

文章编号:1674-2869(2015)10-0001-04

# 12 种饮用干花中微量元素主成分的分析

张 朋,张静佳,杨玉良,祁正兴\*,孙立卿  
青海民族大学化学化工学院,青海 西宁 810007

**摘 要:**为了评价杭白菊等 12 种饮用干花的营养价值,在已有的实验数据基础上,结合主成分分析方法,采用 SPSS13.0 软件,计算了 12 种饮用干花中的微量元素之间的相关矩阵、载荷系数矩阵及各主成分的得分与综合得分.结果表明各主成分其主要作用的元素分别是:第一主成分是 Cr、Cu 和 Mg;第二主成分是 As、Zn 和 Fe;第三主成分是 Cd、Ca 和 Mg;第四主成分是 Pb、As 和 Cr.根据综合得分可知桃花、野菊花、黄山贡菊的营养价值最高,为选择营养价值更高的饮用干花给出了科学的理论依据.

**关键词:**饮用干花;微量元素;主成分分析

**中图分类号:** O61

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1674-2869.2015.10.001

## 0 引 言

饮用干花在我国历史悠久,饮用花茶已经成为国人的一种生活习惯.饮用干花中本身除含有许多有益的氨基酸、维生素、植物化学物外,还含有丰富的多种微量元素,饮用干花用于泡茶、入药、佐餐,对治病、养颜、保健、抗衰老都有很好的功效,对增强人类体质和保障人类健康至关重要.微量元素摄入过量、缺乏或不平衡都会不同程度地引起人体生理的异常或引发身体机能的病变<sup>[1-4]</sup>.由于饮用干花类似中草药,其药效和营养价值与其微量元素的含量关系密切.本研究对杭白菊等 12 种饮用干花中的微量元素含量进行了主成分分析,对其营养价值的评价给出了科学系统的理论依据.

## 1 主成分分析原理

主成分分析(Principle Component Analysis)是多元统计分析中的一种重要的数据挖掘技术,它将原始数据进行标准化处理,在不丢失主要数据信息的前提下,把众多复杂的数据变量归结为少数的几个能表征原始数据信息且彼此不相关的变量.

## 2 12 种饮用干花中微量元素的主成分分析

### 2.1 原始数据

本研究中 12 种饮用干花中的钙、镁、铁、锰、

锌、铜、铬、镉、砷、铅等 10 种微量元素的含量数据全部来自于文献[5],详见表 1.

### 2.2 原始数据的标准化处理

采用 SPSS13.0 对上述原始数据进行标准化处理,以消除原始数据之间量纲不同的影响,从而使进行标准化后的数据更科学、更具可比性,并且服从正态分布规律(标准化后的数据略).

### 2.3 结果与分析

采用 SPSS13.0 统计学软件计算了 12 种饮用干花中微量元素含量数据进行主成分分析得到主因子的特征值和方差贡献率(见表 2)、主成分载荷系数矩阵(见表 3),由表 2 主因子的特征值和方差贡献率可知,前四个因子的方差累计贡献率为 84.880%,大于 80%,因此可以筛选出前四个因子来进行主成分分析;然后根据载荷矩阵得到主成分得分与综合得分的关系式;最后以各因子的贡献率作为权重进行线性加权求和计算得到各因子得分及排名.其中,主成分载荷系数矩阵反映了各个初始变量与主成分的相关程度,也反映了各个变量的重要程度及作用;综合得分反映了各饮用干花的质量优劣,可以较为准确的评价各种饮用干花的营养价值.

根据上述主成分载荷系数矩阵得到各主成分得分及综合得分的计算式从计算而得到各饮用干花的各因子得分,再根据得分情况进行排名见表 4.

各主成分得分计算关系式:

$$F_1 = 0.325Z_{Ca} + 0.402Z_{Mg} + 0.280Z_{Fe} + 0.322Z_{Mn} + 0.372Z_{Zn} +$$

收稿日期:2015-06-02

作者简介:张 朋(1990-),男,河北保定人,硕士研究生.研究方向:有机化学.\* 通信联系人

表 1 12 种饮用干花中微量元素的含量

Table1 Content of trace elements in 12 kinds of drinking dried flowers

/(μg/g)

序号	名称	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	Cr	Cd	As	Pb
1	杭白菊	5487.02	2419.75	201.68	36.23	28.97	17.14	0.74	0.15	1.87	2.32
2	黄山贡菊	6865.62	2330.34	207.67	98.17	32.09	16.46	0.31	0.18	1.26	4.11
3	野菊花	8564.18	3307.43	249.62	99.01	34.62	21.1	0.51	0.27	0.52	1.27
4	七彩菊	2398.54	2146.52	183.92	11.43	21.34	10.43	0.75	0.07	1.04	3.47
5	金盏花	2887.47	2578.83	194.57	29.75	48.51	15.63	0.37	0.14	1.11	4.81
6	洋甘菊	3103.52	1626.94	389.36	35.35	41.05	13.14	0.71	0.27	1.54	3.28
7	红玫瑰花	4861.84	2201.63	248.74	34.51	40.99	24.58	0.16	0.56	0.63	0.16
8	粉玫瑰花	3099.67	2158.06	181.95	44.66	26.98	10.67	0.77	0.05	1.96	0.57
9	紫玫瑰花	2987.93	2076.41	166.26	39.54	19.76	16.37	1.01	0.35	1.27	0.21
10	月季花	6128.54	2018.99	171.32	30.95	28.54	18.11	0.97	0.29	0.99	3.94
11	桃花	2930.04	2800.1	499.04	32.86	74.54	22.63	0.36	0.17	2.24	4.03
12	苹果花	2135.24	2031.54	185.19	13.21	19.26	20.04	0.74	0.27	0.95	1.07

$$0.420Z_{Ca}-0.431Z_{Cr}+0.191Z_{Cd}-0.094Z_{As}+0.068Z_{Pb}$$

$$F_2=-0.312Z_{Ca}-0.010Z_{Mg}+0.416Z_{Fe}-0.201Z_{Mn}+0.422Z_{Zn}-0.139Z_{Cu}-0.092Z_{Cr}-0.339Z_{Cd}+0.482Z_{As}+0.396Z_{Pb}$$

$$F_3=0.366Z_{Ca}+0.301Z_{Mg}-0.221Z_{Fe}+0.453Z_{Mn}-0.142Z_{Zn}-0.363Z_{Cu}+0.069Z_{Cr}-0.529Z_{Cd}+0.071Z_{As}+0.281Z_{Pb}$$

$$F_4=0.041Z_{Ca}+0.185Z_{Mg}+0.206Z_{Fe}+0.227Z_{Mn}-$$

$$0.033Z_{Zn}+0.066Z_{Cr}-0.049Z_{Cd}+0.547Z_{As}-0.691Z_{Pb}$$

综合得分计算关系式:

表 3 主成分载荷系数矩阵

Table 3 Principal component load factor matrix

名称	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$
Zscore(Ca)	0.325	-0.312	0.366	0.041
Zscore(Mg)	0.402	-0.010	0.301	0.185
Zscore(Fe)	0.280	0.416	-0.221	0.206
Zscore(Mn)	0.322	-0.201	0.453	0.227
Zscore(Zn)	0.372	0.422	-0.142	-0.033
Zscore(Cu)	0.420	-0.139	-0.363	0.066
Zscore(Cr)	-0.431	-0.092	0.069	0.294
Zscore(Cd)	0.191	-0.339	-0.529	-0.049
Zscore(As)	-0.094	0.482	0.071	0.547
Zscore(Pb)	0.068	0.369	0.281	-0.691

表 2 特征值和方差贡献率

Table 2 Characteristic value and variance contribution rate of the principal divisor

主因子数	特征值	各因子方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1	3.261	32.611	32.611
2	2.666	26.658	59.269
3	1.738	17.380	76.650
4	0.823	8.230	84.880

表 4 主成分得分和排名

Table 4 Principal comprehensive scores and rankings

名称	$F_1$	名次	$F_2$	名次	$F_3$	名次	$F_4$	名次	$F$	名次
杭白菊	-0.441	6	0.213	6	0.736	4	0.775	3	0.105	5
黄山贡菊	1.339	4	-0.401	7	1.921	1	-0.575	9	0.616	3
野菊花	2.962	1	-2.170	12	1.561	2	0.606	5	0.708	2
七彩菊	-2.267	12	0.480	5	0.641	5	-1.010	6	-0.583	10
金盏花	0.341	5	1.199	3	0.492	6	-1.532	12	0.390	4
洋甘菊	-0.824	8	1.445	2	-0.797	9	-0.127	7	-0.032	6
红玫瑰花	1.988	3	-1.793	11	-2.615	12	-0.344	8	-0.313	8
粉玫瑰花	-1.950	11	0.526	4	0.970	3	1.423	1	-0.210	7
紫玫瑰花	-1.641	10	-1.382	10	-0.794	8	1.000	2	-0.959	12
月季花	-0.727	7	-0.876	8	0.150	7	-0.838	10	-0.514	9
桃花	2.540	2	3.691	1	-0.864	10	0.722	4	1.722	1
苹果花	-1.32	9	-0.931	9	-1.402	11	-0.101	11	-0.931	11

$$F=0.326\ 1F_1+0.266\ 58F_2+0.173\ 8F_3+0.082\ 3F_4$$

根据表 4 中综合得分  $F$  值的大小排名可知,桃花、野菊花、黄山贡菊的综合得分分别是 1.722、0.708 和 0.616,排名前三,所以桃花、野菊花、黄山贡菊的营养价值最高;其次是金盏菊、杭白菊、洋甘菊和粉玫瑰花;营养价值最差的是红玫瑰花、月季花、七彩菊、苹果花、紫玫瑰花。因此,我们在选择饮用干花时就可以选则营养价值更高的桃花、野菊花和黄山贡菊。

### 3 讨 论

采用主成分分析降维的思想,该指数转化为少数几个综合性指标,以排除原始数据共存中相互重叠的信息,而获得最主要的信息<sup>[6]</sup>。根据主成分的载荷系数矩阵和各主成分的计算式可以得到如下结论:

第一主成分中起主要作用的元素是 Cr、Cu 和 Mg,其中 Cr 的贡献最大且为负相关;第二主成分中起主要作用的元素是 As、Zn 和 Fe,其中 As 的贡献最大且为正相关;第三主成分中起主要作用的元素是 Cd、Ca 和 Mg,其中 Cd 的贡献最大且为负相关;第四主成分中起主要作用的是 Pb、As 和 Cr,其中 Pb 贡献最大且为负相关。

Ca 和 Mg 为人体所需的宏量元素,其中 Ca 为人体骨骼,牙齿形成时的必须的主要成分,且存在于人体血液,是多种生理机能的参与者;Mg 能辅助钙和钾的吸收,具有预防心脏病、糖尿病和降低胆固醇的作用,很多重大疾病的发生都与微量元素镁的缺乏有密切关系<sup>[7]</sup>。

Fe、Zn、Cu、Cr 为人体必需微量元素,其中 Cu 元素是合成血红蛋白和多种蛋白酶的酶素,可以提高机体防御功能<sup>[8]</sup>;Fe 元素参与人体造血,是组成血红蛋白,肌红蛋白和含铁酶的必要元素<sup>[9]</sup>;Zn 元素是多种蛋白质、核酸和代谢酶的组成元素,能调节新陈代谢,增强机体免疫功能、促进组织修复、加速伤口愈合,另外锌元素在调控基因的表达中也起着重要的作用<sup>[9-10]</sup>,通常把头发中锌的含量作为检查人体健康状况的重要指标<sup>[11]</sup>;Cr 元素多存在于皮肤,参与糖脂肪的代谢过程和降低血液中的胆固醇含量,防止动脉硬化<sup>[10,12]</sup>。

As、Cd、Pb 三种元素都是对人体有害的重金属元素。As 可致癌,无机砷及其化合物有剧毒;Cd 摄入过量会造成儿童的智力低下和引发心脏病;Pb 摄入过量的铅会造成铅中毒,对人体神经系统和血液系统造成危害<sup>[13]</sup>。

但是,依据《药用植物及制剂进出口绿色行业标准》(标准号 WM/T2-2004)中执行的行的标准:Cu(千克质量含量,下同)≤20.0 mg/kg,Cd(千克质量含量,下同)≤0.30 mg/kg,As(千克质量含量)≤2.00 mg/kg,Pb(千克质量含量)≤5.00 mg/kg,以及我国农业部制《茶叶中铬、镉、汞、砷及氟化物限量》(标准号 NY659-2003)中对铬含量指标 Cr(千克质量含量)≤5.00 mg/kg 可见,上述 12 种饮用干花中野菊花、红玫瑰花、桃花和苹果花的铜含量超标,红玫瑰花和紫玫瑰花的镉含量超标,桃花的砷元素含量超标,这些可能是与花茶产地的水源和土壤等条件有关。

综上所述,以主成分分析的方法去研究判别这 12 种饮用干花的营养价值具有一定的科学意义,有助于我们选择营养价值更高的饮用干花。

### 致 谢

感谢青海民族大学化学化工学院提供的研究平台!

### 参考文献:

- [1] 陈慧,陈芳. 食用花卉的利用概况及发展趋势[J]. 中国食品学报,2001,1(1):61-63.  
CHEN Hui,CHEN Fang. The utilization and development trend of the edible flowers [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology,2001,1(1): 61-63. (in Chinese)
- [2] 孙庆媛,李俊伟,王兰凤. 几种可食用花朵中的无机元素测定[J]. 国土与自然资源研究,2007(2):94-95.  
SUN Qing-yuan,LI Jun-wei,WANG Lan-feng. The quantity determination of several kinds of inorganic elements in some eatable flowers [J]. Territory & Natural Resources Study,2007 (2):94-95. (in Chinese)
- [3] 蒋彩云,余芳,韩文娟,等. 花茶抗氧化性评价的新方法[J]. 河北师范大学学报:自然科学版,2014,38(3): 278-281.  
JIANG Cai-yun,YU Fang,HAN Wen-juan,et al. A new evaluation method for aAntioxidant capacity of scented tea[J]. Journal of Hebei Normal University: Natural Science Edition,2014,38(3): 278-281. (in Chinese)
- [4] 秦俊法,陈磐华. 中国的中药微量元素研究 I. 微量元素:一切中药的基本成分[J]. 广东微量元素科学,2010,17(11):1-18.  
QIN Jun-fa,CHEN Pan-hua. The research of trace elements of Chinese medicine in China I .trace elanent;the basic ingredients of all Chinese medicine[J]. Guang-

- dong Trace Elements Science, 2010, 17(11): 1-18. (in Chinese)
- [5] 张莉, 崔英, 吴大付. 12 种饮用干花中的微量元素测定与研究[J]. 资源开发与市场, 2013, 29(4): 343-344, 389. ZHANG Li, CUI Ying, WU Da-fu. Determination and study on trace elements in 12 kinds of drinking dried flowers [J]. Resource Development & Market, 2013, 29(4): 343-344, 389. (in Chinese)
- [6] 多本加. 四种补益药中微量元素含量的主成分分析[J]. 武汉工程大学学报, 2015, 37(7): 30-33. DUO Ben-jia. Principal components analysis of trace element contents in astragali radix, angelicae sinensis radix, lycii fructus and eucommiae cortex[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2015, 37(7): 30-33. (in Chinese)
- [7] 孙立卿, 周长会, 吴启勋. 11 种中草药中微量元素的主成分分析研究[J]. 洛阳师范学院学报, 2014, 33(2): 48-50. SUN Li-qing, ZHOU Chang-hui, WU Qi-xun. The principal component analysis on the trace elements in eleven Chinese herbal medicines [J]. Journal of Luoyang Normal University, 2014, 33(2): 48-50. (in Chinese)
- [8] 徐常龙, 陈义凡, 曹世全, 等. 论人体必需微量元素与人类保健[J]. 高等函授学报: 自然科学版, 2006, 20(2): 7-10. XU Chang-long, CHEN Yi-fan, CAO Shi-quan, et al. The theory of essential trace elements and human health[J]. Journal of Higher Correspondence Education: Natural Sciences, 2006, 20(2): 7-10. (in Chinese)
- [9] 濮玲, 李海朝, 濮御, 等. 十二种常用中草药中微量元素的成分分析[J]. 广西师范大学学报: 自然科学版, 2014, 32(4): 96-100. PU Ling, LI Hai-chao, Pu Yu, et al. Principal component analysis of trace elements in 12 commonly used Chinese herbal medicines[J]. Journal of Guangxi Normal University: Natural Science Edition, 2014, 32(4): 96-100. (in Chinese)
- [10] 刘晓惠, 刘小翠, 吉守祥. 11 种中草药微量元素的主成分分析[J]. 海南师范大学学报: 自然科学版, 2015, 28(1): 49-51. LIU Xiao-hui, LIU Xiao-cui, JI Shou-xiang. The principal component analysis on the trace elements in eleven Chinese herbal medicines [J]. Journal of Hainan Normal University: Natural Science, 2015, 28(1): 49-51. (in Chinese)
- [11] 徐春放, 贺志丽. 浊点萃取分光光度法测头发中锌的含量[J]. 武汉工程大学学报, 2013, 35(10): 17-22. XU Chun-fang, HE Zhi-li. Measuring content of zinc in hair by cloud point extraction spectrophotometry [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2013, 35(10): 17-22. (in Chinese)
- [12] 黄作明, 黄珣. 微量元素与人体健康[J]. 微量元素与健康研究, 2010, 27(6): 58-62. HUANG Zuo-ming, HUANG Xun. Trace elements and Human health [J]. Studies of Trace Elements and Health, 2010, 27(6): 58-62. (in Chinese)
- [13] 李玉珍. 有害元素与人体健康[J]. 生命科学仪器, 2004, 2(6): 10-19. LI Yu-zhen. Harmful element and Human health [J]. Life Science Instruments, 2004, 2(6): 10-19. (in Chinese)

## Principal component analysis of trace elements in 12 kinds of drinking dried flowers

ZHANG Peng, ZHANG Jing-jia, YANG Yu-liang, QI Zheng-xing, SUN Li-qing

School of Chemistry and Chemical Engineering, Qinghai University for Nationalities, Qinghai 810007, China

**Abstract:** To evaluate the nutritional value of Dendranthema morifolium and other 11 kinds of dried flowers, the principal component analysis method was used to calculate the correlation matrix, load factor matrix, each principal component score and the comprehensive scores of trace elements in the flowers by using software SPSS13.0 based on the existing experimental data. Results showed that the first main principal components are Cr, Cu and Mg; the second main components are As, Zn and Fe; the third main components are Cd, Ca and Mg, and the forth main components are Pb, AS, Cr. According to the comprehensive scores, peach blossom, chrysanthemum indicum and Huangshan Gongju have highest nutritional value, which provided scientific evidence for choosing more nutritious drinking dry flower.

**Key words:** drinking dried flower; trace element; principal component analysis

本文编辑: 张 瑞

文章编号:1674-2869(2015)10-0005-05

# 电解锰阳极泥的利用研究进展

黄良取<sup>1</sup>,黄升谋<sup>1\*</sup>,唐疆蜀<sup>2</sup>,张宏波<sup>3</sup>,杨 欢<sup>3</sup>

1.湖北文理学院化学工程与食品科学学院,湖北 襄阳 441053;2.荆门市环境科学研究院,  
湖北 荆门 448000;3.武汉工程大学化学与环境工程学院,湖北 武汉 430074

**摘 要:**在电解金属锰的生产过程中不可避免的会产生高含锰率的阳极泥,因其组成和结构较为复杂,大部分阳极泥被作为危险废物堆存或廉价销售,并未得到合理利用.结合近年的文献资料,分析了阳极泥的元素组成、含量及其赋存形态,指出了以还原法、活化法及物理法实现阳极泥资源化存在二次环境污染、电池材料电化学性能差等缺点,明确了以深入分析阳极泥中杂质元素的净化机理为研究方向,提出了以阳极泥为锰源制备锰酸锂电池材料是实现阳极泥资源化的有效途径.

**关键词:**电解锰;阳极泥;利用;进展

**中图分类号:**X705

**文献标识码:**A

**doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2015.09.002

## 0 引 言

随着我国钢铁工业生产和锰系产品出口的增加,尤其是电解锰产品的大幅增长,锰矿石的消费量也进一步增加,加速了国内有限的矿石消耗<sup>[1-2]</sup>,截止2013年底,电解锰产能已达到了188万吨/年<sup>[3]</sup>,而在电解金属锰的生产过程中,不可避免地要在电解槽的阳极区产生大量高含锰率的阳极泥,而每生产1吨电解锰会产生高含锰率的阳极泥为0.05~0.08吨<sup>[4]</sup>,由此推断,我国电解锰行业每年产生阳极泥10万吨以上,累积量已达到92万吨以上.这些阳极泥因其组成复杂,难以加以利用,一般作为危险废物堆存、炼钢添加剂或廉价出售,并未得到较好的开发和综合利用,不仅资源浪费,而且处理不当易造成相当程度的环境污染.

当前,随着锰矿资源日益枯竭,电解锰产品需求增加与锰矿资源枯竭的矛盾日益明显,在此形势下,回收再利用电解锰阳极泥对于减少锰矿资源消耗、降低堆存的环境风险有着积极意义.

## 1 产生机理及基本特性分析

在电解锰的生产过程中,阳极区 $Mn^{2+}$ 不可避免的被氧化并形成 $Mn^{4+}$ 的水合氧化物(水羟锰矿),同时阳极板中的铅锡合金亦被氧化并与锰氧水合物一起沉淀,形成典型的胶状构造<sup>[5]</sup>.电解锰阳极泥为黑色大小不一的固体物质,其中分散着白

色结晶物 $(NH_4)_2SO_4$ ,阳极泥主要含有Mn、Pb、Sn、Ca、Fe、Mg、Se等元素<sup>[5-7]</sup>,其平均质量分数见表1,其中Mn平均质量分数大于45%,Pb平均质量分数约为3.7%.

表1 电解锰阳极泥中主要元素平均质量分数

Table 1 The average content of major elements in electrolytic manganese anode slime

元素名称	Mn	Pb	Sn	Fe	Ca	Mg	Se
质量分数/%	45	3.73	0.25	4.31	4.11	5.66	0.20

注:元素平均质量分数以及种类与电解锰生产厂家有关

阳极泥主要成份为 $MnO_2$ ,其基本结构是由1个锰原子核与6个氧原子配位形成的六方密堆积结构,这种结构形成的复杂网络可容纳不同的阳离子<sup>[8]</sup>.陶长元<sup>[6]</sup>等研究表明阳极泥主要为非化学计量的化合物 $MnO_x(1 < x < 2)$ ,其晶格缺陷较大,一些杂质如Pb、Sn可分布其中,使阳极泥呈失活的 $MnO_2$ <sup>[6]</sup>.对原样阳极泥的微区进行分析,如图1所示,阳极泥以“封闭相”的形式存在于胶状体系中<sup>[9]</sup>.

## 2 综合利用的现状

通过分析国内外关于电解锰阳极泥的研究现状,各资源利用现状的主题思路分三类:第一类采用还原方法,以木炭、石墨等为还原剂在高温焙烧反应或以生物质、亚硫酸、硫铁矿、 $SO_2$ 等为还原

收稿日期:2015-08-17

作者简介:黄良取(1988-),男,湖北咸宁人,硕士.研究方向:清洁生产技术.\*通信联系人

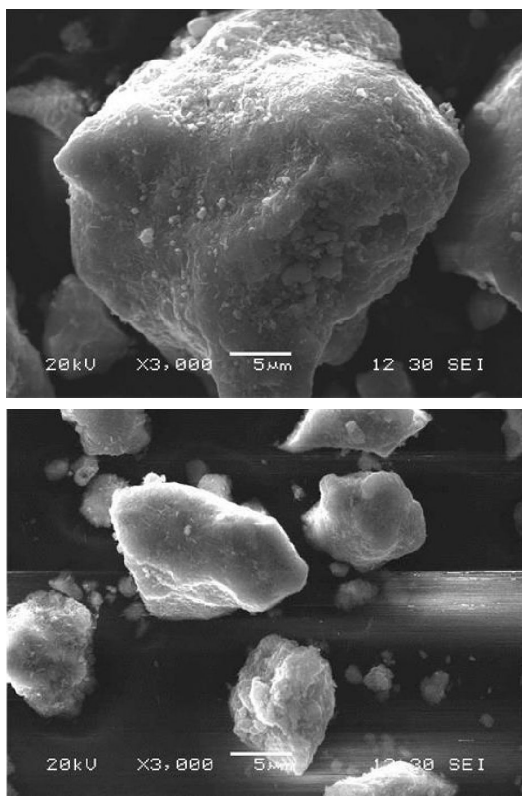


图 1 阳极泥的微区分析

Fig.1 The micro area analysis of anode slime

剂,使阳极泥中的  $\text{Mn}^{4+}$  转变为  $\text{Mn}^{2+}$  进入溶液 ( $\text{MnSO}_4$ ),而铅等杂质则以固相存在,固液分离即可实现锰的综合利用;第二类采用活化阳极泥方法,通过酸浸、焙烧酸浸、碱氧化等方式脱除阳极泥中的杂质元素.酸浸活化阳极泥,或者通过焙烧,改变阳极泥中  $\text{MnO}_2$  的晶型,再通过  $\text{H}^+$  或还原剂促使  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  (或高锰酸盐)重新生成  $\text{MnO}_2$ ,然后获得活性  $\text{MnO}_2$ ;第三类物理法,将阳极泥进行预处理,然后制成浆料,用以作为金属掺杂二氧化锰粉体,用作电池原材料.

## 2.1 硫酸锰制备

利用阳极泥中的锰(Ⅳ)具有氧化性的特点,采用低价硫化物、有机物等作为还原剂,在硫酸体系下,将阳极泥中的锰还原得到锰(Ⅱ)溶液,再通过固液分离,得到相应的产物,滤液经过净化即为硫酸锰溶液,滤渣即为铅精矿(含铅残渣).

**2.1.1 以含硫化合物为还原剂的研究** 还原阳极泥中的锰时,常用的含硫化合物的还原剂为  $\text{FeS}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_3$  等.沈慧庭<sup>[10]</sup>以含硫质量分数  $\geq 45\%$  的硫铁矿为还原剂,在硫酸体系中进行反应,反应完成后进行过滤,向滤液中加入氨水和硫化铵,去除多余重金属杂质,得到符合电解锰生产质量要求的硫酸锰溶液.所得滤渣为含铅质量分数达 55%

以上的合格铅精矿,回收率达到 90%.黎应芬<sup>[11]</sup>以  $\text{FeS}_2$ - $\text{H}_2\text{SO}_4$ - $\text{H}_2\text{O}$  体系对电解锰阳极泥进行了进一步浸出试验,考查了搅拌速率,用矿量,硫酸浓度,黄铁矿浓度、反应温度、颗粒粒径等影响因子对锰浸出量的影响,结果表明,当体系中阳极泥:黄铁矿:硫酸的质量比为 1:0.75:0.92 时,控制反应温度 85  $^\circ\text{C}$ ,搅拌速度为 500 r/min,颗粒粒径小于 0.15 mm 等工艺条件,锰的回收率可达 93%,但此法未对含铅残渣作分析.

刘建本等<sup>[4]</sup>采用电解锌过程中的含  $\text{SO}_2$  尾气为原料,将尾气通入电解锰阳极泥泥浆中,利用  $\text{SO}_2$  的还原性,将阳极泥中的  $\text{MnO}_2$  还原成  $\text{Mn}^{2+}$ ,然后用氨水调节浸出液的 pH 至 5.5 左右,使阳极泥中的部分杂质形成氢氧化物并加以去除,最后采用 SDD 进行第二次净化,结晶即得  $\text{MnSO}_4$ ,当通入尾气流量为 16 L/min 时,  $\text{Mn}^{2+}$  转化率达 90% 以上.高从卷<sup>[12]</sup>等把经过干燥和磨矿后的阳极渣在硫酸性体系中混合均匀,通入  $\text{SO}_2$  (体积分数 99%) 气体,利用蒸汽控制反应温度为 70~90  $^\circ\text{C}$ ,反应 5~8 h,锰浸出可达 96% 以上,过滤得到含铅质量分数为 15%~32% 的铅渣.彭中维<sup>[13]</sup>等在硫酸和亚硫酸钠体系中,控制反应条件为质量比  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ : $\text{MnO}_2$ =1.4:1,液固比 3:1(g/mL,下同),反应时间 0.5 h,此时锰的浸出率可达 92.6%.

采用无机硫化物作为还原体系,探索了处置锰阳极泥的途径,且锰回收率较高(90%以上),但此还原体系在酸性条件下容易产生  $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{SO}_2$  等气体,同时会出现酸性废水、废渣等二次污染问题.

**2.1.2 以有机物为还原剂的研究** 将有机物在硫酸体系中进行水解,使大分子(多糖类)有机物水解为小分子(单糖类)有机物,利用其还原性对阳极泥中的锰进行浸出.刘贵阳<sup>[14]</sup>选用玉米秆、木薯淀粉、甘蔗渣和废糖蜜 4 种有机还原剂对某电解锰阳极泥进行了还原浸出试验,结果表明,在获得相同锰浸出率条件下,还原剂用量排序如下:淀粉<玉米秆<废糖蜜<甘蔗渣(水解).以玉米秆为还原剂,阳极泥锰浸出率可达 97.01%,浸出渣经浸出除杂处理,铅品位可提高到 60.79%,达到三级铅精矿要求,铅回收率为 82.52%.沈慧庭<sup>[15]</sup>亦采用玉米秆为还原剂,锰的浸出率为 96.33%,碳酸锰产品中含锰质量分数为 44%,符合工业级碳酸锰产品质量要求;铅精矿产率为 9.45%,回收率为 90.63%,铅品位为 58.60%,达到四级品要求.

牛莎莎<sup>[16]</sup>等则采用桔子皮-硫酸体系还原浸出锰阳极泥,探索了桔子皮的用量、时间、温度以

及硫酸加入量等工艺条件对锰浸出率的影响,其实验结果显示,当浸出温度为 80 ℃,物料比 1:5,固液比 1:4,浸出时间 2 h,锰的浸出率可达 96%,而铅的浸出率仅为 0.2%。黄齐茂<sup>[17]</sup>等采用木屑为还原剂,锰浸出率达 99.5%以上,回收率达 98%。采用有机物作为还原体系,其原材料丰富,成本较低,工艺技术简单,锰浸出率较高,但产生的废水水质未做分析,同时残渣未做处理,处置不当存在环境风险。

## 2.2 二氧化锰的制备

根据阳极泥的基本特性,制备二氧化锰的方法主要有以下三种:

**a. 焙烧酸浸法:**将阳极泥中的  $\text{MnO}_2$  通过转型焙烧,使其转变为  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ,然后在酸性体系中使  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  发生歧化反应而转变为  $\text{Mn}^{2+}$  以及  $\text{MnO}_2$ ,最后将溶液中游离的  $\text{Mn}^{2+}$  氧化成  $\text{MnO}_2$ 。何溯结<sup>[18]</sup>等以硫酸体系中,对阳极泥进行浸出试验,结果表明,控制酸矿质量比 0.54:1、固液比 1:3,然后添加阳极泥质量 25% 的  $\text{NaClO}_3$ ,在 90 ℃ 下浸出 6 h,锰的转化率可达 89.44%,此法获得的  $\text{MnO}_2$  产品的放电性能极大增强,在 3.9  $\Omega$  连续放电 0.9 V 的时间可以达到 450 min,符智荣<sup>[19]</sup>分两次加入  $\text{NaClO}_3$  (理论值的 1.2 倍) 进行氧化,可以获得较高产率及视比重 (1.54  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) 的  $\text{MnO}_2$ ,其转化率 84.6%。尚伟<sup>[20]</sup>等先采用酸浸,然后将阳极泥置于 350 ℃ 下焙烧 1 h,使得阳极泥中  $\text{MnO}_2$  质量分数提高至 79%,得到的  $\text{MnO}_2$  电化学性能较好,可用于锌锰电池正极材料。

**b. 焙烧氧化法:**将  $\text{MnO}_2$ 、 $\text{MnO}$  和碱在高温下进行焙烧,使阳极泥中的锰以锰酸盐的形式进入溶液,杂质则以固态形式存在,从而达到分离锰与杂质的目的。申永强<sup>[21]</sup>等将阳极泥与  $\text{NaOH}$  以质量比为 1:1~1:1.05 进行混合,将混合物在 450 ℃ 至 470 ℃ 煅烧 3 h,此时  $\text{MnO}_2$  转变为  $\text{Na}_2\text{MnO}_4$ ,过滤,调节  $\text{pH}=10$ ,向滤液中加入适当比例的还原剂(甲醛),当溶液中出现微量的晶种时,继续加热并搅拌,得到初级化学二氧化锰,其质量分数为 92%,水质量分数小于 3%,杂质质量分数小于 0.3%,产品产率 75%,视比重为 1.61  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

**c. 活化法:**采用物理或化学的方法,在不改变阳极泥的晶型条件下,实现对阳极泥的利用。卢周广<sup>[22]</sup>等将电解锰阳极渣进行筛选、漂洗、烘干等预处理工序后,与水、钢球、添加剂混合,球磨,制得含锰复合浆料,用压滤机过滤,取滤渣,烘干,制得用作电极材料的金属掺杂的二氧化锰粉体,其具

有较好的电化学活性,可表现出双层电容特性。齐牧<sup>[23]</sup>等向浸出罐内加入工业水,再投入稀盐酸溶液和平均粒径为 130~160  $\mu\text{m}$  的电解锰阳极泥颗粒混合搅拌,利用蒸汽加热,进行浸出反应;用氨水调溶液  $\text{pH}$  值,压滤,烘干,得含活性二氧化锰含量为 87%~93% 的沉淀物。陶长元<sup>[24]</sup>等以干燥阳极泥质量: $\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液 (2 mol/L) 体积 = 1 g:5~10 mL 的比例与 2 mol/L  $\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液充分混合,过滤,滤渣于 105 ℃ 下烘干,最后以干燥阳极泥:离子液 = 75 g:1~10 mL 的比例加入离子液体并混合均匀,从而制备出含活性二氧化锰的电池原料,其视比重达 1.73~2.04  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,活性二氧化锰含量在 78.8% 以上,电池性能测试显示其连续放电时间可达 330 min。段宁<sup>[25]</sup>等采用碳粉、碳渣、石墨等为还原剂,在 800~1 600 ℃ 下将  $\text{MnO}_2$  还原为  $\text{MnO}$ ,最后在氮气、还原气氛下冷却制得  $\text{MnO}$  混合产物,产物回用至电解金属锰原料。

利用高温焙烧方式,阳极泥变化过程  $\text{MnO}_2 \rightarrow \text{Mn}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{MnO}$ ,可获得电化学性能优异的电池原料,且  $\text{MnO}_2$  产率 90% 以上,操作简单,可适用工业化,但能耗较大,且缺乏更深层次的机理分析。采用物理法虽对阳极泥初步实现了回收再利用,但因阳极泥的产生特性,简单的物理法难以保证电池原料制备电池的稳定性。

## 2.3 锰酸锂的制备

利用阳极泥中锰含量较高的特点,通过对阳极泥进行预处理,制备合成锰酸锂电池材料用前驱体,然后按照配比加入锂源,合成锰酸锂材料。严浩<sup>[26]</sup>采用响应曲面法综合研究了浸出温度、硫酸用量以及葡萄糖用量等工艺条件对阳极泥中的锰浸出率的影响,并在此基础上采用沉淀法合成羟基锰化物,最后以羟基锰化物配以碳酸锂,合成产品锰酸锂。其结果显示:在 80 ℃ 的硫酸溶液体系中,控制葡萄糖/阳极泥质量比为 0.175:1.00,反应 90 min,然后在  $\text{pH}=8.7$  的氨水中充分搅拌,并在 100 ℃ 下陈化 6 h,最后通入氧气加入双氧水,制得前驱体  $\text{MnOOH}$  ( $\text{Mn}$  质量分数 = 93.22%),配以碳酸锂,在 700 ℃ 焙烧 24 h,制备的锰酸锂首次放电容量为 129.03  $\text{mAh} \cdot \text{g}^{-1}$ 。此法在工艺操作上条件苛刻,工业难度大,为解决工艺操作的简单性,黄良取<sup>[9]</sup>提出洗涤-高温焙烧-浸取的工艺去除阳极泥中的杂质,然后利用净化后的阳极泥为锰源制备锰酸锂。其结果显示,采用 2 mol/L  $\text{NH}_4\text{Ac}$  浸出焙烧于 800 ℃ 的阳极泥,浸出时间 6 h,液固比 8:1,制备出的前驱体  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  质量分数 95% 以上,然后

配以碳酸锂,制备出的锰酸锂的首次充放电容量可达 $100\sim 110\text{ mA}\cdot\text{h/g}$ ,但此法得到的锰酸锂正极材料循环性能较差,需进一步的提高阳极泥中的除铅问题.

## 2.4 硒的回收

阳极泥中含有相当含量的硒,若不处理,不仅造成资源浪费,且无机硒为剧毒物质,处置不当易造成环境污染.栗海峰<sup>[27]</sup>等针对阳极泥中的Se提出了超声波强化回收Se的工艺方法,其研究结果显示,控制阳极泥质量:强碱质量比为 $1:0.10\sim 1.00$ ,液固比为 $1.5:1\sim 10:1$ ,搅拌速度 $100\sim 400\text{ r/min}$ ,反应温度 $40\sim 98\text{ }^\circ\text{C}$ ,超声波功率为 $10.0\sim 100.0(\text{阳极泥})\text{g/kW}$ ,反应时间 $10\sim 60\text{ min}$ 的条件下,浸出液中硒浸出率在95%以上,铅浸出率在1%左右,锰不被浸出.此法采用较简单的工艺解决了硒的回收问题,提高了阳极泥的综合利用价值,但未综合考虑锰与铅的回收.

## 3 展 望

为进一步推进阳极泥的综合利用,降低阳极泥的堆存风险,依据现有的综合处置技术,需重点研究以下三个方面:**a.**优化电解锰生产工艺,减少阳极泥的产生,提高电解锰产品收率;**b.**进一步研究分析阳极泥的成分及结构,重点分析杂质元素在阳极泥中的赋存形态,优化工艺路线,推进阳极泥的净化机理研究;**c.**以阳极泥的基本特性为基础,结合当前新兴能源材料的研究方向,探究最佳的阳极泥利用途径,以同时解决新能源材料原料枯竭和阳极泥堆存的问题.当前锂离子电池正极材料的发展以高压密度钴酸锂、尖晶石型锰酸锂、磷酸铁锂以及三元材料为代表,其中以研究开发的 $5\text{ V}$ 高压尖晶石型锰酸锂为未来第三代电池材料的发展方向<sup>[28]</sup>,以净化后的阳极泥为锰源,立足阳极泥本身的晶体特性,制备改性锰酸锂电池正极材料,不仅解决阳极泥的出路问题,而且为电池材料用锰源提供了新方向.张春霞等<sup>[29]</sup>研究表明,Pb改性的锰化物有益于延长第1电子当量放电,同时,牛莎莎等<sup>[30]</sup>研究表明Pb掺杂的锰酸锂电池循环性能有一定的改善.

在推进阳极泥的利用进程中应遵循的原则:**a.**利于实现工业化,综合考虑技术和经济等因素,技术上操作应简单,经济上可行;**b.**实现锰、铅为主的综合利用且尽量避免产生二次污染.

## 致 谢

感谢湖北省化工清洁生产中心、厦门大学环境与生态学院卢静静、武汉工程大学资源与土木工程学院汪振东对本研究的帮助.

## 参考文献:

- [1] 王运敏. 中国的锰矿资源和电解金属锰的发展[J]. 中国锰业, 2004(3):29-33.  
WANG Yun-min. Resources of Mn-ores and development of EMM [J]. China's Manganese Industry, 2004 (3):29-33. (in Chinese)
- [2] 严旺生. 中国锰矿资源与富锰渣产业的发展[J]. 中国锰业, 2008(1):7-11.  
YAN Wang-sheng. The development Mn resource and rich Mn-slag [J]. China's Manganese Industry, 2008 (1):7-11. (in Chinese)
- [3] 谭柱中. 2013 年中国电解金属锰工业回顾和展望[J]. 中国锰业, 2014(3):1-4.  
TAN Zhu-zhong. Industrial retrospection and prospect of EMM in 2013 [J]. China's Manganese Industry, 2014(3):1-4. (in Chinese)
- [4] 刘建本, 陈上. 用电解锰阳极泥和含 $\text{SO}_2$ 工业尾气制备硫酸锰[J]. 化工环保, 2009(6):538-540.  
LIU Jian-ben, CHENG Shang. Preparation of manganese sulfate using anode slurry from electrolytic manganese production and industrial exhaust gas containing  $\text{SO}_2$  [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2009(6):538-540. (in Chinese)
- [5] 汤集刚, 韩至成. 锰阳极泥的工艺矿物学及杂质的脱除研究[J]. 矿冶, 2005(3):75-78.  
TANG Ji-gang, HAN Zhi-cheng. Investigation on process mineralogy of manganese anode slime and impurity removal[J]. Mining & Metallurgy, 2005(3):75-78. (in Chinese)
- [6] 陶长元, 李东海, 刘作华, 等. 电解锰阳极泥的除杂活化及应用[J]. 电池, 2011(3):121-124.  
TAO Chang-yuan, LI Dong-hai, LIU Zuo-hua, et al. Activation and purification of electrolytic -manganese anode slime and its application[J]. Battery Bimonthly, 2011(3):121-124. (in Chinese)
- [7] 华兵, 毕亚凡, 廖金阳, 等. 电解锰阳极泥特性及除铅初步研究[J]. 环境工程, 2013(S1):457-460.  
HUA Bing, BI Ya-fan, LIAO Jin-yang, et al. Preliminary study on the properties and Pb Removal of electrolytic manganese anode slime[J]. Environmental Engineering, 2013(S1):457-460. (in Chinese)



- [8] 夏熙. 二氧化锰及相关锰氧化物的晶体结构、制备及放电性能(1)[J]. 电池, 2004(6):411-414.  
XIA Xi. Crystal structure, preparation and discharge performance for manganese dioxides and related manganese oxides (1)[J]. Battery Bimonthly, 2004(6): 411-414. (in Chinese)
- [9] 黄良取. 电解锰阳极泥制备锰酸锂电池正极材料的工艺研究[D]. 武汉:武汉工程大学化学与环境工程学院, 2014:83.  
HUANG Liang-qu. Research on preparation of manganese cathode materials for lithium batteries with electrolytic manganese anode slime [D]. Wuhan: School of chemical and Environmental Engineering Wuhan Institute of Technology, 2014:83. (in Chinese)
- [10] 沈慧庭, 黎贵亮, 黄晓燕, 等. 用电解锰阳极泥制备硫酸锰电解液并回收铅的方法: 中国, 103789551A [P]. 2014-05-14.  
SHEN Hui-ting, LI Gui-liang, HUANG Xiao-yan, et al. Preparation of manganese sulfate electrolyte and the method of recovering lead from electrolytic manganese anode slime: CN, 103789551A [P]. 2014-05-14. (in Chinese)
- [11] 黎应芬.  $\text{FeS}_2\text{-H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$  体系浸出锰阳极泥[J]. 广州化工, 2012(14):75-76.  
LI Ying-fen. Manganese anode slimes leaching in the  $\text{FeS}_2\text{-H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$  system[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2012(14):75-76. (in Chinese)
- [12] 高从卷, 向卫东, 黄劲松, 等. 一种从电解锰阳极渣中回收锰、铅的技术: 中国, 102628106A [P]. 2012-08-08.  
GAO Cong-juan, XIANG Wei-dong, HUANG Jin-song, et al. Technology for recovering manganese and lead from electrolytic manganese anode slag: CN, 102628106A [P]. 2012-08-08. (in Chinese)
- [13] 彭中维, 颜文斌, 华骏, 等. 亚硫酸钠湿法还原浸出电解锰阳极泥的研究[J]. 广东化工, 2012(16):13-14.  
PENG Zhong-wei, YAN Hua-bin, YU Jun, et al. A research of wet reduction leaching from electrolytic manganese anode slime by sodium sulfite [J]. Guangdong Chemical Industry, 2012(16):13-14. (in Chinese)
- [14] 刘贵扬, 沈慧庭, 王强. 电解锰阳极泥有机还原浸出回收锰和铅的研究[J]. 矿冶工程, 2014(4):92-98.  
LIU Gui-yang, SHEN Hui-ting, WANG Qiang. Recovery of manganese and lead from manganese electro-winning anode slime by reduction leaching with organic reductants [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2014(4):92-98. (in Chinese)
- [15] 沈慧庭, 黄晓燕, 覃华, 等. 一种从电解锰阳极泥中回收锰和铅的方法: 中国, 101693952A [P]. 2010-04-14.  
SHEN Hui-ting, HUANG Xiao-yan, QIN Hua, et al. Method for recovery of manganese and lead from electrolytic manganese anode slime: CN, 101693952A [P]. 2010-04-14. (in Chinese)
- [16] 牛莎莎, 王志兴, 郭华军, 等. 电解锰阳极渣还原浸出锰[J]. 中国有色金属学报, 2012(9):2662-2666.  
NIU Sha-sha, WANG Zhi-xing, GUO Hua-jun, et al. Reductive leaching of manganese from manganese anode slag [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012(9):2662-2666. (in Chinese)
- [17] 黄齐茂, 王春平, 周红, 等. 锰阳极泥回收制备硫酸锰工艺研究[J]. 有色金属: 冶炼部分, 2010(6):6-8.  
HUANG Qi-mao, WANG Chun-ping, ZHOU Hong, et al. The research on manganese anode slime recycled to produce manganese sulfate[J]. Nonferrous Metals: Extractive Metallurgy, 2010(6):6-8. (in Chinese)
- [18] 何溯结, 韦婷婷, 陈发明, 等. 电解金属锰阳极泥回收制备放电锰粉的研究[J]. 中国锰业, 2012(3):30-32.  
HE Su-jie, WEI Ting-ting, CHEN Fa-ming, et al. A research of discharge manganese powder in anode slime of recovery preparation[J]. China's Manganese Industry, 2012(3):30-32. (in Chinese)
- [19] 符智荣, 申永强, 石爱华, 等. 锰阳极泥焙烧酸浸氧化法制备化学二氧化锰[J]. 吉首大学学报: 自然科学版, 2007(5):107-109.  
FU Zhi-rong, SHEN Yong-qiang, SHI Ai-hua, et al. Manganese anode slime recycled to produce chemical manganese dioxide with calcination-sour soak-oxidation [J]. Journal of Jishou University: Natural Science Edition, 2007(5):107-109. (in Chinese)
- [20] 尚伟, 王旭峰, 温玉清, 等. 用锰电解阳极泥制备电池材料二氧化锰[J]. 湿法冶金, 2015(2):123-125.  
Shang Wei, Wang Xufeng, Wen Yuqing, et al. Preparation of battery material manganese dioxide using electrolytic manganese anode mud [J]. Hydrometallurgy of China, 2015(2):123-125. (in Chinese)
- [21] 申永强, 符智荣, 黄养逢, 等. 电解金属锰阳极泥回收制备化学二氧化锰工艺研究[J]. 中国锰业, 2007(3):14-16.  
SHEN Yong-qiang, FU Zhi-rong, HUANG Yang-feng, et al. Research on manganese anode slime recycle to produce into chemical manganese dioxide[J]. China's Manganese Industry, 2007(3):14-16. (in Chinese)
- [22] 卢周广, 王慧硕. 一种用电解锰阳极渣制备金属掺杂的二氧化锰粉体的方法及应用: 中国, 103334012A [P]. 2013-10-02.  
LU Zhou-guang, WANG Hui-shuo. Method and ap-

- plication of manganese dioxide powder with metal doping preparation by the electrolytic manganese anode slime; CN, 103334012A [P].2013-10-02. (in Chinese)
- [23] 齐牧, 崔传海, 于晓玲, 等. 电解锰阳极泥中二氧化锰的回收提纯方法: 中国, 102876897A[P]. 2013-01-16.
- QI Mu, CUI Chuan-hai, YU Xiao-ling, et al. Recovery and purification method of manganese dioxide in electrolytic manganese anode slime; CN, 102876897A[P].2013-01-16. (in Chinese)
- [24] 陶长元, 杜军, 刘作华, 等. 一种用电解锰阳极泥制备电池原料的方法及其制品: 中国, 101717860A [P]. 2010-06-02.
- TAO Chang-yuan, DU Jun, LIU Zuo-hua, et al. A method for preparing battery raw material and its products by using electrolytic manganese anode slime; CN, 101717860A[P].2010-06-02. (in Chinese)
- [25] 段宁, 于宏兵, 华涛, 等. 一种采用高温还原法将阳极泥中的  $\text{MnO}_2$  还原成  $\text{MnO}$  的方法: 中国, 101264935[P]. 2008-09-17.
- DUAN Ning, YU Hong-bing, HUA Tao, et al. A method for reducing  $\text{MnO}_2$  to  $\text{MnO}$  in anode slime by high temperature reduction method; CN, 101264935 [P]. 2008-09-17. (in Chinese)
- [26] 严浩, 彭文杰, 王志兴, 等. 响应曲面法优化电解锰阳极渣还原浸出工艺 [J]. 中国有色金属学报, 2013(2):528-534.
- YAN Hao, PENG Wen-jie, WANG Zhi-xing, et al. Reductive leaching technology of manganese anode slag optimized by response surface methodology [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013(2): 528-534. (in Chinese)
- [27] 粟海锋, 王雨红, 雷作敏, 等. 一种利用超声强化回收电解锰阳极泥中硒的方法: 中国, 103738928A [P].2014-04-23.
- SU Hai-feng, WANG Yu-hong, LEI Zuo-min, et al. A method for enhancing the recovery of selenium in electrolytic manganese anode slime by ultrasonic; CN, 103738928A[P].2014-04-23. (in Chinese)
- [28] 李卫, 田文怀, 其鲁. 锂离子电池正极材料技术研究进展[J]. 无机盐工业, 2015(6):1-5.
- LI Wei, TIAN Wen-huai, QI Lu. Technology research progress of cathode material of lithium ion battery [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2015(6):1-5. (in Chinese)
- [29] 张春霞, 夏熙. 掺 Pb 改性  $\text{MnO}$  的制备及性能研究 [J]. 电池, 2002(2):63-65.
- ZHANG Chun-xia, Xia Xi. The preparation and performance of  $\text{MnO}$  doped with Pb [J]. Battery Bimonthly, 2002(2):63-65. (in Chinese)
- [30] 牛莎莎, 陈海清, 王志兴, 等. Pb 掺杂对尖晶石型锰酸锂结构和性能的影响 [J]. 湖南有色金属, 2012(5): 43-47.
- NIU Sha-sha, CHEN Hai-qing, WANG Zhi-xing, et al. Study on the Influence of Pb doping on structure and performance of the spinel manganese lithium [J]. Hunan Nonferrous Metals, 2012 (5):43-47. (in Chinese)

## Advances in research and utilization of electrolytic manganese anode slime

**HUANG Liang-qu<sup>1</sup>, HUANG Sheng-mou<sup>1</sup>, TANG Jiang-shu<sup>2</sup>, ZHANG Hong-bo<sup>3</sup>, YANG Huan<sup>3</sup>**

1.School of Chemical Engineering and Food Science, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang 441053, China;

2. Jingmen Research Academy of Environment Sciences, Jingmen 448000, China;

3. School of Chemistry Environmental Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China

**Abstract:** The anode slimes with high rate of manganese were produced in the process of electrolytic manganese metal production. They were piled up as hazardous waste and sold with low price because of their complicated composition and structure, thus they were not reasonably used. Based on the references in recent years, we analyzed the elemental composition, content and speciation of anode slime, and pointed out the disadvantages of resource utilization of anode slim by reduction, activation and physical method, such as secondary environmental pollution and poor electrochemical performance of battery material. Finally, we propose the research direction of the purification mechanism of impurity elements in the anode slime and the efficient way of preparing lithium manganese battery material with anode slime.

**Keywords:** electrolytic manganese; anode slime; utilization; advances

本文编辑: 张 瑞

文章编号:1674-2869(2015)10-0011-05

# 高密度电阻率法在矿山岩溶探测中的应用

田昌贵,元宙昊

武汉工程大学资源与土木工程学院,湖北 武汉 430074

**摘 要:**铜录山矿是一座典型的砂卡岩型多金属岩溶矿山,采用露天与地下联合开采,地下水受岩溶与接触带复合控制.洪水期,临近的小清河河床岩溶反复塌陷、河水沿地下岩溶涌入矿山,长期困扰着井下开采的生产安全.为了彻底消除矿山水患,在河床两岸及露天坑边坡布设了 3 条高密度电阻率法探测剖面,通过计算机将数据经相应畸变点剔除、地形校正、数据平滑等预处理后,最后经过二维反演、处理绘制成视电阻率等值线剖面图,再通过岩、土层电性对比分析出小清河流域岩溶发育特征及地下水主径流通道,同时根据探测成果对河床底部的岩溶进行注浆充填,封堵了河床塌陷区与矿坑之间的主径流通道,达到了较好的堵水效果.

**关键词:**高密度电阻率法;河床;岩溶;探测

**中图分类号:**TD167

**文献标识码:**A

**doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2015.10.003

## 0 引 言

青山河位于湖北省大冶市铜录山矿区西侧,该河中下游段与该矿南露天坑的距离约 500 m,河床流域内的岩溶发育带与矿区相连.矿山的长期疏干排水导致青山河流域岩溶塌陷,洪水期河水倒灌流入矿坑.矿山曾多次采用堤坝加固、回填封堵塌陷区等方法治理,但收效甚微.地下水长期对河床底部冲刷和掏蚀,导致每逢汛期河床便再次复活塌陷,河水和大冶湖水通过复活的塌陷、岩溶裂隙流入矿坑,严重威胁矿山安全生产.为了彻底解决矿山水患问题,采用高密度电阻率法探测了解河床底部的岩溶发育特征及矿区的地下水主径流通道,并根据探测成果对河床底部岩溶进行了注浆加固试验,有效地封堵了小清河河水及矿区地下水流入矿坑的主径流通道,消除了河床岩溶塌陷复活、洪水倒灌对矿山安全生产的威胁.

## 1 高密度电阻率法的基本原理及特征

### 1.1 高密度电阻率法的基本原理

20 世纪 70 年代末期英国学者 Johansson 提出了高密度电阻率法的最初模式(电测深偏置系统)<sup>[1]</sup>,80 年代中期日本地质计测株式会社借助电

极转换板转换电极排列方式实现了野外高密度电阻率法的数据采集,80 年代后期我国原地质矿产部开始了高密度电阻率法及其应用技术研究<sup>[2]</sup>.高密度电阻率法的基本原理与常规直流电阻率法相同,以探测目标体与周围物质导电性差异为基础,在人工电流场的作用下,通过观察和分析视电阻率的变化规律来分析地质问题<sup>[3]</sup>.高密度电阻率法可以在探测断面上同时布置多个电极,通过电极转换装置控制电极的不同排列组合(如  $\alpha$ 、 $\beta$ 、偶极、施伦贝谢和温纳-施伦贝谢等<sup>[4]</sup>)可以同时完成测剖面和测深工作,可以提供更加丰富的地断面信息,有利于分析和比较,见图 1,其中  $a$  为极间距.

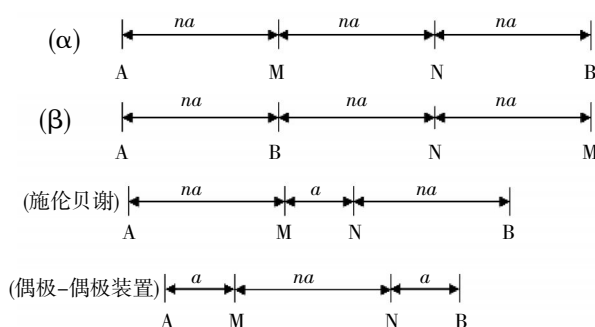


图 1 高密度电阻率法电极排列示意图

Fig.1 Common arrays used for high density resistivity method

收稿日期:2015-08-28

基金项目:武汉工程大学研究生创新基金(CX2014055)

作者简介:田昌贵(1963-),男,湖北松滋人,教授级高级工程师,硕士研究生导师.研究方向:防灾减灾工程、矿山地质环境治理恢复与地质灾害评估.

## 1.2 高密度电阻率法的特点

高密度电阻率法具有测点密度高, 获取信息量大, 对探测对象无损伤, 成果精确、工作效率高等特点<sup>[5]</sup>. 与常规电阻率法相比具有如下优点: ①电极布设一次性完成, 有助于减少因电极设置引起的干扰和故障, 减小测量误差; ②通过转换电极排列方式可获得丰富的地电断面信息; ③采用自动化的数据采集方式, 不仅可以提高数据采集效率, 还可以减小人工操作造成的误差; ④可以对资料进行预处理并显示剖面曲线形态.

## 2 测区概况

本次高密度电法探测剖面布设在铜录山青山河两岸和露采坑西南侧半坡路面. 青山河河床及其两侧为第四系冲积亚粘土, 细一中砂、砂砾石岩层. 结构松散, 稳定性较差. 其下为三叠系碳酸岩地层, 岩溶发育, 富水性强. 近地表浅部发育有溶洞、

开口型的洞穴及溶沟. 矿床开采过程中不断疏排地下水, 引起区域地下水位下降, 溶洞、洞穴上部第四系土层失去了地下水的“浮托力”, 同时在地下水潜蚀、掏空、搬运第四系土层及溶洞、洞穴充填物的作用下, 自然条件下的相对平衡遭到了破坏, 导致河床出现下沉、开裂、塌陷现象. 为了解矿区地下水流入矿坑的主径流通道, 采用了高密度电阻率法探测矿区地下岩溶分布特征及规律.

## 3 工作方法与技术

本次外业资料采集采用 WGMD-9 超级高密度电阻率法系统, 该系统具有抗干扰性强、自动实现自然电位及电极极化补偿、可随时检查接地电阻等优点. 经现场初步试验后, 决定在青山河岸 I、II 号剖面采用温纳装置, 露采坑南侧 III 号剖面综合采用温纳装置、斯伦贝谢装置. 测线参数如表 1 所示, I、II、III 剖面位置如图 2、3 所示.

表 1 测线参数表

Table 1 Survey line parameters

测线编号	测点编号	电极数	电极间距/m	剖面长度/m	观测层数	数据点数	剖面位置
I	0-245	50	5	245	16	392	青山河东岸
II	0-245	50	5	245	16	392	青山河西岸
III	0-590	60	10	590	19	570	露采坑南侧半坡路面

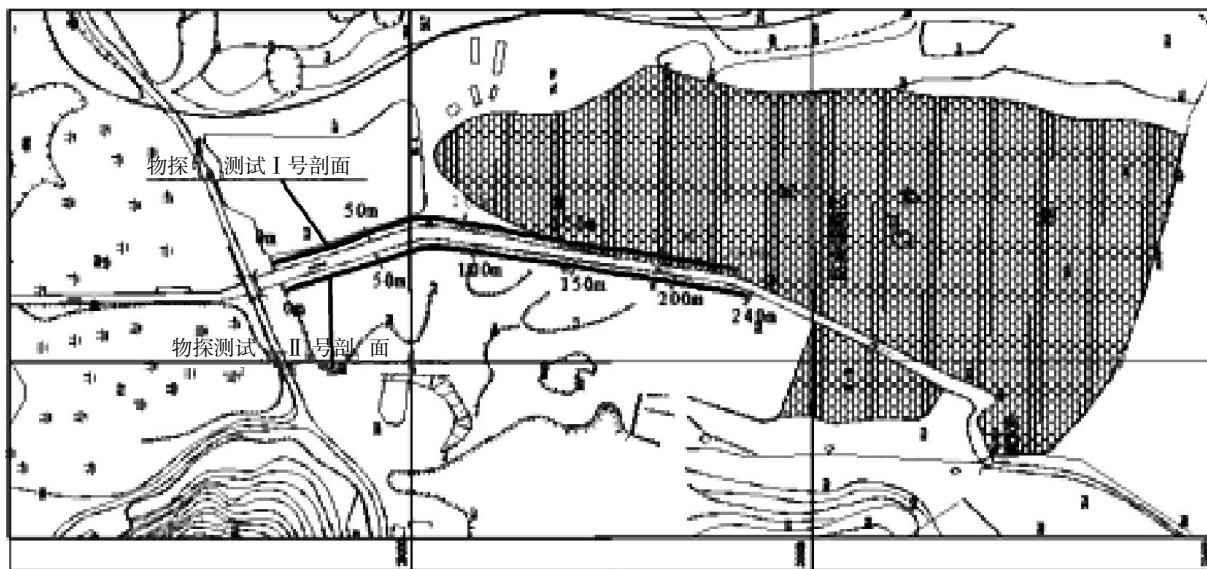


图 2 物探测试 I、II 号剖面位置图

Fig.2 Position of profile 1 and 2 by geophysical test

## 4 测试成果解释

外业采集的数据经过圆滑处理后, 输入计算机进行二维、三维反演后获得地电断面信息, 数据圆滑处理一般采用坏点剔除和滑动平均等方法<sup>[6]</sup>.

二维反演计算采用基于准牛顿最优化非线性最小二乘新算法, 其计算速度可以达到常规最小二乘法的 10 倍以上. 反演结果主要通过均方误差(RMS)来衡量<sup>[7]</sup>, RMS 越大, 反演结果的可靠度越低. 通过多次迭代可以减小均方误差, 为保证反演结果的

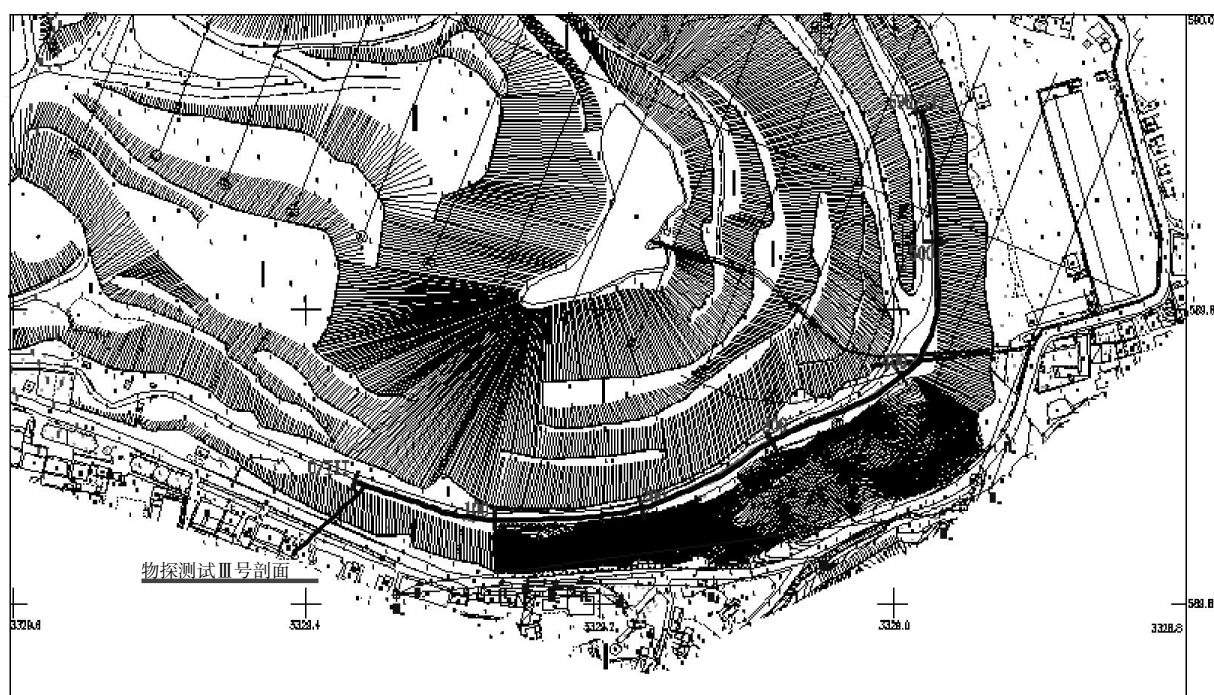


图 3 物探测试Ⅲ号剖面位置图

Fig.3 Position of profile 3 by geophysical test

可靠度,本次探测成果采用五次迭代反演。

#### 4.1 青山河东岸 I 号剖面

I 号剖面位于青山河东岸,外业采集的两条温纳装置数据剖面反演成果一致性良好,实测数据可以客观反映测区的地电条件,数据成果可靠。

高、低阻区在断面上有清楚的反映,在断面上存在 1#、2# 两个低阻异常体(见图 4),根据地质资料综合推测两处为强岩溶发育地段。1# 异常体平面位置位于测点号 53~96 m 处,上顶埋深约 7 m,下底埋深约 25 m,呈漏斗状,推断为强岩溶发育区。2# 异常体平面位置位于测点号 115~150 m 处,与现场塌方处一致,异常上顶埋深 28 m,由于探测深度的原因,异常下部没有闭合,下底埋深大于 40 m,

推断为强岩溶发育区。

#### 4.2 青山河岸 II 号剖面

II 号剖面位于青山河西岸,平面位置与 I 号剖面隔河对称,外业采集的两条温纳装置数据剖面反演成果一致性良好,实测数据可以客观反映测区的地电条件,数据成果可靠。

高、低阻区在断面上有清楚的反映,在断面上存在 3#、4# 两个物探异常体(见图 5),根据相关地质资料综合分析推断这两处为岩溶发育地带。3# 异常体平面位置位于测点号 53~98 m 处,上顶埋深约 9 m,下底埋深约 22 m,推断为强岩溶发育区。4# 异常体平面位置位于测点 130~172 m 处,与现场塌方处一致,异常上顶埋深 5 m,下底埋深 17 m,

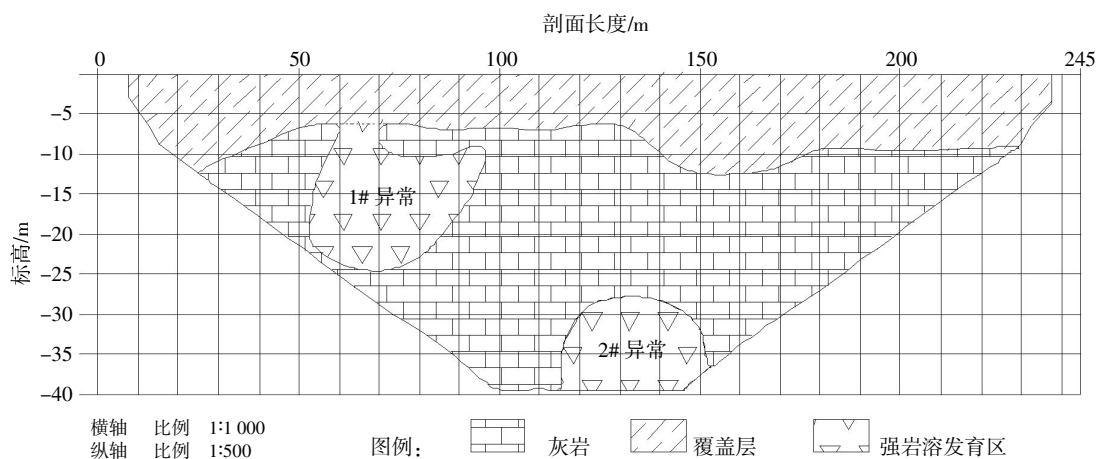


图 4 I 号剖面地质解释图

Fig.4 Geological interpretation of profile 1

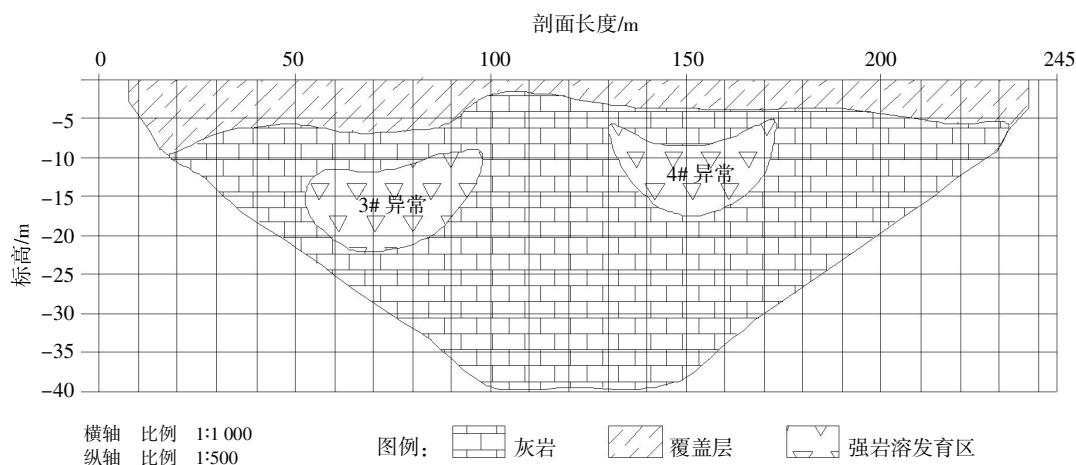


图 5 II号剖面地质解释图

Fig.5 Geological interpretation of profile 2

推断为强岩溶发育区。

#### 4.3 I、II号剖面对比分析

I、II号剖面所反映的地层吻合度较好。都存在两个高阻区即两个完整性较好的灰岩岩体,其中,I号剖面完整性较好的灰岩岩体被埋深较大的岩溶隔开,II号剖面因岩溶埋深较浅,探测成果反映两个完整性较好的灰岩岩体连成一片。1#、3#岩溶区的形态、位置、埋深基本一致,推断为同一岩溶发育区。2#、4#岩溶发育区分别与现场塌方处一致,2#岩溶发育区埋深大,4#岩溶发育区埋深小,2#岩溶发育区位置较4#岩溶发育区偏北,推断为同一岩溶发育区。该岩溶发育区走向北北东,沿南南西向下延伸,延伸深度大于40 m,形成

的空洞较大、较深,这正是此处塌方的原因之所在。

#### 4.4 露采坑南侧 III号剖面

III号剖面位于露采坑南侧半坡路面,外业采集了两条温纳装置的数据剖面 and 一条斯伦贝尔装置的数据剖面,三个剖面反演成果一致性良好,实测数据客观地反映了测区的地电条件,数据成果可靠。

III号剖面存在5#、6#两个物探异常体(见图6)。根据相关地质资料,剖面所处地层:测点0~410 m为中下三叠统白色中粗粒大理岩,测点410~590 m为石英正长闪长玢岩,测点410 m处附近为岩性接触带,接触带大角度倾向东南。因此,接触带与III号剖面在测点410 m处附近呈近似正交且大角度倾向大测点号方向。

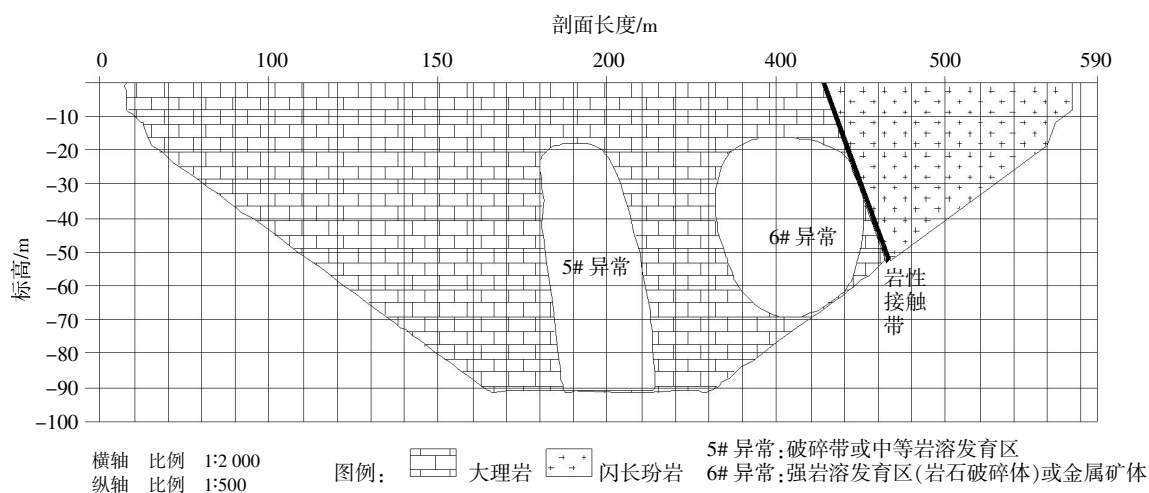


图 6 III号剖面地质解释图

Fig.6 Geological interpretation of profile 3

5#异常体平面位置位于测点号260~325 m,上顶埋深约18 m,下底埋深大于90 m,异常平面呈垂向延伸、陡立状,推断为金属矿化低阻体或裂隙发育带。6#异常体平面位置位于测点365~450 m,上顶埋深17 m,下底埋深70 m,异常平面近似等

轴状。该异常为复合异常体,异常的主体为矿坑陡立金属排水管群,异常右边界为接触带右边界的反映,物探成果显示的岩性接触带位置与现场地表出露的岩性接触带走向基本吻合,接触带呈大角度倾向剖面大测点号方向。

## 5 结 语

高密度电法重复观测成果资料一致性良好,实测数据客观地反映了测区的地电条件,数据成果可靠.后期对青山河沿岸物探异常体进行钻孔验证,发现实际地质情况与物探结果基本相符.通过对河床岩溶塌陷进行注浆充填,封堵了小清河岩溶塌陷区与矿坑之间的主径流通道,基本消除了丰水期洪水通过河床塌陷灌入矿区矿坑的风险.本案例说明先通过高密度电阻率法探测出岩溶分布特征及规律,然后采用帷幕注浆技术对矿区地下水流入矿坑的主径流通道进行重点封堵,不仅可以大幅降低治水成本,而且可以达到较好的堵水效果.该方法在类似岩溶矿山的地下水防治中可以推广使用.

## 致 谢

感谢武汉工程大学对本研究的资助!

## 参考文献:

- [1] 李金铭,罗延钟.电法勘探新进展[M].北京:地质出版社,1996.  
LI Jin-ming, LUO Yan-zhong. Development of resistivity method[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996. (in Chinese)
- [2] 董浩斌,王传雷.高密度电法的发展与应用[J].地质前缘,2003,10(1): 171-176.  
DONG Hao-bin, WANG Chuan-lei. Development and application of 2D resistivity imaging surveys[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(1): 171-176. (in Chinese)
- [3] 王兴泰.高密度电阻率法及其应用研究[J].长春地质

学院学报,1991,21(3): 341-348.

WANG Xing-tai. High density measurement method of electrical resistivity and its application technics [J]. Journal of Changchun University of Earth Science, 1991, 21(3): 341-348. (in Chinese)

- [4] 马志飞,刘鸿福,叶章.高密度电法不同装置的勘探效果对比[J].物探装备,2009,19(1): 52-56.  
MA Zhi-fei, LIU Hong-fu, YE Zhang. Comparison of exploration effect for different devices of high-density electrical prospecting [J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 2009, 19(1): 52-56. (in Chinese)
- [5] 王兴泰.工程与环境物探新方法新技术 [M].北京:地质出版社,1996:108-109.  
WANG Xing-tai. New technology and new methods for engineering and environmental geophysics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 108-109. (in Chinese)
- [6] 石林珂,刘洪一,冷元宝.高密度电阻率法在采空区探测中的应用[J].华北水利水电学院学报,2010, 31(5): 122-124.  
SHI Lin-ke, LIU Hong-yi, LENG Yuan-bao. Application of high density-resistivity method in mined-out god area detecting [J]. North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2010, 31(5): 122-124. (in Chinese)
- [7] 李美梅.高密度电阻率法正反演研究及应用 [D].北京:中国地质大学(北京),2010.  
LI Mei-mei. The research of high density resistivity method of positive and negative numerical modeling [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2010. (in Chinese)

## Application of high density resistivity method in Karst mine

*TIAN Chang-gui, YUAN Zhou-hao*

School of Resource and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China

**Abstract:** Tonglushan mine is a typical Skarn-type polymetallic Karst mine, which used open-pit and underground combined mining method. The groundwater is complexly controlled by contact zone and Karst. Xiaoqinghe river water poured into the pit through the collapse because the river-bed repeatedly collapsed during flood period. Thus the production safety is plagued chronically. To eliminate mine inundation, we emplaced three high density resistivity detecting profiles on the two banks of river and the open-pit slope. After processing data by rejecting distortion point, terrain correct and smoothing, we got the apparent resistivity contour by 2D inversion software. We got the Karst characteristics of Xiaoqinghe area and the main channel of runoff by comparing the electric differences of geological bodies. We filled the Karst fissure under river by grouting according to the detection result, and the main channel of runoff between the river and the pit was plugged, which has satisfactory effects on water plugging rate and reducing cost.

**Keywords:** high density resistivity method; river-bed; Karst; detection

本文编辑:龚晓宁

# 金山店铁矿东区膨胀岩形成机理及预测

梅群力<sup>1</sup>, 陈清运<sup>2</sup>, 黄杰<sup>2</sup>, 彭静波<sup>2</sup>, 陈星亮<sup>3</sup>

1. 中国黄金集团新疆金滩矿业有限公司, 新疆 鄯善 838200;

2. 武汉工程大学资源与土木工程学院, 湖北 武汉 430074;

3. 武汉工程大学机电工程学院, 湖北 武汉 430074

**摘要:**为弄清金山店铁矿东区膨胀岩形成机理,分别用X射线衍射仪、扫描电镜和电子能谱仪检测和鉴定膨胀岩中膨胀矿物的种类、含量及膨胀岩的原岩。检测和鉴定结果表明,膨胀物主要是蒙脱石,其次为伊利石和高岭石,膨胀岩的原岩为石英闪长岩。在此基础上,对东区工程地质特征、膨胀岩形成的物质基础和动力条件进行了系统分析,揭示出膨胀岩体的低温热液蚀变、强膨胀岩体的地质构造、近矿强膨胀岩的热力接触变质等3种膨胀岩的形成机理,并提出了下盘膨胀岩分布具有条带性、大理岩层缺失部位即为膨胀岩、膨胀岩的膨胀性与岩体的破裂程度呈正比的发育规律。根据研究成果,预测膨胀岩主要分布在34-40勘探线间,中间厚度在90 m左右,具有两端薄中间厚的特点。

**关键词:**膨胀岩成因;蒙脱石化;X射线衍射;电子能谱仪;电镜扫描

**中图分类号:**P624

**文献标识码:**A

**doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2015.10.004

## 0 引言

金山店铁矿东区自-270 m水平放顶以来,由膨胀岩引起了一系列工程地质灾害。如,-340 m中段电梯因缩井而提前报废,-298 m、-312 m分段联络道与进路一掘即冒,成巷率极低;-410 m中段矿石榴井几乎全部垮塌,运输大巷多处出现大面积冒顶。根据塌陷地段及已揭露工程的地质调查分析,东区膨胀岩体地段,工程地质特征表现在:膨胀岩体分布范围广,断层和破碎带穿过的地段,一般形成极强膨胀性岩体;在节理分布稀疏基本完整膨胀岩体中开掘工程,易于出现误判,使得支护不及时或强度不够,随着时间推移,往往导致围岩出现大面积垮落。

曲永新等按成因将膨胀岩分为:泥质类膨胀岩,断层泥类膨胀岩,含硬石膏、无水芒硝类膨胀岩,蒙脱石化侵入岩类膨胀岩和蒙脱石化凝灰岩类膨胀岩<sup>[1-2]</sup>。在膨胀岩类鉴定上,主要有矿物学法、岩石化学法、物理学法,用得比较多的是前两种。曲永新按不规则岩块干燥饱和吸水率来判别岩石的膨胀性<sup>[3]</sup>,朱训国以膨胀岩中亲水矿物含量,并辅以岩块干燥饱和吸水率、极限膨胀量、极限膨胀力

指标进行岩石膨胀性分类<sup>[4]</sup>。

只有弄清东区膨胀岩形成机理,才能正确预测膨胀岩分布范围,为开拓、采准工程布置位置的选择,及井巷工程支护方式确定提供依据。本文采用X射线衍射法检测膨胀岩中膨胀矿物的种类及含量,使用电镜扫描法进行膨胀岩的岩相鉴定,利用能谱法检测膨胀岩中元素的含量,以此确定膨胀岩的原岩。在此基础上,根据工程地质,膨胀岩形成的物质基础和动力条件推断膨胀岩形成机理、发育规律,并预测膨胀岩体分布范围。

## 1 工程背景

东区控矿层位有三迭系中统灰岩组(T<sub>2</sub>)和三迭系下统大冶群的第五岩性段至第七岩性段(T<sub>1dy</sub><sup>5-7</sup>),主要由白云质灰岩和白云岩组成,镁元素含量较高, $w(\text{MgO})=8.7\%\sim 8.76\%$ ,且地下水中 $\text{Mg}^{2+}$ 的含量也比较高。东区岩浆岩的原始岩浆属过渡型的碱钙性I型花岗岩浆,它是燕山早期第二段第二次和燕山晚期第二次上侵活动形成的中浅成侵入杂岩体。围岩蚀变较强烈,各蚀变带蚀变强度以控矿断裂、构造破裂带两侧强度最大,而且蚀变强度与矿体规模有着一定的依赖关系。



东区围岩构造复杂,二级断裂较多.东区下盘围岩构造形迹主要表现为走向近东西的断裂带,可见四条相互平行排列的主干断层  $F_1\sim F_4$ ,对矿体下盘围岩破坏严重.层间滑动破碎带位于东区  $T_{2-3pq}$  与  $T_2+T_{1dy}$  地层分界线附近,在该两组地层间因岩性差异较大故发生滑动.破碎带产状与地层产状一致,沿破碎带磁铁矿化、矽卡岩化及蛇纹石化强烈,或被磁铁矿体、矽卡岩体所占据,两侧岩体碎裂厉害.成矿后挤压破碎带位于东区南侧 100 m 范围内,发育有 2~3 条东西走向的挤压破碎带.破碎带宽约 7~15 m,走向长 400~600 m,倾向南,倾角  $60^\circ\sim 75^\circ$ .该破碎带的特点是位移不大,岩石中节理裂隙纵横交错,特别是碳酸盐网脉每厘米可达 3~8 条,夹有糜棱岩 0.3~1 m.

矿体下盘岩浆岩本身并不含水,但是遇上规模较大、延伸较远的构造断裂而又沟通了含水带时,则可以产生突水.2006 年 8 月 24 日,-410 m 水平 175#W130 处巷道顶板出现涌水,涌水量  $25\text{ m}^3/\text{h}$ ,时间为 46d.2007 年 3 月 20 日,-410m 水平 180#S176 m 工作面突发涌水,涌水量高达  $170\text{ m}^3/\text{h}$ .东区下盘岩体节理裂隙发育,这些节理与断层存在水力联系,构成一个充水网络.根据钻孔不同深度取水样进行分析,地下水化学类型及矿化度见表 1.

由表 1 可知,相对于西区的 CK238 孔水文监测资料,可以看出,东区地下水中  $\text{Mg}^{2+}$  含量比西区高一倍左右.

表 1 地下水质分析  
Table 1 Quality analysis of the ground water

孔号	取样深度/m	矿化度/(g/L)	主要离子浓度/mmol/L						备注
			$\text{HCO}_3^{1-}$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^{1-}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{K}^{1+}+\text{Na}^{1+}$	
CK284	50	0.330	53.55	10.89	0.32	24.54	5.56	4.94	东区
CK398	300~600	0.812	12.82	75.13	0.28	22.30	5.30	6.98	东区
CK393	350	0.940	9.70	79.82	0.36	21.56	6.00	6.68	东区
CK238	300	0.817	15.80	69.50	0.62	34.80	3.15	0.07	西区

2 膨胀矿物与膨胀岩的原岩

2.1 膨胀矿物检测

在膨胀岩巷道工作面进行采样,分别选取完整岩样 5 块,编号 1~5,明显膨胀岩样 2 块,编号

6~7.采用 X 射线衍射法,检测膨胀岩中膨胀矿物的种类及含量.部分岩样检测频谱见图 1.

依据岩样 X 射线衍射检测结果,膨胀岩中矿物组分及含量见表 2.

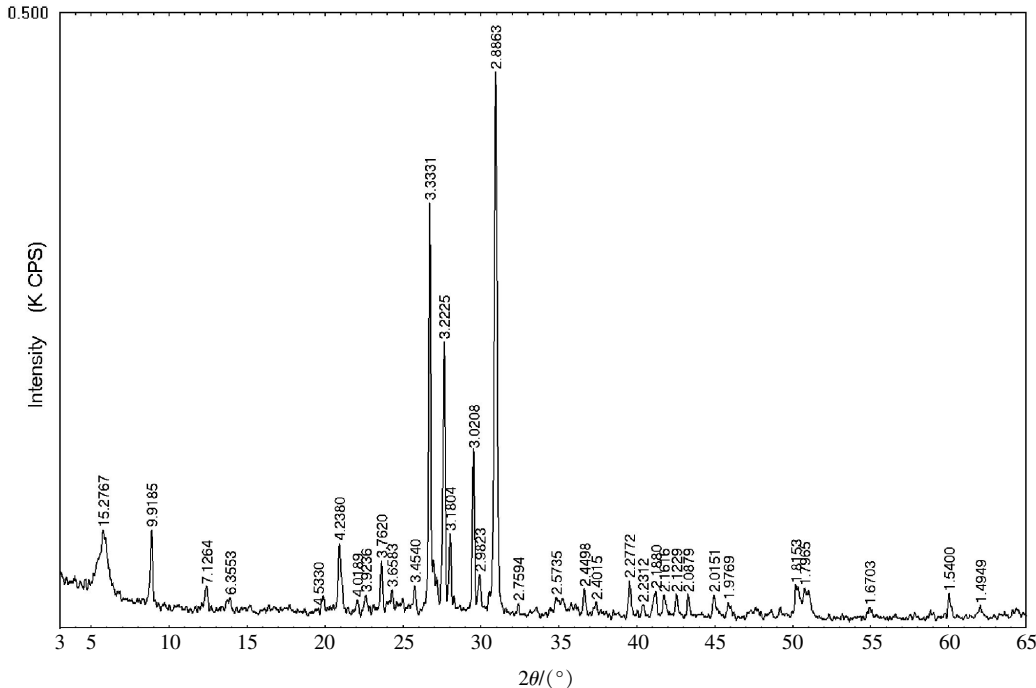


图 1 4# 岩样 X 射线衍射检测图谱  
Fig.1 X ray diffraction pattern of the 4# sample

表 2 膨胀岩矿物组分及含量

Table 2 Mineral composition and content of the expansive rock

w/%

岩样 编号	膨胀矿物			石英	长石	方解石	白云石	沸石
	蒙脱石	高岭石	伊利石					
1	15	0	0	36	44	2	0	3
2	20	5	10	32	12	18	3	0
4	15	5	5	24	18	10	23	0
6	40	0	0	28	32	0	0	0

由表 2 可见,岩样中膨胀矿物主要有蒙脱石、伊利石和高岭石,三者之和在 15%~40%之间,以蒙脱石为主. 其中 6# 岩样是强膨胀岩, 膨胀矿物全为蒙脱石. 蒙脱石属强膨胀矿物,伊利石次之,高岭石再次. 根据曲永新提出的分类标准<sup>[5]</sup>,蒙脱石含量大于 7%即为膨胀岩,因此上述岩样全为膨胀岩.

## 2.2 膨胀岩岩相鉴定

采用电镜扫描法,分别就 3#、5# 和 7# 岩样进行了岩相鉴定,其中 7# 岩样蒙脱石化严重,部分结果见图 2~图 3.

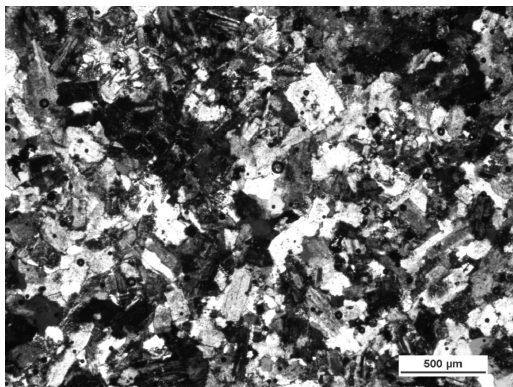


图 2 3# 岩样切片扫描结果

Fig.2 Slice scanning result of the 3# rock sample

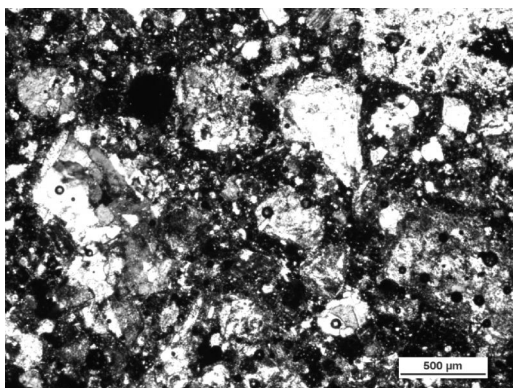


图 3 7# 岩样切片扫描结果

Fig.3 Slice scanning result of the 7# rock sample

鉴定结果为,岩样呈斑状结构,斑晶为斜长石(10%~15%),黑云母(10%),石英(5%);基质为斜长石(50%~70%),钾长石(2%~10%),石英(3%~10%). 综合各方面特征,膨胀岩原岩为石英闪长岩.

## 2.3 膨胀岩化学法检测

2.3.1 膨胀岩化学元素及含量 采用电子能谱仪(EDS)检测岩样中的化学元素及其含量,仪器型号ISM-5510LV. 部分检测能谱见图 4~图 5. 检测结果及分析见表 3. 依表 3, 进行岩样元素含量比对,见图 6.

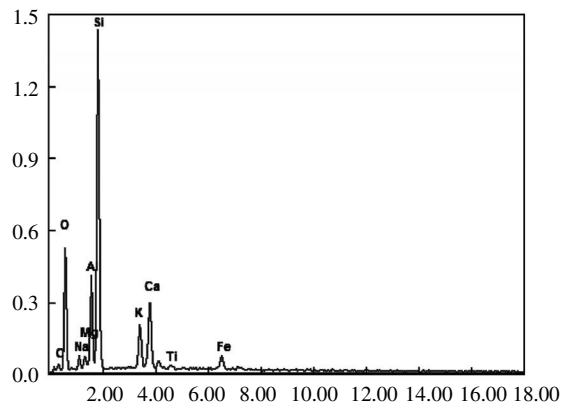


图 4 3# 岩样检测能谱图

Fig. 4 Energy spectrum of the 3# rock sample

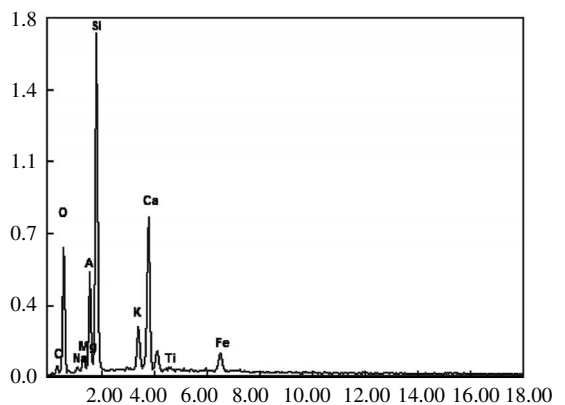


图 5 7# 岩样检测能谱图

Fig. 5 Energy spectrum of the 7# rock sample

由图 6 可见,3 种岩样所含元素含量走势基本一致, 仅 Si、Ca、Al 等元素的含量差别较大. 由于 7# 岩样比 3# 和 5# 岩样的蚀变强烈, 表现出氧化铝的含量降低,而氧化镁含量增高的明显趋势,符合火成岩同晶置换时元素的变化规律性<sup>[6]</sup>.

表 3 岩样化学元素分析

Table 3 Chemical element analysis results of the rock samples w/%

岩石试样	氧化硅	氧化铝	氧化钙	氧化镁	铁氧化合物	氧化钛	氧化钠	氧化钾
岩样/5#	66.81	19.98	2.61	1.98	1.60	0.73	2.23	5.48
岩样/3#	60.74	16.33	6.80	1.58	2.31	0.49	3.36	3.81
岩样/7#	52.76	16.12	12.81	3.37	2.80	0.37	1.33	3.20
3/5# 均值	63.78	18.16	4.71	1.78	1.96	0.61	2.80	4.65

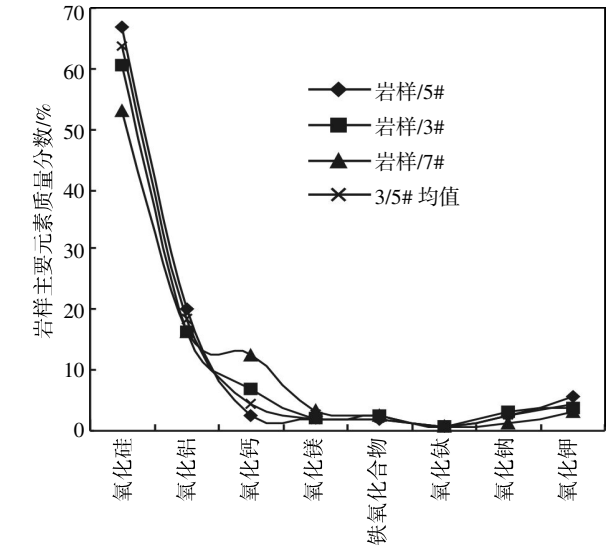


图 6 3#、5#、7# 岩样元素对比

Fig.6 Elements comparison of the 3#,5# and 7# rock samples

2.3.2 膨胀岩原岩的确定 膨胀岩主要元素分析,一般以元素的氧化物质量分数的形式表达. 依据表 3 检测结果与东区地质勘探报告上出现的三大类岩石进行氧化物比对,通过误差分析最后确定膨胀岩的原岩. 由于 7# 岩样蒙脱石化严重,使用 3# 和 5# 岩样元素含量均值与各种岩石进行比对. 参与比对的岩类有角岩、砂岩、页岩、砂卡岩、火成岩等类别. 部分岩类与岩样比对见图 7~图 9.

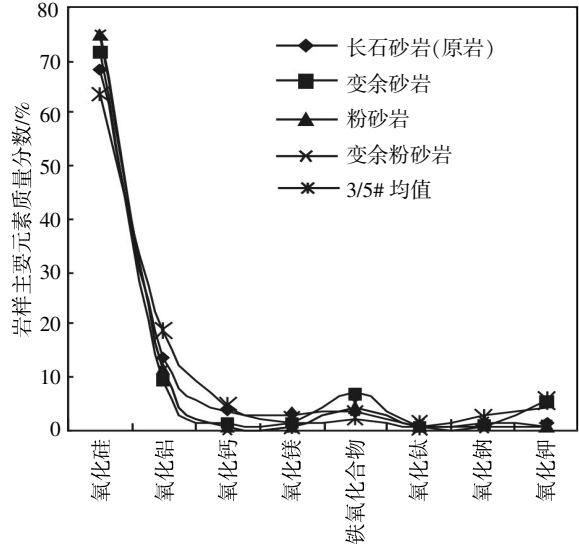


图 7 岩样与砂岩元素对比

Fig.7 Elements comparison of the rock sample and sand rock

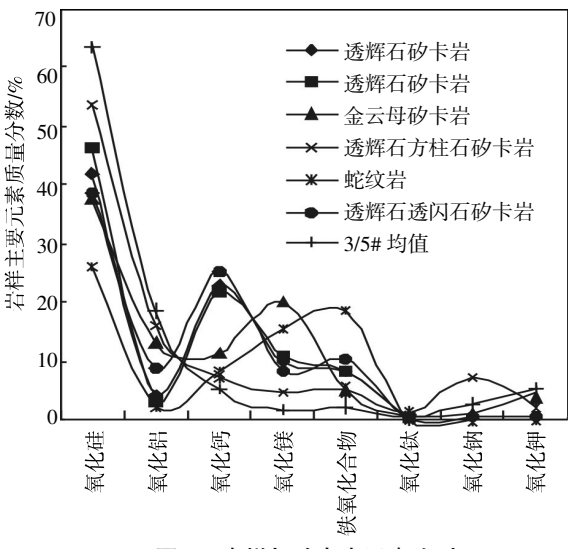


图 8 岩样与砂卡岩元素对比

Fig. 8 Elements comparison of the rock sample and skarn

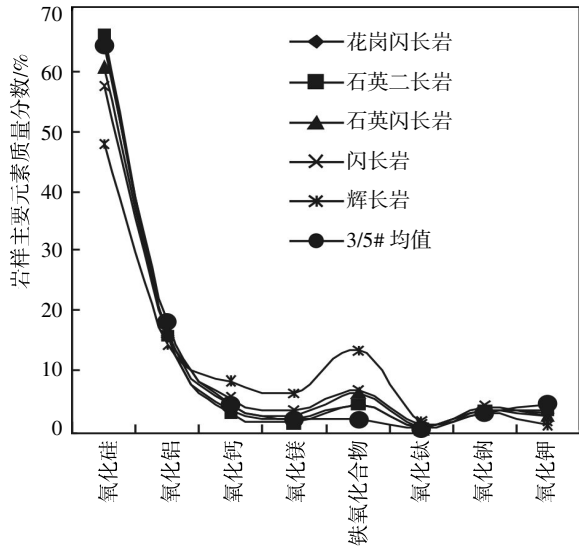


图 9 岩样与火成岩元素对比

Fig.9 Elements comparison of the rock sample and igneous rock

由图 7~图 9 可见,从变化趋势上来看,岩样与变质岩中的英长角岩、变余砂岩和泥质角岩比较吻合;岩样与砂卡岩比对的结果比较分散,基本上可以排除膨胀岩的原岩是砂卡岩的可能性;岩样与火成岩变化趋势一致. 为了进一步弄清膨胀岩的原岩,将上述初选岩石与岩样进一步进行比对.

将初选岩石、全部火成岩与岩样进行比对,根据误差大小,确定膨胀岩的原岩,结果见表 4.

表 4 火成岩、变质岩矿物含量与岩样比对结果

Table 4 Mineral content comparison of the samples, igneous rock and metamorphic rock

岩类	原岩与岩样	岩样元素质量分数/%								数据归一化后与 岩样比对方差
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	
火成岩	花岗闪长岩	64.98	16.33	3.7	1.94	4.38	0.52	3.67	2.95	0.156
	石英二长岩	65.74	15.89	3.27	1.64	4.39	0.75	3.29	3.67	0.125
	石英闪长岩	60.51	18.2	4.63	1.64	6.33	0.73	3.08	2.65	0.196
	闪长岩	57.39	16.42	5.58	3.77	7.25	0.89	4.26	2.57	0.266
	辉长石	47.62	14.52	8.75	6.47	13.46	1.67	2.97	1.18	0.544
变质岩	英长角岩	58.57	17.22	5.11	2.88	5.80	0.78	6.75	3.00	0.356
	变余砂岩	71.47	9.46	1.25	1.70	6.58	0.58	0.68	5.42	0.372
	泥质角岩	60.18	15.42	3.14	3.12	4.92	0.85	2.55	2.27	0.329
	岩样 3/5 号均值	63.775	18.155	4.705	1.780	1.955	0.610	2.795	4.645	

为了避免因元素含量不同而影响方差的大小,将原岩和岩样中各元素氧化物的含量进行归一化处理,通过比对原岩与岩样的含量,计算其方差,以方差的大小确定其偏离程度.同时,考虑原岩在低温热液蚀变过程中表现出“失 Al<sup>3+</sup>增 Mg<sup>2+</sup>”的规律,及岩相分析的结果,进行综合分析,最后确定膨胀岩的原岩.由表 4 可见,岩样矿物检验结果表明,膨胀岩与东区出现的石英二长岩最接近,但岩相研究表明,岩样中钾长石与斜长石的含量差别较大,故可以排除石英二长岩的可能性.花岗闪长岩中的 Si 含量比岩样中 Si 含量高,可能性不大.岩样与石英闪长岩接近,符合“失 Al<sup>3+</sup>增 Mg<sup>2+</sup>”的规律.

综上所述,经比对,变质岩中最有可能成为膨胀岩体原岩的是泥质角岩,但均方差大于石英闪长岩比对的结果,由此可见,该膨胀岩体的原岩为石英闪长岩.

### 3 膨胀岩形成机理

#### 3.1 膨胀岩体的低温热液蚀变形成机理

东区矿体下盘围岩分别为二长花岗岩、石英闪长岩、大理岩和角岩,控矿地层和地下水中 Mg<sup>2+</sup>的含量比较高,在岩浆后期低温热液变质作用下,石英闪长岩(斑状石英闪长岩  $\pi\delta_{05}^{3b}$ )发生火成岩蒙脱石化蚀变,形成厚度达 80~100 m 的蚀变带,离矿体越近蚀变越剧烈.蒙脱石化的斑状石英闪长岩属于中膨胀性至弱膨胀性岩石,如果膨胀岩中节理裂隙充填膨胀剥蚀物厚度大于 5 mm,则变为强膨胀性岩石.

#### 3.2 强膨胀岩体的地质构造形成机理

东区下盘围岩构造复杂,二级断裂较多.下盘围岩中存在四条走向近东西的主干断裂带 F<sub>1</sub>~F<sub>4</sub>,

成矿后期发育有 2~3 条与 F<sub>3</sub> 或 F<sub>4</sub> 相平行排列的挤压破碎带,破碎带宽约 7~15 m,走向长 400~600 m,倾向南,倾角 60°~75°.这些结构面穿过东区下盘已蒙脱石化的石英闪长岩体,并与外界构成水力联系.发生碳酸盐化、绿泥石化、赤铁矿化和片理化,形成断层泥、破碎带、层间滑动带、矿岩接触带类膨胀岩类型.破碎带、断裂带、矿岩接触带、及充填于节理裂隙中的膨胀剥蚀矿物属于剧膨胀岩.

#### 3.3 近矿膨胀岩的接触热力变质形成机理

近矿围岩,由于有铁质元素参加,主要发生接触热力变质作用、接触交代变质作用,形成绿泥石化膨胀岩,厚度在 5 m 左右.近矿围岩蚀变较强烈,各蚀变带蚀变强度以在控矿断裂、构造破裂带两侧强度最大,而且蚀变强度与矿体规模存在一定的依赖关系.沿矿岩接触带磁铁矿化、矽卡岩化及蛇纹石化强烈,或被磁铁矿体、矽卡岩体所占据.

### 4 膨胀岩体发育规律及预测

经工程地质调查分析,膨胀岩体发育表现出一定的规律性:

a.大理岩层被石英闪长岩侵占缺失,该处石英闪长岩易于蚀变为膨胀岩.地质报告表明,大理岩层位比较稳定,除了被 F<sub>3</sub> 断层错断,其他部位都是比较完整的.该层平均厚度 40~70 m,最宽 90 m.因此,膨胀岩范围可以藉此尺寸进行圈定.

b.膨胀岩分布的条带性.现场调查结果表明,近矿膨胀岩蒙脱石化强烈,属剧膨胀岩,厚度在 5 m 左右,远离矿体的膨胀岩蒙脱石化逐渐减弱,表现出较强的条带性;近东西向切割膨胀岩体的断层、破碎带,本身表现为粉状膨胀岩,属于剧膨胀岩.近断层和破碎带岩层为碎裂状膨胀岩体,远离之则为块状膨胀岩体.

c.膨胀岩的膨胀性与岩体的破裂程度有关.受地质构造运动的影响,蒙脱石化的岩体破裂程度不一致,节理裂隙发育地段,膨胀岩蒙脱石化强,表现出剧膨胀岩、强膨胀岩的性质,相反,岩体完整地段,膨胀岩膨胀特性表现弱.

## 5 结 语

经 X 射线衍射试验、电镜扫描岩相鉴定和电子能谱测试,膨胀矿物主要是蒙脱石,其次为伊利石和高岭石,膨胀岩的原岩是石英闪长岩.

东区膨胀岩形成机理有:膨胀岩体的低温热液蚀变形成机理、强膨胀岩体的地质构造形成机理、近矿强膨胀岩的热力接触变质形成机理.

膨胀岩体发育表现出大理岩层被石英闪长岩侵占则极易形成膨胀岩,膨胀岩分布的条带性,膨胀岩的膨胀性与岩体的破裂程度呈正比.

## 致 谢

感谢国家自然科学基金委员会的资助!

## 参考文献:

- [1] 曲永新,张永双,杨俊峰,等.中国膨胀性岩、土一体化工程地质分类理论与实践[C]//中国地质 50 年.北京:地震出版社,2000.  
QU Yong-xin,ZHANG Yong-shuang, YANG Jun-feng, et al. The theory and practice of engineering geological classification of expansive rock and soil in China[C]//China Geology 50 Years. Beijing: Seismological Press, 2000. (in Chinese)
- [2] 顾宝和,曲永新.劣质岩(问题岩)的类型及其工程特征[J].工程勘察,2006,34(1):1-7.  
GU Bao-he, QU Yong-xin. Types and engineering characteristics of poor bad rock (problem rock)[J]. Journal of Geotechnical Investigation & Surveying, 2006, 34(1): 1-7. (in Chinese)
- [3] 曲永新,徐晓岚,时梦熊,等.泥质岩的工程分类和膨胀势的快速预测[J].水文地质工程地质,1988(5):36-39.  
QU Yong-xin, XU Xiao-lan, SHI Meng-xiong, et al. The engineering classification of mud rock and its rapid forecast of swelling power [J]. Journal of Hydrogeology and Engineering Geology, 1988(5): 36-39. (in Chinese)
- [4] 朱训国,杨庆.膨胀岩的判别与分类标准.岩土力学[J],2009,30(增刊2):174-177.  
ZHU Xun-guo, YANG Qing. Identification and classification of swelling rock. Rock and Soil Mechanics[J], 2009, 30(Suppl.2): 174-177. (in Chinese)
- [5] 张永双,曲永新,刘景儒,等.滇藏铁路滇西北段蒙脱石化蚀变岩的工程地质研究 [J]. 岩土工程学报, 2007, 29(4): 531-536.  
ZHANG Yong-shuang, QU Yong-xin, LIU Jing-ru, et al. Engineering geological research on altered rocks in the area of NW Yunnan along Yunnan-Tibet Railway line[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(4): 531-536. (in Chinese)
- [6] 赵杏媛.粘土矿物在油气初次运移中作用的探讨[J].沉积学报,1990,8(2):67-73.  
ZHAO Xing-yuan. Discussion on the effect of clay minerals in primary migration of petroleum [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1990, 8(2): 67-73. (in Chinese)

## Formation mechanism and prediction of expansive rock at east area of Jinshandian iron mine

*MEI Qun-li<sup>1</sup>, CHEN Qing-yun<sup>2</sup>, HUANG Jie<sup>2</sup>, PENG Jing-bo<sup>2</sup>, CHEN Xing-liang<sup>3</sup>*

1.China Nation Gold Group Xinjiang Jintan Mineral & company, Ltd., Shanshan 838200, China;

2.School of Resource and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

3.School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China

**Abstract:** To investigate the formation mechanism of the expansive rock at the east part of Jin Shandian iron mine, the types and their contents of the expandable mineral, the original rock in the expansive rocks were measured by using X-ray diffraction, scanning electron microscope and electron spectrometer. The test results show that the expandable minerals are mainly montmorillonite, followed by illite and kaolinite, and the original rock of the swelling rocks is quartz diorite. The engineering geological characteristics, the formation mechanism and the dynamic conditions of the expansive rock at east area were analyzed systematically. Three formation mechanisms: the low temperature hydrothermal alteration of expansive rock, the geological structure of strong expansive rock and thermal contact metamorphism of strong expansive rock near the mineral were suggested. The growth patterns of the expansive rock including the stripped distribution at the footwall, and the missing part of the marble stratum corresponding to expansive rock, and directly proportional relationship between the expansibility and the degree of fracture were also revealed. It is predicted that the expansive rock is mainly located in the 34–40 exploration line, with a distribution of the thickest part of 90 m in the middle, and thinnest part at the two ends.

**Keywords:** formation mechanism of expansive rock; montmorillonite; X ray diffraction; electron energy spectrometer; scanning electron microscope

本文编辑: 龚晓宁

文章编号:1674-2869(2015)10-0023-05

# 水性环氧改性半柔性路面材料的低温抗裂性能

孙 政,何桂平\*

深圳市公路交通工程试验检测中心,广东 深圳 518049

**摘 要:**为了改善传统半柔性路面材料的低温抗裂性能,采用水泥-乳化沥青-水性环氧树脂三相有机无机复合材料作为新型胶结体系制备的半柔性路面材料.采用匀质性及回弹模量检测方法确定胶结材料中的乳化沥青与水泥的质量比,调整水性环氧树脂与乳化沥青的质量比研究其低温抗裂性能.结果表明:当水性环氧树脂占乳化沥青的质量比为 0.6 时,半柔性路面材料的弯拉劲度模量达到 2 332 MPa,最大弯拉应变达到 2 662  $\mu\epsilon$ ,接近沥青玛蹄脂混合料的水平.扫描电镜研究表明:三相有机无机胶结体系形成以沥青材料为连续相、水性环氧树脂为改性分散相、水泥水化产物为衔接体的三维空间网络结构,既改善了水泥浆材料的干缩应力,同时增强了胶浆与基体沥青混合料的界面粘结力.

**关键词:**三相胶结体系;干缩应力;交织网络

**中图分类号:**U414

**文献标识码:**A

**doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2015.10.005

## 0 引 言

水泥混凝土路面具有强度高、承载力大、温度敏感性小等优点,但同时具有行车舒适性差、维修困难的缺点;相对而言,沥青混凝土路面的功能性及维修方便使其成为高等级公路的发展主流.但是,我国幅员辽阔、气候特点复杂,外加渠化交通的影响,沥青路面承载力差、温度敏感性大、水稳定性差等缺点成为其破坏的主要因素<sup>[1-3]</sup>.基于此背景,一种兼具水泥混凝土路面及沥青混凝土路面优点的新型路面材料应运而生,半柔性路面材料是以大孔隙(孔隙率高达 25%以上)的骨架-空隙型沥青混合料为基体材料,然后灌入水泥砂浆而形成的路面材料<sup>[4-6]</sup>.

国内外的研究成果普遍认为半柔性材料是一种价格适宜、性能良好的路面材料,但是当前各种应用都表明半柔性材料容易出现开裂病害.主要由于沥青基材料与水泥基材料的界面粘结力仅为范德华力,无法抵抗因水泥基材料收缩以及沥青基材料的热胀冷缩带来的内应力<sup>[7]</sup>.国内外相关学者通过沥青基材料的结构优化设计、灌浆材料的优选改性等措施来改善半柔性材料的开裂缺点,但是取得的效果却并不理想.本研究综合利用水性环氧树脂的高强粘结力、乳化沥青的柔性复合改

性水泥砂浆,并以此制备高性能半柔性材料,研究其低温抗裂性能及抗裂机理.

## 1 原材料

### 1.1 乳化沥青

本研究选取泰普克公司生产的阳离子慢裂型 SBS 改性乳化沥青,其主要性能参数见表 1.

表 1 SBS 乳化沥青性能参数

Table 1 Parameters of SBS emulsified asphalt

检测参数	单位	结果
破乳速度	-	慢裂
离子电荷	-	阳离子(+)
筛上剩余量(1.18 mm)	%	0.04
乳液颗粒平均尺寸	$\mu\text{m}$	3.6
质量分数	%	60.2
针入度(100 g, 25 $^{\circ}\text{C}$ , 5 s)	0.1mm	81
蒸发残留物	软化点	53.5
	延度(5 $^{\circ}\text{C}$ )	24
贮存稳定性	1 d	0.9
	5 d	2.1

### 1.2 水 泥

本研究选用广东海螺牌 P.O42.5 普通硅酸盐水泥,主要性能参数见表 2.

收稿日期:2015-09-08

基金项目:深圳市科学技术创新委员会科技项目(CXZZ20140820151319424).

作者简介:孙 政(1987-),湖北仙桃人,硕士,工程师.研究方向:公路、桥梁及隧道建筑材料的研究及检测.\*通信联系人.

表 2 P.O42.5 水泥性能参数  
Table 2 Parameters of P.O42.5 cement

比表面积/(m <sup>2</sup> /kg)	初凝时间/min	终凝时间/min	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
			3 d	28 d	3 d	28 d
324	240	405	30.5	44.0	5.05	6.72

1.3 水性环氧树脂及固化剂

水性环氧树脂按照制备工艺的不同会带有不同的电荷,其颗粒尺寸、电荷特性对整个胶浆体系的固结效果、匀质性都有显著影响,研究表明:阳离子型水性环氧树脂与水泥拌合后亦会迅速发生

团聚、阴离子水性环氧树脂与本研究选取的阳离子乳化沥青拌合时会出现团聚效应. 本研究选取自制的基于 E51 环氧树脂及自乳化型非离子水性固化剂,具体指标见表 3.

表 3 水性环氧树脂及其固化剂控制参数  
Table 3 Parameters of waterborne epoxy resin and curing agent

项目	操作时间 25 ℃/h	乳液颗粒平均粒径/μm	固含量(质量分数)/%
水性环氧树脂	3.0	0.25	100
自乳化型固化剂			40

1.4 集料

选取深圳平湖产辉绿岩作为基体沥青混合料集料,粗集料表观相对密度 2.710,吸水率 0.41%,压碎值 13.9%,洛杉矶磨耗损失 16.3%. 细集料表观相对密度 2.700,吸水率 0.70%. 矿粉采用石灰岩轧制,相对密度 2.720.

1.5 沥青

基体沥青混合料为骨架-空隙型结构,其抗剪强度主要由骨料之间嵌挤所形成的内摩擦角提供,为了增强基体沥青混合料的抗剪强度,需要采用高黏度改性沥青增强集料之间的黏结力,高黏度改性沥青针入度 47(0.01 mm),软化点 97 ℃,15 ℃延度 64 cm,60 ℃动力黏度 86 450 Pa·s.

/乳化沥青(A)条件下胶浆材料的匀质性系数,确定最小水泥用量比为 C/A=0.4,此时匀质性系数为 0.950. 固定 E/A=1,以最小水泥用量比为 C/A=0.4 为起点,测试不同 C/A 条件下胶浆材料的回弹模量,为匹配基体沥青混合料模量,取回弹模量达到 5 010 MPa 时的 C/A 为最大水泥用量比. 以最低水泥用量和最高水泥用量的中值(C/A=0.55)、E<sub>固化剂</sub>/E=1 为基础,设计 E/A=0.0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 进行抗裂性能研究.

2.2 基体沥青混合料配比

参考大孔隙沥青混合料(OGFC)设计方法,通过控制关键筛孔 2.36 mm 及 4.75 mm 通过,采用体积法设计孔隙率为 30%、连通孔隙率超过 23%的基体沥青混合料.

2 配合比设计

2.1 灌浆材料配比

本研究提出有机无机复合灌浆材料体系复杂,水泥主要起到吸收两种水性物质所带来的水分及吸附环氧树脂固化物和沥青的作用,它同时也是整个灌浆材料强度的保证和半柔性路面材料中偏“刚性”的保证. 水性环氧树脂主要起到改善灌浆材料与基体沥青混合料界面黏结的作用,但是它本身具有低温脆性的特征,所以它并不能成为连续相存在于灌浆材料体系之中. 因此,本研究中的灌浆材料是以沥青为连续相、环氧树脂固化物为黏结改性剂、水泥为强度调节剂而得到的复合材料.

基于沥青为连续相、水性环氧树脂为分散相的设计思路,确定水性环氧树脂(E)/乳化沥青(A)的最大掺配比例为 1. 固定 E/A=1,测试不同水泥(C)

3 低温抗裂性能

由于半柔性路面材料仍然偏属于柔性路面体系,其开裂原因主要由两方面的综合作用所致,一方面沥青基材料属于温感性材料,随着外界温度的下降,沥青材料达到劲度模量将增大,进而增加沥青混合料的强度、降低混合料的抗变形能力,在外力荷载的作用下容易出现脆性损坏. 温度下降还会导致沥青面层的收缩,受限于沥青中下面层对上面层的摩擦力约束,沥青上面层的变形将变为温度收缩应力<sup>[8-10]</sup>. 另一方面胶浆体系中的水泥水化形成材料收缩应力,这两种应力超过各自材料的抗拉强度以及两者界面黏结力时就会造成开裂. 本研究采用-10 ℃小梁弯曲试验研究半柔性材料的抗裂性能,试验结果见表 4.



表 4 低温弯曲测试结果  
Table 4 Low temperature bending test results

E/A	抗弯拉强度/MPa	最大弯拉应变/ $\mu\epsilon$	弯拉劲度模量/MPa
0.0	7.28	2 083	3 495
0.2	7.01	2 229	3 145
0.4	6.42	2523	2 545
0.6	6.18	2 662	2 322
0.8	6.12	2 374	2 578
1.0	6.08	2 074	2 932
SMA-13	8.26	2 892	2 856
水泥砂浆制备半柔性材料	8.02	950	8 442

材料的弯拉劲度模量越小、最大弯拉应变越大,那么材料的低温抗裂性能越好. 表 4 的试验结果表明:未掺加水性环氧树脂及乳化沥青的半柔性材料的最大弯拉应变不到 1 000  $\mu\epsilon$ , 仅掺加乳化沥青的半柔性材料的最大弯拉应变为 2 000  $\mu\epsilon$  左右,乳化沥青的掺加亦明显降低材料整体的刚度,但是较之 SMA-13 的低温抗裂性能要差,这是由于水泥水化产物与沥青基材料的低温收缩系数不一致,这直接影响了普通半柔性材料的低温抗裂性能. 随着水性环氧树脂的掺量提高,半柔性材料的弯拉劲度模量呈现先减小后增大的趋势、最大弯拉应变呈现先增大后减小的趋势,因此低温抗裂性能是先增强,后降低的趋势. 这是因为,在水性环氧树脂掺量小于等于 0.6 的时候,环氧固化物与水泥基材料将沥青基材料固定住,在温度降低的时候,沥青基材料本身是要产生收缩的,但是环氧固化物本身的高强黏结性能将这种收缩应力吸收,从而提高了半柔性的低温抗裂性能. 但是,当水性环氧树脂掺量超过 0.6 的时候,过量的环氧固化物除了与沥青基材料胶黏以外,还有部分游离的成分,而环氧树脂本身也是一种低温脆性材料,因此这个时候尽管其可以缓解沥青基材料的收缩应力,但是它本身却也开始出现收缩应力,进而导致整个材料的低温抗裂性能降低.

4 抗裂机理

水性环氧树脂-乳化沥青-水泥三相胶结形成的胶浆材料灌注于基体沥青混合料之中,显著改善了半柔性路面材料的低温抗裂性能. 本研究采用扫描电子显微镜 SEM (scanning electron microscope) 测试复合胶结体系的微观形貌,分析水泥水化产物、水性环氧树脂固化产物与乳化沥青破乳产物的分布结构,具体测试图见图 1~图 4,其中图 1 为 28 d 纯水泥水化产物、图 2 为 28 d 水性环

氧树脂+水泥水化产物(E+C)、图 3 为 28 d 乳化沥青+水泥水化产物(A+C)、图 4 为 28 d 水性环氧树脂+乳化沥青+水泥水化产物(E+A+C).

图 1 表明:28 d 纯水泥水化产物形貌为团簇状 C-S-H 凝胶为基体,针棒状钙矾石贯穿其中,整体材料有明显空隙. 对比图 1,由图 2 知:颜色较暗的部分是水性环氧树脂固化产物,呈现亮色的未水化水泥颗粒及水化产物 C-S-H 凝胶与环氧树脂固化产物交织共生,形成了较纯水泥水化试样明显致密的结构,但是未见针棒状晶体钙矾石生成. 对比图 1,由图 3 知:光滑成片、色泽暗淡的沥青材料与亮色、层状或团簇状水泥水化产物搭接交织, C-S-H 凝胶与针棒状钙矾石交联,整体表现为孔隙较大的骨架网状结构. 图 4 为 28 d 三相复合胶结体系 SEM 形貌图,整体结构为以平滑连续、颜色暗淡的沥青质材料为连续相、褶皱体的水性环氧固化产物为分散相、亮色团簇状水泥水化产物搭接其中,形成了更具空间立体感的结构. 相比较图 2、图 3 微观形貌图,三相胶结体系立体结构增强、明显空隙未见、体系更为致密. 在沥青基体表面可以明显看到除了有较大的水泥水化产物与环氧固化物交联共生体外,还有一些微微凸起的水化产物,这也进一步说明了复合胶结体系的空间交织网络

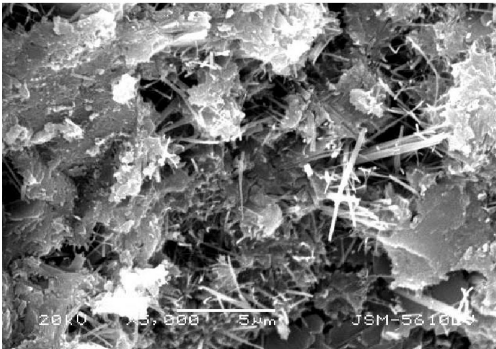


图 1 纯水泥水化 28 d 扫描电镜( $\times 5\,000$ )

Fig.1 Scanning electron microscopy image of pure cement hydration

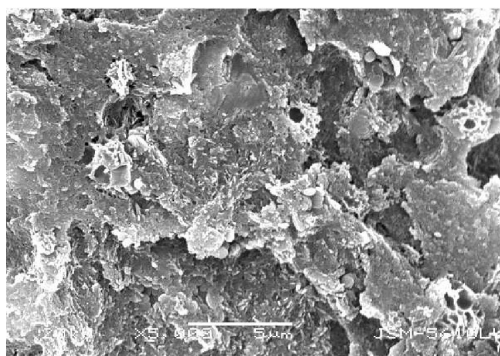
图 2 E+C 28 d 扫描电镜( $\times 5\,000$ )

Fig.2 Scanning electron microscopy image of E+C

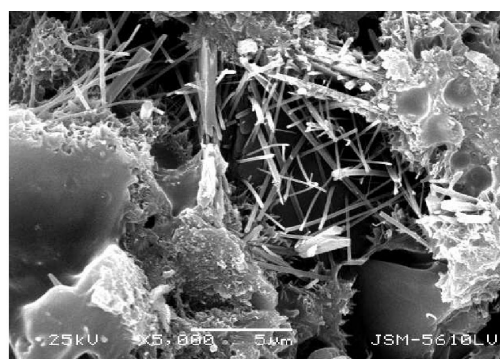
图 3 A+C 28 d 扫描电镜( $\times 5\,000$ )

Fig.3 Scanning electron microscopy image of A+C

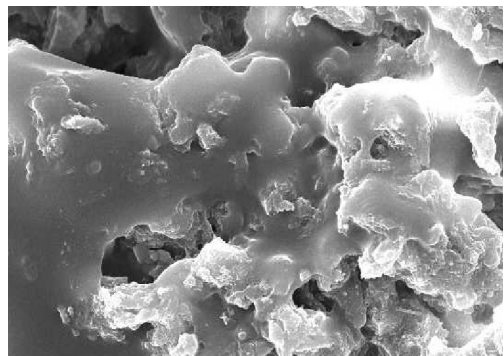
图 4 E+A+C 28 d 扫描电镜( $\times 5\,000$ )

Fig.4 Scanning electron microscopy image of E+A+C

结构。

结合微观形貌分析可知,相较于水泥砂浆作为灌浆材料,复合胶结体系的连续相组分由有干缩效应的水泥水化产物转变为具有黏弹特性的沥青基材料,一方面胶浆材料与基体沥青混合料的协同变形能力加强了,另一方面水性环氧树脂固化产物加强了胶浆与基体沥青混合料的界面黏结力,综合作用下增强了半柔性材料的抗裂性能。

## 5 结 语

a.采用水性环氧树脂-乳化沥青-水泥三相复合胶结体系制备的半柔性路面材料较水泥砂浆制备的半柔性路面材料具有显著的低温抗裂性能,

当  $E/A=0.6$  时,半柔性路面材料的最大弯拉应变达到  $2\,662\,\mu\varepsilon$ ,接近 SMA-13 的水平。

b.抗裂机理研究表明:三相胶结体系形成以沥青材料为连续相、水性环氧树脂为改性分散相、水泥水化产物为衔接体的三维空间网络结构,既改善了水泥浆材料的干缩应力,同时增强了胶浆与基体沥青混合料的界面黏结力。

## 致 谢

感谢深圳市科学技术创新委员会对本研究的资助!感谢课题研究人员侯茜茜、黄志松、邱群聪协助完成部分实验及数据处理工作!

## 参考文献

- [1] 彭波. 沥青混合料集料几何特性与结构研究 [D]. 西安:长安大学, 2008:4-10.  
PEN Bo. Study on geometric characteristics and structure of asphalt mixture aggregate [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008:4-10. (in Chinese)
- [2] 杜顺成. 沥青混合料高温稳定性评价指标和级配设计方法研究[D]. 西安:长安大学, 2007:2-6.  
DU Shun-cheng. Study of evaluation index of high-temperature stability and design methodology for asphalt mixture [D]. Xi'an: Chang'an University, 2007: 2-6. (in Chinese)
- [3] 黎振民. 灌注橡胶粉的半柔性路面复合材料温度稳定性研究[D]. 柳州:广西科技大学, 2013:10-15.  
LI Zheng-min. The composite temperature stability study on Perfusion rubber powder semi-flexible pavement [D]. Liuzhou:Guangxi University of Science and Technology, 2013:10-15. (in Chinese)
- [4] 张大可,成长庆,吴国雄. 半柔性路面水稳定性及低温抗裂性能分析[J]. 重庆交通学院学报,2007,3(26): 55-57.  
ZHANG Da-ke, CHENG Chang-qing, WU Guo-xiong. Water susceptibility and crack resistance at low temperature of semi-flexible pavement [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2007, 26(3): 55-57. (in Chinese)
- [5] 张荣鹏. 高性能灌注式半柔性路面材料的研究与应用[D]. 武汉:武汉理工大学, 2009:2-10.  
ZHANG Rong-kun. Research and application on high-performance pouring semi-flexible pavement material [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009: 2-10. (in Chinese)
- [6] 吴丹. 半柔性路面材料抗疲劳性能的试验研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2009:25-30.  
WU Dan. Research on fatigue property of semi-flexible

- pavement[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2009:25-30. (in Chinese)
- [7] 黄冲. 半柔性路面材料的体积稳定性与抗裂性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010: 5-10.
- HUANG Chong. Research on volume-stability and crack-resistance of semi-flexible pavement material [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010: 5-10. (in Chinese)
- [8] 周晓军, 沈丽娟. 沥青混合料结构与强度的认识[J]. 民营科技, 2008(2): 156-157.
- ZHOU Xiao-jun, SHEN Li-juan. Knowledge about structure and strength of the asphalt mixture[J]. Private science and technology, 2008(2): 156-157. (in Chinese)
- [9] Setyawan. Development of semi-flexible heavy-duty pavements [J]. PhD Thesis University of Leeds, 2003, 143(5): 72-84.
- [10] 沈凡. 水泥-乳化沥青-水性环氧复合胶结钢桥面铺装材料研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012: 40-55.
- SHEN Fan. Research on composite steel bridge deck pavement of cement-emulsifying asphalt and waterborne epoxy [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012: 40-55. (in Chinese)

## Low-temperature cracking resistance of water-borne epoxy resin modified semi-flexible pavement

*SUN Zheng, HE Gui-ping*

Testing Center of Shenzhen City Road Traffic Engineering, Shenzhen 518049, China

**Abstract:** To improve the low temperature crack resistance of traditional pavement, semi-flexible pavement was prepared by using cement-emulsified asphalt-waterborne epoxy resin three-phase organic inorganic composite materials as grouting material. The mass ratio of emulsified asphalt and cement in grouting materials was determined by the method of homogeneous and resilient modulus testing. Results showed that when the mass ratio of waterborne epoxy and emulsified asphalt was 0.6, the maximum bending strain and bending stiffness modulus reached  $2\ 662\ \mu\epsilon$  and  $2\ 332\ \text{MPa}$ , respectively, which was close to those of the stone matrix asphalt. SEM analysis illustrated that in the three-phase organic inorganic grouting system, three-dimensional network structure was formed, in which asphalt, waterborne epoxy resin and cement hydrates worked as continuous phase, dispersed phase and connector, respectively. This structure not only improved the cement material shrinkage stress but also enhanced the bonding force between mortar and matrix asphalt mixture.

**Keywords:** three-phase grouting system; dry shrinkage stress; weaving network

本文编辑: 龚晓宁

文章编号:1674-2869(2015)10-0028-05

# 活塞环自调心夹具摩擦学试验设计

秦襄培, 吴 丽, 鄢宁波, 曾 诚, 武胜超  
武汉工程大学机电工程学院, 湖北 武汉 430205

**摘 要:** 为了研究活塞环的摩擦学问题, 要使用活塞环上直接截取的一段试样进行实验, 如果使用常规夹具, 非对称的桶面活塞环作为销试样垂直于盘试样, 不能保证摩擦接触面在工作面上, 因此设计了一种活塞环自调心夹具, 使得活塞环试样可以倾斜放置。在随后的活塞环表面改性的筛选试验中, 使用了所设计的新夹具, 实验结果显示, 盘试样和环试样的磨损量分别降低了 1.5 倍和 2.3 倍, 实验筛选区分效果明显, 自调心夹具可以满足实验要求。

**关键词:** 摩擦学试验; 活塞环; 自调心; 夹具

**中图分类号:** TG75

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1674-2869.2015.10.006

## 0 引 言

内燃机<sup>[1]</sup>中缸套和活塞环摩擦副<sup>[2]</sup>的摩擦性能的好坏, 关系到内燃机的质量。内燃机在工作时为了保证热能可以最大限度的转化为机械能, 使得内燃机拥有更好的工作效率, 应当将缸套和活塞环保持良好的密封性能<sup>[3]</sup>。但是活塞在缸套里的往复运动带动活塞环与缸套形成摩擦, 若活塞环与缸套的间隙太小, 摩擦就会增大, 进而增大能量的损失<sup>[4]</sup>。另外, 其相互摩擦做功时, 缸套内壁温度上升, 直接影响其使用寿命<sup>[5]</sup>。研究表明: 内燃机在工作过程中因缸套-活塞环摩擦副引起的摩擦功耗占整个发动机摩擦功耗的 45%~65%<sup>[6]</sup>。近年来, 由于发动机向高速和强化方向发展, 活塞环的工作条件越来越苛刻, 对其耐磨性也提出了更高的要求, 因此对缸套和活塞环这对摩擦副的研究必须随之更新。在直接对活塞环进行摩擦磨损的试验<sup>[7]</sup>中, 为了模拟实际工况, 需要保证活塞环的摩擦方向和上下端面垂直且保持活塞环桶面中间接触, 但由于其截面形状过于复杂, 装夹是否可靠便成为整个试验成功的关键因素。现有的夹具仅能装夹规则截面形状的活塞环, 对于不规则截面形状则很难装夹, 同时现有夹具<sup>[8]</sup>装夹时, 接触点是活塞环的最高点, 而不是中间点, 这就表示无法保证磨痕处于中间位置。针对现有技术存在的不足, 有必要设计一种针对销盘式试验机的专用活塞环夹具, 并将夹

具装夹于销盘式试验机<sup>[9]</sup>上进行摩擦学试验来验证夹具是否能满足实际工作要求。

## 1 活塞环自调心夹具设计方案

活塞环截面有多种形状, 有些活塞环的形状不规则, 直接装上夹具, 不能保证工作面在接触面的最高点。比如正桶面环<sup>[10]</sup>, 直接装在常规夹具上面, 可以保证中间点就是接触的最高点, 而不对称的偏桶面环, 接触面的最高点偏离中间点位置, 不是主要接触工作面。夹具设计主要目的就是解决活塞环接触面最高点不在中间位置时, 如何进行试验的问题。传统夹具局限性大, 该设计自调心夹具, 通过两次装夹, 分别定位, 只要活塞环上下端面平行, 无论是何种活塞环截面形状都能通过所设计的夹具进行试验。

设计表明, 子夹具负责装夹活塞环截取试样, 母夹具与子夹具则通过一颗自调心钢珠定位。该夹具特点在于无论最高点在接触面何处, 只要转动自调心钢珠便能调试子夹具位置, 调试至截取试样和盘试样的摩擦面处于良好的面接触状态, 即接触点在接触面的中间位置。

夹具结构如图 1 所示, 活塞环试样装夹于子夹具上端开槽中, 子夹具下端与母夹具环内圆面中心处分别开有直角和钝角锥孔, 用于安置自调心钢珠。自调心钢珠在压力作用下能产生小范围的转动, 便于调心定位。另外, 子夹具与母夹具的接触

收稿日期: 2015-10-15

基金项目: 2012 年地方高校国家级大学生创新创业训练计划(201210490019)

作者简介: 秦襄培(1972-), 男, 湖北武汉人, 副教授, 博士。研究方向: 图像处理、摩擦学。

端面为桶面,母夹具的上端为圆柱槽状,圆柱槽的内径大于子夹具的直径,子夹具安装在母夹具的圆柱槽中.母夹具的底座开设工形槽,螺栓穿过工形槽将母夹具固定在销盘式试验机上.

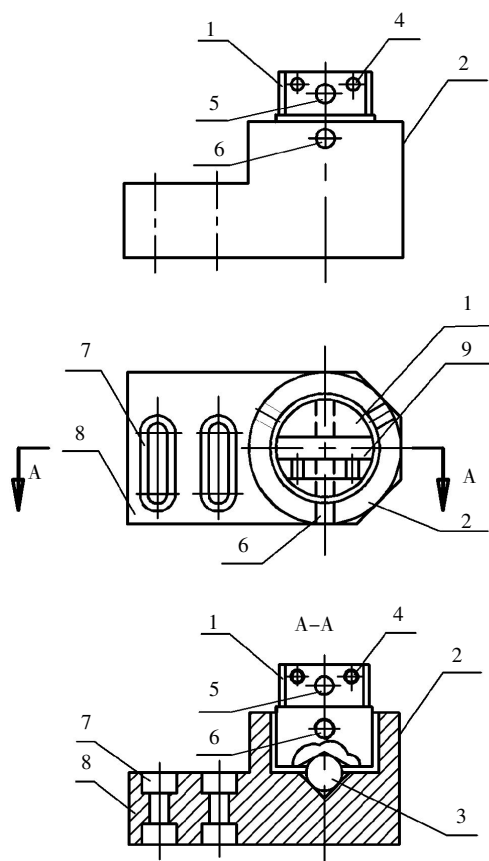


图 1 夹具结构设计图

Fig.1 A design drawing of fixture structure

注:1——子夹具体;2——母夹具体;3——自调心钢珠;  
4、6——螺纹孔;5、7——通孔;8——夹具底座

## 2 夹具实用性验证试验

### 2.1 安装与调试

首先解决活塞环试样的装夹,将活塞环试样放置在子夹具开槽之中,圆柱销通过安装平面对试样进行定位,再由两对称分布的螺栓将其固定.其次是子母夹具的安装,将子夹具放置在母夹具上圆柱槽,圆柱槽上均布三个螺纹通孔,分布对应子夹具下端所开螺纹孔,孔径相同.然后使用起自调心作用的钢珠和三个螺钉将其固定在母夹具上.通过调整螺钉松紧,子夹具可以在母夹具内转动,从而调整活塞环的位置达到指定状态.活塞环装夹示意图如图 2 所示.

试验时需要先验证活塞环位置调整是否到位.方法是在活塞环接触面上放一张复写纸,然后将活

塞环和盘试样接触,通过复写纸留下的痕迹便可判断活塞环位置是否正确.在接触的同时观察盘的外圆对应部分是否和环的端面垂直,如果没有达到要求则需要重新调整.



图 2 活塞环装夹示意图

Fig.2 Diagram of piston ring clamping

### 2.2 试验条件

试验活塞环材料为铸铁盘-渗陶瓷活塞环和渗陶瓷铸铁盘-渗陶瓷活塞环.试验机为 SST-ST 销盘式摩擦磨损试验机(西德)如图 3 所示.

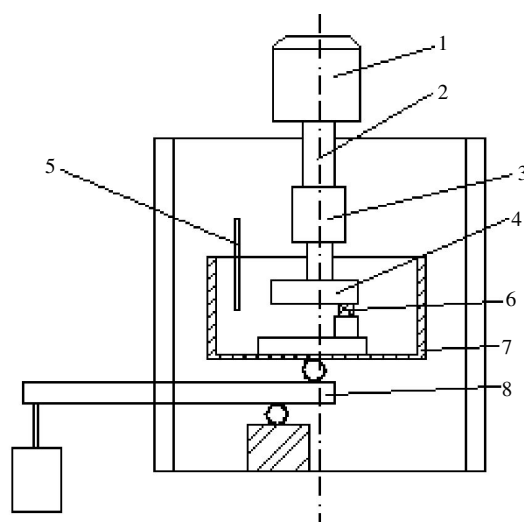


图 3 SST-ST 销盘式磨损试验机示意图

Fig.3 Diagram of SST-ST pin-on-disc tribo-tester

注:1——无级变速电机;2——传动轴;3——摩擦扭矩测定仪;  
4——上试样;5——温度测定仪;6——下试样;  
7——油盒;8——加载系统

表 1 试验参数

Table 1 Experimental parameters

试验参数	试验数据
试验负荷/N	100
滑动速度/m/s	0.70
环境湿度/%	50~65
试验周期/min	300
表面粗糙度	Ra:0.025
环境温度/℃	25
摩擦方式	渍油滑动
润滑油	N32 机械油

2.2.1 试验参数 试验在室温下进行,试验前在接触工作面上加一滴机油润滑,试验时具体参数如表 1 所示. 参考标准: DIN50320.

2.2.2 测试条件 采用西德制造的 HBM 扭矩传感器在线连续测量摩擦系数随时间变化曲线;采用 SST-ST 计算机数据分析系统进行数据采集及处理,采样周期 20  $\mu$ s;使用 Taylor Hobson 测量盘试样磨损截面积;使用 ImageAnalysis 测量活塞环磨损痕尺寸.

### 2.3 试验结果

两种材料的活塞环在 SST-ST 销盘式摩擦磨损试验机试验的结果如图 4、5 与表 2 所示.

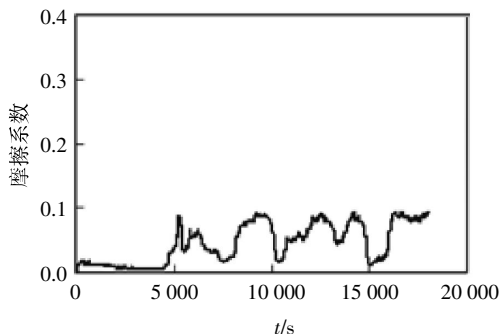


图 4 铸铁盘-渗陶瓷活塞环摩擦副

Fig.4 Friction pair of cast iron plate with ceramic piston ring

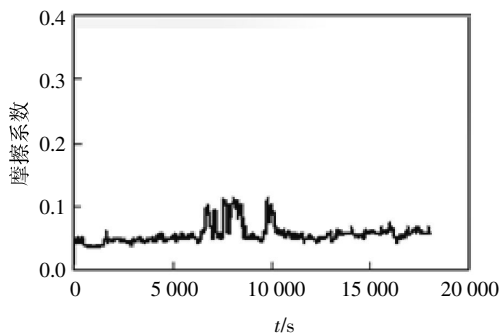


图 5 渗陶瓷铸铁盘-渗陶瓷活塞环摩擦副

Fig.5 Friction pair of infiltration ceramic iron plate with infiltration ceramic piston ring

表 2 试样磨损量

Table 2 The wear loss amount of sample

摩擦副	盘试样磨损/mm	活塞环磨损/mm
铸铁-渗陶瓷环	$1.69 \times 10^{-3}$	$9.01 \times 10^{-3}$
渗陶瓷铸铁-渗陶瓷环	$1.10 \times 10^{-3}$	$3.97 \times 10^{-3}$

## 3 试验分析

试验结果如图 6 所示,图 6 中的磨痕为活塞环接触表面磨痕,磨痕方向与端面垂直. 说明活塞环截取试样和盘试样的摩擦面处于良好的面接触状态, 摩擦方向和上下端面垂直. 试验同时发现,在同样的试验条件下铸铁渗陶瓷盘-渗陶瓷环摩擦副比铸铁盘-渗陶瓷环摩擦副摩擦系数略低,渗陶瓷铸铁盘和渗陶瓷环摩擦副比铸铁盘和渗陶瓷环摩擦副的磨损量分别降低了 1.5 倍和 2.3 倍. 这表明对活塞环进行渗陶瓷<sup>[11]</sup>工艺处理,有助于改善活塞环的耐摩擦性能,自调心夹具能够有效的区分出经表面改性后材料摩擦性能的改变. 使用活塞环自调心夹具在销盘式试验机上研究活塞环耐磨性不仅试验结果精确,方便快捷. 对不同形状的活塞环在销盘式试验机上试验都能真实的模拟出实际工作时产生的摩擦情况.

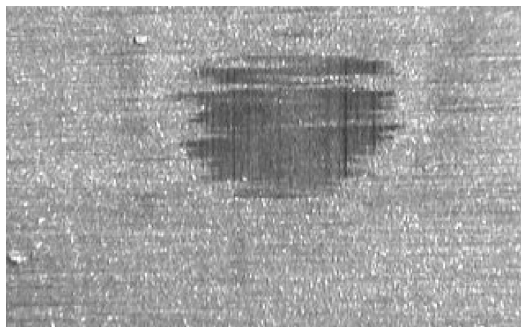


图 6 活塞环接触表面磨痕

Fig.6 The wear marks on the contact surface of piston ring

## 4 结 语

上述设计的一种销盘式试验机上专用夹具,为解决内燃机中活塞环试验时的接触问题,提高实验的精确性. 通过查阅活塞环磨损、内燃机工作原理及相关资料,经过试验,最终设计出了一种专用于销盘式试验机装夹活塞环截取试样的夹具,并通过试验证明所设计的夹具是成功的. 只要活塞环上下端面平行,无论活塞环是何种截面形状都可使用该夹具进行摩擦磨损试验,并能快速准确的实现自调心定位,调整方便快捷,极好地保证了实

验精度,为活塞环摩擦磨损试验提供了一种新的装夹方法. 试验证明,使用该夹具的试验结果与真实活塞环工作时情况一致,且准确有效,便于进一步研究提高活塞环耐磨性. 同时试验也证明,采用渗陶瓷处理后的活塞环耐磨性得到显著提高,该夹具的设计对研究活塞环耐磨性以及提高内燃机工作性能有一定指导作用. 对于提高活塞环耐磨性具有一定实用意义.

## 致 谢

感谢 2012 年地方高校国家级大学生创新创业训练计划(201210490019)对本研究的资助!

## 参考文献:

- [1] 周龙保. 内燃机学[M].北京:机械工业出版社,2011.  
ZHOU Long-bao. Internal combustion engine [M]. Beijing: China Machine Press, 2011. (in Chinese)
- [2] 王先义,孙军,张亮,等. 内燃机活塞环-缸套摩擦副摩擦学的研究进展 [J]. 小型内燃机与摩托车, 2014, 43(2): 86-91.  
WANG Xian-yi, SUN Jun, ZHANG Liang, et al. A Review of Research on Friction of Piston Ring-Cylinder Liner in Internal Combustion Engine [J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle. 2014, 43 (2): 86-91. (in Chinese)
- [3] 邓志明,欧阳光耀,李育学,等. 内燃机活塞环组密封性能研究[J]. 润滑与密封, 2011, 36(3): 60-64.  
DENG Zhi-ming, OU Yang Guangyao, LI Yu-xue, et al. Sealing Performance of Piston Rings of Internal Combustion Engine [J]. Lubrication Engineering. 2011, 36 (3): 60-64. (in Chinese)
- [4] 张向伟,金晓怡,钮冬科,等. 销盘摩擦副摩擦性能分析[J]. 机械设计与研究, 2013, 29(6): 135-137.  
ZHANG Xiang-wei, JIN Xiao-yi, NIU Dong-ke, et al. The Friction Performance Analysis of Pin Disk Friction Pair [J]. Machine Design and Research, 2013, 29(6): 135-137. (in Chinese)
- [5] 谢晓燕,夏永龙. 汽车发动机活塞环的磨损分析及提高活塞环使用寿命的对策[J]. 润滑与密封, 2003(3): 60-61.  
XIE Xiao-yan, XIA Yong-long. Analysis of the Engine's Piston Ring Wear and Countermeasures of Increasing the Service Life of the Ring [J]. Lubrication Engineering, 2003(3): 60-61. (in Chinese)
- [6] 袁成清,郭智威,娄朝辉. 柴油机缸套-活塞环切片往复试验专用夹具; 中国, 2013200627339 [P]. 2013-08-14.  
YUAN Cheng-qing, GUO Zhi-wei, LOU Chao-hui. Reciprocal sliding test of Diesel Cylinder-Ring Special fixtures; China, 2013200627339 [P]. 2013-08-14. (in Chinese)
- [7] 刘伟达. 内燃机活塞环-缸套摩擦磨损过程性能研究 [J]. 柴油机设计与制造, 2006, 14(3): 25-28.  
LIU Wei-da. The study of properties of internal combustion engine piston ring-cylinder friction wear process [J]. Design & Manufacture of Diesel Engine, 2006, 14 (3): 25-28. (in Chinese)
- [8] 瞿志俊. 活塞环干摩擦试验夹具设计 [J]. 煤矿机械, 2010, 31(11): 122-123.  
QU Zhi-jun. Clamp design of piston ring for oil-out lubrication test [J]. Coal Mine Machinery, 2010, 31(11): 122-123. (in Chinese)
- [9] 汪选国. 销盘滑动磨损试验的仿真方法研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.  
WANG Xuan-guo. The study on simulation method of pin-on-disc sliding wear test [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [10] 武冬馥. 桶面活塞环研磨夹具设计参数的探讨 [J]. 内燃机配件, 2000(2): 26-28.  
WU Dong-fu. Discussion on the design parameters of the piston ring of the barrel surface [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2000(2): 26-28. (in Chinese)
- [11] 周永福,袁文,马国英. 渗浸陶瓷活塞环的磨损特性及应用 [J]. 内燃机与配件, 2005(5): 4-7.  
ZHOU Yong-fu, YUAN Wen, MA Guo-ying. Abrasion characteristic and application of ceramic penetration piston ring [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2005(5): 4-7. (in Chinese)

## Design of self-adjusting tribo-tester fixture for piston ring

*QIN Xiang-pei, WU Li, YAN Ning-bo, ZENG Cheng, WU Sheng-chao*

School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;

**Abstract:** To study the tribological problem of piston ring, a section cut from real piston is used to do experiment. If the convention fixture is used, the unsymmetrical drum piston ring is perpendicular to disc, which cannot guarantee friction surface lies on working surface. A self-adjusting fixture was designed to ensure that the piston ring sample can be inclined. The new designed fixture was used in the following screening tests of piston ring surface modification. The results show that the wear loss of disc sample and the ring sample decrease 1.5 and 2.3 times respectively. Results of screening test are distinguished, and the self-adjusting fixture can meet the requirements of the experiment.

**Keywords:** tribo-tester; piston ring; self-adjusting; fixture

本文编辑:陈小平



文章编号:1674-2869(2015)10-0033-07

# 基于前馈神经网络的智慧城市空巢老人识别

冯先成<sup>1</sup>,李 寒<sup>2</sup>,周 密<sup>1</sup>,郭耀飞<sup>1</sup>

1.智能机器人湖北省重点实验室(武汉工程大学),湖北 武汉 430205

2.北京汉通达科技有限公司,北京 100081

**摘 要:**随着社会老龄化进程的加快,空巢老人的数量呈上升趋势,老龄化成为一个不容忽视的社会问题.通过对空巢老人手机用户的识别的数据分析,提出识别信息完整的用户与信息缺失的用户的两个模型.基于正常的用户信息表,空巢老人及其子女的数量可以准确识别,当用户的信息不够充足时,采用前馈神经网络算法,结果显示其空巢老人的识别率可以达到 73.3%.通过识别模型,及时更新空巢老人的数据,为统计局等政府部门提供了简单有效的数据分析,有助于建设智慧城市,促进社会和谐.

**关键词:**智慧城市;构造识别函数;前馈神经网络;空巢老人

**中图分类号:** TP183

**文献标识码:** A

**doi:** 10. 3969/j. issn. 1674-2869. 2015. 10. 007

## 0 引 言

至 2012 年底,我国 60 岁及以上老年人口已达 1.94 亿,占总人口的 14.3%,在 2014 年已突破 2 亿,并以每年 3.2% 的速度增加.根据国际标准,我国已经进入老年型社会.随着社会老龄化程度的不断加深,孤单老人数量呈上升趋势,现如今成为一个不可忽视的社会问题.目前,我国中西部地区的城乡空巢家庭超过 50%,社会老龄化直接导致社会养老等难题,特别是空巢老人、家庭的健康和安全生活,是智慧城市评价指标体系建设的一个重要指标,需要整个社会、家庭、社区、政府及个人的共同努力,因此,建设智慧城市的体系架构,有利于社会和谐.

## 1 空巢老人与其子女的识别模型

### 1.1 空巢老人识别模型的建立

建立空巢老人识别模型,需要包含空巢老人的用户信息数据,主要有:

用户信息:记录本地区用户(通信运营网对应的手机个人)基本情况、终端信息、计费数据;

通话清单:记录本城市用户(手机号码)在某月每天的通话(主/叫、市/话)情况;

短信清单:记录了上述用户在某月每天的短信发送/接收情况.

根据空巢老人的用户信息数据,建立空巢老人

的数据模型,识别本地区的空巢老人手机号码、所在区域、子女手机号码等信息<sup>[1-2]</sup>.

对于大量的多特征的数据的识别问题,构造识别函数,运用神经网络进行识别.对于信息充分且正常的用户,构造识别函数具有识别准确,原理简单易行的优点.识别模型符号说明如表 1 所示.

表 1 符号说明

Table 1 Symbol description

符号	名称
$X_{cl1}$	主叫用户归属地(CERTI_LATN)
$X_{a1}$	主叫用户年龄(AGE)
$X_{tp}$	手机价格(TERMINAL_PRICE)
$X_{pl}$	套餐档次(元)(PROB_LEVEL)
$X_{ca}$	消费金额(CONSUME_AMT)
$X_{wf}$	流量费(WEB_FEE)
$X_{kl1}$	市话费(LOCAL_CALL_FEE)
$X_{a2}$	被叫用户年龄(AGE)
$X_{kl2}$	长途费(LONG_CALL_FEE)
$X_{cl2}$	被叫用户归属地(CERTI_LATN)
$X_{mf}$	漫游费(ROAM_CALL_FEE)
$X_{cf}$	通话费(CALL_FEE)
$X_{vaf}$	增值费(VALUE_ADDED_FEE)
$X_{sf}$	短信费(SMS_FEE)
$T_1$	通话时长,单位秒
$T_2$	通话开始时间
$N$	一周内的通话次数

收稿日期:2015-09-08

基金项目:住房和城乡建设部科研项目(2015-R3-007);武汉工程大学研究生教育创新基金(CX2014045)

作者简介:冯先成(1968-),男,安徽庐江人,副教授,硕士.研究方向:光纤网络通信及智慧城市技术.

通过分析其区号差别,年龄差距,通话的类型,通话的时间段等指标,实现了对空巢老人较为精准的识别,并通过区号将其所得空巢老人集合分为与子女同城的空巢老人与非同城的空巢老人两类.首先进行对通话信息的预处理,筛选出能进行识别的数据,在此基础上先判别主叫与被叫是否为父母与子女的关系,接着判别主叫与被叫是否在同一个城市,得出与子女同城的空巢老人与非同城的空巢老人集合.

## 2.2 空巢老人识别模型的函数构造

在对用户信息进行合理分析后,构造了一个评判空巢老人用户的识别函数,该函数是一个多变量的函数,对各个变量进行分开评判,最后以乘积的形式得到结果<sup>[1-2]</sup>.

选取主叫被叫年龄差距,通话时间,通话时长,通话次数为函数自变量,构造综合识别函数  $G_i(x)$ ,其函数关系如下:

$$G_i(x)=G_i(X_{a1},X_{a2},T_1,T_2,N)=C_1(X_{a1})\times C_2(T_1)\times C_3(X_{a1},X_{a2})\times C_4(T_2)\times C_5(N) \quad (1)$$

其中用户特征矩阵  $X=[X_{a1},X_{a2},T_1,T_2,N]$

$$\text{用户年龄识别函数 } C_1(X_{a1})=\begin{cases} 0 & X_{a1}<40 \\ 1 & X_{a1}\geq 40 \end{cases} \quad (2)$$

通话时间识别函数为:

$$C_2(T_1)=\begin{cases} 0 & T_1>3\ 600 \\ 1 & 300\leq T_1\leq 3\ 600 \end{cases} \quad (3)$$

年龄差距识别函数为:

$$C_3(X_{a1},X_{a2})=\begin{cases} 0, & 20\leq X_{a1}-X_{a2}\leq 40 \\ 1, & 20\geq X_{a1}-X_{a2} \text{ 或 } X_{a1}-X_{a2}>40 \end{cases} \quad (4)$$

通话起始时间识别函数为:

$$C_4(T_2)=\begin{cases} 0, & 19:00\leq T_2\leq 22:00 \\ 1, & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

一周内的通话次数识别函数为:

$$C_5(N)=\begin{cases} 0, & 0<N<2 \\ 1, & N\geq 2 \end{cases}$$

考虑到对于一个用户,由于通话对象不同,识别函数的结果也不同,对于  $G_i(x)$ 同时取 1 和 0 的用户,定义函数  $G(x)$ :

$$G(x)=\begin{cases} 0, & \text{不存在 } G_i(x)=1 \\ 1, & \text{存在 } G_i(x)=1 \end{cases}$$

当  $G(x)=0$ ,表示该用户不是空巢老人, $G(x)=1$ ,表示该用户是空巢老人.这样,就识别出空巢老人的集合.部分结果如表 2 所示.

表 2 空巢老人集合

Table 2 Empty-nest elders collection

主叫号码(空巢老人)	被叫号码(子女)	年龄差距	主叫区号	被叫区号	通话次数
4 084	1 280 855	22	551	551	3
5 272	845 318	25	551	551	2
12 934	687 445	29	551	551	4
18 552	277 172	28	551	551	2
21 372	1 279 748	22	551	551	3
28 071	600 336	27	551	551	2
33 418	994 674	23	551	551	2
37 155	881 493	22	551	551	2
44 708	1 337 159	29	551	550	3
57 225	1 320 309	29	551	551	4
61 444	368 731	23	551	551	5
63 084	324 831	24	551	551	3

在所识别出的空巢老人集合中,以与子女是否同城为依据,进一步划分:

$$C_6(X_{d1},X_{d2})=\begin{cases} \text{非同城空巢老人 } X_{d1}\neq X_{d2} \\ \text{同城空巢老人 } X_{d1}=X_{d2} \end{cases} \quad (6)$$

## 2.3 空巢老人识别流程

空巢老人识别流程如图 1 所示.在通话清单中被叫号码有异网非本运营商的用户,在用户资料中不能找出其个人信息,因此,在通话信息预处理过程中去除被叫为 y 和 g 开头的号码.

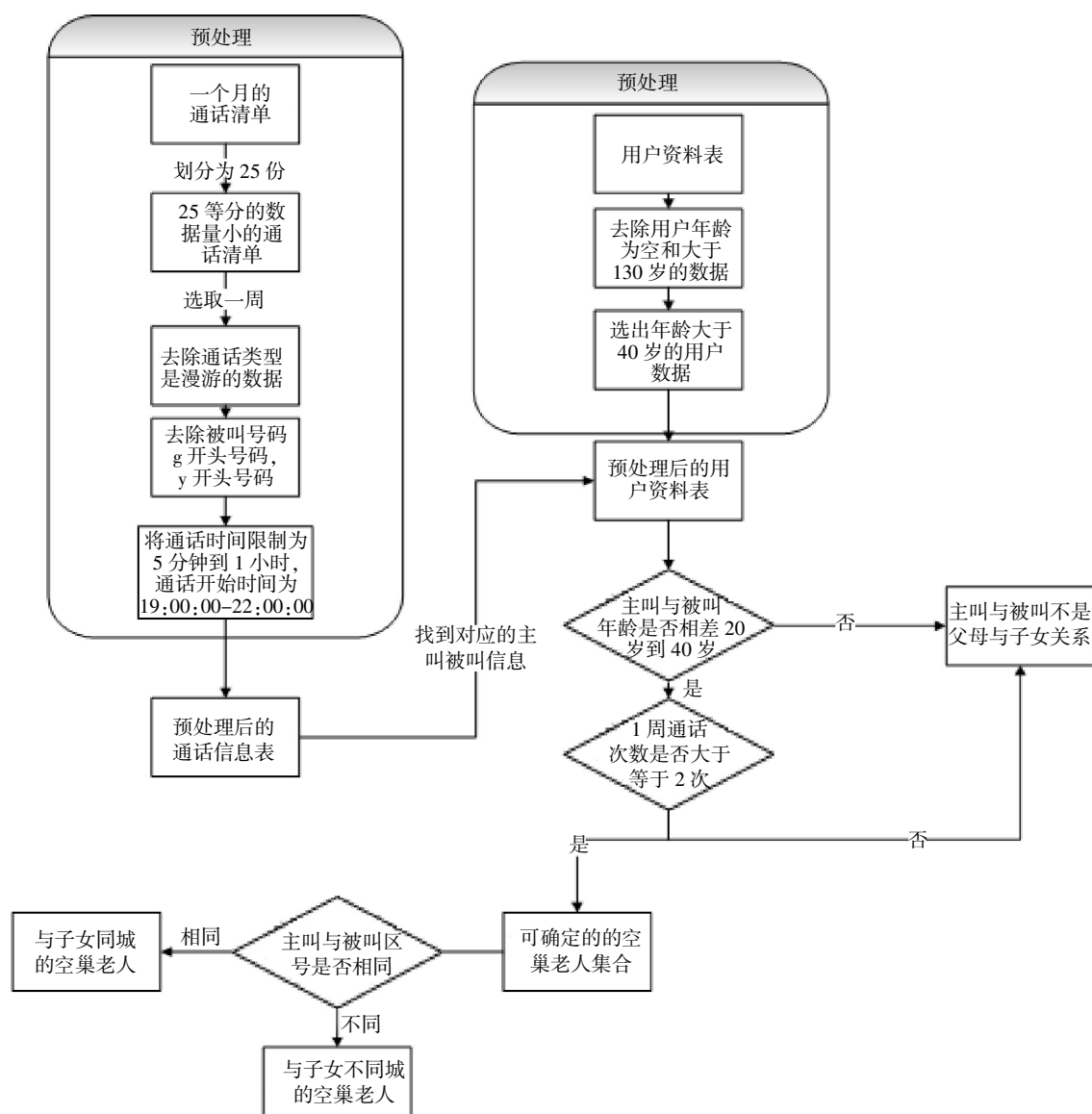


图 1 空巢老人识别流程

Fig.1 Recognition process of empty-nest elders

### 3 空巢老人识别系统的数据分析

通过合理分析空巢老人识别系统的数据,在对特征进行粗略的筛选后,选出手机价格,套餐档次等 7 个特征,如图 2 所示。

为了选择出对用户识别最有效的特征,利用识别函数识别的结果,将空巢老人集合与非空巢老人集合在不同的特征组合下进行线性可分性判断(其中圆圈表示非空巢老人用户,正方形表示空巢老人集合)。

给出两类集合样本各 50 个,7 个特征两两组合共有 21 种组合,几种特征组合的线性可分性如图 3 所示。

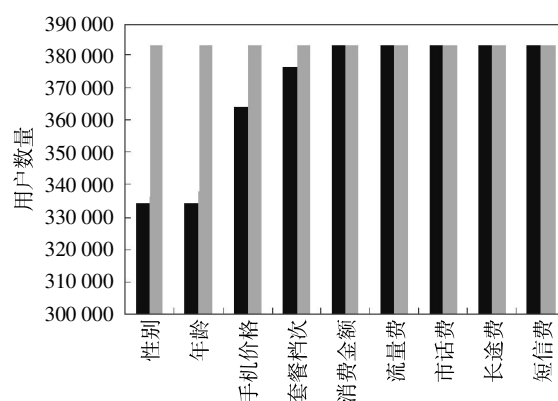


图 2 识别系统的数据分析

Fig.2 Data analysis of identification system

注: ■ 特征总数量; ■ 用户数量

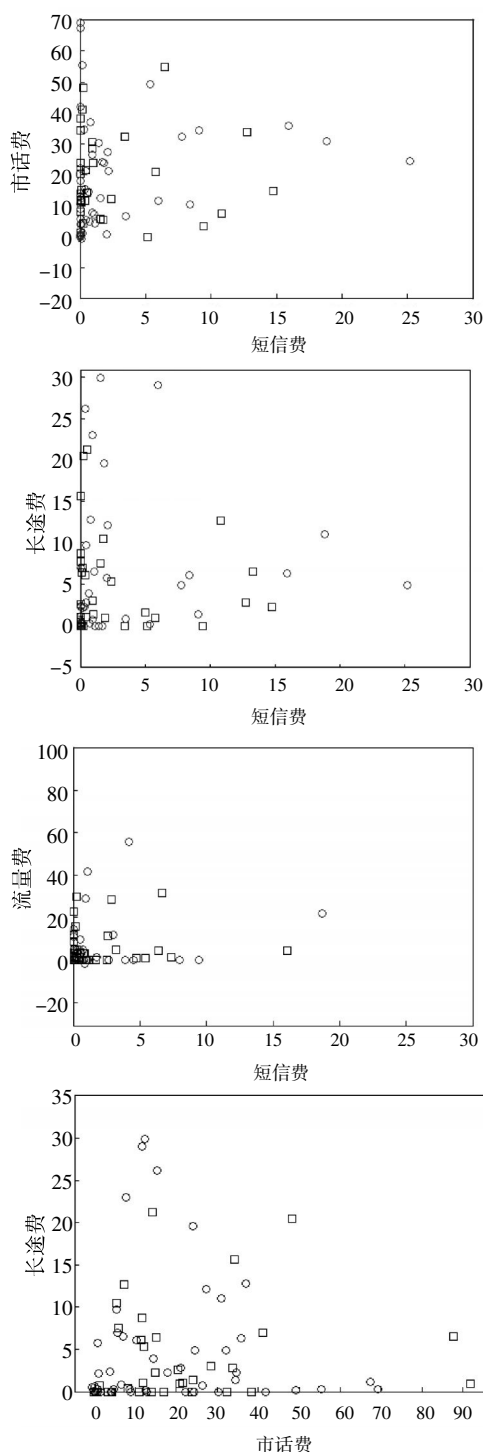


图 3 特征组合的线性可分性

Fig.3 Linear separability of feature combination

## 4 基于前馈神经网络的识别结果的评估

前馈网络主要实现函数逼近、模式识别、分类、数据压缩。前馈神经网络模型如图 4 所示。本模型中运用前馈神经网络的模式识别功能,搭建 2 层前馈神经网络,隐层激活函数为 sigmoid 函数,softmax 为输出层函数,训练算法为共轭梯度法<sup>[3-5]</sup>。

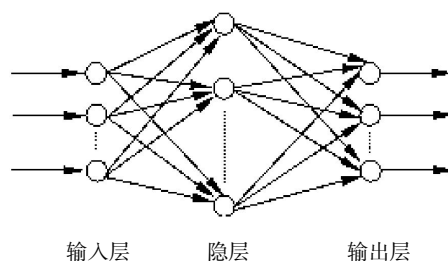


图 4 前馈神经网络模型

Fig.4 Networks model of feed forward neural

### 4.1 样本数据的选取

采用前馈神经网络,采集足够多的典型性好和精度高的样本数据,必须将收集到的样本数据随机分成训练样本、检验样本(10%以上)和测试样本(10%以上)三部分<sup>[3-5]</sup>。因此,在前馈神经网络模型的输出结果样本中,随机选取 100 个空巢老人与 100 个非空巢老人样本,选取其中 75%的训练样本,15%用于检验,15%用于测试。

### 4.2 输入/输出变量的确定及其数据的预处理

为了选择出对用户识别最有效的特征,将这些特征进行组合,7 种特征总组合数为  $c_7^1 + c_7^2 + c_7^3 + c_7^4 + c_7^5 + c_7^6 + c_7^7 = 2^7 - 1 = 127$  个,只选取 2 个特征的组合与 3 个特征的组合作为输入,运用 MATLAB 神经网络模式识别工具箱对样本进行识别,神经网络的结构如图 5 所示。

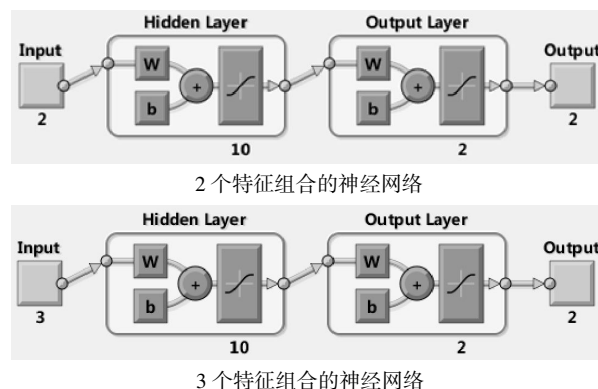


图 5 神经网络结构

Fig.5 Neural network structure

两个特征的组合:(长途费,市话费),(市话费,流量费),(短信费,长途费),(市话费,短信费),(短信费,流量费),(流量费,长途费),(套餐档次,消费金额)。三个特征的组合:(短信费,市话费,长途费),(市话费,长途费,流量费),(手机价格,套餐档次,消费金额)。

### 4.3 识别结果的评估标准

识别效果图的各字段含义:

Training confusion matrix (训练样本效果图)  
Validation confusion matrix (检验样本效果图)  
test confusion matrix (测试样本效果图)  
all confusion matrix (总效果图)  
Training ROC (训练样本 ROC 曲线)  
Validation ROC (检验样本 ROC 曲线)  
Test ROC (测试样本 ROC 曲线)

ROC (receiver operator characteristic curve)曲线:接收特性曲线,曲线下面积越大,识别准确性越高. 在每个效果图中,位于第三行第三列的数值为网络对该样本的识别准确率,该项指标数值越接近于 1,表示网络识别效果越好. 几种组合的识别效果如图 6 所示.

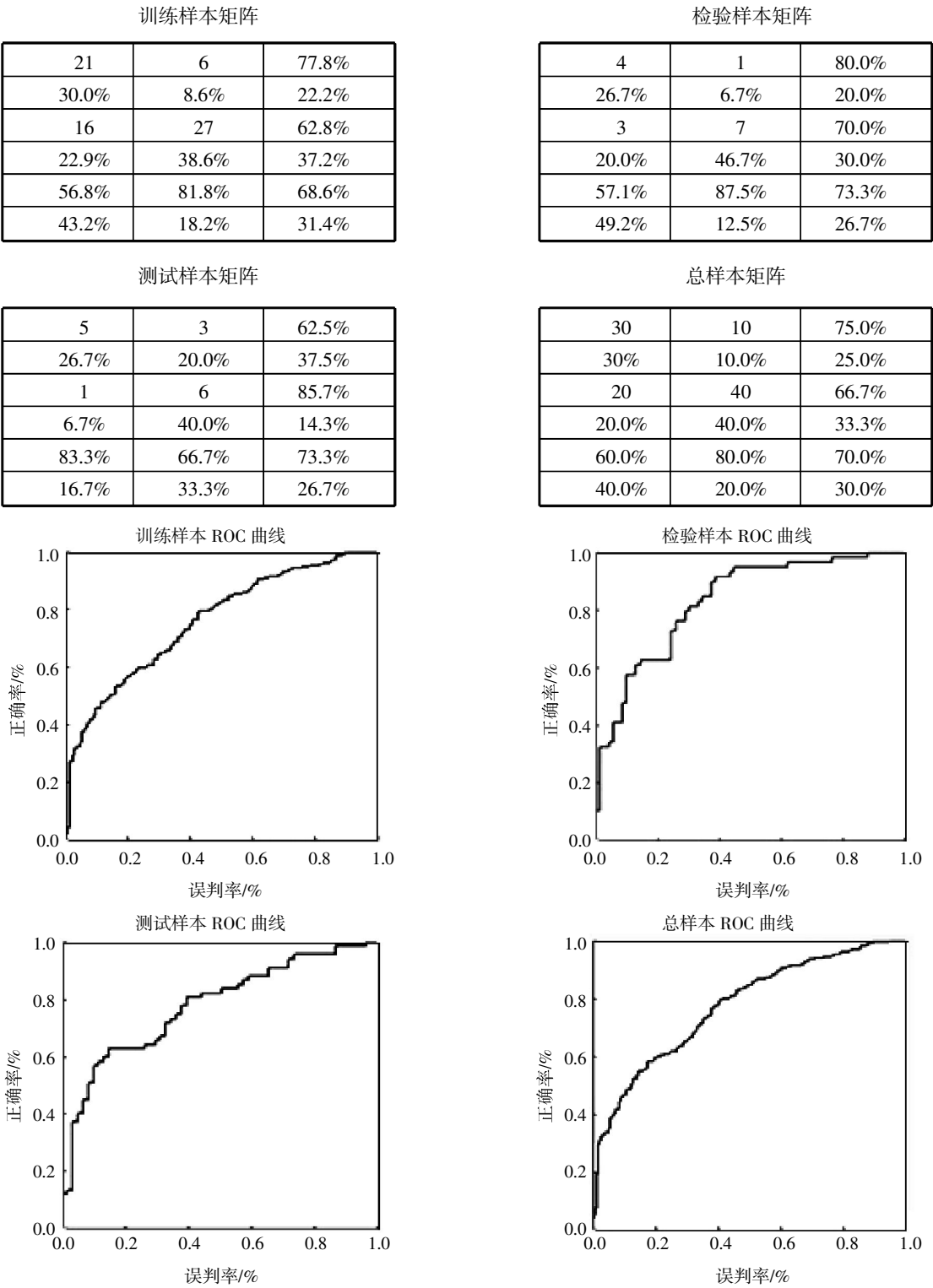


图 6 各组合的识别效果

Fig.6 Recognition effects of each combination

通过对比,发现选取(手机价格,套餐档次,消费金额)这一组特征作为网络的输入时,能得到最好的识别效果,无论从识别的准确率(训练样本 68.6%,检验样本 73.3%,测试样本 73.3%),还是从 ROC 曲线显示的诊断准确性来看,以该组特征为判据识别空巢老人都具有良好的效果。

#### 4.4 算法及模型评价

神经网络算法以其强大的非线性处理能力,自组织和自适应的学习性能等特点,广泛应用于模式识别、优化组合、机器人控制、信号处理等领域。神经网络中使用最为广泛的就是前馈神经网络算法<sup>[6-7]</sup>。

上述模型通过对用户资料信息、通话与短信信息的多级判别,能筛选出比较符合条件的空巢老人,原理简单,易于实现。

但是模型的筛选条件不够完善,对短信表没有进行充分的利用,对于子女在外地,家庭条件不富裕的用户来说,发短信往往比打电话流行。因此,对于经常发短信而打电话较少的用户,仅仅通过用户资料表和通话清单难以将其识别出来<sup>[8]</sup>。

## 5 结 语

通过前馈神经网络算法建立的数学模型,在所给的通话清单数据中,识别出空巢老人及其子女的电话号码,给老年人送去别样的关怀。比如,在节假日给老人发送祝福的短信,并且通过短信方式提醒他们的子女给老人送去祝福。根据空巢老人的通话特点,给空巢老人以最低的通信话费来与自己的子女联系。通信运营商也可以在平时向空巢老人发送有利心理健康、温暖的短信,让他们感受到社会对他们的关爱。

通过上述模型,将所确定的空巢老人名单及信息交给社会福利组织、志愿者组织以及社区养老机构,便于他们举办一些例如登门探望等送爱心活动,为老年人提供集体生活照料、医疗保健、精神慰藉等综合服务。还可以每年更新空巢老人的数据,为统计局等统计机构提供了简单有效的途径来更新数据,构建和谐社区。

#### 参考文献:

[1] 沈斌,漆奋平,江维,等.基于 BP 网络的超滤膜分离中药成分的分析与实现[J].武汉工程大学学报,2009,31

(9):55-58.

SHEN Bin, QI Fen-ping, JIANG Wei. Analysis and implement of separate chinese medicine based on BP network[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2009, 36 (9): 55-58. (in Chinese)

[2] 黄登斌,夏学知.基于用户分类信息的空巢老人挖掘模型[J].计算机与数字工程,2013(3):440-441.

HUANG Deng-bin, XIA Xue-zhi. Mining model of empty nester based on the classification of the users information [J]. Computer & Digital Engineering, 2013 (3): 440-441. (in Chinese)

[3] 李翔,苏成,王韶君,等.基于模糊神经网络的综合评判方法[J].计算机工程,2009,35(6):200-203.

LI Xiang, SU Cheng, WANG Shao-jun. Comprehensive evaluation method based on fuzzy neural network [J]. Computer Engineering, 2009, 35(6): 200-203. (in Chinese)

[4] 王勇,付志红,张淮清.基于前馈神经网络的电网基波高精度检测[J].电网技术,2011(8):124-128.

WANG Yong, FU Zhi-hong, ZHANG Huai-qing. High precision detection of fundamental of power grid based on back propagation neural network [J]. Power System Technology, 2011(8): 124-128. (in Chinese)

[5] 刘瑞叶,黄磊.基于动态神经网络的风电场输出功率预测[J].电力系统自动化,2012(11):19-22.

LIU Rui-ye, HUANG Lei. Wind power forecasting based on dynamic neural networks [J]. Automation of electric Power Systems, 2012(11): 19-22. (in Chinese)

[6] 蔡信,李波,汪宏华.基于神经网络模型的动力电池 SOC 估计研究[J].机电工程,2015(1):128-132.

CAI Xin, LI Bo, WANG Hong-hua. Estimation of state-of-charge for electric vehicle power battery with neural network method [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015(01): 128-132. (in Chinese)

[7] 杨帆,姜勇,杨元君.信息融合技术在矿井安全监测系统中的应用[J].武汉工程大学学报,2014,36(5):64-67.

YANG Fan, JIANG Yong, YANG Yuan-jun. Information fusion technology in application of mine safety monitoring system [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2014, 36(5): 64-67. (in Chinese)

[8] 刘扬,张振海.小波神经网络的无刷直流电机转子位置检测方法[J].武汉工程大学学报,2014(10):66-70.

LIU Yang, ZHANG Zhen-hai. Rotor position detection method of brushless motor based on wavelet neural Network [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2014(10): 66-70. (in Chinese)

## Recognition of empty-nest elders in intelligent city based on feedforward neural network

*FENG Xian-cheng<sup>1</sup>, LI Han<sup>2</sup>, ZHOU Mi<sup>1</sup>, GUO Yao-fei<sup>1</sup>*

1. Hubei Key Laboratory of Intelligent Robot (Wuhan Institute of Technology), Wuhan 430205, China;

2. MTCS Systems Engineering Co. Ltd., Beijing 100081, China

**Abstract:** Aimed at the social problems associated with empty-nest elders, two recognition models of empty-nest elders were presented based on the analysis of calling list and user information table. The empty-nest elders and their children's number can be identified by recognition function based on the normal user information table. Meanwhile the recognition accuracy rate can reach 73.3% using feedforward neural network algorithm when the information of a user is not sufficient. Moreover the database empty-nest elders can be timely updated by the recognition models, which can provide effective data for statistics bureau and other government departments. It is beneficial to the development of intelligent city and harmonious society.

**Keywords:** intelligent city ; recognition function; feedforward neural networks; empty-nest elders

本文编辑:陈小平

文章编号:1674-2869(2015)10-0040-05

# 基于直流力矩电机的位置控制伺服系统研究

于宝成<sup>1,2,3</sup>, 龙 冲<sup>1,2</sup>, 王春梅<sup>1,2,3</sup>

1. 武汉工程大学计算机科学与工程学院, 湖北 武汉 430205;
2. 智能机器人湖北省重点实验室(武汉工程大学), 湖北 武汉 430205;
3. 湖北省智能焊接装备工程技术研发中心, 湖北 武汉 430205

**摘 要:**为了满足工控平台能快速、稳定控制负载位置的需求,设计了一种基于直流力矩电机的位置控制伺服系统. 该系统的硬件部分主要由 ARINC429 通信卡、高性能 DSP 控制器、光电编码器、直流力矩电机和数据采集卡组成. 首先通过 ARINC429 通信卡发送根据协议产生的通信指令,用来控制电机的转速和位置. 再利用光电编码器和数据采集卡来反馈位置信息,最后在上位机上进行监控. 软件部分采用 labview 进行编写,上下位机通过自定义的通讯协议进行数据通信,上位机发送命令到下位机,下位机接收命令并处理后将结果反馈给上位机,从而实现对下位机平台的控制. 通过随动系统项目的应用测试,证明该系统功能稳定,能够满足实际项目的基本需求.

**关键词:**直流力矩电机;稳速控制;伺服控制;光电编码器

**中图分类号:**TP275

**文献标识码:**A

**doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2015.10.008

## 0 引 言

伺服系统又称随动系统,是用来精确地跟随或复现某个过程的反馈控制系统,其输出量能以一定准确度跟随输入量的变化而变化,伺服系统广泛应用于各种工业控制行业. 近几年,直流伺服控制系统飞速的发展,它能直接通过控制电枢电流,来进行对转矩与转速的控制,凭借它控制简单,调速性能优异的优点,使其在工业控制中具有广泛的应用<sup>[1]</sup>. 因此,这里主要采用光电编码器、DSP 控制器、直流力矩电机和数据采集卡等硬件来设计一个基于直流电机位置控制系统. 在本系统中,主要通过数据采集卡和直流电动机来采集数据和控制负载的位置,其中直流电动机的稳定性和高精度性对整个系统参数的测量具有重大的影响.

## 1 工作原理

伺服控制系统接收由上位机发送给 DSP 控制器的工作指令,根据先前制订的通信协议来对指令进行解析,进而输出控制电机精度和速度的指令信号,最后根据解析出的信号来控制直流电动机的转动速率和角度,并将角度相关信息经过编码器和数据采集卡反馈到上位机上. 同时在上位机软件上设定好采样频率,系统每隔 10 ms,通过把当前经

反馈得到的位置与速度值和预先设定的值进行比较,看是否在阈值范围内,如果不在,则继续按照给定的时间间隔来接受角度值,如果在阈值范围内,系统则会向电机发送停止命令. 最后使直流力矩电机能精确的控制负载在给定的时间内到达预先设定的位置. 在本系统中,由 DSP 控制器、直流力矩电机、光电编码器和数据采集卡构成反馈回路,其中负载电路,增量式光电编码器和数据采集卡相连接,通过数据采集卡来采集当前负载所在的位置和电机的速率,并能在上位机上给予友好的界面显示. 其工作原理如图 1 所示.

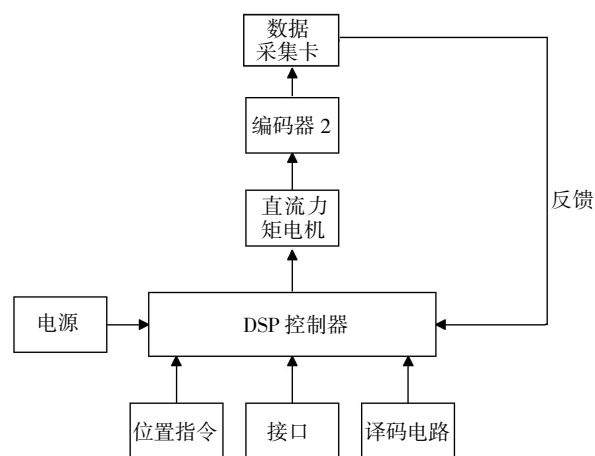


图 1 系统工作原理图

Fig.1 System working schematic diagram

收稿日期:2015-08-25

作者简介:于宝成(1974-)男,河南新乡人,副教授,博士. 研究方向:智能机器人,机电系统智能监测与控制.



## 2 伺服工作系统硬件设计

本系统硬件部分主要由 DSP 控制器、直流力矩电机、增量式光电编码器和数据采集卡等部分组成. 系统的控制部分主要以 DSP 控制器为核心, 利用其外围电路接口(电源模块电路、串行通信接口电路、数字模拟转换电路、增量式编码器接口电路等)来准确控制直流力矩电动机. 系统利用 DSP 接收上位机发送过来的控制指令, 通过转速电流双环调节器, 利用其 pwm 模块和 AD 模块的功能来输出控制电机运动的 pwm 波形. 将其增量式编码器接口电路与编码器相连接, 将通过编码器获得的信号经过细分处理, 最后反馈给上位机. 以此最终完成负载的位置伺服控制, 使负载的转动满足系统要求. 其中利用转速电流双闭环的控制示意图如图 2 所示.

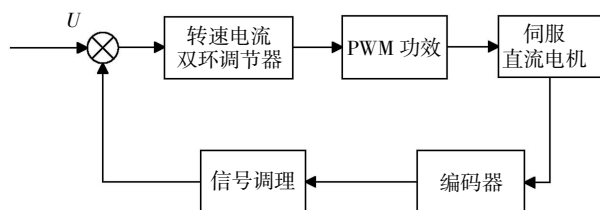


图 2 直流电动机转速电流双闭环示意图

Fig.2 Diagram of loop current velocity of DC motor

### 2.1 DSP 控制器

系统采用 TI 公司生产的 TMS320F2812 型号的数字处理器. 该型号处理器具有比较完善的外围控制接口和丰富的电机控制外设电路, 并且指令的完成时间比较短. 它具有高速信号处理和数字控制所必须的体系特点. 配合 pwm 脉冲发生器, AD 转换器和数字 I/O 接口等片上外设, 使之成为电机和其它控制领域应用的实现提供了良好的平台. 本系统中, 该控制器具有多达 16 位的模拟输入通道, 具有 AD 转换功能. 利用该控制器的 pwm 输出, 来对速度电流环进行控制. 可以通过连接光电编码器和该控制器上正交编码脉冲电路的编码和计数引脚, 来获得负载的位置和速率信息.

### 2.2 光电编码器

光电编码器是一种通过光电转换将输出轴上的机械几何位移量转换成脉冲、数字量或模拟量信号输出的传感器. 利用它可以实现角度、直线位移、转速等模拟物理量的测量<sup>[2]</sup>.

由于在本伺服系统中需要根据反馈的信号来不断地调整直流力矩电机的速率和位置, 因此主要利用光电编码器, 数据采集卡和上位机来构成一个位置环控制. 在负载机构上连有增量式光电编码

器, 其输出信号经过细分电路进行细分处理, 通过数据采集卡采集负载俯仰、方位和消旋的变化量, 在上位机上通过和初始设置的值比较来不断改变驱动信号, 以此来控制直流力矩电机和负载位置的不断变化, 最终达到系统的位置要求. 本系统中位置环和速度环的控制相辅相成, 使负载能精确、高速的到达目的位置. 系统采用中国电子科技集团公司第二十一研究所生产的 QA-45 光电编码器, 其具有重量轻、功能全、高频响应、分辨能力高、承载能力强、力矩小、耗能低等优点. 光电编码器主要由精密轴系、光电码盘、红外发光二极管、光电三极管和处理电路等几个部分组成, 其中光电码盘由编码码盘和狭缝码盘两个部分组成, 属于核心部件. 为了在负载上进行简便的安装, 码盘将采用耐用、轻便的金属结构. 其工作是通过光电角度传感器将轴系的角度信息转为光电信号, 传至细分计数电路部件. 通过细分计数电路部件对光电信号进行整形、判向、细分和计数, 最终将角度信息以 16 位总线数据方式并行输出.

### 2.3 直流力矩电机

直流力矩电机是一种具有软机械特性和宽调速范围的特种电机. 可以以较小输出转矩, 而具有较高的输出转速, 转速和输出扭力能独立进行调节, 使用方便, 操作简单, 比一般交流力矩电机具有更高的操控性. 其特点是低转速、响应快、特性线度好、过载能力强. 广泛应用于各种机械制造、高精度转动系统、以及雷达监控系统上<sup>[3]</sup>. 本系统采用由中国电子科技集团公司第二十一研究所生产的型号为 J72LY001 的直流力矩电动机.

**2.3.1 伺服系统电流速度闭环分析** 系统为了准确快速的控制负载的俯仰、方位、消旋的位置移动, 直流力矩电机运动的稳定性和精确性对负载的影响占有绝对因素. 为了使负载能在最短的时间内获得最大的加速度, 要发挥电动机的过载能力, 并且要加大电流. 同时当负载的转速达到稳态时, 电流也应该快速下降, 最后使电流保持恒定. 因此, 设计了双闭环调速控制系统. 当电流快速下降时, 此时是以电流负反馈为主. 当需要保持负载稳定转动时, 此时是以转速负反馈为主. 这样可以防止电枢电流在动态过程中超过既定的允许值, 从而可以使电枢电流能准确的随着控制电压指令不断的变化来准确控制电机的输出力矩, 就可以使负载能以较高的精确性和稳定性达到理想位置. 因此在本系统采用了两个调节器构成电流与速度的双闭环控制, 从而提高试验的精确性和稳定性.

2.3.2 电机模型 由于可以通过改变电流的大小来改变直流电机的转速,从而可以对负载进行转速控制.由基尔霍夫电压定律<sup>[6]</sup>可知直流力矩电机的动态方程为:

$$U_m = L_m \frac{dI_m}{dt} + R_m I_m + C_e \omega \quad (1)$$

其中  $U_m$  表示电机的输入电压,  $R_m$  表示电枢电阻,  $L_m$  表示电枢电感,  $I_m$  表示通过电枢的电流,  $\omega$  表示电机轴的转速,  $C_e$  表示电动势常数. 根据动力学方程得:

$$M = C_m I_m = M_L + f \omega_m J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2)$$

其中  $M$  为电磁力矩,  $C_m$  表示为转矩常数,  $f$  表示为集中粘性摩擦系数,  $M_L$  表示为负载力矩,  $J$  为电机的转动惯量. 由刚体的转动定律<sup>[7]</sup>, 电动机轴上的运动方程式为:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_f \quad (3)$$

其中  $M_f$  为电动机轴上的负载力矩. 整理得电机的微分方程:

$$T_d T_m \frac{d^2 n}{dt^2} + T_m \frac{dn}{dt} + n = \frac{U_m}{C_e} \quad (4)$$

其中  $T_d$  表示电枢回路的电磁时间常数,  $T_m$  表示机电常数,  $n$  表示电动机转速.

2.3.3 伺服系统电流速度闭环设计 本系统采用转速、电流双闭环调速系统. 该调速系统采用三相全控桥整流电路. 其中转速外环与电流内环均采用  $p_i$  控制. 对于电流闭环,  $p_i$  调节器的传递函数为:

$$W_m(s) = K_i \frac{\tau_s s + 1}{\tau_s s} \quad (5)$$

其中  $K_i$  表示电流调节器放大倍数,  $\tau_i$  表示电流调节器时间常数.

根据直流电机参数  $\tau_i = T_i = 0.036$  s, 整流装置滞后时间常数  $T_s = 0.0017$  s; 取电流滤波时间常数  $T_{oi} = 2$  ms = 0.002 s, 电流环时间常数之和  $T_{\Sigma i} = T_s + T_{oi} = 0.0037$  s.

由于要求  $\delta_i < 5\%$ , 所以应取  $K_i T_{\Sigma i} = 0.5$

$$K_i = \frac{0.5}{T_{\Sigma i}} = 0.5 / 0.0037 = 135.1 \text{ s}^{-1}$$

于是电流调节器的比例系数为:

$$K_i = \frac{K_{\tau} R}{K_s \beta} = \frac{135.1 \times 0.036 \times 0.0825}{40 \times 0.0274} = 0.3702$$

电流调节器电路图如图 3 所示.

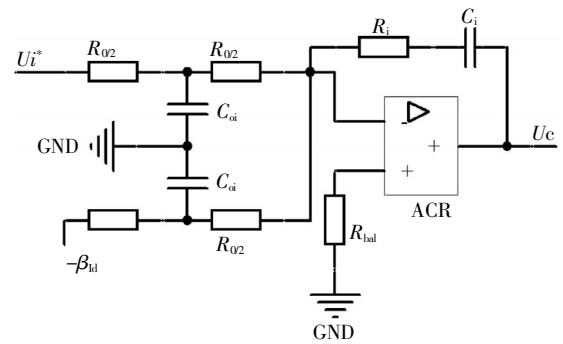


图 3 电流调节器电路图

Fig.3 A circuit diagram of the current regulator

对于转速闭环,  $p_i$  调节器的传递函数为:

$$W_n(s) = K_n \frac{\tau_n s + 1}{\tau_n s} \quad (6)$$

其中  $K_n$  表示速度调节器放大倍数,  $\tau_n$  表示速度调节器时间常数.

电流环等效时间常数  $1/K_i$ . 由前述已知,  $K_i T_{\Sigma i} = 0.5$  则

$$\frac{1}{K_i} = 2T_{\Sigma i} = 2 \times 0.0037 \text{ s} = 0.0074 \text{ s}$$

转速滤波时间常数, 根据所用测速发电机纹波情况, 取  $T_{on} = 0.01$  s

转速环时间常数. 按时间常数近似处理, 取

$$T_{\Sigma n} = \frac{1}{K_i} + T_{on} = 0.0074 \text{ s} + 0.01 \text{ s} = 0.0174 \text{ s}$$

其中按系统要求  $h=5$  则 ASR 的超前时间常数为  $\tau_n = hT_{\Sigma n} = 5 \times 0.0174 = 0.087 \text{ s}$

转速开环增益为:

$$K_N = \frac{h+1}{2h^2 T_{\Sigma n}^2} = \frac{6}{2 \times 25 \times 0.0174^2} \text{ s}^{-2} = 396.4 \text{ s}^{-2}$$

则速度调节器的比例系数为:

$$K_n = \frac{(h+1)\beta C_c T_m}{2h\alpha R T_{\Sigma n}} = \frac{6 \times 0.274 \times 0.4478 \times 0.1485}{2 \times 5 \times 0.0158 \times 0.0825 \times 0.0174} = 48.2$$

其中转速调节器电路图如图 4 所示.

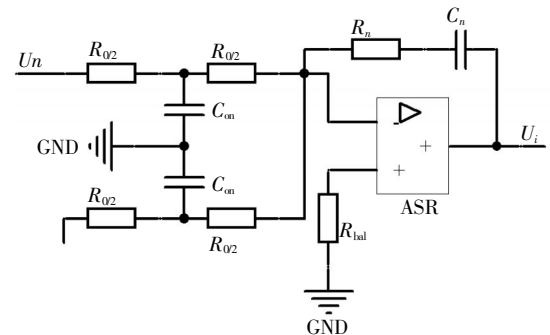


图 4 转速调节器电路图

Fig.4 Speed regulator circuit diagram

根据上述电流、速度闭环控制系统的结构图如图 5 所示.

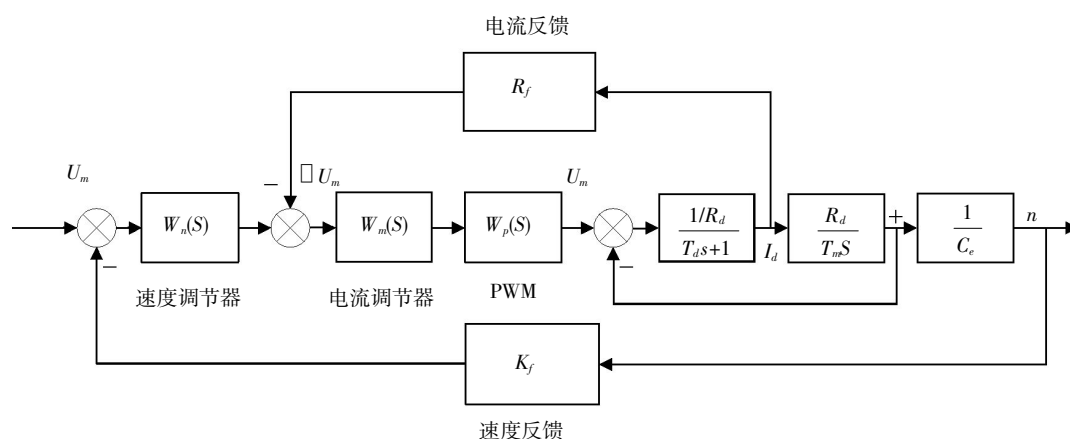


图 5 电流、速度双闭环控制系统结构图

Fig.5 Structure diagram of the current and speed dual-loop control system

### 3 伺服控制系统的软件设计

上位机软件采用 labview 进行编写. Labview 可以提供给用户友好的界面,并且在测试测量,控制领域方面具有突出的优点,能够图形化显示数据的采集和分析过程,能对数据和负载状态进行图形化的管理. 其编程风格也是简单方便,能充分满足本系统的测试要求. 并且,本系统将测试采集的不同任务划分在不同模块中,可以根据用户要求来简单的增加不同的功能模块. 本系统软件流程图如图 6 所示.

本软件首先输入初始位置和初始速度指令来控制电机运动. 通过细分电路板将传输到编码器的光电信号转换成数字信号. 由采集卡进行采集,将收到的数字信号转换成角度并在电脑上能实时显示. 根据角度的变化和比较,在重新生成新的电机运动命令来控制电机运动,使电机到达最终想要的位置和速度.

本软件的伺服控制模块的控制框图如图 7 所示. 通过该模块可以很好的控制负载在不同方位的运行位置.

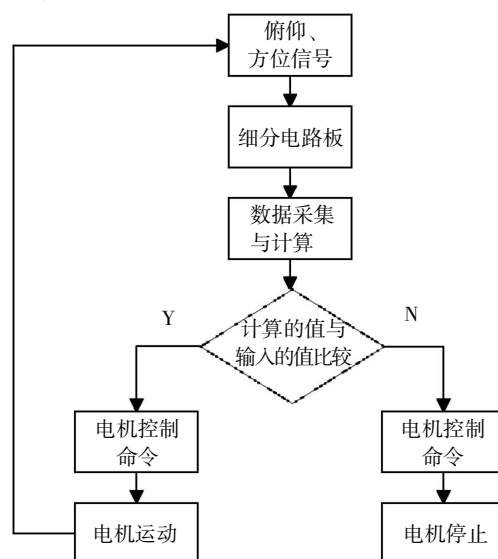


图 6 伺服系统软件流程图

Fig. 6 Software flow diagram of servo system



图 7 伺服控制模块框图

Fig.7 The block diagram of Servo control

## 4 结 语

上述伺服系统是利用转速、电流双闭环控制回路来控制直流电动机,采用高精度的光电编码器、细分电路板和数据采集卡来实现俯仰,方位和消旋方向的位置闭环控制. 经过测试,该伺服系统能够满足用户需求,并且运行稳定,各项参数也达到目标要求. 同时,这也为今后开发更高性能的伺服系统提供了研究基础.

## 致 谢

感谢湖北省教育厅科学技术研究项目提供的资金支持!

## 参考文献:

- [1] 张晓青,栗书贤.永磁式直流力矩电动机稳速系统设计[J]. 微特电机,2001,2(3):50-56.  
ZHANG Xiao-qing, LI Shu-xian. Designed of a torque motor system of Permanent magnet DC [J]. Micro motor,2001,2(3):50-56.(in Chinese)
- [2] 尹翔陵,王爱祥.直流力矩电机在精密跟踪雷达中的应用[J]. 电子工程师,2001,27(1):55-57.  
YIN xiang-ling, WANG Ai-xiang. The Application of DC motors used in precision tracking radar [J]. Electronics Engineer,2001,27(1):55-57.(in Chinese)
- [3] 赵政春,邱飏.ATP 系统伺服平台的研究[J]. 机床与液压,2009,6(23):25-27.  
ZHENG Zhen-chun, QIU Biao. Research on platform of ATP servo system [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2009,6(23):25-27.(in Chinese)
- [4] 温照方.电机与控制[M].北京:北京理工大学出版社,2004.  
WEN Zhao-fang. Motor and control.[M] Beijing Institute of Technology Press,2004.(in Chinese)
- [5] 李汉舟,杨世超.基于模糊 PID 的直流力矩电机转速控制[J]. 中国惯性学报,2004,6(3):80-84.  
LI Han-Zhou, YANG Shi-chao. The research of DC torque motor speed control based on fuzzy PID [J]. Journal of Chinese Inertial,2004,6(3):80-84.(in Chinese)
- [6] Kiyoshi Ohishi, Tomonori Mashimo. Digital Robust Speed Servo System with Complete Avoidance of Output Saturation Effect [J]. Power Conversion Conference, 1997(1):501-506.
- [7] STEPHAN R M, HAVN V, UNBEHAUEN H. Cascade adaptive speed control of a thyristor-driven DC motor [J]. IEE processing, 1988, 135(1):49-55.

## Servo system of stable speed control based on direct current torque motor

YU Bao-cheng<sup>1,2,3</sup>, LONG Chong<sup>1,2</sup>, WANG Chun-mei<sup>1,2,3\*</sup>

1. School of Computer Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;
2. Hubei Key Laboratory of Intelligent Robot(Wuhan Institute of Technology), Wuhan 430205, China;
3. Hubei Province Intelligent Welding Equipment Technology Research Center, Wuhan 430205, China

**Abstract:** To make the industrial platform control the motor position fast and stably, a servo system of steady speed control based on direct current torque motor was designed. The hardware part of the system consists of a high-performance DSP controller ARINC429 communication cards, photoelectric encoder, direct current motors and data acquisition cards. ARINC429 communication cards were utilized to communicate the data. The optical encoder and data acquisition cards were used to collect and feedback position information, and the position information was lastly monitored by the upper computer. The software part was written by the language of labview. A self-define communications protocol was applied to serial communication for the upper platform and the lower platform. The upper computer sent commands to the lower computer, and the lower computer received commands and gave feedback to the upper computer after processing, enabling control of the lower platform. The application test results show that the system is reliable and can meet the basic needs of the actual project.

**Keywords:** direct current torque motor; stable speed control; servo control; photoelectric encoder

本文编辑:陈小平

文章编号:1674-2869(2015)10-0045-06

# 一种基于领域情感词典的网络评论倾向分析方法

何成万,王 格

武汉工程大学计算机科学与工程学院,湖北 武汉 430205

**摘 要:**移动互联网的快速发展使得网络上数据量剧增,如何从纷繁复杂的信息中提取出对人们有用的信息就成为一个亟待解决的课题.本文提出一种改进的基于情感词典的倾向分析方法,该方法在情感词典中加入领域情感词,并且通过构建辅助词典集来进行辅助分析.同时给出了一种半自动的词典维护方法来发现新词和更新词典集.通过对手机领域的评论进行文本级的情感倾向分析,正面情感分析的准确率和召回率达到 0.713 和 0.769,负面情感的准确率和召回率达到 0.738 和 0.706,与传统基于情感词典的方法相比准确率和召回率都有较大提高.

**关键词:**情感倾向分析;情感词典;辅助词典集

**中图分类号:**TP311

**文献标识码:**A

**doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2015.10.009

## 0 引 言

随着互联网的普及和互联网技术的发展,越来越多的人选择在网上购物、发表评论.如何从如此多纷繁复杂的信息中提取出对人们有用的信息就成为一个亟待解决的课题.文本情感倾向性分析的目的是对整篇文本所体现出的态度,即文本中的主观信息进行判断<sup>[1]</sup>.

目前进行情感倾向分析主要的方法为基于机器学习的方法和基于情感词典的方法.基于机器学习的方法涉及特定领域,在领域相关的文本倾向性分析中有较好的表现,但是对于领域无关的文本进行分析时,效果不是很好.基于情感词典的方法核心思想是构造情感词典,对待分析的文本进行预处理之后,根据情感词典进行情感词匹配,这种方法通用性强,不需要语料处理工作,但是对于特定领域的文本,倾向分析效果不是很好.

本文以基于情感词典的方法为基础,借鉴机器学习的思想,在情感词典中加入领域情感词,并构造辅助词典集合,提出一种改进的基于情感词典的倾向分析方法.对于动态词,本文给出了一种通过处理评论主体来处理动态表达的方法,同时给出一种有监督的词典维护方法.

## 1 相关研究

观点挖掘按照挖掘粒度来分可以分为文本

级、句子级、词语级.文本级的挖掘又叫做情感倾向分析或文本分类,目的是判断文本是褒义、贬义还是中性.

2002 年 Turny 就提出了基于种子词汇来发现情感词的方法<sup>[2]</sup>. Pang 等使用了贝叶斯、最大熵、支持向量机(SVM)等机器学习的方法来构造分类器,并对这几种方法进行了对比<sup>[3]</sup>. Nozomi Kobayashi 等构建了一个模式库,收录了 8 种命中率比较高且比较准的模式用来提取评价主体、评价方面和评价之间的关系<sup>[4]</sup>,随后做了大量的语料工作,研究了主体和属性、属性和属性之间的层次关系,还对句子间的关系抽取做了一定的研究<sup>[5]</sup>. Marrese 等考虑到用户对不同的产品发表不同的评论,找出旅游领域的特征,构造出更复杂的扩充和自然语言处理模型用于旅游领域的挖掘<sup>[6]</sup>. Penalver 等通过在特征选择阶段使用本体来提高基于特征的观点挖掘,同时给倾向性分析提出了一种基于向量的分析方法<sup>[7]</sup>.

朱嫣岚提出了基于知网的语义倾向计算<sup>[8]</sup>. 孙建旺等利用词典和机器学习相结合的方法来进行中文微博的情感分析<sup>[9]</sup>. 肖红等提出结合句法分析和情感词典的网络舆情分析的方法<sup>[10]</sup>. 王勇等构建一种情感极性词典来对微博情感进行分类<sup>[11]</sup>. 谢松县等提出一种用语义关系构建情感词典的方法将中文情感词转换为对应的英文,可以解决同一个词语在不同语境下的倾向值分析<sup>[12]</sup>. 徐晓丹等

收稿日期:2015-09-14

基金项目:国家自然科学基金(61272115,60873024)

作者简介:何成万(1970-),男,湖北荆门人,教授,博士.研究方向:软件工程.

利用情感词典及特征加权相结合的方法来进行倾向性判别<sup>[13]</sup>. 周咏梅等针对微博上的网络用语, 使用上下文熵和词频统计阈值在过滤后的微博的语料部分中来滤筛选网络用语, 构建网络情感词典<sup>[14]</sup>.

## 2 词典构造

本文构造的词典主要包括情感词典和辅助词典集, 各词典的关系如图 1 所示.

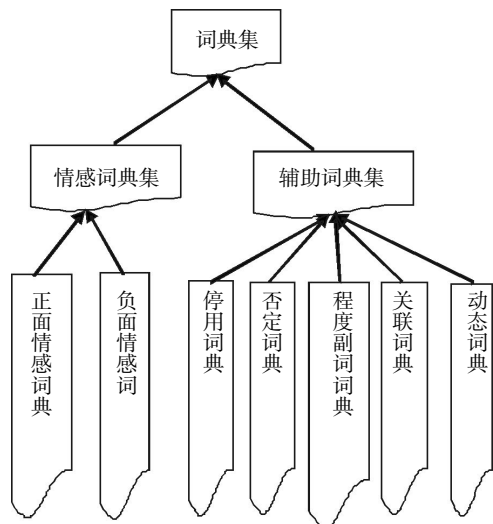


图 1 词典集结构关系

Fig.1 Structural relationship of dictionaries

### 2.1 情感词典构造

将 HowNet<sup>[15]</sup>发布的正面评价词典、正面情感词典、情感词汇本体<sup>[16]</sup>中极性为“1”的词合并去重, 构成正面基础情感词典, 且词语的情感倾向值都为“+1”; 将 HowNet 中的负面评价词典、负面情感词典、情感词汇本体中极性为“2”的词合并去重, 构成负面基础情感词典, 且词语的情感倾向值都为“-1”.

基础情感词典是通用词典, 这种词典的优点通用性强. 但是通用的情感词典在领域相关的文本分析中, 面对含有某些领域相关的情感词的评论的时候并不能准确分析出结果. 为了增加对特定领域的识别能力, 本文借鉴机器学习的思想, 对特定领域进行语料分析和学习, 扩充基础情感词典. 基础情感词典的扩充过程如下:

step1: 对于每一条训练语料, 进行分词和停用词过滤.

step2: 将经过预处理之后的文本与基础情感词典中的词语匹配, 如果匹配成功, 则说明该词语已经收录在基础情感词典中, 不再考虑; 如果未匹配成功, 则该词语属于未收录词语, 将该词语加入未收录候选词表中.

step3: 待所有训练语料处理完毕之后, 对于未收录候选词表中的词, 进行人工判断词语的情感倾向, 并且根据倾向性赋予倾向值(褒义为“+1”, 贬义为“-1”), 将倾向值为正的词, 加入正向基础情感词典中, 将倾向值为负的词, 加入负向基础情感词典中.

本文没有使用 SO-PMI 或 PMI 等方法去计算情感词更为具体的倾向值, 原因有如下几点:

a. 对于整个分析过程来讲, 正向词倾向值定为+1, 负向词倾向值定为-1, 这样可以简化分析过程的计算量, 并且具体的倾向值对倾向分析的影响没有否定词、程度副词、关联词等的影响大. 如本文这样定义情感词的倾向值, 在倾向值计算的时候节省了开销, 配合辅助词典进行分析得到的分析结果已经能够满足要求.

b. 使用 SO-PMI 或 PMI 算法计算词语倾向值, 需要选择种子词, 而种子词的选择方法没有固定标准, 理论上是选择情感倾向强烈的词作为种子词, 但是计算词语倾向性强烈程度本身就是要解决的问题. 另外, 选择的种子词的数量对分析结果也有影响.

### 2.2 辅助词典集的构造

2.2.1 停用词典 停用词是在表达中为了语义连贯而添加的没有实际意义的词语, 或者对于情感倾向分析来说没有帮助的词. 例如, 在“这部手机太好了”和“这部手机用着真流畅”中, “了”和“着”这两个词在语言表达上都没有实际的意义, 仅仅只是习惯表达或者为了语意连贯而加上的. 本文构建的停用词典共收录停用词 1 118 个.

2.2.2 否定词典 在自然语言中, 否定表达根据否定词数量的不同, 分为否定表达和多重否定. 否定词数量的多少能够直接影响情感词的倾向值. 其中否定和三重否定表示的否定的意思, 而双重否定表达的是着重肯定的意思. 这里引入乘积因子  $\beta$ , 用来处理否定词数量对情感词倾向值的影响. 在匹配的过程中记录否定词的匹配的次数, 匹配过程结束后, 若否定词的数量为偶数, 将  $\beta$  置为 2, 若否定词的数量为奇数, 将  $\beta$  置为-1.

2.2.3 程度副词词典 程度副词既可以改变情感词的倾向性, 又可以改变情感词的倾向值, 从而在分句及整句的倾向值计算中影响倾向分析的结果, 例如“手机好用”是正面评价, “手机很好用”是对“好用”的加强. 程度副词词典收录了 115 个程度副词, 是将 HowNet 提供的程度级别词典进行人工筛选过滤之后, 添加进部分新词构成的. 本文定

义乘积因子  $\alpha$  来综合表征这三类程度副词的影响,在程度副词词典中记录程度副词的权值,在进行程度副词匹配时,若匹配成功,则将情感词的倾向值乘以  $\alpha$ ,并用于后续计算. 程度副词词典结构如表 1 所示.

表 1 部分程度副词及权值

Table 1 Weights of some degree adverbs

程度副词	权值
很	2
非常	2
稍微	0.5
一点	0.5
过于	-1

**2.2.4 关联词词典** 关联词是对倾向性分析影响较大的一个原因,尤其在中文表达中,连词的出现频率非常高,忽视这些连词对倾向性的影响可能会使倾向值的计算不准确,甚至导致倾向分析出现错误,例如“这个手机虽然贵,但是性价比高”,这条评论里重点要表达的是对手机的正面情感,如果不考虑关联词,“贵”的倾向为“-1”,“性价比高”倾向值为“+1”,综合倾向值为“0”,为中性,但是从汉语语法来看,这条评论表达了作者正面情感. 为了处理关联词对于倾向分析的影响,本文构建了关联词词典. 关联词词典中收录的是常用的汉语关联词,根据这些关联词对汉语表达不同分句之间语义的影响,赋予关联词所影响的分句不同的权值. 定义参数  $\theta$  表征重点分句的权值(非重点分句权值为1),部分关联词权重如表 2 所示.

表 2 部分关联词及权重

Table 2 Weights of some conjunctive words

关联词	第一分句权重	第二分句权重
尽管.....可是	1	2
虽然.....但是	1	2
.....却.....		2
不但.....而且	1	2
不仅.....还	1	2

**2.2.5 动态词典** 动态词的处理是近年中文情感倾向分析中的一个难点. 所谓动态词,就是情感倾向不固定,随着语境和评论主体的不同会发生变化的词,如“快”、“高”等情感词,单独从词语的倾向性来看是褒义的,收录在正面情感词典中,但是在“耗电快”、“发热高”等表达中,显然是负面的.

在不涉及领域的通用词典中,对于这类词语是无法识别的,因为通用词典是基于词语匹配来分析的,无法识别语义信息. 无法识别动态情感词将会

大大降低情感分析的准确度.

通过对大量语料研究,发现动态表达呈现一定的规律,即情感词之所以能够表现出动态的情感倾向,是因为这些动态词描述的是评论主体或评论主体某一属性的特点,而这些属性往往是领域相关的,且情感词往往具有与平时表达相反的情感倾向,如上文“耗电快”、“发热高”等表达中的“快”、“高”.

在不涉及特定领域的倾向分析中,这些评论主体数量很多,但是具体到特定的领域,这些评论主体的数量就非常有限了,而本文的研究目的正好是在保留通用性的情况下来满足领域适用性,所以经过大量的语料研究,提出了一种解决动态词倾向识别的方法,即构建一个动态词典,其中收录能够改变情感词倾向性的评论主体. 通过上面的分析,笔者认为解决动态词的核心不是怎样去处理动态词本身,而是怎样去识别动态词所描述的对象. 通过语料分析,动态词的数量是不多的,涉及到特定领域的就更少了,但是这部分少量的动态词却对某些评论的倾向分析的结果的准确性起到了决定性的作用.

由于目前对动态词的研究还处于初步阶段,本文给出了处理动态词的一种方法,但是动态词典的构建需要手动完成.

### 2.3 新词发现及词典维护方法

倾向分析中另外一个难点,就是新词识别的问题. 这里的新词指的是情感词典中未收录的词语. 例如“给力”、“坑爹”、“不明觉厉”等,这些词是不符合汉语语法规则的,但是借由网络快速传播,从而让大部分网民了解并广泛使用.

目前国内有部分这方面的研究,都是通过复杂的自动发现算法来识别新词,这样做的优点是完全不需要人工参与,但是就目前的研究现状来看,识别效果并不是很好,而且算法复杂,开销很大. 综合考虑识别效果、算法复杂度、计算开销等因素,本文提出一种有监督的新词发现方法.

横向比较每个网络用语出现的时间,发现如此多的网络用语并不是在短时间内集中出现的,而是在相对较长的时间里零散的出现. 考虑到这种事实,花费少量的人工来换取高效的新词发现效率是可行的,主要过程如下:

**a.** 当发现未匹配的分词片段的时候,不仅仅只记录该片段,同时记录该片段的上一片段和下一片段,这样当提交给人工判断时候方便人工进行正确处理;

**b.** 当未匹配片段达到阈值,交由人工判断,若

判定为未收录新词,将该词加入情感词典或辅助词典集中对应的词典;对于判断为不是新词的组合,添加进非情感词典中,这样可以避免重复判断不是新词的高频组合。

关于阈值  $T$  的设定可以根据分析规模的大小来设定。

这种新词发现方法可以用来收录情感词典中为收录的新词,也可以用来维护构建辅助词典集。

### 3 倾向计算与结果分析

#### 3.1 倾向值计算方法

通过分析可知,进行倾向分析的评论必须是同一主体,若评论中含有多个评论主体,则需进行句子级的挖掘。

设计倾向值计算方法的思路是先计算分句的倾向值,再计算整句的倾向值,最后计算文本的倾向值。算法描述如下:

输入:待分类文本  $d$ ,情感词典  $\text{sendic}$ ,停用词典  $\text{stopdic}$ ,否定词典  $\text{ndic}$ ,程度副词词典  $\text{levdic}$ ,关联词典  $\text{reldic}$ ,动态词典  $\text{dyndic}$ ;

输出:文本  $d$  的分析结果

step1:将待分类文本  $d$  使用中科院的分词系统 ICTCLAS<sup>[17]</sup>进行分词;

step2:将分词完成的文本使用停用词典  $\text{stopdic}$  进行过滤;

step3:将文本按照句号划分成整句集合  $S=\{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ ,并对每一个整句根据逗号和分号划分成分句  $s_1, s_2, \dots, s_n$ ;

step4:对每一分句使用情感词典  $\text{sendic}$  匹配情感词,若匹配失败,则对下一分句进行匹配,直至所有分句匹配失败;若匹配成功,进行下一步;

step5:从情感词的位置开始反向遍历分句,根据程度副词词典  $\text{levdic}$  匹配程度副词,若匹配到程度副词,则置乘积因子  $\alpha=2$ ,否则置乘积因子为 1;

step6:从情感词的位置反向遍历分句,根据否定词典  $\text{ndic}$  匹配否定词,记录否定词的数量  $n$ ,若  $n$  为奇数,则置乘积因子  $\beta=-1$ ,若为非 0 偶数,则置为 2,若为 0 则置为 1;

step7:从情感词的位置反向遍历分句,根据动态词典  $\text{dyndic}$  匹配动态情感词的评论主体,若匹配成功,则将情感词的倾向性改变,倾向值的绝对值不变;

step8:从情感词的位置反向遍历分句,根据关联词典  $\text{reldic}$  匹配关联词,根据关联词典中定义的分句权值确定乘积因子  $\theta$  的值;

step9:根据公式(1)计算文档  $d$  的倾向值  $\text{Orientation}(d)$ ;

step10:若  $d$  的倾向值  $>0$ ,则文档为褒义;若  $d$  的倾向值  $<0$ ,则文档为贬义。

$$\text{Orientation}(d) = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\sum_{j=1}^m \alpha \beta \theta \text{Ori}(w)}{m} \right)}{n} \quad (1)$$

式(1)中  $m$  为整句中分句的数量,  $n$  为文档中整句的数量。  $\text{Ori}(w)$  为分句中情感词结合动态词典  $\text{dyndic}$  之后的倾向值,  $\alpha$  表示程度副词对倾向性分析的影响;  $\beta$  表示否定词对倾向性分析的影响;  $\theta$  表示关联词对情感分析的影响。

#### 3.2 试验和结果分析

以手机领域的评论为例,进行情感词典的扩充和动态词典的构造。实验数据为数据堂下载的真实手机评论。从获取的手机评论中随机选择 2 000 条作为训练语料,用于情感词典的构建。从中选择 1 000 条作为测试语料用于实验结果分析。

通过对 2 000 条训练语料进行以上处理,新增了 71 个领域情感词。其中褒义 23 个,贬义 48 个。将褒义词添加进正向基础情感词典,构成正面情感词典,将贬义词添加进负向基础情感词典,构成负面情感词典。构成的正面情感词典和负面情感词典部分内容如表 3 所示。

表 3 部分正面情感词

Table 3 Some positive emotional words

倾向	举例
褒义情感词	赞、持久、经摔、耐用、牛掰、给力
贬义情感词	坑爹、黑屏、死机、翻新机、垃圾、山寨机、失灵、雪花屏

然后人工在手机评论的语料中搜集动态情感词的评论主体和评论主体的属性,构成动态词典,部分动态词典如图 2 所示。

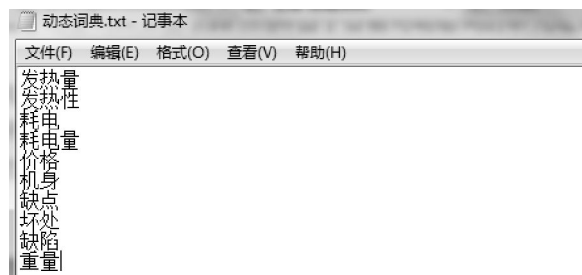


图 2 部分动态词

Fig.2 Some dynamic terms



邀请 3 位标注者分别对 1 000 条测试语料进行人工标注,然后对标注结果进行汇总,若有两名标注者或所有标注者对语料标注为正向,则语料倾向性为正,若有两名标注者或所有标注者对语料标注为负向,则语料倾向性为负。

将本文提出的方法和传统的使用 HowNet 计算的方法进行比较,为了更具体的对比分析两种方法,对正面情感和负面情感分开计算,结果如表 4 所示。

表 4 实验结果

Table 4 Experimental results

方法	评估指标	正面情感	负面情感
本文提出的方法	文本数量	698	302
	准确率 $p$	0.713	0.738
	召回率 $r$	0.769	0.706
	$F$ 值	0.739	0.721
基于 HowNet 的方法	文本数量	788	212
	准确率 $p$	0.503	0.462
	召回率 $r$	0.611	0.310
	$F$ 值	0.672	0.371

通过对上表实验数据的分析可以得到以下结论:

在进行领域相关文本的倾向性分析时,本文提出的方法在正面情感的判断和负面情感的判断上,无论准确率和召回率都要比基于 HowNet 的传统情感词典方法要高。首先是因为对 HowNet 进行了筛选过滤,去除了不符合收录规则的词;其次是进行了领域相关的训练语料的学习工作,引入了领域情感词,并且扩充了网络流行用语,对领域相关的评论进行分析可以提高分析的准确度;第三是辅助词典集全面的考虑了语义和句子间的结构关系,能够处理否定词、程度副词、关联词,能够提高倾向值计算的准确性,对于动态词的识别能够增强分析的准确度。

## 4 结 语

以上提出的一种基于领域情感词典的网络评论倾向分析方法,给出了情感词典的构建和扩充方法,并通过构建辅助词典集以及有监督的维护方法来进行辅助分析。

目前的方法还存在以下不足:不能识别网络表达中表情符号和不符合语法规则的表达;需要研究出自动的新词发现方法;对于特殊句式如反问句等还不能识别。将在今后的工作中对这些问题做进一步的研究。

## 参考文献:

- [1] 黄萱菁,张奇,吴苑斌.文本情感倾向分析[J].中文信息学报,2011,10(9):118-126.  
HUANG Xuan jing,Zhang Qi, WU Yuan bin. A Survey on Sentiment Analysis [J]. Journal of Chinese information,2011,10(9) 118-126.(in Chinese)
- [2] Turney PD. Thumbs up or thumbs down semantic orientation applied to unsupervised classification of views [C]//Proceedings of the 40th annual meeting on association for computational linguistics. Philadelphia: Association for Computational Linguistics,2002:417-424.
- [3] Pang B, Lee L. Seeing stars: Exploiting class relationships for sentiment categorization with respect to rating scales [C]//Proceedings of the 43rd annual meeting on association for computational linguistics. New York: NJ,ACM,2005:115-124.
- [4] Nozomi Kobayashi, Kentaro Inui, Yuji Matsumoto. Collecting Evaluation Expressions for Opinion Extraction[C]//Proceedings of the 1st International Joint Conference on Natural Language Processing (IJCNLP). 2004:584 - 589.
- [5] Nozomi Kobayashi, Kentaro Inui, Yuji Matsumoto. Extracting Aspect-Evaluating and Aspect-of Relations in Opinion mining [C]//Proceedings of the 2007 Joint Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing and Computational Natural Language Learning, Prague, June 2007:1065-1074.
- [6] Marrese-Taylor E, Velasquez J D, Bravo-Marquez F. A novel deterministic approach for aspect-based opinion mining in tourism products reviews[J]. Expert Systems with Applications,2014,41(17):7764-7775.
- [7] Penalver-Martinez I, Garcia-Sanchez F, Valencia-Garcia R, et al. Feature-based opinion mining through ontologies [J]. Expert System with Applications,2014, 41(13):5995-6008.
- [8] 朱嫣岚,闵锦,周雅倩,等.基于 HowNet 的词汇语义倾向计算[J].中文信息学报,2006,20(1):14-20.  
ZHU Yan-lan,MIN Jin,ZHOU Ya-qian,etc. Semantic orientation computing based on hownet[J]. Journal of Chinese Information,2006,20(1):14-20.(in Chinese)
- [9] 孙建旺,吕学强,张镭翰.基于词典与机器学习的中文微博情感分析研究[J].计算机应用与软件,2014,31(7):177-181.  
SUN Jianwang LV Xueqiang Zhang Leihan. On sentiment analysis of chinese microblogging based on lexicon and machine learning[J]. Journal of Computer Applications and Software,2014,31(7):177-181.(in Chinese)

- [10] 肖红, 许少华. 基于句法分析和情感词典的网络舆情倾向性分析研究[J]. 小型微型计算机系统, 2014, 35(4): 811–813.  
XIAO Hong, XU Shao-hua. Analysis on web public opinion orientation based on syntactic parsing and emotional dictionary [J]. Small Microcomputer system, 2014, 35(4): 811–813. (in Chinese)
- [11] 王勇, 吕学强, 姬连春, 等. 基于极性词典的中文微博客情感分类 [J]. 计算机应用与软件, 2014, 31(1): 35–37, 126.  
WANG Yong, LV Xueqiang, JI Lianchun, et al. Sentiment classification for chinese microblogging based on polarity lexicons [J]. Computer Applications and Software, 2014, 31(1): 35–37, 126. (in Chinese)
- [12] 徐晓丹, 段正杰, 陈中育. 基于扩展情感词典及特征加权的情感挖掘方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2014, 44(6): 15–18, 69.  
XU Xiaodan, DUAN Zhengjie, CHEN Zhongyu. The sentiment mining method based on extended sentiment dictionary and integrated features [J]. Journal of Shandong University (engineering science), 2014, 44(6): 15–18, 69. (in Chinese)
- [13] 谢松县, 刘博, 王挺. 应用语义关系自动构建情感词典[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(3): 111–115.  
XIE Songxian, LIU Bo, WANG Ting. Applying semantic relations to construct sentiment lexicon automatically [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2014, 36(3): 111–115. (in Chinese)
- [14] 周咏梅, 阳爱民, 林江豪. 中文微博情感词典构建方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2014, 4(3): 36–40.  
ZHOU Yongmei, YANG Aimin, LIN Jianghao. A method of building Chinese microblog sentiment lexicon [J]. Journal of Shandong University (engineering science), 2014, 4(3): 36–40. (in Chinese)
- [15] 周强, 冯松岩. 构建知网关系的网状表示[J]. 中文信息学报, 2000, 14(6): 21–27.  
ZHOU Qiang, FENG Song-yan. Build a relation network representation for How-net. Journal of Chinese information, 2000, 14(6): 21–27. (in Chinese)
- [16] 郭凯. 基于评论情感的微博谣言检测研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2014.  
GUO Kai. The research of Microblog Rumors Detection Based on Comments Sentiment [D]. Dalian: dalian university of technology, 2014. (in Chinese)
- [17] 蔡小艳, 寇应展, 沈巍, 等. 汉语词法分析系统 ICTCLAS 在 Nutch-0.9 中的应用与实现 [J]. 军械工程学院学报, 2008, 20(5): 63–70.  
CAI Xiao yan, KOU Ying zhan, Shen Wei, et al. The Application and Realization of ICTCLAS on Nutch-0.9 [J]. Journal of ordnance engineering college, 2008, 20(5): 63–70. (in Chinese)

## Method of semantic orientation analysis based on domain specific sentiment dictionary

HE Cheng-wan, WANG Ge

School of Computer Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

**Abstract:** The volume of data on the network increases remarkably with the rapid development of mobile network. How to extract useful information from the complicated information becomes an urgent problem to be solved. An improved semantic orientation analysis was proposed, in which the sentiment dictionary was expanded with domain emotional words, and an auxiliary dictionary set was constructed for assistant analysis. To maintain all the dictionaries, a semi-automatic method was also presented. The results in the domain of mobile phone show that the rates of accuracy and recall of positive emotion analysis are 0.713 and 0.769, and the rates of accuracy and those of negative emotion analysis are 0.738 and 0.706, which are improved compared with using the traditional method.

**Keywords:** semantic orientation analysis; sentiment dictionary; assistant dictionary set

本文编辑: 陈小平

文章编号:1674-2869(2015)10-0051-06

# 电动汽车电池荷电状态估算

王华杰, 郑来芳

太原工业学院电子工程系, 山西 太原 030008

**摘要:**为了精确估计电动汽车电池的荷电状态(SOC),将模糊神经网络和最小二乘支持向量机分别用来估计电池的 SOC,然后将两种方法相结合,交替地使用来预测电池 SOC. 在美国能源部纯电动汽车试验计划提供的混合工况 UDDS-NYCC-US06\_HWY 驾驶循环实验中提取电池模型参数的充电/放电测试周期,用电池电流,电池电压和电池温度为独立变量,试验进行了 80 Ah 镍氢电池与动力测试周期来预测电池 SOC. 结果表明,此方法不仅可以准确的估算 SOC,而且能减少计算量.

**关键词:**电动汽车;模糊神经网络;最小二乘支持向量机;电池荷电状态

**中图分类号:**TM912

**文献标识码:**A

**doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2015.10.010

## 0 引言

为了充分利用电池里的能量,同时防止不必要的浪费,电池荷电状态是电池的一个重要参数,反映了电池能量.

一个准确的 SOC 指示是非常重要的,方便用户使用. 设计一个精确的 SOC 指示系统的关键问题是电池和用户行为的不可预见性. 电池充放电过程是一个复杂的动态非线性系统,创建一个可以确切描述电池充放电系统的数学模型很困难. 所以准确估算电池 SOC 有相当大的难度<sup>[1-3]</sup>.

近年来,支持向量机<sup>[4-7]</sup>(SVM)技术被广泛用在各种领域. 在建立较好网络模型的前提下,神经网络法依靠大量的样本数据进行训练可以得到较好的预测精度,但神经网络可能有局部极小的问题,而支持向量机的学习算法具有全局最优解.

在本文中,模糊神经网络和最小二乘支持向量机用于估计电池的 SOC,将两种方法相结合,研究他们是否能更有效地估计电池的 SOC. 仿真是基于电动汽车仿真软件 ADVISOR,结果表明,新方法能给出更精确的估计并减少计算.

## 1 模糊神经网络原理

神经网络是近似和简化人类大脑的结构与工作模式. 这种结构和工作模式可产生一定的功能特征,类似于人脑的行为. 本文以自适应神经模糊

推理系统为建模基础.

假设模糊逻辑系统中有两个输入  $x$  和  $y$ , 一个输出  $z$ , 那么在一阶 Sugeno 模糊模型具有两条“if-then”模糊规则:

Rule 1: if  $x$  是  $A_1$  and  $y$  是  $B_1$  then

$$z_1 = p_1x + q_1y + r_1$$

Rule 2: if  $x$  是  $A_2$  and  $y$  是  $B_2$  then  $z_2 = p_2x +$

$$q_2y + r_2$$

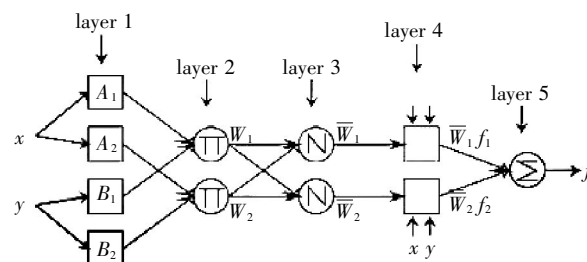


图 1 ANFIS 的结构

Fig.1 The structure of ANFIS

在第一层中, 每一个节点函数的自适应节点的功能如下:  $O_{1,i} = \mu A_i(x)$ ,  $i=1, 2$ .

采用钟型函数作为隶属度函数:

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1 + \left[ \left| \frac{x - c_i}{a_i} \right| \right]^2} \quad (1)$$

式(1)中,  $\{a_i, b_i, c_i\}$  是参数的集合.

在第二层中, 节点的输出跟输入的关系用式(2)表示:

收稿日期:2015-08-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61072121)

作者简介:王华杰(1988-),女,山西太原人,助教,硕士. 研究方向:嵌入式系统及应用.

$$O_{2,i} = \omega A_i(x) \mu B_i(y), \quad i=1,2 \quad (2)$$

在第三层中,节点  $i$  是一个比率,节点的输出跟输入的关系用式(3)表示:

$$O_{3,i} = \frac{\omega_i}{\omega_1 + \omega_2}, \quad i=1,2 \quad (3)$$

在第四层中,每一个节点  $i$  都是一个自适应节点.

$$O_{4,i} = \omega_i f_i = \omega(p_i x + q_i y + r_i) \quad (4)$$

式(4)中,  $\{p_i, q_i, r_i\}$  是参数的集合.

在第五层中,单点是被标记为一个固定节点 $\Sigma$ ,把所有传送信号的总和作为输出.

在 ANFIS 中,利用神经网络法计算采样数据得到所需的参数,完成自适应建模过程.

## 2 基于模糊神经网络电池 SOC 预测模型

电池的放电性质是由多种因素的影响,可以得到如下的数据:充电电压,放电电流,电池的内部温度. SOC 估计就是根据蓄电池的充电电压、放电电流和电池的内部的温度的数值得到电池 SOC 数值. 使用神经网络设计估计器的目的是为了逼近函数:

$$SOC = f(V, I, T) \quad (5)$$

在实际应用中,采用测量那些容易测量的因素,即监测电池的 SOC,结合放电电流,电池温度的变化,电池电压变化.这种分析 SOC 方法被称作电化学方法. 电池的电压是一个参数,它是最简单的测量,但它是反映多电池信息的参数.

为了避免由不同的电池采样值的影响,首先归一化输入数据,然后定义输入、输出变量,构造了一个一阶 Sugeno 模糊模型,最后使用隶属函数为每个输入进行了训练.

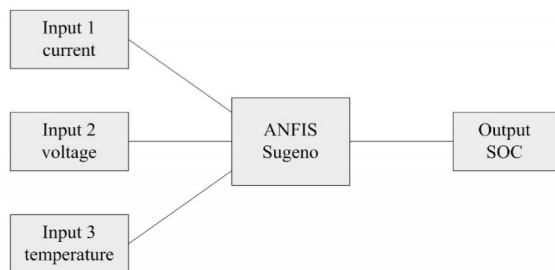


图 2 一阶 Sugeno 模糊系统的 SOC 模型

Fig.2 SOC model of the first-order Sugeno fuzzy system

模糊神经网络的训练过程如下:

(1) 初始化模糊神经网络隶属度函数参数和

系数,将所得到的数据归一化到  $[-1, 1]$ , 用作训练样本.

(2) 设置初始权重为均匀分布的小的随机值,并设置神经元的数目,学习速率.

(3) 用训练样本训练模糊神经网络和迭代法调整权重,然后计算得出输出.

## 3 模糊神经网络仿真

使用 ADVISOR 仿真软件获得所需的训练和测试数据集. ADVISOR 是美国能源实验室(Natural Renewable Energy Library)开发的高级车辆仿真软件(Advanced Vehicle Simulator). 使用该软件可以搭建一个电动汽车实验平台,利用标准测试路程的模拟行驶程序,获取电动车在行驶过程中的各项参数.

动态 SOC 测试是 80Ah/96V Ni-MH 电池组采用混合工况 UDDS-NYCC-US06\_HWY 混合驱动循环实验进行的. 采用混合工况试验数据进行研究是让预测结果能够充分表现出电池在实际使用时的动态特性,而且也能说明此方法较好的鲁棒性和实用性. 基于电动汽车仿真软件 ADVISOR,将此循环运行 2 个周期,虚拟的电动车一共运行了 4 675 s,全程 29.73 m,运行过程中最大速度为 80.3 mph,平均速度为 22.89 mph. 收集的数据有速度、电流、电压、温度,如图 3、4、5、6 所示. 蓄电池 SOC 是通过“库仑折算”的方法获得的,如图 7 所示.

预测误差图如图 8 所示. 由图 8 可以看出,虽然最大预测误差大于 0.1,但总体来说,结果大体让人满意.

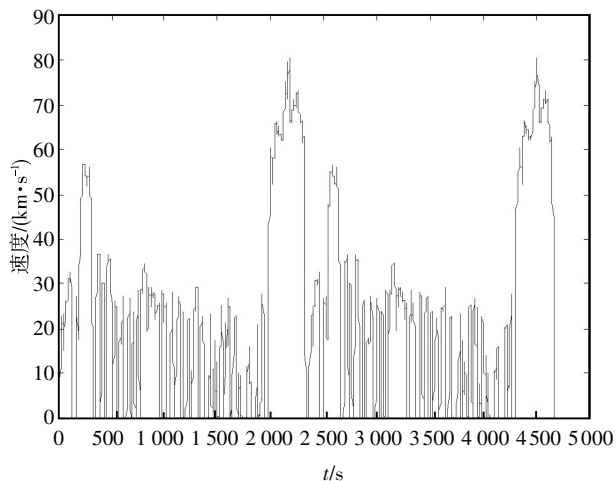


图 3 仿真平台下纯电动汽车车速变化曲线

Fig.3 Curve of the pure electric vehicle's speed under the simulation platform

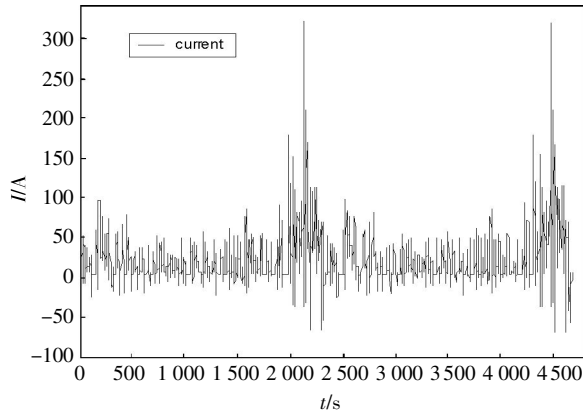


图 4 仿真平台下蓄电池输出电流变化曲线

Fig.4 Curve of the battery's output current change under the simulation platform

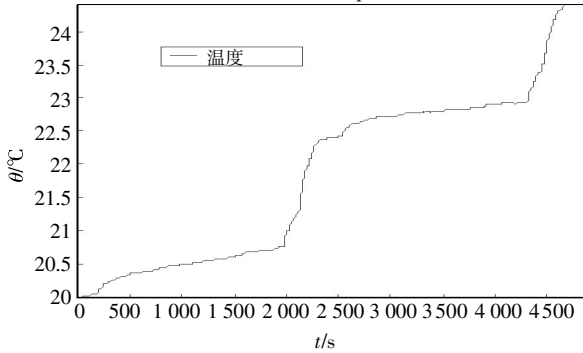


图 5 仿真平台下温度变化曲线

Fig.5 Curve of the variation of temperature under simulation platform

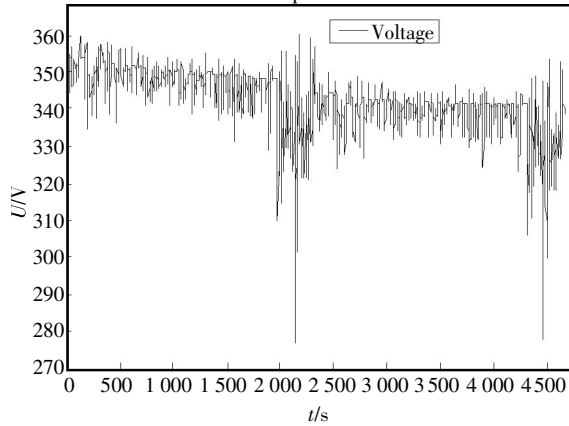


图 6 仿真平台下蓄电池电压变化曲线

Fig.6 Curve of the variation of battery voltage under simulation platform

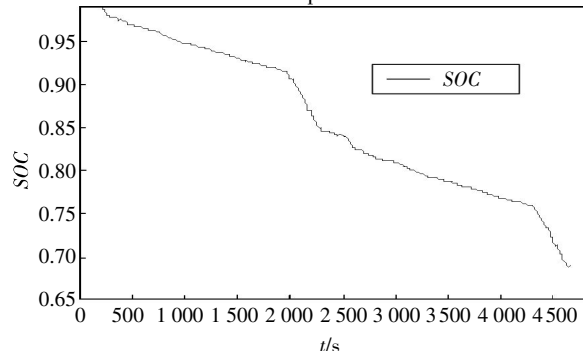


图 7 仿真平台下蓄电池 SOC 变化曲线

Fig.7 Curve of battery's SOC change under simulation platform

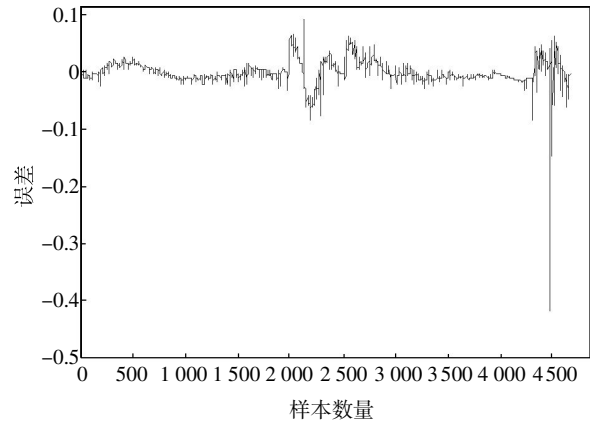


图 8 基于模糊神经网络方法的预测误差图

Fig.8 Error prediction based on fuzzy neural network method

## 4 LS-SVM 原理

SVM 是一种基于经验风险最小化和统计学习理论的计算学习理论,利用内核函数,可以使低维空间非线性输入映射到高维空间,能够使这些低维特征变量成为线性可分的变量。

最小二乘支持向量机可以改变复合二次规划问题转化为求解线性方程组,并且可以通过使用迭代的方式来解决,大大减少了计算量,提高了求解速度。设训练样本集  $T$  由  $N$  个样本点组成:

$$T = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)\} \quad (6)$$

其中,  $x_i \in \mathbf{R}^n$  是输入向量,  $y_i \in \mathbf{R}$  是对应于  $x_i$  的输出。令  $a = \frac{1}{\gamma}$ , 则优化问题是一个最小二乘支持向量机:

$$\min_{w, b, e} J(w, b, e) = \frac{1}{2} w^T w + \frac{\gamma}{2} \sum_{k=1}^N e_k^2 \quad (7)$$

约束条件:

$$y_k = w^T \varphi(x_k) + b + e_k, k = 1, \dots, N \quad (8)$$

其中,  $w$  是权重向量,  $\gamma$  是恒定可调参数,  $e_k$  是相应的误差变量,  $\varphi(\cdot)$  是具有非线性映射功能的函数, 使输入样本从低维空间到高维特征空间,  $b$  是一个偏差。

相应的优化问题(6)、(7)两式,可以定义一个拉格朗日函数为:

$$L(w, b, e, \alpha) = J(w, b, e) - \sum_{k=1}^N \alpha_k \{w^T \varphi(x_k) + b + e_k - y_k\} \quad (9)$$

其中,  $\alpha_k \in \mathbf{R}$  是拉格朗日乘子,用来做二次逼近。下面对等式(8)进行优化:

$$\frac{\partial L}{\partial w} = 0 \rightarrow w = \sum_{k=1}^N \alpha_k \varphi(x_k) \quad (10)$$

$$\frac{\partial L}{\partial b} = 0 \rightarrow \sum_{k=1}^N \alpha_k = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial L}{\partial b}=0 \rightarrow \partial_k=\gamma e_k, k=1, \cdots, N \quad (12)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \alpha_k}=0 \rightarrow \mathbf{w}^T \varphi(x_k)+b+e_k-y_k=0, k=1, \cdots, N \quad (13)$$

可以表示为下列矩阵的形式:

$$\begin{pmatrix} 0 & \mathbf{1}^T \\ \mathbf{1} & \Omega+\gamma^{-1}\mathbf{I} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b \\ \alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ Y \end{pmatrix} \quad (14)$$

其中  $\Omega_{ij}=\varphi(x_i)^T \varphi(x_j)=K(x_i, x_j)$ ,  $Y=(y_1, \cdots, y_N)^T$ ,  $\mathbf{1}=(1, \cdots, 1)^T$ ,  $\alpha=(\alpha_1, \cdots, \alpha_N)^T$

解方程(13)得到  $\alpha$  和  $b$  后, 对于新的输入向量  $x$ , 其输出值  $y(x)$  可以根据下式进行计算:

$$y(x)=\sum_{k=1}^N \alpha_k K(x, x_k)+b \quad (15)$$

其中,  $K(x, x_k)$  是核函数. 核函数从低维空间中选取特征向量, 使低维空间的数据通过映射后在高维空间变得线性可分. 可以看出, 核函数在处理非线性问题时起到非常重要的作用. 核函数之所以是最小二乘支持向量机的重要因素, 是因为选择不同类型的核函数能直接决定最小二乘支持向量机的性能. 目前, 多项式核函数、Mercer 核函数、RBF 核函数等使用的比较普遍. 目前, 支持向量机的内核类型常选用的 RBF 神经. 要使用支持向量机解决回归问题的数据是不是线性可分的, 内核必须选择. 在本文中, 径向基函数被选为核函数:

$$K(x_i, x_j)=\exp\left(\frac{-|x_i-x_j|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (16)$$

## 5 基于 LS-SVM 电池 SOC 预测模型

在电池充放电过程中, 电池荷电状态(SOC)与电池的电压、电流、温度等因素密切相关, 那么用电池温度、电压、电流作为输入, 电池 SOC 作为模型的输出. 建立如下的数学方程:

$$SOC=f[(V, I, T), \alpha_k, b] \quad k=1, \cdots, N \quad (17)$$

最小二乘支持向量机依赖于超参数  $(C, \nu, \gamma)$ , 惩罚参数  $C$ , 超参数  $\nu$  定义该类型的 SVM 回归. 当 RBF 核被选作为核函数时,  $\gamma$  就表示为内核参数. 对于核函数来说, 内核参数是非常重要的, 因此在升高学习和泛化能力方面起着决定性作用, 增强预测模型性能就必须准确选择内核参数.

超参数的选择, 是通过每个组合都使用八倍交叉验证, 然后选用最佳的交叉验证精度的参数. 根据式(10)来求出  $\alpha$  和  $b$  的值, 然后把模型参数引入到 LS-SVM 预测模型中, 那么输入测试样本后, 就可以得到预测电池 SOC. 将预测值与 SOC 的实

验数据进行对比, 以验证基于 LS-SVM 算法电池 SOC 预测模型的性能.

## 6 LS-SVM 仿真

基于 LS-SVM 电池 SOC 的预测模型预测过程的具体步骤如下:

(1) 选择样本数据, 进行数据处理, 生成训练样本集和预测样本集;

(2) 建立一个核函数  $K(x_i, x_j)$  和参数  $C, \gamma$ , 并选择核函数的类型和惩罚系数; 每个参数组合经过八倍交叉验证, 得到最佳的参数. 本文得到的参数为:  $C=0.707\ 107$ ,  $\gamma=2.828\ 43$ 、均方误差  $MSE=2.866\ 42e-005$ .

(3) 通过训练样本建立目标函数, 并通过求解二次规划问题找到最佳的超平面, 得到拉格朗日乘子  $\alpha$  和  $b$ ;

(4) 建立与所获得的参数的预测模型, 并预测未来的预测值与测试样本集.

预测误差如图 9 所示, LS-SVM 预测的电池 SOC 的结果与试验结果相符合, 它的最大预测误差小于 0.5%, 并且相关系数  $R=99.99\ 09\%$ , 运行了 599.933 132 s.

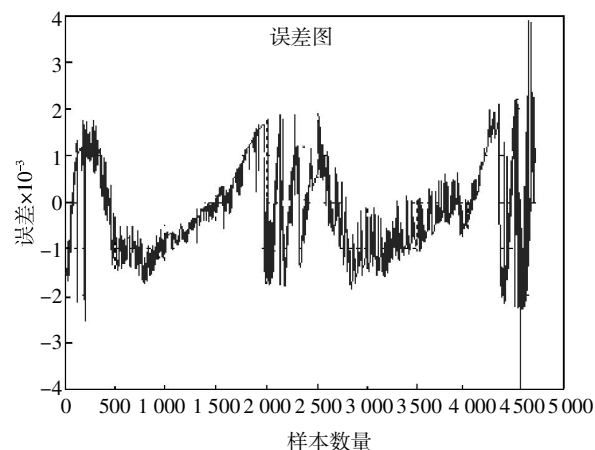


图 9 基于 LS-SVM 方法的预测误差图

Fig.9 Error prediction based on LS-SVM method

## 7 基于模糊神经网络和 LS-SVM 电池 SOC 预测

这里提出将模糊神经网络和 LS-SVM 相结合的 SOC 估算方法, 预测步骤大致如下: 首先, LS-SVM 来估计 SOC 和规范初始误差; 然后它被模糊神经网络取代时预测 SOC 接近实际值. 经过一段时间, LS-SVM 用来取代模糊神经网络, 校正累积的偏移量, 然后再次切换到模糊神经网络, 依此类

推. 将两者合并交替使用方法的预测误差如图 10 所示. 可以看到, 预测数据与实验数据的变化是相同的. 均方误差  $MSE=2.798\ 04e-005$ , 相关系数  $R=99.991\ 2\%$ , 运行了 488.245 310 s.

不过发现当  $SOC$  较大和较小的时段, 预测误差相对大一些. 引起这种情况大致有以下几个原因: (1) 在  $SOC$  较大和较小的时段, 有大电流的充放电, 引起较大误差的产生; (2) 汽车运行过程中不停的充放电, 温度会不断的升高, 电池模型也会发生相应改变, 那么所建立的函数关系也不能完全适用了. 鉴于这种情况, 要想得到满意的试验结果, 就要设法保证电池的内部温度相对稳定. 这样电池模型就不用考虑电池内部温度的变化, 只需要考虑外界环境温度就可以了.

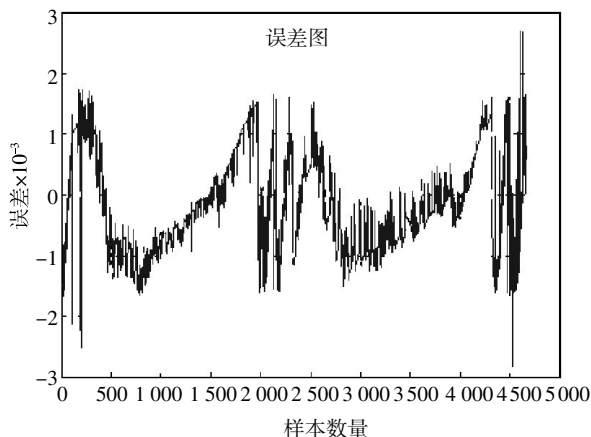


图 10 基于新方法的预测误差图

Fig.10 Error prediction based on the new method

实验结果表明, 该 LS-SVM 预测的电池  $SOC$  的结果与试验结果相符合, 它的最大预测误差小于 0.5%, 而模糊神经网络的最大预测误差大于 0.1, 但总体来说, 结果大体让人满意, 基于新方法的最大预测误差小于 0.3%. 由此也可以看出, 基于合并的方法具有更高的精度, 更好的实用性.

## 8 结 语

对于在电动汽车动力电池的最优控制问题, 准确地估计电池的充电状态( $SOC$ )的状态是不可忽略的部分. 本文分别建立了基于模糊神经网络算法和 LS-SVM 算法的电池  $SOC$  预测模型, 并将其交替应用到了 NI-MH 电池组  $SOC$  动态预测. 仿真是基于电动汽车仿真软件 ADVISOR, 验证结果

表明, 此估计方法是可行的, 并具有较高的精度. 此预测方法不需要知道电池内部复杂的物理化学变化, 反映了它良好的适应性, 不仅可以准确的估算  $SOC$ , 而且能减少计算量, 所以它可以成为一个实用的电池  $SOC$  估计方法.

### 参考文献:

- [1] WANG Geng bo. The development of batteries in electric vehicles [J]. Hu bei Automotive Industries Institute, 1996, 32(12): 83-86.
- [2] MA you-liang, CHEN quan-shi, QI zhan-ning. A research on the SOC Definition and measurement method of batteries used in EVS [J]. J Tsinghua Univ (Sci&Tech), 2001, 41(11): 95-97.
- [3] 邵海岳, 钟志华, 何莉萍, 等. 电动汽车动力电池模型及  $SOC$  预测方法[J]. 电源技术, 2004, 28(10): 637-640.  
SHAO Haiyue, ZHONG Zhihua, HE Liping, et al. The model of Electric vehicle battery and the method of SOC's estimation[J]. Power Technology, 2004, 28(10): 637-640. (in Chinese)
- [4] 裴晟, 陈全世, 林成涛. 基于支持向量回归电池  $SOC$  估计方法研究[J]. 电源技术, 2007, 31(3): 243-252.  
PEI Sheng, CHENG Shiquan, LIN Chengtao. Study on estimating method for battery state of charge based on support vector regression[J]. Power Technology, 2007, 31(3): 243-252. (in Chinese)
- [5] 郭桂芳, 曹秉刚. 电动车用 Ni/MH 电池组剩余容量的非线性自回归滑动平均预测 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(4): 591-595. (in Chinese)  
GUO Gui-fang, CAO Binggang. NARMAX method for estimating the residual capacity of Ni/MH battery pack for electric vehicle[J]. Control Theory & Applications, 2011, 28(4): 591-595. (in Chinese)
- [6] SUYKENS J A K. De Brabanter JaLukas Let alWeighted least squares support vector machines robustness and sparse approximation [J]. Neurocomputing, 2002, 48(1-4): 85-105.
- [7] 阎威武, 绍惠鹤. 支持向量机和最小二乘支持向量机的比较及应用[J]. 控制与决策, 2003, 18(3): 18-20.  
YAN Wei-wu, SHAO Hui-he. Application of support vector machines and least squares support vector machines to heart disease diagnoses[J]. Control and Decision, 2003, 18(3): 18-20. (in Chinese)

## Evaluating charge state of electric vehicle battery

**WANG Hua-jie, ZHENG Lai-fang**

Electronic of Engineering, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030008, China

**Abstract:** To exactly evaluate the state of the charge (*SOC*) of the electric vehicle's battery, the fuzzy neural network and least squares support vector machines were used separately at first and then the two methods were combined and employed alternately to predict the battery *SOC*. The battery model parameters of charging/discharging testing period were drawn from UDDS-NYCC-US06\_HWY driving cyclic experiment, which was provided by the U.S. department of energy's electrical vehicle. Using the data of battery current, voltage and temperature as the independent variables, test on an 80 Ah Ni-MH battery and the cycle of the battery's power was conducted to predict the battery's *SOC*. Results showed that the method not only can accurately estimate the *SOC* but also can reduce the amount of calculation.

**Keywords:** electric vehicle; fuzzy neural network; least square support vector machine; state of charge;

本文编辑:陈小平



# FP-Growth 算法在药物相互作用系统中的应用

王殿君<sup>1,2</sup>, 邵宗凯<sup>1\*</sup>

1. 昆明理工大学信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650500

2. 云南省第一人民医院云南省药学服务质量管理研究中心, 云南 昆明 650500

**摘要:**针对联合用药多不良反应事件频发的问题,提出使用关联规则挖掘中的FP-Growth算法进行分析运算.通过FP-Growth算法挖掘药物相互作用数据,得出了药物相互作用的规则,并将此算法成功运用到系统中.通过对数据库中的药物数据进行分析,对药物是否可以联合用药做出判断,进而对配药工作提供决策支持.设计并实现了静脉注射药物相互作用分析系统.结果表明,系统可以提高药物相互作用数据查询的速度95%左右,有利于促进合理用药和用药安全.

**关键词:**药物;关联规则;FP-Growth;相互作用

中国法分类号:TP311.1

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2015.10.011

## 0 引言

如今,伴随着静脉药物治疗中药品种类的不断增加以及新品种药物的出现,联合用药得到了广泛使用,同时所产生的药物之间相互作用也受到了人们越来越多的关注.目前,在静脉用药当中,对病人进行治疗的过程中几乎不存在一次只使用单一种类药物的情况,联合用药是为了增强药物的治疗效果,同时又减少药物的不良反应和用药量,随着当前联合用药数量越来越多,药物之间的不良反应的频率也在不断的上升,联合给药中药物相互作用是导致药物不良反应的一个非常重要的因素.因此,对药物相互作用的研究具有重要的指导意义和实践意义<sup>[1-2]</sup>.数据挖掘是最近几年里发展起来的一种信息处理技术,它是通过相关的算法搜索出隐藏在其中有价值信息的过程.本文对关联规则挖掘中的FP-Growth算法进行了有关研究,利用的药物数据是相关文献<sup>[3-4]</sup>中的抗感染类药物数据,探讨各药物之间潜在、有价值的关系.

## 1 药物相互作用的相关概念

药物相互作用是指在相同的时间或同一段时间2种或2种以上的药物联合使用时所导致药物疗效所产生的变化,可能加强疗效或减少药物的不利影响,也可能是药物的药效减弱或者出现本来不应该有的副作用,有时候甚至可能发生一些罕见的

不良反应,进而危害患者的身体健康<sup>[1]</sup>.比如:当去甲肾上腺素与全麻药同时使用时,会使心肌对拟交感胺类药反应更加的敏感,容易发生室性心律失常,不适宜一同使用,必须一同使用时应减少用量;当甲苯磺丁脲与磺胺类药物同时使用时,会致使人体出现低血糖的症状.

## 2 数据挖掘概述

### 2.1 数据挖掘概念

在最近几十年中,伴随着计算机、数据库及其相关技术的快速发展的同时,数据的存储也变的越来越简单和低廉.如何对数据进行处理成为我们必须面对的问题,所以数据挖掘技术应运而生,数据挖掘是指从海量的数据中发现潜在的、有用的,最终可转换成可被理解的形式过程.受多个学科影响,比如:统计学、数据库、机器学习、信息科学、可视化和其它学科等<sup>[5-6]</sup>.

### 2.2 关联规则概念

当前在医药学领域中数据挖掘技术应用也十分广泛与成功<sup>[7]</sup>.将数据挖掘中的关联规则应用到医院静脉注射药物相互作用分析中,促进了合理用药,从而对静配中心的药物分析工作起到一定的指导作用.

关联规则挖掘用来找出海量数据中各项集之间潜在的相关联系,它是数据挖掘中的一类重要算法.最近几年广泛应用于各个行业中.

FP-Growth 算法<sup>[8-9]</sup>作为关联规则挖掘中的经典算法,FP-Growth 算法利用了特殊的数据结构,解决了 APRIORI 算法挖掘过程中需要不断扫描数据库的缺点,它不需要不断的生成候选项集和不断的扫描数据库来进行对比.为了能够达到这种效果,它采用了一种特殊的数据结构形式,称为频繁模式树(FP-tree).

采用 FP-Growth 算法的步骤如下:

(1)为每一个频繁项,构建它的条件模式基,然后再构建它的条件频繁模式树.

(2)为每个新创建的条件频繁模式树重复上述过程.

(3)当构建的频繁模式树为 NULL 时,它的前缀就是频繁模式;当频繁模式树只包含 1 条路径时,列出所有可能的组合,然后与 FP-tree 的前缀连结就可以获取频繁模式.

通过最小置信度对每个频繁项集进行筛选,选出置信度大于或等于最小置信度的频繁项集,

形成强关联规则,成为有效关联规则.

### 3 以关联规则挖掘开发的静脉注射药物相互作用的分析系统

静脉药物配置中心,简称静配中心,英文缩写为 PIVAS,是指依照国际标准的要求和药物的特点来设计配药环境,并由接受过严格训练的药学技术人员来依照操作流程对包括细胞毒性药物在内的一些药物进行集中科学配置的医药机构<sup>[10]</sup>,它是为合理用药和临床治疗服务的.静脉药物配置中心可为临床治疗提供安全、可靠、经济的静脉用药,对临床治疗中的合理用药起到重要的促进作用.所以将数据挖掘中的关联规则算法应用到医院静配中心静脉注射药物相互作用中有非常重要的实际和指导意义.

药物相互作用的关联规则挖掘流程图如图 1 所示.

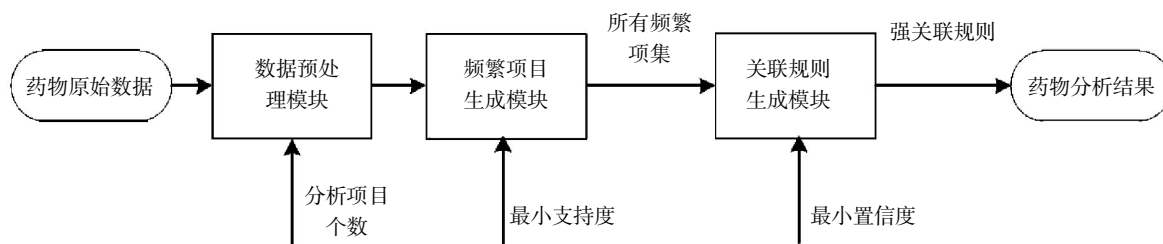


图 1 药物相互作用分析关联规则流程图

Fig.1 Flowchart of association rules of drug interaction analysis

#### 3.1 数据处理

数据处理过程可以用来改善数据的质量,从而有利于后续的数据挖掘工作,提供高质量的数据,从而提高了数据挖掘的准确度和性能.本文主要对《药物相互作用基础与临床》和《静脉用药物调配技术》两本书中的抗感染类药物分别为 41 种、137 种药物数据进行处理.

根据以上的药物数据,将相关文献中的抗感染类药物信息进行数据处理,以此建立药物事务的数据库表.此事务数据库表包括七个栏目:审核项目、药物名称、异常药物名称、提示、异常药物编码、异常药物类别和注意事项描述.其中提示信息可以分为:

- 1)禁止与其配伍;
- 2)与其配伍需谨慎;
- 3)需要关注;
- 4)调低用药剂量;
- 5)调高用药剂量.

#### 3.2 关联规则挖掘结果及分析

通过多次试验,最终将最小置信度设为 40%,而避免合用药物最小支持度设为 8%,谨慎合用药物最小支持度设为 10%,可以合用药物数据库的最小支持度设为 10%<sup>[11]</sup>.

对产生的关联规则作分析,从而得出其中的一些规律,取其中的几条强关联规则进行说明.

由避免合用药物生成规则说明与庆大霉素需避免合用的抗感染类药物有 92.5%与卡那霉素也需避免合用.

庆大霉素 $\Rightarrow$ 卡那霉素 0.925

这条规则的置信度为 92.5%,说明:当有一种抗感染类药物与庆大霉素避免合用时,这种药物同时与卡那霉素避免合用的概率为 92.5%.

由谨慎合用药物生成规则说明与妥布霉素需谨慎合用的抗感染类药物有 41.4%与多黏菌素 B 与需谨慎合用.

妥布霉素 $\Rightarrow$ 多黏菌素 B 0.414

这条规则的置信度为 41.4%,说明:当有一种抗感染类药物与妥布霉素谨慎合用时,这种药物同时与多黏菌素 B 谨慎合用的概率为 41.4%.

对于其它规则也可以得到同样的结果. 由可以合用药物生成规则:

阿苯达唑⇒氯喹+伏立康唑 0.50

这条规则的置信度为 50%,说明当有一种抗感染类药物与阿苯达唑可以合用时,这种药物同时与氯喹和福利康唑可以合用的概率为 50%.

将关联规则应用到静脉注射药物相互作用分析中,系统经过一段时间实际测试,效果良好. 部分结果显示结果如图 2 所示.

相互作用查询

查看表单

相互作用查询条件

搜索选项

查询

清空条件

药物名称:

剂量调整: 全部

药房: 静脉用药配置中心

Drag a column header and drop it here to group by that column

	审核项目	药物名称	异常药物名称	提示	异常药物规格	异常药物编码	异常药物类别	注意事项描述
>	药物药物相互作用	氨曲南		调高用药剂量			氨基糖苷类	
	药物药物相互作用	氨曲南	头孢西丁	调低用药剂量		逻辑药物		
	药物药物相互作用	氨溴索		调高用药剂量			其他抗菌抗生素	
	药物药物相互作用	胺碘酮	环孢素	调低用药剂量		逻辑药物		
	药物药物相互作用	胺碘酮	地尔硫卓盐酸盐	需要关注	30mg*40片/盒	Y00000010911		
	药物药物相互作用	昂丹司琼	地塞米松	调高用药剂量	1ml5mg*1支/支	Y00000010527		
	药物药物相互作用	奥美拉唑	地西洋	调低用药剂量		逻辑药物		
	药物药物相互作用	奥美拉唑	地西洋	调低用药剂量		逻辑药物		
	药物药物相互作用	奥美拉唑	复方酮康唑	调高用药剂量	20g*1支/支	Y00000011024		
	药物药物相互作用	奥美拉唑	华法林	调低用药剂量		逻辑药物		
	药物药物相互作用	奥美拉唑	华法林	调低用药剂量		逻辑药物		
	药物药物相互作用	奥美拉唑	华法林	调低用药剂量		逻辑药物		
	药物药物相互作用	奥美拉唑	华法林	调低用药剂量		逻辑药物		
	药物药物相互作用	奥美拉唑	伊曲康唑	调高用药剂量		逻辑药物		
	药物药物相互作用	奥美拉唑	克拉霉素	调低用药剂量	125mg*6片/盒	Y00000010942		
	药物药物相互作用	奥美拉唑	克拉霉素	调低用药剂量	125mg*6片/盒	Y00000010942		
	药物药物相互作用	奥美拉唑	苯妥英钠	调低用药剂量		逻辑药物		
	药物药物相互作用	奥美拉唑	苯妥英钠	调低用药剂量		逻辑药物		

图 2 关联规则在静配中心药物相互作用系统中的应用

Fig.2 Application of association rules in drug-interaction system at the center of the static distribution

4 结 语

结合以上分析,对于药物的相互作用案例进行关联规则挖掘是可行的. 通过设置合理的最小置信度和支持度阈值能够挖掘出有意义的规则. 通过分析这些强关联规则集有利于揭示数据之间潜在的、有价值的联系.

对关联规则挖掘中的 FP-Growth 算法进行了相关研究,并对药物数据进行了挖掘,初步探讨了各个药物各因素值间的联系. 实际并实现了静脉注射药物相互作用分析系统,促进了合理用药和用药安全.

致 谢

感谢昆明理工大学信息工程与自动化学院、云南省第一人民医院药剂科静配中心提供的帮助与支持!

参考文献:

[1] 刘彦卿,洪燕君,曾苏.代谢性药物-药物相互作用的研究进展[J].浙江大学学报(医学版),2009,38(2): 215-224.  
LIU Yan-qing, HONG Yan-jun, ZENG Su. Recent advances in metabolism-based drug-drug interactions[J]. Journal of Zhejiang University (Medical Sciences), 2009, 38(2):215-224.(in Chinese)  
[2] 孟威宏,史国兵,赵庆春,等.促进医疗机构合理用药的对策[J].中国药房,2011,22(5):385-387.  
MENG Wei-hong, SHI Guo-Bing, ZHAO Qing-chun, et al. Countermeasures for the Improvement of Rational Drug Use in Medical Institutions [J]. China Pharmacy, 2011, 22(5):385-387. (in Chinese)  
[3] 刘治军,韩红蕾.药物相互作用基础与临床[M].北京:人民卫生出版社,2009.  
LIU Zhi-jun, HAN Hong-lei. Basic and clinical drug

- interaction [M]. Beijing: People's Medical Publishing House(PMPH), 2009. (in Chinese)
- [4] 刘圣,傅先明.静脉用药物调配技术[M].安徽:安徽科学技术出版社,2015.
- LIU Sheng,FU Xian-ming.Intravenous Drug formulation technology [M].Anhui:Anhui Science and Technology Press,2015. (in Chinese)
- [5] TAN Pang-ning, Michael Steinbach, Vipin Kumar. Introduction to Data Mining [M]. Addison Wesley: 1st International edition, 2005.
- [6] 王光宏,蒋平.数据挖掘综述[J].同济大学学报(自然科学版),2004,32(2):246-252.
- WANG Guang-hong, JIANG Ping. Survey of data mining[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2004, 32(2):246-252. (in Chinese)
- [7] 刘婵桢,王友俊.医学数据挖掘技术与应用研究[J].生物医学工程学杂志,2014,31(5):1182-1186.
- LIU Chan-zhen, WANG You-jun. Research on medical data mining and its applications [J]. Journal of Biomedical Engineering, 2004, 31(5):1182-1186. (in Chinese)
- [8] 陆楠,王喆,周春光.基于FP-tree 频集模式的FP-Growth 算法对关联规则挖掘的影响[J].吉林大学学报(理学版),2003,41(2):180-185.
- LU Nan, WANG Zhe, ZHOU Chun-guang. The effect of fp-growth algorithm based on fp-tree frequent set patterns on association rule mining [J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2003, 41(2):180-185. (in Chinese)
- [9] Jiawei Han, Micheline Kamber. Data Mining Concepts and Techniques [M]. Beijing:China Machine Press, 2001.
- [10] 晏马成,陈胜新,周东.医院静脉注射液配制业务的进展[J].中国医院药学杂志,2003,23(8):29-34.
- YAN Ma-cheng, CHEN Sheng-xin, ZHOU Dong. Hospital intravenous injection allocation of business progress [J]. Chinese Journal of Hospital Pharmacy, 2003, 23(8):29-34. (in Chinese)
- [11] 胡双. 关联规则挖掘研究及其在药物相互作用中的应用[D]. 昆明:昆明理工大学,2013.
- HU Shuang. Mining association rules and its application in the drug interaction[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2013. (in Chinese)

## Application of FP-Growth algorithm in interacting system of medicine

WANG Dian-jun<sup>1,2</sup>, SHAO Zong-kai<sup>\*1</sup>

1.Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;2.Research Center for Pharmaceutical Care and Quality Management, the First People's Hospital of Yunnan Province, Kunming 650500, China

**Abstract:** Aimed at the adverse drug reactions resulted from the combination of drugs, the FP - Growth in association rules mining was proposed. The drug-interaction rules were obtained by using FP-Growth algorithm to mine the data of drug interaction, and the algorithm was applied to the system successfully. By analyzing the drug data in the database, the feasibility of the drug combination could be concluded, which could provide decision support for the work of configuring drugs. Finally, the system of intravenous drug-interaction analysis system was designed. The application results show that the query speed of drug-interaction data increases by 95% in the system, which is conducive to rational drug use and medication safety.

**Keywords:** drugs; association rules; FP-Growth; interaction

本文编辑:陈小平

文章编号:1674-2869(2015)10-0061-06

# 基于综合参数调控的 LED 智能照明系统

李 奇

华中科技大学光学与电子信息学院,湖北 武汉 430074

**摘 要:**为了实现照明系统调光的目的性与准确性,提出了一种基于照度检测的 LED 智能照明控制系统. 系统由传感器、LED 照明回路、控制面板及逻辑控制器件组成. 通过分析实例场景的照明结构与需求,可编程门阵列利用串行 I/O 口读取照度传感器、人体红外传感器、控制面板、投影仪信号等数据,同时输出脉冲宽度调制调光信号对 LED 照明回路进行控制,实现以综合参数调控的智能系统功能. 在不同的照明环境中,系统可根据具体要求进行灵活调整,以实现了对各种 LED 智能照明场景的多区域准确控制.

**关键词:**LED 智能照明;传感器;综合参数调控;多区域控制

**中图分类号:**TU113.6

**文献标识码:**A

**doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2015.10.012

## 0 引 言

LED 照明具有环保、节能等特性,是新一代绿色照明光源,已得到越来越广泛的应用,而 LED 智能照明系统已被应用于酒店、办公楼、学校等各种场所,智能照明系统需要根据环境变化进行自适应控制,在人群集中,且长时间工作场所,对视觉行为、视觉舒适、视觉环境有着较高的要求,不合理的照明设计可能会造成健康损伤<sup>[1]</sup>.

目前的智能照明在控制方面还存在独立性与盲目性的不足. 在光强、色温、照度调节乃至照明颜色等方面不能根据实际需求实时合理地调控. 为了弥补这一不足,本文设计了一种采用照度等多参数检测方案,实时反馈场景的相关联区域照明状态,作出及时判断并调整的新型智能照明系统. 在实现各个场景模式智能切换的同时,灯光控制方面也实现了根据具体需求,有目的地准确控制,提高照明系统智能化程度. 并以多媒体会议室为例,通过分析光源分布、照明需求,对场景进行照度检测与照明控制,验证了系统的合理性<sup>[2-3]</sup>.

## 1 多参数检测方案设计

根据照明功能要求,确定各区域照明具体参数,通过人体红外传感器以及投影仪信号进行照明模式智能切换,然后通过照度传感器反馈,系统调整控制信号,达到相应照明要求.

### 1.1 照明实例

以多媒体会议室照明为例,会议室长宽分别为 9 m 和 4 m,层高为 3.2 m,布置有 6 个 50 W LED 泛光灯,单光光源通量为 4 000 lm,以及一个 30 W LED 射灯,安装高度均为 3 m,桌面距离地面 0.75 m,光源距离桌面 2.25 m. 多媒体会议室灯光分布如图 1 所示,照明功率密度为 10 W/m<sup>2</sup>,平均照度 300 lx,符合国家建筑照明设计标准<sup>[4]</sup>的要求.

多媒体会议室分为 4 个照明区域,区域 I 为靠近窗户会场区域,区域 II 为远离窗户会场区域,均采用泛光灯均匀照明,区域 III 为演示台区域,采用射灯进行局部照明,区域 IV 为投影仪区域,不需要照明,但会检测投影仪亮度. 在控制的过程中,将对不同区域的照明要求进行区别控制,使各区域均达到各自预想的照明环境.

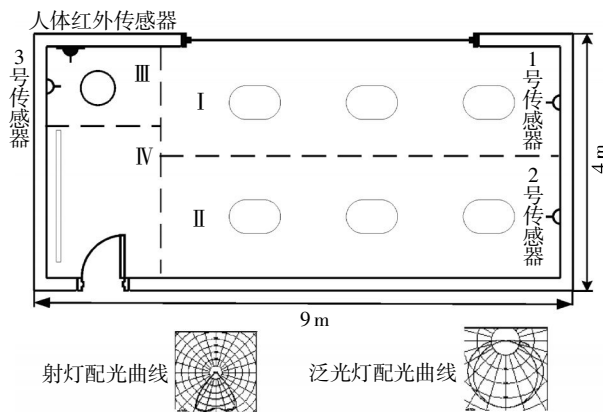


图 1 会议室灯光分布图

Fig.1 Light distribution of meeting room

收稿日期:2015-08-25

作者简介:李 奇(1991-),男,湖北武汉人,硕士研究生.研究方向:软件工程.

## 1.2 照度检测

照明需求可分为三类:(1)低照度照明. 在演示模式中,会议室应采取低照度照明方式以配合投影仪演示,为了同时满足会议桌上的阅读要求,可设置为最低阅读照度要求为 75 lx. (2)中等照度照明. 在讨论模式中,会议室的亮度应该提高至会议室照度标准值,即 200 lx,以满足讨论、记录等活动的照明需求. (3)高照度照明. 在进退场时,为了方便安排、签到,会议室照度应该尽可能达到最亮,根据照明条件设定为 300 lx<sup>[5]</sup>.

进行室内照明时,应同时计入照明器直射照度与墙面反射照度. 平面的闭合空间,光源 S 与墙面  $A_J$  与工作表面  $A_K$  上微元面  $dA_J$ 、 $dA_K$  所在位置关系如图 2 所示.

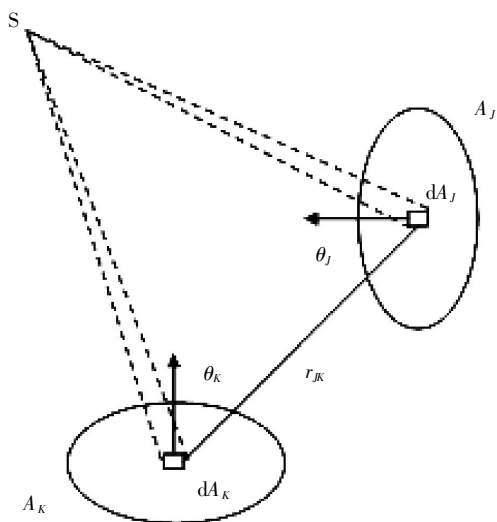


图 2 墙面与工作表面关系示意图

Fig.2 Diagram of metope and work surface

根据照度定义与光传递理论,可推导出当空间内存在人工照明,并且光源位置固定时,任意两点的照度均成比例关系, $A_J$  与  $A_K$  面上照度传递比  $K$  不会随着光源照度的变化而变化<sup>[6]</sup>. 根据这一模型,可以通过照度传感器测量墙面传感器照度变化量  $\Delta E_k$ ,对工作表面照度变化量  $\Delta E_J$  进行推算,然后对 LED 光源进行相应调整,使工作表面照度达到预期值,实现对照明的准确控制. 照度变化推算公式为:

$$K = \frac{E_k}{\eta E_J} = \frac{E_2(r_x^2 + r_y^2)}{\eta(h - 0.75m)^2 E_1} \quad (1)$$

式(1)中: $K$  为理想传递比; $E_k$  为墙壁表面照度, lx;

$E_J$  为工作表面照度, lx;  $\eta$  为误差范围;  $E_1$  为配光曲线  $dA_J$  方向照度, lx;  $E_2$  为配光曲线  $dA_K$  方向照度, lx;  $r_x$  为光源与传感器水平距离, m;  $r_y$  为光源与传感器垂直距离, m;  $h$  为光源安装高度, m.

影响  $K$  值的主要因素为:照度传感器设置高度与相对光源的水平距离.

如图 1 所示,三个照度传感器分别安装在墙上,检测区域 I、II、III 照度变化. 为防止人员对传感器进行干扰,应安装在墙上较高的位置,距离地面 2 m,根据会议室灯光分布图,距离最近光源水平距离 1.2 m. 可取传递比  $K=0.34$ . 根据计算,低照度照明、中等照度照明、高照度照明时照度传感器参考值分别为 25.5 lx、68 lx、102 lx. 因为 10 lx 的变化对人眼并不会明显影响,取误差范围为 10%,得到参考区间分别为 23~28 lx、62~74 lx、92 lx 以上. 在相应模式下,若照度传感器反馈值在参考区间内,便可认为已达到照度要求,无需进一步调控<sup>[7]</sup>.

## 1.3 系统流程

根据一般会议流程,可将照明分为以下几种模式:进退场模式、演示模式、讨论模式、休息模式、关灯模式. 随会议流程安排,操作模式流程如下:

(1)进退场时,通过控制面板开启进退场模式,会议室区域 I、II、III 均为高亮照度模式. 1、2、3 号传感器参考范围为 92 lx 以上.

(2)当投影仪开启并在人体红外传感器检测到人体时,系统通过控制面板自动启动演示模式. 演示模式除了调光模式之外,会有定时限制,时间快结束时会对演示者进行提醒. 区域 I、II 为低照度模式,光照条件可以实现基本阅读,1、2 号传感器参考范围为 23~28 lx,区域 III 为中照度模式,3 号传感器参考范围为 62~74 lx. 当 LED 控制信号为 0 依然达高于照度要求时,电动窗帘关闭. 演示结束后,可通过控制面板切换为讨论模式,也可以在定时结束时自动切换为讨论模式.

(3)讨论时,区域 I、II、III 均为中等照明模式. 1、2、3 号传感器参考范围为 62~74 lx.

(4)当投影仪关闭时,控制面板调整为休息模式. 休息完毕后可通过控制面板开始演示模式. 区域 III 低照度照明,区域 I、II 中等照度模式. 3 号传感器参考范围为 23~28 lx,1、2 号传感器的参考范围为 62~74 lx.

(5)手动切换关灯模式时,所有区域 LED 灯关闭.

系统控制流程图如图 3 所示.

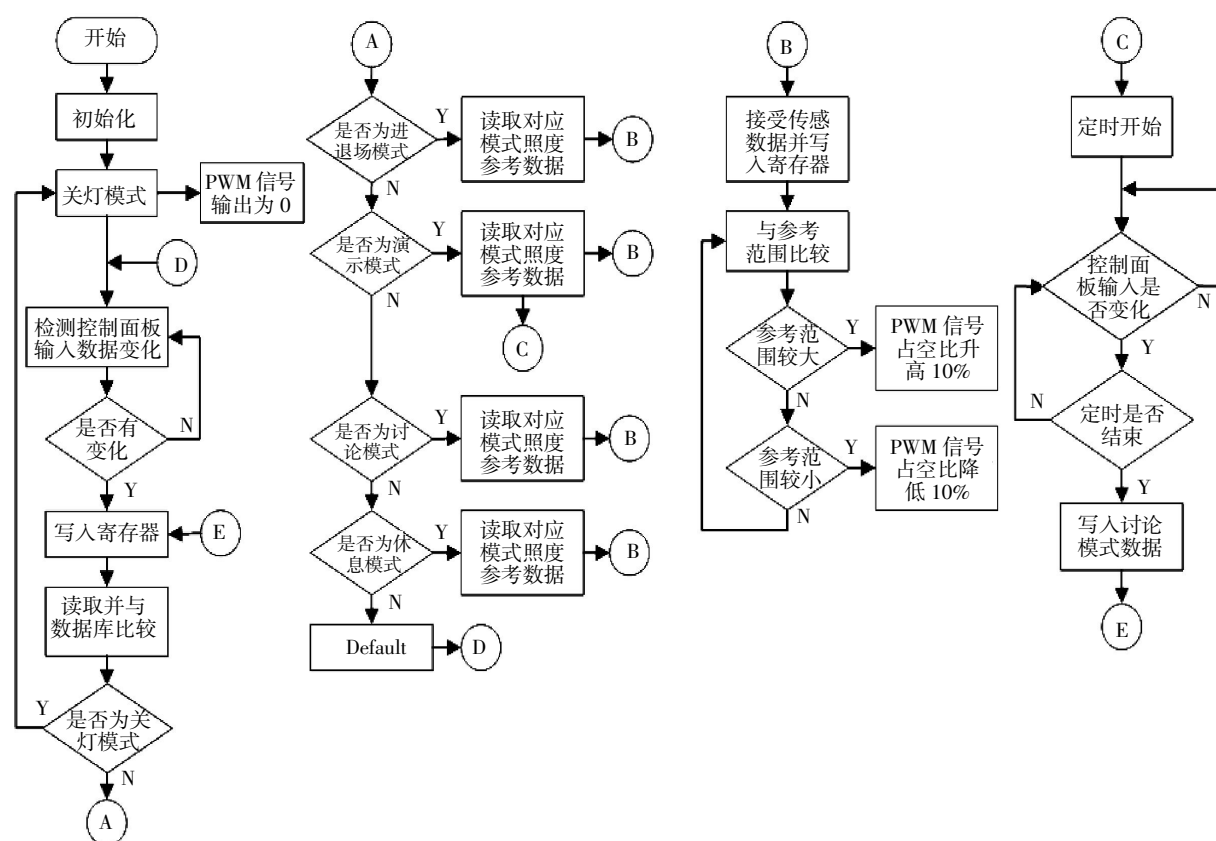


图 3 系统控制流程图

Fig.3 Flow chart of system control

#### 1.4 控制仿真结果

根据系统中各光源位置与亮度关系,利用 DI-ALux 仿真软件,对工作平面照度分布进行了仿真。根据灯具设计参数对照明功率密度与平均照度的推算,进退场时可以满足照度要求,同时关灯模式也不需要对照明进行仿真计算。所以,主要针对演示模式、讨论模式、休息模式进行建模仿真。仿真结果如图 4 所示。

演示模式中,各个工作区域照度如图 4 所示。横纵坐标代表场景长、宽尺寸,色阶深度代表对应照度范围。根据调控区域 I、II、III 的 LED 回路控制信号占空比分别为 20%、20%、70%,平均照度为 75.6 lx、70.2 lx、221.5 lx。讨论模式中,控区域 I、II、III 的 LED 回路控制信号占空比分别为 40%、40%、50%,平均照度为 210.7 lx、194.3 lx、312.3 lx。休息模式中,控区域 I、II、III 的 LED 回路控制信号占空比分别为 60%、60%、10%,平均照度为 256.9 lx、286.7 lx、142.1 lx。在各个模式下,区域 I、II、III 工作表面照度均在误差范围之内。根据仿真结果显示,在各模式下,智能照明控制系统到达了对照明设计的要求。

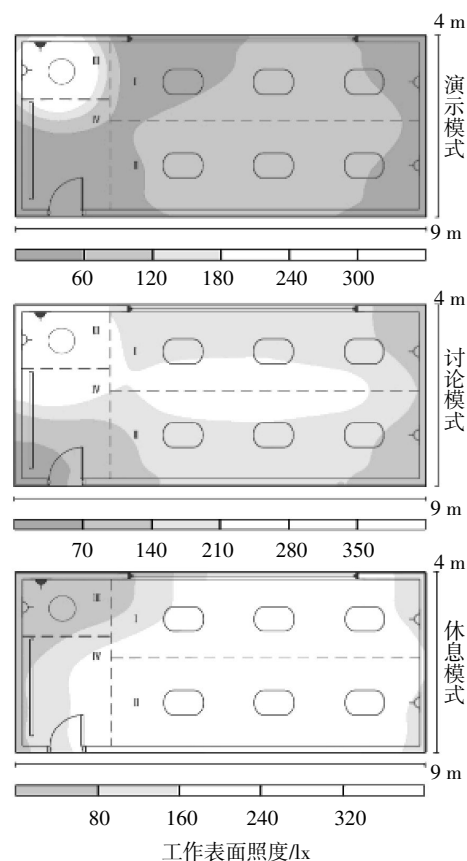


图 4 室内工作面灰阶等照度图

Fig.4 Gray-scale intensity of illumination on work surface

## 2 系统结构

根据多参数调控智能照明系统的要求,照明模式将通过智能方式进行切换,在不同模式下,各个区域的照明程度在照度传感器反馈后进行比较调整.

### 2.1 硬件结构

智能照明系统由逻辑编程器件(FPGA)、控制面板、照度传感器、LED 照明回路组成,系统结构如图 5 所示.

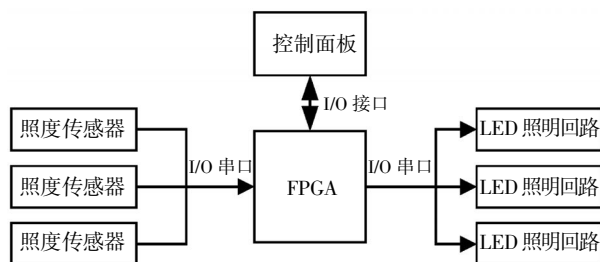


图 5 系统结构

Fig.5 System organization

控制面板主要功能为显示当前模式状态与模式手动切换控制. FPGA 作为系统控制核心部件,综合控制面板指令信号、传感器反馈信号、自身时钟信号对照明模式进行智能切换,并依照模式设定确定各个照明区域应该达到的照度参数范围,同时读取对应照度传感器数据,与期望参数范围进行对比,然后改变控制 LED 照明回路的 PWM 信号,使相应区域达到应有的照明要求.

### 2.2 控制模块

控制模块主要功能为接收控制面板以及传感器信号后,输出对应 PWM 信号对各个区域 LED 照明设备进行控制. FPGA 智能控制模块示意图如图 6 所示.

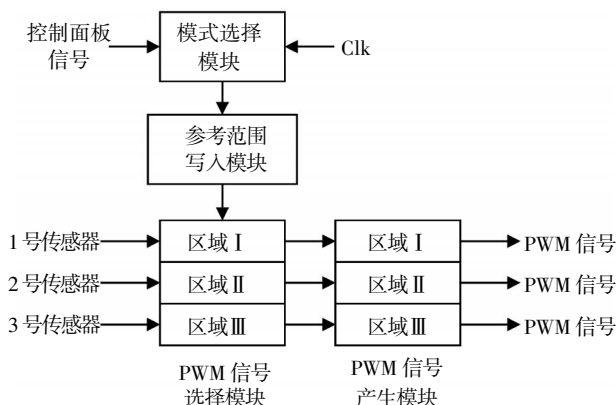


图 6 控制模块示意图

Fig.6 Diagram of control module

把模块封装成为硬件模块电路进行连接,连接方式如图 7 所示.

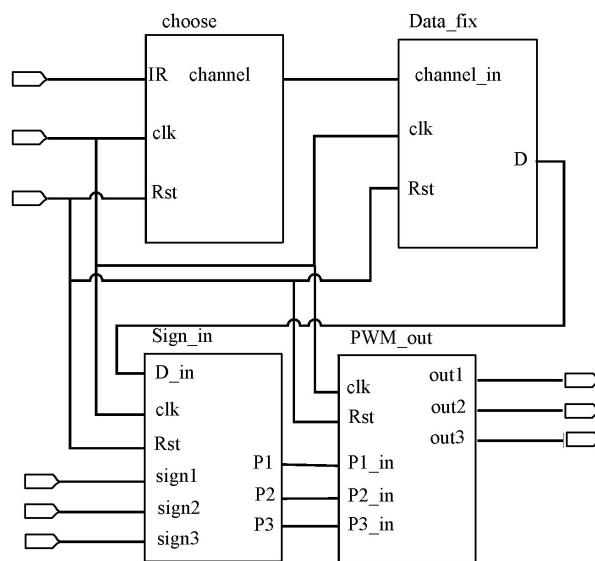


图 7 电路模块连接图

Fig.7 Diagram of circuit module connection

在接收到控制面板的控制信号后,选择调用相应的参考范围模块:

```
begin
  case(Data[23:16])//识别控制面板发出接收信号
    8'b01000101;channel<=2'b000;//选择不同模式
    .....
  default;;endcase
  case(channel)//根据选择模式调用参考范围写入模块
    2'b000;begin D1 <=1'b1;D2 <=1'b0;D3 <=1'b0;end
    .....
  default;;endcase end
```

在确定参考范围后,与照度传感器信号进行对比,如果高于传感器信号,则增加 PWM 占空比输出,如果低于则减少,如果在范围内则不做出调整.

always@ (negedge rst or posedge clk)//时钟上沿触发模块

if(sign>max) pwm<=pwm-1;//高于范围,PWM 占空比减小一档

else if (sign<min) pwm<=pwm+1;//低于范围,PWM 占空比增加一档

根据 PWM 输出指令来调用相对应占空比的 PWM 输出模块

```
PWMout LEDout1(. .....,.pwm(pwm1),.pw-
```



```

mout(ledout1));
    PWMout LEDout2 (. . . . . ,pwm (pwm2) ,.pw-
mout(ledout2));
    //调用 PWM 信号产生模块
    . . . . .

```

### 3 结 语

与原有的智能照明系统相比,设计的 LED 智能照明系统实现了基于照度检测的照明控制,仿真结果理想,并在实际的场景应用中实现了照明要求,得到了良好的照明效果. 对于不同环境的智能控制,该系统可以通过不同环境的 LED 光源分布与照明需求灵活地调整,达到所需的智能照明控制要求.

#### 参考文献:

- [1] 侯加全.智能照明控制系统发展趋势的探讨[J].现代建筑电气,2013(S1):263-266.  
HOU Jia-quan.The discussion of development trend of intelligent lighting control system[J]. Modern construction electrical,2013(S1):263-266.(in Chinese)
- [2] YAO H,LI Z. A smart lighting system in a demo classroom[C]//CIE Central Bureau/Conference Secretariat, China Illuminating Engineering Society.Proceedings of Lighting Quality & Energy Efficiency.CIE Central Bureau/Conference Secretariat,China Illuminating Engineering Society,2012:255-256.
- [3] 代丹, 陈寅生. LED 照明技术应用现状与发展趋势[J]. 建筑电气,2014(12):14-20.  
DAI Dan,CHEN Yan-sheng. LED lighting technology application situation and development trend[J]. Building Electricity,2014(12):14-20.(in Chinese)
- [4] 中华人民共和国建设部.GB5003422004 建筑照明设计标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2004.  
Promulgated by the PRC Ministry of Construction. GB5003422004 standard for lighting design of buildings [S].Beijing:China Architecture & Building Press,2004. (in Chinese)
- [5] Min -Wook.Lee,Hyun -Ji.Kim,Jang -Hyun.Lim,Hoon. Kim. A Study of Development of Lighting Control System Considering User's Needs in Residential Environment[C]//Planetary Scientific Research Center.Planetary Scientific Research Center Volume 48. Planetary Scientific Research Center,2014:87-90.
- [6] 袁樵. 国际照明委员会照明标准——室内工作场所照明[J]. 照明工程学报,2002(4):55-60.  
YUAN Qiao.The lighting standards of the international commission——illumination lighting of indoor workplaces[J].China Illuminating Engineering Journal,2002 (4):55-60.(in Chinese)
- [7] 周晓伟,蔡建平,郑增威,等. 新型室内照明智能控制系统的研究与实现 [J]. 计算机应用研究,2009(8): 2977-2981.  
ZHOU Xiao-wei,CAI Jian-ping,ZHENG Zen-wei,et al. Research and implementation of novel intelligent indoor light control system,2009(8):2977-2981. (in Chinese)

## Smart luminance system of LED based on comprehensive parameter control

*LI Qi*

School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

**Abstract:** To improve the accurate and smart control of the luminance system, a smart luminance control system of LED based on luminance measurement was proposed. The system consists of sensors, LED circuits, a control interface and a logic control device. Through analyzing the lighting structure and requirements of scenarios, the logic control device reads inputs from light sensors, infrared sensors of the human body, control interface and projector signal by its serial I/O, and subsequently adjusts the LED power through pulse-width modulation signals to achieve the function of this smart system by comprehensive parameter control. The system can be adjusted flexibly according to the specific requirements in different lighting conditions, realizing the accurate control in the multi-areas

**Keywords:** smart luminance of LED; sensor; comprehensive parameter control; multi-area control

本文编辑:陈小平

文章编号:1674-2869(2015)10-0067-06

# 轨道交通智能售票系统服务设计优化

赵树林,殷晓晨\*

合肥工业大学建筑与艺术学院,安徽 合肥 230601

**摘要:**为了提升轨道交通智能售票系统的用户体验,应用工业设计理念与服务设计原则,对自助售票机界面设计进行优化设计.在对现有轨道交通智能售票系统用户需求、购票流程及用户体验进行分析的基础上,将服务设计“用户为先+追踪体验流程+涉及所有接触点+致力于打造完美的用户体验”的理念与方法引入轨道交通售票系统的设计,提出互联网+背景下轨道交通售票系统的服务设计原型,并在此基础上构建服务系统角色模型和功能树,最后将优化后的功能体现在自助售票机界面设计中.实践证明轨道交通售票系统界面的优化设计具备更好的可用性、有效性、高效性和更优的用户体验.

**关键词:**服务设计;轨道交通;智能售票系统;服务模型;用户体验

**中图分类号:**TH391

**文献标识码:**A

**doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2015.10.013

## 0 引言

智能售票系统是使用一些相对先进的技术,比如信息技术数据通信技术、GPS定位导航技术以及传感器技术等,对地面交通运行状况信息进行实时、准确和高效的追踪,并将该信息应用到城市公共交通售票服务的规划与管理中,是解决目前城市交通售票模式单一问题的首要措施.随着城市立体交通路网大发展,轨道交通路网逐渐形成,如同智能巴士系统一样,轨道交通售票系统智能化发展逐渐被人们提上日程.智能售票系统利用无线传感技术采集轨道交通各线路流量、人员以及设备的信息,通过互联网或移动通信网络,经由计算机或手机实现对票务的智能化管理,以使用户通过自助售票机来远程了解当时当刻始发站和目的地的人、车运行状况,以方便线路的最优选择和远程购票等操作.此外,在不影响自助售票系统本身必要功能的工作使用之外,尽可能的增加更多乘客所需要的信息,并根据实时反馈智能优化当前购票乘客线路,达到减少操作,更加直观,更具智能化的购票流程和更完善的用户体验.

## 1 轨道交通售票系统

### 1.1 轨道交通自助售票系统的国内外发展现状

轨道交通自助售票系统是自动售检票系统中的一部分,体系复杂,技术含量相对较高.可以预

计,随着智能互联时代的到来,无论是互联网还是物联网的渗透,该系统将会更加复杂,专业面更广,维护更困难<sup>[1]</sup>.在国内,自助售票系统具体操作顺序不统一,有的先选定购票张数再进行目的地选择,有的则正好相反.在目的地选择部分,没有配合相应软键盘直接输入目的地信息,而是在线路地图中肉眼识别,使得外来人口在不了解相关线路具体站点的情况之下,带来了不必要的困扰,线路越多越复杂,乘客识别能力更加繁琐,如图1所示.

在国外,智能化设计在自助售票系统的应用也处于刚刚起步阶段,但在信息服务设计上,通过实时回收系统内数据并及时显示在自助售票机上,已经实现信息实时共享与应用,例如日本轨道交通系统,全国大中城市各条线路已经在近年逐步更新自助售票机服务交互系统,界面显示实现双屏多任务同时操作,双屏操作避免了单屏操作的凌乱,需求触点更加直接.如图2所示,左边任务屏幕提供购票张数信息,虽然与右边主屏幕单列开来,但省时高效而且直观的操作流程极大的方便乘客购票.不仅如此,界面增加信息指示条,以用于显示当前站点实时人流量、各线路拥堵以及紧急通知等实时信息.

### 1.2 互联网时代下的自助售票系统

随着经济社会不断发展,技术不断成熟.轨道交通迎来加速发展的时机,北京、上海、广州等特大城市轨道交通线网更是交错交织.如何基于互

收稿日期:2015-08-17

作者简介:赵树林(1991-),男,安徽合肥人,硕士研究生.研究方向:工业设计.\*通信联系人.

联网链条各部分,建立组织更加优秀、受用广泛的服务设计体系,是当今轨道交通智能化的当务之急亦是必经之路。



图 1 北京地铁自助售票机界面图

Fig.1 Interface of Beijing subway self-service ticket machine



图 2 东京地下铁自助售票机界面图

Fig.2 Interface of Tokyo subway self-service ticket machine

基于互联网时代的发展,另一种新型趋势。即物物相联的物联网逐渐被人们所挖掘。通过射频识别、全球定位、红外感应器系统等信息传感设备,按一定协议,把任何物品与互联网相连接,进行信息交换和通信,再通过物品工作反馈的过程,以实现智能化识别、定位、跟踪、监控和管理的一种网络概念<sup>[2]</sup>。其实在现有的轨道交通智能检测系统中已经广泛应用,其中,充当主要角色的即是实时数据收集和信息反馈,其中包括 GPRS 车载定位系统;摄像头采集等数据收集系统,采集到实时数据通过大型数据库传输和云端计算机运算,最终将实时信息,线路优化结果反馈在接受设备上,使得大众出行更加直观便捷。另外,以手机为代表的智能移动设备进入千家万户,各种应用让人应接不暇,目前已经能够实现客户端远程购买汽车票、火车票、机票等服务。以此看来,公共交通尤其是轨道交通售票系统进入远程购票模式指日可待。未来,通过

客户端,乘客既可以在家中了解时事线路信息,预先购票,进站后在自助购票机甚至直接在闸机验证购票信息进站乘车即可,省时省力,智能高效,如图 3 所示。

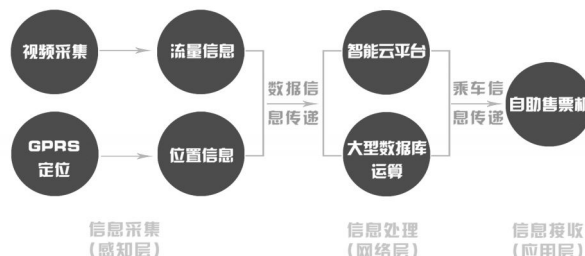


图 3 轨道交通自助售票机物联网模式流程

Fig.3 The IOT mode process of rail transit self-service ticket machine

## 2 以用户为中心的服务设计

### 2.1 服务设计的概念

服务设计主要是将设计学、管理学、计算机技术和营销学的理论和方法结合起来,有效的计划和组织一项服务中所涉及的人、通信交流、基础设施以及物料等相关因素,从而提高用户体验和服务质量的设计活动。服务设计是从用户的需求出发,运用以人为本的、科学的、用户参与的方法,确定服务提供的方式和内容的过程<sup>[3]</sup>。

### 2.2 服务设计流程和方法

以用户为中心的概念在工业设计领域被广泛应用并贯穿整个过程,基于本文阐述的轨道交通售票系统的服务设计即是显性服务设计中的一类。整体而言,移动端的服务设计成为此概念领域的前沿先端。从最初的用户研究至最终的产品设计与维护。在整个过程当中,分为分析与规划、开发设计、设计评测三大阶段。具体的转化过程为“用户需求分析→服务定位触点→原型设计→系统设计→设计评价”如图 4 所示。

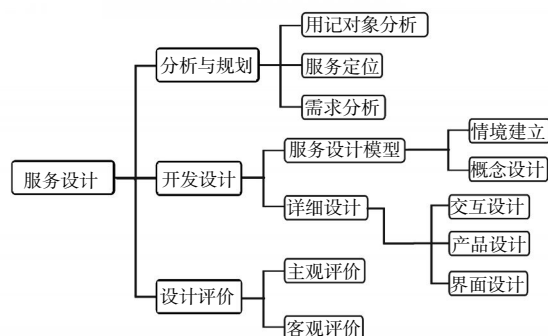


图 4 服务设计流程图

Fig.4 Flow chart of service design

### 3 轨道交通自助售票系统的服务设计优化

针对上述分析,根据服务特性和理念,基于物联时代技术蓝图的指印.通过服务对象和服务提供者的接触点分析,将优化结果运用于整个服务流程中.

#### 3.1 分析与规划

**3.1.1 轨道交通售票系统用户对象分析** 近年来,人口增长、城市交通人流量的增加是推动新型交通模式发展的主要动因.以自动售票机为主体的轨道交通自助售票系统中,乘客即是服务研究对象.使用轨道交通这一公共交通工具出行的人数比例不断增加,带给自助售票系统前所未有的压力.通过实地考察和研究归纳出乘客主要分为两种:第一种,城市本地常住人口.这一部分乘客由于出行路程趋向于单一化,以上班族和学生为主,始发地和目的地是固定的.因此,这一部分人也已经熟知自己经常经过的线路概况和票价信息.除此之外,城市一卡通的不断兴起,使用者也是面向常住人口开放,人们只需携带一张卡,进入轨道交通进出站闸机直接刷卡乘车,省去了自助售票这一多余环节.第二种,以出差、旅行、探亲为主的流动人口.这部分乘客由于出行路线多样化和暂时性等特点,外加对于出行路线不熟,临时办理长时效期的交通卡手续繁琐,使得自助售票机成为轨道交通出行的必经程序之一.综合分析来看,研究重点也就主要针对于此部分受用群体进行特定对象的服务设计研究<sup>[4]</sup>.

**3.1.2 用户需求分析与规划** 信息化的发展,公共交通出行的乘客需求趋于多样化,不仅仅满足于购票乘车这一简单需求.轨道交通也是如此.通过对部分使用轨道交通售票系统的乘客调查,归纳出如图 5 所示的几点.

**3.1.3 轨道交通售票系统购票流程和触点分析** 通过普通乘客在进站购票过程中普遍的流程顺序研究,与表一中罗列分析的用户需求结合,综合分析乘客购票需求流程,具体为:确定购票张数→选择目的地→获取所需信息→投币购票→出票口取票(找零);移动客户端购票乘客取票需求流程具体为:确定“取票”→确定取票信息→验证取票信息→出票口取票<sup>[5]</sup>,如图 6 所示.

轨道交通售票系统触点产生由乘客起主导作用.以用户需求为主的轨道交通智能售票系统的

信息构架大体分为:服务项目(购票/取票),购票张数,时间,线路,目的地,票价(投币),行程推荐.

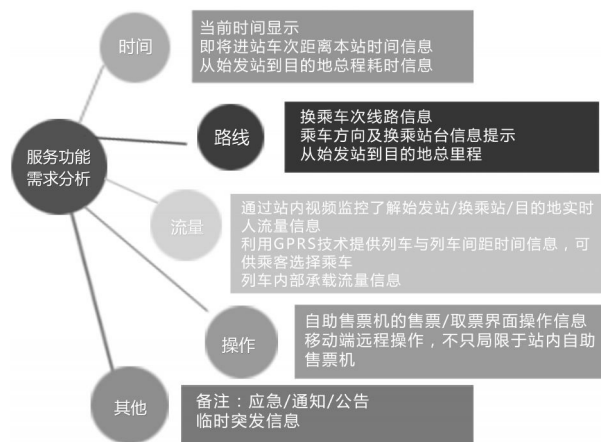


图 5 轨道交通售票系统的服务功能需求分析

Fig.5 Requirement analysis of service function of the rail transit ticket system

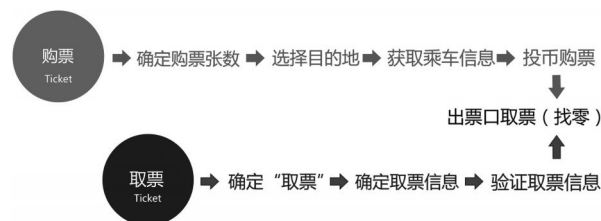


图 6 轨道交通售票系统购票流程分析

Fig.6 Process analysis of rail transit ticket system

行程推荐模块基于技术支撑,迎合乘客需求,根据数据采集和云端运算,根据乘客提供目的地信息,提供时间最快,拥堵最轻,距离最短三种出行方案,如图 7 所示.

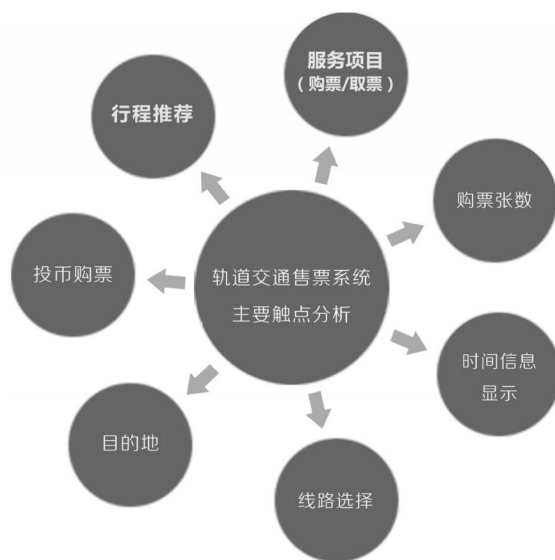


图 7 轨道交通售票系统主要触点分析

Fig.7 Main contact analysis of rail transit ticket system

### 3.2 具体设计

3.2.1 服务原型设计 服务模型设计主要包括草图和服务信息设计. 以主页面, 功能模块和下层功能块之间的交互为例, 通过上述的用户研究以及服务需求分析<sup>[6]</sup>, 确定轨道交通售票系统的功能需求列表, 生成服务原型示例图, 如图 8 所示.

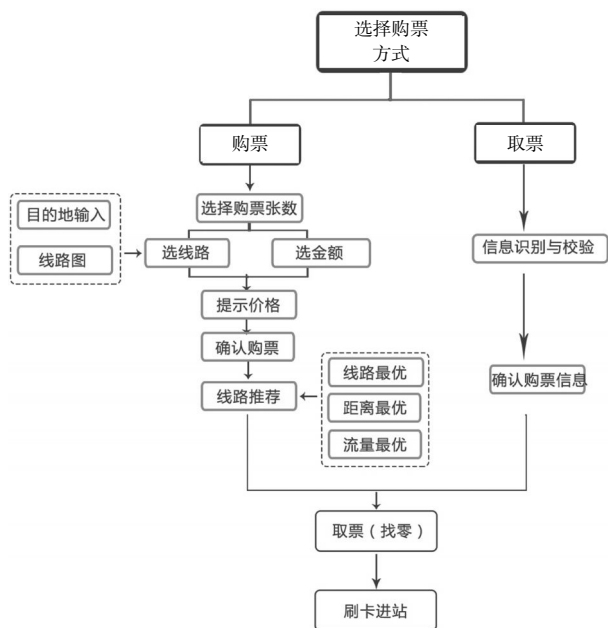


图 8 轨道交通售票系统的服务原型设计

Fig.8 Prototype design of rail transit ticket service system

3.2.2 系统界面优化设计 综上所述用户需求流程, 不论是在自助售票机界面设计部分还是在移动设备客户端界面部分, 界面设计是构成自助售票机服务系统中服务受用者和服务设计者最为重要的触点<sup>[7]</sup>.

以自助售票机界面为例, 自助售票流程包括三大基本功能, 分别是时间信息、线路目的地选择、取票. 时间位置信息通过 GPRS 定位列车所在位置来提供乘客选择, 通过云端处理收集到的流量信息和乘客输入的目的地信息等经过计算机数据库运算提供优化线路方案, 取票信息提示当前购票和网络购票取票流程等<sup>[8]</sup>.

相较于传统售票机界面功能, 本次设计由于移动设备购票应用模块的增加, 因此, 在初始界面增加服务项目模块如图 9 所示.

其次, 在选择线路模块增加目的地输入对话框, 配以软键盘. 这样使得人机交互更加简法直观, 方便快速得到乘客出行目的地信息, 省去由于乘客线路不熟等原因在传统线路地图中找寻所带来的繁琐体验. 如图 10 为本次服务设计优化意向, 图 11 为传统线路选择界面, 作为大多数非本地乘

客出行需求, 这样繁杂琐碎的线路很难让乘客直观的找到自己想去的目的, 线路越多, 越加繁杂, 交互层级更多, 用户体验随之变差.



图 9 服务项目界面意向

Fig.9 Intention of service interface



图 10 目的地选择界面意向

Fig.10 Intention of destination selection

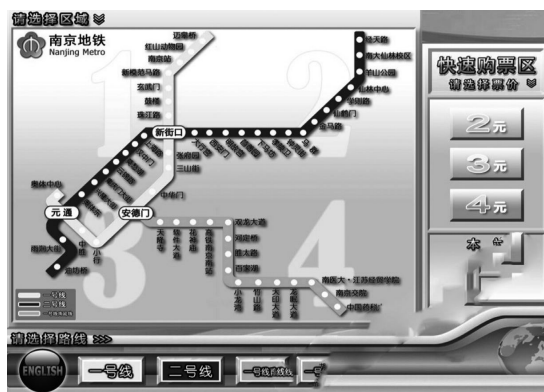


图 11 传统线路选择

Fig.11 Choice of traditional route

最后, 也是轨道交通售票系统在智能化领域的优化意向. 在传统售票流程额外增加智能线路行程推荐模块, 乘客设定好目的地后, 根据当前实测流量信息, 班次信息等经过大数据库计算, 得出线路推荐信息. 距离最近, 时间最短, 流量最优三个方案, 乘客可以根据自己出行需要选择相应优化方案. 界面呈现上, 在每一个方案下部, 都会有推荐

路线的具体信息,如图 12 所示.例如,在选择距离最近方案后,下部线路条从左至右依次为,始发站信息,线路 1 信息,换乘站信息,换乘后线路 2 信息,终到目的地.与此同时,提供该方案所用时间,路程距离信息,直观方便乘客出行<sup>[9]</sup>.



图 12 行程推荐意向界面

Fig.12 Interface of travel recommendation intention

## 4 结 语

以上分析了轨道交通智能售票系统的服务设计优化相关内容,基于传统自助售票系统的服务设计提出了基于乘客和自助售票系统之间的服务设计优化模型.分析了在当前轨道交通路网不断发达现实因素下,基于用户需求考虑的服务设计模型.通过分析、规划、具体设计、设计评估的设计流程,建立了服务设计过程模型.以自助售票机界面设计为例,将服务设计模型产品化.由于服务设计问题及其设计评价的客观性和复杂性,这一设计具体项目和研究广度需要进一步研究和论证.今后需进一步研究以用户为中心的设计评价体系,以用户为中心的移动设备端的服务设计,客观验证总结设计可用性问题,对进一步改善轨道交通智能售票系统的服务优化具有参考作用,也为进一步完善轨道交通智能售票系统服务设计理论奠定基础.

## 致 谢

感谢河北工业大学建筑艺术学院的支持!

## 参考文献:

- [1] 陈鹏辉.城市轨道交通自助售检票系统的现状与发展趋势[J].城市轨道交通研究,2009(5):10-12.  
CHEN Peng-hui.The Status que and Development of Urban Rail Transit Automatic Fare Collection System [J].Urban Mass Transit,2009(5):10(in Chinese)
- [2] 解相吾.物联网技术基础[M].北京:清华大学出版社,2014.  
XIE Xiangwu.Internet of things Technology [M].Beijing:Tsinghua University press,2014. (in Chinese)
- [3] 周煜啸,朱上上.手持移动设备中以用户为中心的服务设计研究[J].计算机集成制造系统,2012(2):242-243.  
ZHOU Li-xiao,ZHU Shang-shang.User-centered service design in handheld mobile devices [J].Computer Integrated Manufacturing Systems,2012 (2):242-243. (in Chinese)
- [4] 朱灿基,卢涛,冯巩,等.面向物联网的分布式跨平台数据传输系统设计[J].武汉工程大学学报,2015,37(3):74-78.  
ZHU Canji,LU Tao,FENG Gong,et al.Design of distributed cross-platform data transmission system based on internet of things [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2015,37(3):74-78.(in Chinese)
- [5] 杨鹏飞.基于综合交通诱导的智能公共交通信息服务[D].青岛:青岛科技大学.2009:9-11.  
YANG Peng-fei.Research into the information service system for intelligent public transportation based on integrated traffic guidance [D].Qingdao:Qingdao University of Science&Technology.2009:9-11. (in Chinese)
- [6] 宿效文.上班族乘坐地铁流程的服务设计研究——以广州地铁为例[D].广州:广东工业大学.2014.  
SU Xiao -wen .Research of Service Design About Salaryman Subway Process-A Case Study of Guangzhou Metro [D]. Guangzhou:Guangdong University of Technology.2014(. (in Chinese)
- [7] 刘露.地铁自助售票机界面用户使用分析[J].现代装饰,2015(3):114.  
LIU Lu.Analysis on the interface of the subway ticket machine[J].Modern Decoration(Theory)2015(3):114-116. (in Chinese)
- [8] 盛铖.面向大型城市公共交通立体化运营的服务设计研究[J].科技世界,2014(35):158-159.  
SHENG Cheng.Research on service design for large scale urban public transportation [J].Science & Technology Vision, 2014(35):158-159. (in Chinese)
- [9] 张明,高嘉蔚.北京地铁自助售票服务设计策略研究[J].包装工程,2015(12):69-70.  
ZHANG Ming,GAO Jia -wei.The Design Strategies of Beijing Subway Self -ticketing Service [J].Packaging Engineering, 2015(12):69-70. (in Chinese)

## Optimized design of intelligence tickets booking system in rail transit service

*ZHAO Shu-lin, YIN Xiao-chen*

College of Architecture and Art, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China

**Abstract:** To improve the user experience of intelligent ticket booking system in rail transit service, the interface design of self-service ticket machine was optimized based on the conception of industrial design and service design. By analyzing the current user requirement in intelligent ticket booking system, ticket purchase procedures and user experience, the service design minds and methods of users-first +tracking experience processes +involving all contact points+ creating the perfect user experience were considered in designing the intelligent ticket booking system in rail transit. The service design prototype of ticket booking system in rail transit on the background of Internet+ was proposed. On this basis, the service system role model and the function tree were established. Finally, the optimized function was applied in the interface design of self-service ticket machine. Practice proved that the optimized design of rail transport booking system has better availability, validity, high efficiency and superior user experience.

**Keywords:** service design; rail transit; intelligence ticket booking system; service model; user experience.

本文编辑:陈小平



文章编号:1674-2869(2015)10-0073-06

# NP 完全问题研究及前景剖析

杜立智,陈和平,符海东

武汉科技大学计算机科学与技术学院,湖北 武汉 430065

**摘 要:** P vs. NP 是理论计算机领域最重要的课题之一,而其中的核心是 NP 完全问题. 由于该问题所涉及的概念复杂抽象,对它们的理解存在不少谬误,许多已发表的研究论文都包含着这些谬误. 主要是:NP、NP 完全概念理解谬误,确定性及非确定性图灵机的概念模糊不清,P 与 NP 关系的误读,NP 问题研究方向的误导等. 本文分析了这些谬误,并揭示了相关概念的实质. 通过不同角度多方位分析,对 NP 完全问题可能的解决途径和研究方向,提供了启发式思路.

**关键字:** 确定性图灵机;非确定性图灵机;NP 完全问题

**中图分类号:** TP3-0

**文献标识码:** A

**doi:** 10. 3969/j. issn. 1674-2869. 2015. 10. 014

## 0 引 言

对 P 和 NP 问题的研究,关键有两个方面,第一是对相关概念的正确理解和把握,第二是正确的研究方向与正确的研究方法. 对于第一点,由于相关概念相当复杂抽象,存在着许多理解上的谬误. 甚至一些翻译过来的教科书都存在这些谬误,从而影响了该专业的学生正确理解掌握相关概念. 对于第二点,关键是倾向于以 NP 等于 P 为出发点还是相反. 不同的出发点,对研究的成功与否,起着至关重要的作用.

而在所有 NP 相关问题中,NP 完全无疑是最重要的概念. 事实上,对 NP 完全及其相关概念的透彻理解,是深入研究 NP 问题,尤其是研究 NP 与 P 的关系问题的关键. 谈到 NP 完全,又不能不涉及到多项式归约.

本文的目的是,通过分析 NP 问题相关的核心概念,并通过对抽象定义的解析结合对认识谬误的剖析,揭示其实质. 本文的关键点是,深入剖析 NP 完全问题时间复杂度的逻辑内涵,同时通过对多个实际问题的分析,给出解决 NP 完全问题的启发式思路,从而为该领域的研究者在概念和研究方向的正确把握上提供参考.

## 1 NP 和 NP 完全问题的起源与基本思想及其影响和发展

NP 问题是随着计算复杂性理论的产生而出现的. 根据计算复杂性理论,所有科学问题按其解决时间可分为三大类:多项式类、指数类和不可解类. 但要确定某个具体的问题到底属于哪一类,往往并非一件容易的事情,尤其是对少数难度大的问题<sup>[1-2]</sup>.

在理论计算机领域,对这三类问题的研究本来就浩瀚和深不可测,随着 NP 问题的出现,事情就更复杂了. NP 问题是与确定性图灵机和非确定性图灵机的概念一起出现的<sup>[3]</sup>. 这两个概念相当抽象,极难透彻理解掌握,从而更加为 NP 问题蒙上了一层神秘色彩.

通俗地讲,NP 问题是“多项式验证”问题. 也就是说,若是有了某个 NP 问题的解,要判断这个解是否正确,这个判断可以在多项式时间内完成. 至于求解这个问题到底需要多少时间,先撇开.

自从 NP 问题出现以后,学术界长时间对此进行了大量的投入及研究,尽管取得了不少研究成果,由于 NP 问题的难度和深度,迄今为止,依然不

收稿日期:2015-08-17

基金项目:湖北省自然科学基金项目(2014CFC1121)

作者简介:杜立智(1964),男,湖北黄冈人,副教授,硕士. 研究方向:计算机算法;计算数学;计算复杂性.

能确定 NP 到底属于上述三类问题中的哪一类. 可以确定两点, 其一是 NP 问题空间复杂度是多项式, 其二是, NP 问题时间复杂度的上限是指数型. 所以, 任何 NP 问题要么是多项式, 要么是指数型<sup>[4]</sup>, 而不可能是不可解的问题. 不过, 要确定 NP 到底是不是属于多项式, 确定这一点本身倒可能是不可解问题. 不少专家提出了这样的判断和疑问.

1937 年, 英国计算机科学家, 同时也是计算复杂性理论开山鼻祖的图灵提出了一种自动机模型, 后来被人们称作图灵机, 并论证了图灵机的可计算功能. 图灵机模型的提出不仅为现代计算机的设计奠定了理论基础, 同时也成为引出和研究 NP 问题的工具.

后进一步分为确定性图灵机(DTM)和非确定性图灵机(NDTM)两类. 这两个概念在教科书中的定义高度抽象, 难以把握. 笔者在这里用通俗的语言加以剖析. 确定性图灵机是现代计算机的理论模型, 可以认为现代计算机是对图灵机理论模型的实现. 其计算功能与现代计算机等价, 但还是有根本的不同, 前者更抽象. 笔者曾经用确定性图灵机进行了编程练习, 解决同样的问题, 比当今流行的计算机语言编程要难得多. 而非确定性图灵机则纯属理想的理论模型, 现实中无法实现. P 类问题也定义为在确定性图灵机上能在多项式时间内解决的问题; NP 类问题则是在非确定性图灵机上能在多项式时间内解决的问题.

非确定性图灵机的最大特点就是具有并行运算能力. 但请注意正确理解它的关键是, 这个并行并不是无限制的. 它只能进行“分叉”式的并行, 而不能按许多甚至无数平行线“平行”方式地并行. 若是后者, 那非确定性图灵机就不仅能解决 NP 问题, 指数型问题也能一块解决了. 用一颗  $n$  层的  $k$  叉树来描述确定性非确定性图灵机的区别无疑能说明问题, 可以肯定所有 NP 问题都可以翻译成这个模型. 对于这样一棵树, 其节点数目是指数型,  $k$  的  $n$  次方. 当然这些节点之间有统一的联系规律, 这个规律信息是多项式. 要寻找其中一个点, 以及从顶点到这个点的一条路径, 非确定图灵机从顶点开始向下, 在每一个分叉处能并行地同时向所有分支走下去, 从而, 最多  $n$  步就能达到目的; 而确定性图灵机无并行能力, 它需要遍历整个树, 才能保证找到目标. 当然, 也不排除有高超的算法使其能快速得到结果.

显而易见, 所有多项式问题, 也就是 P 类问题, 肯定属于 NP. 因为能在多项式时间内计算出结果的, 必然也能在多项式时间内验证结果. 但 NP 是否属于 P 成了该领域的最大难题, 迄今无法确定. 该问题的解决不仅能在该领域带来理论上的重大突破, 并且也能对许多重要的问题的实际计算具有重要意义.

1971 年, NP 问题的研究取得了里程碑的突破. 加拿大著名计算机科学家史蒂文-库克证明了存在具有 NP 完全性质的 NP 问题<sup>[5]</sup>, 这就是可满足性问题(SAT), 它也是人类发现的首个 NP 完全问题(NPC). 所谓某问题具备 NP 完全性, 也就是, 任何 NP 问题的求解都可以多项式转化到对该问题的求解. 库克构造了一般 NP 问题, 也就是任意 NP 问题多项式转化为 SAT 问题的转化方法和公式, 从而完成了 NP 完全的证明. 其逻辑结果是: 如果能得到可满足性问题的多项式时间算法, 那就意味着所有 NP 问题都具有多项式时间算法, 即 NP 等于 P. 请注意证明某 NP 问题具有 NP 完全性, 通常是一道艰难的工作, 普通的 NP 问题并不具备这一特性. 而大量的 NP 问题其实就是非常简明的 P 问题. 不少论文书刊中, 经常使用这样的说法: 某问题是 NP, 故无有效算法. 这当然是一种谬误, 是混淆了 NP 与 NP 完全的概念.

NP 和 NP 完全问题的出现, 对计算机算法和计算复杂性领域, 产生了重大而深远的影响.

随着第一个 NP 完全问题的发现和证明, 兴起了对这类问题之间的多项式转化研究. 在教科书中通常将这种转化称为“归约”<sup>[6]</sup>. 注意理解多项式归约必须把握两个关键点: 一是转化本身所需的时间是多项式, 二是转化后对原问题计算规模的扩大, 不超出多项式的范围. 例如, 若需要将具有  $n$  个变量的 3SAT 问题按多项式规约转化为对另一 NP 问题的求解, 那么, 转化所需的时间不能超出  $n$  的多项式函数, 同时, 设转化后一问题的大小规模为  $m$ ,  $m$  也不能超出  $n$  的多项式函数. 若是  $m$  在  $n$  的基础上呈指数型放大, 即使转化本身所花的时间很快, 那当然也不能称作多项式归约.

长期以来, 多项式转化的研究一直经久不衰. 它主要有两个方面的价值. 从 70 年代初开始, 前期的研究主要是为了发现 NP 完全问题. 那时候每发现一个 NP 完全问题, 就是一个较轰动的大成果. 如今这个已经不那么重要了. 但由于 NP 完全问题

之间的多项式转化性质,若得到了一个问题的高效算法,则可以通过转化得到其他问题的高效算法.因而前一类目的的研究已经显著降温,后一类目的研究则更有实用价值.

这就是 NP 完全问题的意义和实质.

关于 NP 完全问题,还有一个重要概念就是伪多项式时间算法.举例来讲,整数背包问题:给定一些整数  $C_j, j=1, 2, \dots, n$ , 以及整数  $b$ , 是否存在整数  $X_1, \dots, X_n \geq 0$  使得  $\sum_{j=1}^n C_j X_j = b$ ? 该问题是经典的 NP 完全问题, 但该问题存在针对参数  $n$  和  $b$  的多项式时间算法, 称伪多项式时间算法. 也就是说, 必须限定  $b$  的大小为  $n$  的多项式, 该问题才具有多项式时间算法. 而当  $b$  很大, 为  $n$  的指数幂时, 按同样方法得到的算法的时间复杂度就不是多项式, 而是指数型了. 一些研究者不理解这一点, 花了大量的时间和精力, 找到了该问题的在限定了  $b$  的大小的前提下的多项式时间算法, 就真的以为已经解决了 NP 是否等于 P 的问题. 其实是大谬误.

## 2 关于 NP 完全问题时间复杂度的争论

首先讨论 NP 完全问题时间复杂度的一些特点. 一般来说, 对于所熟悉的许多多项式时间问题, 其时间复杂度的曲线很光滑. 也就是说, 局部范围的输入数据, 往往具有整体时间复杂度的特性. 例如, 对于著名的冒泡排序算法, 其时间复杂度在最坏的情况下是  $n$  的平方, 在最快的情况下为常数, 平均时间为二分之  $n$  的平方, 且其分布呈光滑的曲线, 并且这样的曲线很容易通过算例描绘出来. 在  $n$  等于任何值的时候, 都具有这样的特点.

NP 完全问题, 比如哈密尔顿环, 就完全不是这样了. 哈密尔顿环的特点是: 对一个不大的  $n$ , 其可能的算例数量极其庞大, 且这些算例的难易程度分布相当复杂, 没有规律, 现在还没有人能掌握这些算例难易程度的分布规律. 例如, 国际某网站有关于最难算的哈密尔顿的算例, 这些算例用笔者的程序可以非常轻松和快速地解决. 因而, 对于某个 NP 完全问题, 一个计算程序所说在最坏情况下的计算时间, 只能指的是在所算的例子中最慢的那一个, 而不是指: 该程序找到了这样的例子, 它代表了此问题计算时间复杂度的上限. 这样的例子

是没有人能找得到的, 而冒泡排序之类的多项式问题则非常容易找到这样的例子, 且呈固定的概率分布.

故而对 NP 完全问题算法的思维不能停留在对一些简单问题的思维层面上. 就算真的能找到在最坏情况下的问题, 也不能排除在客观世界存在有这样的 NP 完全问题, 比如: 它的时间复杂度上限是某个值, 但在某个数据段, 最坏的情况的复杂度是另一个值, 在另一个数据段最坏的情况又是一个不同的值, 等等. 这就是为什么 NP 完全问题时间复杂度难以确定的根本原因.

自从史蒂文库克论证了 NP 完全问题的存在, NP 是否等于 P 随即开始困扰人类, 考量着人类复杂的思路能力和计算能力. 此问题也很快被公认为最具挑战性的世界难题. 如果能证明某个 NP 完全问题存在多项式时间算法, 即可判定所有 NP 问题都具有多项式时间算法. 如前所述, 迄今已发现 4 千多个 NP 完全问题, 还没有人能论证完全问题学者具有多项式时间算法, 也没有人能否定其具有多项式时间算法. 相关领域的学者往往根据自己的感觉或倾向拥有自己的判断, 这些判断不能说是科学的或有实际价值的.

有人对一些数学家和计算机科学家做过统计, 结果大多数倾向于认为 NP 不等于 P, 只有小部分认为两者相等.

一些科学家在提出 NP 不等于 P 的判断时, 所举的理由仅仅是泛泛的, 而不具备严格的科学认证价值. 举例如下:

一个算法学家, 在一本算法专著上写到: 迄今已出现了大量 NP 完全问题, 由于许多最优秀的算法专家和数学家在长期研究这些问题, 却没有找到一个多项式算法, 故倾向于判断 NP 不等于 P<sup>[1]</sup>.

ACM 期刊主编是这样论证 NP 不等于 P 的: 若谁证明了 NP 等于 P, 则他不仅只是解决了 NP 问题, 所有 7 大世纪难题他都解决了, 因为所有科学研究问题的解决都属 NP<sup>[7]</sup>.

还有专家认为: 由于非确定性图灵机的计算能力明显强于确定性图灵机, 从而 NP 不等于 P. 当然, 也有不少专家认为 NP 等于 P.

下面给出 NP 是否等于 P 的一些启发式思考.

## 3 科研问题的解决与 NP 完全问题

NP 问题为何如此具有影响力? 其原因一是问

题本身确实难解,极具挑战性,二是,它考量人类思维能力和计算能力的极限.人的思维是串行的而不具备并行思维能力,而所有科学问题的解决途径,其实都是 NP.

若是 NP 等于 P,则理论上,只具有串行思维能力的人类,可以解决所有科学难题.而若是 NP 不等于 P,也就是大量的 NP 问题会是指数型的,则不幸得很,大量科学问题人类思维很难解决.因为指数型通常意味着 2 的  $n$  次方或更大,当  $n$  的规模达到小小的 100 时,解决问题所需的思维步骤将达 100 万亿亿步,这是人类思维能力所无法企及的,哪怕花上万万年的时间.

从哲学上可以这么说,是否赞成 NP 等于 P,是区分可知论和不可知论的分水岭.

公认为 20 世纪最伟大的数学家的希尔伯特有句名言:我们必须知道,我们必能知道!可见,本质上,希尔伯特是赞成 NP 等于 P 的!

而他在 20 世纪刚开始所提出的 23 个高不可攀的数学问题,也已经陆续得到了解决,仿佛是在证明他的“我们必能知道”的断言.

人类历史上,一个个科学难题在不断被解决,难道不是在印证着 NP 等于 P 吗?

笔者对此的质疑逻辑是:如前所述,所有科研难题的解决途径是 NP,因而 NP 是否等于 P 这一难题的解决途径无疑也属 NP.鉴于这是科学难题,许多科学家判断,该问题人类长时期很难解决,例如上述 ACM 的期刊主编就是这样判断的,因而有理由认为该问题属于 NP 难,并且其解决过程所包含的参量也就是  $n$  不可能很小.

这意味着任何宣称证明了 NP 不等于 P 的人,其实是在用自己证明的结论,去否决自己证明的可能性和正确性,也就是说,是在循环否定.

## 4 围棋软件开发与 NP 完全问题

曾有人提议,若能开发一个围棋软件,能打败所有围棋高手,也就是说其思路已达到最优,那不就一切都证明了吗?此提议非常好,但要做好还有诸多困难,而且就算做好了,也不意味 NP 问题的解决.

下围棋属敌对搜索,是极大极小搜索加剪枝问题中的一种.问题在于,它的分支数非常大,也就是可选的点很多,因而计算深度就只能很浅了,否则计算量和储存量都会大得惊人.不仅如此,它的状态

值量化非常困难,从而在进行优劣选择以及剪枝时,非常难以把握.因此,迄今最好的围棋软件只能达到业余二段的水平,与专业高段棋手比当然是相差甚远.

人下围棋能达到专业强九段的水平,不妨假定此水平极高.由此就产生了如下问题:(1)围棋是 NP 吗?(2)围棋是 NPC 吗?(3)此问题能在多项式内解决吗?

注意到强九段,显然,不能认为强九段的思维能力和记忆能力能满足指数型.不妨设想人类能出现这样顶级的围棋高手,他下棋就能达到最优,也就是说能在多项式时间内完成判断计算.这就意味着,一个明显的指数型搜索问题,有人却可在多项式内完成.这是如何办到的呢?回答只能是:在充分研究后,加上充分的知识积累以及复杂的关联信息的充分把握.从逻辑上可以判断,人能做到的,软件也应能做到,且不会增加计算量和储存量.

对这个问题的分析,可以得到解决 NP 完全问题的某些启发.

此外,近年来一些论文提到的一些研究技巧,亦对 NP 问题的研究有所助益<sup>[8-10]</sup>.

针对 Hamilton 环这一 NP 完全问题的多项式时间算法的研究尝试也一直在进行<sup>[11]</sup>.多年来,笔者也坚持进行该问题的研究,已经有相当乐观的结果.

## 5 个体和群体及概率与 NP 完全问题

同样,从启发思维的角度,如前所述,至今已发现了 4 000 多个 NP 完全问题,且还会继续发现.由于任何一个 NP 完全问题,都可以多项式规约到另一个任意的 NP 完全问题,也就是说,所有 NP 完全问题两两之间的距离是多项式,这件事本身强烈地昭示着(strongly imply),NP 问题具有统一的求解规律和难解度,并且也应具有多项式量级.

客观世界的任何一个群体,其任意个体之间某个属性的差值,与个体属性的绝对值通常都处在同一个量级.举例说来:通常成人的体重是百斤量级,很肥壮和很瘦的人之间体重的差值也是百斤量级.同样,很肥大的蚂蚁与很瘦小的蚂蚁体重之差值也与通常单个成年蚂蚁的体重处在同一个数量级.

再举一个例子:假使在某个太空中随机选  $n$  个点, $n$  显著大于 1,若其中任两个点之间的距离都不超过  $10^{10}$  米,就有理由认为,该太空本身的最大尺

度也在  $10^{10}$  米量级。

不难看出,这些问题之间具有相同的内在逻辑,从而也给人们在 NP 完全问题的认识上以启发。

## 6 结 语

NP 完全问题的相关概念十分的抽象,难以把握,无论学生或研究人员,常有相关问题的概念错误或理解模糊,本文用通俗的语言揭示了这些概念的本质。

在 NP 完全问题的研究中,最为关键的是正确的研究方向,若是研究方向为并不成立的谬误所误导,则不仅会导致多走弯路,甚至可能是完全做无用功。其中一个最大的谬误就是,认为 NP 当然的不等于 P。这就意味着所有 NP 完全问题不可能有多项式时间算法,因此从根本上限制了这方面的研究。许多学者包括一些专家都将其作为限制框框。这仅仅只是一些研究人员的一种个人倾向,而绝不是定论。有理由认为其有可能甚至极可能是错的。还有一种倾向就是将 P vs. NP 问题过分神秘化,要么宣称该问题不能在人类已有知识框架内解决,要么宣称今后很长时期人类不可能解决。所有这些宣称并无切实的依据。本文详细论述了 NP 完全问题的实质,并从多个角度,用启发式思维方式,分析了其时间复杂度及其特性,以及可行的研究前景和研究方向。可供相关领域的学者参考。

## 致 谢

感谢湖北省自然科学基金对本研究的支持!

## 参考文献:

- [1] ARORA S, BARAK B. Complexity Theory: A Modern Approach Cambridge University Press [M]. Cambridge, 2009
- [2] AARONSON S. Is P versus NP formally independent [J]. Bulletin of the European Association for Theoretical Computer Science, 2003, 81(10): 109–136.
- [3] 杜丁柱,葛可一,王洁.计算复杂性导引[M].北京:高等教育出版社,2002:35–57.  
DU ing-zhu, Ge Keyi, Wang Jie. Introduction to Computing Complexity [M]. Peking: High Education Press, 2002: 35–57. (in Chinese)
- [4] SARTAJ Sahni, Data Structures, Algorithms, and Applications in C++ [M]. McGraw-Hill, 1998.
- [5] COOK S A. The complexity of theorem proving procedures [M]. Proceedings of Third Annual ACM Symposium, New York: on Theory of Computing, Association for Computing Machinery, 1971: 151–158.
- [6] KARP R M. Reducibility among combinatorial problems [M]. Miller R E, Thatcher J W Plenum Press, Complexity of Computer Computations, New York: 1972: 85–104.
- [7] LANCE Fortnow. The Status of the P Versus NP Problem [J]. Communications of the ACM, 2010, 52(9): 78–86.
- [8] 朱丽君, 陈金芳. 大数据下中文期刊论文被引分析 [J]. 武汉工程大学学报, 2015, 37(5): 74–78.  
ZHU Li-jun, CHEN Jin-fang. Citation analysis on Chinese Periodicals Under big data [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2015, 37(5): 74–78. (in Chinese)
- [9] 付 敏, 戴祖旭, 王道蓬. 压缩编码的上下文树构造算法 [J]. 武汉工程大学学报, 2015, 37(4): 51–55.  
Fu Min, Dai Zuxue, WANG Dao-peng. Context tree algorithm based on compression encoding [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2015, 37(4): 51–55. (in Chinese)
- [10] 殷秀叶. 大数据环境下的相似重复记录检测方法 [J]. 武汉工程大学学报, 2014, 36(9): 66–69.  
YIN Xiu ye. Method for detecting approximately duplicate database records in big data environment [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2014(9): 66–69. (in Chinese)
- [11] POSA L. Hamiltonian circuits in random graphs [J]. Discrete Math, 1976(14): 359–364.

## NP-complete problem and its future

*DU Li-zhi, CHEN He-ping, FU Hai-dong*

College of Computer Science and Technology, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China

**Abstract:** P versus NP is one of the most important problems in theoretical computer science. Because the concepts about it are very abstract and complicated, some scholars and students in computer science often misunderstand them. A lot of published papers contain these misunderstandings. The main problems are: the defaults in understanding the concepts of NP and NPC, unclearly understanding the concepts of deterministic turing machine and non-deterministic turing machine, misreading the relationship of P and NP and misleading in the study direction of NP, etc. Of all these concepts, the core concept is the NP-complete problem. In this paper, we analyzed the misunderstandings. By deeply studying the definitions, we revealed their essence. Specially, by analyzing a lot of questions in different fields, we gave some heuristic strain of thoughts for the possible ways to solve the NP-complete problem and the possible directions to study it.

**Keywords:** deterministic turing machine; nondeterministic turing machine; NP-complete problem

本文编辑:陈小平