

模糊综合评判在电池性能检测中的应用

赵 辉¹, 刘 娜¹, 周永勤²

(1. 哈尔滨理工大学 应用科学学院, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 哈尔滨理工大学 电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 为了探讨循环寿命对电池性能的影响, 以一台磷酸铁锂电池(LIPB)作为研究对象, 分析其工作原理。电池性能主要受循环寿命的影响, 且循环寿命又主要受放电时间、容量、能量的影响。依据模糊综合评判和模糊关系合成方法对电池在充放电时间、容量、能量中性能进行评判, 得出电池系统中的模糊综合评判模型, 进一步确定最佳循环周期以完成对电池性能的估计。

关键词: 模糊综合评判; 电池性能; 循环寿命; 评估

DOI: 10.15938/j.jhust.2018.03.025

中图分类号: O29 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2018)03-0143-06

The Application of Fuzzy Comprehensive Evaluation on the Battery Performance

ZHAO Hui¹, LIU Na¹, ZHOU Yong-qin²

(1. School of Applied Sciences, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: In order to investigate the influence of cycle life on the performance of the battery, a lithium iron phosphate battery (LIPB) is used as the research object to analyze its working principle. The battery performance is mainly affected by the cycle life, and the cycle life is mainly affected by the discharge time, capacity and energy. Based on fuzzy comprehensive evaluation method in this paper, the performance of the battery in charging and discharging time, capacity and energy are evaluated, obtaining fuzzy comprehensive evaluation model of the cell system and further determining the optimal cycle to complete the estimation performance of the battery.

Keywords: fuzzy comprehensive evaluation; battery performance; cycle life; assessment

0 引 言

20 世纪初,随着电动汽车的推广,电动汽车电池的研究愈发受到重视。作为高密度的能源模块其安全性也备受考验,锂离子电池尽管在国内外已经有了很多产品,但总体技术仍然不够成熟,各方面需

要不断完善,需要不断对纯电力汽车电池管理系统的状态进行监测,大幅度提高纯电力汽车的安全性能与可靠性能,提高车辆的运输效率,降低检修与维修的成本。

近年来,电池的安全性对续驶里程、加速性能和电池寿命等性能都会产生直接的影响,电池管理系统是当今电动汽车研发的重点和热点之一。2003

收稿日期: 2016-06-07

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(A201214)。

作者简介: 赵 辉(1963—),男,教授,硕士研究生导师;

周永勤(1971—),男,博士,教授。

通信作者: 刘 娜(1992—),女,硕士研究生; E-mail: 809360355@qq.com.

年陈羚,程璇^[1]等人通过 XRD、TEM 和 SEM 等手段对运行时间为 200,500,700,1000,和 2000 的三合一膜电极中的阴、阳极催化剂分别进行了表征,获得催化剂晶态、表面形态及颗粒大小等变化信息,考察催化剂晶胞参数、颗粒大小等变化对电池及性能的影响;2006 年何洪文,余晓江^[2]利用能量状态 CSOE 评价和指示电池的能量状态。使用能量衰减系数、相对电压衰减率和温升速率评价电池的放电性能,采用相对电压差异系数和相对内阻差异系数评价电池的一致性;2015 年张宝群,马龙飞^[3]等通过循环寿命测试的结果分析研究了电池老化对电池开路电压、电池内阻等参数的影响。结合混合脉冲功率特性测试的结果,在 Simulink 上搭建了电池的仿真模型,能够很好的体现电池的特性;2015 年袁庆丰^[4]研究了三元正极材料电池体系的过充失效过程和机理,并采用电芯内短路模拟、释氧的定量分析、热箱实验等分析方法,分析了电芯在过充失效过程中电池着火现象的原因。

电池性能作为一种全新的概念,目前对该内容的研究尚不完备,对其安全检验等问题尚未解决,通过查找文献未发现使用数学模型解决该问题相关的文章。本文依据模糊综合评判和模糊关系合成方法对电池在充放电时间、容量、能量中性能进行评判,得出电池系统中的模糊综合评判模型,进一步确定最佳循环周期以完成对电池性能的估计^[5]。综合评判和关系合成是模糊数学的基本理论和方法,对现实世界中广泛存在的模糊的,不确定的事物进行定量化,作出相对客观、正确、符合实际的评价,进而解决实际问题^[6]。

1 模糊综合评判法的过程

模糊综合评判是根据评价标准和实测值,经过模糊变换后对事物作出评价的一种方法。而综合评判就是对受多种因素所影响的事物或现象作出总的评价,即针对评判对象的全体,根据所给的条件,给

每个对象赋予一个非负实数,再据此排序择优^[7]。

具体步骤如下:

1) 因素集: $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$, 设与被评判对象相关的因素有 m 个;

2) 权重集: 为了反应各因素的重要程度,对各个因素应赋予一个相应的权数 a_i 各权数组成的集合

$$A = (a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_m)$$

3) 评价集: $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$, 设所有可能出现的评语有 n 个;

4) 单因素评判: 定出每个因素对于各评价等级的隶属度,求出对 μ_i 的一个模糊评判子集合

$$R = \frac{r_{i1}}{v_1} + \frac{r_{i2}}{v_2} + \dots + \frac{r_{im}}{v_m}, \text{进一步求出单因素评判}$$

矩阵 R ,

$$R = (R_1 \quad R_2 \quad \dots \quad R_n)^T = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{pmatrix}$$

通过权数与评判矩阵 R 的合成,得出综合评价集 $B = (b_1 \quad b_2 \quad \dots \quad b_n)$, 则 $B = A \circ R$

其中,

$$A = (a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_m)$$

$$R = (r_{ij})_{m \times n}, r_{ij} \in [0, 1]$$

$$b_j = \bigvee_{i=1}^m (a_i \wedge r_{ij}), j = 1, \dots, n$$

由综合评价的过程可见,当单独考虑因素 μ_i 时, μ_i 的评价对评语 v_j 的隶属程度为 $r_{ij} (j = 1, 2, \dots, n)$. 通过模糊关系合成运算对各个调整后的隶属程度进行综合处理,得出合理的综合评价结果^[8-10]。

2 模糊综合评判模型的建立

2.1 评价指标的选取

本文以一台磷酸铁锂电池为例,根据电池的充放电时间、容量、能量对电池的性能进行判断。

表 1 评判指标

循环周期 指标	充电容量/ Ah	放电容量/ Ah	充电能量/ Wh	放电能量/ Wh	充电时间/ s	放电时间/ s
1	9.139 8	9.118 9	31.640 7	28.485 5	7 941.747 3	6 565.934 9
2	13.362 2	13.339 8	46.196 1	41.697 2	3 039.840 8	3 039.162 4
3	17.554 9	17.530 6	60.650 3	54.814 8	3 018.415 1	3 017.557 1
4	21.733 9	21.706 7	75.055 4	67.885 6	3 008.618 v6	3 006.886 9

续表 1

循环周期 指标	充电容量/ Ah	放电容量/ Ah	充电能量/ Wh	放电能量/ Wh	充电时间/ s	放电时间/ s
5	25.903 3	25.874 2	89.425 9	80.930 5	3 001.645 6	3 000.740 8
6	30.424 3	30.461 6	104.698 3	95.684 4	9 804.506 2	9 950.661 4
7	35.019 2	35.048 3	120.181 9	110.441 5	9 964.927 1	9 948.864 2
8	39.610 9	39.629 1	135.651 1	125.177 6	9 957.888 7	9 936.290 9
9	44.200 6	44.207 0	151.113 1	139.903 1	9 953.707 3	9 929.817 2
10	48.781 2	48.776 1	166.546 7	154.597 4	9 933.607 9	9 910.772 9
11	53.251 6	53.220 5	181.702 4	168.782 6	6 437.067 2	6 400.611 1
12	57.694 5	57.658 4	196.764 9	182.950 6	6 397.384 5	6 391.204 6
13	62.137 3	62.094 5	211.824 8	197.111 9	6 397.210 2	6 388.568 3
14	66.573 2	66.521 1	226.863 1	211.238 7	6 387.464 4	6 375.074 7
15	71.001 6	70.942 1	241.877 7	225.345 7	6 376.509 9	6 366.999 1

2.2 确定因素集和评判集

因素集:

$U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6\} = \{\text{充电容量, 放电容量, 充电能量, 放电能量, 充电时间, 放电时间}\}$

评语集:

$V = \{v_1, v_2, v_3\} = \{\text{优, 良, 差}\}$

2.3 确定模糊综合评判矩阵

由于纯电力汽车电池是作为一个全新的概念被提出的,因此在这个新结构领域下可以借用的现有研究成果和相关专家学者少之又少,但是,该领域的专家对所调查的问题研究的也最为透彻、最熟悉,因此选择专家系统法给出相应评判矩阵^[11-12]。

专家系统是根据专家的实际经验给出模糊信息的处理算式或相应权系数值来确定隶属函数的一种方法^[13]。在许多情况下,经常是初步确定粗略的隶属函数,然后再通过实践检验逐步修改和完善,而实际效果正是检验和调整隶属函数的依据^[14]。本次试验通过电气学院 10 位专业人员循环试验可知:

表 2 专家对第一次循环数据的评价情况

评价因素	评价指标		
	优	良	差
充电容量	2	4	4
放电容量	3	5	2
充电能量	4	4	2
放电能量	6	2	2
充电时间	3	6	1
放电时间	7	0	3

由表 2 知,电池第一次循环充电容量为优的隶属度是 $\frac{2}{10}=0.2$,充电容量为良的隶属度是 $\frac{4}{10}=0.4$,充电容量为差的隶属度是 $\frac{4}{10}=0.4$ 。放电容量为优的隶属度是 $\frac{3}{10}=0.3$,放电容量为良的隶属度是 $\frac{5}{10}=0.5$,放电容量为差的隶属度是 $\frac{2}{10}=0.2$ 。同理可算出其它数据的隶属度。从而得到了以下 15 组相应的模糊评判矩阵:

$$R_1 = \begin{pmatrix} 0.2 & 0.4 & 0.4 \\ 0.3 & 0.5 & 0.2 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 \\ 0.1 & 0.6 & 0.3 \\ 0.3 & 0.6 & 0.1 \\ 0 & 0.7 & 0.3 \end{pmatrix}$$

对矩阵中单因素进行解释说明

$$f: U \rightarrow F(V)$$

先确定模糊关系 R_f , 则有

$$R_f|_{u_1} = f(u_1) = (0.2, 0.4, 0.4)$$

$$R_f|_{u_3} = f(u_3) = (0.4, 0.4, 0.2)$$

$$R_f|_{u_4} = f(u_4) = (0.1, 0.6, 0.3)$$

$$R_f|_{u_5} = f(u_5) = (0.3, 0.6, 0.1)$$

$$R_f|_{u_6} = f(u_6) = (0, 0.7, 0.3)$$

故可知

$$f(u_1) = \frac{0.2}{v_1} + \frac{0.4}{v_2} + \frac{0.4}{v_3}$$

$$f(u_2) = \frac{0.3}{v_1} + \frac{0.5}{v_2} + \frac{0.2}{v_3}$$

$$f(u_3) = \frac{0.4}{v_1} + \frac{0.4}{v_2} + \frac{0.2}{v_3}$$

$$f(u_4) = \frac{0.1}{v_1} + \frac{0.6}{v_2} + \frac{0.3}{v_3}$$

$$f(u_5) = \frac{0.3}{v_1} + \frac{0.6}{v_2} + \frac{0.1}{v_3}$$

$$f(u_6) = \frac{0}{v_1} + \frac{0.7}{v_2} + \frac{0.3}{v_3}$$

其中 v_1, v_2, v_3 代表评语集优, 良, 差。同理可解释其它评判矩阵的含义。

$$R_2 = \begin{pmatrix} 0.1 & 0.5 & 0.4 \\ 0.2 & 0.3 & 0.5 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.4 & 0.6 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0.9 & 0.1 \\ 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0.4 & 0.6 & 0 \\ 0.3 & 0.3 & 0.4 \\ 0.1 & 0.2 & 0.7 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R_4 = \begin{pmatrix} 0.3 & 0.4 & 0.3 \\ 0.2 & 0.8 & 0 \\ 0.4 & 0.2 & 0.4 \\ 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0.9 & 0 & 0.1 \\ 0.2 & 0.4 & 0.4 \end{pmatrix}$$

$$R_5 = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.2 & 0.3 \\ 0.4 & 0.3 & 0.3 \\ 0.9 & 0.1 & 0 \\ 0.2 & 0.2 & 0.6 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R_6 = \begin{pmatrix} 0.6 & 0.1 & 0.3 \\ 0.3 & 0.4 & 0.3 \\ 0.8 & 0 & 0.2 \\ 0.7 & 0.2 & 0.1 \\ 0.6 & 0 & 0.4 \\ 0.5 & 0.3 & 0.1 \end{pmatrix}$$

$$R_7 = \begin{pmatrix} 0.7 & 0.3 & 0 \\ 0.4 & 0.5 & 0.1 \\ 0.3 & 0.5 & 0.2 \\ 0.1 & 0.9 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.8 \\ 0.7 & 0 & 0.3 \end{pmatrix}$$

$$R_8 = \begin{pmatrix} 0.2 & 0.7 & 0.1 \\ 0.3 & 0.4 & 0.3 \\ 0.8 & 0.1 & 0.1 \\ 0.1 & 0.9 & 0 \\ 0.6 & 0.2 & 0.2 \\ 0.4 & 0 & 0.6 \end{pmatrix}$$

$$R_9 = \begin{pmatrix} 0.1 & 0.6 & 0.3 \\ 0.4 & 0.5 & 0.1 \\ 0.6 & 0.1 & 0.3 \\ 0.3 & 0.6 & 0.1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R_{10} = \begin{pmatrix} 0.3 & 0.6 & 0.1 \\ 0.2 & 0.2 & 0.6 \\ 0.1 & 0.7 & 0.2 \\ 0.8 & 0 & 0.2 \\ 0.3 & 0.7 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 \end{pmatrix}$$

$$R_{11} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0.6 & 0.4 & 0 \\ 0.3 & 0.5 & 0.2 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0.7 & 0.2 & 0.1 \\ 0.2 & 0.4 & 0.4 \end{pmatrix}$$

$$R_{12} = \begin{pmatrix} 0.8 & 0.1 & 0.1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.6 & 0.1 \\ 0.4 & 0.3 & 0.3 \\ 0.8 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 \end{pmatrix}$$

$$R_{13} = \begin{pmatrix} 0 & 0.4 & 0.6 \\ 0.2 & 0.5 & 0.3 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 \\ 0 & 0.7 & 0.3 \\ 0 & 0.8 & 0.2 \\ 0.7 & 0 & 0.3 \end{pmatrix}$$

$$R_{14} = \begin{pmatrix} 0.1 & 0.4 & 0.5 \\ 0.4 & 0.2 & 0.4 \\ 0.2 & 0.5 & 0.3 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.9 & 0.1 \\ 0.1 & 0.1 & 0.8 \end{pmatrix}$$

$$R_{15} = \begin{pmatrix} 0.2 & 0.2 & 0.6 \\ 0.8 & 0 & 0.2 \\ 0.3 & 0.5 & 0.2 \\ 0.4 & 0.6 & 0 \\ 0 & 0.7 & 0.3 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

2.4 因素权重的选取

确定权重的方法有很多,如专家咨询法、层次分析法、因子分析法、变异系数法^[15-16]。在本文中采

用变异系数法,它是直接利用各项指标所包含的信息,通过计算得到指标的权重。为了消除各项评价指标的量纲不同的影响,需要用各项指标的变异系数来衡量各项指标取值的差异程度^[17]。各项指标的变异系数公式如下:

$$V_i = \frac{\sigma_i}{\bar{x}_i} (i=1,2,\dots,n)$$

其中: V_i 是第 i 项指标的变异系数,也称为标准差系数; σ_i 是第 i 项指标的标准差; $\bar{x}_i$ 是第 i 项指标的平均数。

各项指标的权重为:

$$\bar{W}_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i}$$

表3 各因素变异系数及权重

指标	充电容量	放电容量	充电能量	放电能量	充电时间	放电时间
平均值	39.759 2	39.741 9	136.012 8	125.669 8	6 774.702 7	6 681.943 1
标准差	19.243 4	19.232 6	65.271 2	61.388 9	2 684.800 1	2 672.496 0
变异系数	0.483 99	0.483 94	0.479 89	0.488 49	0.396 29	0.399 96
权重	0.177 12	0.177 10	0.175 62	0.178 77	0.145 03	0.146 37

计算过程如下:

- 1) 先根据各个指标的数据,分别计算每个指标的平均值和标准差;
- 2) 根据均值和标准差计算变异系数;
- 3) 将各项指标的变异系数相加,计算构成评价指标体系的这3个指标的权重。

在 MATLAB 中计算得出数据(见表3),由以上得出,权重集

$$A = (0.177\ 12\ 0.177\ 10\ 0.175\ 62\ 0.178\ 77\ 0.145\ 03\ 0.146\ 37)$$

2.5 综合评判结果

对15组数据进行评判,分别是

$$B_1 = A \circ R_1 = (0.220\ 19\ 0.526\ 39\ 0.253\ 44)$$

$$B_2 = A \circ R_2 = (0.111\ 14\ 0.271\ 21\ 0.617\ 66)$$

$$B_3 = A \circ R_3 = (0.226\ 93\ 0.435\ 97\ 0.337\ 11)$$

$$B_4 = A \circ R_4 = (0.407\ 99\ 0.395\ 59\ 0.196\ 44)$$

$$B_5 = A \circ R_5 = (0.353\ 21\ 0.141\ 87\ 0.504\ 93)$$

$$B_6 = A \circ R_6 = (0.585\ 24\ 0.168\ 22\ 0.231\ 92)$$

$$B_7 = A \circ R_7 = (0.367\ 85\ 0.419\ 39\ 0.212\ 77)$$

$$B_8 = A \circ R_8 = (0.392\ 49\ 0.402\ 29\ 0.205\ 23)$$

$$B_9 = A \circ R_9 = (0.247\ 56\ 0.464\ 68\ 0.287\ 78)$$

$$B_{10} = A \circ R_{10} = (0.380\ 47\ 0.424\ 69\ 0.194\ 85)$$

$$B_{11} = A \circ R_{11} = (0.289\ 74\ 0.246\ 20\ 0.464\ 07)$$

$$B_{12} = A \circ R_{12} = (0.559\ 01\ 0.278\ 91\ 0.162\ 09)$$

$$B_{13} = A \circ R_{13} = (0.243\ 25\ 0.453\ 25\ 0.303\ 51)$$

$$B_{14} = A \circ R_{14} = (0.138\ 31\ 0.339\ 24\ 0.522\ 46)$$

$$B_{15} = A \circ R_{15} = (0.301\ 29\ 0.332\ 02\ 0.366\ 69)$$

依据最大隶属原则,循环周期为4、6、12时,得出的评价为优;循环周期为1、3、7、8、9、10、13时,得出的评价为良;循环周期为2、5、11、14、15时,得出的评价为差。综上所述,有三组循环周期中电池充放电时间、容量、能量的数据为优,这三组数据被视为电池性能评判中最佳数值。

3 结 论

本文采用模糊综合评判的方法对磷酸铁锂电池的性能进行评估,为了使评估结果更准确将指标进行无量纲处理,为达到客观性和实用性,做了一些细节的改善^[18-20]。

- 1) 对评价集做了相应的改善,选用了电池充放电的时间、容量、能量作为评价对象,提高了电池性

能检测结果的精度。

2) 引入了模糊统计法,将模糊概念明确化,可直观的表示隶属程度的客观规律,进一步提高各级指标权重的准确性和客观性。

3) 运用 Matlab 及 Excel 绘制各因素变异系数及权重表格,减轻了评判计算的工作量。为各类模糊综合决评判方法提供了一种较为高效快捷的计算方案,具有较好的普适性。

磷酸铁锂电池的循环寿命受很多因素影响^[21-22],这些因素之间的相互作用也比较复杂,为了得到合理的评判结果,采用模糊综合评判模型对电池安全性能进行评估^[23],该方法还可以用于具有相似特性的其他工科科研模型的评估问题。

参 考 文 献:

- [1] 陈玲,程璇,张颖,等. 质子交换膜燃料电池性能及催化剂表征[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2003(6): 756-762.
- [2] 何洪文,余晓江. 电动车辆动力电池的性能评价[J]. 吉林大学学报(工学版), 2006(5): 659-663.
- [3] 张宝群,马飞龙,范刘洋,等. 磷酸铁锂电池老化分析及模型搭建[J]. 电源技术, 2015(11): 2374-2376.
- [4] 袁庆丰. 锂离子电池硅基复合负极材料和电池安全性的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [5] 尹国举,朱建华. 模糊随机变量的模糊概率特征的性质[J]. 军械工程学院学报, 2000(4): 73-76.
- [6] 杨海军. 基于模糊积分的软件质量综合评估模型[J]. 兰州大学学报(自然科学版) 2011, 47(1): 106-115.
- [7] MOUXiangyong, GUO Zaihua, LIN Gang, et al. The Optimization of Regional Lightning Risk Assessment Based on AHP and Fuzzy Comprehensive Evaluation [J]. IEEE Trans. Lightning, 2011, 7(12): 331-334.
- [8] 张峰,胡艳连. 模糊综合评判和层次分析法在高校教学评价中的应用[J]. 长春师范学院学报, 2006(6): 10-13.
- [9] ZHANG GuangHua, ZHANG YuQing, LIU XueFeng. Using fuzzy comprehensive evaluation method to establish a credible spectrum sensing and allocation model [J]. Security Comm Networks, 2014, 7(11).
- [10] 杨纶标,高英仪,凌卫新. 模糊数学原理及应用[M]. 广州: 华南理工大学出版, 2006.
- [11] YUXuefeng, ZHANG Zhongyuan, SUN Yingna. Application of Fuzzy Clustering Method in Analysis Correlative of Indicators of Water Resources System [J]. IEEE Trans. Science and Engineering System. 2012(7): 593-595.
- [12] 曾昭法,唐海滨,王毅. 长沙二手房价格模糊综合评估模型[J]商业研究. 2010(3): 139-142.
- [13] 范存祥,刘新阳. 区域水资源开发状况综合评价权重系数确定方法研究[J]. 大科技, 2011(11): 1-3.
- [14] 李连结,姚建刚,龙立波,等. 组合赋权法在电能质量模糊综合评价中的应用[J]. 电力系统自动化, 2007(4): 56-60.
- [15] SONG Jinbo, LIU Yan, SONG Danrong. Multi-grade Fuzzy Comprehensive Evaluation of BOT Projects Service Quality Based on Fuzzy Entropy Weight Coefficient Method [J]. IEEE Trans. Business Intelligence and Financial Engineering, 2012, 5(2): 556-560.
- [16] 李树辉. 锂电池安全试验设备设计——挤压试验机[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2014(1): 55-59.
- [17] OUYANGQuan. Design and Implementation of the Network, Evaluation System Based on Comprehensive Evaluation Method [J]. IEEE Trans. Distributed Computing and Applications to Business, Engineering and Science, 2010, 7(8): 285-288.
- [18] 孙琳琳. 基于动态模糊测度的教师业绩评价研究[J]. 电脑知识与技术, 2013(26): 58-59.
- [19] 丁桑岚. 环境评价概论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001: 98-133.
- [20] 周永勤,周美兰,颜景斌,等. 基于组态技术虚拟被控对象的 PLC 仿真实验研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2004(6): 7-22.
- [21] 王海英,张军,李革臣,等. 电池自动检测分选设备的开发与设计[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2000(5): 16-19.
- [22] 周永勤,王旭东,张玉光,等. 开关磁阻电机模糊滑模观测器间接位置检测[J]. 电机与控制学报, 2013(6): 57-63.
- [23] 赵辉,吕青,丁树业. 模糊综合评判在优化电机冷却系统中的应用[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2016(6): 106-110.

(编辑: 关 毅)