

# 锂离子动力电池生产工艺权重分析

关玉明, 李朝, 崔佳, 靳美娜, 冀承林, 商鹏  
(河北工业大学机械工程学院, 天津 300130)

**摘要:**在专家打分的基础上,研究了如何通过灰度理论与层次分析法 AHP(analytic hierarchy process)得到专家权重和影响锂离子动力电池一致性的因素权重。首先基于灰色关联度计算权重的理论,对因子做灰色关联分析,当不存在唯一参考序列时,将每一序列本身既当比较序列又当参考序列,得到对应的灰色自关联矩阵,通过计算特征值与特征向量,得到专家权重;然后采用专家打分的方式采集影响电池一致性因素的评定分数,通过指标两两比较的差值法确定 AHP 的判断矩阵,从而得到因素权重;最后通过加权算术均值法得到影响电池一致性的综合指标权重。

**关键词:**锂离子动力电池;灰色关联度;层次分析法;相对权重;综合权重

## Weight Analysis for Production Process of Lithium-ion Power Battery

GUAN Yuming, LI Zhao, CUI Jia, JIN Meina, JI Chenglin, SHANG Peng  
(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

**Abstract:** On the basis of expert scoring, the way of using grey theory and analytic hierarchy process(AHP) to obtain the weights of experts and factors that influence the consistency of lithium-ion battery is studied in this paper. First, the grey correlation analysis of factors is conducted based on the theory of calculating the weight based on grey relational grade. When there is no unique reference sequence, each sequence itself is used both as a comparison sequence and as a reference sequence, thus the corresponding grey self-correlation matrix is obtained. By calculating the eigenvalues and eigenvectors, the weights of experts are obtained. Then, the scores of factors affecting the consistency of the battery are collected by expert scoring. The judgment matrix of AHP is determined by comparing the differences in every two indexes, and the weights of factors are obtained. Finally, the weighted arithmetic mean method is used to obtain the comprehensive index weight that affects the consistency of the lithium battery.

**Keywords:** lithium-ion battery; grey relational grade; analytic hierarchy process(AHP); relative weight; comprehensive weight

### 1 锂离子动力电池一致性影响因素权重分析

对锂离子动力电池一致性影响因素权重分析时,由一个专家决定影响电池一致性因素的大小主观性

太强,容易出现决策不准的现象,采用多个专家对其影响因素进行打分的方法可以有效避免上述情况的发生。但是,各个专家工作经验、知识结构、知识水平以及对锂离子动力电池一致性影响因素的认识程度不同<sup>[1-3]</sup>,如果只是将各个专家的意见用算术平均的方法进行综合,将各个专家的权重视为相等<sup>[4]</sup>,那么因素综合权重结果的误差就会变大,不能很好的体现实际影响因素的权重。

本文通过引进灰色关联理论,通过灰色关联度计算,将专家关于电池一致性影响因素的打分数据

收稿日期:2017-02-20;修回日期:2018-08-20  
基金项目:天津市科技特派员资助项目(14JCTPJC00532)  
Project Supported by Science and Technology Support Program of Tianjin(14JCTPJC00532)

进行两两比较,得到灰色关联度矩阵。台湾作家 Kun-Li Wen 所述著作及论文<sup>[5-6]</sup>中提出,灰色关联度矩阵最大特征值对应的特征向量即为所求权重,所以灰色关联度矩阵最大特征值对应的特征向量将会非常客观的表征出各个专家打分数据的可信度,即每位专家的相对权重。

目前关于因素指标的权重计算方法非常多,层次分析法将定性和定量分析有机结合,可以有效解决定量数据少的问题,成为目前多目标、多准则复杂系统权重计算的最佳选择之一。本文在灰色关联理论确定专家权重的基础上,将每一位专家对因素指标的打分转化为一组一致性较好的判断矩阵,再应用根法计算因素指标权重。通过层次分析法计算出所有专家关于各个因素指标的权重,将得到的因素指标权重通过加权算术均值法 WAMM(weighted arithmetic mean method)<sup>[7]</sup>,与专家权重相结合,得到集结多位专家意见的因素指标综合权重。

## 2 基于灰色关联理论的专家权重分析

### 2.1 灰色关联理论

灰色关联分析是灰色系统理论的基础,是一种用来分析和确定系统因素间的影响程度和因素对系统主行为的贡献测度,描述因素间关系强弱、大小、次序的系统分析方法。其基本思想是:以因素的数据序列为依据,用数学方法研究因素间的几何对应关系,即序列曲线的几何形状越接近,则它们之间的灰色关联度越大,反之越小<sup>[8-9]</sup>。应用灰色关联度进行权重分析可以使序列之间不明确的关系量化、序化、显化,而且对数据要求低,数据大小排列清晰,同时可以减小计算难度<sup>[10]</sup>。

#### 2.1.1 灰色关联度数学模型

##### 1) 灰色关联因子空间

灰色关联因子空间由序列构成,序列必须具备3个属性:①可比性;②可接近性,若  $x_j(k) = x_i(k) + C, C > 0, k \in K$ , 则称  $x_i$  和  $x_j$  是不可接近的;③极性一致性,  $x_i$  和  $x_j$  同极性。

##### 2) 灰色关联空间

灰色关联空间实质上是满足灰色关联公理的差异信息测度空间。参考序列与比较序列之间的差异信息构成了差异信息测度空间。序列之间点与点的比较测度称为灰色关联系数,序列与序列之间的比较测度称为灰色关联度。令  $X$  为灰色关联因子集,  $\Gamma$  为灰色关联映射集, 则称  $(X, \Gamma)$  为灰色关联空间, 当且仅当  $\Gamma$  满足灰色关联4公理时,  $\gamma(x_i, x_j)$  即为灰色关联度, 且有  $\gamma(x_i, x_j) \in \Gamma$ 。灰色关联4公理分别为

(1) 规范性:  $0 < \gamma(x_i, x_j) \leq 1, \gamma(x_i, x_j) = 1 \leftarrow x_i = x_j$ 。

(2) 整体性:  $\gamma(x_i, x_j) = \gamma(x_j, x_i), i \neq j$ 。

(3) 偶对对称性:  $\gamma(x_i, x_j) = \gamma(x_j, x_i) \leftarrow x = \{x_i, x_j\}$ 。

(4) 接近性:  $|x_i(k) - x_j(k)|$  越小,  $\gamma(x_i(k), x_j(k))$  越大。

##### 3) 灰色关联度计算

在灰色关联度理论中,一般需要选取一个序列  $x_0(k)$  作为系统参考序列,其他序列作为系统比较序列,即邓氏关联度。Nagai 关联度可以选取任意序列为参考序列,与其他序列作比较,得到对应的灰色自关联矩阵,本文即采用此方法计算专家权重,则有

$$\Gamma_{ij} = \Gamma(x_i, x_j) = \frac{\Delta_{\max} - \bar{\Delta}_{ij}}{\Delta_{\max} - \Delta_{\min}}, \bar{\Delta}_{ij} = \left( \sum_{k=1}^n [\Delta_{ij}(k)]^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$i=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, n; j \in i \quad (1)$$

式中:  $x_i$  为参考序列;  $x_j$  为比较序列;  $\Delta_{ij} = \|x_i(k) - x_j(k)\|$ ;  $\Delta_{\min} = \min_i \min_j |x_i(k) - x_j(k)|$ ;  $\Delta_{\max} = \max_i \max_j |x_i(k) - x_j(k)|$ 。

### 2.2 灰色关联度权重计算

根据灰色关联度理论和 Saaty's 权重计算方法,将灰色关联度矩阵的最大特征根对应的特征向量作为最优解。计算步骤如下。

(1) 将原始数据序列进行量化处理,使其满足空间序列的3个属性,得到的序列为

$$\begin{cases} x_1 = (x_1(1), x_1(2), \dots, x_1(k)) \\ x_2 = (x_2(1), x_2(2), \dots, x_2(k)) \\ \vdots \\ x_m = (x_m(1), x_m(2), \dots, x_m(k)) \end{cases} \quad (2)$$

(2)通过 Nagai 的灰色关联度计算方法计算序列的灰色关联度,将互为参考序列计算得到的灰色关联度进行排列,得到  $m \times m$  的灰色关联度矩阵  $R_{m \times m}$ ,即

$$R_{m \times m} = \begin{bmatrix} \Gamma_{11} & \Gamma_{12} & \cdots & \Gamma_{1m} \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22} & \cdots & \Gamma_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Gamma_{m1} & \Gamma_{m2} & \cdots & \Gamma_{mm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

该灰色关联度矩阵为灰色自关联矩阵,则该矩阵为对角线元素为 1 的对称矩阵且不满足灰色关联 4 公理的整体性。

(3)计算关联度矩阵  $R_{m \times m}$  对应的特征值  $\lambda$ 。

(4)计算特征值对应的特征向量,即

$$P^{-1}RP = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}。$$

(5)根据特征值法,最大特征值  $\lambda_{\max}$  对应的特征向量  $y^T = (y_1, y_2, \dots, y_m)$  即为各序列的相对权重。

(6)将相对权重  $y^T = (y_1, y_2, \dots, y_m)$  归一化处理,得到各序列的权重  $\omega^T = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)$ ,其中

$$\omega_l = \frac{y_l}{\sum_{l=1}^m y_l} \quad (4)$$

### 3 基于层次分析法的影响因素指标权重分析

#### 3.1 层次分析法

层次分析法是一种新型决策理论,是通过两两比较建立比较矩阵的多目标决策方法<sup>[11-12]</sup>,将专家的经验分析与理性分析相结合,使比较过程中的不确定因素较大程度地降低<sup>[13]</sup>,提高了决策的有效性,在多目标规划领域具有广泛的应用价值。

#### 3.2 层次分析法计算因素指标权重

##### 3.2.1 应用层次分析权重确定方法中的根法确定指标权重的步骤

$m$  个专家各自建立两两比较判断矩阵  $A_l, l = 1, 2, \dots, m$ 。通常采用 1~9 标度法获得判断矩阵,而 1~9 标度法所需信息较多,一般很难确切给出。尤其是当同一层次上的元素很多时,很容易使决策者做出矛盾和混乱的判断,使判断矩阵出现严重的不一

致现象。而(0,2)EM法及(-2,2)EM法只适用于较少数据的比较<sup>[14-15]</sup>,当同层次上元素较多时,各元素间由于差距较小,从而被忽略统计,使决策结果的可信度下降。为了解决多元素权重计算困难的问题,本文通过打分的方式来采集电池一致性影响因素专家评定分数,采用 10 分制,第  $l$  个专家给第  $k$  个因素指标的分数记为  $z_l(k)$ 。通过两两指标比较的差值确定判断矩阵  $A_l = \{a_{ij}^l\}$ 。具体算法为

$$a_{ij}^l = \begin{cases} z_l(i) - z_l(j) + 1 & z_l(i) - z_l(j) \geq 0 \\ \frac{1}{|z_l(i) - z_l(j)| + 1} & z_l(i) - z_l(j) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $a_{ij}^l > 0, a_{ij}^l = \frac{1}{a_{ji}^l}; i, j = 1, 2, \dots, n, n$  为矩阵阶数; $l = 1, 2, \dots, m$ 。

##### 3.2.2 计算指标权重

(1)计算判断矩阵  $A_l$  的每一行元素的积  $M_i^l$ ,即

$$M_i^l = \prod_{j=1}^n a_{ji}^l \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

(2)计算  $M_i^l$  的  $n$  次方根,即

$$\bar{W}_i^l = \sqrt[n]{M_i^l} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

(3)将所求向量归一化,得

$$W^l = [W_1^l, W_2^l, \dots, W_n^l]^T \quad (8)$$

其中, $W_i^l$  为第  $l$  个专家所求各因素指标的权重, $W_i^l = \frac{\bar{W}_i^l}{\sum_{i=1}^n \bar{W}_i^l}$ 。

##### 3.2.3 判断矩阵 $A_l$ 的最大特征值 $\lambda_{\max}^l$ 的确定

$$\lambda_{\max}^l = \sum_{i=1}^n \frac{(A_l \cdot W^l)_i}{n W_i^l} \quad (9)$$

$$\text{其中: } A_l \cdot W^l = \begin{bmatrix} a_{11}^l & a_{12}^l & \cdots & a_{1n}^l \\ a_{21}^l & a_{22}^l & \cdots & a_{2n}^l \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1}^l & a_{n2}^l & \cdots & a_{nn}^l \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W_1^l \\ W_2^l \\ \vdots \\ W_n^l \end{bmatrix};$$

$$(A_l \cdot W^l)_i = a_{i1}^l W_1^l + a_{i2}^l W_2^l + \cdots + a_{in}^l W_n^l。$$

##### 3.2.4 一致性检验

(1)计算一致性指标  $C_l^l$ ,即

$$C_l^l = \frac{\lambda_{\max}^l - n}{n - 1} \quad (10)$$

(2)查同阶矩阵平均随机一致性指标  $R_l^l$ ,见表 1。

表 1 同阶矩阵平均随机一致性指标  $R_1^l$

Tab.1 Average random consistency index  $R_1^l$  of the same-order matrix

阶数 $n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$R_1^l$	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.14	1.46	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58	1.59

(3)计算一致性比例  $C_r^l$ ,即

$$C_r^l = \frac{C_1^l}{R_1^l} \tag{11}$$

当  $C_r^l=0$  时,  $A$  具有完全一致性; 当  $C_r^l<0.1$  时,  $A$  具有满意一致性; 当  $C_r^l>0.1$  时,  $A$  具有非满意一致性, 则应予以调整或舍弃不用。

### 4 锂离子电池一致性影响因素综合权重的确定

锂离子电池一致性影响因素的综合指标权重计算方法为 WAMM, 是比较简单有效的权重集结方式, 有广泛的适用性。本文根据专家打出的分数, 应用加权算术均值法将应用灰色关联度矩阵求得的专家权重  $\omega_l$  和通过层次分析中判断矩阵得到各因素指标权重  $W^l$  集结为因素指标综合权重, 再将归一化后的专家权重与相应因素指标的权重积为  $W^l\omega_l$ , 在此基础上将各专家对某一指标的所有权重求和即为这个指标的组合权重。第  $i$  个指标的权重为

$$\omega_i = \sum_{l=1}^m W_i^l \omega_l \tag{12}$$

### 5 锂离子电池一致性影响因素综合权重计算

锂离子电池一致性影响因素涉及到生产加工的各个工序, 企业需要考虑经济、时间以及客观因素, 判断各个影响因素对一致性的影响, 从而综合确定解决一致性问题的优先顺序和方案。为了相对准确地判断影响因素的一致性, 请 8 位从事锂离子电池工作的专家(工程师)对所提影响锂离子电池一致性的因素进行打分。由于各专家对锂离子电池的一致性评判的准确性不同, 所以需要得到各专家

对一致性评判系统的影响权重。通过灰色系统关联度理论算出各专家的权重, 应用层次分析法对单一专家情况下的电池一致性影响因素进行权重分析, 确定出 8 位专家对电池一致性影响因素指标权重, 最后通过加权算术平均的方法得到因素指标的综合权重。由此得到对电池一致性影响比较大的几个关键工艺, 为企业工艺改进和优化提供一种理论方法和数据支持。

#### 5.1 电池一致性影响因素专家评分系统

通过对锂离子电池生产过程的分析, 影响电池一致性的主要因素如表 2 所示。8 位专家对影响电池一致性的主要因素进行打分, 其专家信息如表 3 所示, 锂离子电池一致性影响因素评分系统如表 4 所示。

表 2 影响电池一致性的因素

Tab.2 Factors affecting the consistency of battery

序号	影响因素	序号	影响因素
F <sub>1</sub>	原材料预处理	F <sub>8</sub>	冷热压成型
F <sub>2</sub>	混料均匀性	F <sub>9</sub>	顶侧封
F <sub>3</sub>	涂布均匀性	F <sub>10</sub>	真空干燥
F <sub>4</sub>	压实密度均匀性	F <sub>11</sub>	注液
F <sub>5</sub>	极片分切	F <sub>12</sub>	化成
F <sub>6</sub>	极耳焊接	F <sub>13</sub>	抽真空封口
F <sub>7</sub>	卷绕/叠片	F <sub>14</sub>	老化

表 3 专家从事电池工作信息

Tab.3 Information about experts engaging in battery work

专家编号	工作时长/a	专家信息
A	10	电池生产工艺工程师
B	8	电池生产工艺工程师
C	10	电池生产总工程师
D	8	电池研究专家
E	8	电池研究专家
F	15	电池研究专家
G	10	电池生产工艺工程师
H	8	电池生产工艺工程师

表 4 锂离子电池一致性影响因素评分系统

Tab.4 Scoring system for influencing factors of consistency of lithium-ion battery

影响 因素	A(z <sub>1</sub> )	B(z <sub>2</sub> )	C(z <sub>3</sub> )	D(z <sub>4</sub> )	E(z <sub>5</sub> )	F(z <sub>6</sub> )	G(z <sub>7</sub> )	H(z <sub>8</sub> )	影响 因素	A(z <sub>1</sub> )	B(z <sub>2</sub> )	C(z <sub>3</sub> )	D(z <sub>4</sub> )	E(z <sub>5</sub> )	F(z <sub>6</sub> )	G(z <sub>7</sub> )	H(z <sub>8</sub> )
F <sub>1</sub>	7	6	6	8	8	6	5	9	F <sub>8</sub>	9	8	6	8	4	7	5	6
F <sub>2</sub>	8	8	10	9	8	9	10	7	F <sub>9</sub>	5	3	3	4	2	8	3	9
F <sub>3</sub>	8	7	10	3	9	8	10	9	F <sub>10</sub>	10	10	10	9	10	8	9	9
F <sub>4</sub>	9	8	10	10	9	10	9	10	F <sub>11</sub>	10	8	10	9	7	10	9	7
F <sub>5</sub>	4	9	3	4	2	8	3	9	F <sub>12</sub>	7	8	9	9	4	7	8	6
F <sub>6</sub>	9	7	8	8	8	6	9	9	F <sub>13</sub>	8	6	2	8	2	7	3	4
F <sub>7</sub>	7	8	8	10	8	7	6	10	F <sub>14</sub>	7	5	5	6	6	8	4	4

5.2 电池一致性影响因素评定专家权重计算

由于打分系统中的专家数据属于同量纲,所以不需要灰色系统理论中的无量纲化处理,即  $z_i(k) = x_i(k), i=1, 2, \dots, m, k=1, 2, \dots, n$ , 得到因素序列  $x_i$  分别为

$$x_1=z_1=(7, 8, 8, 9, 4, 9, 7, 9, 5, 10, 10, 7, 8, 7)$$

$$x_2=z_2=(6, 8, 7, 8, 9, 7, 8, 8, 3, 10, 8, 8, 6, 5)$$

$$x_3=z_3=(6, 10, 10, 10, 3, 8, 8, 6, 3, 10, 10, 9, 2, 5)$$

$$x_4=z_4=(8, 9, 3, 10, 4, 8, 10, 8, 4, 9, 9, 9, 8, 6)$$

$$x_5=z_5=(8, 8, 9, 9, 2, 8, 8, 4, 2, 10, 7, 4, 2, 6)$$

$$x_6=z_6=(6, 9, 8, 10, 8, 6, 7, 7, 8, 8, 10, 7, 7, 8)$$

$$x_7=z_7=(5, 10, 10, 9, 3, 9, 6, 5, 3, 9, 9, 8, 3, 4)$$

$$x_8=z_8=(9, 7, 9, 10, 9, 9, 10, 6, 9, 9, 7, 6, 4, 4)$$

计算灰色关联度。将上述序列代入式(1)中,得到各个因素序列的灰色关联度,并生成灰色关联度矩阵  $R_{8 \times 8}$ , 即

$$R_{8 \times 8} = \begin{bmatrix} 1.000 & 0 & -0.020 & 2 & -0.195 & 2 & 0.020 & 6 & -0.407 & 0 & 0.020 & 6 & -0.203 & 7 & -0.442 & 8 \\ -0.020 & 2 & 1.000 & 0 & -0.269 & 7 & -0.142 & 9 & -0.498 & 3 & -0.049 & 8 & -0.277 & 8 & -0.253 & 6 \\ -0.195 & 2 & -0.269 & 7 & 1.000 & 0 & -0.449 & 8 & -0.020 & 2 & -0.449 & 8 & 0.484 & 9 & -0.564 & 9 \\ 0.020 & 6 & -0.142 & 9 & -0.449 & 8 & 1.000 & 0 & -0.641 & 3 & -0.324 & 8 & -0.551 & 8 & -0.622 & 6 \\ -0.407 & 0 & -0.498 & 3 & -0.020 & 2 & -0.641 & 3 & 1.000 & 0 & -0.714 & 3 & 0.010 & 3 & -0.584 & 4 \\ 0.020 & 6 & -0.049 & 8 & -0.449 & 8 & -0.324 & 8 & -0.714 & 3 & 1.000 & 0 & -0.470 & 8 & -0.203 & 7 \\ -0.203 & 7 & -0.277 & 8 & 0.484 & 9 & -0.551 & 8 & 0.010 & 3 & -0.470 & 8 & 1.000 & 0 & -0.597 & 2 \\ -0.442 & 8 & -0.253 & 6 & -0.564 & 9 & -0.622 & 6 & -0.584 & 4 & -0.203 & 7 & -0.597 & 2 & 1.000 & 0 \end{bmatrix}$$

应用 Matlab 计算关联度矩阵特征值和特征向量, 找出最大特征值  $\lambda_{\max}=2.658 0$ , 对应的特征向量:  $y^T=(0.159 2, 0.215 1, 0.453 5, 0.272 2, 0.458 6, 0.366 9, 0.482 0, 0.267 1)$ , 得到的特征向量即为专家相对权重。

将特征向量  $y^T$  进行归一化处理, 得到专家权重:  $\omega^T=(0.059 5, 0.080 4, 0.169 6, 0.101 8, 0.171 5, 0.137 2, 0.180 2, 0.099 9)$ 。

5.3 电池一致性影响因素指标权重计算

根据电池一致性专家打分评定系统中的数据, 代入式(5)得到 8 位专家对影响因素的判断矩

阵, 分别表示为

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/2 & 1/3 & 4 & 1/3 & 1 & 1/3 & 3 & 1/4 & 1/4 & 1 & 1/2 & 1 \\ 2 & 1 & 1 & 1/2 & 5 & 1/2 & 2 & 1/2 & 4 & 1/3 & 1/3 & 2 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 1 & 1/2 & 5 & 1/2 & 2 & 1/2 & 4 & 1/3 & 1/3 & 2 & 1 & 2 \\ 3 & 2 & 2 & 1 & 6 & 1 & 3 & 1 & 5 & 1/2 & 1/2 & 3 & 2 & 3 \\ 1/4 & 1/5 & 1/5 & 1/6 & 1 & 1/6 & 1/4 & 1/6 & 1/2 & 1/7 & 1/7 & 1/4 & 1/5 & 1/4 \\ 3 & 2 & 2 & 1 & 6 & 1 & 3 & 1 & 5 & 1/2 & 1/2 & 3 & 2 & 3 \\ 1 & 1/2 & 1/2 & 1/3 & 4 & 1/3 & 1 & 1/3 & 3 & 1/4 & 1/4 & 1 & 1/2 & 1 \\ 3 & 2 & 2 & 1 & 6 & 1 & 3 & 1 & 5 & 1/2 & 1/2 & 3 & 2 & 3 \\ 1/3 & 1/4 & 1/4 & 1/5 & 2 & 1/5 & 1/3 & 1/5 & 1 & 1/6 & 1/6 & 1/3 & 1/4 & 1/3 \\ 4 & 3 & 2 & 2 & 7 & 2 & 4 & 2 & 6 & 1 & 1 & 4 & 3 & 4 \\ 4 & 3 & 3 & 2 & 7 & 2 & 4 & 2 & 6 & 1 & 1 & 4 & 3 & 4 \\ 1 & 1/2 & 1/2 & 1/3 & 4 & 1/3 & 1 & 1/3 & 3 & 1/4 & 1/4 & 1 & 1/2 & 1 \\ 2 & 1 & 1 & 1/2 & 5 & 1/2 & 2 & 1/2 & 4 & 1/3 & 1/3 & 2 & 1 & 2 \\ 1 & 1/2 & 1/2 & 1/3 & 4 & 1/3 & 1 & 1/3 & 3 & 1/4 & 1/4 & 1 & 1/2 & 1 \end{bmatrix};$$



$$\begin{aligned}
 W^3 &= [0.030\ 4\ 0.134\ 6\ 0.134\ 6\ 0.134\ 6\ 0.012\ 4 \\
 &\quad 0.059\ 9\ 0.059\ 9\ 0.030\ 4\ 0.014\ 5\ 0.134\ 6 \\
 &\quad 0.134\ 6\ 0.087\ 8\ 0.009\ 4\ 0.021\ 9]^T; \\
 W^4 &= [0.058\ 4\ 0.097\ 4\ 0.011\ 3\ 0.154\ 3\ 0.015\ 0 \\
 &\quad 0.058\ 4\ 0.154\ 3\ 0.058\ 4\ 0.015\ 0\ 0.097\ 4 \\
 &\quad 0.097\ 4\ 0.097\ 4\ 0.058\ 4\ 0.027\ 2]^T; \\
 W^5 &= [0.088\ 7\ 0.088\ 7\ 0.136\ 4\ 0.136\ 4\ 0.011\ 9 \\
 &\quad 0.088\ 7\ 0.088\ 7\ 0.022\ 0\ 0.011\ 9\ 0.193\ 2 \\
 &\quad 0.053\ 8\ 0.022\ 0\ 0.011\ 9\ 0.041\ 0]^T; \\
 W^6 &= [0.023\ 5\ 0.114\ 1\ 0.068\ 4\ 0.171\ 5\ 0.068\ 4 \\
 &\quad 0.023\ 5\ 0.038\ 5\ 0.038\ 5\ 0.068\ 4\ 0.068\ 4 \\
 &\quad 0.171\ 5\ 0.038\ 5\ 0.038\ 5\ 0.068\ 4]^T; \\
 W^7 &= [0.027\ 1\ 0.166\ 1\ 0.166\ 1\ 0.110\ 5\ 0.013\ 4 \\
 &\quad 0.110\ 5\ 0.038\ 5\ 0.027\ 1\ 0.013\ 4\ 0.110\ 5 \\
 &\quad 0.110\ 5\ 0.073\ 8\ 0.013\ 4\ 0.019\ 0]^T; \\
 W^8 &= [0.091\ 3\ 0.037\ 7\ 0.091\ 3\ 0.149\ 3\ 0.091\ 3 \\
 &\quad 0.091\ 3\ 0.149\ 3\ 0.025\ 4\ 0.091\ 3\ 0.091\ 3 \\
 &\quad 0.037\ 7\ 0.025\ 4\ 0.013\ 5\ 0.013\ 5]^T.
 \end{aligned}$$

应用式(9)计算判断矩阵  $A_l$  的最大特征值如表 5,得到

$$\lambda_{\max} = (14.273\ 2, 14.269\ 9, 14.879\ 8, 14.340\ 2, 14.5329, 14.143\ 2, 14.459\ 4, 14.290\ 6)$$

将判断矩阵最大特征值  $\lambda_{\max}$  代入式(10)和式(11),得到判断矩阵的一致性比例值。 $C_R^1=0.013\ 3, C_R^2=0.013\ 1, C_R^3=0.042\ 8, C_R^4=0.016\ 6, C_R^5=0.025\ 9, C_R^6=0.007\ 0, C_R^7=0.022\ 4, C_R^8=0.014\ 1$ , 可以看出所有的一致性比例值  $C_R^l$  都小于 0.1, 所以判断矩阵  $A_l$  全部具有满意的一致性。

表 5 判断矩阵  $A_l$  的最大特征值

Tab.5 Maximum eigenvalue of judgement matrix  $A_l$

$A_l$	$\lambda_{\max}$	$A_l$	$\lambda_{\max}$
$A_1$	14.273 2	$A_5$	14.532 9
$A_2$	14.269 9	$A_6$	14.143 2
$A_3$	14.879 8	$A_7$	14.459 4
$A_4$	14.340 2	$A_8$	14.290 6

### 5.4 电池一致性影响因素综合权重计算

将计算得到的各个专家对锂离子电池一致性影响因素的权重  $W^l$  和专家权重  $\omega_l$  代入式(12),求

得锂离子电池一致性影响因素综合权重  $\Psi$ , 见表 6。

从表中可以看出,锂离子电池一致性的影响因素按照影响权重大小排序为: $F_4$  压实密度均匀性> $F_{10}$  真空干燥> $F_2$  混料均匀性> $F_{11}$  注液工艺> $F_3$  涂布均匀性> $F_7$  卷绕/叠片> $F_6$  极耳焊接> $F_{12}$  化成> $F_1$  原材料预处理> $F_8$  冷热压成型> $F_5$  极片分切> $F_{14}$  老化> $F_9$  顶侧封> $F_{13}$  抽真空封口。

表 6 锂离子电池一致性影响因素综合权重  $\Psi$

Tab.6 Comprehensive weight  $\Psi$  for influencing factors of consistency of lithium-ion battery

影响因素	$\Psi$	影响因素	$\Psi$
$F_1$	0.048 2	$F_8$	0.040 3
$F_2$	0.107 5	$F_9$	0.029 0
$F_3$	0.103 3	$F_{10}$	0.129 4
$F_4$	0.132 9	$F_{11}$	0.106 0
$F_5$	0.038 1	$F_{12}$	0.058 4
$F_6$	0.073 5	$F_{13}$	0.024 8
$F_7$	0.077 0	$F_{14}$	0.031 6

## 6 结语

本文通过专家打分对影响锂离子电池一致性的因素进行权重分析,为了避免专家打分的主观性对权重分析的影响,应用灰色关联理论客观的计算出各个专家的可信度,即专家权重;然后通过层次分析法得出了单一专家情况下的电池一致性影响因素指标权重值,并对建立的判断矩阵进行一致性检验,结果表明一致性较好;应用加权算术均值法,将专家权重与一致性影响因素指标权重相结合,所得加权值即为锂离子电池一致性影响因素的综合权重值。最后得出目前对锂离子电池一致性影响较大的工艺分别为:压实密度、真空干燥、混料均匀性和注液工艺等,为后续锂电池一致性研究提供了理论参考,同时对工程实践具有实际指导意义。

### 参考文献:

[1] 徐泽水. 群组决策中专家赋权方法研究[J]. 应用数学与计算数学学报, 2001, 15(1): 19-22.  
 Xu Zeshui. Research on methods for derivign experts' weights in group decision making[J]. Communication on appl-

- ied mathematics and computation, 2001, 15 (1): 19-22(in Chinese).
- [2] 邱丽玲, 马素霞, 马晨霞, 等. 电能质量监测数据一致性定义及检测方法[J]. 电源学报, 2015, 13(5): 48-53.  
Qiu Liling, Ma Suxia, Ma Chenxia, et al. Consistent definition and detection method of power quality monitoring data [J]. Journal of Power Supply, 2015, 13(5): 48-53 (in Chinese).
- [3] 张金龙, 佟微, 孙叶宁, 等. 锂电池健康状态估算方法综述[J]. 电源学报, 2017, 15(2): 128-134.  
Zhang Jinlong, Tong Wei, Sun Yening, et al. Summarize of lithium battery status of health estimation method[J]. Journal of Power Supply, 2017, 15(2): 128-134(in Chinese).
- [4] 王明文. 群组决策中专家权重确定的主客观法[J]. 江西师范大学学报: 自然科学版, 1999, 23(2): 138-142.  
Wang Mingwen. An objective and subjective synthetic approach to determine expert weights for group decision[J]. Journal of Jiangxi Normal University: Natural Science Edition, 1999, 23(2): 138-142(in Chinese).
- [5] Wen KunLi. Grey System Theory and Applications[M]. Taipei: Wunan Publisher, 2009.
- [6] Wen Kunli, You Meili, Wang J R. The modern analysis method in kensei engineering[J]. International Journal of Kansai Information, 2010, 1(1): 43-52.
- [7] Basak I, Saaty T. Group decision making using the analytic hierarchy process[J]. Mathematical & Computer Modelling, 1993, 17(4-5): 101-109.
- [8] 邓聚龙. 灰色系统理论教程[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990.
- [9] 周秀文. 灰色关联度的研究与应用[D]. 吉林: 吉林大学, 2007: 5-13.  
Zhou Xiuwen. The study on the grey relational degree and its application [D]. Jilin: Jilin University, 2007: 5-13 (in Chinese).
- [10] 邓聚龙. 灰色系统: 社会、经济[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- [11] 袁磊. 基于 AHP 的群决策方法(GAHP)应用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007: 30-37.  
Yuan Lei. Research on applications of group decision making based on AHP(GAHP)[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007: 30-37(in Chinese).
- [12] 阿辽沙·叶, 祝恩国, 成倩, 等. 用电设备安全评估的改进区间层次分析法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(1): 32-36.  
Aliaosha·Ye, Zhu Enguo, Cheng Qian, et al. Improved interval analytic hierarchy process method for electrical equipment safety assessment[J]. Proceedings of the CSU-EP-SA, 2015, 27(1): 32-36(in Chinese).
- [13] 倪正藩. 层次分析法确定评价因素权重系数的一种方法[J]. 上海教育科研, 1987, 5(26): 44-46.
- [14] 左军. 层次分析法中判断矩阵的间接给出法[J]. 系统工程, 1988, 6(6): 56-63.
- [15] 徐泽水. 层次分析新标度法[J]. 系统工程理论与实践, 1998, 18(10): 74-77.  
Xu Zeshui. A new scale method in analytic hierarchy process[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 1998, 18(10): 74-77(in Chinese).



关玉明

## 作者简介:

关玉明(1957-),男,硕士,博士生导师,研究方向:机电一体化成套设备及其关键部件的研究,E-mail:gyuming@163.com。

李朝(1990-),男,通信作者,硕士研究生,研究方向:机电一体化成套设备及其关键技术,E-mail:947703325@qq.com。

崔佳(1992-),男,硕士研究生,研究方向:机电一体化成套设备及其关键技术,E-mail:805705967@qq.com。

靳美娜(1991-),女,硕士研究生,研究方向:机电一体化成套设备及其关键技术,E-mail:1429276539@qq.com。

冀承林(1990-),男,硕士研究生,研究方向:机电一体化成套设备及关键技术,E-mail:jichenglin3@163.com。

商鹏(1980-),女,博士,副教授,研究方向:机电一体化成套设备及关键技术,E-mail:shangpeng0828@126.com。