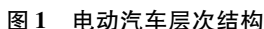


(青岛理工大学汽车与交通学院 青岛 266520)

关键词 电动汽车, 定量化选型, ∞ 标度, 模糊层次分析法

根据对电动汽车整体性能的分析,建立的指标-性能-结构层次模型如图 1 所示。



— 1169 —

根据电动汽车的选型需求分组,每一组作为一个层次,按照最高层(目标层)、若干的中间层(结构层和准则层)和最低层(指标层)的形式排列起来。同一层作为准则,对下一层的元素起支配作用,同时它又受上一层元素的支配。

1.2 ∞ 标度法构造模糊判断矩阵

首先确定第 i 个指标中,各选型方案的指标值的隶属度关系,即构造模糊判断矩阵的第 i 行。

为了更精确地表述方案变动的影响,本文在常用的 0.1~0.9 标度法基础上,提出了一种新的标度

方法——(0,1) 区间上的 ∞ 标度法,如图 2 所示。在其隶属度计算中把(0,1)区间分成 n_i 份,且有:

$$n_i = \lceil \frac{\max\{a_j\}}{\min\{a_j\}} \rceil \quad (j = 1, 2, \dots, m) \tag{1}$$

式中, a_i 为第 i 指标中各选型方案的指标值,本文中 $j = 1, 2, 3$ 。

n_i 随着指标最大值最小值之比的增大而增大,理论上可趋向无穷大,因此命名为 ∞ 标度法。 n_i 的取值可按图 2 最右列数据选取。实际计算中,若 $n_i \leq 3$, 则可采用小数点后一位进行取整到 0.5。

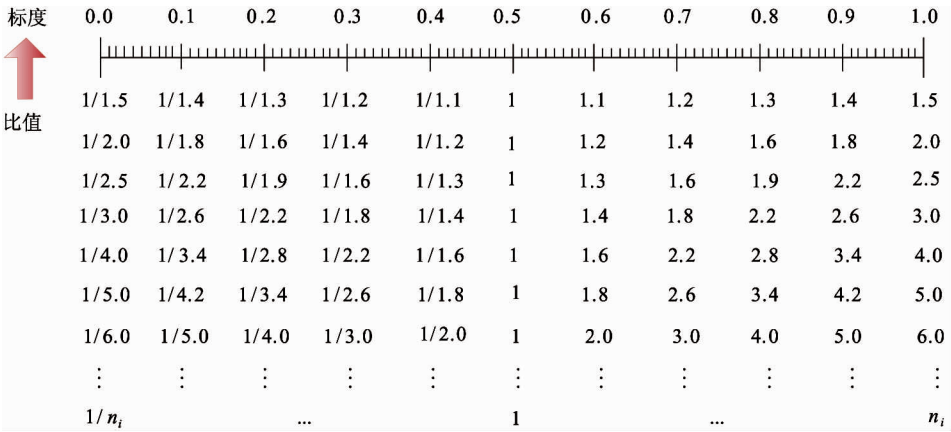


图 2 ∞ 标度法取值

一般地,定义某指标各个方案的隶属度为

$$\beta = \frac{a_{i,j1}}{a_{i,j2}} \quad (j_1, j_2 = 1, 2, \dots, n) \tag{2}$$

β 表征了对第 i 个指标而言,选型方案 j_1 相比方案 j_2 的相对优劣程度。根据隶属度 β 的取值,选择图 2 中对应 n_i 值的一行数据,确定最上端 0.0~1.0 标度对应值,构建模糊矩阵。

设上一层的元素 C 同下一层次中的元素 $a_1, a_2, \dots, a_n$ 有联系,则相对于 $a_1, a_2, \dots, a_n$ 的指标集 C , 模糊判断关系可用图 3 表示。

C	a_1	a_i	a_j	$\dots$	a_n
a_1	a_{11}	a_{1i}	a_{1j}	$\dots$	a_{1n}
a_i	a_{i1}	a_{ii}	a_{ij}	$\dots$	a_{in}
a_j	a_{j1}	a_{ji}	a_{jj}	$\dots$	a_{jn}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
a_n	a_{n1}	a_{ni}	a_{nj}	$\dots$	a_{nn}

图 3 模糊判断关系

图中元素 r_{ij} 表示在评价指标集 $C(a_1, a_2, \dots, a_n)$ 比较时,方案 i 和 j 的指标具有模糊关系“ a_i 比

a_j 重要程度”的隶属度,即可根据(0,1)标度的 r_{ij} 反求 β 。

定义模糊判断矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times n}$ 。

1.3 模糊一致矩阵

设模糊综合评判的单因素评判矩阵为

$$R^k = (r_{ij}^k)_{n \times n} \tag{3}$$

分别计算各行之和 r_i 和各列之和 r_j :

$$r_i = \sum_{l=1}^n r_{il}, \quad r_j = \sum_{l=1}^n r_{lj} \tag{4}$$

对于 $\forall l = 1, 2, \dots, n$, 有

$$\begin{aligned} r_{il}^k - r_{jl}^k + 0.5 &= \frac{r_i^k - r_l^k}{2n} + 0.5 - (\frac{r_j^k - r_l^k}{2n} + 0.5) + 0.5 \\ &= \frac{r_i^k - r_j^k}{2n} + 0.5 \\ &= r_{ij}^k \end{aligned} \tag{5}$$

因此可做变换

$$r_{ij}^k = \frac{r_i^k - r_j^k}{2n} + 0.5 \tag{6}$$

从而得到新的判断矩阵 $R^k (k = 1, 2, \dots, m)$, 且可证明 R^k 满足一致阵条件。

2 层次排序

根据系统可分性原理,将方案优选过程所需考虑的因素根据其属性分为若干个分系统,对每一个分系统,利用单层次-多因素模型分别计算得到各方案的隶属度值,对于具有两个层次结构以上的系统,可以依此类推,建立多层次-多因素方案优选模型,其层次结构与图 1 相同,箭头反向。

根据多层次-多因素方案优选模型,利用模糊判断一致阵 R^k 计算,在指标层单排序基础上,逐次进行准则层和结构层的计算,即通过多层加权的指标排序,获得电动汽车各选型方案的综合评价值,其最大值即为最优解。

计算 R^k 中第 i 行数据:

$$\bar{s}_i = (\prod_{l=1}^n r_{il}^k)^{\frac{1}{n}} \tag{7}$$

运用方根法计算选型方案 A_i 在 k 因素下的隶属度值 s_i^k :

$$s_i^k = \frac{\bar{s}_i}{\sum_{l=1}^n \bar{s}_l} \tag{8}$$

类似地,指标权重 w_k 的计算则可根据专家打分筛选机制,采用式(6)和(7)进行计算。计算不同方案的加权评价值:

$$S_i^{(p)} = \sum_{k=1}^m w_k \cdot s_i^k \tag{9}$$

式中,方案编号 $i = 1, 2, \dots, n$, 结构层次编号 $p = 1, 2, \dots, m$, 本文中分别为目标层 1、结构层 2、准则层 3、指标层 4。

将 $S_i^{(p)} (i = 1, 2, \dots, n)$ 由大到小顺序,得到该层下 n 个选型方案优劣排名。

在单层排序基础上,从下向上逐层进行加权计算,最终得到目标层加权评价值的优劣排序。确定综合评价值最优方案:

$$S_{\text{optimal}} = \max \{ S_i^{(p)} \} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \tag{10}$$

3 实例计算

3.1 动力总成方案层次结构及其量化

根据前述方法,进行电动汽车动力总成定量化选型计算,建立的分层结构如图 4 所示,结构层选择电池和电机两个主要总成,准则层包括 9 项,指标层 29 项。

选择 3 种典型的 3 种动力总成方案,方案选型 1 是铅酸电池和感应电机组合,选型 2 是镍氢电池和永磁无刷直流电机组合,选型 3 是锂电池和开关磁阻式电机组合。

通过文献查阅的方法,辅以厂家调研获得定量化的指标层量化参数,如电池比能量、电机转速、价格、寿命等,如表 1 所列。部分参数如散热、可维护性等则通过前述 ∞ 标度法换算为量化参数,以 * 标出。

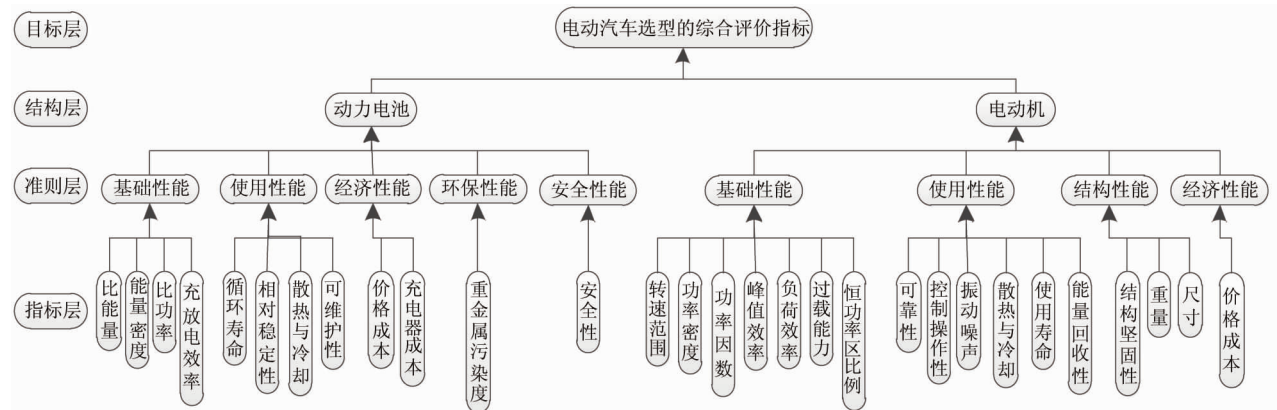


图 4 电动汽车动力总成分层结构

表 1 电动汽车定量化选型方法的 FAHP 层次分析结构

目标层	结构层	准则层	指标层(单位)	选型 1	选型 2	选型 3
电动汽车选型的综合评价指标	动力电池	基础性能	比能量(Wh/kg)	35	70	125
			能量密度(Wh/L)	75	210	290
			比功率(W/kg)	250	200	250
			充放电效率(%)	65	90	95
		使用性能	循环寿命(次)	500	1000	1200
			相对稳定性	60	70	85
			散热与冷却*	80	70	55
			可维护性	55	75	80
		经济性能	价格成本(元/Wh)	90	45	45
			充电器成本(元/个)	80	60	35
		环保性能	重金属污染度*	30	90	90
		安全性能	安全性	82	75	45
	电动机	基础性能	转速范围(r/min)	1600	700	1800
			功率密度(W/kg)	75	85	95
			功率因数	83.5	91.5	62.5
			峰值效率(%)	94.5	96	87.5
			负荷效率(%)	91	91	82
			过载能力	400	300	400
			恒功率区比例	1:5	1:2.25	1:3
		使用性能	可靠性	75	85	75
			控制操作性	75	75	75
			振动噪声(dB)	85	85	65
			散热与冷却*	75	85	85
			使用寿命(次)	75	75	75
			能量回收性	65	75	60
		结构性能	结构坚固性	75	65	85
			重量(kg)	65	85	85
			尺寸(mm)	65	85	85
		经济性能	价格成本(元/台)	65	65	85

3.2 权值计算

根据图 4 结构设计指标层、准则层和结构层权重的专家问卷,共获得 138 个有效样本,选择范围包括企业专家、高校和研究所等机构的权威专家,如表 2。

表 2 调研样本分布

调研对象	发放问卷	有效问卷
企业	电池	24
	电机	24
	整车	28
	控制器	20
高校	教授	20
	研究生	20
其他		24
总计	160	138

在行业专家调研的同时,进行了普通电动汽车车主的调研,列为“其他”项。为提高数据效率,无效问卷中指标层选项打分率低于 38% 未计入,准则层和结构层的打分数据与专家打分比较偏差后,计入权值计算。

需要指出的是,指标分为正指标和逆指标,为了便于统一量化评价,本文采用正指标法,即打分值越高代表其指标性能越好,部分逆指标进行了取反换算,并在权值列表 3、表 4 中以 * 标出。

为了更加精确地量化对比指标的重要程度,与 SAE 标准采用十分制法不同,本文采用百分制。除了指标层中的可维护性外,各参数数据基本符合正态分布,故按照 3 σ 方法剔除专家打分数据奇异点,计算打分的数学期望,并根据公式(2)到(8)计算权重值,部分数据见表 1。

表 3 电池相关权值列表

类型	性能指标	权重
指标层	比能量	0.235
	能量密度	0.238
	比功率	0.248
	充放电效率	0.279
	循环寿命	0.272
	相对稳定性	0.263
	散热与冷却	0.256
	可维护性	0.210
	价格成本 *	0.5
	充电器成本 *	0.5
准则层	重金属污染度 *	1.0
	安全性	1.0
	基础性能	0.145
	使用性能	0.224
	经济性能	0.206
结构层	环保性能	0.204
	安全性能	0.221
	动力电池	0.510

表 4 电机权值表

类型	性能指标	数学期望
指标层	转速范围	0.143
	功率密度	0.165
	功率因数	0.157
	峰值效率	0.122
	负荷效率	0.138
	过载能力	0.131
	恒功率区比例	0.144
	可靠性	0.165
	控制操作性	0.165
	振动噪声 *	0.202
准则层	散热与冷却	0.163
	使用寿命	0.144
	基础性能	0.243
	使用性能	0.238
	结构性能	0.271
结构层	经济性能	0.248
	电动机	0.490

由以上计算得到的各指标权重统计数据可以看出:对于电动汽车的定量化选型总体而言,电池和电动机重要性基本相当,因此实际上可以暂不考虑图 4 中设计的目标层,直接对结构层中的电池和电机方案分别评价。

对于动力电池,其使用性能和安全性能最重要,其权重系数值分别为 0.224 和 0.221,其次是环保性

能和经济性能,表征电池本身技术先进性的基础性能权重反而最低,仅为 0.145;电动机的结构性能是最重要的,其次是经济性能和基础性能,再次是环保性能。在指标层中,充放电效率、循环寿命和相对稳定性相对重要,其权重系数值分别为 0.279、0.272 和 0.263。

类似地可对电动机相关各层权重进行性能和指标分析。

3.3 隶属度计算及综合评价

以电池比能量指标(因素)为例,由 (0,1) 区间上的 ∞ 标度法,取 $n = 4$, 构造的模糊判断矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.40 & 0.24 \\ 0.60 & 0.50 & 0.42 \\ 0.76 & 0.58 & 0.50 \end{bmatrix} \tag{11}$$

根据判断矩阵由式(4)计算得: $r_{i1} = 1.14$; $r_{i2} = 1.52$; $r_{i3} = 1.84$; $c_{j1} = 1.86$; $c_{j2} = 1.48$; $c_{j3} = 1.16$ 。由式(6)逐项计算,构建模糊一致矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 0.380 & 0.443 & 0.497 \\ 0.443 & 0.507 & 0.560 \\ 0.497 & 0.560 & 0.613 \end{bmatrix} \tag{12}$$

再由式(7)和(8)运用方根法计算 3 个选型方案的隶属度: $s_1^k = 0.293$, $s_2^k = 0.336$, $s_3^k = 0.371$ 。

依照上述计算方法,可分别计算出电池比能量以外其他的隶属度值,如表 5 所示。

最后由式(9)计算各选型方案的综合评价值: $S_1 = 0.318$, $S_2 = 0.342$, $S_3 = 0.340$, 因此有 $\max \{S_1, S_2, S_3\} = S_2$ 。

由此可知:原有三种选型方案中,选型 2 镍氢电池和永磁无刷直流电机组合的综合评价值最高,但与选型 3 锂电和开关磁阻电机组合的评价值相差不大,也仅比选型 1 得分高 7%,因此可进一步优化组合。

从结构层的评价值来看,对于动力电池而言,镍氢电池的加权评价值最高,为 0.353;对于电动机而言,开关磁阻式电机较好,其加权评价值为 0.357,如表 6 所示。准则层上,铅酸电池的经济性能和安全性能较好,其值分别为 0.402 和 0.387;锂电池的基础性能和使用性能较好,其值分别为 0.375 和 0.360,而镍氢电池的综合性能较好;感应电机的整体性能较差,永磁无刷直流电机的使用性能较好,其值为 0.355,开关磁阻电机的经济性能和结构性能较好,其值分别为 0.404 和 0.373,如表 7 所示。因此新增镍氢电池和开关磁阻式电机的组合为选型 4,重新

计算,最终结果为: $S_1 = 0.224$, $S_2 = 0.249$, $S_3 = 0.245$, $S_4 = 0.282$ 。

表 5 选型方案隶属度值

指标层	隶属度		
	选型 1	选型 2	选型 3
比能量	0.293	0.336	0.371
能量密度	0.280	0.349	0.371
比功率	0.362	0.277	0.362
充放电效率	0.235	0.371	0.394
循环寿命	0.240	0.364	0.396
相对稳定性	0.266	0.330	0.404
散热与冷却	0.401	0.349	0.250
可维护性	0.239	0.369	0.393
价格成本	0.408	0.296	0.296
充电器成本	0.395	0.348	0.256
重金属污染度	0.240	0.380	0.380
安全性	0.387	0.368	0.245
转速范围	0.367	0.252	0.382
功率密度	0.289	0.334	0.377
功率因数	0.362	0.399	0.240
峰值效率	0.340	0.347	0.313
负荷效率	0.346	0.346	0.309
过载能力	0.371	0.258	0.371
恒功率区比例	0.260	0.393	0.347
可靠性	0.319	0.362	0.319
控制操作性	0.333	0.333	0.333
振动噪声	0.369	0.369	0.263
散热与冷却	0.304	0.348	0.348
使用寿命	0.333	0.3333	0.333
能量回收性	0.326	0.378	0.296
结构坚固性	0.336	0.281	0.383
重量	0.263	0.369	0.369
尺寸	0.263	0.369	0.369
价格成本	0.298	0.298	0.404

表 6 结构层加权评价值

结构层	加权评价值		
	选型 1	选型 2	选型 3
动力电池	0.324	0.353	0.324
电动机	0.312	0.333	0.357

表 7 准则层加权评价值

准则层		加权评价值		
		选型 1	选型 2	选型 3
动力电池	基础性能	0.291	0.334	0.375
	使用性能	0.288	0.352	0.360
	经济性能	0.402	0.322	0.276
	环保性能	0.240	0.380	0.38
	安全性能	0.387	0.368	0.245
电动机	基础性能	0.332	0.334	0.334
	使用性能	0.332	0.355	0.313
	结构性能	0.286	0.340	0.373
	经济性能	0.298	0.298	0.404

因此,可确定评价值为 0.282 的选型方案 4 更优。

4 结 论

本文提出了一种新的(0,1)区间上的 ∞ 标度法(或 n 标度法),提高了传统模糊层次分析法的计算精确度。针对电动汽车动力系统总成结构,构建了多层次-多因素方案优选模型,利用模糊一致矩阵计算加权综合评价值,通过层次排序确定最优解。该方法是一种相对客观的、定量化的电动汽车选型计算方法。

对三种电池电机组方案进行了计算,得到了电动汽车选型的综合评价指标,并通过对结构层、准则层的对比分析和计算,得到了理论上的最佳电动汽车的选型方案。

参考文献

[1] 姜立标, 吴斌, 冯骁等. 电动汽车动力性参数的仿真设计与试验验证. 汽车工程, 2011, 33(12): 1013-1017

[2] 朱曰莹, 赵桂范, 杨娜等. 电动汽车动力系统参数匹配及优化. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(7): 90-95

[3] 郑敏信, 齐铂金, 吴红杰等. 混合动力客车锂离子动力电池管理系统. 高技术通讯, 2008, 18(2): 173-178

[4] 李永, 胡向红, 乔箭. 改进的模糊层次分析法. 西北大学学报(自然科学版), 2005, 35(1): 11-12

[5] 王化吉, 宗长富, 管欣等. 基于模糊层次分析法的汽车操纵稳定性主观评价指标权重确定方法. 机械工程学报, 2011, 47(24): 83-90

Study on a quantitative type-selection approach for design of electric vehicles

Liu Jiang, Kong Xiangsheng, Wang Yushun, Wang Zhaojie
(Vehicle Engineering Department of College of automobile and traffic ,
Qingdao Technological University , Qingdao 266520)

Abstract

To improve the type-selection quality of electric vehicles during their initial design stage, a novel ∞ scaling method was proposed based on the fuzzy analytic hierarchy process, and a multi-level and multi-factor model for optimization of design schemes was built for electric vehicle power systems. Then the weighted comprehensive evaluation values were calculated using a fuzzy consistent matrix, and by sequencing these values from the performance layer up to the structure layer to determine the final optimization result, the quantitative evaluation of the type selection process of a design scheme was achieved. Three typical electric vehicles were used as the type-selection examples to compute the comprehensive evaluation values according to this new approach, and through the comparison analysis of the structure layer and the criterion layer, a better selection scheme for the power train system of electric vehicles was obtained theoretically.

Key words: electric vehicle, quantitative type-selection, ∞ scaling method, fuzzy analytic hierarchy process