DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.1.271 **中图分类号**：TM46 **文献标志码**：A

基于组合赋权法的燃料电池客车动力总成综合性能评价

杨继斌[1,2,3](中国电源学会会员)，何宗虎[1,3]，徐晓惠[1,2,3]，邓鹏毅[1,2,3]
(1.西华大学汽车测控与安全四川省重点实验室，成都 610039；2.四川省新能源汽车智能控制与仿真测试技术工程研究中心，成都 610039；3.西华大学四川智能及新能源汽车产业学院，成都 610039)

摘要：为完善燃料电池客车测试评价技术体系，有效保障燃料电池客车的大规模推广应用，提出了1种将组合赋权法与主观打分方法相结合的燃料电池客车动力总成综合性能评价方法。首先，构建了燃料电池客车动力总成综合性能评价体系并给出各项指标的测试方法。然后，分别采用层次分析法和变异系数法确定评价指标主客观权重，并运用基于博弈论的组合赋权法得到综合权重。在此基础上，利用主观打分方法对待评价车辆的测试结果进行评分，最后与综合权重加权计算得到综合得分并进行评级。实例计算结果表明，融合了主、客观权重的综合权重克服了单一方法求取权重的局限性，使评价结果更加客观和准确，进而验证了评价体系和方法的科学性和合理性。

关键词：燃料电池客车；动力总成；组合赋权法；综合性能评价；博弈论

Comprehensive Performance Evaluation of Fuel Cell Bus Powertrain Based on Combination Weighting Method

YANG Jibin[1,2,3], *Member, CPSS*, HE Zonghu[1,3], XU Xiaohui[1,2,3], DENG Pengyi[1,2,3]
(1. Vehicle Measurement Control and Safety Key Laboratory of Sichuan Province, Xihua University, Chengdu 610039, China; 2. Provincial Engineering Research Center for New Energy Vehicle Intelligent Control and Simulation Test Technology of Sichuan, Chengdu 610039, China; 3. Sichuan Industrial School of Intelligent and New Energy Automobile, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: To improve the test and evaluation technology system for fuel cell buses and effectively ensure their widespread applications, a comprehensive performance evaluation method for the power train of fuel cell buses is proposed, which combines the combination weighting method and subjective scoring method. First, a comprehensive performance evaluation system for the powertrain of fuel cell buses is constructed, and the test methods for each index are given. Then, the analytic hierarchy process and coefficient of variation are used to determine the subjective and objective weights of evaluation indexes, and the combination weighting method based on the game theory is used to obtain the comprehensive weights. On this basis, the subjective scoring method is used to score the test results of vehicles to be evaluated. At last, the comprehensive scores are obtained by weighted calculation with the comprehensive weight, which are further rated. The calculation result of an example shows that the comprehensive weight combining the subjective and objective weights overcomes the limitation of calculating the weight by only one single method and makes the evaluation results more objective and accurate, thus verifying the scientific nature and rationality of the evaluation system and method.

Keywords: Fuel cell bus; powertrain; combination weighting method; comprehensive performance evaluation; game theory

收稿日期：2023-06-27；**修回日期**：2023-08-12；**录用日期**：2023-08-23；**网络首发日期**：2023-10-25
基金项目：四川省科技计划资助项目(2023YFG0067，2022YFG0092，2023YFG0068)
This work is supported by the Science & Technology Project of Sichuan Province under the grants 2023YFG0067, 2022YFG0092 and 2023YFG0068

动力总成作为汽车的重要组成部分，包含了车辆上产生动力并将动力传递到路面的一系列零部件[1]。其综合性能的优劣可从一定程度上直接反映出整车的性能，是汽车企业具有核心竞争价值的关键，也是市场和消费者关注的热点[2-3]。

目前，质子交换膜燃料电池 PEMFC(proton exchange membrane fuel cell)因具有能量转化效率高、噪声低及零排放等优点被越来越多的应用在汽车领域[4-6]，特别是在客车和卡车等商用车领域具有较大的应用潜力，国内已进行了大量示范应用[7]。完善的燃料电池客车测试评价技术体系是燃料电池客车大量推广应用的重要保障，动力总成作为燃料电池客车的核心部件，对其性能的评价方法研究具有重要的工程意义。目前，燃料电池客车普遍以混合动力的形式出现，从而解决了只使用燃料电池作为动力源时存在的响应速度慢、频繁变载工况严重影响燃料电池寿命等问题[8-10]。所以，针对燃料电池客车动力总成的性能评价要面向燃料电池和动力电池 2 个动力源。

近年来，国内外学者对车辆动力总成的综合性能评价已做了大量研究。Zhou 等[11]对插电式混合动力汽车动力总成设计方案的优化和综合评价进行了研究，通过基于全局最优控制理论，统筹优化燃油经济性、电能消耗和加速能力，采用权重因子组合方案得到动力总成综合性能的帕累托最优解及其相应的最优部件参数；倪计民等[12]建立了 1 种包含整车动力性、经济性和排放性能的动力总成综合性能评价体系，并将评价指标量纲进行归一化和加权平均得到评价值对综合性能进行评价；此外，Song 等[13]提出了 1 个对燃料电池汽车不同能量管理策略进行综合定量评价的综合评价体系，并分析了燃料电池汽车 2 个动力源的运行状态对燃料电池耐久性、燃料经济性的影响；Liu 等[14]在现有单一汽车性能指标的基础上提出具有明确物理含义的汽车性能综合评价新方案来定量评价汽车的综合性能，并使用过去 17 年的市场数据验证了方法的有效性。然而，上述文献对动力总成综合性能的评价侧重于动力性、经济性和排放性能等，评价方式主要适用于传统汽车和混合动力汽车。针对在耐久性、环境适应性和动态响应性能等方面有更高要求的燃料电池客车，现有动力总成性能测试和评价方法已不再适用。因此，有必要探索 1 种面向燃料电池客车的动力总成测试和评价方法，实现对动力总成性能更为全面的评价。

本文首先综合考虑动力总成整车性能和各子系统性能，构建 1 种燃料电池客车动力总成综合评价体系。然后，基于组合赋权法的思想分别采用层次分析法 AHP(analytic hierarchy process)和变异系数法 CV(coefficient of variation)求取主客观权重，再利用博弈论获得决策最优的综合权重。最后，由多位专业人员对各二级指标测试结果采用十分制主观打分法进行打分，并将打分平均值与获得的综合权重加权计算得到动力总成综合得分并进行评级，从而直观地体现其综合性能。

1 动力总成综合性能评价体系

目前针对动力总成性能的评价体系[12,14]主要从整车性能角度展开，而没有对动力总成子系统性能进行评价。通过借鉴文献[12]、文献[14-17]并考虑燃料电池客车运行工况和工作特点，从燃料电池客车动力总成整车层面和各子系统层面出发，综合考虑动力性、经济性、耐久性、环境适应性和动态响应性能等，并结合整车道路试验及台架试验方法，构建了燃料电池客车动力总成综合性能评价体系，其中包括准则层 7 个一级指标和子准则层 23 个二级指标，如图 1 所示。

将准则层指标分为 7 类，包括动力性、经济性、耐久性、NVH 性能、动力总成效率、动态性能和环境适应性。在传统的动力总成综合性能评价体系基础上引入了耐久性、环境适应性和动态性能等燃料电池客车更为关注的性能指标，并在子准则层中考虑了各子系统的性能评价，从而实现对燃料电池客车动力总成更为全面的性能评价。在该评价体系中，燃料电池系统包括燃料电池电堆及其辅助部件，电驱动总成包括驱动电机系统、主减速器及差

速器，动力电池系统包括动力电池及动力电池管理系统，驱动电机系统包括驱动电机及其控制系统。

随着燃料电池技术的不断发展和商业化进程的持续推进，燃料电池系统及燃料电池汽车的测试体系也在相应完善，但专门针对燃料电池客车的测试标准较为少见。因此，对子准则层中的各项指标的测试方法除了按照现行的燃料电池客车专用标准进行外，同时参考相应电动汽车通用测试的国家标准、行业标准和团体标准进行，各二级指标参考标准见表 1。

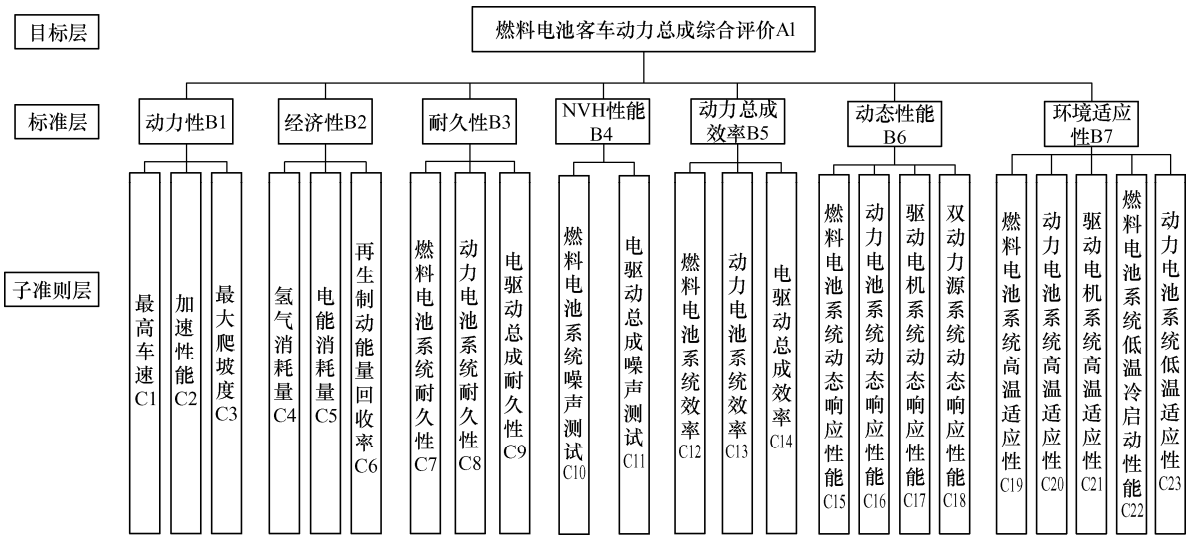


图 1　燃料电池客车动力总成综合性能评价体系

Fig. 1 Comprehensive performance evaluation system for powertrain of fuel cell bus

表 1　各二级指标参考标准

Tab. 1 Reference standard for each secondary index

指标	参考标准
C1	GB/T 26991《燃料电池电动汽车动力性能试验方法》
C2、C3	JT/T 1342—2020《燃料电池客车技术规范》
C4、C5	T/SCSAE 001—2022《燃料电池客车动力系统能量消耗量台架试验方法》
C6	T/CSAE 76—2018《纯电动汽车再生制动能量回收效能快速评价及试验方法》
C7	GB/T 38914—2020《车用质子交换膜燃料电池堆使用寿命测试评价方法》
C8	GB/T 31484—2015《电动汽车用动力蓄电池循环寿命要求及试验方法》
C9、C14	T/CSAE 143—2020《纯电动乘用车一体化电驱动总成测评规范》
C10、C12	GB/T 41134.2—2021《电驱动工业车辆用燃料电池发电系统 第 2 部分：性能试验方法》
C11	QC/T 1132—2020《电动汽车用电动动力系噪声测量方法》
C13、C16、C20、C23	GB/T 31467《电动汽车用锂离子动力电池包和系统电性能试验方法》
C15	GB/T 28183—2011《客车用燃料电池发电系统测试方法》
C17、C21	GB/T 18488《电动汽车用驱动电机系统》
C18	T/SCSAE 002—2022《燃料电池客车双动力源系统性能台架试验方法》
C19	GB/T 25319—2010《汽车用燃料电池发电系统 技术条件》
C22	GB/T 33979—2017《质子交换膜燃料电池发电系统低温特性测试方法》

2 基于博弈论-AHP-CV 的组合赋权法评价权重计算

本文选取 AHP 和 CV 分别计算主观权重和客观权重。考虑到单一方法求取权重进行综合性能评价存在局限性，故本文提出将基于博弈论的组合赋权法应用于燃料电池客车动力总成的综合评价，综合优化 2 种赋权方法求取的权重，兼顾了专家经验的主观性和实际测试数据的客观性，更大程度地发挥出 2 种方法的优点[16]。基于博弈论-AHP-CV 的组合赋权法评价权重的计算方法如下。

2.1 确定主观权重

AHP 是 1 种将复杂模糊问题分解为多个层次、多个指标从而进行决策的主观分析方法[17]。借助专家经验对两两指标之间的重要程度进行比较判断后建立判断矩阵，进而计算出相应的指标权重，权重的求取是将人的主观描述判断客观化、将人的思维过程数学化的过程。

(1)建立判断矩阵

由多个专家对指标进行评定打分，采用九级标度法记录得分并求取平均值构建判断矩阵 $\boldsymbol{A}=(a_{ij})_{n\times n}$，其中 a_{ij} 为指标 i 相比于指标 j 的重要程度，n 为评价指标数量。

(2)计算权重

①计算 n 阶判断矩阵中每行元素的乘积 M_i 为

$$M_i=\prod_{j=1}^{n}a_{ij}\quad i=1,2,\cdots,n \tag{1}$$

②计算 M_i 的 n 次方根 $\bar{M}_i$ 为

$$\bar{M}_i=\sqrt[n]{M_i}\quad i=1,2,\cdots,n \tag{2}$$

③归一化处理得到权重 α_i 为

$$\alpha_i=\frac{\bar{M}_i}{\sum_{i=1}^{n}\bar{M}_i}\quad i=1,2,\cdots,n \tag{3}$$

式中，α_i 为第 i 个指标的主观权重。

可得主观权重向量 $\boldsymbol{\alpha}$ 为

$$\boldsymbol{\alpha}=(\alpha_1,\alpha_2,\cdots,\alpha_n) \tag{4}$$

(3)一致性检验

①近似计算最大特征根 $\lambda_{\max}$ 为

$$\lambda_{\max}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{(\boldsymbol{A\alpha})_i}{\alpha_i} \tag{5}$$

式中，$(\boldsymbol{A\alpha})_i$ 为矩阵 $\boldsymbol{A}$ 与向量 $\boldsymbol{\alpha}$ 相乘得到列向量的第 i 个元素。

②利用最大特征根 $\lambda_{\max}$ 计算一致性指标 CI 和相对一致性指标 CR，然后进行一致性检验，具体为

$$\mathrm{CI}=\frac{\lambda_{\max}-n}{n-1} \tag{6}$$

$$\mathrm{CR}=\frac{\mathrm{CI}}{\mathrm{RI}} \tag{7}$$

式中，RI 为判断矩阵平均随机一致性指标。若 CR <0.1，则一致性检验通过；若 CR ≥0.1，则判断矩阵不满足一致性，需要重新赋值。

2.2 确定客观权重

CV 是 1 种用于衡量各评价指标数据变异程度的客观赋权统计方法[18]。运用变异系数法可以很大程度上避免主观因素的影响，直接根据数据的差异程度获取不同评价指标的客观信息权重。设待评价车辆的数量为 m，即整个待评价数据中有 m 个样本，则待评价车辆样本数据矩阵 $\boldsymbol{X}=(x_{pj})_{m\times n}$。

①计算指标数据的均值 $\bar{x}_j$ 和标准差 S_j 为

$$\bar{x}_j=\frac{1}{m}\sum_{p=1}^{m}x_{pj}\qquad j=1,2,\cdots,n \tag{8}$$

$$S_j=\sqrt{\frac{\sum_{p=1}^{m}(x_{pj}-\bar{x}_j)^2}{m-1}}\qquad j=1,2,\cdots,n \tag{9}$$

②计算各评价指标的变异系数 v_j 为

$$v_j=\frac{S_j}{\bar{x}_j}\qquad j=1,2,\cdots,n \tag{10}$$

③对 v_j 进行归一化处理，得到各指标客观权重 β_j 为

$$\beta_j=\frac{v_j}{\sum_{j=1}^{n}v_j}\qquad j=1,2,\cdots,n \tag{11}$$

可得客观权重向量 $\boldsymbol{\beta}$ 为

$$\boldsymbol{\beta}=(\beta_1,\beta_2,\cdots,\beta_n) \tag{12}$$

2.3 确定组合权重

博弈论属于运筹学范畴，主要运用决策思维来研究事物竞争时的相互作用，分析不同决策主体行

为相互影响时的理性行为及其决策均衡的问题[19-20]。在进行决策时，要求组合权重与各原始权重之间离差最小化，离差较大者产生妥协。基于博弈论的组合赋权法权重计算方法如下。

①使用 y(本文 y=2)种方法计算权重，把待博弈的权重向量构造基本权重集 $\boldsymbol{W}=\{\boldsymbol{w}_1,\boldsymbol{w}_2,\cdots,\boldsymbol{w}_y\}$，将这 y 个向量任意线性组合得到 1 个可能的权重集为

$$\boldsymbol{W}=\sum_{k=1}^{y}d_k\boldsymbol{w}_k^{\mathrm{T}}(d_k>0) \tag{13}$$

式中：d_k 为线性组合系数；$\boldsymbol{w}_k$ 为待博弈权重中的 1 种；$\boldsymbol{W}$ 为权重集中 1 种可能的组合权重向量。

②基于博弈论的离差最小化思想是寻找最优的线性组合系数 d_k^*，即寻找最优 $\boldsymbol{W}^*$，使得 $\boldsymbol{W}^*$ 与各个待博弈权重 $\boldsymbol{w}_k$ 之间的离差最小化，具体为

$$\min_{l\in\{1,2,\cdots,y\}}\left\|\sum_{k=1}^{y}d_k\boldsymbol{w}_k^{\mathrm{T}}-\boldsymbol{w}_l^{\mathrm{T}}\right\| \tag{14}$$

根据矩阵的微分性质可得式(14)的一阶导数为

$$\sum_{k=1}^{y}d_k\times\boldsymbol{w}_l\times\boldsymbol{w}_k^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{w}_l\times\boldsymbol{w}_l^{\mathrm{T}}\qquad l\in\{1,2,\cdots,y\} \tag{15}$$

将式(15)转化为线性方程组得

$$\begin{pmatrix}\boldsymbol{w}_1\times\boldsymbol{w}_1^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{w}_1\times\boldsymbol{w}_2^{\mathrm{T}} & \cdots & \boldsymbol{w}_1\times\boldsymbol{w}_y^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{w}_2\times\boldsymbol{w}_1^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{w}_2\times\boldsymbol{w}_2^{\mathrm{T}} & \cdots & \boldsymbol{w}_2\times\boldsymbol{w}_y^{\mathrm{T}}\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ \boldsymbol{w}_y\times\boldsymbol{w}_1^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{w}_y\times\boldsymbol{w}_2^{\mathrm{T}} & \cdots & \boldsymbol{w}_y\times\boldsymbol{w}_y^{\mathrm{T}}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}d_1\\ d_2\\ \vdots\\ d_y\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\boldsymbol{w}_1\times\boldsymbol{w}_1^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{w}_2\times\boldsymbol{w}_2^{\mathrm{T}}\\ \vdots\\ \boldsymbol{w}_y\times\boldsymbol{w}_y^{\mathrm{T}}\end{pmatrix} \tag{16}$$

③对式(16)求出的 $(d_1,d_2,\cdots,d_y)$ 进行归一化处理可得

$$d_k^*=\frac{d_k}{\sum_{k=1}^{y}d_k} \tag{17}$$

④得到博弈决策后的组合权重为

$$\boldsymbol{W}^*=\sum_{k=1}^{y}d_k^*\boldsymbol{w}_k^{\mathrm{T}} \tag{18}$$

3　综合评价得分及评级

3.1　主观评价打分方法

目前国内外关于汽车主观评价打分的方法包括 SAE 打分标准、日本打分方法、德国宝马打分方法、奥地利 AVL 李斯特内燃机及测试设备公司打分方法，本文采取 SAEJ 1441 打分标准的十分制主观打分法。

3.2　综合得分计算及评级

由多位专业人员对各二级指标测试结果采用十分制主观打分方法进行打分，并将打分平均值与获得的综合权重加权计算得到动力总成综合得分，具体的专业人员数量可根据实际情况进行选择，原则上不低于 5 位。基于计算所得的综合得分进行评级，对应的评级关系见表 2。

表 2　动力总成综合得分评级

Tab. 2 Comprehensive score rating of powertrain

评分	评级	问题描述
6 分以下	不合格	严重问题
6~7	合格	较大问题
7~8	中等	中等问题
8~9	良好	较小问题
9~10	优秀	没有问题

4　实例应用与分析

以 2 款不同型号待评价燃料电池城市客车为例，阐述本文所提方法的应用步骤与效果，各二级指标的测试数据主要由汽车厂商提供的检测报告给出。考虑到目前燃料电池汽车相关国家标准体系及要求尚未完善，针对部分暂没有第三方检测报告的数据，将以车辆运行及相关零部件试验数据为参考打分依据，部分测试数据见表 3。

表 3　待评价燃料电池城市客车部分数据

Tab. 3 Partial data of fuel cell city buses to be evaluated

部分参数	车辆 1	车辆 2
30 min 最高车速/(km·h^{-1})	68.2	63.5
0~50 km/h 加速时间/s	14.5	16.1
最大爬坡度/%	20	18
燃料电池电堆最大功率/kW	47.0	45.5
驱动电机额定/峰值功率/kW	90/200	90/150
动力电池容量/(kW·h)	90.2	69.1

4.1　组合权重计算

(1)基于层次分析法计算主观权重

以准则层 7 个一级指标动力性 B1、经济性 B2、耐久性 B3、NVH 性能 B4、动力总成效率 B5、动态性能 B6、环境适应性 B7 为例，将 5 位专家赋予的准则层标度求取平均值并取整构建准则层判断矩阵 $\boldsymbol{A}_1$ 为

$$\boldsymbol{A}_1=\begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 3 & 2 & 1 & 5 \\ 1 & 1 & 1 & 4 & 1 & 1 & 4 \\ 1/2 & 1 & 1 & 2 & 2 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/4 & 1/2 & 1 & 2 & 2 & 2 \\ 1/2 & 1 & 1/2 & 1/2 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1/2 & 1/2 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/4 & 1/2 & 1/2 & 1 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

根据 2.1 节所述层次分析法的步骤，经计算求得准则层主观权重为(0.236 4，0.195 7，0.160 6，0.112 6，0.108 1，0.126 4，0.060 2)。

以此类推，按相同的步骤可得到子准则层中各二级指标相对于准则层的主观权重为(0.400，0.400，0.200)、(0.493 4，0.310 8，0.195 8)、(0.428 6，0.428 6，0.142 9)、(0.666 7，0.333 3)、(0.493 4，0.310 8，0.195 8)、(0.291 1，0.244 8，0.291 1，0.173 1)、(0.222 2，0.222 2，0.222 2，0.111 1，0.222 2)。根据计算得到的准则层主观权重可以将子准则层中各二级指标相对于准则层的主观权重转化为各二级指标相对于目标层的主观权重，见表 4。

(2)基于变异系数法计算客观权重

将 2 款待评价车辆的各二级指标测试数据按照 2.2 节所述变异系数法的步骤进行计算，可得到 23 个二级指标的客观权重，见表 4。

(3)基于博弈论计算组合权重

将层次分析法和变异系数法求取的主客观权重运用博弈论的离差最小化思想进行线性组合获得决策最优的综合权重，见表 4。

4.2 主观打分法得分

根据前文所述的十分制主观打分方法，本文对 2 款待评价燃料电池城市客车的测试数据进行模拟打分，打分结果见表 4。

4.3 综合评价结果分析

按照 3.2 节所述的方法计算动力总成综合得分并进行评级，并将单独采用层次分析法和变异系数法时的最终得分和评级也列出，3 种权重评级结果见表 5。

表 4 不同赋权方法所得权重及待评价车辆主观打分法得分

Tab. 4 Weights obtained by different weighting methods, and scores obtained by subjective scoring method of vehicles to be evaluated

指标	AHP	CV	组合权重	车辆 1 得分	车辆 2 得分
C1	0.094 6	0.060 0	0.078 6	9.1	7.5
C2	0.094 6	0.075 7	0.085 9	8.6	7.6
C3	0.047 3	0.059 1	0.052 8	8.6	8.1
C4	0.096 6	0.034 4	0.067 8	9.2	8.6
C5	0.060 8	0.012 2	0.038 3	9.1	7.5
C6	0.038 3	0.026 5	0.032 8	8.6	8.1
C7	0.068 8	0.051 2	0.060 7	8.2	7.6
C8	0.068 8	0.012 3	0.042 7	9.1	8.9
C9	0.022 9	0.059 1	0.039 6	8.8	8.1
C10	0.075 1	0.027 1	0.052 9	7.8	8.8
C11	0.037 5	0.022 3	0.030 5	8.6	7.7
C12	0.053 3	0.030 7	0.042 8	8.7	8.5
C13	0.033 6	0.012 3	0.023 7	8.9	8.7
C14	0.021 2	0.013 3	0.017 5	8.1	8.5
C15	0.036 8	0.109 7	0.070 5	8.3	7.1
C16	0.030 9	0.085 3	0.056 1	8.8	7.2
C17	0.036 8	0.025 9	0.031 8	7.6	9.2
C18	0.021 9	0.070 7	0.044 5	8.3	6.9
C19	0.013 4	0.048 4	0.029 6	8.6	7.9
C20	0.013 4	0.044 1	0.027 6	8.3	7.7
C21	0.0134	0.033 4	0.022 7	8.5	7.8
C22	0.006 7	0.040 9	0.022 5	6.8	8.1
C23	0.013 4	0.045 2	0.028 1	7.7	7.3

表 5 综合评价得分及评级

Tab. 5 Comprehensive evaluation scores and ratings

车辆编号	AHP	CV	组合权重
车辆 1	8.63(良好)	8.48(良好)	8.56(良好)
车辆 2	7.76(中等)	8.06(良好)	7.92(中等)

由表 3 可知，本文实例应用中所选 2 款待评价燃料电池城市客车的动力系统参数相近，所表现出的动力性能也接近，若直接使用传统的动力总成综合性能评价体系，即只考虑动力性及经济性对其进行评价，那么 2 款客车的综合评价结果也将相近，

但 2 款车的动力总成主要差别在于选型不同，其子系统的性能存在差异。从综合性能指标方面来看，相比于车辆 2，车辆 1 所采用的动力总成的燃料电池系统动态响应性能、动力电池系统动态响应性能、环境适应性、燃料电池系统耐久性等指标更优；从综合评价结果来看，利用组合赋权法计算出 2 款车的综合评价得分为 8.56 和 7.92，表明车辆 1 动力总成性能为良好，车辆 2 为中等，评价结果符合预期。

由表 5 可知，车辆 1 的 3 种赋权方法的综合评级结果一致，均为良好，但车辆 2 仅有层次分析法与组合赋权法的评级结果一致，可以看出单独采用某一种赋权方法时的评价结果受主客观影响，评价结果会产生些许偏差。从单一权重相对于组合权重的得分偏差值来看，单独采用某一种赋权方法产生偏差的可能性是随机的，但基于博弈论的组合赋权方法可以在多数相近的结果与少数相异的结果之间寻求决策最优的平衡。因此，该方法是 1 种全面且综合的权重确定方法，适用于燃料电池客车动力总成综合性能评价体系。

此外，从 23 个二级指标组合权重来看，最高车速 C1、加速性能 C2、氢气消耗量 C4、燃料电池系统耐久性 C7、燃料电池系统动态响应性能 C15 及动力电池系统动态响应性能 C16 在综合性能评价中权重较大，其中属于燃料电池系统的性能指标有 3 项，属于动力电池系统的性能指标有 1 项，因此可以看出在燃料电池和动力电池 2 个动力源中，燃料电池系统的性能对动力总成综合性能影响更大。

5　结论

准确可靠的燃料电池客车测试评价体系是燃料电池客车大量推广应用的基础，针对目前燃料电池客车测试评价体系尚不完善的问题，本文提出了 1 种燃料电池客车动力总成综合性能评价方法。在传统的动力总成评价方法上引入耐久性、环境适应性和动态响应性能等燃料电池客车更为关注的性能指标，构建动力总成综合评价体系。运用基于博弈论的组合赋权法获取决策最优的组合权重，并最终与主观打分法加权计算得到综合评分。该方法面向动力总成整车层面及各子系统层面，符合燃料电池客车未来的测试评价体系发展趋势。

运用基于博弈论的组合赋权方法将主客观权重进行线性组合获得决策最优的综合权重，既保留了专家经验的主观性，又结合了实际数据的客观性，从而更大程度地发挥出 2 种方法的优点，使得到的权重更加合理有效。

在后续工作中，需要进一步补充和完善燃料电池客车动力总成综合评价体系。同时，随着测评体系的不断完善，二级指标的测试结果将更加规范化和透明化，为综合评价提供更准确的依据。此外，在基于博弈论的组合赋权法中，待博弈的赋权方法的种类越多，博弈组合的效果越好，评价结果越准确，因此未来可尝试结合更多赋权方法优化组合权重。

参考文献：

[1] 牛礼民, 杨洪源, 周亚洲, 等. 混合动力汽车动力总成多智能体集成控制策略[J]. 机械工程学报，2019, 55(12): 168-177, 188.
Niu Limin, Yang Hongyuan, Zhou Yazhou, et al. Hybrid electric vehicle integrated control strategy based on multi-agent [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(12): 168-177, 188. (in Chinese)

[2] Tran M K, Akinsanya M, Panchal S, et al. Design of a hybrid electric vehicle powertrain for performance optimization considering various powertrain components and configurations [J]. Vehicles, 2021, 3(1): 20-32.

[3] Nguyen C T, Walker P D, Zhang Nong, et al. Efficiency improvement of a novel dual motor powertrain for plug-in hybrid electric buses [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2020, 234(7): 1869-1882.

[4] 邵志刚, 衣宝廉. 氢能与燃料电池发展现状及展望[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(4): 469-477.
Shao Zhigang, Yi Baolian. Developing trend and present status of hydrogen energy and fuel cell development [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(4): 469-477. (in Chinese)

[5] Chen Xi, Long Shichun, He Lingxuan, et al. Performance evaluation on thermodynamics-economy-environment of PEMFC vehicle power system under dynamic condition [J]. Energy Conversion and Management, 2022, 269: 116082.

[6] 徐德鸿, 李海津, 李霄, 等. 燃料电池发电系统研究综述[J]. 电源学报, 2012, 10(6): 1-8.
Xu Dehong, Li Haijin, Li Xiao, et al. Review on the fuel cell power system [J]. Journal of Power Supply, 2012, 10(6): 1-8. (in Chinese)

[7] 王贺武, 欧阳明高, 李建秋, 等. 中国氢燃料电池汽车技术路线选择与实践进展[J]. 汽车安全与节能学报, 2022, 13(2): 211-224.
Wang Hewu, Ouyang Minggao, Li Jianqiu, et al. Hydrogen fuel cell vehicle technology roadmap and progress in China [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2022, 13(2): 211-224. (in Chinese)

[8] 徐鑫, 武小花, 杨佳珞, 等. 燃料电池客车模型预测控制能量管理策略[J]. 电源学报, 2025, 23(6): 309-319.
Xu Xin, Wu Xiaohua, Yang Jialuo, et al. Model predictive control-based energy management strategy for fuel cell buses [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(6): 309-319. (in Chinese)

[9] Fathabadi H. Combining a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) stack with a Li-ion battery to supply the power needs of a hybrid electric vehicle [J]. Renewable Energy, 2019, 130: 714-724.

[10] Hua T, Ahluwalia R, Eudy L, et al. Status of hydrogen fuel cell electric buses worldwide [J]. Journal of Power Sources, 2014, 269: 975-993.

[11] Zhou Xingyu, Qin Datong, Hu Jianjun. Multi-objective optimization design and performance evaluation for plug-in hybrid electric vehicle powertrains [J]. Applied Energy, 2017, 208: 1608-1625.

[12] 倪计民, 单炯毅, 叶淑英. 轻型车动力总成综合性能评价体系的构建[J]. 汽车技术, 2006(3): 30-34.
Ni Jimin, Shan Jiongyi, Ye Shuying. Construction of the evaluation system of the combined performance of the power train of light duty trucks [J]. Automobile Technology, 2006(3): 30-34. (in Chinese)

[13] Song Ke, Chen Huan, Wen Peimin, et al. A comprehensive evaluation framework to evaluate energy management strategies of fuel cell electric vehicles [J]. Electrochimica Acta, 2018, 292: 960-973.

[14] Liu Mengfei, Ouyang Xinyu, Lu Ruikai, et al. An evaluation method for automotive technical and comprehensive performance [J]. Automotive Innovation, 2023, 6(2): 231-243.

[15] Jiang Kang, Luo Ziqiang, Feng Zhongxiang, et al. Subjective evaluation of automobile power performance based on RA-AHP [J]. Cognition, Technology & Work, 2018, 20(3): 413-424.

[16] 张建, 夏烈, 徐亮辉, 等. 基于最小鉴别信息组合赋权法的光伏发电单元综合评价技术研究[J]. 电源学报, 2025, 23(5): 152-160.
Zhang Jian, Xia Lie, Xu Lianghui, et al. Research on comprehensive evaluation technology for photovoltaic power generation unit based on combined weighting method of minimum discriminant information [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 152-160. (in Chinese)

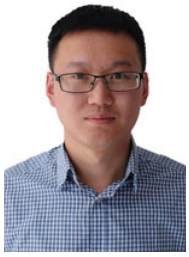
[17] Zhang Xinfeng, Ding Chen, Zhang Tong. A hierarchical model for automotive PEM fuel cell system comprehensive evaluation and comparison [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(3): 1476-1484.

[18] 樊东方, 罗凯, 靳志宏. 基于变异系数法的社会物流成本聚合指标构建[J]. 公路交通科技, 2023, 40(1): 245-251.
Fan Dongfang, Luo Kai, Jin Zhihong. Construction of social logistics cost aggregation indicator based on variation coefficient method [J]. Journal of Highway and

Transportation Research and Development, 2023, 40(1): 245-251. (in Chinese)

[19] 陆键, 刘禹杰, 马晓丽. 基于博弈论的危险品运输网络选线[J]. 中国公路学报, 2018, 31(4): 322-329.
Lu Jian, Liu Yujie, Ma Xiaoli. Game-theory-based hazardous materials transport network routing [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(4): 322-329. (in Chinese)

[20] Liu Tianyu, Deng Yong, Chan F. Evidential supplier selection based on DEMATEL and game theory [J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2018, 20(4): 1321-1333.



杨继斌

作者简介：

杨继斌(1989—)，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，副教授。研究方向：新能源车辆优化控制及测试评价。E-mail：yangjibin08@163.com。

何宗虎(1996—)，男，硕士研究生。研究方向：燃料电池技术。E-mail：1345959557@qq.com。

徐晓惠(1982—)，女，博士，教授。研究方向：复杂非线性系统的动态行为分析。E-mail：xhxu@163.com。

邓鹏毅(1972—)，男，硕士，副教授。研究方向：新能源汽车测试评价技术，汽车电子控制技术开发，新能源汽车动力及传动技术开发。E-mail：961499493@qq.com。

(责任编辑：孙美菊)



公益广告来源：杭州市公益广告宣传网