

机电复合传动关键部件和系统级性能 综合评估方法研究

徐保荣¹, 杜艺舟², 刘城^{2,3}, 万丽¹, 刘涛⁴

(1. 中国人民解放军 63966 部队, 北京 100081;

2. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081;

3. 北京理工大学 车辆传动重点实验室, 北京 100081;

4. 中国人民解放军 32381 部队, 北京 100072)

摘要: 动力传动系统的性能评估在陆上机动装备试验鉴定过程中具有重要意义; 机电复合传动系统所具有的多动力源协同工作、高效多模供电、结构复杂度和集成度高等特点决定了现有评估方法无法给出完善、充分的性能评估结果; 为充分满足对系统设计、匹配、控制、耐久性等系统指标及部件性能指标的验证与考核需求, 提出新的机电复合传动系统部件级性能评估方法; 基于机电复合传动装置的综合性能评价指标体系, 开展了机电复合传动装置的系统级、部件级性能评估方法研究, 通过综合赋权确定了指标的不同权重, 提出了发动机、电机等不同部件的评估方法, 并提出了层次分析法与模糊综合评估法相结合的系统级评估方法, 综合考虑了机电复合传动系统中各关键部件对系统性能的影响程度, 确定了指标体系中各项指标对表征系统性能的贡献度。

关键词: 机电复合; 指标体系; 标准化; 系统部件级; 评估方法

Research on Comprehensive Evaluation Method for Electromechanical Composite Transmission Key Components and System-level Performance

XU Baorong¹, DU Yizhou², LIU Cheng^{2,3}, WAN Li¹, LIU Tao⁴

(1. Unit 63966 of PLA, Beijing 100081, China;

2. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

3. National Key Laboratory of Vehicular Transmission, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

4. Unit 32381 of PLA, Beijing 100072, China)

Abstract: The performance evaluation of powertrain systems is of great significance in the process of equipment test and evaluation. Electromechanical composite transmission systems have the characteristics of multi-power source collaboration, efficient multi-mode power supply, high structural complexity, and integration. These characteristics determine that existing evaluation methods cannot provide perfect and sufficient performance evaluation results; In order to fully meet verification and assessment requirements such as system design, matching, control, durability, and other system indicators as well as component performance indicators, a new component level performance evaluation method for electromechanical composite transmission system is proposed. Based on a comprehensive index system for evaluating the overall performance of electromechanical composite transmission devices, It investigates the evaluation methods for both system-level and component-level performances of electromechanical composite transmission devices, different weights of each indicator are determined through comprehensive weighting techniques, evaluation methods are presented for various components such as engines and generators, and a system level evaluation method combining hierarchical analysis and fuzzy comprehensive evaluation is proposed. By considering the influences of key components in the electromechanical composite transmission system on the system performance, the contribution of various indicators in the indicator system on the system performance is determined.

Keywords: electromechanical composite; index system; standardization; system component level; evaluation method

0 引言

在新能源汽车产业发展^[1]的同时, 军用越野车辆也趋

向于多动力源和电气化的方向发展^[2], 车辆的电传动技术已进入成熟阶段^[3]。随着电武器、电装甲^[4]以及主动悬架等电气化装备的发展, 对动力传动系统的供电能力也提出了

收稿日期: 2024-03-12; 修回日期: 2024-03-20。

基金项目: 军队科研项目(LJ2017121)。

作者简介: 徐保荣(1980-), 男, 博士, 高级工程师。

通讯作者: 万丽(1979-), 女, 硕士, 工程师。

引用格式: 徐保荣, 杜艺舟, 刘城, 等. 机电复合传动关键部件和系统级性能综合评估方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(7): 315-321.

更高的要求。机电复合传动装置采用发动机—发电机组和电池两个能量源共同供能,能够调节发动机工作点,提高燃油经济性同时电池储能或者复合储能系统能够更快地对瞬时电能需求进行响应,提高系统响应速度^[5]。机电复合传动装置是新时代工程车辆和机械等的核心部件,也是新型车辆传动发展的趋势,如何对其性能进行考核,并构建机电复合传动系统性能评价指标体系,成为目前车辆动力传动研究的当务之急。因此,开展机电复合传动系统部件性能评估方法研究,能够提供论证依据、加快研制进度、强化定型验证,具备充实理论体系、拓宽工程实践领域的重要价值。

机电复合传动有别于液力机械综合传动和其他复合传动系统,除了发动机还增加了多个电机作为动力源。通过多动力源协同工作,实现车辆直驶、转向驱动,同时满足工程设备和其它车载用电设备的供电需求,满足整车机动性^[6]、燃油经济性^[7]等多方面要求。相比于传统机械式传动系统,机电复合传动系统不仅要控制转速、转矩,还需要对电流、电压进行控制。车辆实际运行工况复杂,在换挡、多动力源激励、路面负载等因素影响下,传动部件的电流、电压、转矩等工作参数可能出现剧烈变化,进而引发部件的工作状态超限甚至损坏问题^[8]。为充分满足在定型试验中对系统设计、匹配、控制、耐久性等关键技术指标的验证与考核,需要构建完善的机电复合传动系统试验评价体系^[9],并建立机电复合传动系统部件级和系统级的性能评估方法。

1 机电复合传动系统指标集构建

针对车辆和工程机械等预研阶段机电复合传动系统的评价工作至关重要。在此过程中不仅要得出系统的总体性能评价结果,还需深入分析各组成模块的具体性能表现。通过更为细致的评价能够明确哪些性能指标需要得到加强和改善,从而有针对性地提升系统的整体性能^[10]。对于机电复合传动系统的评价工作不仅包括总体性能评估,还需对各子系统进行详细的分析,如起动发电系统、动力电池系统以及机电复合传动装置等。此外,还应评估每个模块的具体性能指标,以全面了解其综合水平。通过这样的评价方式,可以更准确地指出改进方向,为系统的进一步优化提供有力支持。总之,对机电复合传动系统的评价工作应全面而深入,旨在提升系统的整体性能,并为后续的研发工作提供明确的指导。

因此应从部件级、系统级和整车级分层开展构建电传动系统的评价目标构建研究工作,构建的指标体系中整车级指标、系统级指标和部件级指标相互关联,构成机电复合系统综合评价指标体系。

针对机电复合传动系统试验评价体系,其构建流程如图 1,首先通过对部件级、系统级和整车级 3 个级别分别研究,构建完善的机电复合传动评价指标集。整个评价体系按照层次层、能力/性能层及指标层分别构建,体系中包含

可表征的量化指标及不可量化表征的功能指标,同时,将各指标分为设计指标以及性能指标,设计指标为产品设计过程中,因为总体技术指标要求、匹配要求等设定的指标,而性能指标则为产品设计完成后对其性能进行评价的指标,后续进行评估方法研究时,主要以性能指标为基础进行评判。

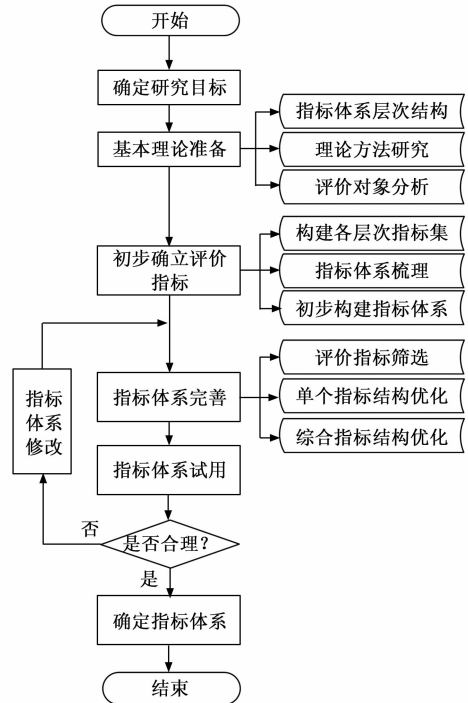


图 1 指标体系构建流程图

本文以机电复合传动系统中部件、系统为例,分别优化、筛选和构建其评价指标体系。针对机电复合传动系统加入电机、电池、电控后对系统特性,特别是电气安全、电磁兼容等造成较大影响,同时对机动性会有指标上较大的提升,并且衍生出传统装甲车辆传动系统所不具有的能量平衡特性及静音行驶特性^[11-15],据此,提出机电复合传动系统整车级试验评价体系如图 2 所示,其主要包含通用质量特性、机动性、电气系统性能、电磁兼容特性、能量平衡特性、静音行驶特性等部分^[16-20]。

2 评价指标筛选与结构优化

2.1 评价指标筛选

采用解释结构模型法,能够深入剖析指标之间的逻辑关系和层次结构,从而构建一个清晰、有条理的指标体系。通过系统分析法,可以全面考虑系统的整体性和协调性,确保构建的指标体系既全面又均衡。而纵向分解法则能够按照层级关系逐步细化指标,使得指标体系既具有宏观的战略导向,又不失微观的操作性。通过融合上述 3 种方法并借助数学方法进行指标筛选和优化,能够构建一个科学实用的多层次、多维度指标体系,指标耦合分析包括分析指标之间的相互依赖、相互制约关系^[21],以及它们之间的层次结构和逻辑关系。通过深入剖析这些关系,能够明确

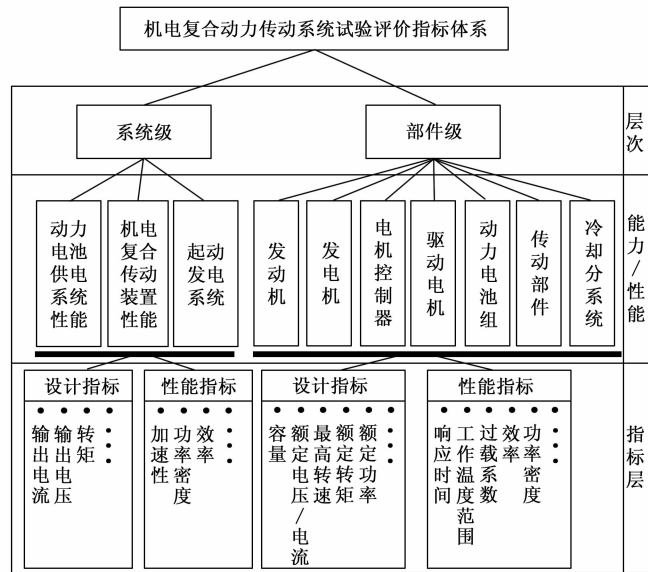


图 2 机电复合传动系统级、部件级试验评价指标体系

指标体系的内在逻辑和评估机制, 为后续的评估方法提供坚实的理论基础。

2.2 结构优化

在完成各层级初步评价指标体系的构建后, 进一步对每一层次进行了指标结构的优化工作^[22-23]。优化的核心在于确保指标的独立性与关联性之间的平衡。尽管通过系统分析法和解释结构模型法, 已经构建了一个相对全面的评价指标体系, 但在实际操作中发现, 某些单个指标体系内部仍存在不合理的结构问题。这些问题主要表现为指标间的相互关联过于紧密, 或者某些指标仍具备进一步分解的潜力。因此针对这些问题进行了细致的梳理和调整, 对每个指标体系分别进行结构优化, 以确保整个指标体系的科学性和实用性, 原则如下:

- 1) 逻辑清晰, 减少交叉重复, 防止重新引入耦合因素;
- 2) 为确保评估结果有效性, 优化前后对各指标的独立性进行分析判断;
- 3) 指标应分解彻底, 能够清晰描述特征参数, 无需进一步分解。

3 机电复合传动评估方法

3.1 机电复合传动部件级评估方法

部件级评估流程如图 3 所示, 首先对所有指标进行标准化处理, 随后即对部件性能层、指标层重要程度(即权重)进行计算。在构建指标体系时, 需要确定各评价指标的权重, 以量化它们对某一工程总体性能的影响程度。权重的大小反映了指标的重要性, 越重要的指标权重越大。为确保权重的合理性和有效性, 需进行归一化处理, 使所有权重值落在 0~1 的范围内。确定权重的方法多种多样, 包括主观赋权法、客观赋权法和综合赋权法。这些方法各有特点, 可根据具体工程需求和实际情况选择合适的方法来确定权重。确定指标权重是部件级评价中最关键的一步,

本报告中采用客观赋权和主观赋权相结合的方法进行综合赋权。

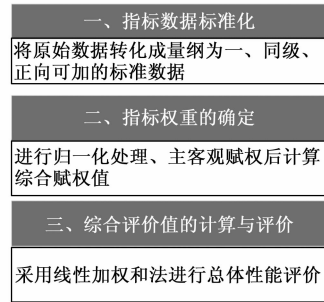


图 3 部件级评估流程

3.1.1 主观赋权法

主观赋权是基于专家或决策者的主观判断来确定各项指标的权重。其中, “环比比例评分法”是一种常用的评定方法。该方法通过以下 5 个步骤进行权重的推算。

1) 排序评价指标:

基于经验和专业知识, 将方案的各个评价指标进行有序排列。在此过程中, 最顶部的评价指标应被赋予最大的权重, 随着排序向下, 每个指标的权重应逐渐减小, 直至最底部的评价指标拥有最小的权重。

2) 确定环比基数 S_0 :

为了简化比较过程并建立一个统一的参照标准, 通常将环比基数 S_0 设定为 10。这个选择是基于数学和统计学的便利性, 使得后续的环比变化可以方便地通过百分比来表示。

3) 评定环比评分值 S_j :

对第二个评价指标与第一个评价指标进行比较, 基于经验和专业知识, 为其相对重要性分配一个环比评分值 S_j 。这个评分值 S_j 的范围是 0 到 10, 其中 10 表示两个指标同等重要, 而 0 则表示第二个指标相对于第一个指标来说微不足道。随后, 继续以相同的方式将下一个评价指标与上一个评价指标进行比较, 并为每个比较结果分配相应的环比评分值。确保评分次序始终由上至下, 以保持评价的一致性和连贯性。

4) 计算权重评分值 W'_{ij} :

最末评价指标的环比评分值直接作为其权重评分值。对于其他评价指标, 其权重评分值则通过以下公式计算得出:

$$W'_{ij} = W'_{i+1j} \cdot \frac{S_0}{S_{j+1}}$$

其中权重评分值计算按照从下至上的次序进行。

第五步, 进行归一化得到权重 W_{ij} 。

$$W_{ij} = \frac{W'_{ij}}{\sum_{j=1}^n W'_{ij}} \quad j = 1, 2, \dots, n$$

其中: n 为指标个数。

最终得到各指标的环比评价价值、权重评分值以及归一化后的权重值。

3.1.2 客观赋权

客观赋权基于各指标标准数据, 直接计算得出权重。

采用熵值法确定权重,该方法依据各方案间指标数据的差异程度来分配权重。数据差异越大,对应权重也越大,体现了不同方案间的差异程度对权重分配的影响。此赋权法凸显方案间差异,适用于方案间的对比评价^[24]。客观赋权过程分三步:

1) 将标准数据 u_{ij} 转化为比重值。

$$P_{ij} = \frac{u_{ij}}{\sum_{i=1}^m u_{ij}} \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$$

其中: m 为方案的个数。

2) 采用下式计算各指标对应熵值。

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} \quad j = 1, 2, \dots, n$$

式中, $k = \frac{1}{\ln m} \quad 0 < e_j < 1$ 。

3) 推算权重 W'_{2j} 及归一化权重值 W_{2j} 。

由上式可知,数据差异与 e_j 值成反比:差异越小, e_j 越大;差异越大, e_j 越小。另外,数据差异大则第 j 项指标对方案比较的作用显著,因此其权重应相应增大。权重与熵值相互补充,权重体现指标重要性,而熵值反映数据差异。即 $W'_{2j} = 1 - e_j$, 归一化得到:

$$W_{2j} = \frac{W'_{2j}}{\sum_{j=1}^n W'_{2j}} \quad j = 1, 2, \dots, n$$

对指标进行客观赋权后,得到的客观赋权评价指标权重。

3.1.3 综合赋权

主观赋权法概念明确、操作简便,但易受个人偏好影响;客观赋权法计算精确、结果客观,但权重可能随数据波动,缺乏稳定性。为平衡两者优缺点,综合赋权法应运而生。该方法结合主、客观赋权的结果,既考虑专家意见,又依赖数据分析,旨在确定更为合理、稳定的权重分配方案。设 W_{1j} 、 W_{2j} 分别为第 j 项指标主、客观赋权的权重,则综合赋权的权重可按下式计算:

$$W_j = \frac{W_{1j} W_{2j}}{\sum_{j=1}^n W_{1j} W_{2j}} \quad j = 1, 2, \dots, n$$

3.1.4 综合评价值的计算

确定指标权重并标准化指标数据后,采用线性加权和法计算系统总体性能的综合评价价值,以评估优劣,其计算方法如下。

$$E_i = \sum_{j=1}^n W_j u_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, m$$

3.2 机电复合传动系统级评估

模糊综合评估方法以模糊推理为核心机制,巧妙融合了定性分析与定量分析,不仅体现了精确性的要求,也兼顾了非确定性的处理,因此特别适合用于装甲车辆机电传动系统等涉及多因素、多层次复杂问题的系统评价。这种方法能够全面、准确地反映系统的整体性能,为决策提供科学、可靠的依据。在确定权重时,层次分析法通过构建两两比较矩阵,能够科学、合理地评估各要素的相对重要性。这

种方法不仅说服力强,而且易于理解和接受,因为它提供了一个清晰、透明的框架来量化不同要素之间的相对关系,从而确保权重分配的合理性和有效性^[25]。

因此,为使各因素组合后全面客观的反映系统性能,同时确保对各指标权重合理,采用模糊综合评估方法为主,层次分析法为辅的方法来定义指标权重。这种方法的优势在于能够充分结合两种分析方法,提供更为全面和准确的系统性能评价结果。从而提供更加准确、全面的评价结果。系统级评估流程如图 4 所示。

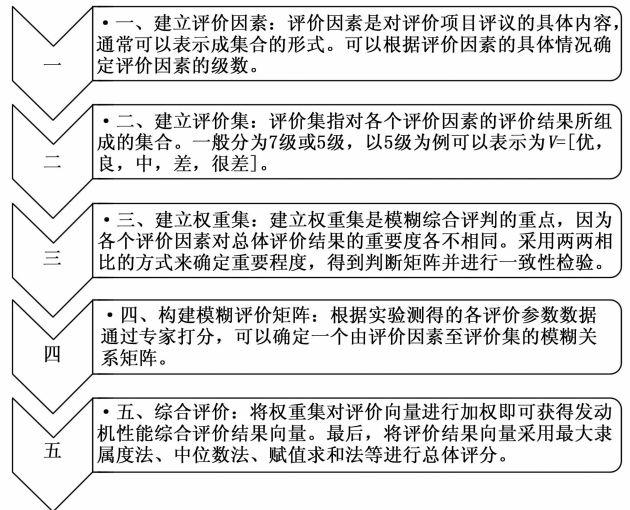


图 4 系统级评估流程

3.2.1 系统级评估方法

3.2.1.1 层次分析法及模糊综合评判法

1) 建立评价因素:

评价因素是对评价项目评议的具体内容,通常可以表示成集合的形式:

$$F = [F_1, F_2, \dots, F_n]$$

式中, n 表示评价因素的个数。

确定评价因素的级数可以记为:

$$F = [F_{i-1}, F_{i-2}, \dots, F_{i-m}]$$

式中, m 表示 2 级评价因素的个数。

2) 建立评价集:

确定评价因素后,把每个因素分成 5 个等级的评价集,评价集指对各个评价因素的评价结果所组成的集合,5 个等级则可以记为:

$$V = [\text{优}, \text{良}, \text{中}, \text{差}, \text{很差}]$$

总分定级时,取各级分数区间的中间值为等级参数,参数向量 $C = (c_1, c_2, c_3, c_4, c_5) = (95, 85, 75, 65, 30)$ 。

3) 建立各级因素评估矩阵:

在构建指标体系时,首先对指标进行分类。一类是客观评价指标,这些指标具备明确的量化标准,便于进行数值化衡量,如工作温度范围、最大充/放电电流、效率等;另一类是主观评价指标,这些指标难以直接量化,通常依赖于个人或群体的主观判断,如耐湿热能力、耐振能力等。这样的分类有助于更好地理解 and 处理不同类型的指标,为

后续的评价工作奠定坚实基础。

为将已有机电传动研究成果的指标参量数据应用于评价过程, 采用梯形隶属度函数进行数据量化。这种方法能够确保数据在评价过程中的准确性和有效性, 从而更好地反映机电传动系统的性能表现。通过梯形隶属度函数的运用, 可以将不同性质和量纲的指标参量数据进行统一处理, 使得评价结果更加客观、准确和可靠。该隶属度函数的表达式为:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x \notin (x_1, x_4) \\ (x - x_1)/(x - x_2), & x \in (x_1, x_2) \\ 1, & x \in (x_2, x_3) \\ (x_3 - x)/(x_3 - x_4), & x \in (x_3, x_4) \end{cases}$$

设定 5 个主观评价等价, 采用百分制, 隶属度函数的转折点如下:

表 8 各级隶属度函数的转折点

	隶属度函数的转折点
优	$f(89, 91, -, -)$
良	$f(79, 81, 89, 91)$
中	$f(69, 71, 79, 81)$
差	$f(59, 61, 69, 71)$
极差	$f(-, -, 59, 61)$

应用隶属度函数精确计算了各层指标的评价值, 并据此构建了相应的评价值数列, 为全面评估系统性能提供了有力数据支持。

3.2.1.2 建立权重矩阵

权重集的构建在模糊综合评判中占据核心地位, 因为它决定了不同评价因素对最终结果的影响程度。通过建立权重集, 能够精确地量化各因素的重要性, 确保在评判过程中充分考虑其相对作用, 从而得出更加准确、客观的综合评价结论, 并在评价过程中充分考虑其差异, 从而确保评价结果的客观性和准确性。因此, 权重集的建立对于模糊综合评判至关重要, 其提供了一个有效的工具来区分各因素的重要度, 并确保评价结果的全面性和公正性。

$$A_i = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$$

a_{ij} 为两个指标的相对重要度, 具体取值可以参考下表, 且 $a_{ij} = 1/a_{ji}$ 。

表 9 重要性标度含义表

含义	重要性标度
同等重要	1
前者稍重要	3
前者明显重要	5
前者强烈重要	7
前者极端重要	9
中间过渡值	2, 4, 6, 8

一致性检验条件: 求取判断矩阵 A 的最大特征值 λ_{max} 并代入下式中进行一致性检验:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}, CR = \frac{CI}{RI}$$

具体的 RI 值可通过查表得到:

表 10 RI 取值表

阶数	RI 值	阶数	RI 值
1	0	9	1.46
2	0	10	0.49
3	0.52	11	0.52
4	0.89	12	1.54
5	1.12	13	1.56
6	1.26	14	1.58
7	1.36	15	1.59
8	1.41		

3.2.1.3 综合评价

模糊综合评估在模型 $B = A \cdot R$ 中, 模糊算子的选择尤为关键。不同的模糊算子蕴含不同逻辑, 对同一问题的处理可能导致迥异的结论。为确保评估结果的精准与有效, 深入剖析了常用模糊算子的特性与局限。针对机电复合传动系统的特点, 需要一个既全面又精准的评估方法。经过比较选择了 $M(*, +)$ 模式进行模糊综合评判。这一模式不仅能够全面反映影响机电复合传动系统的诸多因素, 还能完整保留单因素评估的信息, 从而确保评估结果的全面性和准确性。此外, $M(*, +)$ 模式在处理具有互补性的因素时表现尤为出色, 其评估有效性得到了广泛认可。因此能够提供更为准确、可靠的评估结果, 为机电复合传动系统的优化改进提供有力支持。

最终, 由 $Q = B * CT$ 得出评估结果并进行分析。

3.2.2 动力电池供电系统评估

按性能层、指标层对动力电池供电系统进行分级评价, 其分级情况如图 5 所示。

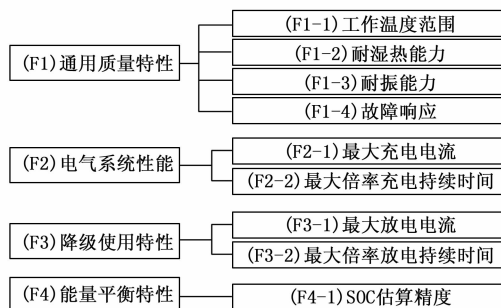


图 5 动力电池供电系统评价分级表

按 3.2.1 小节求出动力电池供电系统匹配合理性的总得分:

$$Q = [0.3704 \quad 0.2454 \quad 0.0818 \quad 0.1751 \quad 0.1266] \cdot \begin{bmatrix} 95 \\ 85 \\ 75 \\ 65 \\ 30 \end{bmatrix} = 77.3615$$

评价结果为中等。

3.2.3 起动发电系统评估

按性能层、指标层对起动发电系统进行分级评价，其分级情况图 6 所示。

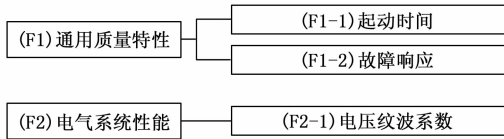


图 6 起动发电系统评价分级表

按 3.2.1 求出动力电池供电系统匹配合理性的总得分分为：

$$Q = [0 \quad 0.4 \quad 0.6 \quad 0 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} 95 \\ 85 \\ 75 \\ 65 \\ 30 \end{bmatrix} = 77$$

评价结果为中等。

3.2.4 机电复合传动装置评估

按性能层、指标层对机电复合传动装置进行分级评价，其分级情况如图 7 所示。

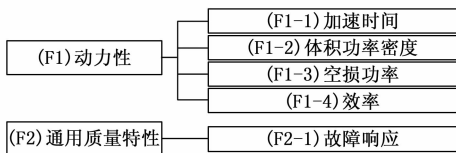


图 7 机电复合传动装置评价分级表

按 3.2.1 可求出动力电池供电系统匹配合理性的总得分分为：

$$Q = [0.0297 \quad 0.8447 \quad 0.0690 \quad 0.0568 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} 95 \\ 85 \\ 75 \\ 65 \\ 30 \end{bmatrix} = 83.488$$

评价结果为良。

4 试验结果及分析

4.1 动力电池组试验评估

4.1.1 试验原理

动力电池组测试试验方案中动力电池本体与电池管理系统、电子负载、电池充放电电机通过电气连接。动力电池供电系统主要由配电柜、动力电池组、电池管理系统、电子负载、动力电池测试柜、电池充放电电机、可编程高低温箱、测试与数据采集设备、数据采集与试验控制台以及其他辅助系统组成，如图 8 所示。

4.1.2 试验步骤

从动力电池组动力性和通用质量特性分析角度出发，以自放电率、充电效率、放电效率、质量功率密度、质量

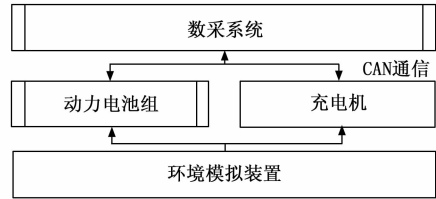


图 8 动力电池组试验台架方案

能量密度、循环寿命、工作温度范围、抗短路、抗过充过放、抗火烧能力、抗浸泡能力、抗挤压能力、抗冲击能力、抗针刺能力等表征参数作为切入点，对动力电池组的荷电保持特性、充放电特性、可靠性、环境适应性、安全性等试验项目展开分析，并进行电池组荷电保持能力测试、电池组充电性能测试、电池组放电性能测试、电池组放电容量测试、电池组循环寿命试验、动力电池组耐高低温环境可靠性测试、电池组短路测试、电池组过充过放测试、电池组火烧测试、电池组浸泡测试、电池组挤压测试、电池组冲击测试、电池组针刺测试等试验方法的测试，从而对动力电池组关键部件进行全面的测试试验，如图 9 所示。

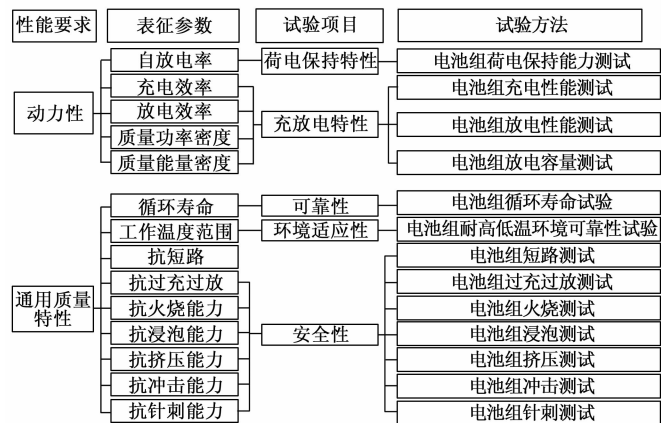


图 9 动力电池组试验步骤

4.1.3 试验结果分析

通过对动力电池组荷电保持能力试验、重返点性能试验、循环寿命试验、过充过放试验、耐高低温可靠性等试验结果进行分析，符合 3.2.2 中评价结果为中等的结论。

4.2 发电机试验评估

4.2.1 试验原理

交流发电机试验台由机械系统、测量控制系统、工业控制计算机及变频调速控制等组成。

机械系统由操作台、夹具、传动及升速等三部分组成。测控系统由控制柜、温度测量传感器、转速测量传感器、扭矩仪等组成。整个系统的检测与控制是由一台工业控制计算机利用数据采集卡来完成。发电机试验台架设计框图如图 10 所示。

4.2.2 试验步骤

从发电机动力性和通用质量特性分析角度出发，以质量功率密度、效率、工作温度范围、耐湿、耐盐雾和使用寿命等表征参数作为切入点，对发电机的稳态性能、环境

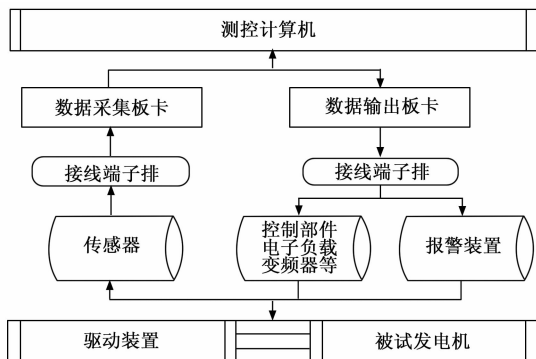


图 10 发电机试验台架方案

适应性和可靠性等试验项目展开分析, 并进行发电机性能试验、发电机效率试验、不同温度下发电机性能试验、不同湿度下发电机性能试验、发电机盐雾试验和发电机耐久性试验等试验方法的测试, 从而对发电机关重部件进行全面的试验测试, 如图 11 所示。

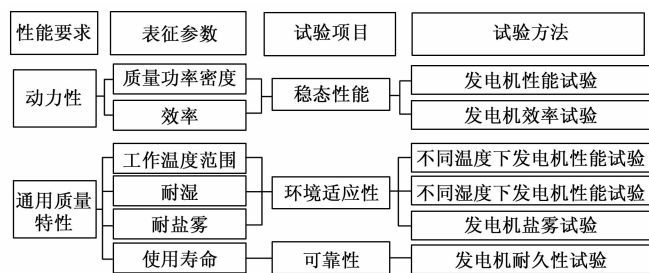


图 11 发电机试验步骤

4.2.3 试验结果分析

通过对发电机不同温/湿度下性能试验、不同温度下效率试验、盐雾试验、加速寿命试验结果进行分析, 符合 3.2.3 中评价结果为中等的结论。

5 结束语

针对采用机电复合传动装置的车辆, 本工作通过对其机电传动系统综合性能评价指标体系开展研究, 构建了两级机电复合传动系统的评价指标体系, 包括系统级、部件级。根据可测试性、可评价性及机电传动相关性等核心准则, 对指标进行了细致的筛选, 确保所选指标既符合评估要求, 又能有效反映机电传动的关键特性。考虑了指标的独立性和关联性, 分别对每个层次进行了指标结构优化, 对指标体系进行了综合优化, 最终构建了系统级、部件级评价指标体系。对综合评价指标体系进行了标准化处理, 确定了指标权重。运用基于层次分析的模糊综合评判法, 对系统级指标进行了全面评价, 该方法综合了层次分析与模糊理论的优点, 确保评价的准确性和科学性; 采用客观赋权和主观赋权相结合的方法进行了部件级指标的综合赋权。评价指标体系和综合评估方法的提出, 对完善军用越野车辆动力传动系统评价理论具有重要意义。

参考文献:

[1] 王芳, 邱彬. 2023 年新能源汽车发展形势研判 [J]. 智能

网联汽车, 2023 (2): 64-68.

[2] 项昌乐, 马越. 装甲车辆机电复合传动系统模式切换控制理论与方法 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2020.

[3] 孙逢春, 张承宁. 装甲车辆混合动力电传动技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.

[4] 茹永刚, 尹忠东, 张恺, 等. 电动汽车充电设备电气安全保护能力量化考核指标研究 [J]. 电气工程学报, 2017, 12(10): 25-30.

[5] 胡宇. 永磁同步电机测试研究综述 [J]. 内燃机与配件, 2018 (4): 62-63.

[6] 董学锋. 插电式混合动力乘用车主性能统计与分析评价 [J]. 汽车技术, 2018 (7): 1-4.

[7] 吕志梁. 插电式混合动力汽车能量管理研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.

[8] 杨君, 邱晓明, 徐正藻. 电动汽车动力电池组管理系统设计 [J]. 软件, 2011, 32(3): 54-56.

[9] 王伟, 王庆年, 初亮, 等. 混合动力汽车驱动电机性能评价体系研究 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 20-25.

[10] 解难, 孙龙, 王玉伟. 插电式混合动力汽车排放与能耗综合评价体系的构建 [J]. 重庆理工大学学报 (自然科学), 2017, 31(4): 34-39.

[11] 胡厉强. 轻型装甲车辆战场安全性评估 [D]. 太原: 中北大学, 2011.

[12] 韩羞, 韩志强, 窦守健. 装甲车辆环境适应性论证与试验决策支持系统的初步构想 [J]. 装备环境工程, 2004, 10(1): 64-67.

[13] 邱彬. 混合动力城市客车能量管理策略及节能评价研究 [D]. 北京, 清华大学, 2014.

[14] 何仁, 王宪英, 王若平. 混合动力传动系统匹配评价指标的探讨 [J]. 汽车技术, 2005 (1): 22-24.

[15] 杨茹, 冯超, 张耀伟, 等. 混合动力汽车的全生命周期评价 [J]. 新能源进展, 2014, 2(2): 151-156.

[16] 盖江涛, 张承宁, 李炯. 混合动力汽车电机驱动系统效率评价研究 [J]. 微电机, 2007 (4): 73-75.

[17] 杜波, 秦大同, 段志辉, 等. 混合动力汽车模式切换与 AMT 换挡品质评价方法 [J]. 汽车科技, 2014 (6): 6-13.

[18] 郭宽友, 游国平. 混合动力重型商用车能耗测试评价方法研究 [J]. 客车技术与研究, 2013, 35(3): 45-48.

[19] 李宇恒, 刘福胜, 刘永权. 新型装甲装备通用质量特性评价方法研究 [J]. 价值工程, 2016, 35(1): 228-231.

[20] 傅强, 魏平芬, 杨涛, 等. 锂离子电池组关键参数研究与性能评估 [J]. 船电技术, 2016, 36(2): 59-62.

[21] 李玉兰, 董素荣, 刘瑞林. 装甲车辆环境适应性研究体系 [J]. 装备环境工程, 2017, 14 (4): 82-86.

[22] 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.

[23] 中国机械工程学会. 中国机械工程技术路线图 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2016.

[24] 王伟. 车用永磁同步电机的参数匹配、协调控制与性能评价研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2010.

[25] 陈春良, 刘彦, 张雅卿. 基于 IGAHP—熵—博弈论—Choquet 积分的新型装甲装备通用质量特性评价模型研究 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (7): 2438-2442.