

混合动力汽车驱动电机性能评价体系研究*

王伟¹ 王庆年² 初亮² 董秀辉³

(1. 中国汽车技术研究中心,天津 300162; 2. 吉林大学汽车动态模拟国家重点实验室,长春 130025;
3. 中国第一汽车集团公司技术中心,长春 130011)

【摘要】 为了提高混合动力汽车驱动电机系统评价的准确性和客观性,保证驱动电机发挥出最优性能,分别从电机本体设计、电机控制性能和整车行驶循环工况 3 个层面列出 23 个评价指标,以驱动电机台架试验和整车计算机仿真平台为评价测试手段,采用多属性决策灰色关联度的评价方法,建立了驱动电机综合性能评价体系。实例证明了该评价体系的完整性和可操作性。

关键词: 混合动力汽车 驱动电机 评价体系 灰色关联度

中图分类号: U469. 7; N945. 16 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)08-0020-06

Evaluation Regime of Traction Motor for Hybrid Electric Vehicle

Wang Wei¹ Wang Qingnian² Chu Liang² Dong Xiuhui³

(1. China Automotive Technology and Research Center, Tianjin 300162, China

2. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China

3. R & D Center, First Automobile Workshop, Changchun 130011, China)

Abstract

In order to improve the accuracy and objectivity of the traction motor evaluation system of hybrid electric vehicle and make sure of the optimality performance for the motor, 23 evaluating indicators were listed according to the motor body design, performance of motor control and the driving cycle of vehicle. The traction motor performance evaluate system was established with the grey relation degree approach to multiple attribute decision making as evaluation method, and the motor bench test and computer simulation platform as instrument. At last, taking traction motors of hybrid electric bus of FAW as an example, the evaluation system was demonstrated. The results proved that the performance of motor could be determined by the evaluation system.

Key words Hybrid electric vehicle, Traction motor, Evaluation system, Gray relation degree

引言

随着车用驱动电机研发水平逐步提高以及混合动力汽车向产业化发展,车用驱动电机与整车综合性能的匹配和评价成为亟需解决的难点之一。长期以来,车用驱动电机性能评价和考核往往脱离整车,仅仅依靠驱动电机的台架试验进行测试。同时整车驱动电机系统的评价指标受很多因素的影响,较难保证评价的准确性和客观性。因此,有必要建立一个较为完善的驱动电机综合性能评价体系来实现整

车零部件模块化对整车系统集成的评价,为电动汽车设计方案的确提供理论基础^[1-2]。

本文根据各种车用驱动电机的基本特性,分别从电机本体设计、电机控制性能、整车行驶工况 3 个方面提出了 23 个评价指标。在确定评价指标的基础上,采用多属性决策灰色关联度的综合评价方法,建立车用驱动电机系统的综合评价体系。

1 驱动电机评价流程

根据各种类型驱动电机基本性能和混合动力汽

收稿日期: 2010-08-24 修回日期: 2010-11-19

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2006AA11A184)

作者简介: 王伟,工程师,主要从事混合动力汽车驱动电机及整车控制技术研究,E-mail: wangwei5603@sina.com

通讯作者: 王庆年,教授,博士生导师,主要从事混合动力汽车驱动理论及控制技术研究,E-mail: wqn@jlu.edu.cn

车工作模式要求,提出驱动电机系统“三横两纵”评价指标体系框架,如图 1 所示。“三横”主要指电机本体、电机控制器和整车行驶循环工况的项指标和类指标。“两纵”主要指驱动电机台架测试和计算

机仿真平台,是驱动电机系统评价的测试手段。台架试验主要测试驱动电机系统的固有性能,车辆行驶循环工况中的仿真主要是考查驱动电机在行驶工况中的运行效能。

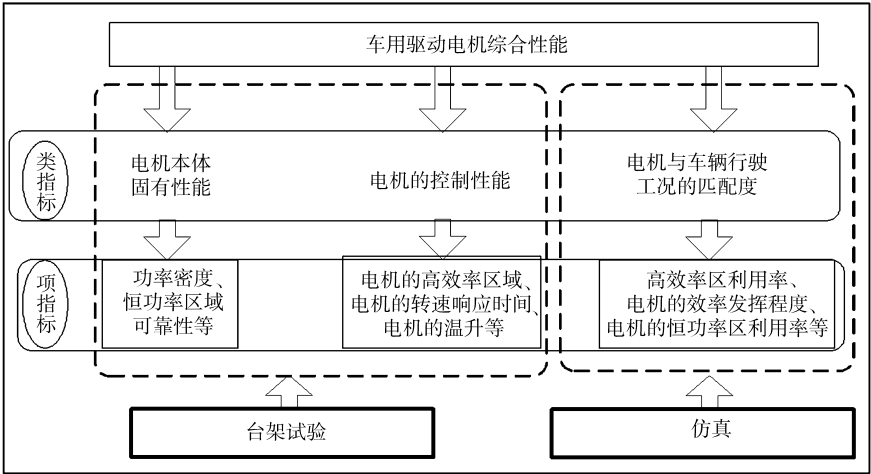


图 1 驱动电机评价体系框图

Fig. 1 Evaluation flow chart for traction motor

2 驱动电机性能评价指标

车用驱动电机主要类型包括:交流感应电机、开关磁阻电机、无刷直流电机、永磁同步电机。每种类型的驱动电机都有特有的结构设计和控制算法,同时不同结构形式的混合动力汽车选择的驱动电机类型也不相同。因此,结合不同类型车用驱动电机系统和车辆行驶工况的基本特点,提出 3 种类型的评价指标。

2.1 电机本体设计指标

为了反映出各种车用驱动电机的本体设计特性的差异,选用电机本体的功率密度、外形尺寸、质量、过载能力、功率因数、恒功率区域、转速范围、控制操作性、成本 10 个指标作为评价指标,各种类型电机本体的性能如表 1 所示^[3-5]。

2.2 电机控制性能指标

驱动电机的控制性能分为静态性能和动态性能,决定驱动电机静态性能的指标为:高效率区域、最高效率、转矩控制精度、转速稳定性、转矩外特性曲线(堵转转矩)、温升;决定驱动电机动态性能的指标为:转矩响应时间、转速响应时间、转速超调量。

2.3 结合车辆行驶循环工况的运行效能指标

驱动电机固有特性中,高效率区域占整个电机全部转速转矩工作范围只是一个关于效率范围的评价,不能很好地反映利用情况。在对高效率区考核的基础上提出“电机系统效率区间利用率”评价指标 $\eta_{mc_eff_i}$,即设定效率区间范围内,电机及其控制器在效率区间的工作点数量与电机全部工作点数量的

比值,即

$$\eta_{mc_eff_i} = \frac{N_{mc_i}}{N_{mc}} \quad (1)$$

式中 N_{mc_i} ——电机工作点落于某设定效率区间内的个数

N_{mc} ——电机的总工作点个数

表 1 各种类型驱动电机的性能

Tab. 1 Performance of different traction motors

参数	直流电机	感应式电机	永磁式电机	开关磁阻电机
功率密度	低	中	高	较高
过载能力/%	200	300 ~ 500	300	300 ~ 500
功率因数/%		82 ~ 85	90 ~ 93	60 ~ 65
恒功率区域		1:5	1:2.25	1:3
转速范围/r·min ⁻¹	4 000 ~ 6 000	12 000 ~ 20 000	4 000 ~ 10 000	> 15 000
可靠性	一般	好	优良	好
外形尺寸	大	中	小	小
电机质量	重	中	轻	轻
控制操作性	最好	好	好	好
控制器成本	低	高	高	一般

在效率区间利用率概念的基础上,提出了“电机效率发挥程度”评价指标^[5]

$$D_{m_mc} = \sum_i \frac{\bar{\eta}_{mc_i} \eta_{mc_eff_i}}{\eta_{mc_c}} \quad (2)$$

式中 $\bar{\eta}_{mc_i}$ ——电机在第 i 个效率区间的伪加权效率,如表 2 所示

η_{mc_c} ——电机最高效率参考值

驱动电机转矩和功率在车辆行驶工况中,并不是一直工作在额定转矩以下,每个工况都有部分工作点落入电机过载区间。因此确定电机过载区间利用率 $\eta_{N_load_i}$ 作为电机在额定转矩以上的工作点分布的一个指标,具体表达式为

$$\eta_{N_load_i} = \frac{N_{overload_i}}{N_{mc}}$$

(3)

式中 $N_{overload_i}$ ——电机在过载区间工作点个数

表 2 电机效率区间及其加权效率

Tab. 2 Motor efficiency region and weight efficiency			
效率区间	伪加权效率	效率区间	伪加权效率
>0.9	电机的最高效率	0.7~0.8	0.75
0.8~0.9	0.9	<0.7	0.175

恒功率区间是电机设计的一个关键点,区间的大小决定了电机弱磁控制的难易程度。在车辆行驶工况中,电机在恒功率区间实际工作点的个数与电机全部工作点的比值为电机恒功率区间的利用率 η_{ω_i} ,具体表达式为

$$\eta_{\omega_i} = \frac{v_{\omega_i}}{N_{mc}}$$

(4)

式中 v_{ω_i} ——电机在恒功率区间工作点个数

3 多属性决策灰色关联度评价方法

驱动电机的综合性能受到各种因素的影响,因素涉及面很宽,而且各因素之间存在层次关系。这些因素的评价与综合通常应用以经典集合论为基础的数学方法进行描述,但是因为方法本身固有的局限性,并不适合于工程应用。多属性决策灰色关联分析是一种多因素统计的分析方法^[6],它以各因素的样本数据为依据,用灰色关联度来描述各因素间的关系强弱、大小和次序。如果样本数据反映出两因素的变化态势基本一致,则它们之间的关联度较大;反之,关联度较小。与传统的评价方法相比,此方法对数据要求较低且计算量小,便于广泛应用。因此,本文采用多属性决策灰色关联度算法把各种类型因素综合加以评价。评价算法一般按照下列步骤:

(1)确定决策矩阵,对数据进行规范化处理

属性值有多种类型。有些指标的属性值越大越好,如电机的效率、电机的控制精度等是效益型;有些指标的值越小越好,如电机的成本、电机的温升等,称作成本型。为了便于对属性指标进行必要的数学处理,普遍采用两极比例方法将定性语言类属性指标转换为定量指标,如电机的可靠性、电机的操作便利性等。最后对电机的数据进行统一无量纲变

化,进行标准 0-1 变换,建立决策矩阵

$$D = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1j} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{i1} & \cdots & r_{ij} \end{bmatrix}$$

(5)

(2)确定最优样本

根据灰色关联度原理构造最优样本

$$R_0 = (r_{01}, r_{02}, \cdots, r_{0j})$$

(6)

其中

$$r_{0j} = \max_{1 \leq m \leq i} \{ r_{mj} \} \quad (n = 1, 2, \cdots, j)$$

(7)

(3)确定绝对差值矩阵

样本 R_i 与最优样本 R_0 的绝对差值矩阵元素

$$\Delta_{ij} = |r_{ij} - r_{0j}|$$

(8)

(4)确定关联系数矩阵

样本 R_i 与最优样本 R_0 的关联系数矩阵

$$\xi_{ij} = \frac{\min_i \min_j \Delta_{ij} + \rho \max_i \max_j \Delta_{ij}}{\Delta_{ij} + \rho \max_i \max_j \Delta_{ij}}$$

(9)

式中 ρ ——分辨系数,一般取 0.5

(5)层次分析法确定权重,构造判断矩阵

任何系统分析都以一定的信息为基础,层次分析法的信息基础主要是每一层次中各因素所占的比重并不一定相同,在决策者的心目中,它们各占有一定的比例。图 2 为驱动电机系统结合车辆行驶工况的各项指标综合分析模型。根据判断矩阵的标度以及一致性检验,可求出各指标的权重,如表 3~8 所示,各层的一致性比例均小于 0.1,各层判断矩阵的一致性满足要求。

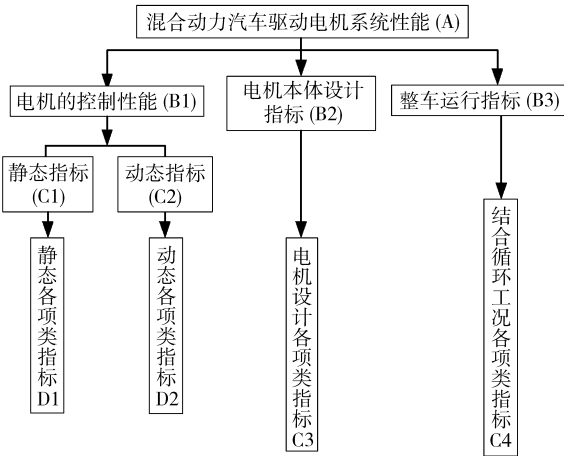


图 2 电机决策方案的层次结构和分析模型

Fig. 2 Decision scheme hierarchical structure and analysis model for motor

(6)确定关联度大小

确定了方案各指标的权重和决策矩阵以及最优样本之后,关联度 I_i 表达式为

$$I_i = \sum_{n=1}^j w_n \varepsilon_{in}$$

(10)

式中 w_n ——指标 r_j 的归一化权重

表 3 A-B 层各评价指标权重

Tab.3 Evaluation indicators weight for A-B					
	B1	B2	B3	权重 W_A	一致性比例
B1	1	2	3	0.539 6	0.007
B2	1/2	1	1/2	0.297 0	
B3	1/3	1/2	1	0.163 4	

表 4 B1-C 层各评价指标权重

Tab.4 Evaluation indicators weight for B1-C				
	C11	C12	权重 W_{B1}	一致性比例
C11	1	1	0.5	0
C12	1	1	0.5	

表 5 B2-C 层各评价指标权重

Tab.5 Evaluation indicators weight for B2-C												
	C21	C22	C23	C24	C25	C26	C27	C28	C29	C210	权重 W_{B2}	一致性比例
C21	1	1	1	1/3	1	1/3	1/2	1/2	1/3	1/3	0.046	0.052 5
C22	1	1	1	1/3	1	1/3	1/2	1/2	1/3	1/3	0.046	
C23	1	1	1	1	1	1/3	1/2	1/2	1/3	1/3	0.051	
C24	3	3	3	1	1	1	1	1/3	1/3	1/3	0.086	
C25	1	1	1	1/3	1	1/3	1/2	1/2	1/3	1/3	0.046	
C26	3	3	3	1	3	1	3	1/3	1/3	1/3	0.109	
C27	2	2	2	1	2	1/3	1	1/2	1/3	1/3	0.072	
C28	2	2	2	3	2	3	2	1	1/3	1/3	0.128	
C29	3	3	3	3	3	3	3	3	1	2	0.221	
C210	3	3	3	3	3	3	3	3	1/2	1	0.192	

表 6 B3-C 层各评价指标权重

Tab.6 Evaluation indicators weight for B3-C						
	C31	C32	C33	C34	权重 W_{B3}	一致性比例
C31	1	2	3	3	0.444 1	0.022
C32	1/2	1	3	3	0.312 4	
C33	1/3	1/3	1	1	0.122 4	
C34	1/3	1/3	1	1	0.122 4	

表 8 C-D2 层各评价指标权重

Tab.8 Evaluation indicators weight for C – D2					
	D21	D22	D23	权重 W_{D2}	一致性比例
D21	1	5	4	0.687	0.08
D22	1/5	1	2	0.187	
D23	1/4	1/2	1	0.127	

表 7 C-D1 层各评价指标权重

Tab.7 Evaluation indicators weight for C-D1								
	D11	D12	D13	D14	D15	D16	权重 W_{D1}	一致性比例
D11	1	7	1/3	1/3	1/3	1/3	0.090	0.07
D12	1/7	1	1/5	1/5	1/7	1/5	0.030	
D13	3	5	1	1	1/3	2	0.189	
D14	3	5	1	1	1/3	2	0.189	
D15	3	7	3	3	1	2	0.352	
D16	3	5	1/2	1/2	1/2	1	0.146	

代入各个方案具体数值,可以计算出每台电机的性能综合评定数值。

(7) 依据关联度,确定最终的综合性能

关联度 I_i 越大,说明 R 与最优指标 R^* 越接近,变化的趋势越一致。即第 i 个被评价对象优于其他

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0.545 & 0.5 & 0.5 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0.43 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 1 & 0.74 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0.145 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0.5 & 0 & 1 & 0.5 & 0.75 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0.884 & 0 & 0.167 & 0 & 0.163 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0.2 & 0.2 & 0 & 0.48 & 0.326 & 0.15 & 0 \\ 0.518 & 0.88 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0.63 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

继而确定最优方案的样本

$$A_0 = (1, 1)$$

被评价对象,据此可以排出各被评价对象的优劣次序。

4 应用

以一汽混合动力客车 CHEV6110 选用的 A、B、C、D 4 台电机为例,A 电机为甲厂商生产的感应电机,B 电机为乙厂商生产的永磁同步电机,C 电机为丙厂商生产的开关磁阻电机,D 电机为丁厂商生产的感应电机。结合 4 台驱动电机台架试验数据和整车在北京循环工况中的仿真结果,如表 9 所示,运用多属性决策灰色关联度的评价体系对选用的驱动电机进行综合评价。

根据评价体系中驱动电机的样本数量,构成了 4 方案 23 个属性的多属性决策问题。依据提出的评价流程确定决策矩阵

根据式(8)推导出绝对差值矩阵

$$\Delta = \begin{bmatrix} 1 & 0.455 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0.57 & 0.8 & 0.8 & 0.8 & 0 & 0.26 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.855 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.5 & 1 & 0 & 0.5 & 0.25 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0.116 & 1 & 0.833 & 1 & 0.837 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0.8 & 0.8 & 1 & 0.52 & 0.674 & 0.85 & 1 \\ 0.482 & 0.12 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0.5 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0.37 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

分辨系数取 0.5,根据式(9)确定关联系数矩阵

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} 0.33 & 0.52 & 0.5 & 0.5 & 1 & 1 & 0.33 & 1 & 0.47 & 0.38 & 0.38 & 0.38 & 1 & 0.66 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0.37 & 0.33 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0.33 & 0.5 & 0.33 & 1 & 0.5 & 0.67 & 0.33 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0.33 & 1 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 1 & 1 & 0.33 & 0.33 \\ 0.81 & 0.33 & 0.37 & 0.33 & 0.37 & 1 & 1 & 0.33 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0.33 & 0.33 & 1 & 0.38 & 0.33 & 0.33 & 0.49 & 0.43 & 0.37 & 0.33 \\ 0.51 & 0.81 & 1 & 1 & 0.33 & 1 & 0.33 & 0.5 & 0.33 & 0.33 & 0.33 & 0.33 & 1 & 0.57 & 0.33 & 1 & 0.33 & 0.33 & 0.33 & 0.33 & 0.33 & 0.33 & 0.33 \end{bmatrix}$$

表 9 测试电机的评价指标

Tab.9 Evaluation indicators for tested motor

项目	类指标	具体指标	A	B	C	D
电机的控制性能	静态指标	电机高效率区域/% (>85%)	70.0	85.5	80.0	63.5
		电机最高效率/%	95.0	97.5	92.0	96.0
		转矩控制精度 * /%	5	2	3	8
		转速稳定性 * /r·min ⁻¹	3	3	2	4
		转矩外特性曲线/N·m	269	240	243	240
		电机温升/℃	正常(9)	正常(9)	正常(9)	正常(9)
	动态指标	转矩响应时间 * /ms	40	35	30	40
		转速响应时间 * /ms	50	55	70	60
		转速超调量/r·min ⁻¹	25	35	12	35
电机的本体性能	设计指标	转矩密度	中(7)	高(9)	高(9)	中(6.5)
		功率密度	中(7)	小(9)	小(9)	中(6.5)
		质量	中(7)	轻(9)	轻(9)	中(6.5)
		过载能力/%	3	3	3	3
		功率因数/%	85	92	65	82
		恒功率区域	1.875	1.67	1.67	1.67
		转速范围/r·min ⁻¹	0~6 000	0~6 000	0~6 000	0~6 000
		控制操作性	最好(9)	好(7)	较好(6)	差(5)
		可靠性	最好(9)	好(7)	较好(6)	差(5)
		成本	很高(1)	高(3)	平均(5)	平均(5)
整车运行性能	结合循环工况(北京)	电机效率发挥程度/%	50.46	52.98	51.23	50.03
		电机效率利用率/% (>85%)	30.06	34.20	32.85	30.85
		过载区间利用率/%	20.67	18.12	18.50	18.12
		恒功率区间利用率/%	37.70	21.47	21.47	21.47

* 电机工作在额定转速或者额定转矩状态下的测试值

计算 4 台驱动电机相对于最优样本的关联度：
 $I_A=0.676, I_B=0.616, I_C=0.605, I_D=0.479$ 。

关联度越大,说明方案越接近于最优方案。因此各电机方案排序为: $I_A>I_B>I_C>I_D$ 。

对比综合评价方案中关联度的大小,A 电机综合性能优于 B 电机。虽然 B 电机高效率区和控制精度等指标要好于 A 电机,但是其可靠性和可控性方面会低于 A 电机。在综合评价框架中,B 电机效

率方面的优势被其可控性和成本等因素所抵消。由此分析,B 电机如果在产品的可靠性和成熟性方面有所提高,其综合性能会优于 A 电机。相对而言,C 电机和 D 电机各方面性能与 A、B 两电机相比,性能较差。但是对于开关磁阻电机 C 来说,其控制性能指标良好,如果技术可靠,产品的成熟度提高之后,使用普及前景还是很大的。由以上分析可知,建立的评价体系可以应用于混合动力汽车各种驱动电机

的综合性能评价,具有良好的分辨性。

为了评价同一电机在不同城市循环工况中的综合性能,以 B 电机为例,在评价体系内选用北京、长春、上海 3 个车辆行驶循环工况进行分析。因为选用的是同一驱动电机,电机本体评价指标和控制性能指标大小都是相同的,评价过程与不同电机在同一车辆行驶循环工况相类似,在此不再赘述,仅给出计算结果。

表 10 为 CHEV6100 客车在不同的整车行驶循环工况中各评价指标的大小。结合文中评价体系的计算流程,可得 B 电机在 3 个车辆循环行驶工况中

表 10 B 电机在不同行驶循环工况的计算结果
Tab. 10 Simulation results for B motor in difference drive cycles %

循环工况	北京	长春	上海
电机效率发挥程度	52.98	56.55	53.51
电机效率利用率(>85%)	34.20	35.56	35.08
过载区间利用率	18.12	23.50	25.74
恒功率区间利用率	21.47	27.22	25.92

的相对关联度为:0.750、0.777、0.768。

由数据分析可知,B 电机在 3 个车辆行驶工况中电机高效率区利用率基本相同,但是考虑电机效率发挥程度之后,B 电机的高效率区域与长春车辆行驶循环工况更加匹配。此外,B 电机在长春工况与北京和上海工况相比,恒功率区和过载区间工作点相对较多,更好地发挥出了 B 电机应有的性能。因此,B 电机更适合运行在长春行驶循环工况。

5 结论

(1)提出的基于多属性决策灰色关联度评价方法一方面将评价框架中的指标都等效地归纳到综合性能评价体系中,另一方面根据设计理念采用加权系数的方式显示性能指标的重要性,为混合动力汽车驱动电机的选型、参数匹配提供了理论依据,缩短了混合动力汽车的开发周期。

(2)结合一汽混合动力客车 4 台电机的台架试验数据和仿真结果,验证了基于多属性决策灰色关联度驱动电机综合性能的评价方法的工程实用性。

参 考 文 献

1 [波]安东尼·所左曼诺夫斯基. 混合动力城市公交车系统设计[M]. 何洪文,译. 北京:北京理工大学出版社,2007.

2 Hall E,Ramamaurthy M S S, Balda J C. Optimum speed ratio of induction motor drivers for electric vehicle propulsion[C] // Proceedings of the 2001 Applied Power Eletrical Conference,2001(3):371~377.

3 许建国. 电机与拖动基础[M]. 北京:高等教育出版社,2004.

4 [美]列维 E. 多相电动机直接设计法[M]. 陈明德,童本正,译. 北京:机械工业出版社,1989.

5 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.

He Ren, Wang Xianying, Wang Ruoping. Discussion on evaluation indices for matching of hybrid power drive train[J]. Automobile Technology, 2005(1): 22~24. (in Chinese)

6 叶义成,柯丽华,黄德育. 系统综合评价技术及其应用[M]. 北京:冶金工业出版社,2006.

(上接第 19 页)

4 BastosG S, Ribeiro C H, Souza L E. Variable utility in multi-robot task allocation systems[C] // Proc. of the 5th Latin American Robotic Symposium. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2009: 179~183.

5 陈大伟. 大城市对外客运枢纽规划与设计理论研究[D]. 南京:东南大学,2007.

Chen Dawei. Study on planning and design theory for external passenger transport hub of metropolis [D]. Nanjing: Southeast University,2007. (in Chinese)

6 袁传义. 半主动悬架与电动助力转向系统自适应模糊集成控制及其优化设计[D]. 镇江:江苏大学,2007.

Yuan Chuanyi. Self-adaptive fuzzy integrated control and optimization design of vehicle semi-active suspension and electric power steering system [D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2007. (in Chinese)

7 姜长生,王从庆,魏海坤,等. 智能控制与应用[M]. 北京:科学出版社,2007:168~177.

8 Toshio Yoshimura, Yota Emoto. Steering and suspension system of a full car model using fuzzy reasoning and disturbance observers[J]. Intenational Journal of Vehicle Autonomous Systems, 2003,1(3/4):363~384.

9 刘伟,刘大维,陈焕明,等. 基于联合仿真的半主动悬架车辆行驶平顺性研究[J]. 农业机械学报,2009,40(6):16~22.

Liu Wei, Liu Dawei, Chen Huanming, et al. Ride comfort of MR-damper semi-active suspension systems based on co-simulations [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(6): 16~22. (in Chinese)