

基于悬架效用函数的车身姿态控制*

陈 龙 黄 晨 江浩斌 陈蓉蓉

(江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013)

【摘要】 为了研究悬架控制对车身运动姿态的影响,运用八板块假说对整车模型进行分析,提出了构造悬架效用函数的方法,并且给出了基于熵值法优化权值方法,设计出相应的 Simulink 控制器;以某车型为例建立整车多体动力学模型,进行了脉冲路面和蛇形道路下不同车速工况的 SIMPACK/Matlab 联合仿真,将基于悬架效用函数优化的模糊控制和现有其他控制方法的悬架减振效果进行了对比分析;理论分析和仿真试验证明,基于悬架效用函数优化的模糊控制是可行的,较好地改善了车辆的平顺性,并能有效抑制车身俯仰和侧倾运动。

关键词: 车辆 悬架 效用函数 姿态控制 联合仿真

中图分类号: U411 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)08-0015-05

Body Posture Control Based on Suspension Utility Function

Chen Long Huang Chen Jiang Haobin Chen Rongrong

(School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

In order to study the influence of body posture interdependency on suspension control, the model of full vehicle using eight schematic of vehicle plate was analyzed. An approach based on the suspension utility function and a weighted optimization algorithm based on entropy value was presented. A kind of control strategy used in Simulink was designed. Meantime, taking a certain vehicle as an example, a whole multi-body model of vehicle was built. The SIMPACK/Matlab co-simulation in different vehicle speeds under impulse road and snakelike road was tested respectively. Then, the effects of semi-active suspension with fuzzy logical of optimal suspension utility function and other controls were compared. Theoretical analysis and simulation experiment showed that semi-active suspension controlled with fuzzy logical of optimal suspension utility function was practicable. It could improve ride comfort and restrain pitch and roll motion.

Key words Vehicle, Suspension, Utility function, Posture control, Co-simulation

引言

近年来,国内外学者对悬架控制做了大量的研究,既有主动悬架也有半主动悬架。半主动悬架又包括电流变液、磁流变液和可调阻尼减振器等,采用了各种不同的控制算法(最优控制、鲁棒控制、自适应控制、模糊控制、神经网络控制等),效果不尽相同。

但是无论使用何种结构悬架和控制策略,都无

法解决理论上存在的不同自由度运动对车身姿态的影响。例如汽车在行驶的过程中有垂向运动,同时还会存在俯仰运动和侧倾运动。3种运动之间相互影响,造成车身扭转等。王祺明^[1]等考虑将其隔离开来再分别控制,但是隔离后控制最终集中作用在悬架上将会产生不同的效果。李以农^[2]等考虑到了这种效果,提出分层递阶的思想,但是没有将车身姿态进行深入分析,而是将复合运动作为一种特殊状态设计控制策略。本文针对以上问题,提出先隔

收稿日期: 2010-09-27 修回日期: 2010-11-22

* 国家自然科学基金资助项目(50875112)、江苏省自然科学基金资助项目(BK2010337)、江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CX10B_253Z)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(2009322711013)和江苏省高校自然科学研究重大项目(09KJA580001)

作者简介: 陈龙,教授,博士生导师,主要从事车辆动态性能研究,E-mail: chenlong@ujs.edu.cn

离、再控制、最后优化的思想,构造悬架效用函数作为新的优化目标并寻求最优解,设计出相应的模糊控制器。以某车型为例建立整车多体动力学模型,利用 SIMAT 联合仿真对控制效果和可行性进行验证。

1 理论分析

1.1 整车系统的运动分析

汽车行驶过程中不仅要考虑汽车的垂向运动,同时还要考虑俯仰运动和侧倾运动。根据八板块假说把整车的 3 个自由度运动分别隔离,垂直运动时将整车模型视为 4 个 1/4 车体模型,俯仰运动时视为前、后 2 个 1/2 车体模型,侧倾运动时视为左、右 2 个 1/2 车体模型(如图 1 所示)。对每个分块分别采用相应的控制逻辑进行独立控制,然后把抑制垂向运动、俯仰运动和侧倾运动的 3 个作用力叠加,就得到实现总体控制目标的各个主动减振器输出的阻尼力。

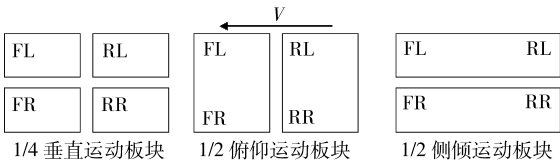


图 1 整车八板块分解图

Fig.1 Eight schematic diagrams of vehicle plate

悬架控制根据车身当前的姿态来分配主动减振器的各自阻尼力,因此车身运动姿态识别的正确与否,会极大地影响到悬架控制的性能。

为了准确描述汽车运动对车身的影响,令车身运动姿态集为

$$\Phi = \{\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3\} \tag{1}$$

式中 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ ——垂向振动加速度、侧倾角和俯仰角

作用在悬架系统上的阻尼力模型为

$$F_i = \{F_{i,1}, F_{i,2}, F_{i,3}\} \tag{2}$$

式中 $F_{i,1}, F_{i,2}, F_{i,3}$ ——垂向振动、侧倾和俯仰控制器施加在第 i 只悬架上的阻尼力

下角 i 取 1、2、3、4,分别代表左前、右前、左后、右后车轮的悬架。

在悬架系统阻尼力模型的基础上,结合车身运动姿态集,设计出主动悬架系统控制的推理规则集

$$\{\omega_1, \omega_2, \omega_3\} \Rightarrow \Psi = \{1, \dots, 8\} \tag{3}$$

其中, $\omega_i = \{+, -\}$ ($i=1, 2, 3$) 代表垂向振动、侧倾和俯仰控制器施加在悬架上阻尼力的方向集, + 表示使悬架压缩, - 表示使悬架伸张。 Ψ 代表悬架控制的 8 种状态集。具体见表 1。

表 1 车身姿态识别及悬架控制推理逻辑

Tab.1 Body posture identification and deductive logic of suspension control

状态	ω_1	ω_2	ω_3
1	+	+	+
2	+	-	+
3	+	+	-
4	+	-	-
5	-	+	+
6	-	-	+
7	-	+	-
8	-	-	-

1.2 悬架效用函数的定义与求解

从表 1 中可以看出,根据 3 种车身姿态对悬架施加的阻尼力可能是同向的也可能是异向的。同向阻尼力控制会有加强控制效果的趋势,异向则存在此消彼长的冲突关系,所以 3 种阻尼力不能简单的线性叠加或相减。

1971 年德国科学家哈肯^[3]提出了统一的系统协同学思想,指出协同是协调两个或者两个以上的不同资源或者个体,协同一致地完成某一目标的过程或能力。若系统中各子资源或者个体能很好配合、协同,多种力量就能集聚成一个总力量,形成大大超越原各自功能总和的新功能。

由此可以定义效用函数来表征对悬架施加阻尼力的控制效果,其函数值的大小能表征车身姿态控制从悬架阻尼力的叠加组合中所获得满足的程度,即函数值越大,表示车身姿态控制效果越好,其表达式是

$$F_{\text{utility}}(i) = [k_{i,1} \quad k_{i,2} \quad k_{i,3}] [F_{i,1} \quad F_{i,2} \quad F_{i,3}]^T \tag{4}$$

($i=1, 2, 3, 4$)

式中 $F_{\text{utility}}(i)$ ——第 i 只悬架的效用函数

$k_{i,1}, k_{i,2}, k_{i,3}$ ——垂向振动、侧倾和俯仰控制器施加在第 i 只悬架上的阻尼力的权值^[4]

由于熵值法能够深刻地反映出指标信息熵值的效用价值,其给出的指标权重要比德尔菲法和层次分析法有较高的可信度,所以采用熵值法对权值进行优化^[5]。

假设 B_{ij} 是第 i 组权值第 j 个控制器效用值,则用熵值法确定效用权重的步骤如下:

(1) 计算第 j 个控制器熵值第 i 个方案的特征比重

$$P_{ij} = B_{ij} / \sum_{i=1}^n B_{ij}$$

$$(B_{ij} \geq 0, \sum_{i=1}^n B_{ij} > 0; j = 1, 2, \dots) \tag{5}$$

(2) 计算第 j 个控制器的熵值

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (e_j > 0) \tag{6}$$

其中 $k = 1/\ln n$

(3) 计算第 j 个控制器的差异性系数。对于给定的 j, B_{ij} 的差异越小, 则 e_j 越大, 当 B_{ij} 全等时, $P_{ij} = 1/n, e_j = e_{\max} = 1 (k = 1/\ln n)$ 。此时, 系统的该项信息完全无序, 指标 B_{ij} 对于方案的比较无意义; B_{ij} 的差异越大, 则 e_j 越小, 第 j 个控制器对于方案的比较作用越大。因此, 定义差异性系数 $g_j = 1 - e_j, g_j$ 越大, 越应重视该控制器的作用。

(4) 确定权重系数

$$w_j = g_j / \sum_{j=1}^m g_j \tag{7}$$

式中 w_j ——已归一化的评价指标权重系数

1.3 模糊控制器设计

模糊控制是一种比较成熟的控制方法, 在控制过程中包含大量人的控制经验和知识, 与人的智能行为类似, 有效地解决了车辆主动悬架系统多参数、非线性问题。在车辆行驶过程中, 模糊控制器根据车况变化, 调节可调阻尼减振器的阻尼力, 实现衰减车体振动, 抑制车身姿态变化, 提高车辆行驶平顺性和乘坐舒适性^[6~7]。

输入变量的基本论域与路面干扰有密切关系, 应根据受路面干扰的最大值来确定, 输出变量的基本论域则以汽车在不同路面行驶时保持良好的悬架特性为原则。根据整车运动分解控制的原理, 设计独立的垂直、俯仰、侧倾模糊控制器 (如图 2)。输入、输出变量均选用高斯型隶属函数。

模糊规则的选取是控制器的核心, 选取控制量变化的原则是: 当误差很大或较大时, 选取控制量以尽快消除误差为主; 而当误差较小时, 选取控制量要注意防止超调, 以系统的稳定性为主。模糊推理算法采用 Mandani 方法, 权重均取为 1。

由已知的连续输入精确量, 通过各种不同的模糊推理过程, 求出模糊控制器相应的输出量, 它也是一个模糊量, 而被控对象只能接受精确的控制量, 因此必须将输出的模糊量转化成精确量, 此过程通常由模糊判决来完成^[8]。

2 仿真

2.1 整车多刚体动力学模型

利用多体动力学仿真技术建立汽车模型可以极大地提高建模的质量并缩短设计周期, 甚至可以降低物理样机生产和测试中的昂贵费用^[9]。将建好

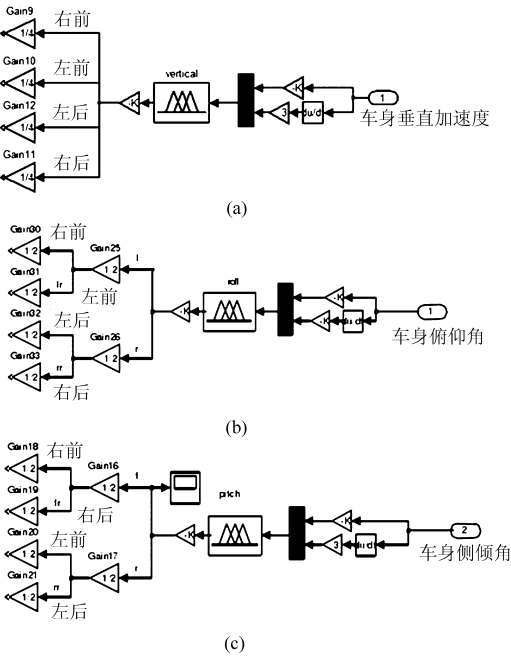


图 2 运动控制模块图

Fig. 2 Control module diagrams

(a) 垂直运动 (b) 俯仰运动 (c) 侧倾运动

的前悬架模型、后悬架模型、转向系模型、轮胎模型、车身模型等进行装配, 如图 3 所示。

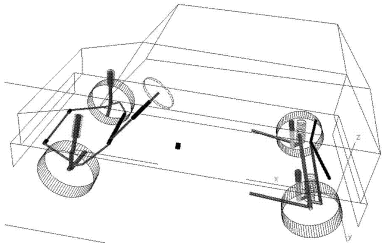


图 3 整车模型

Fig. 3 Vehicle model in SIMPACK

2.2 联合仿真模型

利用 SIMPACK 软件中的 SIMAT 系统将整车多体动力学模型以非线性被控对象形式输出到 Matlab/Simulink 环境中, 并以 SIMPACK 联合仿真模块子系统来表示, 在 SIMAT 系统中定义联合仿真采样周期和服务器进程 TCP 端口。所建立的联合仿真系统 SIMAT 如图 4 所示。在 SIMPACK 中定义整车模型需要的输出变量 $Y(t)_{Output_Vector}$ (车身垂直加速度、车身俯仰角、车身侧倾角) 和输入变量 U_{Extern} (汽车前、后、左、右悬架的主动减振器的阻尼力), 其中激励力元类型为 93 号力元: Force/Torque by $u(t)$ Cmp^[10]。

车辆动力学状态通过接口输送到控制器, 控制器经过逻辑运算发出控制指令, 控制指令又通过接口作用于车辆, 从而使车辆在期望的动力学状态下运行。利用闭环在线的仿真控制过程, 调整控制算法和参数直达到满意精度为止。

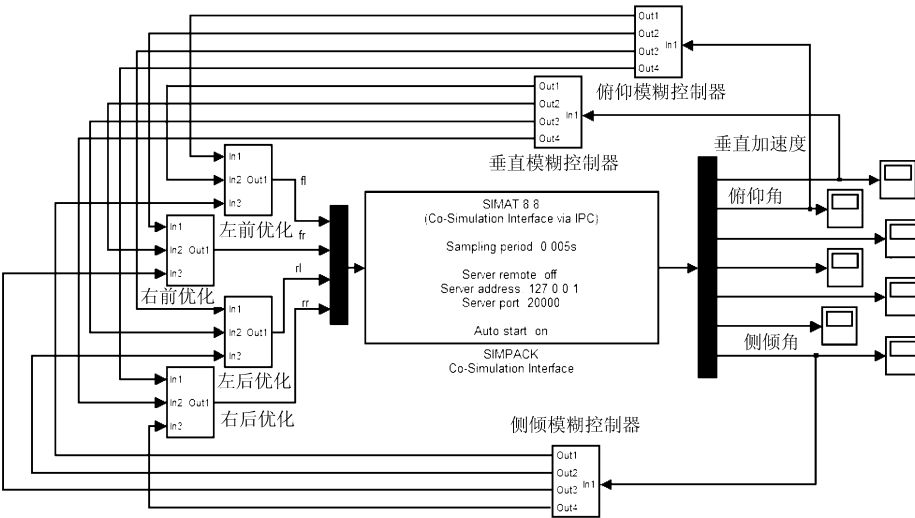


图 4 联合仿真主程序模块
Fig.4 Block diagram of co-simulation

2.3 联合仿真分析

分别采用脉冲路面和蛇形道路等工况,进行不同车速下整车联合仿真,对经过效用函数优化的模糊主动控制悬架和现有其他控制方法悬架仿真结果进行了比较分析。仿真参数如表 2。

表 2 整车参数
Tab.2 Vehicle parameters

参数	数值
整车整备质量/kg	900
最大总质量/kg	1 330
簧下质量(前/后)/kg	35/33
前轴质量(空/满)/kg	540/640
轴距/mm	2 335
前轴到质心距离/mm	955
后轴到质心距离/mm	1 380
前轮轮距/mm	1 360
后轮轮距/mm	1 355
车身尺寸(长×宽×高)/mm×mm×mm	3 400×1 575×1 670
轮胎型号	165/65R13

2.3.1 脉冲输入仿真

试验按照国标 GB/T 4970—2009《汽车平顺性试验方法》进行。限于篇幅,进行了车辆满载状态 20、40、60 km/h 3 种车速下仿真试验;并将本文基于悬架效用函数的优化控制与现有其他控制方法,如智能分层递阶控制^[2]、自适应模糊控制^[6]等进行比较分析。脉冲输入仿真试验时,本文重点考查俯仰振动的情况,仿真结果如图 5、6 所示。从图 5 中可以看出,基于悬架效用函数的优化控制效果明显优于智能分层递阶控制、自适应模糊控制,例如基于悬架效用函数的优化控制的振动曲线峰值较低、收敛速度最快、稳定性最好。随着车速的提高车身俯仰

角加速度幅值增大,控制的效果也更加明显。

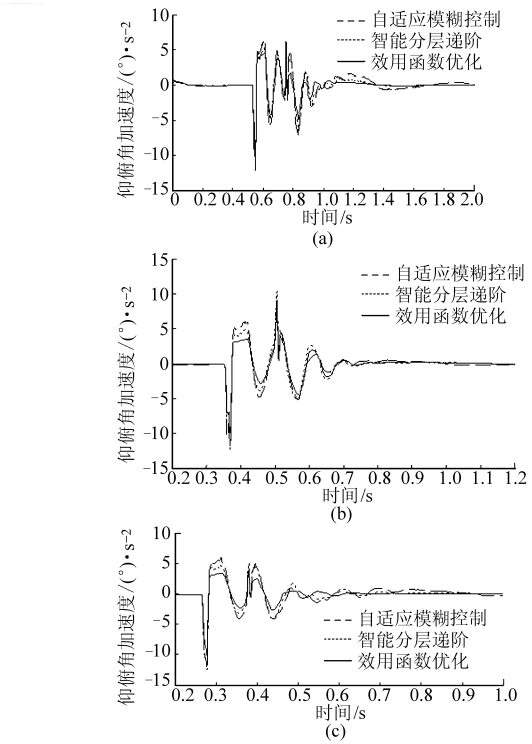


图 5 车身俯仰角加速度时域图
Fig.5 Diagrams of pitch angle acceleration
(a) 20 km/h (b) 40 km/h (c) 60 km/h

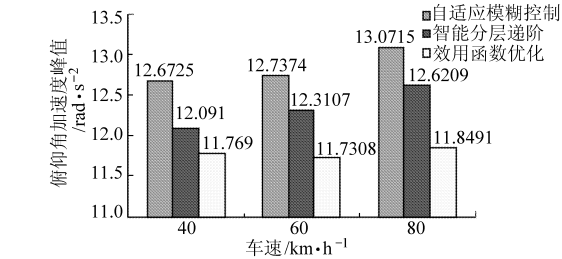


图 6 车身俯仰角加速度峰值柱状图
Fig.6 Diagrams of pitch angle acceleration peak

图 6 给出了车身俯仰角加速度峰值变化趋势。从图中可以看出,随着车速的增加车身俯仰角加速度峰值在增加,但是基于悬架效用函数优化控制后的车身俯仰角加速度峰值增加不明显,有效地抑制了俯仰振动。

2.3.2 蛇形道路输入仿真

为观测行驶过程中悬架控制对车身侧倾姿态的响应,进行了蛇行仿真试验。道路设计参考国家标准 GB/T 6323.1—1994《汽车操纵稳定性试验方法蛇行试验》。试验汽车以 10、20、30 km/h 的稳定车速直线行驶,进入试验区段后汽车呈“S”行驶轨迹通过试验路段,同时记录车身侧倾角变化的时间历程曲线。

从图 7 中可以看出,对悬架施加控制的效果优

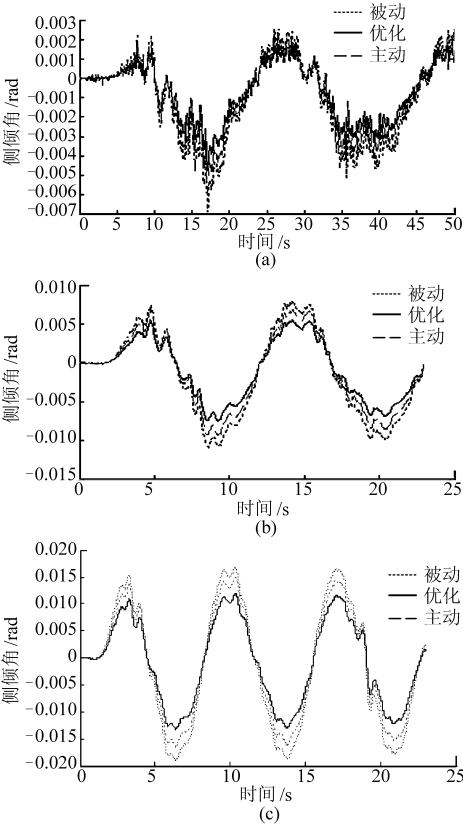


图 7 车身侧倾角时域图

Fig. 7 Diagrams of roll angle

(a) 10 km/h (b) 20 km/h (c) 30 km/h

于不施加控制,而基于效用函数的优化控制又优于传统不加优化的控制,随着车速的提高控制的效果也更加明显。

从图 8 中可以看出随着车速的增加车身侧倾角峰值都在增加,但控制效果也在增加。而表 3 是传统的主动控制和基于效用函数的优化控制分别相对于被动悬架的性能提高幅度,明显看出基于效用函数的优化控制效果最优。

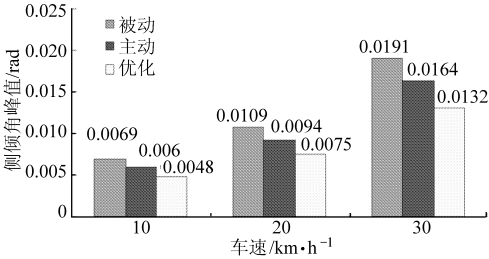


图 8 车身侧倾角峰值柱状图

Fig. 8 Diagrams roll angle peak

表 3 车身侧倾角峰值降低比率

Tab.3 Performance comparison of roll angle peak

控制方法	车速/ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$		
	10	20	30
主动	13.04	13.76	14.14
优化	30.43	31.19	30.89

3 结束语

建立了整车多刚体动力学模型,针对车身姿态存在扭转,悬架阻尼力控制矛盾的问题,设计了一种基于悬架效用函数优化的控制策略,进行了 SIMPACK 与 Matlab 联合仿真,与现有其他控制方法仿真结果进行了对比,仿真结果表明所制定的控制策略有效地降低了车辆行驶过程中的车身俯仰角加速度和侧倾角的峰值,改善了车辆行驶平顺性。所建整车模型更加接近实际的物理模型,可为工程应用提供参考。

参 考 文 献

1 王祺明. 磁流变减振器半主动悬架控制仿真及试验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
Wang Qiming. Control simulation and test study on magnetron rheological (MR) semi-active suspension [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009. (in Chinese)

2 李以农,赵树恩,郑玲,等. 汽车半主动悬架智能分布式递阶控制[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(19): 6 095 ~ 6 098.
Li Yinong,Zhao Shuen,Zhen Ling,et al. Intelligent distributed hierarchical control on automobile semi-active suspension [J]. Journal of System Simulation,2009,21(19):6 095 ~ 6 098. (in Chinese)

3 哈肯 H. 协同学[M]. 北京:原子能出版社,1984:16 ~ 28.

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)