

# 并联混合动力汽车用感应电机的参数匹配与整车性能的研究

郑 维, 崔淑梅

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 基于并联混合动力汽车(PHEV), 研究开发了应用于城市工况条件下的感应电机系统。结合整车的控制需求, 详细的分析说明了感应电机系统的性能特点及其功能, 同时结合具体行驶工况, 分析了不同参数匹配的感应电机系统对 PHEV 整车性能的影响。利用 Matlab/Simulink 对 PHEV 系统进行了仿真分析, 并进行了样车的道路试验研究, 仿真与试验结果表明该系统具有较好的性能, 能够满足 PHEV 的整车控制要求。

**关键词:** PHEV; 感应电机; 燃油经济性; 行驶工况; 仿真; 道路试验

中图分类号: U469.72; TM343

文献标志码: A

文章编号: 1001-6848(2010)05-0001-05

## Research on Parameters Design and Vehicle Performance of Induction Motor for Parallel Hybrid Electric Vehicle

ZHENG Wei, CUI Shu-mei

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The paper introduced parallel hybrid electric vehicle' (PHEV) induction motor system based on city driving condition. The characteristics and performances of induction motor system were analyzed in detail combined with the whole vehicle's control requirement, and integrated with the specific driving condition, the impact on PHEV with different parameter matched induction machine system was analyzed, too. The PHEV system was simulated with Matlab/Simulink, and carried on the road tests experiments, the result shows this system achieved preferable performance, and can satisfy the whole vehicle's control demand of PHEV.

**Key Words:** PHEV; Induction motor; Fuel economy; Driving cycle; Simulation; Road test

## 0 引 言

电机及其控制系统是混合动力汽车(HEV)中的主要组成部分。在现有的能源技术还不足以为电动汽车提供足够的行驶里程的情况下, 高性能的电机系统是混合动力汽车商品化的关键。因此, 各汽车制造厂家及科研机构在努力开发高效蓄电池的同时, 也在大力研究适应各种不同类型电动汽车的高性能的车用电机系统。感应电机因其具有成本低、可靠性高、免维护及控制技术相对成熟等特性, 成为电动汽车领域里应用广泛的一种电机<sup>[1-2]</sup>。

对于 PHEV 而言, 电驱动系统是其关键的动力

总成部分, 根据对其运行状态的分析, 当 PHEV 以纯电动、联合驱动、再生制动和发动机驱动并发电的工作模式运行时, 电驱动系统效率的高低将决定混合动力驱动系统对能量的利用效率, 进而将影响整车的经济性能。因此, 为了提高整车的经济性能, 电驱动系统的工作点也尽可能的在其高效区域内<sup>[3-6]</sup>。因此, 电机系统的方案直接决定了 PHEV 的整车性能, 为了更好的实现各种工作模式并提高整车的性能, 不仅要求电机系统具有尽可能宽广的高效率区, 而且要求系统具有调速范围宽以及良好的转矩、转速动态特性。研究开发高性能的 PHEV 用感应电机系统, 对进一步提高动力性和经济性极为重要, 也是提高整车性能的关键技术之一<sup>[7]</sup>。

本文从提高 PHEV 整车性能出发, 提出了 PHEV 对电机系统的性能要求。并结合具体行驶

工况,分析了不同参数匹配的电机系统对整车性能的影响。最后对PHEV进行了性能仿真与道路实验研究,结果表明该系统具有较好的性能。

## 1 PHEV用感应电机系统概述

PHEV采用双轴并联结构型式,它的主要特点是发动机(包括离合器)与电机通过动力合成装置连接在一起,驱动力通过自动变速箱、传动轴到后桥,最终驱动车辆。本文研究的PHEV动力总成的结构如图1所示。

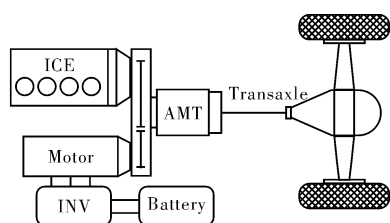


图1 并联混合动力汽车动力系统结构

电机系统在PHEV的各种运行状态下,有着不同的要求以实现整车的各种工作模式(电机模式、电驱动模式、发动机单独驱动模式、混合驱动模式、再生制动模式)。因此,PHEV对电机系统有着以下的要求:

① 在低速(恒转矩)运行具有较大转矩,以满足起动、爬坡等要求,在恒功率区,具有高的转速以满足汽车能够高速行驶;

② 宽调速范围和宽转矩变化范围,有尽可能宽的高效率区域,以提高整车的能量利用率;

③ 能够实现能量再生回馈,瞬时功率大,有一定的过载能力,加速性能好;

④ 动态品质好、转矩控制灵活容易且稳定、响应快,以适应路面变化和频繁刹车,可靠性高;

⑤ 由于双轴并联结构增加了动力合成装置和电机总成,使变速箱输入轴转动惯量增加4倍,所需换挡力相应增加。因此,电机系统还需配合整车完成主动同步换挡。

PHEV用电机参数的确定,直接关系到整车性能,这也是研制设计PHEV的必要环节。确定电机参数的方法为:首先根据整车动力性能指标确定电机的性能要求,然后结合具体行驶工况来对其进行修正。使得电机的实际工作点尽可能在高效区内,以提高能量的利用效率。通常用于PHEV的电机外特性为:在额定转速以下,以恒转矩模式运行,在额定转速以上,以恒功率模式运行。电

机的额定与峰值参数包括电机的转速、转矩和功率,它们与PHEV的驾驶性能要求、用途、应用场合所有很大关系。如果这些参数过小,则电机可能会无法满足整车的转矩和功率需求,达不到整车的加速性、爬坡度以及最高时速等性能要求,电机经常工作在额定参数之外的短时工作区,造成电机损坏;如额定参数过大,则是一种浪费,系统效率也不高。

PHEV电驱动系统的设计不仅与整车参数密切相关,而且与PHEV的整车性能有很大关系,如持续和短时可达的最高车速、爬坡能力、给定坡路上的最高车速、不同速度上的加速度、超速。此外,还有必要确定驾驶工况要求的平均功率,超载的可能性和频率,环境条件,电源瞬时及持续的最大功率,额定及最小电压。建立电机系统与整车参数和动力性能之间联系的是动力系统的数学模型。PHEV行驶时,车辆驱动转矩和功率,与行驶阻力与阻力功率的平衡方程如下式所示<sup>[8-9]</sup>。

$$M/r = mgs\sin\alpha + mgf\cos\alpha + \frac{C_d A}{21.15} v^2 + \delta m \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

$$P = (mgs\sin\alpha + mgf\cos\alpha + \frac{C_d A}{21.15} v^2 + \delta m \frac{dv}{dt}) \frac{v}{3600} \quad (2)$$

式中, $M$ 为车辆的驱动转矩, $r$ 为车轮半径, $f$ 为滚动阻力系数, $\alpha$ 为坡度角, $C_d$ 为空气阻力系数, $A$ 为迎风面积, $v$ 为车速, $m$ 为车辆质量, $\delta$ 为汽车质量换算系数。

根据式(1)可以获得车辆的加速度、爬坡度、加速时间与距离,如式(3)~式(6)所示:

$$a = \frac{dv}{dt} = (Mi_g i_0 \eta / r - mgf - C_d A v^2 / 21.15) / \delta m \quad (3)$$

$$i = (Mi_g i_0 \eta / r - mgf - (C_d A v^2) / 21.15) / mg \quad (4)$$

$$t_a = \int_{v_0}^{v_1} \frac{\delta m}{Mi_g i_0 \eta / r - mgf - C_d A v^2 / 21.15} dv \quad (5)$$

$$S_a = \int_{v_0}^{v_1} \frac{\delta m v}{Mi_g i_0 \eta / r - mgf - C_d A v^2 / 21.15} dv \quad (6)$$

通过对上式的分析可以得出:当PHEV整车参数与动力性指标确定后,根据车辆动力学模型只能得出PHEV总的功率需求。因此,还需对PHEV的整车性能进行进一步的分析,来确定感应电机参数的具体匹配。

## 2 PHEV能量管理策略

PHEV的转矩/功率分配策略是能量管理策略

的核心,其通过信息流协调车辆各部件的运行,对各部件的工作点进行优化,使其运行在高效区,同时兼顾整车动力性能与驾驶舒适性能,使燃油消耗达到最低。因此,总的来说能量管理策略主要解决的问题是:决定 PHEV 的总转矩/功率需求在发动机与电机之间的合理分配<sup>[10-12]</sup>。

PHEV 根据道路转矩需求,可将发动机与电机的工作区域分为三部分:高负荷区、优化区与低负荷区。如图 2 所示。

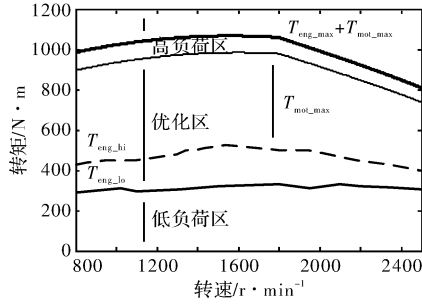


图 2 发动机与电机转矩分配示意图

#### (1) 高负荷区

若满足:  $T_{re} > T_{eng\_hi} + T_{mot\_max}$  (7)

则:  $T_{mot} = T_{mot\_max}$ ;  $T_{eng} = T_{re} - T_{mot\_max}$  (8)

#### (2) 优化区

若满足:  $T_{re} \geq T_{eng\_lo}$ ;  $T_{re} \leq T_{eng\_hi} + T_{mot\_max}$  (9)

则:  $T_{mot} = \min \{ T_{re} - \min ( T_{eng\_lo}, T_{re} ), T_{mot\_max} \}$   
 $T_{eng} = T_{re} - T_{mot}$  (10)

#### (3) 低负荷区

若满足:  $T_{re} < T_{eng\_lo}$  (11)

此时如果电机转矩能够满足道路负荷的要求,车辆纯电动行驶。

则:  $T_{mot} = T_{mot\_max}$ ;  $T_{eng} = 0$  (12)

此时如果电机转矩不能满足道路负荷的要求,车辆行驶中给电池充电。

则:  $T_{mot} = T_{re} - T_{eng}$   
 $T_{eng} = \min ( T_{ge\_max} + T_{re}, T_{eng\_lo} )$  (13)

式中,  $T_{eng\_hi}$  为发动机最优工作区域上限;  $T_{eng\_lo}$  为发动机最优工作区域下限;  $T_{mot\_max}$  为电机电动扭矩最大值;  $T_{ge\_max}$  为电机发电扭矩最大值。

### 3 不同参数匹配动力性能的仿真分析

通过 PHEV 行驶时的动力系统模型,使用 MATLAB 仿真软件,可以得到在匹配不同参数的感应电机时的 PHEV 整车动力性能<sup>[13]</sup>。本文实例使用城市公交客车的整车参数与动力性要求如表 1 所示。结合整车参数与动力性指标,

PHEV 总的需求功率选为 195 kW,下面将结合整车的动力性需求对电机系统的参数匹配进行仿真分析。

表 1 PHEV 的整车参数与动力性要求

质量/kg	11000	后桥速比	6.2
滚动摩擦系数	0.0068	车轮半径/mm	509
迎风面积/m <sup>2</sup>	7.316	风阻系数	0.79
最高车速/km·h <sup>-1</sup>	>90		
最大爬坡度/%	>30		
0~60 km 加速时间/s	30		

#### 3.1 加速性能的仿真分析

PHEV 加速性能指的是,车辆在原地起步时的加速能力,通常用加速到一定车速所用的时间和距离来评价。在对 PHEV 进行加速性能分析时,考虑电机的工作点在峰值工作区域。即电机的峰值功率。根据式(5)、式(6),通过采用不同电机峰值功率对 PHEV 进行加速性能的仿真分析,可以得出并联混合动力汽车的加速时间、加速距离分别与车速的关系曲线,如图 3 所示。

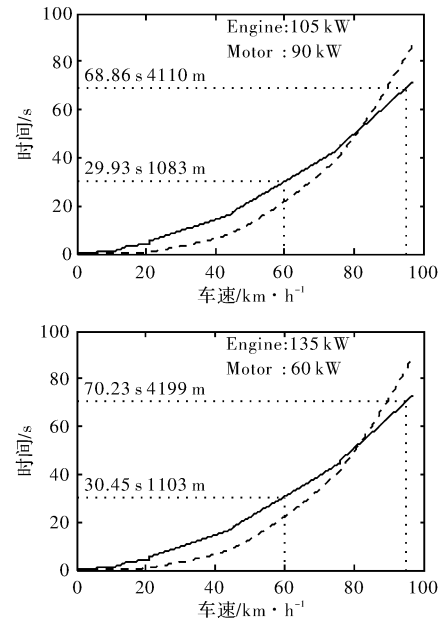


图 3 加速时间/距离与车速的关系曲线

PHEV 连续升档加速时,加速时间与距离随着匹配总功率的增加而减小。在 PHEV 的匹配功率一定时,发动机功率与电机峰值功率之间的分配对加速时间和距离的影响不是很大。在满足发动机单独驱动车辆的前提下,发动机功率选为 105 kW,因此,电机的峰值功率选为 90 kW。仿真分析对比结果如表 2 所示。

表2 不同匹配功率下加速时间与距离的仿真结果

ICE 功率/kW	105	135
EM 峰值功率/kW	90	60
时间/s	0~60 km	29.93 30.45
	0~95 km	68.86 70.23
距离/m	0~60 km	1083 1103
	0~95 km	4110 4199

### 3.2 爬坡性能的仿真分析

PHEV 的爬坡性能指的是, 车辆在良好路面以最低车速上坡等速行驶的最大坡度。在对 PHEV 进行爬坡性能分析时, 考虑电机的工作点在连续工作区域, 即电机的额定功率。根据式(4), 通过采用不同电机额定功率对 PHEV 进行爬坡性能的仿真分析, 可以得出 PHEV 在不同档位下坡度与车速的关系曲线, 如图4所示。

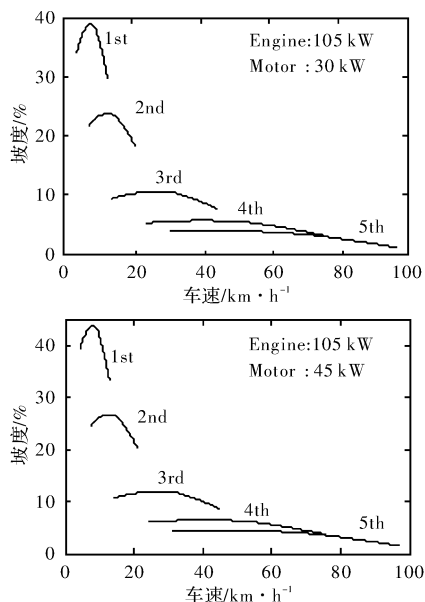


图4 不同档位下坡度与车速的关系曲线

通过对上图的对比分析, 我们可以得出, PHEV 爬坡性能随着电机额定功率的增加而增加。因此, 在确定电机额定功率时, 需要充分考虑车辆的爬坡性能要求。应明确车辆的持续爬坡坡度以及相应的车速, 车辆的最大爬坡坡度, 电机的短时工作时间等等。建立车辆驾驶性能与电机参数的平衡。仿真分析对比结果如表3所示:

表3 不同匹配功率下爬坡性能的仿真结果

ICE 功率/kW	EM 功率/kW	最大爬坡坡度(%)				
		一档	二档	三档	四档	五档
105	30	38.82	23.72	10.49	5.60	3.86
105	45	43.66	26.72	11.88	6.43	4.53

通过以上对 PHEV 动力性能的分析可以得出: PHEV 总的匹配功率一定时, 电机系统功率分配的

大小对 PHEV 的整车加速性能几乎没有影响。但额定功率的大小需要根据具体的爬坡性能来决定。以上对整车动力性能的分析都是基于极限工况(最大爬坡能力、最大加速性能), 而没有考虑复杂的实际使用工况。在一般的行驶条件下, PHEV 很少在这些极限工况下行驶。因此, PHEV 在满足整车动力性能指标后, 为了兼顾 PHEV 的经济性, 还需进一步针对具体行驶工况, 结合电机系统的工作特性来对电机参数进行匹配, 使得 PHEV 获得最佳的性能。

### 4 不同参数匹配经济性能的仿真分析

电机系统的高效区域一般由电机的额定转速与额定功率来决定。因此, 根据对 PHEV 动力性能分析的结果, 额定功率可由 PHEV 以纯电动行驶的最大车速以及联合驱动的爬坡能力来确定。为了减小电机的尺寸和电池频繁充放电所造成的损耗, 通常以车辆在市区行驶的平均车速为标准, 这里额定功率定为 30 kW。根据扭矩合成装置的速比与变速箱的换档规律, 电机的最高转速定为 6000 r/min。接下来将结合具体行驶工况, 对研制开发的 30/90 kW@3600 r/min 与 30/90 kW@1500 r/min 两台电机进行整车燃油经济性的仿真分析, 仿真过程中保证储能系统具有相同的荷电状态(SOC)变化量。图5所示为电机系统在行驶工况下工作点的分布情况。

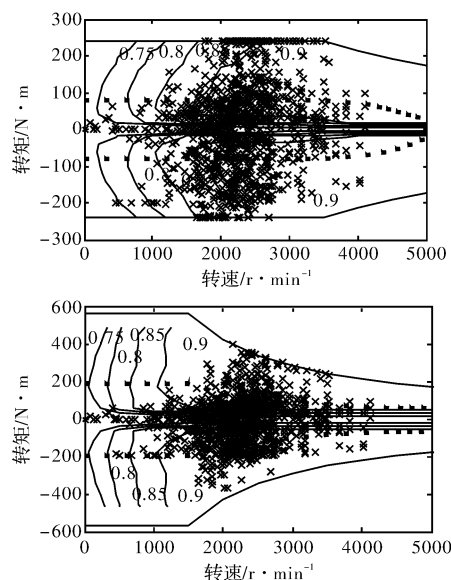


图5 行驶工况下电机系统工作点的分布情况

由于行驶工况平均车速较高, 在整个循环中功率需求与电机的工作转速较高, 因此, 30/90 kW@3600 r/min 电机实际工作点较 30/90 kW@1500 r/min 位于高效区的多, 即前者具有相对较好

的燃油经济性。仿真分析对比结果如表 4 所示。

表 4 行驶工况下整车经济性的仿真结果

EM 额定 转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	ICE 平均 效率/%	EM 平均 效率/%	百公里油耗 (L/100 km)
3600	37	90	26.8
1500	37	86	28.3

通过以上的分析, 我们可以得出: PHEV 需要针对具体的行驶工况及使用条件来进行设计。为了提高电驱动系统的效率, 在设计电机确定具体参数时, 应该结合具体行驶工况, 根据电机实际工作转速、转矩和功率的具体分布情况来确定高效区的分布, 尽可能的使工作点位于高效区。

## 5 性能仿真与道路试验的结果分析

根据以上对 PHEV 整车动力性与经济性的分析, 本文选用 30/90 kW@3600 r/min 的电机系统, 对 PHEV 进行了行驶工况下的整车仿真与功能样车的道路试验。图 6 所示为 PHEV 在行驶工况下 SOC/燃油消耗量/实际车速的仿真结果。

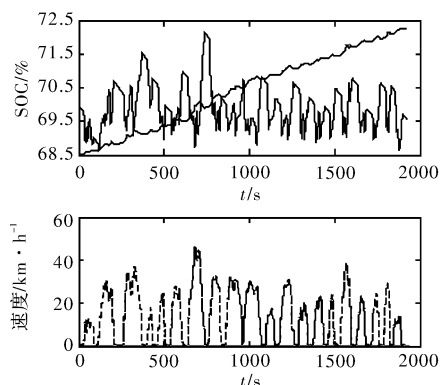


图 6 SOC/燃油消耗量/实际车速的仿真结果

在行驶工况的开始阶段, 初始的动力电池组 SOC 值为 70%, 行驶工况结束时动力电池组的 SOC 值为 69.51%, 可以看出, 动力电池组的 SOC 值变化比较平稳, 有利于保证动力电池组的寿命, 同时也实现了动力电池组 SOC 值的平衡控制。仿真得到 PHEV 的百公里油耗为 26.8L/100 km, 与传统汽车比较, 燃油经济性提高了 32%。此外, 从车速的仿真结果可以看出, 车辆的实际车速与行驶工况目标车速十分吻合。因此, PHEV 在具有较好的燃油经济性的同时, 也能满足混合动力汽车的动力性要求。图 7 所示为 PHEV 功能样车道路试验电机输出的转矩与转速的变化曲线。

图中可以看出, 在 4 s 时, 电机起动发动机运行, 此时, 电机转速约为 1600 r/min, 发动机怠速运行, 车辆处于空档状态。当进行到 14.7 s 时,

PHEV 开始挂档起车并连续升档加速, 在此过程中, 电机输出驱动转矩与发动机共同驱动车辆加速。当进行到 36.5 s 时, PHEV 开始降档减速, 在此过程中, 电机输出负转矩进行制动能量回收。

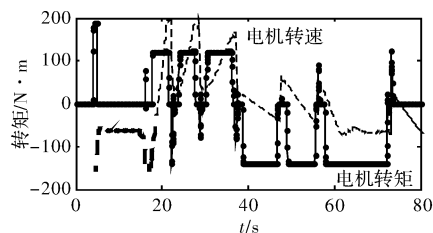


图 7 道路试验电机输出转矩与转速的变化曲线

同时, 在 PHEV 换档的过程中, 电机系统完成了主动同步换档的功能, 试验曲线如图 8 所示。图中可以看出, 在 PHEV 换档过程中, 当降速升档时, 电机输出负转矩, 当升速降档时, 电机输出正转矩。变速箱输入轴在电机系统的控制下与目标转速同步(变速箱输入轴通过固定速比齿轮箱与电机相连), 此时输入轴比发动机更早的到达目标转速, 使得输入轴同步时间缩短到约 0.3 s, 很显著的减少了换档的时间, 提高了整车的动力性能。

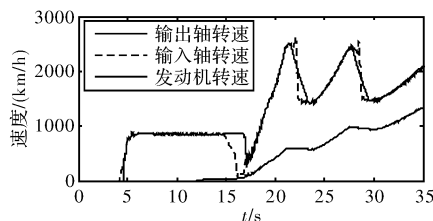


图 8 变速箱输入轴、输出轴与发动机转速的变化曲线

## 6 结 论

(1) 结合整车的控制需求, 分析了 PHEV 对电机系统的性能要求, 确定了发动机与电机的能量管理策略。并运用 matlab/simulink 软件分析了不同参数匹配的感应电机系统对 PHEV 整车动力性与经济性的影响。

(2) 对 PHEV 进行了行驶工况下的整车性能仿真与功能样车的道路试验研究。仿真试验结果表明, 该感应电机系统具有很好的动、静态特性, 完全满足 PHEV 的控制要求, 同时, 有效的提高了 PHEV 的整车性能。

## 参考文献

- [1] Chan. C. C. The State of the Art of Electric and Hybrid Vehicles[C]. Proc. IEEE, 2002, 90: 247-266.

(下转第 18 页)

- 社, 1999: 159-176.
- [6] 张琛. 直流无刷电动机原理及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [7] 叶金虎. 现代无刷直流永磁电动机的原理和设计[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [8] 黄国治, 傅丰礼. 中小旋转电机设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [9] 魏静微. 小功率永磁电机原理设计及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [10] Carlson R, Lajoie M M, Fagundes J C. Analysis of torque ripple due to phase commutation in brushless DC machines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1992, 28(3): 632-638.
- [11] 李钟明, 刘卫国. 稀土永磁电机[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 134-141.
- [12] 林平, 韦鲲, 张仲超. 新型无刷直流电机换相转矩脉动的抑制控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3).
- [13] Zhu Z. Q, Howe D, Ackermann B. Analytical prediction of dynamic performance characteristics of brushless DC drives[J]. J. Electrical Machines and Power System, 1992, 20(6): 661-678.
- [14] 莫会成. 方波激励永磁无刷伺服电动机换向过程分析[J]. 微电机, 1994, (3): 3-9.
- [15] 李鲲鹏, 胡虔生, 黄允凯. 计及绕组电感的永磁无刷直流电动机电路模型及其分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 76-80.
- [16] 王晋, 陶桂林, 周理兵, 等. 基于换相过程分析的无刷直流电动机机械特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(14): 141-145.
- [17] 黄平林, 胡虔生. 高速永磁无刷直流电动机稳态特性的仿真分析[J]. 微特电机, 2005, (7): 21-23, 28.
- 
- 作者简介: 谭建成(1940-), 男, 研究员级高级工程师, 长期从事微特电机设计及控制技术研究。

(上接第5页)

- [2] Harson A, Mellor P. H, Howe D. Design Considerations for Induction Machines for Electric Vehicle Drives[C]. Proc. Of Electrical Machines and Drives. 1995: 1-2.
- [3] Gino Paganelli, Gabriele Ercole, Avra Brahma, et al. General Supervisory Control Policy for the Energy Optimization of Charge-Sustaining Hybrid Electric Vehicles[J]. JSAE Review, 2001(22): 511-518.
- [4] He Xiaoling, Jeffrey W Hodgson. Modeling and Simulation for Hybrid Electric Vehicles-Part1: Model[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2002, 3(4): 235-243.
- [5] Xie Hui, Song Xiaowu, Zhou Nenghui. Hierarchical Control Models and Energy Management Strategy for a Mild Hybrid Electrical Vehicle[C]. Proceeding of 2003 Sinio-Korea ICAE, 2003.
- [6] Johnsonvh, Wipkekb, Rausendj. HEV control strategy for real-time optimization of fuel economy and emissions[G]. SAE Paper, 2000: 1543.
- [7] Michael Lowery, Kaushik Rajashekara, Balarama Murty. Electric Drive System for Electric and Hybrid Vehicles[C]. Proc. Of 18th Electric Vehicles Symposium(EVS-18). Berlin, Germany. 2001: 1-2.
- [8] Piotr Drozd, Richard Siegenthaler. Hybrid Powertrain Architecture for Medium Duty Commercial Vehicles[C]. EVS18, Berlin, 2001: 1-7.
- [9] Chan David T. W, Chan C. C, Chau K. T. System Level Simulation of Electric Vehicles Using Universal Driving Cycle[C]. Proc. Of 16th Electric Vehicles Symposium (EVS-16). Beijing, China1999: 2-11.
- [10] Salmasi F. R. Control strategies for hybrid electric vehicles; evolution, classification, comparison, and future trends[J]. IEEE Trans. Veh. Tech., September 2007, 56(9): 2393-2397.
- [11] Amano Masahiko, Gopal Ram V, Matsuo Takeshi, et al. Practical Optimization of Energy Management for Parallel Hybrid Electric Vehicles[C]. EVS 20, 2003.
- [12] Chau K. T, Chan C. C. Emerging Energy-Efficient Technologies for Hybrid Electric Vehicles[C]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(4): 826-830.
- [13] Karen L. Butler, Mehrdad Ehsani, Preyas Kamath. A Matlab-based modeling and simulation package for electric and hybrid electric vehicle design[J]. IEEE Trans. Vehicular Technology, 1999, 48(11): 1771-1777.
- 
- 作者简介: 郑维(1979-), 男, 博士研究生, 从事电动汽车整车控制、电驱动系统控制与仿真的研究。