DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.10.002

# 电动汽车控制系统与弱磁扩速研究*

程　博[1]　李　雪[1]　叶　敏[1]　王凤凯[2]　曹秉刚[2]

(1.长安大学道路施工技术与装备教育部重点实验室, 西安 710064; 2.西安交通大学机械工程学院, 西安 710049)

【摘要】 针对电动汽车用内置式永磁同步电动机设计控制系统,通过借鉴以往经验以及对电动机响应曲线的分析,结合电动汽车运行实际状况,制定模糊控制规则,设计模糊 PI 复合型控制器,实现在矢量控制中嵌入,完成模糊 PI 矢量控制系统仿真。以同时考虑转速和变调率的双判断条件来确定是否需要弱磁控制,实现以转折速度为阈值的分段式矢量控制策略。最后,进行了电动机运转实验,实验结果表明算法提高了电动汽车的响应特性和运行平稳性,拓宽了电动机的可控速度范围,改善了电动汽车的驾驶性能。

**关键词**: 电动汽车　内置式永磁同步电动机　矢量控制　模糊优化　弱磁调速

**中图分类号**: TP274　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2012)10-0008-06

# Control System and Flux-weakening Algorithm of Electric Vehicle

Cheng Bo[1]　Li Xue[1]　Ye Min[1]　Wang Fengkai[2]　Cao Binggang[2]

(1. *Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment*, *Ministry of Education*, *Chang'an University*, *Xi'an* 710064, *China*　2. *School of Mechanical Engineering*, *Xi'an Jiaotong University*, *Xi'an* 710049, *China*)

**Abstract**

Corresponding to the interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) used in electric vehicle (EV), control system was designed. Based on the experts experience and motor response curve, combining the actual running state of EV, the fuzzy control rules were made. The fuzzy-PI controller was designed and embedded in the vector control system, and then the simulation was completed. A double-condition considering both speed and duty cycle was utilized to judge whether the flux-weakening control was necessary. A subsection control strategy was adopted according to the speed threshold. Finally, by the running experiment of IPMSM used in EV, it was proved that the response performance and running stability of the motor were improved, and the controllable speed range was widened.

**Key words**　Electric vehicle, Interior permanent magnet synchronous motor, Vector control, Fuzzy optimum, Flux-weakening control

## 引言

随着经济的发展,能源与环境问题日益凸显,电动汽车技术得到了越来越多的关注。电动机控制属于电动汽车核心技术之一,引起了广泛的研究兴趣[1~2]。

在永磁同步电动机的控制中,模糊优化得到了高度的重视,文献[3]提出了采用四层神经网络来训练模糊控制器的参数,通过仿真和实验验证了控制永磁同步电动机的效果。文献[4~5]利用模糊优化与 back stepping 控制的思想相结合,在电动机参数不确定和负载扰动的情况下,实现永磁同步电动机的高性能位置跟踪控制。文献[6~7]采用自组织模糊滑模控制,全局控制器由 T-S 模糊局部补偿器与滑模监督控制器构成随着瞬态响应或者跟踪响应的变化,实现了增益自动调节。文献[8~9]提

收稿日期: 2012-02-01　修回日期: 2012-05-17

*国家自然科学基金资助项目(51105043)、西安市年度创新支撑计划资助项目(CXY1120)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CHD2011JC043)

作者简介: 程博,讲师,博士,主要从事计算智能、电动汽车和新能源技术研究,E-mail: chengbo7681@126.com

出了采用模糊优化与直接转矩控制相结合的思路，改善常规的直接转矩控制，减少了永磁同步电动机的转矩脉动，提高了系统控制性能。文献[10]，基于 Takagi－Sugeno（T－S）模糊方法提出了一种速度控制器的设计思路，对于永磁同步电动机取得了较好的效果。

本文借鉴以往经验以及对电动机响应曲线的分析，制定模糊控制规则，将模糊 PI 嵌入矢量控制系统。考虑到 IPMSM 的自身特点，并要满足电动汽车的速度需求，采用分段式的矢量控制策略，即在转折速度以下采用 $i_d=0$ 的控制策略，而在转折速度以上则采用弱磁控制，并结合汽车运行的实际状况，设计同时考虑转速和变调率的双判断条件来确定是否采用弱磁控制策略。

## 1　IPMSM 矢量控制

研究对象为径向磁场内转子式无起动绕组正弦波永磁同步电动机。交流电动机矢量控制原理是模拟直流电动机转矩控制的规律，在磁场定向坐标上，将电流矢量分解成产生磁通的励磁电流分量和产生转矩的转矩电流分量，并使两分量互相垂直、彼此独立，然后分别进行调节，使转矩和磁通的控制实现解耦。永磁同步电动机矢量控制原理如图 1 所示。

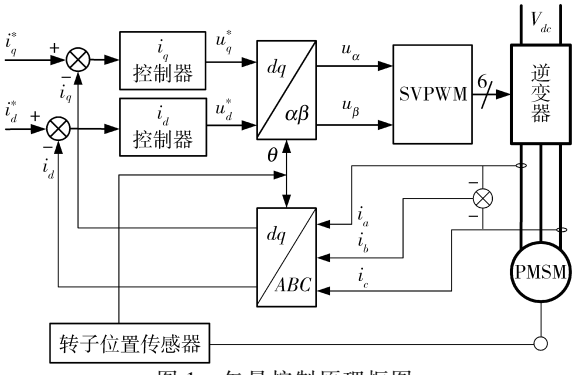


图 1　矢量控制原理框图

Fig. 1　Diagram of vector control

根据图 1，可建立双环矢量控制的仿真系统。控制电流目的是在磁场定向控制时，电磁转矩和磁通解耦后直接受控于定子电流的转矩分量和磁链分量，通过控制电流就可以有效地控制转矩和磁链。在 Simulink 中建立双闭环矢量控制的仿真系统，如图 2 所示。在图 2 中，逆变桥、电动机及电动机测量子系统均采用 Simulink 中的 Sim Power Systems 自带模块。设置电动机模型参数如下：定子电阻为 2.875 Ω，交轴和直轴电感为 $L_d$ = 0.085 H，$L_q$ = 0.085 H；转动惯量为 0.000 8 kg·m$^2$，极对数为 4，永磁体磁通为 0.175 Wb。

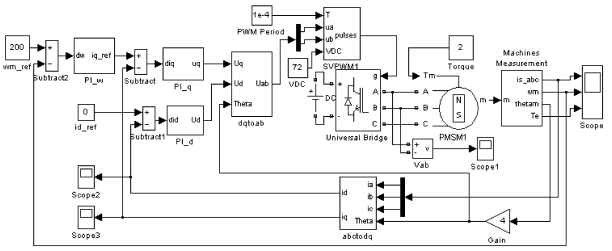


图 2　电动机双闭环控制仿真系统

Fig. 2　Simulation system of double closed loop

根据坐标变换原理，建立坐标变换子系统 *ABC* to *dq* 及 *dq* to *ABC*。按照 Ziegler－Nichols 设计法[11]确定电流环及转速环 PI 控制器参数如表 1 所示。

**表 1　电流环及转速环 PI 控制器参数**

**Tab. 1　PI parameters of current and speed loop**

| 控制器类别 | 比例系数 $K_p$ | 积分系数 $K_i$ |
|---|---|---|
| 直轴电流 PI 控制 | 9.8 | 2.6 |
| 交轴电流 PI 控制 | 9.8 | 2.6 |
| 转速 PI 控制器 | 7.0 | 1.0 |

## 2　模糊 PI 控制器设计与弱磁扩速

模糊控制不依赖于被控对象的精确数学模型，能够克服非线性因素的影响，对被控对象的参数变化具有较强的鲁棒性，但是模糊控制本身消除系统稳态误差的性能较差，难以达到较高的控制精度，而传统 PI 控制在理论上可以完全消除稳态误差，因此，针对电动汽车用 IPMSM 控制系统的强烈时变的非线性，把两者结合，设计模糊 PI 复合型控制器，然后嵌入电动机双闭环矢量控制算法中，则可同时满足动态及稳态控制的要求。

### 2.1　模糊 PI 复合型控制器设计

控制器的设计结构如图 3 所示。根据给定信号与反馈信号的误差 $e$，以及误差变化率 $e_c$，利用模糊规则进行模糊推理，由模糊控制器输出 PI 参数的增量 $\Delta K_p$、$\Delta K_i$，修正 PI 控制器的参数 $K_p$、$K_i$，以保证电动机在不同的运行状态下都能具有良好的动、静态性能。

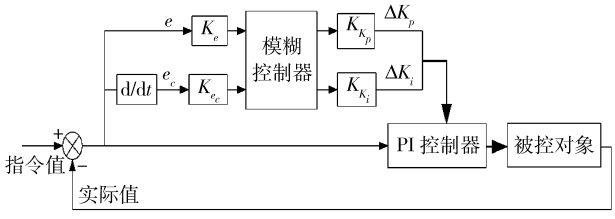


图 3　模糊 PI 复合型控制器设计结构

Fig. 3　Design structure of fuzzy-PI controller

设计步骤如下：

（1）确定输入为 $e$ 和 $e_c$，输出 $\Delta K_p$、$\Delta K_i$。

(2)输入和输出变量的模糊子集英文表示为{NB,NM,NS,ZE,PS,PM,PB},论域均设定为{-3,-2,-1,0,1,2,3}。

(3)确定量化因子 $K_e$、$K_{e_c}$及比例因子 $K_{K_p}$、$K_{K_i}$。

$$K_e = 3/e_m \quad K_{e_c} = 3/e_{cm}$$

$$K_{K_p} = P_m/3 \quad K_{K_i} = I_m/3$$

式中 $e_m$——输入变量偏差 $e$ 的幅值

$e_{cm}$——输入变量偏差 $e_c$ 的幅值

$P_m$——输出变量 $\Delta K_p$最大值

$I_m$——输出变量 $\Delta K_i$最大值

(4)采用三角形隶属度函数,将精确的输入变量模糊化,以确定 $x$ 点在模糊子集中的隶属度,如图4所示。

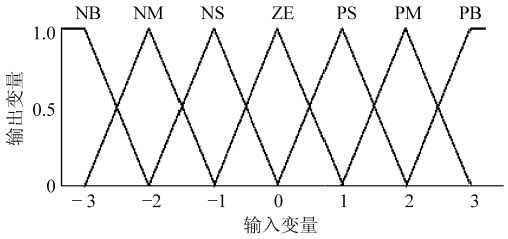


图4 输入及输出变量三角形隶属度函数

Fig. 4 Triangle membership function of input and output variables

把在[-3,3]之间变化的连续量分为7挡,每一挡对应一个模糊集,实现模糊化过程,如表2所示。

**表2 $x$ 点的模糊化**

**Tab. 2 Fuzzy of $x$**

| $x$ 范围 | (-∞,-2.5) | [-2.5,-1.5) | [-1.5,-0.3] | (-0.3,0.3) | [0.3,1.5] | (1.5,2.5] | (2.5,∞) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 模糊集 | NB | NM | NS | ZE | PS | PM | PB |

(5)制定模糊推理规则:永磁同步电动机为二阶系统,依据其阶跃响应的过程特征、输入与输出的关系以及PI参数对系统阶跃响应的作用,来制定模糊推理规则。基于PI参数对系统性能影响,整定方法基本原则见文献[12]。

(6)模糊推理决策:模糊规则确定后,接着进行模糊推理。对于模糊推理决策,采用Mamdani算法,它是基于极大极小关系的推理算法,计算过程较容易在程序中实现[13]。

(7)解模糊:采用加权平均法,将所得各隶属度 $\mu(u_i)$ 与其对应的论域值 $u_i$ 乘积之和再除以隶属度之和,能够顾及各个隶属程度不同的元素,不会造成对某部分控制作用的忽略,简单易行。加权平均法执行量为

$$u_{\max} = \sum \mu(u_i)u_i \Big/ \sum \mu(u_i)$$

最后得到的模糊控制,如表3、4所示。

**表3 $\Delta K_p$模糊控制**

**Tab. 3 Fuzzy control of $\Delta K_p$**

| $e$ | $e_c$ | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | -3 | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 |
| -3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 0 |
| -2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 | 0 | 1 |
| -1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 |
| 0 | 2 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 |
| 1 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 3 |
| 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| 3 | 0 | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 |

**表4 $\Delta K_i$模糊控制**

**Tab. 4 Fuzzy control of $\Delta K_i$**

| $e$ | $e_c$ | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | -3 | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 |
| -3 | -2 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| -2 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 |
| -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| 2 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 3 | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |

## 2.2 模糊 PI 复合型控制器仿真

利用 Matlab/Simulink 模糊逻辑工具箱,设置 $e$、$e_c$和 $\Delta K_p$、$\Delta K_i$,论域范围均为[-3,3],模糊推理算法采用 Mamdani 算法,解模糊采用 centroid(加权平均)法,设置三角形隶属度函数,完成添加模糊控制规则到编辑器的编辑。然后用模糊逻辑工具箱中的 Fuzzy Logic Controller 模块建立模糊 PI 控制器,如图5所示。然后将图5的模糊 PI 控制器嵌入图6中,再将图6的 diq-uq 模块嵌入图7。在图7中,设置电动机模型参数和图2中的参数相同。

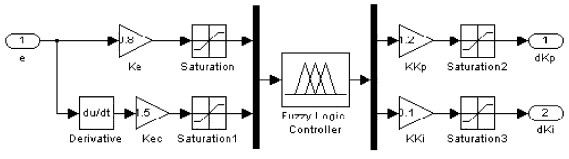


图5 模糊 PI 控制器

Fig. 5 Fuzzy-PI controller

模糊控制的仿真结果如图8和图9所示。从图中可以看出,嵌入模糊 PI 控制器后,电流、转速、转矩响应超调小,比较平稳,转矩响应改善明显;$i_q$ 响应波动也比较小,意味着电动机运行更平稳。

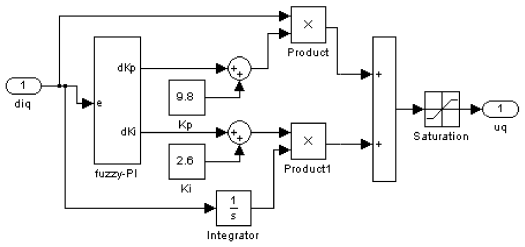


图 6　模糊 PI 控制器嵌入 diq-uq 模块

Fig. 6　Fuzzy-PI controller embedded in diq-uq module

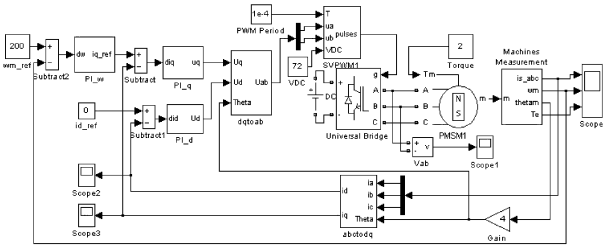


图 7　双闭环控制仿真

Fig. 7　Double-loop control simulation

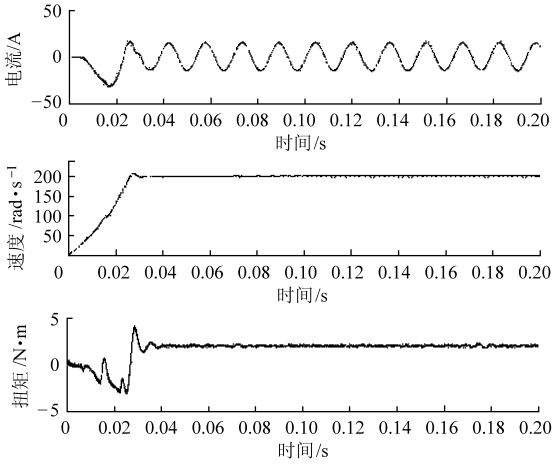


图 8　电流、转速、转矩响应曲线

Fig. 8　Response curve of current, speed and torque

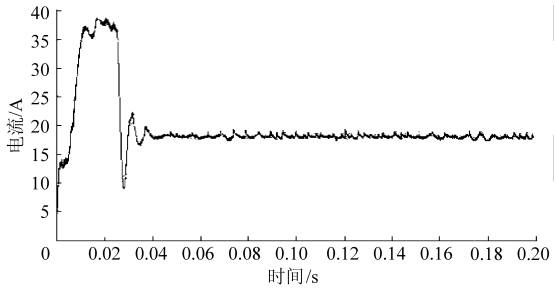


图 9　$i_q$ 响应曲线

Fig. 9　Response curve of $i_q$

## 3　基于模糊 PI 电动机控制实验

所选电动机为 160ZWS001 型内嵌式永磁同步电动机，性能参数为：极对数 4，额定电压 72 V，额定电流 22 A，额定功率 1.5 kW，最大功率 3 kW，额定转速 2 800 r/min，最高转速5 600 r/min，最高效率大于等于 85%。模拟实际电动车负载，采用 HELISTAR 磁粉制动器，额定转矩为 100 N·m，激磁电流 0 ~ 2.2 A 。

### 3.1　模糊 PI 控制效果验证

在负载为 20 N·m 时，进行模糊 PI 控制与常规 PI 控制的实验，将实验数据导入 Excel，如图 10 所示。

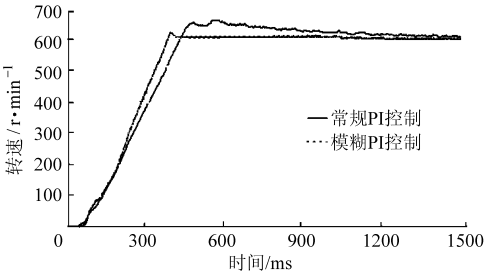


图 10　20 N·m 负载时转速响应曲线比较

Fig. 10　Speed response curve under 20 N·m

从图中看出，在负载下相对于常规 PI 控制，在模糊 PI 控制下系统的响应更快、超调更小、能更迅速地到达指令值，且运行更平稳。

### 3.2　弱磁扩速的规则与实验

在控制程序中，单纯地通过对转速或变调率（调制电压与直流母线电压的比值）的检测来判断是否进行弱磁都是不全面的。因为电动汽车可能处于以下两种状况：

（1）高速下坡，此时电动机转矩不需要输出最大，电流也没有达到极限值，从而变调率小于 1，如果仅通过速度条件的判断（此时转速可能大于转折转速）而进行弱磁是没有必要的。

（2）低速上坡，此时电动汽车要求尽可能大的转矩，对转速要求不高，电动机转速小于转折转速，如果仅通过变调率条件的判断（此时变调率可能大于 1）而进行弱磁是非常危险的，因为弱磁状态下，输出转矩会随交轴电流的减小而减小，在爬坡状况下会对电动机造成很大伤害。

因此，需要设置转速和变调率的双重判断条件来决定是否进行弱磁。首先进行转速判断，在电池和逆变器确定的情况下，通过实验可以得到转折转速 $n_c$，为了避免电动机在 $n_c$ 附近振荡，需设置一个速度滞环 $v_l$ ~ $v_h$，电动汽车加速超过 $v_h$ 时进入弱磁控制函数，减速低于 $v_l$ 时退出弱磁控制函数，恢复到 $i_d = 0$ 的控制。

进入弱磁函数后，再判断变调率大小，变调率大于 1 时，开始弱磁扩速，以直流母线电压与调制电压的差值（即直流电压反馈）作为控制量进行 PI 控制，输出矢量控制的指令值 $i_d^*$（$i_d^* < 0$）。若变调率小于 1，则 PI 控制器不起作用，即 $i_d^*$ 输出为 0，依然采用 $i_d = 0$ 的控制。

弱磁控制的算法流程图如图 11 所示。在额定负载下,给定不同转速(低于转折速度、邻近转折速度和高于转折速度),来记录和观察相应的 $i_d$、$i_q$,如图 12 所示。

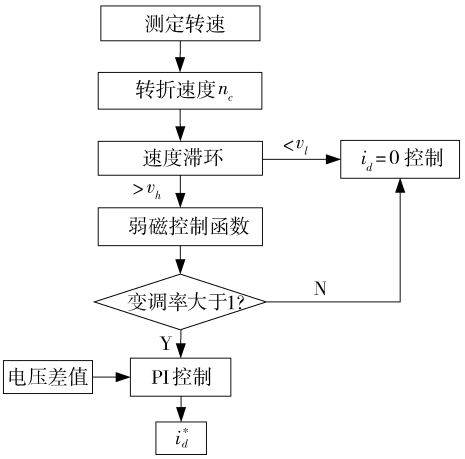


图 11 双判断条件控制流程图

Fig. 11 Diagram of double judgment control

从图中可以看出,当转速指令值为 1 500 r/min 时,转速低于转折速度,电动机运行于 $i_d = 0$ 状态,$i_d$、$i_q$ 波动较小,电动机运行较稳定;当转速指令值上升到 3 000 r/min 时,转速接近转折速度,电动机工作状态邻近弱磁点,$i_d$、$i_q$ 波动变大,此时屏蔽弱磁扩速模块,继续提高转速指令值,电动机将工作在磁饱和状态而无法继续有效提速;打开弱磁扩速模块,电动机转速则继续升高至指令值 4 500 r/min,但因电动机处于非正常工作状态,$i_d$、$i_q$ 波动更为剧烈,且 $i_d$ 明显处于负值(平均值约为 -15 A),说明电动机已经工作于弱磁扩速状态,并且至少可以使电动机转速有效拓展 50%。

## 4 结束语

在电动机驱动双闭环矢量控制系统中嵌入了模糊 PI 复合型控制器,结合 IPMSM 电动机的自身特点,采用了分段式矢量控制策略,在程序中设置转速和变调率的双重判断条件来确定是否进入弱磁函数控制,有效地扩展了电动机的可控速度范围。最终算法的实现,使系统具有更快更稳定的响应性能,电动机输出转矩更加平稳,提高了电动汽车的驾驶舒适性和灵活性。

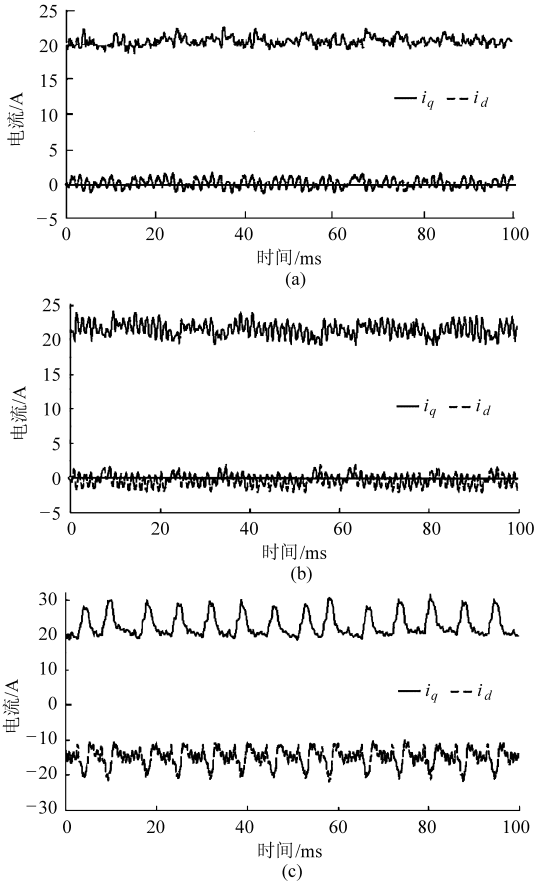


图 12 3 种速度情况下的电流 $i_d$ 和 $i_q$

Fig. 12 Response curve of $i_d$ and $i_q$ under three different velocities

(a) 1 500 r/min (b) 3 000 r/min (c) 4 500 r/min

## 参 考 文 献


1 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.
Wang Wei, Wang Qingnian, Chu Liang, et al. Evaluation regime of traction motor for hybrid electric vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 20 ~ 25. (in Chinese)

2 李雯,张承宁,宋强,等. 混合动力汽车电机驱动系统二维载荷谱研究[J]. 农业机械学报,2010,41(7):21 ~ 24.
Li Wen, Zhang Chengning, Song Qiang, et al. 2-D load spectrum for motor propulsion system on hybrid electric vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 21 ~ 24. (in Chinese)

3 Cetin Elmas, Oguz Ustun, Hasan H Sayan. A neuro-fuzzy controller for speed control of a permanent magnet synchronous motor drive[J]. Expert Systems with Applications, 2008, 43(1): 657 ~ 664.

4 方一鸣,任少冲,王志杰,等. 永磁同步电动机转速自适应模糊 Backstepping 控制[J]. 电机与控制学报,2011,15(6):97 ~ 103.
Fang Yiming, Ren Shaochong, Wang Zhijie, et al. Adaptive fuzzy Backstepping control for speed of permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Machines and Control, 2011, 15(6): 97 ~ 103. (in Chinese)

5 于金鹏,陈兵,于海生,等. 基于自适应模糊反步法的永磁同步电机位置跟踪控制[J]. 控制与决策,2010,25(10):

1 547 ~ 1 552.
Yu Jinpeng, Chen Bing, Yu Haisheng, et al. Adaptive fuzzy backstepping position tracking control for permanent magnet synchronous motor[J]. Control and Decision,2010,25(10):1 547 ~ 1 552. (in Chinese)

6 Guo Yajun, Long Huo. Self organizing fuzzy sliding mode controller for the position control of a permanent magnet synchronous motor drive[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2011,2(2): 109 ~ 118.

7 张细政,王耀南,袁小芳. 永磁同步电机自适应模糊滑模变结构控制[J]. 中国机械工程,2010,21(2):206 ~ 212.
Zhang Xizheng, Wang Yaonan, Yuan Xiaofang. Adaptive fuzzy sliding-mode control for PM synchronous motor[J]. China Mechanical Engineering,2010,21(2):206 ~ 212. (in Chinese)

8 蒋城峰. 基于双模糊控制的永磁同步电机直接转矩控制系统[D]. 长沙:中南大学,2008.
Jiang Chengfeng. Direct torque control based on double fuzzy for PMSM [D]. Changsha:Central South University,2008. (in Chinese)

9 肖石伟. 基于自适应模糊的永磁同步电机直接转矩控制[D]. 广州:华南理工大学,2010.
Xiao Shiwei. Direct torque control based on adaptive fuzzy for PMSM[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2010. (in Chinese)

10 Han Ho Choi, Jin-Woo Jung. Takagi－Sugeno fuzzy speed controller design for a permanent magnet synchronous motor [J]. Mechatronics, 2011,21(8):1 317 ~ 1 328.

11 Astrom K J, Hagglund T. Revisiting the Ziegler－Nichols step response method for PI control [J]. Journal of Process Control, 2002,4(4):364 ~ 380.

12 杨玉巍. 基于 DSP 的无刷直流电机模糊控制系统研究[D]. 西安:西北工业大学,2006.
Yang Yuwei. Fuzzy control system based on DSP for brushless DC motor [D]. Xi'an:Northwestern Polytechnic University, 2006. (in Chinese)

13 叶军军. 基于模糊控制的永磁同步电机矢量控制系统的研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2006.
Ye Junjun. Vector control system based on fuzzy for PMSM [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2006. (in Chinese)

(上接第 7 页)

3 胡建军,赵玉省,秦大同. 基于 CAN 通信的混合动力系统硬件在环仿真实验[J]. 中国机械工程, 2008, 19(3): 300 ~ 304.
Hu Jianjun, Zhao Yusheng, Qin Datong. Hardware-in-loop simulation of HEV system based on CAN[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(3): 300 ~ 304. (in Chinese)

4 张承宁,吴静波,邹渊, 等. 履带式混合动力车辆控制策略硬件在环仿真[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(9): 790 ~ 794.
Zhang Chengning, Wu Jingbo, Zou Yuan, et al. Hardware-in-the-loop simulation on control strategy in hybrid electric transmission tracked vehicle[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2009, 29(9): 790 ~ 794. (in Chinese)

5 李国岫,张欣,宋建锋. 并联式混合动力电动汽车动力总成控制器硬件在环仿真[J]. 中国公路学报, 2006, 19(1): 108 ~ 112.
Li Guoxiu, Zhang Xin, Song Jianfeng. Hardware in loop simulation for powertrain controller of parallel hybrid electric vehicle [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1): 108 ~ 112. (in Chinese)

6 李宏才,闫清东,王伟达 等. 双模式机电复合传动方案设计与特性对比[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 31 ~ 36.
Li Hongcai, Yan Qingdong, Wang Weida, et al. Design and contrast studies of dual-mode mechanical-electronic transmission scheme[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 31 ~ 36. (in Chinese)

7 秦大同,游国平,胡建军. 新型功率分流式混合动力传动系统工作模式分析与参数设计[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 184 ~ 191.
Qin Datong, You Guoping, Hu Jianjun. Operation mode analysis and parameters design of a novel power split hybrid transmission system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(2): 184 ~ 191. (in Chinese)

8 Xiong Weiwei, Yin Chengliang, Zhang Jianwu, et al. Series-parallel hybrid control strategy design and optimization using real-valued genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 22(6): 862 ~ 868.

9 Liu J M, Peng H. Modeling and control of a power-split hybrid vehicle [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2008, 16(6): 1 242 ~ 1 251.

10 Lin C C, Jeon S, Peng H, et al. Driving pattern recognition for control of hyhrid electric trucks[J]. Vehicle System Dynamics, 2004,42(1 ~ 2): 41 ~ 58.