

# 基于软件的轿车举窗永磁直流电机热保护方法

施大发<sup>1,2</sup>, 黄庆<sup>1</sup>, 潘小清<sup>1</sup>, 黄守道<sup>1</sup>, 刘竹<sup>1</sup>, 张金平<sup>1</sup>

1. 湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082
2. 湖南机电职业技术学院电气工程系, 长沙 410151

**摘要** 针对轿车举窗工作中产生的热量可能烧毁举窗电机的问题, 提出了一种基于软件的举窗电机热保护方法。通过分析轿车举窗永磁直流电机在三种工作状态下的温度变化原理, 建立了相应的热保护算法数学模型, 设计了电机工作温度的实时监测软件。在电源电压为 12.5V 和 14.5V 条件下对软件监测方法进行了实验验证, 结果显示, 监测温度与实测温度的误差小于 5°C, 表明该方法对电机温度变化的监测具有较高的准确性, 可实现对轿车举窗电机的热保护。该方法在无温度传感器的电机温度保护领域具有一定的应用前景。

**关键词** 永磁直流电动机; 温度监测; 热保护; 轿车举窗

**中图分类号** TM331

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.24.005

## Thermal Protection of Permanent Magnet DC Motor for Car Lifting Window Based on Software

SHI Dafa<sup>1,2</sup>, HUANG Qing<sup>1</sup>, PAN Xiaoqing<sup>1</sup>, HUANG Shoudao, LIU Zhu<sup>1</sup>, ZHANG Jinping<sup>1</sup>

1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China
2. Department of Electrical Engineering, College of Hunan Mechanical & Electrical Polytechnic, Changsha 410151, China

**Abstract** In view of the working car's lifting window produces heat can destroy the motor of lifting window, a software thermal protection method of motor for car lifting window is proposed. Firstly, through analyzing the theory of permanent magnet DC motor's temperature variation under three working states, the mathematic models of thermal protection algorithm are built, and the real-time monitor software of motor's temperature is designed. Secondly, the experimental verification of software monitoring method is carried on under voltage of 12.5V and 14.5V. At last, the result shows the error between monitor temperature and actual temperature is less than 5°C, which means this method has high accuracy in monitoring of motor's temperature variation, and can realize thermal protection for the motor of car's lifting window. It will be applied in the field of motor thermal protection without temperature sensor.

**Keywords** permanent magnet direct-current motor; temperature monitor; thermal protection; lifting window of car

### 0 引言

轿车举窗电机通常采用永磁直流电动机。由于车窗玻璃需要经常上升或下降, 电机在运行过程中, 存在各种损耗(铁耗、铜耗等), 这些损耗转化为热能, 使电机各部位的温度升高, 最终超过环境温度<sup>[1]</sup>。电机允许达到的最高温度是由电机使用绝缘材料的耐热程度决定的。在电机运行过程中, 其工

作温度在一定时间内若超过其绝缘材料的极限温度, 可能烧毁电机甚至引发火灾。因此, 给车窗电机装设温度保护装置是必要的。电机运行过程中, 温度保护装置在电机快要达到最高允许温度之前切断电源, 阻止因电机继续运行升温而烧毁电机<sup>[2]</sup>。

目前对电机的热保护已经成为研究热点。文献[3]提出利

收稿日期: 2013-03-01; 修回日期: 2013-06-28

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAH11F03); 湖南省教育厅资助科研项目(11C0481)

作者简介: 施大发, 副教授, 研究方向为自动化控制与应用, 电子邮箱: shidafa98@163.com; 黄庆(通信作者), 博士研究生, 研究方向为伺服系统及其控制, 电子邮箱: huangq0916@163.com



用参数在线辨识技术辨识电机电阻的温度,根据材料和温度的线性关系计算电机温度。文献[4]采用单片机模拟电机的积热过程和温升过程,实现热保护。此外,电机热保护也向着智能化方向发展,文献[5,6]提出用神经网络预测电机升降温,通过算法的改进实现热保护。本文研究一种基于软件的轿车举窗永磁直流电机热保护方法。

### 1 热保护算法模型的建立

轿车举窗永磁直流电机有3种工作状态,即运行状态、静止状态和堵转状态。根据举窗电机3种工作状态,建立相应的热保护数学模型,即电机运行升温模型、电机静止降温模型和电机堵转升温模型。

#### 1.1 电机运行升温模型

电机的发热计算是有内部热源时的发热计算。在计算时假定:热源是温度为 $\theta$ 的均匀发热体,其功率 $P$ 为恒值,且其比热容 $c$ 和综合散热系数 $K_T$ 也是均匀的,并且与温度无关。发热体的质量为 $m$ ,散热面积为 $A$ ,温升为 $\tau$ 。于是,热源的热平衡方程<sup>[7-9]</sup>为

$$Pdt = cmd\tau + K_T A \tau dt \quad (1)$$

等式左端为热源在时间 $dt$ 内产生的热量,右端的两项分别为消耗于发热体升温过程的热量和散失到周围介质中的热量。

$$\frac{d\tau}{dt} + \frac{K_T A}{cm} \tau - \frac{P}{cm} = 0 \quad (2)$$

其解为

$$\tau_1 = \frac{P}{K_T A} \quad (3)$$

式(2)的辅助方程为

$$\frac{d\tau_2}{dt} + \frac{K_T A}{cm} \tau_2 = 0 \quad (4)$$

其解为

$$\tau_2 = C_1 e^{-t/T} \quad (5)$$

式中, $C_1$ 为取决于具体问题初始条件的积分常数; $T$ 为发热体的发热时间常数, $T = cm/K_T A$ 。

因此,式(2)的通解,即发热体的温升为

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = \frac{P}{K_T A} + C_1 e^{-t/T} \quad (6)$$

当 $t=0$ 时,温升 $\tau=0$ ,故 $C_1 = PK_T A$ ,而

$$\tau = \frac{P}{K_T A} (1 - e^{-t/T}) \quad (7)$$

显然,当 $t \rightarrow \infty$ 时,温升 $\tau$ 将达到其稳态值。

$$\tau_s = \frac{P}{K_T A} \quad (8)$$

式(8)即为发热体产生的热量完全散失到周围介质中时的温升。

若电机接通电源时已有初始温升 $\tau_0$ ,即 $t=0$ 时, $\tau=\tau_0$ ,则式(2)的通解为

$$\tau = \tau_0 e^{-t/T} + \tau_s (1 - e^{-t/T}) \quad (9)$$

#### 1.2 电机静止降温模型

电机脱离电源后开始冷却。由于发热体已不再吸收能量,故式(1)变为

$$cmd\tau + K_T A d\tau = 0 \quad (10)$$

其解为

$$\tau = C_2 e^{-t/T}$$

由于 $t=0$ 时, $\tau=\tau_s$ ,故积分常数 $C_2=\tau_s$ 。因此,冷却过程的表达式为

$$\tau = \tau_s e^{-t/T} = \frac{P}{K_T A} e^{-t/T} \quad (11)$$

#### 1.3 电机升降温模型的离散化

在升降温模型公式中,对于 $e^{-t/T}$ 的计算是很复杂的。因此车窗运行到顶部或者底部时,电机处于短暂的静止状态,可以将这种运行—静止—运行近似看成短时工作制。对于短时工作制,由于 $t/T \ll 1$ ,所以 $e^{-t/T}$ 的计算可利用泰勒级数展开式,即

$$e^{-t/T} = 1 - \frac{t}{T} + \left(\frac{t}{T}\right)^2 / 2! + \dots \quad (12)$$

由于 $t/T \ll 1$ ,可由式(12)的前两项进行计算,从而使计算过程大为简化。

设 $t_1, t_2$ 分别为反复短时工作制电机的工作时间和休息时间, $T_1, T_2$ 分别为电机发热时间常数和冷却时间常数,则电机工作时第一个周期内发热温升为

$$\tau_1 = \tau_0 e^{-t_1/T_1} + \tau_\infty (1 - e^{-t_1/T_1}) \quad (13)$$

在 $t_2$ 时间内散热温度降至 $\tau'_1$ ,

$$\tau'_1 = \tau_0 e^{-t_2/T_2} \quad (14)$$

则在第 $k$ 个周期工作时,

$$\begin{cases} \tau_k = \tau'_{k-1} e^{-t_1/T_1} + \tau_\infty (1 - e^{-t_1/T_1}) \\ \tau'_k = \tau_k e^{-t_2/T_2} \end{cases} \quad (15)$$

根据上面对 $e^{-t/T}$ 的处理,将式(15)简化为

$$\begin{cases} \tau_k = \tau'_{k-1} + t_1/T_1 (\tau_\infty - \tau'_{k-1}) \\ \tau'_k = \tau_k (1 - t_2/T_2) \end{cases} \quad (16)$$

这样,可以利用微机硬件、软件的配合,对每一个工作周期实时采样 $t_1, t_2$ 及 $k$ ,然后按式(16)进行计算,可实时计算出电机温度。

同时,式(16)可以写为

$$\begin{cases} \tau_k = \tau'_{k-1} (1 - t_1/T_1) + (t_1/T_1) \tau_\infty \\ \tau'_k = \tau_k (1 - t_2/T_2) \end{cases} \quad (17)$$

在举窗电机工作时间 $t_1$ 和暂停时间 $t_2$ 一定的情况下, $(1 - t_1/T_1)$ 、 $(1 - t_2/T_2)$ 为常数( $T_1$ 和 $T_2$ 在50ms间隔内近似不变)。这样,电机当前升温 $\tau_k$ 是前一时刻温度 $\tau'_{k-1}$ 的一次函数,电机当前降温 $\tau'_k$ 为前一时刻温度 $\tau_k$ 的一次函数。

#### 1.4 电机堵转升温模型

电机堵转时间最多为400ms,属于短时过负荷现象,可以把电机的温升看成是没有散热的发热过程。这时绕组的温度

随损耗和时间直线上升,则有

$$\tau = \frac{\Delta P}{cG} t_g \quad (18)$$

式中,  $G$  为绕组质量;  $\Delta P$  为电机损耗;  $t_g$  为堵转时间。

在这种情况下,温升可以用发热曲线起始部分的切线表示,即

$$\tau = t_g \frac{\tau_\infty}{T_1} \quad (19)$$

式中,  $\tau_\infty$  为稳定温升。

计算短时堵转温升时,可认为电机损耗与稳定温升和电流的平方成正比:

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_n} = \frac{\tau_\infty}{\tau_n} = \frac{I^2}{I_n^2} = h^2 \quad (20)$$

将式(20)代入式(19)得

$$\tau = \frac{\tau_n t_g h^2}{T_1} \quad (21)$$

则发生堵转时的温升为

$$\tau = \frac{\tau_n t_g h^2}{T_1} + \tau_0 \quad (22)$$

根据上述可将电机堵转温升的表达式简化为

$$\tau = K_U t_g + \tau_0 \quad (23)$$

式中,  $K_U$  为不同电压下堵转时温升的斜率。

在某一电压  $U$  下电机堵转时,分别测得不同时刻 ( $t_{g1}, t_{g2}, \dots$ ) 的温度,代入上式可求得  $K_U$ ,进行多次测量求取  $K_U$  平均值。同理,可求取不同电压下电机堵转时  $K_U$  的平均值。然后拟合出  $U$  与  $K_U$  的函数表达式  $K_U = f(U)$ ,代入式(23)得

$$\tau = f(U) t_g + \tau_0 \quad (24)$$

利用式(24)可求得任意电压下电机堵转时的温升。电机堵转时的温升是堵转前温升的一次函数。

## 2 热保护软件的设计

基于车窗升降电机温升过程模型的软件设计方法,本文尽可能优化代码使代码占用的存储空间最小,以降低轿车电子控制单元 ECU 的硬件成本。下面对所开发算法软件的设计原理、程序总体结构、功能分配、模块划分和运行设计等进行说明,为详细设计奠定基础。

### 2.1 设计原理

电机的工作状态为运行和堵转时温度升高,工作状态为静止(停转)时温度下降。实验表明,电机运行时其温度按指数函数增长,电机静止时其温度按指数函数下降,依据理论分析,电机当前温度等于前一时刻温度加上这段时间内的温度变化量。因此,热保护算法的原理是将实际升、降温曲线各划分为 8 段温度区间,各温度区间采用斜率不同的线段来逼近升、降温曲线<sup>[10-12]</sup>。

热保护算法程序通过状态识别子函数判断电机的工作状态,根据电机状态确定实时的升温点或降温点,再按实时的升温点或降温点划分升温或降温曲线的 8 个区间,同时确定各温度区间相应的温度变化斜率。

### 2.2 总体流程

电机三种工作状态之间的转换规律为:运行—静止,静止—运行,运行—堵转,堵转—静止。热保护模块在每次计算温度时,首先要判断当前电机处于何种工作状态。若判断电机工作状态没有发生变化,则继续用之前的温度计算子模块计算电机温度。若判断电机工作状态发生了变化,先调用消抖函数确认电机状态是否真的发生变化,如果确认电机状态发生了变化,再根据变化后的电机状态,调用相应的温度计算子模块,计算电机在 50ms 时间内的温度变化量,并与此前的电机温度相加,求得电机当前温度。软件的总体流程如图 1 所示。

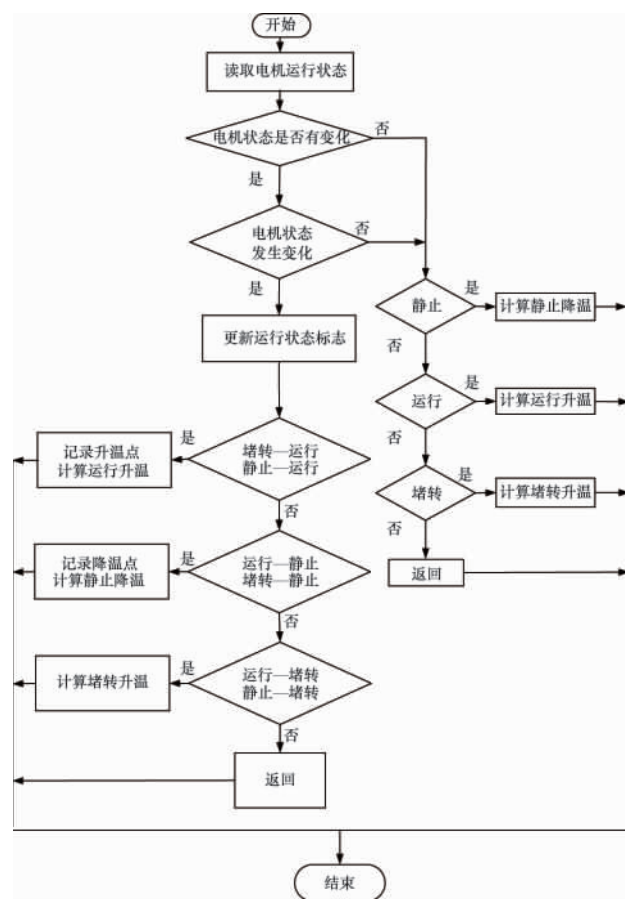


图 1 软件的总体流程

Fig. 1 Flow chart of software

### 2.3 电机运行升温计算模块

该模块用于计算电机运行过程中电机的温升。首先调用升温区间斜率计算子函数,从该函数中读取相应的升温斜率,该斜率是电机在 50ms 时间内的温度增加量  $\Delta\tau$ ,并与此前的电机温度相加,得到电机当前温度,若计算温度大于最高极限温度时,当前温度变量等于最高极限温度。同时,该模块能在判断电机状态变化过程中累计增量误差,在确定电机状态时,该误差用于修正电机工作状态变化后的温度计算基准。



### 2.4 电机静止降温计算模块

该模块用于计算电机从运行或堵转状态转换为静止状态后的降温计算。首先调用降温区间斜率计算子函数,从中读取相应的降温斜率,该斜率是电机在 50ms 时间内的温度减小量  $\Delta\tau$ ,然后与此前电机的温度相减,得到当前电机的温度,若计算温度小于最小极限温度时,当前温度变量等于最小极限温度。同理,该模块能在识别电机状态变化过程中累计增量误差,在确定电机状态为静止时,该误差用于修正电机工作状态变化后的温度计算基准。

### 2.5 电机堵转升温计算模块

轿车车窗系统默认在电机持续堵转 400ms 后切断电源。堵转过程中,为确保电机安全,轿车 ECU 仍然会每 50ms 监测一次电机温度,若电机温度超过最高允许温度,则切断电机电源,保证电机不会因温度过高而烧毁。

### 2.6 电机状态转换标记模块

该模块的功能是识别电机的工作状态是否发生了转换,以及发生了何种转换。

### 2.7 电机状态识别模块

该模块的功能是识别电机的当前状态。软件识别流程图 2 所示。

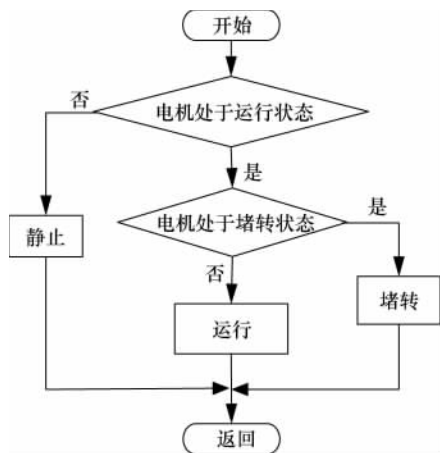


图 2 电机运行状态识别流程

Fig. 2 Motor operation recognition diagram

## 3 电机温度实验

根据上述热保护方法的原理,搭建了电机温度实验平台,将软件监测温度与实测温度相比较,验证本文方法的准确性和可靠性。

### 3.1 技术指标及设备

环境要求:考虑到电机要有一定的环境承受能力,所以设定环境温度为 80°C。

电源要求:电机的供电电压范围为 9~16V,最大输出电流 30A。

实验设备:温箱、轿车前门、电压源、温度测量仪、电脑、

电机、电机控制盒、数据线等。

### 3.2 实验方法

在进行实验时,将轿车前门放入温箱中,关闭温箱门。开启温箱进行加热,在电机温度升至设定环境温度 80°C 时,开始运行热保护软件程序。安装在轿车电子控制单元 ECU 中的热保护软件可实时计算出电机的温度变化值,并通过数据线传至试验用计算机。实验平台总框图如图 3 所示。

实际温度通过温度传感器测量,即在电机的碳刷上加装热电偶,将其连接至温度测量仪,对电机工作温度进行实时测量。

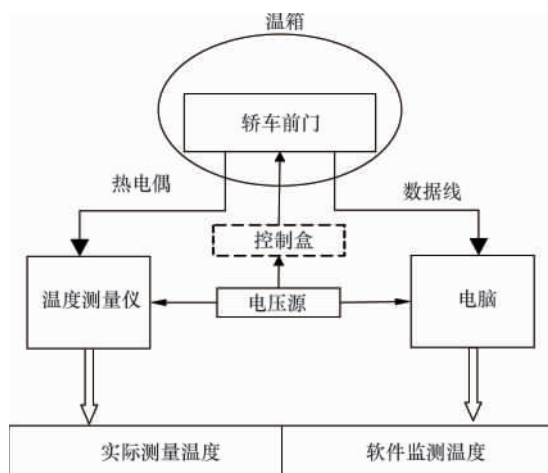


图 3 实验平台总框图

Fig. 3 Experimental platform

### 3.3 实验结果

为了模拟实际轿车举窗电机的工作环境,电机实验的电源电压采用 14.5V 和 12.5V,电机的工作状态为运行—静止交替进行。在两组电压下,电机升温/降温曲线分别如图 4 和图 5 所示,为便于分析,按时间顺序给升、降温点排序。从图中可以看出,在升温阶段,电机温度越接近环境温度 80°C 时,软件监测温度越准确,例如从升温点 1 至降温点 2,升温

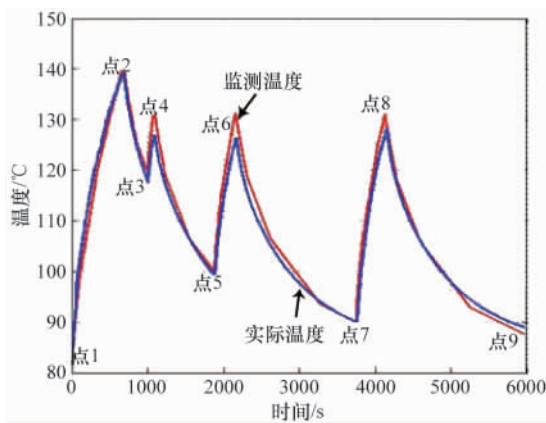


图 4 14.5V 电压下的温度曲线

Fig. 4 Temperature curve under 14.5V

点7至降温点8,软件监测温度曲线与电机实际温度曲线接近。在降温初期阶段,软件监测温度与电机实际温度有一定误差,例如从降温点4至升温点5,降温点6至升温点7,两者误差比较明显。在降温中后期,软件监测温度接近电机实际温度。

在两种实验条件下,电机温度的软件监测值与实测值的误差曲线分别如图6和图7所示,可以看出两种条件下软件

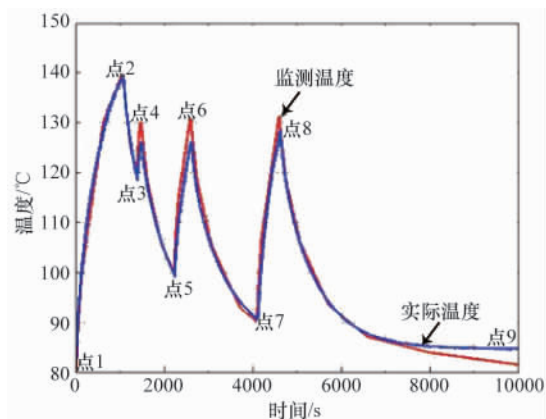


图5 12.5V电压下的温度曲线  
Fig. 5 Temperature curve under 12.5V

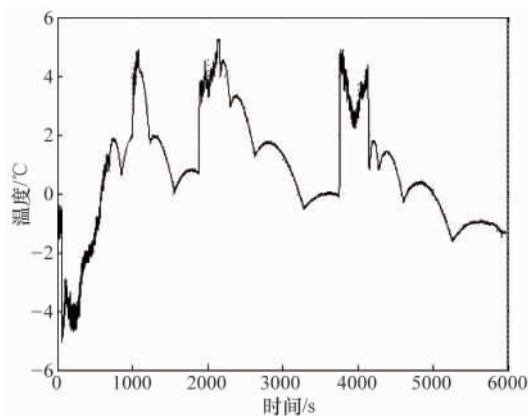


图6 14.5V电压下的温度误差曲线  
Fig. 6 Temperature error curve under 14.5V

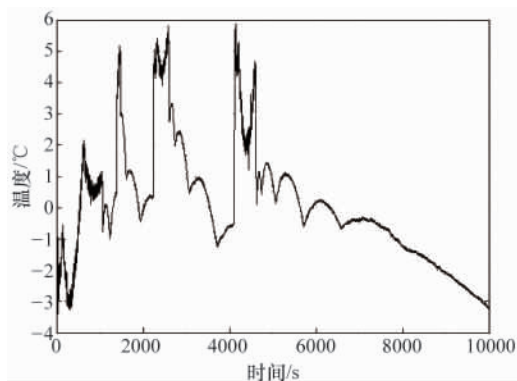


图7 12.5V电压下的温度误差曲线  
Fig. 7 Temperature error curve under 12.5V

监测温度与实测温度的误差均保持在5°C之内,说明该软件监测方法具有较高的准确性。

#### 4 结论

本文在对轿车举窗电机三种工作状态模型分析的基础上,设计了举窗用永磁直流电机的热保护软件算法,并提出了具体的实现方案。通过搭建电机温度实验平台,验证了本文方法能可靠、准确地实现电机的热保护,可用于无温度传感器的车窗电机中。本文方法可靠性高,使用方便,维护简单,在工程实践中具有应用和推广价值。

#### 参考文献 (References)

- [1] Khalifa F A, Serry S, Ismail M M, et al. Effect of temperature rise on the performance of induction motors [C]. Computer Engineering & Systems 2009 International Conference, Cairo, Egypt, December 14, 2009.
- [2] 杨明发, 张培铭. 异步电动机热保护方法概述[J]. 微电机, 2009, 42(5): 57-60.  
Yang Mingfa, Zhang Peiming. Micro Motor, 2009, 42(5): 57-60.
- [3] 杜斌. 基于参数在线辨识技术的交流异步电动机热保护系统[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(5): 328-331.  
Du Bin. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 1996, 16(5): 328-331.
- [4] 欧阳名三, 梁喆, 金林. 采用MSP430单片机的电机保护器的研究[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8): 347-348.  
Ouyang Mingsan, Liang Zhe, Jin Lin. Chinese Journal of Science Instrument, 2005, 26(8): 347-348.
- [5] Guo Qiyi, Huang Shize, Guo Yuping, et al. Research on the forecast of the limited temperature rise of motor based on artificial neural network [C]. ICISE 2nd International Conference, Hangzhou, China, December 14, 2010.
- [6] Ballal M S, Khan Z J, Suyawanshi H M, et al. Adaptive neural fuzzy inference system for the detection of inter-turn insulation and bearing wear faults in induction motor [J]. Industrial Electronics, 2007, 54(1): 250-258.
- [7] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 161-270.  
Tang Renyuan. Modern permanent magnet motor theory and design [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2000: 161-270.
- [8] 张金平, 黄守道, 高剑. 轿车车窗用永磁直流电动机温度预测算法研究[J]. 微电机, 2011, 44(10): 33-35.  
Zhang Jinping, Huang Shoudao, Gao Jian. Micro Motor, 2011, 44(10): 33-35.
- [9] Sang B L, Habefler T G. A remote and sensorless thermal protection scheme for sinail line connected AC machines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(5): 1323-1332.
- [10] 辜承林, 陈乔夫, 熊永前. 电机学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2007.  
Gu Chenglin, Chen Qiaofu, Xiong Yongqian. Electromechanics [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2007.
- [11] Zocholl S E. Optimizing motor thermal models [C]. 2007 IEEE Conference on Industry and Commercial Power Systems - Technical Conference, Edmonton, Canada, May 6-11, 2007.
- [12] Qiu Yunfeng, Yin Jie, Wang Yi, et al. The research about sensor-less anti-pinch system for automotive electric window [C]. Computational and Information Sciences 2010 International Conference, Chengdu, China, December 17-19, 2010.

(责任编辑 韩星明)