

乘用车引擎冷却风扇控制器热保护设计与试验

Thermal Protection Design and Test for Cooling Fan Controller of Passenger Vehicle Engine

杨平

(沙洲职业工学院科研处, 江苏 张家港 215600)

摘要: 在乘用车引擎冷却风扇控制系统设计中, 如果没有充分考虑直流电机在堵转、低电压、长时间启动等情况下的电机发热量, 就会导致电机和控制器损坏, 从而给行驶中的乘用车带来极大危害。为此, 研究了直流电机在非正常工作状况下的热积累与热散发系统数学模型, 并提出了电机过载保护以及电机启动、电机堵转和电机短路等热保护方案, 具体给出了温度保护环节的设计和设定方法。相关试验表明, 该热保护系统设计合理、运行可靠。该设计方法也为类似系统保护设计提供了一种有益参考。

关键词: 热平衡保护 PWM A/D 转换 可靠性 控制系统

中图分类号: TP215 **文献标志码:** A

Abstract: In design of control system for cooling fan of passenger vehicle engine, large heat generating of DC motor under conditions of stalling, low voltage, or long period startup, etc., must be taken into account, otherwise motor and controller might be damaged, and great harm maybe brought to the running vehicle. The mathematical models for heat accumulation and heat emission for DC motor working under abnormal conditions are studied; and the thermal protection strategies for overload, startup process, stalling and short circuit, etc., of the motor; and temperature protection section W_{pHR} design and setting method are proposed. The related and experiment verify that this thermal protection system is designed reasonably and running reliably; the design method also provides beneficial reference for similar design of systematic protection.

Keywords: Heat balance protection Pulse width modulation (PWM) A/D conversion Reliability Control system

0 引言

乘用车引擎冷却风扇直流电机正常运行与否决定了乘用车能否正常行驶。冷却风扇直流电机故障通常表现为热故障, 即电机运行中产生的热量大于散发的热量, 累积的热量致使电机绝缘等级下降, 最终致使电机烧毁。电机烧毁主要是由于电机长时间过载运行、启动时间过长、启动频繁或堵转等情况引起电机过电流, 从而破坏电机积累和散发的热量平衡。这种电机热不平衡的状况给行驶中的车辆带来了极大的危险。

1 电机过热保护原理

针对直流电机运行中可能出现的热不平衡危害, 在设计直流电机控制系统时, 有必要研究电机的热量积累与热量散发模型, 才能合理、全面地保护电机, 从而避免各种危险情况发生。

1.1 电机发热积累模型

根据直流电机连续运行条件, 电机持续运行的负载能力主要取决于电机线圈绕组温度^[1]。IEC 255-8标准规定, 直流电机热积累与电机运行电流、电机额定电流大小和电流镇定倍数有关^[2]。因此, 冷热态时的直流电机热过负荷保护动作时限如式(1)、式(2)所示。

$$t_{冷} = \tau \ln \frac{I^2}{I^2 - (KI_b)^2} \quad (1)$$

$$t_{热} = \tau \ln \frac{I^2 - I_b^2}{I^2 - (KI_b)^2} \quad (2)$$

式中: t 为过负荷保护动作时限; I_b 为电动机的额定电流; I 为电动机电枢运行电流; K 为电流整定倍数, 在启动过程中 $K=0.5$, 启动完毕后 $K=1.0$; τ 为电动机热积累时间常数, 可整定, 表示电机的能力。

为实现发热模型的热积累特性, 将式(1)、式(2)合并简化为:

$$H = \left[K \left(\frac{I}{I_b} \right)^2 - 1.05^2 \right] \Delta t \quad (3)$$

式中: H 为电动机的热积累值, 表示电动机发热程度; Δt 为相邻两次热积累计算的时间间隔。

2012年度江苏省高校基金资助项目(编号: JHB2012-77)。

修改稿收到日期: 2013-03-14。

作者杨平(1970-), 男, 2000年毕业于江苏大学农业电气化与自动化专业, 获硕士学位, 高级工程师; 主要从事汽车电子与电机控制的教学与研究工作。

1.2 电机热发散模型

当热积累值 H 在 $(0, \tau)$ 区间时,说明电动机处于过负荷运行状态并有一定的热积累,但未达到保护动作的程度。此时,如果过负荷消失,保护系统应该考虑电动机的热发散情况。过负荷保护一般是采用积累的热量并按指数规律衰减的模型来模拟热发散,其表达式为:

$$H_t = H e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (4)$$

式中: H 为过负荷消除时的热积累值; τ_2 为电动机热发散时间常数; H_t 为经 t 时间衰减后剩余的热积累值。

当衰减后剩余的热积累值达到保护动作的程度时,保护系统动作,电机被关断,此时电机电枢电流 I 为 0。电机热积累散发时间的长短取决于电机的冷却时间常数 τ_{stop} , τ_{stop} 值可以整定。当 $t < 0.5\tau_{stop}$ 时,表明此时的电枢绕组温升过高,电机不允许再启动;当 $t > 0.5\tau_{stop}$ 时,电机可以重新启动。

2 电机保护方案设计

以电机运行的电流对电机温升限制为设计原则,对电动机进行过热保护是一种简单有效的保护方案,多年来一直被广泛采用^[3-4]。以微处理器为核心的电机过热保护系统,常将电机电枢电流信号转换成模拟电路可处理的电压信号。这些信号经过电路处理后送入 MCU 的模拟输入端口,进行 A/D 转换与数据处理。MCU 根据运算结果与设定保护值的比较,输出可变的 PWM 信号占空比值,从而改变电机运行状态;同时把相关故障信号以电压方波的形式反馈给发动机电子控制单元(electronic control unit, ECU)。

保护动作时间的设定值与运算结果是风扇直流电机保护的关键问题,它决定着设定的保护功能能否在恰当的时间内对电动机进行可靠性的保护,使其保护功能充分发挥潜在的过载能力,从而保证其绕组温度不超过温度极限。事实上,不同的故障类型所要求的保护特性是不同的。

2.1 过载保护方案

2.1.1 电机过载特性与保护特性

电机的过载保护,能够有效避免由于电机过载或启动失败而导致的温度过高现象^[3-4]。由于电机发热导致电机温升,其温度上升过程可表示为^[5-6]:

$$\tau = \frac{W}{H_s S} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) = \tau_{fin} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) \quad (5)$$

式中: τ 为电机温升; W 为电驱损耗; H_s 为电机散热系数; S 为电机散热面积; τ_{fin} 为电机稳定温升; t 为过载或故障运行时间; T_1 为电机发热时间常数。

当电驱损耗 W 为电机额定功率的 K 倍时, $\tau = \tau_{fin}$, 则有:

$$\tau_{fin} = \frac{KW}{H_s S} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) = K\tau_{fin} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) \quad (6)$$

即:

$$t = T_1 \ln \frac{K}{K-1} = T_1 \ln \frac{k^2}{k^2-1} \quad (7)$$

式中: K 为损耗增加倍数; k 为电流增加倍数。

由式(7)可知,电流过载倍数与电机允许过载运行时间有关。所以,只有当电机过热保护系统的时间曲线在电机的过载曲线下方时,保护系统才起作用,这样可避免电机在过载时发生频繁停机现象。

2.1.2 电流有效值的计算

电机过热保护系统的动作时间与电流有效值的大小密切相关。根据电路基本原理,可得电流有效值表达式为:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (8)$$

将式(8)离散化,可得:

$$I \approx \sqrt{\frac{1}{n\Delta T} [i^2(t_1) + i^2(t_2) + \dots + i^2(t_n)] \Delta T} = \sqrt{\frac{1}{n} [i^2(t_1) + i^2(t_2) + \dots + i^2(t_n)]} \quad (9)$$

式中: n 为一个周期内的采样次数; ΔT 为采样周期; $t_1 \sim t_n$ 为采样时刻。

采用 MCU 为核心的直流电机采样电流信号,采样周期比较灵活,设定 $\Delta T = 1 \text{ ms}$ 。考虑到计算动作时间时仅需考虑 $K_2 = I_2/I_n$ 。因此,式(9)的开方运算可不进行,这样大大提高了 MCU 的计算运行速度,即:

$$I^2 = \frac{1}{n} [i^2(t_1) + i^2(t_2) + \dots + i^2(t_n)] \quad (10)$$

2.2 电机启动过程及堵转保护方案

电机转子线圈得电后,以下几种异常情况会导致启动故障:①电机的机械故障;②电机的轴承故障;③电源电压过低等。当上述任一情况发生时,线圈转子加电后,可能出现转子不转或长时间启动不成功,此时,直流电机类似于一个二次侧为纯阻性负载的变压器,电流为电机额定电流的 5~8 倍,其值取决于电机设计和电源阻抗^[7-8]。按 6 倍电机转子阻抗值考虑,加上集肤效应电阻(按 3 倍电机转子阻抗值计算),则此时电机发热量约为正常工作时的 108 倍。由于温度上升很快,近似于绝热状态下的发热过程,这时可以把电动机看作单纯发热体,此时温升计算如下:

$$\tau = \tau_{fin} \times \frac{t}{T_1} \quad (11)$$

若电流过载倍数为 k , 单位时间内电机绝热状态下的发热量增大 k^2 倍, 则发热时间计算公式为:

$$t = T_1 \times \frac{1}{k^2} \quad (12)$$

2.3 短路保护方案

2.3.1 短路电流的测量与判断

当电机内部或外部发生短路时, 由于短路电流很大, 在出现故障的瞬间将产生巨大的能量, 所以导致的破坏后果非常严重。因此, 对短路故障的保护应该马上动作, 且越快越好。若采用式(10)计算短路电流, MCU 至少需要半个时钟周期响应时间。为了尽快检测到短路电流, 每采集到一次电流信号(系统设定 300 ms 采样一次), 都要将其和设定值进行比较, 这样不到二分之一周期就可测出短路电流^[9-10]。因此, 在电机运行过程中, 当控制系统连续 4 次检测到测量值 $i(t_k)$ 大于短路电流设定值 I_r , 即 $i(t_k) > I_r$ 时, 保护系统立即动作, 这样可降低电机由于短路而烧坏的可能性。

2.3.2 短路保护方案的选择

为了提高短路保护的可靠性, 防止短路故障引起控制系统不动作, 保护系统还设计了模拟脱扣电路, 作为后备瞬时动作保护。模拟脱扣电路不受控制系统 CPU 控制, 加快了响应速度, 提高了短路保护的可靠性。

2.3.3 保护环节的作用

由于电机中最常见也最严重的非正常工作状态就是因过负荷引起的过电流。该电流将直接导致风扇电机的温升^[11-13]。因此, 本文设计了保护环节, 该环节为开环控制, 其具体的功能如下。

① 适时检测风扇电机的温度情况, 并记录温度值;

② 根据记录的温度采样值, 比较温度采样值与温度设定值大小, 如果温度采样值大于温度设定值, 则相应温度标志位置位。

2.3.4 保护环节的设计

理论上, 在由 PWM 斩波控制器和直流电机构成的机电系统中, 可以把 PWM 斩波控制器看作是一个积分环节和一个比例环节的复合, 可以把直流电机看作是一阶惯性环节, 其机电系统保护环节的控制数学模型框图如图 1 所示。



图 1 过热保护环节数学模型框图

Fig. 1 The mathematical model of overheat protection sector

图 1 中: T_0 为系统保护温度设定参考值; T 为实际温度采样值; $W_{\text{phr}}(S)$ 为电机热保护环节; K_{PWM} 为 PWM 斩波控制器比例放大系数; $\frac{1}{TS+1}$ 为一阶惯性环节;

$\frac{1/C_e}{T_i S + T_m S + 1}$ 为一阶惯性环节 $\frac{1/R}{T_m S + 1}$ 、积分环节 $\frac{R}{T_i S}$ 和比例环节 $\frac{1}{C_e}$ 的复合, 其中 R 为机电系统对电流的等效阻抗, T 为机电系统惯性时间常数, T_m 为电机惯性时间常数, T_i 为控制器惯性时间常数, C_e 为 PWM 斩波控制器等效电容。

控制器热保护算法描述如下。

步骤 1: 采样并记录温度采样值。

步骤 2: 将温度值变换为正系数值。

步骤 3: 温度值分布密度处理, 将数据分布密集处的数据拉开, 将分布较松散处的数据压缩。

步骤 4: 根据处理后的数据, 判定温度情况, 具体如下。

① 当温度值过高时, 温度过高标志位置位(当 PWM 输出时, 如果查询到这一标志置位, 则停止输出); 当温度值下降到比此时温度低一个 $\Delta\tau$ 时, 温度过高标志位复位。

② 当温度值很低时, 温度过低标志位置位(当 PWM 输出时, 查询到这一标志置位, 可以全速输出); 当温度值升高到比此时温度高一个 $\Delta\tau$ 时, 温度过低标志位复位。

3 试验过程

3.1 电机堵转试验

在常温 25 °C、相对湿度 85% 的环境中, 给控制器加上 15 VDC 直流电源, 使用外力迫使冷却风扇静止而导致驱动电机堵转。在试验时间为 2 h, 强制控制器 PWM 斩波电压输出占空比 100% 的情况下, 使用福禄克热成像仪检测控制器和直流电机的发热温度。在 2 h 试验时间内, 控制器输出端稳态电感线圈最高温度为 110.3 °C, 控制器 MOSFET 管的最高温度为 41.6 °C, 主风扇电机本体外壳的最高温度为 46.7 °C, 副风扇电机线圈的最高温度为 42.5 °C。在冷却风扇主、副电机堵转 2 h 的情况下, 控制器和主、副电机本身最高发热温度在许可范围内, 从而表明控制过热保护系统设计安全可靠。

3.2 电机全速运行试验

电机全速运行试验的条件与电机堵转试验相同。这时, 使控制器输出 PWM 斩波(占空比 100%), 使得主、副电机分别带动主、副冷却风扇全速运行 2 h。经

试验可知,控制器输出稳波电容的最高温度为48.3℃,输出稳波电感为45.3℃,均在安全范围之内。主风扇电机在全速运行2h内,电机磁钢温度稳态值为54.5℃,电机转子线圈温度稳态值为25.9℃,均在安全范围之内。以上试验表明,过热保护控制系统设计合理、控制系统安全可靠。该设计方法也可作为类似过热保护系统设计提供借鉴。

4 结束语

基于热平衡的热保护设计技术在电力系统、电源技术、风电系统等领域已经有了较多应用^[13],本文将该技术引入到乘用车引擎冷却风扇控制系统则是一种有益的尝试。该方法适合于交直流电机调速系统中频繁启动、长时过载等热保护应用场合,例如应用于负载变化大的电力拖动控制系统保护、高温工作环境电源保护系统、发热量大的电力电子装置等应用场合。

参考文献

[1] 迟长春,李奎,岳大为. 基于热积累的过载保护算法[J]. 电力系统及其自动化学报,2008(2):52-56.
 [2] 魏佳丹,周波,韩楚,等. 一种新型绕组开路型永磁电机启动/发电系统[J]. 中国电机工程学报,2011,31(36):86-94.
 [3] Matteo L. New and advanced cooling system concept for small cars[J].

Vehicle Thermal Management Systems,2003(6):685-694.

[4] 王彦文,黄益庄,苏诚. 矿用低压电动机智能型保护装置的研究[J]. 电力系统及其自动化学报,1998(6):40-45.
 [5] 邓文浪,陈智勇,段斌. 提高双馈式风电系统故障穿越能力的控制策略[J]. 电机与控制学报,2010,12(4):15-22.
 [6] Liu J B, Qin X X, Lin H, et al. Analysis on circulating current of parallel inverter with SPWM modulation for AC motor drive[C]// Proceedings of 4th ICMIC,2012:802-809.
 [7] Holmes D G. A general analytical method for determining the theoretical harmonic components of carrier based PWM strategies [C]//IEEE Industry Applications Society Annual Meeting,1998:1207-1214.
 [8] 王华强,石荣荣,杨滢光,等. 一类时变时滞系统的稳定性判据[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2011(8):1146-1121.
 [9] Jin J Q, Xu Y Q. Microprocessor based phaselocked LOOP speed control system for AC motor[J]. Journal of China Textile University, 1991,8(3):23-28.
 [10]野口昌介. 电动机实用技术 [M]. 北京:机械工业出版社,1987.
 [11]刘刚,王志强,房建成. 永磁无刷直流电机控制技术与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2008:14-31.
 [12]李晓华,尹项根,陈德树. 中小型电动机综合保护装置研制[C]//全国高校电力系统及自动化专业第十五届学术年会论文集,武汉,1999:662-666.
 [13]张波,李忠,毛宗源,等. 一类永磁同步电动机混沌模型与霍夫交叉[J]. 中国电机工程学报,2001,21(9):13-17.

(上接第8页)

像振铃效应造成的假象。采用非均匀内插法重建图像的平均梯度次之,采用凸集投影法和统计复原法重建图像的平均梯度依次减小。

经比较分析,不考虑振铃效应明显的迭代反向投影法。综合考虑各种算法的用时、信息熵及平均梯度可知,非均匀内插法是最好的图像重建算法。根据主、客观评价标准,彩色序列车牌图像复原采用非均匀内插法重建图像的效果最好。

5 结束语

本文对彩色序列车牌图像超分辨率复原方法进行了研究,采用支持向量机对模糊车牌图像的模糊类型进行了辨识。根据解模糊图像,在RGB色彩空间中分别采用均方误差匹配准则和平均绝对误差匹配准则,并利用多种块匹配算法对车牌图像进行运动估计,得到了最佳运动估计方法。

根据得到的运动估计参数,分别采用非均匀内插法、迭代反向投影法、凸集投影法、统计复原法4种不同的图像重建方法进行超分辨率重建,对比分析了不

同复原算法得到图像的优劣,找出了最佳图像重建算法——非均匀内插法。该算法是一种既经济又容易实现的图像分辨率提高方法,能带来巨大的经济效益,具有良好的应用前景。

参考文献

[1] 李宾. 车牌识别中图像超分辨复原方法的研究[D]. 天津:河北工业大学,2007.
 [2] 吴炜,杨晓敏,卿粼波,等. 基于马尔可夫随机场的低分辨率车牌图像复原算法[J]. 计算机应用研究,2010,27(3):1170-1172,1186.
 [3] 李楠,路小波. 基于小波融合的车牌模糊图像复原算法[J]. 公路交通科技,2011,28(3):133-137.
 [4] 李宇成,贾宝华,杨光明. 运动模糊图像的参数估计与恢复[J]. 计算机工程与设计,2010,31(19):4247-4249,4277.
 [5] 赵新勇,路小波,李楠. 车辆运动模糊图像复原方法[J]. 交通信息与安全,2009,27(6):11-13.
 [6] Nguyen N, Milanfar P, Golub G. Efficient generalized cross-validation with applications to parametric image restoration and resolution enhancement[J]. IEEE Transactions on Image Processing,2001(10):1299-1308.
 [7] 顾亚芳. 高斯模糊图像的盲复原[D]. 南京:东南大学,2005.
 [8] 沈岷,李舜酩,毛建国,等. 数字图像复原技术综述[J]. 中国图象图形学报,2009,14(9):1764-1775.