

# 基于发热-散热积累模型的电动机过载保护研究

罗建锋, 唐轶, 陈奎, 张丽

(中国矿业大学信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008)

**摘要:** 对异步电动机发热与散热机理进行分析, 利用傅氏算法建立了电机热积累-散热的动态数学模型。仿真分析该模型, 证明本模型可准确连续模拟电机温升动态变化情况, 对避免电动机因定子绕组, 转子绕组, 定子铁心温度过高而造成损坏提供最优判据。通过与传统反时限保护进行对比, 验证了本模型对负载变化引起的热积累反应更准确, 敏锐。并在此基础上设计了以 ARM 芯片 LPC2131 为主控单元的智能保护器, 经过长时间现场运行证明了本方案的可行性。

**关键词:** 异步电动机; 发热-散热积累模型; 过载保护; ARM

## Study on motor over-load protection based on heat accumulation-emission model

LUO Jian-feng, TANG Yi, CHEN Kui, ZHANG Li

(China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** This paper analyzes heat accumulation-emission of asynchronous motor, then establishes a dynamic mathematical model by discrete Fourier transform. It can reflect dynamic changes of motor thermal accurately and continuously, so as to prevent thermal rising too high felicitously. Compared with traditional inverse-time protection, the model can reflect heat accumulation caused by load changes more accurately and more acutely. An intelligentized protector using ARM IPC2131 is designed based on the model. A long time on-site operation proves its feasibility.

**Key words:** asynchronous motor; heat accumulation-emission model; over-load protection; ARM

中图分类号: TM772 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)03-0095-04

## 0 引言

异步电动机在运行过程中, 定子电流的大小受负载波动而变化, 因此电动机定子绕组温度并不稳定, 对于低倍过载, 电动机温升升高, 在未超过电动机允许最高温升  $\tau_{\max}$  之前, 电动机可正常运行。但是, 由于电动机自身的热积累, 在长时间低倍过载之后, 电动机温升可能超过允许值。电动机温度过高将使得电动机定子绝缘加速老化, 绝缘下降, 电动机因此而损坏。

现在电动机过载保护有多种数学模型, 比如等时间电流  $i^2t$  特性<sup>[1]</sup>及 IEC60255-3 推荐的数学模型<sup>[1]</sup>等, 但是这些模型都有各自的缺点, 它们一般的算法是采用积分法或查表法, 在电动机超过额定电流的情况下进行延时限制。由于电动机负载动态变化, 不可能将每一种过载系数都体现在算法中。如果建立连续性的电动机热积累的数学模型就能够准确模拟出电动机的瞬时温升, 根据允许最大温升  $\tau_{dz}$  作为判据, 就能对过载进行最优保护。因此, 对于电动机进行发热-散热积累模型分析就显得尤为重要。

电动机热源很复杂, 包括定子绕组, 转子绕组, 定子铁心等几个主要部分。煤矿企业对于中小型电机的过载保护, 现在主要是采用 JDB 综合保护器的传统的反时限保护, 其主要依据定子电流。由于定子电流的测量误差和电流平方的累积误差, 造成误动、拒动比较频繁。为了替代 JDB 的反时限保护, 经过对中小型电动机发热与散热的深入研究, 我们提出了一种包括定子绕组, 转子绕组, 定子铁心三种因素的电动机发热与散热模型。

## 1 电动机发热-散热积累模型

虽然电动机由许多物理性质不同的部件组成, 内部的发热与散热关系比较复杂, 但实践证明, 对于中小型电动机将其作为一个均质等温体<sup>[2]</sup>, 可得到工程上允许的分析精度。假设电动机在时刻  $t$  的温升为  $\tau$ , 而单位时间内电动机中产生的热量为  $Q$ ,  $dt$  时间内电动机的温升增量为  $d\tau$ , 由能量守恒定律有

$$Qdt - Q_{FE}dt = cmdt - Q_sdt \quad (1)$$

式中:  $m$  为电动机的质量;  $c$  为比热容量;  $Q_s$  为单

位时间内经电动机表面散发到周围空间的热量；

$Q_{FE}$  为电动机铁心发热

由传热学知识，有

$$Q_s = \lambda A \tau \quad (2)$$

式中： $\lambda$  为散热系数； $A$  为电动机的表面积。

由电机学知识，有  $Q_{FE} = mU^2$

式中： $m$  为固定系数； $U$  为相电压所以可以认为  $Q_{FE}$  为一个常数  $F$ 。

由式 (1) 和 (2) 整理后可得到微分方程

$$\frac{d\tau}{dt} - \frac{\lambda A - F}{cm} \tau = \frac{Q - Q_{FE}}{cm} \quad (3)$$

解式 (3) 可得到电动机温升方程

$$\tau = \tau_w - (1 - e^{-t/T}) - \tau_0 e^{-t/T} \quad (4)$$

式中： $\tau_w$  为电动机的稳定温升； $\tau_0$  为电动机的初始温升； $T$  为电动机的热时间常数  $T = \frac{cm}{\lambda A}$ ，由式 (4)

可知，电动机温升由发热  $\tau_w(1 - e^{-t/T})$  与散热  $\tau_0 e^{-t/T}$  两者共同决定。

电动机根据绝缘材料分为 A、E、B、F、H、C 六个级别，每个级别允许的温升限值各不相同。其中以 E 级和 B 级应用最为广泛，按国家制定的环境温度标准 40℃（介质为空气），E 级和 F 级绝缘材料温升限值为 75℃ 和 80℃。电动机温升超过允许最大值，保护器必须动作。

在电动机运行过程中，电动机温升随负载而变化。根据式 (4)，可得到电动机任意时刻温升  $\tau$ 。假设环境初始温度为  $\tau_0$ ，则

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \tau_w(1 - e^{-\Delta t_1/T}) - \tau_0 e^{-\Delta t_1/T} \\ \tau_2 &= \tau_w(1 - e^{-\Delta t_2/T}) - \tau_1 e^{-\Delta t_2/T} \\ &\dots \\ \tau_n &= \tau_w(1 - e^{-\Delta t_n/T}) - \tau_{n-1} e^{-\Delta t_n/T} \end{aligned} \quad (5)$$

当  $\tau_n > \tau_{dz}$ （实际情况可根据电动机绝缘材料等级确定），电动机超过允许温升限值，保护器动作<sup>[3]</sup>。

## 2 模型的实现

电动机负载恒定时：

$$\tau_w = \frac{RI_{EQ}^2}{\lambda A} \quad (6)$$

式中： $I_{EQ}$  为电动机发热效应的等效电流； $R$  为定子绕组的等效电阻。

英国 GEC 公司提出“等效电流”概念<sup>[4]</sup>

$$I_{EQ} = \sqrt{I_+^2 + KI_-^2} \quad (7)$$

式中： $I_+$  为正序电流； $I_-$  为负序电流； $K$  是与电动机热容量成正比例的一个常数，范围为 (3, 10)。此公式适用于发生不对称故障的情况。在设置断相不平衡保护的情况下，可对不对称故障进行保护。在三相对称过载时， $I_-$  近似为 0， $I_{EQ}$  近似为  $I_+$ ，定子发热等效电流可以用定子等效电流代替，如果电网负序分量较大，谐波较多，可以在等效电流发热基础上乘以适当的系数  $\alpha$ ，其范围 (1, 1.1) 一般情况下可取  $\alpha = 1.05$ 。

$$\tau_w = \frac{\alpha RI_{eq}^2}{\lambda A} \quad (8)$$

式中： $I_{eq}$  为定子等效电流，可以由傅氏算法求得

$$\text{Re}(I_{eq}) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(n) \cos(2k\pi / N) \quad (9)$$

$$\text{Im}(I_{eq}) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(n) \sin(2k\pi / N) \quad (10)$$

$$I_{eq}^2 = \text{Re}(I_{eq})^2 + \text{Im}(I_{eq})^2 \quad (11)$$

式中： $\text{Re}(I_{eq})$  和  $\text{Im}(I_{eq})$  为  $I_{eq}$  的实部与虚部。

$N$  为一周期电流采样点数。在一个周波 20 ms 内对电流波形采样 16 点，即  $N = 16$ 。

将式 (5)、(8)、(11) 综合，可得到电动机任意时刻温升为

$$\tau_n = \frac{\alpha RI_{eq}^2}{\lambda A} (1 - e^{-\Delta t_n/T}) - \tau_{n-1} e^{-\Delta t_n/T} \quad (12)$$

在单片机系统中，采用定时间隔计算一次温升，综合考虑计算精度与运算能力，假设每隔 30 ms 进行一次温升变化计算，则  $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \dots = \Delta t_n =$

0.03 s， $\frac{\alpha R}{\lambda A}$  是由电动机容量和型号决定的常数，用户可根据电动机容量和型号进行整定，文献[4]中提供了热时间常数的计算方法。

$$\begin{aligned} \text{令 } B &= \frac{\alpha R}{\lambda A}, C = e^{-0.03/T} \text{ 则} \\ \tau_n &= B(1 - C)I_{eq}^2 + \tau_{n-1}C \end{aligned} \quad (13)$$

上式可以作为电动机发热-散热积累数学模型，具备热记忆功能<sup>[5]</sup>。 $\tau_n > \tau_{dz}$ （实际情况可根据电动机绝缘材料等级整定），电动机超过允许温升限值，保护器动作。与传统的比例法过载保护等方法比较，此模型具有简单、准确、连续等优点<sup>[6]</sup>。

本模型作为电动机过载保护模型，此外电动机保护还有短路、断相（电流不平衡）、漏电闭锁等保护功能，此处不再赘述。

### 3 与传统反时限保护比较

在 JDB 综合保护器中采用模拟电路来实现反时限过载保护<sup>[7]</sup>。随着负载的变化,电容侧电压也出现变化,再通过由运算放大器组成的比较器输出动作信号。对于不同的过载情况,电容的充电放电经过不同的电阻:过载系数为 1.05~1.2 之间时,电容经过 r4、r9 充电,时间常数为 (r4+r9) c; 过载系数为 1.2~1.5 之间时, z2 击穿,电容经过 r4 充电,时间常数为 r4c; 过载系数为 1.5~6 之间时, z1、z2 击穿,电容经过 r4、r20 并联充电,时间常数为 (r4//r9) c; 电容放电经过电阻 r10 与 r10、r20 的并联,时间常数为 [r10+ (r4//r20)] c。电容两端电压达到额定电流稳定电压的 1.1 倍时由运算放大器组成的比较器输出动作信号。各时间常数由文献[8]决定。如表 1。

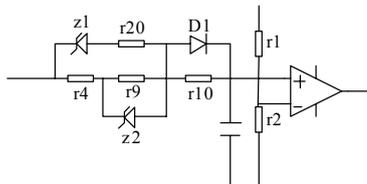


图 1 传统反时限保护原理图

Fig.1 Diagram of classic inverse-time protection

表 1 过载保护特性

Tab.1 Over-load protective property

实际 电流	动作时间		起始 状态	复位 状态	复位时 间/min
	La 组	Lb 组			
1.05	$t < 20 \text{ min}$	$5 \text{ min} < t < 20 \text{ min}$	热态	自动	$1 < t < 3$
1.2	$t < 3 \text{ min}$	$3 \text{ min} < t < 5 \text{ min}$	热态	自动	$1 < t < 3$
6	$t > 5 \text{ s}$	$8 \text{ s} < t < 16 \text{ s}$	冷态	自动	$1 < t < 3$

通过下面图 2 与图 3 对比可以看出, JDB 综合保护器实际反映的不是电动机的热积累,而是 rc 充电常数,工程用电阻电容的误差比较大导致保护器误动和拒动比较频繁。本模型则是较为真实地反映了电动机的发热和散热积累,因此,对负载变化反应更准确、敏锐。

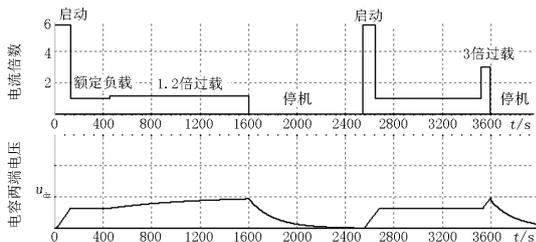


图 2 传统反限过载保护仿真结果

Fig.2 Curve of over-load by simulation

对于同样的负载波动情况,本模型的仿真结果如图 3。

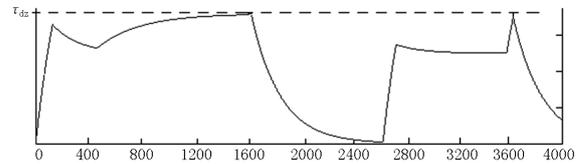


图 3 发热散热模型过载保护仿真结果

Fig.3 Heat accumulation-emission by simulation

### 4 硬件电路设计

装置中的主控单元采用 NXP 公司的 LPC2131 芯片作为微控制器。数据采集单元采用 MAX125 作为模数转换器。并且为了方便人机交互,外挂液晶显示器进行实时显示,多路键盘方便用户整定。主要的工作流程为:LPC2131 发出采集指令,这时模拟输入信号经过滤波、模数转换(A/D)后,变成数字信号由 LPC2131 进行运算处理,之后按照判据进行过载、断相、短路、漏电闭锁故障等保护。同时将实时温度和故障信息在液晶显示器上显示。用户可以根据实际情况将参数输入系统。见图 4 装置原理框图。

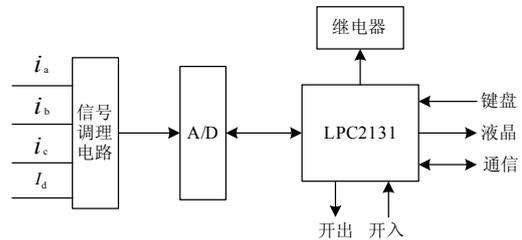


图 4 装置原理框图

Fig.4 Block diagram of device

#### 4.1 数据采集电路

信号的采集和转换是由 MAX125 完成的。MAX125 是 2×4 通道的高速 14 位数据采集芯片,可通过编程输入分为 A、B 两组对八个通道进行数据采集,本装置采用其中 4 个通道,分别采集三相定子电流与附加直流电流(分别用于计算三相定子的过载、断相、短路与漏电闭锁保护)转换所得的数据都存储在芯片内部的 RAM 中。

#### 4.2 微处理器电路

微处理器电路主要完成故障计算、保护逻辑判断、液晶显示器的控制、故障追忆等任务,是整个装置的核心。

32 位 LPC2131 微处理器作为微处理器电路的主元件,主频高达 60 MHz,并且具有三级流水线

技术，使装置具有快速性。片内集成的实时时钟可以为装置提供精确的时间及故障追忆时间。

### 5 软件设计

软件采用模块化设计，便于扩充和修改。主要包括：采样转换子程序、数据处理子程序、显示子程序、整定子程序等组成。

装置软件主流程图如图 5 所示。

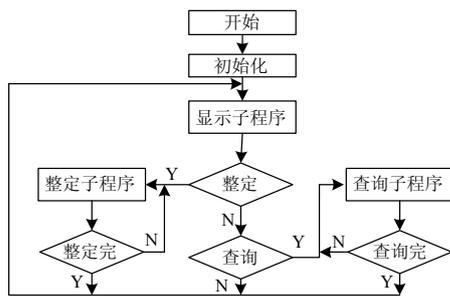


图 5 主程序流程图

Fig.5 Flow chart of main program

采样子程序如图 6 所示。

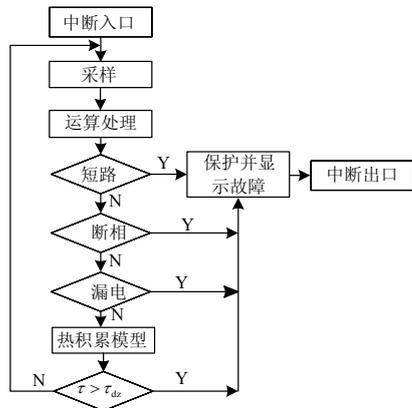


图 6 采样子程序流程图

Fig.6 Flow chart of interrupt subprogram

### 6 结论

本装置最大特点是可以实时反映电动机内部温升，将过载保护转化为温升保护，较之以前的积分法和查表法，本模型具有简单，准确，实时反映电动机温升等优点。应某矿务局要求，本装置安装在井下磁力启动器上作为井下电动机的保护进行了工业性运行试验，运行效果良好，并建议推广。

### 参考文献

[1] Li K, Wang J Q, Li W H, et al. Study on Reliability for Overload Relay[A]. in: Proceedings of 1<sup>st</sup> International Conference on Reliability of Electrical Products and Electrical Contacts[C]. Suzhou(China): 2004.

[2] 辜承林, 陈乔夫, 熊永前. 电机学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.

GU Cheng-lin, CHEN Qiao-fu, XIONG Yong-qian. Electromechanics[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2001.

[3] 葛耀中, 杜兆强, 刘浩芳. 自适应速断保护的動作性能分析[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(18): 28-32, 36.

GE Yao-zhong, DU Zhao-qiang, LIU Hao-fang. Analysis on Performance of the Adaptive Instantaneous Trip Protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(18): 28-32, 36.

[4] 迟长春, 李逵, 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, 32(1): 56-60.

CHI Chang-chun, LI Kui, YUE Da-wei. Heat Accumulation Based Over-load Protection Algorithm[J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System and its Automation, 2008, 32(1): 56-60.

[5] 徐国葆. 不稳定导热与时间常数[J]. 电机电器技术, 1981(4): 4-7.

XU Guo-bao. Thermal Instability and the Time Constant [J]. Electric Machine & Electric Apparatus Technologies, 1981(4): 4-7.

[6] 徐国葆. 关于电工产品热时间常数的温度突变试验[J]. 电机电器技术, 1979(4): 9-19.

XU Guo-bao. Thermal Time Constant on the Electrical Products Temperature of Mutation Test[J]. Electric Machine & Electric Apparatus Technologies, 1979(4): 9-19.

收稿日期: 2008-03-03; 修回日期: 2009-05-22

作者简介:

罗建锋 (1982-), 男, 研究生, 研究方向为电力系统微机保护与小电流接地; E-mail:wduojianfeng@163.com

唐轶 (1957-), 男, 博士生导师, 从事为电力系统自动化和电能质量控制领域的教学、研究工作。