

直流电动机的热模型及其温升预测

吴国芳

(上海大学自动化学院)

摘要: 从定量分析功率损耗出发,建立直流电动机的热模型,提出了电机温升的预测计算方法。

关键词: 直流电动机 功率损耗 热模型 电机温升

1 引言

直流电动机作为电能转换为机械能的装置,其能量的一大部分是消耗在电机本身的发热损失,由此也导致电机温度升高、系统效率降低。因此,分析和掌握这种热损耗的因素和规律,预测电机温升的方法,颇为重要。

本文通过对直流电动机功耗的定量分析,以功率损耗作为输入变量,以电机的温升作为输出变量,建立直流电动机的热模型,从理论上导出电机温升随时间变化的规律,并结合实际应用,加以合理的近似和简化,提出了计算电机温升的方法。

2 直流电动机的功耗及效率

他激直流电动机的基本方程组

电枢回路电压方程:

$$U_m(t) = R_a \cdot i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + E(t) \quad (1)$$

$$\text{电枢反电势: } E(t) = K_e \cdot \varphi \cdot \omega(t) \quad (2)$$

$$\text{电磁转矩: } T(t) = K_t \cdot \varphi \cdot i_a(t) \quad (3)$$

电动机转矩平衡方程:

$$T(t) = T_f(t) + T_L(t) + J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) \quad (4)$$

式中: $V_m(t)$ —电枢输入电压; $i_a(t)$ —电枢回路电流; R_a —电枢电路电阻; L_a —电枢电感; K_e —电机电动势常数; K_t —电机转矩常数; φ —恒定激磁磁通; B —粘滞摩擦系数; T_f —除了粘滞摩擦之外的电动机与其轴相连的所有负载的摩擦、风损和铁损的总和; $T_L(t)$ —负载转矩;

$\omega(t)$ —电枢转速; $T_f(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt}$ —克服惯性使转子加速的转矩; J —转子以及电机轴相连的负载的总转动惯量。

输入直流电动机的电功率,一部分损失在电枢绕组的热耗,其余部分转换为机械功率。机械功率的一部分损失于摩擦和风阻,剩下部分转换为轴的有功功率输出。

直流电动机总输入功率的瞬时值为:

$$p_i(t) = u_i(t) \cdot i_a(t) \quad (5)$$

将(1)(2)式代入(5)式可得:

$$p_i(t) = R_a \cdot i_a^2(t) + L_a \cdot i_a(t) \cdot \frac{di_a(t)}{dt} + K_e \cdot \varphi \cdot i_a(t) \cdot \omega(t) \quad (6)$$

从(3)(4)式可得电枢电流为:

$$i_a(t) = \frac{1}{K_t \cdot \varphi} [T_f(t) + T_L(t) + J \frac{d\omega(t)}{dt} + B \cdot \omega(t)] \quad (7)$$

将(7)式代入(6)式可得:

$$\begin{aligned} p_i(t) = & R_a \cdot i_a^2(t) + L_a i_a(t) \frac{di_a(t)}{dt} \\ & + \frac{K_e}{K_t} J \cdot \omega(t) \frac{d\omega(t)}{dt} \\ & + \frac{K_e}{K_t} B \cdot \omega^2(t) + \frac{K_e}{K_t} \cdot \omega(t) \\ & \cdot T_f(t) + \frac{K_e}{K_t} \cdot \omega(t) \cdot T_L(t) \end{aligned} \quad (8)$$

(8)式中: 第一项 $R_a \cdot i_a^2(t)$ 表示电枢绕组中的电流损耗; 第二项 $L_a \cdot i_a(t) \frac{di_a(t)}{dt} = \frac{d}{dt} [\frac{1}{2} L_a \cdot i_a^2(t)]$ 表示电枢电感 L_a 中储能的变化率, 在一

个周期中平均功耗为零;第三项 $\frac{K_r}{K_i} \cdot J \cdot \omega(t) \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{K_r}{K_i} \cdot \frac{d}{dt} [\frac{1}{2} J \omega^2(t)]$ 表示动能的变化率,在完整的启动、制动过程中平均功耗也为零。第二、三项即表示储能元件输入和输出瞬时功率流,在周期性运行中,惯性和电感元件的储能不变,无功率损耗。

显然,直流电动机总的输入平均功率为:

$$P_m(t) = R_a \cdot I_a^2 + \frac{K_r}{K_i} \cdot B \cdot \omega^2 + \frac{K_r}{K_i} \cdot \omega \cdot T_f + \frac{K_r}{K_i} \cdot \omega \cdot T_L \quad (9)$$

输出的机械功率为: $\frac{K_r}{K_i} \cdot \omega \cdot T_L$

系统效率为输出机械功率与总输入平均功率之比:

$$\eta \times 100\% = \frac{T_L}{\frac{R_a \cdot I_a^2 \cdot K_i}{K_r \cdot \omega} + B\omega + T_f + T_L} \times 100\% \quad (10)$$

(10)式中的参数都可认为是恒定值。

总的机械功率为:

$$\frac{K_r}{K_i} B \cdot \omega^2 + \frac{K_r}{K_i} \cdot \omega \cdot T_f + \frac{K_r}{K_i} \cdot \omega \cdot T_L$$

机械转换效率为输出有用机械功率与总机械功率之比:

$$\eta_m \times 100\% = \frac{T_L}{B\omega + T_f + T_L} \times 100\% \quad (11)$$

例如:一台微型永磁直流电动机,运行时电枢电压为16伏,电枢电流小于2安培,负载转矩为0.08牛顿·米,转速为200弧度/秒。假定所有摩擦均为粘滞摩擦,即 $T_f = 0$, $B = 100 \times 10^{-6}$ 米/秒,电枢电阻为3欧姆。经计算可得:直流电动机的效率为 $\eta = 50\%$ 。说明,电机在稳定运行时有一半功消耗在电机本身的发热之中。机械转换效率为 $\eta_m = 80\%$ 。说明绝大部分机械功率用于使负载加速和减速。

3 直流电动机的热模型

基于上述的分析可知,直流电动机运行中的发热是不可避免的。因此,有必要掌握电机的温升规律及其影响因素,以便采取对策,加以预测和控制。这对于延长电机使用寿命,提高系统运行效率,无疑是至关重要的。为建立直流电动机的热模型,我们以图1所示的简化模型和以下假定为基础:

1) 电枢、定子和周围环境的温度为均匀分布;

2) 不同温度表面相互之间的热传导与其温差成正比;

3) 消耗并转换为热的功率——即电枢电流产生的损耗和机械损耗,完全消耗在电枢和轴承上。表达为:

$$p_L(t) = R_a \cdot i_a^2(t) + \frac{K_r}{K_i} B \omega^2(t) + \frac{K_r}{K_i} \omega(t) \cdot T_f(t) \quad (12)$$

热模型的推导,以热的形式来表示功率。

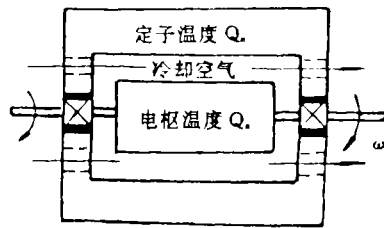


图1 直流电动机的发热部件

以总的热耗 $p_L(t)$ 作为输入量,以温升 $\theta(t)$ 作为输出量,从电枢传导到定子的总的热功率为:

$$p_{as}(t) = G_{as} \cdot [\theta_a(t) - \theta_s(t)] \quad (13)$$

式中: G_{as} —电枢和定子之间的热导; $\theta_a(t)$ —电枢相对于周围环境的温升; $\theta_s(t)$ —定子相对于周围环境的温升。

从电枢传导到周围介质的热功为:

$$p_{aw}(t) = G_{aw} \cdot \theta_a(t) \quad (14)$$

从定子传导到周围介质的热功为:

$$p_{sw}(t) = G_{sw} \cdot \theta_s(t) \quad (15)$$

式中: G_{av} 、 G_w —分别为电枢和定子与周围环境之间的热导。

在电机中各部所消耗的热功率与其本体温度对时间的变化是成正比的。因此,

电枢的热方程式为:

$$K_a \frac{d\theta_a(t)}{dt} p_L(t) = p_a(t) - p_{av}(t) \quad (16)$$

$$\text{定子的热方程式为: } K_s \frac{d\theta_s(t)}{dt} = p_s(t) - p_{sv}(t) \quad (17)$$

式中: K_a 、 K_s —分别为电枢和定子的热功耗比例常数。

将(13)(14)(15)式代入(16)(17)式,可得到包

含总功耗 $p_L(t)$ 并以 $\theta_a(t)$ 、 $\theta_s(t)$ 作为变量的二个微分方程:

$$K_a \frac{d\theta_a(t)}{dt} = p_L(t) - G_{as}[\theta_a(t) - \theta_s(t)] - G_{av} \cdot \theta_a(t) \quad (18)$$

$$K_s \frac{d\theta_s(t)}{dt} = G_{as} \cdot [\theta_a(t) - \theta_s(t)] - G_{sv} \cdot \theta_s(t) \quad (19)$$

将(18)(19)式取拉氏变换,就可得到直流电动机热模型的传递函数。其

电枢温升对总输入功耗 p_L 的传递函数为式(20):

$$\frac{H_a(s)}{P_L(s)} = \frac{SK_s + G_{as} + G_{sv}}{K_a K_s \cdot S^2 + [K_s(G_{as} + G_{av}) + K_a(G_{as} + G_{sv})] \cdot S + G_{as}G_{av} + G_{as}G_{sv} + G_{av}G_{sv}} \quad (20)$$

定子温升对总输入功耗 p_L 的传递函数为式(21):

$$\frac{H_s(s)}{P_L(s)} = \frac{G_{as}}{K_a K_s \cdot S^2 + [K_s(G_{as} + G_{av}) + K_a(G_{as} + G_{sv})] \cdot S + G_{as}G_{av} + G_{as}G_{sv} + G_{av}G_{sv}} \quad (21)$$

4 电机温升的预测计算

从上述推证可知,在电机热常数为已知的条件下,电机的温升对总的输入功率 p_L 的传递特性是确定的。从理论上讲,只要求得总功耗 $p_L(t)$ 随时间的变化规律,电机温升随时间的变化规律是可以计算得到的。但是,由于 $p_L(t)$ 对时间的关系复杂难解,这种计算并不实用。

在实际应用中,可近似认为总输入功率保持不变,即可对电枢和定子的温升进行预测计算。在工程分析中,可选择电机运行中的几个特定状态,来计算电枢和定子的温升。实践证明,这种近似的预测计算是完全足够的。

(1) 稳态时的简化

假定供给电枢的功率为常数并以阶跃函数形式作用,来计算电机稳定运行时的温升。根据拉氏变换的终值定理,可得电枢稳态温升的计算式为式(22):

$$\theta_a = p_L \left[\frac{G_{as} + G_{sv}}{G_{as}G_{av} + G_{as}G_{sv} + G_{av}G_{sv}} \right] \quad (22)$$

定子稳态温升的计算式:

$$\theta_s = p_L \left[\frac{G_{as}}{G_{as}G_{av} + G_{as}G_{sv} + G_{av}G_{sv}} \right] \quad (23)$$

式中, p_L —为所提供阶跃功率的幅值。

(2) 强通风冷方式的简化

若对直流电动机采用强迫风冷措施,会导致电枢和定子之间热耦合的减弱,使 $G_{as} \ll G_{av}$ 。 G_{as} 可忽略不计,则电枢的热方程可简化为一阶:

$$K_a \frac{d\theta_a(t)}{dt} = p_L(t) - G_{av} \cdot \theta_a(t) \quad (24)$$

电枢温升对功耗的传递函数简化为:

$$\frac{H_a(s)}{P_L(s)} = \frac{\frac{1}{G_{av}}}{\frac{K_a}{G_{av}} \cdot S + 1} \quad (25)$$

式中: $1/G_{aa}$ —为电枢热阻; K_a/G_{aa} —为热时间常数。

须知: 当冷却空气气流增大时, 电枢和周围介质的热导 G_{aa} 也随之增大, 并导致电枢热阻减小, 发热时间常数减小。这对直流电动机并非有利。

(3) 部分分式分解法

从 (20)(21) 两式电机热模型传递函数可知: 两式分母部分都包含有相同的二次多项式。该多项式可以分解为两个因式, 故传递函数可以部分分式表达:

$$\frac{\bar{\theta}_a(s)}{p_L(s)} = \frac{SK_s + G_{aa} + G_{ww}}{C(s\tau_1 + 1)(s\tau_2 + 1)} \\ = \frac{R_1}{s\tau_1 + 1} + \frac{R_2}{s\tau_2 + 1} \quad (26)$$

式中: $C = G_{aa}G_{ww} + G_{aa}G_{ww} + G_{ww}G_{ww}$ 为常数。

对于已知功耗 p_L , 电枢温升 (26) 式可视为两个温升分量之和来计算。若 R_1 、 R_2 、 τ_1 、 τ_2 可通过计算求得, 则可使计算得到简化。

如果存在一个时间常数比另一个时间常数相差一个数量级以上时, 则近似视一项为常数, 又可使计算得以简化。

5 测试结果与比较

本试验以 Z₃-32 型直流电动机组成一拖动系统。以阶跃形式作用于不同的给定功耗 p_L , 在系统处于稳态运行时对电枢的温升进行测试, 并与理论计算值相比较。

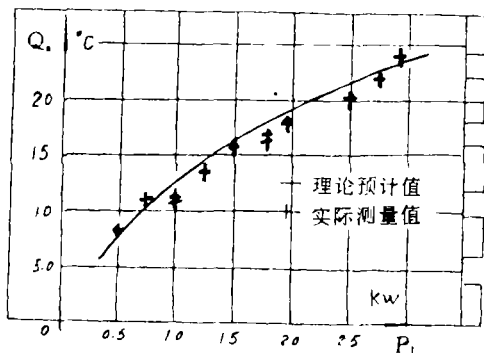


图 2 电枢稳态温升测试

电机额定功率为 3.3 kW; 额定电压为 110V; 额定电流为 34.8A; 额定转速为 3000 r/min; 并激自冷式。测试环境温度为 24.5℃。

稳态运行测试结果如图 2 所示。与简化的理论计算值相比较, 大部分电枢温升值偏低, 误差不超过 ±2℃。

强迫风冷稳态测试结果如图 3 所示。与简化的理论计算值相比较, 电枢温升值也偏低, 误差稍大, 不超过 ±3.0℃。由此可见, 理论上的简化预测计算可保证足够的精度。

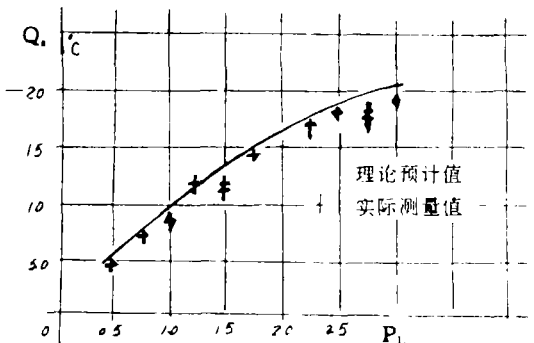


图 3 强迫风冷时的电枢稳定温升

6 结束语

直流电动机热模型的建立, 以温度均匀分布、热传导与温差成正比的假定为前提, 所导出的传递特性都是线性确定的, 只要已知电动机的热参数, 就可以对电机的温升作出预测计算。这种方法尤其适用于中、小功率直流电动机温升的预测, 可足以满足工程上的精度要求。

文中以热功原理的建模思想和分析方法对其他大功率传动系统的温升分析也有参考价值。

参考文献

- 郭宗仪 汤一雅可甫主编, 直流电及其控制系统, 增量运动控制 (第一册), SRL 出版公司, 1978 年
- DC. Motors, Speed Controls Servo System, 3rd ed., Engineering Handbook. Electro-Craft Corporation, 1975