

矿用隔爆型电机的水冷结构与温升计算

李建成^{1,2}, 王富春^{1,2}

(1. 佳木斯电机股份有限公司 北京研发中心, 北京 100070;

2. 国家防爆电机工程技术研究中心, 黑龙江 佳木斯 154002)

摘要: 针对矿用隔爆电机体积小、功率大、发热严重等应用特点,合理地设计水冷结构可以有效地平衡电机发热量,保证电机的安全运行。基于流体力学及电机传热学理论开发编制了水冷电机水路结构与温升计算程序。以 YBSD 矿用隔爆型三相电动机为研究对象,对其机壳水路进行了结构与热力计算,并进一步计算了电机的温升情况。通过将程序计算结果与实际电机数据进行对比分析,验证了所提方法的可行性和计算的准确性,为矿用隔爆型水冷电机设计提供了技术手段。

关键词: 矿用隔爆型电机; 水冷; 温升; 计算程序

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2017)11-0089-06

Design of Water-Cooled Structure and Calculation of Temperature Rise of Mine Explosion-Proof Motor

LI Jiancheng^{1,2}, WANG Fuchun^{1,2}

(1. Beijing R&D Center of Jiamusi Electric Machine Co., Ltd., Beijing 100070, China;

2. National Engineer Research Center of Explosion-Proof Motor, Jiamusi 154002, China)

Abstract: To make sure of the heating transfer and safe running of mine explosion-proof motor which had special structure and applying situation such as small size, high power and terrible heat, it's the key to design a rational and suitable water-cooled structure. A program based on the heat transfer and hydrodynamic theory was compiled in this paper research on the water-cooled structure and temperature rise of the YBSD motor. The calculation result was compared with the case and date from actual motor, then the feasibility and accuracy of the calculation method was verified, which provided a technological means.

Key words: mine explosion-proof motor; water-cooled; temperature rise; calculation program

0 引言

随着市场需求的增加、竞争的日益激烈,电机产品的品种、数量也在不断增多,同时电机单机容量不断扩大,温升问题日益严重,对电机技术水平也提出了更高的要求,其中电机冷却系统设计是电机设计中的重要环节。矿用隔爆型电动机因其特殊的应用场所,具有功率大、体积小、发热量严重等特点,随着电机设计容量的不断提升,电机运行时产生的单位体积损耗也会不断增长,从而引起电机各部分温度的进一步升高^[1-2]。因此,能

够合理地设计矿用隔爆型高功率密度电机的水冷系统,有效地平衡电机发热量,控制电机温升,对于电机的运行可靠性及提高其功率密度具有十分重要的意义。

本文通过流体力学及电机传热学相关理论推导,开发编制了水冷电机水路结构与温升计算程序,并以 YBSD 矿用隔爆型三相电动机为研究对象,以机壳水路为研究重点,利用程序对其进行结构设计、水路热力计算以及电机温升计算,并将计算结果与实际电机数据进行了对比分析,验证了该方法的可行性、准确性与实用性。

1 基本理论

根据电机的散热分析和水路热力计算,合理设计水路结构是水冷电机结构设计的核心任务。本节基于流体力学及电机传热学相关理论,详尽推导了适用于水冷电机水路结构设计与温升计算的重要公式。

1.1 水冷电机的水路结构设计

现以水冷电机中的机壳水路结构为研究重点,根据电机的散热分析与流体动力学、电机传热学相关的计算公式,给出一种普适的水冷电机水路结构设计计算过程,具体设计步骤如图 1 所示。

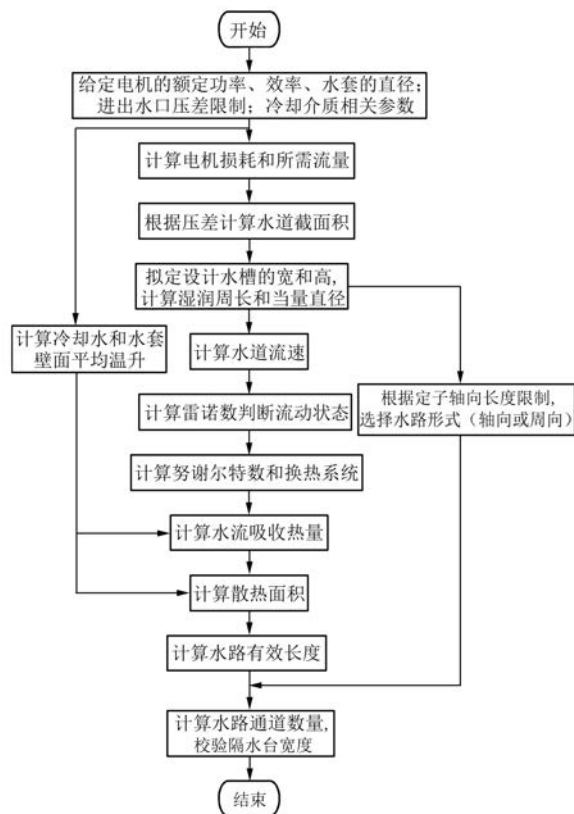


图 1 水路结构的设计步骤

依照图 1 中的水路结构设计过程给出重要设计步骤相对应的计算公式。

电机损耗计算公式:

$$P_r = (1/\eta - 1)P_e \quad (1)$$

式中: P_r ——电机总损耗, kW;

η ——电机效率;

P_e ——电机额定功率, kW。

流量计算公式:

$$Q = k_q \frac{1000 \times P_r}{c_p \rho (t_{out} - t_{in})} \quad (2)$$

式中: Q ——水流量, m^3/s ;

c_p ——水的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

ρ ——水的密度, kg/m^3 ;

t_{in}, t_{out} ——进出水的温度, $^{\circ}\text{C}$;

k_q ——流量系数。

水路截面积计算公式:

$$A = Q/(\mu \sqrt{2\Delta p/\rho}) \quad (3)$$

式中: A ——水路截面积, m^2 ;

μ ——截流系数;

Δp ——水路压差, Pa。

雷诺数计算公式:

$$Re = vDe/v \quad (4)$$

式中: Re ——雷诺数;

v ——水流速度, m/s ;

ν ——水的运动黏度, m^2/s ;

De ——水路截面的当量直径, m。

依据雷诺数 Re 判断流动状态详见参考文献[3]。

为了散热效果更好,应尽量将冷却水设计为湍流状态。这里仅给出湍流时努谢尔特数和换热系数对应的求解公式,而对于层流、过度流状态时的经验公式详见文献[4-5]。

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad (5)$$

$$\alpha = Nu\lambda/De \quad (6)$$

式中: Nu ——努谢尔特数;

Pr ——普朗特数;

α ——换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;

λ ——水的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

冷却水吸收热量计算公式:

$$\phi = c_p m (t_{out} - t_{in}) \quad (7)$$

式中: ϕ ——冷却水从水套壁面吸收的热量, W;

m ——单位时间内流过截面的水流质量, kg/s 。

水路散热面积和水路长度计算公式:

$$S = \phi/(\alpha \Delta t) \quad (8)$$

$$L = S/(\pi De) \quad (9)$$

式中: S ——散热面积, m^2 ;

L ——水路长度, m。

水路通道数量及隔水台宽度计算公式:

轴向水路:

$$N = L/H \quad (10)$$

$$c = \pi[(D_2 - 2h_{out}) + (D_1 + 2h_{in})]/(2N) - U/2 + [(D_2 - 2h_{out}) - (D_1 + 2h_{in})]/2 \quad (11)$$

式中: N ——水道数量;

H ——水路轴向设计长度, m;

c ——隔水台宽度, m;

h_{in}, h_{out} ——水套内、外壁厚, m;

D_1, D_2 ——水套内、外径, m;

U ——水路截面湿润周长, m。

周向水路:

$$N = 2L/[(D_2 + D_1)] \quad (12)$$

$$c = (H - 2L')/N - a \quad (13)$$

式中: L' ——退刀槽的裕量, m;

a ——水槽宽度, m。

1.2 水冷电机的水路阻力计算

水路设计不仅要实现有效的散热, 还需兼顾供水泵体的能耗, 尽量降低它的负荷, 即减少水路阻力损失。水路阻力损失主要包括沿程阻力损失和局部阻力损失。其与水路结构、水流速度密切相关。

(1) 沿程阻力计算公式:

$$h_f = \lambda f \frac{L}{De} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (14)$$

式中: h_f ——沿程阻力, m;

λf ——沿程阻力系数, 在不同流动状态时经验公式有所不同^[6]。

(2) 局部阻力计算公式:

进、出口阻力计算

$$\zeta_1 = (A_{in}/A - 1)^2 \quad (15)$$

式中: ζ_1 ——进口阻力系数;

A_{in} ——入水口截面积, m^2 。

$$\zeta_2 = 0.5(1 - A_{out}/A) \quad (16)$$

式中: ζ_2 ——出口阻力系数;

A_{out} ——出水口截面积, m^2 。

折弯阻力计算

轴向水路:

$$\zeta_3 = 2(N - 1)\zeta_w \quad (17)$$

周向水路:

$$\zeta_3 = N\zeta_w \quad (18)$$

式中: ζ_3 ——阻力系数;

ζ_w ——折弯系数, 根据水路结构和折弯角度取值不同^[6]。

局部总阻力计算

$$h_w = (\zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3)v^2/(2g) \quad (19)$$

式中: h_w ——局部阻力, m。

(3) 水路总阻力计算公式:

$$\Delta p = \Delta z \rho g + \rho[(Q/A_{out})^2 - (Q/A_{in})^2]/2 + \rho g(h_f + h_w) \quad (20)$$

式中: Δz ——进、出水口高度差, m;

Δp ——进、出水口压差, Pa。

(4) 水泵损耗计算公式:

$$W_p = Q \cdot \Delta p \quad (21)$$

式中: W_p ——泵功率, W。

1.3 电机温升计算

电机发热源主要包括定子铜耗、转子铜耗、铁耗、机械损耗和杂散损耗。这里采用等效热路法对电机温升进行计算。假设条件包括: 铜的导热系数无穷大, 即铜导体为等温体; 绕组铜耗全部在槽部, 且热流密度均相等; 忽略热量轴向传递, 认为电机热量自内向外径向传递, 通过水冷结构带走; 转子绕组热量的一半由气隙经定子铁心传递给机壳; 杂散损耗定转子各占一半, 且集中在齿部; 转子损耗热量经气隙传递给定子铁心齿部。

简化的等效热路图如图 2 所示。

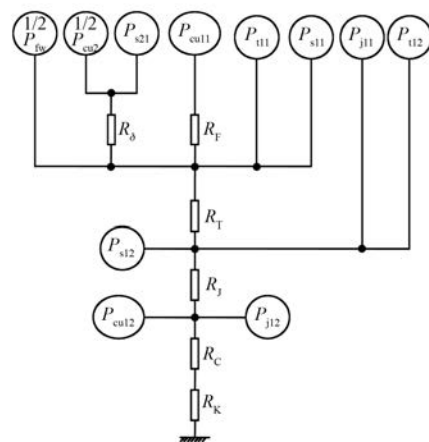


图 2 电机的简化等效热路图

图 2 中 P_{cu11} 为定子绕组槽部的损耗热量; P_{cu12} 为定子绕组端部传到机壳的损耗热量; P_{cu2} 为转子绕组传到定子铁心的损耗热量; P_{s21} 为转子杂散损耗; P_{s11} 和 P_{s12} 各为定子杂散损耗的一半; P_{fw} 为机械损耗; P_{111} 和 P_{112} 各为定子铁心齿部损耗的

一半; P_{j11} 和 P_{j12} 各为定子铁心轭部损耗的一半。 R_F 为定子铁心绕组对铁心的热阻; R_δ 为定转子气隙的热阻; R_T 和 R_J 分别为定子铁心齿部、轭部的传导热阻; R_C 为机壳的传导热阻; R_K 为机壳对水的散热热阻。

电机温升的计算公式整理如下:

(1) 定子绕组对定子铁心的温降公式:

$$\theta_i = q_i R_i \quad (22)$$

式中: θ_i ——定子绕组对铁心温降, K;

q_i ——通过槽内绝缘层的热流密度, W/m^2 ;

R_i ——槽内绝缘总热阻。

热流密度、热阻的具体公式详见文献[7]。

(2) 定子铁心齿部的温降公式:

$$\theta_t = \frac{P_{txch}}{Z b_{t1} L_{Fe}} \cdot \frac{h_{t1}}{K_{fe} \lambda_{fe}} \\ P_{txch} = L_{Fe} P_{cu1} / (3L_z) + P_{cu2}/2 + P_{fw}/2 + P_s/2 + P_{t1}/2 \quad (23)$$

式中: θ_t ——定子铁心齿部温降, K;

Z ——定子槽数;

b_{t1} ——定子铁心齿部平均宽度, m;

L_{Fe} ——定子铁心长度, m;

P_{txch} ——铁心齿部相关损耗, W;

K_{fe} ——铁心叠压系数;

λ_{fe} ——硅钢片纵向导热系数;

h_{t1} ——定子铁心齿部磁路计算长度, m;

L_z ——定子绕组半匝长, m。

(3) 定子铁心轭部的温降公式:

$$\theta_j = \frac{P_{txe}}{\pi(D_1 - h_{j1})L_{Fe}} \cdot \frac{h_{j1}}{K_{fe} \lambda_{fe}} \\ P_{txe} = L_{Fe} P_{cu1} / L_z + P_{cu2}/2 + P_{fw}/2 + 3P_s/4 + P_{t1} + P_{j1}/2 \quad (24)$$

式中: θ_j ——定子铁心轭部温降, K;

h_{j1} ——定子铁心齿部磁路计算长度, m;

P_{txe} ——铁心轭部相关损耗, W。

(4) 定子铁心与机壳装配间隙温降公式:

$$\theta_{c1} = \frac{P_{txj}}{\pi D_1 L_{Fe}} \cdot \frac{(0.5 + 3D_1) \times 10^{-5}}{\lambda_{jx}} \\ P_{txj} = P_{cu1} + P_{cu2}/2 + P_{fw}/2 + 3P_s/4 + P_{t1} + P_{j1} \quad (25)$$

式中: θ_{c1} ——定子铁心与机壳装配间隙温降, K;

P_{txj} ——定子铁心与机壳装配间隙相关损耗, W;

λ_{jx} ——空气热导率。

(5) 机壳中的温降公式:

$$\theta_{c2} = \frac{P_{jk}}{\pi D_1 \cdot L_{Fe}} \cdot \frac{h_{in}}{\lambda_c} \\ P_{jk} = P_{cu1} + P_{cu2}/2 + P_{fw}/2 + 3P_s/4 + P_{t1} + P_{j1} \quad (26)$$

式中: θ_{c2} ——机壳中的温降, K;

P_{jk} ——机壳相关损耗, W;

λ_c ——机壳材料导热系数, $W/(m \cdot K)$ 。

(6) 机壳水套表面对冷却水的温降公式:

$$\theta_w = t_w - t_f \quad (27)$$

式中: θ_w ——机壳水套表面对冷却水的温降, K;

t_w ——水套壁面平均温度, $^{\circ}C$;

t_f ——冷却水的平均温度, $^{\circ}C$ 。

(7) 定子绕组总温升公式:

$$\theta_{total} = \theta_i + \theta_t + \theta_j + \theta_{c1} + \theta_{c2} + \theta_w \quad (28)$$

式中: θ_{total} ——定子绕组总温升。

(8) 转子对定子铁心的温降公式:

$$\theta_\delta = \frac{P_{cu2}/2 + P_s/4}{2\pi R_r L_{Fe}} \cdot \frac{\delta}{\lambda_{eff}} \quad (29)$$

式中: θ_δ ——转子对定子铁心的温降, K;

R_r ——转子外径, m;

δ ——定转子间隙, m;

λ_{eff} ——有效导热系数, $W/(m \cdot ^{\circ}C)$, 经验公式详见文献[7]。

(9) 转子总温升公式:

$$\theta_r = \theta_{total} + \theta_\delta \quad (30)$$

式中: θ_r ——转子总温升。

(10) 机壳表面平均温度公式:

$$t_{jb} = \left(t_{air} + \frac{G_r \cdot v_{air}^2}{g \cdot a_p \cdot L_b^3} + t_w \right) / 2 \quad (31)$$

式中: t_{jb} ——机座表面平均温度, $^{\circ}C$;

t_{air} ——环境空气温度, $^{\circ}C$;

a_p ——体积膨胀系数, 可取 $a_p = 1/(273 + t_{air})$;

L_b ——机壳有效长度, m;

G_r ——格拉晓夫数;

v_{air} ——空气运动黏度, m^2/s 。

2 程序编制与实例验证

为了实现水冷电机水路结构设计与温升计算的参数化和可视化, 现基于上节的基本理论计算

公式利用 VB 语言开发编制了便于设计人员使用的应用程序,并以 YBSD 矿用隔爆型三相异步电机为例,验证了该方法的可行性和程序计算的准确性。

2.1 程序简介

根据水冷电机常用机壳、端盖、电气元件水冷结构的特征及实际应用情况,应用程序主要涉及了水冷机壳计算、水冷端盖计算、电气元件水冷板结构计算三个部分。图 3~图 5 给出了计算程序的主界面以及机壳计算部分的输入界面和结果输出界面。



图 3 水冷结构计算程序的主界面



图 4 机壳部分的输入界面

2.2 实例验证

以 700 kW-4P 的 YBSD 矿用隔爆型三相电机为例,以其机壳水冷结构为主要研究对象,利用开发编制的应用计算程序进行了水路结构设计、热力计算与电机温升计算。

2.2.1 基本技术参数

表 1 给出了程序计算中与电机相关所需输入

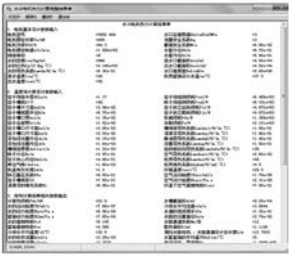


图 5 结果输出界面

的主要技术参数。

表 1 主要技术参数

参数名称	参数值
额定功率/kW	700
电机效率/%	95.67
额定转速($r \cdot \min^{-1}$)	1 500
绝缘等级	F
定子铜耗/kW	10 676
转子铜耗/kW	5 509
铁耗/kW	8 790
机械损耗/kW	2 932
杂散损耗/kW	3 743
环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	16.5
进水设计温度/ $^{\circ}\text{C}$	13
出水设计温度/ $^{\circ}\text{C}$	14.5
水口压差限值/MPa	3.0
水套设计外径/mm	875
水套设计内径/mm	770
定子铁心长度/mm	860
定子铁心内径/mm	500
单边气隙/mm	2.2
机座有效长度/mm	1 320

2.2.2 计算结果对比分析

表 2 将程序计算结果与实际电机水路结构尺寸及电机温升试验数据进行了对比。

由表 2 可知,应用计算程序得出的水冷机壳结构尺寸以及电机温升情况均能较好地贴合实际情况,并且满足电机的设计要求。同时利用有限元仿真,计算机壳水路进出口压差损失约为 0.52 MPa,与程序结果相近,进一步验证了计算程序的可行性和准确性。

表 2 程序计算结果与实体电机数据的对比			
对比参数	计算结果	实际数据	误差/%
水流量/(m ³ ·h ⁻¹)	8.17	8.1	0.9
进水温度/℃	13	13.2	1.5
出水温度/℃	14.5	14.5	0
环境温度/℃	16.5	16.5	0
水路结构型式	推荐轴向式	轴向式	-
水套外径/mm	875	875	0
水套内径/mm	770	770	0
水道宽度/mm	45	45	0
水道高度/mm	15	16	6.25
隔水台宽度/mm	18.7	20	6.5
水套壁厚/mm	18.8/18.8	22/14.5	22
水路轴向设计长度/mm	1 150	1 145	0.45
水道条数	40	40	0
机壳水路带走热量/kW	14.25	12.23	16.5
水阻压差损失/MPa	0.59	给定水压 2.0	-
定子温度/℃	90.97	93.8	3.0
转子温度/℃	99.80	无数据	-
机壳表面温度/℃	19.61	18.2	7.7

3 结 语

本文在流体力学及电机传热学理论计算的基础上,利用 VB 语言开发编制了具有参数化和可

视化的水冷电机水路结构设计与温升计算程序。同时,以 YBSD 矿用隔爆型三相异步电机为例,应用计算程序对其机壳水路进行了结构设计、热力计算与电机温升计算;通过与实际电机结构尺寸及试验数据对比,表明了该程序方法的可行性与准确性,并可在其他水冷电机水路结构设计中推广应用。

【参 考 文 献】

[1] 丁舜年.大型电机的发热与冷却[M].北京:科学出版社,1992.

[2] 魏永田,孟大伟,温嘉斌.电机内热交换[M].北京:机械工业出版社,1998.

[3] 吴望一.流体力学[M].北京:北京大学出版社,1982.

[4] 李青青,黄勤,杨立,等.永磁同步电机水冷系统散热参数分析与热仿真[J].机械设计与制造,2014(4): 188-191.

[5] 温嘉斌,许明宇.防爆型水冷电机内换热与温度场计算[J].电机与控制学报,2009,13(2): 393-397.

[6] 梁培鑫,柴凤,李翠萍,等.水冷电机水路设计的研究[J].微电机,2013,46(5): 1-4.

[7] 李子健.电动车用水冷感应电机温度场及其水冷系统的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.

收稿日期: 2016 -08 -15

(上接第 88 页)

(3) 同轴度、气隙对电机性能的影响不大,应追求最好的同轴度和最小的气隙,但气隙过小,存在定转子卡滞的风险,设计时应综合考虑。

(4) 形位公差对电机性能的影响较小,基本可忽略不计。

【参 考 文 献】

[1] 坂本正文.步进电机应用技术[M].王自强,译.北京:科学出版社,2010.

[2] 赵博,张洪亮.Ansoft 12 在工程电磁场中的应用[M].北京:中国水利水电出版社,2010.

[3] 王宗培,姚宏.步进电机计算和设计方法的研究

[M].南京:东南大学出版社,1994.

[4] 刘宝廷,程树康.步进电机及其驱动控制系统[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1997.

[5] CHARI M V K, SILVESTER P P.电磁场问题的有限元解法[M].史乃,唐任远,译.北京:科学出版社,1985.

[6] 陈晔.两自由度电机矩角特性的计算与分析[D].杭州:浙江大学,2005.

[7] WALE J D, POOLLOCK C. Hybrid stepping mortors and drives[J].Power Engineering Journal, 2001, 15(1): 5-12.

收稿日期: 2017 -09 -19