

水冷电机设计特点分析

黄磊, 郑龙平, 李光耀

(上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司, 上海 200063)

摘要: 水冷电机应用广泛, 其设计也有自己的特点。针对水冷电机中机壳水冷结构的两种水路分布方式, 即折返型和螺旋型, 介绍了水路结构的优缺点和水路设计涉及参数的计算方法。考虑水冷机壳承压问题, 给出了机壳内外筒壁强度计算公式。研究内容可为水冷电机的设计提供参考。

关键词: 水路; 水冷结构; 轴向折返型水路; 周向螺旋型水路; 筒壁强度计算

中图分类号: TM 302 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)12-0093-04

Analysis of the Design Characteristics of Water-Cooled Motor

HUANG Lei, ZHENG Longping, LI Guangyao

(Shanghai Engineering Research Center of Motor System Energy Saving Co., Ltd., Shanghai 200063, China)

Abstract: Water-cooled motor has wide applications, and its design shows some special features. For the two water jacket structures of the water-cooled motor, i.e., Z-shaped axial water jacket and circumferential spiral water jacket, the advantages and disadvantages were introduced, and the calculation methods for the design parameters were given. Considering the pressure on the water jacket, the strength calculation formulas were derived for the inner and outer shell walls. This research could give reference for the design of water-cooled motors.

Key words: water jacket; water-cooled structure; Z-shaped axial water jacket; circumferential spiral water jacket; shell wall strength calculation

0 引言

电机的冷却形式多种多样, 按冷却介质分类有水、空气、氟利昂、氢气、氮气、二氧化碳、油冷却, 按冷却回路布置有自由循环、进出口管、机壳表面、内外装冷却器(用周围环境介质或远方介质)冷却, 常用的冷却方式包括 IC411、IC611、IC01、IC81W、ICW37 等。水冷电机具有体积小、自重轻、噪声低、效率高等优点, 受到广大用户的青睐, 特别是在运行条件和通风条件差, 又有大量水源的场所。

水冷电机广泛应用于煤矿、新能源汽车、发电机、空调、真空泵、采煤机截割部等场所。水路设计是水冷电机设计的关键。水路结构的选择、布置、水路宽度、水路长度等因素直接影响着散热效果。为了达到理想的冷却效果, 还需考虑制造成

本、结构可操作性、现场水源质量等问题。本文介绍了水路设计中参数的计算方法, 并给出了水冷机壳筒壁强度分析思路, 可供设计人员在设计水冷电机时参考。

1 水路介绍

水冷电机的结构主要分为 3 种: 机壳水冷结构、端盖水冷结构和转轴水冷结构。除机壳水冷结构可单独使用之外, 其他两种均和机壳水冷混合使用, 如图 1、图 2 所示。水冷混合空气冷却的结构如图 3 所示。

在水冷电机中, 机壳水路按分布方式分为折返型和螺旋型, 如图 4、图 5 所示。折返型水路结构: 单条水路轴向直走, 水路之间 180°转折, 首尾依次连接, 进、出水口被一长隔水台分隔两边。螺旋型水路结构: 水路沿周向螺旋连续前进, 进、出

作者简介: 黄磊(1976—), 女, 工程师, 研究方向为电机标准化。

郑龙平(1984—), 男, 工程师, 研究方向为电机设计。

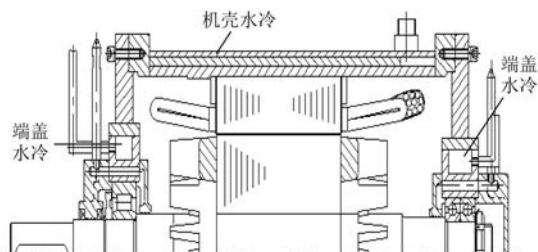


图1 圆筒型机壳水冷+端盖水冷结构

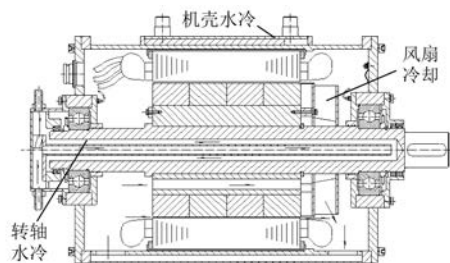


图2 机壳水冷+转轴水冷结构

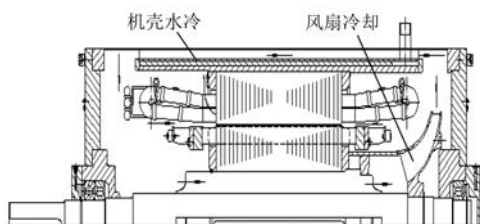


图3 圆筒型机壳水冷+风扇冷却结构

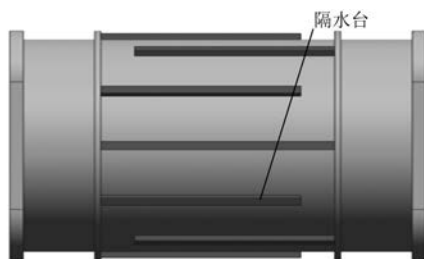


图4 折返型水路结构

水口分居电机两端。

两种类型的水路各有优缺点,根据使用经验对其总结如下。

(1) 折返型水路的优点是:结构简单,加工容易,制造工艺简便;散热比较均匀,不会在电机两端产生温度梯度;进、出水口设计灵活,可在同端亦可根据长隔水台的情况相隔一定角度。缺点:由于圆周水道数量多,转弯倒角多,水流阻力损失

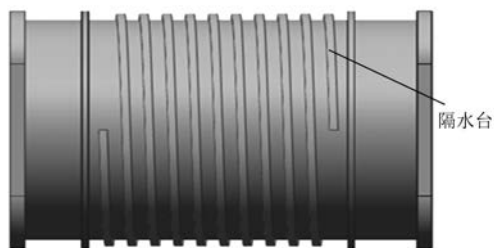


图5 螺旋型水路结构

较大;进、出水口温度的差异会使电机进、出水口两侧出现温度梯度,容易造成绕组温度不一致,从而对电机运行产生影响。

(2) 螺旋型水路的优点:结构通畅,流道截面积比较均衡,水流阻力损失小;冷却效果好,不会出现因电机进、出水口两侧出现温差梯度而造成绕组温度不一致的现象。缺点:加工耗时,加工难度较大,加工成本高;进、出水口分布在电机两端,必须通过外接水管引导,不便于安装外接水源。

2 水路设计

水冷机壳水路设计主要涉及如下参数的确定:隔水台宽 m 、水路截面积 S 、水道高 b 、水道宽 a 、水道数 n 、水道长 L 。部分参数如图6、图7所示。

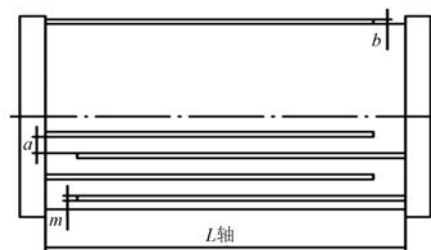


图6 折返型水路

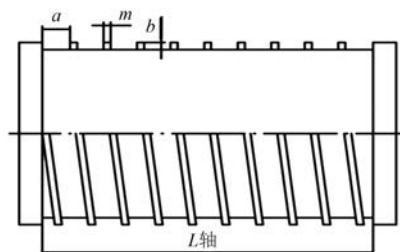


图7 螺旋型水路

为使水冷机壳达到预期的散热效果,根据热量守恒关系,水冷电机中冷却水的需求量 Q 为

$$Q = \frac{\Sigma P \times 10^3}{c_a \Delta T} \quad (1)$$

式中: ΣP ——电机内部总损耗;

c_a ——水的比热, 20 °C 时为 4 181 W·s/°C;

ΔT ——进出口水的温差, 一般为 5~8 K。

对于水路流量 Q 的设计可参考 MT/T 476—2011《YBC 系列采煤机截割部用隔爆型三相异步电动机》^[1]。

水路截面积:

$$S = ab \quad (2)$$

水路水流流速:

$$v = \frac{Q}{S} \quad (3)$$

当量直径:

$$d_e = \frac{2ab}{a+b} \quad (4)$$

对于螺旋型水路, 水路圈数:

$$n_{\text{螺}} = \frac{L}{a+m} \quad (5)$$

水路总长

$$L_{\text{螺总}} = \frac{\pi D_0 L_{\text{轴}}}{a+m} \quad (6)$$

式中: D_0 ——水路中心所在的圆直径。

对于折返型水路, 水路个数:

$$n_{\text{直}} = \frac{\pi D_0}{a+m} \quad (7)$$

水路总长:

$$L_{\text{直总}} = \frac{\pi D_0 L_{\text{轴}}}{a+m} \quad (8)$$

从式(6)和式(8)可看出, 两种水路总长一样, 即 $L = L_{\text{螺总}} = L_{\text{直总}}$ 。

3 机壳筒壁强度计算

水路设计在满足电机散热要求的前提下, 还须综合考虑水冷机壳筒壁承受的压力。水冷电机在运行时, 应考虑水源的质量或进、出水口压力差, 当水道被堵塞或进、出水口压力差过大时, 水套内、外筒壁就会承受附加压力, 若压力超过筒身可承载的强度, 壳体就会发生变形现象, 外表出现波纹或被压瘪。在这种情况下, 若消除此压力载荷后壳体无法恢复原状, 即称为机壳筒壁鼓胀。为了杜绝这类隐患, 根据 MT/T 478—2011《YBS 系列输送机用隔爆

型三相异步电动机》^[2]的技术要求 4.2 条规定: 水冷电动机冷却工作压力不大于 3 MPa。

(1) 内筒壁强度计算。内层筒壁受到水由外向内的压力, 如果壁厚不够, 壳体将失去原来的形状而被压瘪或出现纹波, 导致筒体失稳。在一定的筒体外径、厚度、长度、材料力学性能条件下, 导致这种失稳的外压最小值称为临界压力。根据电机外形长短, 圆筒可分为长圆筒、短圆筒。

长圆筒临界压力 p_{cr} 计算:

$$p_{\text{cr}} = \frac{2E}{1-\nu^2} \left(\frac{t_1}{D_1} \right)^3 \quad (9)$$

式中: E ——机壳材料在设计温度下的弹性模量;

ν ——泊松比, 因电机机壳均为合金钢板, 所以取 ν 为 0.3;

t_1 ——内筒壁厚;

D_1 ——圆筒中面直径, 等于圆筒内径加上壁厚 t_1 。

短圆筒临界压力 p_{cr} 计算:

$$p_{\text{cr}} = \frac{2.59Et_1^2}{L_{D_1} \sqrt{\frac{D_1}{t_1}}} \quad (10)$$

通常以“临界长度”区分长圆筒和短圆筒类型, 临界长度以 L_{cr} 表示, 当 $L_{\text{轴}} > L_{\text{cr}}$ 时为长圆筒, 反之为短圆筒。

当式(9)等于式(10), 可推断出临界长度:

$$L_{\text{cr}} = 1.17D_1 \sqrt{\frac{D_1}{t_1}} \quad (11)$$

这种临界状态下, $L_{\text{轴}}$ 与 D_1 比值较小, t_1 与 D_1 比值较大, 圆筒的筒体较短, 壁厚较厚, 整体刚性较好, 不会因失稳而破坏。这种圆筒称为刚性圆筒。

一般情况下, 压力达到临界压力值的 1/3~1/2 时长圆筒就可能会被压瘪。因此, 机座设计时不允许在外压力等于或接近临界压力 p_{cr} , 必须有一定的安全裕度。许用压力必须比临界压力小, 即许用压力 $[p]$ 计算如下:

$$[p] = \frac{p_{\text{cr}}}{k} \quad (12)$$

其中: k 为稳定安全系数, 根据 GB/T 150.1—2011《压力容器 第 1 部分: 通用要求》^[3] 4.4.1 中表 1 的规定, 对碳素钢、低合金钢要求 k 为 2.7, 若采用

其他材料也可参考上述规定选取。

(2) 外筒壁强度计算。外筒壁临界压力 p_{cr} 计算:

$$p_{cr} = \frac{2[\sigma]^t \phi t_2}{D_2 + t_2} \quad (13)$$

式中: $[\sigma]^t$ ——材料在设计温度下的许用应力;

ϕ ——焊接接头系数;

D_2 ——外筒壁内径;

t_2 ——外筒壁厚。

对于常温下外筒壁材料许用应力 ($-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$) 计算为

$$[\sigma]^t = \min \left\{ \frac{\sigma_b}{n_b}, \frac{(\sigma)_{0.2}}{n_s} \right\} \quad (14)$$

式中: σ_b ——抗拉强度;

$\sigma_{0.2}$ ——屈服强度;

n_b ——抗拉强度系数;

n_s ——屈服安全系数。

常温下,碳钢和低合金钢的抗拉强度系数为 2.7;碳钢和低合金钢的屈服强度系数为 1.5。

根据 GB/T 150.1—2011《压力容器 第 1 部分:通用要求》4.5.2.2,钢制压力容器的焊接接头

系数规定如下。

(1) 双面焊对接接头和相对于双面焊的全焊透对接接头。全部无损检测,取 ϕ 为 1.0;局部无损检测,取 ϕ 为 0.85。

(2) 单面焊对接接头(沿焊缝根部全长有紧贴基本金属的垫板)。全部无损检测,取 ϕ 为 0.9;局部无损检测,取 ϕ 为 0.8。

4 结 语

通过对水冷电机水路结构介绍、水路结构参数及水路外壳强度的计算及分析,为行业设计人员在设计此类电机时提供依据,提高水冷电机设计的可靠性及准确性。

【参考文献】

- [1] YBC系列采焊机截割部用隔爆型三相异步电动机:MT/T 476—2011[S].
- [2] YBS 系列输送机用隔爆型三相异步电动机:MT/T 478—2011[S].
- [3] 压力容器 第 1 部分:通用要求:GB/T 150.1—2011[S].

收稿日期:2018-07-01

(上接第 73 页)

- [13] 金志颖,杨仕友,倪光正,等.EMS 型磁悬浮列车电磁系统动态电磁场的有限元分析及其悬浮与牵引力特性的研究[J].中国电机工程学报,2004,24(10):133-137.
- [14] 王厚生,杜玉梅,夏平畴,等.电动式磁悬浮列车金属板轨道结构的研究[J].中国电机工程学报,2005,25(7):162-165.
- [15] 陈贵荣,常文森.磁悬浮列车悬浮电磁铁设计研究[J].国防科技大学学报,1993,15(4):10-15.
- [16] 尹力明,陈贵荣.吸力型磁悬浮列车的悬浮电磁铁的设计原理和计算方法[J].机车电传动,1992(5):14-19.
- [17] 张颖,陈慧星,吴志添,等.电磁永磁混合磁悬浮列车的磁铁结构优化设计[J].机车电传动,2008(5):30-32.
- [18] 李云钢,张晓,程虎,等.EMS 磁悬浮列车的零电流

型永磁电磁混合磁铁设计技术研究[J].机车电传动,2011(5):30-32.

- [19] 李云钢,闫宇壮,程虎.混合 EMS 型磁悬浮列车的悬浮磁铁设计与分析[J].国防科技大学学报,2006,28(5):94-98.
- [20] 李云钢,程虎,张鼎.EMS 型电磁永磁混合悬浮控制问题[C]//第二十四届中国控制会议论文集,2005:871-873.
- [21] WANG L, YU P, LI J, et al. A practical magnetic flux density observer for hybrid suspension system of maglev train[C]//第 36 届中国控制会议论文集(G),2017:9926-9933.
- [22] 张瑞华,严陆光,徐善纲,等.几种典型的高速磁悬浮列车方案比较[J].电工电能新技术,2004,23(2):46-50.

收稿日期:2018-07-02