

低速大转矩电机冷却系统数值计算^{*}

姚丙雷, 王鸿鹄

(上海电机系统节能工程技术研究中心, 上海 200063)

摘要: 在低速大转矩电机系列设计中, 考虑到机座的通用性和外形尺寸的规范性, 采用了轴向水路的水冷机座结构。通过对电机冷却系统的流体场计算, 得到了电机的散热情况, 耦合温度场计算, 得到了电机冷却水和机座的温升, 并通过对机座的模态分析得到了电机的固有振动频率。

关键词: 低速大转矩电机; 永磁同步电机; 水冷; 数值计算

中图分类号: TM 301 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)05-0088-04

Numerical Calculation of Cooling System of Low Speed High Torque Motor^{*}

YAO Binglei, WANG Honghu

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

Abstract: In the series design of low speed high torque motor, the water cooled frame structure of axial water was adopted, considering the universality and the specification of the size of the frame. Through the calculation of the fluid field of the motor cooling system, the heat dissipation parameters of the motor were obtained. The temperature rise of the cooling water and the frame of the motor was obtained. The natural vibration frequency of the motor was obtained through the vibration mode analysis of the frame.

Key words: low speed high torque motor; permanent magnet synchronous motor (PMSM); water-cooling; numerical calculation

0 引言

在传统工业设备中, 当电动机输出的转速、转矩不能直接满足负载使用要求时, 通常采用齿轮箱、皮带轮、液力耦合器等中间传动装置来改变转速、转矩, 诸如用于皮带机、球磨机、搅拌机之类的低速重载设备, 由此造成电机和负载设备之间传动效率降低、设备体积大、故障率高、安装维护不方便, 同时增加设备振动与噪声, 降低设备精度、缩短设备寿命。随着电机及其控制技术的发展, 低速大转矩的永磁同步电动机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 系统的成功研制使得电机直接驱动负载设备成为可能。采用低速大转矩 PMSM 直驱系统后, 与普通异步电机带减速机结构相比, 具有很多明显优势: 可实现设备直联, 取消传统的齿轮减速机构, 传动效率高, 节材节

能; 设备更加紧凑, 体积小、重量轻、可靠性高、维护方便; 设备振动小、噪声低、寿命长; 避免了减速机带来的传动齿隙, 提高了系统的结构谐振频率, 运动控制系统不容易发生振荡失效情况, 控制对象的动、静态误差可得到有效控制。

低速大转矩 PMSM 主要应用于搅拌机、球磨机、拉丝机等低转速负载, 在设备中与负载设备直联, 使得电机与加工、处理、运输的物料距离很近, 经常伴随着高温、粉尘等恶劣工况。普通空冷方式电机具有成本较低的优点, 但在应用于搅拌机、球磨机等直驱电机中时, 很可能由于环境温度过高导致电机的损坏, 而设备作业中所带来的粉尘等杂质可能会堵塞风路, 对电机的温升造成不利影响。考虑到风冷系统的缺陷, 采用了机座水冷的冷却方式。

本文通过分析电机机座模型的特点, 建立了

^{*} 基金项目: 上海张江国家自主创新示范区专项发展资金重点项目 (201609-PT-C1085-002)

作者简介: 姚丙雷 (1976—), 男, 高级工程师, 研究方向为永磁电机。

电机机座模型,进行了流体场、温度场计算,并为了防止共振,对机座的振动模态进行了计算。

1 机座模型

常用的水冷机座的结构大体可分为轴向水路、周向水路两种结构^[1-2]。轴向水路优点是结构简单,缺点是电机温度沿周向分布不均,适用于外径较小的电机;周向水路的优点是阻力最小,缺点是结构较为复杂,而且会导致机座前后的温度分布不均,适用于轴向长度较短的电机。低速大转矩系列电机的规格很多,考虑到生产、加工、安装的通用性和规范性,同一机座号匹配多种功率的电机,轴向水路结构通过简单的内、外水套和折流筋长度的调整,即可适应于不同的机座长度,生产便利且机座散热情况的规律性强,有利于电机设计。

低速大转矩电机机座结构如图 1 所示,包括内水套、外水套、折流筋、封水环和法兰等结构。

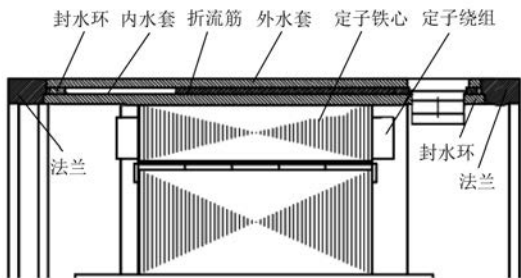


图 1 机座结构

内、外水套在径向上限制了冷却水的流动,封水环限制了冷却水的轴向流动,折流筋在周向上将空腔划分为多个水道,电机的冷却水通过入水孔进入机座,通过各水道将铁心传递到机座中的热量带出,通过出水孔流出机座。折流筋和冷却水道分布展开图如图 2 所示。

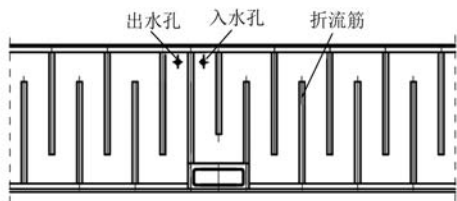


图 2 冷却水道分布图

根据电机电磁和冷却系统的参数,完成电机结构设计,建立机座三维模型,如图 3 所示。



图 3 机座模型

2 流体与温度计算

在计算机座散热时,需要首先对流体的运动情况进行分析,以便得到机座中水道表面的对流换热系数来进行温度场计算。建立电机流体区域模型,即水道空腔模型。模型图和剖分图如图 4 所示。

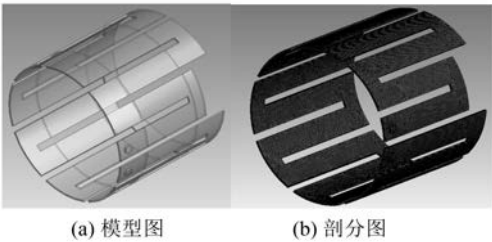


图 4 流体模型

在计算中依据电机冷却结构的特性增加了流体的重力计算,计算结果如图 5 所示。

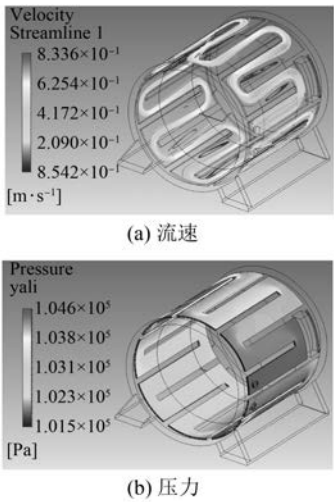


图 5 流体场计算

从图 5 中可以看出,在冷却水道中流速最高值约为 0.8 m/s,出现在水道中远离入水孔的一侧;流速的最小值约为 0.08 m/s,出现在靠近入水孔的一侧,且此时主要是水的涡流状态,涡流主要

出现在流体克服重力向上运行的靠近入水孔的一侧。因此设计时水道不宜过宽, 以免导致水流分布不均匀。水道的压力从入水孔至出水孔依次减小, 在弯角处的压力稍大于直线处, 水流折返增加了局部压力损失。可见, 在设置水道参数时, 需兼顾冷却水的均匀分布与水道压力损失。

通过电机的热流耦合, 可以计算得到电机冷却水分布和流速的不均匀带来的散热系数的分布, 结合电机的稳态损耗作为温度场计算的热源, 得到电机的流体温度场和机座温度场, 如图 6 所示。

从图 6 可以看出, 散热系数值的大小与冷却水的流速相对应, 散热系数最大点出现在远离入水孔一侧。流体入口温度为 30 ℃, 出口温度为 40 ℃, 散热系数大的一侧流速较快, 使此部分流体停留时间较短, 温度也较低, 流速低的部分流体温度也较高, 最大值约为 54 ℃。机座温度分布与热源的位置和机座水道的散热系数分布相关。由于电机的损耗几乎全部通过定子铁心传递到机座上, 一部分热量通过折流筋直接传递到机座外表面, 等效于机座表面自然冷却, 效果较差; 另一部分热量通过冷却水传递到机座外表面, 冷却效果较好。机座的最高温度出现在折流筋部分。这部分温度取决于折流筋宽度和折流筋两侧流体的散热情况。经计算电机内壁的最高温度可达 61 ℃, 而机座外表面的温度较低, 最高温度为 52 ℃。

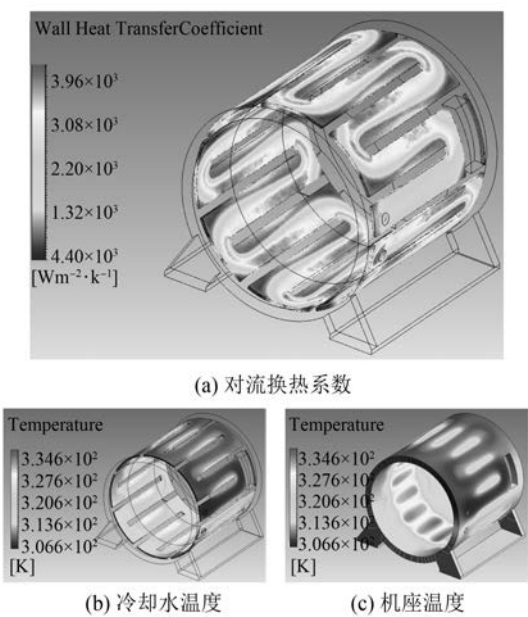


图 6 温度场计算

3 固有振动频率计算

机座水冷机座不同于普通铸铁机座和钢板机座, 是由定子内外套、折流筋、法兰等结构焊接而成的中空结构, 在结构上与普通机座有较大差别。为了检验机座与转子在额定转速下的振动情况, 在本项目中对机座进行了模态分析, 计算结果如图 7 所示, 频率如表 1 所示。



图 7 各阶振型

表 1 各阶振型频率

振型	频率/Hz
一阶	82.145
二阶	187.390
三阶	199.020
四阶	279.780
五阶	324.220
六阶	376.220

低速大转矩 PMSM 的转速较低, 为 150 ~ 500 r/min, 与机座对应的共振转速差距极大, 不会产生共振。

4 结 语

水冷机座散热系统同时具备散热性能好、密封性好、散热不依赖电机转速等特点, 满足低速大

转矩电机对散热系统的要求。在水路类型选择方面, 可根据电机的尺寸、安装条件和工况需求等因素进行确定。在低速大转矩系列电机中, 考虑到系列电机的通用性和低速电机功率密度较低的特点, 选择了轴向水路结构, 通过合理的机座水路参数设计, 在散热效率和均匀度上都达到很好的效果。由于水冷机座结构的特殊性, 计算了机座的固有振动频率, 结果表明机座的固有振动频率和电机临界转速频率相差较大, 不会产生共振。

【参 考 文 献】

[1] 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): 2-4.
[2] 刘兆江. 采煤机用防爆型水冷电机设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2009.

收稿日期: 2017 -12 -04



(上接第 71 页)

【参 考 文 献】

[1] TONG W, WU S, AB Z, et al. Thermal analysis of direct-drive permanent magnet wind generator using both lumped parameter network and finite element method [C] // Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, IEEE, 2010: 1-4.
[2] 黄苏融, 张琪, 谢国栋, 等. 燃料电池轿车用高密度无刷永磁牵引电动机[J]. 机械工程学报, 2005, 41(12): 69-75.
[3] 黄苏融, 钱慧杰, 张琪, 等. 现代永磁电机技术研究与应开[J]. 电机与控制应用, 2007, 34(1): 1-6.
[4] CHENG M, CHAU K T, CHAN C C, et al. Nonlinear varying-network magnetic circuit analysis for doubly salient permanent-magnet motors [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 36(1): 339-348.
[5] STATON D A, CAVAGNINO A. Convection heat transfer and flow calculations suitable for analytical

modelling of electric machines[C] // IEEE Industrial Electronics, Conference on IECON, 2006: 4841-4846.
[6] 周洁, 谢卫. 用等效磁网络法与有限元法计算永磁电机参数的比较[J]. 西安交通大学学报, 1998(4): 23-26.
[7] ZHANG G, HUA W, CHENG M. Nonlinear magnetic network models for flux-switching permanent magnet machines[J]. Science China, 2016, 59(3): 494-505.
[8] NAKAMURA K, SAITO K, ICHINOKURA O. Dynamic analysis of interior permanent magnet motor based on a magnetic circuit model [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(5): 3250-3252.
[9] YAMAZAKI K, ISHIGAMI H. Rotor-shape optimization of interior-permanent-magnet motors to reduce harmonic iron losses[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 57(1): 61-69.
[10] 陈世坤. 电机设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

收稿日期: 2017 -11 -07