

异步牵引电机冷却设计的分析与验证

丰帆, 郑国丽, 黄鹏程, 黄松海
(中车株洲电机有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 以某异步牵引电机为例, 介绍了电机冷却系统设计的过程和主要原则。分析了电机内冷却介质的流动特性并提出改善流量分配的措施; 通过对比电机定子绕组温升的计算值与试验值, 验证了计算方法; 详细分析了海拔高度对空气性质和电机绕组温升的影响, 并阐述了在冷却设计时考虑运行环境因素的重要性。介绍的设计思路和结论对异步牵引电机的冷却设计具有一定的参考价值。

关键词: 异步牵引电机; 冷却分析; 试验验证; 高原环境

中图分类号: TM 343 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)06-0063-04

Analysis and Verification of Cooling Design for Asynchronous Traction Motor

FENG Fan, ZHENG Guoli, HUANG Pengcheng, HUANG Songhai
(CRRC Zhuzhou Electric Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China)

Abstract: Taking an asynchronous traction motor as an example, introduced the process and the principles of the motor cooling system design. Firstly, the improvement measures of the flow distribution were proposed based on analysis of the flow characteristics of the coolant in the motor. Secondly, the calculated value and the experimental value of the stator winding temperature rise were compared, and the results showed that the calculation method was feasible. Finally, the impact of altitude on the properties of air and the motor winding temperature rise was analyzed, and the importance of considering the operating environment in the design of cooling system was emphasized. The design thinking and conclusions had certain referential value for the cooling design of asynchronous traction motor.

Key words: asynchronous traction motor; cooling analysis; test verification; altitude environment

0 引言

随着国家对高效节能电机的推广, 提高电机能效水平已成为电机行业共同关注的话题, 而电机能效的提升依赖于节能技术研究和产品开发。根据电机设计的基本规律说明, 单机容量越大, 其经济性能越好。单机容量的增大, 主要依靠通风冷却技术的改进。通风冷却技术的改进, 不仅使材料消耗降低, 而且由于尺寸减小给厂房建筑和运输带来便利。强化通风冷却可使电机维持在较低的温升水平, 从而可以减小热变形和减小振动磨损, 提高绝缘寿命。良好的通风冷却系统, 还具有通风损耗小、噪声低等特点。因此, 对于各类电

机来说, 对其通风冷却技术的研究具有重要的意义^[1-3]。

电机冷却系统设计过程如下: 确定网络特性即网路中的压力损失与网路内冷却介质流量之间的关系; 计算流阻、系统内冷却介质的流量及压力损失; 计算电机各部件温升, 其中定子绕组的平均温升和热点温升尤为重要。

冷却系统设计原则如下:

- (1) 总风量满足设计要求;
- (2) 电机各部分的风量分配力求合理;
- (3) 单位体积流量的通风损耗小;
- (4) 电机运行在允许的温度范围内, 温度分布均匀;

作者简介: 丰帆(1985—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电机通风散热分析。

郑国丽(1984—), 女, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电机传热与流动数值模拟。

(5) 结构简单,运行安全、可靠,维护与加工方便。

1 流动特性计算

本文以某异步风力发电机为例,介绍电机冷却系统设计过程。电机冷却方式为 IC17,电机冷却介质通过进风道从电机的远方介质中吸入电机,经过电机后,直接返回到周围介质;冷却介质运动的推动方法是通过与电机分开安装的风机驱动冷却介质运动。电机内部布置了 4 个轴向冷却风路,即:(1)定子轭部通风孔;(2)定子槽口通风沟及气隙;(3)转子轭部通风孔;(4)机座与定子铁心外圆之间的通风道。此种轴向强迫通风方式具有风阻低、通风损耗小、噪声低等特点。

电机通风计算的目:确定电机冷却系统的流阻、风道内冷却介质的流速和沿冷却通道的压力损失;选择足以补偿网络损失的压力降;确定冷却介质流量的增压部分及通风所需的功率。

1.1 风阻计算

冷却介质通过管道时,压力损失包括沿程损失和局部损失,压力降可表示为

$$\Delta P = 1/2\zeta\rho v^2 = \zeta\rho q_v^2/2A^2 = Zq_v^2 \quad (1)$$

式中: ζ ——损耗系数;

ρ ——密度;

v ——速度;

q_v ——通过管道的体积流量;

A ——管道的截面积;

Z ——管道的风阻, $Z = \frac{\zeta\rho}{2A^2}$ 。

电机的风阻主要部分为局部风阻,包括扩大风阻、缩小风阻、转弯风阻、入口风阻和出口风阻等。在计算截面扩大或缩小的相应风阻时,局部损耗系数对应于小截面处的流速,所以 A 要用小截面代入^[4]。

冷却介质通过管道时,风路可能是串联、并联或者是串并联。串联风路如图 1(a)所示,风路流量相同,风路所需全部压力等于各部分压力损失的总和。串联风阻 $Z = \sum_1^n Z_n$; 并联风路如图 1(b)所示,并联各支路的压降相同,并联风阻

$$Z = \frac{1}{[\sum_1^n (1/\sqrt{Z_n})]^2}$$

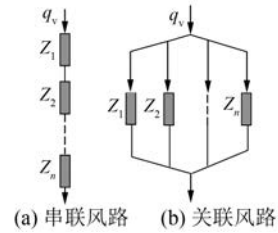


图 1 等效风路图

1.2 冷却风量计算

首先根据能量守恒关系,计算异步牵引电机所

需冷却介质总的体积流量 $q_v = \frac{\sum p_h}{c_a \Delta\tau_a} = 1.18 \text{ m}^3/\text{s}$,

$\sum p_h$ 表示由冷却介质带走的损耗, c_a 表示冷却介质比热容, $\Delta\tau_a$ 表示冷却介质通过电机后的温升。然后采用等效风路法计算总风阻,获得电机风阻特性曲线,如图 2 所示。当体积流量为 $1.18 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,压力降为 501 Pa,说明只有提供 501 Pa 以上的压头,才能提供所需的冷却风量。

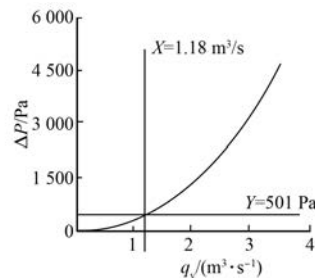


图 2 风阻特性曲线

1.3 风量分配

电机冷却系统设计时,除了计算冷却介质总流量外,还要计算电机各部分的流量分配。合理的流量分配可以降低温升,提高温度分布的均匀性,增强电机运行的可靠性。对于发热量高、热阻大的部件应适当增加冷却风量的分配。风道设计时可通过调整风道流通截面面积,并联风道数等方式调节各部分的流量分配比例。本文计算了异步牵引电机流经各部分风道的流量占总流量的比例,如图 3 所示。定子风道的冷却风量占总风量的 45%,转子风道占 33%,机座风道和气隙分别占 19% 和 3%,大部分热量来自定子铜耗和铁耗。因此,合理提高定子风道和机座风道流量比例有利于优化电机的散热效果。

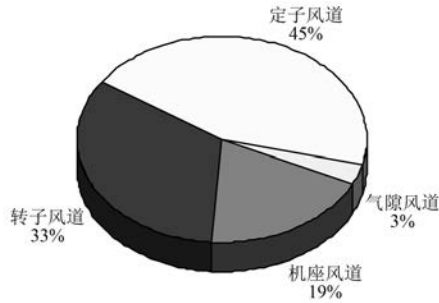


图3 各风道流量比例分配

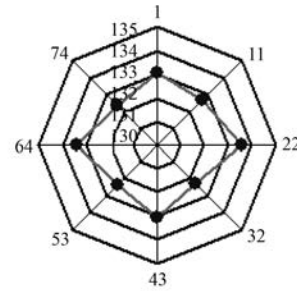


图5 定子绕组周向温度分布

2 定子绕组热计算

热计算的基本要求是计算绕组最高温升和平均温升,因为在所采用的绝缘等级下最高温升将限制电机功率,而平均温升是最合适的运行指标。电机温升的计算方法包括热参数法、等效热路法、温度场法等。

本文基于计算流体动力学原理,采用温度场法计算电机温度场,输出电机绕组平均温升为87.8 K,通过电阻法测量电机绕组平均温升为81.7 K,相对误差为7.5%,在工程允许误差范围内,验证计算方法可行。计算绕组最高温升为103 K,电机绝缘等级为200级,绕组温升符合标准。定子绕组轴向温度分布如图4所示。由于电机采用轴向强迫通风方式,冷却空气由电机一端进入,另一端排出。由图4可知,绕组轴向温度变化梯度较大,沿空气流动方向,绕组温度逐渐升高。

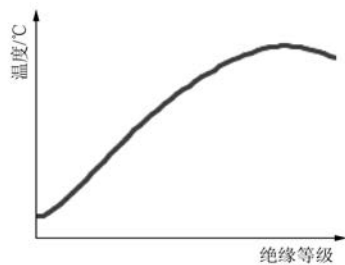


图4 定子直段绕组轴向温度分布

图5为定子绕组周向温度分布,定子共84槽,沿圆周方向依次提取1、11、22、32、43、53、64、74号槽内绕组的温度,由图5可知,各槽绕组沿圆周方向温度分布均匀,最大偏差小于2 K。

3 海拔不同对绕组温升的影响

电机冷却设计过程中,需要综合考虑电机的

实际运行环境,如果周围介质的温度和密度不同于规定值,则计算和试验时就应考虑到这些参数对绕组热状态的影响。还必须考虑电机的运行条件:安装的海拔高度、湿度、污染程度及介质的一些其他因素,例如高原环境空气稀薄,散热条件差,电机在这种情况下运行,温度要比海拔低的地区高。在考虑海拔高度对电机温升的影响时,可将环境温度的影响一并进行补偿折算,虽然二者可以互相抵偿,但是设计时仍需要一定裕量。

3.1 海拔与空气性质的关系

3.1.1 海拔与气压的关系

理想情况下,大气压力与海拔具有一一对应的关系^[5]。在海平面附近,海拔每升高100 m,气压下降约700 Pa。由于空气具有可压缩性,大气压力与海拔具有非线性关系。海平面到11 km以下地区大气压力为

$$p_z = 101.325 \times \left(1 - \frac{Z}{44\ 329}\right)^{5.255\ 876} \quad (2)$$

式中: p_z ——海拔 Z 处的气压, kPa;

Z ——海拔, m。

3.1.2 海拔与气温的关系

气温变化除受纬度影响外,还随海拔的增加而递减:

$$t_z = t_A - \frac{g_1 \times \Delta Z}{100} \quad (3)$$

式中: t_z ——海拔 Z 处的气温, ℃;

t_A ——相邻气象台站的气温, ℃;

g_1 ——气温梯度,取0.5~0.7 K/100 m;

ΔZ ——海拔 Z 处与相邻气象台站海拔之差, m。

3.1.3 压力、温度与密度的关系

根据理想空气的状态方程:

$$\rho = \frac{p}{R_g \times T} \quad (4)$$

式中: R_g ——气体常数, 为 287 J/kg·K;

p ——压力, Pa;

T ——温度, K。

已知不同海拔下的压力和温度可以推导出空气的密度。

3.1.4 海拔对空气物性的影响

空气的导热系数随温度升高而增大, 在通常的压力范围内, 其导热系数随压力变化很小, 故工程计算中常可忽略压力对空气导热系数的影响; 空气的黏度随压强变化很小, 空气随温度升高黏度增大; 空气的比热容主要受空气温度影响。说明海拔不同, 主要影响空气的密度, 而空气导热系数、黏度、比热容等特性主要受温度影响较大。

3.2 不同海拔下绕组温升

采用数值模拟的方法计算相同体积流量、不同海拔下定子绕组温升如表 1 所示。通过计算得知, 海拔升高 5 000 m, 绕组平均温升相对增加 42%, 相当于海拔每升高 100 m, 平均温升升高了 0.74 K; 热点温升相对增加 45.6%, 相当于海拔每升高 100 m 绕组最高温升升高了 0.94 K。可见海拔对绕组温升影响很大, 根据国家标准规定, 当使用地点的海拔与试验地点海拔不同时, 应根据具体情况合理修正。进一步说明进行冷却设计时应充分考虑电机实际运行环境, 保证设计裕量是确保电机可靠运行的前提条件。

表 1 不同海拔绕组温升对比

绕组温升	运行环境	
	海拔 0 m、 环温 40 °C	海拔 5 000 m、 环温 40 °C
定子绕组平均温升/K	88	125
定子绕组热点温升/K	103	150

4 结 语

(1) 根据能量守恒关系计算得出冷却电机需要的总风量为 1.18 m³/s, 采用等效风路法计算整机风阻, 由风阻特性曲线得到增压元件需提供 501 Pa 的压头。

(2) 计算电机各部分的流量分配, 流经定子风道的风量占总风量的 45%, 转子风道占 33%, 机座风道和气隙分别占 19% 和 3%, 因为热量大部分来自定子铜耗和铁耗, 因此, 定子风道和机座风道流量分配比重多一些, 有利于电机冷却。

(3) 计算异步牵引电机的绕组平均温升为 87.8 K, 试验值 81.7 K, 相对误差 7.5%, 在工程允许误差范围内, 验证计算方法可行, 电机采用轴向通风, 绕组具有周向温度分布均匀, 轴向温度分布不均的特点, 设计时应保证绕组热点温度低于标准值。

(4) 海拔越高, 空气密度越小, 散热条件越差, 根据海拔与空气性质的关系, 确定不同海拔下空气属性, 计算海拔 0 m 和 5 000 m 的绕组温升, 海拔升高 5 000 m, 绕组平均温升升高 37 K, 热点温升升高 47 K。

【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] А.И. 鲍里先科, В.Г. 单科, А.И. 亚科夫列夫. 电机中的空气动力学与热传递[M]. 魏书慈, 邱建甫, 译. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [4] 陈世坤. 电机设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [5] 苟红松, 李永生, 罗占夫. 高海拔地区隧道施工通风风量计算及风机选型研究[J]. 隧道建设, 2012, 32(1): 53-56.

收稿日期: 2016-08-15

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告

网上投稿: www.motor-abc.cn