

2极大功率自润滑高压高速三相异步电动机设计

赵岩 李梦林 王中亮

南阳防爆集团有限公司,河南南阳(473008)

摘要 介绍了2极大功率自润滑高压高速电机设计所考虑的主要问题。主要包括功率的提升,自润滑的实现,振动与噪声控制。提升功率需要增加有效材料,不利于自润滑实现,并且随着功率的提升,电磁激振力增强,增大了振动和噪声控制的难度。如何解决功率提升后所面临的自润滑、振动、噪声等问题?文中结合具体事例,提出了功率提升的解决方案,提出了轴承自润滑设计主要相关参数的关系以及自润滑实现的主要措施,提出了振动与噪声产生的主要原因和相应的解决措施。

关键词 大功率 自润滑 振动 噪声

中图分类号 TM343 **文献标识码** B **文章编号** 1008-7281(2007)05-0008-05

Design of 2-Pole High-Power Self-Lubrication High-Voltage High-Speed Three-Phase Induction Motor

Zhao Yan, Li Menglin, and Wang Zhongliang

Abstract This paper introduces some main matters in design of 2-pole high-power self-lubrication high-voltage high-speed motor, such as improving of output, obtaining of self-lubrication, control of vibration and noise. Improving of output need increasing of effective material, and self lubrication is difficult to carried out. Alongside the growth of output, electromagnetic excited force is increased, so vibration and noise of motor is difficult to control. How to solve the matters of self lubrication, vibration and noise after improving output? This paper presents the relations between main parameters in design of self lubrication bearing and some main measures to carried out it. The main reasons caused by vibration and noise and appropriate measures are presented also.

Key words Large output, self lubrication, vibration, noise

0 引言

随着经济的快速发展和经济结构的不断调整,市场对大容量、高品质机电产品的需求不断增大;而日益严重的能源危机和污染问题也使市场对机电产品节能和环保的要求日渐提高。2极自润滑高压电机除去了因为油站所带来的场所要求、维护要求、油站的防爆要求(对防爆场所)等一系列的附加费用和污染问题,所以具有很高的性能价格比。然而2极大功率电机由于自身的特殊性使得自润滑实现非常困难,所以国内1000kW以上2极大功率电机基本上仍以滑动轴承强制润滑为主。

我公司为适应海上采油、油气管道输送等恶

劣环境的市场需要,近些年一直在开展2极电机滑动轴承自润滑技术攻关,积累了丰富的理论和实践经验,取得了丰硕的成果,已经掌握了2极电机滑动轴承自润滑的关键技术,在滑动轴承的选型、转轴材料的选取、轴承内部发热与散热的计算、润滑油的供应上均有成功的经验,完全可实现2000kW左右的2极电机的滑动轴承自润滑。

1 问题提出

此次承接YKK560-21400kW 10kV可润滑滑动轴承电机的设计开发,该电机设计容量按空冷冷却基本可以达到1800kW 6kV,这在国内基本处于2极大功率自润滑电机的前列,具体参数如下:

收稿日期:2007-05-07.

赵岩男 1976年生,毕业于合肥工业大学汽车与拖拉机设计制造专业,现从事高压中型电机设计开发工作。

型号 YKK560 - 2;额定功率 1 400kW;额定电压 10kV;效率 95%;功率因数 0.88;堵转电流倍数 7;堵转转矩倍数 0.6;最大转矩倍数 1.8;定子温升 90K;噪声 (Lp) 95dB (A);振动 2.8 mm/s;冷却方式: IC611;自润滑滑动轴承;海拔 1 320m;环温 - 31.4 ~ +36.6。

2 设计难点

功率的提升:正常产品,此电机需在 H630上制造,此次是在 H560中心高上设计。为提升电机的功率,需要增加定转子有效材料的用量;而加长铁心会增加转子重量,轴承的比压增加,摩擦损耗增大,不利于自润滑的实现;并且随着功率的增大,电机的损耗相应加大,可能影响轴承油温。

2极自润滑的实现:与强制润滑相比,2极自润滑电机缺少油站提供的循环冷却和润滑,而2极电机轴径线速度较高,轴承发热量较大,并且可能存在由转子铁心向轴承导热,所以直接导致润滑油膜的不稳定和润滑油品质的快速下降,大大增加了2极自润滑的设计难度。

振动与噪声控制:2极大容量电机(特别是滑动轴承)的振动与噪声控制历来是国内外电机制造厂家和科研部门的研究课题。“空-空冷却”的电机还多了外风路的噪声和振动源,所以是2极电机振动与噪声控制的难点。

以下分别就上述问题的设计思路进行介绍,供读者参考。

3 解决功率提升问题

为满足电机电压、功率的要求,又符合企业标准化、通用化、系列化、信息化的要求,从而在满足设计需要的同时最大限度的降低设计、生产和售后服务成本,按照常规设计思路,有以下关系式

$$D^2 \cdot l_{ef} \cdot n/P = 6.1 / (K_{vm} \cdot K_{dp} \cdot A \cdot B) = C_A \text{ (电机常数)} \quad (1)$$

式中, D 电枢直径; l_{ef} 电枢计算长度; n 转子转速; P 计算功率; K_{vm} 弧极系数; K_{dp} 波形系数(近似为 1.11); K_{dp} 绕组系数(通常按基波绕组系数带入); A 线负荷; B 气隙磁密。

故近似推出

$$P \text{ (计算功率)} \propto D^2 \cdot l_{ef} \quad (2)$$

对于此次订货,采用 Q/NF234企业标准,通

用 H560 - 2工装模具,通过加长铁心 l_{ef} 来提高功率。

为避免齿谐波产生同步附加转矩和振动与噪声的影响,现有定转子槽配合符合以下要求:

$$\begin{cases} Z1 & Z2 \\ Z1 - Z2 & \pm 2p \\ Z2 & Z1 \pm i \\ Z2 & Z1 \pm i \quad i=1, 2, 3 \end{cases}$$

电磁参数按以下范围控制:

- B :控制在 0.5 ~ 0.8T 范围内
- B_{d1} :控制在 1.35 ~ 1.65T 范围内
- B_{d1} :控制在 1.0 ~ 1.4T 范围内
- B_{d2} :控制在 1.35 ~ 1.65T 范围内
- B_{d2} :控制在 1.0 ~ 1.55T 范围内
- AJ_1 :控制在 $140 \times 10^9 \sim 290 \times 10^3 A^2 / m^3$ 范围内

内

但是此次 YKK560 - 2 1 400kW 10kV 电机的设计,为提升功率,计算铁心较长,实际铁心两端冷却风道狭窄,电机温升难以保证,并且会影响轴承油温;在此基础上进行转子校核,电机自润滑和振动均难以保证。所以,通过临界转速计算修正转子长度,然后根据自润滑要求进行转子校核。结果转子铁心比原来缩短将近 300mm。这样一来,电机的机械性能有了保证,而且风路通畅,从而使下一步的电磁计算有了参照平台。

由于铁心缩短,功率需要提升,所以只有提高 A —线负荷的数值(见式(1),而 B 的增加应慎重考虑)。 $A = NI$ (N —每相串联匝数, I —额定电流), AJ 值也不能过大,所以只有增加 N 值和导线面积。

按照上述思路,经过核算,加大了定子槽形,确保电磁性能符合要求。这里要说的是,定子槽形的加大还要注意以下几点影响:

- (1) 定子齿部和轭部磁密对电磁噪声的影响;
- (2) 定子齿部和轭部的刚性对电机振动和噪声的影响;
- (3) 增安型电机应注意气隙和转子齿磁场引起的谐波漏抗对转子表面温度的影响;
- (4) 双层成型线圈端部间隙将减小,可能造成下线困难和影响端部通风。

4 解决 2 极自润滑问题

对于 2 极滑动轴承计算原理,可以按以下公式简要说明

$$t = W_f / Q \tag{3}$$

$$W_f = v \cdot d \cdot K (\nu \cdot P \cdot d / l)^{1/2} \tag{4}$$

$$h = (1 - x) \tag{5}$$

$$P / (l \cdot d)^2 \tag{6}$$

式中, t —润滑油温升 (自润滑 [t]按经验值较核); W_f —轴承摩擦损耗; h —最小油膜厚度 (自润滑 [h]按经验值校核); K —轴承承载能力系数; Q —轴瓦油量 (自润滑按经验值带入); v —轴径线速度; k —摩擦计算系数; ν —润滑油粘度; P —轴径载荷; d —轴径直径; l —轴径长度; x —相对偏心。

由式 (3)、(4)可知, 2 极自润滑情况下主要控制轴承摩擦损耗 W_f 的增加。由式 (4)可知, ν 、 P 、 d 和 l 的增加均会造成 W_f 的增加,使润滑油温升 t 变大,导致在无外界循环油站冷却的情况下轴承室油温过高,润滑油品质下降,不能持续产生稳定的油膜,即自润滑失败。在与多极数自润滑电机相比较的情况下,我们可以看出: 2 极自润滑电机轴径线速度 v 远高于多极数自润滑电机,所以在保证 [t]以及 h 、 l 相对稳定的情况下,需要 d 值相对减小较多,并且对 P 值也有限度。

由式 (5)、(6)以及图 1 ($h - x - k$ 曲线)可知,要使 2 极自润滑油膜稳定,在保证 [h]以及 h 、 l 相对稳定的情况下,由于 d 值相对减小较多,所以 P 值相应不能过大。

所以,比较常规 2 极强制润滑来讲, 2 极自润滑轴径需要减小较多,并且要求 P 值不能过大,这样才能保证 2 极自润滑的实现。

主要的技术措施如下:

(1) 转轴的材料选用合金结构钢,在保证输出功率的情况下,尽量减小轴承台直径,以减小轴承内部的摩擦热,为实现自润滑奠定基础。

(2) 在电机的结构设计上采用双侧对称风路,使轴承处在冷风区,或采用隔板减少电机内部的热量向轴承的传递。

(3) 滑动轴承的设计依据德国标准 DN31690、DN31693、DN31694,在此基础上做了

改进设计,充分利用热传递的三种途径传导、对流、辐射将轴承内部的热量散出,使轴承在允许的温度内到热平衡。增大轴承座的散热面积,均衡油池温度,采用双油环带油。

经核算,轴承自润滑温升为 36,符合要求。

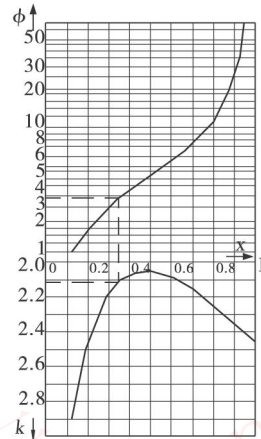


图 1 $h - x - k$ 曲线

5 解决振动与噪声问题

(1) 振动与噪声产生的原因

电机的振动与噪声来源包含三个方面:电磁、机械、通风。但在电机实际运行中各种原因相互作用,表象之下,各种主因与次因错综复杂,简述如下。

根据相关著述,有足够强度可以被耳感觉到的声音在频率 $f = 16 \sim 16\,000\text{Hz}$ 范围之内,而噪声仅在频率 $f = 400 \sim 5\,000\text{Hz}$ 范围之内,尤其是频率 $f = 1\,000 \sim 5\,000\text{Hz}$ 范围内的噪声。2 极大功率电机虽然可以通过选取合适的槽配合来减小谐波噪声和振动,但因为其主波磁场产生的力波次数较低 ($r=2$,见图 2),所以不可避免的表现出较强的低频振动和噪声。

2 极大功率电机一般为挠性转子,根据相关著述和生产实践,转子自身以及加工装配等环节的微小偏差均可产生转子的静偏心和动偏心,从而引起较强的低频振动。振频为 $2sf_1$ 的差拍振动同样不可避免。

对于 2 极电机的通风噪声,有以下关系式

$$f_b = 50kZ \quad (k=1, 2, 3, \dots) \tag{7}$$

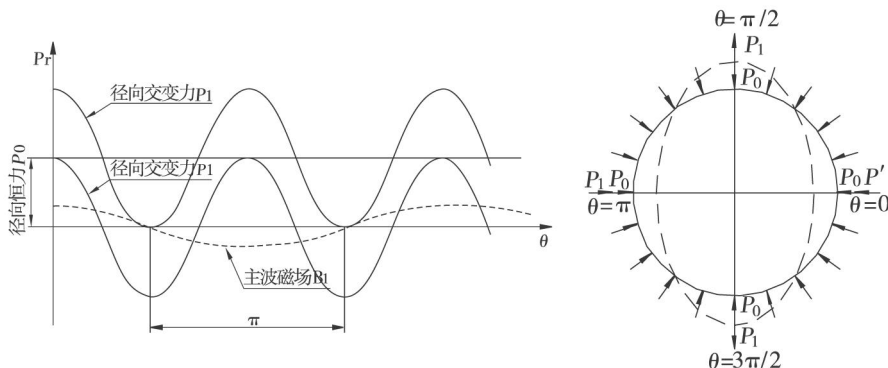
式中, f_b —通风噪声频率; Z —通风叶片数。

所以 2 极电机在高转速下转子通风槽板和内外风扇产生的高频通风噪声尤为显著,并且因为

电磁振动和通风的影响引起的相关零部件的强迫振动和共振也因为 2 极大功率电机的高转速和大功率从而在范围和强度上大大加强了。

由以上几方面因素可知,从电机的使用和环

保要求考虑,对于 2 极大功率电机的振动和噪声的控制主要表现为:自身的电磁特性及加工装配等环节引起的低频振动、机械和通风原因引起的高频噪声。



(2)对于 2 极振动的主要措施

a 临界转速计算

针对 2 极大功率电机特点,为避开 1 阶和 2 阶共振,临界转速按以下原则进行。

若按式估算

$$n_{cr} = \frac{2.69 \times 10^6 \times d_{cr}^2}{\sqrt{G_2 \cdot l}} \quad (\text{r/min}) \quad (8)$$

式中, n_{cr} —临界转速; d_{cr} —等截面等效轴直径; G_2 —转子重; l —轴承距。

计算临界转速高于额定转速 80% 以上,便不需要进行精确核算。

通常进行转轴计算(参见相关著述),至少要求计算电机转轴临界转速在额定转速的 $\pm 25\%$ 以外;若第一临界转速低于 40% 额定转速,则需要计算第二临界转速(转子临界转速的详细计算涉及到电磁力、材料、转子结构、与主机的联接等多种因素,一般的工程计算文献都有介绍,这里不再赘述)。

经核算,转子临界转速为 2 213r/min(为 74% 额定转速),挠度为 0.236mm(小于 10% 气隙值);

b 合理进行各主要结构件设计,经过计算并在试验基础上提高结构件强度和刚性,尤其注意避免结构共振。转轴采用高强度材料,经过转轴危险截面强度校核,按额定转矩考核安全系数为 4 倍,按工业运行 2.5 倍额定转矩(根据文献资料)考核安全系数接近 1.7 倍;端盖为减小形变提高刚性,采用了加强筋结构;

c 从结构设计上避免产生较大的不平衡量,

严格控制加工装配工艺,减小振动源的激振力。

(3) 对于噪声的主要措施

a 采取微孔消音的措施,风路系统利用消声材料进行消声处理;根据电机效率,核算外风路换热量,确定外风扇的最小尺寸;b 对定子齿部和轭部的刚性进行振动频率计算,确保其自振频率在安全范围内;c 进行合理的电磁设计(见前述),减小电磁噪声;d 合理确定转子通风结构和内外风路设计,减小通风噪声。

6 整体结构和绝缘

本电机内风路采用轴流式对称风路,外风路采用转轴自带离心式风扇,端盖式自润滑滑动轴承,结构紧凑合理。定子绕组采用成熟的减薄绝缘结构和 VPI 真空压力浸漆技术,在保证 10kV 绝缘性能的同时增强了电机散热能力。

7 型式试验结果

YKK560 - 2 1 400kW 10kV 型式试验结果见表 1。

表 1 YKK560 - 2 1 400kW 10kV 试验结果

性能指标	标准值	限值	试验值
(%)	95%		95.89
cos	0.88		0.919
I_{st}^*	7	8.4	7.03
T_{st}^*	0.6	0.51	1.86
T_m^*	1.8	1.62	3.06
温升 (K)	90K		78
噪声 dB(A)	95		90
振动 (mm/s)	2.8		2.2
轴温 ()	80/80		66/63

注: * 代表“标么值”。

(下转 19 页)

鼓形齿联轴器公称扭矩 125 000N · m,许用转速 1 650r/min。联轴器与电机轴都没有键,靠紧量传递扭矩。用加入高压油的方法将联轴器从轴上拆下,联轴器上有高压注油孔。

2 电机绝缘结构说明

电机绝缘的可靠性是决定电机寿命的重要标志之一。为了保证电机长期负载运行的可靠性,对电机实行以下的绝缘结构。

2.1 电机全部采用 F级绝缘结构,定子、转子均进行整体真空压力浸无溶剂漆(VPI)。

2.2 电枢冲片采用涂漆冷轧硅钢片,主极冲片、换向极冲片、机座冲片均采用涂漆冷轧薄钢板。

2.3 电枢线圈用 5 ×22.4铜线加工成变截面,除去毛刺以后包绝缘,导线绝缘半迭绕一层 0.07 ×20聚酰亚胺薄膜上胶带后热压成型,主绝缘直线部分半迭绕两层(斜边半迭绕一层)0.05 ×20聚酰亚胺薄膜带和半迭绕一层 0.11 ×25环氧聚酯薄膜粉云母带,匝间垫一层 0.07nomex纸,最外层平绕一层 0.06 ×20无碱带保护带。线圈端部上下层之间,各垫两层 0.3有机硅柔软云母板和 0.2聚芳纤维纸聚酯薄膜复合箔 NMN。电枢支架绝缘为先垫放一层 0.2NMN再扣上两层 U形压制绝缘罩,并用 0.1 ×20无碱带绑扎固定,结构简单可靠。

2.4 均压线采用蜗卷式结构,1/2均压。导线采用 1.8 ×6单玻璃丝包双层聚酰亚胺薄膜绕包铜扁线 SBMEB - 50/155,层间垫 0.2NMN和 1.5环氧玻璃布板 3240各两层,对地绝缘采用两层云母压制绝缘盒交错扣放,盒内再灌入环氧填充胶,使全台均压线形成一个整体,结构合理,安装方便。整个均压线圈固定在电枢后压板上。

2.5 主极铆钉、换向极铆钉、机座冲片拉紧螺杆和电枢铁心外圈拉紧螺杆均采用绝缘结构,以便适应于可控硅整流电源供电的要求。

2.6 主极线圈采用 2 ×5双玻璃丝漆包线 SB EQB - 40/180,绕制时层间刷单马胶,然后烘干固化成型。主极极身绝缘垫环氧酚醛玻璃布板,四个角高度方向垫两层 0.25NMN。前后端垫放间隔垫块,使线圈与铁心之间有 20mm间隔,有利于通风散热。

2.7 补偿线圈导线 10 ×50半圆形铜线,对地绝缘为半迭绕四层 0.075 ×20聚酰亚胺薄膜带,半迭绕一层 0.1 ×20无碱带,外面再卷包 $1\frac{1}{4}$ 层 0.05聚脂薄膜,槽绝缘为 0.2NMN $1\frac{1}{4}$ 层。

3 结语

该拖动电机设计进行了大量的电磁方案对比,从中选取了最优方案,尽管换向参数、热参数都比较高,但由于在电磁和结构上采取了相应措施,从而保证了电机良好性能。目前三台电机已生产完毕,且通过了试验台验收:(1)电机振动小于 0.03mm;(2)1 200r/min 过速无异常;(3)1.3倍(1 040V)过电压线圈匝间无异常;(4)1.5倍过载(6 015A),1 000r/min换向火花 1级;(5)各个绕组及有关部件温升合格。达到了设计的预期效果。

参考文献

- [1] 陈世坤. 电机设计 [M]. 北京:机械工业出版社, 1982.
- [2] 许实章. 电机学 [M]. 北京:机械工业出版社, 1981.
- [3] ZG1001 - 57技术报告. 《轴电流和轴承电流》

(上接 11页)

8 结语

由以上分析可以看出,该电机在高海拔、大容量、自润滑等苛刻条件下,电机的温升、振动、噪声、轴承温度等各项指标基本有较为理想的分布。总之,这次的试制使我公司高压箱式 2极自润滑电机基本具有 2 000kW 以内的设计开发能力,处

于国内高压箱式 2极自润滑电机的前列,并为今后开发 2 000kW 以上高压箱式 2极自润滑电机提供了宝贵的经验。

参考文献

- [1] 陈世坤. 电机设计. 北京:机械工业出版社, 1994.
- [2] 汪国梁. 电机学. 北京:机械工业出版社, 1996.
- [3] 大电机研究所编. 大型电机计算公式. 电指 (DZ) 21 ~24 - 63 技术标准出版社, 1965.