

大中型高压高速电动机转轴静力学仿真分析*

韦福东¹, 李光耀¹, 姚丙雷², 王建辉², 刘朋鹏²

[1. 上海电器科学研究所(集团)有限公司, 上海 200063;

2. 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: 以 10 kV-3 000 kW-2 极高压高速电动机为例, 对转子偏心情况下电机转轴的静力学进行分析。对单边磁拉力的计算分别采用分析法和有限元法, 并针对带有轴向通风槽的转轴挠度进行计算。然后通过 ANSYS Workbench 有限元仿真软件对转轴进行静力学仿真分析。在保证计算精度的基础上, 可使用分析法。这为高压高速电动机单边磁拉力和转轴的静力学分析提供了参考。

关键词: 高压高速电动机; 单边磁拉力; 转轴; 静力学分析

中图分类号: TM 301.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)07-0062-05

Static Simulation Analysis on the Shaft of Large and Medium-Sized High-Voltage High-Speed Motor*

WEI Fudong¹, LI Guangyao¹, YAO Binglei², WANG Jianhui², LIU Pengpeng²

[1. Shanghai Electrical Apparatus Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200063, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Motor System Energy Saving Co., Ltd., Shanghai 200063, China]

Abstract: Using a 10 kV-3 000 kW-2 pole high-voltage high-speed motor as an example, the statics of the shaft were analyzed under the rotor eccentricity. An analysis method and a finite element method were proposed for the unilateral magnetic force, and the deflection of the shaft with axial ventilation slots was calculated. Then, the statics of the shaft were analyzed by ANSYS Workbench finite element simulation software. The analysis method could be used on the basis of ensuring the calculation accuracy. A reference for the unilateral magnetic force and the static analysis on the shaft of the high-voltage high-speed motor was provided.

Key words: high-voltage high-speed motor; unilateral magnetic force; shaft; static analysis

0 引言

大中型高压高速电动机作为我国重大技术装备的核心驱动设备, 具有技术难度大、制造工艺复杂等特点, 广泛应用于发电、钢铁及石油化工等领域, 对国民经济具有重要意义^[1-2]。与国外先进技术相比, 国内高压高速电机设计技术与制造工艺相对落后, 存在产品体积大、功率密度低、振动噪声大等问题^[3]。高功率密度、高可靠性成为高压高速电机的发展趋势之一。相同机座号的情况

下, 电机的功率密度、转轴结构强度及临界转速等静态、动态力学分析与设计成为高压高速电机轻量化发展的瓶颈。

高压高速电动机因转子质量大、转速高, 通常采用滑动轴承^[4-5]。由于加工和安装误差, 转子挠度变化等原因, 不可避免地会发生转子偏心现象。电机偏心通常包括静态偏心、动态偏心和混合偏心 3 种^[6]。各类偏心又会引起单边磁拉力的产生, 进而对转轴的刚度、挠度造成影响。因此, 需要对电机的单边磁拉力及转轴静力学进行

* 基金项目: 2017 年工业转型升级(中国制造 2025)

作者简介: 韦福东(1992—), 男, 硕士, 研究方向为电机设计与控制技术。

李光耀(1964—), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为高效电机设计。

姚丙雷(1976—), 男, 高级工程师, 研究方向为永磁电机。

分析。

本文以 10 kV-3 000 kW-2 极高压高速电动机为例,通过 ANSYS Maxwell 2D 有限元软件对高压高速电动机单边磁拉力进行有限元仿真分析,并对带有轴向通风槽的转轴挠度进行计算。通过 ANSYS Workbench 有限元仿真平台对转轴进行静力学仿真分析,简化了高压高速电动机转轴静力学分析方法,计算结果较为准确。

1 单边磁拉力

1.1 单边磁拉力的分析与计算

大中型高压高速电动机由于加工、安装误差及滑动轴承等影响会产生转子偏心现象,导致电机气隙磁密发生畸变,从而产生单边磁拉力。电机发生转子偏心时,将转子圆心偏移定子圆心的距离 OO' 定义为初始偏心距离 e_0 ,电机的最小气隙减小到 $\delta - e_0$,最大气隙增大到 $\delta + e_0$ [7]。偏心示意图如图 1 所示。

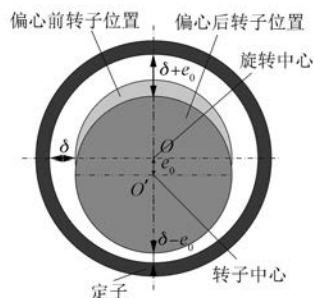


图 1 转子动态偏心示意图

为了便于分析,对转子偏心率 ε 进行定义:

$$\varepsilon = \frac{e_0}{\delta} \quad (1)$$

式中: e_0 ——电机偏心距离;

δ ——正常情况下的电机气隙长度。

对于单边磁拉力的计算,需要对气隙磁场进行分析。通常,可以忽略端部效应的影响,通过二维场进行求解分析。

由图 1 可知,假定高压高速电动机的 2 个磁极在垂直位置,当磁势一定时,最大气隙处的磁密将减小到 $B_{\delta 1}$,最小气隙处的磁密将增大到 $B_{\delta 2}$ 。由于磁密不均所产生的磁拉力差即为单边磁拉力。单边磁拉力会作用在转子上,进一步导致转轴的挠度变大。

根据已有的电工学基础,计算电磁铁对衔铁的吸力:

$$F' = \frac{B^2}{2\mu_0} A \quad (2)$$

式中: B ——电磁铁与衔铁间平均气隙磁密;

μ_0 ——真空磁导率;

A ——一个电磁铁极的面积。

忽略饱和及齿槽变化所引起的气隙系数的影响,由式(2)可推导出 2 极电机的单边磁拉力计算式:

$$F_m = \frac{\pi D l_{ef} (B_{\delta 2}^2 - B_{\delta 1}^2)}{4\mu_0} \quad (3)$$

式中: F_m ——单边磁拉力;

D ——转子外径;

l_{ef} ——电枢计算长度;

μ_0 ——真空磁导率。

为了优化大中型高压高速电机散热结构,通常在定、转子铁心中部设置径向通风道,引起气隙磁场变化,因此电枢的有效计算长度比铁心总长 l_t 要短 [8]。由每段径向通风道而损失的电枢轴向计算长度 b'_v 为

$$b'_v = \frac{b_v^2}{b_v + \frac{5\delta}{2}} \quad (4)$$

式中: b_v ——轴向通风槽宽。

因此,计算单边磁拉力时的电枢计算长度 l_{ef} 为

$$l_{ef} = l_t - N_v b'_v \quad (5)$$

式中: N_v ——轴向通风槽数。

1.2 2D 电磁场有限元仿真

为了分析偏心对电机气隙磁场及单边磁拉力的影响,采用有限元法对电机的径向磁拉力进行分析。以 2 极高压高速电动机为例,样机主要参数如表 1 所示。

表 1 样机主要参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定功率/kW	3 000	频率/Hz	50
额定电压/kV	10	额定转速/(r·min ⁻¹)	2 987
径向通风槽数	11	极对数 p	1

根据样机的结构与尺寸建立 Maxwell 有限元仿真模型,并对材料属性进行分配,定义边界条

件,加载激励并对网格进行划分,最后求解模型并作后处理。样机有限元仿真模型如图 2 所示。

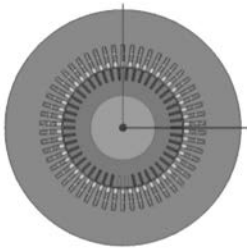


图 2 有限元仿真模型

通过有限元法对高压高速电机气隙磁密和单边磁拉力进行求解,对数据进行处理后,可得转子偏心后气隙磁密和单边磁拉力波形图如图 3、图 4 所示。

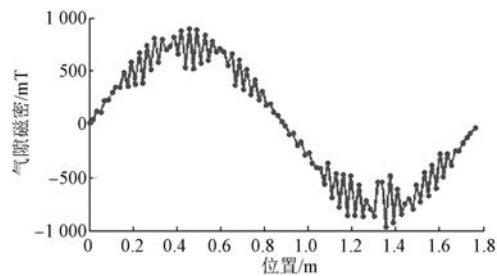


图 3 转子偏心后气隙磁密波形图

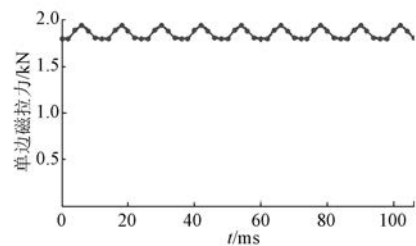


图 4 单边磁拉力波形图(偏心距为 0.6 mm)

由图 3、图 4 可知,由于受到定转子齿槽效应的影响,气隙磁密波形存在波动;由于转子动态偏心,单边磁拉力随时间呈周期性波动。

在保证其他参数不变的情况下,改变转子偏心距,得到不同偏心距所对应的单边磁拉力,并对比有限元法和分析法所求得单边磁拉力,对比结果如表 2 所示。

由表 2 可知,电机转子偏心距的增大,电机的单边磁拉力也随之增大,通过 2 种方法求得的单边磁拉力最大偏差为 5.74%。

表 2 2 种方法所求得单边磁拉力对比表

偏心距/mm	有限元法/kN	分析法/kN	偏差/%
0.1	0.302	0.287	5.23
0.2	0.603	0.575	4.89
0.3	0.910	0.862	5.57
0.4	1.215	1.150	5.65
0.5	1.508	1.437	4.94
0.6	1.823	1.724	5.74

2 电机转轴静力学分析

2.1 高压高速电机转轴挠度计算

在保证电机结构强度的基础上,大中型高压电机转子大多采用焊筋轴结构,与定、转子上的径向通风槽构成混合通风结构,从而加大电机的通风散热效果^[9]。然而电机的焊接轴在实际运行中会受到转子重力、起停时的最大扭矩及单边磁拉力等作用,并且部分轴焊缝处存在缺陷,会发生焊缝断裂,甚至影响电机的正常使用^[10]。

为了避免上述故障发生,可增大转轴强度,提高可靠性。高压高速电机采用加工轴,即直接在轴的表面加工出 6 个方形轴向通风道,以提高转轴结构强度。高压高速电机加工转轴截面结构如图 5 所示。

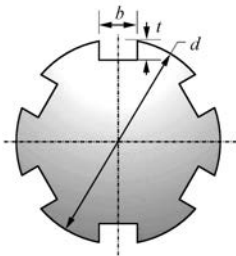


图 5 高压高速电动机加工转轴截面结构

抗弯截面系数为

$$Z = \frac{\pi d^3}{32} - \frac{3bt(d - t)^2}{d} \tag{6}$$

式中： d ——转轴铁心段的直径；
 b ——转轴上轴向通风槽的槽宽；
 t ——转轴上轴向通风槽的槽高。
从而可以推导出转轴上转子铁心处的等效直径 d_{eq} ：

$$d_{eq} = \sqrt[3]{d^3 - \frac{96bt(d-t)^2}{\pi d}} \quad (7)$$

可得由转轴各段惯性矩 J_i :

$$J_i = \frac{\pi}{64} d_i^4 \quad (8)$$

考虑到转轴受转子铁心重力作用,可得转轴挠度为

$$y_a = \frac{G}{3EL^2} (L_2^2 S_1 + L_1^2 S_2) \quad (9)$$

式中: G ——转子重力, N;

E ——弹性模量, 转轴材料为 45 号钢, 弹性模量取值为 2×10^{11} Pa;

L ——转轴两支撑点之间的距离;

L_1 、 L_2 ——转轴左、右支撑点至转轴重心点的距离;

S_1 、 S_2 ——转轴左、右部分参数值。

S 的计算公式为

$$S = \sum \frac{X_i^3 - X_{i-1}^3}{J_i} \quad (10)$$

式中: X_i 、 X_{i-1} ——相应各轴段的长度。

考虑单边磁拉力 F_m 后, 总挠度 y 如式 (11) 所示:

$$y = \frac{y_a(F_m + G - y_a e_0 F_m)}{G - y_a e_0 F_m} \quad (11)$$

2.2 3D 有限元仿真分析

利用 ANSYS Workbench 有限元仿真软件, 对转轴静力学进行有限元仿真。根据样机转轴的结构尺寸, 建立 ANSYS 三维有限元仿真模型, 如图 6 所示。

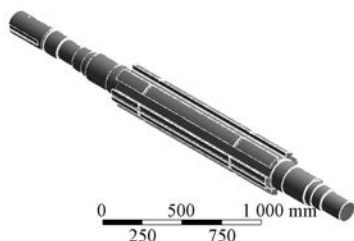


图 6 转轴有限元仿真模型

对轴的材料属性进行定义, 在高压高速电机中, 转轴采用 45 号钢, 其密度为 7850 kg/m^3 , 弹性模量为 2×10^{11} Pa, 泊松比为 0.3。然后对模型进行有限元剖分, 模型节点为 253 993 个, 单元数

为 169 314 个, 网格划分质量满足求解要求。

在进行结构静力学分析时, 为了模拟转轴的实际运行情况, 对转轴施加绕旋转中心转动的额定转速, 转轴自身及转子铁心的重力, 转子所受到的单边磁拉力, 并在转轴的轴承段设置约束条件。然后对转轴静力学进行求解和后处理, 求得转轴挠度和应力云图如图 7 和图 8 所示。

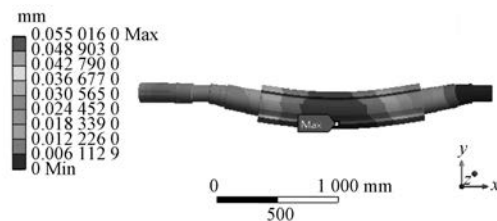


图 7 转轴挠度云图



图 8 转轴应力云图

由图 7 和图 8 可知, 转子在额定转速下发生偏心率为 10% 的偏心时, 转轴最大应力发生在轴承段处, 最大应力为 26.427 MPa, 远远小于转轴材料的最大屈服极限, 转轴的最大变形为 0.055 016 mm, 小于单边气隙的 10%, 未超过设计规定值, 电机转轴结构安全可靠。

2.3 结果对比

在保持其他参数不变的情况下, 修改转轴所受到的单边磁拉力, 可以仿真出转子在不同偏心距下, 不同的单边磁拉力对转轴刚度和挠度的影响, 其中偏心距为零等同于转轴仅受到转子重力的情况。对比有限元法与分析法求得的转轴强度、刚度如表 3 所示。

由表 3 可知, 偏心距增加, 转轴所受到的单边磁拉力随之增大, 最大应力和挠度也逐渐变大。工程上要求转子转轴最大偏心率 ε 需小于 0.1, 因此在偏心距为 0.6 mm 的情况下, 转轴刚度、挠度依然满足设计要求, 转轴结构合理。另外, 通过对比 2 种方法求得的转轴挠度结果可知, 最大偏差

为 3.82%。

表 3 2 种方法所求得的转轴强度、刚度对比表

偏心距/ mm	有限元法		分析法	挠度偏差/ %
	最大应力/MPa	挠度/mm	挠度/mm	
0	23.778	0.048 8	0.047 9	1.98
0.1	24.207	0.050 2	0.049 1	2.17
0.2	24.631	0.051 5	0.050 8	1.48
0.3	25.071	0.052 9	0.052 4	1.02
0.4	25.505	0.054 3	0.053 2	1.97
0.5	25.975	0.055 7	0.054 1	2.94
0.6	26.427	0.057 2	0.055 0	3.82

3 样机验证

按照有限元分析计算所设计的大中型高压电机转轴模型,在 KS560-2 高压高速电机上开展样机试验验证。试验结果如表 4 所示。

表 4 KS560-2 大中型高压高速电机试验结果

参数名称	试验值	设计值
效率/%	95.62	95.70
功率因数	0.911	0.905
振动/ μm	23	-
噪声/dB(A)	89	-

由表 3 可知,采用所提方法设计的大中型高压高速电机运行平稳、性能良好,转轴的机械强度符合设计要求,表明试验结果达到预期目标,分析方法合理、准确。

4 结 语

本文分别采用分析法和有限元法对转子偏心情况下转轴受到的单边磁拉力进行计算,并介绍

了带有轴向通风槽的转轴挠度计算方法。该方法计算得到的结果较为准确,在保证计算精度的基础上,可使用分析法。这为高压高速电动机单边磁拉力和转轴的静力学分析提供了参考。

【参 考 文 献】

[1] 应伟航.STM 系列高速紧凑大型感应电动机设计研究[D].上海:上海交通大学,2010.

[2] 佟宁泽.大中型感应电机电磁力及定子振动分析[D].沈阳:沈阳工业大学,2006.

[3] 夏云彦,孟大伟,于清明,等.紧凑型高压电机起动特性及阻抗的电磁耦合计算[J].电工技术学报,2017,32(1): 183.

[4] WANG Y L, LIU Z S, KANG W J, et al. Approximate analytical model for fluid film force of finite length plain journal bearing[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science,2012,226 (5): 1345.

[5] 张金慧,李伟.大中型电机轴承及润滑方式的选择[J].防爆电机,2013,48(3): 51.

[6] REZIG A, MEKIDECHE M R, DJERDIR A. Effect of rotor eccentricity faults on noise generation in permanent magnet synchronous motors[J]. Progress in Electromagnetics Research C,2010,15: 117.

[7] 李嘉明,于慎波,赵海宁,等.偏心电磁力对永磁同步电主轴转子可靠性的影响[J].组合机床与自动化加工技术,2018(11): 106.

[8] 陈世坤.电机设计[M].2 版.北京:机械工业出版社,1990.

[9] 罗勇林.大型异步电机通风散热优化设计[D].上海:上海交通大学,2008.

[10] 王猛.电机焊筋轴断裂失效分析[D].湘潭:湘潭大学,2005.

收稿日期: 2019-04-15

[主要栏目]

- 控制与应用技术
- 研究与设计
- 故障诊断与保护
- 新能源发电与局域电网
- 新能源汽车技术
- 发电机组及其控制
- 测试技术与测控系统
- 材料与工艺
- 电机生产及质量管理
- 电力电子变流器技术
- 智能制造
- 节能应用