

永磁同步电主轴热态特性分析

单文桃,刘意,吴战,李坤

(江苏理工学院 机械工程学院,江苏 常州 213001)

摘要:针对电主轴的热分析主要集中于内置电机为感应电机的电主轴,对内置电机为永磁型的研究甚少的现状,基于电磁学和摩擦学理论对永磁型电主轴的热源进行了计算,并使用传热学经典理论计算电主轴热边界条件。以此为基础在 Ansys Workbench 中建立电主轴有限元分析模型进行热态分析,根据求解结果进行热-结构耦合分析。结果表明,由于永磁同步电主轴有着转子不发热的固有特性,导致热量主要集中在前后轴承处并使主轴产生热变形。

关键词:永磁同步电主轴;热态特性;有限元

中图分类号:TM351 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)05-0034-03

Thermal Performance Analysis of Permanent Magnetism Synchronous Motorized Spindle

SHAN Wentao, LIU Yi, WU Zhan, LI Kun

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

Abstract: The thermal analysis of the motorized spindle is mainly focused on the motorized spindle with the built-in motor as the induction motor, the thermal source of the motorized spindle is analyzed and calculated by using the theory of electromagnetics and tribology. Using Ansys Workbench, its thermal analysis and thermal structure coupling analysis are carried out. The results show that the permanent magnet synchronous motorized spindle has the inherent characteristics of non-heating of the rotor, thus mainly concentrating the heat onto the front and rear bearings, which results in thermal deformation of the spindle.

Keywords: permanent magnetism synchronous motorized spindle; thermal property; finite element

0 引言

与传统的电机或机床主轴相比,高速电主轴在动力学、可靠性等方面更为复杂。电主轴高速运转时,其内置电机和轴承会产生较大的离心力,因摩擦还伴随着热膨胀,这样就会导致电主轴内部重要部件的热力学性能发生改变。并且电主轴内部的热量扩散得不均匀,也导致其相关部件的热变形,最终体现在加工精度上。因此,建立合理的热态分析模型来分析电主轴的温升以便能够对其加以有效地控制就变得十分必要。国际上,BOSSMANN B, TU J F^[1]建立了第一个电主轴热分析模型,从功率分布情况研究电主轴的热源和传热,并对其传热机制进行了相关计算与试验验证。HOLKUP T 等^[2]借助有限元方法建立热-结构耦合模型,反映了电主轴在实际工作条件下的温度分布、热变形量等相关重要参数。国内,何晓亮等^[3]采用节点网络法建立电主轴温度场模型。曹骏等^[4]使用有限元软件对某机床主轴进行了温度场计算并把相关接触热阻考虑在内,综合分析了机床系统的热态特性。鉴于以上的研究,目前电主轴的热态分析主要集中在其内置电机为感应式电机的高速电主轴。对比内置电机为感应式的电主轴,永磁式电主轴的转子基本不发热,其内部温度场分布必然会发生变化,因此有必要对其

做进一步研究。本文在对电主轴的热源分析基础上利用相关理论对发热量进行计算,确定了电主轴系统的热边界条件,最后将以上数据加载到有限元分析软件中对其热态特性进行分析。

1 电主轴的热源及发热量计算

1.1 内置电机发热量计算

永磁同步电主轴其内置电机的损耗会导致定子发热^[5]。电损耗主要是定子和转子绕组的损耗 P_c , 可以用式(1)计算:

$$P_c = \sum (I_x^2 R_x) \quad (1)$$

式中: I_x 为绕组 x 中的电流, A; R_x 为绕组 x 中的电阻, Ω 。

壳体成圆柱状的空气摩擦损耗 P_n 可按式(2)计算:

$$P_n = \pi \mu_a \rho_a \omega^3 R^4 L \quad (2)$$

式中: μ_a 为旋转体与气体间的摩擦系数; ρ_a 为间隙气体的密度; R 为转动体半径; ω 为转动体转动角速度; L 为转动体长度。

1.2 滚动轴承摩擦热分析与计算

PALMGREN 凭借长期的试验与研究终于推导出轴承

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51405209);江苏省研究生创新工程项目(20820111719)

第一作者简介:单文桃(1987—),男,江苏盐城人,副教授,博士,研究方向为高速电主轴技术、智能驱动控制算法研究。

摩擦计算经验公式^[6]。根据他的经验公式,轴承的摩擦力矩 M 主要来源与速度无关,它由两部分组成:一是在载荷作用下产生的摩擦力矩 M_1 ,二是润滑剂自身黏度引起的摩擦力矩 M_0 ,即式(3):

$$M = M_0 + M_1 \quad (3)$$

轴承的摩擦损耗功率 $P^{[7-9]}$,由式(4)计算:

$$P = \frac{2\pi n M}{60} \quad (4)$$

式中: n 为轴承内圈转速; M 为轴承的摩擦力矩。

本文研究的 FL 系列高速永磁同步电主轴所采用的轴承技术参数见表 1。

表 1 轴承技术参数

轴承参数	前轴承	后轴承
内径/mm	45	40
外径/mm	68	62
接触角/(°)	15	15
润滑方式	油气润滑	油气润滑

2 热态特性的有限元分析

2.1 电主轴有限元模型的建立与网格划分

本文研究的 FL 系列高速永磁同步电主轴在 Solidworks 中的三维造型如图 1 所示。根据热分析的需要,在三维建模过程中要对模型进行适当地简化。

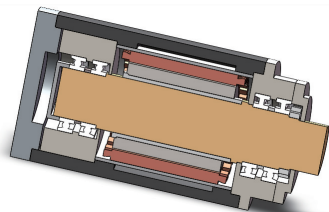


图 1 电主轴简化模型

将建立好的模型导入 Ansys Workbench 中,对模型中赋予相应的材料,并且对模型进行网格划分,经过网格划分后的结果如图 2 所示。

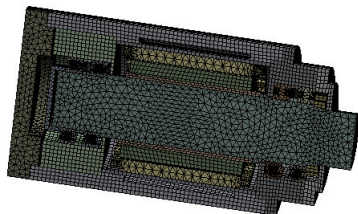


图 2 网格划分处理

对永磁同步电主轴进行热分析前,设定电主轴的运行条件:工作转速为 15 000 r/min、初始工作温度为 22 ℃,环境温度为 22 ℃、循环冷却水的流量为 1.07 L/min、供气压力为 0.23 MPa。表 2 为计算得到的生热率及各种对流换热系数。

表 2 电主轴生热率及换热系数

参数名称	计算结果
电机定子生热率/(W·m ⁻³)	1 895 054
前轴承生热率/(W·m ⁻³)	9 613 987
后轴承生热率/(W·m ⁻³)	8 179 064
定子冷却水套与循环冷却水之间的对流换热系数/(W·m ⁻² ℃ ⁻¹)	600
转子端部的对流换热系数/(W·m ⁻² ℃ ⁻¹)	180
定转子气隙间的对流换热系数/(W·m ⁻² ℃ ⁻¹)	185
轴承与油雾润滑的对流换热系数/(W·m ⁻² ℃ ⁻¹)	216
电主轴机身与周围空气的对流换热系数/(W·m ⁻² ℃ ⁻¹)	9.7

2.2 电主轴稳态热分析

进入 Ansys Workbench 环境,建立稳态热分析模块,并将计算好的各个数据加载到已建立好的电主轴有限元分析模型中。计算得到电主轴稳态热分析的温度场云图,详细结果如图 3 所示。

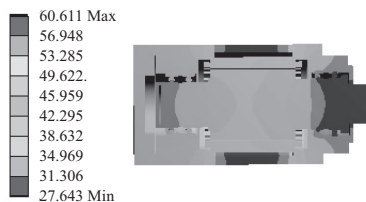


图 3 电主轴稳态温度分布云图

从图 3 中可以直观看到,前端轴承组、后端轴承组、主轴前端这 3 个区域升温较高。

2.3 电主轴热-结构耦合分析

热-结构耦合就是将热分析得到的结果作为新的载荷,加载到有限元的分析模型中。电主轴是数控机床的核心部件,其任何部件的微小变形都会导致机床加工精度的变化,因此有必要进行热结构分析。经顺序耦合分析^[10-11],图 4 中在 15 000 r/min、环境温度 22 ℃下,主轴的应力强度峰值 8 MPa。

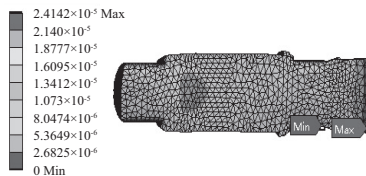


图 4 主轴应力强度云图

由图 5 可以看出,在 15 000 r/min、环境温度 22 ℃下,主轴的总变形量为 2.4 μm。

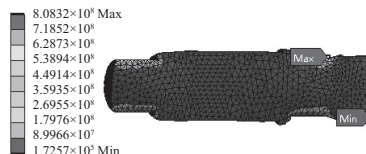


图 5 主轴总变形云图

3 改善电主轴热态特性基本思路

3.1 加强散热

由热态特性有限元分析知前端轴承组、后端轴承组、主轴前端这3个区域温升较高,且发生了热变形,因此需要进一步加强散热。为了使散热效果明显,应对前后轴承组采用合理的冷却专用回路。此外,还可以采用迷宫加气封的密封方式。迷宫加气封的密封方式不但能起到很好的密封作用,同时由于其压缩空气不断向外逸出,还具有一定的冷却效果。

3.2 热误差建模

通过测量多组温升与变形量的数据,对电主轴进行热误差建模。建模的常用方法主要有经验热误差建模和理论热误差建模^[12]。前者主要应用于热误差的补偿,基于对统计学模型的参数识别实现误差的预测。后者主要用于热误差的避免,基于传热关系及力与位移的约束建立方程,通过数值方法得到热变形量。

4 结语

基于电磁学和摩擦学理论对电主轴的热源进行了计算,然后使用传热学经典理论计算电主轴热边界条件。在此基础上使用 Ansys Workbench 对电主轴进行了热态分析和热-结构耦合分析。通过分析云图可知,在电主轴系统达到稳态后,温升较高的部位主要分布在前端轴承组、后端轴承组、主轴前端,最为严重的部位是前端轴承组和主轴前端,相应地引起了热变形,最终会引起加工误差。由此提出了可在温升和热变形最为严重的区域加强散热,或者

建立电主轴热误差模型。

参考文献:

- [1] BOSSMANN B, TU J F. A thermal model for high speed motorized spindles[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1999, 39: 1345-1366.
- [2] HOLKUP T, CAO H, KOLAR P, et al. Thermo-mechanical model of spindles[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2010, 59(1): 365-368.
- [3] 何晓亮,熊万里,黄红武. 高速精密主轴轴承热特性的计算及分析[J]. 机械, 2003, 6: 14-16.
- [4] 曹骏,胡佩俊,应济. 基于接触热阻的主轴热特性有限元分析[J]. 机电工程, 2008, 25(2): 20-25.
- [5] 何强,李安玲. 高速精密电主轴仿真关键技术研究[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2018: 127.
- [6] 邱明,陈龙,李迎春. 轴承摩擦学原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2012.
- [7] 蒋兴奇,马家驹,赵联春. 高速精密角接触轴承热分析[J]. 轴承, 2000(8): 1-4.
- [8] 毕江涛. 高速高性能电主轴热态性能分析[J]. 机械传动, 2011, 35(12): 84-87.
- [9] 陈夺,冯明. 高速电主轴稳态温度场分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2014(5): 54-57.
- [10] 王欣,强云玥. K-C33 磨床高速电主轴加工过程中的温升特性分析[J]. 农业装备与车辆工程, 2018, 56(2): 84-85.
- [11] 任朝晖,李炎臻,刘杨. 高速电主轴热力学分析的仿真研究[J]. 机床与液压, 2018, 46(1): 121-125.
- [12] 王海同,李铁民,王立平,等. 机床热误差建模研究综述[J]. 机械工程学报, 2015, 51(9): 119-128.

收稿日期:2019-05-24

(上接第 27 页)



图 8 主塔有限元模型

采用与上述模型相同的方式对改良设计后的主塔有限元模型施加约束和载荷。将有限元模型导入 ANSYS 软件,求解各节点应力,并利用后处理功能查看计算结果。图 9 是主塔 Von-Mises 等效应力云图。

由有限元计算结果可知,主塔有限元模型最大节点应力为 254.603 MPa,在斜腹杆与主塔支撑油缸铰点连接处,小于此扭转工况下 Q345 钢的许用应力 257.46 MPa,满足该工况的静强度要求。

5 结语

1) 改良设计后的主塔满足此扭转工况的应用要求,解决了最初设计主塔扭转刚度不足、抗扭性能差的问题。

2) 因装备的应用要求,其一端必需为开口式桁架结

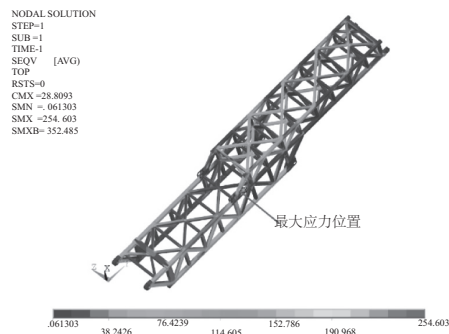


图 9 主塔 Von-Mises 等效应力云图

构时,将装备设计成开口式桁架与封闭式桁架组合的乙形桁架结构,可有效地提高装备的抗扭性能。

参考文献:

- [1] 田宝桢. 铁路跨越安全防护装备关键技术研究[D]. 成都:西南交通大学, 2018.
- [2] GB/T 3811-2008 起重机设计规范[S].
- [3] 曾攀. 有限元基础教程[M]. 北京:高等教育出版社, 2009.
- [4] 孙训方,方孝淑,关来泰. 材料力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2009.

收稿日期:2019-05-06