

高速电主轴单元的热态特性分析

魏效玲 时玉冰 李勇 刘梦晗 王剑锋

(河北工程大学 机电工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 由于电主轴系统高速运转时,产生大量的热,并导致热变形,本文基于 ANSYS 对高速电主轴单元的热态特性进行分析。文中采用有限元法对高速电主轴系统模型进行建模,并计算了电主轴系统的发热量及各部位热对流,通过 ANSYS 进行分析,得到了高速电主轴单元的温度分布、主轴端部的轴向和径向偏移量及位移图。从热态性能中可以分析得出热感应预载荷,并计算得出相应的强度和临界速度。同时研究发现,为了获得更多的预载荷,应该考虑热感应预载荷的影响。

关键词: 电主轴; 高速; 有限元; 热对流; 热态特性分析

中图分类号: TG659

文献标识码: A

The thermal analysis of high speed motorized spindle

WEI Xiao - ling ,SHI Yu - bing ,LI Yong ,LIU Meng - han ,WANG Jian - feng

(College of Mechanic and Electronic Engineering , Hebei University of Engineering , Hebei Handan056038 ,China)

Abstract: On account of the high - speed motorized spindle system , the heat generated will inevitably produce a fever and lead to the spindle thermal deformation. In this paper , the thermal characteristics of high speed spindle unit were analyzed based on the ANSYS. This text uses the finite element method for modeling to calculate the heat generated and the thermal convection on each part of the spindle; through the analysis of ANSYS , the temperature distribution of high - speed electric spindle unit , axial and radial displacement at the end of main spindle and corresponding displacement diagrams are obtained. The thermal state performance can be analyzed thermal induction pre load , and calculated the homologous intensity and the critical speed. The study also found that the effect of heat induced pre load should be considered in order to obtain more pre load.

Key words: motorized spindle; high speed; finite element; thermal convection; thermal - analysis

为了实现高速运转,获得更高的生产率,电主轴技术应运而生。电主轴由内置式电动机直接驱动,省略了齿轮和皮带这种传统的动力传动装置。然而电主轴内置式电动机相当于增加了热源,电主轴高速运转时,电动机产生的热量主要是定子绕组的铜损耗和转子绕组的铁损耗造成的,产生的热量大部分由转子与定子之间的气隙传入定子。此外,对于高速旋转的转子,主轴壳体内部的空气也会产生热量。热量主要通过主轴及其壳体向外辐射,除了电机所产生的热量外,主轴轴承产生的热量也不容忽视。大量的热量聚集到轴承,

降低了轴承的使用寿命,也会使主轴变形,最终降低其加工精度。

随着主轴转速的增加,由于各种摩擦因素产生了大量的热,而各种摩擦日趋严重,热量积累也越多。随着电主轴温度上升,需要的轴承预紧力也相应增大,同时轴承也将生成更多的热量。考虑到热辐射和热传递,主轴轴承必须合理地润滑与冷却,否则,它不能保证电主轴的高速运转。因此对高速电主轴的热态特性分析就变得尤为重要了。

收稿日期: 2014 - 05 - 09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(项目编号: 61240050); 河北省自然科学基金资助项目(F2010001047)

特约专稿

作者简介: 魏效玲(1963 -),女,山西河津市人,教授,从事数控技术方面的教学与科研工作。

1 电主轴系统的结构

本文所设计电主轴系统结构如图 1 所示, 内置式电机置于前后轴承之间, 电机转子采用过盈配合的方法安装在主轴上。为了满足电主轴高速、高刚度、低温升等设计性能要求, 采用角接触混合陶瓷球轴承支承, 即滚球材料用的 Si_3N_4 陶瓷, 而轴承的内、外圈仍用钢制材料。前后两组轴承整体上为背对背安装, 前轴承采用定位预紧固定; 后轴承采用弹簧定压预紧, 其轴向可以有微小的移动, 以补偿主轴工作时的热伸长。定子和冷却套作为一体安装在主轴单元的壳体中, 电机采用油-水热交换系统进行冷却。

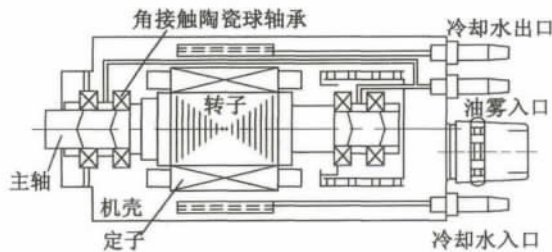


图1 高速电主轴系统的结构

Fig.1 Structure of the high speed motorized spindle

2 电主轴系统产生的热量

由于该模型是轴对称结构, 因此只需对该模型的一半横截面进行建模。对系统的元素、材料特性、负载进行选择, 建立有限元模型。高速电主轴系统的有限元模型如图 2 所示。电主轴单元产生的热量包括电机产生的热量和轴承摩擦产生的热量。



图2 高速电主轴系统的有限元模型

Fig.2 Finite element model of the high speed spindle

电机产生的热量通过功率损耗计算。其中, 定子产生的热量等于功率损耗的 $2/3$, 而转子产生的热量等于剩余的 $1/3$ 。角接触球轴承由于两种类型的摩擦力产生大量的热, 同时由于润滑粘度而产生摩擦力矩。其产生的热量为 $H_f = M \cdot \omega$ 。

其中 $M = 0.45 \cdot f_0 (\mu\omega)^{0.66} \cdot d_m^3 + f_1 \cdot$

$$\left(\frac{F_s}{C_s}\right) F_\beta \cdot d_m。$$

轴承运转过程中产生的热量为 $H_s = \omega_{roll} \cdot M_s$ 。其中 $M_{si} = \frac{3kQ_i a_i \varepsilon}{8}$, $M_{so} = \frac{3kQ_0 a_0 \varepsilon}{8}$, $Q_i = K_a \delta_i^{1.5}$, $Q_0 = K_a \delta_0^{1.5}$, $\delta_i = l_i - l_{oi} - \Delta_i$, $\delta_e = l_e - l_{oi} - \Delta_e$, $\omega_{roll} = \omega \cdot \sigma$ 。表 1 中给出了主轴单元各部分产生的热量。

表 1 主轴单元各部分产生的热量

Tab.1 Details for finding spin moment

主轴部分	产生热量因素/W			产生总热量/W
	润滑摩擦	摩擦力	旋转	
轴承-I	0.122	155	26.1	181.22
轴承-II	0.081	170	22.42	191.66
轴承-III	0.080	105	8.9	123.8
轴		2226		2226
转子		1113		1113

3 电主轴系统的热对流

热对流是物体表面与周围接触的流体之间由于温差存在而产生的热量交换。其中, 有以下几点。

角接触混合陶瓷球轴承中滚珠与润滑剂间的热对流 (h_b)

$$Nu = \frac{h_b \cdot D_o}{k} = 0.33 \cdot P_r^{0.4} R_e^{0.5}$$

$$R_e = \frac{\omega \cdot D^2}{\mu}; R_e < 4 \cdot 10^5$$

$$P_r = \frac{C_p \cdot \eta}{k}; 0.7 < P_r < 217$$

电机转子与空气间的热对流 (h_r)

$$Nu = \frac{h_r \cdot D_r}{k} = c \cdot P_r^m R_e^n; c = 0.076, m = 0.7, n =$$

-0.37

$$R_e < 10^6; P < 0.7$$

冷却剂与空气间的热对流 (h_c)

$$\dot{u} = \frac{\dot{v}}{A_c}$$

$$Nu = \frac{h_c \cdot b}{k} = 0.0225 \cdot P_r^{0.3} R_e^{0.8}$$

$$R_e = \frac{\dot{u} \cdot b}{\mu}; R_e > 10000$$

电主轴的温度分布和热性能分析如图 3 和图 4 所示。

表 2 中显示了主轴系统各部分的热对流。

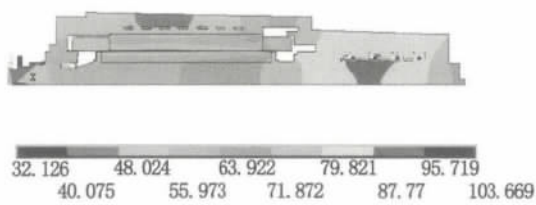


图3 主轴系统的温度分布

Fig.3 Temperature distributions in spindle parts

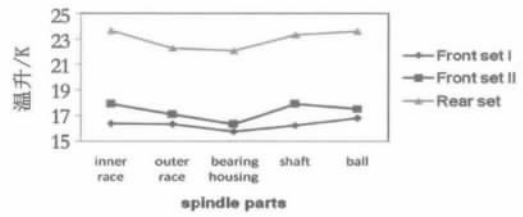


图4 温度分布

Fig.4 Temperature distribution

表2 主轴系统的热对流

Tab.2 Convection in spindle parts

主轴部分	轴承 I	轴承 II	轴承 III	转子	冷却剂箱
热对流/W. (m ⁻² · K ⁻¹)	163	178	200	178.3	759

4 电主轴系统的热态特性分析

从以上热态性能中可以分析得出热感应预载荷,并计算得出相应的强度和临界速度。每一种模式的临界速度都不一样,因为预载荷是由时间来决定的。因此,时间增加了,固有频率也会随之增加,热感应预载荷就会对临界速度的提升有积极作用,即在轴承不产生故障的情况下,获得更高的速度。这对增加工作时间似乎是一种好的效果,但是,经过长时间的运行,过多的热感应预载荷会使材料引起热偏移,使轴承产生故障。因此,轴承的制作材料必须有更好的热稳定性,以便承受更高的温度。

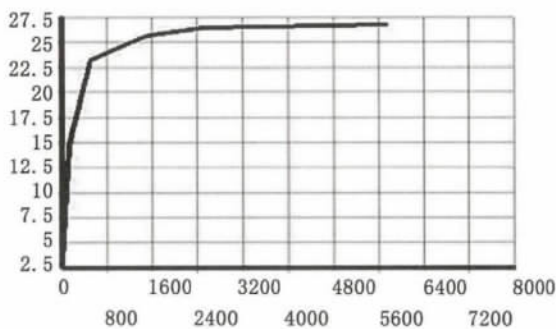


图5 稳态温度

Fig.5 steady state temperatures

临界速度可以通过分析得到的坎贝尔图表来计算得到,这些计算结果的条件是在 10 000 r/min 和 5 000 s 范围内。瞬态热态特性分析用来计算温度、径向和轴向偏差,以及热感应预载荷。从图 5 中可以看出,显示稳定状态已经达到 6.5h。主轴端部的径向和轴向偏差如图 6、图 7、图 8、图 9 所示,从图可知电主轴的热变形情况。

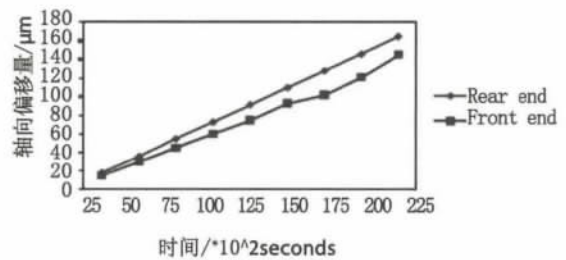


图6 主轴端部的轴向偏移量

Fig.6 Axial deflections in the spindle end position

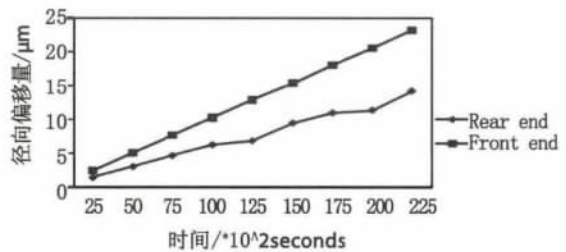


图7 主轴端部的径向偏移量

Fig.7 Radial deflections in the spindle end position

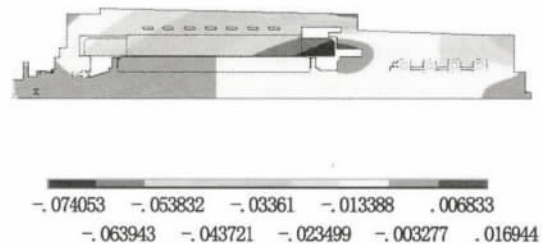
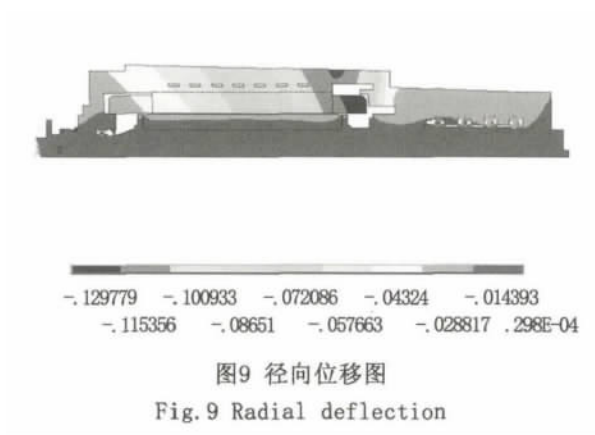


图8 轴向位移图

Fig.8 Axial deflection



5 结论

1) 为了获得更多的预载荷,应该考虑热感应预载荷的影响。

2) 由热感应预载荷和防松螺母提供的预载荷,也用来提高临界速度,以便有更大范围的运行速度。已计算出热感应预载荷和与之相对应的固有频率,也就是提高了临界速度,以致在不同时间,当达到 10 000 r/min 时,电主轴有更大范围的运行速。

3) 通过确定电主轴系统的温度分布、主轴端部的径向和轴向偏移,掌握其热变形,从而可以采取更有效、针对性的冷却和补偿措施,提高电主轴加工过程中的稳定性和可靠性。

参考文献:

[1] 陆建忠, 孙家宁. 金属切削原理与刀具[M]. 北京: 机械

工业出版社, 2001.

[2] 张伯霖, 杨庆东, 陈常年. 高速切削技术及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.

[3] 魏效玲, 李小锐, 玉新民, 等. 数控机床高速电主轴的热态特性分析[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2012, 29(4): 87-89.

[4] WANG RH, RAMAN V, NAYAK UV. Head-disk dynamics in the flying, near contact and contact regimes [J]. Proceedings of the symposium on interface nanotribology and nanotechnology for 1 Tbit/in². vol. 11 2001: 37-43.

[5] SYATH ABUTHAKEER S, MOHANRAM P V, MOHAN KUMAR G. Dynamic and thermal analysis of high speed motorized spindle [J]. International journal of applied engineering research, 2011(1): 864-882.

[6] 伍建国. 内圆磨床床身结构的动态分析与优化设计[J]. 精密制造与自动化, 2002(2): 25-26.

[7] 刘东辉, 赵新伟, 李元宝, 等. 无位置传感器无刷直流电机数控调速器设计[J]. 河北科技大学学报, 2013, 34(4): 302-307.

[8] 韩志峰. 电主轴热-结构耦合特性分析[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2005.

[9] 龚曙光. ANSYS 基础应用及范例解析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.

[10] 郭军, 张伯霖, 肖曙红, 等. 电机后置式电主轴热态特性的分析与研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2004(7): 64-67.

[11] 黄晓明. 高速电主轴热态特性的有限元分析[D]. 广州: 广东工业大学, 2003.

(责任编辑 刘存英)