

# 磨床主轴热特性分析及热变形补偿策略\*

张祥雷 冯伟 陈站 罗琪

(厦门大学物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005)

**摘要** 针对五轴数控可转位刀片周边工具磨床建立了砂轮-主轴-轴承-主轴箱的主轴部件有限元模型,分析了主轴部件的热源及其发热量的计算公式,通过有限元仿真计算得到磨床主轴的热稳态温度场和热变形量,进行了主轴热特性分析。在不增加温度、位移传感器的基础上提出了有效的主轴热变形补偿策略,实现刀片加工精度达到 $5\ \mu\text{m}$ 的精度要求。

**关键词** 主轴静刚度 轴承-转子系统 轴承刚度 热变形补偿

中图分类号:TH161 文献标识码:A 文章编号:1672-4801(2014)02-002-03

主轴单元作为磨床的关键部件,其热特性直接影响磨床加工的精度和稳定性,对其进行准确的分析至关重要。国内学者吴玉厚对高速电主轴单元的工作原理、结构、关键技术和性能分析等方面有较全面的论述<sup>[1]</sup>。兰州理工大学对HMC80卧式加工中心电主轴热、动态特性分析及耦合进行了研究<sup>[2]</sup>。浙江大学的蒋兴奇对主轴轴承的热特性进行了较深入的研究,并推导了轴承热变形对轴承动力学特性的影响<sup>[3,4]</sup>。在以上研究的基础上,本文针对自主开发的五轴数控精密可转位刀片周边磨床的主轴部件的热特性进行了研究,分析其达到热稳态时温度场和热变形,提出有效的主轴热变形补偿策略,为提高工具磨床的稳定性提供理论依据。

## 1 主轴部件的主要热源分析

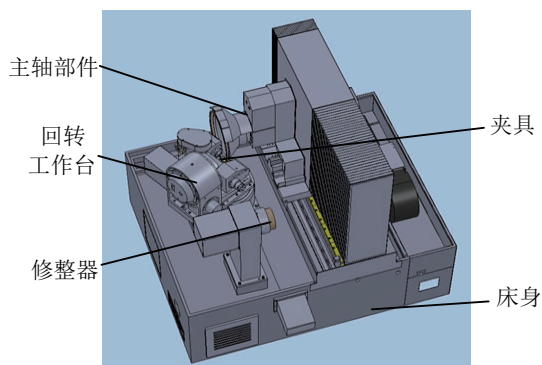


图1 磨床整机外观图

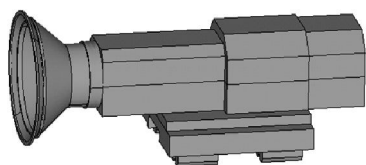


图2 主轴部件简图

五轴精密数控可转位刀片周边磨床如图1所示,磨床主要由床身、主轴、卧式回转工作台、立式回转工作台、头架、尾架、高精度两坐标直线工作台、砂轮架、修整器等部件组成。图2为磨床的主轴部件,通过工程分析,它有两个主要热源:一是电机,主轴电机在空转或加工时所消耗的功率转变为热量;二是轴承,主轴轴承在高速运转中存在的复杂摩擦生成热量,直接导致主轴部件的热变形,严重时甚至会发生金属粘结烧伤现象,使轴承失效。本文分析暂不考虑磨削热的影响。

## 2 主轴部件的热态特性分析

### 2.1 主轴电机的发热计算

主轴电机的损耗一般分为4类:机械损耗、电损耗、磁损耗和附加损耗。前三类损耗通常称为主要损耗,附加损耗在总的损耗总所占比例很小,约为额定功率的1%~5%,可忽略不计<sup>[5]</sup>。故电机产生的热量可采用下式计算:

$$P = \pi a \rho \omega^2 r^4 L + I^2 R + b f B_{\max}^2 \quad (1)$$

式中, $a$ 为摩擦系数; $\rho$ 为空气密度; $\omega$ 为角速度; $r$ 为转子的外半径; $L$ 为转子的长度; $I$ 为电流; $R$ 为导体的电阻; $b$ 为与电工钢牌号有关的常数; $f$ 为磁化频率; $B_{\max}$ 为磁感应强度最大值。

### 2.2 轴承的发热计算

轴承的摩擦是内外套圈相对运动时,轴承内部各元件对该运动阻抗的总和。根据Palmgren理论,摩擦力矩 $M$ 主要由空载时润滑油粘性所产生的摩擦力矩 $M_0$ 和与速度无关的载荷作用产生的摩擦力矩 $M_1$ 两部分组成。具体的计算公式如下<sup>[6]</sup>:

\*国家科技重大专项(2010ZX04001-162)

作者简介 张祥雷(1987 - )男,在读博士,研究方向:复杂曲面成形与精密数控装备制造技术研究。

$$H = 0.1047nM = 10^{-10} f_0(n\gamma)^{2/3} d_m^3 + 10^{-3} f_1(P_0/C_0)^{1/3} P_1 d_m \quad (2)$$

式中,  $n$  为轴承转速;  $M$  为轴承摩擦力矩;  $f_0$ 、 $f_1$  为相关系数;  $\gamma$  为运转温度下润滑剂的运动粘度;  $d_m$  为轴承的平均直径;  $P_0$  为轴承的等效静载荷;  $C_0$  为轴承额定静载荷;  $P_1$  为决定摩擦力矩的当量载荷。

### 2.3 主轴部件的热态特性分析

对于五轴工具磨床主轴部件的热态特性有限元分析在如下条件下进行:

- 1) 假设主轴电机的功率损失全部转化为热量, 其值由公式(1)计算;
- 2) 前轴承采用角接触陶瓷球轴承, 后轴承为精密双列圆柱滚子轴承, 前后轴承的生热量由公式(2)计算;
- 3) 主轴冷却系统的冷却油流量为  $Q=2.5 \text{ L/min}$ , 入口温度为  $T_{in}=20^\circ\text{C}$ ;
- 4) 环境温度为  $T=20^\circ\text{C}$ 。

图3为主轴部件采用油冷时的温度场分布, 主轴转速为  $2800 \text{ r/min}$ , 提取仿真的数据可以得到主轴电机的最高温度为  $44.3^\circ\text{C}$ , 前轴承的最高温度为  $36.2^\circ\text{C}$ , 后轴承的最高温度为  $39.5^\circ\text{C}$ 。

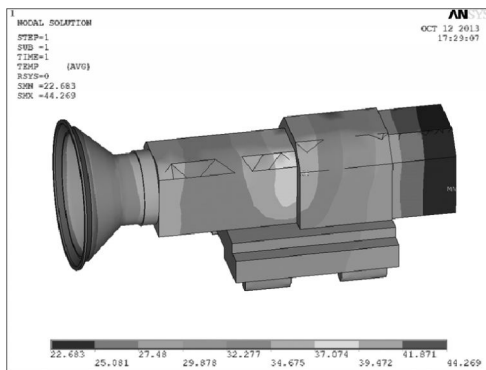


图3 主轴部件的热稳态温度云图

采用顺序耦合的方式, 将主轴部件底部施加全约束, 加载温度计算的结果, 获得主轴在热稳定时的热变形云图, 如图4所示。从图中可以看出, 主轴发生膨胀并弯曲, 最大的变形量发生在砂轮上端面, 变形值达到了  $132 \mu\text{m}$ 。这主要是由于砂轮轴电机、轴承产生的热量使砂轮主轴产生热膨胀, 造成主轴的轴向伸长, 而主轴前后轴承发热不均引起了主轴的倾斜。主轴热变形的产生降低了磨床加工的精度, 必须对磨床主轴产生的热变形进行控制。

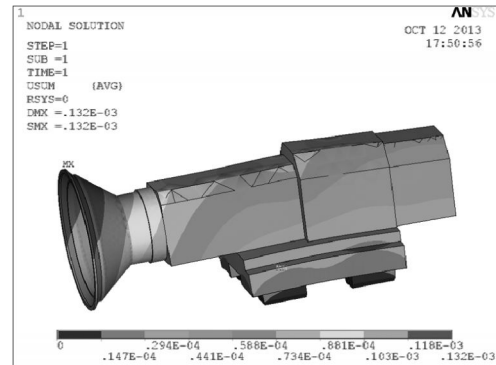


图4 主轴热变形云图

### 3 主轴部件的热变形控制

减小磨床的热变形误差一般有两种方法: 误差防止和误差补偿法<sup>[5]</sup>。

误差防止就是通过提高磨床的设计、制造和装配途径来减少或消除磨床原始误差的方法, 这种靠提高磨床制造精度和安装精度来减少磨床误差的方法存在很大的局限性, 而且经济代价较高。

近年发展起来的误差补偿是一种减少热变形的经济有效的方法。磨床误差补偿就是人为制造一种新的误差去抵消磨床的原始误差, 随着数控磨床的大量应用, 相应地产生了热误差数控补偿技术, 通过分析磨床热误差变化规律, 建立热误差补偿的数学模型, 利用布置在磨床上的传感器实时测量磨床的温度和热变形, 就可以实现磨床热误差的动态补偿。

对于五轴数控磨床而言, 其本身的制造和装配精度已经很高, 采用误差防止的方法减小热误差将会大大增大成本, 采用误差补偿的方法则可以花很小的代价获得较高的磨床精度。通过布置温度和位移传感器建立主轴的热误差模型, 然后通过数控系统实施补偿, 便可以实时测量并补偿主轴的热变形误差。另一种补偿方法是每次测量磨削后的可转位刀片内切圆直径, 将实测值跟标称值做比较, 如果偏差值在  $3 \mu\text{m}$  以内, 则认为是正常偏差范围, 不进行补偿; 如果偏差值超过  $3 \mu\text{m}$ , 则补偿偏差值的一定比例, 如 90%。该方法避免了使用温度传感器, 不需要加工前的热机时间, 并且可补偿包含热、几何等误差, 是一种综合性的补偿方法。经现场验证, 该方法将可转位刀片尺寸的一致性成功控制在  $5 \mu\text{m}$  以内。

### 4 结语

针对五轴数控可转位刀片工(下转第10页)

1)刀架预紧力过大。当用扳手松动蜗杆端部时不易转动,且需用较大力气才可以转动,若下次夹紧后刀架仍不能正常启动,则可以断定是预紧力过大造成的。可通过调小刀架电机夹紧电流排除之。

2)刀架内部机械卡死。当旋转刀架内部的蜗杆,无论顺时针或逆时针都无法旋转时,其原因是机械卡死。第一,检查是否有螺母锁死情况,若有,应及时调整;第二,检查夹紧装置反靠定位销是否在反靠棘轮槽内,若在,则需要将反靠棘轮与螺杆连接销孔回转一个角度重新打孔连接;第三,检查是否由于润滑系统不良造成蜗杆锁死,若有,应及时拆开,查清实际情况,加以润滑处理。

3)电源不通,电机不转。检查线路是否完好,电源开关是否良好接通,开关位置是否正确。电源通,电机反转,可确定为电机相序接反,可通过检查线路变换相序排除之。若手动换刀正常,机控不换刀,则应该检查微机与刀架控制器引线、微机I/O接口及刀架到位回答信号。

## 5 结束语

本文采用PLC为中心的设计程序,配合数控系统已成功的应用于经济性数控机床刀架部分改造。实践证明,整个系统具有一定的通用性,运行稳定,安装调试方便,可根据车床实际情况灵活的更改刀位数等。

### 参考文献:

- [1] 廖常初.西门子人机界面[M].北京:机械出版社,2007.
- [2] 李华主.机械制造技术[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [3] 张兴国.可编程序控制器技术应用[M].北京:中国电力出版社,2006
- [4] 祝红方.PLC及其在数控机床上的应用[M].北京:人民邮电局出版社,2007.

(上接第3页)

具磨床的主轴进行热特性分析,应用有限元软件获取主轴的热稳态温度及热变形云图,验证了主轴在电机、前后轴承处发生较大的温度变化,并得到了主轴在热稳定状态时的最大变形量,最后在

分析主轴热特性的基础上提出了减少其热变形的补偿方法,确保可转位刀片加工精度的稳定性与保持性达到工程要求。

### 参考文献:

- [1] 吴玉厚.数控磨床电主轴单元技术[M].北京:机械工业出版社,2006.
- [2] 赵跃超.HMC80卧式加工中心电主轴热、动态特性分析及耦合研究[D].兰州:兰州理工大学,2011.
- [3] 蒋兴奇.主轴轴承热特性及对速度和动力学性能影响的研究[D].杭州:浙江大学,2001.
- [4] 蒋兴奇,马家驹,赵联春.高速精密角接触球轴承热分析[J].轴承,2000,8:1-4.
- [5] 肖章林,刘玉荣,张伯霖.高速数控磨床主轴轴承的油气润滑技术[J].机械开发,1998(3):18-23.
- [6] Mohammed. A. Alfares, Abdallah. A. Esharkawy. Effects of Axial Preloading of Angular Contact Ball Bearings on the Dynamics of a Grinding Machine Spindle System[J]. Journal of Materials Processing Technology,2003(136):48~59.
- [7] 庞静珠,李蓓智,杨建国,等.高速磨床电主轴热刚度耦合模型的分析与优化[J].东华大学学报(自然科学版),2012,38(4):471-473.
- [8] ABELE E, ALTINTAS Y, KOLAP P, et al. Machine tool spindle unites[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2010, 59(2):781-802.
- [9] 周金芳,姜万生,王斌洲,等.高速电主轴在线温升及轴向热伸长测试系统的设计[J].科学技术与工程,2012,12(4):749-752.
- [10] 曹永洁,傅建中.基于高精度位移传感器的机床主轴热变形实时测量.控制与检测,2006(12):42-44.
- [11] 张祥雷,姚斌,姚博世,等.可转位刀片周边磨削的夹具变形分析[J].组合机床与自动化加工技术,2013(3):9-11.
- [12] 张祥雷,姚斌,姚博世,等.五轴工具磨床床身的结构分析与轻量化研究[J].制造技术与机床,2013(5):56-59.