

高效精密磨床动静压主轴回转精度的测试研究*

郭力¹, 张华²

(1. 湖南大学机械与运载工程学院, 长沙 410082;

2. 湖南机电职业技术学院, 长沙 410151)

[摘要] 为提高数控磨床的磨削性能,应用美国 Lion Precision 公司生产的主轴回转精度测试仪,对一台高效精密数控磨床砂轮动静压主轴系统的回转精度进行测试,结果表明该砂轮主轴系统的回转精度较高。综合主轴的旋转精度、静刚性、抗振性、热稳定性研究结果,可以验证该磨床砂轮主轴的性能较为优良。

关键词: 高精度磨床; 砂轮动静压主轴; 回转精度; Lion Precision 公司; 刚度

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.05.020



郭力

教授,博士生导师,中国机械工程学会高级会员,国家高效磨削工程技术研究中心、国家 985 高技术研究(汽车先进设计与制造创新团队)学术骨干。研究方向为智能高效精密磨削技术及其数控机床装备、智能机床动静压主轴系统等。

随着航空航天和国防工业的飞速发展,高温合金和陶瓷等高性能难加工新材料得到广泛应用,同时针对这些新材料的高效精密磨削技术的应用也越来越多。国内外很多科研机构对高效磨削装备及技术进行了研究,例如湖南大学国家高效磨削工程技术研究中心对于高效精密磨削技术与装备的研究与开发^[1]。砂轮动静压轴承主轴是高效精密数控磨床核心功能部件,其性能主要表现在旋转精度、静刚性、抗振性和热稳定性 4 个方面。

磨床砂轮动静压轴承主轴的回转精度对磨床砂轮主轴的磨削精度有着非常重要的影响,一般认为砂轮主轴的回转误差在磨削加工中会“复印”到磨削工件表面,磨床砂轮主轴的回转精度低则磨削工件的精度也低。通过回转误差测试可以评价磨床在磨削中所能达到的最小形状误

差和表面粗糙度,提高轴承主轴的刚度和精度可以提高其回转精度。国内外学者在通过研究高刚度的静压轴承节流器和降低轴承主轴零件的形位误差来提高主轴回转精度^[2]。如果动静压轴承的动静压混合油膜刚度,那么轴承所承载荷变动时主轴轴心位移变动非常小,轴承的回转精度就高;精密制造过程中,若轴承主轴的圆度误差等形位误差和装配误差都比较小,则轴承主轴回转精度高;另外,主轴的动平衡精度较高,回转精度也高。由于影响主轴回转精度的因素非常多,磨床主轴的回转精度目前只能测试,还没有一种全面准确的理论分析预测方法。磨床砂轮主轴回转精度是主轴系统的重要性能指标之一,它直接影响到磨削加工零件的圆度、平面度、圆柱度等几何形状精度和表面粗糙程度。

磨床砂轮主轴的回转精度很大程度上依赖于主轴轴承的精度和刚

* 基金项目: 国家科技重大专项(2012ZX04002-091); 湖南省自然科学基金项目(2017JJ5017); 湖南省教育厅科学研究项目(17C0577)。

度。大多数情况下,磨床砂轮主轴处于高速旋转的状态,而且不需要经常改变主轴速度,因此在高效精密数控磨床砂轮主轴中常采用液体动静压轴承,这不仅因为液体动静压轴承的油膜刚度高,而且液体动静压轴承中的高压油膜具有很好的误差均化作用,可允许主轴的圆度误差为主轴回转精度的5~10倍,即主轴的回转精度比主轴及轴承本身制造精度高一个数量级。所以数控磨床砂轮液体动静压轴承主轴具有高精度和高刚度,适合进行高效精密磨削加工。

实际上,由于磨床主轴轴颈支承在动静压轴承上,动静压轴承又固定在主轴箱体支承孔内,主轴上还安装有带轮等传动件,轴承、轴颈的各种加工误差、轴承的间隙和主轴的挠曲及机床的振动等因素都会使得主轴回转轴线的空间位置每一瞬间均发生变化,从而引起磨床动静压主轴的回转误差。

减少磨床主轴回转误差,提高主轴回转精度除了需要提高轴承主轴系统零件的加工精度外,还应该提高磨床主轴的刚性、减小轴承的间隙、增强工艺系统的稳定性、保持良好的润滑等。总之,提高磨床主轴的回转精度是一个系统工程。

主轴回转精度测试

1 主轴回转精度

在高效精密数控磨床砂轮主轴轴系中,主轴轴颈和轴承等关键零件的制造误差和装配误差,使主轴旋转时回转轴线在空间位置一直变动,它相对于瞬时回转轴线的平均位置的位移量就是主轴的回转误差。理论上主轴旋转时会有5个自由度的误差,为了方便测量和处理,主要针对误差敏感方向进行测量,即对回转精度产生误差最大的方向进行测量。主轴的径向端面跳动误差为主要测量点,而径向误差方向上的误差运动是一个二维的平面运动,测量上比较

困难,难以对理论上的轴心线进行测量,因此只能通过标准球对主轴径向轮廓测量来间接测量主轴在径向产生的回转误差。

2 主轴回转误差产生原因

2.1 皮带传动的影响

磨床主轴回转精度受到多种复杂因素的影响,其中主轴驱动电机传递动力时的振动是最重要因素之一,它直接产生主轴的径向和端面跳动,影响主轴的回转精度,最终将影响磨削加工质量。减少振动或者设法抵抗这种振动,是测量主轴回转精度时必须考虑的。图1所示是高效精密数控磨床砂轮动静压轴承主轴系统试验台,驱动电机通过两级皮带轮带动动静压主轴旋转,动静压主轴由前后径向动静压轴承、双向静压推力轴承、主轴和密封件组成^[3]。该驱动

电机由两级皮带传动该磨床动静压主轴系统,因皮带传动减振能力强,故而消除了主轴驱动电机振动对该主轴回转精度的影响。同时皮带轮不直接安装在动静压主轴上,而是通过花键套的安装和连接来带动主轴旋转,进一步减少主轴传动的振动,提高主轴回转精度。

2.2 动静压轴承的影响

该磨床动静压主轴采用浅油腔节流动静压径向轴承^[4]作为主轴的前后径向轴承,该轴承的结构见图2,其浅油腔深度约为0.03mm,与轴承的直径间隙相当。动静压轴承的浅油腔阶梯节流静压效应较强,静压油膜产生误差均化效应,所以主轴的回转精度高。轴承油膜承载能力大,油膜刚度高,由于动静压轴承油膜的动压效应,即轴承的承载能力随着转速

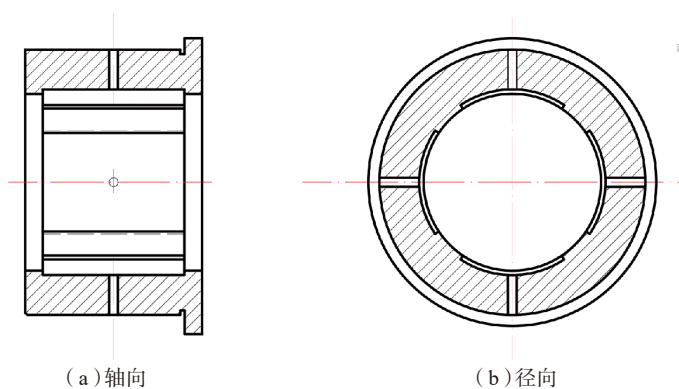


(a) 动静压主轴



(b) 主轴两级皮带传动

图1 动静压主轴系统试验台
Fig.1 Hybrid spindle test rig



(a) 轴向

(b) 径向

图2 动静压轴承结构
Fig.2 Hybrid bearing construction

变大而变大。主轴在高速条件下动压轴承的动压封油面和浅油腔中的动压油膜压力大,即磨削力较大,磨削效率较高。

2.3 主轴的加工精度

主轴表面质量和加工精度也对旋转精度有影响。在主轴的主要尺寸中,除了配合公差要求,还特别需要注意主轴轴颈、主轴支承座孔的尺寸与几何形状误差,前、后支承轴颈的同轴度误差,零件端面与轴颈中心线垂直度的误差等。在高效精密数控磨床主轴中,主轴轴颈的不圆度、圆跳动和端面垂直度都必须在规定范围内,保证工件在高速运转中不会因为受力不均导致倾斜或者变形,也能尽量减少主轴在定位面相对旋转中心的偏移,提高主轴的回转精度。

3 主轴回转精度测试

单点测量法^[5]是用一个传感器测量安装在磨床主轴上的高精度标准球,由于标准球精度相对于主轴回转误差较小,可以忽略,所以可以认为传感器测量值就是主轴回转误差。

径向固定敏感方向测量的是磨床主轴的回转误差。主要通过位移

传感器来记录和读取主轴回转误差数据,然后将读取的数据按照主轴回转角作为横坐标,传感器读出的主轴回转误差位移量作为纵坐标,形成主轴回转精度的圆图像。

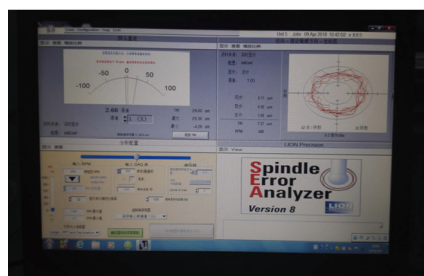
在高效精密数控磨床主轴中,其轴端的轮廓粗糙度远高于精密数控磨床所要求轴系的回转精度,因此不能直接用传感器对轴段轮廓径向截面进行测量。一般需要用到标准球测量,标准球的表面精度是远高于轴段径向截面的。图3所示是采用美国LION牌高精度主轴回转精度测试仪来测量磨床动静压主轴系统的径向圆跳动,即主轴的回转精度。主轴回转精度测试仪可测量机床主轴以一定速度运行时的回转误差,在此基础上可采取措施来降低主轴的回转运动误差。该仪器的基本原理是:在被测量的主轴端部附近非接触式安装直径为30mm的精密标准钢球(纳米级圆度),而这个标准钢球就是精密电容位移传感器,用此电容式探头来测量主轴回转时的动态位移,该主轴的动态位移即主轴的回转误差。一般在电容位移传感器测量过程中,

位移的变化会导致相应的电容值变化。所以在测量过程中,主轴端部跳动的位移会使电容位移传感器的电容值发生变化,而从电容值的变化就可以得到主轴的位移量的变化,从而得出主轴的回转精度。

美国Lion Precision公司开发的主轴误差分析仪由1个精密标准球、5个高分辨率的电容式位移传感器、1个CPL信号采集系统和1个SEA软件及其他附件组成^[6]。测试时将1个精密标准球安装于回转轴的端部,精密标准球安装偏心值对测量的准确度有很大影响,如果偏心值太大,得到的测量结果就不再是目标轴的回转精度。根据实践经验,取偏心值在10~15 μm 之间较为合适。在精密标准球的径向位置安装一个电容位移传感器,由CPL信号采集系统将信号传递至计算机后由SEA软件作分析处理,最终得到回转轴径向轴心轨迹图。设定主轴每32转为一个样本空间,每转均匀取93个点的测量值。测试过程中电容位移传感器将采集的电压信号经数据线传递至计算机,然后经过测试软件的处理得到主轴回转误差运动极坐标图。

通过测试可以得到回转砂轮主轴在某一转速下径向误差轴心轨迹极坐标图(图4),其显示了主轴未经处理的32转主轴轴心轨迹。

为消除主轴旋转不平衡带来的轴结构误差,应该在各种不同轴转速下进行测试回转精度,以选择最优转速,并对磨床磨削性能进行预估。图4显示了高效精密磨床主轴回转径向运动误差值,同步误差对应于工件圆度,异步误差对应于工件表面粗糙度,这两个值体现的是磨床的精密磨削能力。由图4(a)中测量结果可见,该主轴在500r/min转速时,同步误差为0.14 μm ,异步误差为0.15 μm ,回转精度为0.26 μm 。图4(b)中主轴在1500r/min转速时,同步误差为0.13 μm ,异步误差为0.15 μm ,回转精



(a) 回转精度测试界面



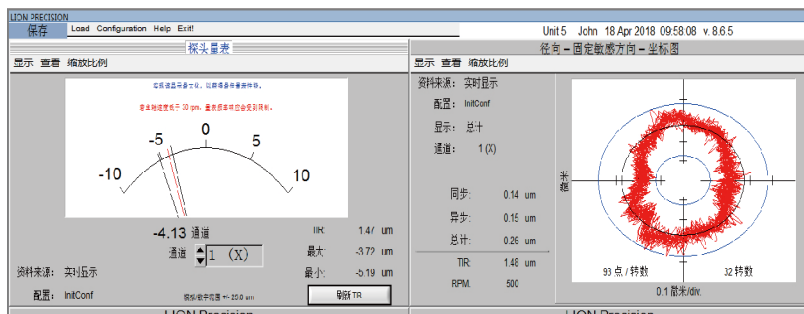
(b) 回转精度测试仪器



(c) 回转精度测试

图3 主轴回转精度测试

Fig.3 Spindle rotation accuracy test



(a) 主轴转速为 500r/min



(b) 主轴转速为 1500r/min

图4 不同主轴转速回转精度测量

Fig.4 Rotation accuracy measurement of different spindle speeds

度为 $0.24\mu\text{m}$ 。如表 1 所示,多次主轴回转精度测试结果都在 $0.3\mu\text{m}$ 以下,所以该主轴回转精度高。

主轴径向误差可以分为同步误差与异步误差,同步误差与磨削工件孔径圆度直接相关,异步误差和工件磨削表面粗糙度直接相关。一般异步误差值对应于工件磨削表面粗糙度值的 4~6 倍。造成磨床砂轮主轴回转误差的主要原因:一是主轴动静压轴承中心线与主轴中心线的偏

斜;二是磨床工作台变形造成主轴与测量点之间的动态位移,比如主轴旋转不平衡振动等。利用该系统测试磨床主轴的回转精度,对提高磨床主轴的回转精度和磨削加工质量具有非常重要的意义。

主轴性能讨论

对高效精密磨床动静压轴承主轴系统的静刚性、抗振性、热稳定性进行了研究^[3,7-10]。

主轴系统的刚度分为静刚度和动刚度两部分,在动刚度的研究中应优先进行静刚度研究,其中静刚度表示在静载荷的情况下主轴抵抗变形的能力,动刚度则表示在动载荷的情况下主轴抵抗变形的能力。应用材料力学理论分析该数控磨床主轴系统,得到主轴系统中前后动静压轴承的受力;再根据这个轴承的受力,基于流体润滑的雷诺方程,应用 FLUENT 软件在计算机上进行数值

分析^[4],得到浅油腔节流径向动静压轴承的油膜刚度、润滑油流量和温升等轴承的基本性能参数;同时得到主轴系统中毛细管节流、小孔节流和薄膜节流止推静压轴承的性能。进而应用主轴受力变形得知该主轴系统静刚度值较高。

砂轮上加工点处的法向振幅直接影响磨削的加工精度,激振力幅值与砂轮上加工点处法向振幅的比值可以表示砂轮加工点处抵抗变形的能力,即系统在简谐载荷下的动刚度。应用 ANSYS 软件有限元主轴系统振动仿真分析,该主轴系统的动刚度大于 $350\text{N}/\mu\text{m}$,符合该主轴系统的高动刚度设计要求。

同时应用 ANSYS 有限元软件热分析模块来获得主轴系统热变形仿真数值解^[7,10],在该主轴的温度场及热变形计算中,高精度磨床主轴采用的材料为 38CrMoAlA,模拟出多种工况的砂轮主轴磨削状态下主轴热变形。动静压轴承温度越高,主轴各处的最大热变形量也越大。主轴前端砂轮处轴向最大热变形较大,因为轴向零变形基准是在止推轴承处(靠主轴后端皮带轮处),离主轴前端较远,而热变形量(即主轴轴向热膨胀量)是累积向前的,所以热伸长变形累积到主轴前端就比较大了。当主轴轴向热膨胀量大时,端面磨削会有较大的误差。所以该主轴前端轴向最大热变形较大,在设计中要考虑应用轴向热变形的位移补偿来消除误差,提高磨削加工精度。有限元分析表明,该砂轮主轴温升范围小,能够快速达到稳定,而且主轴热变形较小。

结论

本文通过理论分析和试验研究相结合,对主轴回转精度测试和主轴轴承性能进行有限元理论分析,得出的性能数据表明该高效精密数控磨床动静压主轴系统的静刚度、回转精

表1 主轴回转精度测试结果

Table 1 Spindle rotation accuracy test results

主轴转速 / ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	回转精度 / μm
200	0.21
500	0.26
800	0.23
1500	0.24

度、抗振性、热稳定性等性能优良,可以满足高效精密磨床的磨削需求,所以这是一款性能优良的高档数控磨床砂轮主轴系统。

参考文献

- [1] 盛晓敏, 郭力, 谢桂芝, 等. 超高速磨削技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- SHENG Xiaomin, GUO Li, XIE Guizhi, et al. Ultra-high-speed grinding technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [2] 胡灿, 熊万里, 孙文彪, 等. 可控节流液体静压主轴回转精度提升的机理研究 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(11): 160-168.
- HU Can, XIONG Wanli, SUN Wenbiao, et al. Research on the mechanism of improving hydrostatic spindle rotating accuracy with controllable restrictor[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(11): 160-168.
- [3] 郭力, 曹姗, 胡靖. 高效精密动压主轴热动力学耦合特性分析 [J]. 机械科学与技术, 2015, 34(11): 1686-1692.
- GUO Li, CAO Shan, HU Jing. Coupling analysis of thermal-dynamics characteristics of high efficiency and precision hybrid spindle[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(11): 1686-1692.
- [4] 郭力, 沈志伟, 刘桂萍. 高效精密磨床砂轮主轴深腔动静压轴承静特性分析 [J]. 润滑与密封, 2014, 39(2): 1-8.
- GUO Li, SHEN Zhiwei, LIU Guiping. Analysis of static characteristics of the liquid hybrid bearings with deep-shallow cavity in a high efficiency and precision spindle of grinder[J]. Lubrication Engineering, 2014, 39(2): 1-8.
- [5] 邱波. 主轴回转精度动态测试技术研究 [J]. 科技创新导报, 2013(22): 79-80.
- QIU Bo. Research on dynamic testing technology of spindle rotation accuracy[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2013(22): 79-80.
- [6] 籍永建, 王红军. 某型数控机床主轴系统回转误差动态测试研究 [J]. 机床与液压, 2015, 43(1): 5-8.
- JI Yongjian, WANG Hongjun. Dynamic testing research of rotary errors for a certain type of NC machine tool spindle system[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015, 43(1): 5-8.
- [7] 郭力, 胡靖, 曹姗, 等. 精密磨床主轴深腔动静压轴承热弹性复合变形分析 [J]. 制造技术与机床, 2014(10): 59-65.
- GUO Li, HU Jing, CAO Shan, et al. Analysis of thermo-elastic deformation in liquid hybrid bearing with deep-shallow cavity of precise grinder[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2014(10): 59-65.
- [8] 张华, 郭力, 朱喜峰, 等. PM 流量控制器节流液体静压轴承静态特性分析 [J]. 机械科学与技术, 2016, 35(7): 1073-1082.
- ZHANG Hua, GUO Li, ZHU Xifeng, et al. Study on static and dynamic characteristics of hydrostatic bearing for PM flow controller[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2016, 35(7): 1073-1082.
- [9] 张华, 郭力, 许怡赦, 等. 隔热涂层对磨床主轴动静压轴承热变形的影响研究 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2016, 43(4): 67-74.
- ZHANG Hua, GUO Li, XU Yishe, et al. Thermal deformation research about applying heat insulation coating on hybrid bearing in spindle of grinder[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(4): 67-74.
- [10] 郭力, 李波, 章泽. 液体动静压轴承的温度场与热变形仿真分析 [J]. 机械科学与技术, 2014, 33(4): 511-515.
- GUO Li, LI Bo, ZHANG Ze. Simulating temperature field and thermal deformation of liquid dynamic and static pressure bearing[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2014, 33(4): 511-515.

通讯作者: 郭力, E-mail: guolihu8@163.com。

Test Research on Rotation Accuracy of Hybrid Spindle of High-Efficiency Precision Grinding Machine

GUO Li¹, ZHANG Hua²

(1. Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Hunan Mechanical and Electrical Polytechnic, Changsha 410151, China)

[ABSTRACT] The spindle rotation accuracy of a high-efficiency precision CNC grinding machine is tested by using the spindle rotation accuracy tester produced by Lion Precision Company. The results show that the spindle rotation accuracy of the grinding wheel spindle system is very high. The results of the research on rotation accuracy, static rigidity, vibration resistance and thermal stability of the grinding wheel spindle show that it is a grinding wheel spindle with excellent performance. This will improve the grinding performance of CNC grinding machines.

Keywords: High-accuracy grinding machine; Grinding wheel hybrid spindle; Rotary accuracy; Lion Precision Company; Stiffness

(责编 逸飞)