

国产柔性坐标测量机机械部分设计与调试

胡鹏浩¹ 费业泰¹ 王春花²

摘要

经过 4 a 研制出了 6 自由度柔性坐标测量机并形成产品投放到国内市场. 主要介绍了其机械部分设计、制造与调试的思路和措施, 选用高精度光栅传感器并精心调整光栅偏心, 通过圆光栅读数误差试验, 实现对光栅测角误差的修正, 从而确保了该产品的测量精度.

关键词

柔性坐标测量机; 角度测量误差修正; 精密圆光栅应用

中图分类号 TH71; TG803

文献标志码 A

0 引言

Introduction

近十年来, 国外的柔性关节坐标测量机陆续进入并完全占据了国内市场, 主要是 Cimcore、Faro 和 Romer 3 家公司的产品. 国内先后有若干科研院所从事该技术和产品的研究, 并取得了很多科研成果, 但真正形成产品制造能力的并不多见. 本文通过 4 a 的研制, 初步完成了技术的产业化进程, 目前产品已小批量投放市场, 仪器的精度指标已稳定地达到进口中高档产品的水准.

关节式柔性 3 坐标测量机具有结构灵活、便于携带、适应范围广等优点, 但由于其结构本质上与串联机器人相似, 具有天生的误差累积和放大效应, 因而仪器的精度很难保证, 本文从仪器关键部件设计、制造和装配以及仪器的误差修正和精度标定 2 个方面进行了研究, 采用了多项自主技术保证了仪器的精度^[1-3].

1 关节设计

Design of joint

如图 1 所示, 柔性测量机的机械结构主要是由基座、立柱、2 个测量臂、6 个旋转关节、测头和平衡系统组成. 其中旋转关节的设计和制造最为重要, 关节回转精度将直接影响整台仪器的性能和精度指标. 关节的设计、工艺和装配调试必须全面考虑和优化. 其中主要包含内嵌轴和交叉轴的结构设计、滚动轴承选取、角度编码器选择和调试, 以及装配中轴系预紧等问题.

6 个旋转关节是由 3 对交叉十字关节组成的, 每对交叉十字关节结构都是相同的, 结构如图 2 所示. 内嵌轴 9 和交叉轴 5 垂直配置, 2 轴均采用 2 套精密滚动轴承支撑和定位, 依据轴的受力特点、考虑到调整装配的方便, 关节上选配的是进口 P_2 级角接触球轴承, 角接触球轴承不仅可以同时承受轴向和径向载荷, 而且调整预紧方便, 便于提高轴系刚性和回转精度. 从图 2 上可以看出, 2 轴上角接触球轴承的配置方式是不同的. 内嵌轴上轴承承受的力作用于 2 轴承的中间, 类似简直梁, 因此轴承采用了面对面排列的方式 (DF). 图中 S 点是角接触球轴承实际载荷支撑点, 可见采用这样的配置方式实际上相当于缩短了简直梁 2 个支点的位置, 有利于提高该轴的刚性; 交叉轴受力类似于悬臂梁, 作用力在轴承外侧, 2 套角接触球轴承采用背对背的

收稿日期 2009-04-28

资助项目 国家自然科学基金 (50875083); 安徽高校省级自然科学研究重点项目 (KJ2008 A005)

作者简介

胡鹏浩, 男, 博士, 教授, 研究方向为精密仪器设计与制造. hupenghao@yahoo.com.cn

1 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 合肥, 230009

2 无锡油泵油嘴研究所, 无锡, 214000

排列方式(DB),实际上增大了2个实际支撑点之间的间距,有助于提高该轴的刚性.



图1 样机

Fig.1 Sample of machine



图3 轴承综合参数检查仪

Fig.3 Bearing synthetic parameter detecting system

的作用不大;太大时,轴承磨损增加不利于长时间维持系统精度,寿命降低. 如何量化轴承的预紧负荷,使装配技术人员能保证最佳的预紧效果,本文依据上述专用仪器的测试数据,通过控制预紧量来实现对预紧力的精确控制. 具体的预紧方法不再赘述.

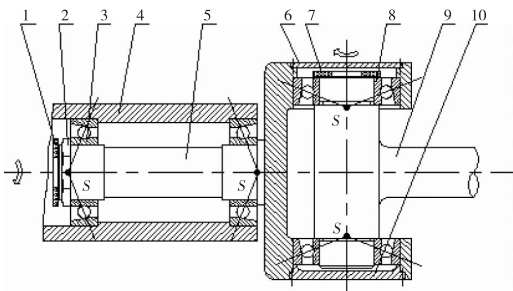
关节装配后首先需要借助专用测量夹具和量具测量交叉轴5和内嵌轴9的垂直度误差,并将3对交叉十字关节的垂直度误差作为系统误差代入到测量数学模型中以消除其对测量精度的影响. 其次,关节装配后还必须检测2轴的轴向窜动和径向跳动误差是否在公差范围之内,必要时也可以采用自准直仪来测量回转轴的扭摆代替对轴系跳动的测量.

2 角度传感器的选用及角度误差修正

Choice of angular sensor and angle error correction

柔性坐标测量机是通过精确测量6个关节的旋转角度值,来获得被测点的坐标值的,因此6个角度传感器的精度对系统的最终精度是至关重要的. 如图2所示,十字关节上配置2只圆光栅编码器,圆光栅在轴上的轴向位置确定主要考虑光栅装配方便和便于轻松调整光栅输出信号. 实际装配中,圆光栅盘中心和回转轴中心的偏心直接影响莫尔条纹的质量,对光栅输出信号的影响很大,其偏心误差一般要控制在1 μm以下.

由于角度误差在各个关节间具有传递性,离测头位置越远的角度编码器的精度对整机测量精度的影响越大,离测头位置近的编码器对整机测量精度的影响小,底座处的第1关节上的编码器原则上精度要求最高(对于高端产品,该圆光栅传感器对径配置两个读数头,用来消除偏心误差). 因此,可根据这



1,7—圆光栅盘;2—预紧螺母;3,8—角接触球轴承
4—关节臂筒;5—交叉轴;6—轴承座盖板;9—内嵌轴;10—轴承端盖

图2 十字关节

Fig.2 Cross-joint diagram

所选精密角接触球轴承为最高精度等级 P_2 ,但事实上并非每套轴承都可以满足使用要求,而是通过专门的测试后从中选取更好性能参数的轴承. 为此笔者专门研制了1台滚动轴承检测设备,如图3所示. 该设备不仅能够测试轴承摩擦力矩的变化,分析轴承摩擦力矩产生以及影响变化的因素,还可以综合完成轴承刚度指标(预紧力与预紧量)、单个轴承回转精度(内圈端面跳动、径向跳动)等技术指标测量,提供转速、预紧力变化与滚动轴承摩擦力矩之间的函数关系和试验曲线,较全面地把握了滚动轴承的特性,这对于笔者在装配中精确调整轴承起了很大的作用. 简而言之,测量机上所使用的12套精密轴承是从 P_2 级精密轴承中优选出来的,与轴承相配的轴颈是根据轴承内圈实际尺寸配磨的,不具有互换性.

滚动轴承的预紧主要是提高轴系的回转精度、增加支承的刚性. 预加载荷太小时,对提高轴承刚性

一原理,对不同的关节,应选用不同测量精度的角度编码器. 这样不仅可以满足精度的要求,而且可以节约成本. 本系统选用国外 2 家著名公司的圆光栅角度编码器. 除选用高精度光栅传感器并精心调整光栅偏心以外,还需对圆光栅的测角误差进行测试,实现对光栅测角误差的修正,从而保证仪器的测量精度.

前面提到圆光栅偏心误差会影响光栅盘所产生莫尔条纹的质量,同时它也会让圆光栅产生比较大的测角误差,如图 4 所示. 光栅盘回转中心为 O_0 ,而实际轴系回转中心为 O_1 ,则 2 中心之间的距离即为偏心量 e ,设理想的几何回转中心为 O_0 到读数头的距离为 R ,不难得出实际回转中心到读数头的距离为

$$L = R + e \sin(\theta + \theta_0).$$

式中: θ 为光栅实时转过的角度; θ_0 为初始相位.

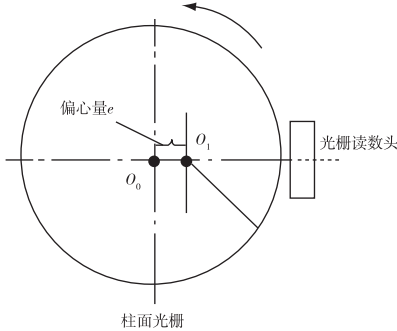


图 4 安装偏心示意

Fig.4 Diagram of installation offset

由于光栅读数头读取并记忆的信号本质上是光栅上的刻线数,而该刻线数直接正比于读数头扫过的弧长,因此,由于安装偏心引起的读数误差同样可由正弦函数表示:

$$\Delta E = e \sin(\theta + \theta_0).$$
 (1)

式中: ΔE 表示光栅偏心引起的读数误差; θ 为光栅实时转过的角度; θ_0 而则表示初始相位值. 对此误差通过下面的测试比对即可予以消除和修正^[4].

3 实验数据处理

Experimental data processing

测试圆光栅编码器测角精度的实验装置如图 5 所示,采用了金属多面棱体加光电自准直仪的方法来对光栅进行精度测试,通过专用夹具将多面棱体的回转中心与待检测的轴系回转中心连接起来,这样,当光栅绕其回转中心转过一定角度时,多面

棱体也同样转过相同角度. 比对圆光栅输出角度和光电自准直仪的读数就可以得出光栅的测角误差值.

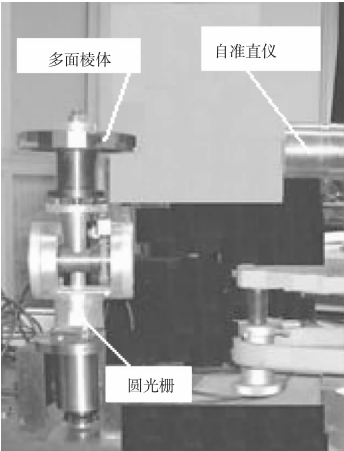


图 5 圆光栅读数误差试验

Fig.5 Experiment on round grating reading error test

将被测轴和圆光栅旋转 1 周采样,实验所用的是 24 面棱体,1 周 360°范围内采样点为 24 点,经过多次重复测量,编码器的测角误差即可得出,表 1 为某 1 个圆光栅的误差数据^[5].

表 1 圆光栅测角误差

Table 1 Angle-measuring error of round grating (°)

采样序号	1	2	3	4
测量误差	0.000 0	-0.012 5	-0.022 7	-0.033 0
采样序号	5	6	7	8
测量误差	-0.041 0	-0.051 3	-0.057 1	-0.060 8
采样序号	9	10	11	12
测量误差	-0.060 1	-0.059 3	-0.054 2	-0.046 9
采样序号	13	14	15	16
测量误差	-0.037 4	-0.025 6	-0.013 9	-0.004 4
采样序号	17	18	19	20
测量误差	0.005 1	0.014 6	0.019 8	0.022 7
采样序号	21	22	23	24
测量误差	0.023 4	0.022 0	0.016 1	0.010 3

从上表中的数据不难看出,该圆光栅的角度测量误差中含有较大的偏心误差成分,利用式(1)并进行数据拟合,即可得出该圆光栅的偏心误差修正函数式:

$$\Delta E_1 = 0.043\,0 \times \sin\left(\frac{\theta_1}{180.0} \cdot \pi + 2.687\,8\right) - 0.017\,1.$$

式中: θ_1 为编码器转过的角度; ΔE_1 为编码器 1 转过角度 θ_1 时的修正量,单位为(°). 式中的常数项是

因为编码器与多面棱体测角系统零位不重合引起的. 将该误差表达式植入测量软件中即可实现圆光栅测角误差的修正. 该编码器的修正效果如图 6 所示. 修正后编码器 1 的测量误差集中在 $(-0.0036^{\circ} \sim 0.0002^{\circ})$ 之间, 而修正前的测量误差在 $(-0.0608^{\circ} \sim 0.0234^{\circ})$ 之间, 相比之下, 经过偏心误差修正后, 测角精度明显提高. 1 台柔性坐标测量机上的 6 个圆光栅编码器都需要经过这样的测试与修正, 测试和修正工作结束后再进行关节之间的连接和最后的仪器总装.

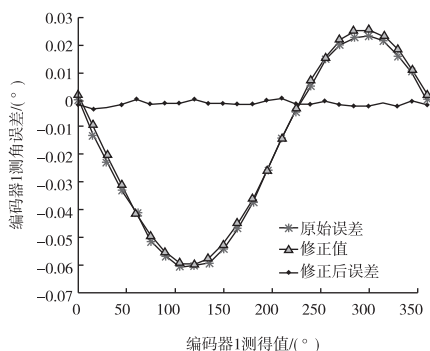


图 6 误差修正曲线对比

Fig. 6 Error correction curve contrast

当然在柔性坐标测量机中误差因素很多, 经过长期的分析、研究和实验, 目前可以总结出来的误差源大约有 70 项. 圆光栅的读数误差只是其中比较大的一个部分, 另外大约有 20 项比较大的误差通过整机的标定也得到了很好的控制, 所采用的标定方法也是自主研发的, 通过巧妙的设计和组合能有针对性地获得多项误差信息, 进而得到修正或消除^[4-5].

Design and tuning of the mechanical section in flexible coordinate measuring machines made in China

HU Penghao¹ FEI Yetai¹ WANG Chunhua²

1 School of Instrumentation and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009

2 Wuxi Fuel Injection Equipment Research Institute, Wuxi 214000

Abstract In recent years the overseas flexible joint coordinate measuring machine has entered and occupied China's market, which has found wide applications in aero and astronautic industries, automobile industry and etc. Our research team spent 4 years and successfully developed the flexible coordinate measuring machine which possesses 6-degree of freedom with high accuracy and reliability. Now the homemade product has played an important role in some factories and companies. This paper mainly focuses on its mechanical section's design method, manufacturing process and tuning experience. The error correction methods are also discussed herein.

Key words flexible coordinate measuring machine; error correction in angle measurement; precision round grating application

4 结束语

Conclusion

国外知名企业研制和开发此技术已有 20 a 的历史, 笔者仅用了 4 a 时间. 虽然目前产品性能和所采用的关键技术与国外产品仍有一定的差距(本仪器测量范围 2 400 mm, 空间长度测量精度 0.07 mm), 但可以相信这个差距正在被缩小. 下一步的工作将主要集中在动态误差修正和全面的、便捷的、可以规范化操作的标定技术研究之上. 在产品系列化的基础上, 将根据用户的需要进行个性化的、有针对性的研制, 努力拓宽柔性坐标测量机的应用前景.

参考文献

References

- [1] Bosch J A. Evolution of measurement [C]//Coordinate Measuring Machines and Systems. Marcel Dekker Inc, 1995:1-38
- [2] 小美濃武久, ほか. 多関節型三次元測定機精度向上[J]. 精密工學會志, 1986, 52(8):1300-1304
Omino Takehisa, Improvement of accuracy for articulated three-dimensional coordinate measuring machine[J]. The Japan Society for Precision Engineering, 1986, 52(8):1300-1304
- [3] Alamgir Choudhury, Joseph Genin. Kinematics of an n-degree-of-freedom multi-link robotic system[J]. The International Journal of Robotics Research, 1989, 8(6):132-140
- [4] WANG Chunhua, FEI Yetai, HU Penghao, et al. Accuracy distribution and determination of the flexible three-coordinate measuring machine, Volume 6280 [C]//Proceedings of SPIE, Third International Symposium on Precision and Mechanical Measurements, 2006, 6280(2):2-6
- [5] 汪平平. 柔性坐标测量机精度理论与应用技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 2006
WANG Pingping. Research on accuracy theory and its application about flexible coordinate measuring machine [D]. A Dissertation Submitted to Hefei University of Technology for the Degree of Doctor of Philosophy in Engineering, 2006