

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.04.004

锥齿轮传动形性测试仪的设计*

杨大谦,林家春*,石照耀

(北京工业大学 北京市精密测控技术与仪器工程技术研究中心,北京 100124)

摘要:针对当前锥齿轮测量仪效率低、精度不足、功能单一,无法作出全面客观评价的问题,研究了锥齿轮快速形貌和性能的测量方法,设计了一台锥齿轮传动形性测试仪,该仪器由机械结构、电气控制、测量软件3部分组成。在分析研究了紧凑型床身设计的基础上,通过采用3个长光栅闭环反馈的直线轴运动和两个主轴电机的旋转运动,对被测齿轮进行了定位和加载。采用了西门子Simotion系统作为仪器电气和运动控制系统,通过控制锥齿轮副对滚,采集被测锥齿轮副的齿面信息,经由上位机测量软件分析处理,对被测锥齿轮的形貌精度和工作性能作出了评定。研究结果表明,该仪器结构能测量四级精度锥齿轮,并且通过传动误差、振动噪声和磨削烧伤的检测,可以对锥齿轮副形貌和性能进行客观、全面评价。

关键词:锥齿轮测量;高精度;机械设计;电气控制

中图分类号:TH132.421

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)04-0401-05

Design of bevel gear geometry and performance tester

YANG Da-qian, LIN Jia-chun, SHI Zhao-yao

(Beijing Precision Measurement & Control Technology and Instrument Engineering Technology Research Center,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Aiming at the current problem of bevel gear tester was so low efficiency, single function and low accuracy that could not do a reasonable judgment, study was taken to research the measurement of geometry and performance of bevel gears. A bevel gear geometry and performance tester was designed out, which included mechanical structure, electrical control, and measurement software. Based on the compact design method, a compact and stable bed was designed out, meanwhile, two rotary movement with spindle motors and three linear axes which were close-loop feedback with encoders were established. Siemens Simotion system was employed to control the motion and electrical components. While controlling the gears rolling, the information was collected and analyzed in the computer. The results indicate that the mechanic structure is capable of measuring 4th precision bevel gears, and through the transmission error, structure-borne noise and grinding burn signals to get a reasonable judgment.

Key words: bevel gear measurement; high precision; mechanic design; electrical control

0 引言

目前,锥齿轮已广泛地应用于工业、交通和能源等重要领域,而随着更多的机械设备向重载、高速、高效

方向的发展,人们对机械的运转性能提出了更高的要求。因此,如何得到传动更平稳、振动噪声更低并且使用寿命更长的锥齿轮是齿轮行业的一个重要研究课题。

收稿日期:2015-12-25

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ590395)

作者简介:杨大谦(1990-),男,四川达州人,硕士研究生,主要研究方向为精密测试技术及仪器。E-mail:dzyangqian@126.com

通信联系人:林家春,男,副教授,硕士生导师。E-mail:linjc@bjut.edu.cn

本研究所设计床身采用 ANSYS 仿真软件进行了优化,主要受力面采用肋板和加强筋支撑,床身内部镂空以调整机床重心,底座加工有多个支撑面,采用垫铁减震支撑,并且床身上还设计有多处减重孔和质量调整腔,在机床加工完成后,设计人员可通过调整支撑点位置和质量调整腔中重物质量,再次进行优化,以实现高速和高精度的测量要求。床身铸造采用砂型模具,翻砂铸造,成本相对较低,并采用人工失效,快速消除铸造过程中产生的应力,导轨安装面采用精加工,保证安装面的平面度和直线度。

3.2 主轴直驱技术

锥齿轮副传动误差的测量需要高精度的轴系驱动,传统锥齿轮检查仪的主轴多采用皮带驱动,因此,存在柔性连接或间隙、误差大,且选型时受到负载/电机惯量比的约束^[13]。为了获得良好的加/减速特性,主轴必须尽可能地减小旋转部分转动惯量,并且本研究检查的齿轮尺寸范围大,主轴负载转动惯量变化大,传统主轴结构无法胜任。因此,结合表 1 的设计要求,本研究设计采用电主轴的结构形式,即将空心转子与机床主轴直接过盈配合,成为一种集成式电机主轴。采用主轴电机直驱技术^[14]的电机转子和负载的惯量成为一个整体,刚性连接,没有中间传动环节,理论上不考虑惯量比。

本研究的 A/C 轴主轴电机均采用西门子 1FE1 同步内装式电机定转子。根据 1FE1 电机尺寸,本研究设计了如图 4 的主轴结构。

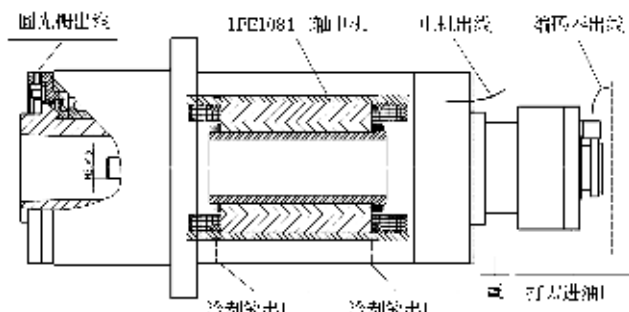


图 4 主轴电机结构图

该主轴为空心精密主轴,内部可装拉杆机构,主轴前端采用莫氏锥孔结构,通过与齿轮夹具锥面的过盈配合减小偏心误差,使主轴精度小于 $2\ \mu\text{m}$ 。主轴直驱技术有效地克服了传统锥齿轮检查仪精度低、振动和噪声大的缺点,并且结构更紧凑、重量轻、稳定性和动态综合性能都更好,满足本研究高速和重载的测量要求。主轴电机后端安装有海德汉 ERM 磁栅编码器作为主轴电机闭环反馈控制用的角度编码器,测量传动

误差的圆光栅安装在主轴电机最前端,靠近被测齿轮副,结合测量和安装要求,本研究采用了雷尼绍 REXM 超高精度圆光栅,可在低速下(通常小于 $500\ \text{r/min}$)测量传动误差。

两主轴电机采用相同的设计,方便加工,可互为主/被动端,保证了同样的动态特性。两主轴中,主动轴为转速控制,带动从动轮正、反转,从动轴为力矩控制,采用力矩限幅的方式,始终输出与主动轮旋向相反的扭矩,起到加载的目的。开始检测时,主动轴驱动齿轮副先加速至设定转速,从动轴再加载至设定扭矩;停止检测时则是先停从动轴,去掉载荷,再停主动轴。

3.3 自动装夹技术

锥齿轮检查仪常用手动装夹方式夹紧工件,不仅操作复杂,效率低,而且精度低,重复性较差。针对这一问题,本研究设计了一套气液增压自动装夹系统,基本原理为碟簧拉紧,液压松刀。

装夹系统拉杆结构改装自精密加工机床用拉刀机构,空心主轴内拉杆一端通过螺纹与齿轮机械式夹具连接,夹具依靠锥孔与主轴定位。在拉杆拉紧状态下,拉力由碟形簧片组的压缩变形提供,在拉力作用下,小轮依靠锥孔夹紧,而大轮依靠扩张盘夹紧。更换工件时,气液增压缸提供的高压油进入拉刀机构后端的高压油腔,由液压缸克服弹簧力,从而松开夹具。仪器操作面板上分别设置有大小轮装夹按钮和指示灯,夹具未夹紧前主轴不能转动。

齿轮夹紧时,夹紧力全部由弹簧形变力提供,理论上不消耗功率;夹具松开时,高压油在拉杆后端油腔流动一次,动作时间短。自动装夹系统重量轻、定位精度高,并且操作简便,漏油少,减少了维护成本。

3.4 直线运动轴设计

仪器直线轴的主要受到各轴向重力和载荷的影响。螺旋锥齿轮副啮合时,齿轮轴向和径向力受齿轮工艺参数的影响,与切向力之间存在一定的对应关系,但最大不超过切向力 1.5 倍^[15-16]。考虑到本研究被测齿轮种类多,为简化设计,本研究取倍数 $\mu = 1.5$,计算检查工况下齿轮副三轴向最大外力为:

$$F_t = 2T/D \quad (2)$$

$$F_s = \mu \cdot F_t \quad (3)$$

$$F_r = \mu \cdot F_r \quad (4)$$

式中: T —齿轮副最大检测载荷, Nm ; D —被测齿轮最

小外径,mm; F_t —锥齿轮最大切向力,kN; F_s —水平轴最大轴向力,kN; F_r —水平轴最大径向力,kN。

本研究直线轴伺服电机通过联轴器直接与滚珠丝杠相连,中间无调速单元,动态响应好,传动链采用过盈配合,无反向间隙,确保了精度。直线轴的设计还要考虑惯量匹配和转矩、加速度、速度等特性。因此,根据表1的设计指标,本研究对传动链进行验算后得到,该仪器直线轴负载惯量小于转子惯量,并且电机以最大扭矩加速至最大转速不超过0.1 s,因此,该仪器直线运动轴刚度大,动态特性好。

本研究所设计仪器竖直接承受载荷较大,为平衡重力,保证仪器在竖直方向的动态响应能力,本研究在竖直方向设计有配重单元。同时,竖直轴伺服电机带抱闸,防止突然掉电时因重力造成的破坏。

本研究直线运动轴设计有气动重载型钳制锁、长光栅,以及多组限位等关键部件。通过采用长光栅的闭环反馈控制提高了直线轴定位精度,定位完成后,导轨钳制锁夹紧导轨,增加轴向刚度,防止加载检测工况下,轴向窜动影响定位精度。

3.5 精度分析

传动误差是齿轮副的重要评价指标,精度越高的齿轮副传动误差越小。齿轮精度运动学认为齿轮是不存在变形的刚体,齿轮副误差沿着啮合线方向影响传动特性。因此,本研究以刚体运动学理论为基础,结合表1的设计指标,以最大外径分别为260 mm和500 mm的小轮和大轮为例,列出影响仪器精度的各误差项如表2所示。

表2 仪器精度分析(单位:μm)

误差项目	允许误差	分度圆上反应值	标准不确定度
	$\Delta/\mu\text{m}$	$\delta_{li}/\mu\text{m}$	$\delta_{2i}/\mu\text{m}$
小轮轴系径跳	2	4.131	1.686
大轮轴系径跳	2	4.131	1.686
小轮轴系轴跳	2	0.578	0.236
大轮轴系轴跳	2	1.337	0.546
两轴系垂直度	2"	1.154	0.471
小轮安装偏心	2	4.218	1.722
大轮安装偏心	2	4.042	1.650
大轮圆光栅精度	1"	1.454	0.839
小轮圆光栅精度	1"	0.630	0.364

假设表2中所有误差项相互独立,相关系数为零,则计算的切向综合总偏差为:

$$\delta = \sqrt{\sum \delta_{li}^2} = 8.615 \mu\text{m} \tag{8}$$

锥齿轮切向综合误差满足^[17]:

$$F'_i = F_p + 1.15f_c \tag{9}$$

式中: F_p —齿距累计偏差,μm; f_c —齿形相对误差,μm。

外径为260 mm的4级精度锥齿轮切向综合误差 $F'_i = 29.6 \mu\text{m} > 3\delta$,即仪器满足4级精度锥齿轮的要求。本研究所设计仪器的最终效果如图5所示。

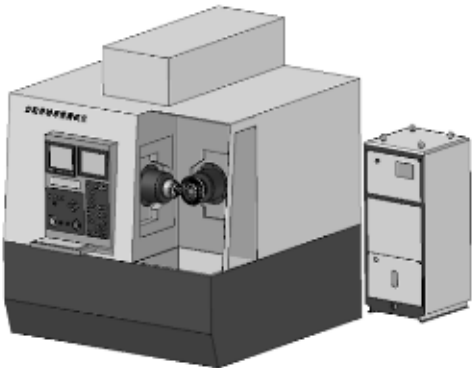


图5 齿轮传动形性测试仪效果图

4 结束语

本研究对比分析现有锥齿轮检查机床,并基于传动误差、振动噪声和磨削烧伤的测量原理,设计了一台高精度且功能丰富的锥齿轮传动形性测试系统。该仪器机械结构设计紧凑,各功能模块集成度高。床身分析结果表明,该结构形变小,高速测量稳定性高,直驱主轴和齿轮快速装夹系统保证了测量的重复性,减小了偏心误差,直线轴动态性能和刚度高,并且采用光栅反馈提高了定位精度。仪器控制系统响应快且精度高,可实现齿轮安装位置及主轴动态参数的快速调整,以配合测量系统实现被测锥齿轮副形貌和性能的快速检测。

通过整机精度分析得出,仪器关键部分误差综合到分度圆上的反应值 δ 小于4级精度锥齿轮切向综合误差的1/3,因此,本研究所设计的仪器能有效地满足四级精度锥齿轮测量需求。

(下转第416页)

本文引用格式:

杨大谦,林家春,石照耀. 锥齿轮传动形性测试仪的设计[J]. 机电工程,2016,33(4):401-405,416.
YANG Da-qian, LIN Jia-chun, SHI Zhao-yao. Design of bevel gear geometry and performance tester[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016, 33(4):401-405,416.
《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>