

基于电子展成原理的直齿锥齿轮齿形误差测量

Tooth Shape Error Measurement of Straight Bevel Gear Based on Electrical Generating

哈尔滨量具刃具集团有限责任公司 周洪燕

[摘要] 针对传统基于接触印痕检验的直齿锥齿轮齿形误差检测方法存在的难以定量描述几何误差、量值溯源性差等缺点,提出一种基于电子展成原理的直齿锥齿轮齿形误差测量与评定方法,首先建立了直齿锥齿轮的理论齿形及齿形误差测量的数学模型,然后在基于全闭环交流伺服控制系统的齿轮测量中心上,控制传感器测头在空间扫描形成直齿锥齿轮的理论齿形曲线,依据连续扫描过程中的传感器读数对直齿锥齿轮的齿形误差进行测量与评定。结果表明,该方法可在现有 CNC 齿轮测量中心上实现直齿锥齿轮齿形误差的自动测量与评定,具有测量效率与自动化程度高、量值溯源性好等显著优点。

关键词: 直齿锥齿轮 齿形误差 电子展成误差评定

[ABSTRACT] According to the traditional inspection method for straight bevel gear's tooth shape error based on the contact moulage exists defects of difficult quantitative description of geometric errors and poor traceability vector-valued, a kind of tooth shape error measurement and evaluation method of straight bevel gear based on electrical generating is presented. Firstly, the theory tooth shape of straight bevel gear and mathematical model of tooth shape error measurement is established, then sensor in space scanning straight bevel gear's tooth shape and forming theory curve on the gear measurement center is controlled based on the closed-loop AC servo control system, tooth shape error of straight bevel gear is measured and evaluated based on the sensor readings in the process of continuous scanning. Experiment results show that, this method can realize the automatic measurement and evaluation of straight bevel gear's tooth shape error in existing CNC gear measurement center, and has significant advantage of the measurement efficiency, high degree of automation, and good vector-valued traceability.

Keywords: Straight bevel gear Tooth shape error Electrical generating Error evaluation

直齿锥齿轮具有容易加工、成本低且能够改变传动方向等优点,在汽车、机床、工程机械领域的产品与装备中得到广泛应用。随着上述领域对产品高性能、低消耗要求的日益提高,齿轮传动系统朝着高速、重载、高可靠性、低噪声和低成本方向发展,对产品与装备中直齿锥齿轮的精度要求也越来越高。对直齿锥齿轮的齿形误差进行高精度测量与误差评定,并分析误差产生的原因,对于修正切齿方案,提高其加工质量具有重要的实际意义和经济价值^[1-2]。

然而,由于直齿锥齿轮的齿面形状与数学模型较为复杂,其齿形误差的测量与评定及控制方法一直是测量领域的难题。我国工业生产过程中,目前仍广泛采用传统的基于接触印痕检验的直齿锥齿轮齿形误差检测方法^[3-4],该方法是将标准齿轮与待测齿轮安装在滚动检齿机上,在轻微制动作用下使齿轮对进行啮合,根据齿轮啮合后齿面上接触印痕位置,判断待测齿轮的综合运动误差与加工质量。该方法属于“啮合式运动测量法”,优点是检测结果能直接反映其传动性能,但存在难以定量描述几何误差、量值溯源性差的缺陷,接触斑点的大小和形状的判断依赖于操作员的经验,主观性大,不利于进行齿轮加工工艺改进及加工设备的误差诊断。也有采用坐标测量机进行直齿锥齿轮齿形误差测量的方法^[5],其原理是在齿面上测量大量离散点坐标,建立数学模型进行齿形拟合,绘制拓扑图,从而确定齿形误差与加工质量,该方法存在的问题在于测量效率较低,测量点的数目与位置选取对测量精度影响较大。

此外, KLINGELNBERG、M&M 等国外量仪厂家生产的 CNC 齿轮测量仪多具有直齿锥齿轮齿形误差测量与误差评定的功能^[6],但价格昂贵,且超精度型产品对我国实施禁运。因此,研究具有我国自主知识产权的直齿锥齿轮齿形误差测量与评定方法,对于突破国外技术垄断,提高我国产品质量与竞争力,具有十分重要的意义。

1 直齿锥齿轮的理论齿形与误差形式

从理论上讲,直齿锥齿轮的齿形为球面渐开线。但在现实加工中,由于球面无法展成平面,球面渐开线也

不能在平面上展开,这就给圆锥齿轮的设计和计算带来了很大的困难,故在工程中通常采用一种近似的方法,即采用与球面渐开线非常接近的锥面渐开线来代替球面渐开线,一般倾向于用背锥渐开线代替球面渐开线进行锥齿的建模、设计与加工。图1为直齿锥齿轮的半剖面图, O_1A 绕 O_1O 旋转得到背锥,将球面渐开线向背锥投影,可以看出 ab 圆弧与直线 $a'b'$ 相差很小,可以认为直线 $a'b'$ 与圆弧近似。由于背锥可以展开成平面,因此可以用背锥上的渐开线代替球面渐开线来研究。理论研究表明,用当量齿轮的齿形来代替直齿锥齿轮大端球面上的理论齿形,其误差是很小的。基于此,直齿锥齿轮齿形误差的测量就是在直齿锥齿轮的背锥渐开线上测量的。

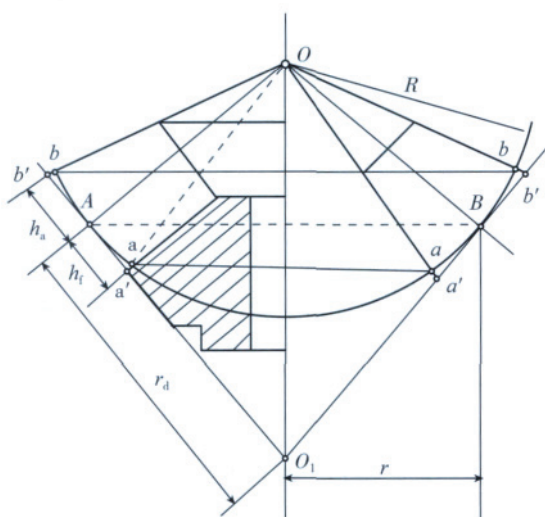


图1 直齿锥齿轮的半剖面图
Fig.1 Half section of straight bevel gear

直齿锥齿轮产生齿形误差的因素及齿形畸变的表现形式也比较复杂。主要的几种齿形误差形式包括齿形顶肥根瘦、齿形顶瘦根肥、齿形一面合格而另一面不合格、齿顶或齿根不合格、压力角偏大等。直齿锥齿轮的齿形误差严重影响其传动平稳性和瞬时速度比,造成误差的原因主要是加工机床本身的精度与性能限制,或是加工过程中工艺参数调整不合适。实践表明,根据齿形误差的测量结果对机床和加工参数进行调整是提高齿轮加工精度与传动性能的有效方法。

2 直齿锥齿轮齿形误差的测量模型

直齿锥齿轮的齿形误差是指在齿轮的工作部分内,容纳实际齿形的两理论齿形间的法向距离,一般在齿宽的中部进行测量,齿形误差测量过程中传感器测头轨迹的示意图如图2中轨迹 T 所示。直齿锥齿轮的理论

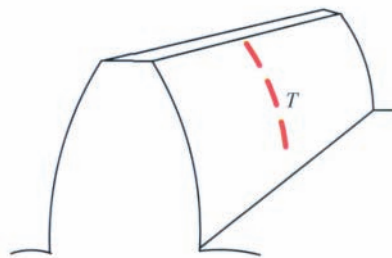


图2 齿形误差测量中传感器测头轨迹
Fig.2 Sensor track of measuring tooth shape error

齿形应是球面渐开线,但加工时一般是以其背锥面上的渐开线为依据。因此,可以用测背锥平面渐开线的齿形误差代替球面渐开线齿形误差,测量其齿形误差时所用的基圆一般也应是背锥面上形成该渐开线的当量基圆。由此可知,直齿锥齿轮的齿形误差即为以当量基圆为基圆的背锥面上的渐开线误差。

根据球面三角学原理进行测量起点和终点的展开角的计算,如图3所示。

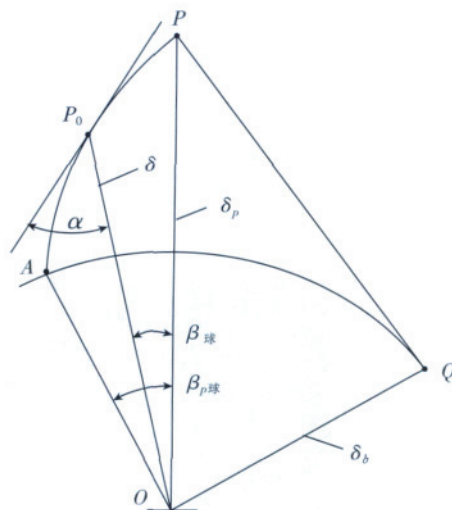


图3 球面渐开线的极坐标
Fig.3 Coordinate of sphere involute

齿形上任意点 P 的展开角 φ_p 就是 PQ (在球面上的直线长度代表角度),计算公式如下:

$$\varphi_p = \arccos(\cos \delta_p / \cos \delta_b), \quad (1)$$

式中, δ_p 为点 P 的锥角, δ_b 为基锥角。

将(1)式中的 δ_p 用顶锥角 δ_a 代替,即得到测量终点的展开角 φ_a :

$$\varphi_a = \arccos(\cos \delta_a / \cos \delta_b). \quad (2)$$

测量起始点展开角按与平面齿轮啮合的方法来计算,相当于圆柱齿轮中按与齿条啮合的计算方法。测量起始点展开角 φ_1 的计算公式如下:

$$\varphi_1 = \arccos(\cos\delta_1 / \cos\delta_b), \quad (3)$$

式中, δ_1 为与平面齿轮啮合时的工作锥角。

利用球面三角学导出 δ_1 的计算公式:

$$\delta_1 = \arccos(\cos\delta\cos\alpha + \sin\delta\sin\alpha\sin\alpha_0), \quad (4)$$

其中: $\sin\alpha = \sin\theta_a / \sin\alpha_0, \quad (5)$

$$\theta_a = \delta_a - \delta, \quad (6)$$

式中, δ_a 为顶锥角。

基锥角的计算公式如下:

$$\delta_b = \arcsin(\sin\delta\cos\alpha), \quad (7)$$

式中, δ 为节锥角, α 为节锥压力角。

上述计算测量起始点展开角的方法多用于不知配对齿轮参数时使用,无特殊要求的情况下一般都能满足使用,保证啮合要求,其测量齿廓的范围是比较可靠而且合理的。当 $\delta_1 < \delta_b$ 时, φ_1 即取为 0° 。

3 基于电子展成的直齿锥齿轮齿形误差测量

电子展成方法是通过由计算机、控制器、伺服驱动装置及传动装置组成的展成系统,取代机械展成法中的展成装置,形成某种特定曲线轨迹(如螺旋线、齿廓线等)。电子展成法一般是按照被测齿轮的理论方程进行控制的,数控系统采用闭环控制系统。采用电子展成法的齿轮测量仪器,一般都具有一个能够 360° 旋转的转台,在转台的一侧安装有一个能够实现三维运动的测头架,测量运动只能在转台的一侧进行。齿轮测量中心各运动轴的定义如图 4 所示。

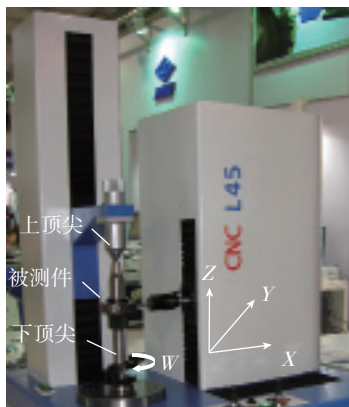


图4 齿轮测量中心
Fig.4 Gear measuring center

本课题介绍的直齿锥齿轮齿形误差的测量方案是采用电子展成法。首先,将被测件安装在仪器上下顶尖之间,如图 5 所示,建立坐标系;然后,根据齿轮理论方程建立数学模型,控制主轴 W 以及 Y 和 Z 三轴联动,测头接触齿面测量齿形误差。由于测量的曲线是背锥上的渐开线,因此,测头运动的轨迹垂直于分度圆锥母线。同时,测控系统实时采集测头和各运动轴的坐标值,并

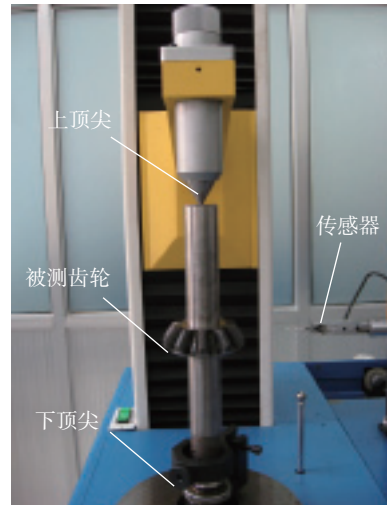


图5 直齿锥齿轮安装
Fig.5 Installation of straight bevel gear

传送给计算机,绘出误差曲线图,并自动进行误差评定。

软件系统采用了面向对象编程语言的先进思想,在开始着手系统开发时,就考虑应用面向对象思想将系统的数据和方法封装在一起,采用模块化编程思想,将系统结构模块化,每个模块具有特定的功能,同时各模块相对独立。这样就减少了各模块之间的耦合关系,便于系统的开发、维护和升级。

4 试验

为了验证该齿形误差测量方法的可行性,在 3906T 型 CNC 齿轮测量中心上进行实际测量试验,将得到的齿面数据进行数据处理,从而可以得到齿形误差。以如下齿轮参数为例进行实际测量试验,实际齿轮的设计参数如图 6 所示。

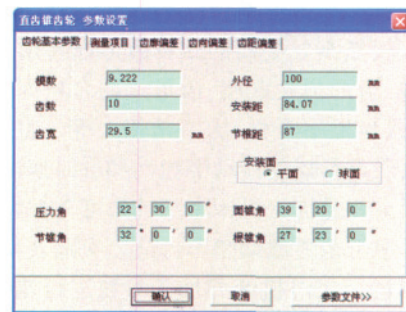


图6 基本参数输入界面
Fig.6 Basic parameter input interface

齿形误差的测量结果如图 7 所示。根据最小二乘法误差评定技术,可得到齿形总偏差、形状偏差以及倾斜偏差。由测量结果值可计算出压力角误差值(角度),即机床需要调整的角度:

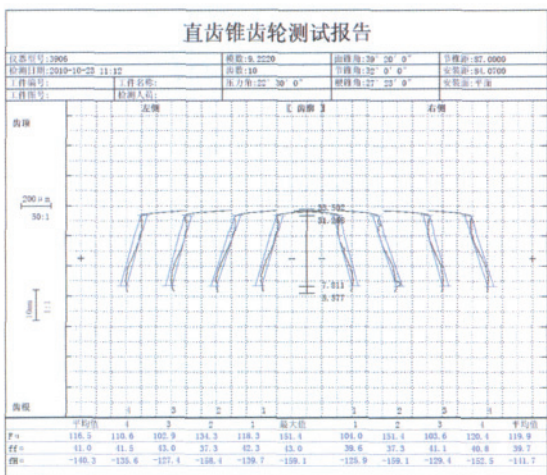


图7 测量结果
Fig.7 Measuring result

$$\Delta\lambda = \arctan \frac{fH_\alpha}{L}, \quad (8)$$

式中, $\Delta\lambda$ 为压力角误差, fH_α 为齿廓倾斜偏差 (mm), L 为评定长度 (mm)。

以上述齿轮的右齿面为例, $fH_\alpha = -159.1/1000 = -0.1591$, $L = 31.268 - 7.811 = 23.457$, 故

$$\Delta\lambda = \arctan \frac{fH_\alpha}{L} = \arctan(-0.1591/23.457) = -0.388^\circ。$$

测量结果表明: 压力角误差为 -0.388° , 即被测齿轮的压力角比理论值大 0.388° , 可以通过调整机床参数来修正此误差。

5 结论

本课题提出了一种基于电子展成原理的直齿锥齿轮齿形误差测量与评定方法, 基于直齿锥齿轮的理论齿形及齿形误差测量的数学模型, 在齿轮测量中心上控制传感器测头在空间扫描, 形成直齿锥齿轮的理论齿形曲线, 依据连续扫描过程中的传感器读数对直齿锥齿轮的齿形误差进行测量与评定。试验结果表明, 该方法可在现有 CNC 齿轮测量中心上实现直齿锥齿轮齿形误差的自动测量与评定, 具有测量效率与自动化程度高、量值溯源性好等显著优点, 而且该系统具有良好的可操作性和稳定性, 测量方案合理可行, 测试精度在许可范围内, 从而验证了该测量方法的可行性。

参考文献

- [1] 魏华亮. 国内齿轮量仪的市场需求及产品分析. 机械工程师, 2004(9): 3-4.
- [2] 昌明. 齿轮测量中心测控系统开发 [D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
- [3] 张鸿源. 圆锥齿轮测量. 北京: 中国计量出版社, 1992: 40-

150.

- [4] 郑惠芸. 直齿锥齿轮齿形误差分析. 山西机械, 2003(4):58-59.
- [5] 王志, 王贵成, 谢华锐. 锥齿轮测量的误差分离法. 农业机械学报, 2005,36(9):128-130.
- [6] 劳奇成, 尚雅层, 王建华, 等. CNC 齿轮测量中心的测控系统. 西安工业学院学报, 1996(9): 213-215. (责编 良辰)

(上接第 79 页)

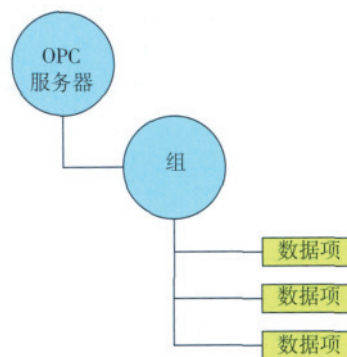


图7 OPC Server的对象组成
Fig.7 Objects of OPC Server

当 Quality 属性显示为 Good 状态时, 变量则上载成功, 变量成功上载标志着 OPC Sever 配置成功, 这时就建立了 OPC 服务器 / 客户端的无缝连接, 实现数据的实时交互。

4 结束语

航空机轮静载荷试验系统是检测飞机机轮静态指标的试验装置, 设计一个能够精确、稳定、可靠地获得飞机机轮的静态力学性能参数的航空机轮径侧向联合载荷试验台, 对于我国的航空工业、国防工业有着重要的意义。

本课题设计的基于 PCC 的航空机轮静载荷试验台控制系统已经成功应用于某型航空机轮静载荷试验测试系统中, 经过长时间的稳定运行和多次试验测试证明: 本课题所设计的航空机轮静载荷试验台控制系统完全满足航空机轮静载荷试验要求。

参考文献

- [1] 陈锐. 航空机轮联合载荷试验计算机测控系统研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2006.
- [2] 徐慧攀, 王典洪. 基于 PCC 的水电站计算机监控系统设计. 电力自动化设备, 2008,26(5):54-56.
- [3] 林国营, 赵继敏. 过程控制系统中基于 PVI 的通信设计. 工业控制计算机, 2007,20(8):24-27.
- [4] 江静, 文生平等. LabVIEW 实现基于 OPC 的 PC 与 PCC 实时通讯. 微计算机信息, 2008,24(8-3):120-122. (责编 岭雾)