

锥齿轮单项误差测量仪器的研制

石照耀, 左序涛, 林 虎

(北京工业大学 机械工程及应用电子技术学院, 北京 100124)

摘 要: 针对现行锥齿轮误差测量中存在的问题, 研制了数控式锥齿轮单项误差测量仪, 实现了对锥齿轮单项误差的高效精密测量. 介绍了仪器的工作原理及构成, 阐述了锥齿轮单项误差的测量与误差的评定方法, 通过对齿距测量和传统的齿圈跳动测量的对比分析, 提出了由齿距偏差计算齿圈跳动的方法, 并给出了相应的数学模型.

关键词: 锥齿轮; 齿轮测量仪器; 齿距误差; 齿圈跳动

中图分类号: TH 711

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2009)09-1163-05

锥齿轮因载荷均匀、传动平稳、振动小、噪声低等特点而在工程中得到广泛应用. 但锥齿轮齿面形状复杂, 齿面数学描述相对困难, 因而锥齿轮误差理论和测量技术远落后于圆柱齿轮. 锥齿轮测量通常分为几何误差的坐标式测量、综合误差的啮合式测量以及整体误差测量^[1]. 描述锥齿轮几何精度的主要指标是齿距偏差与齿面三维拓扑误差. 齿厚偏差被用来控制齿侧间隙. 齿圈跳动因测量简单, 而得到较广泛采用, 但从本质上说它是个代用指标. 由于齿面三维拓扑误差测量属于曲面测量范畴, 测量与评定比较复杂, 通常需要精密型三坐标测量机或专门的齿轮测量中心. 因而, 锥齿轮的单项误差通常仅指齿距偏差、齿圈跳动和齿厚偏差, 而不包括齿面三维拓扑误差.

目前, 国内外测量锥齿轮几何误差的主要手段是齿轮测量中心, 而缺乏专门的单项误差测量仪器. 本文作者研制出数控式锥齿轮单项误差测量仪器, 实现了锥齿轮的单项误差的高效精密测量.

1 仪器工作原理及构成

1.1 仪器的工作原理

锥齿轮单项误差测量仪基于极坐标测量原理. 如图 1 所示, 在运动控制器的控制下, 伺服系统驱动转台主轴, 主轴带动被测齿轮同步回转, 以齿轮回转轴心为极坐标原点, 则测头与齿轮的触测点坐标为 (ρ, θ) . 测量时, 测头进入齿槽至极径为 ρ 处, 测头与齿面接触而触发采样单元记录下圆光栅的计数值 θ , 测量点坐标数据通过 PCI 总线传给上位机, 上位机即可对计数值进行转换和计算得到锥齿轮的误差, 并进行评定和分析^[2].

1.2 仪器的构成

锥齿轮单项误差测量仪^[3-5]由机械系统、CNC 系统、测量与信号处理系统构成, 如图 1 所示.

1.2.1 机械系统

主机属于立式结构, 具有一个回转坐标 θ 和一个径向直线坐标. 回转主轴采用精密密珠轴系^[6], 而径向直线坐标采用精密滚针导轨, 其中, 轴系精度小于 $1.2 \mu\text{m}$, 导轨定位精度为 $1 \mu\text{m}$. 其他机构还包括花岗石床身和直线导轨辅助调偏机构.

收稿日期: 2008-01-18.

基金项目: 国家支撑计划资助项目(2006BAF01B01-03).

作者简介: 石照耀(1964—), 男, 湖南岳阳人, 教授, 博士生导师.

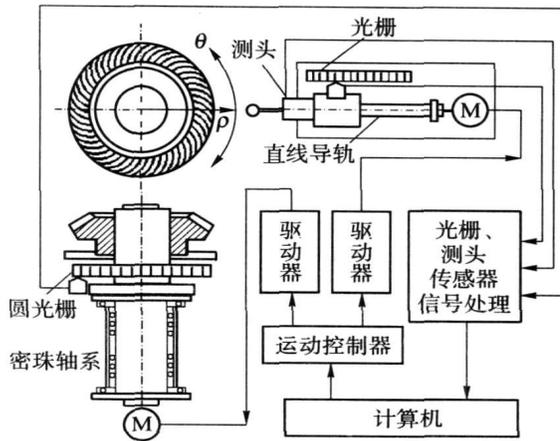


图1 测量仪器结构框架

Fig.1 The configuration chart of the measuring instrument

1.2.2 CNC 系统

CNC 系统选用基于 DSP 的 PMAC2 多轴运动控制器。该控制器内建完善的 PID 控制算法和滤波器，具有纳秒级硬件位置捕捉功能，使得系统控制和数据采样更精确和迅速^[7]。驱动器和交流伺服电机均采用 Panasonic 的产品。

1.2.3 测量与信号处理系统

转角和直线位移测量均采用高精度的 Renishaw 光栅，测头采用 Renishaw 的触发式多维测头。

2 单项误差测量

锥齿轮单项误差测量原理如图 2 所示，测头从锥齿轮齿宽中部位置迅速深入齿间，在分度圆锥面处与齿面接触进行采样，测头进给方向垂直于分锥面。

2.1 齿距偏差测量

根据国标 GB11365—89，在锥齿轮中点分度圆上，实际齿距与公称齿距之差称为齿距偏差；任意两个同侧齿面间的实际弧长与公称弧长之差的最大绝对值称为齿距累积偏差^[8]。

测量齿距偏差原理如图 3 所示，设齿轮沿逆时针方向回转，测头伸入到分度圆附近先接触到左齿面，数据采集系统记录下当前时刻的角度值，然后齿轮顺时针回转，测头接触到下一齿的右齿面，同样记录下这一时刻角度值，测头退出齿槽，齿轮逆时针转动到下一个角度位置，依次测量直到测完所有的齿。

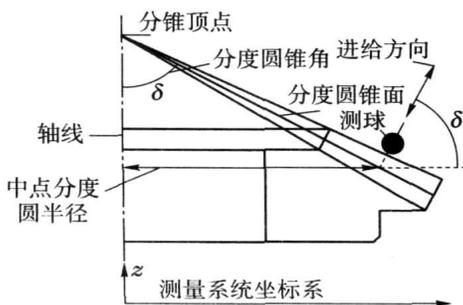


图2 锥齿轮单项误差测量原理

Fig.2 The bevel gear deviations measurement principle

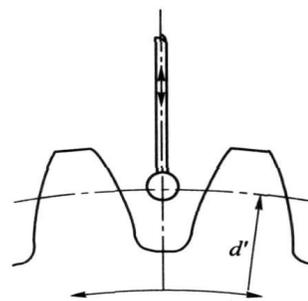


图3 齿距偏差测量原理

Fig.3 The pitch error measurement principle

将所有采得的角度值依照奇偶数及测量的齿序分别保存，通过计算可以得到每个齿相对第一齿的左

右齿面齿距累计偏差, 记为 ΔF_{pi} , i 代表齿序.

齿距偏差为

$$\Delta f_{pti} = \Delta F_{pi} - \Delta F_{p(i-1)} \quad (1)$$

k 个齿齿距累计偏差为

$$\Delta F_{pki} = |\Delta F_{pi} - \Delta F_{p(i-k)}| \quad (2)$$

齿距累积偏差为

$$\Delta F_p = \Delta F_{pimax} - \Delta F_{pimin} \quad (3)$$

2.2 齿圈跳动测量

齿轮一转范围内, 测头在齿槽内与齿面中部双面接触时, 沿分锥法向相对齿轮轴线的最大变动量称为齿圈跳动.

传统的齿圈跳动测量^[9]如图 4(a)所示, 将球形或圆锥形测头依次与齿轮齿槽分度圆处双面接触, 通过计算测量测头相对轴线方向距离最大变化量即可得到 ΔF_r . 图 4(a)中测头触点实际位置不可知, 但测球的球心位置却能得到, 那么齿圈跳动就可以看作是测头球心位置相对轴线的变化.

事实上, 通过齿距测量, 也能获得齿圈跳动的数据. 考察齿距测量过程, 如图 4(b)所示, 可以看到: 齿距偏差测量点的位置等同于相同条件下齿圈跳动测球与齿面接触点的位置. 因此, 通过左右齿面的齿距测量, 可以计算出传统齿圈跳动测量中测球球心位置, 进而可以对齿圈跳动进行评定. 传统的齿圈跳动测量中, 测球的直径随被测齿轮模数和齿数不同而不同, 实践中会发现计算和选择不同尺寸的测头比较繁琐, 常用的目测法选择测头也在一定程度上会给测量带来误差, 而使用本方法则可以改善这一状况.

2.3 由齿距偏差求取齿圈跳动

2.3.1 数学模型

齿距误差测量点虽然唯一表示了触及齿侧的位置, 但是齿面的实际形状偏差并不可知, 事实上, 实际测量接触点几乎不可能准确的处于理想中齿面形状接触点位置上^[10], 为了简化处理, 我们用切平面来代替齿距误差测量点处的齿面. 不同的切面斜率, 传统的齿圈跳动测量中测头在齿槽的深入程度不同, 采样点局部近似效果可以从图 5 看出, 但是这种由于深入程度变化带来的误差对于每个齿的影响是一致的, 也就是说, 这种变换对于齿圈跳动测量结果的影响很小, 那么计算中可以取适当斜率的近似切平面.

假设齿距误差测量点附近的切平面与中点分度圆的径向夹角为 β , 如图 6 所示, 通过已测得的齿距偏差 Δf_{pti} 可以求出齿圈跳动 ΔF_r . 图 6 中 α 为中点分度圆压力角, t_1 、 t_2 为分度圆分别过左右齿面采样点的切线, n_1 、 n_2 为相应采样点处法线, 可以看出, 在图示坐标系中, n_1 、 n_2 交点(即坐标系原点 O)也就是所求的球心, 那么 Y 坐标的变化就代表了齿圈跳动.

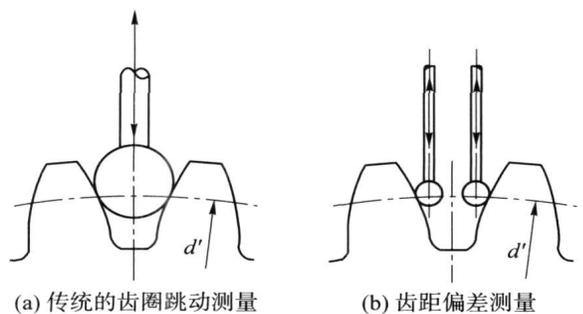


图 4 由齿距偏差测量评定齿圈跳动

Fig. 4 Runout evaluation based on pitch measurement

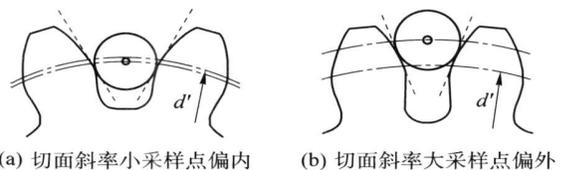


图 5 不同切面斜率下的采样点局部效果

Fig. 5 The sampling point local view of different slope tangent plane

在图6示坐标系中,设测量第*i*齿时,左、右齿在X-Y方向上坐标偏差值分别为 $\Delta x_i^1, \Delta y_i^1, \Delta x_i^2, \Delta y_i^2$ (上标1、2分别表示左、右齿面,下标*i*表示齿序).2.1中已通过 $\Delta x_i^1, \Delta x_i^2$ 计算出齿距偏差 $\Delta f_{pti}^1, \Delta f_{pti}^2$ [11].根据国标GB11365-89,切线 t_1, t_2 的增量分别代表了左、右齿距偏差,那么图6中 n_1, n_2 (啮合线)方向的增量则可以表示为

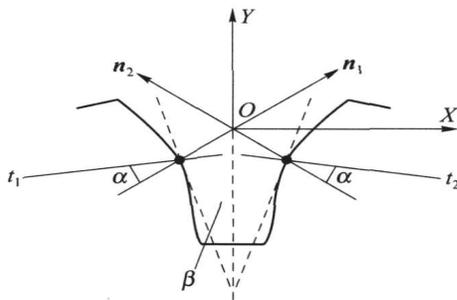


图6 啮合线增量

Fig.6 The increment of meshing line

$$\begin{cases} \Delta n_1 = \Delta f_{pti}^1 \times \cos \alpha \\ \Delta n_2 = \Delta f_{pti}^2 \times \cos \alpha \end{cases} \quad (4)$$

$\Delta n_1, \Delta n_2$ 分别为第*i*齿齿距偏差引起的左、右啮合线增量,那么可得到径向跳动 Δy_i 为

$$\Delta y_i = (\Delta n_1 + \Delta n_2) \sin \beta = (\Delta f_{pti}^1 + \Delta f_{pti}^2) \cos \alpha \sin \beta \quad (5)$$

由定义得到齿圈跳动为

$$\Delta F_r = |\Delta y_{imax} - \Delta y_{imin}|, i = 0, 1, \dots, n-1 \quad (6)$$

实际上, $\Delta y_i^1, \Delta y_i^2$ 值的合成就反映了测头球心的坐标变化 Δy_i ,即

$$\Delta y_i = \Delta y_i^1 + \Delta y_i^2 \quad (7)$$

2.3.2 近似误差

应当指出,用切平面代替实际复杂齿面时,会给计算带来方法误差.对于螺旋锥齿轮而言,传统的齿圈跳动测量点和齿距误差测量点位置差别就比较大,如图7所示,2种方法所用到的采样点在Z坐标位置是不相同的.为了使近似面更真实地反映实际的齿面形状,就需要含有一维、二维甚至多维曲率的标准几何学模型,这给锥齿轮齿距偏差测量条件下评定齿圈跳动带来了新问题.

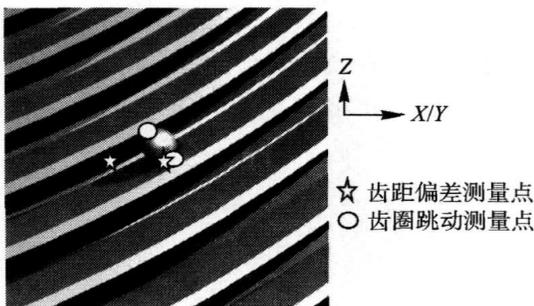


图7 螺旋锥齿轮采样点位置

Fig.7 The sampling point location of spiral bevel gear

3 结束语

研制的数控式锥齿轮单项误差测量仪,机械结构简单,精度稳定,在由回转和直线进给所组成的测量极坐标系中,可实现对锥齿轮单项误差的高效精密测量.通过对比分析锥齿轮齿距误差测量和传统的齿圈跳动测量,建立了由齿距偏差测量数据求取齿圈跳动的数学模型,以实现对齿圈跳动的评定.本仪器也可用于其他齿轮的齿距测量和精密分度测量.

参考文献:

[1] 谢华锟, 王志, 石照耀, 等. 锥齿轮测量技术的最新进展[J]. 工具技术, 2003, 37(10): 48-51.
 XIE Hua-kun, WANG Zhi, SHI Zhao-yao, et al. Development on technology of bevel gear measurement [J]. Tool Engineering, 2003, 37(10): 48-51. (in Chinese)

- [2] SLOCUM A H. Precision machine design[M]. USA: Prentice Hall, Inc, 1992; 15-38.
- [3] 石照耀, 叶勇, 丁毅, 等. CNC 式高准确度滚刀测量机[J]. 仪器仪表学报, 1999, 20(5): 529-531.
SHI Zhao-yao, YE Yong, DING Yi, et al. CNC high precision measuring machine for hobs[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1999, 20(5): 529-531. (in Chinese)
- [4] MOORE W R. Foundations of mechanical accuracy[M]. USA: The Moore Special Tool Company, 1970; 23-56.
- [5] MCKEOWN P A. Some aspects of the design of high precision measuring machine[J]. Quality Assurance, 1975, 1(1): 7-12.
- [6] 李庆祥. 现代精密仪器设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004; 130-132.
- [7] Delta Tan Data System, Inc. Pmac user's manual[M]. USA: Delta Tau Data System, Inc, 2000; 17-18.
- [8] 《机械工程标准手册》编委会. 机械工程标准手册—齿轮传动卷[M]. 北京: 中国标准出版社, 2003; 352-360.
- [9] AGMA. 2009-B01 Bevel gear classification, tolerances, and measuring methods[S]. USA: AGMA, 2001; 1-10.
- [10] GUENTHER A, HOCKEN R. Evaluation of runout deviation at bevel based on pitch measurements[J]. Annals of the CRIP, 2006, 55(1): 539-542.
- [11] 张兆龙. 同时测量左右齿面齿距误差[J]. 计量与测试技术, 1995, 22(2): 10-12.
ZHANG Zhao-long. Measuring the pitch error on both tooth surface at the same time[J]. Metrology & Measurement Technique, 1995, 22(2): 10-12. (in Chinese)

Development of Bevel Gear Deviations Measuring Machine

SHI Zhao-yao, ZUO Xu-tao, LIN Hu

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology,
Beijing 100124, China)

Abstract: To solve problems of current bevel gear measurement, the authors developed a CNC-type bevel gear deviations measuring machine, and achieved high precision and efficient inspection. This paper presents the principle of measurement and the configuration of the machine, expounds the measurement technology and the evaluation of bevel gear individual errors, and proposes the mathematical formula of runout derived from pitch error. The formula is based on the analysis between bevel gear pitch error measurement and traditional runout measurement.

Key words: bevel gear; gear measuring machine; pitch error; gear runout

(责任编辑 刘 潇)