

引用格式:周子硕,李绍滋,赵艳平.高精度齿轮副侧隙自动测量技术研究[J].电光与控制,2019,26(5):100-104. ZHOU Z S, LI S Z, ZHAO Y P. On automatic measurement technology of high-precision gear pair gap[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(5):100-104.

高精度齿轮副侧隙自动测量技术研究

周子硕¹, 李绍滋¹, 赵艳平²

(1. 厦门大学, 福建 厦门 361005; 2. 中国航空工业集团公司洛阳光电设备研究所, 河南 洛阳 471000)

摘要: 齿轮副侧隙是齿轮机械设计和齿轮啮合时的重要参数, 为了提高齿轮副侧隙的测量精度, 解决由于结构所限无法实现两个齿轮上同时安装圆光栅光电码盘作为角度传感器的齿轮副侧隙的测量问题, 提出了一种基于光电角度测量模块的齿轮侧隙自动测量技术, 在主动齿轮上安装微型光电角度测量模块, 从动齿轮上安装光电编码器, 来采集两个齿轮的角度, 并进行数据处理和软件控制, 实现了齿轮副侧隙的自动测量; 给出了影响该自动检测系统的主要误差来源, 进行了误差分析; 最后通过实验给出了一种锥齿轮副侧隙的自动测量结果。

关键词: 齿轮副; 侧隙; 角度测量; 误差分析

中图分类号: O213.2 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.05.020

On Automatic Measurement Technology of High-Precision Gear Pair Gap

ZHOU Zi-shuo¹, LI Shao-zi¹, ZHAO Yan-ping²

(1. Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Luoyang Research Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China)

Abstract: Gear pair gap is an important parameter in gear mechanical design and gear meshing. In order to improve the measurement precision of the gear pair gap and solve the problem that it is impossible to measure the gap of the gear pair which is equipped with a circular grating photoelectric code disk on both gears as an angle sensor due to the limitation of structure, an automatic measuring technique based on the photoelectric angle measurement module is proposed for measuring the gap of the gear pair. To collect the angles of the two gears, a micro-photoelectric angle measurement module is installed on the driving gear and a photoelectric encoder is mounted on the driven gear, and then data processing and software control are performed to realize the automatic measurement of the gear pair gap. The main error sources affecting the automatic detection system are given, and an error analysis is carried out. Finally, the automatic measurement results of the gap of bevel gear pair are given through experiments.

Key words: gear pair; gap; angle measurement; error analysis

0 引言

机载光电瞄准系统一般采用高精度的齿轮传动来实现外框架的方位和俯仰方向的转动, 齿轮副侧隙是齿轮机械设计和装调的重要参数, 直接影响光电瞄准系统传动的平稳性以及整个系统的稳定精度, 齿轮副侧隙过小时, 工作温度升高引起热膨胀变形导致齿轮卡住, 侧隙过大, 会造成控制系统产生抖动和自激现象, 所以齿轮副装调时必须保证合适的侧隙。侧隙在装配过程

中可调整, 圆柱齿轮副通过调整两齿轮的中心距, 锥齿轮副通过调整安装距离来实现侧隙的调整。侧隙调整的依据为侧隙测量结果, 关于侧隙的测量, 文献[1-3]给出了压铅丝法、塞规法、打表法3种传统的侧隙测量方法, 并对这3种侧隙的测量方法进行分析, 传统的测量方法精度较低, 无法满足高精度齿轮副侧隙的测量要求。文献[4]研究了锥齿轮副最佳安装距的测量方法, 在主动齿轮和从动齿轮上安装圆光栅采集两个齿轮的转角位移, 数据采集卡将采集到的脉冲信号发送给上位机进行数据处理, 开发了相应的传动误差测控软件来测试提取出锥齿轮副的最佳安装距, 以及传动误差测量结果, 缺少侧隙的测量技术研究。目前国

收稿日期: 2018-11-14

修回日期: 2019-04-16

作者简介: 周子硕(1997—), 男, 河南洛阳人, 学士, 研究方向为计算机应用技术。

内还没有针对因结构限制无法安装双编码器的齿轮副侧隙的高精度自动测量方面的技术研究。

为了提高齿轮副侧隙的测量精度,解决由于结构所限无法实现两个齿轮上同时安装编码器作为角度传感器的齿轮副侧隙的测量问题,本文研究的方法为:在主动齿轮上安装微型光电角度测量模块,采集主动齿轮的转动角度;在从动齿轮上安装编码器,采集从动齿轮的转动角度。电机控制主动齿轮正反向转动,带动从动齿轮的转动并通过软件计算来实现对齿轮副侧隙的自动测量。

1 齿轮侧隙自动测量原理

1.1 齿轮副侧隙的定义

齿轮副侧隙分为圆周侧隙 j_t 和法向侧隙 j_n ,如图1所示。

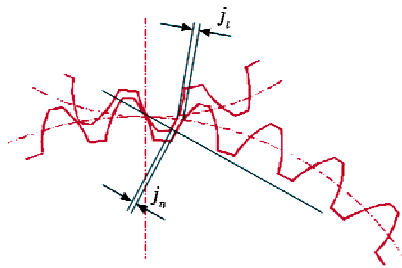


图1 圆周侧隙与法向侧隙

Fig.1 Circumferential backlash and normal backlash

圆周侧隙 j_t 定义为:安装好的齿轮副,当一个齿轮固定时另一个齿轮的圆周晃动量以分度圆弧长计值;法向侧隙 j_n 定义为:安装好的齿轮副,当工作齿面接触时非工作齿面之间的最小距离。

1.2 待测齿轮副结构形式

图2所示为高精度齿轮副的典型结构,该结构为一对轴角90°的锥齿轮,传动比为5,主动齿轮安装到了电机的减速箱输出轴上,主动齿轮上无安装编码器空间和接口,从动齿轮上有安装编码器空间和接口。

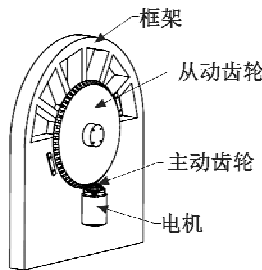


图2 齿轮副结构

Fig.2 Gear pair structure

1.3 待测齿轮副结构形式

该侧隙自动测量系统,主要是针对圆周侧隙 j_t 进行测量。

测量原理:在从动齿轮上安装高精度编码器,反馈从动齿轮的转动角度,在主动齿轮上安装微型光电角度测量模块,反馈主动齿轮的转动角度,电机驱动主动齿轮正向转动一个小角度,再反向转动一个小角度,根据传动比关系,得出从动齿轮滞后主动齿轮的角度值,然后根据分度圆半径得出圆周侧隙的线量值。一对齿轮测量结束后,软件控制电机驱动齿轮转动一齿角度,继续测量下一对齿轮,直到测量完所设置的齿轮对数,以此实现侧隙的自动测量。

主动、从动齿轮相对位移过程的分析^[1]如下所述。

当主动齿轮启动时,带动从动齿轮转动,启动时齿间动作状态如图3所示,其中两条细线代表从动齿轮相邻两齿。

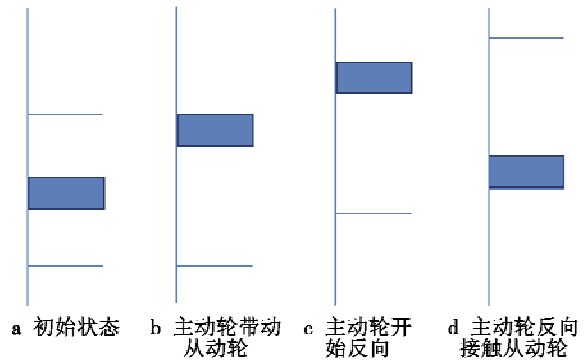


图3 齿轮副动作状态

Fig.3 Action states of gear pair

图3a中,齿轮副处于初始状态;图3b中,处于主动齿轮刚好带动从动齿轮的临界状态;图3c中,处于主动齿轮反向,二者由于惯性继续共同运动,主动轮反向开始的临界状态;图3d为主动轮反向运动,刚好与从动轮接触的临界状态。

齿轮副啮合侧隙时刻分布如图4所示。

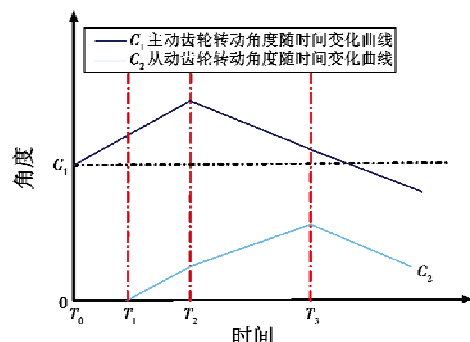


图4 齿轮副啮合侧隙时刻分布图

Fig.4 Time distribution of gear pair meshing clearance

当处于图4中 T_0 时刻(图3a),2个角度传感器都为零位状态,直流电机开始接受启动命令,还未开始带动主动轮齿运动。当电机开始转动,因为侧隙的存在,主动轮开始动作一段时间后,从动轮才开始运动(图4

中 T_1 时刻), 由于运动中惯性的存在, 发出反向命令后, 电机会有一定的惯性运动, 主动轮的惯性运动结束后, 才会开始反向运动, 就会出现图 4 中 T_1 (图 3b) 至 T_2 时刻 (图 3c) 之间的这段曲线, 2 个角度传感器的读值 (即两个齿轮的运动) 都会变大, 当主动轮反向作用开始后, 监控主动轮角度传感器的读值就会减小, 从动轮仍然会沿着一个方向运动 (或停止不动)。随着反向的动作, 电机会带动主动轮再次与从动轮相接触, 达到图 3d 状态, 此时监控从动轮的角度传感器因为反向作用的出现, 读值会变小, 即图 4 中 T_3 时刻, 只需记录在 T_2 时刻和 T_3 时刻之间, 2 个角度传感器的角度变化之和即为齿轮副侧隙的角量值。

角度传感器记录的是转动角度值, 主动轮和从动轮的半径是已知的, 计算可得侧隙的线量值为

$$L = \theta_1 \cdot R_1 + \theta_2 \cdot R_2 \quad (1)$$

式中: θ_1, θ_2 分别为监控主动轮和从动轮的 2 个角度传感器在 2 个时刻各自的角度变化差值; R_1, R_2 分别为主动轮和从动轮的半径值。

2 齿轮侧隙自动测量系统设计

2.1 角度传感器设计

针对图 2 中的一对锥齿轮副的结构形式设计的测量系统如图 5 所示。

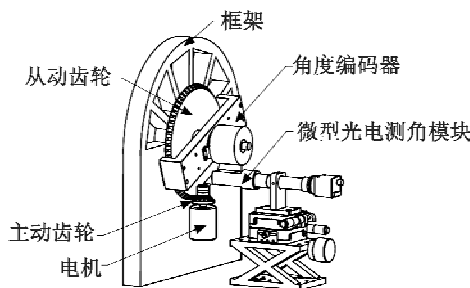


图 5 测试系统图

Fig. 5 Test system diagram

从动齿轮轴上同轴安装高精度角度编码器作为角度传感器, 即通过角度编码器直接测量大齿轮角度变化 θ_2 , 选用分辨率 5" 测试精度 $\pm 15''$ 的绝对式角度编码器。

小齿轮一般尺寸较小无法安装编码器, 设计一种微型光电角度测量模块进行角度测量, 如图 6 所示。

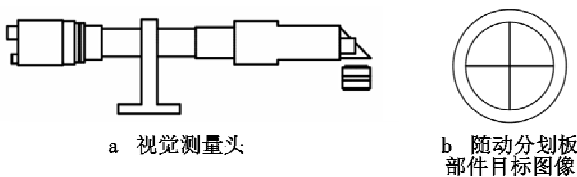


图 6 小齿轮角度变化测量装置图

Fig. 6 Diagram of measuring device for angle change of pinion gear

该微型光电角度测量模块由安装在主动齿轮上的随动分划板部件 (分划板自身可发光, 可随主动齿轮转动) 和与主动齿轮接触的视觉测量头组成 (图 6a)。测试时随动分划板部件随着小齿轮转动, 视觉测量头通过光学系统采集随动分划板部件目标图像 (图 6b), 然后由计算机软件采用目标识别和亚像素细分技术对随动目标图像位置进行高精度解算, 就可以计算出主动齿轮的角度变化量^[5], 系统设计可保证角度分辨率为 20"。

目标图像灰度在一维方向服从高斯分布, 如图 7 所示。目标图像的识别定位根据图像灰度值求得梯度值, 然后根据梯度值进行高斯拟合。

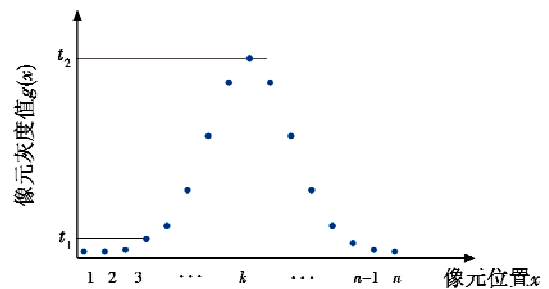


图 7 一维灰度分布

Fig. 7 One-dimensional gray distribution

首先根据如下判断法则剔除无用点。从第 1 个点开始, 依次计算 $t_i = g(x_i + 1) - g(x_i)$ 的值, 若 $t_i < t_o$ (t_o 为设定的阈值), $t_{i+1} > t_o$, 则记下此时的 x_i , 该点即为起始点。

终点判断条件: 若 $t_i > t_o, t_{i+1} < t_o, t_{i+2} > t_o$, 则继续计算后面的点; 若 $t_i > t_o, t_{i+1} < t_o, t_{i+2} < t_o$, 则记下此时的 $x_i + 1$, 即为终点值。

剔除无用点后获得图标一维灰度分布的离散点, 将离散点拟合为一条连续的曲线, 通过曲线求得曲线的对称轴线的坐标。

高斯曲线的表达式为

$$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} \quad (2)$$

式中: y 为目标图像每个像元的灰度值; x 为像元位置; μ 为目标图像中心位置; σ 为目标图像灰度分布的标准偏差。把高斯曲线式 (2) 两边取对数可得

$$\ln y = \ln \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} \quad (3)$$

显然式 (3) 可以改写成 $y = ax^2 + bx + c$ 形式的二次曲线, 其中 3 个系数 a, b, c 的值分别为

$$\begin{cases} a = \frac{d \times e - f \times g}{h \times d - g \times g} \\ b = \frac{f - g \times a}{d} \\ c = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i - a \times \sum_{i=1}^n x_i^2 - b \times \sum_{i=1}^n x_i \right) \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中,未知参数 d, e, f, g, h 的值分别为

$$\begin{cases} d = n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i \\ e = n \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i - \sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i \\ f = n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i \\ g = n \sum_{i=1}^n x_i^3 - \sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n x_i \\ h = n \sum_{i=1}^n x_i^4 - \sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{cases} \quad (5)$$

式(4)和式(5)是对原曲线函数取对数后得到的, y_i 用像元灰度值的对数值代替, x_i 为像元位置坐标。根据最小二乘法计算结果进一步求出 μ 和 σ 分别为

$$\begin{cases} \mu = -b/(2 \times a) \\ \sigma = \sqrt{\frac{-1}{2 \times a}} \end{cases} \quad (6)$$

式中, μ 值即为目标图像的亚像素细分位置。利用 μ , 采用直线最小二乘法计算公式计算出随动部件目标直线斜率 k_i , 利用 k_i 变化即可计算出齿轮所转动的角度 θ_1 , 如图8所示。

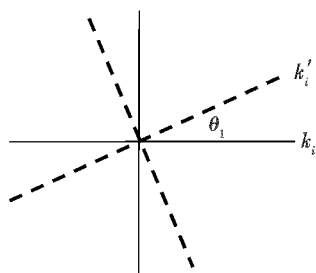


图8 利用目标直线斜率变化计算齿轮转动角度

Fig. 8 Calculation of gear rotation angle by changing the slope of the target line

2.2 主动齿轮控制设计

如1.3节中主动、从动齿轮相对位移过程分析所述,测试中需要驱动主动齿轮进行正反向转动,带动从动齿轮进行正反向转动以进行圆周侧隙的测量,本文采用电机控制主动齿轮进行正反向转动。

2.2.1 测量控制流程

测量开始后,电机控制主动齿轮首先转动,微型光电测角模块通过随动模块监控主动齿轮和从动齿轮上的绝对编码器监控从动齿轮的绝对运动,二者都将数据传递给测试系统。当从动齿轮的绝对编码器发生角度变化时,测试系统驱动电机使主动齿轮开始反向转动,同时,系统开始记录微型光电测角模块角度量和从动齿轮上的绝对编码器的角度值。主动齿轮继续运动,当从动齿轮绝对编码器角度值发生转折时,即侧隙

走完时,从动齿轮也开始反方向转动的瞬间结束角度记录,分别计算微型光电测角模块和编码器的首尾角度差异,即可得到当前测试齿轮副的侧隙。

2.2.2 电机闭环控制

测试过程中,齿轮的往复运动和全程的分段运动控制,需要采用闭环的位置控制模式。选用智能直流电机驱动控制器,兼容驱动电压在10~50V之间功率小于200W的有刷或者是无刷直流电机,在功能上可实现位置工作模式。使用上位机对各路传感器数据进行处理,并通过上位机实现测试过程的自动化控制,驱动控制器支持RS232通讯协议下的二次开发,可对控制进行编写,建立参数,通过参数导入进行不同电机的控制切换。

2.3 测量软件设计

从实际测试过程要求出发,软件设计的功能包括齿轮电机运动控制、主动齿轮角度传感器图像显示、测量过程设置、测量结果显示等几个部分:

1) 齿轮电机运动控制是对测试过程中齿轮旋转速度、旋转位置的控制;

2) 主动齿轮角度传感器图像显示是为了方便主动齿轮角度传感器的对准;

3) 测量过程设置中可输入当前被测试齿轮副的基本参数,如齿数、减速比、齿轮直径等,还可以设定本次测量的齿数,方便不同类型产品的测试;

4) 测量结果显示本次测量齿数完成后的所有结果,结果可保存和删除,同时呈现测量结果的最大值和最小值。

3 误差分析

在齿轮副侧隙测量中,该系统采用同时精确测量主动和从动两个齿轮的角度运动差异来计算其相对运动线量差异,从而得到侧隙值。因此,测试系统误差取决于对每个齿轮转动角度的精确测量和两个角度测试单元的同步误差。

3.1 角度传感器精度

该测试系统有角度编码器和微型光电测角模块两种测角系统。角度编码器属于成熟的测试产品,精度优于15";微型光电测角模块采集主动齿轮上的随动目标转动图像,由计算机程序对目标图像进行图像识别,然后采用亚像素细分获取高精度的目标角度位置,由此计算出主动齿轮转动的角度量,模块精度可以达到20"。

3.2 误差分析

3.2.1 角度测量误差

从1.3节测量原理中的分析可知,侧隙测量误差取决于2个采值测量时刻的角度测量差值,即

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (7)$$

式中: σ_1 为微型光电测角模块的线量误差; σ_2 为角度编码器测量的线量误差。这两个线量误差算式为 $\sigma = \delta R$, 即误差等于测角设备精度误差与被测齿轮半径的乘积。

3.2.2 同步误差

齿轮副侧隙的测量主要是通过侧隙运动范围内主副齿轮的角度传感器读值来反馈计算的。同步性需要保证的是 2 个角度传感器采值的间隔和响应速率, 只有二者同时采值才可以实现精确的侧隙测量。实际工作中编码器采值的同时触发微型光电测角模块采值, 微型光电测角模块的硬件曝光响应为 2 ms, 电机在此时间段内驱动主动齿轮转过的角度对结果的影响, 即

为同步角度误差。

根据所选取电机转速计算得到 2 ms 同步角度误差为 40.3"。同步误差 $\sigma_3 = \theta R_{\text{主动}}$, 即为 2 ms 时间主动齿轮转过的角度 θ 与主动齿轮半径 $R_{\text{主动}}$ 的乘积。

综上所述, 根据系统误差综合公式, 该系统误差为

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2} \quad (8)$$

当设定主动齿轮直径为 33 mm, 从动齿轮直径为 165 mm 时, 系统误差的最终结果为 4.1 μm 。

4 实验验证

利用该测量系统对上述的一对锥齿轮副不同的 10 个齿的侧隙进行 10 次测量, 测试数据如表 1 所示。

表 1 实验测试数据

Table 1 Experimental test data

被测齿编号	测试数据/ μm										最大测量偏差/ μm
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	274	272	272	273	270	269	269	271	270	271	5
2	239	238	238	238	237	238	236	239	237	237	3
3	227	227	229	228	229	228	227	229	229	227	2
4	217	217	216	217	217	215	215	216	216	215	2
5	251	251	250	249	249	249	248	248	250	250	3
6	211	212	211	210	208	210	208	209	211	210	4
7	234	233	233	234	234	234	233	234	233	233	1
8	244	246	245	244	245	244	243	246	245	246	3
9	244	242	243	243	244	244	243	242	244	244	2
10	242	240	241	241	240	241	241	240	241	242	2

从测试数据可以看出, 采用此侧隙测量系统可实现微米级的测量精度, 测量重复性很好, 10 组数据最大偏差为 5 μm , 且可以实现连续的自动测量, 测试效率高。

5 结论

基于光电角度测量模块的齿轮副侧隙自动测量技术, 在主动齿轮上安装微型光电角度测量模块, 从动齿轮上安装编码器, 采集两齿轮的角度, 并进行软件控制、数据处理, 实现了侧隙的自动测量。给出了影响该测量系统的主要误差来源, 进行了误差分析, 最后通过试验验证了测量系统可实现微米级的测量, 测量重复精度不大于 5 μm , 且可实现连续的自动测量, 测试效率高。

参 考 文 献

- [1] 李玉芬, 施兆伟, 王永明. 工作台齿圈齿轮啮合侧隙检测和调试技术的研究和应用[J]. 机械设计, 2011, 28(11): 46-47.
- [2] 常国强, 高勇. 齿轮啮合间隙测量方法探讨[J]. 计量与测试技术, 2011, 38(6): 38-39.
- [3] 姜丽, 梁秀霞, 张强, 等. 行星减速机的反向间隙的测量方法研究[J]. 自动化技术与应用, 2014, 33(8): 125-127, 131.
- [4] 汤洁, 王冰鹤, 石照耀. 安装距可调的锥齿轮副传动误差测量[J]. 光学精密工程, 2016, 24(6): 1335-1344.
- [5] 尚雅层, 陈静, 田军委. 高斯拟合亚像素边缘检测算法[J]. 计算机应用, 2011, 31(1): 179-181.