



电光与控制
Electronics Optics & Control
ISSN 1671-637X, CN 41-1227/TN

《电光与控制》网络首发论文

题目： 高精度齿轮副侧隙自动测量技术研究
作者： 周子硕，李绍滋，赵艳平
网络首发日期： 2019-01-17
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/OL]. 电光与控制. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1227.tn.20190116.1633.002.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

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, 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, 本文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, 来采集两齿轮的角度, 并进行数据处理, 软件控制, 实现了齿轮副侧隙的自动测量。并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; 最后通过试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

Research 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 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 gap of the gear pair which is equipped with a circular grating photoelectric code disk simultaneously 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 gear pair in this paper. To collect the angles of the two gears, the micro-photoelectric angle measurement module is installed on the driving gear and the photoelectric encoder is mounted on the driven gear, and while 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 the error analysis is carried out. Finally, the automatic measurement

results of the gap of bevel gear pair are given through experiments.

Keywords: 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，齿轮副的侧隙是齿轮机械设计和装调的重要参数^[1]，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，齿轮副侧隙过小则工作温度升高引起热膨胀变形导致齿轮卡住，侧隙过大时就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[2-4]中作者根据工作实际经验，给出了3种传统的侧隙测量方法，有压铅丝法、塞规法、打表法，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^[5]。文献[6]中作者研究了锥齿轮副最佳安装距的测量方法，测控系统组成为：在主动齿轮和从动齿轮上安装圆光栅采集两齿轮的转角位移，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。目前国内还没有针对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，本文提出了一种基于光电角度测量模块的侧隙自动测量技术，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，来采集两齿轮的转动角度，并进行数据处理，软件控制，实现了齿轮副侧隙的自动测量。并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；最后通过试验给出了一种锥齿轮副侧隙的自动测量结果。

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。

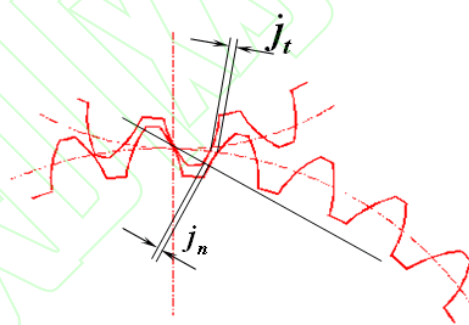


图1 圆周侧隙与法向侧隙

Fig.1 Circumferential backlash and normal backlash

其中，圆周侧隙 j_t ：安装好的齿轮副，当一个齿轮固定，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 ：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

高精度齿轮副的典型结构形式如图2所示。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。

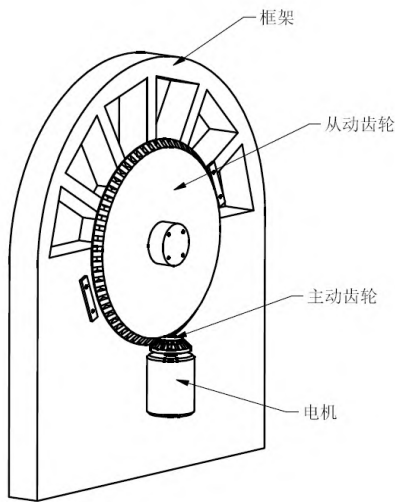


图 2 齿轮副结构

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；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，然后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结束，以此实现侧隙的自动测量。

主动、从动齿轮相对位移过程分析^[1]如下：

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。1) 中齿轮副处于初始状态；2) 中处于主动齿轮刚好带动从动齿轮的临界状态；3) 中处于主动齿轮反向，二者由于惯性共同继续运动，

主动轮反向开始的临界状态；4) 主动轮反向运动，刚好与从动轮接触的临界状态。

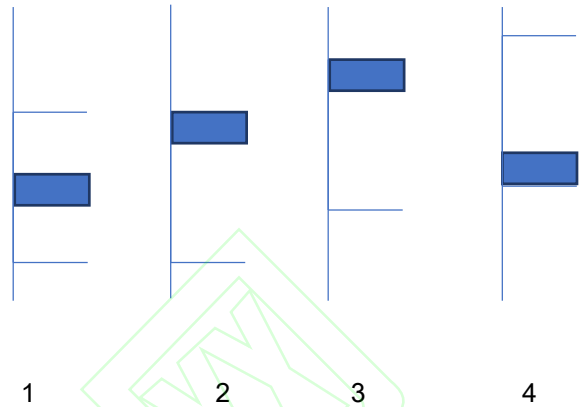


图 3 齿轮副动作状态

Fig.3 Gear pair action state

根据齿轮副的动作状态，结合两个监控齿轮运动的角度传感器就可以对齿轮副的运动进行准确的测量。图 3 中（1）所示处于图 4 中齿轮副啮合侧隙时刻分布图中 T_0 时刻，两个角度传感器都处于清零状态，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，电机会有有一定的惯性运动，当主动轮的惯性运动结束后，才会开始反向运动，就会使得出现图 4 中 T_1 （图 3 中状态（2））至 T_2 时刻（图 3 中状态（3））之间的这段曲线，两个角度传感器的读值（也就是两个齿轮的运动）都会变大，当主动轮反向作用开始后，监控主动轮的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（或者停止不动）。随着反向的动作，电机带着主动轮再次和从动轮相接触，达到图 3 中（4）的状态，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，也就是图 4 中 T_3 时刻。我们只需记录在 T_2 时刻和 T_3 时刻之间，两个角度传感器的角度变化之和即为齿轮副侧隙的角量值。

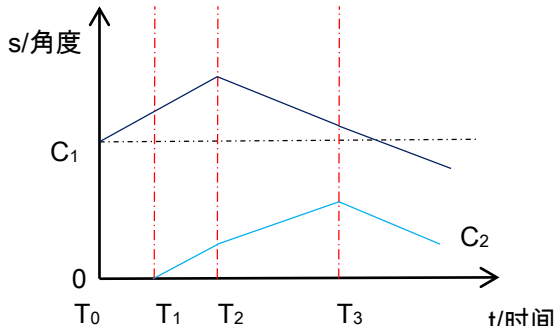


图 4 齿轮副啮合侧隙时刻分布图

Fig.4 Profile of gear pair meshing clearance time distribution

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，按下面公式计算即可得到侧隙的线量值。

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

式中， θ_1 、 θ_2 为监控主动轮和从动轮的两个角度传感器在两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。

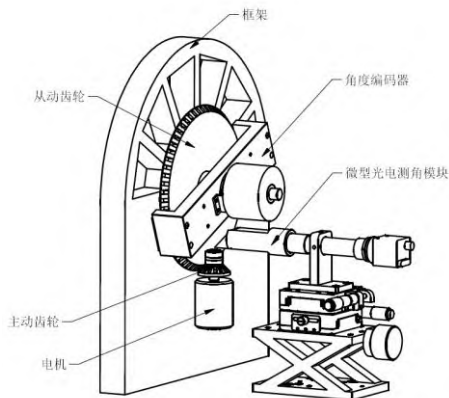


图 5 测试系统图

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的角度变化 θ_2 。选用 18 位分辨率 5s，角度测试精度 $\pm 15s$ 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，我们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，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）和不与主动齿轮接触的视觉测量头组成（图 6 (a)）。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 6 (b)），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"。

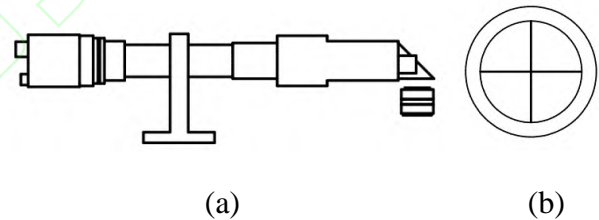


图 6 小齿轮角度变化测量装置图

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

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导得到梯度值，然后根据梯度值进行高斯拟合。

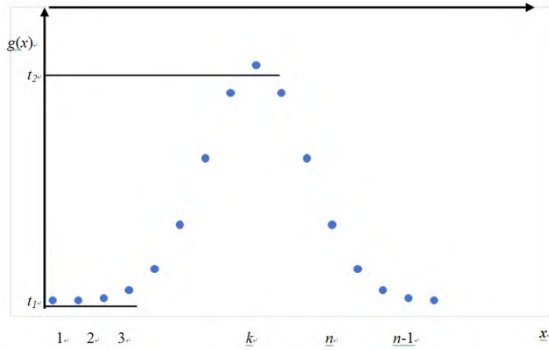


图 7 一维灰度分布

Fig.7 One-dimensional gray distribution

首先根据如下判断法则剔除无用点。从第一个点开始，依次计算 $t_i=g(x_{i+1})-g(x_i)$ 的值，若 $t_i < t_e$ (t_e 是自己定的一个阈值)， $t_{i+1} > t_e$ ，则记下此时的 x_i ，该点即为起始点；

1) 若 $t_i > t_e, t_{i+1} < t_e, t_{i+2} > t_e$ ，则继续计算后面的点；

2) 若 $t_i > t_e, t_{i+1} < t_e, t_{i+2} < t_e$ ，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，通过曲线来求曲线的对称轴线的坐标。

高斯曲线的表达式为

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

把高斯曲线两边取对数得到

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

上式是一条 $y=ax^2+bx+c$ 的二次曲线，利用最小二乘法原理求参数 a, b, c 。得到

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

其中：

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

上述公式是对原曲线函数取对数后得到的， y_i 用对数值代替，根据最小二乘法计算结果进一步求出 μ 和 σ

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

μ 值即为目标图像的亚像素细分位置。利用目标图像的亚像素细分位置，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 ，根据利用直线斜率变化就可以计算出齿轮所转动的角度 θ_i (如图 8)。

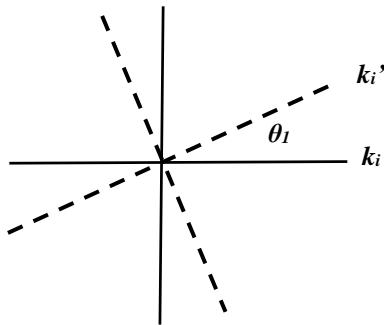


图 8 利用目标直线斜率变化计算齿轮转动角度

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。我们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,当从动轮绝对编码器角度值发生转折时,也就是侧隙走完时,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,即可计算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,因此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,

在功能上可以实现位置工作模式。

测试中,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,可以对控制进行编写,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。

齿轮电机运动控制功能是对测试过程中齿轮旋转速度、旋转位置的控制;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;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;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他们的相对运动线量差异,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,采集在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,这种测试模块的精度可以达到 $20''$ 。

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两个采值测量时刻角度测量差值。

$$\sigma = \left(\sigma_{\text{微型光电测角模块}}^2 + \sigma_{\text{角度编码器}}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

其中， $\sigma_{\text{微型光电测角模块}}$ 是微型光电测角模块的线量误差， $\sigma_{\text{角度编码器}}$ 是角度编码器测量的线量误差，这两个线量误差计算公式为 $\sigma = \delta \cdot R$ ，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两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 2ms，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 2ms 同步角度误差为 40.3"。同步误差 $\sigma_{\text{同步误差}} = \theta_{2\text{ms}} R_{\text{主动}}$ ，即为 2ms 时间主动齿轮转过的角度与主动齿轮半径的乘积。

综合上述分析根据系统误差综合公式，该系统误差按如下公式计算得到。

$$\sigma = \left(\sigma_{\text{微型光电测角模块}}^2 + \sigma_{\text{角度编码器}}^2 + \sigma_{\text{同步误差}}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

当设定主动齿轮直径为 33mm，从动齿轮直径为 165mm 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，我们对上述的一对锥齿轮副的侧隙进行了十次测量。主动齿轮直径为 33mm，从动齿轮直径为 165mm。测试数据如表 1 所示。

表 1 实验测试数据

Tab.1 Experimental test data

序号	测试数据 (μm)										最大测量偏差 (μm)
	1 次	2 次	3 次	4 次	5 次	6 次	7 次	8 次	9 次	10 次	
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

从测量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，且测量重复性很好，十组数据最大偏差为 $5\mu\text{m}$ 。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，来采集两齿轮的角度，并进行软件控制，数据处理，实现了侧隙的自动测量。并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 $5\mu\text{m}$ ，且可以实现连续的自动测量，测试效率高。

参考文献

- [1] 唐进元, 刘欣, 戴进基于 ANSYS/LS-DYNA 的齿轮传动线外啮合冲击研究[J]. 振动与冲击, 2007.26 (9), 40-44.
- [2] 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 (11), 46-47.
- [3] 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.
- [4] 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. 22 (8), 125-131.
- [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, 2011.1 (31), 179-181.
- [6] 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 2016.6 (24), 1335-1342.