

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2312129

齿轮线激光三维测量仪的研制*

石照耀, 李美川, 孙衍强, 于 渤

(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:快速获取齿轮全部齿面的三维误差信息,是表征复杂齿面质量的关键和前提。本文基于激光三角测量原理,建立了齿轮线激光三维测量模型,研制出齿轮线激光三维测量仪,可用于生产现场快速获取被测齿轮的三维齿面误差信息并进行质量评定。仪器采用立式结构,主要由基座、精密主轴、圆光栅传感器、控制系统、软件系统等部分组成。精密主轴采用密珠轴系实现高精度回转,保证了被测齿轮的高精度定位与回转。在精密主轴周向布置两个高精度线激光传感器,并根据被测齿轮参数调整其位姿状态;圆光栅实时获取精密主轴的回转角度,并触发采集器实时采集并记录被测齿轮左右齿面的几何信息。开发了齿轮线激光三维测量与评价软件,可实现齿轮齿廓偏差、齿距偏差、拓扑偏差等项目的测量与评定,能够满足 5 级精度齿轮的检测要求。

关键词: 齿轮; 齿轮测量; 齿轮测量仪器; 线激光传感器; 线激光测量

中图分类号: TH71 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460. 40

Development of three-dimensional gear measuring instrument with line laser

Shi Zhaoyao, Li Meichuan, Sun Yanqiang, Yu Bo

(Beijing Engineering Research Center of Precision Measurement Technology and Instruments,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Rapidly obtaining the three-dimensional error information for all tooth surfaces of gears is the key and prerequisite for characterizing the quality of complex tooth surfaces. In this paper, based on the principle of laser triangulation, a three-dimensional measurement model with line laser is established for the gear, and the developed measuring instrument can be used to quickly obtain the error information of three-dimensional tooth surface and evaluate the quality of gear. The instrument adopts the vertical structure consisting of base, precision spindle, circular grating sensor, control system and software system, etc. The precision spindle adopts the dense bead shaft system to achieve high-precision rotation, which ensures the high-precision positioning and rotation of measured gear. Two high-precision line laser sensors are arranged in the circumferential direction of the precision spindle, and the positional state is adjusted according to the parameters of measured gear. Specifically, the rotation angle of precision spindle is acquired by the circular grating in real time, and the geometrical information of gears' left and right flanks is collected and recorded by the collector in real time. In conclusion the three-dimensional measurement and evaluation software for the gear has been developed, which can realize the measurement and evaluation of gear's tooth profile deviation, pitch deviation, topological deviation etc., and meet the detection requirements of grade 5 precision gear.

Keywords: gear; gear measurement; gear measurement instruments; line laser sensor; line laser measurement

0 引 言

齿轮是工业领域中应用最广泛的基础零件,其质量

直接影响主机的性能与寿命。齿轮的齿面质量检测是评估和控制齿轮质量的基本方式^[1]。目前,齿轮检测常采用齿轮测量中心(gear measuring center, GMC)或坐标测量机(coordinate measuring machine, CMM)来测量齿面少

量点/线信息并进行二维评价。但随着齿轮使用性能要求的不断提升,齿轮齿面三维修形越来越普遍,以齿面上少量的点/线测量为主的齿面质量检测,难以反映整个齿面的真实质量情况^[2]。

近年来,光学测量技术得到发展,在齿轮测量领域的应用优势逐渐显现,诸如激光三角测量、激光全息、工业CT等,使得获取具有复杂修形形状的三维拓扑误差成为可能^[3-7]。特别是,线激光测量作为一种典型激光三角测量方法^[8],在测量精度与测量效率上具有综合优势。目前,基于线激光的齿轮三维测量方案主要有两种:一种是在现有齿轮测量中心上增加线激光传感器,通过特定的安装机构实现线激光传感器测头与接触式测头的切换,譬如 Gleason 推出的 300GMSL 多传感器齿轮检测系统^[4];但该系统需要接触式测头进行初始定位。另一种是采用单回转轴系,周向布置多个线激光传感器的方式,对被测齿轮进行三维扫描测量,譬如 HEXAGON 开发了齿轮 3D 在线测量系统^[5]。

自 2015 年起,笔者团队与国外同步开展了齿轮线激光三维测量技术的全面研究^[9-16]。采用单回转轴系方案,研制出齿轮线激光三维测量仪,实现 5 级精度齿轮的齿廓偏差、齿距偏差、拓扑偏差等项目的测量与评价。

1 测量原理

如图 1 所示采用广义极坐标测量法^[17],线激光传感器偏离轴平面一定的距离 a_0 ,被测齿轮随仪器主轴回转,传感器获取齿面几何信息,经过坐标系变换将获取的激光测线数据变换为齿轮齿面数据,并与齿轮齿面理论数据进行比较,从而获得齿面误差。

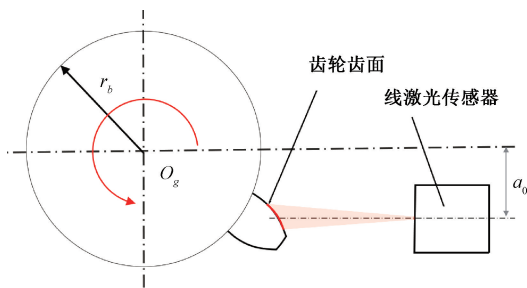


图 1 广义极坐标测量法

Fig. 1 Generalized measurement method of polar coordinate

建立如图 2 所示的坐标系:仪器坐标系 $\sigma_0 = [O_0; x_0, y_0, z_0]$, 齿轮坐标系 $\sigma_g = [O_g; x_g, y_g, z_g]$, 测量光线坐标系 $\sigma_l = [O_l; x_l, y_l, z_l]$, 传感器坐标系 $\sigma_s = [O_s; x_s, y_s, z_s]$ 。线激光传感器通过安装座与仪器固定连接,仪器坐标系 σ_0 和传感器坐标系 σ_s 均为固定坐标系;齿轮通过装夹机构与仪器主轴固连并随之回转,齿轮坐标系 σ_g 为

动坐标系。其中齿轮坐标系的 z_g 轴与齿轮轴线重合,机器坐标系的 z_0 轴与齿轮坐标系的 z_g 轴重合;传感器坐标系的原点 O_s 位于出射激光线的中心位置,平面 $X_s O_s Y_s$ 与激光出射光平面共面。

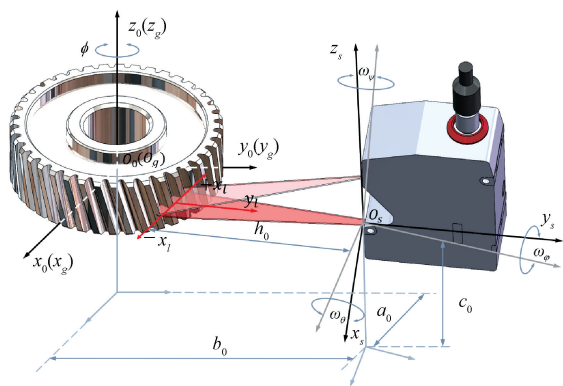


图 2 齿轮线激光三维测量模型

Fig. 2 Three-dimensional gear measurement model

在测量光线坐标系 σ_l 下,线激光传感器获取的齿面信息为 D_l , 可表示为:

$$D_l = [x_l, y_l, 0, 1]^T \quad (1)$$

根据测量光线坐标系 σ_l 与传感器坐标系 σ_s 的空间关系,建立转换矩阵 M_l^s 和平移矩阵 T_l^s ,上述齿面信息 D_l 转换至传感器坐标系 σ_s 下,齿面信息变换为 D_s , 可表示为:

$$D_s = M_l^s \cdot D_l + T_l^s \quad (2)$$

其中,

$$D_s = [x_s, y_s, z_s, 1]^T$$

$$M_l^s = \begin{bmatrix} k_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_l^s = (0, -h_0, 0, 0)^T$$

其中, k_s 为线激光传感器的安装参数,取值为 +1 或 -1 (正 / 反安装); h_0 线激光传感器的基准距离。

根据传感器坐标系 σ_s 与仪器坐标系 σ_0 之间的空间关系,建立转换矩阵 M_s^0 和平移矩阵 T_s^0 ,将上述齿面信息 D_s 转换至仪器坐标系 σ_0 下,齿面信息变换为 D_0 , 可表示为:

$$D_0 = M_s^0 \cdot D_s + T_s^0 \quad (3)$$

其中,

$$D_0 = [x_0, y_0, z_0, 1]^T$$

$$M_s^0 =$$

$$\begin{bmatrix} C_\psi C_\varphi - S_\psi S_\theta S_\varphi & -S_\psi C_\theta & C_\psi S_\varphi + S_\psi S_\theta C_\varphi & 0 \\ S_\psi C_\varphi + C_\psi S_\theta S_\varphi & C_\psi C_\theta & S_\psi S_\varphi - C_\psi S_\theta C_\varphi & 0 \\ -C_\theta S_\varphi & S_\theta & C_\theta C_\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T}_s^0 = (a_0, b_0, c_0, 0)^T$$

其中,下标 ψ 、 θ 、 φ 分别表示图2中线激光传感器的空间姿态角 ω_ψ 、 ω_θ 、 ω_φ ;C、S分别表示 $\cos(\cdot)$ 、 $\sin(\cdot)$,如 $S_\psi C_\varphi = \sin(\omega_\psi) \cos(\omega_\varphi)$; a_0 、 b_0 、 c_0 分别为线激光传感器相对被测齿轮切向、径向、轴向的偏置距离。

以上6个自由度参数^[18]确定了线激光传感器在仪器坐标系下的空间位姿。

被测齿轮随着仪器主轴回转,设回转角度为 ϕ ,建立转换矩阵 $\mathbf{M}_0^g$,将上述齿面信息 $\mathbf{D}_0$ 转换到齿轮坐标系 σ_g 下,可表示为:

$$\mathbf{D}_g = \mathbf{M}_0^g \cdot \mathbf{D}_0 \quad (4)$$

其中,

$$\mathbf{D}_g = [x_g, y_g, z_g, 1]^T$$

$$\mathbf{M}_0^g = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

转换矩阵 $\mathbf{M}_0^g$ 是仪器主轴回转角度 ϕ 为参数的旋转矩阵。

可以得出:

$$\mathbf{D}_g = \mathbf{M}_0^g \cdot \{ \mathbf{M}_s^0 \cdot (\mathbf{M}_l^s \cdot \mathbf{D}_l + \mathbf{T}_l^s) + \mathbf{T}_s^0 \} \quad (5)$$

至此,由激光测线坐标系齿面信息 $\mathbf{D}_l$ 可以获取被测齿轮齿面的三维点云信息。

2 仪器工作原理

本仪器采用立式结构,其结构如图3所示。被测齿轮安装在主轴上,在齿轮周向对称布置2个线激光传感器,连接到仪器的安装平板上,调整线激光传感器与被测齿轮的相对位置及空间姿态,确保主轴一次回转测量可同时分别获取被测齿轮左、右2个齿面信息。齿轮测量前先采用特征标件对本仪器进行系统标定,以确定两个传感器的在仪器坐标系下各自的6个自由度参数(ω_ψ 、 ω_θ 、 ω_φ 、 a_0 、 b_0 、 c_0),从而实现上一节描述的齿面信息坐标系间的转换。计算机通过控制交流伺服电机按设定速度回转,圆光栅获取精密主轴的回转角度信号并经由采集器同步触发线激光传感器实时扫描并记录被测齿轮的齿面数据。此时,计算机同步采集被测齿轮的回转角度信号和线激光传感器获取到的齿面几何信息数据,根据齿轮线激光三维测量原理,可实现被测齿轮的三维齿面重构,并进行三维齿面误差的分析与评价。

3 仪器的结构设计

3.1 仪器总体结构设计

仪器总体设计综合考虑精度、经济性、可靠性、寿命

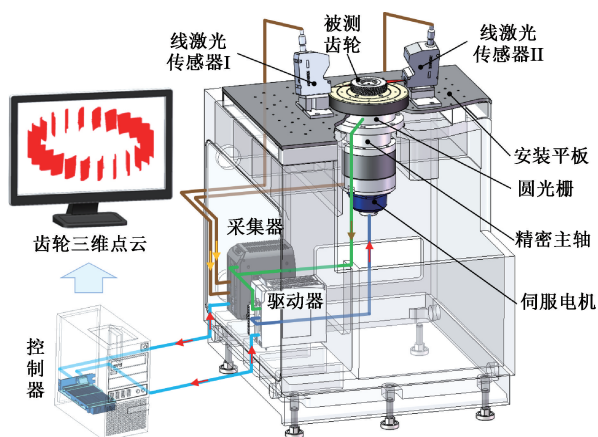


图3 仪器工作原理

Fig. 3 The working principle of instrument

和造型等因素^[19],如图4所示,主机采用立式结构,包括基座、精密主轴、被测齿轮、安装平板、线激光传感器、计算机控制系统、操作面板等。

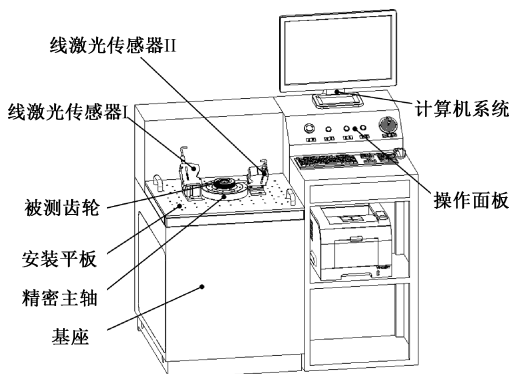


图4 仪器主机结构

Fig. 4 The structure of instrument

基座采用铸铁材料,具有较高的强度、刚度,良好的机加工性、耐磨性及耐候性,生产成本低。精密主轴采用高精度密珠轴系,在一定载荷下具有稳定的回转精度和刚度,结构简单、调试方便、无卡滞。安装平板采用螺纹孔板结构,透气性好减少热变形,增强稳定性,方便了线激光传感器安装位置的调整;本结构采用整体式快换结构,可以实现特定空间位姿的线激光传感器整体快捷更换,方便仪器工装结构调整,满足多类型齿轮现场快速检测的需求。

3.2 精密主轴

回转主轴是测量仪器的关键部件,其设计合理与否直接影响测量仪器的工作质量、测量精度等性能。

如图5所示,精密主轴采用密珠轴系结构,主要包括定位芯轴、花盘、圆光栅传感器、主轴、平面密珠结构、无框交流伺服电机。密珠轴系由主轴7、轴套8以及密集于

两者之间的具有过盈配合的滚珠5组成。滚珠安放于保持架6中,其中,主轴7、轴套8的圆度小于 $0.3\text{ }\mu\text{m}$,滚珠采用“00级”钢球。由于滚珠的过盈配合和在保持架中均匀密集的分佈,使主轴径向回转精度达到 $1.0\text{ }\mu\text{m}$ 。平面密珠9安放于轴套上、下端面处,通过压紧螺母11经轴向压环12调整轴向预紧力,调节平面滚珠的过盈量,使主轴端面回转精度也达到 $1.0\text{ }\mu\text{m}$ 。圆光栅盘3紧固在主轴上,利用基准轴肩进行圆光栅轴向定位,采用双读数头4结构以消除光栅盘安装偏心带来的测角误差。采用无框交流伺服电机10直接驱动主轴回转,电机外框通过压套结构固定连接在外套13中。

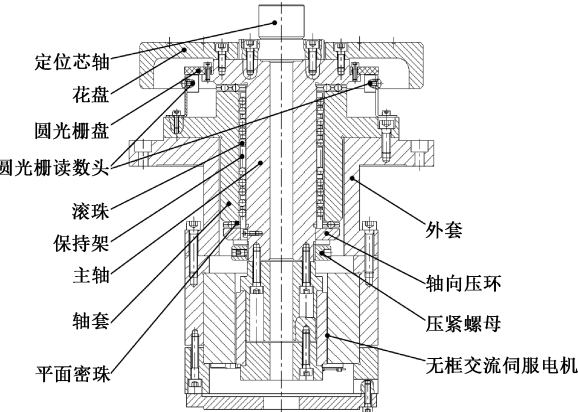


图5 精密主轴结构

Fig. 5 Precision spindle structure

3.3 齿轮装夹机构

如图6所示,齿轮的装夹机构采用滚珠衬套保持架定位方式。被测圆柱齿轮1安装在定位芯轴2上,滚珠4安放于衬套支架3中,压紧螺钉5保证了齿轮端面与定位芯轴轴肩的良好配合,具有过盈配合的滚珠提高了定位芯轴与被测齿轮间的定心性。

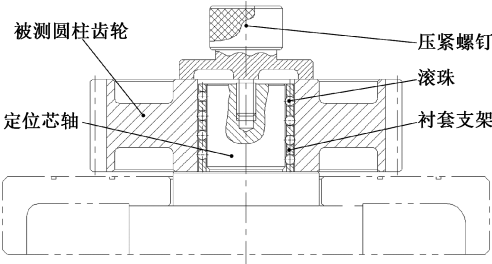


图6 齿轮装夹机构

Fig. 6 Clamping device for gear

4 测控与软件系统

4.1 测控系统设计

如图7所示,测量过程中,计算机通过运动控制卡

发送指令给伺服驱动器,控制伺服电机带动仪器主轴回转。圆光栅传感器实时获取仪器主轴的回转角度信号,一路信号返回伺服驱动器用于伺服电机的闭环控制;一路信号连接到线激光传感器采集卡,作为外部信号触发源同步触发传感器采集并记录被测齿轮齿面数据。

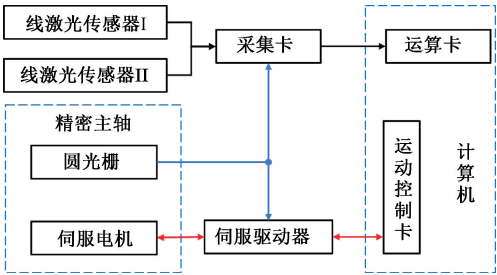


图7 测控系统框图

Fig. 7 Block diagram of measurement and control system

圆光栅传感器采用等角度采样,使得仪器主轴回转空间域的采样间隔是均匀的。该系统与主轴转速无关,无论系统主轴的速度稳定性如何都能获得均匀的空间采样。

4.2 软件系统设计

软件系统包括参数输入、标定、测量、评价、打印和退出等功能,可满足不同参数齿轮的快速测量与评价,界面环境友好,操作便捷。

输入或导入齿轮的基本参数,并计算齿轮几何参数以及评价参数,包括起测/终测圆直径、起评/终评圆直径等;然后,进行系统标定,确定2个线激光传感器在仪器坐标系下各自的6个自由度参数^[11];设定转台参数并选择测量模式后,启动测量,线激光传感器采集到的齿面轮廓实时显示在测量界面中,如图8所示;测量结束后系统进入评价模块,可评价被测齿轮的齿廓偏差、齿距偏差、拓扑偏差等项目;根据需求打印测量与评价报表,完成一次齿轮的线激光三维测量与评价。

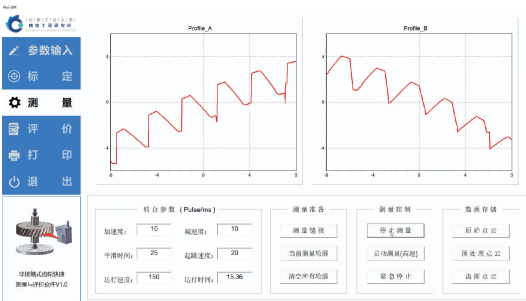


图8 测量界面

Fig. 8 Measurement interface

5 仪器测试

研发的仪器如图 9 所示,通过测量实验进一步验证仪器的设计及使用性能。被测齿轮参数如表 1 所示,通过本仪器可获得如图 10 所示的被测齿轮齿面三维数据云图。

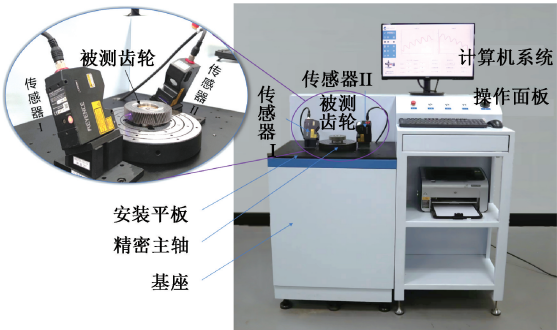


图 9 齿轮线激光三维测量仪

Fig. 9 Three-dimensional gear measuring instrument with line laser

5.1 齿廓偏差测量

截取靠近齿宽中部一个与端截面平行的截面数据进行渐开线齿廓偏差分析。如图 11 所示为被测齿轮左右齿面齿廓数据分布图和局部放大图。

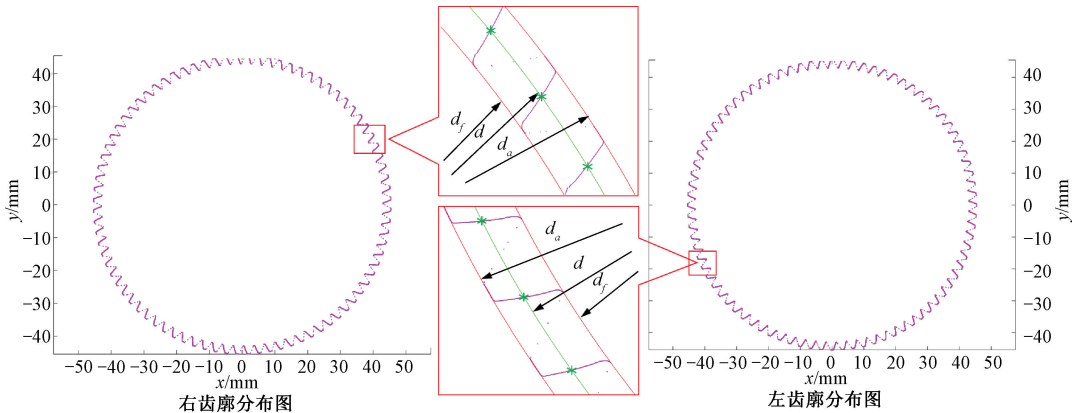


图 11 齿轮左右面齿廓分布图

Fig. 11 Distribution diagram of gear's left and right flanks profile

以右齿面为例,根据齿轮精度标准 ISO1328-1,选取被测齿轮均布的 4 个轮齿(1#,22#,43#,64#)的齿廓偏差进行分析与评价^[20],结果如图 12 所示,其中 1#轮齿右齿面齿廓偏差分别为:齿廓倾斜偏差 $f_{H\alpha} = 1.47 \mu\text{m}$;齿廓总偏差 $F_{\alpha} = 2.35 \mu\text{m}$;齿廓形状偏差 $f_{i\alpha} = 1.95 \mu\text{m}$ 。

5.2 齿距偏差测量

基于扫描被测齿轮得到的齿廓曲线,如图 11 所示,在分度圆位置处(局部放大图 * 位置)进行被测齿轮齿

表 1 被测齿轮参数

Table 1 Measured gear parameters

序号	参数	数值
1	模数/mm	1
2	齿数	84
3	压力角/(°)	20
4	螺旋角/(°)	18.75
5	齿宽/mm	25
6	旋向	左旋
7	等级 ISO1328-1:2013	5

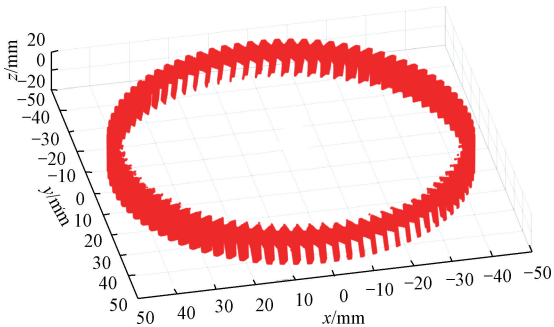


图 10 被测齿轮齿面三维数据云图

Fig. 10 Three-dimensional cloud chart of measured gear flanks

距偏差的测量与评价。

同样以右齿面为例,根据齿轮精度标准 ISO1328-1,选取被测齿轮的齿距偏差进行分析与评价^[20],结果如图 13 所示,单个齿距偏差为 $f_p = 3.25 \mu\text{m}$,累计齿距偏差为 $F_p = 9.36 \mu\text{m}$ 。

5.3 拓扑偏差测量

选取被测齿轮的第 1#轮齿的右齿面进行拓扑分析,误差图如图 14 所示,可以清晰识别齿面的拓扑情况。

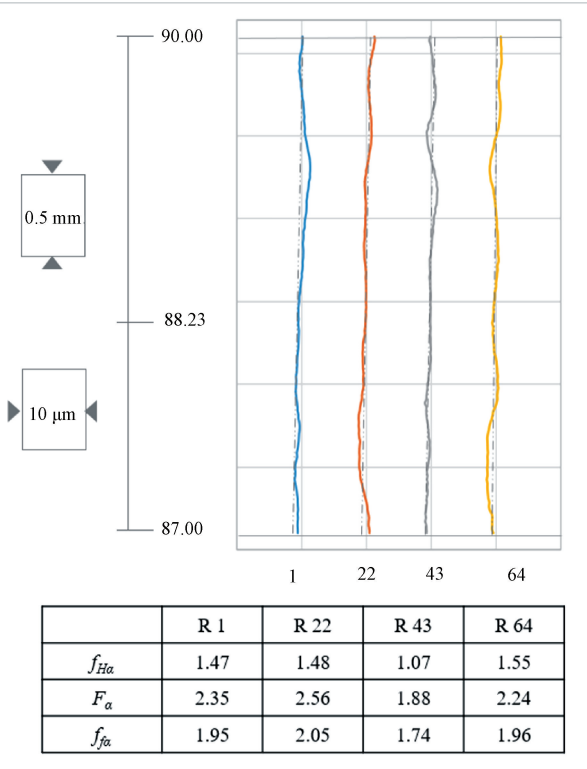


图 12 被测齿轮右齿面齿廓偏差评价结果
Fig. 12 Evaluation results of deviated right flanks of measured gear

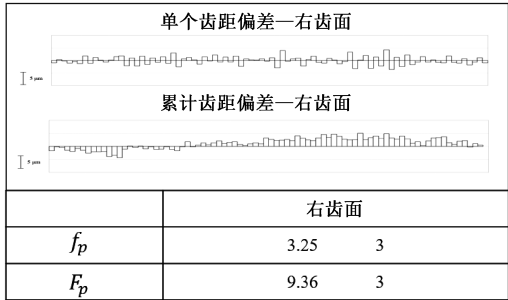


图 13 被测齿轮右面齿距偏差评价结果
Fig. 13 Evaluation results of pitch deviation of the right flank of gear

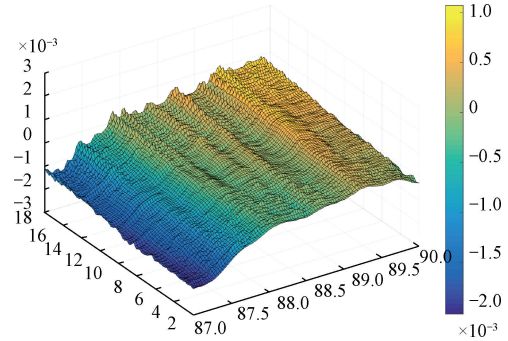
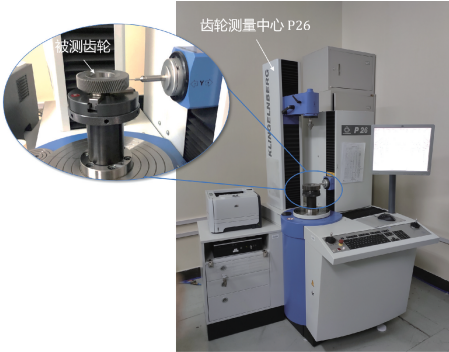


图 14 被测齿轮第1#齿的右齿面拓扑偏差
Fig. 14 Topographical deviation of the 1# tooth right flank of measured gear

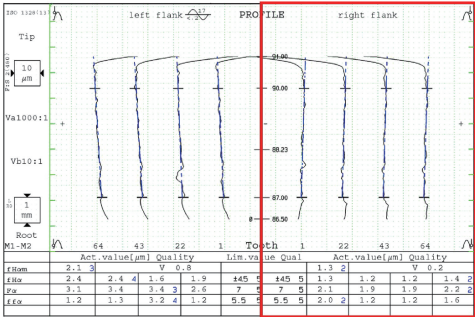
三维拓扑图包含了齿轮误差的全部信息,很好地揭示齿轮实际误差的全貌,展现了误差曲线的形状和变化趋势;具有信息丰富、数据完整、评价全面的特点,更包括了許多有价值而未解构的信息。

5.4 比对分析

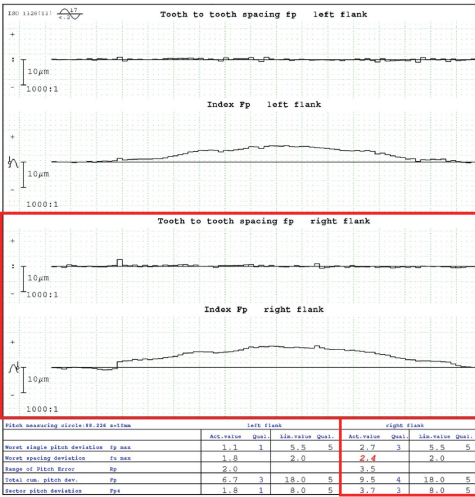
为验证所研制齿轮线激光三维测量仪测量结果的正确性,开展相应的比对实验。将被测齿轮安装在接触式齿轮测量中心(P26, Klingelnberg)上进行测量得到齿廓偏差和齿距偏差的评价结果,如图15所示。



(a) 齿轮测量中心 (P26, Klingelnberg)
(a) Gear measurement center(P26,Klingelnberg)



(b) 接触式测量评价结果—齿廓偏差
(b) Evaluation results of contact measurement - profile deviation



(c) 接触式测量评价结果—齿距偏差
(c) Evaluation results of contact measurement - pitch deviation

图 15 齿轮测量中心及评价结果
Fig. 15 Gear measurement center and evaluation results

以右齿面为例,比对齿轮线激光三维测量仪与传统齿轮测量中心对齿廓偏差、齿距偏差的评价结果,如表 2 和 3 所示,测量与评价结果具有一致性。

表 2 本文方法与 GMC(P26) 的齿廓偏差比对 Table 2 Comparison of tooth profile deviation between this method and GMC(P26)				
项目	公差/ μm	轮齿 序号	GMC(P26) 评价结果/μm	本文测量 评价结果/μm
$f_{H\alpha}$	±4.5	1#	1.3	1.47
		22#	1.2	1.48
		43#	1.2	1.07
		64#	1.4	1.55
F_{α}	7	1#	2.1	2.35
		22#	1.9	2.56
		43#	1.9	1.88
		64#	2.2	2.24
$f_{f\alpha}$	5.5	1#	2.0	1.95
		22#	1.2	2.05
		43#	1.2	1.74
		64#	1.6	1.96

表 3 本文方法与 GMC(P26) 的齿距偏差比对 Table 3 Comparison of the pitch deviation between this method and GMC(P26)			
项目	公差/μm	GMC(P26) 评价结果/μm	本文测量 评价结果/μm
f_p	5.5	2.7	3.25
F_p	18	9.5	9.36

5.5 仪器的不确定度计算

影响仪器的测量精度主要包括几个方面^[21]：
1) 机械系统的误差因素
包括仪器主轴径向跳动、端面跳动引入的误差；齿轮安装偏心引入的误差；圆光栅的安装偏心产生测角误差，本仪器圆光栅采用双读数头结构以消除光栅盘安装偏心带来的测角误差。
2) 标准量的误差因素
主要是圆光栅角度刻线和线激光传感器系统精度引入的误差。
3) 信号处理与算法的误差因素
主要是光栅读数头信号处理引入量化误差和电气稳定性和评价软件算法引入的误差。
这些误差的影响随着被测齿轮参数的不同而不同，本文的不确定度计算以表 1 中给出的参数对齿轮进齿廓测量进行分析。仪器各项误差因素所引起的测量精度如表 4 所示。

表 4 仪器精度分析 Table 4 Precision analysis of the instrument						
误差项目		误差值	齿顶圆上反映值/μm	服从分布	包含因子 k	标准不确定度 分量 $u_i/\mu\text{m}$
机械系统 误差	主轴径向跳动	1.0 μm	Δ_{1-i}	正态分布	3	0.71
	主轴轴向跳动	1.0 μm		正态分布	3	0.07
	齿轮安装偏心	0.8 μm		正态分布	3	0.57
	圆光栅安装偏心	0 μm		正态分布	3	0
标准量 误差	圆光栅系统精度	1.0″	Δ_{2-i}	均匀分布	$\sqrt{3}$	0.12
	线激光系统精度	0.4 μm		均匀分布	$\sqrt{3}$	0.23
信号处理与 算法误差	细分器及计数卡	1″	Δ_{3-i}	均匀分布	$\sqrt{3}$	0.13
	电器系统稳定性	0.35″		均匀分布	$\sqrt{3}$	0.05
	算法误差	0.005 μm		均匀分布	$\sqrt{3}$	0.003
其他	齿廓误差测量重复性	—	Δ_4	—	—	0.330

4) 齿廓偏差测量重复性引入的不确定度分量
被测齿轮重复测量 10 圈,对 1#轮齿右齿面齿廓总偏差数据进行重复性分析。齿廓总偏差结果如图 16 所示。

分析可得出齿廓总偏差的标准差为 $\sigma=0.330\text{ }\mu\text{m}$,最大极差为 $1.133\text{ }\mu\text{m}$,如表 5 所示。
可以认定表 4 中所述各分量相互独立,彼此间的

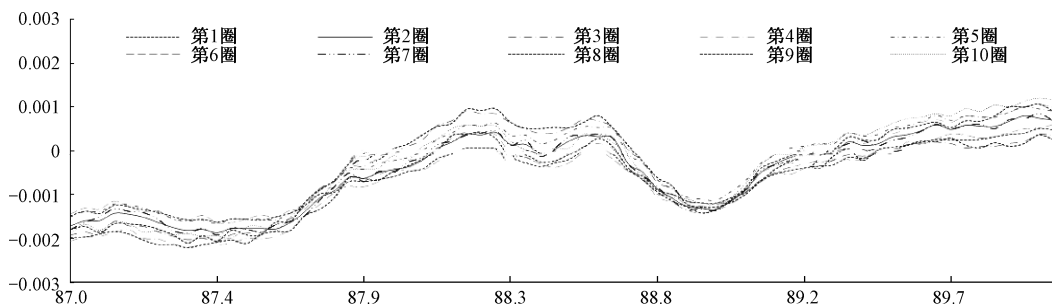


图 16 被测齿轮 1#右齿面齿廓偏差 10 次测量结果

Fig. 16 Measurement results of tooth profile deviation for gear 1 # 10 times

表 5 测量齿廓总偏差数据及重复性

Table 5 Total measurement deviation of the tooth profile data and repeatability mm

项目	第 1 圈	第 2 圈	第 3 圈	第 4 圈	第 5 圈	第 6 圈
齿廓总偏差	0.002 353	0.002 568	0.002 956	0.003 012	0.003 486	0.002 719
项目	第 7 圈	第 8 圈	第 9 圈	第 10 圈	标准差	极差
齿廓总偏差	0.002 806	0.003 235	0.002 474	0.002 968	0.000 330	0.001 133

相关系数为 0,按照不确定度合成原理^[22],得到齿廓总偏差的合成标准不确定度 u_c 为:

$$u_c = \sum_{i=1}^{10} \sqrt{u_i^2} = 1.01 \text{ }\mu\text{m} \tag{6}$$

取包含因子 $k = 2$,则齿廓总偏差的伸展不确定度为:

$$U = k \times u_c = 2.02 \text{ }\mu\text{m} \tag{7}$$

参照 ISO1328-1,对于 5 级精度圆柱齿轮^[20](参数见表 1)齿廓总偏差 F_α 的允许值为 $F_\alpha = 7.14 \text{ }\mu\text{m}$ 。测量齿廓总偏差不确定度小于齿廓总偏差允许值的 1/3($2.38 \text{ }\mu\text{m}$)。仪器可以满足 5 级精度圆柱齿轮的测量要求。

6 结 论

基于激光三角测量原理,建立了齿轮线激光三维测量模型,研制了齿轮线激光三维测量仪,包括基座、精密主轴、控制系统、软件系统等部分组成,整体快换式安排平板可满足多种参数类型的齿轮实现现场型快速检测的需求。所研制的仪器可完成被测齿轮三维齿面信息获取,并能实现齿廓偏差、齿距偏差、拓扑偏差等项目的检测,验证该仪器满足 5 级精度齿轮的检测要求,由仪器的齿廓偏差得到仪器合成标准不确定度和伸展不确定度分别为 $1.01 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $2.02 \text{ }\mu\text{m}$ 。下一步,将在该仪器上增加齿轮或传感器沿齿轮轴向的移动,实现齿面螺旋线偏差的测量和更多未解构齿面数据的挖掘与利用。

参考文献

[1] 石照耀,费业泰,谢华锟. 齿轮测量技术 100 年—回顾与展望[J]. 中国工程科学, 2003, 5(9): 13-17.

SHI ZH Y, FEI Y T, XIE H K. 100 years of gear measuring technology-review and prospect [J]. China Engineering Science, 2003, 5(9): 13-17.

[2] 石照耀,于渤,宋辉旭,等. 20 年来齿轮测量技术的发展[J]. 中国机械工程, 2022, 33(9): 1009-1024.

SHI ZH Y, YU B, SONG H X. et al. Development of gear measurement technology during the last 20 years[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(9): 1009-1024.

[3] GOCH G, NI K, PENG Y, et al. Future gear metrology based on areal measurements and improved holistic evaluations [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2017, 66(1): 469-474.

[4] Gleason Corporation. Multi-Sensor Inspection Machines for High Precision Parts, Product brochure,USA.

[5] HexagonMetrology (2020) Optical sensor HP-O. Product brochure: [https://www. hexagonmi. com/products/ coordinate-measuring-machines/ cmm-sensors/ non-contact-sensors/ hp-optical-sensors](https://www.hexagonmi.com/products/coordinate-measuring-machines/cmm-sensors/non-contact-sensors/hp-optical-sensors) (2023-Aug-06).

[6] KERFORN N. Gear inspection in record time[J]. Optik & Photonik, 2017, 12(3): 56-57.

[7] CHRISTOF G, MARKUS F. Hybrid gear metrology with Klingelnberg: An overview of tactile and optical gear metrology[J]. Gear Technol, 2021: 26-27.

[8] KIENLE P, BATARILO L, AKGÜL M, et al. Optical setup for error compensation in a laser triangulation system[J]. Sensors, 2020, 20(17): 4949.

[9] 郭晓忠. 云平台下的齿轮三维测量关键技术研究[D]. 北京:北京工业大学,2020.

GUO X ZH. Research on the key technology of gear 3D

- measurement under cloud platform[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2020.
- [10] 王涛. 基于线结构光的齿轮三维测量方法研究[D]. 北京:北京工业大学, 2021.
- WANG T. Research on three-dimensional measurement method for gears based on line structured light [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2021.
- [11] 石照耀, 孙衍强. 齿轮三维测量中线激光传感器位姿标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(12): 39-46.
- SHI ZH Y, SUN Y Q. A position and attitude calibration method for the linear laser sensor in gear 3D measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(12): 39-46.
- [12] 石照耀, 王涛. 齿轮三维测量中线结构光测头位姿的优化方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 43(7): 44-53.
- SHI ZH Y, WANG T. Optimization method of probe position of linear structured light in three-dimensional gears measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 43(7): 44-53.
- [13] 刘艺, 孙衍强, 石照耀, 等. 线结构光传感器测量特性的测试分析[J]. 机电工程, 2022, 39(12): 1740-1746.
- LIU Y, SUN Y Q, SHI ZH Y, et al. Test and analysis of measurement characteristics of line structured light sensor[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2022, 39(12): 1740-1746.
- [14] 石照耀, 赵保亚, 于渤, 等. 齿轮特征线统一模型及在齿轮三维误差评定中的应用[J]. 机械工程学报, 2022, 58(24): 1-9.
- SHI ZH Y, ZHAO B Y, YU B. Unified model of gear characteristic lines and its application in the evaluation of gears 3D deviation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(24): 1-9.
- [15] GUO X ZH, SHI ZH Y, YU B, et al. 3D measurement of gears based on a line structured light sensor [J]. Precision Engineering, 2020, 61: 160-169.
- [16] SHI ZH Y, WANG T, LIN J CH. A simultaneous calibration technique of the extrinsic and turntable for structured-light-sensor-integrated CNC system [J]. Optical and Lasers in Engineering, 2021, 138: 106451.
- [17] 石照耀, 叶勇. 广义极坐标法测量渐开线轮廓误差的研究[J]. 仪器仪表学报, 2001(2): 140-142, 153.
- SHI ZH Y, YE Y. Research on the generalized polar-coordinate method for measuring involute pro-file deviations[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2001(2): 140-142, 153.
- [18] MORSE E, JAGANMOHAN P. 6 DOF calibration of profile sensor locations in an inspection station[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2020, 69(1): 465-468.
- [19] 舒赞辉, 石照耀, 王笑一. 齿轮测量仪器的动态设计方法及其应用[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 910-918.
- SHU Z H, SHI ZH Y, WANG X Y. Dynamic design method of gear measuring instrument and its application[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(4): 910-918.
- [20] ISO 1328-1:2013(E). Cylindrical gears-ISO system of flank tolerance classification-part 1: Definitions and allowable of value of deviations relevant to flanks of gear teeth[S]. Geneva: Central Secretariat Geneva, 2013.
- [21] LIN H, KELLER F, STEIN M. Influence and compensation of cmm geometric errors on 3d gear measurements[J]. Measurement, 2020, 151:107110.
- [22] 国家质量监督检验检疫总局. JJF 1059.1-2012 测量不确定度评定与表示[S]. 2012.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. JJF 1059.1-2012 Evaluation and Expression of Uncertainty in Measurement[S]. 2012.

作者简介



石照耀(通信作者), 1984年于合肥工业大学获得学士学位, 1988年于陕西机械学院获得硕士学位, 2001年于合肥工业大学获得博士学位, 现为北京工业大学教授、博士生导师、教育部长江学者特聘教授, 主要研究方向为精密测试技术和仪器、齿轮工程和精密减速器。

E-mail: shizhaoyao@bjut.edu.cn

Shi Zhaoyao (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Hefei University of Technology in 1984, M.Sc. degree from Shaanxi Institute of Mechanical Engineering in 1988 and Ph.D. degree from Hefei University of Technology in 2001. He is currently a professor and a Ph.D. advisor at Beijing University of Technology. He is a “Yangtze River Scholar” distinguished professor awarded by the Ministry of Education. His main research interests include precision measurement technology and instrument, gear engineering and precision reducer.



李美川, 2008年于西安工业大学获得学士学位, 2014年于西安工业大学获得硕士学位, 现为北京工业大学博士研究生, 主要研究方向为精密测试技术和仪器。

E-mail: leemerchar@aliyun.com

Li Meichuan received his B.Sc. degree from Xi'an Technological University in 2008, and received his M.Sc. degree from Xi'an Technological University in 2014. He is currently a Ph.D. candidate at Beijing University of Technology. His main research interest includes precision measurement technology and instrument.