先进光电测量、分析与制造

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250921001

线结构光传感器误差对齿廓偏差测量的影响及误差补偿

周禹成，赫东锋*

（西安工业大学 机电工程学院，西安 710021）

摘　要： 为研究线结构光传感器在齿廓偏差测量中的精度问题，提出一种基于该传感器的齿廓偏差测量方法。通过建立测量渐开线圆柱齿轮齿廓的倾斜误差模型，并将其对直齿轮进行测量时的误差模型进行简化，系统分析了传感器空间姿态等因素对测量精度的影响。通过实验对标准渐开线样板进行测量并和Klingelnberg P26齿轮测量中心结果进行对比，验证了所提方法的有效性。实验结果表明，在进行误差补偿后，所提出的基于线结构光传感器齿廓偏差测量方法能够达到7级精度，满足渐开线直齿圆柱齿轮齿廓偏差的测量要求。

关键词： 齿轮；齿廓偏差测量；非接触式测量；线结构光传感器；误差补偿

中图分类号： TH741；TN249　**文章编号：** 1001－5868(2025)05－0811－08

Impact of Errors in Linear Structured-Light Sensors on Tooth Profile Deviation Measurement and Error Compensation

ZHOU Yucheng, HE Dongfeng

(**School of Mechatronic Engineering, Xi′an Technological University, Xi′an 710021, CHN**)

Abstract: A measurement method for tooth profile deviation based on a line-structured light sensor is proposed to investigate its accuracy issues. An inclination error model for measuring the involute tooth profile of cylindrical gears was established and subsequently simplified for spur gears, through which the influence of factors such as sensor spatial posture on measurement accuracy was systematically analyzed. Experiments were conducted on a standard involute specimen, and the results were compared with those obtained from a Klingelnberg P26 gear measuring center. The experimental results show that after error compensation, the proposed method can meet the measurement requirements of Grade 7 accuracy for the profile deviation of involute spur cylindrical gears.

Key words: gear; tooth profile deviation measurement; non-contact measurement; line-structured light sensor; error compensation

0　引言

随着制造业的不断发展，齿轮作为应用最广泛的关键基础零件，其性能要求也越来越高。齿廓偏差是影响齿轮传约精度、承载能力、传约效率以及噪声和振动水平的关键参数之一。目前，齿廓偏差的测量主要通过接触式测头扫描齿面来进行，但该方式效率低，易对被测物体的表面造成损伤[1-2]。因此，接触式测量方法难以满足现代齿轮制造业对于齿轮测量的需求。

收稿日期：2025－09－21.

* **通信作者：**赫东锋

为解决接触式测量方法所面临的多种缺陷，自20世纪80年代起，各类非接触式测量方法得到了快速发展。其中，激光三角测量作为一种极具发展潜力的非接触测量手段，已被广泛应用于各类复杂表面三维轮廓的测量中[3]。基于激光三角法线结构光传感器的齿轮测量方法，属于非接触式齿轮测量范畴，具备测量速度快、测头无磨损等诸多优势，符合齿轮快速且高精度的检测需求。然而，该方法与传统的接触式方法对比，其测量精度较低。这主要是因为激光三角法更容易受到环境光、被测物体的材料和工艺、测量角度等因素的影响[4]。

Auerswald等[5]采用线结构光法测量齿轮齿面，并将其所得测量曲线与三坐标测量机（CMM）的结果逐点比较，齿形测量偏差为±8.2 μm。郭晓忠等[6]提出一种基于线结构光传感器和高精度气浮转台的三维点云测量系统，提出一种基于小样本局部椭圆拟合法的齿轮光学测量坐标系的建立方法，利用该系统测得六级精度齿轮的齿形总偏差为15.8 μm。然而，以上研究均未考虑传感器测量误差的影响。

为揭示线结构光传感器在各种因素影响下的测量特性，刘艺等[7]研究了线结构光传感器的内部因素和外部因素对线结构光传感器测量特性的影响规律，发现传感器在不同测量区域的稳定性存在差异，其中X方向上中间区域稳定性优于两端。为了提高激光三角法的测量精度和可靠性，Vukašinovic等[8]分析了倾斜角度、扫描距离、物体颜色和反射率对结构光传感器测量精度和可靠性的影响。通过分析被测物体表面不同颜色引起的误差，Li等[9]提出一种提高激光三角测量精度的补偿方法。Wu等[10]提出一种通过获取图像的像素灰度曲线、标准化和迭代插值来处理激光三角测量数据的新算法。Li等[11]研究了扫描深度、表面粗糙度、倾斜角和方位角的影响，提出一种考虑结构光传感器空间姿态的实用测量策略。Sun等[12]建立了测量光入射角的数学模型，重点分析了线结构光传感器位置和姿态对入射角的影响，研究结果表明，增大传感器在齿轮切向的偏置量可显著减小入射角，从而减少齿面数据缺失；而当传感器倾角小于60°时，对入射角的影响可忽略不计。

综上所述，线结构光传感器的测量精度受多种因素影响，包括被测物体的表面特性（如粗糙度、颜色、材质）、线结构光传感器的空间姿态、环境温度以及光照强度。在这些影响因素中，传感器的空间姿态对测量精度的影响最大。为进一步提高线结构光传感器测量齿轮精度，本文分析了线结构光传感器空间姿态参数对齿廓偏差测量的影响因素，并简化了误差补偿模型。通过实验对传感器扫描误差进行标定并基于RBF神经网络建立了线结构光传感器全量程误差补偿模型，最后对标准渐开线样板进行测量并和Klingelnberg P26齿轮测量中心结果进行对比，验证了所提基于线结构光传感器齿廓偏差测量方法可行性。实验结果表明，进行误差补偿后，线结构光传感器在全量程内对齿廓偏差测量差异不大，在正负的扫描范围分别具有良好的一致性，齿廓偏差测量结果能够达到7级精度的齿轮测量要求。

1 线结构光传感器误差对齿廓测量影响模型建立

1.1 线结构光传感器测量齿廓偏差误差模型建立

线结构光传感器是基于激光三角测量原理设计的精密光学仪器，其散焦现象会造成像点的分散，从而降低测量精度[14]。此外，扫描距离的变化、测量倾角等都会造成像点的分散。线结构光传感器在齿轮测量中的空间姿态如图1所示，P点为线结构光传感器在齿面上的任一测量点。在对渐开螺旋面进行测量时，线结构光传感器与被测齿面在空间上存在三个方向的倾角：渐开螺旋面法线N与激光平面的倾角α，激光束与渐开线法线的倾角γ以及传感器本身绕光轴旋转角度β。

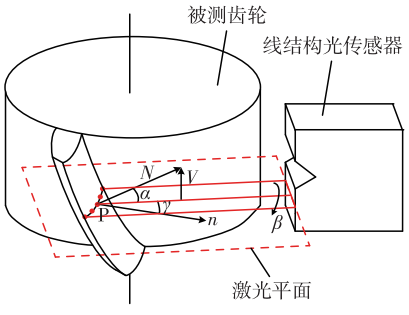


图1 线结构光传感器测量示意图

如图2所示，分析了激光测量系统在扫描距离x以及测量倾角影响下的原理误差。P为斜面上的被测点，倾角为a，R为接收透镜的有效半径，L_0为被测点P到接收透镜中心M_1的距离，L'为接收透镜中心M_1到光电探测器之间的距离，θ为矢量$\boldsymbol{KA}$与

$\boldsymbol{AM}_1$之间的夹角，ω_0为矢量$\boldsymbol{PM}_1$与被测点 P 的法向矢量$\boldsymbol{N}$之间的夹角，d为接收透镜中心 M_1到激光束起始点 K 的距离。以 P 点为原点建立空间坐标系 S(O-XYZ)，当传感器光轴绕 Z 轴旋转时，即测量平面 MPK 绕 Z 轴旋转到测量平面 M_1PK，中心点 M 到点 M_1对应的角度为倾角β。

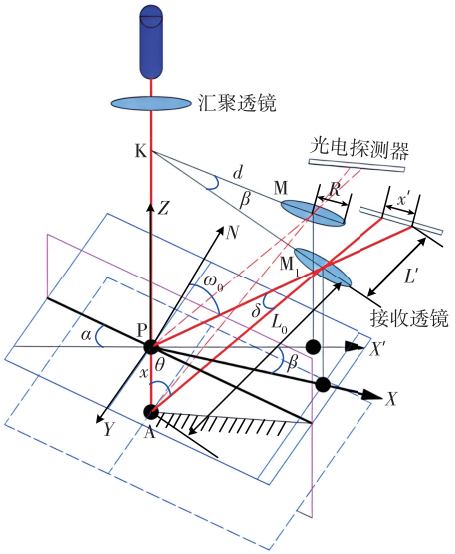


图 2　线结构光传感器倾斜测量原理

被测点 P 的法向矢量为：

$$\boldsymbol{N}=(\sin\alpha,0,\cos\alpha) \tag{1}$$

$$\boldsymbol{PM}_1=(d\cos\beta,\sin\beta,L_0\cos(\theta+\delta)) \tag{2}$$

由于参数δ的值非常小，因此$\boldsymbol{PM}_1$可表示为：

$$\boldsymbol{PM}_1=(d\cos\beta,\sin\beta,L_0\cos(\theta)) \tag{3}$$

由此可以计算出：

$$\cos\omega_0=\frac{\boldsymbol{PM}_1\cdot\boldsymbol{PN}}{|\boldsymbol{PM}_1||\boldsymbol{PN}|}\approx\frac{d\sin\alpha\cos\beta+L_0\cos\alpha\cos\theta}{L_0} \tag{4}$$

因为$d\approx L_0\sin\theta$，可得：

$$\tan\omega_0=\sqrt{\frac{1}{(\sin\alpha\cos\beta\sin\theta+\cos\alpha\cos\theta)^2}-1} \tag{5}$$

在扫描距离x，α和β三个因素影响下的线结构光传感器测量误差可以表示为[15]：

$$E_a=|\boldsymbol{M}_1\boldsymbol{K}|_{\alpha\neq0,\beta\neq0}-|\boldsymbol{MK}|_{\alpha=0,\beta=0}=\frac{R^2L'x\cos\theta}{L_0^3}\left(1+\frac{2x\cos\theta}{L_0}\right)\cdot\left(\sqrt{\frac{1}{(\sin\alpha\cos\beta\sin\theta+\cos\alpha\cos\theta)^2}-1}-\tan\theta\right) \tag{6}$$

α的值可以通过以下步骤计算得出。如图 3 所示为渐开螺旋面模型，渐开螺旋面方程为：

$$\boldsymbol{r}=\begin{pmatrix}x\\y\\z\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}r_b\cos\delta+\theta r_b\sin\delta\\r_b\sin\delta-\theta r_b\cos\delta\\z\end{pmatrix} \tag{7}$$

式中，$\delta=\xi+\theta+\varphi$，$\xi=z\tan\beta_b/r_b$，$\varphi$为渐开线起始角，$\theta$为渐开线展开角，$r_b$为基圆半径，$\beta_b$为螺旋角。

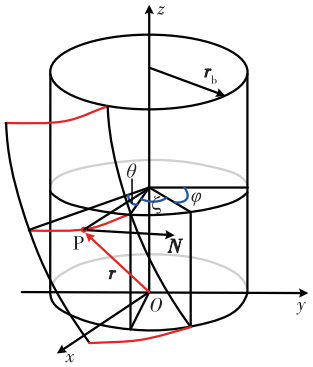


图 3　渐开螺旋面模型

在渐开线圆柱齿轮的渐开螺旋面上，任意一点 P 的法向量即渐开螺旋面法线由经过该点的两条不共线的切向量的叉乘所决定，即为：

$$\boldsymbol{N}=\frac{\partial\boldsymbol{r}}{\partial z}\times\frac{\partial\boldsymbol{r}}{\partial\theta}=(\sin\delta,-\cos\delta,\tan\beta_b)^{\mathrm{T}} \tag{8}$$

当激光为水平打光时，激光平面单位法向量为：

$$\boldsymbol{V}=(0,0,1)^{\mathrm{T}} \tag{9}$$

由此可推导α为：

$$\alpha=\arccos\left(\frac{\boldsymbol{N}\cdot\boldsymbol{V}}{|\boldsymbol{N}||\boldsymbol{V}|}\right)=\arccos\left(\frac{\tan\beta_b}{\sqrt{1+\tan^2\beta_b}}\right) \tag{10}$$

由于β_b为定值，可得α也为定值。直齿轮可以看作是螺旋角为 0°的斜齿轮，通过公式(10)的理论推导，可得出测量直齿轮时，α=0，因此不存在变量α。同时在测量直齿轮时，激光光线为水平打光，传感器绕 Z 轴的转角β=0，因此也不存在变量β，则误差模型(6)可简化为：

$$E_a=-\frac{\tan\theta R^2L'x\cos\theta}{L_0^3}\left(1+\frac{2x\cos\theta}{L_0}\right) \tag{11}$$

分析公式(11)可得，使用线结构光传感器在对直齿圆柱齿轮进行测量时，简化后传感器误差变量只与传感器读数x有关。其他四个参数θ，R，L'，L_0为传感器内部参数，均为常数。

1.2　齿廓偏差计算

建立齿廓偏差计算示意图如图 4 所示，假设 P_i

为设计齿廓上一点，B点为同样展角下齿廓上对应的实际轮廓测量点。

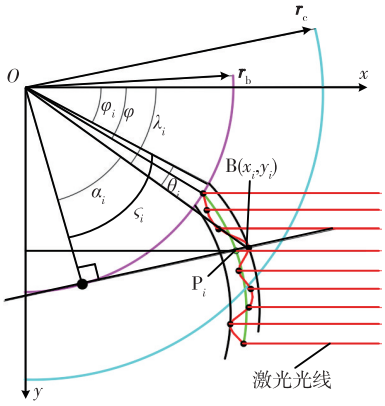


图4 齿廓偏差计算原理

根据图4中几何原理，可得该齿廓上任意一测点B(x_i,y_i)在齿面的压力角α_i为：

$$\alpha_i=\arccos\left(\frac{\boldsymbol{r}_b}{\sqrt{{x_i}^2+{y_i}^2}}\right) \tag{12}$$

式中，$\boldsymbol{r}_b$为基圆半径。

展角θ_i为：

$$\theta_i=\tan\left[\arccos\left(\frac{\boldsymbol{r}_b}{\sqrt{{x_i}^2+{y_i}^2}}\right)\right]-\arccos\left(\frac{\boldsymbol{r}_b}{\sqrt{{x_i}^2+{y_i}^2}}\right) \tag{13}$$

则该点对应的展开角为ς_i：

$$\varsigma_i=\alpha_i+\theta_i=\tan(\alpha_i) \tag{14}$$

实测点对应的展长L_i'为：

$$L_i'=\boldsymbol{r}_b\varsigma_i \tag{15}$$

根据实测点可以建立齿廓渐开线方程：

$$\begin{cases}x_i=\sqrt{{x_i}^2+{y_i}^2}\cos(\varphi_i+\lambda\theta_i)\\ y_i=\sqrt{{x_i}^2+{y_i}^2}\sin(\varphi_i+\lambda\theta_i)\end{cases} \tag{16}$$

式中，当$\lambda=1$时，为右齿廓渐开线方程；当$\lambda=-1$时，为左齿廓渐开线方程。

由公式(16)可以求解出任意点B(x_i,y_i)的起始角φ_i：

$$\varphi_i=\arctan(y_i/x_i)-\lambda\theta_i \tag{17}$$

取起始角的平均值作为理想渐开线的初始值：

$$\varphi=\frac{1}{N}\sum_i^N\varphi_i \tag{18}$$

式中，N为传感器测量点数。

由此，可以得到任意点(x_i,y_i)的齿廓偏差值为：

$$E_i=r_b(\varphi_i-\varphi) \tag{19}$$

则每个测点对应的理论展开长度L_i：

$$L_i=L_i'-E_i \tag{20}$$

依据ISO 1328-1:2013标准，对计算得到的齿廓偏差数据进行评价，标准规定仅对齿廓有效计值长度(齿廓控制圆到齿顶成形圆的95%范围)进行偏差评定。其中，齿廓控制圆直径d_{cf}计算可表示为：

$$\begin{cases}d_{cf}=\dfrac{d_b}{\cos\alpha_E}\\ \alpha_E=\arctan\left(\tan\alpha-\dfrac{4}{z\sin 2\alpha}\right)\end{cases} \tag{21}$$

式中，d_b为基圆直径，α_E为齿廓控制圆处的压力角，α为分度圆处的压力角，z为齿数。

齿顶成形圆直径d_{fa}表示齿顶圆去掉圆角后的直径(若无圆角则等于齿顶圆直径)，其计算公式为：

$$d_{fa}=d+2m(h_a^*+x) \tag{22}$$

式中，d_{fa}为齿顶圆直径，d为分度圆直径，h_a^*为齿顶高系数，x为法向变位系数，m为模数。

则可计算评价起始展开长度L_E，作为偏差评定的起点。该长度由几何关系推导出：

$$L_E=\sqrt{\left(\frac{d_{cf}}{2}\right)^2-{r_b}^2} \tag{23}$$

齿廓偏差的有效测量长度L_{AE}则按照标准定义的95%区间计算，其表达式为：

$$\begin{cases}L_{fa}=\sqrt{\left(\dfrac{d_{fa}}{2}\right)^2-r_b^2}\\ L_{AE}=(L_{fa}-L_E)\times 95\%\end{cases} \tag{24}$$

式中，L_{fa}为齿顶成形圆处的理论展开长度。该式表示有效评定区间为从基圆展开长度L_E开始，向齿顶延伸95%的齿廓总长度。实际测得的齿廓偏差序列(L_i,E_i)将被截取在$L_E\sim(L_E+L_{AE})$范围内作为评价数据。

假设在评价范围内数据为(L_j,E_j)，对于落在有效长度区间内的偏差数据，采用最小二乘法拟合平均齿廓迹线E_j'，计算公式如下：

$$E_j'=kL_j+b \tag{25}$$

式中，k,b分别为最小二乘拟合斜率和截距。

齿廓倾斜偏差f_{Ha}是评定齿廓整体线性倾斜程

度的指标，定义为拟合直线在有效评定长度区间两端的高度差，其计算公式为：

$$f_{Ha}=k\cdot(L_{AE}-L_E) \tag{26}$$

式中，k为通过最小二乘法拟合得到的齿廓平均线斜率，L_E与L_{AE}分别为有效评定区间内的最大与最小展开长度。

齿廓形状偏差f_{fa}衡量的是齿廓形貌相对于平均线的波动幅值，体现了齿廓曲线的局部起伏情况。其定义为拟合直线与实际偏差之间残差的最大值与最小值之差，即：

$$f_{fa}=\max(E_j-E_j')-\min(E_j-E_j') \tag{27}$$

齿廓总偏差F_a反映的是评定区间内齿廓偏差的整体振幅，定义为实测偏差值中的最大值与最小值之差，表示齿廓整体轮廓的偏离程度，计算公式为：

$$F_a=\max(E_j)-\min(E_j) \tag{28}$$

2　实验验证

2.1　传感器标定实验

本文第 1 节分析了使用线结构光传感器对圆柱直齿轮齿廓进行测量产生误差模型。使用 LJ-8060 线结构光传感器，现对其测量误差进行扫描距离的标定。线结构光传感器的具体参数如表 1 所示，其中传感器的扫描距离范围为－7.3 mm～7.3 mm。误差校正通过自主研制的 C40 齿轮测量中心和标准量块进行，如图 5 所示。将线结构光传感器通过安装板安装在齿轮测量中心R轴上，通过控制R轴移动可带动传感器在其测量范围内进行扫描。实验前，首先调整传感器的空间姿态，以确保激光束平行于Z轴，然后将量块放置在齿轮测量中心回转轴上，通过不断调整回转工作台，使得量块工作面与激光光线平行。在传感器量程范围（－7.3～7.3 mm）内对标准量块进行测量，每移动步长 0.1 mm 记录传感器读数和齿轮测量中心R轴光栅读数值。以齿轮测量中心R轴光栅读数值作为基准值，传感器读数值作为测量值。计算每条线激光所有测量点的均值，并利用R轴光栅值减去传感器读数均值即为传感器测量误差。

通过误差标定实验，获得了 147 组线结构光传感器和齿轮测量中心R轴光栅的测量数据，得到传感器在整个测量范围内对应的测量误差。基于该误差数据，使用 RBF 神经网络建立线结构光传感器全量程的误差补偿模型，其中X轴为扫描距离h，Y轴为测量误差，得到误差曲线如图 6 所示。由图可知，线结构光传感器在整个测量范围内存在扫描误差，测量误差的变化随扫描距离h的增大而增大。此外，扫描误差呈不对称性，在 0～7.3 mm 范围内的扫描误差明显大于在－7.3～0 mm 范围内的。

表 1　线结构光传感器参数

性能	指标
产品型号	LJ-X8060
测量原理	漫反射
基准距离	64 mm
测量范围	X轴：16 mm Z轴：±7.3 mm
基准距离光点直径	25 mm × 49 μm
直线性（Z轴）	±0.04%F.S （±0.008%）
重复精度	X轴：0.4 μm Z轴：0.5 μm
绝对精度	0.1 μm
轮廓数据数量	3 200

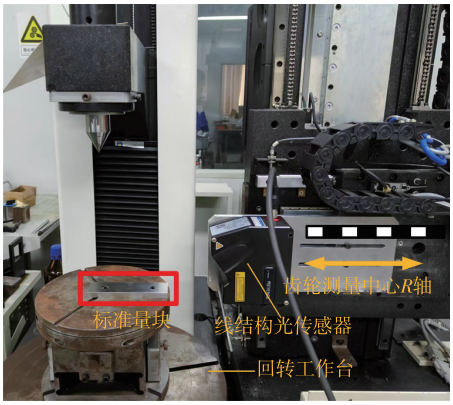


图 5　线结构光传感器扫描误差标定

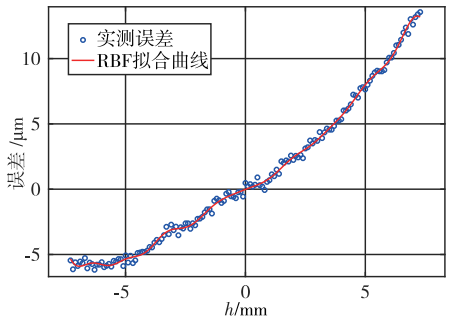


图 6　线结构光传感器测量误差曲线

2.2　渐开线样板测量和结果验证

渐开线样板是一种标准的齿轮测量器具，其渐开线齿面是各种渐开线仪表的检定基准。由于渐开线样板的齿形精度比齿轮的齿形精度要高，本实

验采用渐开线样板作为被测对象，渐开线样板参数如表2所示。

表2 渐开线样板参数

参数	数值
模数	5.082 4 mm
齿数	22
压力角	20°

为验证传感器误差补偿模型在齿轮测量中的补偿效果，现使用线结构光传感器对渐开线样板进行测量，测量装置如图7所示。测量装置位于超净间实验室，该实验室可有效防止空气中的悬浮颗粒物沉积在齿轮齿廓表面或传感器的光学镜头上，确保了结构光条纹图像的质量和测量的可靠性，同时能够保证整个测量环境处于20±0.5℃恒温恒压条件。测量前，被测渐开线样板在实验室内静置超过24小时，以确保其温度与环境充分平衡，避免热变形引入的测量误差。线结构光传感器在工作过程中，其内部的半导体激光器的温升会影响其输出特性，进而影响传感器测量精度稳定性。因此在测量之前，已经对线结构光传感器进行1小时预热处理[7]，使其达到稳定条件后再进行测量。

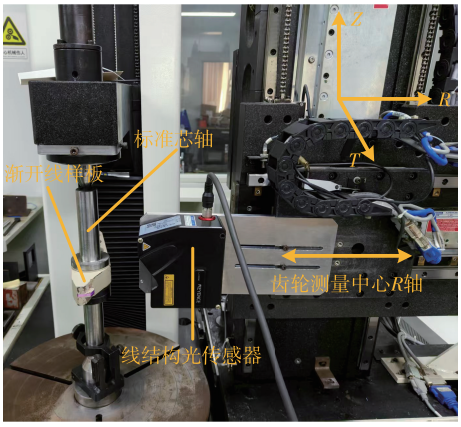


图7 渐开线样板测量装置

在测量过程中，由于传感器测量数据是在传感器坐标系下给出的，而为了对齿轮进行精度评价，需要将这些测量数据转换到齿轮坐标系下，因此需要确定齿轮和传感器之间的相对位置关系。本文使用标准芯轴建立坐标系，具体步骤为：首先，移动齿轮测量中心直线轴，使用线结构光传感器对标准芯轴进行测量，以采集一段圆弧数据，并记录下此时齿轮测量中心R轴和T轴的光栅数据；随后，利用最小二乘法拟合圆弧数据，得到其圆心坐标；据此，便能得到传感器和芯轴回转中心的相对位置关；然后，再对渐开线样板进行测量；最后，根据2.2小节中推导的公式进行齿廓偏差计算与评价。

在线结构光传感器测量范围内对标准渐开线样板进行测量，通过移动齿轮测量中心R轴，使得线结构光传感器在左端极限范围刚好能够测量到渐开线样板。以此位置为基准，按照每次移动1 mm步长向另一端移动齿轮测量中心R轴，直到超出传感器测量范围，总共测得14组渐开线样板数据。根据2.2小节推导过程对齿廓偏差进行计算，得到的齿廓偏差曲线如图8所示。分析图8可知，由于线结构光传感器扫描误差影响，齿廓偏差的值随着扫描距离h绝对值增大而增大。

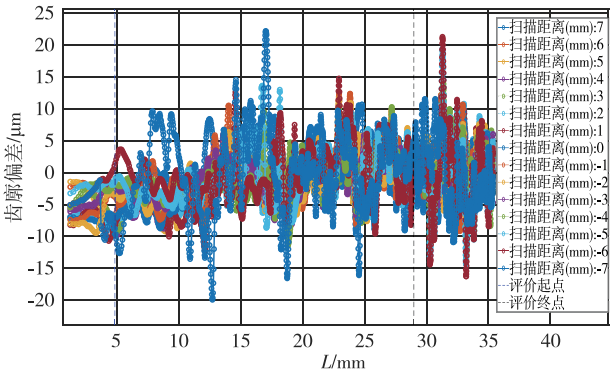


图8 线结构光传感器全量程下齿廓偏差

线结构光传感器在进行齿廓偏差的实际测量过程中，受到多种因素的共同影响，测量结果不可避免地存在数据异常，如图8中在展长L为8 mm，11 mm，13 mm，16 mm，18 mm，24 mm等处出现明显的尖端毛刺。这些影响因素包括传感器精度限制、激光测量的物理特性以及测量现场的环境干扰（环境光线变化、机械振约、空气粉尘等）。因此需要对齿廓偏差进行滤波处理，本文使用基于huber权函数的稳健高斯滤波器对齿廓偏差进行滤波处理，既能够剔除传感器的异常值，同时能够对齿廓偏差起到较好的平滑滤波效果[16]。

为了更直观看到异常值以及滤波后效果，现取其中一组滤波后的齿廓偏差曲线，如图9所示。由曲线可知，基于huber权函数的稳健高斯滤波器能够对线结构光传感器异常值以及齿廓偏差起到较好的处理效果。

通过误差模型公式(6)进行补偿，得到补偿后的所有扫描距离下齿廓偏差，再对误差补偿后的齿廓偏差进行稳健高斯滤波处理，得到的齿廓偏差曲线如图10所示。其中图10(a)为在传感器1 mm到

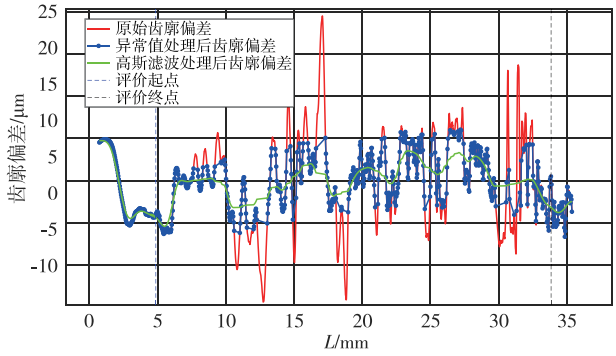
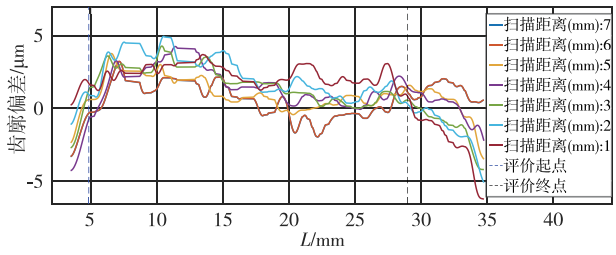
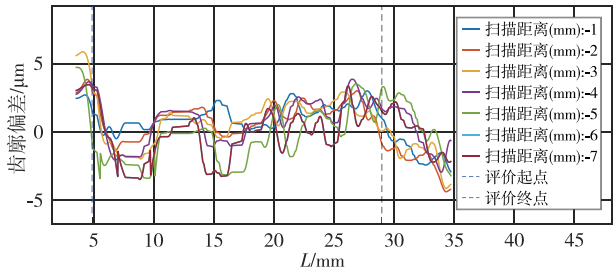


图 9　异常值以及滤波处理后齿廓偏差

7 mm 范围内测量得到的齿廓偏差曲线，通过分析可得误差补偿后的齿廓偏差在该扫描范围内一致性良好；图 10(b)为传感器在－1 mm 到－7 mm 范围内测量得到的齿廓偏差曲线，同样在该范围内齿廓偏差的一致性也良好。由此说明误差补偿后在传感器整个测量范围内对齿廓偏差的测量差异不大，能够控制在 5 μm 范围内。误差补偿后虽然对扫描误差大小进行了有效补偿，但是在传感器正负的扫描范围之间测出的齿廓偏差趋势存在较大差异，这与图 6 中传感器误差的不对称是一致的。



(a) 正扫描范围



(b) 负扫描范围

图 10　线结构光传感器不同扫描距离下误差补偿后齿廓偏差

按照 2.2 小节齿廓偏差评价公式对齿廓偏差进行评价，同时与接触式齿轮测量中心(Klingelnberg P26)的测量结果进行比较，齿轮测量中心 P26 测量如图 11 所示。线结构光传感器测量结果以及 P26 对比结果如表 3 所示。

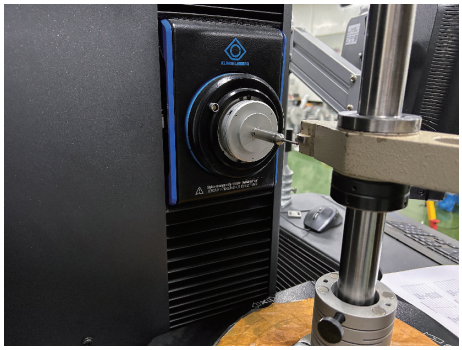


图 11　P26 齿轮测量中心对比实验

表 3　齿廓偏差测量结果

线结构光 h(mm)和 P26 测量	F_α/μm	$f_{f\alpha}$/μm	$f_{H\alpha}$/μm
h=－7	6.9	5.2	3.8
h=－6	4.4	4.4	0.15
h=－5	6.5	4.4	－2.0
h=－4	6.6	4.2	－3.1
h=－3	6.5	3.2	－3.9
h=－2	6.0	4.0	－3.9
h=－1	6.9	6.4	－3.5
h=1	6.0	5.2	－2.1
h=2	5.8	5.3	－1.2
h=3	5.1	5.1	－0.1
h=4	6.8	6.8	－0.1
h=5	6.9	5.9	2.8
h=6	6.5	5.5	1.8
h=7	6.9	5.9	3.4
P26 测量结果	2.6	2	1.7

由表 3 数据可得，进行误差补偿后，线结构光传感器测量齿廓总偏差在 6.9 μm 内，和 P26 相比，最大差值为 4.3 μm，齿廓形状偏差最大差值为 4.8 μm，齿廓倾斜偏差最大差值为 2.2 μm。通过查询 GB/T 10095.1-2001《渐开线圆柱齿轮精度等级》可知，所提出的基于线结构光传感器齿廓偏差测量方法能够测量 7 级精度的齿轮。

4　结论

本文提出了一种渐开线圆柱齿轮齿廓偏差测量时对线结构光传感器误差进行补偿的方法。首先分析了线结构光传感器的测量原理，建立了线结构光传感器测量渐开线圆柱齿轮齿廓的倾斜误差模型，并将其对直齿轮进行测量时的误差模型进行了简化。在齿轮测量中心上，以 R 轴光栅数据为基准，使用标准量块对 LJ-8060 线结构光传感器的测量误差进行了扫描距离的标定，并基于 RBF 神经网络建立了线结构光传感器全量程的误差补偿模型。

建立了基于直角坐标法的齿廓偏差计算与评定模型,并针对线结构光传感器的异常值使用了基于huber权函数的稳健高斯滤波算法对齿廓偏差进行滤波处理。误差补偿后,和Klingelnberg P26齿轮测量中心的鉴定结果相比,齿廓总偏差结果相差4.3 μm。实验结果表明,所提出的基于线结构光传感器齿廓偏差测量方法能够满足7级精度的渐开线直齿圆柱齿轮齿廓偏差的测量要求,该研究对于提升齿轮光学测量的测量精度具有一定借鉴意义。

参考文献:

[1] Goch G, Ni K, Peng Y, et al. Future gear metrology based on areal measurements and improved holistic evaluations [J]. CIRP Annals, 2017, 66(1): 469-474.

[2] Boral P, Gołębski R, Stoic A. Analysis of outline measurements methods of spur gear involute profile [J]. Technical Gazette, 2021, 28(3): 1008-1011.

[3] Ding D, Ding W, Huang R, et al. Research progress of laser triangulation on-machine measurement technology for complex surface: a review[J]. Measurement, 2023, 216: 113001.

[4] Pigeon S, Lapointe-Pinel B. Using a slit to suppress optical aberrations in laser triangulation sensors[J]. Sensors, 2024, 24(8): 2662.

[5] Auerswald M M, von Freyberg A, Fischer A. Laser line triangulation for fast 3D measurements on large gears[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 100(9): 2423-2433.

[6] Guo X, Shi Z, Yu B, et al. 3D measurement of gears based on a line structured light sensor[J]. Precision Engineering, 2020, 61: 160-169.

[7] 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 Yi, Sun Yanqiang, Shi Zhaoyao, et al. Test and analysis of measurement characteristics of line structured light sensor [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2022, 39(12): 1740-1746.

[8] Vukašinović N, Možina J, Duhovnik J. Correlation between incident angle, measurement distance, object colour and the number of acquired points at CNC laser scanning[J]. Strojniški Vestnik - Journal of Mechanical Engineering, 2012, 58(1): 23-28.

[9] Li S, Jia X, Chen M, et al. Error analysis and correction for color in laser triangulation measurement [J]. Optik, 2018, 168: 165-173.

[10] Wu S, Shen B, Wang J, et al. Super-resolution algorithm for laser triangulation measurement [J]. Lasers in Engineering, 2017, 38(3/6): 385-395.

[11] Li B, Li F, Liu H, et al. A measurement strategy and an error-compensation model for the on-machine laser measurement of large-scale free-form surfaces [J]. Measurement Science and Technology, 2014, 25(1): 015204.

[12] Sun Y, Shi Z, Yu B, et al. Incident angle model of measuring light in gear measurement utilizing a line laser sensor and analysis on its influence factors[J]. Measurement, 2022, 203: 111838.

[13] 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 Xiaozhong. Research on the key technology of gear 3D measurement under cloud platform [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2020.

[14] Chao J, Zhang L. Parameters of small pitch thread measured by an intelligent detection method [J]. Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering, 2016, 16(2): 207-218.

[15] Yao B, Cai Z, Lu J, et al. Novel laser triangulation measurement method for screw rotor profile under multi-factor constraints[J]. Measurement, 2020, 152: 107317.

[16] Dobrzanski P, Pawlus P. Digital filtering of surface topography: part II. Applications of robust and valley suppression filters[J]. Precision Engineering, 2010, 34(3): 651-658.

作者简介:

周禹成(2000—),男,硕士研究生,主要研究方向为齿轮光学精密测量;

赫东锋(1975—),男,博士,副教授,主要研究方向为精密测量测试技术与智能机械。