

文章编号 1004-924X(2016)02-0390-08

齿轮误差三维评定方法

张 白^{1*}, 石照耀², 林家春²

(1. 北方民族大学 电气信息工程学院, 宁夏 银川 750021;

2. 北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124)

摘要:研究了齿轮误差三维评定方法,以消除测量仪器定位误差对齿轮误差评定的影响,提高齿轮测量仪器的测量精度。分析了传统齿轮二维评定方法的弊端,提出将齿轮误差评定从二维评定模式转变为三维评定模式。该评定模式不再要求齿轮各项误差测量点位于特征面内,实现了三维空间内的齿轮误差测量与评定。为提高齿轮三维误差评定算法的效率,通过螺旋降维方法将三维数据降至二维数据,再对二维测量数据进行各项误差的评定。以特大型齿轮激光跟踪在位测量系统作为实验对象,对 4 级标准齿轮的齿廓误差进行了测量,并与传统的齿轮二维误差评定方法以及德国 ZEISS 公司 InvolutePro 软件的评定结果进行了对比。结果表明:传统齿轮二维误差评定方法有较大误差,三维齿廓评定方法与德国 ZEISS 公司 InvolutePro 软件评定结果一致,精度达到 $0.1 \mu\text{m}$,证明了提出的齿廓误差三维评定方法完全正确,可以消除仪器定位误差对测量结果的影响,提高了测量仪器的测量精度。

关键词: 齿轮测量; 定位误差; 三维评定; 螺旋降维法

中图分类号: TG86 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162402.0390

Three-dimensional coordinate evaluation method of gear errors

ZHANG Bai^{1*}, SHI Zhao-yao², LIN Jia-chun²

(1. College of Electrical and Information Engineering,
Beifang University of Nationalities, Yinchuan 750021, China;

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

* Corresponding author, E-mail: zhangbai6402@163.com

Abstract: A three-dimensional coordinate evaluation method for gear errors was explored to eliminate the influence of positioning error of a measurement instrument on the measurements and evaluations of a gear and to improve the measuring accuracy. The traditional two-dimensional gear error evaluation method was analyzed, and then the gear error evaluation model was changed from two-dimensional evaluation model into three-dimensional evaluation model. In the three-dimensional evaluation model, the measurement points of gear error were not required in the characteristic surface, and error measurement and evaluation of gear could be realized in a three-dimensional space. Furthermore, to im-

收稿日期: 2015-08-03; 修订日期: 2015-10-20.

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目(No. 2010ZX04014-091); 宁夏自然科学基金重点项目(No. NZ14098)

prove the efficiency of three-dimensional evaluation algorithm of gear errors, three-dimensional data were reduce to two-dimensional data by using spiral dimensionality reduction method, and the error evaluation of two-dimensional measurement data were carried out. By taking the in-site measurement system with laser tracker for megagear as an experimental object, the profile error of a 4 level standard gear was measured, and obtained results were compared with that of the traditional two-dimensional gear error estimation method and the evaluation results from the InvolutePro software of German ZEISS company. The experimental results indicate that the traditional two-dimensional evaluation method has a bigger error, but the proposed three dimensional evaluation method can obtain the same evaluation results with the software of InvolutePro of German ZEISS company, and the algorithm precision reaches $0.1 \mu\text{m}$. The results verify that proposed three dimensional evaluation method is correct. It eliminates the influence of instrument positioning precision on gear error measurement and improves the measurement precision of gear measuring instruments.

Key words: gear measurement; positioning error; three-dimensional evaluation; spiral dimensionality reduction method

1 引 言

齿轮传动是最常用的机械传动形式之一,广泛应用于机床、汽车、船舶、工程机械等各个领域^[1]。目前,对齿轮质量的要求也越来越严,特别是在汽车产业中,要求齿轮 100%检测,这也为齿轮测量仪器及技术提供了新的发展机遇。齿轮误差测量方式包括单项误差测量、综合误差测量及整体误差测量 3 种^[2]。从控制齿轮加工质量出发,一般采用单项误差检测;从控制齿轮使用质量出发,一般采用综合误差检测;齿轮整体误差测量系统可以同时获得齿轮单项误差与综合误差。为指导齿轮加工参数的设置,企业广泛使用单项误差对齿轮质量进行测量与控制。齿轮单项误差的测量仪器主要包括齿轮测量中心和三坐标测量机,齿轮测量中心通常采用圆柱坐标进行测量^[3],而三坐标测量机通常采用笛卡尔坐标进行测量^[4]。齿轮的精度标准要求齿轮在测量与评定过程中要严格按照各项误差的定义进行。以坐标测量机为例,测量渐开线齿廓时,要求测头在同一齿轮端截面进行测量,而实际坐标测量机测量齿廓偏差时,由于坐标测量机自身也有定位误差,很难保证在同一截面进行测量,这就造成误差测量与评定标准不一致的问题^[4,5]。为此,本文开展了齿轮误差三维评定方法的研究,以消除测量仪器定位误差对于齿轮误差评定的影响,提高齿轮测量仪器的测量精度。

2 齿轮误差测量模型及算法

2.1 齿廓误差

2.1.1 二维齿廓误差定义

齿轮精度标准 ISO—1328 中关于齿廓误差的定义为实际齿廓偏离设计齿廓的量,在端平面内且垂直于渐开线齿廓的方向记值,本文称之为二维齿廓误差定义。齿廓各误差项定义如图 1 所示。

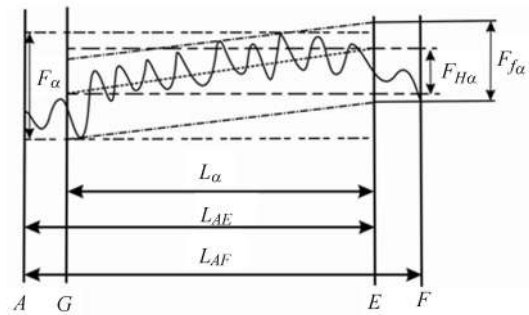


图 1 齿廓误差定义

Fig. 1 Definition of tooth profile error

其中 F_α 表示齿廓总偏差, $F_{f\alpha}$ 表示齿廓形状偏差, $F_{H\alpha}$ 表示齿廓倾斜偏差, L_{AF} 表示可用长度, L_{AE} 表示有效长度, L_α 表示齿廓计值范围。

2.1.2 齿廓测量路径规划

在直角坐标系中,任意一条渐开线对应唯一一个渐开线起始角 φ , 如图 2 所示。直角坐标系

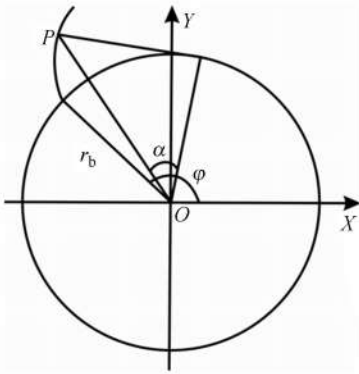


图 2 渐开线齿廓模型

Fig. 2 Model of involute tooth profile

下的渐开线方程如式(1)所示^[6]:

$$\begin{cases} x = \frac{r_b}{\cos \alpha} \times \cos(\varphi - \text{inv}(\alpha)) \\ y = \frac{r_b}{\cos \alpha} \times \sin(\varphi - \text{inv}(\alpha)) \end{cases}, \quad (1)$$

齿轮工件坐标系建立方法通常是以齿厚中部或齿槽中部构建 X 轴,此时,每个齿廓对应的理论渐开线起始角 φ 则唯一确定,根据齿廓误差测量方式规划齿廓采样点 P_i ,将点 P_i 对应的压力角 α_i 代入式(1),即可求出每个离散点在齿轮工件坐标系下的坐标值。

2.1.3 二维齿廓误差计算方法

根据渐开线的性质可知,每一个齿廓测量点 P_i 对应唯一一个渐开线起始角 φ_i ,因此可根据齿廓误差测量点的直角坐标值反求出每点对应的渐开线起始角 φ_i ,计算公式如式(2)与式(3)所示:^[6]

$$\alpha_i = \arccos\left(\frac{r_b}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}\right), \quad (2)$$

$$\varphi_i = \arccos\left(\frac{x_i \times \cos \alpha_i}{r_b}\right) + \tan \alpha_i - \alpha_i, \quad (3)$$

则各点齿廓测量误差的计算公式如下^[6]:

$$\varepsilon_i = r_b \times (\varphi_i - \varphi), \quad (4)$$

式中: φ 为理论渐开线起始角,由式(4)可以计算出各点对应的齿廓误差值,再根据齿廓误差评定原则对齿廓误差曲线进行评定^[7,8]。

上述渐开线齿廓误差评定算法为二维平面内的评定算法,实际测量过程中,由于测量仪器存在定位误差,造成实际测量齿廓不在一个端截面内,从而使算法产生较大误差。

2.1.4 三维齿廓误差定义

为消除测量仪器的定位误差对齿廓测量的影响,本文提出三维齿廓误差:以理论端截面齿廓为基准进行齿廓测量,实际齿廓测量点偏离理论渐开螺旋面的量^[6],在端平面内且垂直于渐开线齿廓的方向计值。由于不同截面齿廓误差测量点中同时包含螺旋线误差,为表征齿廓误差中螺旋线误差的影响程度,本文同时提出了三维齿廓误差截面偏移量 F_m ,其定义为齿廓误差测量数据中齿轮廓轴方向的最大距离。 F_m 越小,三维齿廓误差评定结果越接近常规齿廓误差评定结果, F_m 越大,三维齿廓误差评定结果中螺旋线误差的影响越大。

2.1.5 三维齿廓误差评定算法

根据定义可知,三维齿廓误差需要通过计算测量点到理论渐开螺旋面的距离得到。北京工业大学石照耀教授与林虎博士提出的齿轮多自由度方法可以实现回归求解齿面自由度参数,即可实现理论渐开螺旋面的拟合,再根据点到渐开螺旋面距离公式求解各点的三维齿廓误差^[9]。但该方法实现过程复杂,算法难度大,效率低。为实现三维齿廓误差的快速评定,本文考虑通过螺旋降维法实现三维齿廓误差与二维齿廓误差的快速转换,即通过坐标变换将实际齿廓测量点通过螺旋运动变换至同一齿轮端截面上,再利用公式(4)对同一端截面上的测量点进行齿廓误差计算。该方法将点到渐开螺旋面的距离变换为点到渐开线的距离,具体算法描述如下:设一条齿廓线的各测量点以 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 表示,其中 i 表示测量点数, $i=1, \dots, N_0$,设齿轮导程为 P_z ,每一个测量点 P_i 相对于理论齿廓端截面高度 z_0 的螺旋运动角的计算公式如式(5)所示。通过式(6)将齿廓测量点 P_i 变换至理论齿廓端截面上,变换后的测量点坐标表示为 $P'_i(x'_i, y'_i, z_0)$ 。再利用式(3)与式(4)计算各测量点的齿廓误差,并根据齿轮精度标准中齿廓各误差项的定义对其进行误差评定^[6]。

$$\Delta\beta_i = \lambda \times \frac{z_i - z_0}{P_z} \times 2\pi, \quad (5)$$

式中 λ 表示螺旋方向,左旋时 $\lambda = -1$,右旋时 $\lambda = 1$ 。

$$\begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\Delta\beta_i) & \sin(\Delta\beta_i) & 0 \\ -\sin(\Delta\beta_i) & \cos(\Delta\beta_i) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

式中 $\Delta\beta_i$ 表示螺旋角, (x_i, y_i) 表示原始测量点 P_i 的坐标, (x'_i, y'_i) 表示变换后测量点的坐标。

2.2 螺旋线误差

2.2.1 螺旋线误差定义

齿轮精度标准 ISO-1328 关于螺旋线误差的定义为实际螺旋线偏离设计螺旋线的量。其误差定义如图 3 所示。

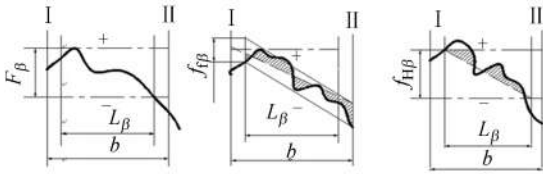


图 3 螺旋线误差定义

Fig. 3 Definition of helix error

其中 F_β 表示螺旋线总偏差, f_β 表示螺旋线形状偏差, $f_{\beta\beta}$ 表示螺旋线倾斜偏差, b 为齿宽。 L_β 为计值长度。

2.2.2 螺旋线测量路径规划

螺旋线误差通常采用等距采样策略进行测量,以理论起测点 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ 作为螺旋线的运动参考点,根据等距间隔 Δd 计算各螺旋线测量路径点相对于理论起测点 P_0 的螺旋升角 $\Delta\beta_i$,计算公式如式(7)所示:

$$\Delta\beta_i = \lambda \times \frac{i \times \Delta d}{P_z} \times 2\pi, \quad (7)$$

式中 λ 表示螺旋方向,左旋时 $\lambda = -1$,右旋时 $\lambda = 1$ 。

旋转坐标系即可求出螺旋线各采样路径点的直角坐标。

2.2.3 二维螺旋线的误差评定方法

常规螺旋线误差的坐标式评定方法是计算实际螺旋线误差测量点与理论螺旋线的偏移量。根据螺旋线的性质可知,每一个螺旋线测量点 P_i 对应的相对螺旋升角 $\Delta\beta_i$ 是唯一的,根据坐标系变换将各测量点 P_i 变换至理论起测点 P_0 所在截面高度的平面内,比较变换后各测量点 P'_i 与理论起测点 P_0 的距离,再根据螺旋线误差评定原则对螺旋线误差曲线进行评定^[7,8]。

而实际螺旋线测量过程中,由于测量仪器自身存在定位误差,使得实际测量螺旋线不在一个圆柱面内,因此将不可避免地把齿廓误差引入到螺旋线误差评定中,从而造成其评定结果不准

确^[6]。

2.2.4 三维螺旋线误差定义

为消除测量仪器定位误差对螺旋线误差评定的影响,本文提出三维螺旋线误差的定义:以理论螺旋线为基准进行螺旋线测量,实际螺旋线测量点偏离理论渐开螺旋面的量^[6],在端平面内且垂直于渐开线齿廓的方向计值。由于螺旋线误差测量点中同时包含齿廓误差。为表征螺旋线误差中齿廓误差的影响程度,本文同时提出了三维螺旋线误差径向偏移量 $F_{r\beta}$ 的概念,其定义为螺旋线误差测量数据中的径向偏移距离。 $F_{r\beta}$ 越小,三维螺旋线的误差评定结果越接近二维螺旋线的误差评定结果, $F_{r\beta}$ 越大,三维螺旋线的误差评定结果中齿廓误差的影响越大。

2.2.5 三维螺旋线误差的评定方法

根据定义可知,三维螺旋线误差仍然需要通过计算测量点到理论渐开螺旋面的距离得到。采用齿轮多自由度方法同样可以计算出三维螺旋线误差^[9]。但为了避免齿轮多自由度的算法效率低,算法复杂度高的缺陷,本文采用自行设计的螺旋降维法计算点到渐开螺旋面的距离。

根据螺旋线的性质可知,每一个螺旋线的测量点 P_i 对应唯一的螺旋升角 $\Delta\beta_i$,故可根据螺旋线误差测量点的直角坐标值反求出每点对应的相对渐开线起始角 $\Delta\varphi_i$,计算公式如式(8)所示:

$$\Delta\varphi_i = \arccos\left(\frac{x_i \times \cos \alpha_i}{r_b}\right) + \tan \alpha_i - \alpha_i + \Delta\beta_i, \quad (8)$$

再由式(4)计算出各点的三维螺旋线误差量,并根据齿轮精度标准的各螺旋线误差项的定义对其进行误差评定。

3 测头半径对测量路径的影响

由于测头半径的影响,齿轮测量过程中测头接触点的坐标与测头的球心坐标不一致,因此需要在测头路径规划时将测头半径的影响引入到路径规划中^[10]。齿轮测量过程中,测头半径对于直齿轮与斜齿轮的影响不同,下面分别对其进行分析。

3.1 直齿轮采样路径规划

直齿轮齿廓测量过程中,由于测头半径的影响,测头球心点坐标与接触点坐标在 Z 轴上的分

量一致,但两者之间对应的渐开线压力角不同,如图 4 所示。

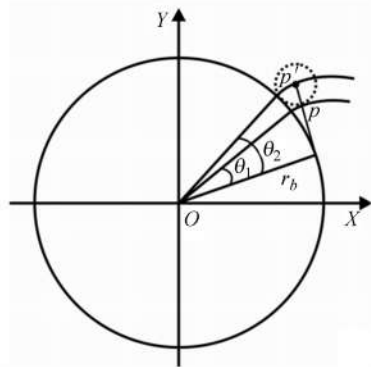


图 4 测头半径对直齿轮测量点位置的影响

Fig. 4 Influence of probe's radius on position of measurement point of spur gear

由图 4 可得,对于测头半径为 r_p ,基圆半径为 r_b 的齿轮齿廓进行测量路径规划时,要保证测头接触点对应的渐开线压力角为 α_i ,测头球心对应的渐开线压力角应为 $\arctan(\frac{r_b \times \tan \alpha_i + r_p}{r_b})$ 。

3.2 斜齿轮采样路径规划

斜齿轮齿廓测量过程中,受测头半径的影响,测头球心点坐标与接触点坐标对应的渐开线压力角不同,另外受螺旋角的影响,两者在 Z 坐标的分量也不相同,如图 5 所示^[6,9]。

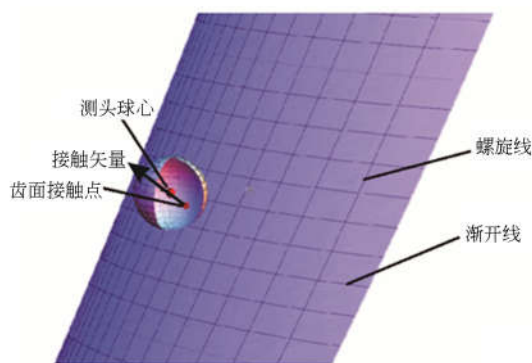


图 5 测头半径对斜齿轮测量点位置的影响

Fig. 5 Influence of probe's radius on position of measurement point of helix gear

斜齿轮的齿面为渐开螺旋面,其可以看作是齿廓线(u 线)和螺旋线(v 线)的合成运动,以压力角 α 为参数 u , z 坐标为参数 v , φ 为渐开线起始

角。设 f 为齿面方向,左齿 $f = -1$. 则渐开螺旋面的方程可以表示为式(9)^[6,9]:

$$r(u, v) = \begin{pmatrix} \frac{r_b}{\cos u} \times \cos(\frac{v \times 2\pi}{p_z} + \varphi - f \times \text{inv}(u)) \\ \frac{r_b}{\cos(u)} \times \sin(\frac{v \times 2\pi}{p_z} + \varphi - f \times \text{inv}(u)) \\ v \end{pmatrix}, \tag{12}$$

对公式(9)分别求偏导,则可得 $r_u(u, v)$ 与 $r_v(u, v)$, 接触矢量 $n(u, v) = \frac{r_u(u, v) \times r_v(u, v)}{|r_u(u, v) \times r_v(u, v)|}$, 根据接触矢量与测量半径即可求得测头球心的测量路径^[6]。

4 测头半径对测量结果的影响

坐标测量法中,齿轮各项误差的测量点是以测头球心坐标给出的,而实际测头齿面接触点与测头球心点所对应的渐开线发生线长度不同^[11],在齿廓误差评定标准中,起评点与终评点是以渐开线发生长度进行计算的,因此需要通过测头接触点反推测头球心点的齿廓起评点与终评点。

4.1 直齿轮的误差评定

对于直齿轮,设测头半径为 r_p ,测头与齿面的接触点所在渐开线的发生线长度为 l_p ,测头球心所在渐开线的发生线长度为 l'_p ,且 $l'_p - l_p = r_p$,这对齿廓误差评定尤为重要,若不考虑测头半径的影响,则会造成齿廓误差起评点与终评点的计算错误,如图 6 所示。

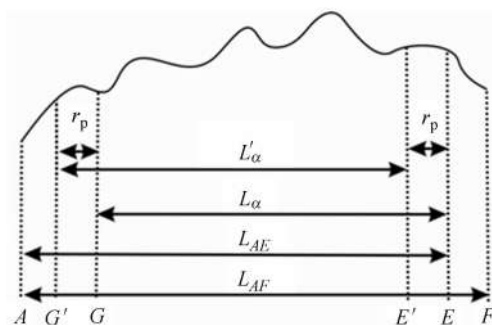


图 6 测头半径对齿廓误差评定的影响

Fig. 6 Influence of radius of probe on profile error evaluation

由图 6 可知,未考虑测头半径时,齿廓误差评定范围为 L_α ,考虑测头半径时,齿廓误差评定范围为 L'_α 。

对于直齿轮,测头半径仅对齿廓误差评定产生影响,螺旋线误差按照测头球心点坐标直接进行评定即可。

4.2 斜齿轮的误差评定

对于斜齿轮,测头半径的计算相对复杂,以左齿面齿廓测量为例,设齿面测量点的坐标为 $(x_i, y_i, z_i), i=1, 2, \dots, n$, 则测量点对应渐开线起始角为 $\varphi_i = \arccos(\frac{x_i \times \cos \alpha_i}{r_b}) + \tan \alpha_i - \alpha_i$; 压力角为 $\alpha_i = \arccos(\frac{r_b}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}})$, 将它们带入式 (12) 后求偏导, 即可求得测量点对应的接触矢量 $\mathbf{n}_i = \frac{r_u(\alpha_i, z_i) \times r_v(\alpha_i, z_i)}{|r_u(\alpha_i, z_i) \times r_v(\alpha_i, z_i)|} |_{\varphi_i}$ 。设 Z 轴单位矢量为 $\mathbf{e}_3 = (0, 0, 1)$, 则测头端面的等效半径 $r_{tp} = r_p \times \sin(\arccos(\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{e}_3))$, 对齿廓误差数据进行误差评定时, 需将测头端面等效半径考虑进去。

斜齿轮的螺旋线误差精确评定同样需要考虑测头半径的影响, 此时按照上述方法计算测头的轴向等效半径 $r_{ap} = r_p \times \cos(\arccos(\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{e}_3))$, 并根据轴向等效测头半径 r_{ap} 确定螺旋线起评点与终评点。由于实际应用中齿轮螺旋角与测头半径较小, 对螺旋线误差评定的影响也较小, 故在实际计算过程中可以不考虑测头半径对斜齿轮螺旋线误差评定的影响。

5 测量实验与结果

为验证齿轮误差三维评定方法的性能, 文中以齿廓测量为例, 使用特大型齿轮激光跟踪在位测量系统对其进行测量, 如图 7 所示^[12]。



图 7 特大型齿轮激光跟踪在位测量系统

Fig. 7 In-site measurement system with laser tracker for mega gear

所选齿轮为 4 级标准齿轮, 齿轮参数如下:

齿轮类型为外齿轮, 螺旋方向为右旋, 模数为 16 mm, 齿数为 58, 压力角为 20°, 螺旋角为 12°, 齿宽为 280 mm, 齿轮外径为 980.730 mm。传统的二维误差评定方式的计算结果如表 1 所示, 误差曲线如图 8 所示。三维误差评定方法计算的齿廓误差如表 2 所示, 误差曲线如图 9 所示。采用德国 ZEISS 公司 InvolutePro 软件获得的评定结果如表 3 所示。由测量结果可知: 对于相同的齿廓测量数据, 齿廓三维评定方法与传统二维评定方法的结果差异较大, 而三维齿廓评定方法对测量数据的评定结果与德国 ZEISS 公司 InvolutePro 软件评定结果一致, 这表明三维齿廓误差评定方法完全正确, 可以消除仪器定位误差对测量结果的影响。

表 1 传统二维误差评定结果

Tab. 1 Results of traditional two-dimensional error evaluation method (μm)

测量项目	左齿面	右齿面
F_α	5.9	4.9
F_{fa}	5.7	4.3
$F_{H\alpha}$	-2.4	3.1

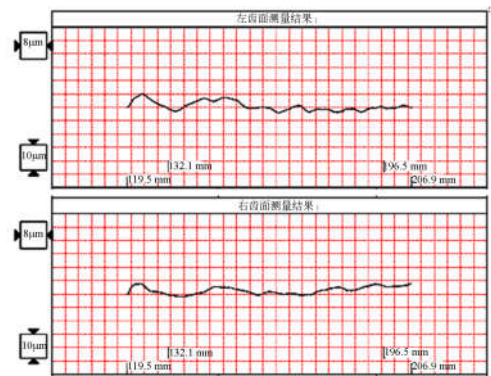


图 8 传统二维误差评定曲线

Fig. 8 Error curves for traditional two-dimensional evaluation method

表 2 三维误差评定结果

Tab. 2 Results of error for three-dimensional error evaluation method (μm)

测量项目	左齿面	右齿面
F_α	5.3	4.5
F_{fa}	5.1	3.3
$F_{H\alpha}$	-2.9	2.9

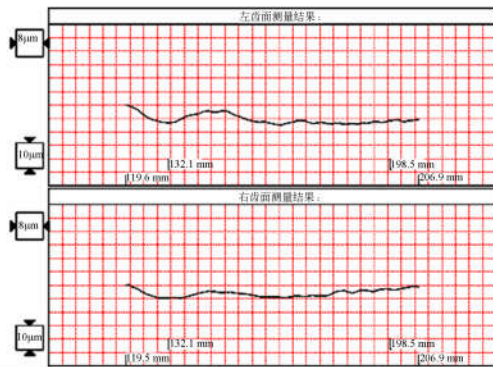


图 9 三维误差评定曲线

Fig. 9 Error curves of three-dimensional evaluation method

表 3 InvolutePro 软件误差评定结果

Tab. 3 Error evaluation results by InvolutePro software(μm)

测量项目	左齿面	右齿面
F_a	5.3	4.5
F_{fa}	5.1	3.3
F_{Ha}	-2.9	2.9

参考文献:

- [1] GOCH G. Gear metrology[J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2003, 52(2):659-695.
- [2] 柏永新. 齿轮精度与综合检验[M]. 上海:上海科学技术出版社,1986.
BAI Y X. *Gear Accuracy and Comprehensive Inspection* [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers,1986. (in Chinese)
- [3] 石雪梅. 基于齿轮测量中心的渐开线圆柱齿轮的测量与评定[D]. 天津:天津大学,2009.
SHI X M. *Measurement and evaluation of involute cylindrical gear based on gear measurement center* [D]. Tianjin: Tianjin University,2009. (in Chinese)
- [4] LOTZE W. *Zahnradmessung Mit Koordinaten Messgeräten*[M]. Dresden, Germany: Eigenverlag,2006.
- [5] 石照耀, 张宇, 张白. 三坐标机测量齿轮齿廓的不确定度评价[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(4):766-771.
SHI ZH Y, ZHANG Y, ZHANG B. Uncertainty evaluation of CMM measurement for gear profile [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4):766-771. (in Chinese)
- [6] 张白. 特大型齿轮激光跟踪在位测量系统及关键技术研究[D]. 北京:北京工业大学,2013.

6 结 论

本文通过分析传统齿轮二维评定方法的缺陷,提出了齿轮误差的三维评定方法,分析了测头半径对于齿轮测量的影响,并对齿廓误差与螺旋线误差进行了详细介绍。采用特大型齿轮激光跟踪在位测量系统对 4 级标准齿轮进行了测量,分别采用传统齿轮二维误差评定方法、齿轮误差三维评定方法以及德国 ZEISS 公司 InvolutePro 软件进行误差评定。通过比较评定结果发现传统齿轮二维误差评定方法有较大误差,三维齿廓评定方法与德国 ZEISS 公司 InvolutePro 软件的评定结果一致,精度可达 $0.1 \mu\text{m}$,这证明了齿廓误差三维评定方法完全可以消除仪器定位误差对测量结果的影响,提高了测量仪器的测量精度。由于齿廓三维评定方法与螺旋线三维评定方法的定义以及评定方法原理上一致,这也进一步证明了齿轮误差三维评定方法的正确性与准确性。

ZHANG B. *Research on key technology and measurement system of in-site measurement system with laser tracker for mega gear*[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013. (in Chinese)

- [7] 石照耀,张白,林家春,等. 特大型齿轮激光跟踪在位测量原理及关键技术[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(9):2340-2347.
SHI ZH Y, ZHANG B, LIN J CH, *et al.*. Principle and critical technology of in-site measurement system with laser tracker for mega gear[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(9):2340-2347. (in Chinese)
- [8] HÄRTIG F, KRYSTEK MP, KLEIN S. Reliable detection of periodic micro structures on open surfaces [J]. *Key Engineering Materials*, 2008, 381-382: 15-18.
- [9] 石照耀,林虎. 齿轮误差多自由度理论[J]. *机械工程学报*, 2013, 50(1):55-60.
SHI ZH Y, LIN H. Multi-degrees of freedom theory for gear deviation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 50(1):55-60. (in Chinese)
- [10] 宋远,叶寒,涂海宁. 运动误差对齿轮螺旋线偏差测量的影响[J]. *机械设计与制造*, 2013, (7):129-130.
SONG Y, YE H, TU H N. The influence about

- motion error on gear helix deviation measurement [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2013, (7):129-130. (in Chinese)
- [11] 李春,刘书桂. 三坐标测量机的测头半径补偿与曲面匹配[J]. *仪器仪表学报*, 2003, 24(4):145-147.
LI CH, LIU SH G. The probe radius compensation of free-form surface and surface matching[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2003, 24(4):145-147. (in Chinese)
- [12] 张白,石照耀,林家春. 齿轮激光跟踪在位测量的姿态调整模型[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2014, 35(5):607-612, 636.
ZHANG B, SHI ZH Y, LIN J CH. Attitude adjustment models of an in-site gear measurement system with a laser tracker [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2014, 35(5):607-612, 636. (in Chinese)

作者简介:



张 白(1981—),男,内蒙古人,博士,讲师,2010年、2014年于北京工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事现代精密测控技术与仪器的研究。E-mail: zhangbai6402@163.com



石照耀(1964—),男,湖南岳阳人,博士,教育部长江学者特聘教授,博士生导师,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,现为北京市精密测控技术与仪器工程技术研究中心主任,主要从事精密测试技术与仪器、齿轮工程方面的研究。E-mail: shizhaoyao@bjut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)