

文章编号 1004-924X(2013)09-2340-08

特大型齿轮激光跟踪在位测量原理及关键技术

石照耀¹, 张 白^{1*}, 林家春¹, 魏华亮², 陈显民²

(1. 北京工业大学 机械与应用电子技术学院, 北京 100124;

2. 哈尔滨量具刃具集团有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: 为了实现特大型齿轮精密测量, 介绍了作者提出的特大型齿轮激光跟踪在位测量原理, 重点阐述了其中的几项关键技术。特大型齿轮激光跟踪在位测量系统整合了激光跟踪仪的大尺寸测量能力和三坐标测量机的高精度, 采用激光跟踪仪建立齿轮工件坐标系和三维测量平台坐标系, 通过激光跟踪仪坐标系将齿轮工件坐标系与三维测量平台坐标系关联起来, 并建立了相应坐标系的拟合模型及算法。同时, 建立了三维测量平台的姿态调整模型, 通过姿态调整机构完成了三维测量平台的姿态调整, 进而确保三维测量平台与齿轮轴线的位置关系满足要求。最后, 给出了该在位测量系统的实测结果。实验结果表明: 特大型齿轮激光跟踪在位测量系统原理正确可行, 满足 6 级以下特大型齿轮的精密测量。

关键词: 特大齿轮; 齿轮测量; 激光跟踪仪; 在位测量; 姿态调整

中图分类号: TN249; TG86 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132109.2340

Principle and critical technology of in-site measurement system with laser tracker for mega gear

SHI Zhao-yao¹, ZHANG Bai^{*}, LIN Jia-chun¹, WEI Hua-liang², CHEN Xian-min²

(1. College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Harbin Measuring & Cutting Tool Group Co., Ltd., Harbin 150040, China)

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

Abstract: To perform precise measurement on mega gears, the principle of mega-gear in-site measurement system with laser tracker and corresponding key techniques are originally introduced. Considering the mega-gear in-site measurement system with laser tracker integrates the large-scale measurement capacity of laser tracker and the high accuracy of coordinate measuring machine, the laser tracker is used to establish the coordinate system both for mega gears and the Three-coordinate Measurement Platform (TMP), thereby, their coordinate systems are associated by the coordinate system of the laser tracker, and the module and algorithm of coordinate system fitting are proposed simultaneously. Meanwhile, a novel module of attitude adjustment of TMP is established, which can be accomplished by the system of attitude adjustment to ensure that the position relationship between TMP and the axis of gear can meet the measuring requirements. The results illustrate that the principle of mega-gear in-site measurement system with laser tracker is correct and feasible, and in consequence it can meet

收稿日期: 2013-04-12; 修订日期: 2013-04-30.

基金项目: 国家科技重大专项资助项目 (No. 2010ZX04014-091)

the six grade precision measurement requirements of mega gears.

Key words: mega gear; gear measurement; laser tracker; in-site measurement; attitude adjustment

1 引言

特大型齿轮通常是指直径大于 3 000 mm 的齿轮,主要应用于发电、建材、舰船、矿山机械、海洋工程等领域,在国民经济及国防建设中起着重要作用。

齿轮的精度对齿轮的使用寿命和性能有直接而重大的影响。因此,对齿轮进行测量、控制其质量历来是机械测量的重点。近年来,随着关键装备对特大型齿轮使用要求的不断提高以及特大型齿轮加工工艺水平的快速提升,特大型齿轮的精度较以前也有了大幅提高,因此特大型齿轮的检测越来越被重视。

齿轮测量主要有两种方式^[1-2]:一是将被测齿轮置于仪器上进行测量,主要仪器是齿轮测量中心和三坐标测量机;另一种是“在位测量”。在位测量又分为在机床上对齿轮进行测量的“在机测量”和将仪器置于齿轮上的“上置式测量”。

目前,特大型齿轮测量仪器主要有:(1)德国 Klingelnberg 研制的 P350 齿轮测量中心,其可测工件最大直径为 3 800 mm;(2)德国 Wenzel 公司研制的 WGT6000,可测齿轮最大直径为 6 000 mm;(3)德国 Leitz 公司生产的大型坐标量机 PMM-G,可测量空间为 7 000 mm×4 000 mm×3 000 mm,可测齿轮最大直径为 6 000 mm(需要分段测量)。理论上讲,直径 6 000 mm 以下的齿轮测量问题已得到解决,但上述量仪不适用于生产现场,且大型齿轮搬运不便,在仪器上的安装调试困难,限制了这类仪器的应用。

对特大型齿轮而言,传统的在位测量(上置式测量和在机测量)的关键问题是如何精确确定测量装置与被测齿轮的位置关系,也即测量基准难以确定。基准不准确,测量精度就无法保证。对在机测量而言,测量精度又严重依赖机床的原始精度。因此,如何提高测量精度一直是困扰传统的上置式测量和在机测量的难题^[3-4]。

2 激光跟踪在位测量原理

在位测量中如何确立测量仪器与被测齿轮的位置关系,可分解为两个基本问题:其一是根据齿轮的位置如何确定测量仪器的姿态;其二是齿轮轴线(或基准面)与测量仪器的真实空间距离的确定。围绕这 2 个关键问题,作者提出了特大型齿轮的激光跟踪在位测量方法^[5-7]。

本方法利用激光跟踪仪在大尺寸测量和定位方面的优点,将激光跟踪仪用于确定被测齿轮和三维测量平台的位置关系(如图 1 所示),通过建立工件坐标系和测量坐标系的精确关系,实现齿轮特征线的测量。

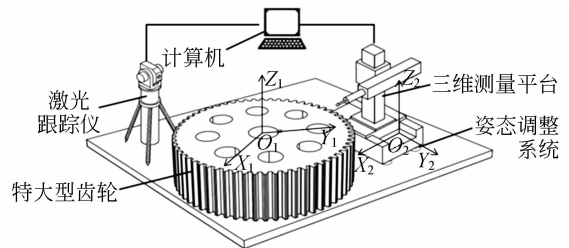


图 1 特大型齿轮测量系统结构图

Fig. 1 Configuration of measurement system for mega gear

利用激光跟踪仪在被测齿轮定位特征上采集数据点建立工件坐标系 σ_1 , 将激光跟踪仪的靶镜安装在三维测量平台的移动臂上, 控制三维测量平台分别沿着各坐标轴进行运动, 在运动过程中使用激光跟踪仪测量靶镜沿着各坐标轴移动的坐标点, 通过坐标系拟合算法建立三维测量平台坐标系 $\sigma_2(O_2; X_2, Y_2, Z_2)$ 。根据三维测量平台与被测齿轮的方位, 对三维测量平台进行姿态调整, 使两者的位置关系满足测量要求。然后, 利用激光跟踪仪重新建立三维测量平台的坐标系统 $\sigma_3(O_2; X_2, Y_2, Z_2)$, 通过坐标变换建立被测齿轮坐标系 σ_1 和三维测量平台坐标系 σ_3 的关系:

$$\sigma_1 \rightarrow \sigma_3: \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 - x_0 \\ y_1 - y_0 \\ z_1 - z_0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: (x_1, y_1, z_1) 为点在 σ_1 中的坐标, (x_2, y_2, z_2) 为点在 σ_3 中的坐标, (x_0, y_0, z_0) 为 σ_3 的坐标原点在 σ_1 中的坐标, $a_{ij} = \mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}_j = \cos(\mathbf{e}_i, \mathbf{e}_j)$, $(i=1, 2, 3; j=1, 2, 3)$ 表示坐标系 σ_3 与坐标系 σ_1 各坐标轴之间的夹角的余弦。

确定了三维测量平台和被测齿轮的位置关系后, 就可以对其齿廓、螺旋线、接触线、齿厚等参数进行测量。

齿面特征线包括: 齿廓、螺旋线和接触线。测量齿廓偏差时, 锁定三维测量平台的 Z 轴(图 1 所示 Z_2), 仅在 XY 平面内移动测头进行齿廓数据的获取; 测量螺旋线偏差时, 三维测量平台的 X, Y, Z 3 个轴联动获取被测齿面上的一条螺旋线数据。采样获得的数据含有三维测量平台定位误差, 需进行误差修正。最后按相关标准法计算出齿廓和螺旋线偏差, 同时给出测量结果的不确定度。齿廓测量示意图如图 2(a) 所示, 螺旋线测量如图 2(b) 所示。

接触线位于齿轮基圆柱切平面内, 是条直线。进行齿轮接触线测量时, 只需 2 个坐标运动。首先根据被测齿轮的参数, 计算理论接触线轨迹, 然后控制三维测量平台的测头沿接触线轨迹运动, 理论接触线轨迹与实际接触线轨迹的差值即为接触线误差, 如图 2(c) 所示。

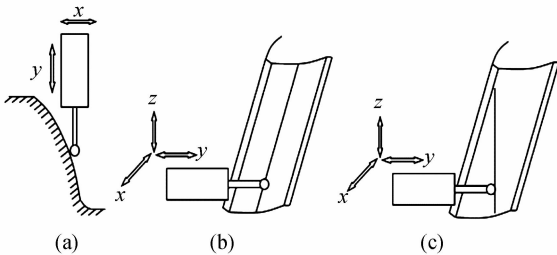


图 2 齿轮特征线测量

Fig. 2 Measurement of characteristic lines of gear

3 关键技术

3.1 齿轮工件坐标系的建立

利用激光跟踪仪测量齿轮内孔, 对其进行圆柱拟合, 可获得圆柱轴线方程, 即:

$$\frac{x - x_0}{l_{\text{laser}}} = \frac{y - x_0}{m_{\text{laser}}} = \frac{z - z_0}{n_{\text{laser}}}. \quad (2)$$

利用激光跟踪仪测量齿轮定位端面, 对其进行平面拟合, 即可获得平面方程, 即:

$$l_{\text{plane}}x + m_{\text{plane}}y + n_{\text{plane}}z + d = 0. \quad (3)$$

最后使用跟踪仪靶镜在齿轮左齿面测量一点, 得到齿面坐标点 $(x_{\text{flank}}, y_{\text{flank}}, z_{\text{flank}})$, 通过点线面方程可以获得齿轮工件坐标系。

使用齿轮内孔圆柱轴线(式(2))作为工件坐标系的 Z 轴, 即 $Z_w = (l_{\text{laser}}, m_{\text{laser}}, n_{\text{laser}})$, 计算齿轮端面方程(式(3))与内孔圆柱轴线的交点 O'_w , 设交点坐标为 (x'_0, y'_0, z'_0) , 设齿廓测量点 A 为 $(x_{\text{flank}}, y_{\text{flank}}, z_{\text{flank}})$, 令齿轮工件坐标系的 X 轴如式(4)所示。

$$X''_w = (x_{\text{flank}} - x'_0, y_{\text{flank}} - y'_0, z_{\text{flank}} - z'_0). \quad (4)$$

则工件坐标系的 Y 轴为 Z 轴与 X 轴的矢量积, 即 $Y'_w = Z'_w \times X''_w$, 利用 Y'_w 与 Z'_w 的矢量积即可求得 $X'_w = Y'_w \times Z'_w$, 通过以上步骤初步建立了一个齿轮工件坐标系 $O'_w X'_w Y'_w Z'_w$, 如图 3 所示。

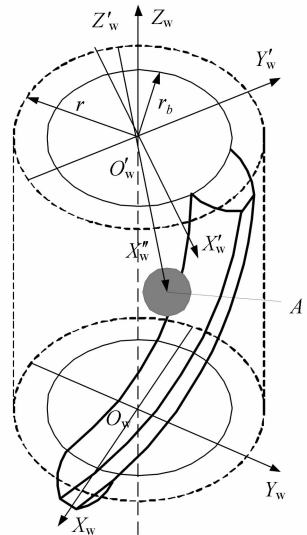


图 3 工件坐标系建立模型

Fig. 3 Establishment module of workpiece coordinate system

为方便齿轮测量路径的规划以及齿轮误差的评定, 将齿轮工件坐标系建立在齿轮下端的齿厚中部。简化的二维工件坐标系建立模型如图 4 所示。

其中 X 轴是齿厚中部分割线, 由图 4 可知:

$$\angle X'O'X = \eta + (\varphi - \theta). \quad (5)$$

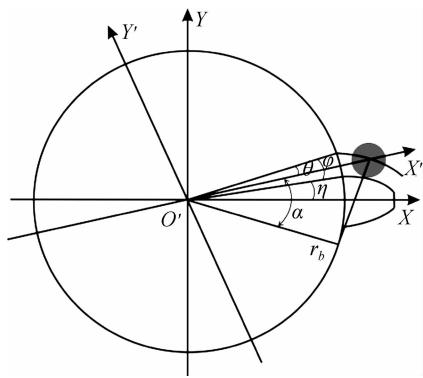


图 4 工件坐标系简化模型

Fig. 4 Simple module of workpiece coordinate system

其中: η 是 $\frac{1}{2}$ 基圆齿厚所对应的角度, $\varphi = \frac{r_p}{r_b}$ (式中 r_p 为测头半径, r_b 为基圆半径, $\theta = \tan \alpha - \alpha$ 。对于直齿轮而言,只需要将坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 旋转至 $O'-XYZ$,再将坐标系向下平移齿宽即完成特大型齿轮的工件坐标系建立。

对于斜齿轮而言,需考虑斜齿轮螺旋角的影响,如图 3 所示,齿廓测量点 A 距离齿轮定位端面距离设为 d_1 ,齿轮齿宽为 b ,齿轮导程为 P_z ,则为将齿轮工件坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 变换至齿轮下端面(定位端面为上端面)齿厚中部,则旋转角如式(6)所示,旋转方向与螺旋方向有关,右旋为负,左旋为正。

$$roll = \frac{b - d_1}{p_z} \times 2\pi. \quad (6)$$

3.2 三维测量平台坐标系建立

特大型齿轮激光跟踪在位测量系统中由于三维测量平台与齿轮工件的分离,必须使用激光跟踪仪建立三维测量平台的坐标系,进而实现三维测量平台与特大型齿轮的相互定位。对于三维测量平台坐标系而言,需要获取其坐标系矢量方向及坐标系原点。对于三维测量平台坐标系矢量方

向而言,通过坐标系最小二乘拟合算法^[8]可以获得,具体实现过程及数学模型如下:

首先,将激光跟踪仪的靶镜安装在三维测量平台的移动臂上,如图 5 所示,激光跟踪仪靶镜与三维测量平台测头固定在一起,控制三维测量平台分别从系统设置的固定点(可以不是机器坐标系原点)沿着各坐标轴分别进行运动,在运动过程中使用激光跟踪仪测量靶镜沿着各坐标轴移动的坐标点,对三维测量平台各轴测量数据点分别使用最小二乘法进行直线拟合,得到三维测量平台各轴的直线方程,由于三维测量平台自身误差及激光跟踪仪的测量误差,拟合得到的三维平台三轴不会交于一点,为此通过最小二乘法拟合求到一个距离三轴直线距离最小的点,此点即为当前拟合坐标系的原点(三维测量平台坐标系测量中设置的固定点,三维测量平台坐标系精确原点通过辅助装置进行精确测量),再由坐标系正交关系可得,在已知坐标系原点的情况下,坐标系仅有 5 个未知数,设计坐标系拟合算法,算法模型描述如下:求使所有测量点到所属测量轴距离的平方和最小的坐标系参数,数学模型如式(7)所示。

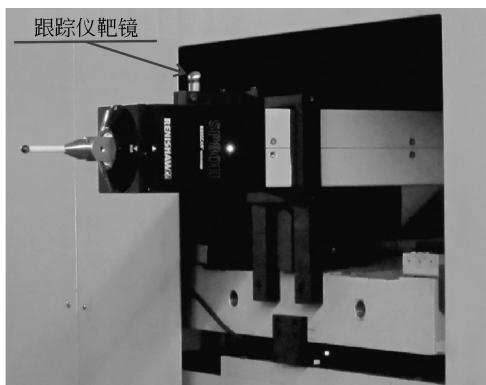


图 5 跟踪仪靶镜安装图

Fig. 5 Setting figure of reflector of laser tracker

$$\begin{cases} X_{sum} = \sum_{i=1}^{n_x} (w_X \times (x_i - x_0) - v_X \times (z_i - z_0))^2 + (u_X \times (z_i - z_0) - w_X \times (x_i - x_0))^2 + (v_X \times (x_i - x_0) - u_X \times (y_i - y_0))^2 \\ Y_{sum} = \sum_{i=1}^{n_y} (w_Y \times (x_i - x_0) - v_Y \times (z_i - z_0))^2 + (u_Y \times (z_i - z_0) - w_Y \times (x_i - x_0))^2 + (v_Y \times (x_i - x_0) - u_Y \times (y_i - y_0))^2 \\ Z_{sum} = \sum_{i=1}^{n_z} (w_Z \times (x_i - x_0) - v_Z \times (z_i - z_0))^2 + (u_Z \times (z_i - z_0) - w_Z \times (x_i - x_0))^2 + (v_Z \times (x_i - x_0) - u_Z \times (y_i - y_0))^2 \\ Min(X_{sum} + Y_{sum} + Z_{sum}) \end{cases}, \quad (7)$$

式中: (x_0, y_0, z_0) 为坐标系原点坐标, (x_i, y_i, z_i) 为测量点, (u_x, v_x, w_x) 为 X 轴方向矢量, (u_y, v_y, w_y) 为 Y 轴方向矢量, (u_z, v_z, w_z) 为 Z 轴方向矢量, n_x 为 X 轴测量点数, n_y 为 Y 轴测量点数, n_z 为 Z 轴测量点数。

通过坐标系拟合算法可以得到三维平台三轴坐标矢量,但由于设计中无法将跟踪仪靶镜精确安装在三维测量平台的测头球心位置,造成的坐标系拟合算法拟合出的坐标系相对于三维测量平台坐标系存在一个平移量,为此利用激光跟踪仪靶镜作为辅助装置实现三维测量平台坐标系原点的测量,首先使用三维测量平台测量跟踪仪靶镜球面,得到靶镜球心在三维测量平台坐标系下的坐标值,再使用激光跟踪仪测量靶镜,得到靶镜球心在激光跟踪仪坐标系下的坐标值,然后通过式(8)计算三维测量平台坐标系原点坐标。

$$\begin{bmatrix} x_{\text{CMM}} \\ y_{\text{CMM}} \\ z_{\text{CMM}} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \cdot \begin{bmatrix} x_{L-x} \\ y_{L-y} \\ z_{L-z} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

其中: (x_L, y_L, z_L) 为靶镜球心在激光跟踪仪坐标系下的坐标值, $(x_{\text{CMM}}, y_{\text{CMM}}, z_{\text{CMM}})$ 为靶镜球心在三维测量平台坐标系下的坐标值, (x, y, z) 为三维测量平台坐标系的原点在激光跟踪仪坐标系下的坐标值。A 为坐标系变换矩阵,其值是根据坐标系最小二乘法拟合得到的坐标系各轴向量计算得出。

解式(8)就可以得出三维测量平台坐标系原点在激光跟踪仪坐标系下的坐标值。将坐标系最小二乘法得到的坐标轴向量与式(8)得到的坐标系原点坐标值相结合就可以得到在激光跟踪仪坐标系下表示的三维测量平台坐标系。

3.3 姿态调整模型

在特大型齿轮测量中,为了提高齿轮测量精度,需要将齿轮工件坐标系与三维测量平台坐标系调整至平行,为此设计姿态调整结构实现三维测量平台的自动姿态调整^[8-12],调整结构的模型如图 6 所示。自动姿态调整硬件设计中将高度支撑点 A' 与 C' 所在直线同三维平台的 Y 轴(或者 X 轴)平行,通过调整 A' 与 C' 的电机支撑点的高度,可以将三维测量平台 Y 轴(或者 X 轴)调整到目标位置,再通过调整 B' 的电机,实现将 X 轴(或者 Y 轴)调整至目标位置,至此完成将三维测量平台调整至与齿轮工件坐标系 XY 平面平行的状态,再通过调整旋转电机 D', 最终实现三维测量平台坐标系与齿轮工件坐标系平行。

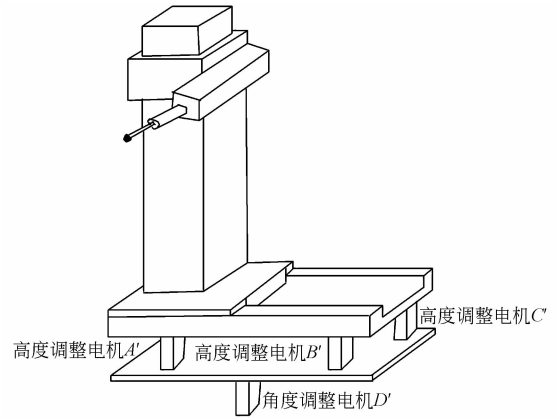


图 6 自动姿态调整的结构图

Fig. 6 Structure picture of auto attitude adjustment

3.4 数据处理算法和软件设计

数据处理算法是该仪器的核心,其中包括:工件坐标系和三维测量平台坐标系的建立;多次转站后三维测量平台采样数据的融合;齿轮几何参数、齿廓、螺旋线、接触线、齿厚、齿面拓扑误差等的路径规划与误差评定;齿轮几何参数、齿廓、螺旋线、接触线、齿厚、齿面拓扑误差等的误差曲线的定位误差修正;测量不确定度的计算;三维测量平台误差修正等。

3.5 特大型齿轮仪器的标定和测量误差修正

采用 Monte-Carlo 法模拟,通过中尺寸的标定,实现大齿轮的测量不确定度的计算。同时,通过分析整个测量系统的误差来源,对于确定性误差设计合适的方法对其进行测量并利用软件进行修正,提高系统的测量精度。由于温度是大型零件尺寸测量必须考虑的因素,还对空间温度进行监测,以修正温度梯度变化所带来的测量误差。

4 实测结果

研制的特大型齿轮激光跟踪在位测量系统如图 7 所示,其中三维测量平台是特大型齿轮激光跟踪在位测量系统配套研制的专用设备,其测头采用 Renishaw 公司生产的 SP80H 测头,激光跟踪仪采用 Leica 公司的 AT901-MR。使用本系统对 4 级标准齿轮进行测量,齿轮参数如下:齿轮类型:外齿轮,螺旋方向:右旋,模数:16 mm,齿数:58,压力角:20°,螺旋角:12°,齿宽:280 mm,齿轮外径:980.730 mm。使用克林伯格齿轮测量中心的测量结果如表 1 所示。齿廓偏差与螺旋线偏差的测量

结果如图 8 和图 9 所示。



图 7 特大型齿轮测量系统实物图

Fig. 7 Picture of measurement system for mega gear

表 1 克林贝格齿轮测量结果

Tab. 1 Measurement result of gear by Klingelnberg gear measuring center (μm)

	齿廓误差			螺旋线误差		
	F_a	f_{fa}	f_{Ha}	F_β	$f_{f\beta}$	$f_{H\beta}$
左齿面	7.2	1.9	7.0	4.0	2.6	-4.4
右齿面	3.5	2.6	2.0	7.0	3.3	7.3

实验结果表明特大型齿轮激光跟踪在位测量系统原理正确,结果可靠,具有 6 级以下特大型齿轮的测量能力。

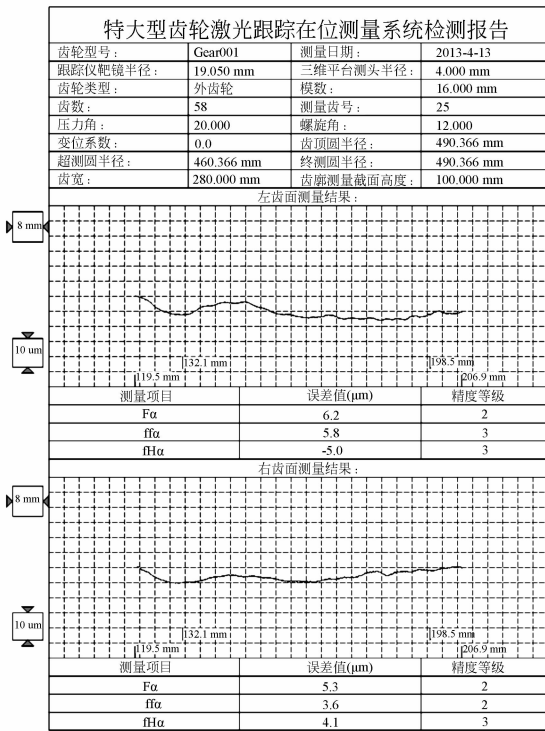


图 8 齿廓测量报告

Fig. 8 Profile measurement report

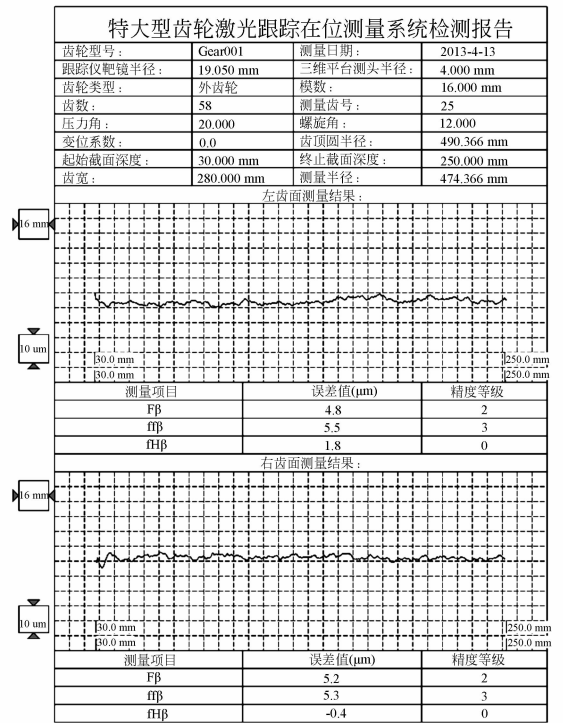


图 9 螺旋线测量报告

Fig. 9 Helix measurement report

5 结论

本文摒弃了传统大型齿轮测量仪器“以大测大”的测量方式,充分利用激光跟踪仪大空间测量能力和坐标测量机高精度测量能力的特点,解决了特大型齿轮测量中的定位问题,可实现齿轮特征线、拓扑误差等参数的测量。这一

技术方案具有较好的灵活性,通过“以小测大”这一思路,实现了超大复杂零件的高精度测量,开辟了一种新的测量方式,与传统的“以大测大”即大型测量仪器测量大尺寸的方式有本质的区别。这一方案不但增加了测量的灵活性,同时提高了测量精度。只要进行适当的变化就可用于其它大型复杂零件的测量,具有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] 石照耀, 费业泰, 谢华锐. 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 measurement technology-review & prospect [J]. *Engineering Science*, 2003, 5(9): 13-17. (in Chinese)
- [2] 石照耀. 齿轮量仪. 中国齿轮工业年鉴[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010.
SHI ZH Y. Gear Instruments. *China Gear Industry Yearbook* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2010. (in Chinese)
- [3] MATTHEW J. An emphasis on accuracy meeting the many challenges of large gear inspection[J]. *Gear Technology*, 2011(3): 28-33.
- [4] WENDT K, FRANKE M, Haertig F. Measuring large 3D structures using four portable tracking laser interferometers[J]. *Measurement*, 2012(25): 2239-2345.
- [5] 石照耀, 张宇, 张白, 等. 特大型齿轮激光跟踪在位测量的定位模型[J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(1): 1-6.
SHI ZH Y, ZHANG Y, ZHANG B, *et al.*. Positioning models for the in-site mega-gear measuring system with a laser tracker [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2013, 39(1): 1-6. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 石照耀, 林家春. 基于激光跟踪技术的大型齿轮测量方法: 中国, 200910084275.7 [P].
SHI ZH Y, LIN J CH. *Large Gear Measurement Method Based on Laser Tracker Technology*: China, 200910084275.7 [P]. (in Chinese)
- [8] HAERTIG H, LIN H, KNIEL K, *et al.*. Standard conforming involute gear metrology using an articulated arm coordinate measuring system [J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(10): 1-6.
- [9] FANGA S P, WANGA L J, KOMORIB M, *et al.*. Design of laser interferometric system for measurement of gear tooth flank [J]. *Optik*, 2011, 122: 1301-1304.
- [10] GADELMAWLA E S. Computer vision algorithms for measurement and inspection of spur gears [J]. *Measurement*, 2011, 44: 1669-1678.
- [11] 胡浩, 梁晋, 唐正宗, 等. 大视场多像机视频测量系统的全局标定[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 369-378.
HU H, LIANG J, TANG ZH Z, *et al.*. Global calibration for multi-camera videogrammetric system with large-scale field-of-view [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 369-378. (in Chinese)
- [12] 李磊刚, 梁晋, 唐正宗, 等. 飞机结构件运动数据的动态视觉测量系统[J]. 光学精密工程, 2012, 20(9): 1929-1938.
LI L G, LIANG J, TANG ZH Z, *et al.*. Optical and dynamic measuring system for movement data of aircraft structural parts [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9): 1929-1938. (in Chinese)

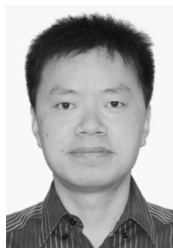
作者简介:



石照耀(1964—), 男, 湖南岳阳人, 教授, 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, 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



张白(1981—), 男, 内蒙古巴彦淖尔人, 博士研究生, 2004 年于成都理工大学获得学士学位, 2007 年于北京工业大学获得硕士学位, 主要从事精密测试技术与仪器方面的研究。E-mail: zhangbai6402@163.com



林家春(1978—),男,四川南充人,副教授,2001年于中国农业大学获得硕士学位,2006年于中国农业大学获得博士学位,主要从事精密测控技术与仪器方面的研究。E-mail: linjc@bjut.edu.cn



陈显民(1957—),男,吉林德惠人,高级工程师,1984年毕业于哈尔滨量具刃具厂工学院量仪设计专业,主要从事大、中、小各种模数齿轮及齿轮刀具精密测量仪器设计方面的研究。E-mail: xianminchen@126.com



魏华亮(1961—),男,高级工程师,哈尔滨量具刃具集团有限责任公司总经理,主要从事精密量仪的研发及应用方面的研究。

(本栏目编辑:马 健)

(版权所有 未经许可 不得转载)