

文章编号 1004-924X(2013)07-1763-08

基于便携式坐标测量机的大齿轮测量方法

林 虎¹, Frank Härtig², Karin Kniel², 石照耀^{1*}

(1. 北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124;

2. Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig und Berlin, 38116 Braunschweig, Germany)

摘要:针对目前便携式坐标测量机测量大齿轮的采样策略和评定算法存在的不足,设计了两种特殊的辅助标尺—渐开线标尺及螺旋线标尺。利用设计的两种标尺在大齿轮齿面上对齿廓及螺旋线的测量点进行标注,开展了齿轮的在位重复性测量的实验研究。利用关节臂坐标测量机及激光跟踪仪测量系统在德国计量研究院研制的 1 m 外径齿轮样板上开展了测量实验,采用 INVOLUTE Pro 对采样数据点进行评定,给出了测量结果及测量不确定度。测量实验表明,基于新的齿轮测量方法,关节臂坐标测量机比激光跟踪仪测量系统测量结果更为精确,测试结果与标定值最大相差 8.16 μm 。实验结果验证了提出方法的有效性,为便携式坐标测量机在大齿轮测量领域的应用提供了依据。

关键词:大齿轮测量;便携式坐标测量机;大齿轮样板

中图分类号:TH721;TG86 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132107.1763

Measurement of large gears by using portable coordinate measuring machines

LIN Hu¹, Frank Härtig², Karin Kniel², SHI Zhao-yao^{1*}

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

2. Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig und Berlin, 38116 Braunschweig, Germany)

* Corresponding author, E-mail: shizhaoyao@bjut.edu.cn

Abstract: Two kinds of auxiliary templates, involute template and helix template, were developed to remedy the shortages of Portable Coordinate Measuring Machines (PCMMs) in sampling strategy and evolution method for large gear measurement. By using the templates to mark the measurement points of tooth profiles and spiral lines on the gear flanks, the experimental research were performed on the position repeatability measurement of the gear. An Articulated Arm Coordinate Measuring Machine (AACMM) and a Laser Tracker Measuring System (LTMS) were used to measure the gear standard with an outside diameter of 1 m. All the measurement data were evaluated by a software INVOLUTE Pro, and the measurement uncertainties of profile and helix were obtained. The result demonstrates that the AACMM is more precise than LTMS based on above method and the maximum deviation is 8.16 μm as compared to the calibration values. The experimental results verify the validity and feasibility of the method, and provide the basis for the application of large gear measurement using PCMMs.

Key words: large gear measurement; portable coordinate measuring machine; large gear standard

收稿日期:2013-04-13;修订日期:2013-05-21.

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

1 引言

便携式坐标测量机是指非正交系坐标测量机,包括关节臂测量机、激光跟踪仪和光笔测量仪等。相对于正交系三坐标测量机,便携式坐标测量机有如下优点:体重较轻,可方便应用于加工现场;实现测量运动更为灵活,绕一个支点回转,比三轴直线运动合成的回转更为轻巧、迅速;测量空间开阔,可以对直角坐标系不易探测的隐藏点进行测量,更方便地实现手动扫描测量。因此,便携式坐标测量机在近年来得到了快速发展。

大齿轮是大型机械装备的重要零部件,广泛应用于发电、矿山机械及船舶等领域。迄今为止,对大齿轮的质量检测主要依靠大型正交系坐标测量机,采用“以大测大”的方式来实现^[1-2]。然而大齿轮因尺寸大、重量大,运装到计量室极为不便,且检测后还需把齿轮运回机床进行再次安装和加工,过程费时费力。相对而言,便携式坐标测量机具有更大的灵活性,可实现工件的现场在位检测。但至今便携式坐标测量机在齿轮测量领域并未得到应用,难点主要有:

(1)缺少便携式坐标测量机测量大齿轮的采样策略和评定算法。与三坐标测量机的自动化测量不同,便携式坐标测量机大部分为手动操作,目标点瞄准和定位均需依靠人手持仪器完成,因此对已知目标点采样具有很大的不确定性。目前齿轮精度检测规范给出的坐标法测量原理针对的是自动化测量仪器。测量前先计算测量目标点的理论坐标值,接着通过测头对目标点进行瞄准定位测量,实际测得值与理论值比较得到该点的误差值,将各点的差值绘成误差曲线即可进行误差评定^[3-4]。因此传统测量方法对仪器测量定位精度要求较高,并不适用于手持式的测量仪器。

(2)便携式坐标测量机测量齿轮精度无法溯源。目前对齿轮测量仪器测量精度和不确定度评定的方法主要是应用已校准工件或标准件^[5-6]。使用测量仪器对高精度的齿轮样板进行测量,测量数据与齿轮样板的标定数据进行对比后可确定仪器的测量精度和测量不确定度。

然而,目前只有德国计量研究院(Physikalisch-Technische Bundesanstalt)开发了 1 m 外径的大齿轮样板。缺少大齿轮样板,则相关的研究工作难以展开。

针对上述测量难点,北京工业大学与德国计量研究院联合开展了相关的研究工作,取得了一定的成果^[7]。

2 测量方法

本文研究工作的基本思路是应用辅助标尺在齿轮被测误差项(齿廓偏差、螺旋线偏差和齿距偏差)所规定的采样位置上进行测量点标注;并采用新的误差评定算法,该算法可对采样定位引起的偏差进行补偿。相关的测量实验在已标定的大齿轮样板上展开,与标定数据比对,测量的结果得到了满足便携式测量仪器要求的测量精度及不确定度。

2.1 渐开线标尺及螺旋线标尺设计

根据齿面展成原理,设计了两种特殊的辅助标尺—渐开线标尺及螺旋线标尺,如图 1 所示。两种标尺上都标注了测量点位置的刻线,渐开线标尺用于辅助测量人员在齿轮横截面上对渐开线齿廓测量点进行标注;而螺旋线标尺用于辅助测量人员在螺旋线上对螺旋线测量点进行标注。两者配合使用,可满足齿轮齿廓、螺旋线和齿距测量点的标注。

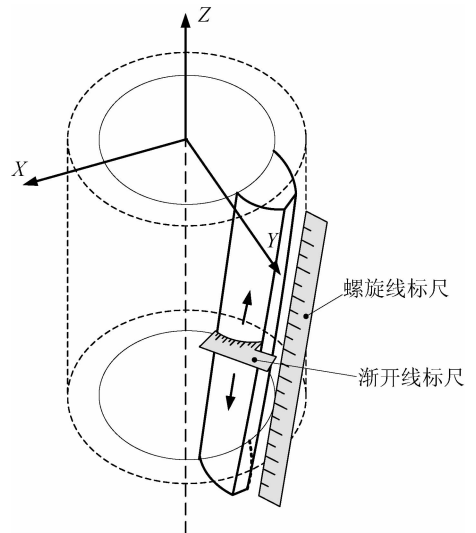


图 1 渐开线标尺和螺旋线标尺

Fig. 1 Involute template and helix template

渐开线标尺和螺旋线标尺的设计需要满足如下几点:

(1)标尺上的刻线数应该满足渐开线和螺旋线评定的需要。

(2)标尺上刻线间的密度不应太高,从人机工程学的角度考虑,其距离不小于测球的直径。

(3)渐开线标尺刻线的位置要与发生线的长度一致。齿廓的采样方式应采用发生线等间距测量的方式,通过对齿廓测量起点和终点对应的发生线长度进行计算,得到发生线从起点到终点的增长当量,最终得到每段发生线所对应的齿廓位置。

(4)标尺应标注对应被测齿轮的参数以便选用,同时标尺应方便手持。

下面给出渐开线标尺和螺旋线标尺的设计说明。

图2所示是某一渐开线标尺,此渐开线标尺相对应的齿轮参数为:齿数 $z=38$,模数 $m_n=25$ mm,压力角 $\alpha_n=20^\circ$ 。标尺的基准弧线形状与对应齿轮的齿廓渐开线一致,上面的刻线标示齿廓测量点所对应的位置,每条刻线对应发生线的长度值标注在刻线的下方。这里只标示了长刻线对应发生线的长度,起点、终点和短刻线对应的值都没有标出。可以看出,齿廓测量起点和终点所对应的发生线 L_R 和 L_T 长度值分别为 100 和 220 mm。该标尺还标注了齿距测量点所在的分度圆位置,该位置用一个带黑点的刻线标示。除了上面测量点位置信息外,标尺也给出了齿轮的基本参数以便与别的标尺区别。

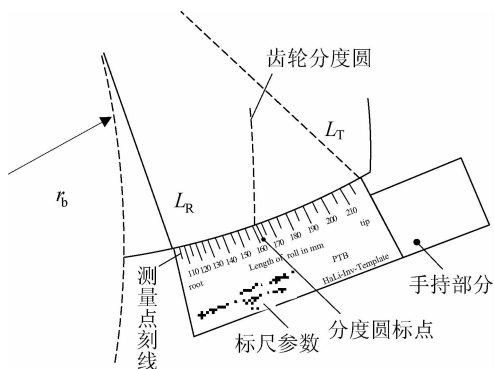


图2 渐开线标尺设计

Fig. 2 Design of involute template

对渐开线标尺而言,最重要的设计参数是基圆半径。根据渐开线的展成原理,决定渐开线曲线形状的是基圆尺寸。因此,对两个齿数和模数

皆不同的齿轮,其基圆尺寸仍存在相同的可能,这时渐开线标尺就可以用在其中任意一个齿轮上。

图3所示为3种不同螺旋线标尺的应用示意图。就螺旋线标尺而言,设计依据的重要参数是齿轮螺旋角和齿轮旋向。3种螺旋线标尺分别用于左旋齿、直齿和右旋齿,对应螺旋角分别为 20° 、 0 和 10° 。标尺上标注了测量点对应的刻线,刻线值可以根据实际情况调整,刻线值的增量方向应沿着齿轮的轴线方向。螺旋线标尺可用于对左齿廓或右齿廓进行标注,其上标示了基准面、左齿面和右齿面等信息。

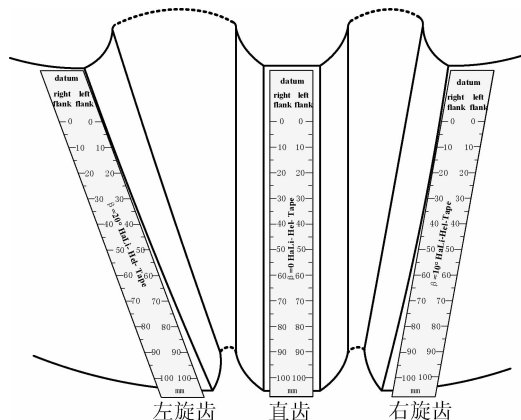


图3 螺旋线标尺设计

Fig. 3 Design of helix template

渐开线标尺可以用一定厚度的金属材料加工,便于其基准弧线与齿面进行贴合。而螺旋线标尺则更适合用薄金属片加工,使其具有一定柔性便于与螺旋齿轮外圆表面贴紧。

2.2 坐标测量误差评定算法

传统齿轮坐标测量都需要事先计算被测量理论点的坐标值及对应的法矢方向,依据上述已知参数控制测头来测量实际点坐标值,最后得到理论点和实际点之间的差值。德国德累斯顿工业大学 W. Lotze 教授在对齿轮坐标测量理论研究的基础上提出了新的误差评定算法,该算法的核心为渐开线齿轮的三维统一模型,通过齿面测量点可以建立一个替代拟合齿面,基于该齿面就可以计算出齿廓、螺旋线和齿距等各项误差。因此采样点并不需要严格处于某一特定点位置^[8-9]。

基于该算法的齿轮测量软件为 INVOLUTE Pro。输入该软件的坐标点可为测球中心点坐标,软件能对测头半径会进行补偿,并给出实际接触点的坐标值^[10]。

3 测量仪器及齿轮样板

3.1 便携式坐标测量机

实验用的便携式坐标测量机为关节臂坐标测量机和激光跟踪仪测量系统。

关节臂坐标测量机由多个管臂和关节组成,安装有光学或接触测量系统的末端臂可由人牵引实现对零件的表面测量。测量过程中,安装在关节上的角度编码器记录转动的角度,结合臂长就可计算出测量点的坐标值^[11]。实验所用关节臂坐标测量机为 ROMER 公司的 INFINITE 2.0 Plus,如图 4 所示。该测量机的旋转轴为 6 轴,测量范围为空间直径 2.4 m,锥孔测量重复性为 0.017 mm,空间长度精度为 0.025 mm。该测量机提供了 3 种 TESA 硬测头:直径 15 mm 的钢测球、直径 5 mm 和 3 mm 的红宝石测球。与测量机配套的软件为 PowerINSPECT4.3。



图 4 ROMER 关节臂坐标测量机

Fig. 4 Articulated arm coordinate measuring machine from ROMER

激光跟踪仪是一种球坐标系测量系统,内置激光测距系统及 2 个正交的角度编码器,通过对目标靶镜进行测量相对距离及角度值,可计算目标点的空间坐标值。相比正交式三坐标测量机,激光跟踪仪更像是便携、无框架的坐标测量机,可实现大尺寸的快速跟踪测量。实验所用激光跟踪仪测量系统为 Leica 公司的 AT901-Long Range,配备了 CMOS 数字照相系统 T-Cam 和手持式无线测头 T-Probe,如图 5 所示,两者配合可实现隐藏点的触测。T-Probe 的最大测量范围为 30 m,



图 5 Leica 激光跟踪仪测量系统(左:T-Probe)

Fig. 5 Laser tracker measuring system from Leica (left side: T-Probe)

空间点测量不确定度为 $\pm 30 \mu\text{m} + 10 \mu\text{m}/\text{m}$, T-Probe 配备 Renishaw 可拆卸硬测头。激光跟踪仪测量系统配套使用的软件为 PolyWorks v12。

3.2 大齿轮样板

随着大齿轮应用越来越广泛,各种大齿轮测量仪器也相继被开发。对测量仪器的测量精度标定也成了普遍关注的问题。德国计量研究院针对大齿轮测量仪器标定研制了大齿轮样板如图 6 所示。样板为 50° 扇形齿,直径为 1 m,齿宽为 400 mm,其上包含了左旋、右旋和直齿 3 种不同类型的外齿轮。德国计量研究院借助高精度三坐标测量机及转台完成了对样板各项精度的标定,可用于渐开线和螺旋线的精度溯源。实验以样板的左旋齿为分析测量对象,参数如表 1 所示^[12]。



图 6 大齿轮样板

Fig. 6 Large gear standard

表1 样板左旋齿参数

Tab.1 Parameters of left hand gear

参数	数值
齿轮类型	外齿轮
齿轮旋向	左旋
齿数 z	36
法向模数 m_n/mm	25
法向压力角 $\alpha_n/(\text{°})$	20
齿宽 b/mm	400
螺旋角 $\beta/(\text{°})$	20
齿根圆直径 d_f/mm	911
齿顶圆直径 d_a/mm	1 000

4 测量实验

4.1 实验室条件

测量实验在德国计量研究院的计量实验室展开。实验室温度为 $(20 \pm 0.2)^\circ\text{C}$ 。测量开始前,关节臂坐标测量机与激光跟踪仪测量系统在实验室热平衡时间超过 12 h。

4.2 测量点规划

表2为测量点规划表,包含了在基准圆柱面、齿廓和螺旋线上所测量的点数。INVOLUTE Pro规定齿廓和螺旋线的最少测量点数为12,考虑到手动测量的方便性,设定齿廓测量点数为13,螺旋线测量点数为19。对于齿轮坐标测量而言,工件坐标系的建立极为重要。大齿轮样板的回转芯轴的上端和下端各有一个直径200 mm的基准圆柱面,用于建立齿轮的回转轴,这里设定上端和下端各测量25个点。

表2 左旋齿测量点规划

Tab.1 Layout of measurement points on left hand gear

参数	数值	
齿廓测量起始点	发生线长度/mm	100
	对应半径/mm	457.61
齿廓测量终止点	发生线长度/mm	220
	对应半径/mm	497.81
齿廓测量点数	13	
螺旋线测量点数	19	
基准圆柱面	直径/mm	200
	测量点数	25

4.3 测量流程

测量点标注。依据表2的测量点规划,使用防水毛毡笔在上下两个基准圆柱面上各均布标注25个测量点,齿廓和螺旋线测量点的标注需要借助渐开线标尺和螺旋线标尺。首先把螺旋线标尺固定于齿轮外径表面上,然后借助渐开线标尺在齿宽中部进行测量点标注,渐开线标尺的定位需要满足标尺齿廓与齿轮齿廓配合后两者间隙最小。螺旋线测量点可借助渐开线标尺上的分度圆标点在不同的齿宽截面位置进行标注。需要注意的是,标注点的墨迹一般为 $2 \sim 10 \mu\text{m}$ 的薄膜层,所以实际触测点应尽量靠近标注点,而不是处于其表面。

建立齿轮坐标系。对25个测量点进行测量采样后,通过最小二乘法拟合得到2个拟合圆,由2个圆的圆心可确定齿轮的回转轴 Z , Z 轴正方向是由齿轮底端面指向上端面。为了确定齿轮坐标系的原点位置和 X 轴正方向,在齿轮轮齿的上端面标注了一个测量点,通过该点与 Z 轴正交的直线即为 X 轴,其正方向是由齿轮回转轴指向外部的。 Z 轴和 X 轴确定后, Y 轴即可由右手定则确定。在建立了齿轮坐标系后,齿廓面上的测量点的坐标就可以通过测量软件自动转换到齿轮坐标系下。需要注意的是,关节臂坐标测量机和激光跟踪仪测量系统采集的都是测头中心点的坐标值,而不是触测点的坐标值。

测量仪器位置规划:使用关节臂坐标测量机开展测量时,需把其固定于某一合适位置,以满足所有测量元素测量。用关节臂坐标测量机对大齿轮样板的左旋齿完成12次测量。使用激光跟踪仪测量系统开展测量时,把其置于距离齿轮回转轴3 m的位置,此时 T-Probe 对所有测量元素测量,光路没有被齿轮遮挡。

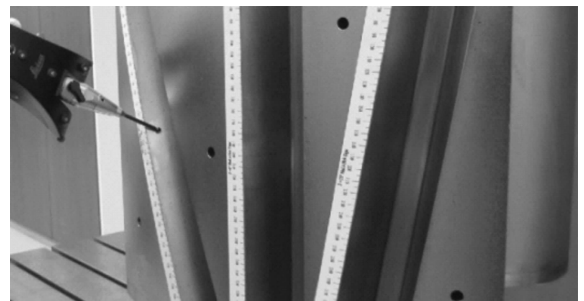


图7 使用 T-Probe 测量大齿轮样板

Fig.7 Measuring large gear standard using T-Probe

重复性测量:分别采用关节臂坐标测量机及激光跟踪仪测量系统对样板基准圆柱面及齿面进行 12 次重复性测量。

5 测量结果评定与不确定度计算

把所有左旋齿的测量点采样数据输入到齿轮误差评定软件 INVOLUTE Pro,误差参数可以依据各国标准(如 ISO、DIN 和 AGMA 等)进行评定。

评价齿廓偏差可以用齿廓倾斜偏差、齿廓形状偏差和齿廓总偏差;对于螺旋线偏差可以用螺旋线倾斜偏差、螺旋线形状偏差和螺旋线总偏差来评价,因此每个齿面测量可以得到 6 个误差项。对关节臂坐标测量机和激光跟踪仪测量系统的 12 次测量序列结果分别求平均值,平均值与标定数值进行比对如图 8 所示。

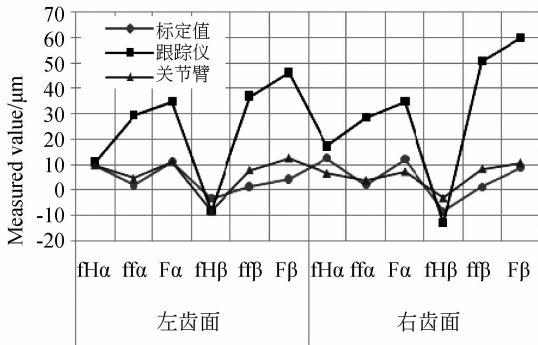


图 8 测量结果与标定值比对

Fig. 8 Measurement results and calibrated values

从图 8 可以看出,关节臂坐标测量机的测量值与标定值相差较小,最大的相对偏差值为 $8.16 \mu\text{m}$;而激光跟踪仪测量系统的测量值则相对较大,且基本为正偏差。齿廓倾斜偏差和螺旋线倾斜偏差与标定值比较接近,而齿廓形状偏差、齿廓总偏差、螺旋线形状偏差、螺旋线总偏差与标定值则相差较大,最大为 $50 \mu\text{m}$,这因为形状偏差和总偏差易受单点测量误差的影响。

除了给出测量平均值,还应计算测量值的不确定度。针对关节臂坐标测量机和激光跟踪仪测量系统的测量方式,测量不确定度包含的不确定度贡献因素为^[6,13]:

(1)大齿轮样板标定值的不确定度 u_{cal} 。

(2)关节臂坐标测量机和激光跟踪仪测量系

统测量过程引入的不确定度分量 $u_{\text{A-process}}$ 和 $u_{\text{L-process}}$ 。该分量主要包含由测量过程引起的测量重复性误差。分别由各自的 12 次测量序列结果的标准不确定度来评定。

(3)实验室环境条件的不确定度 u_w 。实验室温度恒定为 $(20 \pm 0.2)^\circ\text{C}$,且齿轮样板和测量仪器达到热平衡状态,保证了测量结果的一致性。因此, u_w 的值可忽略。

(4)关节臂坐标测量机和激光跟踪仪测量系统的系统误差分别为 b_{A} 和 b_{L} ,两者可通过计算测量平均值和对应的标定值之间的差值来计算。

综上,关节臂坐标测量机和激光跟踪仪测量系统测量结果的扩展不确定度(置信概率约为 95%)可分别由式(1)和式(2)计算^[14]:

$$U_{\text{A}}(k=2) = 2\sqrt{u_{\text{cal}}^2 + u_{\text{A-process}}^2 + u_w^2 + b_{\text{A}}^2}, \quad (1)$$

$$U_{\text{L}}(k=2) = 2\sqrt{u_{\text{cal}}^2 + u_{\text{L-process}}^2 + u_w^2 + b_{\text{L}}^2}. \quad (2)$$

经过计算,关节臂坐标测量机的测量不确定度如图 9 所示。需要注意的是,图中纵坐标为相对偏差值,“0”刻线所在横轴线为齿轮样板标定值。图中菱形点表示对应误差项的测量平均值,菱形点两边的线长代表的区间为测量不确定度,两个星号代表了测量数据的最大值和最小值。

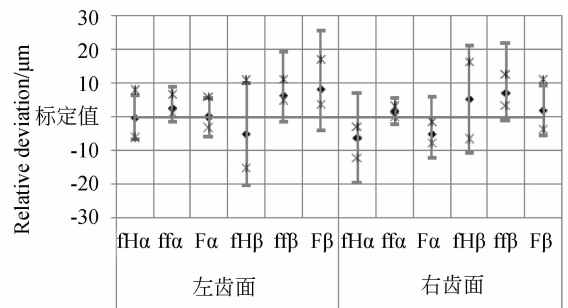


图 9 关节臂坐标测量机的测量不确定度

Fig. 9 Measurement uncertainty of articulated arm coordinate measuring machine

由图 9 可知,螺旋线的测量不确定度普遍比齿廓线的测量不确定度大,而主要影响的因素并不相同,如左齿面的螺旋线倾斜偏差主要的影响因素是测量重复性,而形状偏差和总偏差则受系统误差影响大。测量结果最大不确定度为左齿面倾斜总偏差 $\pm 17.2 \mu\text{m}$,最小不确定为右齿面齿

形偏差 $\pm 3.8 \mu\text{m}$ 。

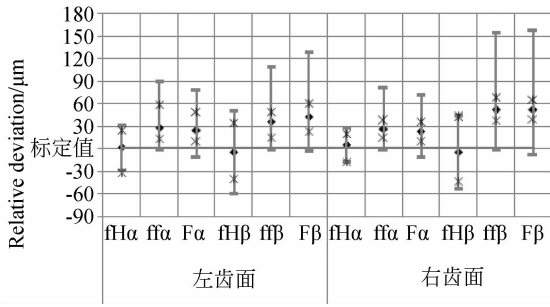


图10 激光跟踪仪测量系统的测量不确定度

Fig. 10 Measurement uncertainty of laser tracker measuring system

图10为激光跟踪仪测量系统的测量不确定度结果。与图9一样,这里的纵坐标也为相对偏差值。从图中可以看出,测量不确定值普遍较大,最大的值出现在右齿面上,其测量不确定度超过 $100 \mu\text{m}$ 。比较齿廓和螺旋线的倾斜偏差,其测量平均值比较接近标定值,但是最大和最小值相差较大,说明其测量不确定度受系统误差影响较小,受重复性影响大,而造成这个现象的原因是齿轮回转轴的测量及拟合,拟合回转轴如果倾斜误差

较大则引起的螺旋线误差也相应变大,相比较而言,回转轴倾斜误差对齿廓偏差则影响较小。

6 结论

通过特别设计的两种标尺—渐开线标尺及螺旋线标尺,在大齿轮齿面上对齿廓及螺旋线的测量点进行标注,为利用便携式坐标测量机开展大齿轮在位重复性测量提供了一种思路。

为评估便携式坐标测量机测量齿轮的性能及测量方法的有效性,使用两种典型的便携式坐标测量机—关节臂坐标测量机和激光跟踪仪测量系统,对德国计量研究院研制的1米大齿轮样板分别进行了12次重复测量实验。测量结果与标定值进行比对后表明,关节臂坐标测量机比激光跟踪仪测量系统可以获得更好的精度,其测量值与标定值的差值都在 $8.16 \mu\text{m}$ 之内。

除了仪器的精度外,对便携式坐标测量机而言,操作者的经验不能忽略。由于大部分的便携式坐标测量机都为手动操作,对测量点进行采样时操作者手持测头的稳定性及对测针实施探测力的大小都会对测量结果有一定影响。

参考文献:

- [1] GOCH G, KNAPP W, HAERTIG F. Precision engineering for wind energy systems [J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2012, 61(2): 611-634.
- [2] 石照耀. 齿轮量仪[G]. 中国齿轮工业年鉴, 北京: 中国齿轮专业协会, 2010:220-225.
SHI ZH Y. *Gear Measurement Instruments* [G]. China gears industry yearbook. Beijing: China Gear Manufacturer Association, 2010:220-225. (in Chinese)
- [3] ISO1328-1. Cylindrical gears-ISO system of accuracy-Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to corresponding flanks of gear teeth [S]. 2008.
- [4] ISO/TR 10064-1. Code of inspection practice -Part 1: Inspection of corresponding flanks of gear teeth [S]. 1992.
- [5] HAERTIG F, 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.
- [6] ISO 15530-3. Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement-Part 3: Use of calibrated workpieces or standards [S]. 2004.
- [7] 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)
- [8] LOTZE W. *Zahnradmessung mit Koordinatenmessenger ten* [M]. Dresden: Eigenverlag, 2006: 225-228.
- [9] LOTZE W, HAERTIG F. 3D gear measurement by CMM[C]. *Proceedings of Laser Metrology and Machine Performance*, Birmingham, 2001: 333-344.

- [10] CARL Z A G. *INVOLUTE PRO manual* [M]. Dresden, 2010;39-67.
- [11] 石照耀, 张斌, 林家春, 等. 坐标测量技术半世纪——演变与趋势 [J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(5): 648-656.
SHI ZH Y, ZHANG B, LIN J CH, *et al.*. Half century of coordinate metrology technology- evolution and trends [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2011, 37(5): 648-656. (in Chinese)
- [12] HAERTIG F, ROST K, GOCH G. Large gear material standard for the traceability of gears for transmission manufacturing [C]. *International Conference on Gears: Europe invites the world. Garching, Germany*, 2010 ;991-1004.
- [13] ISO/IEC Guide 98-3: Uncertainty of measurement -Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement [S]. 2008.
- [14] HAERTIG F, KRYSTEK M. Correct treatment of systematic errors in the evaluation of measurement uncertainty [C]. *Proceedings of International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments. Saint-Petersburg, Russia*, 2009; 1016-1019.

作者简介:



林 虎(1984—)男,广西玉林人,博士研究生,2007年于河海大学获得学士学位,2010年于北京工业大学获得硕士学位,主要研究方向为精密测试技术与仪器。E-mail: linhu@emails.bjut.edu.cn



Frank Härtig 男,德国人,博士,教授,德国计量研究院坐标计量室主任,主要研究方向为几何量坐标测量、齿轮测量技术、测量不确定度评定和几何量计量软件认证等。E-mail: frank.haertig@ptb.de



Karin Kniel 女,德国人,博士,德国计量研究院坐标计量室齿轮测量工作组负责人,主要研究方向为齿轮测量技术、测量不确定度评定等。E-mail: karin.kniel@ptb.de

导师简介:



石照耀(1964—)男,湖南岳阳人,博士,教育部长江学者特聘教授,博士研究生导师,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,主要研究方向为齿轮工程及精密测试技术与仪器。E-mail: shizhaoyao@bjut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)