doi：10.11823/j.issn.1674-5795.2016.04.09

人字齿轮对称度的检测分析

崔柏慧，贺健，赵连洲
（哈尔滨东安发动机（集团）有限公司，黑龙江 哈尔滨 150066）

摘　要：人字齿轮是在大型动力传动装置上广泛使用的一种特殊齿轮，十分适合高速、重载传动。但是人字齿轮特殊的结构导致其加工困难，对于两侧齿的要求较高，尤其是对于两侧齿轮齿面与中心截面的对称度要求十分严格，检测难度大。本文通过对人字齿轮的对称度误差要求进行分析，找到了此项误差的主要测量要素，并提出了其在三坐标测量机上的检测新方法。

关键词：人字齿轮；对称度；三坐标测量机；余弦误差；极角偏差
中图分类号：TB92；TH701　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1674-5795(2016)04-0033-04

Analysis and Testing of Symmetry Between Teeth of Double-helical Gears

CUI Baihui，HE Jian，ZHAO Lianzhou
（Harbin DonganEngine（group）Corporation LTD，Harbin 150066，China）

Abstract：A double-helical gear is a kind of special gear which can be used on large power transmission devices. It can work perfectly in the overload and high speed transmission system. But the special structure requirements of teeth make the machining process difficult. Especially there is a strict requirement on the symmetry between the teeth and the central shaft，and it is difficult to be tested. Based on the analysis of symmetry for double-helical gears，the main measurement factor was found，and a new test method on CMM was put forward in this article.

Key words：double-helical gear；symmetry；CMM ；cosine error ；polar angle deviation

0　引言

人字齿轮因其较大的承载能力和特殊的消除轴上横向力的结构，常被应用于大型动力装置上，在大型货轮、运输机上应用广泛[1]。人字齿轮相当于两个斜齿轮合并而成，不但具备斜齿轮的优点，还克服了斜齿轮会产生较大轴向力这一缺点，但加工困难，检测难度大。

人字齿轮的技术要求中不仅要保证齿轮的各项参数质量，还要保证一项特殊的形位误差符合图纸要求，即图纸上公差要求严格的两侧齿轮齿面对中心截面的对称度（一般要求在0.05~0.2 mm之间），此项误差的大小直接影响齿轮轴上横向力的消除效果，过大时会影响齿轮寿命、导致齿轮轴断裂。因此在人字齿轮加工过程中，齿面对称度的检测十分重要。

在人字齿轮的加工和参数调整过程中，左右旋向齿轮对中心截面的对称度可以在机床上用通用尺表进行粗略测量，但最终人字齿轮的各项尺寸是否符合图纸要求还要通过检测检验才能判断，因此还要研究在其它检测设备上进行该对称度误差的测量。

收稿日期：2016-03-13；**修回日期**：2016-05-21
作者简介：崔柏慧（1985-），女，黑龙江哈尔滨人，工程师，主要从事长度计量研究工作。

1　问题分析

常见人字齿轮组件的简图如图1所示。通常技术要求中会给出同侧齿面对于中心基准平面的对称度公差要求。

1.1　问题的理解

人字齿轮对中心截面的对称度，是指两侧齿轮对应齿的同侧齿面对称，如图1所示。在GB/T 1182-2008《产品几何技术规范（GPS）几何公差形状、方向、位置和跳动公差标注》中给出了中心平面对称度公差的公差带定义：公差带为间距等于公差值t、对称于基准中心平面的两平行平面所限定的区域[2]。如图2所示。图2中，f和$f/2$分别表示对称度误差和对称度误差的一半。

也就是说对于人字齿轮上下不同旋向的斜齿齿面，其对称度的公差带也应该是一个平行于基准平面的两平行平面间的区域，即提取（实际）中心平面应该限定

在距离等于公差值 t、对称于基准平面的两平行平面间。

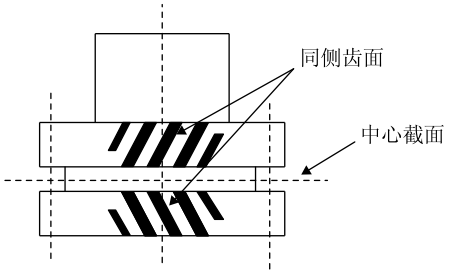

图 1　人字齿轮简图

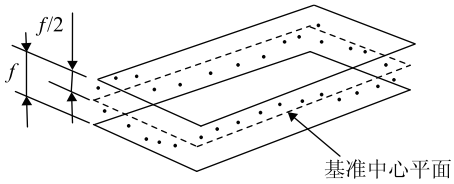

图 2　国标定义的对称度公差

1.2　问题转换

通过对人字齿轮的加工过程的跟踪研究和相关资料的查询，可以将被测特征进行转换，齿面对称其实也就是齿轮齿面上的对应点都应该对称。如图 3 所示，进一步可以这样理解人字齿轮的对称度，就是要求人字齿轮在左右旋向的同侧齿面上的任意角向两对应点 A 和 B 的中点 C 应该在距离等于公差值 t、对称于基准平面的两平行平面间。C 点到基准面的距离为 ΔT_h，那么按照对称度公差的定义，其对称度误差 f 就应该为 $2\Delta T_h$，即 $2\Delta T_h$ 应不大于图纸所给出的对称度公差值。图 3 中的 ΔT_s 为相对中间基准截面同一高度的两个实际对应点之间的沿齿轮周向距离偏差，即对应点间的极角偏差所对应的弦长，β 为斜齿的倾斜角度。

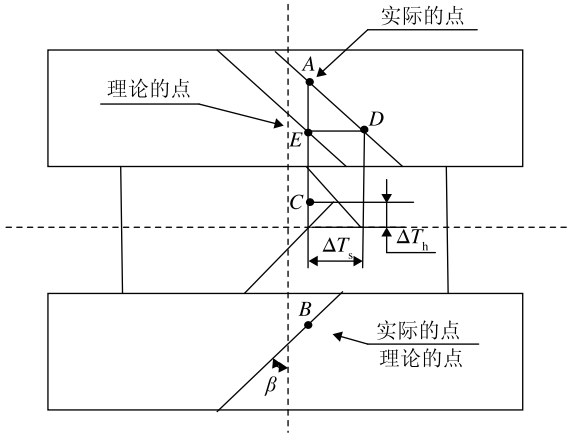

图 3　人字齿轮对称度示意图

如果将齿面上的点都用三轴坐标的方式表示，中心截面的法线作为 Z 轴，则图 3 中右旋齿轮齿面上的 $E(X, Y, Z)$ 点就应该与左旋齿轮齿面上的 $B(X, Y, -Z)$ 点对称。如此一来要测量齿面的对称度，就可以分别在左右旋齿轮的齿面上固定两个轴坐标值来分别测量对应的坐标点，然后看两点之间极角的差值，再通过 β 换算到对称度公差的方向，进行对称度误差的计算。

2　测量方法

2.1　测量设备

按照上述分析的思路，要选择可以测量齿面上坐标点并给出坐标值的测量设备，由于齿面是渐开线曲面，需要具有多方向测头的检测仪器，因此三坐标测量机是可以选择的检测设备。从精度方面来讲，若人字齿轮的技术要求中其对称度公差为 0.05 mm，测量范围为 2000 mm 以内，三坐标的示值误差通常可以控制在(2+3L/1000) μm 以内(L 为被测尺寸长度)，因此精度上满足所选设备精度应不低于公差值的 1/4～1/10 的原则[3]。

2.2　测量基准

人字齿轮零件多是回转体，如图 1 所示人字齿轮轴，整个零件的结构都是回转体，也就是说没有可以确定径向方向的基准特征，要想得到坐标值，要么加工一个径向基准，要么将直角坐标系转换成极坐标系。前者可能会破坏成品零件，造成浪费，后者更符合实际要求。因此只要将人字齿轮的中心截面定为找正基准，回转体的中心作为坐标系的原点就能实现极坐标系的建立。

2.3　对应点位置控制

按照上述的分析思路，需要将对应点的两个坐标加以控制。在此坐标系中，为了对应点在齿面的同一截面，可以将极半径作为一个控制的坐标，由于左右旋向齿面的极角偏差是导致齿面不对称的主要因素，在相同极角处采点不易控制，因此要将高度作为另一个要控制的坐标。

2.4　测量过程

选择合适的测头，在此，选择直径是 1 mm 的测头，转角 A90B180，选择相对应的齿面，在左右旋齿面上分别固定极半径和高度进行对应点探测，反复更新触测点的坐标，然后进行自动采点，直到两个点的极半径相同(差值<0.001 mm)、高度绝对值相同且一正一负(通常 3～5 次即可)，得到两点间的极角偏差值。

3　测量结果分析

3.1　余弦误差的影响

由于所测量的是曲面上的点，因此需要考虑余弦误差的影响。按图 4 所示的触测方向，被测两点的余弦误差为 δ_1 和 δ_2，$\delta_1 = r - r\times\cos\alpha_1$，$\delta_2 = r - r\times\cos\alpha_2$，由于余弦误差带来的偏差为 $|\delta_1 - \delta_2| = r|(\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1)|$，$r$ 为所用测头半径，和 α_2 分别为上下齿轮的倾斜角度。由于上下齿加工时基准平面相同，且是在一次装夹后一道工序加工出来的，因此可以保证左右旋向齿轮的倾斜角度差值很小(30′以内)。

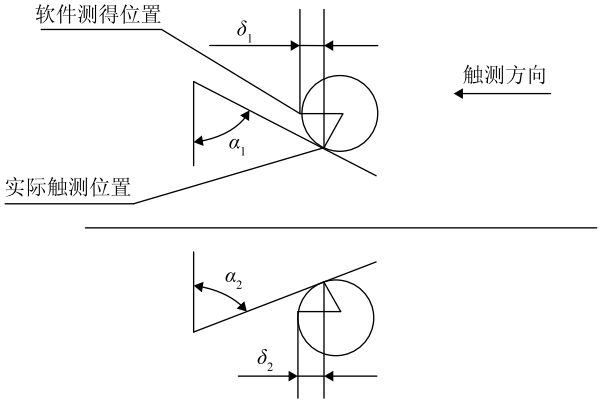

图 4　人字齿轮对应点余弦误差示意图[4]

通过在左右旋向齿槽安放辅助测量滚棒的方式，实际测得此人字齿轮左右旋向齿轮的倾斜角度分别为 30°5′ 和 29°52′，所用测头半径为 0.5 mm，则 $|\delta_1 - \delta_2| \approx 0.001$ mm。由此看来，在所用测头半径较小时，余弦误差对测量此对称度误差的影响可以忽略。

3.2　对称度的计算

如图 3 所示，通过对应点的测量，可以得到两个对应点间的极角偏差 ξ_α，换算成弦长 S，有

$$S = \Delta T_s = R\pi\ \xi_\alpha / 180 \qquad (1)$$

式中：R 为极半径。极角偏差很小，因此弦长近似等于弧长。ΔT_s 为相对中间基准截面同一高度的两个实际对应点之间的沿齿轮周向距离偏差，即对应点间的极角偏差所对应的弦长。

再换算成轴向差值最终求出实际的对称度误差[5]：

$$f = 2\Delta T_h = \Delta T_s / \tan\beta \qquad (2)$$

式中：β 为斜齿的倾斜角度。

以某人字齿轮为例，用三坐标测量机测得的测量结果为 $\xi_\alpha = 0.002°$，$R = 300$ mm，将测量结果代入公式(1)，则

$$\Delta T_s = 0.011 \text{ mm}$$

β 为已知参数，$\beta = 30°$，由公式(2)，有

$$f = 0.011 \text{ mm} / \tan 30° = 0.018 \text{ mm}$$

从工艺人员处获取到的该人字齿轮在机床上测量到的左右旋向齿面的极角差值与在三坐标测量机上所测得的结果基本一致(两种方法极角差差值不大于 0.002°)。由于机加过程中要保证齿形误差合格，因此整个齿面上点的对称偏离量都应是相同的，每个点之间不会有较大差别。但为了验证整个齿面的对称度误差都符合要求，需要在人字齿轮的齿面的不同位置进行采点，通常在圆周分布的 4 个不同齿面上进行采点，每个齿面按上中下测量 3 个点。取所有有效点对称度的最差值作为最终测量结果。

3.3　测量不确定度分析

3.3.1　测量不确定度来源

通过对测量设备和测量过程进行分析，测量中，可能引入不确定度的来源有：三坐标测量机探测误差、测量结果重复性、工件的形状误差(加工质量)、测力和探针旋转角度、三坐标测量机和被测工件线膨胀系数差、三坐标测量机和被测工件温度差。

3.3.2　标准不确定度分析

1)三坐标测量机引入的不确定度分量 u_1

通过查阅此台三坐标的校准证书，此三坐标的探测误差为 1.3 μm，取均匀分布，则

$$u_1 = 1.3\ \mu\text{m}/\sqrt{3} = 0.75\ \mu\text{m}$$

2)重复性引入的不确定度分量 u_2

运用本文所述测量方法，对一人字齿轮齿面的对称度进行 6 次重复性测量。测量结果分别为 0.020，0.018，0.018，0.016，0.018，0.016 mm。

运用极差法求得实验标准偏差：

$$s = 0.004 \text{ mm}/2.53 = 0.0016 \text{ mm}$$

取单次测量结果作为最终测量结果，则

$$u_2 = s = 0.0016 \text{ mm} = 1.6\ \mu\text{m}$$

3)工件的形状误差所引入的测量不确定度分量 u_3

被测齿轮的齿面形状偏差为 2 μm，取均匀分布，则

$$u_3 = 2\ \mu\text{m}/\sqrt{3} = 1.2\ \mu\text{m}$$

4)三坐标测量机和被测工件线膨胀系数差引入的不确定度分量 u_4 和温度差引入的确定度分量温度差引入的不确定度分量 u_5

实验件经过恒温处理，且环境温度稳定，线膨胀系数和温度对于测量点的影响很小，因此三坐标测量机和被测工作线膨胀系数差引入的不确定度分量 u_4 和温度差引入的不确定度分量 u_5 可以忽略不计。

5)测力和探针旋转角度引入的不确定度分量 u_6

该项测量误差已包含在测量重复性中，不需要重复分析。

3.3.3 合成标准不确定度和扩展不确定度

引入各不确定度分量的因素互不相关，由方和根公式，合成标准不确定度为

$u_c=\sqrt{u_1^2+u_2^2+u_3^2}=2.1\ \mu m$

取 $k=2$，扩展不确定度为

$U=2\times2.1\ \mu m=4.2\ \mu m$

不确定度分析结果符合 1/3~1/10 的测量原则，此方法能够满足人字齿轮齿面对称度公差为 0.05 mm 的要求。

4 结语

在加工人字齿轮过程中，对其两侧齿面的对称度误差采用专用测具进行在线检测的方法比较普遍，但在其他测量设备如三坐标测量机上测量的方法仍然需要研究。本文所述的人字齿轮的检测方法，能够解决人字齿轮两侧齿面的对称度在三坐标测量机上检测的问题，经过不确定度分析验证，此种方法可以给出准确的对称度值，不仅不需要破坏零件，检测效率也较高，为检测人字齿轮对称度提供了很好的方法，具有参考价值。

参 考 文 献

[1] 王成，方宗德，贾海涛，等. 修形人字齿轮传动误差计算与试验研究[J]. 中国机械工程，2009，20(20)：2427-2430.

[2] 国家质量监督检验检疫总局，国家标准化管理委员会. GB/T 1182-2008/ ISO/TS 1101：2004 产品几何技术规范(GPS)几何公差形状、方向、位置和跳动公差标注[S]. 北京：中国标准出版社，2008.

[3] 国家质量技术监督局. JJF 1059-1999 测量不确定度评定与表示[S]. 北京：中国计量出版社，1999.

[4] 海克斯康测量技术公司. 实用坐标测量技术[M]. 北京：化学工业出版社，2007：21-22.

[5] 王世辰，吕亚丹，高春田. 人字齿轮对中偏差的计算和控制[J]. 机械工程师，2002(8)：63-64.

(上接第 13 页)

3)两点式拟合是指选择零点和满量程两点或选取中间任意两点做一阶线性拟合。

本实验两点式拟合结果为

零点和满量程拟合：$y_4=9.505x-4.706$

24 kPa 点和 33 kPa 点拟合：$y_5=9.478x-4.6$

由图 5 分析，传感器精度误差的基本趋势是低温正偏差，高温负偏差；Matlab 全压力点的拟合方法优于两点式拟合，全量程来看，Matlab 分析中一次和二次拟合误差较小，可以作为最优拟合法，误差均匀的分布在-0.1~0.1 之间，在 24~33 kPa 区间，一次方拟合精度较高，全量程二次方拟合精度较高，可以根据需要选择拟合方法。

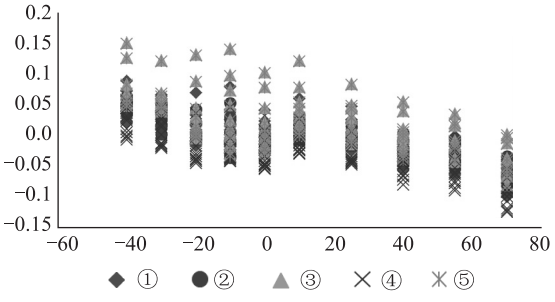

图 5 误差散点图

4 结束语

本文给出了利用 MAX1452 补偿硅压阻压力传感器的方法，着重介绍了数字补偿技术的原理和软硬件设计，分析了补偿温度点的选择、拟合方法的验证。测试表明：该技术稳定可靠，通讯方便，精度可达 0.1%。

参 考 文 献

[1]刘鹏，杨学友，杨凌辉，等. 基于 MAX1452 硅压力传感器温度补偿系统的设计[J]. 仪表技术与传感器，2010(4)：61-64.

[2] 赵岩，李永红，王恩怀. 基于 MAX1452 的 MEMS 压力传感器校准系统的设计[J]. 仪表技术与传感器，2009(10)：94-96.

[3] 孙凤玲，于海超，王金文，等. 硅压阻式压力传感器温度补偿建模与算法研究[J]. 微纳电子技术，2007，44(7)：48-50.

[4] 樊尚春，彭春荣. 硅压阻压力传感器的温度特性及其补偿[J]. 微纳电子技术，2003(8)：484-488.

[5] 赵妍，刘志珍. 基于 MAX1452 的压力传感器温度补偿[J]. 电气应用，2006，25(4)：137-139.