

# Comparative Analysis of Gear Measurement in Different Coordinate Systems

Bin Zhang

Hexacon Manufacturing Intelligent Technology (Qingdao) Co., Ltd., Qingdao, Shandong, 266000, China

## Abstract

Gears are essential key components in mechanical transmission systems, and their precise measurement is crucial for ensuring the stability and operational efficiency of the transmission system. This paper aims to compare and explore gear measurement methods based on different coordinate systems, with cylindrical involute gears as the research object. Through two system building methods, surface alignment and cylindrical alignment, the differences in measurement results and optimization potential are analyzed. In this study, we conducted experiments based on Quindos software, first using two methods of gear measurement: surface alignment and cylinder alignment. These two methods establish coordinate systems based on the different geometric features of gears, which affects the measurement accuracy and reliability of the results. This study explores the effectiveness and differences of these two methods in practical applications through experiments and data analysis, aiming to provide scientific decision support for gear measurement processes and improve measurement accuracy and reliability. The research results will help optimize gear measurement methods and provide valuable references and guidance for related fields.

## Keywords

gear measurement; coordinate system comparison; Quindos software; measurement accuracy

## 不同坐标系下的齿轮测量对比分析

张斌

海克斯康制造智能技术(青岛)有限公司, 中国·山东 青岛 266000

## 摘要

齿轮是机械传动系统中不可或缺的关键部件,其精确测量对确保传动系统的稳定性和运行效率至关重要。论文旨在比较和探讨基于不同坐标系的齿轮测量方法,以圆柱渐开线齿轮为研究对象,通过面找正和圆柱找正两种建系方法,分析它们在测量结果上的差异及优化潜力。在本研究中,我们以Quindos软件为基础进行实验,首先使用面找正和圆柱找正两种方法进行齿轮测量。这两种方法分别以齿轮的不同几何特征为基准进行坐标系的建立,从而影响测量精度和结果的可靠性。本研究通过实验和数据分析,探讨了这两种方法在实际应用中的效果和差异,旨在为齿轮测量过程提供科学的决策支持,提高测量的准确性和可靠性。研究结果将有助于优化齿轮测量方法,为相关领域提供有价值的参考和指导。

## 关键词

齿轮测量; 坐标系比较; Quindos软件; 测量精度

## 1 背景和研究意义

齿轮作为机械传动中常见的元件,扮演着传递力和运动的重要角色。齿轮的准确测量对于确保传动系统的稳定性、运行效率和使用寿命至关重要。因此,研究基于不同坐标系的齿轮测量方法比较具有重要的实际意义。传统的齿轮测量方法通常基于机床坐标系进行,即直接将齿轮装夹在机床上进行测量。这种方法在技术上较为成熟,但在复杂形状、特定规格或高精度要求(如航空航天、精密仪器等)下,可

能无法满足需求<sup>[1]</sup>。因此,一些研究者开始探索使用零件坐标系进行齿轮测量的方法。

在基于零件坐标系的齿轮测量中,齿轮被脱离机床进行测量,并以齿轮的几何特征为基准进行坐标系的建立和测量。这种测量方法可以更好地适应复杂形状的齿轮,提高测量精度和测量效率。因此,不同坐标系的齿轮测量对比研究可以帮助我们了解每种方法的优劣势、适用范围和潜在问题,可以为齿轮测量过程提供决策支持和提高测量的准确性和可靠性<sup>[2,3]</sup>。

## 2 齿轮检测方法概述

### 2.1 齿轮检测原理

齿轮测量是通过对齿轮的几何特征进行测量和分析来

【作者简介】张斌(1993-),男,中国江苏南通人,硕士,工程师,从事三坐标测量,模块化编程定制开发,特殊模块类(齿轮、压缩机转子、叶盘等)检测研究。

获取齿轮的尺寸、形状和位置等信息的过程。齿轮测量的基本原理包括以下几个方面：

**坐标系的建立：**在齿轮测量中，需要建立适当的坐标系以便进行测量和分析。常用的坐标系建立包括基准面找正、基准轴找正。

**探测器和传感器的使用：**齿轮测量需要使用各种探测器和传感器来获取齿轮的几何特征，常见的探测器包括触发式探测器、非接触式激光扫描器等。触发式探测器可以通过接触齿轮表面来测量齿轮的尺寸和形状，而非接触式激光扫描器可以通过激光束扫描来获取齿轮的三维表面数据。

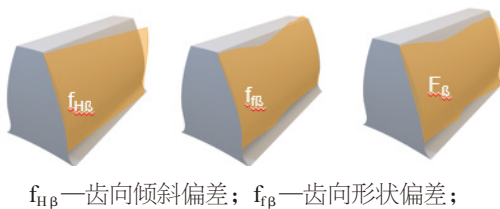
**测量参数和测量标准：**齿轮测量中常用的参数包括模数、齿数、压力角、螺旋角等，常用的测量标准包括：DIN 3962:1978、DIN 5480:2006、ISO 1328-1:1995、AGMA 2015-1A01:2015、JIS 1702-1/2:1998 等。

### 2.2 齿轮检测项目

齿轮检测项目主要包括齿廓测量（图 1）、齿向测量（图 2）、齿距跳动（图 3、图 4）、跨棒距和公法线等。



图 1 齿廓评价项目



$f_{H\beta}$ —齿向倾斜偏差； $f_{f\beta}$ —齿向形状偏差； $F_{\beta}$ —齿向总偏差

图 2 齿向评价项目

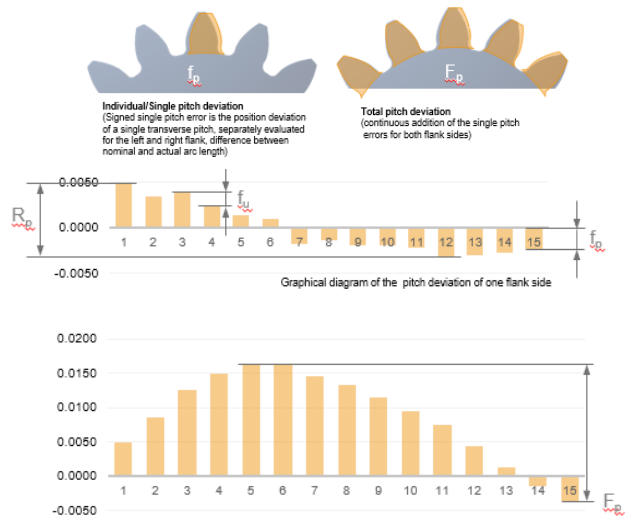
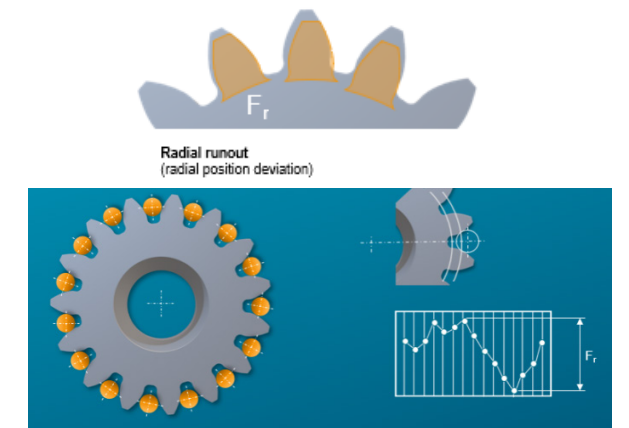


图 3 齿距评价项目



$f_p$ —单个齿距偏差； $F_p$ —齿距累积偏差； $f_u$ —相邻齿距偏差； $R_p$ —单个齿距极限偏差； $F_r$ —径向跳动

图 4 跳动评价

## 3 不同坐标系检测对比

### 3.1 齿轮检测设备

齿轮检测设备如表 1 所示。

表 1 齿轮检测设备

| 测试设备及条件    |                |         |                        |        |         |        |         |      |
|------------|----------------|---------|------------------------|--------|---------|--------|---------|------|
| 项目         | 地点             | 厂商      | 机型                     | 控制柜    | 测头      | 电脑系统   | 测量软件    | 分析软件 |
| 实际条件       | 无锡             | Hexagon | Global S 09.15.08-Blue | DC800  | X5      | Win10  | Quindos | 齿轮模块 |
| 测量机精度      |                |         |                        |        |         |        |         |      |
| E0/E150 um | 理论             | 实际      | THP/um/sec             | 理论     | 实际      | PFTUum | 理论      | 实际   |
|            | 1.2+2.8/1000um | 0.46    |                        | 2.5/40 | 1.69/37 |        | 1.4     | 1.04 |
| R0 um      | 1.4            |         |                        |        |         |        |         |      |
| 温度 / 湿度    |                |         |                        |        |         |        |         |      |
| 温度         | 20°C ± 1°C     | 湿度      | 60%                    |        |         |        |         |      |

### 3.2 齿轮检测状态

检测齿轮由于精度等级高，需要恒温一段时间再去进行测量，本次检测对比中都使用了温度补偿并保证工件放置稳定<sup>[4]</sup>，采用三点支撑定位的方式（图 5）。由于齿轮齿数较多，结合现有测针配置若选用 8 方向星型针检测会与齿轮表面发生干涉，故最终选择两组 4 方向星型针搭配 X5 更换架实现自动检测（图 6）。



图 5 三点支撑

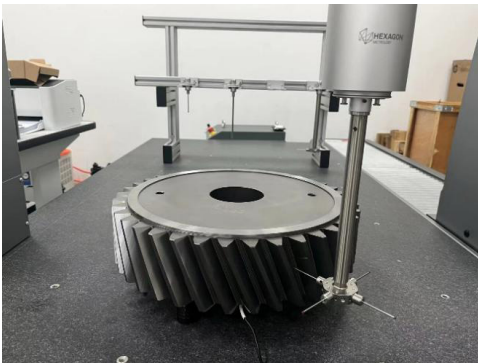


图 6 检测状态

### 3.3 不同坐标系下检测结果对比

首先调取竖直方向测针都以面圆粗建坐标系，接着先以上平面作为 A 基准进行找正，上平面限制 Z 方向原点，中间的内孔用来定 X 和 Y 方向原点，然后使用齿轮模块基于当前面找正的坐标系进行齿廓、齿向、齿距跳动、跨棒距和公法线长度的测量<sup>[5]</sup>，齿形齿向结果如图 7 所示。

紧接着保持工件不动，换成以中间内孔轴线为基准 A 进行找正，限制 X 和 Y 原点，测量上平面来限制 Z 原点，同样以齿轮模块基于当前轴线找正的坐标系进行齿廓、齿向、齿距跳动、跨棒距和公法线长度的测量，齿形齿向结果如图 8 所示。

通过两种坐标系的对比测量，发现两次测量的结果明显有差异。以面找正去测量的结果明显比以内孔找正去测量的结果要好，且第二种测出来的部分结果就不合理，尤其是  $fH\beta$  齿向倾斜偏差。从图 8 可看出，四个齿的左齿面 left 出现正负交叉的情况，右齿面也同样有这种现象且都明显超差<sup>[6]</sup>。正常情况下，机床在加工齿轮的时候，齿轮是定位在

转台上。通过转台旋转和铣刀铣的方式保证齿轮成型。若转台和刀具都 OK，正常不会出现齿向倾斜偏差有正有负的现象。再看图 7，四个齿的右齿面都是负偏差，左齿面有 1 个齿是 -0.4，几乎已经能满足要求了。考虑到被测齿轮等级较高，齿向倾斜偏差公差为 3 $\mu\text{m}$ ，按照 1/3 原则严格上选用的测量机 THP 和 PFTU 都应该在 1 $\mu\text{m}$  以内，本次采用的测量机精度上（见表 1）还差一些所以有可能会出微小的正负值变化，但几乎可以忽略不计。

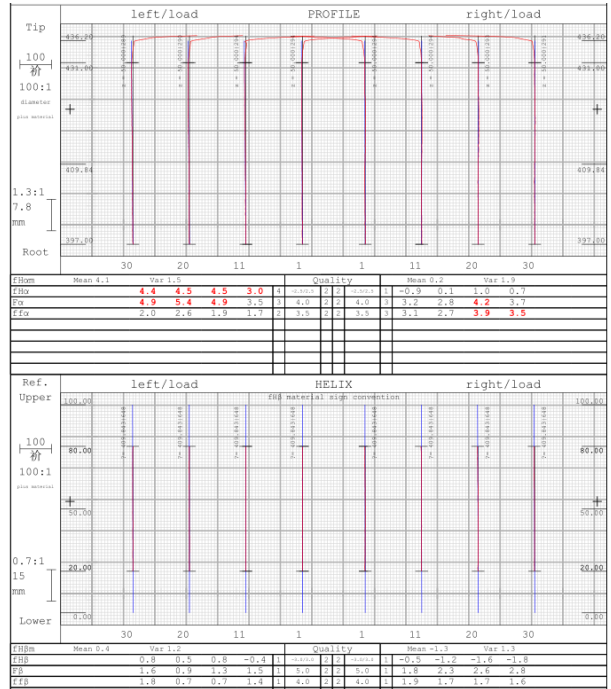


图 7 齿廓齿向结果（面找正）

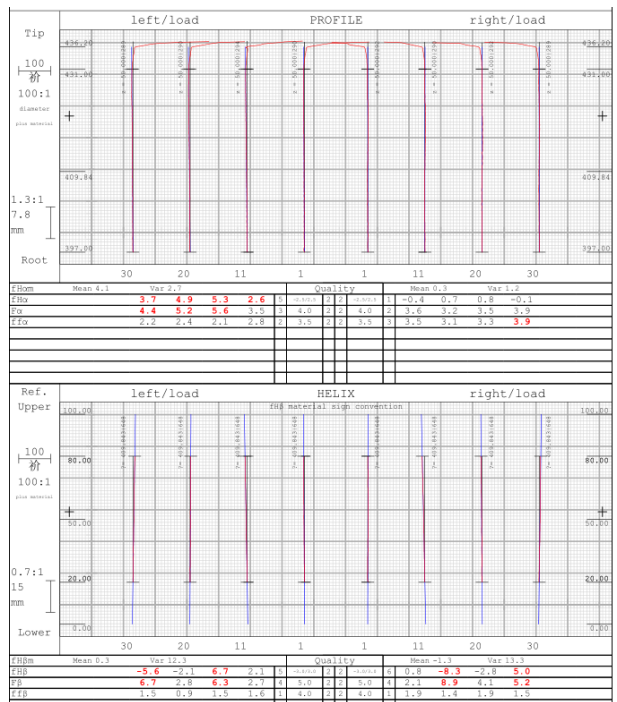


图 8 齿廓齿向结果（内孔找正）

为进一步验证面找正建坐标系的正确性，两种坐标系下又分别复测了两次，测完之后对这6组数据进行统计整理以右齿面的齿向倾斜偏差为例（图9、图10）。

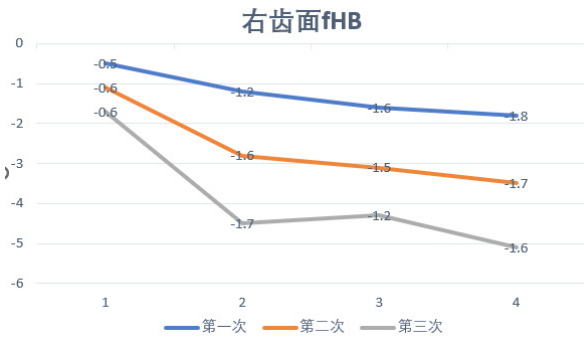


图9 面找正

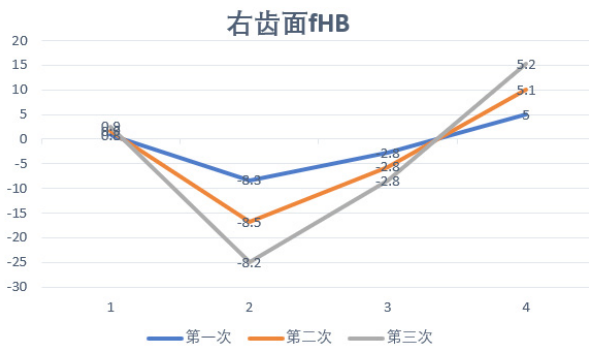


图10 内孔找正

统计整理发现不管哪种建系方式，3次测量的重复性都是OK，都在1um范围内。但以面找正的测量结果除了重复性OK还能保证数据结果的合理性，齿向倾斜偏差都是负值，而以内孔找正的测量结果每次依然表现正负值波动的情况。综上，也再次证明了该二级齿轮应该使用面找正建立坐标系然后再去测量齿廓、齿向等项目才是正确合理的<sup>[7]</sup>。

### 3.4 两种坐标系的验证总结

3.3节分别以两种坐标系做了测量对比（未提供图纸），从测量数据上看明显以面找正去测量更加合理。由于涉及与其他机器的对标，客户只是明确该二级齿轮在克林贝格上测的结果OK并未给出具体报告。一开始客户一直说以内孔为基准找正去测量，但如上所示测出来的结果一直不好并没达到客户期望。在本次测量对比过程中，对各自的第一基准要素分别评价了平面度和圆柱度，如图11所示。

| Text       | Eval.    | Actual | Nominal | Up.Tol. | Low.Tol. | Act-Nom | Graphic |
|------------|----------|--------|---------|---------|----------|---------|---------|
| YUANZHUDU  | ASME_Cyl | 0.1286 | 0.0000  | 0.1000  | 0.0000   | 0.1286  |         |
| PINGMIANDU | ASME_Fla | 0.0050 | 0.0000  | 0.1000  | 0.0000   | 0.0050  |         |

图11

从上述结果中可看出平面度只有5um，而圆柱度快接近13丝了，按照第一基准的特性（准确）选择以平面找正

再去测量才是合理准确的。将该结果与工艺设计部门确定后，他们也认可需要以平面为第一基准找正，这样也符合该齿轮的加工定位基准。

## 4 结论

### 4.1 研究总结

通过对比分析不同坐标系下（面找正和内孔找正）的齿轮测量方法，并输出测量结果，可以得出在齿轮测量中，不同坐标系的选择对测量精度有着重要影响。面找正方法侧重于通过齿轮的接触面建立坐标系，这种方法对齿轮的表面状态要求较高，适用于表面较为规则的齿轮测量。圆柱找正方法则通过齿轮的圆柱形状建立坐标系，这种方法对齿轮的几何轮廓要求较高，能够更好地适应复杂形状的齿轮。合理地选择坐标系类型、参数调整与优化，可以提高齿轮测量的准确性和可靠性。在我们实际检测齿轮过程中，一定要以第一基准或者以加工精度最高的特征元素进行找正第一方向，这样也可以最大程度地避免测量结果的不合理性。

### 4.2 研究的不足和展望

本论文以Quindos软件为基础结合已知路径扫描进行齿轮测量的比较研究，然而，不同的测量软件可能存在差异。结合现有测针配置，本次测试基于两组星型探针完成，测试效率较低，若考虑提升效率，可使用八方向星型针避免频繁换针<sup>[8]</sup>。使用“GearCalcDiaStarStylus”指令计算所需测针长度从而保证不会与齿面发生干涉。因此，未来的研究可以考虑进一步探索其他测量软件的应用以及8方向的测试效果，并进行多软件和多探针的比较研究。此外，对于不同类型和规格的齿轮，也可以研究其对坐标系选择和测量方法包括已知路径扫描和未知路径扫描的影响，以完善齿轮测量领域的理论和实践。

### 参考文献

- [1] 石照耀,于渤,宋辉旭,等.20年来齿轮测量技术的发展[J].中国机械工程,2022,33(9):1009-1024.
- [2] 许钰敏.基准不统一情况下轴类齿轮几何误差测量分析方法研究[D].华侨大学,2021.
- [3] 曾彪,周元生,王圣晖,等.基于通用三坐标测量机的面齿轮齿形误差测量[J].航空动力学报,2022,37(4):856-868.
- [4] 宋爱利,庞敏,宋慧,等.基于三坐标测量机的渐开线齿轮测量方法[J].金属加工(冷加工),2020(5):77-80.
- [5] 沈佳渊.基于通用三坐标测量机的面齿轮齿形误差测量[J].中国金属通报,2023(10):171-173.
- [6] 金雨生,丁建军,张天伟,等.在机测量坐标系转换及齿面误差解算技术与实现[J].仪器仪表学报,2023,44(12):120-133.
- [7] 杨叶茜.坐标系建立误差对啮合式齿轮测量机测量结果的影响及其消减[D].西安工业大学,2022.
- [8] 尹培丽,王建华,韩凡滨,等.极坐标法测量齿廓偏差的坐标系建立误差补偿[J].工具技术,2021,55(12):111-117.