

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513664

# 双啮测量中码特齿轮误差修正方法\*

王笑一<sup>1</sup>, 朱董杰<sup>1</sup>, 刘明康<sup>1,2</sup>, 石照耀<sup>2</sup>, 包永久<sup>3</sup>

(1. 河南科技大学机电工程学院 洛阳 471003; 2. 北京工业大学北京市精密测控技术与仪器工程技术研究中心 北京 100124; 3. 哈尔滨创博科技有限公司 哈尔滨 150028)

**摘要:** 双面啮合测量可获取齿轮径向综合偏差, 是齿轮生产现场最为常用的全检方法。但双啮测量结果通常会受到码特齿轮误差的影响, 修正双啮测量结果中码特齿轮引入的误差是提高双面啮合测量应用价值的有效方法。基于现有双面啮合综合测量仪, 提出了基于码特齿轮错齿和连续旋转测量的双啮测量中码特齿轮误差修正方法, 获取了可应用于双啮测量结果的码特齿轮误差修正值, 设计了码特齿轮和被测齿轮具有不同径向综合偏差的多组仿真试验, 揭示了径向综合偏差对双啮测量结果的影响和码特齿轮误差修正方法的作用机制, 提出了可反映双啮测量系统精度的一致性评价指标, 验证了该码特齿轮误差修正方法的有效性。测量试验表明, 利用该方法修正双啮测量结果后, 从码特齿轮不同相位、被测齿轮同一相位开始测量得到的中心距曲线簇的一致性明显增强。相较于误差修正前, 一致性评价指标表明双啮测量系统精度提高了 77.82%; 相较于现有的误差修正方法, 中心距曲线簇的一致性评价指标提高了 52.08%。提出的双面啮合测量码特齿轮误差修正方法有效减小了码特齿轮误差对双啮测量结果的影响, 增强了双啮测量结果的可追溯性和双面啮合测量方法的应用价值, 提高了双啮测量系统精度, 使双啮测量结果能更准确地表征被测齿轮质量, 在测量效率和误差修正效果上具有优越表现。

**关键词:** 双啮测量结果; 码特齿轮; 中心距; 误差修正

**中图分类号:** TH17 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

## Error correction method for master gear in double-flank measurement

Wang Xiaoyi<sup>1</sup>, Zhu Dongjie<sup>1</sup>, Liu Mingkang<sup>1,2</sup>, Shi Zhaoyao<sup>2</sup>, Bao Yongjiu<sup>3</sup>

(1. School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China;  
2. Beijing Engineering Research Center of Precision Measurement Technology and Instruments, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 3. Harbin Chuangbo Technology Co., Ltd., Harbin 150028, China)

**Abstract:** Double-flank measurement is the most widely used full inspection method in gear production workshops, which can obtain the radial composite deviation of gears. However, the double-flank measurements are usually affected by the error of the master gear. Correcting the error introduced by the master gear in double-flank measurements is an effective method to improve the application value of double-flank measurement. Based on the existing double-flank rolling tester, an error correction method for the master gear in double-flank measurement, based on changing the initial measurement teeth of the master gear and continuous rotation measurement was proposed. The corrected values of master gear error that can be applied to double-flank measurements are obtained. Multiple sets of simulation experiments with different radial composite deviations for the master gear and product gear are designed. The influence of radial composite deviation on double-flank measurements and the mechanism of the master gear error correction method are revealed. The consistency evaluation parameter that can reflect the accuracy of the double-flank measurement system is proposed to evaluate the effectiveness of the error correction method. The measurement experiments show that, after using this method to correct double-flank measurements, the consistency of the center distance curve cluster measured from different phases of the master gear and the same phase of the product gear is significantly enhanced. Compared with before error correction, the consistency evaluation parameter shows that the accuracy of the double-flank measurement system has increased by 77.82%; compared with existing error compensation methods, the consistency evaluation parameter of

收稿日期: 2025-01-09 Received Date: 2025-01-09

\* 基金项目: 国家自然科学基金(52227809)项目资助

the center distance curve cluster has been improved by 52.08%. The error correction method for master gear in double-flank measurement has effectively reduced the impact of the master gear error on the double-flank measurements. It has enhanced the traceability of double-flank measurements and the application value of double-flank measurement method, improved the accuracy of the double-flank measurement system, and enabled the double-flank measurements to more accurately characterize the quality of the product gear. Furthermore, this method exhibits superior performance in terms of measurement efficiency and the effectiveness of error correction.

**Keywords:** double-flank measurements; master gear; center distance; error correction

## 0 引言

齿轮测量对于保障齿轮质量起着至关重要的作用。双面啮合测量对环境要求低、测量效率高,是大批量齿轮生产现场应用最广泛的检验手段<sup>[1-2]</sup>。

双面啮合测量利用玛特齿轮<sup>[3]</sup>确定被测齿轮的误差。码特齿轮作为双啮测量中的基准件,一般要比被测齿轮精度高2~3个等级。码特齿轮误差不可避免地会影响被测齿轮的径向综合总偏差、一齿径向综合偏差和径向跳动等测量结果。若进一步提高码特齿轮精度,则会导致制造、检验难度大<sup>[4]</sup>,双啮测量成本增高。高精度玛特齿轮的制造难度和制造成本是阻碍双啮测量方法广泛使用的主要因素。

如果能对双啮测量结果中码特齿轮引入的误差进行修正,将从3个方面提升双啮测量的应用价值:1)能够降低对码特齿轮的精度要求,甚至不需要根据产品齿轮参数专门制作码特齿轮、使用产品齿轮就可以替代码特齿轮进行双面啮合测量,这样可以大幅降低双面啮合测量成本,增加双面啮合测量的应用场景;2)能够有效提高双面啮合测量精度,提高双面啮合测量结果的重复性;3)可提升基于双啮测量结果获取的分析式齿轮精度指标的应用价值<sup>[5-7]</sup>。

针对如何修正或分离双啮测量结果中码特齿轮引入的误差,一些学者从不同角度进行了研究,分别取得了一些进展。

文献[8-9]用3个参数相同的同级齿轮互检,叠加运算3种配对齿轮组的双啮测量误差曲线,分离出所有齿轮单独的误差函数,实现用同级被测齿轮互检替代码特齿轮。范小兰<sup>[10]</sup>针对两齿轮齿数相差大导致误差分离方法的检测周期长的问题,提出了一种利用波形合成技术使误差曲线等分并相减求得被测齿轮误差的方法。范义峰等<sup>[11]</sup>用与码特齿轮同等级精度的共轭标定齿轮的某一特定齿去标定码特齿轮的所有齿槽,测量得到码特齿轮误差。此种方法具有一定的修正效果,但过程中需要多次拉开两齿轮并错齿,使码特齿轮所有齿槽依次与被测齿轮的特定齿啮合,因此效率不高。总之,上述研究中的码特齿轮误差修正方法存在效果不明显或效率不高的问题。

此外,国内外有一些齿距偏差标定的相关研究<sup>[12-14]</sup>可供双面啮合测量中码特齿轮的误差修正方法进行参考。Kniel等<sup>[15]</sup>利用齿距偏差的封闭性原理,对齿轮转位测量,可以计算出系统误差的最佳估计值。Lou等<sup>[16]</sup>提出了一种齿距偏差的测量方法,利用旋转齿轮测量的两次数据就可以修正测量过程中的系统误差。上述齿距偏差标定的研究通过控制变量修正了多次测量过程中相同的系统误差。

利用相似的思想,本研究提出了一种测量效率和修正效果更优的双啮测量中码特齿轮误差修正方法。该方法通过转位码特齿轮得到码特齿轮不同轮齿与被测齿轮轮齿的啮合特征数据,联立多圈测量数据求解出码特齿轮的误差估计值。基于本文提出的双啮误差曲线簇一致性评价指标,仿真试验和实测试验均表明应用新方法可显著提高双啮测量精度。

## 1 误差修正方法

误差修正新方法的基本原理是:在双面啮合综合测量仪上,经过码特齿轮的错齿和连续旋转测量,可获得多圈的双啮中心距数据;综合这些数据可计算得到码特齿轮各轮齿相对于某一基准轮齿的径向综合偏差差值,进而可修正双啮测量结果中码特齿轮引入的误差。

此外,运用本文提出的双啮中心距数据高频采样方法和累积误差消除方法,可进一步提升双啮测量系统的精度。

### 1.1 修正方法基本原理

误差修正新方法主要由两个步骤组成:1)在双面啮合综合测量仪上进行码特齿轮错齿测量;2)根据多圈的中心距数据求解双啮测量结果中的码特齿轮误差。

如图1所示,码特齿轮双面啮合测量旋转一圈后,令被测齿轮起始测量轮齿序号不变,码特齿轮改变起始测量轮齿序号后再次旋转一圈(即“错齿”测量),可以得到码特齿轮连续旋转两圈(或多圈)的中心距数据。

根据多圈中心距数据求解双啮测量结果中码特齿轮各轮齿误差的具体方法为:

当第 $i$ 次改变码特齿轮起始测量的轮齿、被测齿轮的第 $m$ 个轮齿和码特齿轮的第 $n$ 个轮齿双面啮合测量

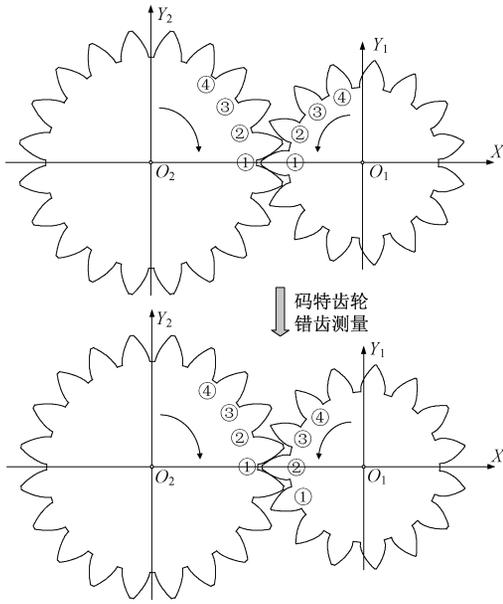


图1 码特齿轮错齿(改变起始测量轮齿)测量

Fig. 1 Master gear changes the initial measurement teeth

时,双面啮合综合测量仪采集得到的中心距数据记为  $a_{m \rightarrow n}^i$ , 将所有中心距数据收集到矩阵  $M_1$  中, 即:

$$M_1 = \begin{bmatrix} a_{1 \rightarrow 1}^0 & a_{1 \rightarrow 2}^1 & \cdots & a_{1 \rightarrow 1}^{z_2} \\ a_{2 \rightarrow 2}^0 & a_{2 \rightarrow 3}^1 & \cdots & a_{2 \rightarrow 2}^{z_2} \\ a_{3 \rightarrow 3}^0 & a_{3 \rightarrow 4}^1 & \cdots & a_{3 \rightarrow 3}^{z_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{k \rightarrow z_2}^0 & a_{k \rightarrow 1}^1 & \cdots & a_{k \rightarrow z_2}^{z_2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,  $z_2$  是码特齿轮的齿数,  $k$  是在双面啮合测量时被测齿轮与码特齿轮的第  $z_2$  个轮齿啮合的轮齿号。

式(1)中, 矩阵  $M_1$  的每个元素可以被描述为  $P_m^i + g_n^i + a$ 。其中, 第  $i$  次改变码特齿轮的起始测量的轮齿时, 被测齿轮第  $m$  个齿的径向综合偏差用  $P_m^i$  表示, 码特齿轮第  $n$  个齿的径向综合偏差用  $g_n^i$  表示,  $a$  用来表示被测齿轮和码特齿轮的理论中心距。则  $M_1$  可以表述为:

$$M_1 = \begin{bmatrix} P_1^0 + g_1^0 + a & P_1^1 + g_2^1 + a & \cdots & P_1^{z_2} + g_1^{z_2} + a \\ P_2^0 + g_2^0 + a & P_2^1 + g_3^1 + a & \cdots & P_2^{z_2} + g_2^{z_2} + a \\ P_3^0 + g_3^0 + a & P_3^1 + g_4^1 + a & \cdots & P_3^{z_2} + g_3^{z_2} + a \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_k^0 + g_{z_2}^0 + a & P_k^1 + g_1^1 + a & \cdots & P_k^{z_2} + g_{z_2}^{z_2} + a \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,  $M_1$  的第1和第2列数据对应相减, 可以得到  $M_{1 \rightarrow 2}$ , 即:

$$M_{1 \rightarrow 2} = \begin{bmatrix} g_1^0 - g_2^1 \\ g_2^0 - g_3^1 \\ g_3^0 - g_4^1 \\ \vdots \\ g_{z_2}^0 - g_1^1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

用  $\Delta_{1 \rightarrow 2}$  表示码特齿轮的第1号轮齿与第2号轮齿之间的径向综合偏差的差值, 即:

$$\Delta_{1 \rightarrow 2} = g_1 - g_2 \quad (4)$$

则式(3)中  $M_{1 \rightarrow 2}$  的可以表述为:

$$M_{1 \rightarrow 2} = \begin{bmatrix} \Delta_{1 \rightarrow 2} = g_1^0 - g_2^1 \\ \Delta_{2 \rightarrow 3} = g_2^0 - g_3^1 \\ \Delta_{3 \rightarrow 4} = g_3^0 - g_4^1 \\ \vdots \\ \Delta_{z_2 \rightarrow 1} = g_{z_2}^0 - g_1^1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

则可得到码特齿轮的第1号轮齿与第  $n$  号轮齿之间的径向综合偏差的差值, 即:

$$\Delta_{1 \rightarrow n} = \sum_{i=2}^n \Delta_{i-1 \rightarrow i} \quad (6)$$

选择式(2)中  $M_1$  的任意相邻的两列数据, 第  $j$  列和第  $j+1$  列, 根据上文叙述的方法可以得到码特齿轮的第  $j$  号轮齿与第  $n$  号轮齿之间的径向综合偏差的差值  $\Delta_{j \rightarrow n}$ , 即:

$$\Delta_{j \rightarrow n} = \begin{cases} \sum_{i=j+1}^n \Delta_{i-1 \rightarrow i}, & n > j \\ - \sum_{i=j+1}^n \Delta_{i-1 \rightarrow i}, & n < j \end{cases} \quad (7)$$

综上所述, 基于式(2)、(3)、(5)、(7), 可以得到码特齿轮的某一轮齿(第  $S$  号轮齿)与其他所有轮齿之间的径向综合偏差的差值, 即:  $\Delta_{S \rightarrow 1}, \Delta_{S \rightarrow 2}, \Delta_{S \rightarrow 3}, \dots, \Delta_{S \rightarrow z_2}$ 。

这些径向综合偏差的差值即为双啮测量结果中码特齿轮各轮齿引入误差的修正值。将双啮测量结果与修正值在相同相位处进行线性叠加, 就可以得到更精确的被测齿轮的误差数据。

### 1.2 评价指标与改善方法

消除双啮测量结果中码特齿轮引入的误差后, 从码特齿轮不同相位起始测量得到的多条中心距曲线的一致性会增强。为了评价不同组试验中分别获取的多条双啮误差曲线(即中心距数据)的一致性, 首先求出曲线簇的均值曲线, 即:

$$\mu_i = \frac{\sum_{k=1}^N a_i^k}{N} \quad (8)$$

式中:  $\mu_i$  为曲线簇中所有曲线的第  $i$  个中心距数据的平均值;  $a_i^k$  为第  $k$  条中心距曲线的第  $i$  个中心距数据。

再计算  $N$  条曲线组成的曲线簇相对于均值曲线的曼哈顿距离的平均值,再除以曲线的采样点数,获得与中心距平均变动量等价的线性距离,作为中心距曲线簇的一致性评价指标,即曲线的平均曼哈顿距离 (average manhattan distance of curves, AMDC):

$$AMDC = \frac{\sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{n \times z_1} |a_i^k - \mu_i|}{N \times n \times z_1} \quad (9)$$

其中,  $n$  为单个齿距角范围内的中心距采样点,  $z_1$  为被测齿轮齿数。计算出的双啮中心距数据一致性评价指标数值越小,说明双啮测量系统的精度越好,误差修正效果越好。

高频采样情况下,双面啮合测量结果中码特齿轮误差修正的思路如图 2 所示。

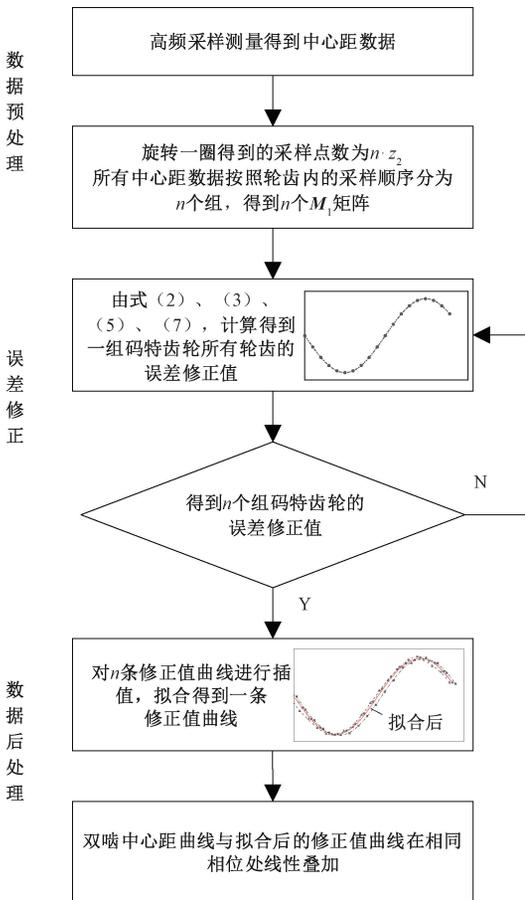


图 2 高频采样误差修正思路

Fig. 2 High-frequency sampling error correction ideas

若单个轮齿范围内的中心距采样点为  $n$  个,将采样得到的所有中心距数据按照轮齿内的采样顺序分为  $n$  个组,可得到  $n$  个  $M_1$  矩阵。对任一  $M_1$  矩阵,利用式(2)、(3)、(5)、(7),可以得到误差修正值。对得到的  $n$  条修正值曲线进行插值,再利用最小二乘法拟合,可以得到一

条修正值曲线。将双啮测量结果与拟合后的修正值曲线在相同相位处线性叠加,得到修正双啮测量结果中码特齿轮引入误差后的被测齿轮径向综合偏差。上述方法中改变码特齿轮起始测量的轮齿、进行至少一次错齿测量,使用  $M_1$  矩阵中至少两列数据求解误差修正值。但当码特齿轮的齿数较多时,为减小误差修正方法的误差累积,可以错开多个齿进行多次测量,即选取  $M_1$  矩阵中不相邻的多列数据联立求解。

## 2 仿真试验

### 2.1 试验思路

为验证本文方法对双啮测量结果修正的正确性和鲁棒性,更好地说明该方法的作用原理,开展 3 组有不同齿轮径向综合偏差的误差修正仿真试验,如图 3~5 所示。仿真试验中的齿轮副基本参数如表 1 所示。

表 1 仿真试验中的齿轮参数

Table 1 Gear parameters in simulation experiment

名称	模数/mm	齿数	压力角/(°)	变位系数
被测齿轮	2	20	20	0
玛特齿轮	2	19	20	0

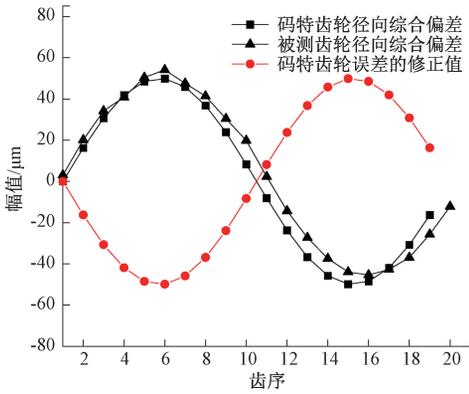
如图 3(a)、4(a)和 5(a)所示,仿真试验中,设定两齿轮的各轮齿径向综合偏差,码特齿轮错齿测量得到两组中心距数据:第 1 次中心距数据集和第 2 次中心距数据集。根据式(3)~(6)求解得到双啮测量结果中码特齿轮引入误差的修正值。

将修正值与两组中心距曲线进行叠加,得到消除双啮测量结果中码特齿轮引入误差后的中心距数据。将修正前后的中心距数据进行对比,如图 3(b)、4(b)和 5(b)所示。

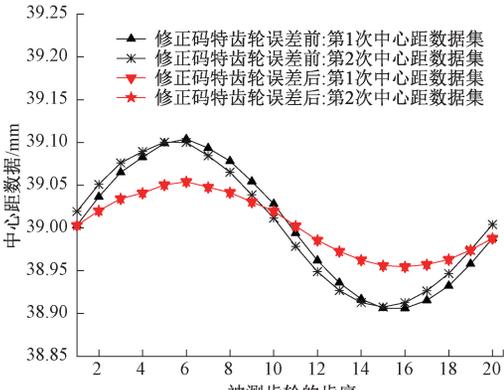
### 2.2 试验结果

仿真试验 I 如图 3 所示。对两齿轮设定相位相同的正弦曲线型的径向综合偏差。被测齿轮和码特齿轮的径向跳动均为  $100 \mu\text{m}$ 。

将修正值线性叠加到双啮测量结果后,可消除码特齿轮径向综合偏差对双啮测量结果的影响。如图 3(b)所示,修正后的两次中心距数据在幅值和相位上相同,两条曲线在图中重叠。且相较于误差修正前的中心距曲线,测得的径向综合总偏差减小了  $100 \mu\text{m}$ ,与码特齿轮的径向综合总偏差数值相同,说明码特齿轮的径向综合偏差在仿真结果中被消除了。验证了本文修正方法的有效性。



(a) 径向综合偏差和修正值  
(a) Radial composite deviation and corrected value



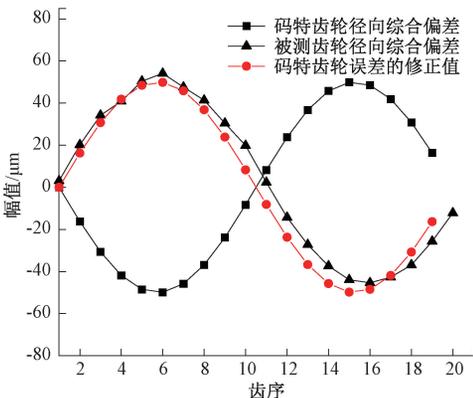
(b) 修正误差前后  
(b) Before and after error correction

图3 仿真试验 I

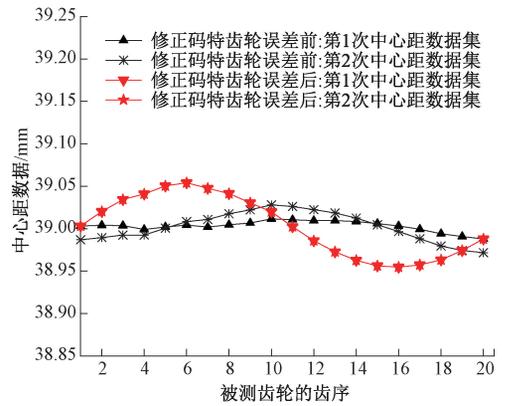
Fig. 3 Simulation experiment I

仿真试验 II 如图 4 所示,设定两齿轮的径向综合偏差在相同相位处大小相同、符号相反。此仿真条件下,码特齿轮的径向综合偏差会导致被测齿轮双啮测量结果中的径向综合偏差偏小。如果本文修正方法能有效修正双啮测量结果中码特齿轮引入误差,则相较于误差修正前,双啮测量结果的径向综合偏差会变大。

如图 4 (b) 所示,修正后的两次中心距数据在幅值和相位上相同,两条曲线在图中重叠。相较于误差修正



(a) 径向综合偏差和修正值  
(a) Radial composite deviation and corrected value



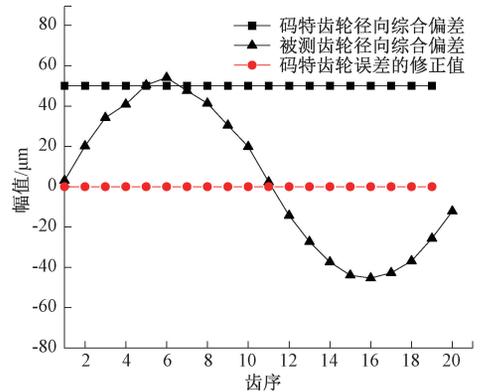
(b) 修正误差前后  
(b) Before and after error correction

图4 仿真试验 II

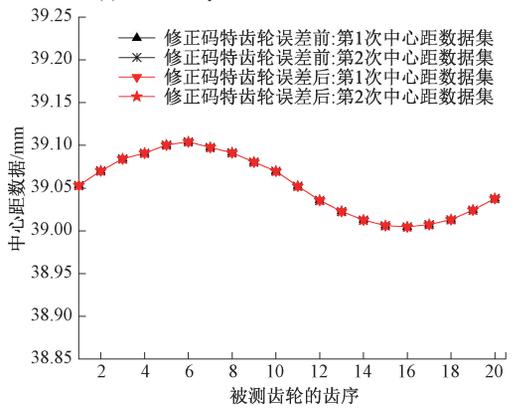
Fig. 4 Simulation experiment II

前的中心距曲线,测得的径向综合偏差增大  $100 \mu\text{m}$ 。同样验证了本文修正方法的有效性。

仿真试验 III 如图 5 所示,设定码特齿轮的径向综合偏差值在每个轮齿上相等。如图 5 (a) 所示,此仿真条件下,求得的修正值均为 0。图 5 (b) 中的 4 条曲线重叠,修正前后的中心距数据没有变化。



(a) 径向综合偏差和修正值  
(a) Radial composite deviation and corrected value



(b) 修正误差前后  
(b) Before and after error correction

图5 仿真试验 III

Fig. 5 Simulation experiment III

仿真试验Ⅲ中的各轮齿之间的径向综合偏差差值为 0,相当于发生变位后的无误差理想齿轮,齿轮副的理论中心距发生变化,故试验结果中的 4 条曲线重叠。通过仿真试验Ⅲ可以更直观地揭示本文修正方法的作用机制:在旋转测量过程中,根据相对比较的原理,计算出码特齿轮各轮齿之间的径向综合偏差相对差,得到能显著提高双啮测量精度的修正值。

### 3 实测试验

利用如图 6 所示的测量系统,进行消除双啮测量结果中码特齿轮引入误差的实测试验。试验用齿轮的参数如表 2 所示。

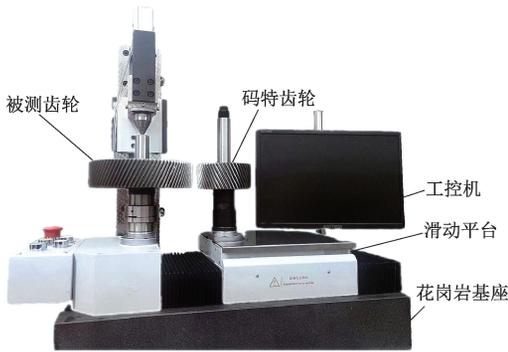


图 6 试验装置

Fig. 6 Experiment equipment

表 2 试验齿轮参数

Table 2 Gear parameters in experiment

名称	模数/ mm	齿数	压力角/ (°)	变位系数	螺旋角/ (°)
被测齿轮	2.07	89	18	0.015	26
玛特齿轮	2.07	50	18	0	26

实测试验中,首先开展了从被测齿轮相同相位、码特齿轮不同相位开始测量的多圈转位试验,验证了本文方法的有效性和鲁棒性。其次,开展了对中心距数据多种采样频率条件下的码特齿轮误差修正方法的试验,说明了高频采样的误差修正思路的改善效果。最后进行了本文方法与现有误差修正方法的对比试验,验证了本文方法误差修正效果的优越性。

#### 3.1 转位试验

从被测齿轮的相同相位、码特齿轮每隔 45°开始测量一次,共得到从码特齿轮的 45°~315°等间隔开始测量的 7 组双啮测量结果,如图 7 所示。

如果能够有效消除双啮测量结果中码特齿轮引入的误差,从被测齿轮的相同相位开始测量得到的中心距曲

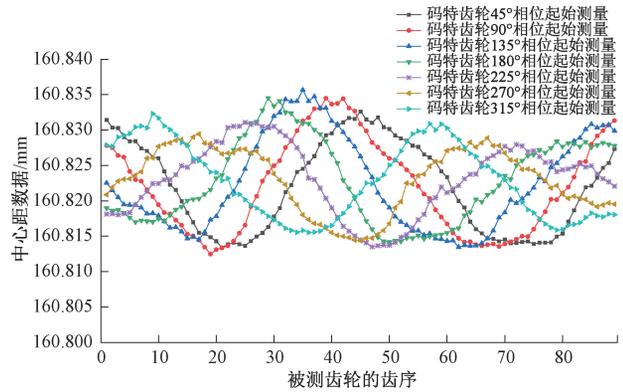


图 7 转位试验双啮测量结果

Fig. 7 Double-flank measurements of rotation experiment

线簇将表现出较强的一致性。

利用本文提出的修正方法,得到如图 8 所示的双啮测量结果中码特齿轮引入误差的修正值曲线。将修正值曲线与转位试验的 7 组双啮测量结果在相同相位处进行叠加,得到如图 9 所示的消除误差后的中心距数据。相较于误差修正前,中心距曲线的极差下降了 50% 左右。从码特齿轮不同相位开始测量的 7 条中心距曲线一致性明显增强,利用式(9)可以计算出中心距曲线簇在误差

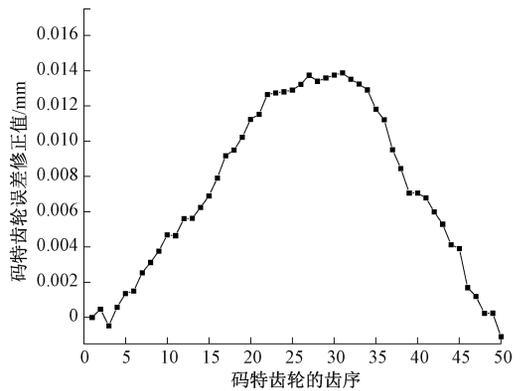


图 8 修正值曲线

Fig. 8 Corrected curve

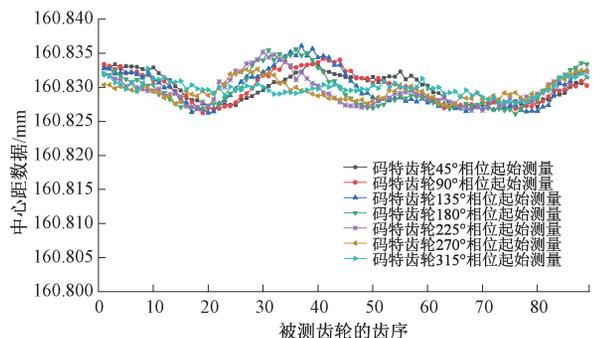


图 9 修正后的中心距数据

Fig. 9 Center distance data after correction

修正前的一致性评价指标为  $4.89 \mu\text{m}$ , 误差修正后的一致性评价指标为  $1.08 \mu\text{m}$ , 一致性评价指标提升了 77.82%, 验证了本文方法的有效性和鲁棒性。

### 3.2 高频采样误差修正试验

本文提出利用高频采样改善误差修正效果思路, 并在不同采样频率下进行了误差修正试验, 验证了这种改善方法的效果。以单个齿距范围内采样一个中心距的误差修正试验为基准, 则单个齿距范围内采样  $N$  个中心距的误差修正试验, 就定义为  $N$  倍频试验。

选取  $M_1$  矩阵中的第 1、5 和 10 列数据进行多次不同倍频的误差修正试验, 并计算出多次试验的中心距曲线簇的一致性评价指标进行对比。

如图 10 所示, 随着中心距采样频率的提高, 一致性评价指标数值逐渐变小, 双啮测量系统精度逐渐提高。这说明, 在一定的采样频率范围内, 高频采样数据能更好的反映码特齿轮的误差特征, 基于高频采样数据能得到更好的误差修正效果。

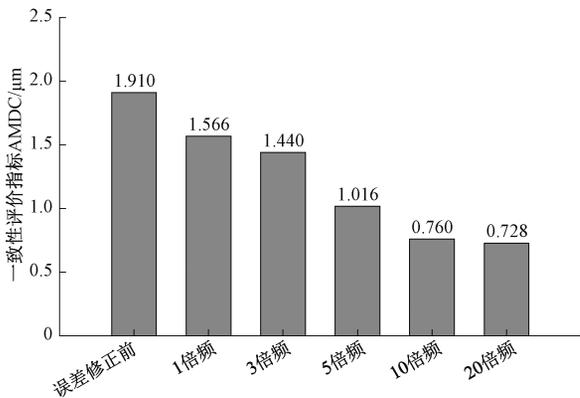


图 10 不同采样频率的误差修正效果对比

Fig. 10 Comparison of error correction effects of different sampling frequencies

### 3.3 对比试验

在相同试验条件下进行对比试验, 用一致性评价指标对比本文方法和现有方法<sup>[11]</sup>的误差修正效果。

与转位试验类似, 从被测齿轮相同相位开始测量, 码特齿轮分别从 1 号、5 号和 10 号齿槽开始测量, 得到 3 组双啮测量结果, 即  $0^\circ$ 、 $36^\circ$  和  $72^\circ$  相位数据。分别采用本文方法和现有方法对 3 组双啮测量结果进行误差修正。图 11~12 分别对比了用两种方法进行误差修正前后的中心距数据。

如表 3 所示, 计算出图 11~12 的中心距曲线簇的一致性评价指标和消除误差后的中心距曲线簇的一致性提升率。

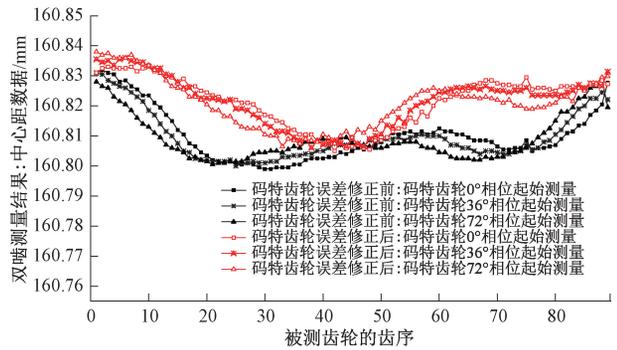


图 11 现有方法误差修正效果

Fig. 11 Error correction effect of existing method

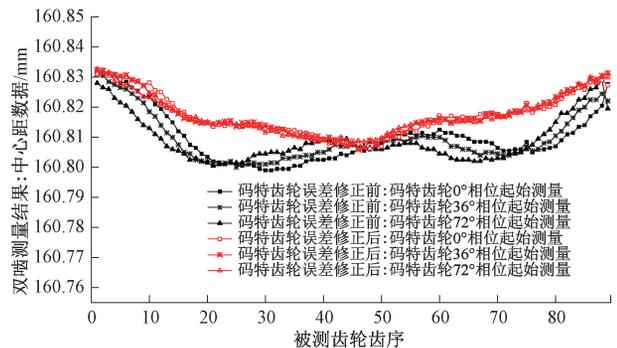


图 12 本文方法误差修正效果

Fig. 12 Error correction effect of the method proposed in this paper

表 3 误差修正效果对比

Table 3 Comparison of error correction effects

名称	一致性评价指标 AMDC/ $\mu\text{m}$	中心距曲线一致性 提升率/%
双啮测量结果	1.92	0
现有方法补偿后	1.70	11.46
本文方法修正后	0.70	63.54

利用本文方法进行修正后, 中心距曲线簇的一致性相较于未修正之前的中心距曲线簇提升了 63.54%; 利用现有方法进行修正后, 中心距曲线簇的一致性相较于未修正之前的中心距曲线簇提升了 11.46%。从一致性评价指标来看, 相较于现有方法, 本文方法使中心距曲线簇的一致性增强了 52.08%。本文方法相对于现有方法具有明显的优越性。

## 4 结 论

被测齿轮在双面啮合综合测量仪上进行测量时, 码特齿轮误差会影响双啮测量结果。本文对基于错齿和连

续旋转测量的双啮测量中码特齿轮误差修正方法进行了研究,提出了反映双啮测量系统精度的一致性评价指标。进行了验证方法正确性、鲁棒性和优越性的仿真和实测试验。测量实践表明,相较于修正前的双啮测量结果,从码特齿轮不同相位、被测齿轮同一相位测量的中心距数据曲线簇的一致性明显增强,增强了77.82%;相较于已有的误差补偿方法,一致性增强了52.08%;利用本文方法进行误差修正后的双啮测量结果受码特齿轮误差的影响明显变小。

本文方法可以有效减小码特齿轮误差对双啮测量结果的影响,将使双啮测量结果更准确地表征被测齿轮质量,增强双啮测量结果的可追溯性和应用价值,提高双啮测量系统精度。相比于现有的双啮测量码特齿轮误差修正方法,本文方法误差修正的效率更高、效果更好。

未来,对比本文方法获取的码特齿轮误差修正值与齿轮测量中心获取的码特齿轮测量结果,可对码特齿轮误差修正方法进一步加以改善。另外,为了提高本文修正方法的应用效率,应开发专用的软件算法。

## 参考文献

- [1] GOCH G, GUENTHER A, PENG Y, et al. Gear metrology-an update[J]. *CIRP Annals*, 2023, 72(2): 725-751.
- [2] 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.  
SHI ZH Y, YU B, SONG H X, et al. Development of gear measurement technology during last 20 years[J]. *China Mechanical Engineering*, 2022, 33(9): 1009-1024.
- [3] 国家标准化管理委员会(SAC/TC 52). 圆柱齿轮 ISO 齿面公差分级制第2部分: 径向综合偏差的定义和允许值: GB/T 10095.2—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.  
Standardization Administration of the P. R. C(SAC/TC 52). Cylindrical gears-ISO system of flank tolerance classification-part 2: Definitions and allowable values of double flank radial composite deviations: GB/T 10095.2—2023[S] Beijing: China Standards Press, 2023.
- [4] LING S Y, ZHANG B, ZHANG J, et al. Two gear-grinding techniques to improve pitch deviations of ultra-precision gears[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2015, 229(11): 1955-1962.
- [5] WANG X Y, LIU M K, YAO T Y, et al. Study on the measurability of gear analytical parameters in double-flank

- measurement[J]. *Sensors*, 2023, 23(24): 9728.
- [6] WANG X Y, LIU M K, YAO T Y, et al. A novel method for obtaining analytical parameters based on double-flank measurement[J]. *Sensors*, 2024, 24(9): 2734.
- [7] 石照耀, 汤洁, 魏华亮, 等. 基于双面啮合多维测量原理的齿轮在线测量机[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(2): 303-307.  
SHI ZH Y, TANG J, WEI H L, et al. Gear in-line measuring machine based on double-flank gear rolling test with multi-degrees of freedom[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(2): 303-307.
- [8] 马宏伟, 生成德, 王振义. 齿轮双啮综合检验的误差分离技术研究[J]. *西安矿业学院学报*, 1994(1): 74-78.  
MA H W, SHENG CH D, WANG ZH Y. Research on error separation technology for comprehensive inspection of gear double-flank[J]. *Journal of Xi'an Mining Institute*, 1994(1): 74-78.
- [9] K. HERRMANN, 柏永新. 标准齿轮和双面啮合检查仪的周期检定[J]. *国外计量*, 1981(5): 12-15.  
HERRMANN K, BAI Y X. Periodic calibration of standard gears and double-flank inspection instruments[J]. *Foreign Metrology*, 1981(5): 12-15.
- [10] 范小兰. 双啮综合检验中误差分离新方法[J]. *计量技术*, 1997(1): 17-18.  
FAN X L. A new method for error separation in double-flank comprehensive inspection[J]. *Metrology Technology*, 1997(1): 17-18.
- [11] 范义峰, 彭青龙, 周广才. 一种消除齿轮双面啮合测量仪中标准齿轮引入误差的方法, CN106289087B[P]. 2017-01-04.  
FAN Y F, PENG Q L, ZHOU G C. A method for eliminating errors introduced by master gear in double-flank rolling tester, CN106289087B[P]. 2017-01-04.
- [12] 王笑一, 石照耀, 林家春. 基于全齿廓信息的齿距偏差快速测量方法[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(10): 2202-2210.  
WANG X Y, SHI ZH Y, LIN J CH. Fast measurement method for pitch deviation based on full toothprofile information[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(10): 2202-2210.
- [13] KONDO Y, SASAJIMA K, OSAWA S, et al. Traceability strategy for gear-pitch-measuring instruments: Development and calibration of a multiball artifact[J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(6): 065101.

- [14] SATO O, OSAWA S, KONDO Y, et al. Calibration and uncertainty evaluation of single pitch deviation by multiple-measurement technique[J]. Precision Engineering, 2010, 34(1): 156-163.
- [15] KNIEL K, HÄRTIG F, OSAWA S, et al. Two highly accurate methods for pitch calibration[J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(11): 115110.
- [16] LOU ZH F, LING S Y, HE H ZH, et al. A kind of multi-step method for measuring pitch deviation of a gear[J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23(11): 115002.

### 作者简介



**王笑一**, 1999 年于洛阳工学院获得学士学位, 2005 年于河南科技大学获得硕士学位, 2016 年于北京工业大学获得博士学位, 现为河南科技大学教授, 主要研究方向为精密测试技术及仪器和小模数齿轮超精密测量。

E-mail: wxy2.0@163.com

**Wang Xiaoyi** received his B. Sc. degree from Luoyang Institute of Technology in 1999, his M. Sc. degree from Henan University of Science and Technology in 2005, and his Ph. D. degree from Beijing University of Technology in 2016. He is currently a professor at Henan University of Science and Technology. His main research interests include precision measurement technology and instruments, and ultra-precision measurement of small module gears.



**朱董杰**, 2022 年于河南科技大学获得学士学位, 现为河南科技大学硕士研究生, 主要研究方向为精密测试技术及仪器和小模数齿轮超精密测量。

E-mail: zdjwsbn@163.com

**Zhu Dongjie** received his B. Sc. degree from Henan University of Science and Technology in 2022. He is currently a master's student at University of Science and Technology. His main research interests Henan include precision measurement technology and instruments, along with ultra-precision measurement of small module gears.



**刘明康**(通信作者), 2022 年毕业于河南科技大学获学士学位, 2025 年于该校获硕士学位, 目前为北京工业大学博士研究生, 主要从事精密测试技术及仪器相关研究。

E-mail: kklmk163@163.com

**Liu Mingkan** (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Henan University of Science and Technology in 2022 and 2025, respectively. He is currently a Ph. D. candidate at Beijing University of Technology. His main research interests include precision measurement technology and instruments.



**石照耀**, 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, 现为北京工业大学博士生导师、教育部长江学者特聘教授, 主要研究方向为精密测试技术及仪器。

E-mail: shizhaoyao@bjut.edu.cn

**Shi Zhaoyao** received his B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 1984, his M. Sc. degree from Shanxi Institute of Mechanical Engineering in 1988, and his Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2001. He is currently a professor and Ph. D. supervisor at Beijing University of Technology and a “Yangtze River Scholar” distinguished professor awarded by the Ministry of Education. His main research interests include precision measurement technology and instruments, gear engineering, and precision reducers.



**包永久**, 2019 年于东北农业大学获得本科学历, 现为哈尔滨创博科技有限公司技术副总工程师, 主要负责精密测量仪器设计开发和非标检测设备的设计开发。

E-mail: 4875415@qq.com

**Bao Yongjiu** received his B. Sc. degree from Northeast Agricultural University in 2019. He is currently the deputy chief engineer of technology at Harbin Chuangbo Technology Co., Ltd. His main research interests include the design and development of precision measuring instruments, and non-standard testing equipment.