

文章编号 1004-924X(2011)10-2450-07

基圆盘与导轨间滑移对双盘式渐开线 测量仪测量精度的影响

娄志峰^{1*}, 王立鼎^{1,2}, 王晓东¹, 马 勇¹

- (1. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116023;
2. 大连理工大学 微纳米技术及系统辽宁省重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要: 由于在双盘式渐开线测量仪中, 基圆盘与导轨间的滑移是影响测量精度的重要因素, 而有效控制轮轨间的摩擦力可解决基圆盘滑移, 本文分别采用传动绳与传动带驱动基圆盘滚动, 分析了在不同测量力情况下基圆盘与导轨间的摩擦力及其对滑移的影响。结果显示, 当采用传动绳驱动测量力为 0.7 N 及采用传动带驱动测量力为 0.2 N, 基圆盘顺时针转动测量渐开线时, 轮轨间的摩擦力分别为 0.02 N 与 0.07 N, 此时基圆盘滑移对渐开线测量影响可以忽略。另外, 增加基圆盘组件的配重也能够有效减小基圆盘滑移, 此时基圆盘顺时针与逆时针转动测得的渐开线齿形的差异为 0.06 μm 。

关键词: 双盘式渐开线测量仪; 基圆盘; 滑移

中图分类号: TG86; TH71 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111910.2450

Analysis of slippage between discs and rail in involute measuring instrument with double-discs

LOU Zhi-feng^{1*}, WANG Li-ding^{1,2}, WANG Xiao-dong¹, MA Yong¹

- (1. Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining of Ministry of Education, Dalian 116023, China;
2. Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian 116023, China)

* Corresponding author, E-mail: louzxf@dlut.edu.cn

Abstract: The slippage between discs and rail is one of important factors for the measurement accuracy of an involute. However, control of frictions effectively can modify the slippage of discs. In the paper, frictions between discs and rail are analyzed respectively when a cord and a belt are used to drive the discs to roll. According to the analysis and experiment, it shows that if measuring forces are 0.7 N and 0.2 N and the base discs is driven by the cord and belt, frictions are 0.02 N and 0.07 N respectively, for the base disc clockwise rolled; where the effect of the slippages of based discs on the involute measurement can be ignored. Moreover, the slippage can also be reduced by increasing the weight of base disc groups, and measurement difference of involute is 0.06 μm when the rolling directions of

收稿日期: 2010-12-30; 修订日期: 2011-02-17.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50905026); 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2008AA042506)

the base discs are different.

Key words: involute measuring instrument with double-discs; base disc; slippage

1 引言

在齿轮的若干精度指标中,渐开线圆柱齿轮的齿形检验是一个难度较大的测试技术。当前,精密齿轮的测量主要采用齿轮测量中心,该类仪器采用电子展成原理对渐开线齿形进行测量,具有测量效率高,自动化,精度高等特点^[1-2]。随着激光测量技术的发展,一些高精度齿轮测量仪器采用激光测量技术进行长度坐标测量或用来修正测头误差。德国 PTB 研制了一种渐开线齿廓测量仪,在具有精密转台的三坐标机的工作台上,该仪器安装了自行研制的激光跟踪干涉仪,测头上部安装反射镜,测量时通过激光测量对测头位置坐标进行修正^[3]。日本 AMTEC 公司研制的 G3 齿轮测量系统,采用 CONO 激光全息测量头,使用非接触法测量齿廓误差^[1]。

另外,德国 PTB 研制了基于“滚动法”的渐开线测量仪,该仪器采用双盘作为仪器基准元件,根据渐开线展成原理,使圆盘带动被测齿轮在导轨上滚动,完成渐开线齿形的测量,其测量过程完全符合渐开线展成原理,测量误差源少,精度高^[4]。日本京都大学 Fumi Takeoka 等也根据相同的原理研制了一台渐开线仪器,采用激光干涉仪对基圆盘的滚动距离与齿形误差进行测量^[5-6]。大连理工大学研制的双盘式渐开线测量仪也基于此测量原理,通过精化仪器中的各个关键部件,实现了 1 级精度齿轮的测量。

采用双盘式渐开线测量仪测量渐开线齿形时,基圆盘须在导轨上进行滚动,轮轨间的滑移会直接影响渐开线测量精度,Fumi Takeoka 等对研制的“滚动法”渐开线测量仪中的轮轨滑移问题进行了分析^[5]。本文在双盘式渐开线测量仪采用不同驱动方式时,分析了测量力与基圆盘组件重量对基圆盘与导轨间摩擦力的影响,提出了有效减小滑移问题的方法,并通过实验进行了验证。

2 双盘式渐开线测量仪结构

双盘式渐开线测量仪(如图 1)主要由基座、

测量架、基准导轨、基圆盘与齿轮组件、基准板及驱动系统等组成。

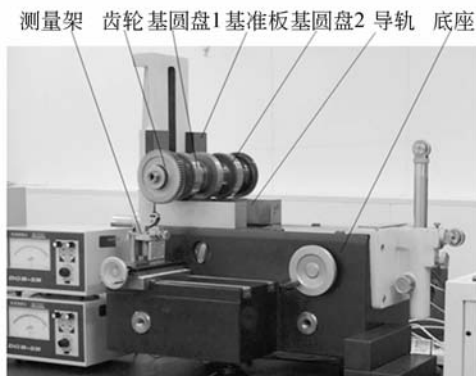


图 1 双盘式渐开线测量仪

Fig. 1 Involute measuring instrument with double-discs

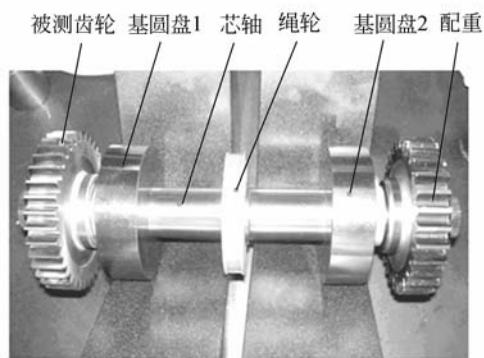


图 2 基圆盘、齿轮与芯轴组件

Fig. 2 Base disc, gear and mandrel

测量仪基座采用花岗岩制作,具有良好的吸震性与热稳定性。基座上表面经过精密研磨,用于放置基准导轨。基准导轨采用淬火 GCr15 轴承钢制作,平面度误差 $<1 \mu\text{m}$,配对的两导尺不等高误差小于 $2 \mu\text{m}$ 。

基圆盘是双盘式渐开线测量仪中最重要的基准元件,基圆盘直径等于被测渐开线圆柱齿轮的理论基圆直径,尺寸误差 $<1 \mu\text{m}$,圆度误差 $<0.5 \mu\text{m}$ 。

图 2 为装配后的基圆盘、齿轮与芯轴,基圆盘与齿轮安装于同一芯轴上,被测齿轮安装于芯轴的端部,内孔经由密珠与芯轴配合。密珠装配可以实现孔与轴间的微量过盈配合,保证齿轮定位

准确,并且拆卸方便。芯轴另一端安装有与被测齿轮重量相似的齿轮作为配重,保证基圆盘组件在滚动过程中处于受力平衡。在芯轴中部为绳轮,用于缠绕驱动基圆盘组件转动的传动绳或传动带。

仪器左侧的基准板安装于左支架上,主要用于基圆盘初始定位。支架中安装有上下移动的滑轮,用于调整传动绳的张紧力。

测量渐开线时,调整测点与基准导尺处于同一平面;双基圆盘沿导轨向右侧滚动,测头微力压紧齿面,在基圆盘滚动的过程中,基圆盘相对于测点的轨迹为标准渐开线,而测头的偏移量即为齿形误差^[1]。

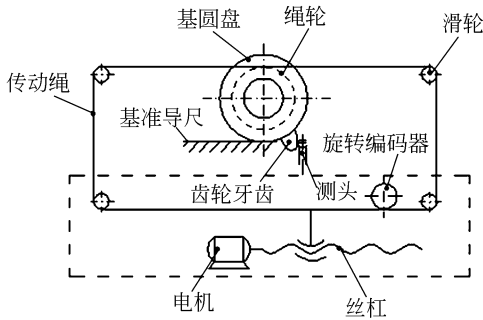


图 3 双盘式渐开线测量仪驱动系统

Fig. 3 Driving system of double-disc instrument

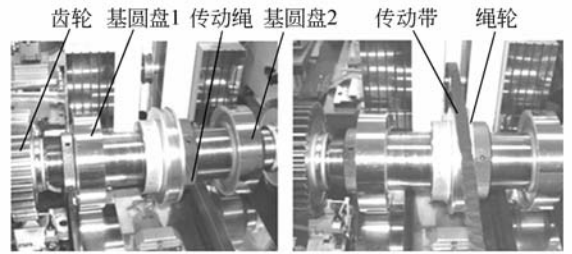
双盘式渐开线测量仪驱动系统原理如图 3 所示。传动绳或传动带两端固定在与丝杠配合的螺母上,经由外部滑轮张紧,缠绕或紧压在绳轮上。测量过程中,电机带动精密丝杠旋转,通过螺母带动传动绳或传动带移动,进而驱动两个基圆盘在导轨上滚动,完成测量过程的主运动。图 3 中虚线方框内的组件,如电机、丝杠等均安装在测量仪基座内部^[7-8]。

双盘式渐开线测量仪中的测量误差源可以分为影响生成理论渐开线轨迹的误差因素、影响被测渐开线齿形在测量仪中位置精度的误差因素等^[9]。仪器关键零部件均由超精加工制作而成,并通过各种精化处理手段,使装配精度进一步提高。双盘式渐开线测量仪测量渐开线圆柱齿轮($m=4$ 、 $z=30$ 、 $\alpha=20^\circ$)齿形时的测量不确定度(U_{99})为 $0.67 \mu\text{m}$,完全可以满足 1 级精度齿轮的测量,在现有渐开线齿形量仪中精度最高^[1]。

3 基圆盘与导轨间摩擦力分析

在双盘式渐开线测量仪中,基圆盘是重要的基准元件,它在导轨上的滚动状态会直接影响到渐开线的测量结果。基圆盘直径与圆度测量均由北京长城计量测试研究所完成。直径采用自动精密万能测长仪进行测量,测量不确定度为 $U=0.03 \mu\text{m}$ ($k=2$)。测得理论直径为 112.763 mm 的一对基圆盘实际直径分别为 112.762 mm 与 112.763 mm 。圆度采用自动精密圆度仪进行测量,测量不确定度为 $U=0.05 \mu\text{m}$ ($k=2$),测得的两基圆盘圆度误差分别为 $0.345 \mu\text{m}$ 与 $0.320 \mu\text{m}$ 。

在渐开线齿形测量过程中,基圆盘组件可采用绳传动驱动,如图 4(a),即将传动绳缠绕在芯轴组件的绳轮上,通过传动绳的移动带动基圆盘滚动;另外也可采用传动带驱动,如图 4(b),通过张紧装置将传动带压在绳轮上,不进行缠绕,通过传动带的移动带动基圆盘滚动。



(a) 传动绳驱动

(b) 传动带驱动

(a) Cord driving method

(b) Belt driving method

图 4 基圆盘驱动方式

Fig. 4 Driving method of base discs

3.1 传动绳驱动

传动绳采用直径为 0.5 mm 的钢丝,具有一定的韧性,弹性较小,经由外部滑轮张紧,紧绕在芯轴中部的绳轮上。采用该方式进行驱动时,基圆盘 1 的受力如图 5 所示。设基圆盘所受扭矩为 M ,与导轨间的摩擦力为 f ,测头测量力为 F_1 ,测头与齿面摩擦力为 f_1 ,基圆盘半径为 r ,绳轮半径为 r_1 ,当基圆盘按图中顺时针方向滚动,测量方向由齿根到齿顶时,根据受力关系^[5,10],可得

$$\begin{cases} m\ddot{x} = f + F_1 \\ I\ddot{\omega} = M - f \cdot r - F_1 \cdot r - f_1 \cdot \Delta \end{cases}, \quad (1)$$

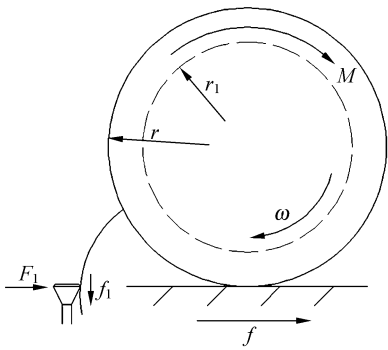


图 5 传动绳驱动法中基圆盘受力状况
Fig. 5 Forces of base disc in cord driving method

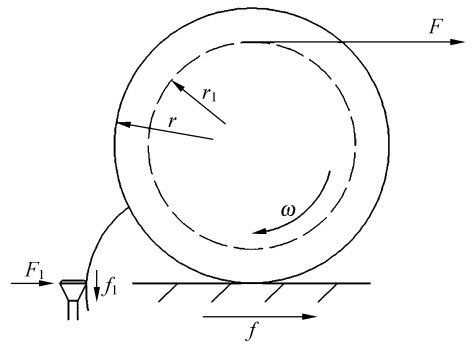


图 6 传动带驱动下基圆盘受力图
Fig. 6 Forces of base disc in belt driving method

式(1)中, x 为基圆盘滚动距离; ω 为基圆盘转动角速度; f_1 为测头与被测齿面间的滑动摩擦力; I 为基圆盘的转动惯量; Δ 为渐开线相对于起点的展开长度。

若基圆盘与导轨间无滑动产生时, 可得

$$\ddot{x} = r \cdot \dot{\omega} \quad (2)$$

将式(2)带入式(1), 可得

$$f = \frac{m \cdot r \cdot M - (m \cdot r^2 + I) \cdot F_1 - m \cdot r \cdot f_1 \cdot \Delta}{I + m \cdot r^2} \quad (3)$$

基圆盘 2 由于无测量力的影响, 故其与导轨间的摩擦力为

$$f = \frac{m \cdot r \cdot M}{I + m \cdot r^2} \quad (4)$$

3.2 传动带驱动

基圆盘受力情况如图 6 所示, 设传动带驱动力为 F , 根据受力平衡, 可得

$$\begin{cases} m\ddot{x} = F + f + F_1 \\ I\dot{\omega} = F \cdot r_1 - f \cdot r - F_1 \cdot r - f_1 \cdot \Delta \end{cases}, \quad (5)$$

式中, x 为基圆盘滚动距离; ω 为基圆盘转动角速度; f_1 为测头与被测齿面间的滑动摩擦力; I 为基圆盘的转动惯量; Δ 为渐开线相对于起点的展开长度。

若基圆盘与导轨间未产生滑移, 可知

$$\ddot{x} = r \cdot \dot{\omega} \quad (6)$$

将式(6)带入式(5)可得

$$f = \frac{(m \cdot r \cdot r_1 - I) \cdot F - (m \cdot r^2 + I) \cdot F_1 - m \cdot r \cdot f_1 \cdot \Delta}{I + m \cdot r^2}, \quad (7)$$

基圆盘 2 与导轨间的摩擦力为

$$f = \frac{(m \cdot r \cdot r_1 - I) \cdot F}{I + m \cdot r^2} \quad (8)$$

通过适当选取各个参数, 可以使轮轨间的摩擦力达到最小。

4 渐开线齿形测量实验

以测量 $m=4, z=30, \alpha=20^\circ$ 渐开线圆柱齿轮齿廓为例, 对基圆盘与导轨间的受力状态进行分析, 探讨轮轨间的摩擦力对测量精度的影响。基圆盘理论直径为 112.763 1 mm, 绳轮直径为 110.00 mm, 基圆盘组件的质量为 13.4 kg, 转动惯量为 $14.3 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。由于被测齿轮装配于基圆盘 1 的一侧, 故渐开线测量主要受基圆盘 1 滑移的影响。

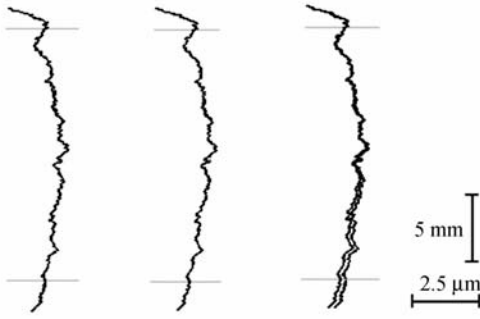
4.1 测量力为 0.7 N

电感测头的初始测量力选择为 0.7 N, 采用传动绳缠绕法对基圆盘进行驱动。根据式(3)计算可知, 当基圆盘顺时针滚动, 渐开线由齿根向齿顶测量时, 基圆盘 1 与导轨间的摩擦力为 0.02 N, 方向与基圆盘前进方向相同。

当基圆盘逆时针滚动, 渐开线由齿顶向齿根测量时, 基圆盘 1 与导轨的摩擦力为 0.95 N, 方向同样与基圆盘滚动方向相同。由于基圆盘滚动过程中相对于导轨滑移方向与摩擦力方向相反, 故上述情况下测量的渐开线齿形倾斜偏差会比理论值大。

图 7(a)与(b)分别为对渐开线从齿根到齿顶与从齿顶到齿根进行测量的结果, 图(c)为将二曲线重叠放置, 可知二次测量结果差异为 $0.3 \mu\text{m}$ 。

若采用传动带驱动, 可以根据式(7)计算, 当基圆盘顺时针滚动时, 基圆盘 1 与导轨间的摩擦力为 0.57 N, 方向与滚动方向相反, 滑移导致测



(a) 齿根至齿顶 (b) 齿顶至齿根 (c) 重合放置
(a) From root to tip (b) From tip to root (c) Overlapping

图 7 传动绳驱动测量结果(测量力为 0.7 N)

Fig. 7 Measuring results in cord driving method with measuring force of 0.7 N



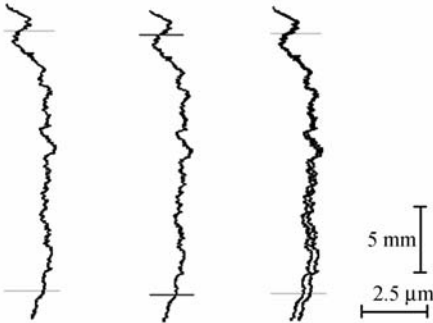
(a) 齿根至齿顶 (b) 齿顶至齿根 (c) 重合放置
(a) From root to tip (b) From tip to root (c) Overlapping

图 9 传动绳驱动测量结果(测量力为 0.2 N)

Fig. 9 Measuring results in cord driving method with measuring force of 0.2 N

量结果中齿形倾斜偏差变大。基圆盘逆时针滚动时,基圆盘 1 受到的摩擦力为 0.83 N,方向与滚动方向相同,会使测得的渐开线倾斜偏差变小。

测得的渐开线齿形误差如图 8 所示,其中(a)与(b)分别为渐开线从齿根到齿顶与从齿顶到齿根进行测量的结果,二者差异为 $0.3 \mu\text{m}$ 。



(a) 齿根至齿顶 (b) 齿顶至齿根 (c) 重合放置
(a) From root to tip (b) From tip to root (c) Overlapping

图 8 传动带驱动测量结果(测量力为 0.7 N)

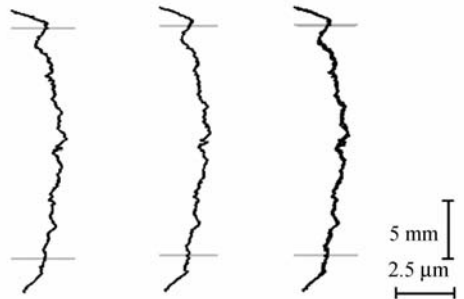
Fig. 8 Measuring results in belt driving method with measuring force of 0.7 N

4.2 测量力为 0.2 N

通过改变电感测头中的弹簧,使测头测量力减小到 0.2 N。根据式(3)计算可知,采用传动绳驱动,基圆盘在顺时针与逆时针进行滚动,测量渐开线齿形时,与导轨的摩擦力分别为 0.28 N 与 0.68 N,方向均与基圆盘滚动方向相同。图 9 为测量结果,两次测量结果的差异为 $0.2 \mu\text{m}$ 。

采用传动带驱动时,基圆盘顺时针与逆时针

滚动时与导轨的摩擦力分别为 0.07 N 与 0.32 N,方向均与基圆盘滚动方向相同。图 10 为测量结果,两次测量差异为 $0.06 \mu\text{m}$ 。



(a) 齿根至齿顶 (b) 齿顶至齿根 (c) 重合放置
(a) From root to tip (b) From tip to root (c) Overlapping

图 10 传动带驱动测量结果

Fig. 10 Measuring results in belt driving method with measuring force of 0.2 N

在测量结果为图 7(a)与图 10(a)中,轮轨间的摩擦力分别为 0.02 N 与 0.07 N,摩擦力较小,由摩擦力引起的滑移较小,此时测得的渐开线齿形误差值更接近于真实值。

4.3 增加基圆盘组件配重

基圆盘滚动过程中的滑移从机理上是由于基圆盘与导轨接触面间的摩擦力大于滑动摩擦力引起。若在基圆盘组件中增加配重,可以增大轮轨间的滑动摩擦力,降低滑移可能性。

实验中在芯轴的两端增加两个配重,如图 11,质量均为 5 kg。采用传动绳驱动对同一渐开

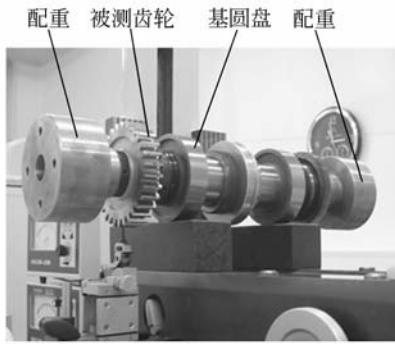
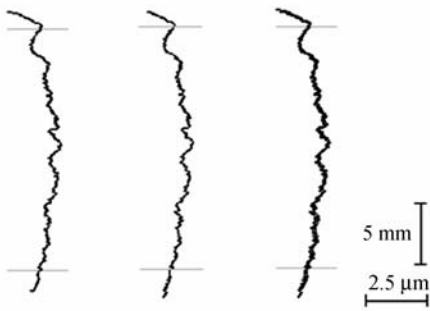


图 11 基圆盘组件增加配重

Fig. 11 Discs group with additional weight

线进行测量,图 12(a)与(b)分别为渐开线从齿根到齿顶与从齿顶到齿根进行测量的结果,二者差异为 $0.06 \mu\text{m}$ 。在基圆盘增加配重后,滑动摩擦力增大,测量过程中的滑移可大幅减小。

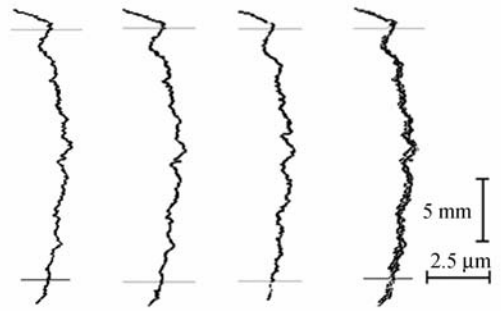


(a)齿根至齿顶 (b)齿顶至齿根 (c)重合放置
(a) From root to tip (b) From tip to root (c) Overlapping

图 12 增加配重后测量结果

Fig. 12 Measuring results with additional weight

将测量结果图 12(a)与图 7(a)及图 10(a)进行比较,如图 13 所示,可知测量曲线差异 $< 0.1 \mu\text{m}$ 。



(a)图 7(a) (b)图 10(a) (c)图 12(a) (d)重合放置
(a)Fig. 7(a) (b)Fig. 10(a) (c)Fig. 12(a) (d)overlapping

图 13 测量曲线比对

Fig. 13 Comparison of measuring curves

4 结 论

在双盘式渐开线测量仪中,有效控制基圆盘与导轨间的滑移是保证渐开线测量精度的关键。本文分别采用传动绳与传动带对基圆盘滚动进行驱动,分析了在测量力不同的情况下基圆盘与导轨间的摩擦力,探讨摩擦力对轮轨间滑移的影响。通过选取不同的驱动方式与测量力,可有效降低基圆盘与导轨间的摩擦力,进而保证渐开线测量精度。

分析与实验验证显示,当测量力为 0.7 N ,采用传动绳驱动,及测量力为 0.2 N ,采用传动带驱动时,基圆盘顺时针转动测量渐开线时,轮轨间的摩擦力分别为 0.02 N 与 0.07 N ,此时基圆盘滑移对渐开线测量的影响可以忽略。

通过增加基圆盘组件的配重,可增加轮轨间的滑动摩擦力,能够有效减小基圆盘滑移,此时基圆盘顺时针与逆时针转动测量渐开线齿形的差异为 $0.06 \mu\text{m}$ 。

参考文献:

[1] 王立鼎,娄志峰,王晓东,等. 超精密渐开线齿形的测量方法[J]. 光学精密工程, 2006, 14(6):980-985.
WANG L D, LOU ZH F, WANG X D, et al.. Measuring methods of ultraprecision involute tooth profile[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 980-985. (in Chinese)

[2] 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. (in Chinese)

[3] HARTIG F, KECK C, KNIEL K. An novel high

- accuracy concept for gear calibration [J]. *Gear Technology*, 2005, 5-6: 16-20.
- [4] BEYER W, PAHL W. Advanced strategies for the traceable calibration of cylindrical gears and bevel gears at PTB[J]. *VDI Berichte*, 1996, 1230: 937-945.
- [5] FURMI T, MASAHARU K, AIZOH K, *et al.*. High-precision measurement of an involute artefact by a rolling method and comparison between measuring instruments [J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20: 1-12.
- [6] TAKEOKA F, KOMORI M, KUBO A, *et al.*. Design of laser interferometric measuring device of involute profile[J]. *J. Mech. Des.*, 2008, 130: 052602.
- [7] 娄志峰, 王立鼎, 张玉玲, 等. 双盘式渐开线测量仪测点位置调整方式[J]. *光学 精密工程*, 2007, 15(10): 980-985.
LOU ZH F, WANG L D, ZHANG Y L, *et al.*. Adjustment of probe in double-disc involute measuring instrument [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10): 980-985. (in Chinese)
- [8] 娄志峰, 王立鼎, 马勇, 等. 双盘式渐开线测量仪数据采集与控制系统的研制[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(1): 61-64.
LOU ZH F, WANG L D, MA Y, *et al.*. Data acquisition and control system of double-disc involute measurement instrument [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(1): 61-64. (in Chinese)
- [9] 王立鼎, 娄志峰, 马勇, 等. 双盘式渐开线测量仪精度分析[J]. *计量学报*, 2009, 30(5): 393-398.
WANG L D, LOU ZH F, MA Y, *et al.*. Accuracy analysis of the double-disc instrument for measuring involute [J]. *Jilang Xuebao*, 2009, 30(5): 393-398. (in Chinese)
- [10] 孙礼煌. 滚动运动中的滑动摩擦[J]. *大庆石油学院学报*, 1990, 14(1): 101-104.
SUN L H. Sliding friction in rolling motion [J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 1990, 14(1): 101-104. (in Chinese)

作者简介:



娄志峰(1978—),男,黑龙江肇东人,助理研究员,1999年、2008年于大连理工大学分别获得学士、博士学位,主要从事超精密齿轮测量技术的研究。E-mail: louzf@dlut.edu.cn



王立鼎(1934—),男,辽宁辽阳人,教授,博士生导师,中国科学院院士,1960年于吉林工业大学获得学士学位,主要从事超精密齿轮加工与测试、精密机械设计 & 微纳米机械的研究。E-mail: wangld@dlut.edu.cn



王晓东(1965—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,1989年于南京航空学院获得学士学位,1992年于哈尔滨船舶工程学院获硕士学位,1995年于哈尔滨工业大学获博士学位,主要从事微装配技术与系统、精密仪器设计与制造等方面的研究。E-mail: xdwang@dlut.edu.cn



马勇(1956—),男,辽宁大连人,副教授,1982年于大连工学院获工学学士学位,1987年于阜新矿业学院获硕士学位,主要从事超精密标准齿轮研制等方面的研究。E-mail: yongma@dlut.edu.cn