

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209800

渐开线纯滚动测量中展开长度的确定方法^{*}

凌 明¹, 凌四营^{1,2}, 刘祥生¹, 石照耀³, 王立鼎^{1,2}

(1. 大连理工大学微纳技术及系统辽宁省重点实验室 大连 116023; 2. 大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室 大连 116023; 3. 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)

摘 要:双滚轮-导轨式渐开线测量仪一种无阿贝误差、误差源少、测量精度高的渐开线测量仪器, 常用来测量 1 级齿轮渐开线样板或 1 级标准齿轮, 但是双滚轮-导轨式渐开线测量仪不易准确获得渐开线的齿廓偏差与展开长度的对应关系。而渐开线齿面的齿根部容易累积较多的加工误差和测量误差, 1 级齿轮渐开线样板要求齿廓偏差需要从展开长度 3 或 5 mm 处开始计值, 如果展开长度存在偏差将会影响齿廓偏差的测量结果。为了获得齿廓偏差与展开长度较为准确的对应关系、实现齿轮渐开线样板的精确计值, 本文研究了双滚轮-导轨式渐开线测量仪测量齿轮渐开线样板时齿轮渐开线样板齿顶圆角、齿顶圆偏差和滚轮半径偏差对展开长度的影响, 提出一种基于机器视觉的双滚轮-导轨式渐开线测量仪测量策略和展开长度修正方法, 通过机器视觉判断渐开线样板理论齿顶点和起始测量位置, 并根据滚轮半径对展开长度进行修正。本文对一件齿轮渐开线样板进行了测量实验, 齿廓形状偏差的测量结果与齿轮测量中心的差异不大于 0.1 μm , 且齿廓偏差曲线具有一致性, 说明该测量策略可以获得齿廓偏差与展开长度的对应关系。

关键词: 齿轮渐开线样板; 渐开线测量; 展开长度; 渐开线齿廓偏差; 机器视觉

中图分类号: TH711 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Determination of roll path length in involute measurement with the rolling method

Ling Ming¹, Ling Siying^{1,2}, Liu Xiangsheng¹, Shi Zhaoyao³, Wang Liding^{1,2}

(1. Key Laboratory for Micro/ Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China; 2. Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China; 3. Beijing Engineering Research Center of Precision Measurement Technology and Instruments, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The double-roller-guide involute measuring instrument is a kind of involute measuring instrument with no Abbey error, few error sources, and high measurement accuracy, which is commonly used to measure the class-1 gear involute artefacts or class-1 standard gears. However, it is not easy to obtain the accurate correspondence between the profile deviation and roll path length of the measured involute with the double roller-guide involute measuring instrument. The root of the involute flank is prone to accumulate machining and measurement errors, while the profile deviation of class-1 gear involute artefacts is required the to be calculated from 3 or 5 mm of the roll path length, which may lead to large profile measurement deviations if the roll path length is off. To obtain a more accurate correspondence between profile deviation and roll path length, and to achieve a more accurate evaluation of gear involute artefacts, the effect on the roll path length caused by the tip corner chamfer, deviation of tip radius and deviation of roller radius as measuring gear involute artefact with double roller-guide involute measuring instrument is analyzed. Tip corner chamfer and deviation of roller radius could lead to deviations in roll path length of millimetres. In addition, a kind of measuring strategy for a double roller-guide involute measuring instrument based on machine vision is proposed. The theoretical tip point and the starting measuring position of the gear involute artefact are obtained by machine vision and the roll path length is corrected according to the roller radius. A measurement

收稿日期: 2022-05-16 Received Date: 2022-05-16

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(5207052737)、国家重点研发计划(2018YFB2001400)、产业技术基础公共服务平台(2020-0095-3-1)项目资助

experiment is also implemented on a gear involute artefact, the difference in the profile form deviation between the double roller-guide involute measuring instrument and the gear measurement centre is no more than $0.1 \mu\text{m}$, and the profile deviation curve is consistent. It shows that the measurement strategy could obtain the correspondence between profile deviation and roll path length.

Keywords: gear involute artefact; involute measurement; roll path length; involute profile deviation; machine vision

0 引言

齿轮渐开线样板 (gear involute artefact, GIA) (下文简称渐开线样板) 是用来校准渐开线测量仪器、传递齿轮渐开线的参数量值的标准计量器具^[1]。

当前主流的电子展成式齿轮测量仪如齿轮测量中心等相较于传统的机械展成式测量仪具有更好的通用性和更高的测量效率, 德国联邦物理技术研究院 (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB)、日本国家计量研究院 (National Metrology Institute of Japan, NMIJ)、中国计量科学研究院等国家级计量研究院可以实现 $1 \mu\text{m}$ 左右测量不确定度 (U_{95}) 的齿廓偏差的测量^[2-4], 但是目前国家级计量研究院进行量值比对和量值传递时使用的渐开线样板的齿廓偏差也在 $1 \mu\text{m}$ 左右^[2-4], 而在测量高精度渐开线时, 通常要求渐开线测量仪器的测量不确定度应为被测渐开线齿廓公差的 $1/2 \sim 1/3$ ^[5], 现在基于电子展成原理的渐开线测量仪器无法满足 1 级渐开线样板的测量需要。

而传统的机械展成式渐开线测量方法特别是双滚轮-导轨式渐开线测量仪虽然测量效率较低、通用性较差, 但与电子展成式齿轮测量仪相比具有无阿贝误差、测量精度高、误差源少的优点, 被用来测量高精度齿轮渐开线样板或标准齿轮^[6-8]。

当利用齿轮测量中心或三坐标测量机测量渐开线样板时, 一般需要先利用基准球校准测头位置, 配合光栅尺或激光干涉仪可以较为准确地判断渐开线样板待测齿面基圆、齿根圆和齿顶圆的位置及被测渐开线齿廓偏差与展开长度的对应关系, 但双滚轮-导轨式渐开线测量仪无法直接获得渐开线样板上述三圆的位置, 也不易获得被测渐开线的齿廓偏差与展开长度的准确对应。而 1 级渐开线样板需要从基圆处给出被测齿廓并从齿根部展开长度 3 或 5 mm 处开始计值^[1], 而渐开线样板的齿根部一般加工误差较大而且测量误差也容易集中在齿根部^[9-10], 所以在利用双滚轮-导轨式渐开线测量仪测量渐开线样板时, 需要尽可能准确地得到被测渐开线的齿廓偏差与展开长度的对应关系, 否则可能会导致测得的齿廓形状偏差和齿廓倾斜偏差偏离实际值。

为了能尽可能准确地判断被测渐开线的齿廓偏差与展开长度的对应关系, 本文分析了渐开线样板结构误差和滚轮半径偏差对渐开线展开长度偏差的影响, 提出一

种基于机器视觉的双滚轮-导轨式渐开线测量仪的测量策略和滚轮半径偏差修正方法, 对一件渐开线样板的左、右齿面进行了测量实验, 测量结果与齿轮测量中心的测量结果进行了对比。

1 渐开线样板结构偏差对展开长度的影响

1.1 齿顶圆角对展开长度的影响

双滚轮-导轨式渐开线测量仪的测量原理如图 1 所示, 当滚轮在导轨上纯滚动, 以该滚轮半径为基圆半径的标准渐开线与发生线的交点 P 为不动点, 所以可以在 P 点布置一个测头, 测头测得的位移即渐开线的齿廓偏差。而渐开线样板齿顶部单位弧长所对应的渐开线展开长度远小于齿根部单位弧长所对应的渐开线展开长度^[9], 所以在利用双滚轮-导轨式渐开线测量仪测量渐开线时, 通常是先找到齿顶点, 然后利用设计展开长度寻找齿根处的渐开线起始计值点。

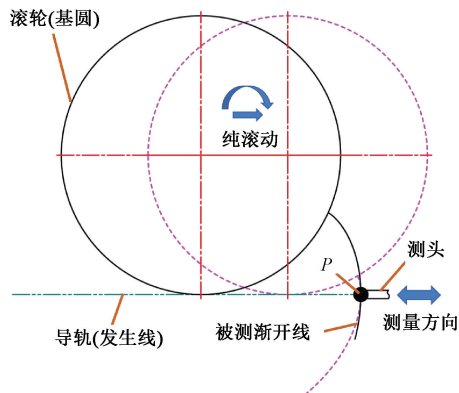


图 1 双滚轮-导轨式渐开线测量仪测量原理

Fig. 1 Involute measurement principle with the rolling method

将其转换到常用的渐开线的平面直角坐标系, 如图 2 所示。当从齿顶开始进入测量时, 测头首先与齿顶点接触但此时测头顶点并不在渐开线齿廓内, 随着纯滚动, 测头的顶点 P 与渐开线齿廓的齿顶点 T 接触, 从这一时刻开始测头的位移为被测渐开线的齿廓偏差 f_i 。测头的球半径为 r_p , 齿顶点 T 的展开长度为 ρ_{ip} , 展开角为 θ_{ip} , 坐标 $T(x_{ip}, y_{ip})$ 。

标准渐开线 $L(x_L, y_L)$ 满足:

$$\begin{cases} x_L = r_b \cos \theta + r_b \theta \sin \theta \\ y_L = r_b \sin \theta - r_b \theta \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

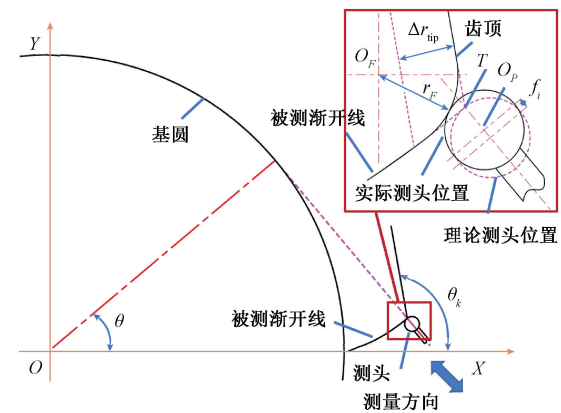


图 2 渐开线样板结构偏差对渐开线测量的影响
Fig.2 Effect on involute measurement caused by structural deviation of GIA

在齿顶点 T 处,坐标 $T(x_{ip}, y_{ip})$ 为标准渐开线 $L(x_L, y_L)$ 在展开角 $\theta = \theta_{ip}$ 时的坐标。

测头的圆心 $O_p(x_p, y_p)$ 满足:

$$\begin{cases} x_p = x_L + (r_p + f_i) \sin \theta \\ y_p = y_L - (r_p + f_i) \cos \theta \end{cases} \quad (2)$$

当齿顶点 T 在测头上但展开角 $\theta > \theta_{ip}$ 即测头顶点脱离被测渐开线齿廓时,满足:

$$\sqrt{(x_p - x_{ip})^2 + (y_p - y_{ip})^2} = r_p \quad (3)$$

联立式(1)~(3)即可解得齿廓偏差 f_i 。

在渐开线样板的实际加工过程中,齿顶是刀具进入或脱离渐开线齿面的点,在齿顶处往往存在微小的塌边,而且齿轮渐开线样板国家标准 GB/T 6467—2010 要求渐开线样板的齿廓面表面粗糙度应满足 $Ra \leq 0.1 \mu\text{m}^{[1]}$,一般需要对渐开线样板进行抛光,所以在齿顶部的一段区域内可能不是渐开线齿廓,该区域的形状可近似视为一段圆弧,即齿顶圆角。

齿顶圆角的圆心 $O_F(x_F, y_F)$ 为离齿顶所在直线距离等于圆角半径 r_F 的直线和展开角 θ_F 处渐开线发生线的交点,展开角 θ_F 为实际渐开线齿廓的齿顶点处的展开角。

离齿顶所在直线距离等于圆角半径 r_F 的直线满足:

$$\tan \theta_k (x_F - x_{ip}) - (y_F - y_{ip}) + \frac{r_F}{\cos \theta_k} = 0 \quad (4)$$

其中, θ_k 为齿顶所在直线的角度(下文简称为齿顶倾角)。

展开角 θ_F 处渐开线的发生线满足:

$$x_F \cos \theta_F + y_F \sin \theta_F - r_b = 0 \quad (5)$$

且齿顶圆角的圆心 $O_F(x_F, y_F)$ 到渐开线上展开角为 θ_F 时的点的距离为 r_F :

$$\sqrt{(x_p - x_F)^2 + (y_p - y_F)^2} = r_p + r_F \quad (6)$$

联立式(1)~(6),即可解得齿顶存在圆角时的齿廓偏差 f_i 测量结果。基圆半径 $r_b = 100 \text{ mm}$ 、展开长度 $\rho = 0 \sim 70 \text{ mm}$ 的渐开线和测头半径 $r_p = 1.5 \text{ mm}$ 的模拟测量结果如图 3 所示,可以看到,随着齿顶圆角 r_F 的增大,因齿顶圆角 r_F 引起的展开长度偏差 $\Delta \rho_F$ 也随之增大,但是很难根据齿廓偏差曲线判断出齿顶圆角 r_F 的大小和被测渐开线的展开长度偏差 $\Delta \rho_F$,增加采样频率或使用小球径的测头也仍存在这样的困难。齿轮渐开线样板国家标准 GB/T 6467—2010 推荐的 1 级渐开线样板的基本参数如表 1 所示。对于表 1 中参数的渐开线样板,随着基圆半径 r_b 的增大(同时也意味着展开长度的增长),展开长度偏差 $\Delta \rho_F$ 也随之增大,如图 4 所示。

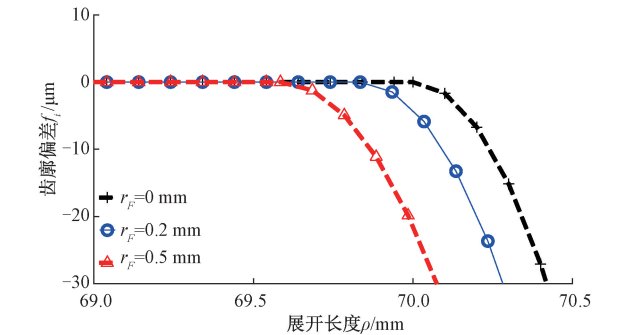


图 3 齿顶部齿廓偏差曲线
(基圆半径 $r_b = 100 \text{ mm}$, 测头半径 $r_p = 1.5 \text{ mm}$)

Fig. 3 Profile deviation curve at tip of tooth
(base radius $r_b = 100 \text{ mm}$, probe radius $r_p = 1.5 \text{ mm}$)

表 1 渐开线样板基本参数 ^[1]		
Table 1 Parameters of gear involute artefact ^[1]		
基圆半径 r_b/mm	展开角 $\theta/(\text{^\circ})$	计值范围/ mm
25	20	3~17
50	38	3~35
60	44	5~39
100	70	5~65
120	84	5~79
150	94	5~89
200	105	5~100
250	130	5~125
300	140	5~135
400	160	5~155

需要说明的是,展开长度偏差对渐开线齿廓倾斜偏差和齿廓形状偏差评价结果的影响与渐开线样板实际的齿廓偏差、计值范围、测头球径和滤波策略等因素有关。

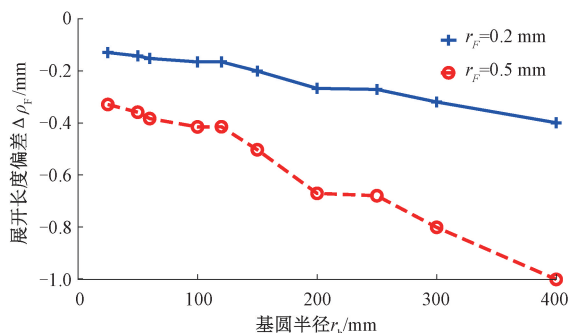


图4 齿顶部圆角对展开长度的影响($r_p = 1.5$ mm)

Fig. 4 Effect on roll path length caused by tip corner chamfer ($r_p = 1.5$ mm)

1.2 齿顶圆半径偏差对展开长度的影响

渐开线样板在加工过程中,齿顶圆半径常是偏离设计值的,下面考虑齿顶圆半径偏差 Δr_{tip} 对渐开线样板展开长度的影响。

渐开线与以基圆为圆心、半径为 r_i 的任意圆的交点满足式(7),其中 ρ_i 为该处渐开线对应的展开长度。

$$r_i^2 = r_b^2 + \rho_i^2 \quad (7)$$

所以图2中齿顶圆处的由齿顶圆半径偏差 Δr_{tip} 引起的渐开线展开长度误差 $\Delta \rho_{\text{tip}}$ 满足:

$$\Delta \rho_{\text{tip}} = \sqrt{(r_{\text{tip}} + \Delta r_{\text{tip}})^2 - r_b^2} - \rho_{\text{tip}} \quad (8)$$

渐开线样板的齿顶圆半径偏差一般满足 $\Delta r_{\text{tip}} \leq \pm 10 \mu\text{m}$,最大不超过 $\pm 20 \mu\text{m}$,齿顶圆半径偏差 Δr_{tip} 引起的展开长度偏差 $\Delta \rho_{\text{tip}}$ 如图5所示(渐开线参数如表1所示),基圆半径 $r_b \leq 300$ mm 的渐开线样板的展开长度偏差 $\Delta \rho_{\text{tip}} < 0.06$ mm,所以齿顶圆半径偏差可以不作为主要的展开长度偏差的误差源考虑,渐开线样板的实际齿顶圆半径通过常用的示值最大允许误差为 $\pm 2 \sim 4 \mu\text{m}$ 的壁厚千分尺即可满足测量需求。

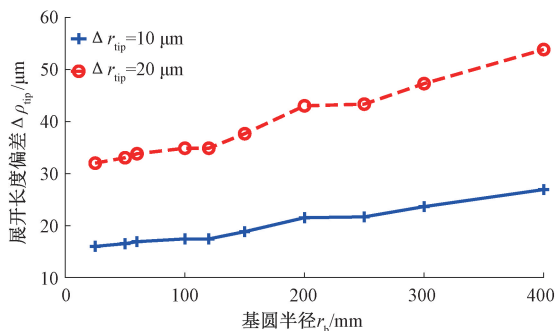


图5 齿顶圆半径偏差对展开长度的影响

Fig. 5 Effect on roll path length caused by deviation of tip radius

2 滚轮半径偏差对展开长度的影响

渐开线样板在量值传递时需要按照齿廓倾斜偏差修正渐开线样板的基圆半径,这导致在利用双滚轮-导轨式渐开线测量仪测量渐开线样板的过程中,滚轮的半径 r_{roller} 与渐开线样板的基圆半径 r_b 一般存在微米级的滚轮半径偏差 Δr_b :

$$\Delta r_b = r_{\text{roller}} - r_b \quad (9)$$

当存在滚轮半径偏差 Δr_b 时标准渐开线在滚轮对应的圆上满足:

$$x_L'^2 + y_L'^2 = r_{\text{roller}}^2 + \rho_i'^2 \quad (10)$$

其中 ρ_i' 为被测渐开线对应的滚轮上的展开长度。

因滚轮半径偏差 Δr_b 而引起的展开长度偏差 $\Delta \rho_{\text{roller}}$ 满足:

$$\Delta \rho_{\text{roller}} = \rho_i' - \rho_i = \sqrt{r_b^2(1 + \theta^2) - r_{\text{roller}}^2} - r_b \theta \quad (11)$$

当滚轮半径 r_{roller} 比待测渐开线样板的基圆半径 r_b 小时,如果仍按渐开线样板的理论展开长度评价渐开线,会导致一部分不属于渐开线的齿廓被计入齿廓偏差;当滚轮半径 r_{roller} 比待测渐开线样板的基圆半径 r_b 大时,在滚轮内部的渐开线无法被测得。

而当滚轮半径偏差 $\Delta r_b = 20 \mu\text{m}$ 时,基圆半径 $r_b = 50$ mm 的渐开线样板无法被测得的渐开线齿廓对应的展开长度 $\rho = 0 \sim 1.4$ mm,基圆半径 $r_b = 100$ mm 的渐开线样板无法被测得的渐开线齿廓对应的展开长度 $\rho = 0 \sim 2$ mm,所以应尽量选择半径比渐开线样板的基圆半径小的滚轮,即利用双滚轮-导轨式渐开线测量仪测量渐开线样板时应满足滚轮半径 r_{roller} 可以使被测渐开线的齿廓倾斜偏差 $f_{\text{H}\alpha}$ 为正,待测量后对展开长度和齿廓倾斜偏差进行修正。滚轮半径偏差对展开长度的影响如图6所示。

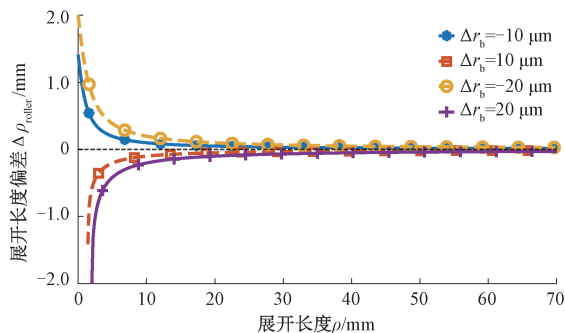


图6 滚轮半径偏差对展开长度的影响

Fig. 6 Effect on roll path length caused by deviation of roller radius

3 双滚轮-导轨式渐开线测量仪测量策略

虽然渐开线样板的齿顶圆角可以通过轮廓测量仪等测量设备准确测出,但是因为渐开线样板本身是存在齿廓偏差的,而且通常齿根部和齿顶部的齿廓形貌较为复杂,齿廓偏差也大于齿中部。所以在利用双滚轮-导轨式渐开线测量仪测量渐开线样板时,即使已知渐开线样板齿顶圆角的大小,仍然不易获得渐开线样板终止计值位置与对应的展开长度,从而影响渐开线的计值。

目前,基于机器视觉的齿轮光学测量方法具有测量效率高、非接触测量的优点,广泛应用于小模数直齿轮的测量^[11-14],虽然这些方法目前在齿廓偏差测量精度上仍不满足高精度渐开线的测量需求,但是可以用来判断渐开线样板的齿顶与测头的位置关系。基于此,提出一种基于机器视觉的双滚轮-导轨式渐开线测量仪测量渐开线样板的方法,其步骤如下:

1) 首先,通过目视将齿顶点调整至导轨平面以下,并将测头调整到待测齿面附近(测头与被测齿面相距1~2 mm),在测头和被测齿面的中截面附近利用标定板对相机进行校准^[13],然后采集图像。

2) 将采集到的图像转换为二值图,然后对二值图进行边缘检测,判断齿顶轮廓、渐开线齿面轮廓和测头轮廓。为了能更清晰地分辨齿顶圆和测头与齿顶点的位置,采集图像时一般放大2X~4X,此时图像中只有对应弧长2~5 mm的渐开线齿面轮廓和齿顶轮廓,以基圆半径 $r_b = 100$ mm的渐开线为例,在展开长度 $\rho = 60 \sim 70$ mm范围内,利用二次曲线拟合渐开线的均方根误差 $RMSE = 0.15 \mu m$,在圆心角 5° 时,利用2次曲线拟合圆的均方根误差 $RMSE = 1.5 \mu m$,所以可以利用二次曲线和最小二乘法(式(12))拟合渐开线轮廓和齿顶轮廓,利用圆的方程和非线性最小二乘法(式(13))拟合测头(本例中渐开线样板的齿顶为圆柱,当渐开线样板的齿顶为平面时可利用直线拟合)。理论齿顶点为拟合出的齿顶轮廓与拟合出的渐开线齿面轮廓的交点。

$$\min_x f(x) = \min_x \sum_i (A_1 x_i^2 + A_2 x_i + A_3 - y_i)^2 \quad (12)$$

式中: (x_i, y_i) 为像素点的坐标, A_1, A_2, A_3 为2次曲线的系数。

$$\min f(x) = \min \sum_i ((x_i - B_1)^2 + (y_i - B_2)^2 - B_3)^2 \quad (13)$$

式中: (B_1, B_2) 为圆心的坐标, B_3 为圆半径的平方。

3) 驱动渐开线样板向齿根方向滚动(齿顶点向导轨上方运动),每1 mm展开长度采集10~20幅图像,计算每幅图像中理论齿顶点到测头球心的距离(测头静止),当理论齿顶点到测头球心的距离最短时,为渐开线开始

测量的位置。将测头与待测齿面接触,测量时,先将渐开线样板从齿顶方向滚动到齿根方向,滚轮滚动距离为渐开线样板的设计展开长度,然后再从齿根方向测量到齿顶方向,得到被测渐开线的齿廓偏差 f_i 和在滚轮半径下的展开长度 ρ'_i 。

4) 在评价被测渐开线的齿廓倾斜偏差和齿廓形状偏差时,首先根据齿廓倾斜偏差 $f_{H\alpha}$ 和滚轮半径 r_{roller} 修正被测渐开线的基圆半径,得到被测渐开线基圆半径实际值 r_{bs} (式(14)),然后根据基圆半径实际值 r_{bs} 计算在该基圆半径下齿廓偏差 f_i 对应的展开长度 ρ_i (式(15)),利用此时的展开长度 ρ_i 和齿廓偏差 f_i 评价齿廓形状偏差 $f_{f\alpha}$ 。

$$r_{bs} = r_{\text{roller}} \left(1 + \frac{f_{H\alpha}}{L_a} \right) \quad (14)$$

$$\rho_i = \sqrt{\rho^2 r_i^2 + r_{\text{roller}}^2 - r_{bs}^2}, \rho'_i \geq \sqrt{r_b^2 - r_{\text{roller}}^2} \quad (15)$$

4 渐开线样板测量实验

对一件渐开线样板的左、右齿面进行测量实验,渐开线样板的基圆半径设计值为100 mm,展开长度设计值为0~83 mm,齿廓偏差的计值范围为5~78 mm。先利用示值最大允许误差为 $\pm 3 \mu m$ 的三丰千分尺对渐开线样板的齿顶圆进行测量,渐开线样板的齿顶圆半径设计值为130 mm,测得渐开线样板待测齿面的实际齿顶圆半径 $r_{\text{tips}} = 129.996$ mm,对展开长度的影响可以忽略。

测量时实验室温度为 $20^\circ C \pm 0.3^\circ C$,双滚轮-导轨式渐开线测量仪如图7所示。通过摩擦驱动装置驱动滚轮和渐开线样板在导轨上做纯滚动,通过摩擦驱动装置上的光栅尺或激光干涉仪记录滚轮滚过的距离(即被测渐开线样板的展开长度),通过微位移转换装置和激光干涉仪测量被测齿廓,实验所用滚轮半径 $r_{\text{roller}} = 99.9828$ mm(两滚轮直径分别为199.9651 mm和199.9659 mm,取均值),测头

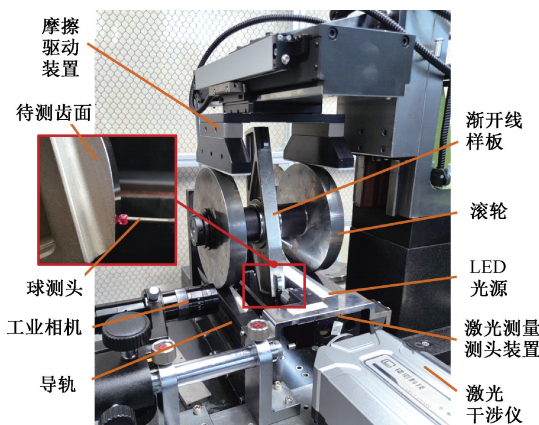


图7 双滚轮-导轨式渐开线测量仪与视觉系统

Fig. 7 Double roller-guide involute measuring instrument with the vision system

半径 $r_p = 1.5\text{ mm}$ 。测量时每 1 mm 展开长度取 10 个采样点,在评价齿廓倾斜偏差和齿廓形状偏差时,依据 ISO 1328-1 : 2013 对原始测量数据进行 50% 传输特性的高斯低通滤波处理,齿廓形状滤波器截止波长 $\lambda_\alpha = 1\text{ mm}$ ^[15]。

测量渐开线样板时首先将采集到的 RGB 图像(如图 8(a)所示)进行了旋转(为了方便进行边缘检测)并转换为灰度图像,利用局部阈值法对图像进行二值化(如图 8(b)所示),然后对图像进行边缘检测。传统的边缘检测算法有 Sobel 算子、Roberts 算子、Prewitt 算子、LoG 算子、Canny 算子等,其中 Canny 算子具有良好的信噪

比、较高的检测准确度、较好的边缘连续性和完整性,Canny 算子及其改进方法在表面缺陷检测上得到了广泛的应用^[16-18],考虑到识别误差小于 0.05 mm 即可满足本文的需求,所以本文直接利用 Canny 算子进行边缘检测。在采集到的图像中,利用最小二乘法拟合二次曲线得到渐开线轮廓曲线和齿顶轮廓曲线,利用信赖域反射算法(trust-region-reflective)求解基于非线性最小二乘的圆曲线拟合,得到测头曲线,齿顶轮廓曲线和渐开线轮廓曲线的交点为理论齿顶点,如图 8(c)所示。测得的左、右齿面的齿顶圆角分别为 0.12 和 0.09 mm 。

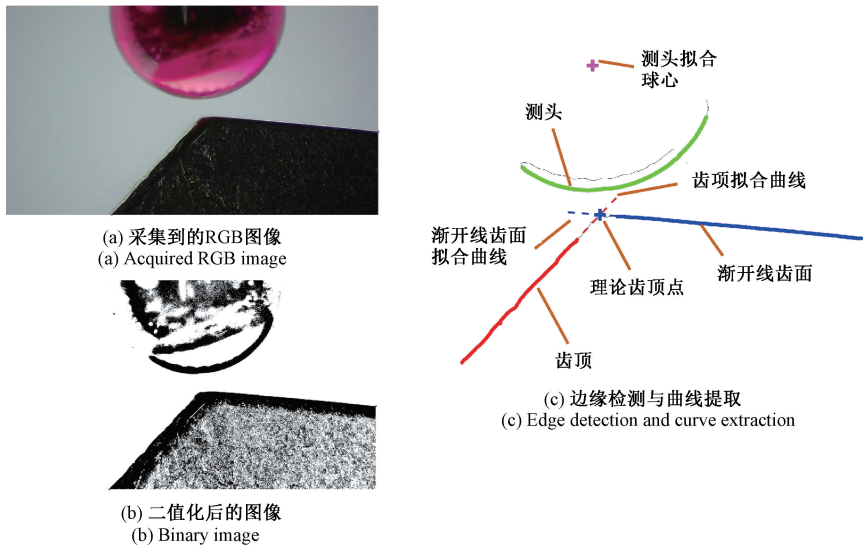


图 8 齿顶部与测头图像
Fig. 8 Images of tooth top and radius

对渐开线样板进行初步评价,测得左、右齿面的齿廓倾斜偏差 $f_{H\alpha}$ 分别为 8.23 和 $8.25\text{ }\mu\text{m}$,利用式(14)修正基圆半径,左、右齿面的基圆半径实际值 r_{bs} 均为 99.9941 mm ,然后利用式(15)修正展开长度 ρ_i 并计算齿廓形状偏差,修正前左、右齿面的齿廓形状偏差 $f_{f\alpha}$ 分别为 0.37 和 $0.38\text{ }\mu\text{m}$ 和,修正后左、右齿面的齿廓形状偏差 $f_{f\alpha}$ 分别为 0.32 和 $0.37\text{ }\mu\text{m}$ 。

该渐开线样板也在东北国家计量测试中心进行了测量,利用齿轮测量中心 Klingelnberg P40 测量了渐开线样板的基圆半径和齿廓形状偏差,齿廓偏差曲线如图 9 所示(测量曲线的放大倍率为 $10\ 000:1$),渐开线样板左、右齿面的基圆半径实际值 r_{bs} 分别为 99.9946 和 99.9936 mm 、齿廓形状偏差 $f_{f\alpha}$ 分别为 0.3 和 $0.4\text{ }\mu\text{m}$,两种渐开线测量仪器的齿廓偏差曲线具有一致性。

利用轮廓测量仪 MarSurf XC20 测得左、右齿面的齿顶圆角分别为 0.12988 和 0.0877 mm ,与实验室测量结果的差异小于 0.01 mm ,该误差一方面可能是由视

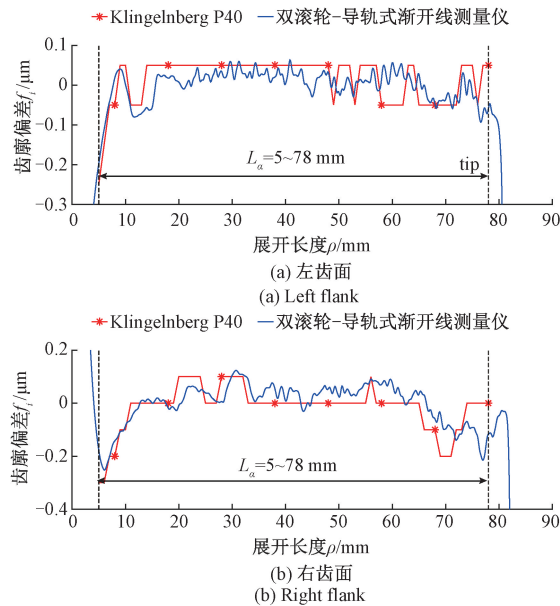


图 9 齿廓偏差曲线(已修正齿廓倾斜偏差)
Fig. 9 Profile deviation curves (the corrected profile slope deviation)

觉系统的误差引起的,另一方面可能是因为视觉系统测量时测得的齿顶圆角位于齿廓侧面而轮廓测量仪的测量位置为齿廓中截面。本文通过齿顶圆角判断理论齿顶点的位置,该误差可以接受。

两实验室测得的齿廓偏差曲线和齿廓形状偏差的差异 $\leq 0.1\text{ }\mu\text{m}$,这种差异可能是由分辨率或随机误差等因素引起的。但是基圆半径实际值的差异为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$,这可能与仪器的测量误差、双滚轮-导轨式渐开线测量仪和齿轮测量中心测量渐开线样板时定位基准不一致,测量时测头受力方向不一致等因素有关。

5 结 论

为了获得齿廓偏差与展开长度较为准确的对应关系、实现齿轮渐开线样板的精确计值,本文研究了双滚轮-导轨式渐开线测量仪测量齿轮渐开线样板时齿轮渐开线样板的齿顶圆角、齿顶圆偏差和滚轮半径偏差对展开长度的影响,发现齿顶圆角和滚轮半径偏差可能带来毫米级的展开长度偏差,进而影响齿廓偏差的测量结果。

本文提出一种基于机器视觉的双滚轮-导轨式渐开线测量仪测量策略和展开长度修正方法,通过机器视觉判断渐开线样板理论齿顶点和起始测量位置,根据滚轮半径对展开长度进行修正,并对一件齿轮渐开线样板进行了测量实验,测得的齿廓形状偏差与齿轮测量中心的测量结果差异 $\leq 0.1\text{ }\mu\text{m}$,齿廓偏差曲线具有一致性,说明该测量策略可以获得齿廓偏差与展开长度的对应关系,可以用于高精度齿轮渐开线样板的精密测量。

参考文献

- [1] 全国量具量仪标准化技术委员会. 齿轮渐开线样板: GB/T 6467—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
National Standardization Technical Committee of Measuring Tools and Instruments of China. The involute artifact: GB/T 6467—2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [2] MAKAREVICH V. Final report on supplementary comparison COOMET. L-S10: Comparison of length standards for measuring gear parameters [J]. Metrologia, 2012, DOI:10.1088/0026-1394/49/1A/04004.
- [3] KNIEL K, CHANTHAWONG N, EASTMAN N, et al. Supplementary comparison EURAMET. L-S24 on involute gear standards [J]. Metrologia, 2014, 51(1A): 04001.
- [4] KNIEL K, WEDMANN A, STEIN M, et al. COOMET supplementary comparison L-S18 (project: 673/UA-a/15) [J]. Metrologia, 2018, DOI:10.1088/0026-1394/

55/1A/04008.

- [5] 全国齿轮标准化技术委员会. 渐开线圆柱齿轮精度检验细则: GB/T 13924—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
National Standardization Technical Committee of Gears of China. Inspection code for accuracy of involute cylindrical gears: GB/T 6467—2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [6] RUDOLF O. History of gear measuring machines and traceability 1900—2006 [J]. Gear Product News, 2006, 10: 20-25.
- [7] TAKEOKA F, KOMORI M, KUBO A, et al. High-precision measurement of an involute artefact by a rolling method and comparison between measuring instruments [J]. Measurement Science and Technology, 2009, DOI:10.1088/0957-0233/20/4/045105.
- [8] 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]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(6): 980-985.
- [9] 凌明, 凌四营, 刘祥生, 等. 虑及计值范围的1级齿轮渐开线样板精密成型 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(11): 35-44.
LING M, LING S Y, LIU X SH, et al. Precision forming for class-1 gear involute artefact considering the evaluation range [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(11): 35-44.
- [10] 凌明, 凌四营, 刘远航, 等. 测头半径对1级渐开线样板齿廓偏差测量的影响 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(4): 121-128.
LING M, LING S Y, LIU Y H, et al. Effect of probe radius on the measurement for profile deviations of class-1 gear involute artefact [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(4): 121-128.
- [11] MORU D K, BORRO D. A machine vision algorithm for quality control inspection of gears [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(19): 105-123.
- [12] 孔盛杰, 黄翔, 周蒯, 等. 基于机器视觉的齿形结构齿顶圆检测方法 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4): 247-255.
KONG SH J, HUANG X, ZHOU K, et al. Detection method of addendum circle of gear structure based on

- machine vision [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(4): 247-255.
- [13] 汤洁, 刘小兵, 李睿. 未知参数小模数齿轮齿距和齿廓偏差视觉测量[J]. 光学精密工程, 2021, 29(1): 100-109.
- TANG J, LIU X B, LI R. Vision measurement of pitch and profile deviations for small modulus gears with unknown parameters [J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(1): 100-109.
- [14] 支珊, 赵文珍, 赵文辉, 等. 基于齿轮局部图像的齿距机器视觉测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(2): 225-231.
- ZHI SH, ZHAO W ZH, ZHAO W H, et al. Visual measurement method of pitch machine based on gear local image [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(2): 225-231.
- [15] Technical Committee ISO/TC 60, Gears. ISO Cylindrical gears-ISO system of flank tolerance classification-Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to flanks of gear teeth: ISO 1328-1: 2013[S]. Geneva: International Standards Organization, 2013:21-22.
- [16] 黄梦涛, 连一鑫. 基于改进 Canny 算子的锂电池极片表面缺陷检测[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(10): 199-209.
- HUANG M T, LIAN Y X. Lithium battery electrode plate surface defect detection based on improved Canny operator [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(10): 199-209.
- [17] 赵朗月, 吴一全. 基于机器视觉的表面缺陷检测方法研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(1): 198-219.
- ZHAO L Y, WU Y Q. Research progress of surface defect detection methods based on machine vision [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(1): 198-219.
- [18] 何静, 余昊宇, 张昌凡, 等. 基于 Canny-YOLOv3 的列车轮对踏面损伤检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(12): 25-30.
- HE J, YU H Y, ZHANG CH F, et al. Damage detection of train wheelset tread using Canny-YOLOv3 [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(12): 25-30.

作者简介



Ling Ming received his B. Sc. degree from Xi'an University of Architecture and Technology in 2018. He is currently a Ph. D. candidate at Dalian University of Technology. His main research interests include precision and ultra-precision machining, precision gear grinding and testing technology.



Ling Siying (Corresponding author) received his B. Sc. degree from ShanDong JiaoTong University in 2004, received his M. Sc. degree from Shandong University of Technology in 2007, and received his Ph. D. degree from Dalian University of Technology in 2011. He is currently an associate professor and a master advisor at Dalian University of Technology. His main research interests include precision and ultra-precision machining, precision mechanical design, precision gear grinding and testing technology.



Shi Zhaoyao received his B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 1984, received his M. Sc. degree from Shaanxi Mechanical Institute in 1988, and received his Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2001. He is currently a professor, a Ph. D. advisor, and a Changjiang distinguished professor at Beijing University of Technology. His main research interests include precision measurement technology and instruments, gear engineering and precision reducers.

凌明, 2018 年于西安建筑科技大学获得学士学位, 现为大连理工大学博士研究生, 主要研究方向为精密、超精密加工、精密磨齿工艺与测试技术。

E-mail: lingming@mail.dlut.edu.cn

凌四营 (通信作者), 2004 年于山东交通学院获得学士学位, 2007 年于山东理工大学获得硕士学位, 2011 年于大连理工大学获得博士学位, 现为大连理工大学副教授、硕士研究生导师, 主要研究方向为精密、超精密加工、精密机械设计、精密磨齿工艺与测试技术。

E-mail: lingsy@dlut.edu.cn

Ling Siying (Corresponding author) received his B. Sc. degree from ShanDong JiaoTong University in 2004, received his M. Sc. degree from Shandong University of Technology in 2007, and received his Ph. D. degree from Dalian University of Technology in 2011. He is currently an associate professor and a master advisor at Dalian University of Technology. His main research interests include precision and ultra-precision machining, precision mechanical design, precision gear grinding and testing technology.

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, 现为北京工业大学教授、博士研究生导师, 长江学者特聘教授, 主要研究方向为精密测试技术和仪器、齿轮工程和精密减速器。

E-mail: shizhaoyao@bjut.edu.cn

Shi Zhaoyao received his B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 1984, received his M. Sc. degree from Shaanxi Mechanical Institute in 1988, and received his Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2001. He is currently a professor, a Ph. D. advisor, and a Changjiang distinguished professor at Beijing University of Technology. His main research interests include precision measurement technology and instruments, gear engineering and precision reducers.