

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210321

环境温度对双滚轮-导轨式渐开线测量仪的影响^{*}

凌 明¹, 凌四营^{1,2}, 张 衡¹, 王奉涛³, 王立鼎^{1,2}

(1. 大连理工大学微纳米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. 汕头大学智能制造技术教育部重点实验室 汕头 515063)

摘 要:双滚轮-导轨式渐开线测量仪是一种无阿贝误差、误差源少、测量精度高的渐开线测量仪器,常用来测量高精度标准齿轮和齿轮渐开线样板。本文研究了环境温度对双滚轮-导轨式渐开线测量仪及齿轮渐开线样板的影响,发现当双滚轮-导轨式渐开线测量仪的滚轮与待测齿轮渐开线样板的热膨胀系数相同时,环境温度的变化不会带来齿廓倾斜偏差,而滚轮与齿轮渐开线样板的热膨胀系数不同时,在 $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 范围内环境温度的变化带来的齿廓倾斜偏差是随环境温度线性变化的,而且上述两种情况环境温度的变化均只带来纳米量级的齿廓形状偏差,可以忽略。通过 ANSYS 进行了渐开线样板、滚轮和导轨的热膨胀仿真验证,并通过 GCr15 钢和 SiC 陶瓷材料的滚轮对材料为 GCr15 钢的渐开线样板的同一齿面进行了不同环境温度下的齿廓偏差测量实验,环境温度变化时, GCr15 钢材料滚轮测得的齿廓倾斜偏差未发生明显改变, SiC 陶瓷材料滚轮测得的齿廓倾斜偏差的变化量为 $0.71 \mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$, 与理论值 $0.73 \mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ 基本一致,两种材料滚轮测得的齿廓形状偏差均未发生明显改变。

关键词: 渐开线齿廓偏差; 齿轮测量; 热膨胀; 误差补偿

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

Effect of ambient temperature on the double roller-guide involute measurement instrument

Ling Ming¹, Ling Siying^{1,2}, Zhang Heng¹, Wang Fengtao³, Wang Liding²

(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. Key Laboratory of Intelligent Manufacturing Technology of Ministry of Education, Shantou University, Shantou 515063, 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 artifacts or class-1 standard gears. The effect of ambient temperature on the double roller-guide involute measuring instrument and gear involute artifact is analyzed. The change of the ambient temperature would not bring about the profile slope deviation as the thermal expansion coefficient of the roller of the double roller-guide involute measuring instrument and the gear involute artifact to be measured are the same. However, when the thermal expansion coefficient of the roller and the gear involute artifact is different, the profile slope deviation under the change of the ambient temperature within $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ is linear with the ambient temperature. The variation of ambient temperature only causes nanometer-scale profile form deviation in both case and can be neglected. The thermal expansion simulation of the gear involute artifact, roller, and the guide is verified by ANSYS. The measurement experiments for profile deviation at different ambient temperatures are implemented on the same tooth surface of the gear involute artifact made of GCr15 steel. As the ambient temperature changes, the profile slope deviation measured by the roller made of GCr15 steel does not change significantly, and the change of profile slope deviation measured by the roller made of SiC ceramic material is $0.71 \mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$, which is basically consistent with the theoretical value of $0.73 \mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$, and the tooth profile form deviation measured by the roller of both materials does not change significantly.

Keywords: involute profile deviation; gear measurement; thermal expansion; error compensation

收稿日期: 2022-08-17 Received Date: 2022-08-17

^{*} 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

0 引 言

渐开线廓形是齿轮应用最广泛的一种廓形,为了实现渐开线齿轮的高效精密测量,基于线结构光与机器视觉的新型光学齿轮测量方法也得到了研究^[1-3],但是测量精度与传统的齿轮测量仪器仍具有一定的差距。渐开线的纯滚动展成法是一种符合渐开线生成原理的高精度渐开线成型方法,双滚轮-导轨式渐开线展成机构,具有渐开线一次成型、结构简单、误差源少、渐开线展成精度高的优点,基于该类型展成机构的双滚轮-导轨式渐开线测量仪是一种无阿贝误差的渐开线测量仪器,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)、大连理工大学^[4-6]均采用此方法测量高精度标准齿轮和齿轮渐开线样板的齿廓偏差,大连理工大学也利用双滚轮-导轨式渐开线展成机构加工磨齿机的凸轮和齿轮渐开线样板。

利用双滚轮-导轨式渐开线展成机构,大连理工大学已经加工出满足我国齿轮渐开线样板国家标准 GB/T 6467—2010 对 1 级渐开线样板计值范围和齿廓形状偏差要求的渐开线样板^[7],并通过一种空间几何误差补偿方法提高了双滚轮-导轨式渐开线测量仪的测量精度^[8],但是在利用渐开线样板进行量值传递、修正渐开线测量仪器的示值误差时,通常需要将渐开线样板的齿廓倾斜偏差修正为小于 $0.1 \mu\text{m}$,并提供基圆半径实际值和齿廓形状偏差^[9],这对渐开线的测量精度提出了很高的要求。

为了实现渐开线样板的精确计值,本文研究了环境温度对双滚轮-导轨式渐开线测量仪齿廓偏差的影响规律,通过 ANSYS 进行了渐开线样板、滚轮和导轨的热膨胀仿真,并更换了双滚轮-导轨式渐开线测量仪滚轮的材料,对同一渐开线样板齿廓偏差进行了不同环境温度下的测量实验。

1 环境温度引起的渐开线热膨胀

双滚轮-导轨式渐开线测量仪的测量原理如图 1 所示,当滚轮在导轨上做纯滚动时,以滚轮半径为基圆半径的标准渐开线与发生线(导轨)的交点 P 位置不发生改变,所以在 P 点布置一测头即可实现以滚轮半径为设计基圆半径的渐开线的测量,测头采集到的数据即为渐开线的齿廓偏差。

一般要求,渐开线样板需要放置在检定室内平衡温度的时间应不少于 12 h,检定用设备放置在检定室内平衡温度的时间应不少于 24 h^[10],此时可以认为渐开线样

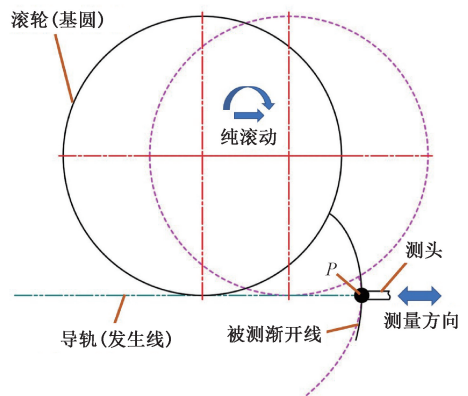


图 1 双滚轮-导轨式渐开线测量仪测量原理

Fig. 1 Involute measurement with the rolling method

板和双滚轮-导轨式渐开线测量仪内部温度为环境温度。一般渐开线样板、滚轮和导轨所用材料为钢类材料或陶瓷类材料,在测量 1 级渐开线样板或 1 级标准齿轮时,检定室温度应满足 $20^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ ^[10],可以认为热膨胀系数是线性的,线性热膨胀系数 α 满足:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L \Delta T} \quad (1)$$

式中: ΔT 为室温相对于 20°C 的变化量, L 为试样在 20°C 时的原始长度, ΔL 为热膨胀量。

首先研究双滚轮-导轨式渐开线测量仪滚轮热膨胀带来的齿廓偏差。滚轮为均匀的盘类零件,可以视为热变形是沿径向的,滚轮半径的热变形 Δr_{bT} 满足:

$$\Delta r_{bT} = r_b \alpha \Delta T \quad (2)$$

滚轮热膨胀后(基圆半径 $r_b + \Delta r_{bT}$,如图 2(a)所示),经纯滚动生成的实际渐开线满足:

$$\begin{cases} x_{Le1} = (r_b + \Delta r_{bT}) \cos \theta + (r_b + \Delta r_{bT}) \theta \sin \theta \\ y_{Le1} = (r_b + \Delta r_{bT}) \sin \theta - (r_b + \Delta r_{bT}) \theta \cos \theta \end{cases} \quad (3)$$

实际渐开线上的点对应的理论展开角 θ_L :

$$\theta_L = \arccos \frac{r_b}{\sqrt{x_{Le1}^2 + y_{Le1}^2}} + \arcsin \frac{y_{Le1}}{\sqrt{x_{Le1}^2 + y_{Le1}^2}} \quad (4)$$

所对应的基圆半径 r_b 理论渐开线上在该展开角时的点满足:

$$\begin{cases} x_L = r_b \cos \theta_L + r_b \theta_L \sin \theta_L \\ y_L = r_b \sin \theta_L - r_b \theta_L \cos \theta_L \end{cases} \quad (5)$$

展开角 θ_L 处基圆上的点 (x_p, y_p) 满足:

$$\begin{cases} x_p = r_b \cos \theta_L \\ y_p = r_b \sin \theta_L \end{cases} \quad (6)$$

则实际渐开线偏离理论渐开线的程度即齿廓偏差 f_i 为:

$$f_i = \sqrt{(x_{Le1} - x_p)^2 + (y_{Le1} - y_p)^2} - \sqrt{(x_L - x_p)^2 + (y_L - y_p)^2} \quad (7)$$

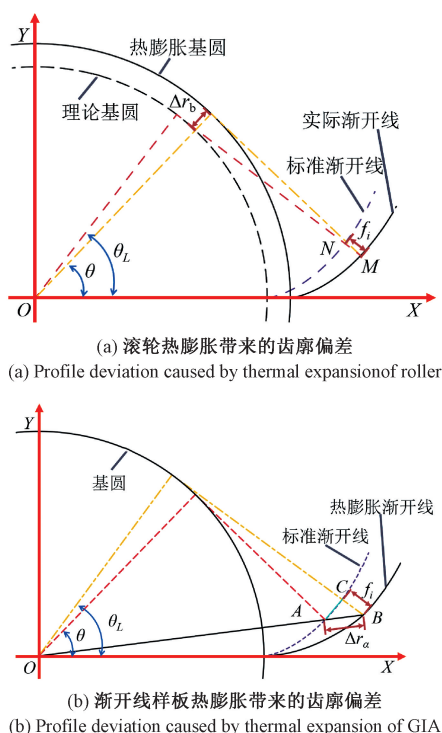


图2 双滚轮-导轨式渐开线测量仪的热膨胀

Fig. 2 Thermal expansion of the double roller-guide involute measuring instrument

式(7)即滚轮热膨胀带来的齿廓偏差 $f_{iRoller}$ 。

利用最小二乘法拟合 $(r_b \theta_i, f_i)$ 得出平均齿廓迹线:

$$y_i = kr_b \theta_i + b \quad (8)$$

则齿廓倾斜偏差 $f_{H\alpha}$ 为:

$$f_{H\alpha} = kL_\alpha \quad (9)$$

式中: L_α 为渐开线齿廓偏差的计值长度。

齿廓形状偏差 f_{fa} 满足:

$$f_{fa} = |\max(f_i - y_i) - \min(f_i - y_i)| \quad (10)$$

下面研究渐开线样板自身的热膨胀规律,如图2(b)所示。渐开线样板的齿面为平面内的复杂曲线,在展开角 θ 处渐开线的热膨胀可以视作渐开线在该点沿基圆径向的变形,所以在温度变化 ΔT 时,渐开线沿基圆径向的热膨胀 Δr_a (图2(b)中AB间的距离)满足:

$$\Delta r_a = \sqrt{r_b^2 (1 + \theta^2)} \alpha \Delta T \quad (11)$$

渐开线样板齿面上的渐开线热膨胀后满足:

$$\begin{cases} x_{L2} = x_L + \Delta r_a \cos(\theta - \arctan \theta) \\ y_{L2} = y_L + \Delta r_a \sin(\theta - \arctan \theta) \end{cases} \quad (12)$$

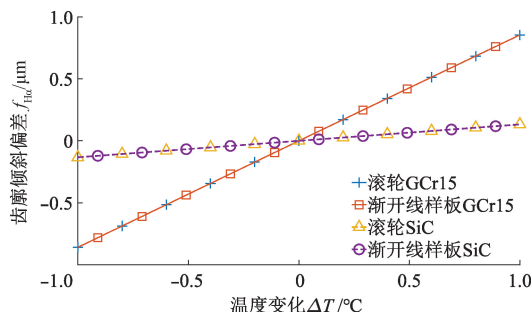
将式(12)中的 (x_{L2}, y_{L2}) 替代式(3)中的 (x_{L1}, y_{L1}) 即可计算渐开线样板自身热膨胀带来的齿廓偏差 f_{iGIA} 。

双滚轮-导轨式渐开线测量仪因热膨胀的测量误差带来的齿廓偏差 Δf_i 满足:

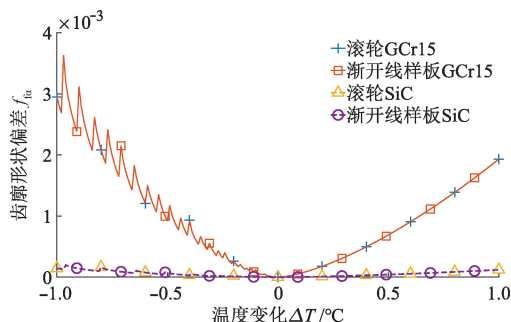
$$\Delta f_i = f_{iGIA} - f_{iRoller} \quad (13)$$

我国齿轮渐开线样板国家标准 GB/T 6467—2010 要求,渐开线样板工作面的硬度应不低于 60 HRC^[9], GCr15 钢具有耐磨性好、硬度高的优点,也是使用最为广泛的一种高碳铬轴承钢,经 850℃ 油淬、-60℃ 以下深冷并经 160℃ 回火后,硬度可以达到 60 HRC 以上^[11-12],满足渐开线样板齿面的硬度要求。SiC 陶瓷具有硬度高(硬度约为 GCr15 钢的 4~5 倍)、热膨胀系数小、耐磨性能好的优点,是一种广泛应用的经济陶瓷。所以在作者所在实验室,渐开线样板和滚轮采用 GCr15 钢和 SiC 陶瓷两种材料,线性热膨胀系数分别为 $\alpha_{GCr15} = 12.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ^[13], $\alpha_{SiC} = 1.9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ (SiC 陶瓷的热膨胀系数由生产厂家提供的热学性能测试插值计算得到)。

从图3可以看到,温度变化对齿廓倾斜偏差的影响是线性的,对齿廓形状偏差的影响不足 0.01 μm ,可以忽略。对于双滚轮-导轨式渐开线测量仪,当滚轮和渐开线样板的材料相同时,滚轮热膨胀后经纯滚动展成的实际渐开线与渐开线样板自身热膨胀后的渐开线重合,环境温度的变化不会带来纯滚动展成系统的齿廓偏差。渐开线样板的材料一般是固定的,所以双滚轮-



(a) 热膨胀带来的齿廓倾斜偏差 $f_{H\alpha}$
(a) Profile slope deviation $f_{H\alpha}$ caused by thermal expansion



(b) 热膨胀带来的齿廓形状偏差 f_{fa}
(b) Profile form deviation f_{fa} caused by thermal expansion

图3 热膨胀带来的齿廓偏差(基圆半径 $r_b = 100 \text{ mm}$, 计值范围 0~70 mm)

Fig. 3 Profile deviation caused by thermal expansion (Base radius $r_b = 100 \text{ mm}$, evaluation range in roll path length is 0~70 mm)

导轨式渐开线测量仪其他系统误差如弹性蠕滑带来的齿廓倾斜偏差可以通过更换不同材料的滚轮和调控环境温度补偿。

图 2 中 BC 或 MN 间的距离即齿廓偏差 f_i 均可以近似看作:

$$f_i \approx \Delta r_\alpha \frac{r_b \theta}{\sqrt{r_b^2 (1 + \theta^2)}} = r_b \alpha \Delta T \theta \quad (14)$$

渐开线展开长度 ρ 满足 $\rho = r_b \theta$, 所以双滚轮-导轨式渐开线测量仪因热膨胀的测量误差带来的齿廓偏差 Δf_i 可近似认为:

$$\Delta f_i = f_{iGIA} - f_{iRoller} = (\alpha_{GIA} - \alpha_{Roller}) \Delta T \rho \quad (15)$$

式中: α_{GIA} 、 α_{Roller} 分别为渐开线样板和滚轮材料的线性热膨胀系数。

上述近似公式与精确解得到的齿廓偏差 f_i 在小温度范围 ($20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) 热膨胀下的差异仅在纳米量级, 所以渐开线样板自身的热膨胀可以看作是基圆热膨胀后形成的新的标准渐开线, 图 3 是由式 (13) 计算得到, 可以看到当滚轮和渐开线样板的材料相同时, 温度变化导致滚轮热膨胀带来的齿廓倾斜偏差和渐开线样板自身热膨胀带来的齿廓倾斜偏差是相同的, 所以可用式 (15) 快速计算环境温度对渐开线齿廓偏差的影响。

2 热膨胀仿真

利用 ANSYS 对渐开线样板、滚轮和导轨的简化模型进行热膨胀仿真, 三者均为 GCr15 钢材料, 渐开线样板基圆半径 $r_b = 100 \text{ mm}$ 、展开长度 $\rho = 0 \sim 70 \text{ mm}$, 滚轮半径 $r_{roller} = 100 \text{ mm}$ 、滚轮宽度 28 mm , 导轨长度 300 mm 、宽度 30 mm 、高度 80 mm 。渐开线样板的热膨胀矢量如图 4(a) 所示, 可以看到渐开线样板的热膨胀是沿基圆半径方向的; 如图 4(b) 所示, 将齿面网格细分, 输出在中截面的变形后渐开线的坐标和膨胀量, 并计算齿廓偏差, 渐开线样板自身热膨胀的数学模型计算结果与 ANSYS 仿真结果如图 5 和表 1 所示, 可以看到数学模型与 ANSYS 仿真的齿廓倾斜偏差的差异不大于 $0.01 \text{ }\mu\text{m}$, 热膨胀造成的齿廓形状偏差仅为纳米量级 (可能是由 ANSYS 建模误差引起的)。图 4(c) 中滚轮的热膨胀变形量与理论分析一致; 图 4(d) 表明了导轨在沿纯滚动方向上, 使用段 (导轨中间 150 mm 范围内) 热膨胀量差异不超过 $0.1 \text{ }\mu\text{m}$, 所以导轨自身的热膨胀可以忽略。

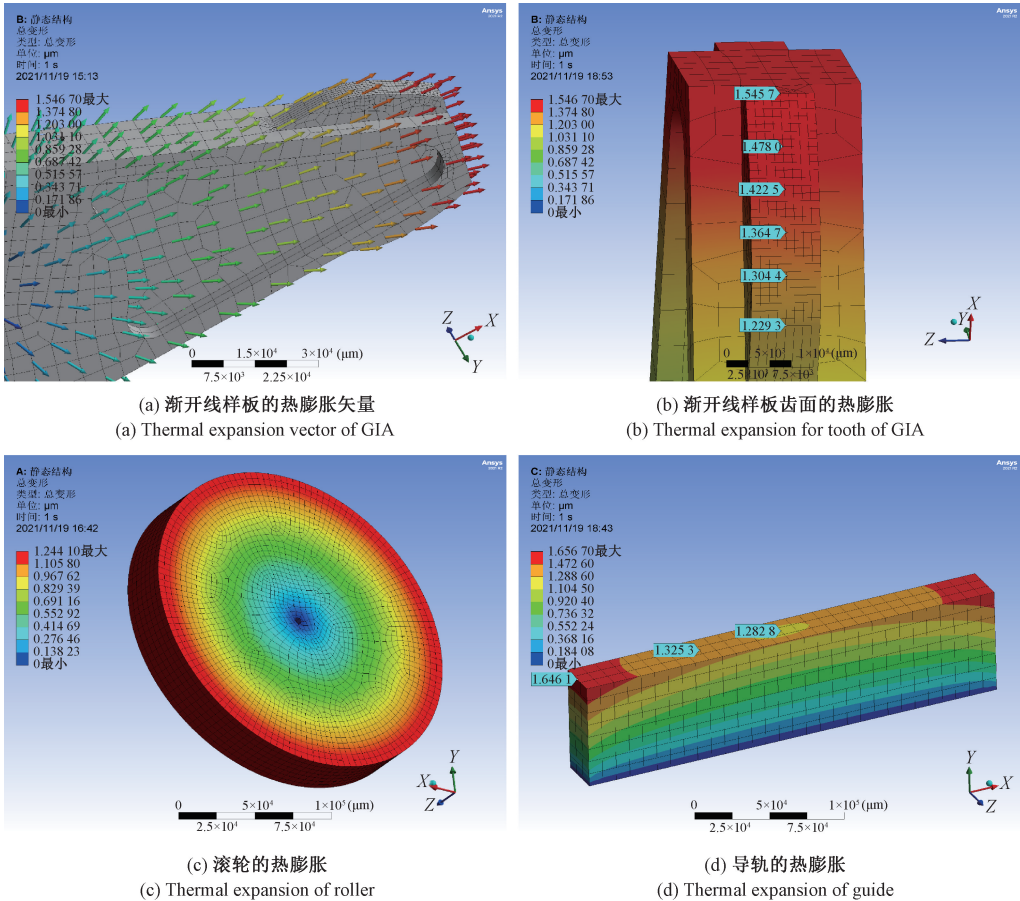


图 4 ANSYS 热膨胀仿真 $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ (材料为 GCr15 钢)

Fig. 4 ANSYS simulation for thermal expansion $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ (Material is GCr15 steel)

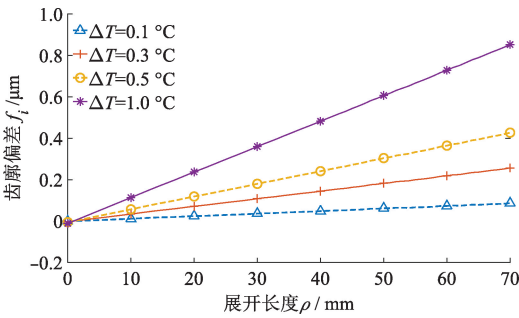


图 5 渐开线样板的热膨胀仿真结果
(渐开线样板材料为 GCr15 钢、基圆半径 $r_b = 100$ mm)
Fig. 5 Simulation results for thermal expansion of GIA
(Material of GIA is GCr15 steel, base radius $r_b = 100$ mm)

表 1 渐开线样板热膨胀的数学模型与 ANSYS 仿真结果比较 (渐开线样板材料为 GCr15 钢、基圆半径 $r_b = 100$ mm、计值范围 0~70 mm)

Table 1 Comparison of mathematical model and ANSYS simulation results for thermal expansion of GIA (Material of GIA is GCr15 steel, base radius $r_b = 100$ mm, evaluation range in roll path length 0~70 mm)

温度变化 $\Delta T / ^\circ\text{C}$	齿廓倾斜偏差 $f_{H\alpha} / \mu\text{m}$		齿廓形状偏差 $f_{fa} / \mu\text{m}$	
	数学模型	ANSYS 仿真	数学模型	ANSYS 仿真
0.1	0.085 9	0.085 5	0	0.004 2
0.3	0.257 3	0.255 8	0.000 3	0.004 2
0.5	0.428 3	0.425 7	0.000 7	0.004 2
1.0	0.855 0	0.849 7	0.001 9	0.004 2

3 渐开线样板的测量实验

对一件设计基圆半径 $r_b = 100$ mm、展开长度 $\rho = 0 \sim 83$ mm、材料为 GCr15 钢的渐开线样板进行测量实验,齿廓偏差的计值范围为 5~75 mm。所用双滚轮-导轨式渐开线测量仪及滚轮如图 6 所示。通过电动线性滑台上装有带硅胶的摩擦板,驱动滚轮和渐开线样板在导轨上做纯滚动,通过微位移转换装置和激光干涉仪测量渐开线样板的齿廓偏差,测量时所用测头球径为 3 mm,每 1 mm 展开长度取 5 个采样点,在评价齿廓倾斜偏差和齿廓形状偏差时,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 $\lambda_c = 1$ mm^[14]。滚轮材料为 SiC 陶瓷和 GCr15 钢两种。环境温度分别控制在 20℃,22℃,24℃,温度传感器为 PT100 热电阻温度传感器,允差为 $\pm 0.15^\circ\text{C}$ 。每次调控环境温度时,渐开线样板及滚轮均在环境温度稳定后平衡温度 24 h,每次测量

时均在待测齿面的中截面测量 3 次后取平均值得到测量结果。

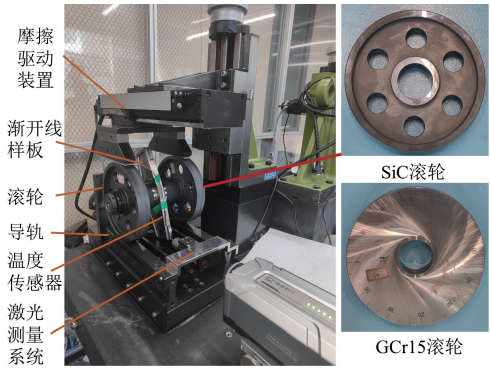
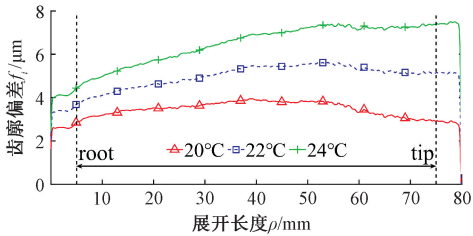
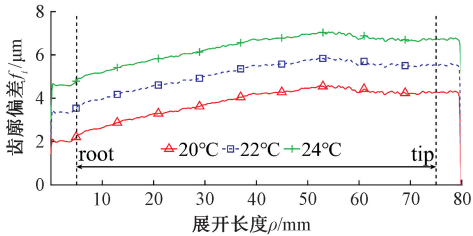


图 6 双滚轮-导轨式渐开线测量仪及不同材料的滚轮
Fig. 6 Double roller-guide involute measurement instrument and rollers with different materials

渐开线样板的齿廓偏差测量曲线如图 7 所示,齿廓倾斜偏差 $f_{H\alpha}$ 和齿廓形状偏差 f_{fa} 如表 2 所示。



(a) 滚轮材料为 SiC 陶瓷时的渐开线样板测量曲线
(a) Measurement curves of GIA as the roller material is SiC ceramic



(b) 滚轮材料为 GCr15 钢时的渐开线样板测量曲线
(b) Measurement curves of GIA as the roller material is GCr15 steel

图 7 渐开线样板测量结果

Fig. 7 Measurement results of GIA

如表 2 和图 7 所示,当滚轮材料为 SiC 陶瓷、渐开线样板材料为 GCr15 钢时,随着环境温度的变化,齿廓倾斜偏差也随之变化,变化率为 $0.71 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$,理论变化率为 $0.73 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$,相对误差约 2.7%,实际变化率与理论变化率的差异可能是温度传感器误差、材料热膨胀系数误差引起的。在对材料进行热学性能测试时,通常温度变化范围在 1 000℃ 以上,在测量时,温度以不超过 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 变化或采用阶梯式升温方式并进行保温(保温过程中温度变化不得大于 $\pm 2^\circ\text{C}$),一般要求测量过程中试件的温

表 2 渐开线样板测量结果

Table 2 Measurement results of GIA with different environmental temperatures and different material rollers

滚轮材料	温度变化 $\Delta T/^{\circ}\text{C}$	齿廓倾斜 偏差的变化 $\Delta f_{\text{H}\alpha}/\mu\text{m}$	齿廓形状 偏差的变化 $\Delta f_{\text{f}\alpha}/\mu\text{m}$	齿廓倾斜 偏差的实 际变化率/ ($\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$)	齿廓倾斜 偏差的理 论变化率/ ($\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$)
SiC 陶瓷	0	0	0		
	2	1.42	0.01	0.71	0.73
	4	2.85	0.01		
GCr15 钢	0	0	0		
	2	-0.06	-0.02	-0.03	0
	4	-0.12	-0.02		

度梯度不大于 $0.4^{\circ}\text{C}/10\text{ mm}^{[14-15]}$,而对高精度渐开线样板或其他齿轮标准器进行精密测量时,环境温度常要求需满足 $20^{\circ}\text{C}\pm0.5^{\circ}\text{C}$ 并进行 12 h 以上的保温,此时滚轮和渐开线样板应采用的热膨胀系数与一般热学性能测试的热膨胀系数存在差异,后续仍需对滚轮和渐开线样板的材料在 20°C 附近的热膨胀系数及温度传感器进行标定。

而当滚轮和渐开线样板的材料均为 GCr15 钢时,随着环境温度的增大,渐开线样板的齿廓倾斜偏差反而以 $0.03\text{ }\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ 减小,一方面这可能是由测量误差引起的,另一方面这可能是因为滚轮与渐开线样板并不是由同一厂家制造的,滚轮和渐开线样板的材料间存在热膨胀系数的差异。综合考虑到测量仪器的重复性误差,可以认为环境温度的变化对齿廓形状偏差的影响可以忽略。

4 滚轮材料的选择

当滚轮与渐开线样板为同种材料时,环境温度在 $20^{\circ}\text{C}\pm0.5^{\circ}\text{C}$ 时对双滚轮-导轨式渐开线测量仪的影响可以忽略,这对于渐开线样板的精确计值是有利的。

但是在滚轮的实际使用过程中,测量基圆半径较大的渐开线样板,如基圆半径 $r_b>400\text{ mm}$ 的渐开线样板时,GCr15 钢材料或相近硬度钢材的滚轮和渐开线样板通常有较大的自重,此时,滚轮和导轨会存在亚微米级的变形^[16],而且过大的自重也不便于测量人员的操作。而 SiC 陶瓷的密度仅为 GCr15 钢的 40% 左右,但硬度约为 GCr15 钢的 4~5 倍,而且对于 GCr15 钢,残余奥氏体每转变 1%,其长度尺寸约增大 $0.01\%^{[17]}$,经淬火、深冷、回火后的 GCr15 钢的残余奥氏体含量可以降低至 3% 左右,即使每年只有 0.05% 的残余奥氏体参与转变,半径 400 mm 的滚轮沿半径的伸长量可达 $2\text{ }\mu\text{m}$,这不利于渐开线样板

基圆半径的量值溯源,所以对于较大基圆半径的渐开线样板,此时滚轮选择如 SiC 陶瓷等陶瓷材料更有利于大基圆半径渐开线样板的加工与测量。

在测量小基圆半径的渐开线样板,如基圆半径 $r_b\leq 60\text{ mm}$ 的渐开线样板时,滚轮如果采用 SiC 等陶瓷材料,惯性较小,易受外界干扰影响,此时选择 GCr15 钢等密度较大的材料有利于增加自重,提高滚动的稳定性。如果仍选用 SiC 等陶瓷材料,需在滚轮旁增加配重以提高稳定性。

当滚轮与渐开线样板的材料不同时,需对环境温度引起的齿廓倾斜偏差按式(7)进行修正。

另一方面,双滚轮-导轨式渐开线展成机构也存在其他会引入齿廓倾斜偏差的误差源,此时可以通过选择与渐开线样板材料不同的滚轮并通过控制环境温度补偿仪器的齿廓倾斜偏差。在磨削加工渐开线样板时,磨削热导致的残余应力与热变形常使磨削后的渐开线样板的基圆半径与滚轮半径存在差异,所以在磨削时,可以通过使用与渐开线样板材料不同的滚轮并控制环境温度,进而调控磨削后渐开线样板的齿廓倾斜偏差。

5 结 论

本文研究了环境温度对双滚轮-导轨式渐开线测量仪及齿轮渐开线样板的影响,发现当双滚轮-导轨式渐开线测量仪的滚轮与待测齿轮渐开线样板的热膨胀系数相同时,环境温度的变化不会带来齿廓倾斜偏差,而滚轮与齿轮渐开线样板的热膨胀系数不同时,在 $20^{\circ}\text{C}\pm5^{\circ}\text{C}$ 范围内环境温度的变化带来的齿廓倾斜偏差是随环境温度线性变化的,而且上述两种情况环境温度的变化均不会带来齿廓形状偏差,通过 ANSYS 进行了渐开线样板、滚轮和导轨的热膨胀仿真。

通过更换双滚轮-导轨式渐开线测量仪 GCr15 钢和 SiC 陶瓷材料的滚轮对同一材料为 GCr15 钢的渐开线样板进行了不同环境温度下的齿廓偏差测量实验,环境温度变化时,GCr15 钢材料滚轮的测量结果未发生明显改变,SiC 陶瓷材料滚轮的齿廓倾斜偏差的变化量为 $0.71\text{ }\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$,与理论值 $0.73\text{ }\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ 基本一致,两种材料滚轮测得的齿廓形状偏差均未发生改变。最后基于上述分析,对滚轮的材料选择提出了建议。

参考文献

[1] 朱维斌,刘明佩,叶树亮. 基于邻域特性分析的小模数齿轮亚像素图像边缘检测[J]. 仪器仪表学报, 2018,39(3):148-156.
ZHU W B, LIU M P, YE SH L, et al. Sub-pixel image

- edge detection based on neighborhood characteristic analysis for small modulus gear[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018,39(3):148-156.
- [2] 石照耀,孙衍强. 齿轮三维测量中线激光传感器位姿标定方法[J]. 仪器仪表学报,2021,42(12):39-46.
SHI ZH Y, SUN Y Q. A position and attitude calibration method for the linear laser sensor in gear 3D measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021,42(12):39-46.
- [3] 邵勇,张钰婷,顾桂鹏,等. 基于最小凸包的直齿圆柱齿轮检测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2017,31(9):1385-1393.
SHAO Y, ZHANG Y T, GU G P, et al. Research of spur gear detection method based on minimum convex hull [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017,31(9):1385-1393.
- [4] RUDOLF O. History of gear measuring machines and traceability 1900-2006 [J]. Gear Product News, 2006(10):20-25.
- [5] 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, 2009,20(4):045105.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 凌四营,孔玉梅,赵昌明,等. 双滚轮-导轨式渐开线测量仪的空间几何误差补偿方法[J]. 光学精密工程,2022,30(6):689-701.
LING S Y, KONG Y M, ZHAO CH M, et al. A compensation method for spatial geometric error of double roller-rail involute measuring instrument[J]. Optics and Precision Engineering, 2022,30(6):689-701.
- [9] 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, 2010:1,3-4.
National Standardization Technical Committee of Measuring Tools and Instruments of China. The involute artifact of gear: GB/T 6467—2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010:1,3-4.
- [10] 全国几何量长度计量技术委员会. 齿轮渐开线样板检定规程: JJG 332—2003 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2003:1-2.
National Technical Committee of Geometric-Length Measurement of China. Verification regulation of gear involute masters: JJG 332—2003 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2003:1-2.
- [11] 张立强,包燕平,王敏,等. GCr15 钢的热膨胀系数[J]. 钢铁研究学报,2012,24(9):40-44.
ZHANG L Q, BAO Y P, WANG M, et al. Thermal expansion coefficients of GCr15 steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2012,24(9):40-44.
- [12] 曾天翼,程陆凡,王乃明,等. 奥氏体化温度及深冷处理对 GCr15 钢组织和力学性能的影响[J/OL]. 热加工工艺: 1-5[2022-05-20].
ZENG T Y, CHENG L F, WANG N M, et al. Effects of austenitizing temperature and cryogenic treatment on microstructure and mechanical properties of GCr15 steel[J]. Hot Working Technology: 1-5[2022-05-20].
- [13] 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.
- [14] 全国钢标准化技术委员会. 金属材料热膨胀特征参数的测定: GB/T 4339—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008:1-9.
National Standardization Technical Committee of Steel of China. Test methods for thermal expansion characteristic parameters of metallic materials: GB/T 4339—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008:1-9.
- [15] 全国工业陶瓷标准化技术委员会. 精细陶瓷线膨胀系数试验方法-顶杆法: GB/T 16535—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008:1-3.
National Standardization Technical Committee of Industrial Ceramics of China. Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics)-Test method for linear thermal expansion of monolithic ceramics by push-rod technique: GB/T 16535—2008 [S]. Beijing:

Standards Press of China, 2008;1-3.

- [16] PUTTOCK M J, THWAITE E G. Elastic compression of spheres and cylinders at point and line contact [S]. Melbourne: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, 1969;15.
- [17] 刘耀中, 左传付. 轴承钢零件淬回火后的残余奥氏体[J]. 轴承, 2008(6):48-51.
- LIU Y ZH, ZUO CH F. Residual austenite in bearing steel parts after quenching and tempering[J]. Bearing, 2008(6):48-51.

作者简介



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

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



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.



王奉涛, 1997 年于吉林工业大学获得学士学位, 2000 年于吉林工业大学获得硕士学位, 2003 年于大连理工大学获得博士学位, 现为汕头大学教授、博士研究生导师, 主要研究方向为机械故障诊断与寿命预测、增材制造过程智能监控、高端海洋装备智能运维。

E-mail: ftwang@stu.edu.cn

Wang Fengtao received his B. Sc. degree from Jilin University of Technology in 1997, received his M. Sc. degree from Jilin University of Technology in 2000, and received his Ph. D. degree from Dalian University of Technology in 2003. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at Shantou University. His main research interests include mechanical fault diagnosis and life prediction, intelligent monitoring of additive manufacturing process, and intelligent operation and maintenance of high-end marine equipment.