

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209334

测头半径对1级渐开线样板齿廓偏差测量的影响*

凌明¹, 凌四营^{1,2}, 刘远航¹, 张志豪¹, 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)

摘要:按齿轮渐开线样板国家标准推荐,1级齿轮渐开线样板的齿廓形状偏差需从展开长度3或5 mm开始计值,齿根部非计值区间对应渐开线弧长仅为0.03~0.18 mm,导致1级齿轮渐开线样板齿根部的渐开线齿廓难以精确测量。为了能更好发挥1级齿轮渐开线样板的量值精准传递作用,分析了1级齿轮渐开线样板结构的特殊性以及测头半径对渐开线齿廓偏差测量结果的影响,结果表明,在齿根展开角误差时,测头半径引入的测量误差会随着测头半径的增大而增大,并随着展开长度的减小而增大,在基圆附近的测量误差可以达到齿廓偏差的50%~200%;当仅渐开线齿面存在加工误差时,测头半径引入的测量误差和展开长度受影响的范围会随着测头半径的增大和被测渐开线基圆半径的增大而增大,在齿根部展开长度10%的范围内测量误差约齿廓形状偏差的10%~60%。通过选取测头半径 $r_p=0.5$ 和2.5 mm的测头对同一齿轮渐开线样板进行了测量实验验证了上述结论。研究为1级齿轮渐开线样板的精密制造、精密测量及使用展开长度区间选取提供了支持。

关键词: 齿轮渐开线样板; 渐开线齿廓偏差; 齿轮测量; 量值传递

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 probe radius on the measurement for profile deviations of class-1 gear involute artefact

Ling Ming¹, Ling Siying^{1,2}, Liu Yuanhang¹, Zhang Zhihao¹, 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)

Abstract: The tooth profile form deviation of class-1 gear involute artefact is evaluated from roll path length 3 or 5 mm starting with the base circle according to the Chinese national standard for gear involute artefact. The arc length corresponding to the involute is only 0.03~0.18 mm, making the root of the involute tooth profile of class-1 gear involute is difficult to be measured. To exploit the accurate transmission of the value with class-1 gear involute artefact better, the special structure of class-1 gear involute artefact and the effect of the probe radius on the measurement results of the involute profile deviation is analyzed. The following conclusions are drawn. Firstly, the measurement error introduced by probe radius increases with increasing probe radius and decreasing rolling length as the rolling angle error at the root of involute is considered, and the measurement error near the base circle can reach 50%~200% of the tooth profile deviation. Secondly as the error in the machining of the involute tooth surface is considered only, the measurement error introduced by probe radius and the affected range of rolling length increases with increasing probe radius and the base radius of the involute being measured, and the measurement error is about 10%~60% of the profile form deviation within the range of 10% of roll path length at the tooth root. The conclusions above are verified by measuring the same gear involute artefact with probe radius $r_p=0.5$ and 2.5 mm. The basis for the ultra-precise manufacture, measurement and the selection of the roll path length to be used of class-1 gear involute artefact is provided.

Keywords: gear involute artefact; involute profile deviation; gear measurement; standard transfer

0 引言

齿轮渐开线样板(gear involute artefact, GIA)是渐开线齿廓偏差溯源与量值传递的基准,是校准各种渐开线测量仪器的标准计量器具,主要用于传递齿轮渐开线的参数量值、修正仪器的示值和确定仪器的示值误差^[1]。

国外没有独立的渐开线样板标准,对渐开线样板的研究多参照圆柱齿轮国际标准 ISO 1328 和各国独立的齿轮标准按齿轮参数进行。国际间用于量值比对的渐开线样板的齿廓形状偏差可以达到 $1\ \mu\text{m}$ 以下^[2-3]。我国从 20 世纪 80 年代开始制订了齿轮渐开线样板国家标准 GB/T 6467 和齿轮渐开线样板检定规程 JJG 332。我国现行的齿轮渐开线样板国家标准 GB/T 6467-2010 按计值范围内的齿廓形状偏差将渐开线样板划分为 1 级和 2 级两个等级,其中 1 级渐开线样板的齿廓形状公差仅为 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 。根据我国国家计量科学数据中心的公开资料显示,目前我国省市级社会公用计量标准的标准齿轮仪器标准器组为二等渐开线样板(渐开线样板计量标准考核时间多为 20 世纪末 21 世纪初,此时渐开线样板的等级仍为一等和二等,齿轮渐开线样板国家标准 GB/T 6467-2010 中将等别修订为级别,且提高了对 1 级渐开线样板齿廓形状偏差的要求)和 2、3 级标准齿轮。

我国国家计量科学研究院及省部级计量部门的渐开线测量仪器齿廓偏差的测量不确定度也为 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ (U_{95})。渐开线测量仪器的测量不确定度一般应为被测渐开线齿廓公差的 $1/2\sim 1/3$ ^[4],商品的渐开线测量仪器很难满足 1 级渐开线样板的测量要求。

目前,高精度渐开线测量仪器主要采用接触式测量,测量时测头的球径一般为毫米级,齿轮渐开线样板检定规程 JJG 332-2003 中推荐渐开线样板的基圆半径 $r_b \leq 60\ \text{mm}$ 时,应用 $\phi 3\ \text{mm}$ 的测头检定渐开线样板;基圆半径 $r_b > 60\ \text{mm}$ 时,应用 $\phi 6\ \text{mm}$ 的测头检定渐开线样板^[5]。近年国内对齿轮在机测量或基于机器视觉识别、线结构光的齿轮测量新方法^[6-11]的研究较多,但是目前渐开线的非接触测量方法的测量不确定度一般是 1 级渐开线样板齿廓形状公差的 2 倍以上,不满足 1 级渐开线样板的测量要求。

大连理工大学已初步掌握中、小基圆参数 1 级标准齿轮和 1 级精度渐开线样板的加工和测量能力^[12-15],而我国在修订齿轮渐开线样板国家标准 GB/T 6467-2010 时国内尚无小批量加工 1 级精度渐开线样板的能力,也没有检索到利用 1 级精度渐开线样板进行量值比对和量值传递的公开文献。为了能更精准地使用 1 级渐开线样板进行量值比对和量值传递,本文针对接触式测量分析了 1 级渐开线样板结构的特殊性以及测头半径对 1 级渐开线样板齿廓偏差测量的影响,并对 1 级渐开线样板的使用展开长度范围提出建议。

1 1 级渐开线样板的特殊性

1 级渐开线样板结构较为特殊,并不是按照同基圆参数标准齿轮的渐开线参数设计的。我国齿轮渐开线样板国家标准 GB/T 6467-2010 要求 1 级渐开线样板应从基圆开始给出测量齿廓,当基圆半径 $r_b \leq 60\ \text{mm}$ 时,渐开线样板需要从齿根部展开长度 $3\ \text{mm}$ 处开始计值,当基圆半径 $r_b > 60\ \text{mm}$ 时,需要从齿根部展开长度 $5\ \text{mm}$ 处开始计值^[1],并推荐了渐开线样板的最短展开长度 ρ_m 和最短计值长度 L_a ,如表 1 所示。

表 1 齿轮渐开线样板国家标准 GB/T 6467-2010 中推荐的 1 级渐开线样板的参数

Table 1 Parameters of class-1 gear involute artefact recommended in Chinese national standard gear involute artefact GB/T 6467-2010 (mm)

基圆半径 r_b	最短展开长度 ρ_m	计值范围	最短计值长度 L_a	齿根部 1 mm 内对应的弧长	齿顶部 1 mm 内对应的弧长	齿根部 5 mm 内对应的弧长 ($r_b \leq 60\ \text{mm}$ 时为 3 mm)	齿顶部 5 mm 内对应的弧长 ($r_b \leq 60\ \text{mm}$ 时为 3 mm)	齿面总弧长
25	20	3~17	14	0.020 0	0.780 0	0.180 0	2.220 0	8.000 0
50	38	3~35	32	0.010 0	0.750 0	0.090 0	2.1900	14.440 0
60	44	5~39	34	0.008 3	0.725 0	0.075 0	2.125 0	16.133 3
100	70	5~65	60	0.005 0	0.695 0	0.125 0	3.375 0	24.500 0
120	84	5~79	74	0.004 2	0.695 8	0.104 2	3.395 8	29.400 0
150	94	5~89	84	0.003 3	0.623 3	0.083 3	3.050 0	29.453 3
200	105	5~100	95	0.002 5	0.522 5	0.062 5	2.562 5	27.562 5
250	130	5~125	120	0.002 0	0.518 0	0.050 0	2.550 0	33.800 0
300	140	5~135	130	0.001 7	0.465 0	0.041 7	2.291 7	32.666 7
400	160	5~155	150	0.001 2	0.398 8	0.031 3	1.968 8	32.000 0

齿轮渐开线样板国家标准 GB/T 6467-2010 中要求 1 级渐开线样板的齿廓形状公差为 $1 \sim 2 \mu\text{m}$, 且齿根部、齿顶部展开长度 5 mm 范围内(当基圆半径 $r_b \leq 60 \text{ mm}$ 时为齿根部、齿顶部展开长度 3 mm 范围内), 即非计值范围内, 齿廓形状偏差的最大允许值不应大于计值范围内齿廓形状公差的 3 倍。而对 2 级渐开线样板, 齿轮渐开线样板国家标准 GB/T 6467-2010 没有计值范围的要求, 只有计值长度和齿廓形状公差的要求。

在平面直角坐标系下标准渐开线 (x_L, y_L) 为:

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

式中: r_b 为基圆半径; θ 为渐开线的展开角。

渐开线所对应的弧长 L_ρ 如下:

$$L_\rho = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sqrt{\left(\frac{dx_L}{d\theta}\right)^2 + \left(\frac{dy_L}{d\theta}\right)^2} d\theta = \int_{\theta_1}^{\theta_2} r_b \theta d\theta = \frac{r_b(\theta_2^2 - \theta_1^2)}{2} = \frac{\rho_2^2 - \rho_1^2}{2r_b} \quad (2)$$

式中: $\theta_1, \theta_2, \rho_1, \rho_2$ 为一段渐开线两点对应的展开角和展开长度, 且 $\rho_1 < \rho_2, \rho_1 = r_b \theta_1, \rho_2 = r_b \theta_2$ 。

齿根部和齿顶部非计值范围内的渐开线齿廓与计值范围内的渐开线齿廓的对比如图 1 和表 1 所示, 渐开线样板在展开长度 $0 \sim 1 \text{ mm}$ (齿根部 1 mm 内) 对应的弧长仅为微米量级, 特别是大基圆半径的渐开线样板, 当基圆半径 $r_b \geq 150 \text{ mm}$ 时, 渐开线在展开长度 $0 \sim 5 \text{ mm}$ (齿根部 5 mm 内) 对应的弧长也仅为几十微米, 这对该区域渐开线的加工和测量提出了非常高的要求。而渐开线在齿顶部 5 mm 内对应的弧长约为 $2 \sim 3 \text{ mm}$, 约占齿面总弧长的 10% (除基圆半径 $r_b = 25 \text{ mm}$ 的渐开线外), 且在齿顶部 1 mm 内对应的弧长仍约为 $0.4 \sim 0.8 \text{ mm}$, 依然长于渐开线在齿根部 5 mm 内对应的弧长。

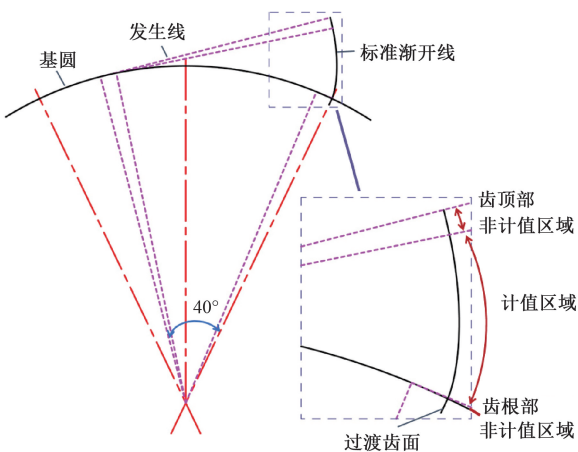


图 1 1 级渐开线样板结构示意图(基圆半径 $r_b = 100 \text{ mm}$)

Fig. 1 Schematic diagram for the structure of class-1 gear involute artefact (base radius $r_b = 100 \text{ mm}$)

通常在评价渐开线时, 测量数据点需要沿展开长度方向大致等距分布^[16], 这种特殊的展开长度与弧长的关系导致在接触式测量 1 级渐开线样板的实际齿廓时, 相同弧长下齿根部的测点密度将远高于齿中部和齿顶部, 在实际接触式测量时, 测头与被测渐开线的接触是两段曲线间的接触, 如图 2 所示, 受测头球径的限制和渐开线齿廓加工误差的干扰, 测头不易测得真实的齿廓偏差, 受限于齿根部渐开线齿廓的弧长, 同样齿廓偏差的局部高点区域在齿根部对测头的干扰造成的测量误差远大于齿中部和齿顶部, 所影响的展开长度范围也会远大于齿中部和齿顶部。

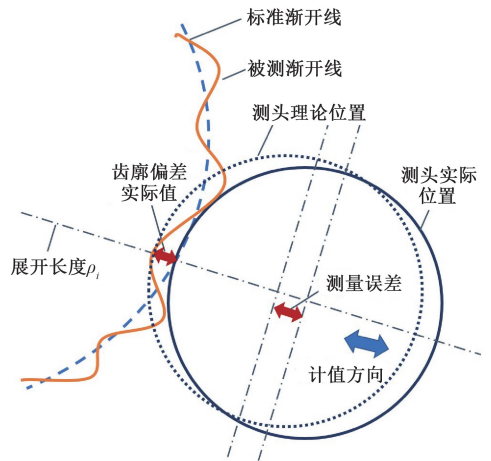


图 2 渐开线齿廓偏差的接触式测量

Fig. 2 Contact measurement of involute profile deviation

2 测头半径对齿廓偏差测量结果的影响

2.1 存在齿根展开角误差时测头半径对齿廓偏差测量结果的影响

齿轮渐开线样板国家标准 GB/T 6467-2010 中要求 1 级渐开线样板应从基圆开始给出测量齿廓, 为了获得基圆附近的渐开线, 避免出现加工后渐开线样板基圆附近无齿面的情况, 需要在基圆处渐开圆柱面设置一过渡齿面延伸至基圆内部, 如图 1 所示。该过渡齿面可以为平面也可以为二次曲面或其他类型的曲面。

渐开线在基圆处为一曲率为 0 的奇点, 加工过程中如果存在展开长度偏差, 在基圆附近容易出现加工根切或加工不完整的情况^[15]。在基圆附近的渐开线弧长较短, 一般仅为几十微米, 所以本文将基圆附近的渐开线齿面视为平面来分析基圆附近渐开线的齿廓偏差对测量结果的影响, 如图 3 所示。该近似平面与标准渐开线的交点所对应的展开角为齿根展开角误差 t , 存在加工误差的齿根部实际渐开线方程满足式(3)。

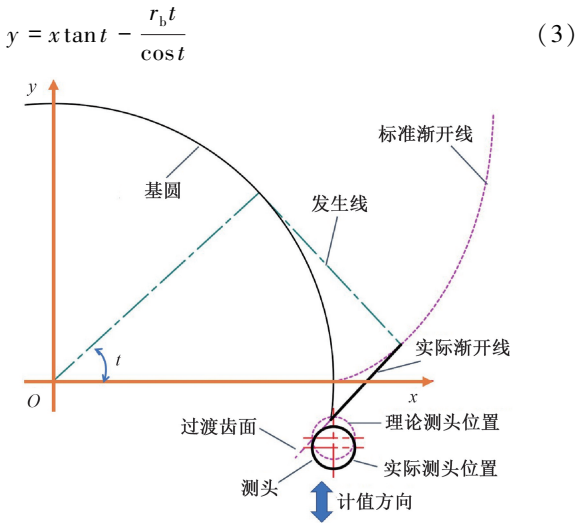


图3 存在齿根展开角误差时的渐开线测量

Fig. 3 Measurement for involute as the rolling angle error at the root of involute considered

在展开角 θ 处,测头圆心 $P(x_p, y_p)$ 在标准渐开线的发生线上:

$$y_p = -\frac{x_p}{\tan \theta} + \frac{r_b}{\sin \theta} \quad (4)$$

当齿根展开角误差 $t > 0$ 即齿根部加工不完整时,测头与实际渐开线和过渡齿面相切,测头半径 r_p 为:

$$|x_p \sin t - y_p \cos t - r_b t| = r_p \quad (5)$$

当齿根展开角误差 $t < 0$,即齿根部加工根切时,情况比较特殊,不能按测头与实际渐开线和过渡齿面相切计算测头位置,因为此时在测量基圆附近的渐开线齿廓时,可能出现测头始终与渐开线齿廓上同一个局部高点始终接触而附近低点域均无法被测量的情况,所以需按模拟测量的方法计算测头位置。

展开角 θ 处,标准渐开线的发生线与实际渐开线的交点 (x_s, y_s) 满足式(6)。

$$\begin{cases} x_s = \frac{r_b \cos t + r_b t \sin \theta}{\cos(t - \theta)} \\ y_s = \frac{r_b \sin t - r_b t \cos \theta}{\cos(t - \theta)} \end{cases} \quad (6)$$

假设展开角 θ 时测头圆心满足式(7)。

$$\begin{cases} x_p = x_s + r_p \sin \theta \\ y_p = y_s - r_p \cos \theta \end{cases} \quad (7)$$

如果此时存在实际渐开线上的点在测头内,则使测头沿发生线向远离实际渐开线方向运动 Δd ,一般可令 $\Delta d = 1 \times 10^{-6}$ 或 1×10^{-7} mm,即利用下式迭代直至测头内没有实际渐开线上的点:

$$\begin{cases} x_p = x_p + \Delta d \sin \theta \\ y_p = y_p - \Delta d \cos \theta \end{cases} \quad (8)$$

如果此时实际渐开线上的点均不在测头内,可使测头沿发生线向靠近实际渐开线方向运动 Δd ,当测头内出现第一个实际渐开线上的点时停止。该搜索过程可以通过二分法等方法加快搜索速度,本文不再讨论。

展开角 θ 处基圆上的点 (x_c, y_c) 满足式(9)。

$$\begin{cases} x_c = r_b \cos \theta \\ y_c = r_b \sin \theta \end{cases} \quad (9)$$

故存在齿根展开角误差 t 时,理论齿廓偏差 f_i 为:

$$f_i = \sqrt{(x_s - x_c)^2 + (y_s - y_c)^2} - \sqrt{(x_L - x_c)^2 + (y_L - y_c)^2} \quad (10)$$

实际测得的齿廓偏差 f_{is} 为:

$$f_{is} = \sqrt{(x_p - x_c)^2 + (y_p - y_c)^2} - \sqrt{(x_L - x_c)^2 + (y_L - y_c)^2} - r_p \quad (11)$$

齿轮渐开线样板检定规程 JJG 332-2003 中推荐渐开线样板的基圆半径 $r_b \leq 60$ mm 时,应用 $\phi 3$ mm 的测头检定渐开线样板;基圆半径 $r_b > 60$ mm 时,应用 $\phi 6$ mm 的测头检定渐开线样板^[5]。

当基圆半径 $r_b = 100$ mm 时,齿轮渐开线样板国家标准 GB/T 6467-2010 要求该规格的渐开线样板在展开长度 $\rho = 0 \sim 5$ mm 内的齿廓形状公差 $f_{\text{inv}} = 3 \mu\text{m}$ 。如图 4 所示,当齿根展开角误差 $t = 3^\circ$ 时,渐开线的齿廓偏差实际值满足该要求,但是因测头存在一定的体积,这会导致在测量被测齿廓时,齿廓偏差测量值大于齿廓偏差实际值,使得齿廓偏差测量值无法满足齿廓形状公差的要求,而且齿廓偏差测量值与齿廓偏差实际值的差异会随着测头的增大和展开长度的减小而增大,即测头越大、展开长度越靠近基圆,测头半径引入的测量误差越大。对于常用的毫米级球径的测头,在基圆附近的测量误差可以达到齿廓偏差的 50%~200%。

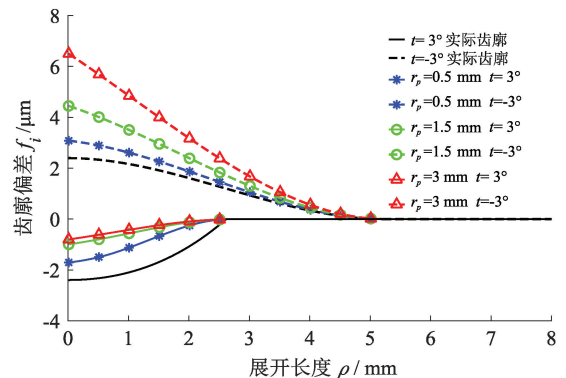


图4 渐开线存在齿根展开角误差时的测量结果

Fig. 4 Measurement results for involute as the rolling angle error at the root of involute considered

而当齿根展开角误差 $t = -3^\circ$ 时,在展开长度 $\rho = 0 \sim 2.5$ mm 的凹陷没有被完全测得,但不同球径测头的测量

差异小于齿根展开角误差 $t=3^\circ$ 时的情况,而且测量时不易受过渡齿面的干扰,所以在加工1级渐开线样板时,齿根部廓形偏向体内时更有利于渐开线样板的使用。

2.2 仅存在渐开线齿面加工误差时测头半径对齿廓偏差测量结果的影响

利用数值模拟的方法研究仅渐开线齿廓存在加工误差而没有过渡齿面干扰的情况。在标准渐开线上沿渐开线的法向叠加 $\omega=1, 5, 10 \text{ mm}^{-1}, A=0.02, 0.1, 0.3 \text{ }\mu\text{m}$ 的正弦波 Δf 模拟渐开线存在加工误差的情况,叠加正弦波参数参考国际量值比对时公开的高精度渐开线样板的齿廓偏差测量曲线,测量模拟渐开线的齿廓偏差如图5所示,模拟生成的渐开线齿廓形状偏差 $f_{i\alpha} \approx 1 \text{ }\mu\text{m}$, 曲线方程如下:

$$\Delta f = A \sin \omega \rho \quad (12)$$

在展开角 θ 处的模拟渐开线 (x_d, y_d) 满足式(13)。

$$\begin{cases} x_d = x_L + \Delta f \sin \theta \\ y_d = y_L - \Delta f \cos \theta \end{cases} \quad (13)$$

利用2.1节的模拟测量方法计算测头测得的齿廓偏差,每1mm展开长度取5个采样点^[16],图5为模拟测量结果,齿廓偏差模拟值与齿廓偏差测量值的差值为测量误差 Δf_i ,由图5可以看出,测量误差主要集中在齿根部。由图5(a)和(b)可以看出,当测头半径 $r_p=1.5$ 和3mm时,在展开长度 $\rho=0\sim 7$ mm内测头半径 $r_p=3$ mm时的测量误差略大于测头半径 $r_p=1.5$ mm时的测量误差 Δf_i ,而且在展开长度 $\rho>7$ mm时,测头半径 $r_p=1.5$ mm的测量误差会更快地衰减。

由图5(b)~(d)也可以看出,当测头半径相同时渐开线样板的基圆半径越大,测量误差的值和受影响的展开长度的范围越大,特别是大基圆半径的渐开线样板,图5(d)所示的基圆半径 $r_b=400$ mm的渐开线样板,在展开长度 $\rho=5$ mm处测量误差 $\Delta f_i>0.6 \text{ }\mu\text{m}$,已占模拟形状偏差的60%,且测量误差主要集中在齿根部展开长度10%的范围内。

虽然大半径测头的测量稳定性优于小半径测头,但是当测头半径过大时会导致齿面上的一些凹陷无法被测得,而且这种过滤作用并非是沿展开长度均匀分布的,而是更多地集中在齿根部。如式(2)和表1所示,展开角相同时,基圆半径越大该区域渐开线对应的弧长越短,这导致当齿面上存在局部高点时,在齿根部局部高点所影响的展开长度范围会远大于在齿顶部影响的展开长度范围,且基圆半径越大的渐开线越容易受影响。这会导致齿廓偏差的测量值和评价出的齿廓倾斜偏差、齿廓形状偏差无法反应渐开线的实际形貌。

以表1中计值范围评价模拟渐开线样板时,齿廓倾斜偏差 $f_{i\alpha}$ 测量值与实际值的差值约 $0.03 \text{ }\mu\text{m}$,但齿廓形状偏差 $f_{i\alpha}$ 的测量值与实际值的差值约 $0.2 \text{ }\mu\text{m}$,为1级标

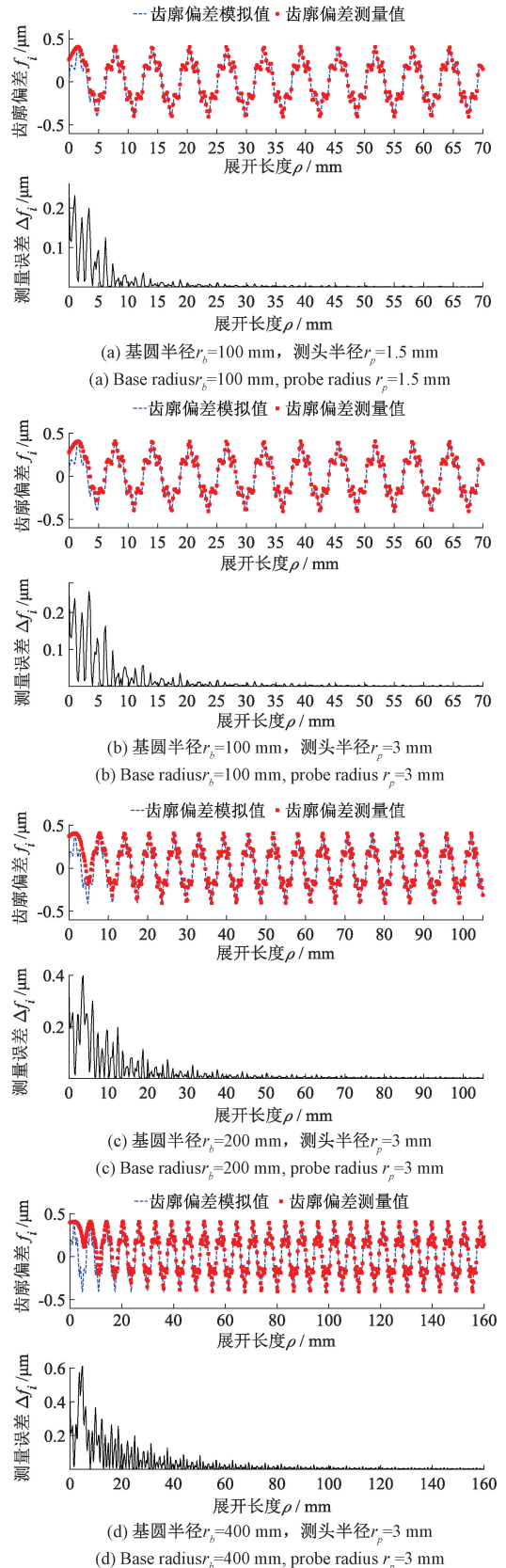


图5 模拟测量

Fig. 5 Simulation measurement

准齿轮齿廓偏差最大允许值的 20%。受限于渐开线样板的加工误差和仪器的测量精度,1 级渐开线样板基圆附近的齿廓很难准确测量,也不易通过测头半径修正测量结果,这导致利用渐开线样板修正仪器的示值误差时,会因为渐开线样板的齿根部较大的测量不确定度引入齿轮测量仪修正误差,这不利于通过高精度渐开线样板修正测量仪器的示值误差。

3 1 级渐开线样板的测量实验

对一件基圆半径 $r_b = 100$ mm、展开长度 $\rho = 0 \sim 86$ mm 的渐开线样板进行测量实验,测量在大连理工大学高精度齿轮研究室进行,测量仪器为双滚轮-导轨式渐开线测量仪,如图 6 所示,仪器的扩展不确定度 $U_{95} < \pm 0.33 \mu\text{m}$ 。

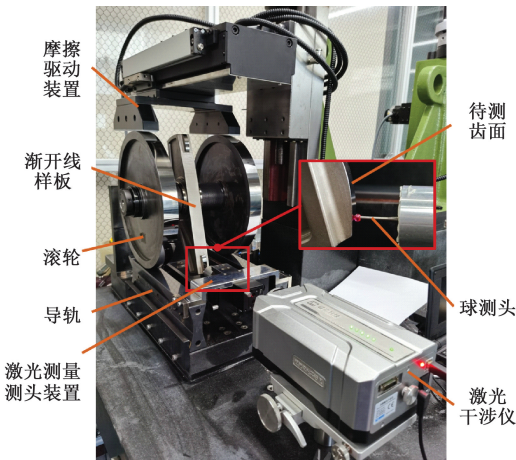


图 6 双滚轮-导轨式渐开线测量仪

Fig. 6 Double roller-guide involute measuring instrument

为了更明显地看出不同测头测量结果的差异,测量时所用测头半径 $r_p = 0.5$ 和 2.5 mm。为了减小随机误差等误差源对测量结果的影响,测量渐开线样板时,按从齿顶测量到齿根再从齿根测量到齿顶的次序测量 5 次被测齿廓,去除其中两组齿廓形状偏差的最大值和最小值数据后取平均值得到渐开线齿廓偏差的原始数据,评价齿廓倾斜偏差 $f_{H\alpha}$ 和齿廓形状偏差 $f_{I\alpha}$ 时,对原始数据进行 50% 传输特性的高斯低通滤波处理,滤波器截止波长 $\lambda_c = 1$ mm^[16]。实验室温度为 $20^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$,测量结果如图 7 所示,测量结果已修正齿廓倾斜偏差,高频分量 f_{β} 为滤波后的齿廓偏差与齿廓偏差原始值的差值。

齿根部和齿顶部的陡增和陡降是因为滤波时对原始数据两端进行了补零。在展开长度 $\rho = 50$ mm 附近均出现了突然增大的高频分量,这可能是齿面或滚轮上的微小凹陷引起的。

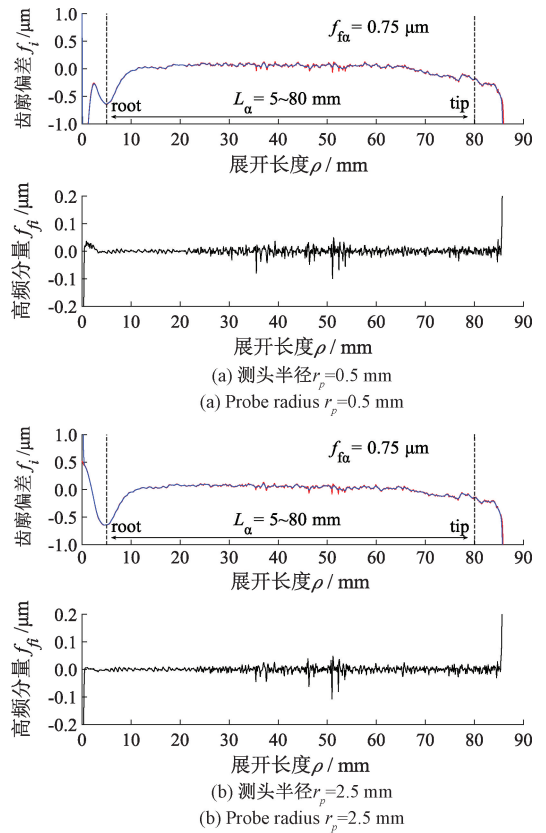


图 7 渐开线样板测量结果

Fig. 7 Measurement result of gear involute artefact

在展开长度 $\rho = 0 \sim 5$ mm,测头半径 $r_p = 2.5$ mm 时,测得的齿廓偏差较测头半径 $r_p = 0.5$ mm 时测得的齿廓偏差更偏向体外,这可能是因为齿根部存在齿根展开角误差,导致不同测头半径测得的齿廓偏差存在较大差异,与 2.1 节现象相同。

在齿根部展开长度 $\rho = 0 \sim 20$ mm,两种测头测得的齿廓偏差曲线的高频分量 f_{β} 均远小于齿中部和齿顶部,这可能是受测头半径的限制,测头不易测得渐开线齿廓齿根部的低点区域,导致图 6 中的齿廓偏差曲线在齿根部会更平滑,这与 2.2 节中齿根部的低点域不易被测得相似。

4 结 论

齿轮渐开线样板国家标准 GB/T 6467-2010 推荐 1 级渐开线样板应从基圆开始给出测量齿廓,从基圆开始的计值展开长度范围为 $3 \sim 5$ mm,对应渐开线弧长仅为 $0.03 \sim 0.18$ mm,使得 1 级渐开线样板齿根部的渐开线齿廓难以加工和测量,增大了 1 级渐开线样板的加工、测量和使用的不确定度。

当存在齿根展开角误差时,测头半径引入的测量误差会随着测头半径的增大而增大,并随着展开长度的减小而增大,在基圆附近的测量误差可以达到齿廓偏差的50%~200%;当仅存在渐开线齿面加工误差时,测头半径引入的测量误差和展开长度受影响的范围会随着测头半径的增大和被测渐开线基圆半径的增大而增大,在齿根部展开长度10%的范围内测量误差约齿廓偏差的10%~60%;通过测头半径 $r_p=0.5$ 和 2.5 mm的测头对同一齿轮渐开线样板进行了测量实验,在展开长度 $\rho=0\sim 5$ mm,可能由于齿根部存在齿根展开角误差,测头半径 $r_p=2.5$ mm时测得的齿廓偏差较测头半径 $r_p=0.5$ mm时测得的齿廓偏差更偏向体外;受限于测头半径和局部高点域的干扰,测头不易测得渐开线齿根部的低点区域,在齿根部展开长度 $\rho=0\sim 20$ mm,两种测头测得的齿廓偏差曲线的高频分量 f_{fi} 均远小于齿中部和齿顶部。

为了能更好发挥1级渐开线样板的量值精准传递作用,减少测头半径引入测量误差对渐开线齿廓偏差评价的影响,1级渐开线样板在进行量值比对和量值传递时应统一测头半径,且利用1级渐开线样板进行渐开线测量仪器的修正时最好避开齿根部展开长度10%的范围。1级渐开线样板在测量和使用时可以不对1级渐开线样板非计值区间的齿廓形状偏差做出要求,而且不需要在齿根部和齿顶部设置相同展开长度的非计值范围。因此,1级渐开线样板测量时,以某一弧长(如 0.2 mm)长度作为齿根和齿顶非计值范围较为合理。

参考文献

- [1] GB/T 6467-2010 齿轮渐开线样板[S]. 北京:中国标准出版社,2010:1,3-4.
GB/T 6467-2010 The involute artifact[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010:1,3-4.
- [2] FRAZER R C, BICKER R, COX B, et al. An international comparison of involute gear profile and helix measurement[J]. Metrologia, 2004, 41(1): 12-16.
- [3] KNIEL K, WEDMANN A, STEIN M, et al. COOMET supplementary comparison L-S18 (project: 673/UA-a/15)[J]. Metrologia, 2018, 55(1A): 4008.
- [4] 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,2008:12.
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, 2008:12.
- [5] 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.
- [6] 赵柏涵,高峰,李艳,等. 渐开线齿形磨削精度的在机测量方法研究[J]. 仪器仪表学报,2018,39(6): 48-55.
ZHAO B H, GAO F, LI Y, et al. Research on on-machine measurement for grinding accuracy of involute profile[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(6): 48-55.
- [7] 孔盛杰,黄翔,周崩,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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] GUO X Z, SHI Z Y, YU B, et al. 3D measurement of gears based on a line structured light sensor[J]. Precision Engineering, 2020, 61: 160-169.
- [11] TANG J, JIA J Q, FANG Z Q, et al. Development of a gear measuring device using DFRP method[J]. Precision Engineering, 2016, 45: 153-159.
- [12] 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 ultra-precision involute tooth profile [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14 (6): 980-985.

- [13] 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.

- [14] 凌四营, 娄志峰, 王立鼎, 等. 高等级渐开线样板精密磨削实验研究 [J]. 大连理工大学学报, 2013, 53(4): 508-513.

LING S Y, LOU ZH F, WANG L D, et al. Experimental study on precision grinding of high grade gear involute artefact [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2013, 53(4): 508-513.

- [15] 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.

LOU 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.

- [16] 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.

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. 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, M. Sc. degree from Shandong University of Technology in 2007, and Ph. D. degree from Dalian University of Technology in 2011. He is currently an associate professor and M. Sc. advisor at Dalian University of Technology. His main research interests include precision and ultraprecision machining, precision mechanical design, precision gear grinding and testing technology.