

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108543

虑及计值范围的 1 级齿轮渐开线样板精密成型*

凌 明¹, 凌四营^{1,2}, 刘祥生¹, 杨 洋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: 齿轮渐开线样板是渐开线齿轮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,但是目前国内外没有满足我国齿轮渐开线样板国家标准 GB/T 6467-2010 要求的 1 级齿轮渐开线样板。1 级齿轮渐开线样板对计值范围和齿廓形状偏差要求极为严格,齿根部非计值范围内的齿面弧长仅 0.1 mm 左右,极易受加工误差影响,导致齿根部加工根切或加工不完整,使齿轮渐开线样板的齿根部齿廓形状偏差超差。本文建立了起始展开角误差与齿轮渐开线样板齿根部齿廓偏差映射关系的数学模型,分析了齿根部齿廓形状偏差超差的原因,通过 Siemens NX 运动仿真和 CAD 仿真对模型进行了验证,并提出一种渐次加工的齿轮渐开线样板齿根部工艺,利用该工艺对一件具有 3 种基圆参数的新型齿轮渐开线样板进行了磨削实验,4 个齿面均满足在计值范围内齿廓形状偏差 $f_{ia} < 1 \mu\text{m}$,满足我国齿轮渐开线样板国家标准 GB/T 6467-2010 对 1 级齿轮渐开线样板计值范围和齿廓形状偏差的要求,研究成果为 1 级齿轮渐开线样板的精密制造提供了工艺方法的支持。

关键词: 齿轮渐开线样板;渐开线齿廓偏差;磨齿工艺;精密加工

中图分类号: TH161 TG616 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Precision forming for class-1 gear involute artefact considering the evaluation range

Ling Ming¹, Ling Siying^{1,2}, Liu Xiangsheng¹, Yang Yang¹, 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 gear involute artefact (GIA) is the benchmark for the trace of involute gear profile deviation and the value-transmission of involute profile. It is the standard for calibrating the instruments for measuring gear involute profile. However, there is no class-1 GIA that can meet Chinese national standard of GIA GB/T 6467-2010 at present. Requirements of the evaluation range and profile form deviation of class-1 GIA are extremely strict. The arc length within the non-evaluation range of the tooth root is only about 0.1 mm, which is easy to be affected by the machining error. It may result in undercutting or incomplete machining of the tooth root. Then, the tolerance of profile form deviation is exceeded. In this article, the mathematical model of the relationship between the initial rolling angle error and the involute profile deviation at the tooth root is formulated. The reason for the out of tolerance of the profile form deviation at the tooth root is analyzed, and the model is verified by the Siemens NX motion simulation and CAD simulation. Based on the above model, a machining method for tooth root at GIA with gradually modified is proposed, and a new kind of GIA with three base circle parameters is processed by the proposed method. The profile form deviations $f_{ia} < 1 \mu\text{m}$ within the evaluation range of four teeth are processed, which meets the requirements of Chinese national standard of GIA GB/T 6467-2010 for the evaluation range and the profile form deviation of class-1 GIA. This research provides a process method support for the precision manufacturing of class-1 GIA.

Keywords: gear involute artefact; profile form deviation; gear grinding; precision machining

收稿日期: 2021-09-08 Received Date: 2021-09-08

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

0 引 言

齿轮是量大面广的关键机械基础件,用来传递空间任意两轴间运动和动力,具有传动效率高、传动比精确等优点。而渐开线齿轮是一种应用最为广泛的齿轮,具有良好的传动性能,且便于制造、安装、测量和标准化。

齿轮渐开线样板(gear involute artefact, GIA),(下文简称渐开线样板)是渐开线齿轮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],渐开线样板以其工作面上的渐开线与仪器形成的渐开线进行比较来确定仪器的示值误差。使用坐标测量机测量产品齿轮渐开线参数时,也应使用渐开线样板校准其示值^[2]。

目前,国内对渐开线齿廓偏差测量的研究较多,林家春等^[3]提出一种基于粗糙度轮廓仪的圆柱齿轮齿廓形状偏差测量方法,朱志强等^[4]提出一种齿轮测量中心 ZC 蜗杆齿廓偏差测量方法,韩江等^[5]提出一种非圆齿轮齿廓特性分析及偏差测量方法。但是国内对传递渐开线量值的 1 级渐开线样板的研究较少,根据我国国家计量科学数据中心的公开资料显示,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和二、三级标准齿轮,大连理工大学^[6-7]加工出齿廓形状偏差 $f_{ia} < 1 \mu\text{m}$ 的齿轮渐开线样板和渐开线凸轮,但是计值范围不满足我国齿轮渐开线样板国家标准 GB/T 6467-2010 对 1 级渐开线样板的要求。

国外没有独立的渐开线样板的标准,对渐开线样板的研究多参照 ISO 1328-1:2013(E) 和各国独立的齿轮标准,德国联邦物理技术研究院(Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB)和日本国家计量研究所(National Metrology Institute of Japan, NMIJ)^[8-9]使用的中等规格齿轮的渐开线齿廓形状偏差约 $0.5 \mu\text{m}$,但这些齿轮与同规格的渐开线样板相比展开长度较短(所用齿轮的计值展开长度不长于 30 mm)。鉴于标准齿轮和渐开线样板的加工难度,日本的京都大学^[10]也开发出双球样板(double ball artefact, DBA),利用圆弧补偿模拟渐开线来标定渐开线测量仪器,但是其展开长度较短、基圆较小,而且零部件间通过螺栓连接,不利于渐开线量值的比对和稳定传递。

为研制满足我国齿轮渐开线样板国家标准 GB/T 6467-2010 要求的 1 级渐开线样板,本文建立了起始展开角误差与渐开线样板齿根部齿廓偏差的数学模型,分析了齿根部齿廓形状偏差超差的原因,通过 Siemens NX 运动仿真和 CAD 仿真对模型进行了验证,并提出一种渐次加工的齿轮渐开线样板齿根部工艺,利用该工艺对一

件具有 3 种基圆参数的新型渐开线样板进行了精密磨削实验,4 个齿面均满足在计值范围内齿廓形状偏差 $f_{ia} < 1 \mu\text{m}$,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的要求,研究成果为 1 级渐开线样板的精密制造提供了工艺方法的支持。

1 齿轮渐开线样板基本特性

我国齿轮渐开线样板国家标准 GB/T 6467-2010 将渐开线样板划分为 1 级和 2 级两个等级,当基圆半径 $r_b \leq 60 \text{ mm}$ 时,1 级渐开线样板需要从齿根部展开长度 3 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 mm 处开始计值^[1],1 级渐开线样板的齿廓形状偏差最大允许值仅为 $1 \sim 2 \mu\text{m}$,具体要求如表 1 所示。

表 1 同基圆参数下 1 级渐开线样板(表中简称为样板)和 1 级标准齿轮(表中简称为齿轮)的对比,比值为样板参数/齿轮参数

Table 1 Comparison of class-1 GIA and class-1 gear artefact with the same base circles, and the ratio referring to the parameters of GIA/parameters of gear artefact

基圆 半径 r_b/mm	项目	起始计值 展开长度 $\rho_{\alpha\text{Start}}/\text{mm}$	计值展开 长度 L_{α}/mm	齿廓形状 偏差最大 允许值 $f_{iaT}/\mu\text{m}$	单位展开长 度齿廓形状 偏差最大允 许值 $f_{iaT}/$ $L_{\alpha} \times 10^{-6}$
50	样板	3	32	1.0	31
	齿轮	7	19	1.8	95
	比值/%	43	168	56	33
100	样板	5	60	1.0	17
	齿轮	19	30	2.1	70
	比值/%	26	200	48	24
150	样板	5	84	1.4	17
	齿轮	31	40	2.4	60
	比值/%	16	210	58	28
200	样板	5	95	1.4	15
	齿轮	44	50	2.6	52
	比值/%	11	190	54	29

1 级渐开线样板与同基圆参数 1 级标准齿轮相比,渐开线样板的计值长度比标准齿轮长 $1.5 \sim 2$ 倍,起始计值展开长度仅为标准齿轮的 $1/10 \sim 1/2$,但齿廓形状偏差最大允许值却收紧 40% 左右,渐开线样板的单位展开长

度的齿廓形状偏差最大允许值仅为标准齿轮的 $1/3$ 左右, 而且随着基圆半径的增大, 对渐开线样板的精度要求比标准齿轮愈发严格, 详细的数据如表 1 所示, 其中 1 级渐开线样板的参数为我国齿轮渐开线样板国家标准 GB/T 6467-2010 中所列出的基本参数, 1 级标准齿轮的参数依据 ISO 1328-1: 2013(E) [11] 计算。由此可见, 对渐开线齿廓而言, 1 级渐开线样板的加工难度远大于同基圆参数的 1 级标准齿轮。

而对渐开线样板自身而言, 1 级渐开线样板齿根部的加工难度远大于齿顶部。如表 2 所示, 虽然 1 级渐开线样板齿根部和齿顶部非计值范围的展开长度各占计值展开长度约 $5\% \sim 10\%$, 但是齿根部单位展长对应的齿面弧长远小于齿顶部, 齿顶部非计值范围内的齿面弧长为 $2 \sim 3$ mm, 约占齿面总弧长的 10% , 齿根部非计值范围内的齿面弧长仅在 0.1 mm 左右, 占齿面总弧长的 1% 。考虑到齿面边缘在加工过程中容易有塌边、根切、加工不完整等加工误差, 而齿根部的起始计值位置离齿面边缘仅 0.1 mm 左右, 所以齿根部的渐开线齿廓形状偏差极易超差, 很难加工出满足计值范围要求的 1 级渐开线样板。

表 2 渐开线样板齿面对应的弧长

Table 2 The corresponding arc length to tooth of GIA

基圆半径 r_b /mm	齿面总弧 长/mm	齿根部非计值范围 内齿面弧长/mm (占齿面总弧长/%)	齿顶部非计值范围 内齿面弧长/mm (占齿面总弧长/%)
50	14.44	0.09(0.62)	2.19(15.17)
100	24.50	0.12(0.49)	3.38(13.80)
150	29.45	0.08(0.27)	3.05(10.36)
200	27.56	0.06(0.22)	2.56(9.29)

2 齿轮渐开线样板精密加工方法

平面沿着一个固定的圆柱(基圆柱)作纯滚动时, 该平面上一条定直线(发生线)所展成的轨迹称为圆柱的渐开线齿面, 渐开线齿面被垂直于基圆柱轴线的平面所截的曲线称为渐开线齿廓, 这也就是渐开线的生成原理[1]。

利用基于渐开线生成原理的机械展成法和电子展成法可以实现高精度的渐开线加工和测量。机械展成法是通过特殊的机械结构实现渐开线的展成, 常见的如滚轮-钢带式、渐开线凸轮-挡板式、滚轮-导轨式机械展成机构; 电子展成法是通过高精度转台和导轨配合光学测量方法将展成运动分解成转动和平动, 取代机械展成机构, 后来也发展出通过电子展成修整砂轮, 利用修整出渐开线的砂轮直接磨削齿轮的成型法加工。关于各种方法所能达到的精度及比较已有文章分析, 本文不再赘述。

基于纯滚动展成原理的滚轮-导轨式机械展成机构广泛应用于高精度渐开线测试系统中, 也是目前能检索到的加工和测量渐开线精度最高的方法之一。基于纯滚动展成原理的滚轮-导轨式机械展成机构加工渐开线的原理如图 1 所示, 滚轮半径与基圆半径一致, 滚轮在导轨上做纯滚动时, 标准渐开线与发生线(导轨)的交点 P 位置不发生改变, 所以可以在 P 点布置一刀具, 在磨削时通常为杯型或蝶形砂轮, 实现渐开线的加工。在 P 点布置一测头即可实现渐开线的测量。该类型的展成机构符合渐开线生成原理, 没有原理性误差, 且机构简单, 渐开线一次成型, 误差来源少。大连理工大学[6-7]应用此方法加工出的渐开线凸轮和样板齿廓形状偏差 $f_{\alpha} < 1 \mu\text{m}$ 。PTB、NMIJ、大连理工大学[8-9, 12-13]也均采用此方法测量渐开线的齿廓偏差。

综上所述, 基于纯滚动展成原理的滚轮-导轨式机械展成机构可以用来加工高精度的渐开线齿廓, 但是 1 级渐开线样板需要从基圆处给出测量齿廓, 且对计值范围和齿廓形状偏差要求严格, 而渐开线样板齿根部易受加工塌边、纯滚动往复运动惯性、起始展开角误差等多种因素影响, 容易导致齿根部渐开线齿廓加工根切或加工不完整, 造成齿廓形状偏差超差, 加工出的样板很难满足我国齿轮渐开线样板国家标准 GB/T 6467-2010 对 1 级样板的要求。所以本文选择基于纯滚动展成原理的双滚轮-导轨式齿轮渐开线样板磨削装置加工渐开线样板, 但仍需对渐开线样板齿根部齿廓形状偏差误差规律和加工工艺进行研究。

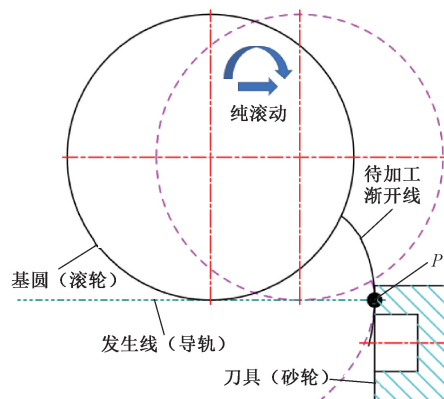


图 1 基于纯滚动展成的渐开线加工原理

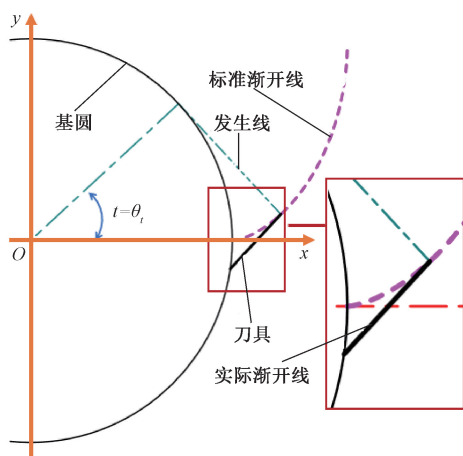
Fig. 1 Principle of involute machining with the rolling method

3 齿根部渐开线齿廓偏差分析

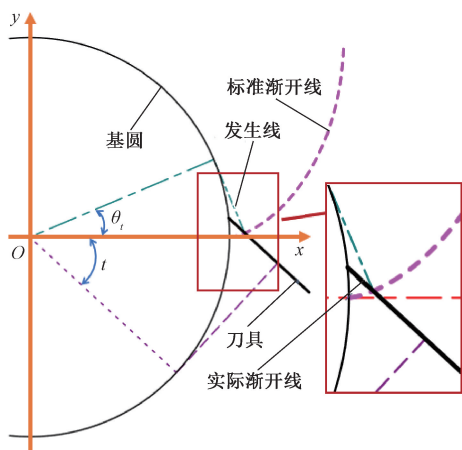
3.1 起始展开角误差对齿根部渐开线廓形的影响

本文在利用双滚轮-导轨式齿轮渐开线样板磨削装置加工渐开线样板的过程中发现, 起始展开角误差会造成渐开线样板齿根部渐开线齿廓加工根切或加工不完

整。以从渐开线样板的齿顶开始进入磨削为例,分析渐开线样板的纯滚动展成磨削过程。当滚轮在导轨上滚动时,如果起始展开角误差 $t > 0$,如图 2(a) 所示,此时齿根部的渐开线齿廓加工不完整,造成齿根部渐开线偏向体外,而且纯滚动磨削过程一般往复进行,该误差在磨削过程中会不断累积,导致齿根部的齿廓形状偏差远大于齿廓形状偏差最大允许值。当起始展开角误差 $t < 0$,如图 2(b) 所示,砂轮会与已加工好的渐开线齿面发生干涉,出现加工根切。



(a) 起始展开角误差 $t > 0$, 渐开线加工不完整
(a) Initial rolling angle error $t > 0$, and the incomplete involute machining



(b) 起始展开角误差 $t < 0$, 渐开线加工根切
(b) Initial rolling angle error $t < 0$, and the undercutting involute

图 2 存在起始展开角误差时刀具对渐开线廓形的影响

Fig. 2 The influence of cutter on involute profile in the presence of rolling angle error

如图 2 所示,以基圆的圆心为原点 O ,以基圆处渐开线的起始点和基圆圆心的连线为 x 轴,建立平面直角坐标系,基圆半径为 r_b ,渐开线展开角为 θ ,渐开线起始展开角误差为 t 。理论纯滚动展成运动的展开角范围为

$0 \sim \theta_\alpha$,实际纯滚动展成运动的展开角范围为 $t \sim \theta_\alpha$ 。

在该坐标系下标准渐开线坐标 (x_L, y_L) 为:

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

当起始展开角误差为 t 时,存在加工误差的齿根部实际渐开线坐标 (x, y) 满足:

$$y = x \tan t - \frac{r_b t}{\cos t} \quad (2)$$

标准渐开线的发生线满足:

$$y_L = -\frac{x_L}{\tan \theta} + \frac{r_b}{\sin \theta} \quad (3)$$

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:

$$\begin{cases} x_s = \frac{r_b \cos t + r_b t \sin \theta}{\cos(t - \theta)} \\ y_s = \frac{r_b \sin t - r_b t \cos \theta}{\cos(t - \theta)} \end{cases} \quad (4)$$

展开角 θ 处基圆上的点 (x_c, y_c) 满足:

$$\begin{cases} x_c = r_b \cos \theta \\ y_c = r_b \sin \theta \end{cases} \quad (5)$$

故存在起始展开角误差 t 时,实际渐开线偏离理论渐开线的程度即齿廓偏差 f_i 满足:

$$f_i = \sqrt{(x_s - x_c)^2 + (y_s - y_c)^2} - \sqrt{(x_L - x_c)^2 + (y_L - y_c)^2} \quad (6)$$

基圆处的齿廓偏差 f_{i0} 满足:

$$f_{i0} = r_b \tan t - \frac{r_b t}{\cos t} \quad (7)$$

理论上当起始展开角误差 $t = 0$ 时,加工出的是标准渐开线。当起始展开角误差 $t > 0$ 时,如图 2(a) 所示,展开角 $0 \sim \theta_i$ 范围内的齿廓未被加工,其中渐开线受影响展开角 $\theta_i = t$ 。当起始展开角误差 $t < 0$ 时,如图 2(b) 所示,展开角 $0 \sim \theta_i$ 范围内的齿廓发生根切,其中渐开线受影响展开角 θ_i 满足:

$$\sin(t - \theta_i) + \theta_i \cos(t - \theta_i) = t \quad (8)$$

从图 3(a) 和 4 可以看到,当起始展开角误差 t 的绝对值相同时,起始展开角误差 t 对基圆处齿廓偏差 f_{i0} 的影响是大小相同方向相反的。而当起始展开角误差 $t > 0$ 时,渐开线受影响展开角 θ_i 与展开角误差 t 相同,起始展开角误差 $t < 0$ 时,渐开线受影响展开角 θ_i 约是起始展开角误差绝对值 $|t|$ 的 1/2,且渐开线受影响展开角 θ_i 只与与展开角误差 t 有关,与基圆半径 r_b 无关,即渐开线受影响展开角 θ_i 满足:

$$\theta_i = \begin{cases} t, & t > 0 \\ -\frac{t}{2}, & t < 0 \end{cases} \quad (9)$$

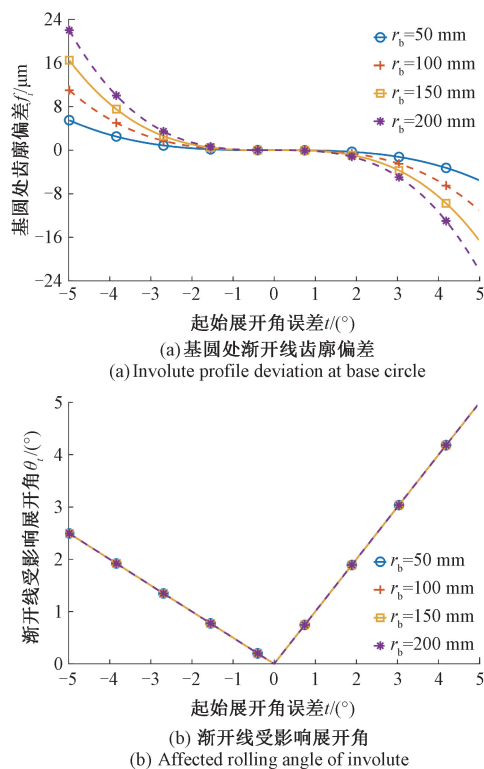
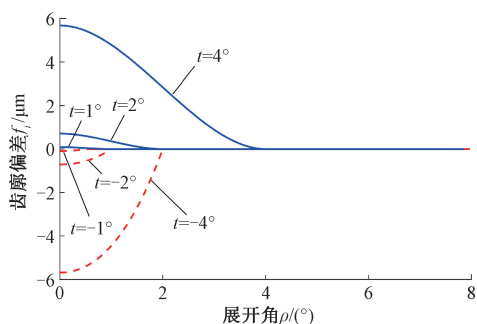


图 3 起始展开角误差对渐开线廓形的影响

Fig. 3 Influence of start rolling angle error on involute profile

图 4 存在起始展开角误差时加工出的渐开线廓形
(基圆半径 $r_b = 100$ mm)Fig. 4 Involute profile machined with start rolling angle error (radius of base circle $r_b = 100$ mm)

样板的起始计值展开角 $\theta_{\alpha\text{Start}}$ 满足:

$$\theta_{\alpha\text{Start}} = \frac{180\rho_{\alpha\text{Start}}}{\pi r_b} \quad (10)$$

式中: $\rho_{\alpha\text{Start}}$ 为起始计值展开长度, 当基圆半径 $r_b \leq 60$ mm 时, 起始计值展开长度 $\rho_{\alpha\text{Start}} = 3$ mm, 当基圆半径 $r_b > 60$ mm 时, 起始计值展开长度 $\rho_{\alpha\text{Start}} = 5$ mm。

几种基圆参数的渐开线样板起始计值展开角 $\theta_{\alpha\text{Start}}$ 如表 3 所示, 可以看到随着基圆半径 r_b 的增大, 起始计值展开角 $\theta_{\alpha\text{Start}}$ 随之减小, 而且从图 3(a) 也可以看到, 起始展开角误差 t 相同时, 基圆半径 r_b 越大, 基圆处齿廓偏差

f_{i0} 受影响越大, 所以大基圆半径的样板在加工过程中更需要控制起始展开角误差。为了保证齿根部计值范围内齿廓形状偏差超差, 需要使起始展开角误差至少满足 $-2\theta_{\alpha\text{Start}} < t < \theta_{\alpha\text{Start}}$ 。

表 3 几种基圆参数的样板起始计值展开角

Table 3 The initial evaluation rolling angle of GIA with several base circle parameters

基圆半径 r_b/mm	展开角 $\theta/(\circ)$	起始计值展开角 $\theta_{\alpha\text{Start}}/(\circ)$
50	44	3.44
100	40	2.86
150	36	1.91
200	30	1.43

通过双滚轮-导轨式齿轮渐开线样板磨削装置加工样板时, 以基圆半径 $r_b = 100$ mm 为例, 当起始展开角误差 $t = -5^\circ$, 砂轮边缘在发生线上 0.1 mm 时砂轮边缘才会与齿面发生干涉, 一般起始展开角误差 $|t| \geq 5^\circ$, 且砂轮在发生线上下 1~2 mm 区域内均存在工作面, 所以只需要考虑砂轮工作面与渐开线齿廓发生干涉, 而不需考虑砂轮边缘与渐开线齿廓发生干涉的情况。

3.2 仿真验证

利用 Siemens NX 的运动仿真功能, 模拟展成加工过程, 运动仿真模型如图 5 所示, Siemens NX 建模精度为 1×10^{-5} mm, 导出精度为 2×10^{-5} mm, 运动仿真结果与数学模型计算结果的比较如图 6 所示。利用 CAD 软件对该数学模型进行测量验证, CAD 建模精度为 0.001 mm。表 4 为渐开线起始展开角误差 t 与对应的基圆处齿廓偏差 f_{i0} 。表 5 为渐开线起始展开角误差 t 与对应的渐开线受影响展开角 θ_i 。为了使建模精度不干扰仿真结果, 选择起始展开角误差 $t = \pm 5^\circ$ 和 $\pm 10^\circ$ 进行仿真验证, 渐开线基圆半径 $r_b = 100$ mm。从图 6、表 4 和 5 中可以看出, 数学模型与运动仿真和测量仿真基本吻合, 差异可能由 CAD 软件建模精度引起。

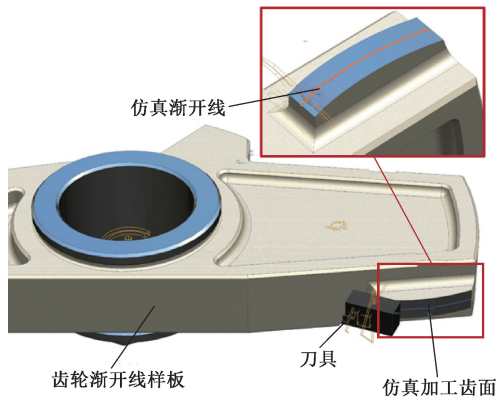


图 5 运动仿真模型

Fig. 5 Motion simulation model

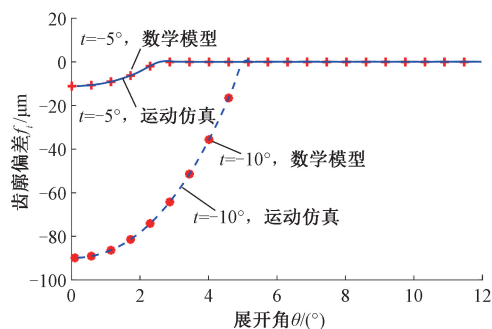


图6 运动仿真与数学模型比较

Fig. 6 Comparison between the motion simulation and the mathematical model

表4 起始展开角误差 t 与基圆处齿廓偏差 f_{i0}
Table 4 The initial rolling angle error t and tooth profile deviation at base circle f_{i0}

起始展开角 误差 $t/(^{\circ})$	基圆处齿廓偏差 f_{i0}/mm		差值的绝对值/ nm
	数学模型	测量仿真	
-10	-0.089 840	-0.089 847	7
-5	-0.011 114	-0.011 114	0
5	0.011 114	0.011 114	0
10	0.089 840	0.089 847	7

表5 起始展开角误差 t 与渐开线受影响展开角 θ_i
Table 5 The initial rolling angle error t and affected rolling angle of involute θ_i ($^{\circ}$)

起始展开角 误差 t	渐开线受影响展开角 θ_i		差值的绝对值
	数学模型	测量仿真	
-10	5.017 220	5.017 155	0.000 065
-5	2.502 164	2.509 835	0.007 671
5	4.999 973	5.017 778	0.017 805
10	10.000 062	9.974 575	0.025 487

4 1级渐开线样板的精密加工

4.1 渐次加工的渐开线样板齿根部工艺

考虑到渐开线样板毛坯存在制造误差,为了使精加工后的渐开线样板能从基圆开始给出测量齿廓,避免渐开线样板毛坯加工时在要求的计值范围内无渐开线齿廓,1级渐开线样板一般需在齿根部设一过渡齿面,如图7所示,该过渡齿面的截面为基圆处渐开线起点与渐开线样板内孔圆心的连线。

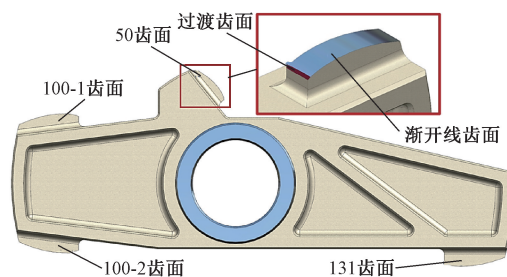


图7 具有3种基圆参数的齿轮渐开线样板

Fig. 7 GIA with three base circle parameters

虽然从上一章的分析中可知,理论上通过控制起始展开角误差可以使计值范围内的渐开线不受起始展开角误差的影响。但在渐开线样板的实际加工过程中发现,因为渐开线样板毛坯自身结构和制造误差等原因,很难准确测量待加工齿面的真实展开角,而且当起始展开角误差 $t > 0$ 时,齿根部加工不完整会造成误差累积,使齿根部的渐开线大幅度偏向体外,齿廓形状偏差远大于最大允许值,不易准确测量齿根部的齿廓偏差,不利于渐开线样板的使用;当起始展开角误差 $t < 0$ 时,参与磨削的砂轮工作面与齿面的交线不在发生线平面内,该处的砂轮没有参与其他位置的渐开线的磨削,磨损量较小,砂轮较锋利,如图8所示,在发生根切时的磨削量容易大于预测值,甚至造成烧伤。当起始展开角误差 $t = 0$ 时,综合加工塌边、滚动组件在往复滚动时的惯性、砂轮在齿根部相对磨削时间远长于其他部分等因素,此时,齿根部的渐开线齿廓仍易偏向体内。所以仍需要在控制起始展开角误差的基础上提出一种渐开线样板齿根部渐开线齿廓的加工工艺。

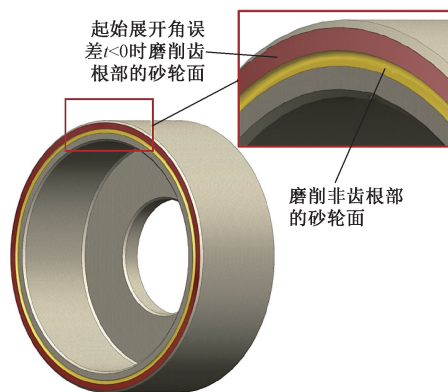


图8 砂轮工作面示意图

Fig. 8 Diagram of working face of grinding wheel

为加工出满足我国齿轮渐开线样板国家标准 GB/T 6467-2010 要求的1级渐开线样板,避免过渡齿面和齿根部误差累积,在半精磨阶段,先按起始展开角误差 $t = -2^{\circ}$ 进行加工,确保过渡齿面和齿根部可以被完整加

工。在精磨阶段,按起始展开角误差 $t = -1^\circ, 0, 0.5^\circ$ 依次修正起始展开角误差,每次修正后,按总进刀量 $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$ 、单次进刀量 $0.1 \sim 0.3 \mu\text{m}$ 精磨,精磨后在双滚轮-导轨式渐开线测量装置上测量待加工齿面的齿廓偏差。如果计值范围和计值范围内齿廓形状偏差均满足我国齿轮渐开线样板国家标准 GB/T 6467-2010 对 1 级渐开线样板的要求,则结束加工。如果不满足要求,则根据齿根部的渐开线廓形修正起始展开角误差,考虑到加工误差,在修正时主要以上一章的模型考虑渐开线展开角受影响展开角 θ_i ,齿廓偏差作为参考依据,当齿根部齿廓偏向体内时,使起始渐开线展开角误差 $t = 0^\circ \sim 0.5^\circ$,总进刀量 $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$ 精磨,当齿根部齿廓偏向体外时,使起始渐开线展开角误差 $t = -1^\circ \sim -0.5^\circ$,总进刀量 $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$ 精磨,精磨后再次测量,如果满足要求则结束加工,如果不满足要求则重复上述过程,流程图如图 9 所示。

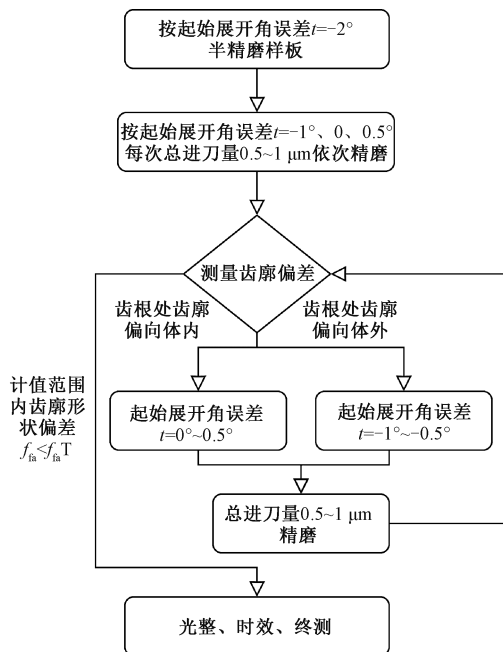


图 9 渐开线样板加工流程

Fig. 9 Flow of GIA processing

精磨后对渐开线样板进行光整加工以降低齿面的表面粗糙度。终测前,应对渐开线样板进行 16 h 以上的时效处理,并在实验室静置 24 h 以上,再对渐开线样板中截面处的渐开线齿廓进行测量。以上步骤在终测前,均不拆卸滚动组件,不改变滚动组件各部件间的位置。

4.2 渐开线样板的精密加工

选择一件具有 3 种基圆参数的新型渐开线样板^[14]进行加工实验,渐开线样板如图 7 所示,该渐开线样板具有 4 个齿面,其中,50 齿面设计基圆半径 $r_b = 50 \text{ mm}$ 、设计展开长度 $\rho = 49 \text{ mm}$;100-1 齿面和 100-2 齿面为同一基

圆半径的左、右齿面,设计基圆半径 $r_b = 100 \text{ mm}$ 、设计展开长度 $\rho = 83 \text{ mm}$;131 齿面设计基圆半径 $r_b = 131 \text{ mm}$ 的齿面,设计展开长度 $\rho = 95 \text{ mm}$;该渐开线样板的质心位于渐开线样板的内孔中心轴线上,3 种渐开线齿廓的基圆圆心和渐开线样板的质心重合,该渐开线样板的设计参数和结构均满足我国齿轮渐开线样板国家标准 GB/T 6467-2010 对 1 级渐开线样板的要求,基本参数如表 6 所示。

表 6 具有 3 种基圆参数的齿轮渐开线样板的基本参数及齿廓形状偏差

Table 6 Parameters and profile form deviations of GIA with three base circle parameters

齿面	设计基圆半径 r_b/mm	设计展开长度 ρ/mm	计值范围 L_a/mm	计值范围内的齿廓形状偏差 $f_{ia}/\mu\text{m}$	国家标准推荐展开长度/ mm	1 级精度的齿廓形状偏差最大允许值 $f_{iaT}/\mu\text{m}$
50	50	49	3~46	0.6	38	1.0
100-1	100	83	5~78	0.5	70	1.0
100-2	100	83	5~78	0.5	70	1.0
131	131	95	5~91	0.5	86	1.4

利用上一节提出的渐次加工的渐开线样板齿根部工艺加工该渐开线样板,加工装置为基于纯滚动展成原理的双滚轮-导轨式齿轮渐开线样板磨削装置,如图 10 所示,磨削装置通过驱动装置控制滚轮的滚动距离来调节渐开线样板的初始展开角误差。测量装置为基于纯滚动展成原理的双滚轮-导轨式渐开线测量装置,如图 11 所示,其扩展不确定度 $U_{95} < \pm 0.33 \mu\text{m}$,测量时所用测头为球径 3 mm 的红宝石球测头,为了减小随机误差、人员误差、滚轮弹性蠕滑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原始数据,原始数据按 ISO 1328-1: 2013(E) 进行 50% 传输特性的高斯低通滤波,滤波器截止波长 $\lambda_a = 1 \text{ mm}$,并按我国齿轮渐开线样板国家标准 GB/T 6467-2010 修正齿廓倾斜偏差,测量时实验室温度为 $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

渐开线样板的齿廓偏差测量结果如表 6 和图 12 所示,50 齿面在计值范围 3~46 mm 内齿廓形状偏差 $f_{ia} = 0.6 \mu\text{m}$,100-1 齿面和 100-2 齿面在计值范围 5~78 mm 内齿廓形状偏差 $f_{ia} = 0.5 \mu\text{m}$,131 齿面在计值范围 5~91 mm 内齿廓形状偏差 $f_{ia} = 0.5 \mu\text{m}$,满足我国齿轮渐开线样板国家标准 GB/T 6467-2010 中对 1 级渐开线样板计值范围和齿廓形状偏差的要求。

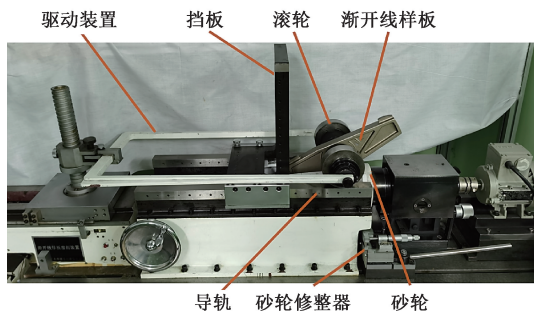


图 10 双滚轮-导轨式齿轮渐开线样板磨削装置

Fig. 10 Double roller-guide GIA-grinding device

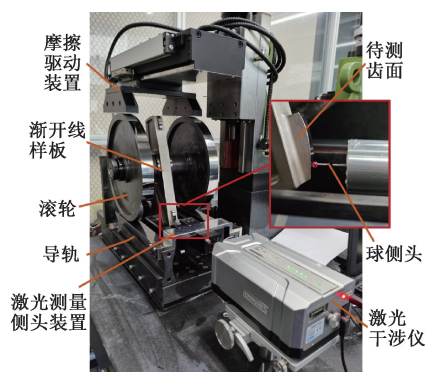


图 11 双滚轮-导轨式渐开线测量装置

Fig. 11 Double roller-guide involute-measurement device

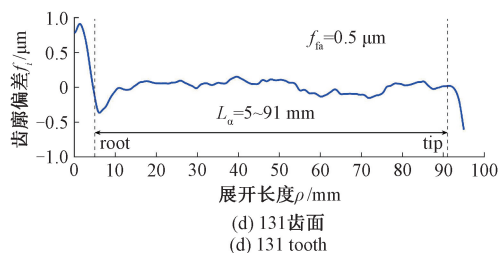
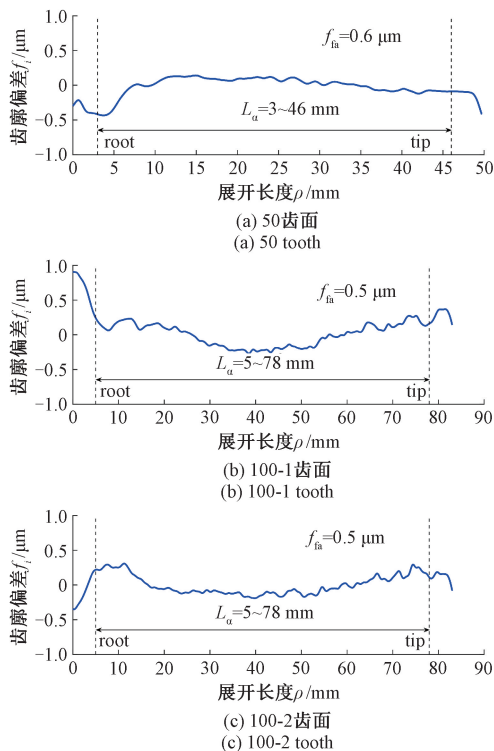


图 12 样板测量结果

Fig. 12 Measurement results of GIA

装配后的渐开线样板标准装置如图 13 所示,渐开线样板内孔与芯轴间安装有偏心密珠轴套^[15],通过渐开线样板的安装偏心将 100-1 齿面和 100-2 齿面的齿廓倾斜偏差的差值调整到 $0.1 \mu\text{m}$ 以下,渐开线样板安装后将锁紧螺母锁死,渐开线样板相对于芯轴的位置不再改变。

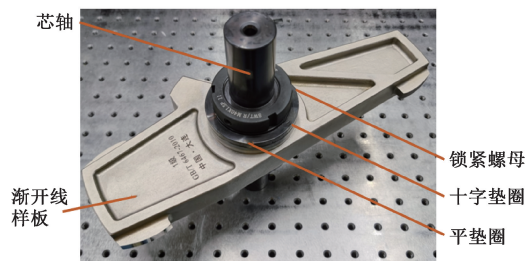


图 13 渐开线样板标准装置

Fig. 13 Standard device of GIA

我国齿轮渐开线样板检定规程 JJG 332-2003 要求,测量 3~4 级齿轮的仪器,其示值误差用一等渐开线样板检定,检定齿轮仪器时,应使用两种不同基圆半径的渐开线样板分别进行,两渐开线样板半径差值至少为 80 mm ^[2]。我国齿轮测量中心校准规范 JJF 1561-2016 要求齿轮测量中心在校准齿廓偏差测量的示值误差、齿廓倾斜偏差测量的一致性和齿廓总偏差测量的重复性时,均应使用渐开线样板进行校准,且渐开线样板尺寸包含 3 个不同的基圆半径值^[16]。该类型的具有 3 种基圆参数的渐开线样板 1 件即可满足上述检定规程和校准规范的要求,提高校准效率,并可减少重复装夹带来的误差。

5 结 论

本文首先建立了起始展开角误差与渐开线样板齿根部齿廓偏差的数学模型,分析了纯滚动展成法在加工渐开线齿廓齿根部时加工根切或不完整的原因,通过 Siemens NX 运动仿真和 CAD 仿真进行了验证,并依此提出一种渐次加工的渐开线样板齿根部工艺,利用该工艺对一件具有 3 种基圆参数的新型渐开线样板进行了加工

实验, 加工装置为基于纯滚动展成原理的双滚轮-导轨式齿轮渐开线样板磨削装置, 加工出的渐开线样板的 4 个齿面的齿廓形状偏差如下: 设计基圆半径 $r_b = 50 \text{ mm}$ 、计值范围 $3 \sim 46 \text{ mm}$ 内齿廓形状偏差 $f_{\text{ia}} = 0.6 \text{ }\mu\text{m}$, 设计基圆半径 $r_b = 100 \text{ mm}$ 、计值范围 $5 \sim 78 \text{ mm}$ 内齿廓形状偏差为 $f_{\text{ia}} = 0.5 \text{ }\mu\text{m}$ (两齿面), 设计基圆半径 $r_b = 131 \text{ mm}$ 、计值范围 $5 \sim 91 \text{ mm}$ 内齿廓形状偏差 $f_{\text{ia}} = 0.5 \text{ }\mu\text{m}$, 满足我国齿轮渐开线样板国家标准 GB/T 6467-2010 中对 1 级渐开线样板计值范围和齿廓形状偏差的要求, 研究成果为 1 级渐开线样板的精密制造提供了工艺方法的支持。

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: 1, 3-4.
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: 1, 3-4.
- [2] 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.
- [3] 林家春, 滕辰, 李晗晓, 等. 基于粗糙度轮廓仪的圆柱齿轮齿廓形状偏差测量[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(12): 15-22.
LIN J CH, TENG CH, LI H X, et al. Tooth profile deviation measurement of cylindrical gears based on a roughness profilometer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(12): 15-22.
- [4] 朱志强, 汤洁, 石照耀, 等. 齿轮测量中心 ZC 蜗杆齿廓偏差测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(12): 56-65.
ZHU ZH Q, TANG J, SHI ZH Y, et al. Measurement method for tooth profile deviations of ZC worm in gear measuring center [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(12): 56-65.
- [5] 韩江, 高婷, 江本赤, 等. 非圆齿轮齿廓特性分析及偏差测量方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(10): 1520-1533.
HAN J, GAO T, JIANG B CH, et al. Tooth profile characteristics analysis and deviation measurement study of non-circular gear [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(10): 1520-1533.
- [6] 佟晓冬, 王立鼎, 王岩, 等. 渐开线实体基准的研制[J]. 计量技术, 1998(5): 33-36.
TONG X D, WANG L D, WANG Y, et al. Development of involute solid datum [J]. Measurement Technique, 1998(5): 33-36.
- [7] 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.
- [8] HARTIG F, KNIEL K. First international involute gear comparison[C]. Cincinnati: AGMA, 2011.
- [9] 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.
- [10] KOMORI M, TAKEOKA F, KONDO K, et al. Design method of double ball artifact for use in evaluating the accuracy of a gear-measuring instrument[J]. Journal of Mechanical Design. 2010, 132(7): 071010.
- [11] 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: 26-27.
- [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 ultraprecision 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] 袁高峰, 凌明. 具有三种基圆参数的齿轮渐开线样板: 202010504236. 4[P]. 2020-06-05.

YUAN G F, LING M. Gear involute artefact with three base circle parameters: 202010504236.4 [P]. 2020-06-05.

- [15] 凌四营,王晓东,王立鼎,等. 一种精密定位用偏心密珠轴套: 201510560861. X [P]. 2015-09-07.

LING S Y, WANG X D, WANG L D, et al. Gear involute artefact with three base circle parameters: 201510560861. X [P]. 2015-09-07.

- [16] 全国几何量长度计量技术委员会. 齿轮测量中心校准规范: JJF 1561-2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 2-4.

National Technical Committee of Geometric-Length Measurement of China. Calibration specification for gear measuring centers: JJF 1561-2016 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 2-4.

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. candidate 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.