

文章编号 1004-924X(2023)23-3457-17

高精度齿轮渐开线样板与测量仪器研究进展

凌四营¹, 凌明^{2*}, 林虎³, 王奉涛¹, 王立鼎²

- (1. 汕头大学 智能制造技术教育部重点实验室, 广东 汕头 515063;
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;
3. 中国计量科学研究院, 北京 100029)

摘要: 渐开线圆柱齿轮是量大面广的关键机械基础件, 为了实现渐开线量值的统一, 通常需要将渐开线样板作为渐开线的实体标准器进行渐开线齿廓偏差的量值溯源、量值传递与量值比对。本文回顾了各国高精度单基圆参数、多基圆参数渐开线样板、集成其他几何参数的齿轮样板、非渐开线式样板及高精度渐开线测量仪器的研究进展, 并对渐开线样板的使用展开长度提出了建议, 对高精度渐开线样板的发展做出了展望。

关键词: 渐开线样板; 渐开线齿廓偏差; 渐开线测量仪; 标准器

中图分类号: TG61 **文献标识码:** A **doi:** 10. 37188/OPE. 20233123. 3457

Research progress in high-precision gear involute artifacts and measuring instruments

LING Siying¹, LING Ming^{2*}, LIN Hu³, WANG Fengtao¹, WANG Liding²

- (1. Key Laboratory of Intelligent Manufacturing Technology of Ministry of Education, Shantou University, Shantou 515063, China;
2. Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;
3. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)
* Corresponding author, E-mail: lingming@mail.dlut.edu.cn

Abstract: Involute cylindrical gears are a key component of various machines and are widely used in all areas of the national economy. To achieve uniformity in involute measurements, gear involute artifacts are often used as entity standards for the traceability, transfer, and comparison of involute profile deviations. This paper reviews the progress in research on high-precision gear involute artifacts with single and multi-base circular parameters, gear artifacts integrating other geometrical parameters, non-involute artifacts, and high-precision involute measuring instruments in various countries. It also suggests uses of roll path length of gear involute artifacts and provides an outlook on the development of high-precision gear involute artifacts.

收稿日期: 2023-04-06; 修订日期: 2023-05-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 52075067); 汕头大学科研启动经费项目(No. NTF23008); 广东省高校创新团队(No. 2020KCXTD012); 中央高校基本科研业务费(No. DUT22LAB111)

key words: involute artifact; involute profile deviations; involute measuring instrument; measurement standard

1 引言

齿轮是量大面广的关键机械基础件,尤其是渐开线圆柱齿轮,广泛应用在国民经济的各个领域。随着机器人、能源装置、轨道交通装备等工业技术的发展,对齿轮副提出了低噪声、高精度、高寿命和高可靠性的要求。

为了研究、建立、复现、保存和维护国家计量基准以及开展国际计量单位制的传递,保持国家计量基准国际等效,我国科技部于2017年发布了《“十三五”先进制造技术领域科技创新规划》^[1],提出将机械基础件和关键部件作为“十三五”期间的重点任务来抓,其中重点提到“基准级别齿轮渐开线样板设计与超精密制造和计量”。国务院于2021年印发了《计量发展规划(2021-2035年)》^[2],提到“开展齿轮等基础零部件特性量及结构成分计量测试技术研究”。

渐开线圆柱齿轮需要验证的几何参数中,最少可接受参数为齿廓总偏差 F_a (1~6级齿轮也需测量齿廓倾斜偏差 $f_{H\alpha}$ 和齿廓形状偏差 f_{α})、齿距累积总偏差 F_p 、单个齿距偏差 f_p 、螺旋线总偏差 F_{β} (1~6级齿轮也需测量齿廓倾斜偏差 $f_{H\beta}$ 和齿廓形状偏差 f_{β})和齿厚 s ^[3-4]。为了评估渐开线测量仪器的测量不确定度并验证仪器的测量精度,ISO(International Organization for Standardization)推荐利用齿轮样板进行齿轮参数的量值溯源与量值传递,并推荐了常用齿轮样板类型和齿轮测量仪器评估方法^[5-6]。

齿轮样板按参数和类型可分为:单参数样板、多参数样板和非渐开线式样板。在二十世纪,渐开线圆柱齿轮的齿廓偏差、齿距偏差、齿厚等几何参数往往需要在不同仪器上测量,综合考虑多种几何参数精密加工的难度,通常将几何参数分离出来,单独制造渐开线样板、螺旋线样板、齿距样板和齿厚样板作为单参数样板进行量值传递与量值比对。其中,渐开线样板又可以根据其设有的基圆个数,分为单基圆参数渐开线样板和多基圆参数渐开线样板。多参数样板通常在

基体上设有上述两个及以上齿轮几何参数。非渐开线式样板利用简单几何形体的组合、通过补偿程序模拟齿轮几何参数,常见的有球式样板、销式样板、平面式样板等。

在此基础上,我国设立了独立的齿轮渐开线样板国家标准 GB/T 6467^[7],将渐开线样板作为渐开线齿轮齿廓偏差溯源与量值传递的标准计量器具,通过渐开线样板工作面上的渐开线与仪器形成的渐开线进行比较来校准各种渐开线测量仪器。

我国的渐开线标准研究已进行了约60年。1965年,中国计量科学研究院(National Institute of Metrology, China, NIM)的唐启昌和徐孝恩等建立了我国第一台齿轮渐开线国家基准装置^[8-9]。为了实现齿轮测量仪器偏差校准与溯源、保证齿轮量值溯源与传递的稳定性与可靠性,二十世纪六七十年代,唐启昌和北京市计量科学研究所的张泰昌等^[10-12]讨论了利用渐开线样板(Gear Involute Artifact, GIA)在我国统一渐开线量值的可能性及方法。二十世纪九十年代,王立鼎院士^[13-15]研制出具有国际先进水平的渐开线样板,其基圆半径 r_b 分别约为50 mm和141 mm、齿廓形状偏差 f_{α} 分别约为0.5 μm 和0.8 μm ,达到该规格当时的国际领先水平。该渐开线样板和标准齿轮提供给中国计量科学研究院作为我国渐开线计量标准器,用于我国齿轮渐开线的量值溯源与量值传递。

目前,我国省部级计量科学研究所使用的样板一般仍为基圆半径 $r_b \leq 200$ mm的二等精度渐开线样板(齿廓形状偏差 f_{α} 约为1.2~2.0 μm)或2~5级标准齿轮,而且制造时间多为二十世纪末^[16],部分样板已无法满足高精度齿轮的计量需要。本文回顾了近20年高精度单基圆参数、多基圆参数齿轮渐开线样板、多参数齿轮样板和非渐开线式样板及高精度渐开线测量方法及仪器的研究进展,并对高精度渐开线样板及测量方法的发展做出了展望。

2 齿轮渐开线样板

2.1 单基圆参数渐开线样板

单基圆参数渐开线样板通常具有两个设计尺寸相同的异侧齿廓面(分别作为左、右齿面),即左、右齿面具有相同的设计基圆半径和展开长度,如图1所示。该类型渐开线样板也可仅具有单个齿廓面,测量时将渐开线样板翻转分别作为左、右齿面使用。单基圆参数渐开线样板的基圆半径建议接近被校仪器测量范围的50%^[17]。

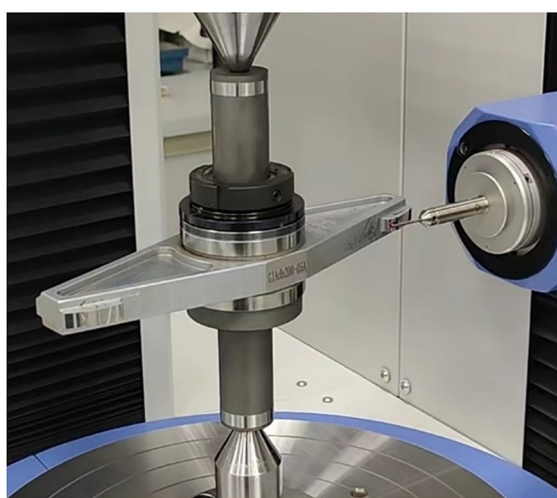


图1 DLUT的单基圆渐开线样板

Fig. 1 Gear involute artifact with single base circle from DLUT

英国纽卡斯尔大学齿轮测量国家实验室(National Gear Metrology Laboratory, NGML)于齿轮国际比对项目EUROMET^[18]中,提供了一件基圆半径 $r_b=100$ mm、计值长度 $L_a=38$ mm、左、右齿面的齿廓形状偏差 f_{ia} 约为 $0.5 \mu\text{m}$ 。

德国联邦物理技术研究院(Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB)在国际量值比对项目EURAMT.L-S24^[19]中,提供了一件基圆半径 r_b 约为25 mm的渐开线样板,该渐开线样板在计值长度 $L_a=17$ mm内齿廓形状偏差 f_{ia} 约为 $0.8 \mu\text{m}$ (左齿面),如图2所示。

2018年,PTB^[20]研制了一种在渐开线上叠加波纹度的渐开线波纹度样板,用于研究不同测量策略(如测头球径、采样频率、滤波策略、测量速度等)对测量结果的影响,如图3所示,该渐开线样板的基圆半径 $r_b=20$ mm、计值长度 $L_a=70$ mm。

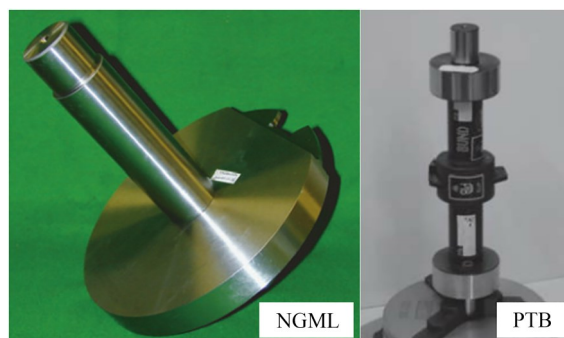


图2 NGML与PTB的单基圆渐开线样板^[18-19]

Fig. 2 Gear involute artifacts with single base circle from NGML and PTB^[18-19]

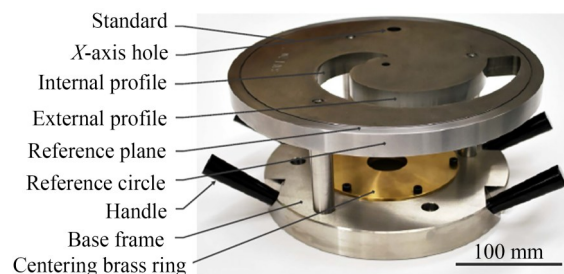


图3 PTB的渐开线波纹度样板^[20]

Fig. 3 Involute corrugation artifact from PTB^[20]

日本京都大学(Kyoto University)与日本国家计量研究所(National Metrology Institute of Japan, NMIJ)^[21-22]开发出基于纯滚动展成原理的双滚轮式激光测量渐开线基准装置,测量实验所用渐开线样板基圆半径 $r_b=57.5$ mm、计值长度 L_a 约为20 mm、齿廓形状偏差 f_{ia} 约为 $0.5 \mu\text{m}$,如图4所示;日本的大阪精密机械株式会社(OSA-

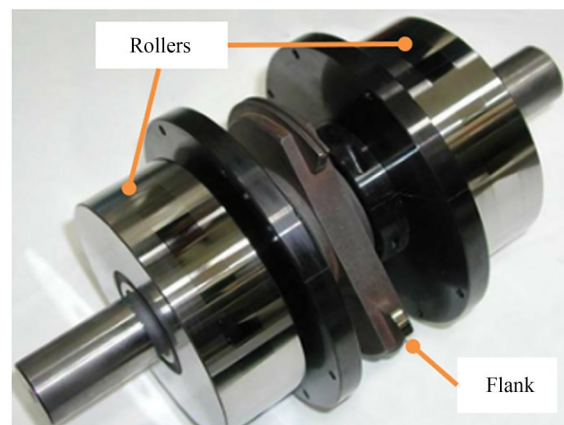


图4 NMIJ带滚轮的渐开线样板^[22]

Fig. 4 Gear involute artifact with rollers from NMIJ^[22]

KA SEIMITSU KIKAI CO. LTD, OSK)^[23]在开发高精度齿轮测量装置(Gear Measuring Instrument, GMI)的过程中,验证 GMI 测量精度所用的渐开线样板基圆半径 $r_b=100$ mm、计值长度 L_a 约为 29 mm,左、右齿面的齿廓形状偏差 f_{α} 约为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 。

2.2 多基圆参数渐开线样板

以上单参数的渐开线样板虽然可以获得亚微米级的齿廓形状偏差和齿廓总偏差(齿廓倾斜偏差即基圆参数一般由本国的最高计量机构给出),但是在利用渐开线样板进行量值传递时,通常希望渐开线样板的基圆半径涵盖尽可能广的范围。如我国《齿轮测量中心校准规范 JJF 1561-2016》^[17]推荐,校准齿廓偏差的示值误差时应使用 3 件不同半径的渐开线样板,且半径应尽量接近被校仪器测量范围的 50%。我国《齿轮渐开线样板检定规程 JJG 332-2003》^[24]规定,检定齿轮仪器时,所用渐开线样板的半径差应至少为 80 mm。ISO《用于测量单个齿轮仪器的评估 ISO 18653:2003》^[5]也推荐,在检定齿轮测量仪器时使用多个渐开线样板以保证样板的几何稳定性。这时就需要多件渐开线样板进行量值溯源与量值传递,为了便于运输和检定,在同一样板上设置多个基圆参数的渐开线样板也被开发出来。

在齿轮国际比对项目 COOMT. L-S10^[25]中,白俄罗斯国家计量院(Belarusian State Institute of Metrology, BelGIM)提供了一件两基圆参数的渐开线样板,如图 5 所示。基圆半径分别为 $r_b=60.140$ mm 和 150.030 mm,计值长度 L_a 约为



图 5 BelGIM 的双基圆参数渐开线样板^[25]

Fig. 5 Gear involute artifact with double design base circles from BelGIM^[25]

19 mm 和 41 mm,齿廓形状偏差 f_{α} 约为 $1.8\text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 。在齿轮国际比对项目 COOMT. L-S18^[26]中,乌克兰国家科学中心(National Scientific Center of Ukraine, NSC)也提供了一件两基圆参数的渐开线样板,该渐开线样板的结构与 BelGIM 提供的渐开线样板结构相同,基圆半径分别为 $r_b=60$ mm 和 150 mm,计值长度 L_a 约为 28 mm 和 32 mm,齿廓形状偏差 f_{α} 约为 $0.9\text{ }\mu\text{m}$ 和 $4.0\text{ }\mu\text{m}$ 。该类型的渐开线样板虽然具有两种基圆参数,但是样板的质心并不在中心轴线上,而且这两件渐开线样板的两基圆参数的渐开线齿廓形状偏差相差 3~4 倍,这不利于渐开线样板的使用。

PTB^[27]于 2018 年研制了一种融合多个小模数内齿面的渐开线样板,如图 6 所示,用于实现亚微米级测量不确定度的微小齿轮测量仪器的校准。该渐开线样板齿顶圆直径为 20 mm,法向模数 $m_n=0.1, 0.2, 0.5, 1$ mm,该渐开线样板有两件,分别为硬质合金和 Ti₆Al₄V 材料,齿廓形状偏差 $f_{\alpha}<1.5\text{ }\mu\text{m}$ 。

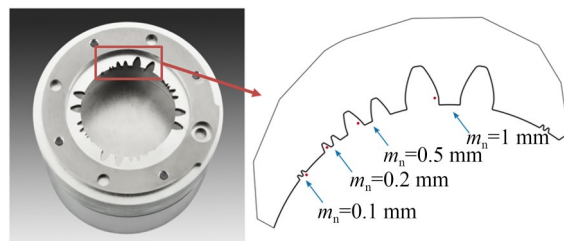


图 6 PTB 的多个小模数内齿面渐开线样板^[27]

Fig. 6 Micro-gear involute artifact with multi-modular internal teeth from PTB^[27]

为简化检定流程,并满足我国齿轮渐开线样板检定规程 JJG 332^[24]、齿轮渐开线测量仪器校准规范 JJF 1124^[28]和齿轮测量中心校准规范 JJF 1561^[23]对检定用渐开线样板规格的要求,大连理工大学设计制造了一种具有 3 种基圆参数的新型渐开线样板^[29],如图 7 所示。该渐开线样板的基圆半径 $r_b=50, 100$ (左、右齿面)、131 mm,计值长度 $L_a=43, 73, 85$ mm,其中一件样板在中国计量科学研究院进行了非正式量值比对^[30],4 个齿面的齿廓形状偏差 f_{α} 约为 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ 。

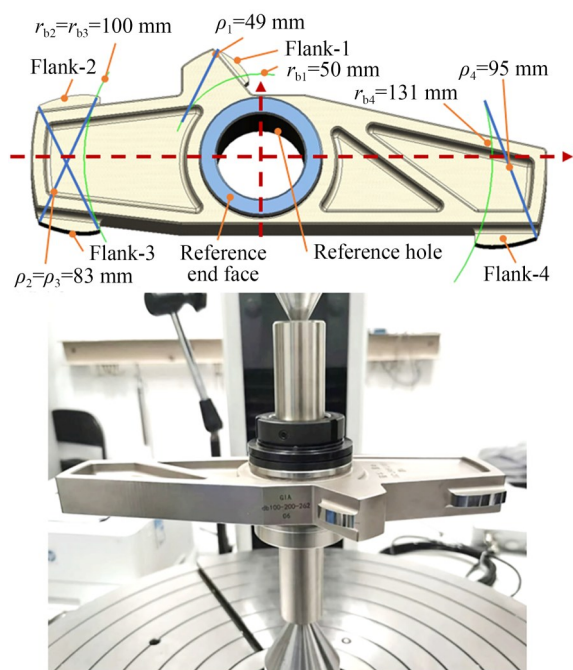
图 7 DLUT 的 3 基圆参数渐开线样板^[30]

Fig. 7 Gear involute artifact with three design base circles from DLUT^[30]

3 多参数齿轮样板

随着数控技术的发展,通常在一个仪器上即可实现齿轮全部几何参数的测量,所以在同一基体上设置多种几何参数(渐开线、螺旋线、齿距)的齿轮样板也得到了广泛应用,如工件式齿轮样板、标准齿轮、齿圈样板等。

工件式齿轮样板^[31]通常将被检参数集中在同一齿轮样板上,如图 8 所示,用于计量机构与生产现场的量值溯源与量值传递。工件式齿轮样板通常与生产企业生产的齿轮工件的规格相同或相近,以便于加工与测量仪器的误差补偿,工件式齿轮样板的精度通常要求 5 级以上,也可与企业生产的齿轮工件的精度大致相同或高 1 级。

大连理工大学的凌四营等^[32-33]利用大平面砂轮机磨齿机研制出基圆半径 r_b 约为 56 mm 的多种规格的直齿渐开线圆柱标准齿轮(master gear),达到圆柱齿轮国际标准 ISO 1328-1:2013 中的 1 级精度,齿廓形状偏差 $f_{\alpha} < 1.3 \mu\text{m}$,该类型的标准齿轮也可以作为渐开线样板和齿距样板使用,如图 9 所示。

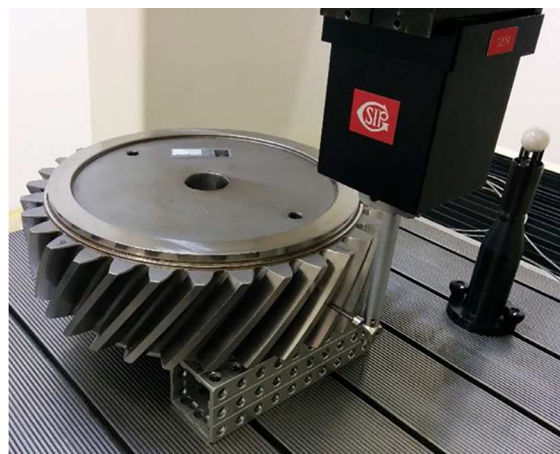
图 8 工件式齿轮样板^[31]

Fig. 8 Workpiece gear artifact^[31]

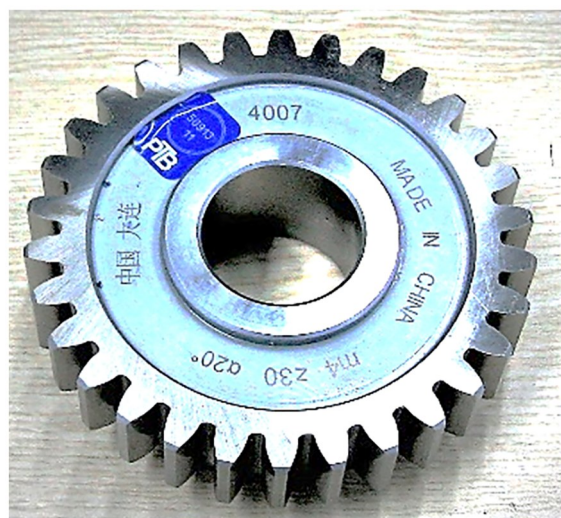


图 9 DLUT 的 1 级精度标准齿轮

Fig. 9 Class-1 master gear from DLUT

为满足风电齿轮测量的迫切需求,PTB^[34]于 2010 年联合 Hoffer 等几家大型齿轮公司研制了一种扇形大齿轮样板,如图 10 所示。该样板的基圆半径 r_b 约为 470 mm、法向模数 20 mm、齿宽 400 mm,包含了左旋 20°、右旋 10°和直齿 3 种不同类型的轮齿,可用于渐开线和螺旋线的量值传递,其渐开线计值长度 L_a 为 120 mm,齿廓形状偏差 f_{α} 约为 $1.8 \mu\text{m}$,该扇形大齿轮样板是世界上目前已公开的渐开线展开长度最长的齿轮样板。

PTB^[35-36]于 2012 年又设计制造了一种大齿圈标准样板,如图 11 所示。大齿圈标准样板的参数为:基圆半径 r_b 约 940 mm、法向模数 18 mm、齿

图 10 PTB 的扇形大齿轮样板^[34]Fig. 10 Large involute gear segment measurement standard from PTB^[34]图 11 PTB 的大齿圈标准样板^[36]Fig. 11 Large ring gear measurement standard from PTB^[36]

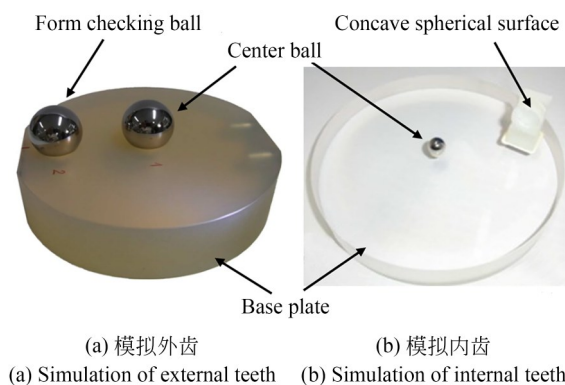
宽 420 mm。该样板包含左旋 20°、右旋 10°和直齿 3 种不同类型的内齿和外齿,渐开线计值长度 L_a 为 84 mm,齿廓形状偏差 f_{fa} 约为 2.0 μm 。该大齿圈标准样板是世界上目前已公开的基圆直径最大的齿轮样板。

4 非渐开线式样板

考虑到渐开线样板的加工难度,工业界一直在寻求利用简单几何形体的组合去代替渐开线样板的可能。ISO 10064-5^[6]也推荐了如平面式样板、销式样板、球式样板等非渐开线式样板用

于 GMI 的评估。平面式样板和销式样板因测量结果易超出量程,已不再用于中、大型渐开线的计量,平面式样板的一种特殊形式——楔形样板,被 NMIJ 用于螺旋线的计量^[37-38]。

NMIJ 联合东京工业大学、日本京都大学^[39-41]开发出一种双球式渐开线样板(Double Ball Artifact, DBA),如图 12 所示。该类型的渐开线样板利用圆弧代替和程序补偿模拟渐开线,该双球式渐开线样板基圆半径 r_b 约为 40 mm、计值长度 L_a 约为 30 mm,扩展不确定度 $U(k=2)$ 约为 0.5 μm ,并于 2016 年研制出一种凹球面双球式渐开线样板,用于模拟内齿面的情况。

图 12 NMIJ 的双球式样板^[39-40]Fig. 12 Double ball artifact from NMIJ^[39-40]

这种双球式样板通过程序补偿圆弧与标准渐开线间的偏差将圆弧作为虚拟渐开线使用,通过调整形状检测球的球径和与中心球的中心距以模拟不同基圆半径的渐开线。这种双球式样板的优点为结构简单,主要组成零部件为球面和平面,相较于渐开线容易获得更高的加工与测量精度;但是这种样板需要专用的测试与补偿程序,而且测头的测量范围也大于工件齿轮的齿廓偏差范围,稳定性也稍逊于上一节所述的渐开线样板。

北京工业大学(Beijing University of Technology, BJUT)的石照耀和陈洪芳等也利用圆弧代替和程序补偿的方法研究出双球式渐开线样板^[42-43]和双轴式圆弧型大尺寸渐开线样板^[44-45],目前最大规格的双轴式圆弧型大尺寸渐开线样板可以实现基圆半径 r_b 约为 361 mm、计值长度 L_a 约为 110 mm、扩展不确定度 $U(k=2)$

约为 $2.9\ \mu\text{m}$ 的渐开线的模拟,如图 13 所示。

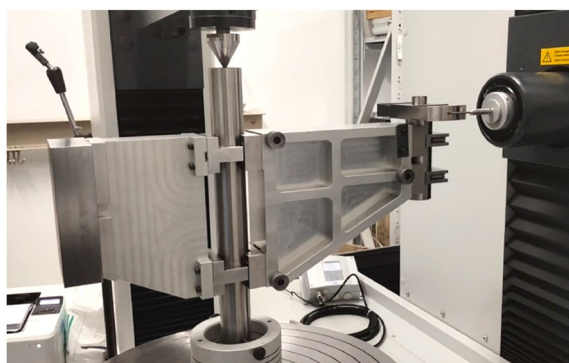
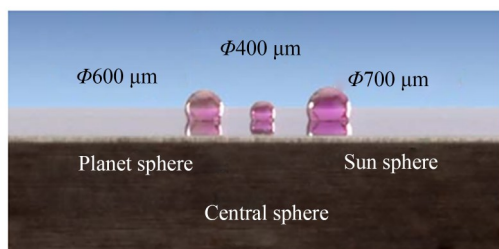


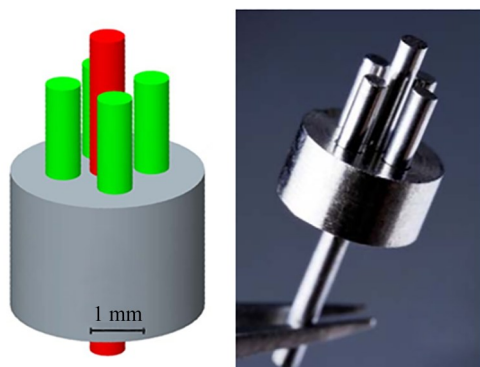
图 13 BJUT 的双轴式圆弧型大尺寸渐开线样板^[45]

Fig. 13 Double-axis arc-shaped large-size involute artifact from BJUT^[45]

Lanza 等^[46]开发出基圆半径 r_b 约为 $0.9\ \text{mm}$ 的微型双球式样板(μ -DBA)和销式样板,用于微小齿轮的渐开线和齿距计量,如图 14 所示。偏心球式样板^[47]作为螺旋线样板使用,多球式样板被开发出来校准转台误差^[34,48-49]、直接作为齿距样板^[50-53]或锥齿轮样板^[54]。



(a) 微型双球式样板
(a) μ -DBA



(b) 销式样板
(b) Pin artifact

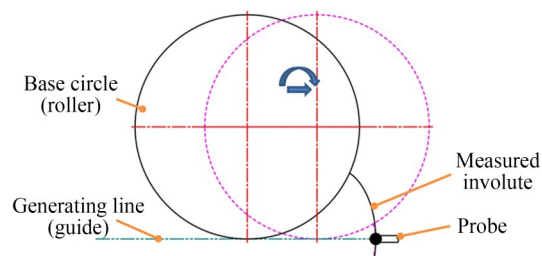
图 14 微小齿轮样板^[46]

Fig. 14 Micro gear artifacts^[46]

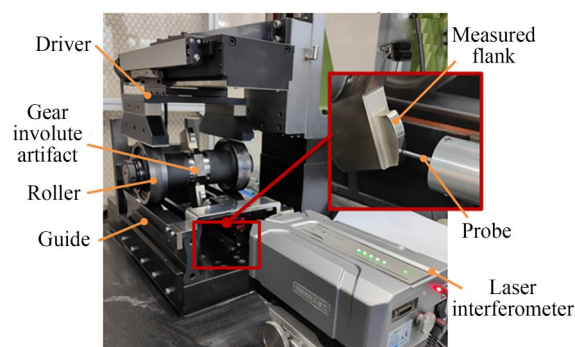
5 高精度渐开线测量方法及仪器

5.1 基于纯滚动展成的渐开线测量

直线在一固定的圆上做纯滚动时,直线上一确定点的轨迹即渐开线,这就是渐开线的展成原理。基于该展成原理,将直线在圆上的纯滚动转变为圆在直线上的纯滚动,则以该圆为基圆的标准渐开线与直线的交点为不动点,在该点布置测头即可实现渐开线的测量。PTB、NMIJ、大连理工大学均采用基于纯滚动测量法的渐开线纯滚动测量仪(如图 15 所示)实现了 $U(F_a, f_{Ha}, f_{Ia}) < 0.5\ \mu\text{m}$ 的测量^[21,55-57],这是目前公开的测量不确定度最低的渐开线测量方法。大连理工大学也利用此方法加工高精度渐开线凸轮与渐开线样板^[58]。但是这种方法受限于滚轮的尺寸,只能用于特定规格的渐开线样板的测量,而且无法测量齿距、齿厚等参量。与该原理相同的还有单盘式渐开线测量仪及在此基础上发展出的圆盘杠杆式、圆盘正弦尺式、基圆补偿式万能渐开线测量仪^[59],但这些方法的测量精度不高,目前基本已



(a) 渐开线纯滚动测量原理
(a) Measuring principle for rolling generation of involute



(b) DLUT 的渐开线纯滚动展成激光测量装置
(b) Involute rolling generation laser measuring instrument from DLUT

图 15 基于纯滚动展成的渐开线测量

Fig. 15 Involute measurement based on rolling generation

被淘汰。大连理工大学的李小燕等^[60]也在研究基于纯滚动展成的螺旋线测量方法。

5.2 基于旋转坐标的渐开线测量

渐开线可以视为转动和平动的复合运动,即可以利用回转台、线性滑台通过转动和平动的运动组合复现渐开线,进而利用仪器复现的渐开线与待测齿面上的渐开线进行比较以确定待测齿面的渐开线齿廓偏差。

随着高精度传感器以及 CNC 控制技术的发展,集成了测长传感器、测角传感器、线性滑台、回转台和 CNC 控制的“电子展成法”逐渐取代传统的机械展成法来复现渐开线,利用该方法的齿轮测量中心(Gear Measuring Centre, GMC,如图 16 所示)在齿轮测量领域得到了广泛的应用。

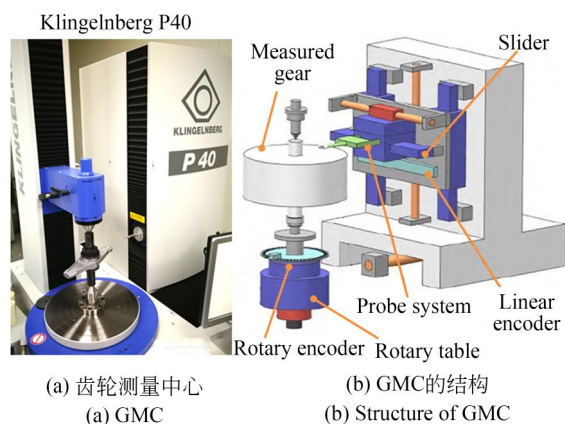


图 16 齿轮测量中心及其测量原理^[37]

Fig. 16 Gear measuring center(GMC) and its measuring principles^[37]

海德汉光栅尺可以实现 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 的纳米级分辨力的长度测量,激光干涉仪可以实现 $(589\,568\,998 \pm 0.5) \mu\text{m}$ 的长度测量。虽然商品级角度编码器(圆光栅)仅能实现约 $\pm 1''$ 的角度测量,但是通过对角度测量方法的研究,重庆理工大学的彭东林等^[61]研发了纳米时栅角度传感器,可以实现精度为 $0.1''$,分辨力为 $0.01''$ 的角度测量。我国 NIM 研发的全圆连续角度标准装置,可以实现 $U(k=2) < 0.05''$ 的连续测角精度^[62-63]。NIM 还开发了新一代齿轮基准装置^[64-65],使用一种回转角误差自校准修正技术,通过对 12 个读数头的不同组合运算分离出回转角

误差,大大提高回转台测角精度。NIM 利用 GMC 可以实现基圆直径 $5 \sim 400 \text{ mm}$ 的齿轮测量,扩展不确定度 $U(F_a) = 1.2 \sim 1.8 \mu\text{m}$, $U(f_{H\alpha}) = 1.0 \sim 1.6 \mu\text{m}$, $U(f_{H\beta}) = 0.8 \mu\text{m}$ ^[66]。日本 OSK 利用 GMC 实现了分度圆直径 $20 \sim 250 \text{ mm}$ 的圆柱齿轮的测量,扩展不确定度 $U(F_a, f_{H\alpha}, f_{H\beta}) = 0.5 \sim 0.7 \mu\text{m}$ ^[22,67]。

除专用的 GMC 外,通过在坐标测量机(Coordinate Measuring Machine, CMM)上安装高精度的回转台,也可以实现渐开线的极坐标测量。白俄罗斯 BelGIM 利用带高精度转台的 CMM 可以实现分度圆直径在 $75 \sim 300 \text{ mm}$,扩展不确定度 $U(F_a, f_{H\alpha}, f_{H\beta})$ 为 $1 \mu\text{m}$ (下文测量不确定度均指扩展不确定度 $U(k=2)$)的齿轮测量^[66]。

5.3 基于直角坐标的渐开线测量

除上述测量渐开线的专用仪器外,也可以直接利用 CMM 获取齿面的空间坐标信息并进行误差分解,PTB 的 Härtig 和 Stein^[68-69]给出了三维坐标测量时圆柱齿轮的坐标描述与误差评估的通用方程。虽然 GMC 将顶尖替换为卡爪可以实现齿圈类工件的测量,但是在测量齿轮时齿轮的安装偏心 and 偏摆会造成回转台偏载进而引起测量误差。CMM 在利用空间坐标法测量齿轮时齿轮静止,在测量大型齿轮方面具有独特的优势。

为了提高 CMM 的空间测量精度,PTB 的 Härtig 与 Wendt 等^[70-71]和北京工业大学的陈洪芳等^[72-73]利用激光追踪测量 CMM 测头的空间定位误差,NIM 的林虎等^[74-75]分析了 CMM 的空间几何误差对 3D 齿轮测量的影响以及激光跟踪多边测量自标定优化方法。PTB 也将激光追踪与空间误差补偿技术结合,开发出 M3D3 校准程序(mobile multilateration measurement system for 3D measurement)用于大体积坐标测量^[76],对分度圆直径为 $25 \sim 400 \text{ mm}$ 的齿轮的测量扩展不确定度 $U(F_a) = 0.9 \sim 1.4 \mu\text{m}$, $U(f_{H\alpha}) = 0.7 \sim 1.1 \mu\text{m}$, $U(f_{H\beta}) = 0.5 \mu\text{m}$;对分度圆直径为 2 m 的齿轮的测量扩展不确定度 $U(F_a) = 2.5 \mu\text{m}$, $U(f_{H\alpha}) = 2.4 \mu\text{m}$, $U(f_{H\beta}) = 0.8 \mu\text{m}$ ^[35],如图 17 所示。日本 NMIJ 利用 CMM 可以实现分度圆直径在 $25 \sim 200 \text{ mm}$,扩展不确定度 $U(F_a, f_{H\alpha}, f_{H\beta}) = 0.52 \mu\text{m}$ 的齿轮测量^[66]。美国的 Y-12 国家安全综合体(Y-12 National Security Complex)^[77]和美国国家标准与技术研究院(National Institute of Stan-

dards and Technology, NIST)^[78]目前均可以实现测量不确定度为 $0.6 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 的齿轮计量。



图 17 PTB 的 CMM ($5 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 2 \text{ m}$)^[35]

Fig. 17 CMM form PTB ($5 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 2 \text{ m}$)^[35]

6 总结与展望

6.1 渐开线样板与测量仪器发展趋势

当前,齿轮测量仪器向着更大的测量范围、更高的测量效率、更多的齿面信息等方向发展。我国已拥有中等规格的渐开线样板,我国省部级计量机构大多能实现法向模数 $m_n = 1 \sim 10 \text{ mm}$ 、基圆半径 $r_b \leq 200 \text{ mm}$ 的圆柱齿轮的校准^[16]。新修订的国家标准 GB/T 10095.1-2022 也规定了法向模数 $0.5 \text{ mm} \leq m_n \leq 70 \text{ mm}$ 、分度圆直径 $5 \text{ mm} \leq d \leq 15\,000 \text{ mm}$ 的齿轮精度制。但是,我国缺少高精度的微小型和大型、超大型齿轮样板和可溯源的高精度测量仪器,也缺少相关类型齿轮样板的国家标准与检定规程。我国齿轮渐开线样板国家标准 GB/T 6467 于 2010 年实行,仅推荐了基圆半径 $r_b = 25 \sim 400 \text{ mm}$ 的渐开线样板的基本参数;齿轮渐开线样板检定规程 JJG 332 于 2003 年实行,仅适用于基圆半径 $r_b \leq 200 \text{ mm}$ 的渐开线样板的检定,无法满足当前渐开线测量与校准的需要。

为了实现风机、船舶等大型齿轮箱的米级齿轮的精确计值,除上述提到的扇形大齿轮样板和大齿圈标准样板外,PTB 还搭建了 $5 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 的 CMM 用于大型齿轮的检测,并纳入长度溯源链中。除建造更大的 GMC 和 CMM 外,也有利用激光跟踪仪将靶镜安装在机械臂^[79-80]或齿轮随动测量系统上进行大型、超大型齿轮激光跟踪测量的研究^[81-83],该类方法目前的测量精度有限(可以测量 6 级齿轮^[84]),但是可以实现“以小测

大”和齿轮的原位测量。

NIM 还设计了大齿轮多参数标准样板^[85],如图 18 所示。该样板结构与工件齿圈结构近似,也为齿圈式,包含螺旋角为 0° 的内外齿和 $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 的左旋和右旋外齿及内齿齿距。该样板的外齿齿顶圆直径为 1 m ,但是其加工难度较大(目前可达 3 级精度),且自重较大不利于运输。

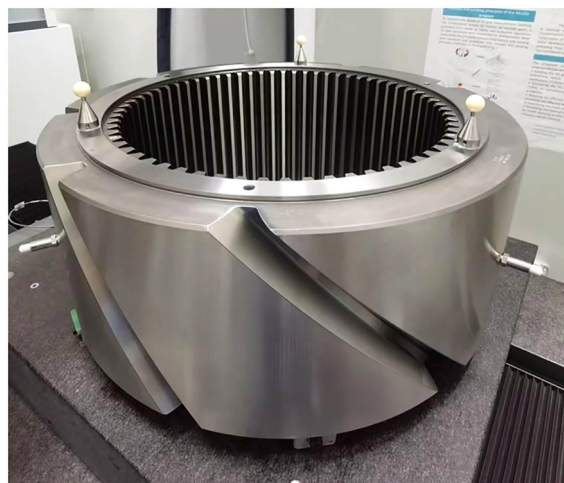


图 18 大齿轮多参量标准样板

Fig. 18 Large standard gear with multi-parameters

笔者团队提出了一种连轴装配式大齿轮渐开线样板^[86],如图 19 所示,并开展了大基圆半径和大展开长度渐开线样板精密制造的基础研究。该样板的基圆半径 $r_b = 400 \text{ mm}$ 、展开长度 $\rho = 283 \text{ mm}$ 。该类样板只有单个渐开线参数,有可能获得更高精度的渐开线,而且体积和自重远小于齿圈式样板,更便于操作和运输。但该样板的基准外圆柱面的位置与齿圈式工件基准圆柱面的位置存在一定的偏差,对量值溯源与量值传递

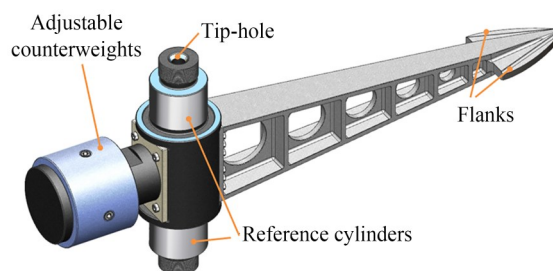


图 19 连轴装配式大齿轮渐开线样板

Fig. 19 Large gear involute artifact assembled with mandrel

可能产生的影响仍需进一步研究。

我国计量机构和齿轮企业的部分 CMM 可以实现高精度渐开线圆柱齿轮的测量。我国也颁布了齿轮测量中心校准规范 JJF 1561-2016 和坐标测量机校准规范 JJF 1064-2010,但是目前没有利用 CMM 测量圆柱齿轮的相关检定规程或校准规范,这不利于渐开线的量值统一。

在微小齿轮测量方面,目前主要采用 μ -CMM(Micro-CMM)^[87]。此外,Ferreira 和 Metz 等^[88-89]开发出测头球径约 300 μm 的硅基微探针, Metz 等^[19]开发出直径约 250 μm 的压阻式微探针,它们均可集成在现有商品 GMC 上实现小模数齿轮的测量。我国已进行了一些微小齿轮测量仪器与测量方法的研究,但是缺少对高精度的微小型齿轮样板、微小齿轮计量方法的研究,由北京工业大学牵头的国家重大科研仪器研制项目有望解决模数小于 1 mm 的 2 级齿轮的测量。

6.2 渐开线测量新方法

随着业界对于全齿面信息及测量效率的关注,激光测量方法也在齿轮测量领域得到了应用。石照耀等^[90-91]提出了齿轮特征线统一模型及三维误差评定方法,通过线结构光获得全齿面信息^[92-93]。Klingelnberg^[94]研制了集成在 GMC 上的光学测头,可以实现齿距、齿厚等参数的快速测量。Gleason^[95]研发的 GMSL 系列 GMC,集成了接触式扫描测头、激光测头、粗糙度测头、硬度与残余应力测头。Fujio 和方素平等^[96-98]开发出用于齿轮测量的激光干涉测量系统。虽然齿轮的激光测量精度目前仍逊于前述 3 种方法,但是测量速度远高于传统的接触式测量。

视觉测量方法在齿轮测量特别是直齿小齿轮检测中得到了广泛应用,主要用于齿轮齿距、齿厚、齿顶圆和齿根圆等几何参数的测量^[99-100],以及齿轮缺陷检测^[101-102],也有通过影像仪测量小型齿轮渐开线齿廓的研究^[103-104]。

除对几何精度的关注外,业界对齿轮副噪声、振动和使用寿命的要求也在逐步提高,研发出直接利用表面粗糙度仪获取齿轮表面信息^[105-106]、利用工业 CT 检测齿轮尺寸和内部缺陷^[107]的方法,以使齿轮副获得更好的使用性能。但是以上测量方法的测量精度不高,一般只能用于 5 级精度及以下齿轮的测量。

6.3 渐开线样板计值范围的设置

在利用渐开线样板校准齿轮测量仪器时,通常希望渐开线样板的计值范围可以涵盖同基圆参数的标准齿轮的计值范围或与其相近,但目前 1 级渐开线样板的计值范围与同基圆参数标准齿轮的计值范围却存在一定差异,不利于渐开线测量仪器的校准。

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处给出待测齿廓,基圆半径 $r_b \leq 60 \text{ mm}$ 的 1 级渐开线样板应从展开长度 3 mm 处开始计值,基圆半径 $r_b > 60 \text{ mm}$ 的 1 级渐开线样板的应从展开长度 5 mm 处开始计值(对 2 级渐开线样板只有计值长度的要求而没有起始计值展开长度的要求)。渐开线样板与同基圆参数标准齿轮的计值范围如图 20 所示。标准齿轮的计值范围按与同参数齿轮啮合时计算^[108](不考虑齿顶倒角):

$$\begin{cases} \rho_{\text{start}} = m_n z \sin \alpha_{\text{wt}} - \sqrt{r_a^2 - r_b^2} \\ \rho_{\text{end}} = 0.95 \left(\sqrt{r_a^2 - r_b^2} - \rho_{\text{start}} \right) + \rho_{\text{start}} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: ρ_{start} 、 ρ_{end} 分别为渐开线起始、终止计值的展开长度, α_{wt} 为端面啮合角, r_b 为基圆半径, r_a 为齿顶圆半径, $r_a = m_n z / 2 + m_n$ 。

图 20 中,标记点位置为计值范围的中心,短横线为计值的上下界,小模数标准齿轮的法向模数 $m_n = 1 \text{ mm}$,大模数标准齿轮的基圆半径 $r_b = 25, 50, 60 \text{ mm}$ 时对应的法向模数 $m_n = 2, 5, 6 \text{ mm}$,其余法向模数 $m_n = 10 \text{ mm}$ 。基圆半径 r_b 在 200~300 mm 的标准齿轮渐开线起始计值的展开长度在同基圆参数渐开线样板计值范围的中心附近,基圆半径 $r_b = 400 \text{ mm}$ 、法向模数 $m_n = 10$

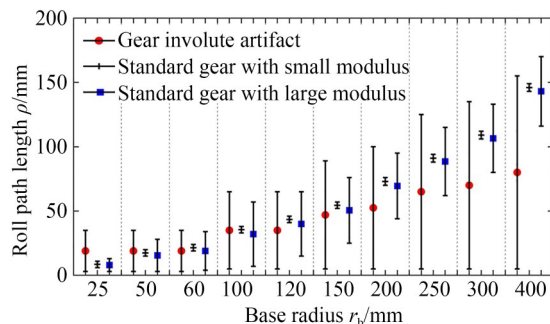


图 20 渐开线样板与标准齿轮计值范围的比较

Fig. 20 Comparison of evaluation ranges of gear involute artifacts with those of standard gears

mm 的标准齿轮渐开线的计值范围已经超出了同基圆参数渐开线样板的计值范围,渐开线样板只

综上,基圆半径 $r_b \geq 200$ mm 的 1 级渐开线样板使用展开长度向基圆外偏移更有利于渐开线的量值溯源与量值传递。另外,我国没有推荐基圆半径 $r_b \leq 25$ mm 的渐开线样板的计值范围和结构,而且基圆半径 $r_b = 25$ mm 标准齿轮的计

有约 1/3 的计值范围在同基圆参数标准齿轮的计值范围内。

值范围主要在同参数渐开线样板的齿根部。而渐开线齿廓在基圆附近会累积更大的加工误差与测量误差^[29,109-110],所以对于微小型齿轮的计量方法与渐开线样板结构还有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] 科技部. “十三五”先进制造技术领域科技创新专项规划 [EB/OL]. (2017-05-02) [2021-09-29]. http://www.gov.cn/xinwen/2017-05/02/content_5190479.htm.
Ministry of Science and Technology. *The 13th Five-Year Plan for Scientific and Technological Innovation Advanced Manufacturing Technology* [EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2017-05/02/content_5190479.htm. (in Chinese)
- [2] 国务院. 计量发展规划(2021-2035 年)[EB/OL]. (2021-12-31) [2022-06-10]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/28/content_5670947.html.
CouncilState. *Quantitative Development Planning (2021-2035)* [EB/OL]. (2021-12-31) [2022-06-10]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/28/content_5670947.html. (in Chinese)
- [3] 全国齿轮标准化技术委员会. 圆柱齿轮 ISO 齿面公差分级制 第 1 部分: 齿面偏差的定义和允许值 GB/T 10095.1-2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
National Gear Standardization Technical Committee. *Cylindrical gears-ISO system of flank tolerance classification-Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to flanks of gear teeth GB/T 10095.1-2022* [S]. Beijing: Standards Press of China, 2022. (in Chinese)
- [4] 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.
- [5] ISO. *Gears-Evaluation of instruments for the measurement of individual gears ISO 18653: 2003* [S]. Geneva: International Standards Organization, 2003.
- [6] *Cylindrical gears-Code of inspection practice-Part 5: Recommendations relative to evaluation of gear measuring instruments: ISO/TR 10064-5: 2005* [S]. International Organization for Standardization (iso), 2005.
- [7] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 齿轮渐开线样板: GB/T 6467—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. *The involute artifact of gear: GB/T 6467-2010* [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011. (in Chinese)
- [8] 中华人民共和国国家市场监督管理总局, 中国计量科学研究院, 德国联邦物理技术研究院. 中德计量合作 40 周年纪念文集 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2019: 87.
State Administration of Market Supervision and Administration of the People's Republic of China, National Institute of Metrology, China, Bundesanstalt-Physikalisch-Technische. *Collection of Commemorative Papers on the 40th Anniversary of Sino German Metrology Cooperation* [M]. Beijing: Standards Press of China, 2019: 87. (in Chinese)
- [9] 唐启昌. 自力更生建立渐开线国家标准[J]. 中国计量, 2008(9): 51-52.
TANG Q CH. Self-reliant establishment of national standards for involute [J]. *China Metrology*, 2008 (9): 51-52. (in Chinese)
- [10] 唐启昌. 用渐开线样板作为渐开线仪器的标准 [J]. 计量工作, 1977(1): 5-8.
TANG Q CH. The involute artifact is used as the standard for involute instruments [J]. *Metrology Science and Technology*, 1977(1): 5-8. (in Chinese)
- [11] 张泰昌. 渐开线样板的检定和使用 [J]. 计量技术. 1986(12): 27-29.
ZHANG T CH. Verification and use of involute artifact [J]. *Metrology Science and Technology*.

- 1986(12): 27-29. (in Chinese)
- [12] 唐启昌. 长度计量检定测试技术讲座(五): 关于齿轮渐开线仪器的正确使用和量值统一(上)[J]. 中国计量, 1997(5): 57-59.
TANG Q CH. Technical lecture on length measurement verification test (V)-on the correct use of gear involute instrument and the unification of quantity value (I)[J]. *China Metrology*, 1997(5): 57-59. (in Chinese)
- [13] 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 solid reference for involute [J]. *Measurement Technique*, 1998(5): 33-36. (in Chinese)
- [14] 王立鼎, 卢占山. 模数 2 基准标准齿轮的研制[J]. 光学机械, 1982(4): 28-34.
WANG L D, LU ZH SH. Development of modular 2 reference standard gear[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1982(4): 28-34. (in Chinese)
- [15] 华恒. 机械工程专家学术成就介绍(46) 精密机械专家王立鼎[J]. 中国机械工程, 1998(6): 82.
HUA H. Introduction to academic achievements of mechanical engineering experts (46) Wang Liding, an expert in precision machinery [J]. *China Mechanical Engineering*, 1998(6): 82. (in Chinese)
- [16] 国家计量科学数据中心. 全国社会公用计量标准[EB/OL]. (2021-09-30) [2021-09-30]. <https://msd.nmnc.ac.cn/openstd/web/index.php?r=openstd%2Flist&keyword=%E6%B8%90%E5%BC%80%E7%BA%BF>.
National Metrological Science Data Center. *National Social Public Measurement Standards* [EB/OL]. (2021-09-30) [2021-09-30]. <https://msd.nmnc.ac.cn/openstd/web/index.php?r=openstd%2Flist&keyword=%E6%B8%90%E5%BC%80%E7%BA%BF>. (in Chinese)
- [17] 国家质量监督检验检疫总局. 齿轮测量中心校准规范: JJF 1561—2016[S]. 北京: 中国质检出版社, 2016.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. *Calibration specification for gear measuring centers: JJF 1561—2016* [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016. (in Chinese)
- [18] 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.
- [19] KNIEL K, CHANTHAWONG N, EASTMAN N, *et al.* Supplementary comparison EURAMET. L-S24 on involute gear standards[J]. *Metrologia*, 2014, 51(1A): 04001.
- [20] METZ D, FERREIRA N, CHAILLOT J, *et al.* Integration of a piezoresistive microprobe into a commercial gear measuring instrument [J]. *Precision Engineering*, 2019, 55: 349-360.
- [21] TAKEOKA F, KOMORI M, KUBO A, *et al.* Design of laser interferometric measuring device of involute profile[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2008, 130(5): 1.
- [22] 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.
- [23] TAGUCHI T, MING A G, SHIMOJO M. Development of high precision gear measuring machine [J]. *International Journal of Mechatronics and Automation*, 2011, 1(3/4): 181.
- [24] 国家质量监督检验检疫总局. 齿轮渐开线样板检定规程: JJG 332—2003[S]. 北京: 中国计量出版社, 2004.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. *Verification regulation of gear involute Masters: JJG 332—2003* [S]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2004. (in Chinese)
- [25] MAKAREVICH V. Final report on supplementary comparison COOMET. L-S10: Comparison of length standards for measuring gear parameters [J]. *Metrologia*, 2012, 49(1A): 04004.
- [26] KNIEL K, WEDMANN A, STEIN M, *et al.* COOMET supplementary comparison L-S18 (project: 673/UA-a/15) [J]. *Metrologia*, 2018, 55(1A): 04008.
- [27] JANTZEN S, NEUGEBAUER M, MEEß R, *et al.* Novel measurement standard for internal involute microgears with modules down to 0.1 mm [J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(12): 125012.
- [28] 国家质量监督检验检疫总局. 齿轮渐开线测量仪器校准规范: JJF 1124—2004[S]. 北京: 中国计量出版社, 2004.
General Administration of Quality Supervision, In-

- spection and Quarantine of the People's Republic of China. *Calibration specification for Gear involute Measuring instruments: JJF 1124—2004*[S]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2004. (in Chinese)
- [29] 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. (in Chinese)
- [30] 凌四营,凌明,石照耀,等. 1级齿轮渐开线样板的国内量值比对[J]. 光学精密工程, 2022, 30(22): 2869-2875.
LING S Y, LING M, SHI ZH Y, *et al.* Measurement comparison for class-1 gear involute artifact in China[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(22): 2869-2875. (in Chinese)
- [31] ZELENÝ V, LINKEOVÁ I, SÝKORA J, *et al.* Mathematical approach to evaluate involute gear profile and helix deviations without using special gear software[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, 135: 150-164.
- [32] 凌四营. 超精密磨齿中的机床精化及磨齿工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
LING S Y. *Research on Machine Refinement and Processing for Ultra-precision Gear-grinding*[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [33] 凌四营,王立鼎,李克洪,等. 基于1级精度基准标准齿轮的超精密磨齿工艺[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7): 1596-1604.
LING S Y, WANG L D, LI K H, *et al.* Ultra-precision gear-grinding processing based on class 1 master gear[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7): 1596-1604. (in Chinese)
- [34] WANG Q, PENG Y, WIEMANN A, *et al.* Improved gear metrology based on the calibration and compensation of rotary table error motions [J]. *CIRP Annals*, 2019, 68(1): 511-514.
- [35] WIEMANN A K, STEIN M, KNIEL K. Traceable metrology for large involute gears[J]. *Precision Engineering*, 2019, 55: 330-338.
- [36] NIK, PENG Y, STÖBENER D, *et al.* *Cylindrical Gear Metrology* [M]. Precision Manufacturing. Singapore: Springer Singapore, 2019: 1-29.
- [37] TAGUCHI T, KONDO Y. Evaluation of a high-precision gear measuring machine for helix measurement using helix and wedge artifacts[J]. *Measurement Science and Technology*, 2016, 27(8): 084008.
- [38] KONDO Y, KONDO K, OSAWA S, *et al.* Evaluation of instruments for helix measurement using wedge artifact [J]. *Precision Engineering*, 2010, 34(4): 667-674.
- [39] 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): 1.
- [40] KOMORI M, TAKEOKA F, KONDO Y, *et al.* High-precision concave spherical artifact for accuracy evaluation of a measuring instrument for an internal gear[J]. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 2016, 10(4): JAMDSM0063.
- [41] KONDO Y, SASAJIMA K, NOGUCHI S, *et al.* Tooth form evaluation using ball artifact development of a measuring instrument of a ball center distance traceable to national standard of length [J]. *Key Engineering Materials*, 2008, 381/382: 595-598.
- [42] 石照耀,张健,陈洪芳. 双球渐开线样板的理论分析和应用[J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 2963-2969.
SHI ZH Y, ZHANG J, CHEN H F. Theoretical analysis of double-ball artifact and its applications [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2963-2969. (in Chinese)
- [43] 陈洪芳,张健. 齿轮双球样板的设计方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(3): 361-365.
CHEN H F, ZHANG J. Design method of a double-ball artifact of gears[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2012, 33(3): 361-365. (in Chinese)
- [44] 陈洪芳,梁超伟,李宝山,等. 新型双轴式圆弧型大尺寸渐开线样板的工作原理[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(1): 1-7.
CHEN H F, LIANG CH W, LI B SH, *et al.* Working principle of novel double-axis arc-shaped large-size involute artifact [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2022, 48(1): 1-7. (in Chinese)
- [45] CHEN H, LIANG C, SHI Z, *et al.* New design

- method for large involute artifacts [J]. *Precision Engineering*, 2022, 76: 190-198.
- [46] LANZA G, VIERING B. A novel standard for the experimental estimation of the uncertainty of measurement for micro gear measurements [J]. *CIRP Annals*, 2011, 60(1): 543-546.
- [47] WESS D B. Development of a novel lead master consisting of an offset sphere [J]. *Precision Engineering*, 1998, 22(4): 206-219.
- [48] KNIEL K, FRANKE M, HÄRTIG F, *et al.* Detecting 6 DoF geometrical errors of rotary tables [J]. *Measurement*, 2020, 153: 107366.
- [49] GUENTHER A, STÖBENER D, GOCH G. Self-calibration method for a ball plate artefact on a CMM [J]. *CIRP Annals*, 2016, 65(1): 503-506.
- [50] KOMORI M, TAKEOKA F, KITEN T, *et al.* Calibration method for magnetically self-aligned multiball pitch artifact and accuracy upon reassembly [J]. *Precision Engineering*, 2016, 43: 187-199.
- [51] KOMORI M, TAKEOKA F, KITEN T, *et al.* Magnetically self-aligned multiball pitch artifact using geometrically simple features [J]. *Precision Engineering*, 2015, 40: 160-171.
- [52] KONDO Y, OSAWA S, SATO O, *et al.* Evaluation of instruments for pitch measurement using a sphere artifact [J]. *Precision Engineering*, 2012, 36(4): 604-611.
- [53] WANG Q C, MILLER J, VON FREYBERG A, *et al.* Error mapping of rotary tables in 4-axis measuring devices using a ball plate artifact [J]. *CIRP Annals*, 2018, 67(1): 559-562.
- [54] GUENTHER A, KNIEL K, HÄRTIG F, *et al.* Introduction of a new bevel gear measurement standard [J]. *CIRP Annals*, 2013, 62(1): 515-518.
- [55] 孔玉梅. 基准级渐开线激光测量仪的精度提升方法研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- KONG Y M. *Research on Precision Improvement Method of Reference Involute Laser Measuring Instrument* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022. (in Chinese)
- [56] 姜志峰. 基准级渐开线测试理论与技术研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- LOU ZH F. *Research on Theory and Technology of Benchmark Involute Test* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [57] RUDOLF O. History of gear measuring machines and traceability 1900-2006 [J]. *Gear Product News*. 2006, 10: 20-25.
- [58] LING S Y, LOU Z F, WANG L D, *et al.* Optimal forming principle and grinding experiment of the ultra-precision involute profile [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2013, 227(3): 375-382.
- [59] 高延新, 张晓琳, 李慧鹏. 齿轮精度与检测技术手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- GAO Y X, ZHANG X L, LI H P. *Technical Manual for Gear Accuracy and Inspection* [M]. Beijing: China Machine Press, 2014. (in Chinese)
- [60] 李小燕, 凌四营, 凌明, 等. 高精度齿轮螺旋线样板的测量方法与仪器 [J]. *光学精密工程*, 2022, 30(17): 2100-2118.
- LI X Y, LING S Y, LING M, *et al.* Measuring methods and instruments of high precision gear helix artifact [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(17): 2100-2118. (in Chinese)
- [61] 彭东林, 付敏, 陈锡侯, 等. 典型位移传感器分类研究与时栅传感器特点分析 [J]. *机械工程学报*, 2018, 54(10): 36-42.
- PENG D L, FU M, CHEN X H, *et al.* Classification study on typical displacement sensors and analysis on the characteristics of time grating sensors [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(10): 36-42. (in Chinese)
- [62] 李尔丽, 薛梓, 黄焱, 等. 全圆连续角度标准装置的系统误差分离与补偿 [J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(3): 1-9.
- LI G L, XUE Z, HUANG Y, *et al.* System error separation and compensation of the continuous full circle angle standard device [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(3): 1-9. (in Chinese)
- [63] HUANG Y, XUE Z, HUANG M, *et al.* The NIM continuous full circle angle standard [J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(7): 074013.
- [64] LIN H, XUE Z, YANG G L, *et al.* Development of a high accurate gear measuring machine based on laser interferometry [C]. *Ninth International Symposium on Precision Engineering Measurement and Instrumentation, SPIE Proceedings. Changsha/Zhangjiajie, China*. SPIE, 2015.
- [65] 林虎, 黄焱, 杨国梁, 等. 新一代齿轮螺旋线基准装置的研制 [J]. *计量科学与技术*, 2022(4):

- 67-73.
- LIN H, HUANG Y, YANG G L, *et al.* Development of the new generation national primary standard for gear helix calibration[J]. *Metrology Science and Technology*, 2022(4): 67-73. (in Chinese)
- [66] KCDB. *CMCs Uncertainty Statements* [EB/OL]. (2022-03-06) [2022-03-06]. <https://www.bipm.org/kcdb/cmc/quick-search?includedFilters=&excludedFilters=&page=0&keywords=gear>.
- [67] OSAKA SEIMITSU KIKAI COTPR. L. *OSK Calibration and Measurement Capability* [EB/OL]. (2022-07-26) [2022-07-26]. http://www.osk-corp.co.jp/en/pages/center5_2.html.
- [68] HÄRTIG F, STEIN M. 3D involute gear evaluation - Part I: Workpiece coordinates[J]. *Measurement*, 2019, 134: 569-573.
- [69] STEIN M, HÄRTIG F. 3D involute gear evaluation - part II: deviations - basic algorithms for modern software validation [J]. *Measurement Science and Technology*, 2022, 33(12): 125003.
- [70] WENDT K, FRANKE M, HÄRTIG F. Measuring large 3D structures using four portable tracking laser interferometers[J]. *Measurement*, 2012, 45(10): 2339-2345.
- [71] HÄRTIG F, CHRISTIAN K, KARIN K, *et al.* Improvement of measurement accuracy by combined evaluation of CMM and tracking interferometer measurements[C]. *XVII IMEKO World Congress Metrology in the 3rd Millennium, IMEKO: Dubrovnik*, 2003: 1172-1175.
- [72] 陈洪芳, 郑博文, 石照耀, 等. 基于激光追踪仪多站位测量的CMM空域坐标修正方法[J]. *中国激光*, 2017, 44(3): 0304003.
- CHEN H F, ZHENG B W, SHI ZH Y, *et al.* CMM spatial coordinate correction method based on laser tracer multistation measurement [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(3): 0304003. (in Chinese)
- [73] 陈洪芳, 孙衍强, 王亚韦, 等. 高精度激光追踪测量方法及实验研究[J]. *中国激光*, 2018, 45(1): 0104003.
- CHEN H F, SUN Y Q, WANG Y W, *et al.* High-precision laser tracking measurement method and experimental study [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(1): 0104003. (in Chinese)
- [74] LIN H, KELLER F, STEIN M. Influence and compensation of CMM geometric errors on 3D gear measurements[J]. *Measurement*, 2020, 151: 107110.
- [75] 李笑宇, 林虎, 薛梓, 等. 激光跟踪多边测量自标定优化方法[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(2): 10-17.
- LI X Y, LIN H, XUE ZH, *et al.* Self-calibration optimization method for laser tracking multilateral measurement [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(2): 10-17. (in Chinese)
- [76] RAFELD E K, KOPPERT N, FRANKE M, *et al.* Recent developments on an interferometric multilateration measurement system for large volume coordinate metrology [J]. *Measurement Science and Technology*, 2022, 33(3): 035004.
- [77] Y-12 *National Security Complex Capabilities* [EB/OL]. (2022-07-28) [2022-07-28]. <https://www.y12.doe.gov/mission/global-security/manufacturing-and-technical-services/oak-ridge-metrology-center/capabilities>.
- [78] *National Institute of Standards and Technology. Back to the Future: Gear Edition* [EB/OL]. (2022-09-12) [2022-12-13]. <https://www.nist.gov/news-events/news/2022/09/back-future-gear-edition>.
- [79] HARTIG F, LIN H, KNIEL K, *et al.* Laser tracker performance quantification for the measurement of involute profile and helix measurements [J]. *Measurement*, 2013, 46(8): 2837-2844.
- [80] HÄRTIG F, LIN H, KNIEL K, *et al.* Standard conforming involute gear metrology using an articulated arm coordinate measuring system [J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(10): 105011.
- [81] 陈洪芳, 闫昊, 石照耀. 面向特大型齿轮的激光跟踪多站位定位[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(9): 2375-2380.
- CHEN H F, YAN H, SHI ZH Y. Laser tracking multi-station positioning method for Mega-gear [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9): 2375-2380. (in Chinese)
- [82] 郭天太, 孙培渊, 刘维, 等. 特大齿轮齿廓偏差测量方法的探究[J]. *工具技术*, 2020, 54(6): 64-67.
- GUO T T, SUN P Y, LIU W, *et al.* Research on measuring method of tooth deviation of extra large gears [J]. *Tool Engineering*, 2020, 54(6): 64-67. (in Chinese)

- [83] 徐星, 王建华. 激光跟踪仪建立齿轮测量坐标系的不确定度分析[J]. 工具技术, 2022, 56(11): 157-160.
- XU X, WANG J H. Uncertainty analysis of gear measuring coordinate system established by laser tracker[J]. *Tool Engineering*, 2022, 56(11): 157-160. (in Chinese)
- [84] 石照耀, 张白, 林家春, 等. 特大型齿轮激光跟踪在位测量原理及关键技术[J]. 光学精密工程, 2013, 21(9): 2340-2347.
- SHI ZH Y, ZHANG B, LIN J CH, *et al.* Principle and critical technology of in-site measurement system with laser tracker for mega gear[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(9): 2340-2347. (in Chinese)
- [85] 林虎, 薛梓, 杨国梁. 一种大齿轮多参量标准样板: CN211346733U[P]. 2020-08-25.
- LIN H, XUE Z, YANG G L. Bull gear multi-parameter standard sample plate: CN211346733U [P]. 2020-08-25. (in Chinese)
- [86] 凌四营, 石照耀, 宋洪侠, 等. 一种连轴装配式大齿轮渐开线样板: CN202111128774.9[P]. 2022-06-14.
- LING S Y, SHI ZH Y, SONG H X, *et al.* A large gear involute artifact assembled with mandrel: 202111128774.9[P]. 2022-06-14. (in Chinese)
- [87] DAI G L, NEUGEBAUER M, STEIN M, *et al.* Overview of 3D micro- and nanocoordinate metrology at PTB [J]. *Applied Sciences*, 2016, 6(9): 257.
- [88] FERREIRA N, KRAH T, JEONG D C, *et al.* Integration of a silicon-based microprobe into a gear measuring instrument for accurate measurement of micro gears[J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(6): 064016.
- [89] METZ D, JANTZEN S, WESSEL D, *et al.* Integration of an isotropic microprobe and a microenvironment into a conventional CMM[J]. *Measurement Science and Technology*, 2019, 30(11): 115007.
- [90] 石照耀, 赵保亚, 于渤, 等. 齿轮特征线统一模型及在齿轮三维误差评定中的应用[J]. 机械工程学报, 2022, 58(24): 1-9.
- SHI ZH Y, ZHAO B Y, YU B, *et al.* Unified model of gear characteristic line and its application in gear three-dimensional error evaluation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(24): 1-9. (in Chinese)
- [91] 石照耀, 赵保亚, 于渤, 等. 齿轮三维误差表征与分解[J]. 机械工程学报, 2022, 58(6): 1-9.
- SHI ZH Y, ZHAO B Y, YU B, *et al.* Characterization and decomposition of three-dimensional error of gear[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(6): 1-9. (in Chinese)
- [92] SHI Z Y, SUN Y Q, WANG X Y, *et al.* Acquisition and assessment of gear holistic deviations based on laser measurement[J]. *Photonics*, 2022, 9(10): 735.
- [93] GUO X, SHI Z, YU B, *et al.* 3D measurement of gears based on a line structured light sensor[J]. *Precision Engineering*, 2020, 61: 160-169.
- [94] KLINGELNBERG. *Klingelberg Hybrid Metrology* [EB/OL]. (2023-05-06) [2023-05-06]. <https://klingelberg.com/en/business-divisions/precision-measuring-centers/hybrid-metrology>.
- [95] GLEASON. *Multi-Sensor Inspection Machines for High Precision Parts* [EB/OL]. (2023-05-06) [2023-05-06]. <https://www.gleason.com/en/products/metrology/metrology-systems/analytical-inspection/gmsl-series-multi-sensor-inspection-including-laser-technology>.
- [96] FUJIO H, KUBO A, SAITOH S, *et al.* Laser holographic measurement of tooth flank form of cylindrical involute gear[J]. *Journal of Mechanical Design*, 1994, 116(3): 721-729.
- [97] FANG S, WANG L, KOMORI M, *et al.* Design of laser interferometric system for measurement of gear tooth flank[J]. *Optik*, 2011, 122(14): 1301-1304.
- [98] YANG P, YANG S, XIAO Y, *et al.* Calibration of geometric distortion based on a reference sheet in oblique laser interferometry [J]. *Optik*, 2019, 183: 47-54.
- [99] GADELMAWLA E S. Computer vision algorithms for measurement and inspection of spur gears [J]. *Measurement*, 2011, 44(9): 1669-1678.
- [100] 石照耀, 方一鸣, 王笑一. 齿轮视觉检测仪器与技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(14): 1415006.
- SHI ZH Y, FANG Y M, WANG X Y. Research progress in gear machine vision inspection instrument and technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(14): 1415006. (in Chinese)
- [101] DONG L, CHEN W F, YANG S Y, *et al.* A

- new machine vision-based intelligent detection method for gear grinding burn[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 125(9/10): 4663-4677.
- [102] ALLAM A, MOUSSA M, TARRY C, *et al.* Detecting teeth defects on automotive gears using deep learning[J]. *Sensors*, 2021, 21(24): 8480.
- [103] 王宁, 段振云, 赵文辉, 等. 齿轮齿廓总偏差视觉测量方法研究[J]. *机械传动*, 2017, 41(11): 28-32.
- WANG N, DUAN ZH Y, ZHAO W H, *et al.* Research on visual measurement method of total deviation of gear tooth profile[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2017, 41(11): 28-32. (in Chinese)
- [104] 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]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(1): 100-109. (in Chinese)
- [105] KOULIN G, ZHANG J, FRAZER R C, *et al.* A new profile roughness measurement approach for involute helical gears [J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(5): 055004.
- [106] 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. (in Chinese)
- [107] 石照耀, 于渤, 宋辉旭, 等. 20年来齿轮测量技术的发展[J]. *中国机械工程*, 2022, 33(9): 1009-1024.
- SHI ZH Y, YU B, SONG H X, *et al.* Development of gear measurement technology during last 20 years [J]. *China Mechanical Engineering*, 2022, 33(9): 1009-1024. (in Chinese)
- [108] ISO. *Gears-Cylindrical involute gears and gear pairs-Concepts and geometry ISO 21771-2007* [S]. Geneva: International Standards Organization, 2007.
- [109] 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. (in Chinese)
- [110] LING M, LING S Y, LI X Y, *et al.* Effect on the measurement for gear involute profile caused by the error of probe position [J]. *Measurement Science and Technology*, 2022, 33(11): 115013.

作者简介:



凌四营(1978—),男,山东日照人,博士,教授,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,主要研究方向为精密机械设计、精密磨齿工艺与测试技术。E-mail:luckling168@163.com

通讯作者:



凌明(1996—),男,山东日照人,博士研究生,2018年于西安建筑科技大学获得学士学位,主要研究方向为齿轮精密加工与测试技术。E-mail:lingming@mail.dlut.edu.cn