

DOI: 10. 19650/j. cnki. cjsi. J2412576

## 论齿轮样板\*

林虎<sup>1</sup>, 石照耀<sup>2</sup>

(1. 中国计量科学研究院 几何量计量科学研究所 北京 100029; 2. 北京工业大学 北京市精密测控技术与仪器工程技术研究中心 北京 100124)

**摘要:** 齿轮样板是齿轮参数量值的标准实物载体,用于将齿轮国家测量标准所复现的量值传递到各级齿轮测量仪器上,从而实现齿轮测量的准确性和一致性,保证齿轮产品质量。全面概述了齿轮样板起源及其发展历程;详细论述了齿轮样板的种类、结构及特点、齿轮样板的测量技术及装置、齿轮样板的国际比对、未来的发展与展望。齿轮样板迄今已历经九十多年发展,其种类在不断丰富、尺度不断延伸、复杂度不断简化,作为一种“有形”的实物量具,目前仍不可替代。未来随着“无形”的虚拟仿真测量技术发展,对“有形”实物样板的依赖将可以减弱,“无形”的技术将可能成为量值传递的新模式。

**关键词:** 齿轮; 齿轮样板; 齿轮测量; 量值传递与溯源; 国际比对; 虚拟测量

**中图分类号:** TH71 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460. 40

## On gear artefacts

Lin Hu<sup>1</sup>, Shi Zhaoyao<sup>2</sup>

(1. Division of Dimensional Metrology, National Institute of Metrology, China, Beijing 100029, China; 2. Beijing Engineering Research Center of Precision Measurement Technology and Instruments, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Gear artefacts are the standard material carriers for gear parameter values, used to transfer the reproduced values from the national gear measurement standard to various gear measuring instruments. This ensures the accuracy and consistency of gear measurements and the quality of gear products. This paper provides a comprehensive overview of the origin and development of gear artefacts, discussing in detail their types, structures, characteristics, measurement techniques and devices, international comparisons, and future development prospects. Over a development history of more than ninety years, gear artefacts have evolved to include diverse types, extended scales, and simplified complexities. As “tangible” material measures, they remain irreplaceable. However, with the advancement of “intangible” virtual simulation measurement technology, the reliance on “tangible” material artefacts is expected to decrease, and “intangible” technology may become a new mode of quantity value transmission in the future.

**Keywords:** gear; gear artefacts; gear measurement; transmission and traceability of quantity values; international comparison; virtual measurement

## 0 引言

齿轮是工业装备的核心基础零部件,其质量是影响装备性能的关键因素<sup>[1]</sup>。为控制齿轮质量,各国齿轮行业配置了大量高精度齿轮测量仪器,齿轮仪器种类多、测量原理各不相同,为了实现仪器的量值统一及国际互认,需要借助齿轮样板来对齿轮仪器校准和修正,保证其测

量准确性和一致性,进而保证齿轮制造质量,为齿轮国际贸易提供计量技术支撑。

世界主要的齿轮工业大国,普遍建立了齿轮量值传递与溯源金字塔体系<sup>[2-3]</sup>。在该金字塔体系中,顶端是各国建立的齿轮国家测量标准,具有最高准确性,向下依次是校准实验室的标准仪器、生产企业的测量仪器、最底层是大量的齿轮零部件产品。从上往下,是齿轮量值传递链条,而从下往上就是齿轮量值溯源链条。齿轮量值传

递或溯源链条不间断,依靠的就是上下层之间连接的各种齿轮样板。

同样,各国之间开展齿轮量值国际比对,依靠的也是传递齿轮样板。因此,齿轮样板是齿轮量值的标准实物载体,具有不可替代性。

## 1 起源与历程

齿轮样板的起源及发展伴随着齿轮加工和测量技术

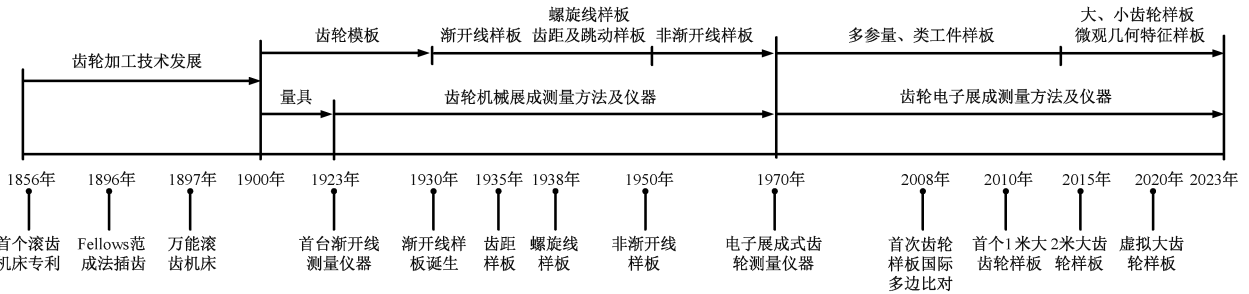


图1 齿轮样板发展历程

Fig. 1 Development history of gear artifacts

一开始是单独制造一件齿形标准的齿轮作为参考模板,后续生产的齿轮与该参考模板进行人工比较,从而判断齿形加工误差。这种方式效率低,且不准确,随后20世纪20年代起人们开始研究齿轮的精确测量方法,并发明了机械式齿轮展成测量仪器。1922年,世界上第一个通过基圆展成来测量渐开线齿形的方法专利出现在瑞士<sup>[6]</sup>。1923年,Zeiss发明了首台基圆盘式渐开线齿形测量仪器<sup>[7]</sup>。随后一直到20世纪60年代末,相继出现了单盘式、圆盘杠杆式、正弦杠杆式、靠模杠杆式等齿形测量仪器<sup>[8]</sup>。齿形测量仪器的大量出现,需要一种具有标准渐开线齿廓的样板来验证其精度,并对存在的仪器误差进行调整。因此,渐开线样板在1930年左右开始出现。1930年以后,更为复杂的螺旋齿轮被加工出来,1938年左右,通过采用正弦尺机构,实现了螺旋线的测量。但是,正弦机构很难准确设定,为此,人们发明了已知螺旋角的螺旋线样板。通过对螺旋线样板的测量结果,就可以准确设定正弦尺机构的角度了。1935年以后,出现了针对齿轮齿距和跳动误差检测的仪器,相应地,齿距样板也被发明用于仪器精度的检测和调整。齿轮样板的诞生,使得当时的西方工业国家计量部门和机构如德国联邦物理技术研究院(physikalisch-technische bundesanstalt,PTB)、原美国国家标准局(national bureau of standards,NBS)等开始重视齿轮样板的相关计量技术研究,基于机械展成式原理的齿轮标准装置和标准样板被研制出来。考虑到高精度渐开线样板加工难度大的问题,20世纪中期以后,部分学者开始研究探索基于基本几

的发展,历经九十多年发展历程,如图1所示。

19世纪以后,工业革命促使齿轮加工技术得到了快速发展<sup>[4]</sup>。1856年Schiele申请了首个齿轮滚齿机床的专利,1896年Fellows发明了革命性的范成法齿轮插齿工艺和机床,1897年Pfafter发明了更为通用的万能滚齿机床,1916年Maag发明了蝶形砂轮的磨齿机<sup>[5]</sup>……各种齿轮加工新技术的出现使得齿轮能够大规模生产,并在形状和性能方面得到改进。齿轮的大规模生产使得人们开始重视齿轮的质量把控,齿轮样板也随之诞生。

何特征的非渐开线样板,各种非渐开线样板开始出现<sup>[9]</sup>。

20世纪70年代以后,电子展成式测量技术的出现,宣告了机械展成式测量技术发展的终结。电子展成式的齿轮测量仪器功能强大,可以测量齿轮的齿形、螺旋线、齿距及跳动等多个参量,迅速成为主流的齿轮测量设备,替代了旧的机械展成式测量仪器。为了更全面的评估电子展成式测量仪器的精度,参数更多、类似齿轮工件的齿轮样板相继被研制出来,这种样板由于与企业生产的齿轮在外形尺寸、参数及材质上相近,可以更为真实地反映仪器测量实际工件的不确定度水平<sup>[10]</sup>。相应地,为了适应类工件样板的测量,或者实现溯源扁平化从而缩短不确定度传递链条,多数国家的齿轮测量标准装置普遍更新为基于电子展成式测量原理的新一代高精度测量仪器<sup>[11]</sup>,并建立了较为完善的齿轮量值传递与溯源金字塔体系(图2)。

进入21世纪以后,全球能源结构加快调整,风能作为一种绿色新能源,在全球范围内得到了快速发展。大齿轮是风能系统的关键零部件,各种大型的齿轮测量仪器在全球范围内得到广泛应用<sup>[12]</sup>。为保证大齿轮的产品质量、保证大型测量仪器的测量准确性,满足大齿轮量值可追溯性的要求,德国PTB于2009年率先开展了大齿轮计量研究,并研制出两件大齿轮样板<sup>[13-14]</sup>。另一方面,同样属于齿轮极端量的小齿轮,也在近20年内受到重视,小齿轮的样板也被研制出来<sup>[15-18]</sup>。21世纪以来,信息化、数字化等新技术在齿轮技术领域不断渗透,对传统基于齿轮实物样板的精度评估方式产生了变革性的影

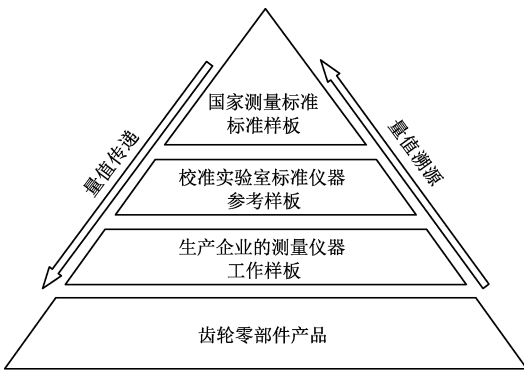


图2 齿轮量值传递与溯源金字塔体系

Fig. 2 Transmission and traceability pyramid system for gear quantity values

响,新的评估方法将不再依赖于高精度的齿轮实物样板,而是基于虚拟的齿轮样板,采用复杂的仿真模型和算法,来对仪器的精度进行评估<sup>[19-20]</sup>。

## 2 齿轮样板的种类

齿轮样板可依据其所表征的齿轮几何特征来分类,依据 ISO/TR 10064-5:2005 及 ISO 18653:2003 的推荐,齿轮样板可分为渐开线样板、螺旋线样板、齿距样板、径向跳动样板、齿厚样板、类工件样板及非渐开线样板。除上述表征宏观尺度特征的样板之外,近些年还出现了表征微观几何特征的齿轮样板,如齿轮粗糙度样板及齿轮波度样板。

### 2.1 渐开线样板

如图3所示,渐开线最早是由荷兰数学家 Huygens 于1673年提出的<sup>[21-22]</sup>,1765年瑞士数学家 Euler 将渐开线齿形引入齿轮<sup>[7,23]</sup>。由于渐开线齿轮的传动优越性,在工业中得到了广泛应用并占据主导地位。渐开线样板要求具有标准的渐开线齿廓。对于加工精度,ISO 18653:2003 推荐不低于 ISO 1328-1 中的5级齿轮精度<sup>[24]</sup>,齿面粗糙度 Ra 值优于 0.4 μm。渐开线样板国家标准 GB/T 6467-2010 按加工精度将样板分为1级和2级<sup>[25]</sup>,其中1级样板要求具有两个尺寸相同的异侧齿廓面,并能从基圆开始给出测量齿廓,齿面粗糙度 Ra 值小于等于 0.1 μm。对于基圆半径小于 100 mm 的1级渐开线样板,齿廓形状偏差小于等于 1.0 μm。而同等尺寸(模数 3 mm,基圆半径 100 mm)的最高精度1级齿轮的齿廓形状偏差小于等于 1.7 μm<sup>[26]</sup>,可见,对渐开线样板的加工精度要求非常严苛。

除了加工精度要求高,在几何尺寸上,相对正常规格的齿轮来说,渐开线样板的齿轮模数相对较大。这是为了在常规基圆尺寸上,获得更长的渐开线展开长度,从而

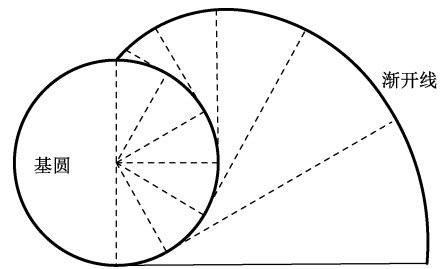


图3 渐开线

Fig. 3 Involute

对仪器在更大测量范围内评估其精度。如图4所示,为两个相同基圆,不同模数( $m=1$  mm 及  $m=3$  mm)的齿轮其齿顶圆渐开线展开长度。GB/T 6467-2010 对不同基圆半径的渐开线展开长度有详细规定,比如基圆半径 60 mm 的样板,要求展长大于 44 mm,按标准齿廓参数来计算得到样板的模数要大于 10 mm。同理,对于基圆半径 150 mm 的样板,其模数要大于 17 mm。

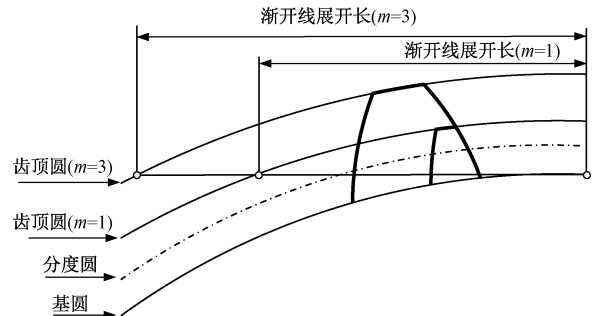


图4 不同模数齿轮的渐开线展开长度

Fig. 4 Lengths of roll with different gear modules

除了以上设计参数及加工精度要求,渐开线样板还要求长期保持稳定的几何特性,这对其所用的材料、热加工处理方法及后期保养维护都有较高要求。

因此,高精度、大模数以及长期稳定性的要求,使得渐开线样板的加工难度大,具有极大挑战。

目前渐开线样板主要有两类,一类是双基圆盘式样板,如图5和6所示。这类样板上面加工了2个同尺寸高精度的基圆盘,主要是为了能按渐开线展成原理,在长导轨上实现机械纯滚动测量<sup>[6,27]</sup>,该类样板只有一个基圆尺寸。

另外一类是芯轴式样板,该类样板没有双基圆盘,一般通过芯轴上的顶尖孔进行定位和固定,按机械或电子展成式原理来测量。芯轴式样板一般具有一个或二个基圆尺寸。图7为德国 Zeiss 公司制造的双基圆渐开线样板,2个基圆半径分别是 60 mm 和 150 mm。图8为 Fellows 制造的一种特殊的渐开线样板,在其齿廓面中部平行于轴线方向,加工了一个沟槽,深度 30 μm 左右,主

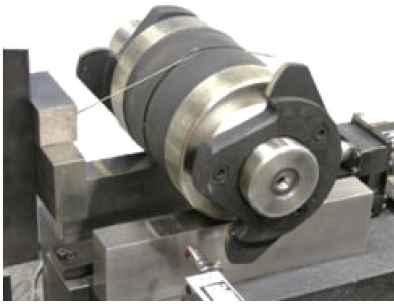


图5 PTB 双基圆盘式样板

Fig. 5 Involute artifact with double base discs from PTB



图6 日本京都大学双基圆盘式样板

Fig. 6 Involute artifact with double base discs from KYOTO



图7 Zeiss 双基圆渐开线样板

Fig. 7 Involute artifact with double base circles from Zeiss



图8 Fellows 渐开线样板

Fig. 8 Involute artifact from Fellows

要用于检验测头的空程<sup>[28]</sup>。图9为瑞士Maag公司制造的渐开线样板,样板为单个大模数轮齿,模数22mm,基

圆半径100mm。在国内,大连理工大学王立鼎院士团队很早就开始了高精度渐开线样板的研制<sup>[29]</sup>。为了突破现有渐开线样板基圆数量的限制,他们近年研制出了一种新型的三基圆渐开线样板<sup>[30]</sup>(图10),样板的3种基圆半径分别是50mm,100mm及131mm。



图9 Maag 渐开线样板

Fig. 9 Involute artifact from Maag

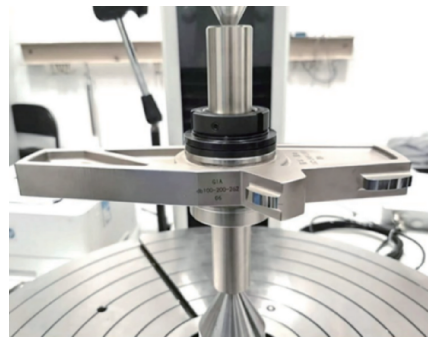


图10 大连理工大学三基圆渐开线样板

Fig. 10 Involute artifact with three base circles from DLUT

## 2.2 螺旋线样板

螺旋线样板是一种具有标准渐开螺旋面的样板,主要用于表征齿轮螺旋线特征。螺旋线样板上一般具有多条螺旋线特征,螺旋角度和旋向各不相同。ISO/TR 10064-5:2005推荐螺旋线样板上具有螺旋角相同的左旋和右旋两条螺旋线,及螺旋角为零的直齿齿向线,其齿宽大于等于100mm<sup>[28]</sup>。螺旋线样板国家标准GB/T 6468-2010将样板分为1级和2级,其中1级样板要求具有0°齿向和相同角度的左旋和右旋螺旋线各一条,齿宽大于90mm<sup>[31]</sup>。螺旋线样板的端截面也是标准的渐开线齿廓,但是其渐开线的展开长度相对渐开线样板要短不少。

螺旋线样板的结构基本都是芯轴式,如图11所示,为瑞士Maag公司制造的螺旋线样板,两条螺旋线分别为左旋和右旋35°,基圆半径100mm,齿宽160mm。图12为美国Gleason公司制造的螺旋线样板,具有0度直齿和



图 11 Maag 螺旋线样板

Fig. 11 Helix artifact from MAAG



图 13 Fellows 螺旋线样板

Fig. 13 Helix artifact from Fellows



图 12 Gleason 螺旋线样板

Fig. 12 Helix artifact from Gleason



图 14 中国计量院螺旋线样板

Fig. 14 Helix artifact from NIM

左右旋  $35^\circ$  螺旋线。图 13 为美国 Fellows 公司制造的多角度螺旋线样板,具有螺旋角  $0^\circ$ ,左旋  $8^\circ$ ,左旋  $23^\circ$ ,左右旋  $41^\circ$  及左旋  $52^\circ$  共 6 条螺旋线。螺旋齿面模数仅为  $1\text{ mm}$  左右,因此齿面非常窄。值得一提的是,该样板在直齿齿宽中部同样加工了一个沟槽,作用与渐开线样板的沟槽相同。为了突破现有螺旋线样板角度范围的限制,中国计量科学研究院(简称中国计量院,NIM)研制了多角度螺旋线样板(图 14),具有螺旋角  $0^\circ$ ,左右旋  $15^\circ$ ,左右旋  $30^\circ$  及左右旋  $45^\circ$  共 7 条螺旋线,分度圆直径  $200\text{ mm}$ ,齿宽  $100\text{ mm}$ 。

### 2.3 齿距及径向跳动样板

齿距样板是具有—圈等角度分布在圆周方向的渐开线齿廓样板,主要表征的是圆周方向上的轮齿分布的均匀性。径向跳动样板与齿距样板类似,但主要用于表征测球在齿槽内与左右齿面同时接触时,其球心在齿轮径向方向的位置变动性。因此,齿距和径向跳动样板,都可以采用标准渐开线齿轮来代替。在我国,大连理工大学王立鼎院士团队成功研制 1 级精度基准齿轮<sup>[32-34]</sup>,指标达到国际领先水平,为我国提供了高精度的标准齿轮样

板,如图 15 所示。另外,日本的小笠原公司制造了模数  $0.1\sim 1\text{ mm}$  范围内的小模数标准齿轮,可作为小模数的齿轮样板。



图 15 大连理工大学研制的基准齿轮

Fig. 15 Primary standard gear artifact from DLUT

齿距样板还可分为外齿轮齿距样板和内齿轮齿距样板,如图 16 所示。

### 2.4 齿厚样板

齿厚样板是同时具有左右渐开线齿面特征的一些轮齿或齿槽的样板。主要表征的是分度圆上的齿厚或齿槽

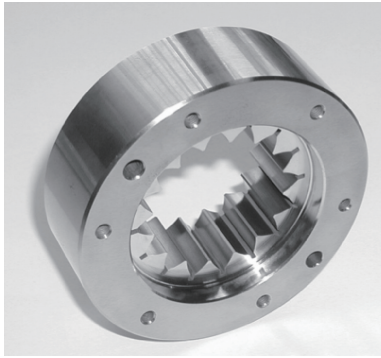


图 16 内齿轮样板

Fig. 16 Internal gear artifact

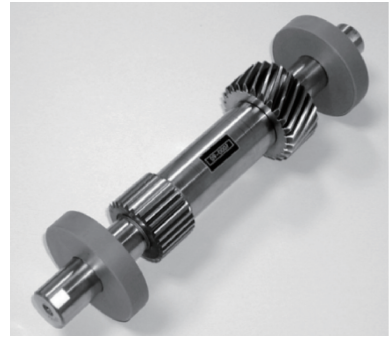


图 18 类工件样板

Fig. 18 Workpiece-like artifact

宽。该类样板只要求圆周上分布有单个或多个轮齿或齿槽即可,如图 17 所示。当然齿厚样板也可以采用标准渐开线齿轮来代替。



图 17 齿厚样板

Fig. 17 Tooth thickness artifact

## 2.5 类工件样板

顾名思义,类工件样板就是与齿轮工件在参数、尺寸及材料上相似,但其加工精度要相对高一些。这种样板所能表征的齿轮几何特征最全,包括渐开线、螺旋线、齿距、跳动及齿厚等。事实上,高精度的标准齿轮就可以作为类工件样板。如图 18 所示,样板上包含直齿和斜齿两种齿轮几何特征。

2005 年左右,德国 Frenco 公司研制了一系列类工件样板<sup>[6]</sup>,如图 19 所示,这类样板特别命名为 IC 样板,IC 意思是条件一致(identity condition),即可以根据实际工件的参数、尺寸来定制相同的样板。按照 ISO 18653:2003 或 ISO 15530-3:2011 来对齿轮测量仪器不确定度进行评估的时候,可以采用一个类工件样板。这样可以简化不确定度评估的过程,并获得与实际工件测量时相



图 19 Frenco IC 样板

Fig. 19 IC artifact from Frenco

近的评估结果<sup>[10,24,35]</sup>。

## 2.6 大齿轮及小齿轮样板

大齿轮及小齿轮属于齿轮的极端量,对其加工、测量都具有极大挑战<sup>[36-38]</sup>。

在大齿轮样板出现以前,大齿轮的量值传递和溯源一直是个难题。2009 年德国 PTB 率先开展了大齿轮计量研究,并研制出两件大齿轮样板。如图 20 所示,第 1 件样板直径 1 000 mm,模数 25 mm,齿宽 400 mm。为了减小样板质量,巧妙设计成 50° 的扇形尺寸,重量降低到 450 kg,当需要在回转台上使用时,可以加上一个对称的配重块<sup>[13]</sup>。样板设计了直齿、左旋 20° 及右旋 10° 的齿槽,可以表征的齿轮几何特征包括渐开线及左右螺旋螺旋线。为应对现场温度环境对工件的影响,样板外表非工作面镀了金层,可以保证样板的热稳定性。同时,在样板周围设计了多个测温孔,可以全面监测样板的内外温度场变化。基于该样板,笔者与 PTB 曾开展了便携式坐标测量机测量大齿轮的方法研究<sup>[39-41]</sup>,设计了两种标尺来辅助测量,以满足 ISO 标准对齿廓测量和螺旋线测量时,

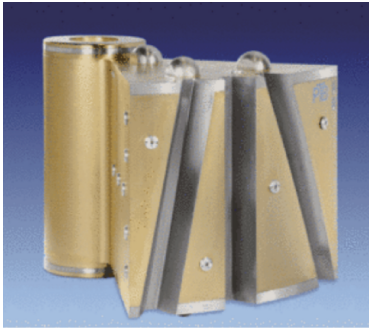


图20 PTB扇形大齿轮样板

Fig. 20 Large gear segment artifact from PTB

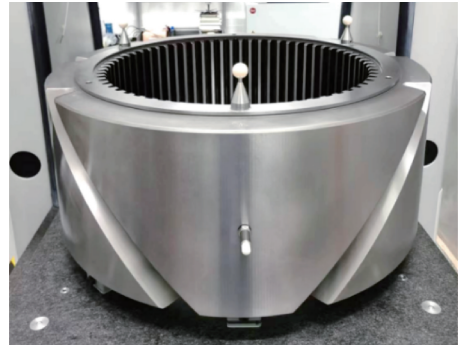


图22 中国计量院大齿轮样板

Fig. 22 Large gear artifact from NIM

测量点分布的要求。

第2件大齿轮样板为齿圈形状(图21),直径1 980 mm,是目前世界上最大的齿轮样板,质量达到了2 700 kg。与第1件不同,该样板考虑了风电大齿轮中存在大量内齿轮,因此各设计了3组内齿和外齿齿槽,每组都包含直齿、左旋20°及右旋10°的齿槽,模数18 mm,齿宽420 mm。为了监测样板的内部温度场变化,在样板外表面布置了12个测温孔<sup>[14]</sup>。为了减小重力变形的影响,PTB设计制造了一种新型的6点支撑底座,相对于3点支撑可以更好的减小大齿轮样板的重力变形。但是该6点支撑底座存在一定的过定位,为此其中5个支撑需要采用弹簧机构,从而适应过定位所引起的底座变形。



图21 PTB大齿圈样板

Fig. 21 Large gear ring artifact from PTB

同样是为了应对大齿轮计量的挑战,中国计量院于2019年研制了一种新型的大齿轮齿圈样板(图22)。与PTB的大齿轮样板不同,该样板在外齿面设计了直齿、左右旋15°、左右旋30°及左右旋43°共7个齿槽,外齿齿顶圆直径1 000 mm,模数25 mm,齿宽400 mm。同时,在内齿面设计了标准的内齿轮,内齿轮齿顶圆直径704 mm,模数11 mm,齿宽400 mm。该样板可以表征的大齿轮几何特征包括渐开线,0°~43°左右旋螺旋线以及齿距,是目前世界上螺旋角最大的齿轮样板,也是参量最全的大齿轮样板。

针对小齿轮的计量研究,PTB于2016年左右研制了两种小齿轮样板,如图23和24所示。两种小样板分别是外齿齿廓和内齿齿廓,样板的齿轮模数包含了0.1 mm,0.2 mm,0.5 mm及1 mm<sup>[16]</sup>。样板分别采用了碳钢和钛两种金属材料制造,其中钛金属非常适合计算机断层扫描(computer tomography, CT)测量。PTB还针对小齿轮测量研发了直径50 μm的微型探针<sup>[18]</sup>,并开展了接触式、光学及CT扫描3种不同原理的小齿轮样板测量研究<sup>[17]</sup>。



图23 外齿小齿轮样板

Fig. 23 Small external gear artifact



图24 内齿小齿轮样板

Fig. 24 Small internal gear artifact

## 2.7 基本几何特征的非渐开线样板

针对高精度齿轮样板加工难度大的问题,20世纪中期以后,部分学者开始研究探索基于基本几何特征的非渐开线样板。基本几何特征包括平面、球、圆柱等,目前

这些几何特征的加工精度最高已经可以达到纳米量级,远远高于渐开线齿轮的加工精度<sup>[42]</sup>。

日本计量院(National Metrology Institute of Japan, NMIJ)在该领域取得了较多成果,主要包括采用高精度的陶瓷球及钢球替代渐开线齿轮,研制了双球样板<sup>[43]</sup>;采用斜切圆柱体的斜平面替代螺旋线,研制了楔形样板<sup>[44]</sup>;基于双球样板原理,研制了多球样板来替代齿距样板<sup>[45]</sup>。

采用这些基本几何特征来替代复杂的渐开线,特别是替代大齿轮和小齿轮两个极端量,将有良好的发展前景。北京工业大学研制了一种新型双轴式圆弧型大尺寸齿轮样板(图25),采用窄圆柱面替代渐开线齿面<sup>[46]</sup>,极大降低了样板体积与重量。德国卡尔斯鲁厄理工学院先后研制了微型双球样板<sup>[47]</sup>和微型圆柱样板<sup>[48]</sup>(图26),后者还可以表征齿轮螺旋线和齿距几何特征。

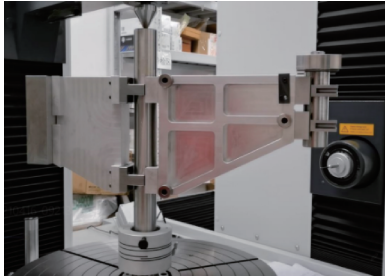


图25 双轴式圆弧型大尺寸样板

Fig. 25 Double-axis arc-shaped large-size artifact



图26 微型圆柱样板

Fig. 26 Micro cylinders artifact

## 2.8 齿轮微观几何特征样板

渐开线、螺旋线及齿距等是宏观尺度上的几何特征,对于高精度齿轮,当控制了宏观几何特征误差后,齿面的微观粗糙度误差及介于微观和宏观之间的波度误差,就会成为齿轮传动磨损和噪声的主要因素。尽管部分齿轮测量仪器已具备对齿轮粗糙度及波度的测量功能,但是其测量准确性及溯源性,还没有解决<sup>[49]</sup>。为此,德国PTB在该领域开展了深入研究,提出并研制了齿轮粗糙

度样板(图27)和齿轮波度样板<sup>[50]</sup>(图28)。

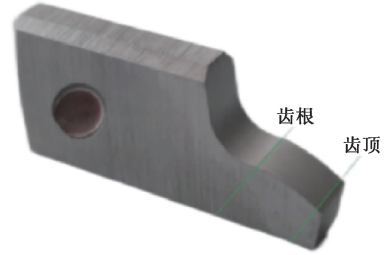


图27 齿轮粗糙度样板

Fig. 27 Gear roughness artifact



图28 齿轮波度样板

Fig. 28 Gear waviness artifact

度样板为单独一个片状结构,可以方便用于常规的粗糙度或轮廓度测量仪的扫描测量,当需要在齿轮测量仪器上测量时,可以安装到一个配套芯轴上,成为可旋转测量的轮齿。这种设计有效解决了传统基于平面坐标粗糙度测量评价和齿轮基于展开长度坐标齿廓测量评价的不一致性。粗糙度样板的齿廓采用电火花加工制造,模拟了一个高度遵循均匀正态分布的轮廓。

齿轮波度样板是在渐开线齿廓表面上叠加了特定的设计谐波,通过对波状结构进行建模表征,可以用于对齿轮测量仪器的滤波性能进行有效评定<sup>[51-52]</sup>。

## 3 齿轮样板的测量技术与装置

齿轮样板由于形状复杂、精度高,需要研制高精度的专用测量装置或者定制精化的商用仪器来开展测量。

德国PTB针对双基圆盘样板的测量,曾研制了一种机械展成式测量装置<sup>[53]</sup>,如图29所示。具有双基圆盘的渐开线样板在高精度长导轨上通过钢丝绳的摩擦驱动产生滚动,基圆盘滚动产生的直线位移就是渐开线的展开长,通过接触式位移传感器可以测量出来。

日本京都大学也研制了机械式纯滚动测量装置,不过进行了优化和改进:将钢丝传动换成了带传动、将接触式的传感器换成了激光干涉直接测量<sup>[54]</sup>。大连理工大学整合了机械展成法与激光测量技术,采用接触式测头与激光测距相结合来对渐开线样板测量<sup>[30,55]</sup>(图30)。



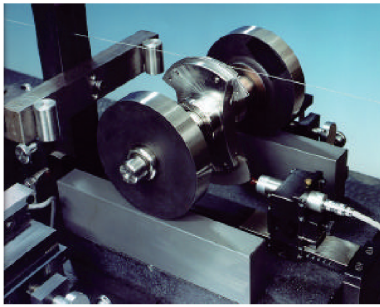


图 29 PTB 纯滚动测量装置

Fig. 29 Rolling measurement device from PTB

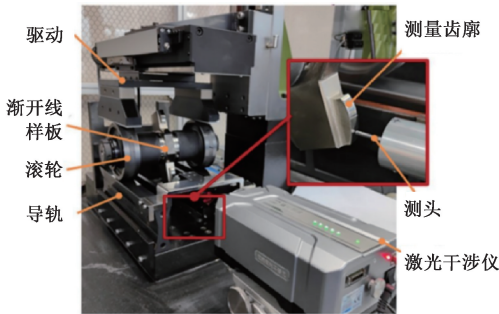


图 30 大连理工大学纯滚动测量装置

Fig. 30 Rolling measurement device from DLUT

机械式纯滚动的测量方法符合渐开线展成原理,测量链短,可以实现很高的测量精度。但缺点也比较突出:每种规格的样板都需要配备2个高精度的基圆盘,且无法测量螺旋线等其他齿轮几何特征,所以一直未能得到很好的推广应用。

德国 PTB 于 2003 年提出了一种利用激光追踪仪配合高精度坐标测量机来测量齿轮样板的方案<sup>[56]</sup>(图 31),基于此方案研制成功新型的商用激光追踪仪<sup>[57]</sup>(图 32)。与机械式纯滚动的测量原理不同,该方案是基于坐标测量机(配转台)的电子展成式测量原理,即通过导轨直线运动及转台回转运动形成渐开线、螺旋线等特定曲线轨

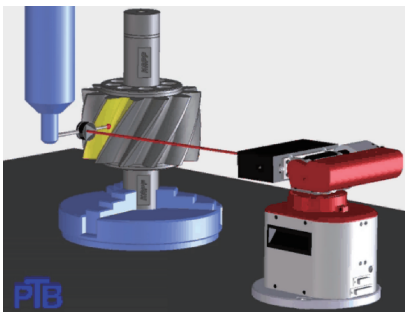


图 31 激光追踪仪及坐标测量机组合测量方法

Fig. 31 Combination measurement method of laser tracer and coordinate measuring machine

迹。通过测微测头得到实际曲线相对理论曲线的误差。电子展成式的齿轮测量仪器功能强大,不仅可以测量渐开线、螺旋线样板,还可以测量类工件样板及齿轮零件。为了提高商用仪器测量精度,本方案中 PTB 采用一台激光追踪仪来同步测量测头的移动位移,并对其三维坐标进行补偿修正,从而提高齿轮样板的测量精度。



图 32 商用激光追踪仪

Fig. 32 Commercial laser tracer

为解决大齿轮样板的测量难题,实现大齿轮量值溯源。2012 年 PTB 进一步提出了基于 4 台激光追踪仪及坐标测量机结合的测量系统(M3D3)(图 33)。该测量系统同样是基于坐标测量机的电子展成式测量原理,通过空间三维导轨直线运动形成渐开线、螺旋线等特定曲线轨迹,测微测头得到实际曲线的空间坐标值。同样是为了提高商用仪器的测量精度,PTB 通过 4 台激光追踪仪在多个站位下测量得到坐标测量机的空间误差矢量,从而提高大齿轮样板的空间坐标测量精度<sup>[58-60]</sup>。

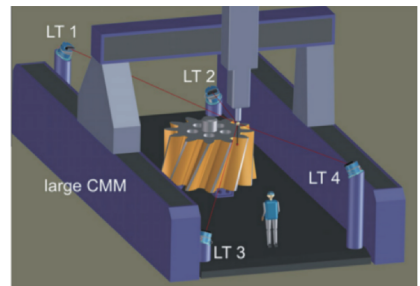


图 33 大齿轮 M3D3 测量系统

Fig. 33 M3D3 measurement system for large gears

针对齿距样板的高精度测量,PTB 基于圆封闭原则,提出了“three-rosette”方法<sup>[61]</sup>,该方法是基于“圆封闭原则”,即整周齿距误差的和为零这一恒定条件,通过将齿距样板放置于转台的不同转位上开展重复测量,如果齿距样板的齿数为  $N$ ,则需要放置转台  $N$  个转位,最终得到  $N^2$  个测量结果。每个测量结果包含转台不同转位下的转台误差、齿距误差及仪器系统误差,对  $N^2$  个测量数据进行转台误差和仪器系统误差分离,最后可以得到高精度的齿距误差测量结果。实际操作过程中,如果齿距样板的齿数较多,则多转位测量会耗费很长时间,测量效率

较低。近期,针对“three-rossette”方法的繁琐性,他们又提出了简化方法<sup>[62]</sup>,简化方法要求多转位次数  $R \geq 5$ ,同时满足  $\sqrt{N} \leq R \leq 2\sqrt{N}$ ,可实现仅略微增加测量不确定度基础上,在更短的时间内完成齿距测量。

1987年,英国国家齿轮计量实验室(National Gear Measurement Laboratory, NGML)在纽卡斯尔成立,专门负责英国的齿轮样板测量,采用商用的齿轮测量仪器,量值溯源至PTB。为了提高齿轮样板测量不确定度水平,该实验室于2003年引入了一台精度经过优化的商用齿轮测量中心(图34),仪器的各项几何偏差,包括定位误差、直线度、偏摆角及垂直度等共27项误差都做了精细化要求<sup>[63]</sup>。



图34 NGML精化的齿轮测量中心

Fig. 34 Gear measuring center with accuracy improved in NGML

美国很早就开始了齿轮技术的研究,1916年成立了著名的美国齿轮制造商协会(American Gear Manufacturers Association, AGMA),NBS也很早就为美国的齿轮制造商提供齿轮样板的测量服务,并持续到20世纪80年代<sup>[64-65]</sup>。由于仪器设备老化,美国齿轮样板测量的业务只能转移到橡树岭国家计量中心。随着美国制造业回归,电动汽车产业要求更高精度的齿轮产品,需要建立更高水平的齿轮测量能力和测量仪器,为此美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)在时隔30年后,于2019年重新开展齿轮样板的测量<sup>[66]</sup>。NIST采用一台20世纪90年代购买的高精度坐标测量机(图35),对软件和硬件进行了更新,使其功能更加完善。为了提高齿轮样板的测量准确性,NIST采用一种“测量分解”的技术,该技术将一系列形状简单的标准件(如量块、球)引入了齿轮样板测量,通过比较测量,NIST进一步降低了齿轮样板的测量不确定度。

在我国,中国计量院于1963年开展齿轮样板测量研究,1965年建立了第一台渐开线国家标准装置<sup>[67]</sup>,1984年建立了第一台螺旋线国家标准装置<sup>[68]</sup>,并陆续开展了齿轮样板测量校准服务,对保证我国齿轮量值有效可靠起到了重要作用<sup>[69]</sup>。2010年,因原标准装置老化,开展



图35 NIST 齿轮样板测量

Fig. 35 Gear artifact measurement in NIST

了新一代齿轮基准装置的研制<sup>[11]</sup>(图36),提出了齿轮特征线空间轨迹展成控制和测量系统分离的技术方案,将复杂的螺旋线和渐开线空间曲线测量转化为激光干涉测长和角度自校准的同步测量,实现了齿轮空间轨迹线的高准确度测量及齿轮参量对长度和角度基准量的直接溯源。



图36 中国计量院新一代齿轮基准装置

Fig. 36 New generation gear primary standard from NIM

## 4 齿轮样板的国际比对

齿轮样板不仅是国内量值传递的载体,也是国际比对的实物媒介。通过齿轮样板在国际间传递测量比对,能够验证各国的齿轮校准与测量能力,实现齿轮量值的全球一致性,为国际贸易提供可靠的技术支撑。迄今为止,国际上已经开展了多次双边及多边齿轮比对<sup>[70-72]</sup>。第一次正式的国际多边比对于2008年开始<sup>[73]</sup>,由欧洲计量规划组织(European Metrology Planning Organization, EURAMET)负责组织协调,参与国家包括德国、中国、日本、泰国、乌克兰、英国及美国共7个国家,整个循环比对过程历经2年多的时间。比对的齿轮样板包括基圆半径25 mm的渐开线样板(图37(a)), $0^\circ \sim 45^\circ$ 螺旋线样板(图37(b))及齿顶圆直径156 mm的齿距样板(图37(c))。

此次国际比对在所有参与比对国中环式传递比对样板,主导实验室德国PTB负责收集各国比对结果,并以

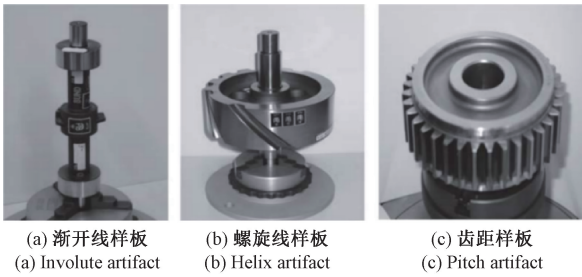


图 37 第一次国际多边比对样板

Fig. 37 Artifacts for the first international multilateral comparison

加权平均值作为参考值,通过归一化偏差  $|En|$  值来评判各国的测量结果。如图 38 所示,为渐开线样板的比对结果(倾斜偏差  $f_{H\alpha}$ ),横轴为参与国代号,纵轴为相对参考值的偏离大小。7 个比对国中只有一个国家的测量结果与参考值偏离较大,其  $|En|$  值大于 1,其余各国测量结果符合一致性要求。但是在  $45^\circ$  大角度螺旋线上,各国测量结果差异性则较为明显,如图 39 所示(倾斜偏差  $f_{H\beta}$ )。7 个比对国中有 3 个国家的测量结果与参考值偏离较大,其  $|En|$  值大于 1,还有一个国家没有上报测量结果,超过半数的比对国结果超差。这种差异性可能是由测量仪器的几何误差引起的,在  $0^\circ \sim 30^\circ$  螺旋线上体现不明显,但是随着螺旋角度的增加,在  $45^\circ$  大角度螺旋线上则体现非常明显。漫长的比对过程也导致齿轮样板受到了一定的表面损伤,因此,齿轮样板作为一种高精度的标准件,良好的护理也是不容忽视的。

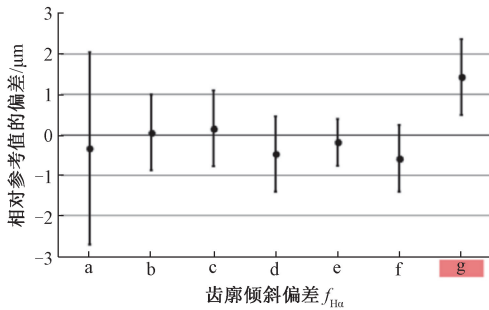


图 38 渐开线样板的比对结果( $f_{H\alpha}$ )

Fig. 38 Comparison results of involute artifact( $f_{H\alpha}$ )

针对大角度螺旋线测量的挑战性,中国计量院与 PTB 于 2017 年开展了大角度齿轮螺旋线参量的双边比对<sup>[11]</sup>,比对在亚太计量规划组织(Asia Pacific Metrology Programme, APMP)的组织协调下开展。比对样板为 1 件  $45^\circ$  螺旋线样板(图 40),具有左旋和右旋两条螺旋线,齿宽 100 mm。比对结果如表 1 所示(倾斜偏差  $f_{H\beta}$ ),  $|\Delta f|$  代表双方测量结果的绝对差值,  $|En|$  值为中国计量院相对 PTB 的归一化偏差,  $|En| < 1$  验证了双方测量结果的一致性。

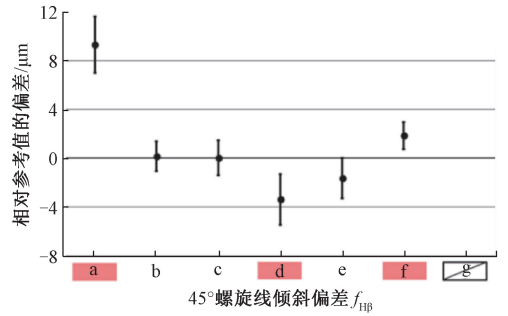


图 39  $45^\circ$  螺旋线样板的比对结果( $f_{H\beta}$ )

Fig. 39 Comparison results of  $45^\circ$  helix artifact( $f_{H\beta}$ )



图 40  $45^\circ$  螺旋线比对样板

Fig. 40  $45^\circ$  helix comparison artifact

表 1 齿轮螺旋线双边比对结果

Table 1 Double sided comparison results of gear helix

螺旋角	参量	$ \Delta f /\mu\text{m}$	$ En $
$45^\circ$ 左旋	$f_{H\beta}$	0.9	0.50
$45^\circ$ 右旋	$f_{H\beta}$	1.1	0.64

## 5 未来发展与展望

齿轮样板作为齿轮量值的标准实物载体,为实现齿轮产品及测量仪器的量值统一发挥着重要的作用。一直以来,一旦有新的齿轮产品或者测量参量出现,就需要研制对应的齿轮样板,如大齿轮样板、小齿轮样板、粗糙度和波度样板等。面对未来的发展,更大尺寸的齿轮产品和更复杂的几何特征仍然会不断涌现,而大型和复杂的齿轮样板的制造必将具有更大的挑战。如何解决实物样板的依赖问题,国际上的专家学者一直在研究探索新的解决思路<sup>[74]</sup>。

齿轮样板本质上表征的是齿轮几何特征,用于检验齿轮测量仪器测量不同齿轮几何特征过程中出现的综合误差影响。通过构建虚拟的齿轮几何特征,并结合虚拟

测量技术来全面评估仪器测量的综合误差影响是未来的发展方向之一。

德国 PTB 于 20 世纪 90 年代开始研究通过计算机虚拟仿真的方法实现坐标测量机面向特定任务的测量性能评估<sup>[75]</sup>,并于 1995 年提出了虚拟坐标测量机(virtual CMM)的概念<sup>[76]</sup>。虚拟坐标测量机是一种实现虚拟仿真的软件,可以面向特定的任务如齿轮测量,考虑在整个测量过程中出现的影响,包括导轨几何误差、探测系统误差、环境影响、工件的影响及测量策略的影响等<sup>[77]</sup>,所有影响量都通过适当的概率分布函数描述,并通过数学模型评估这些过程量对最终结果的综合影响,从而得到测量结果的偏离度和测量不确定度,实现坐标测量机的量值追溯性。

2009 年,PTB 将虚拟坐标测量机的概念引入到齿轮测量中心,提出了一种基于蒙特卡洛法评估齿轮测量不确定度的方法(VCMM-Gear)<sup>[19]</sup>(图 41)。该方法面向齿轮电子展成式测量,在虚拟坐标测量机基础之上,额外考虑了转台误差、齿轮安装误差及测头扫描误差的影响。通过与实物样板测量结果的对比,验证了该方法的有效性。因此,该方法特别适合缺少齿轮实物样板的场合,例如风电领域的大齿轮样板。

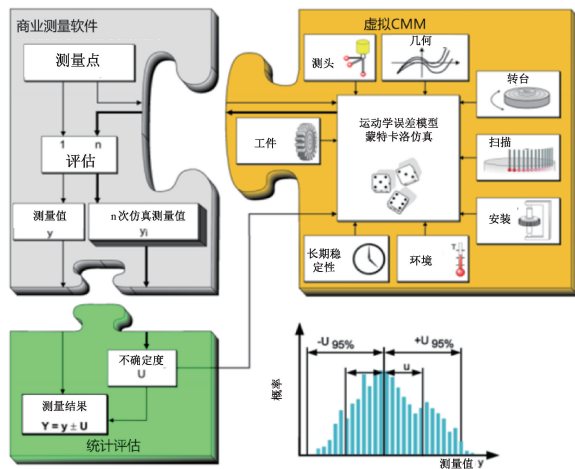


图 41 VCMM-Gear 方法原理

Fig. 41 Principle of VCMM-Gear method

2020 年,中国计量院与 PTB 开展大齿轮计量的合作研究,开发了一款大齿轮虚拟仿真测量的软件程序(Me2Ge)<sup>[20]</sup>(图 42),该软件构建了一个虚拟无误差的大齿轮样板,提取了该样板上的渐开线、螺旋线及齿距三种齿轮几何特征线。建立了一个施加真实几何误差后的虚拟大型坐标测量机,通过虚拟仿真测量,得到了受仪器几何误差影响下的齿轮偏差,揭示了齿轮不同几何特征线测量过程中的主要几何误差来源。该方法可以在缺少高精度齿轮实物样板的情况下,量化评估仪器几何误差对

测量结果的影响,对指导实际工件测量规划也有很大帮助。

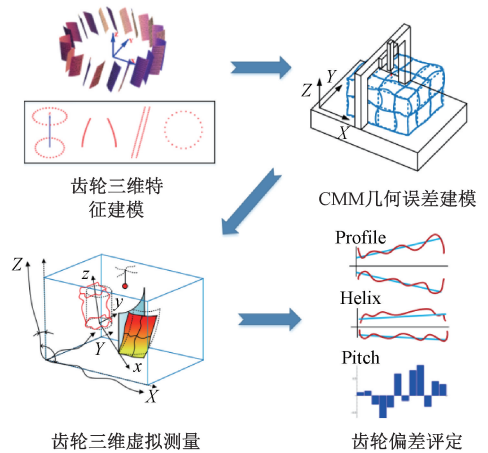


图 42 Me2Ge 齿轮虚拟仿真测量原理

Fig. 42 Gear virtual simulation measurement principle of Me2Ge

未来,在面对大型和复杂的齿轮样板无法制造和缺失的情况下,更完善的虚拟仿真校准的技术将会发挥越来越大的作用<sup>[78]</sup>,这些虚拟技术可以构建完美的齿轮几何特征,不再需要难以加工的实体特征,并对依赖实物样板测量进行量值传递的传统模式产生变革性影响。新的量值传递需要依赖可溯源的虚拟仿真算法和程序软件<sup>[79-80]</sup>,产生一种基于可追溯性虚拟仿真测量的量值传递与溯源新模式。

## 6 结 论

齿轮样板已经历了九十多年的发展,从单一的渐开线样板到渐开线、螺旋线及齿距综合为一体的类工件样板、从常规尺寸到极大和极小尺度、从复杂的渐开线齿廓到基本几何特征齿廓,齿轮样板的种类在不断丰富、尺度不断延伸、复杂度不断简化。

齿轮样板在齿轮量值传递与溯源链条中是上溯下传的实物载体,对保证齿轮产品、齿轮测量仪器量值准确、一致发挥了关键作用。同时也是国际比对的中间媒介,通过相互比对验证,为各国齿轮测量校准能力的互认提供支撑,也为实现齿轮量值的全球一致性、为国际贸易提供可靠的计量技术支撑。

未来,随着信息化和数字化新技术在齿轮领域的广泛应用,更多“无形的”虚拟仿真测量算法可以用来评估仪器测量齿轮的性能,对“有形的”齿轮实物样板的依赖将可以减弱,“无形的”技术将可能成为量值传递与溯源的新模式。

## 参考文献

- [1] GOCH G. Gear metrology[J]. Annals of the CIRP, 2003, 52(2):659-695.
- [2] IMKAMP D, BERTHOLD J, HEIZMANN M, et al. Challenges and trends in manufacturing measurement technology—the “Industrie 4.0” concept[J]. Sens. Syst., 2016, 5(2): 325-335.
- [3] FRAZER R C. Measurement uncertainty in gear metrology[D]. UK: Newcastle University, 2007: 27-35.
- [4] COOPER C M, STOTT W R. Gear manufacturing past, present and future [J]. Gear Technology, 2000, 2: 26-30.
- [5] LITVIN F L. Development of gear technology and theory of gearing[R]. NASA Reference Publication, 1997, 1406: 79-84.
- [6] RUDOLF O. History of gear measuring machines and traceability 1900–2006[J]. Gear Product News, 2006, 10: 20-25.
- [7] 石照耀, 费业泰, 谢华锟. 齿轮测量技术 100 年——回顾与展望[J]. 中国工程科学, 2003, 5(9): 13-17.  
SHI Z Y, FEI Y T, XIE H K. 100 years of gear measurement technology: Review and prospect[J]. China Engineering Science, 2003, 5(9): 13-17.
- [8] SIEKER H W. Recent developments in gear metrology[J]. Gear Technology, 1991, 11: 27-35.
- [9] 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.
- [10] FRAZER R C, WILSON S J. Implementing ISO 18653—Gears: Evaluation of instruments for measurement of individual gears[J]. Gear Technology, 2010, 27(3): 38-47.
- [11] 林虎, 黄垚, 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, 66(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, 66(4): 67-73.
- [12] GOCH G, KNAPP W, HAERTIG F. Precision engineering for wind energy systems[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2012, 61(2): 611-634.
- [13] HAERTIG F, ROST K, GOCH G. Large gear material standard for the traceability of gears for transmission manufacturing[C]. International Conference on Gears: Europe invites the world. Garching, Germany, 2010, 2108(2): 991-1004.
- [14] WIEMANN A K, ATEIN M, KNIEL K. Traceable metrology for large involute gears [J]. Precision Engineering, 2019, 55: 330-338.
- [15] DAI G L, NEUGEBAUER M, STEIN M, et al. Overview of 3D micro-and nanocoordinate metrology at PTB[J]. Applied Sciences, 2016, 6(9): 1-17.
- [16] 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): 1-9.
- [17] JANTZEN S, MARTIN S, ANDREAS D, et al. Microgear measurement standards: Comparing tactile, optical and computed tomography measurements [J]. Gear Technology, 2019, 11: 52-63.
- [18] 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.
- [19] ROST K, WENDT K, HAERTIG F. Evaluating a task-specific measurement uncertainty for gear measuring instruments via Monte Carlo simulation [J]. Precision Engineering, 2016, 44: 220-230.
- [20] LIN H, KELLER F, STEIN M. Influence and compensation of CMM geometric errors on 3D gear measurements[J]. Measurement, 2020, 151(2): 1-9.
- [21] WEISSTEIN, ERIC W. Circle involute [N]. MathWorld—A Wolfram Web Resource (<https://mathworld.wolfram.com/CircleInvolute.html>).
- [22] MACTUTOR. Involute of a circle [N]. History of Mathematics Archive. (<http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Curves/Involute.html>).
- [23] RADZEVICH S P. A brief overview of the evolution of the scientific theory of gearing [N]. Springer Link. ([https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-64638-7\\_6](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-64638-7_6)).
- [24] Gears-Evaluation of instruments for the measurement of individual gears: ISO 18653: 2003 [S]. ISO/TC 60, 2003.
- [25] 齿轮渐开线样板 GB/T 6467-2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.  
The involute artifact of gear: GB/T 6467-2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [26] 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]. ISO, 2013.
- [27] 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):045105,1-12.
- [28] Code of inspection practice-Part 5: Recommendations relative to evaluation of gear measuring instruments: ISO/TR 10064-5:2005[S]ISO,2005.
- [29] 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 reference[J]. *China Academic Journal*, 1998(5):33-36.
- [30] 凌四营,凌明,林虎,等. 高精度齿轮渐开线样板与测量仪器研究进展[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(23):3457-3473.  
LING S Y, LING M, LIN H, et al. Research progress in high-precision gear involute artifacts and measuring instruments[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(23):3457-3473.
- [31] 齿轮螺旋线样板:GB/T 6468-2010[S]. 北京:中国标准出版社,2011.  
The helix artifact of gear: GB/T 6468 - 2010 [S]. Beijing:Standards Press of China,2011.
- [32] 刘万生,龙海波. 大连理工大学一级精度基准齿轮研制成功[N]. *中国科学报*, 2017-05-16.  
LIU W SH, LONG H B. Successful development of first-grade precision standard gears at Dalian University of Technology[N]. *China Science Daily*, 2017-05-16.
- [33] 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.
- [34] 王立鼎,凌四营,马勇,等. 精密、超精密圆柱渐开线齿轮的加工方法[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(2):321-326.  
WANG L D, LING S Y, MA Y, et al. Processing methods of precision and ultra-precision cylindrical involute gear[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(2):321-326.
- [35] Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement—Part 3: Use of calibrated workpieces or standards: ISO 15530-3:2004[S]ISO,2004.
- [36] 石照耀,林虎,林家春,等. 大齿轮测量:现状与趋势[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(10):35-44.  
SHI ZH Y, LIN H, LIN J CH, et al. Current status and trends of large gears metrology[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(10):35-44.
- [37] PEGGS G N, MAROPOULOS P G, HYGES E B. Recent developments in large-scale dimensional metrology[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2009, 223(6):571-595.
- [38] SCHMITT R H, PETEREK M, MORSE E, et al. Advances in large-scale metrology-review and future trends[J]. *CIRP Annals*, 2016, 65(2):643-665.
- [39] HAERTIG 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.
- [40] HAERTIG 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):105011,1-6.
- [41] 林虎,HAERTIG F,KNIEL K,等. 基于便携式坐标测量机的大齿轮测量方法研究[J]. *光学精密工程*. 2013, 21(7):1763-1770.  
LIN H, HAERTIG F, KNIEL K, et al. Measurement of large gears by using portable coordinate measuring machines[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(7):1763-1770.
- [42] SAMMARTINIA M P, DE CHIFFRE L. Development and validation of a new reference cylindrical gear for pitch measurement[J]. *Precision Engineering*, 2000, 24(4):302-309.
- [43] 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]. *Mech. Des*, 2010, 132(7):071010,1-10.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] LANZA G, HAEFNER B. Areal characterization of micro gears by means of computed tomography [C]. 11th International Symposium on Measurement and Quality

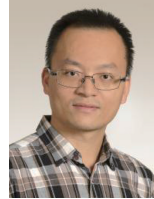
- Control, Cracow-Kielce, Poland, 2013:82-85.
- [48] LANZA G, VIERING B. A novel standard for the experimental estimation of the uncertainty of measurement for micro gear measurements[J]. *CIRP Annals*, 2011, 60(1): 543-546.
- [49] STEINMEYER F, HUESER D, MEESS R, et al. A novel measurement standard for surface roughness on involute gears[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(21): 1-19.
- [50] PTB. Profile waviness artifact for toothed gear flanks[N]. *PTB News*, 2007-3 (<https://www.ptb.de/cms/en/presseaktuelles/journals-magazines/ptb-news/ptb-news-ausgaben/archivederptb-news/news07-3/profile-waviness-artifact-for-toothed-gear-flanks.html>).
- [51] 石照耀, 张白. 渐开线齿轮波度样板 [P]. CN2012100510931, 2012.  
SHI ZH Y, ZHANG B. Involute gear waviness artifact[P]. CN2012100510931, 2012.
- [52] REAVIE T, KOULIN G, FRAZER R C, et al. A method to quantify waviness measurement capability of a gear measurement machine[J]. *Surface Topography Metrology and Properties*, 2019, 7(1): 015002, 1-8.
- [53] BEYER W, PAHI W. Traceability strategies for the calibration of gear and spline artefacts[C]. XVI IMEKO World Congress, Vienna, AUSTRIA, 2000:227-231.
- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] HARTIG F, KECK C, KNIEL K, et al. Improvement of measurement accuracy by combined evaluation of CMM and tracking interferometer measurement [C]. XVII IMEKO World Congress, Dubrovnik, Croatia, 2003:22-27.
- [57] SCHWENKE H, FRANKE M, HANNAFORD J, et al. Error mapping of CMMs and machine tools by a single tracking interferometer [J]. *CIRP Annals*, 2005, 54(1): 475-478.
- [58] HARTIG F, FRANKE M, KNIEL K, et al. Coordinate measurement technique considering the 3D-Abbe principle [C]. 10th IMEKO TC14 Symposium, Braunschweig, GERMANY, 2011: 331-342.
- [59] WENDT K, FRANKE M, HAERTIG F. Measuring large 3D structures using four portable tracking laser interferometers [J]. *Measurement*, 2012, 45(10): 2339-2345.
- [60] KATHARINA R E, NILS K, MATTHIAS F, et al. Recent developments on an interferometric multilateration measurement system for large volume coordinate metrology [J]. *Measurement Science & Technology*, 2022, 33(3):035004, 1-15.
- [61] KNIEL K, HARTIG F, OSAWA S, et al. Two highly accurate methods for pitch calibration[J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(11): 115110, 1-11.
- [62] KELLER F, STEIN M. A reduced self-calibrating method for rotary table error motions[J]. *Measurement Science and Technology*, 2023, 34(6):065015, 1-7.
- [63] FRAZER R C, MANCASOLA P, MIKOLEIZIG G. A new calibration facility for the UK's national gear metrology laboratory[C]. *International Design Engineering Technical Conferences*. Chicago, USA. 2003, 37025: 859-868.
- [64] STIEREN D. The development of a national metrology infrastructure for the domestic gear industry[R]. *Natl. Inst. Stand. Technol, NISTIR 93-5215*, 1993.
- [65] COX B L. Gear measurement traceability and uncertainty[J]. *Gear Technology*, 2000, 8: 37-39.
- [66] NIST. Back to the Future: Gear Edition [N]. *NIST News*, 2022. (<https://www.nist.gov/news-events/news/2022/09/back-future-gear-edition>).
- [67] 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 involute standards [J]. *China Metrology*, 2008(9): 51-52.
- [68] 唐启昌, 方仲平, 叶孝佑. 齿轮螺旋线标准[J]. *计量学报*, 1985(3): 3-7.  
TANG Q CH, FANG ZH P, YE X Y. Gear helix standard[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1985(3): 3-7.
- [69] 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 and test(V) - The correct use of gear involute instrument and the unification of quantity value(1)[J]. *China Metrology*, 1997(5): 57-59.
- [70] 唐启昌. 齿轮渐开线国内外比对报告[J]. *计量技术*, 1990, 3: 28-30.

- TANG Q CH. Comparison report on gear involute at home and abroad [J]. China Academic Journal, 1990, 3: 28-30.
- [71] 张伟,李锐. 齿轮螺旋线量值国际比对结果及分析[J]. 计量技术,1999,8: 23-25.
- ZHANG W, LI R. International comparison results and analysis of gear helix [J]. China Academic Journal, 1999, 8: 23-25.
- [72] FRAZER R C, BICKER R, COX B, et al. An international comparison of involute gear profile and helix measurement[J]. Metrologia,2003,41(1): 12-16.
- [73] HARTIG F, KNIEL K. First international involute gear comparison[J]. Gear Technology, 2014, 31(6): 80-84.
- [74] GOCH G, GUENTHER A, PENG Y, et al. Gear metrology—An update[J]. CIRP Annals, 2023, 72(2): 725-751.
- [75] KUNZMANN H, TRAPET E, WAELDELE F. Concept for the traceability of measurements with coordinate measuring machines [J]. International Progress in Precision Engineering, 1993: 40-52.
- [76] HARTIG F, TRAPET E, WAELDELE F, et al. Traceability of coordinate measurements according to the virtual CMM concept [C]. Proc. 5th IMEKO TC-14 Symp, Zaragoza, 1995:245-254.
- [77] HEISSELMANN D, FRANKE M, ROST K, et al. Determination of measurement uncertainty by Monte Carlo simulation[J]. Series on Advances in Mathematics for Applied Sciences,2017,7:192-202.
- [78] Geometrical Product Specifications (GPS) – Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement-Part 4: Evaluating task-specific measurement uncertainty using simulation; ISO 15530-4;2008[S]. ISO, 2008.
- [79] 汤洁, HARTIG F, 石照耀. 计量软件溯源中的 TraCIM 软件认证系统 [J]. 工具技术, 2017, 51(12): 118-121.
- TANG J, HARTIG F, SHI ZH Y. TraCIM Software validation system based on computationally—intensive

metrology [J]. Tool Engineering, 2017, 51(12): 118-121.

- [80] LIN SH, STEIN M, KELLER F, et al. Online validation of software for cylindrical involute gears [J]. Tool Engineering, 2017, 51(12): 118-121. Measurement; Sensors, 2021,18:1-4.

## 作者简介



林虎,2007年于河海大学获得学士学位,2010年于北京工业大学获得硕士学位,2013年于北京工业大学获得博士学位,现为中国计量科学研究院副研究员,主要研究方向为齿轮计量。

E-mail: linhu@nim.ac.cn

**Lin Hu** received his B.Sc. degree in 2007 from Hohai University, received his M.Sc. degree in 2010 from Beijing University of Technology, received his Ph.D. degree in 2013 from Beijing University of Technology. Now he is an associate research fellow at NIM. His main research interests include gear metrology.



石照耀(通信作者),1984年于合肥工业大学获得学士学位,1988年于陕西机械学院获得硕士学位,2001年于合肥工业大学获得博士学位,现为北京工业大学教授、博士生导师、教育部长江学者特聘教授,主要研究方向为精密测试技术和仪器、齿轮工程和精密减速器。

E-mail: shizhaoyao@bjut.edu.cn

**Shi Zhaoyao** (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Hefei University of Technology in 1984, M.Sc. degree from Shanxi Institute of Mechanical Engineering in 1988 and Ph.D. degree from Hefei University of Technology in 2001. He is currently a professor and a Ph.D. advisor at Beijing University of Technology. He is a “Yangtze River Scholar” distinguished professor awarded by the Ministry of Education. His main research interests include precision measurement technology and instrument, gear engineering and precision reducer.