

文章编号 1004-924X(2026)14-2181-11

## 1 000 mm 多参量集成大齿轮样板设计

林 虎<sup>1\*</sup>, 石晓龙<sup>2</sup>, 薛 梓<sup>1</sup>, 杨国梁<sup>1</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. 中国矿业大学(北京) 机械与电气工程学院, 北京 100083)

**摘要:**大齿轮样板是大型齿轮测量仪器准确性校准的实物标准,仅国外个别计量机构在该领域取得了突破性进展。为解决大齿轮样板的研制难题,本文着重研究了大齿轮样板的设计方法,其中重点详细探讨了外形尺寸、整体结构、齿轮几何特征、核心齿轮参数等重要设计内容,创新提出并设计了一种外径为 1 000 mm 的新型大齿轮多参量集成标准样板。该样板依托对称的内外环形拓扑构型,将多角度螺旋线、渐开线及齿距三个核心几何特征高度集成于单一物理载体,通过有限元分析,对大齿轮样板在重力条件下不同长径比系数的变形情况进行了分析,验证了样板设计的合理性。通过对大齿轮样板的热力学分析,为后续开展实物测量提供了理论分析数据。1 000 mm 多参量集成大齿轮样板将为大型齿轮测量仪器提供一种高效、高精度的多参数综合校准实物样板,对提升我国高端重型装备的齿轮质量管控能力与量值溯源水平具有重要的工程实用价值。

**关键词:**大齿轮样板;环形结构;仪器校准;齿轮测温;有限元分析

**中图分类号:**TH703;TH744 **文献标识码:**A

**doi:**10. 37188/OPE. 20263414. 2181

**CSTR:**32169. 14. OPE. 20263414. 2181

## 1000 mm multi-parameter integrated large gear artifact design

LIN Hu<sup>1\*</sup>, SHI Xiaolong<sup>2</sup>, XUE Zi<sup>1</sup>, YANG Guoliang<sup>1</sup>

(1. *Division of Dimensional Metrology, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China;*

2. *College of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)*

*\* Corresponding author, E-mail: linhu@nim. ac. cn*

**Abstract:** Large gear artifacts are physical standards for calibrating large gear measuring instruments. Only a few foreign metrology institutes have made breakthroughs in this field. To solve development difficulties, this paper studied design methods for large gear artifacts. It discussed dimensions, structures, geometric features, and core parameters in detail. We innovatively designed a new multi-parameter standard artifact with a 1 000 mm outer diameter. The artifact used a symmetrical structure of internal and external gear rings. It integrated multi-angle helices, involute profiles, and pitches into one carrier. Finite element analysis evaluated gravity deformation under different length-to-diameter ratios. These simulation results verified the rationality of the design. Thermodynamic analysis provided theoretical data for subsequent physical measurements. This 1 000 mm artifact offered efficient and high-precision multi-parameter com-

收稿日期:2026-05-18;修订日期:2026-06-10.

基金项目:国家重点研发计划项目(No. 2017YFF0204804);国家重点研发计划项目(No. 2021YFF0600103)资助

prehensive calibration. It had great value for improving China's gear quality control. It also enhanced metrological traceability for high-end heavy equipment.

**Key words:** large gear artifact; ring structure; instrument calibration; gear temperature measurement; finite element analysis

## 1 引言

大齿轮是风能、船舶、重型机械等工业装备的核心基础零部件<sup>[1]</sup>,其质量直接影响装备的运行性能与服役寿命。在齿轮精密几何量测量体系中,齿轮样板是齿轮参数量值的标准实物载体。世界主要工业国家普遍建立了齿轮量值传递与溯源金字塔体系<sup>[2]</sup>,而齿轮样板正是连接国家测量标准、校准实验室参考仪器以及生产企业工作仪器之间的关键纽带。通过齿轮样板,可以将国家测量标准所复现的量值准确传递到各级齿轮测量仪器上,从而修正仪器示值误差,实现齿轮测量的准确性和一致性。在风电等高端装备领域,为保证大齿轮的产品质量和大型测量仪器的准确性,满足大齿轮量值的可追溯性要求,研制专用的高精度大尺寸齿轮样板是不可或缺的质量基础<sup>[3]</sup>。

在大齿轮样板出现以前,大齿轮的量值传递和溯源长期以来一直是一个国际性难题<sup>[4]</sup>。近年来,国外个别计量机构在该领域取得了突破性进展:德国联邦物理技术研究院(PTB)于2009年率先开展大齿轮计量研究,并先后研制出1 000 mm和1 980 mm两件极具代表性的大齿轮样板<sup>[2]</sup>。

在国内,北京工业大学利用圆弧代替和程序补偿方法,研制了双轴式圆弧型大尺寸渐开线样板,最大可实现基圆半径约361 mm的渐开线模拟<sup>[5]</sup>。大连理工大学提出了基圆半径为400 mm的连轴装配式大齿轮渐开线样板,有效减小了样板的体积和自重<sup>[6]</sup>。

尽管国内在常规尺寸齿轮样板研制和相关标准制定上取得了显著成果<sup>[6-7]</sup>,但在面向大尺寸齿轮样板研制和实际工程应用方面,仍与国外先进技术存在差距。一方面,大齿轮样板尺寸大、质量重,整体结构与常规尺寸齿轮样板完全不同,无法直接沿用传统设计思路。且以往针对仪器的渐开线、螺旋线、齿距等多种参量的量值校

准,往往需要配置多块不同结构和功能的标准样板,这种模式在大尺寸应用工况下会导致极高的加工成本和难度,同时在运输及装调时耗时费力,极大制约了大型齿轮测量仪器的校准效率。另一方面,与常规尺寸齿轮样板不同,大齿轮样板易受自身重力变形及环境温度波动影响,金属材料产生的微观热变形会直接导致几何尺寸偏离,从而影响最终的测量结果准确性。

因此,本文着重研究大齿轮样板的设计方法,重点探讨了外形尺寸、结构、齿轮几何特征、核心齿轮参数、精度参数指标及材质选择等重要设计内容,最后创新性地提出并设计了一种新型的大尺寸多参量齿轮样板。本研究将为大尺寸齿轮样板的设计提供深入和详细的参考方法和方案,在提升我国面向大型齿轮测量仪器的量值溯源能力、高端重型齿轮装备的质量管控能力方面具有重要的工程实用价值。

## 2 大齿轮样板设计方法

### 2.1 外形尺寸、结构及齿轮几何特征

(1)外形尺寸:大齿轮样板的外圆直径是设计时需要首先考虑的,一般需要与目标测量仪器的量程相匹配,这样可以在全量程范围内考察仪器的计量特性。另一方面,考虑到大型齿轮样板的加工难度,也可以考虑与被测工件的尺寸相匹配,通过齿轮样板替代评估实际工件的测量不确定度<sup>[8]</sup>。

目前,用于风电、造船业等领域的大型齿轮测量仪器尺寸已经达到5 000 mm,而相应设计覆盖全量程的大型齿轮样板已经非常不现实,且齿轮样板直径越大,质量和热惯性会呈几何级数增加。但是就大齿轮工件而言,大多数尺寸在1 000 mm至3 000 mm之间,因此大齿轮样板的外形尺寸可以设计成与大齿轮工件相匹配。例如,PTB研制的1 980 mm大齿轮样板是用于5 000 mm大型齿轮测量仪器的校准应用<sup>[9]</sup>。

此外大齿轮样板的齿宽(高度)也是重要外形尺寸。在直径相同的情况下,齿宽越宽,长径比会越大,大齿轮样板的整体刚性也会越强。PTB 设计的 1 980 mm 大齿轮样板其齿宽为 420 mm,长径比为 0.2。

(2)结构设计:早期的齿轮样板多采用芯轴式“单齿”或“双齿”结构以大幅减轻重量。然而,不同尺寸的“单齿”或“双齿”结构存在质心偏移的问题,在测量仪器转台上旋转时极易引入偏心误差<sup>[10]</sup>。PTB 在研制 1 000 mm 的大齿轮样板时,通过设计“扇形”结构来实现样板轻量化(图 1),为解决质心偏移的问题,在样板另一侧,设计了可拆卸的配重块。尽管如此,上述设计方案也只是解决了圆周上对称两点的重力平衡。在设计更大尺寸齿轮样板时,更倾向于采用完整的“环形”结构(图 2)。环形结构具有轴多点对称性,能够保证极佳的整体质量平衡,也可以有效提高整体刚性。最重要的是,在环形结构上可以



图 1 PTB 扇形大齿轮样板

Fig. 1 Sector shaped large gear artifact of PTB



图 2 PTB 环形大齿轮样板

Fig. 2 Ring shaped large gear artifact of PTB

设计集成更多不同类型的齿轮几何特征。除此之外,大齿轮样板结构也可考虑其他的轻量化方案,如辐板式、多段拼接结构等。

(3)测量定位基准设计:对于大齿轮样板的测量定位基准设计,其核心在于通过基准定位的方式在大尺寸物理实体上构建起三维正交参考坐标系<sup>[11]</sup>,并与仪器的机器坐标系空间对齐。

具体而言,通常包含三种不同类型的测量定位基准:(a)利用经过超精平面磨削的样板上端面或内、外圆柱面确定 Z 轴方向的轴向(端面)基准,用于消除大尺寸样板装调时产生的倾斜与偏摆误差;(b)通过高精度内、外圆柱面拟合得出圆心,确定空间坐标原点的径向(定心)定位基准,从而消除安装偏心误差;(c)确定起始零位与 X 轴方向的周向(角度)分度基准,通常选取特定的定位孔或首个齿槽的对称中心面。

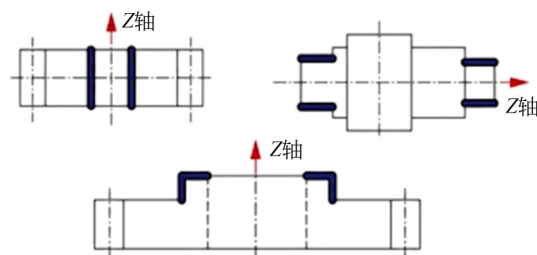


图 3 测量定位基准示意图

Fig. 3 Schematic diagram of measurement and positioning datum

(4)齿轮几何特征设计:齿轮所要测量的参量比较多,一般可以分为渐开线、螺旋线和齿距三大类。

早期的齿轮样板设计常按不同类型的参量分别设计相应几何特征的齿轮样板,依据 ISO 18653:2003,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、齿厚样板等<sup>[12]</sup>。然而上述思路在应用到大齿轮样板设计时会遇到制造成本高、测量效率低的问题。

为解决传统多种齿轮样板单独加工制造的难题,PTB 在设计两个大尺寸齿轮样板时,都考虑将多种齿轮几何特征集成于单一物理载体:1 000 mm 大齿轮样板集成了直齿、左旋 20°及右旋 10°的渐开线及螺旋线,1 980 mm 大齿轮样板

同样集成了上述渐开线及螺旋线,另外在内齿圈上也进行了相应设计,具备了内外齿渐开线和螺旋线几何特征。

**渐开线设计:**渐开线用于检验仪器的切向移动与主轴旋转的联动展开精度。为了全面检验仪器的切向行程,渐开线的展开长度(展长)应足够长。例如,PTB的1 000 mm大齿轮样板渐开线展长达到135 mm,1 980 mm大齿轮样板渐开线展长达到152 mm。

**螺旋线设计:**螺旋线用于检验仪器的轴向移动与主轴旋转的联动展开精度。因此,大齿轮样板应具备足够长的齿宽,以确保仪器的轴向扫描行程足够长。同时,为了适配不同类型的齿轮参数,齿轮样板圆周上通常会设计多种螺旋角的齿面。例如,PTB两件大齿轮样板的齿宽都达到400 mm,且螺旋线的螺旋角包含了直齿、左旋 $20^\circ$ 及右旋 $10^\circ$ 三种。

**齿距设计:**齿距用于检验仪器回转工作台测量齿轮时的分度精度。只有完整的环形结构才能进行全方位的齿距校准,目前PTB还不是具有该几何特征的大齿轮样板。

## 2.2 核心齿轮参数

(1)模数:模数是表征轮齿大小的核心参数,分为法向模数和端面模数。为了获得更长的渐开线展开长度,大齿轮样板通常采用大模数设计<sup>[3]</sup>,如PTB 1 000 mm大齿轮样板的法向模数为25 mm。

(2)压力角与螺旋角:压力角决定了齿轮齿廓形状特性,国内外齿轮标准通常取 $20^\circ$ 作为标准齿廓的压力角。螺旋角是螺旋线样板的核心,分为分度圆螺旋角和基圆螺旋角。大齿轮样板的分度圆螺旋角可以根据仪器测量角度范围进行 $0^\circ\sim 45^\circ$ 多角度的设计,也可以面向大齿轮工件的特定螺旋角度进行匹配设计。

(3)变位系数:变位系数是调整轮齿高度分布与齿廓几何特征的关键参数。常规尺寸的齿轮样板齿廓通常采用标准齿廓,变位系数为零。但是在设计大齿轮样板时,由于需要集成多种齿轮几何特征于一体,变位系数的设计尤为重要,通过设定不同的变位系数,可以调整不同齿轮几何特征的外圆直径和齿根圆直径,从而调整渐开线齿廓的展长。

## 2.3 齿轮参量精度指标

精度指标是衡量样板质量等级的标尺,作为量值传递的标准实物载体,大齿轮样板应具备高精度的特性,即样板的齿轮参量精度应高于被校准仪器或齿轮工件的精度,以此确保校准结果的准确性与可靠性。

在国际层面,ISO 18653:2003标准推荐样板精度不得低于ISO 1328-1标准中的5级齿轮精度。在国内,GB/T 6467-2010与GB/T 6468-2010标准则将样板划分为1级和2级<sup>[13-14]</sup>。其中,1级精度要求代表了工程制造的极限水平(如特定尺寸下齿廓形状偏差控制 $\leq 1.0\ \mu\text{m}$ )。需要注意的是,目前国内外标准并未完全覆盖直径500 mm以上的大齿轮样板范畴,且常规齿轮样板的结构和型式并不适用于大齿轮样板,另外这些标准都忽略了使用过程对样板长期稳定性的要求,这些都是大尺寸齿轮样板区别于中小尺寸齿轮样板的重要特性。

## 2.4 样板材质选择

大齿轮样板的材质决定了其使用过程的高刚性、耐磨性和长期稳定性,国内外并没有统一标准,根据成本和加工难易性可综合考虑以下材质:

(1)优质碳素结构钢(如45#钢):通常用于样板的非工作区(如支撑底座、配重块),以降低加工难度和整体成本。

(2)高碳铬轴承钢(如GCr15):这是目前主流的齿轮样板材质。它的弹性模量高(抗重力变形能力强),淬透性好,热处理后能获得极高的表面硬度和耐磨性,能够经受测头长年累月的接触摩擦。

(3)殷钢/因瓦合金(Invar):这种材质最大的特点是线膨胀系数极低( $1.5\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ),约为普通钢材的1/10。可以最大程度无视环境温度波动,但加工难度较大且成本较高。

## 2.5 测温功能设计

由于金属的线膨胀特性,大尺寸样板对环境温度比较敏感。对于普通钢材,在精密计量中,即便偏离标准温度( $20^\circ\text{C}$ )仅 $1^\circ\text{C}$ ,直径1 000 mm的大齿轮样板也会产生十几微米的尺寸变形。

PTB在研制1 000 mm的扇形大齿轮样板时,为应对现场温度环境对工件的影响,甚至不

惜成本在其外表非工作面镀了金层以隔绝热辐射影响,并在样板周围设计了多个测温孔。随后,在研制 1 980 mm 的大齿轮样板时,PTB 进一步在其外表面均匀布置了 12 个测温孔,用于全面监测大质量实体内部的温度场变化。

## 2.6 有限元分析验证

在大尺寸齿轮样板的设计过程中,有限元分析(Finite Element Analysis, FEA)是连接理论设计与物理加工的关键桥梁。考虑到实体样板高昂的制造成本与极低的容错率,在实际切削成型前,必须依托数字仿真对其在复杂工况下的物理响应进行前瞻性验证。这种验证通常聚焦于两个核心维度:一是静力学分析,旨在探究数百公斤至数吨级别自重在不同装夹与支撑边界下引发的弹性挠度,以此规避宏观结构的微量变形对微米级齿轮几何特征的破坏,从而寻优出最佳的结构拓扑与支撑方案;二是热力学分析,重点考察大尺寸金属实体在非理想恒温环境下的热应变规律。由于大质量样板极易在内部形成热迟滞与温度梯度,微小的温差即可诱发显著的不对称热膨胀。通过提取仿真模型中的热位移场,不仅能直观量化温度波动对几何特征精度的干扰,更为后续引入测温补偿机制与动态误差修正算法提供了扎实的理论依据。

## 3 1 000 mm 多参量集成大齿轮样板设计

基于上面所述的大齿轮样板设计方法与思路分析,本文创新提出一种外径为 1 000 mm 的多参量集成大齿轮样板。下面将详细阐述该样板在整体结构、参数、精度等方面的具体设计思路。

### 3.1 样板整体结构与齿轮几何特征设计

大齿轮样板整体外径设计为 1 000 mm,齿宽设计为 400 mm,长径比为 0.4,这是目前国内最大的齿轮样板。样板未采用扇形结构和其他轻量化设计方案,而是采用环形结构,主要考虑:(1)相较于扇形分体式结构或多段拼接结构,完整的环形构造具有更高的整体刚度,能够有效抵抗因自身重力与装配应力导致的结构变形,从而确保渐开线、螺旋线等齿轮几何特征的精度稳定

性;(2)辐板式的结构能使大齿轮样板整体刚性更强,但是其质量会更重,且内部没有空间设计更多的齿轮参量特征。

在齿轮几何特征设计上,为在单样板上实现渐开线、螺旋线和齿距多参量、多角度覆盖,在样板的外圆柱面与内圆柱面进行了严格的区域划分与齿槽定制:(1)外圆柱面上依次设计了直齿槽(螺旋角 $0^\circ$ )、左旋齿槽组(涵盖螺旋角 $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ )以及对称布置的右旋齿槽组(涵盖螺旋角 $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ ),每个齿槽两侧均设计与有该槽同螺旋角的渐开螺旋面,因此外圆柱面主要集成了外齿渐开线和螺旋线几何特征。(2)内圆柱面设计为直齿结构(螺旋角 $0^\circ$ ),主要集成齿距几何特征与内齿渐开线、螺旋线几何特征。

按上面的设计方案,在外圆柱面上,一共布置了 7 个齿槽,每个齿槽在圆周上所占据的角度可用公式计算:角度 $\theta = \frac{z \cdot \tan \beta}{r}$ 。

根据每个齿槽的角度范围,可以布置相互之间的圆周分布位置。

样板内孔直径需要重视,需要在刚性和重量取舍上综合考虑,由于要特别设计内齿几何特征,因此内孔直径不能太大,这里设计为 672 mm,样板齿圈厚度 164 mm,兼顾外齿和内齿几何特征。

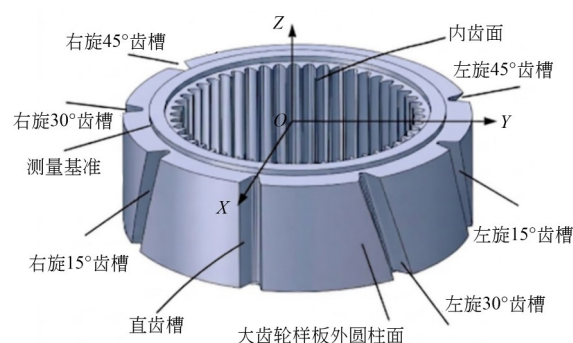


图4 大齿轮样板结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the large gear artifact structure

大齿轮样板整体结构设计如图4所示,除了齿轮多参量集成,关键的测量定位基准设计采用上凸台方案:在样板上端面设计了一圈环形凸台基准,通过凸台的上端面基准构建大齿轮样板坐标系的Z轴方向,通过凸台的外圆柱面基准拟合

得到截面圆心,确定空间坐标原点, $Z$ 轴轴心被严格约束。环形凸台测量定位基准设计的优势在于外侧圆柱面和上端平面更方便进行高精度磨削,获取高精度的平面度和圆度,为后续的齿轮参量测量提供高精度的测量定位基准。

上述大齿轮样板设计方案相比 PTB 的环形大齿轮样板具有两个显著特征:(1)样板外圆柱面齿槽的螺旋角度覆盖  $0^\circ \sim 45^\circ$ ,实现大范围角度螺旋线参量集成;(2)样板内圆柱面为全齿直齿结构,补齐了齿距几何特征的缺失,实现渐开线、螺旋线及齿距三个核心齿轮参量高度集成于单一物理载体。

### 3.2 样板核心参数与精度指标设计

大齿轮样板核心参数如表 1 所示,所有外齿轮的模数统一为 25 mm,以获得更长的渐开线展长。内齿轮重点是其齿距几何特征,且考虑内齿圈加工的空间限制,模数不能设定太大,这里设定为 14 mm。

由于大齿轮样板外圆直径已经确定,在设定模数之后,为了匹配和统一外圆直径,需要调整左旋和右旋齿面的变位系数。

变位系数的推导过程如下:

齿顶圆  $d_a$  的计算公式为:

$$d_a = \frac{m_n \cdot z}{\cos \beta} + 2m_n(h_a^* + x), \quad (1)$$

其中: $d_a$ 为齿顶圆直径, $m_n$ 为法向模数, $z$ 为齿数, $\beta$ 为分度圆螺旋角, $h_a^*$ 为齿顶高系数, $x$ 为变位系数

推导得到变位系数  $x$  的计算公式:

$$x = \frac{d_a - \frac{m_n \cdot z}{\cos \beta}}{2m_n} - h_a^*. \quad (2)$$

因此,通过公式(2)可以计算得到左旋和右旋齿面的变位系数。

齿轮样板的核心参数都确定后,可以计算每种参数对应渐开线的展长。需要注意渐开线仅存在于基圆之外,如果齿根圆直径  $d_f$  大于基圆直径  $d_b$ ,则有效渐开线从齿根圆算起。计算从齿根圆到齿顶圆的渐开线展开长度步骤如下:

齿顶圆直径  $d_a$  处的渐开线展长  $L_a$  (即齿顶圆处的曲率半径)计算公式为:

$$L_a = \frac{1}{2} \sqrt{d_a^2 - d_b^2}. \quad (3)$$

齿根圆直径  $d_f$  处的渐开线展长  $L_f$  计算公式为:

$$L_f = \frac{1}{2} \sqrt{d_f^2 - d_b^2}. \quad (4)$$

将齿顶圆展长减去齿根圆展长,即可得到有效测量展长  $L$ :

$$L = L_a - L_f = \frac{1}{2} (\sqrt{d_a^2 - d_b^2} - \sqrt{d_f^2 - d_b^2}). \quad (5)$$

经过计算,大齿轮样板的渐开线展长达到 225 mm。

对于大齿轮样板的精度指标设计,考虑到目前大部分大齿轮工件的精度为 ISO1328-1 标准 5 级以下,因此大齿轮样板的精度指标 ( $A$ ) 设计为 3 级,以外圆直齿为例,具体计算公式为:

齿廓倾斜偏差公差 ( $f_{HaT}$ ):

$$f_{HaT} = (0.4m_n + 0.001d + 4) \times 2^{0.5(A-5)}, \quad (6)$$

$$f_{HaT} = (0.4 \times 25 + 0.001 \times 950 + 4) \times 0.5 \approx 7.5.$$

齿廓形状偏差公差 ( $f_{faT}$ ):

$$f_{faT} = (0.55m_n + 5) \times 2^{0.5(A-5)}, \quad (7)$$

$$f_{faT} = (0.55 \times 25 + 5) \times 0.5 \approx 9.5.$$

齿廓总偏差公差 ( $F_{aT}$ ):

$$F_{aT} = \sqrt{(f_{HaT})^2 + (f_{faT})^2}, \quad (8)$$

$$F_{aT} = \sqrt{7.475^2 + 9.375^2} \approx 12.$$

螺旋线倾斜偏差公差 ( $f_{H\beta T}$ ):

$$f_{H\beta T} = (0.05d + 0.35b + 4) \times 2^{0.5(A-5)}, \quad (9)$$

$$f_{H\beta T} = (0.05 \sqrt{950} + 0.35 \sqrt{400} + 4) \times 0.5 \approx 6.5.$$

螺旋线形状偏差公差 ( $f_{f\beta T}$ ):

$$f_{f\beta T} = (0.07d + 0.45b + 4) \times 2^{0.5(A-5)}, \quad (10)$$

$$f_{f\beta T} = (0.07 \sqrt{950} + 0.45 \sqrt{400} + 4) \times 0.5 \approx 7.5.$$

螺旋线总偏差公差 ( $F_{\beta T}$ ):

$$F_{\beta T} = \sqrt{(f_{H\beta T})^2 + (f_{f\beta T})^2}, \quad (11)$$

$$F_{\beta T} = \sqrt{6.271^2 + 7.579^2} \approx 10.0,$$

其中: $d$ 为分度圆直径, $b$ 为齿宽, $A$ 为精度等级。

同样,计算其他齿轮参量对应精度指标如表 1 所示。

大齿轮样板的测量定位基准精度可依据齿轮参量的总偏差公差  $1/10 \sim 3/10$  来设定,环形凸台上端面基准构建大齿轮样板的  $Z$  轴方向,依据螺旋线总偏差公差  $3/10$  倍设定为  $3 \mu\text{m}$ ,凸台外圆柱面确定空间坐标原点,依据渐开线总偏差公差  $3/10$  倍设定为  $3.6 \mu\text{m}$ 。

表 1 样板核心参数与精度指标

Tab. 1 Core parameters and accuracy specifications of the artifact

| 齿轮类型         | 外齿    |       |       |       | 内齿   |
|--------------|-------|-------|-------|-------|------|
| 螺旋角/(°)      | 0     | 15    | 30    | 45    | 0    |
| 螺旋线方向        | /     | 左旋&右旋 | 左旋&右旋 | 左旋&右旋 | /    |
| 模数/mm        | 25    | 25    | 25    | 25    | 14   |
| 齿数           | 38    | 37    | 33    | 27    | 50   |
| 压力角/(°)      | 20    | 20    | 20    | 20    | 20   |
| 齿宽/mm        | 400   | 400   | 400   | 400   | 400  |
| 变位系数         | 0     | −0.14 | −0.04 | −0.08 | 0    |
| 分度圆直径/mm     | 950   | 957   | 952   | 954   | 700  |
| 齿顶圆直径/mm     | 1 000 | 1 000 | 1 000 | 1 000 | 672  |
| 齿根圆直径/mm     | 887   | 887   | 887   | 887   | 735  |
| 渐开线展长/mm     | 225   | 222   | 175   | 135   | 95   |
| 齿面精度等级       | 3     | 3     | 3     | 3     | 3    |
| 齿廓倾斜偏差公差/μm  | ±7.5  | ±7.5  | ±7.5  | ±7.5  | ±5.0 |
| 齿廓形状偏差公差/μm  | 9.5   | 9.5   | 9.5   | 9.5   | 6.5  |
| 齿廓总偏差公差/μm   | 12    | 12    | 12    | 12    | 8.0  |
| 螺旋线倾斜偏差公差/μm | ±6.5  | ±6.5  | ±6.5  | ±6.5  | ±6.0 |
| 螺旋线形状偏差公差/μm | 7.5   | 7.5   | 7.5   | 7.5   | 7.5  |
| 螺旋线总偏差公差/μm  | 10.0  | 10.0  | 10.0  | 10.0  | 9.5  |
| 单个齿距偏差公差/μm  | /     | /     | /     | /     | 5.5  |
| 齿距累积总偏差公差/μm | /     | /     | /     | /     | 19   |

3.3 样板材质选择

样板主体材质选择为高碳铬轴承钢 GCr15, 该材质具备以下核心优势:(1)高刚度抗变形能力:其弹性模量高达 208 GPa(吉帕斯卡),在应对大齿轮样板数吨自重引发的弯曲挠度时,表现出较好的抵抗能力。(2)优异的耐磨性与硬度:经特定热处理后,可获得硬

度不低于 60 HRC(洛氏硬度)的耐磨表面。(3)相对稳定的热物性:其热膨胀系数约为  $11.5\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ,处于金属材质中较为稳定且规律可循的区间。需要注意的是,大齿轮样板在进行常规的热处理后,还需要引入  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}\sim -150\text{ }^{\circ}\text{C}$  的深冷处理工序,将样板内部亚稳定的残余奥氏体彻底转化为马氏体,从而获得更稳定的基体,保证其长期稳定性。

3.4 测温功能设计

在大齿轮样板测温功能上,本文提出一种大齿轮样板温度场的检测方法,其核心目的是实现大齿轮样板内外多点分布温度的实时监测,从而为大齿轮样板等温及热变形误差补偿提供参考

数据。

(1)测温点整体布局:如图 5 所示,基于大齿轮样板环形结构的特点,测温点采用 3+3 的圆周布置,内部均布 3 点测量大齿轮样板内部中心点温度,外部均布 3 点测量大齿轮样板外表温度,其中样板内部中心点温度的测量需要设计相应的

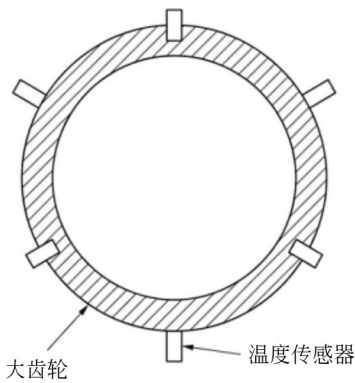


图 5 测温点整体布局示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the overall layout of temperature measurement points

钻孔。通过上述 3+3 测点的圆周布置,可以准确获取样板沿圆周方向的内外温度分布。

(2)内部中心点测温方法:大齿轮样板内部中心点的温度是一个测量难点。首先钻孔深度要为样板齿圈厚度的一半,接着采用长杆式温度传感器探入钻孔内部测量。为确保温度传感器只测量样板中心处的内部实体温度,在温度传感器探头圆周上包裹隔热胶带,只留出末端用于内部实体温度测量。另外,由于机械钻孔后留下的孔底端通常是不平整的锥面,会导致探头末端接触面积小且不均匀,为此在孔底端涂覆硅脂导热材料,对其进行物理填平,保证探头末端与孔底端的良好接触和高效导热。

(3)外部表面测温方法:采用磁吸的方式将温度传感器吸附在大齿轮样板表面,实现样板的外部实体温度测量。相比传统的贴敷式测量,这

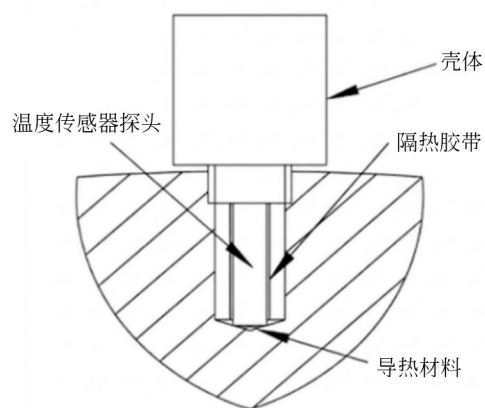


图 6 内部中心点测温示意图

Fig. 6 Schematic diagram of temperature measurement at the internal center point

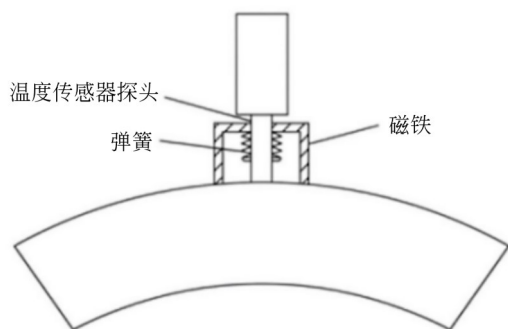


图 7 外部表面测温示意图

Fig. 7 Schematic diagram of external surface temperature measurement

种设计极大地提高了测量效率。温度传感器依靠弹簧机构保持探头与齿轮样板外表面的紧密接触,以准确测量大齿轮的表面温度。

### 3.5 有限元分析

对所设计的 1 000 mm 大齿轮样板进行有限元分析验证,需要注意的是,在大齿轮样板的设计过程中,特别是对整体结构和内外尺寸设计时就可以结合有限元分析的方法来确认设计的合理性。

在外圆直径已确认的条件下,可对大齿轮样板的长径比和内孔直径大小设计参数分别开展静力学分析,研究其自重变形的情况。

下面通过 AnsysWorkbench 软件进行模拟仿真,设置大齿轮样板基体材质为 GCr15,支撑条件为三点支撑,支撑底座材质为结构钢,为简化特征分析,大齿轮样板三维模型未加上内齿齿槽。

设定样板外圆直径 1 000 mm,内孔直径 672 mm,在大齿轮样板的长径比设为 0.2 的条件下,此时齿宽为 200 mm,自重大约 680 kg,有限元分析结果如图 8 所示。

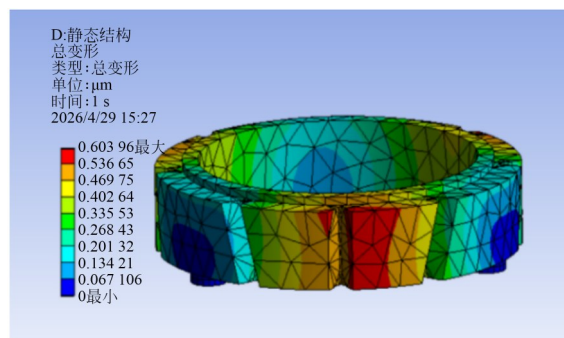


图 8 长径比 0.2 的仿真结果

Fig. 8 Simulation results with a length-to-diameter ratio of 0.2

仿真结果显示:当长径比为 0.2 时,大齿轮样板变形挠度最大为 0.60  $\mu\text{m}$ ,最大变形处发生在圆周两个支撑的中间处。

改变长径比为 0.3,此时齿宽为 300 mm,自重大约 1 010 kg,有限元分析结果如图 9 所示。

仿真结果显示:当长径比为 0.3 时,大齿轮样板变形挠度最大为 0.47  $\mu\text{m}$ ,最大变形挠度相对长径比 0.2 时减小 0.14  $\mu\text{m}$ 。

最后为大齿轮样板设计长径比为 0.4,此时

齿宽为 400 mm,自重大约 1 350 kg,有限元分析结果如图 10 所示。

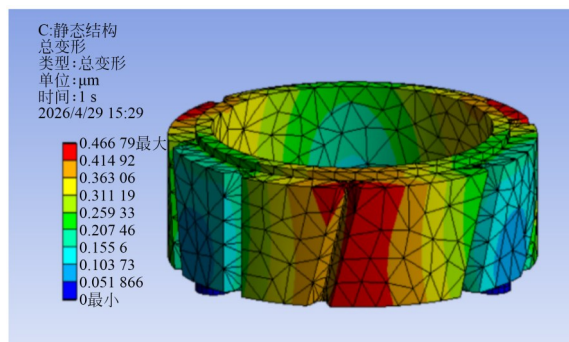


图 9 长径比 0.3 的仿真结果  
Fig. 9 Simulation results with a length-to-diameter ratio of 0.3

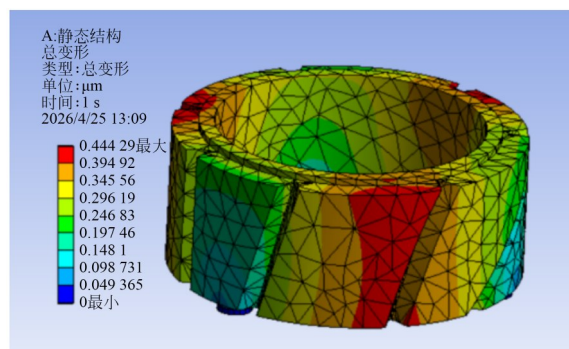


图 10 长径比 0.4 的仿真结果  
Fig. 10 Simulation results with a length-to-diameter ratio of 0.4

仿真结果显示:当长径比为 0.4 时,大齿轮样板变形挠度最大为 0.44 μm。可以看到,最大变形挠度相对长径比 0.3 时变化不大,说明长径比 0.3 为最优设计结果。但是,考虑到大齿轮仪器轴向扫描行程较长,最终采用长径比 0.4 的设计方案。

在大齿轮样板整体结构和尺寸确定后,可开展热力学仿真,分析评估其热变特性。

设置样板初始温度为 20 °C,基体材质为 GCr15,模拟环境温度变化后对大齿轮样板的影响。在样板外表面施加对流换热,设定环境温度为 22 °C 和空气对流换热系数为  $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ,设置变化时间为 10 小时,得到 10 小时后样板表面温度场分布,如图 11 所示。

结果显示此时样板最大温度为 21.841 °C,最小温度为 21.825 °C,在 10 小时内,样板温度随时间变化曲线如图 12 所示。

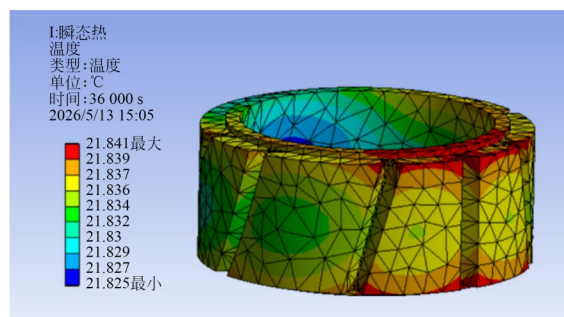


图 11 样板表面温度场分布  
Fig. 11 Temperature field distribution on the surface of the artifact

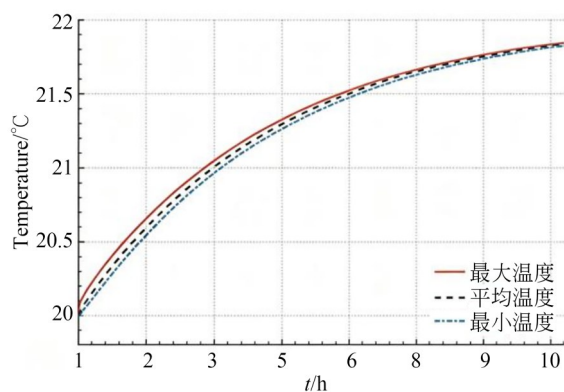


图 12 样板温度随时间变化图  
Fig. 12 Variation of the artifact temperature with time

从样板温度变化曲线可以看到,10 小时内温度变化的速率越来越慢,最终温度仍然没有达到 22 °C。

在最大温度基础上进行温度-重力条件下形变仿真分析,结果如图 13 所示。

仿真结果显示:大齿轮样板在 22 °C 环境下静置 10 小时后,变形挠度最大为 16.82 μm,最大变形处同样发生在圆周两个支撑的中间处。与单

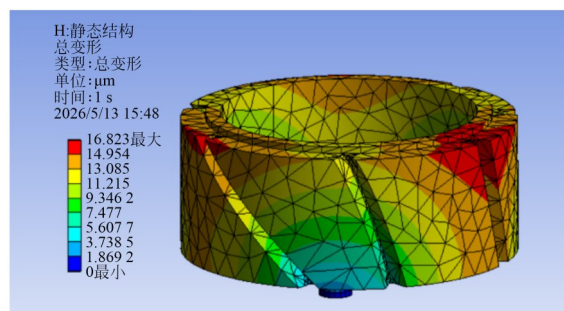


图 13 样板温度形变仿真  
Fig. 13 Simulation of thermal deformation of the artifact

独重力形变不同,温度形变会导致大齿轮样板在圆周径向产生形变。

通过热力学的仿真分析结果可以看到,大齿轮样板在开展测量之前应预留足够长的等温时间,以保证其实体温度与环境温度一致。因温度不一致而导致的形变应引起重视,通过实际测量样板实体温度场结合仿真分析,可以量化分析温度波动对几何特征影响,为后续引入测温补偿机制与动态误差修正算法提供了理论依据。

## 4 结 论

针对大齿轮量值传递与溯源体系对研制专用高精度大尺寸齿轮样板的需求,着重研究了大齿轮样板的设计方法,深入探讨了外形尺寸、结构、齿轮几何特征、核心齿轮参数、精度参数指标及材质选择等重要设计内容,创新提出并设计了一种外径为1 000 mm的新型大齿轮多参量集成标准样板。该样板依托对称的内外环形拓扑构型,将多角度螺旋线、渐开线及齿距等核心几何特征高度集成于单一物理载体。同时,面向大样板易受环境温差干扰的物理特性,同步提出了大

齿轮样板温度场检测方法,可以实现对样板内外实体温度的实时监测与热态评估。通过有限元分析,对大齿轮样板在不同长径比系数下的重力变形挠度进行了分析,验证了本设计的合理性。通过热力学分析,评估了大齿轮样板的热变特性,为后续开展实物测量提供了理论分析数据。

本研究为我国大齿轮样板的设计提供了方法和思路,1 000 mm新型大齿轮多参量标准样板将为大型齿轮测量仪器提供一种高效、高精度的多参数综合校准实物样板,对提升我国高端重型装备的齿轮质量管控能力与量值溯源水平具有重要的工程实用价值。

### 作者贡献声明:

林虎:核心研究者,主导论文整体构思,系统阐述研究思路;

石晓龙:负责撰写论文正文,负责论文有限元分析与结构设计;

薛梓:从专业角度为论文写作提供指导,保障科学性与论文逻辑的严谨性。

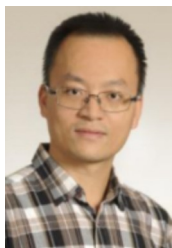
杨国梁:负责齿轮参数计算与核验。

### 参考文献:

- [1] 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 Z Y, LIN H, LIN J C, *et al.* Current status and trends of large gears metrology[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(10): 35-44. (in Chinese)
- [2] WIEMANN A K, STEIN M, KNIEL K. Traceable metrology for large involute gears[J]. *Precision Engineering*, 2019, 55: 330-338.
- [3] 林虎,石照耀. 论齿轮样板[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(6): 240-255.  
LIN H, SHI Z Y. On gear artefacts[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(6): 240-255. (in Chinese)
- [4] 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 Z 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)
- [5] 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 C W, LI B S, *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)
- [6] 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]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(23): 3457-3473. (in Chinese)
- [7] 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]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(17):

- 2100-2118. (in Chinese)
- [8] International Organization for Standardization. Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement Part 3: Use of calibrated work-pieces or standards: ISO 15530-3:2004 [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2004.
- [9] LIN H, KELLER F, STEIN M. Influence and compensation of CMM geometric errors on 3D gear measurements[J]. *Measurement*, 2020, 151: 107110.
- [10] 邹典, 黄垚, 林虎, 等. 齿轮样板负载特征对回转系统角位置误差的影响研究[J]. *计量学报*, 2025, 46(9): 1272-1278.
- ZOU D, HUANG Y, LIN H, *et al.* Research on the effect of gear artifact load characteristics on the angle position error of rotary system[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2025, 46 (9) : 1272-1278. (in Chinese)
- [11] STEIN M, KELLER F, PRZYKLENK A. A unified theory for 3D gear and thread metrology [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(16): 7611.
- [12] International Organization for Standardization. Gears-Evaluation of instruments for the measurement of individual gears: ISO 18653: 2003 [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2003.
- [13] 全国齿轮标准化技术委员会. 齿轮渐开线样板: GB/T 6467-2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- National Technical Committee 52 on Gears of Standardization Administration of China. Gear involute artefacts: GB/T 6467-2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011. (in Chinese)
- [14] 全国齿轮标准化技术委员会. 齿轮螺旋线样板: GB/T 6468-2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- National Technical Committee 52 on Gears of Standardization Administration of China. Gear helix artefacts: GB/T 6468-2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011. (in Chinese)

## 通讯作者:



林 虎(1984—),男,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

## 作者简介:



石晓龙(2002—),男,河北张家口人,硕士研究生,2024年于天津科技大学获得学士学位,主要研究方向为大齿轮测量中心的校准与检验。E-mail: 602672664@qq. com