

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2018.03.08

# 齿轮整体误差测量技术的过去、现在和未来

石照耀<sup>1</sup>, 王笑一<sup>2</sup>

(1. 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; 2. 河南科技大学 机电学院, 河南 洛阳 471003)

**摘要:** 齿轮整体误差测量技术是20世纪70年代初我国机械领域自主研发的国际领先技术之一, 曾得到大力推广和应用, 为我国齿轮行业的技术进步做出了巨大贡献, 但近20年来其发展和应用进入瓶颈期。随着目前新技术条件的出现, 齿轮整体误差测量技术的一些传统难题采用全新的解决方案得以解决, 而其测量效率高、信息全的固有优势则更加突出。齿轮整体误差测量技术有望迎来新的快速发展期。本文综述了齿轮整体误差测量技术的发展历程和研究现状, 分析了整体误差基础理论方面存在的难点和核心问题, 指出可行的解决途径、突破方向和未来的研究趋势, 为齿轮整体误差测量技术及理论未来的发展提供参考和依据。

**关键词:** 齿轮; 齿轮测量; 齿轮整体误差; 现场快速测量

**中图分类号:** TB92; TG86

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5795 (2018) 03-0112-08

## Past, Present and Future of Gear Integrated Error Measurement Technologies

SHI Zhaoyao<sup>1</sup>, WANG Xiaoyi<sup>2</sup>

(1. Beijing Engineering Research Center of Precision Measurement Technology and Instruments,

Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. College of Mechanic and Electronic Engineering, Henan University of Science &amp; Technology, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** Gear integrated error measurements (IEM) was one of the worldwide leading technologies developed in China in the early 1970s and had been widely promoted and applied since then. It had made great contribution to the progress of China gear industry. However, the development and application of gear integrated error technologies have met a bottleneck period over the past 20 years. With the emergence of new technical conditions, some traditional problems of gear IEM technologies can be solved by these innovative solutions, which makes the inherent advantages of the gear IEM technologies in measurement efficiency and information rich more prominent. The gear IEM technologies are expected to enter in a new period of rapid development. The development history and research status of gear IEM technologies are summarized. The difficulties and key problems in the elementary theory of the gear IEM technologies are analyzed. The feasible solutions, breakthrough directions and future research trends of the problems above are given, which provide a certain amount of reference and basis for the technology and theory of gear integrated error in the upcoming development.

**Key words:** gear; gear metrology; gear integrated error; fast in-situ inspection

## 0 引言

镶嵌在国徽上的齿轮是工业的象征, 在信息化时代仍具有不可替代性。齿轮的质量往往直接决定装备的运行性能、服役寿命、安全性和可靠性。历经几次工业革命, 对齿轮的需求越来越大, 对其要求也越来越高。目前齿轮正朝高精度、高功率密度、高可靠性、高效率、长寿命、低噪声等方向发展, 基于齿轮测量的齿轮评价与工艺分析则是保证齿轮质量的主要途径。

齿轮形状复杂, 表征其质量的参数众多。20世纪70年代前, 为测量齿轮的繁多参数, 世界上研发了齿

轮齿形、齿向、齿距、单啮、双啮等10多种仪器。测量一个齿轮需要多台仪器, 带来了测量效率低、项目测量精度不一致等诸多问题<sup>[1]</sup>。

1970年是齿轮测量技术的转折点<sup>[2]</sup>。齿轮整体误差测量技术和齿轮测量机(中心)的出现解决了齿轮测量领域的一个难题, 即在一台仪器上快速获取齿轮的全部误差信息。这两项技术虽然都基于现代光、机、电、计算机等技术, 但走上了不同的技术路线。以黄童年先生为主的我国科技工作者于1970年在世界上首创了齿轮整体误差测量技术<sup>[3-5]</sup>, 实现了在同一台仪器上快速获取齿轮的全部综合和单项误差信息。经过

后续 20 多年的发展, 齿轮整体误差测量技术已成为较为系统的齿轮整体误差理论。它主要包括 3 方面内容<sup>[6]</sup>: 齿轮整体误差概念及其分析方法、齿轮整体误差的获取方法和齿轮整体误差应用。我国曾生产了 1000 多台各式齿轮整体误差测量仪器, 并出口到其它国家。齿轮整体误差技术是 20 世纪 80 年代以前中国机械领域的三大原始创新成果之一, 得到世界公认。其中锥齿轮整体误差测量技术的专利 1989 年卖给了德国的 Klinglberg 公司, 实现了新中国机械工程领域的首项高技术出口。

与此同时, 自 1970 年数控齿轮测量中心<sup>[7]</sup>首次出现以来, 由于其具有测量精度高、功能全面、通用性强等特点, 基于坐标测量法的齿轮测量中心逐渐成为齿轮测量仪器的主要潮流。尤其是 21 世纪以来, CNC 齿轮测量中心的应用趋于广泛, 齿轮整体误差测量仪器的市场受到挤压。同时, 由于齿轮整体误差测量技术本身有一些核心问题长期没有得到彻底解决, 齿轮整体误差测量的发展和应用在近 20 多年进入瓶颈期。

随着目前新技术条件的出现, 齿轮整体误差测量技术及其应用中的一些传统难题基于全新的解决方案已经得以解决, 齿轮整体误差测量原理固有的“效率高、信息全”的优势更加突出, 因此这项技术在基于快速测量的齿轮高效配对等领域有着广阔的发展和应用前景。如何发挥优势、弥补不足, 让中国首创的齿轮整体误差测量技术重放光彩是摆在中国齿轮行业科技人员面前的重要课题<sup>[8]</sup>。

本文综述了齿轮整体误差测量技术的基本原理、发展历程和研究现状, 分析了整体误差基础理论方面存在的难点和核心问题, 并给出可行的解决途径、突破方向和未来的研究趋势, 为齿轮整体误差测量技术及理论的研究发展提供参考和依据。

## 1 发展历程<sup>[9]</sup>

### 1.1 齿轮整体误差测量原理

齿轮整体误差测量技术独创性的提出了特殊的标准元件“跳牙”蜗杆<sup>[10]</sup>。跳牙蜗杆本质上是双头或三头蜗杆, 保留其中一个头作为“测量头”, 而把其他的齿面都减薄, 这样就实现了重合度小于 1 的“间齿单啮”测量, 可以获得传统的单啮测量无法获得的齿面误差信息(图 1、图 2)。测量时, 跳牙蜗杆带动被测齿轮旋转, 在跳牙蜗杆和被测齿轮的轴线上都装有圆

光栅, 跳牙蜗杆旋转一周, 就得到一个整体误差单元曲线。被测齿轮旋转两到三周, 就可以得到一条截面整体误差曲线。从齿轮整体误差曲线可以得到被测齿轮的各种单项误差和综合误差。

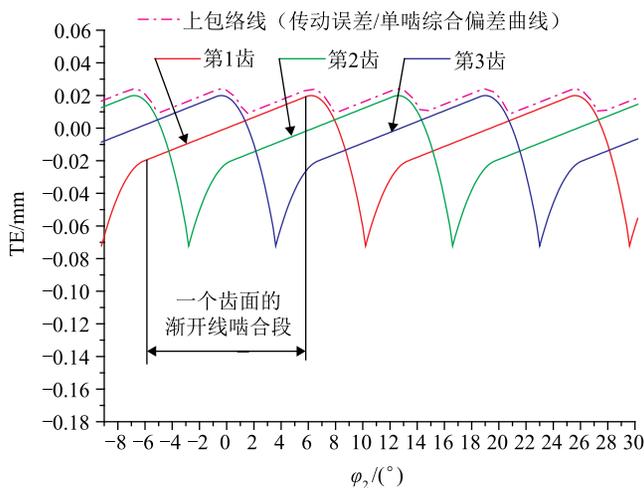


图 1 普通蜗杆得到的传动误差曲线

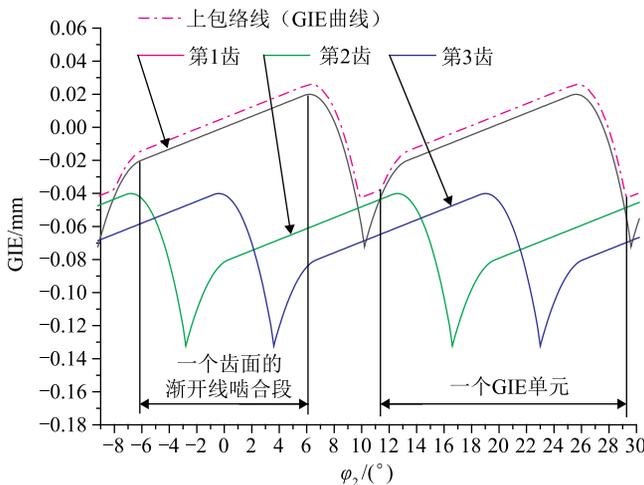


图 2 跳牙蜗杆得到的传动误差曲线（即 GIE 曲线）

### 1.2 齿轮整体误差测量仪器

齿轮整体误差测量方法的应用, 解决了单面啮合法测不出全齿形的难题(图 1), 使单面啮合测量仪从只能测出运动误差曲线一跃而能测出整体误差曲线, 从而成为一种应用范围更广的齿轮仪器<sup>[11]</sup>。国内出现最早的齿轮整体误差测量仪器是 1970 年代北京量具刃具厂生产的 CD320G 型蜗杆式光栅单啮仪<sup>[12]</sup>, 可测出截面整体误差曲线。

从一条截面整体误差曲线仅能获得齿轮一个截面上的误差信息, 这对于宽齿轮和斜齿轮仍然是不够的。因此 1975 年成都工具所开发了一次测出全齿宽整体误

差曲线的“齿轮单面啮合整体误差测量仪”，这种仪器增加了标准蜗杆沿齿轮轴向精密移动的机构。用这种仪器可以测得四种不同用途的整体误差曲线：截面整体误差曲线、全齿宽整体误差曲线、双向截面整体误差曲线和双向全齿宽整体误差曲线<sup>[3]</sup>。在这些曲线上不但可以得到所有误差项目的误差值，还可以清楚地看到各种误差的变化状况、误差之间的定量关系、各种误差与传动质量的关系以及不同切齿工艺误差的特殊规律。

国内使用最多的整体误差测量仪器是成都工具所1980年代末开始生产的CZ450型齿轮整体误差测量仪(图3)，采用计算机处理测量数据，曾是1990年代我国齿轮测量的主导仪器。成都工具所还开发了能测量锥齿轮整体误差曲线的CSZ500型锥齿轮整体误差测量仪<sup>[13]</sup>。成都工具所和北京量具刀具厂一共生产了1000多台蜗杆式整体误差测量仪器。蜗杆式单面啮合间齿测量仪器目前仍是整体误差测量仪器的主流。



图3 齿轮整体误差测量仪 CZ450

2010年，成都工具研究所研发了一种基于差动式啮合滚动点扫描的微小齿轮测量新技术<sup>[14]</sup>，采用双主轴驱动的方式，使被测微小齿轮和精密测量元件保持单面啮合传动，可得到微小齿轮的整体误差，并最终实现微小齿轮的单项几何精度和综合传动精度指标的测量。

德国Frenco公司于2000年前后推出了一种基于测量棱线式跳牙齿轮的单面啮合测量仪，可实现齿面拓扑信息测量<sup>[15]</sup>。Frenco公司还推出了使用薄片式跳牙齿轮作为测量元件的整体误差式测量仪器，其测量元件可沿被测齿轮轴向相对运动，测量被测齿轮多个截面的整体误差曲线。

### 1.3 齿轮整体误差理论<sup>[6]</sup>

齿轮整体误差测量技术除了发展出各种实用性的

新仪器外，在齿轮误差理论方面也取得进展，提出了齿轮整体误差理论。新的误差理论把齿轮所有工作齿面上的误差视为一个整体，并把各齿面点的误差按啮合顺序统一在啮合线上反映，从而与齿轮的传动质量和切齿工艺紧密地联系在一起。这个误差的整体可形象地呈现在整体误差曲线图上。新的整体误差理论借助于齿轮整体误差曲线，阐明和解释了各种齿轮误差的变化规律和相互关系、各种误差产生的原因和对传动质量的影响，在齿轮啮合机理、齿轮误差反映传动质量、齿轮传动质量控制、齿面修形、齿轮各种误差的相互关系和切齿工艺误差分析等多个方面澄清了一系列与齿轮精度有关的问题<sup>[16]</sup>。

齿轮整体误差有几个鲜明的特点：一是反映了齿轮的全部误差信息；二是精确地揭示了齿轮各单项误差的变化规律和彼此间的关系；三是形象地反映了误差齿轮的啮合过程。特别适合齿轮工艺误差分析和动态性能预报。对包含了丰富误差信息并揭示了啮合过程的齿轮整体误差曲线进行剖析，研究与之相关的齿轮副整体误差、齿轮修形、承载变形、振动与噪声<sup>[17]</sup>、齿轮配对<sup>[18]</sup>等问题，取得了一系列理论成果并得到具体应用<sup>[19]</sup>。

## 2 研究进展

齿轮整体误差测量技术的优点是测量效率高，适用于大批量生产中的零件检测和在线分选测量。但该方法需要标准元件并且测量精度不仅与测量仪器相关，更取决于标准元件的精度。此外，齿轮整体误差测量基础理论中几个难点问题长期没有很好的解决，近20年来，齿轮整体误差测量的发展和进入进入了瓶颈期。近期这些核心关键问题在理论和实践上都取得了一些重要进展<sup>[20]</sup>，并实现了齿轮整体误差测量原理在大批量汽车齿轮的在线快速测量中的首次应用。

### 2.1 整体误差理论单元曲线的精确计算

在同时啮合齿面对数小于1的条件下，被测齿轮与标准元件（蜗杆或齿轮）的单齿形完整啮合过程形成的整体误差单元曲线是由被测齿轮的顶刃啮合曲线、渐开线齿形啮合曲线和标准元件的顶刃啮合曲线共同组成的<sup>[10]</sup>，而截面整体误差曲线是由多个整体误差单元曲线组成的。当标准元件和被测齿轮的齿面都是没有误差的理想设计齿面时，单齿形完整啮合过程形成的理想的整体误差单元曲线称为整体误差理论单元曲线。整体误差理论单元曲线是在整体误差曲线上自动

找定齿廓评定区域和计算被测齿轮各单项误差的基本依据,获取精确的整体误差理论单元曲线是处理和析实测整体误差曲线的重要理论基础。

当被测齿轮的设计齿面为理想渐开螺旋面时,整体误差理论单元曲线的计算难点仅在于啮入阶段和啮出阶段这两个顶刃啮合过程,这两个过程都是齿顶螺旋线与渐开螺旋面的空间啮合过程。1973年,郭恒大给出了仅存在正基节误差或负基节误差时顶刃啮合过程的“齿轮转角误差函数”,其实质就是整体误差单元曲线上两个顶刃啮合阶段的曲线函数<sup>[21]</sup>;其计算过程是基于假想平面齿条的,且在计算中略去了高阶小量,因此该方法是一种齿轮整体误差理论单元曲线的近似计算方法。1989年,黄复华提出上述顶刃啮合过程的本质为螺旋齿轮副的“棱-面”啮合,给出了适用于各种类型的渐开线圆柱齿轮副的“棱-面”啮合误差曲线的计算公式<sup>[22]</sup>;但是该方法仅适用于存在单一基节偏差的情况,对于被测齿轮齿面存在修形或其他误差的情况并不适用。当被测齿轮齿面存在修形时,不仅渐开线啮合段的误差曲线受到修形的影响,啮出阶段顶刃啮合曲线也同样受到修形的影响。

之前的研究均未解决有修形齿轮的整体误差理论单元曲线精确计算问题。作者提出了基于渐开线蜗杆和螺旋齿轮虚拟啮合与接触仿真的整体误差理论单元曲线计算新方法。该方法建立了渐开线蜗杆和螺旋齿轮齿面的特殊数学模型,引入二维平面内的最小值优化算法替代了基于啮合原理的隐式微分方程组的求解,只用一组统一的公式就可获得包括啮入阶段、渐开线啮合段和啮出阶段的整体误差理论单元曲线。在被测齿轮有安装误差及齿面存在拓扑修形的条件下该方法仍然适用。该方法很好地解决了渐开线蜗杆与螺旋齿轮空间啮合条件下有修形齿轮的整体误差理论单元曲线精确获取问题,满足了实测整体误差曲线数据分析与处理的需要<sup>[23]</sup>。

## 2.2 齿廓评定区域的自动找定

整体误差曲线上齿廓评定区域起点和终点位置的全自动找定是1970年整体误差概念提出之后的20年中,整体误差测量急需解决而又未能解决的问题<sup>[21]</sup>。1983年,北京量具刃具厂生产的CD320W型万能式齿轮单面啮合检查仪以“齿间固定弦定位法”自动标定出渐开线齿形误差曲线的起止点<sup>[24]</sup>。这种方法需要特殊的锥形测头及其运动机构,并对仪器各运动轴间的几何位置关系提出了很高的要求,因此在实践上并没

有得到普遍的采用。1989年,黄复华提出用曲线拟合的方法确定整体误差曲线上齿廓评定区域的起止点,取得了较好效果,试验中可以达到 $0.2^{\circ} \sim 0.4^{\circ}$ 的找定精度,能够满足实际测量的需求<sup>[9]</sup>。但是,该方法在测量小模数齿轮,或齿数较少或较多的齿轮时,计算理论曲线的精度不高,导致齿顶、齿根的标定位置不可信,不能作为判别齿形误差的依据。1990年张乃君等提出了在不同使用状态下(包括平行轴、交错轴、高度变位和角度变位等)对齿轮进行精度检测时正确计算齿形受检范围的计算方法,考虑了多种因素对受检范围的影响及测量中控制受检范围的方法,纠正了传统计算方法中的一些不足<sup>[25]</sup>。1993年,吴斌、柏永新提出了用互相关函数找定齿形起测点的新方法,该方法受被测齿轮模数、齿数的影响较小<sup>[26]</sup>;但实际应用中该方法找定齿廓评定区域起点的精度仍然不足,齿形误差曲线起点的自动获取问题并未彻底解决。直至目前,CZ450等整体误差测量仪器上齿廓评定区域起止点的自动找定功能仍存在明显不足,在许多情况下需要由操作人员手工指定齿廓评定区域。

通过对整体误差单元曲线的三个形成阶段的深入分析和对比,作者提出在使用曲线匹配原理确定齿廓评定区域时整体误差单元曲线上不同阶段数据的可信程度差别巨大、必须加以区别对待的新观点;并基于这个观点提出了一种以啮出阶段数据为主确定齿廓评定区域的新方法<sup>[27]</sup>。为客观评价各种齿廓评定区域确定方法的优劣,作者提出了评价齿廓评定区域确定精度的一致性指标,并进行了标准齿轮和产品齿轮在不同转速下的测量实验,对比分析了由三种不同方法获取的单元起点位置的一致性<sup>[27]</sup>。实验数据表明单元曲线不同阶段数据可信程度不同的判断是正确的,以啮出阶段数据为主确定齿廓评定区域的新方法得到的单元起点位置一致性最好,可以满足汽车齿轮快速测量的要求,尤其在测量产品齿轮时新方法的效果显著优于传统方法。

## 2.3 整体误差测量“原理误差”的消除

在齿轮整体误差测量实践中很早就发现,对同一个齿轮,用整体误差式仪器得到的齿廓误差曲线和用单项测量仪器测得的齿廓误差曲线之间存在差异,也即整体误差单元曲线上齿廓评定区域内的曲线和作为参考的齿廓偏差曲线之间存在差异。这些差异是否是整体误差测量原理(间齿单面啮合测量原理)固有的“原理误差”,如何解释这些差异,能否消除这些差异,

成为整体误差测量理论需要解决的一个关键问题。

针对这个问题,国内一些学者从不同角度进行了研究,分别取得了一些进展。文献[28]提出齿面几何特征和运动特征的概念,认为运用单面啮合(指整体误差测量)和单项测量技术测得的结果是有区别的,齿面的几何特征和运动特征只有在高精度时才能相互代替。为了解释整体误差测量与单项测量结果不一致的现象,文献[29]提出整体误差测量过程中存在“平差效应”,认为其实质是曲率干涉,并认为对于中等模数、中等齿数、中等精度以下的齿轮,整体误差测量发生平差几乎是必然的;且“平差效应”对测量是不利的,影响了测量的灵敏度。文献[30]使用齿轮整体误差测量过程数字仿真的手段研究了测量中啮合点位置变异引起的误差,提出啮合点变异会对测量产生负面效应,并借助数字仿真研究了负面效应的影响程度,认为这个影响是不容忽视的。

但上述研究仅针对导致测量结果存在差异的某方面的原因进行分析,未能辨析曲率干涉、平差效应、接触点变异等现象之间的关系;也没有提出提高整体误差式齿轮量仪测量精度及减小测量结果差异的方法。

作者通过对齿轮整体误差测量中异点接触现象的分析,提出了异点接触误差的定义和计算方法,分析了异点接触误差和曲率干涉误差在本质上的不同之处,提出了基于准形态学滤波的异点接触误差修正方法,可部分消除“曲率干涉”的影响,减小整体误差测量结果与单项测量结果之间的差异<sup>[31]</sup>。经过异点接触误差修正后的整体误差测量结果更加接近于真实的被测齿廓。该方法对被测齿廓的零阶误差、一阶误差和二阶误差引起的异点接触误差的修正效果非常显著,对高阶误差引起的异点接触误差的修正效果则相对较差。应用该方法还可识别整体误差测量中出现的一些脱啮现象,进而部分地消除脱啮现象对测量结果的不利影响。

## 2.4 整体误差测量原理应用于在线快速测量

2013年起,在国家科技重大专项支持下,哈量集团和北京工业大学等单位合作开发了一种汽车齿轮在线快速测量机,2015年底已在北齿和浙江双环开始现场试用。该测量机采用蜗杆式间齿单啮整体误差测量原理,集成实现自动上下料功能的工业机器人,组成可用于汽车齿轮生产线的在线检测系统(图4)。该测量机检测项目全,测量效率高,并且实现了被测齿轮全部测量信息的在线实时分析和保存,为汽车齿轮的



图4 汽车齿轮在线检测系统

高效配对提供了必要条件<sup>[32]</sup>。

## 3 发展趋势

随着现代计算机技术、传感器技术和互联网/物联网技术的快速发展,齿轮的设计、制造、测量等领域都发生着快速的变化,新的技术方案不断出现。由于具有测量效率高、信息全等原理优势,齿轮整体误差测量在新技术条件下迎来了新的发展机遇,具有广阔的应用前景。

### 3.1 测量仪器方面

齿轮整体误差测量仪器是齿轮整体误差测量技术的载体,是相关技术与理论的集中体现。下面从精度、效率、功能、新技术应用和使用范围拓展等方面对齿轮整体误差测量仪器的发展趋势进行展望。

受限于测量元件的精度和测量仪器自身的精度,测量精度相对较低是整体误差式齿轮测量仪器逊于齿轮测量中心的主要不足。提高测量元件精度的方法前文已经述及。提高仪器精度的措施很多,包括改进机械结构设计、提高机械加工和装配精度、采用高精度的传感器、采用高性能的数据采集系统、采用有效的误差补偿算法和数据处理算法等。其中借鉴三坐标测量机的误差补偿研究成果,针对整体误差测量机自身的结构特点开发专用的误差分离和补偿算法是最容易取得成效的研究领域。

测量效率和精度是量仪重要的性能指标。目前,整体误差式齿轮测量仪器的效率远高于齿轮测量中心,但仍有继续提高的空间。随着机械动力学的快速发展和计算机软、硬件水平的提升,齿轮传动领域的动力学研究已经非常广泛和深入,机床动力学对齿轮加工过程也有很多研究,但测量领域的动力学研究目前还很不充分,而整体误差测量机动力学研究几乎是一片

空白。为了进一步提高整体误差式齿轮量仪的测量效率,有必要深入研究整体误差测量机动力学,一方面解决一定机械结构参数下最高许用测量速度的理论计算问题,另一方面为提高最高许用测量速度提出机械、电气和控制策略方面的优化建议。齿轮整体误差测量中“脱啮”现象的形成条件、影响因素及规律,以及抑制措施等也是亟待研究的重点问题。此外,引入机器人上下料和机器视觉手段减少测量辅助时间也是提高整体效率的有效措施。

目前齿轮整体误差测量技术主要用于批量生产的圆柱齿轮测量,有用于锥齿轮测量的仪器但实际应用不多,在面齿轮、摆线齿轮等测量领域则没有产品化的量仪。随着我国机器人减速器行业的快速发展,用于摆线针轮减速器组件的整体误差测量仪器也是发展方向之一。

整体误差式测量仪器的机构非常简单,仅需要两个回转运动主轴即可完成测量。相比于齿轮测量中心,不但对环境因素不敏感,而且误差形式简单、误差项目少,易于实现实时补偿。因此,整体误差式测量仪器是最适合于生产现场的测量仪器。对于难以用常规方法测量的特大齿轮和微小齿轮,开发基于整体误差的在机测量装置也是有可能取得重要进展的研究方向。

### 3.2 工艺误差分析方面

传统的统计过程控制(Statistical Process Control, SPC)主要关注加工过程的稳定性分析,对工业误差溯源的帮助则较为有限。借助齿轮整体误差测量技术可高效地获取被测齿轮的全部齿廓误差信息或齿面拓扑信息,采用新的统计分析方法处理整体误差的大量测量数据可以得到优于传统方法的评价结果,可用于分析齿轮加工误差来源及预测齿轮使用性能<sup>[33-35]</sup>。这种新的分析和评价方法的正确性和有效性通过大量的应用实例验证之后,未来可应用于针对特定加工设备的在线误差补偿。

传统上圆柱齿轮加工中基于测量的机床参数反调是由人工完成的,仅在调整参数特别复杂的螺旋锥齿轮加工领域引入了机床参数的计算机辅助调整。但随着齿轮传动系统功率密度的不断提升,圆柱齿轮的齿廓修形、齿向修形以及组合修形已得到普遍推广,圆柱齿轮拓扑修形的加工和测量技术已得到实际应用。因此,用于修形圆柱齿轮的基于测量的机床参数自动反调技术(即修形圆柱齿轮的“闭环”制造技术)已具有了实际的应用价值。齿轮整体误差测量具有效

率高、信息全的优点,是最适用于该应用场合的齿轮测量原理,未来在这个领域内的研究必将取得丰硕的成果。

### 3.3 齿轮配对方面

在齿轮整体误差概念提出伊始就已经有了对批量生产齿轮进行基于测量的配对使用,从而在不提高加工质量的前提下改善齿轮传动质量的构想。齿轮副整体误差理论<sup>[36]</sup>建立了主、从动齿轮几何误差与齿轮副运动误差之间的桥梁,为基于齿轮测量的有误差齿轮啮合过程分析和传动质量预报提供了理论基础。以齿轮副整体误差为基础的新动力学模型<sup>[37]</sup>为分析和控制齿轮系统的动力学行为提供了理论依据,为通过齿轮选配降低齿轮振动和噪声提供了一种新途径。

随着汽车齿轮快速测量机<sup>[32]</sup>和齿轮振动性能实验机<sup>[38]</sup>相继投入试用,在大量整体误差测量数据和齿轮传动性能试验数据的支持下,基于齿轮整体误差测量的齿轮分选和配对理论的研究必将取得突破性的进展,有望在短期内得到实际应用。

未来,随着在机测量装置及数控机床数据接口标准化工作的不断发展,以及物联网、云计算、大数据等使能条件的完善,齿轮配对将突破一厂、一地的限制,最终趋势是实现全领域齿轮的全局智能调配使用。

### 3.4 其他方面

齿轮整体误差测量在基础理论方面有两个需要重点关注研究领域。一是进一步解决基础理论中的核心关键问题,包括在有轴系运动误差和测量元件误差条件下的整体误差理论单元曲线的精确计算问题、进一步提高齿廓评定区域自动确定算法的精度及其鲁棒性问题、进一步减小和消除整体误差测量结果的差异问题等;二是继续拓展整体误差测量技术的应用范围,开发用于圆锥齿轮、面齿轮、摆线齿轮等传动元件的整体误差测量方法、仪器和相应的测量数据分析与评价方法。

此外,测量元件的通用性较差一直是影响整体误差测量推广应用的重要因素之一。目前的整体误差测量原理要求测量元件和被测齿轮的模数、压力角和基圆齿距等要取得基本一致,这就限制了测量元件的通用性。能否在现代数控技术的支持下,采用特殊的测量元件改善整体误差测量元件的通用性,也是近期有可能取得重大突破的研究领域。

## 4 结语

齿轮整体误差测量技术作为我国首创的齿轮整体

误差理论的重要组成部分,曾经为我国齿轮行业整体技术水平的提升发挥过重要作用。虽然随着齿轮测量中心的推广普及,近20年来齿轮整体误差测量技术的发展和應用进入了瓶颈期,但我们必须看到该技术在测量原理上的先进性和在一些细分市场上的优势。齿轮测量中心得到大量的应用之后,其购置成本高、对环境要求高、测量效率低,应用于现场工艺分析耗费工时且信息量小的不足逐渐显现出来。随着齿轮整体误差测量基础理论中关键问题的深入研究和逐步解决,齿轮整体误差测量精度较低、柔性较差的不足正在被克服和弥补,齿轮整体误差测量的优势正在突显出来。

同时,随着计算机、传感器、数控系统等领域的技术进步,及物联网、云计算、大数据等使能技术的不断发展,齿轮加工和检测领域出现了全新的技术条件。在新技术条件下,齿轮整体误差测量中的一些传统的难题获得了全新的解决方案,而其测量效率高、信息全面的传统优势则更加突出。

### 参 考 文 献

- [1] Goch G. Gear Metrology [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2003, 52 (2): 659-695.
- [2] 石照耀, 费业泰, 谢华锬. 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.
- [3] 一机部军管会 (70) 一机军技字 223 号: 单啮仪总结、交流、推广会通知 [Z].
- [4] 黄立里, 钟行群. 齿轮的动态全误差曲线及其测量方法 [J]. 中国科学, 1973 (4): 434-453.
- [5] 我国齿轮测量技术达到世界水平 [N]. 人民日报, 1978-03-15 (2).
- [6] 姚福生, 石照耀, 张兆龙, 等. 中国特色的齿轮测量——齿轮整体误差测量技术 [C] // 中国工程院. 中国科学技术前沿. 上海: 上海教育出版社, 1997.
- [7] 石照耀. CNC 齿轮测量中心的演变与展望 [J]. 工具展望, 1992 (1): 20-22; 1992 (2): 13-16; 1992 (3): 7-8.
- [8] 石照耀, 张兆龙, 谢华锬. 齿轮整体误差测量技术的发展与应用前景 [J]. 工具展望, 199, (2): 14-17.
- [9] Huang T N. The development of gear integrated error measurement in China [C] // Proceedings of Inter. Conf. of Gearing, 1989, 25-31.
- [10] 黄童年. 齿轮动态整体误差测量新技术 [J]. 四川机械, 1979 (1): 1-26.
- [11] 柏永新. 齿轮动态整体误差测量新技术的应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.
- [12] 潘锋. 自动量仪动态精度 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [13] Zhang Z, Huang T, Huang S, et al. New kind of gear measurement technique [J]. Measurement Science and Technology, 1997, 8 (7): 715-720.
- [14] 冯刚, 谢华锬, 叶勇, 等. 微小齿轮整体误差精密测量新技术 [J]. 中国测试, 2010, 36 (3): 6-10.
- [15] Frenco. Inspecting All Flanks in Minutes [J]. Gear Technology, 2004, 5/6: 9-10.
- [16] 柏永新. 齿轮精度与综合检验 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1986.
- [17] 石照耀. 齿轮整体误差与齿轮传动噪声的关系研究 [D]. 西安: 陕西机械学院, 1988.
- [18] 康焱. 齿轮副整体误差及其在齿轮配对中的应用 [D]. 北京: 北京工业大学, 2011.
- [19] 舒赞辉. 齿轮高效配对原理及试验研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2017.
- [20] 王笑一. 齿轮整体误差测量的基础理论及其应用研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
- [21] 郭恒大. A MATHEMATICAL ANALYSIS OF INVOLUTE GEAR PERIODICAL ERRORS [J]. Science in China Ser A, 1974 (3): 349-362.
- [22] 黄复华. 螺旋齿轮副的“棱-面”啮合 [J]. 机床, 1989 (2): 20-22, 39.
- [23] Shi Z, Wang X, Shu Z. Theoretical Method for Calculating the Unit Curve of Gear Integrated Error [J]. Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, 2016, 138 (3). doi: 10.1115/1.4032400.
- [24] 全国齿轮加工和测量学术讨论会论文摘要 (二) [J]. 工具技术, 1983 (3): 45-48.
- [25] 张乃君, 阎德珍. 渐开线圆柱齿轮齿形受检范围的计算与控制 [J]. 工具技术, 1990 (12): 9-14.
- [26] 吴斌, 柏永新. 齿轮整体误差测量中齿形起测点的找定 [J]. 计量技术, 1993 (10): 3-6.
- [27] 石照耀, 王笑一, 于渤, 等. 齿轮整体误差测量中齿廓评价区域确定方法 [J]. 机械工程学报, 2017, 53 (3): 34-42.
- [28] 张兆龙. 齿轮误差单面啮合测量技术的解析与几何分析 [J]. 工具技术, 1993 (9): 42-45.
- [29] 段振云, 金嘉琦, 郑鹏, 等. 齿轮整体误差测量过程的平差效应 [J]. 机械工程学报, 2001, 37 (2): 55-57.
- [30] 商向东, 付景顺, 段振云, 等. 齿轮整体误差测量过程的数字仿真 [J]. 机械工程学报, 2000, 36 (5): 15-17.
- [31] 石照耀, 王笑一. 用于接触式测头测量中提取二维轮廓的准形态学滤波方法 [P]. 2014-10-08.
- [32] Wang X, Shi Z, Lin J, et al. Design of a rapid inspection machine for automotive gears based on gear integrated error [C] // ASME 2015 International Design Engineering

Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Boston, 2015: V010T11A035.

[33] Wang X Y, Shi Z Y, Shu Z H, et al. Study on evaluation system of gear accuracy based on statistical analysis [C] // International Gear Conference 2014: 26th - 28th August 2014, Oxford: Chandos Publishing, 2014: 905 - 913.

[34] 王笑一, 石照耀, 林家春. 基于全齿廓信息的齿距偏差快速测量方法 [J]. 仪器仪表学报, 2016 (10): 2202 - 2210.

[35] 王笑一, 石照耀. 基于全信息的齿轮精度评价体系 [J]. 中国科学: 技术科学, 2017 (1).

[36] 石照耀, 康焱. 齿轮副整体误差及其获取方法 [J]. 天津大学学报 (自然科学与工程技术版), 2012, 45 (2): 128 - 134.

[37] 石照耀, 康焱, 林家春. 基于齿轮副整体误差的齿轮动力学模型及其动态特性 [J]. 机械工程学报, 2010, 46 (17): 55 - 61.

[38] Shu Z, Shi Z, Wang X, et al. Development of Pairing Performance Tester for Vehicles Cylindrical Gears [C] // ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Boston, 2015: V010T11A019.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51635001)

## 作者简介



石照耀 (1964 -), 教授, 博士, 博士生导师, 教育部长江学者特聘教授、国务院特殊津贴专家、“十二五”全国机械工业科技创新领军人才, 国际标准化组织 ISO/ TC60 中国委员、德国国家计量研究院 (PTB) 客座科学家、北京市精密测控技术及仪器工程技术研究中心主任。长期致力于精密测试技术与仪器、齿轮工程和机器人评价技术研究, 在精度理论、测试技术与仪器, 精密齿轮传动, 精密机械设计等方面, 取得了一批创新成果, 并在重大装备上获得应用, 推动了我国装备行业的发展。

对齿轮测试技术的研究, 覆盖了齿轮工程的全领域: 从 0.5 毫米的微型齿轮到 10 多米的特大齿轮, 从圆柱齿轮和锥齿轮到面齿轮和环面蜗杆, 从齿轮工件到复杂齿轮刀具, 从计量室测量到车间检测站到生产线的在线测量, 其研究成果获得国内外公认。长期参与国际齿轮标准的制定, 为我国争取在国际齿轮界能

拥有更多的话语权而不懈奋斗。

主持了高档数控机床与基础制造装备国家科技重大专项、国家重大科学仪器设备开发专项、国家科技支撑计划、国家 863 计划、国家自然科学基金重点项目及面上项目等国家及省部级、企业科研项目 40 余项。研制了一系列大型精密测量仪器, 取得了良好的经济社会效益; 参与了一系列国际、国家和行业技术标准的制订; 参与我国机械行业一系列规划和科技计划项目的起草, 国家及省部级科技奖和一系列科技计划项目的会评专家, 专业领域主要国际会议的科学委员会成员。迄今, 获中国机械科技一等奖 2 次, 国家科技进步二等奖 2 次。



王笑一, 博士, 河南科技大学机电学院讲师。1999 年本科毕业于洛阳工学院机制专业, 2005 年硕士毕业于河南科技大学机制专业, 2016 年博士毕业于北京工业大学。主要讲授课程为《数控技术及装备》和《微机控制技术》; 主要研究方向为精密测试技术及仪器; 主持国家自然科学基金面上项目 1 项, 参加国家科技重大专项 1 项, 国家自然科学基金重点项目 1 项; 发表 SCI、EI 收录论文 7 篇。2015 年获第七届国际精密机械测量会议 (ISPMM2015) 最佳报告论文奖。2017 年获得第七届“上银优秀机械博士论文奖”优秀奖。