

# 齿轮测量技术 100 年——回顾与展望

石照耀<sup>1</sup>, 费业泰<sup>2</sup>, 谢华锐<sup>3</sup>

(1. 北京工业大学, 北京 100022; 2. 合肥工业大学, 合肥 230009;  
3. 成都工具研究所, 成都 610056)

**【摘要】** 全面概述了过去 100 年齿轮测量技术的发展历程, 给出了 6 件标志性事情; 着重论述了测量原理的演变、实现测量原理技术方式的发展以及测量结果的表述与利用; 介绍了当今 CNC 齿轮测量中心的原理、组成和特点; 结合 90 年代以来齿轮测量技术领域几股新潮流, 展望了未来齿轮测量技术的一些研究方向。

**【关键词】** 齿轮; 齿轮测量; 齿轮误差; 齿轮测量仪器

**【中图分类号】** TG86; TH132 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1009-1742(2003)09-0013-05

## 1 起源与历程

齿轮的应用有着悠久的历史, 而齿轮的科学研究却始于 17 世纪 M. Camus 发现齿轮传动的节点原理; 1765 年, L. Euler 将渐开线齿形引入齿轮, 100 多年后, Fellows 等人应用范成法高效地生产出渐开线齿轮, 从此渐开线齿轮得到了广泛应用。

由于制造与安装等方面的原因, 实际齿轮总是存在着误差。这种误差对传动系统的精度与动态特性(特别是振动与噪声)有直接的影响。因此, 如何表征、测量、分析、利用和控制齿轮误差一直是不断探索的课题。

齿轮测量的基础是齿轮精度理论<sup>[1]</sup>。齿轮测量技术的发展历程是以齿轮精度理论的发展为前提的。齿轮精度理论的发展实质上反映了人们对齿轮误差认识的深化。迄今, 齿轮精度理论经历了齿轮误差几何学理论、齿轮误差运动学理论和齿轮误差动力学理论的发展过程。其中, 齿轮误差动力学理论还处在探索中。第一种理论将齿轮看作纯几何体, 认为齿轮是一些空间曲面的组合, 任一曲面都可由三维空间中点的坐标来描述, 实际曲面上点的位置和理论位置的偏差即为齿轮误差。第二种理论将齿轮看作刚体, 认为齿轮不仅仅是几何体, 也是

个传动件, 并认为齿轮误差在啮合运动中是通过啮合线方向影响传动特性的, 因此啮合运动误差反映了齿面误差信息。第三种理论将齿轮看作弹性体, 对齿廓进行修形, “有意地”引入误差, 用于补偿轮齿承载后的弹性变形, 从而获取最佳动态性能, 由此形成了齿轮动态精度的新概念。齿轮精度理论的发展, 导致了齿轮精度标准的不断丰富和更新, 如传动误差、设计齿廓的引入等。反过来, 齿轮测量技术的发展也为齿轮精度理论的应用和齿轮标准的贯彻提供了技术支撑。

齿轮测量技术及其仪器的研发已有近百年的历史, 其历程如图 1 所示。在这不短的发展历程中, 有 6 件标志性事情:

1) 1923 年, 德国 Zeiss 公司在世界上首次研制成功一种称为“Tooth Surface Tester”的仪器, 它实际上是机械展成式万能渐开线检查仪<sup>[2]</sup>。在此基础上经过改进, Zeiss 公司于 1925 年推出了实用型仪器, 并投入市场。该仪器的长度基准采用了光学玻璃线纹尺, 其线距为 1 μm。该仪器的问世, 标志着齿轮精密测量的开始。在我国得到广泛使用的 VG450 就是该仪器的改进型。

2) 50 年代初, 机械展成式万能螺旋线检查仪的出现<sup>[3]</sup>, 标志着全面控制齿轮质量成为现实。

3) 1965年,英国研制出光栅式单啮仪<sup>[4]</sup>,标志着高精度测量齿轮动态性能成为可能。

4) 1970年,以黄童年为主的中国工程师研发的齿轮整体误差测量技术<sup>[5]</sup>,标志着运动几何法测量齿轮的开始。

5) 1970年,美国 Fellows 公司在芝加哥博览会展出 Microlog 50,标志着数控齿轮测量中心的开始<sup>[6]</sup>。

6) 80年代末,日本大阪精机推出基于光学全息原理的非接触齿面分析机 FS-35,标志着齿轮非接触测量法的开始<sup>[7]</sup>。

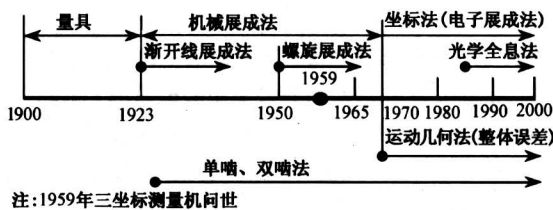


图1 齿轮测量技术发展历程

Fig.1 Evolution of gear measurement technology

## 2 齿轮测量技术的演变

整体上考察过去一个世纪里齿轮测量技术的发展,主要表现在三个方面<sup>[8]</sup>:

1) 在测量原理方面,实现了由“比较测量”到“啮合运动测量”,直至“模型化测量”的发展。

2) 在实现测量原理的技术手段上,历经了“以机械为主”到“机电结合”,直至当今的“光-机-电”与“信息技术”综合集成的演变。

3) 在测量结果的表述与利用方面,历经了从“指示表加肉眼读取”,到“记录器记录加人工研判”,直至“计算机自动分析并将测量结果反馈到制造系统”的飞跃。

与此同时,齿轮量仪经历了从单品种单参数仪器(典型仪器有单盘渐开线检查仪),单品种多参数仪器(典型仪器有齿形齿向检查仪),到多品种多参数仪器(典型仪器有齿轮测量中心)的演变。

### 2.1 机械展成式测量技术<sup>[9]</sup>

20世纪70年代以前,齿轮测量原理主要以比较测量为主,其实质是相对测量。具体方式有两种:一是将被测齿轮与一标准齿轮进行实物比较,从而得到各项误差;二是展成测量法,就是将仪器的运动机构形成的标准特征线与被测齿轮的实际特征线作比较,来确定相应误差;而精确的展成运动

是借助一些精密机构来实现的。不同的特征线需要不同的展成机构,同一展成运动可用不同的机械结构来实现。比较测量的主要缺点是:测量精度依赖于标准件或展成机构的精度,机械结构复杂,柔性较差,同一个齿轮需要多台仪器测量。

从20世纪20年代至60年代末,各国对机械展成式测量技术的研究历经了近半个世纪。早期着重于渐开线展成测量技术的研究,后来将展成测量思想移植到了螺旋线测量上,先后开发出多种机械式渐开线展成机构,如单盘式、圆盘杠杆式、正弦杠杆式、靠模式等。尤以圆盘杠杆式应用最广,属于这一类的仪器有:Zeiss VG450, Carl Mahr 890和891S, MAAG SP60和HP100,大阪精机GC-4H和GC-6H以及哈量3201。对于齿廓误差测量而言,机械展成式测量技术仅限于渐开线齿廓误差测量上。对于非渐开线齿轮的端面齿廓测量,采用展成法测量是十分困难的,因为展成机构太复杂并且缺乏通用性。

对于精确的螺旋展成机构,主要采用正弦尺原理,只是如何将正弦尺的直线运动精确地转换为被测工件的回转运动的方式各不相同。这种机构在滚刀螺旋线测量上应用最为典型,例如,德国Fette公司生产的UWM型滚刀测量仪,Zeiss厂生产的万能滚刀测量仪,前苏联ВНИИ设计的万能型滚刀测量仪,意大利Samputensili厂的Su-130型滚刀测量仪,美国Michigan公司生产的万能滚刀测量仪,Klingelnberg公司的PWF250/300,等等。

20世纪70年代以前,机械展成式测量技术已经发展成熟,并在生产实践中经受了考验。迄今,基于这些技术的仪器仍是一些工厂检测齿轮的常用工具。但70年代以后,随着电子展成式测量技术的出现,机械展成式测量技术的发展宣告终结。

### 2.2 齿轮整体误差测量技术<sup>[10]</sup>

1970年是齿轮测量技术的转折点。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。齿轮整体误差测量技术是从齿轮综合测量中提取单项误差和其他有用信息。1970年,我国在齿轮测量技术方面取得突破,发明了基于“跳牙”蜗杆的齿轮整体误差测量原理。经过30多年的完善与推广<sup>[11]</sup>,这种起源于渐开线圆柱齿轮测

量的方法现已成为传动元件的运动几何测量法<sup>[12]</sup>，采用的标准元件也从蜗杆扩展到齿轮、齿条等。其基本思想是，将被测对象作为一个刚性的功能元件或传动元件与另一标准元件作啮合运动，通过测量啮合运动误差来反求被测对象的误差。其鲜明特点是：形象地反映齿轮啮合传动过程并精确地揭示了齿轮单项误差的变化规律以及误差间的关系，特别适合于齿轮工艺误差分析和动态性能预报。采用这种方法的仪器测量效率高，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。典型仪器是成都工具研究所生产的CZ450 齿轮整体误差测量仪、CSZ500 锥齿轮测量机和CQB700 摆线齿轮测量仪。我国开发的锥齿轮整体误差测量技术的专利已经卖到德国，德国也开发了圆柱齿轮整体误差测量技术及其仪器。

### 2.3 CNC 坐标测量技术

“坐标测量”是1959年夏季在法国巴黎召开的国际机床博览会上由英国 Ferranti 公司首先提出的。这一概念的提出是对传统测量概念的重大突破，其重要意义在于把对测量概念的理解从单纯的“比较”引伸到“模型化测量”的新领域，从而推动了测量技术的蓬勃发展。对齿轮而言，从真正意义上讲，坐标化测量始于70年代初；之后，基于各种坐标原理的齿轮测量技术一直是重要的研究课题。模型化坐标测量原理的实质是将被测零件作为一个纯几何体（相对“运动几何法”而言），通过测量实际零件的坐标值（直角坐标、极坐标、圆柱坐标等），并与理想要素的数学模型作比较，从而确定相应的误差。坐标测量法的特点是：通用性强，主机结构简单，可达到很高的测量精度。

齿轮测量坐标法细分为直角坐标法、极坐标法和圆柱坐标法。实现坐标法有多种形式，如用万能工具显微镜与分度头的组合也可以用来测量齿轮，显然，这种静态测量方式不仅效率低，而且测量精度得不到保证。现代光电技术、微电子技术、计算机技术、软件工程、精密机械等技术的发展才真正为坐标测量法的优越性提供了坚实的技术基础。

齿轮的 CNC 坐标测量技术起源于20世纪70年代的电子展成测量技术<sup>[13]</sup>。电子展成法是相对机械展成法而言的。所谓“电子展成”，即通过由计算机、控制器、伺服驱动装置及传动装置组成的展成系统，取代机械展成法中的展成装置，形成某

种特定曲线轨迹（如螺旋线、齿廓线等）<sup>[14]</sup>。

20世纪70年代以来，电子展成经历了从 NC 到 CNC 的发展过程。目前的 CNC 展成根据实际运动轨迹可分为两种，一种是展成系统形成一条非常标准的理论轨迹，测头感受到的示值可直接作为被测齿轮的误差。这种展成系统可由闭环控制系统或混合型（半闭环）控制系统来完成。由于形成理论标准轨迹的系统相对复杂，因此实际应用中还有另一种驱动系统，即开环驱动加误差补偿（即“粗传动+补偿”）。由于计算机的计算误差以及驱动装置与传动装置等都存在误差，开环电子展成系统中测头运动轨迹不能直接作为测量基准，此时，测头示值中既有被测量的成份，也包含展成系统的误差，因此，必须用位移检测元件测出各相关运动的实际位移量，再由计算机将实际位移量和测头的示值进行合成，补偿展成系统的误差，得到被测齿面上对应点的实际坐标；然后，计算机将实际坐标与被测量的理论模型进行比较，才能得到被测量的误差，这就是“非标准轨迹的电子展成法”<sup>[15]</sup>。

电子展成法一般是按被测齿轮的理论方程进行控制的。90年代以后，CNC 齿轮测量技术中出现了跟踪测量法。它是按被测参数的实际值进行控制的，可采用测头跟踪法和轴对轴跟踪法。测头跟踪法是在测量过程中根据测头的示值对相应坐标轴的测量位置进行调节，达到测头跟踪被测齿面运动，实现对齿轮的测量。轴对轴跟踪法是根据一根坐标轴的实际测量位置来调节其他坐标轴的位置，以完成测量工作。跟踪测量法不仅可以减少控制调节环节，而且有较大的测量灵活性，适合参数未知曲面，或虽然理论方程已知但工件实际误差超出测头量程的情况。当然，跟踪法的测量效率相对较低。

CNC 坐标测量技术在齿轮刀具、蜗轮蜗杆、锥齿轮、小模数齿轮、大齿轮和齿轮在线测量中也得到广泛采用。70年代以来，坐标测量法是齿轮测量技术的世界性主要潮流。

### 2.4 测量数据的处理与利用

在早期的齿轮测量中，人工读指示表（如千分表等）获取齿轮误差，得到的是误差幅值，仅仅能用来评判被检项目合格与否；电动记录器的出现，靠人工读曲线，使工艺误差分析成为可能；计算机的采用使自动处理测量结果、分析工艺误差并将分析结果反馈到加工系统进而修正加工参数成为现实。集专家系统、知识工程于一体的齿轮误差智能

分析系统也开始得到应用。

迄今,在齿轮测量数据处理方面,广泛使用的是最小二乘法,同时数字滤波技术也得到应用。虽然现代信号处理的一些方法已逐渐应用于齿轮测量数据处理中,但尚未实用化。

### 2.5 其他齿轮测量技术

进入20世纪90年代,基于各种光学原理(特别是相移原理)的非接触式齿轮测量技术得到了一定发展<sup>[16]</sup>,这种可称为“并联测量”的新方法代表着齿轮测量技术发展的一个新方向。

## 3 CNC 齿轮测量中心及其特点<sup>[17~18]</sup>

齿轮测量中心采用坐标测量原理,实际上是圆柱(极)坐标测量机。迄今已有美国、德国、日本、瑞士、中国、意大利等几个国家生产CNC齿轮测量中心。国产的典型产品是哈量的3903型齿轮测量中心;国外的典型产品是Klingelnberg的P系列,M&M公司的3000系列。各国的齿轮测量中心虽然原理上大同小异、功能相近,但实现方式却存在一定差异。主要表现在四个方面:

1) 在测量传感器等方面,测角一般采用高精度圆光栅,但测长因被测对象不同而有差异。精度要求很高的齿轮或很长的工件,一般采用双频(或单频)激光干涉仪作长度基准(如测量渐开线或螺旋线样板等);其他情况,则采用高精度长光栅。

2) 在机械系统的精度方面,高精度的轴系(气浮轴系)是必须的;而直线导轨的精度有靠机械精度保证的,也有采用误差修正技术达到的。

3) 在数控系统方面,70年代常为NC开环控制;80年代后,全为CNC控制,大多采用直流伺服电机或步进电机。目前已有采用交流伺服系统或直线电机的。

4) 在测头方面,有电感式的,也有光栅式的;有一维的,也有三维的,甚至有刚性的。刚性测头是不带测微传感器的。若采用刚性测头,则仪器通常是专用的。

齿轮测量中心一般由主机、CNC数控单元、数据采集单元、机间通讯接口、计算机及外设、测量软件 and 数据处理软件等部分组成。当今最新的CNC齿轮测量中心的主要特点是:

1) 在性能上是高效率、高精度、易操作的,所采取的措施有精密机械的优化设计,32位的CNC4或5轴数控系统,直线电机,三维测头和误

差修正技术。

2) 在功能上,包括齿轮(内、外)、齿轮刀具(滚刀、插齿刀、剃齿刀)、锥齿轮、蜗轮、蜗杆、螺杆、凸齿轮、拉刀等回转类零件的主要误差项目测量;轴类零件形位公差测量;强大的分析功能,如接触分析、工艺误差分析、齿根形状分析、参数反求等;可耦合到加工系统中,实时数据通信。

3) 在可维修性方面,能故障自诊断、网络远程故障诊断。

4) 在可升级性方面,包括软件的可升级和硬件的可升级。

与机械展成式测量仪器相比,CNC齿轮测量中心的优点是不言而喻的,其质的飞跃是为任意形状的齿廓测量提供了可能,而不仅仅局限于渐开线或直线齿廓。锥齿轮、K蜗杆(滚刀)、C蜗杆(滚刀)的测量就是明证。CNC齿轮测量中心为测控非线性螺旋曲面提供了工具。

## 4 潮流与展望

20世纪90年代以来,在世界范围内,齿轮测量技术领域出现了值得注意的几股潮流:

1) 齿轮整体误差测量与齿轮坐标测量合二为一。我国推出了既有标准蜗杆又有测头的齿轮测量机CZN450;而国外的CNC齿轮测量中心也能给出“虚拟整体误差”。

2) 齿轮测量中心与三坐标测量机合二为一。美国TSK公司的Radiance和Process Equipment Company的ND430就是按这种理念研制的。

3) 功能测试与分析测试合二为一。简化齿轮测量是发展趋势<sup>[19]</sup>,齿轮整体误差测量仪因高效率地给出齿轮全信息而会为世界接受。

4) 齿轮加工与测量合二为一(一体化)。自从1988年MAAG公司在CNC齿轮磨床SE202E上耦合CNC齿轮测量技术以来,齿轮在机测量技术在齿轮磨床上得到普通采用。

展望未来,与齿轮测量技术相关的研发重点包括:齿轮非接触绝对测量技术;齿轮虚拟测量技术<sup>[20]</sup>;齿轮的网络化测量与诊断技术;基于实测结果的齿轮性能虚拟分析技术(智能配对、动力学性能预报等);齿轮整体误差测量技术的进一步发展(指标量化、性能优化等);齿轮误差的智能分析技术;齿轮统计误差概念体系的建立及其相应的测量技术;生产现场的齿轮高速分选测量与分析技

术(目前 ITW 的 Model4823 为 450~600 件/h; 目标为 800 件/h); 精密机械、光电技术、微电子技  
术、软件工程等技术在齿轮量仪上的应用。

#### 参考文献

- [1] 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
- [2] Steinle A. New gear testers [J]. Werkstattstechnik, 1927, (21): 153~156
- [3] Hultzsch E. History and development of technical precision measuring instruments at Carl Zeiss Jena [J]. Jena Review, 1967, (12): 268~284
- [4] Munro R G. Measuring gear transmission error [J]. Metalworking Production, May 29, 1968: 5457
- [5] 黄潼年. 齿轮动态全误差曲线及其测量方法 [J]. 中国科学, 1973, 17(4): 434~453
- [6] Cleave D V. Big gears are accurately measured with computer-controlled system [J]. Product Engineering, Nov. 23, 1970: 4243
- [7] Fujio H, Kubo A, Saitoh S, et al. Laser holographic measurement of tooth flank form of cylindrical involute gear [J]. Journal of Mechanical Design, 1993, (116): 721~729
- [8] 石照耀. 复杂螺旋曲面特征线测量的理论与技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2000
- [9] 唐启昌. 圆柱齿轮测量[M]. 北京: 中国计量出版社, 1987
- [10] 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[A]. 中国工程院. 中国科学技术前沿[M]. 上海: 上海教育出版社, 1997
- [11] Huang T N. The development of gear integrated error measurement in China [A]. Proceedings of Inter Conf of Gearing [C], 1989. 25~31
- [12] 谢华锬, 石照耀. 传动元件的有控点共轭啮合运动几何测量法[J]. 工具技术, 1999, 33(11): 27~31
- [13] 谢华锬. 国外齿轮测量和齿轮量仪概况[A]. 国外机械工业基本情况参考资料——刀具、量具、量仪[M]. 北京: 第一机械工业部科学技术情报研究所, 1979. 170~204
- [14] 庄葆华, 李真. 齿轮近代测量技术与仪器[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986
- [15] 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
- [16] Wu S, Lu G. Comparative and absolute gear measurement by optical techniques [J]. National Center for Advanced Drivetrain Technologies Quarterly, 1997, (1): 3~5
- [17] Bosch J A. Coordinate Measuring Machines and Systems [M]. Marcel Dekker, Inc, 1995. 367~374
- [18] Mikoleizig G. CNC gear inspection technology and new software solutions adapted to individual industry needs [A]. Laser Metrology and Machine Performance IV [M], WIT Press, 1999. 237~251
- [19] Hoover S. Simplifying gear metrology [J], Quality Magazine, 2000, (2): 1~7
- [20] Suh S H, Lee E S, Kim H C, et al. Geometric error measurement of spiral bevel gears using a virtual gear model for STEP - NC [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, (42): 335~342

## 100 Years of Gear Measurement Technology —— Review & Prospect

Shi Zhaoyao<sup>1</sup>, Fei Yetai<sup>2</sup>, Xie Huakun<sup>3</sup>

(1. Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2. Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Chengdu Tool Research Institute, Chengdu 610056, China)

[Abstract] The evolution of gear measurement technology in the past 100 years is fully reviewed, and 6 key issues related to gear metrology are listed. Emphases are laid on the development of gear measurement principles, the evolution of technical measures realizing them and the interpretation & utilization of measurement results. Meanwhile, the principle, configuration and features of present-day CNC Gear Measuring Center are introduced. A few of new phenomena in the field of gear measurement technology are remarked, and some research topics in the near future are proposed.

[Key words] gear; gear measurement; gear deviation; gear measuring instrument