

文章编号 1004-924X(2006)06-0980-06

超精密渐开线齿形的测量方法

王立鼎^{1,2}, 娄志峰¹, 王晓东^{1,2}, 马 勇¹, 张玉玲³

- (1. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116023;
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. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:分析了双基圆盘式渐开线测量仪的测量原理,其具有结构简单、测量过程中无测头位置引起的阿贝误差等特点。该仪器采用交叉弹簧片的铰链结构作为误差传递杠杆,其灵敏度高、无间隙。经过对仪器的主要测量误差源进行补偿后,其系统的测量不确定度(U_{95}) $< \pm 0.5 \mu\text{m}$,测量精度可以满足1级渐开线齿形的测量要求。通过与其它渐开线齿形测量方法的比较,双基圆盘式渐开线测量仪仅在测量自动化和多功能性等方面不如CNC齿形量仪,其在测量精度与制造经济性等方面更具优势,是超精密渐开线齿形测量的理想方法。

关键词:精密齿轮;渐开线齿形;测量原理;双盘式测量仪

中图分类号:TH132.413 **文献标识码:**A

Measuring methods of ultraprecision involute tooth profile

WANG Li-ding^{1,2}, LOU Zhi-feng¹, WANG Xiao-dong^{1,2}, MA Yong¹, ZHANG Yu-ling³

- (1. *Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining of Ministry of Education, Dalian University of Technology, DaLian 116023, China;*
2. *Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, DaLian 116023, China;*
3. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, ChangChun 130033, China)*

Abstract: A double-disc mode instrument for measuring involute tooth profile is analyzed, which has some advantages, such as simple structure, no Abbe error caused by the stylus, etc. The instrument adopts an intersect coach spring structure as the error transfer lever, which has high sensitivity and no gap. After compensating major measurement error sources, the double-disc mode instrument's uncertainty of measurement (U_{95}) is less than $\pm 0.5 \mu\text{m}$, which can meet measurement specification of the involute tooth profile of level 1 gear. Comparing with CNC instruments for measuring gear tooth profile, the double-disc instrument's automation and multifunction performance are insufficient, but it has advantages in accuracy of measurement and manufacturing economical efficiency, etc. The result shows that the double-disc mode is an ideal method for measuring ultraprecision involute tooth profile.

Key words: precision gear; involute tooth profile; measuring principle; double-disc mode instrument

收稿日期:2006-09-15;修订日期:2006-10-26.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50475151)

1 引言

齿轮是机械制造中的重要传动元件,它广泛应用于汽车、机床、工程机械、发电、船舶、航空航天、兵器等各方面。随着仪器科学的发展,对于齿轮制造精度的要求日益提高。齿轮制造质量取决于诸多方面,其中齿轮测试仪器和测试技术水平是其中的一个关键环节。

在超精密圆柱齿轮若干精度指标的测试中,其渐开线齿形检验是一个重要的检测项目,而且难度较大。本文在分析与比较当前各种原理渐开线齿形测量仪的基础上,着重对双盘式渐开线齿形测量仪进行了分析,该仪器具有较少的测量误差源,认为是测量超精密渐开线齿形的理想仪器。

2 渐开线齿形误差的测量方法

齿形误差是指在齿轮端截面上齿形工作部分,包容实际齿形的两条最近的设计齿形间的法向距离。其测量方法主要可以分为标准曲线法、标准轨迹法和坐标法等^[1]。

2.1 标准曲线法

标准曲线法是指将实际齿形经投影或摄像,与标准齿形进行比较,得出齿形误差,其主要用于小模数齿轮的检测,测量精度较低。

2.2 标准轨迹法及测量仪器

标准轨迹法另称展成法,根据渐开线展成原理,将被测齿形与仪器复现的标准渐开线轨迹进行比较,从而测出齿形误差。根据仪器中标准渐开线的获得方式,标准轨迹法可分为:机械展成法和电子展成法。

2.2.1 机械展成法

机械展成法是通过精密机械机构来获得标准渐开线。各国对机械展成法研究了半个世纪,先后开发出多种机械式渐开线展成结构,应用比较广泛的有单盘式、圆盘杠杆式等^[2]。

单盘式渐开线测量仪的测量原理完全符合渐开线展成原理,其结构简单,测量尺寸链短,容易达到较高的测量精度。此类测量仪产品较多,如哈尔滨量具刀具厂的3202G,德国Marh 889,瑞士Maag FP60等。

中国科学院长春光机所通过改造Maag FP60

单盘式渐开线测量仪(精化轴系,精调仪器几何精度等),在测量 $m=2, Z=60, \alpha=20^\circ$ 的2级精度标准渐开线齿轮时,齿形公差 $F_a=2.1 \mu\text{m}$,系统的测量不确定度 U_{99} 达到 $\pm 0.72 \mu\text{m}$ 。

圆盘杠杆式渐开线测量仪的测量原理与单盘式渐开线齿形测量仪基本相同,不同之处是测量不同基圆直径的齿轮时,不需要更换基圆盘,通过杠杆来调节仪器基圆直径。其操作方便,但结构复杂,测量受环境温度影响较大,不易实现高精度测量。属于此类的齿形测量仪有:Zeiss VG450、Carl Mahr公司890和891S、Maag公司SP60和HP100、大阪精机GC-4H和GC-6H以及哈尔滨量具刀具厂的3201等。

除上述两类测量仪器外,基于机械展成法测量渐开线齿形的仪器还包括圆盘正弦尺式渐开线测量仪、靠模杠杆式渐开线测量仪、以及基圆补偿式渐开线测量仪等,但由于测量范围小,测量精度不高,应用比较少。

2.2.2 电子展成法

电子展成法,也称CNC法向极坐标法,是把数字控制技术应用于渐开线齿形测量的一种近代测试技术,最基本的电子展成系统由数控装置、伺服驱动装置及传动装置组成。实际测量过程中,由展成系统根据渐开线法向极坐标方程形成标准渐开线,实际渐开线齿形与其进行比较,得到被测齿形误差。其测量精度主要取决于测头位置调整、光栅等传感器的精度,以及直线导轨与旋转主轴的制造与调整精度,易于实现高精度的测量。

目前齿轮测量中心大多采用电子展成法测量渐开线齿形,并且增加了坐标修正功能,以实现高精度测量。不同厂家生产的CNC齿轮测量中心也各具特色,如Gleason-Mahr GMX275(图1)采用三维模拟量测量头,可选择扫描或单点采样方式,测头能够转动,转角分辨率为 0.1° ,能够使测头处于被测齿面的法面上^[3];M&M公司推出的Sigma系列齿轮测量中心,采用花岗岩基座,具有很好的稳定性,采用双立柱结构实现四轴联动,气浮平台和双V导轨保证定位绝对精确,三维数字测头可以实现连续扫描^[4];德国Klingelnberg P系列齿轮测量中心采用了专利的三维数字式高精度光栅测量头、性能稳定的优质铸铁床身、高性能直线电机驱动系统及高精度滚珠轴系和密珠滚动导轨^[3]。



图 1 Gleason-Mahr GMX275 齿轮测量中心

Fig. 1 Gleason-Mahr GMX275 gear measuring center

国内 CNC 齿轮测量中心的研制近年也有较大发展,哈尔滨量具刃具厂 3903A 型齿轮测量中心(图 2)采用先进的 CPLD 技术实现四轴联动;通过对高精度静态电感测头动态参数的识别,建立动态补偿模型,拓展了电感测头的动态响应范围;采用新式方型布局,径向传动采用密珠短导轨加测杆移动锁紧结构,提高了定位和测量精度^[5];仪器的测量重复精度高,测量渐开线样板 5 次重复精度小于 $0.5 \mu\text{m}$,样板示值误差小于 $1.4 \mu\text{m}$;测量效率亦可达到国际先进水平,在测量模数 3.5 mm 、齿数为 36 的标准齿轮,仅用三分钟即可完成四个齿的左右齿面齿形误差、螺旋线误差、左右齿面齿距累积误差和径向跳动等项目的测量^[6]。



图 2 哈尔滨量具刃具厂 3903A 齿轮测量中心

Fig. 2 Model 3903A gear measuring center

除专用的 CNC 齿轮测量中心,在配有精密转台和专用齿轮测量软件的三坐标测量机上,采用回转工作台与测量机同步直线运动的方式,也可以实现展成法测量渐开线齿形,而且测量精度较高。

当今,在各国的国家计量院中一般采用电子展成法量仪测量标准渐开线齿形。表 1 列出了德

国、美国和英国的国家级计量单位中的渐开线齿形测量仪器,及其在测量 $m=8 \text{ mm}$ 、 $Z=25 \text{ mm}$ 、 $d=200 \text{ mm}$ 渐开线样板时的测量不确定度 (U_{95})^[5]。

表 1 各国国家计量单位中渐开线齿形测量仪器

Tab. 1 Instruments used to measure involute in some national metrological institutes

国家	计量单位	仪器	测量不确定度 (U_{95})
德国	PTB	Zeiss UPMC 850 坐标测量机	$\pm 1.0 \mu\text{m}$
美国	NIST	Leitz PMM 坐标测量机	$\pm 0.9 \mu\text{m}$
英国	NGML	Höfler EMZ 632 齿轮测量中心	$\pm 1.6 \mu\text{m}$

2.3 坐标法及测量仪器

坐标法是指将被测齿形上的若干点的实际坐标与理论坐标进行比较,计算得出齿形误差。根据测量过程中采用的渐开线坐标形式,坐标法可以分为直角坐标法与极坐标法。

2.3.1 直角坐标法

直角坐标法测量渐开线齿形的原理是把被测齿形置于给定的直角坐标系中,把测量得到的齿形各点的直角坐标值与其理论坐标比较,经数据处理获得齿形误差。

直角坐标法测量渐开线齿形误差可以在三坐标测量机上实现,但测量时需要多根探针探测,或采用测头回转体使测头转过所需角度,这两种方法的控制与数据处理软件均比较复杂,测量精度难以提高^[8]。

2.3.2 极坐标法

采用极坐标法的渐开线齿形测量仪,其工作台在旋转的同时,测头按渐开线极坐标方程 $r=r(\theta)$ 沿径向移动,同时测量实际齿形偏差。此方法测量齿形,不需要切向运动机构,可以简化齿轮测量中心的机械结构,但数据处理复杂,两轴位移非线性,对径向测量系统的精度及测头相对于齿轮轴线的位置精度要求较高,仅适合中等精度齿形的测量^[9]。Höfler ZP 系列齿轮测量中心, Klingelnberg PEC33, 成都工具研究所 CEN450 等均采用极坐标法测量渐开线齿形。

2.4 基于激光测量技术的齿形测量方法

随着激光测量技术的广泛应用,很多高精度

齿轮测量仪器采用激光测量技术进行长度坐标测量或用来修正测量误差。

德国 PTB 研制了一种新型渐开线齿形测量仪,如图 3 所示。在具有精密旋转台的三坐标机工作台上,安装自行研制的激光跟踪干涉仪,在测头上部安装反射镜。测量过程中,通过激光测量对测头坐标进行修正。该仪器使用展成法对渐开线齿形进行测量,测量结果比较普通三坐标测量机有明显改善^[10],如图 4 所示。

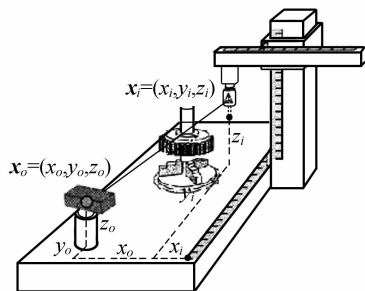
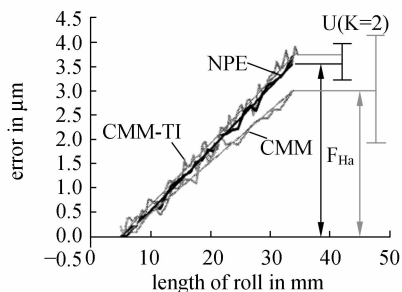


图 3 PTB 新型齿形测量仪

Fig. 3 PTB's instrument for measuring involute



NPE—样板实际误差曲线(经修正)

CMM—使用坐标测量机测量样板误差曲线

CMM-TI—PTB 新型齿形测量仪测量样板误差曲线

图 4 PTB 齿形测量仪测量渐开线样板结果

Fig. 4 Measuring result of an involute profile artefact on PTB's instrument for measuring involute

日本 AMTEC 公司研制的 G3 齿轮测量系统,采用了 CONO 激光全息测量头,使用非接触法测量齿形。齿轮回转,测头位置相应变化,测出齿轮的截面形状,其测量重复性小于 $0.2 \mu\text{m}$ ^[4]。

2.5 齿轮在机测量

齿轮在机测量是指将齿轮测量装置集成于齿轮加工机床,齿轮试切或加工后不用拆卸,直接在机床上进行测量,根据测量结果对机床参数及时

调整修正(主要针对磨齿)。对于成形磨齿加工和大齿轮磨齿加工而言,在提高生产效率、降低成本等方面,具有重要意义,但其测量精度受机床本身精度影响较大。CNC 齿轮加工机床的迅速发展,为推动齿轮在机测量技术的应用和发展提供了工作平台^[4],德国 KAPP 厂的数控磨齿机就是一个典型代表,如图 5 所示。沈阳工业大学采用齿条刃边测头在机测量方案,可显著地缩小测量仪器的结构尺寸,不存在测头径向对正问题,可实现齿轮齿形误差的高精度测量,且测量效率高、操作方便^[11]。

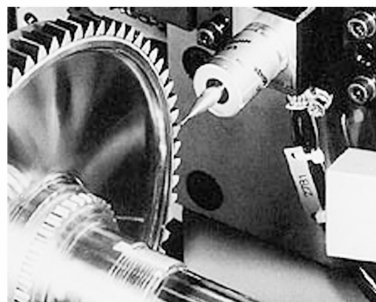


图 5 KAPP 数控磨齿机在机测量

Fig. 5 Measuring gear on-machine on KAPP CNC gear grinding machine

3 双基圆盘式渐开线测量仪

本文介绍的双基圆盘式渐开线测量仪符合机械展成法测量渐开线齿形原理,如图 6 所示。被测齿轮由芯轴与两个基圆盘相连,安装在基圆盘的侧面,驱动系统带动基圆盘在导轨上滚动;测头固定在导轨侧面,测量时需调整测点与导轨处于同一平面,并使测头微力压紧齿面;在基圆盘滚动的过程中,测头的偏移量即为该点的齿形误差。双基圆盘式渐开线测量仪与单盘式渐开线测量仪相比多一个基圆盘,它具有如下优点^[12,13]:(1)导尺与导轨同一化,消除了两者平行度误差的影响;(2)双盘比单盘接触刚度,芯轴处于自由状态,没有大的受压变形;(3)主轴与芯轴变成一根,消除了不同轴度误差;(4)调整测量头测点位于导轨同一平面上,可以避免阿贝误差的影响。与电子展成法量仪相比,双基圆盘测量仪在精度方面的优点是:(1)形成标准渐开线的轨迹是连续的;(2)在结构上环节少,易保证精度;(3)测量过程中不

存在由测头位置引起的阿贝误差;(4)基圆盘可选择与齿轮相同材料,消除了环境温度变化对测量精度的影响。

采用双基圆盘结构,两盘间的尺寸偏差与形位误差有误差均化效果;若合理配置两个基圆盘、芯轴与被测齿轮的偏心,能够最大限度地减小偏心对测量精度的影响;各孔与芯轴的配合部位均为有一定过盈量的密珠套,使之易安装且防止装偏。

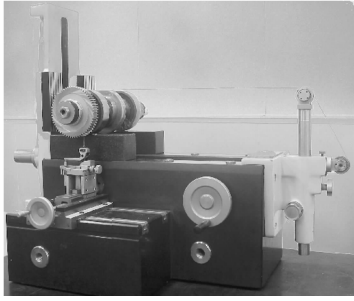


图 6 双基圆盘式渐开线测量仪

Fig. 6 Double-disc mode instrument for measuring involute

双基圆盘式渐开线测量仪驱动系统的原理如图 7 所示。电机带动精密丝杠旋转,进而带动螺母和传动绳移动,传动绳紧绕在芯轴中部的绳轮上,驱动两个基圆盘在导轨上滚动,完成测量过程的主运动。图 7 中虚线方框中电机、丝杠均安装在测量仪基座内部。

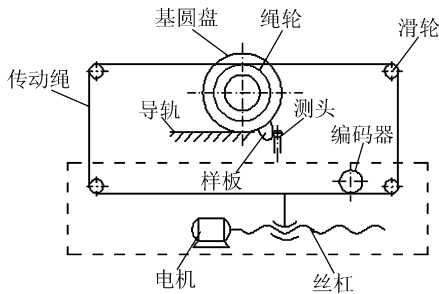


图 7 双基圆盘式渐开线测量仪驱动系统

Fig. 7 Drive system of the double-disc instrument for measuring involute

在双基圆盘式渐开线测量仪中,采用了交叉弹簧片式的铰链作为误差传递杠杆装置,如图 8 所示。对于微小的转动来说其灵敏度高,测量力小,无间隙,虽然理论上中心会有微小变动,但在 $10 \mu\text{m}$ 以内的摆动量来说,其可以忽略不计。通过实际校对,此测量装置灵敏度为 $0.1 \mu\text{m}$ 。

双基圆盘式渐开线测量仪具有较少的测量误差源,通过对基圆盘直径尺寸偏差、安装综合偏心和“弹性蠕滑”等引起的测量误差进行补偿后,可使系统的测量不确定度(U_{95}) $< \pm 0.5 \mu\text{m}$ 。

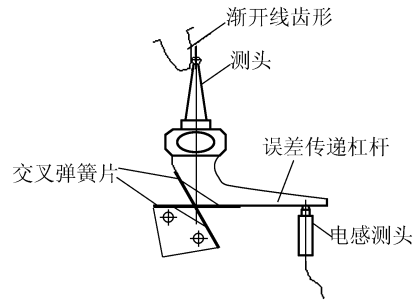


图 8 双基圆盘式渐开线测量仪误差传递杠杆装置

Fig. 8 Error transfer device of the double-disc instrument

4 各种齿形测量方法比较

单盘式和电子展成式齿形测量仪是当前测量精密渐开线齿形比较成熟的两种方法,二者测量精度相差不大。单盘式只是在测量自动化和多功能性等方面不如电子展成式,但其量仪制造成本大大低于电子展成式量仪。以上两类仪器适于测量 2 级和 2 级精度以下的齿轮,测量 1 级精度齿轮的渐开线齿形能力不足。基于激光测量技术的齿形测量法一般是在已有的 CNC 齿轮量仪基础上进行改进,使用激光测量技术对测头进行改造或对其位置进行修正,其测量精度与 CNC 量仪相比会有一定程度的提高,但相应制造成本更高。

表 2 超精密渐开线齿形的测量方法比较

Tab. 2 Comparison of methods for measuring ultraprecision involute tooth profile

	单盘式	双盘式	电子展成式	基于激光技术测量式
测量精度	★★	★★★★★	★★★	★★★★
自动化性能	★	★	★★	★★
制造经济性	★★★	★★★	★★	★

表中:★低 ★★高 ★★★更高 ★★★★★最高

相比以上渐开线测量仪器,双基圆盘式渐开线测量仪在测量渐开线齿形时,具有最少的测量误差源。只要保证仪器结构设计合理,关键零部

件的制造精度,并通过对主要测量误差源的补偿,其测量精度能够满足测量1级渐开线齿形的要求。表2为超精密渐开线齿形各种测量方法的比较。

5 结 论

综上所述,通过对双盘式渐开线测试仪的主

要测量误差源进行补偿后,其系统的测量不确定度(U_{95}) $< \pm 0.5 \mu\text{m}$,在当今用于测量渐开线齿形的量仪中,其具有最高的测量精度,是测量超精密渐开线齿形的理想方法。但其在测量自动化、测头位置调整方式、测量误差源的分析与再补偿等方面仍需要做深入的研究。经过多方面完善之后,该测量原理与方法可以实现国际领先水平的超精密渐开线圆柱齿轮齿形的误差测量。

参考文献:

- [1] 齿轮手册编委会. 齿轮手册[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
Gear Manual Edit Committee. *Gear manual* [M]. Beijing: China Machine Press, 2000. (in Chinese)
- [2] 石照耀,费业泰,谢华锐. 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 ZH Y, FEI Y T, XIE H K. 100 years of gear measurement technology-review & prospect[J]. *Engineering Science*, 2003, 5(9): 13-17. (in Chinese)
- [3] 谢华锐. 近年来齿轮测量技术与仪器的发展[J]. 工具技术,2004,38(9):27-33.
XIE H K. Development of gear's measuring technology and instrument in recent years [J]. *Tool Technology*, 2004, 38(9): 27-33. (in Chinese)
- [4] 宣洪冰. 齿轮测量中心的制造商[J]. 现代零部件,2004,11-12:90-91.
XUAN H B. Manufactures of gear's measuring center[J]. *Modern Spare Part*, 2004, 11-12: 90-91. (in Chinese)
- [5] 白雪飞,黄杰,王安,等. 3903型CNC齿轮测量中心[J]. 现代零部件,2004,3-4:92-93.
BAI X F, HUANG J, WANG A, et al. 3903 CNC gear measuring center[J]. *Modern Spare Part*, 2004, 3-4: 92-93. (in Chinese)
- [6] 白雪飞,黄杰,王安,等. 3903A型CNC齿轮测量中心[J]. 工具技术,2005,39(2):78-79.
BAI X F, HUANG J, WANG AN, et al. 3903A CNC gear measuring center[J]. *Tool Technology*, 2005, 39(2): 78-79. (in Chinese)
- [7] FRAZER R C, BICKER R, COX B, et al. An international comparison of involute gear profile and helix measurement[J]. *Metrologia*, 2004, 41, 12-16.
- [8] 张国雄. 三坐标测量机[M]. 天津:天津大学出版社,1999.
ZHANG G X. *Coordinate measuring machine* [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1999. (in Chinese)
- [9] 张兆龙,曾勇. 极坐标法测量渐开线齿形的分析[J]. 工具技术,1997,31(7):34-37.
ZHANG ZH L, ZENG Y. Measuring gear involute errors in a polar coordinate system[J]. *Tool Technology*, 1997, 31(7): 34-37. (in Chinese)
- [10] HARTIG F, KECK C, KNIEL K. An novel high accuracy concept for gear calibration[J]. *Gear Technology*, 2005, 5-6: 16-20.
- [11] 金嘉琦,李文龙,付景顺,等. 大齿轮齿形在机测量原理与技术[J]. 机械传动,2002,26(1):60-63.
JIN J Q, LI W L, FU J SH, et al. The principle and technology for on-line tooth measurement for large gear[J]. *Mechanical Drive*, 2002, 26(1): 60-63. (in Chinese)
- [12] 张玉玲,王立鼎,佟晓冬. 超精密齿轮渐开线齿形的测量仪器[J]. 光学精密工程,1993,1(4):30-33.
ZHANG Y L, WANG L D, TONG X D. Measuring apparatus of involute tooth profile for super precision gears [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1993, 1(4): 30-33. (in Chinese)
- [13] 佟晓冬,王立鼎,张玉玲. 高精度渐开线样板的测量[J]. 光学精密工程,1993,1(4):34-37.
TONG X D, WANG L D, ZANG Y L. Measurement of high precision involute prototype[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1993, 1(4): 34-37. (in Chinese)

作者简介:王立鼎(1934—),男,辽宁辽阳人,大连理工大学机械工程学院教授,博士生导师,中国科学院院士。主要从事超精密齿轮工艺与测试、精密机械设计及微纳米机械的研究。E-mail: wangld@dlut.edu.cn