

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.02.05

浅谈航空发动机叶片几何参数测试计量保障体系

何小妹, 刘峻峰, 何学军, 张学仪

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 对航空发动机叶片几何参数进行了定义和分类, 基于叶片几何参数精密测量的重要性、型面参数测量的复杂性和叶片几何参数测量评价的现状, 详细介绍了航空发动机叶片几何参数测试计量保障体系构建的需求, 提出建立覆盖航空发动机叶片几何参数的测试计量保障体系, 并对该体系的内涵和架构思路进行了阐述, 为航空发动机装备叶片零部件数字化设计制造、一体化协同工作平台的建设提供技术支撑。

关键词: 航空发动机叶片; 型面参数; 几何参数; 测试计量保障体系

中图分类号: TB92

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)02-0051-05

Discussion on Measurement and Metrology Assurance System of Aero-engine Blade Geometry Parameters

HE Xiaomei, LIU Junfeng, HE Xuejun, ZHANG Xueyi

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: The geometric parameters of aero-engine blades are defined and classified. Based on the importance of precise measurement of blade geometric parameters, the complexity of profile parameter measurement and the status quo of full parameter measurement and evaluation of blade geometric characteristics, the requirements of the construction of test and measurement guarantee system for aero-engine blade geometric parameters are introduced in detail. A test and measurement guarantee system covering the parameters of aero-engine blade geometrical characteristics is proposed, and the connotation and architecture of the system are expounded, which can provide technical support for the construction of the integrated collaborative work platform for the digital design and manufacturing of aero-engine blade parts.

Key words: aero-engine blades; profile parameters; geometric parameters; test and measurement guarantee system

0 引言

叶片是航空发动机的关键零件, 具有种类多、数量大、形状复杂、几何精度要求较高、加工难度大等特点, 其制造品质直接影响发动机的气动性能与寿命。叶片的尺寸、形状、力学等因素决定了其整体性能, 在叶片生产的不同阶段均需对其几何形状、尺寸和特征结构进行检测, 且应对每一阶段测量结果的准确性做相应要求。随着新型号航空发动机叶片型面弯、扭和掠形状的增强, 前后缘曲率半径的小型化, 集成轻量化结构(多联叶片、整体叶盘、叶轮)的出现, 空心叶片内部结构的复杂化, 叶片气膜孔特征的多样化, 叶片表面质量的高要求, 对叶片几何参数测量评价的准确性、快速性和可靠性要求越来越高。航空发动机叶片批量零部件异地加工测量与验收交付的集成模式, 对叶片测量结果的一致性、复现性和量值传递溯源性提出了较高要求, 建立和完善航空发动机叶片几何参数测试计量体系, 对于保障航空发动机的气动性能、

安全性和可靠性至关重要^[1]。

1 航空发动机叶片几何参数的定义和分类

航空发动机叶片种类繁多, 按其在航空发动机中的部位和功能分类, 可以分为风扇叶片、压气机叶片和涡轮叶片等。叶片几何参数(简称叶片参数)是影响叶片气动性能指标的几何量表征, 包括叶片的几何尺寸、形位公差和表面质量。按照结构功能进行分类, 叶片参数可以分为叶片型面参数、叶片榫头参数、叶片表面质量参数和叶片特殊特征参数。

1) 叶片型面参数: 基于叶片叶身自由曲面的测量评价模式, 叶片型面参数可以分为二维叶型参数、二维叶展参数和三维型面参数。根据 HB 5647-1998《叶片叶型的标注、公差与叶身表面粗糙度》规定的叶片等高截面测量准则, 现阶段叶片型面参数仍由多个等高截面二维叶型参数综合评价完成。二维叶型参数包括弦长、弦线角、最大厚度、前后缘固定位置处厚度、积叠点位置度、叶盆/背型线轮廓度、前后缘轮廓度等

常规参数, 以及叶片平头、削边、尖边、缩颈等不合格工艺特殊前后缘形状参数。叶展参数包括叶展轮廓度和叶展轮廓度变化率。

2) 叶片榫头参数: 用于叶片安装定位的上下缘板的尺寸和形位公差。

3) 叶片表面质量参数: 叶片表面的波纹度、粗糙度和表面缺陷等。

4) 叶片特殊特征参数: 叶身表面除型面参数和表面质量之外的其它参数, 包括与叶片气膜孔和内部空腔相关的几何尺寸和形位公差、叶片涂层厚度和壁厚参数等。

2 航空发动机叶片几何参数测试计量体系构建需求

2.1 叶片几何参数精密测量的重要性

叶片几何参数直接影响航空发动机核心机的气动性能。例如: 叶片轮廓度误差会显著影响叶表附近流场结构, 若叶片轮廓度误差较大, 会导致叶背过早出现附面层分离, 对于超音速叶型而言, 较大的叶片轮廓度误差会导致激波加剧^[2-4]。叶片将气流折转对气流做功, 如果弦长过小, 会导致压气机转子无法充分折转气流, 导致叶背易出现大分离区, 不仅增大气动性能损失, 而且也无法使压气机满足设计负荷; 如果弦长过长, 会增加附面层摩擦损失, 导致压气机效率下降^[5-6]。

由此可见, 若叶片加工过程中存在较大误差, 会导致叶片最终加工状态与设计要求的存在明显偏离, 影响航空发动机实际应用性能。通过精密测量手段准确获取叶片几何参数, 对保障叶片制造质量至关重要, 也直接影响航空发动机气动性能的设计验证与准确评估。

2.2 叶片型面参数测量的复杂性

目前国内航空发动机主机厂所主要采用精密的坐标测量手段实现叶片参数测量与评价。图 1 为叶片参数测量的典型流程。与一般零件经坐标测量后直接得到结果相比, 叶片型面参数的测量与评价显然要复杂得多, 其复杂性主要体现在: ①叶片型面为弯扭掠形状的复杂自由曲面, 复杂曲面的测量一直是行业内研究的热点和难点, 准确获取反映叶片型面型线轮廓信息的测量数据是进行参数评价的前提和关键; ②测量设备的参数设置会对测量结果产生较大影响, 例如对小曲率半径前后缘区域进行测量时, 采样密度和测量速度的设置会对测量结果产生很大影响; ③叶片评价的特征参数众多, 且这些参数均无法通过测量直接获得, 而是需在得到叶型截面点云数据的基础上经过数

据预处理、测头半径补偿之后经专用算法评价获得, 评价处理算法在整个叶片参数测量过程中起到至关重要的作用, 例如叶片的弦长、弦线角、最大厚度、前后缘固定位置处厚度等参数可直接利用相应算法进行评价, 积叠点位置度、叶盆/背型线轮廓度、前后缘轮廓度等参数则强烈依赖实测点云数据与理论点云数据基于对齐算法之后的再评价算法。叶片参数评价算法均需要通过不同坐标测量设备配套的专用参数评价软件实现, 软件的多样性也导致叶片型面参数评价存在差异性。

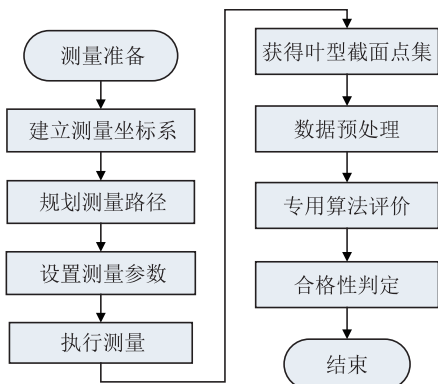


图 1 叶片型面参数典型测量过程

2.3 叶片几何参数测量评价现状

2.3.1 叶片型面参数测量评价

为满足大涵道比涡扇发动机以及未来高推比、新概念发动机的性能要求, 使推重比达到 10 级及以上, 航空发动机核心部件大量采用先进的设计技术、整体构件技术以及全三维计算分析手段, 例如宽弦叶片技术、叶片弯掠技术、可变弯度整流技术、空心叶片技术、大小叶片技术等, 弓形静子叶片、金属包边复合材料叶片等新型叶片开始得到使用。叶片的型面尺寸越来越大, 弯曲和扭转程度越来越高, 叶片前后缘半径越来越小, 前后缘轮廓度公差要求越来越高, 使航空发动机叶片检测面临严峻挑战。

航空发动机叶片研制过程中, 各种类型的叶片专用夹具和各种接触式、非接触式、复合式和便携式检测设备广泛应用, 不同测量设备叶片几何参数检测结果的测量不确定度评定方法尚需要明确^[7]。

随着航空发动机增压比性能的提高, 叶片前后缘越来越薄, 半径越来越小(甚至可达到 0.07 mm)。若采用三坐标测量机, 利用接触测量法进行测量, 由于测球最小直径的存在、测头半径补偿误差的影响以及测量参数设置不佳等问题, 极易导致叶片前后缘测量过程中因打滑、失真、补偿反向等问题产生较大误差,

影响叶片前后缘测量的准确性;若采用点激光测量机,利用非接触测量法进行前后缘轮廓扫描,可以实现叶片边缘无交叉、无重叠、型面微小特征完整显现,且无测头半径补偿问题,但光斑直径大小及散射效应可能影响叶片前后缘测量的准确性。这两种不同的测量方法进行叶片前后缘测量的准确性一度存在争议。

叶片型面是复杂曲面,针对复杂曲面,最精确的测量模式是矢量化测量,即曲面法矢方向触测,法矢方向测头半径补偿。现阶段主要利用三坐标测量机采用等高截面法进行平面曲线测量和评价。由于测头半径的存在,实际测量的“平面曲线”具有一定的高度偏差,且由于受到叶片型面弯扭角度变化、叶片大小不同以及叶片型线扫描过程中测头角度设置情况的影响,实际检测出的截面型线高度差有可能超出截面允许的变化范围。为满足新型号叶片的高难度弯扭检测需求及快速校准需求,四轴联动坐标测量机、五坐标测量机广泛出现。测量模式也分为等高截面法二维曲线测量三维矢量补偿和基于整体型面三维补偿后再等高截面法评价两种。叶片前后缘处的检测结果存在由于测头半径误差补偿导致的测不准问题^[8-10]。

2.3.2 叶片表面质量参数测量评价

波纹度和粗糙度是评价叶片表面加工质量的两个重要参数。HB 5647-1998《叶片叶型的标注、公差与叶身表面粗糙度》对叶身粗糙度和波纹度提出了设计要求。目前,国内外科研机构已对零件加工波纹度和粗糙度的控制进行了相关研究,但是针对航空发动机叶片表面加工质量的波纹度和粗糙度参数测量评价还存在以下不足:①不同测量设备测量得到的叶片波纹度参数存在差异;②使用具有波纹度参数评估功能的商用软件时需定义取样长度,但缺少取样长度的设计标准;③提取波纹度的传统方法是 GB/T 16747-2009《产品几何技术规范(GPS)表面结构轮廓法表面波纹度词汇》中规定的高斯滤波器法,但该方法受截止波长的参数选择不唯一和采样评定轮廓长度过长两方面的限制,模型的稳健性较低;④针对航空发动机叶片波纹度的专用测量设备及其溯源标准和方法的研究几乎空白^[11]。

尽管 HB 5647-1998《叶片叶型的标注、公差与叶身表面粗糙度》规定了叶片粗糙度的设计要求,但目前国内缺少叶片粗糙度的检测标准。外贸航空转包生产叶片明确了叶片粗糙度的测量位置和测量原则,国内采用粗糙度样块比较法和轮廓粗糙度仪直接测量法进行叶片粗糙度检测,目前主要的问题表现在:①对于叶片叶身、叶尖、前后缘、转接圆弧等处的检测位置

和检测范围缺少定义,检测结果复现性、一致性差;②叶尖表面、转接圆弧等测量位置取样长度不够,检测要求不统一,导致测量结果不稳定;③传统上粗糙度的计量是基于二维测量模式进行评价的,同时受仪器测量范围、被测件曲面复杂程度、曲面模型参数限制,导致测量范围和评价算法不能满足叶片曲面粗糙度参数的评价需求,叶片曲面粗糙度三维和二维评价结果的一致性有待研究确认。

2.3.3 叶片特殊特征参数测量评价

叶片气膜孔结构复杂,基准有榫头或叶身迭代点两种形式,叶片型面为自由曲面,气膜孔分布在叶身上且数量较多,角度多变,孔径一般为 0.3~0.8 mm。目前,气膜孔缺乏加工规范和有效的检测手段,其质量主要由工艺保证,采用接近气膜孔径的量棒、针规、塞规等进行测量,得出的孔径为气膜孔的近似值,且难以测量气膜孔的位置度。基于 CCD 的气膜孔多轴测量设备、工业 CT 测量设备和光纤复合扫描测量设备在一定程度上可以实现气膜孔参数的测量,但测量效率还有待提升,气膜孔测量设备没有统一的气膜孔检测方法和相应的设备校准规范也是亟待解决的问题^[12]。

涡轮冷却叶片是航空发动机中结构最复杂、使用环境最为恶劣的部件,其壁厚和内尺寸是保证叶片强度的重要参数,对发动机的高温持久寿命有极大影响。目前,针对航空发动机叶片不同型面、腔道、截面位置上的叶片壁厚及内尺寸的测量主要采用基于断层扫描成像技术的工业 CT 设备实现^[13-14]。目前,在无损检测应用领域,国内 CT 定性测量设备的标准相对较为完善,包括 GB/T 29034-2012《无损检测工业计算机层析成像(CT)指南》、GB/T 29069-2012《无损检测工业计算机层析成像(CT)系统性能测试方法》、GB/T 29070-2012《无损检测工业计算机层析成像(CT)检测通用要求》、GB/T 29067-2012《无损检测工业计算机层析成像(CT)图像测量方法等涉及设计、应用和性能评价》。而针对工业 CT 定量测量设备的校准技术研究,特别是叶片壁厚和内尺寸测量不确定度的评定分析、壁厚和内尺寸参数的量值传递溯源体系还未建立,严重影响了叶片壁厚和内尺寸参数的准确评定分析和合格判定。

涂层在航空发动机叶片中应用广泛,包括整流帽罩防冰涂层、涡轮导向器叶片铝化物扩散涂层、涡轮叶片热障防护涂层、耐磨涂层、风扇叶片抗砂蚀树脂基微叠层复合材料热障涂层等等。各种涂层不同程度地发挥着防护、密封、抗磨、抗冲击、减震、隔热等作用,对提高发动机工作温度、减少燃油消耗、提高

发动机效率、延长热端部件使用寿命、保障发动机安全可靠工作具有重要意义。涂层中最为关键的参数就是涂层的厚度^[15-17]。目前,叶片涂层厚度主要由工艺保证,也有各类型的涂层厚度测量设备,包括日本 KETT、德国尼克斯、北京时代创合科技等公司研制的各类电涡流测厚仪、磁感应测厚仪、荧光 X 射线测厚仪、超声波测厚仪等仪器,且各类设备配置了大量的标准片和基体。现阶段对于基体厚度的测量,主要利用长度计、电感测微仪等进行整体厚度测量,但缺少针对各类测厚仪和标准片的计量手段和校准标准,严重影响了叶片涂层参数的量值传递溯源。

综上可知:传统的单参数的量值溯源体系已经难以满足叶片几何参数测量校准需要,需要建立覆盖发动机叶片型面参数、内尺寸与壁厚参数、气膜孔参数等几何参数的量值传递溯源体系。

3 航空发动机叶片几何参数测试计量保障体系构建思路

3.1 体系范围与内涵

航空发动机叶片参数测试计量保障体系,指为规范叶片数字化设计制造协同过程中叶片模型、叶片制造设备、叶片专用测具、叶片专用测量设备、叶片生产线等量值控制要求,建立的具有测量不确定度描述,与国家或国际计量标准相关联,并满足叶片参数功能需求检测和校准要素的一系列技术、方法、模型、算法、程序、规范与标准的集成。

3.2 航空发动机叶片几何特征全参数测试计量保障体系的架构思路

从航空发动机叶片全生命周期的维度进行分析,航空发动机叶片生命过程可分为叶片的数字化设计、数字化制造、装配、试验、使用和维修维护保养等部分。整个维度以叶片数字化模型为主,并形成以叶片全生命周期统一的可计量的描述方法。梳理分析不同类型(压气机、风扇和涡轮)叶片在航空发动机全寿命周期中与航空发动机气动性能密切相关的叶片几何特征参数的设计要求、制造要求、装配要求、试验要求和维修维护保养要求,梳理不同类型叶片不同工艺制造过程(铸造、锻造、铣削、磨削、增材制造)下的测试计量状况,分析提取叶片几何特征参数计量评价关键要素,例如航空发动机叶片设计阶段,明确数字化模型的坐标系基准、叶片三维模型的计量要求,定义叶片气动性能参数的评定参数以及相应的评价算法,从而有效保障叶片制造过程中检测和叶片维修维护保养过程检测与设计定义的一致性、完整性。

从航空发动机叶片几何参数量值传递溯源链的维度进行分析,根据航空发动机叶片几何参数的定义和分类,针对参数检测用仪器设备或系统梳理适用校准装置以及相关的校准技术规范,明确校准装置技术指标,确定计量标准器具及相应的计量技术规范,在叶片参数量值定义一致的基础上,实现参数量值与计量标准器具量值的比较和传递。叶片几何参数量值传递溯源体系如图 2 所示。

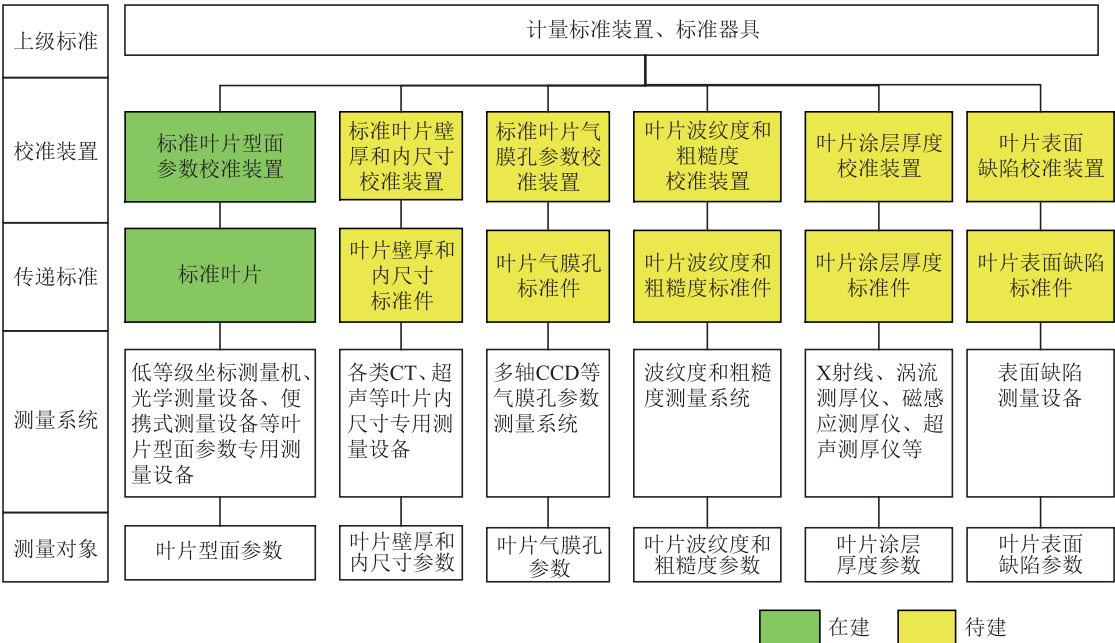


图 2 叶片几何特征全参数量值传递溯源体系框架

叶片几何参数量值传递溯源体系的核心内容是叶片相应几何参数校准装置和相应传递标准件的研制,旨在通过校准装置的研制,开展相应参数测量方法和评价方法研究,明确参数的定义标准,探讨参数测量过程的关键影响因素和影响规律,统一参数的评定算法,研究参数的测量不确定度评定方法,规范参数测量校准方法的一致性;利用传递标准件,增强叶片各类专用测量设备、在线测量设备的验证能力和现场核查能力,提升叶片参数测量评价的准确性,确保航空发动机研制和生产过程中叶片型面参数测试结果的量值准确、溯源有据。例如研制标准叶片型面参数校准装置,有利于开展叶片型面参数计量校准方法研究;研究标准叶片型面三维测量方法、叶片型面参数评价算法,规范叶片型面参数校准方法的一致性,提升叶片型面参数校准结果的准确度;研制标准叶片传递标准,增强叶片型面参数专用测量设备测量验证能力,完善叶片型面参数量值溯源体系。

叶片几何参数量值传递溯源体系中,叶片型面参数计量技术的研究目前已相对成熟,已经明确了叶片型面参数不同测量设备的测量规律,掌握了叶片型面参数评价专用软件评价算法的差异,构建了基于蒙特卡洛法的叶片型面参数测量不确定度评定分析模型,初步建立了叶片前后缘形状数字化评价方法^[18],但叶片壁厚和内尺寸参数、气膜孔参数、涂层厚度参数以及表面质量参数的量值传递溯源体系亟待研究完善。

4 结论

详细阐述了航空发动机叶片型面参数的测试计量保障需求,提出建立航空发动机叶片几何参数测试计量保障体系,基于叶片全生命周期和全参数链溯源角度对该体系的构建展开深入探讨研究。本体系相对于传统的单参数体系的优势在于:①以校准装置和标准件的形式,强化了叶片几何参数测量评价方法的研究、参数的定义和测量评价的规范性、参数专用测量设备现场校准验证的标准性;②整合了叶片全参数全生命周期的测试计量研究关键要素,明确了航空发动机叶片参数测量计量研究的方向,可为航空发动机装备叶片零部件数字化设计制造一体化协同工作平台的建设完善提供技术支撑。

参考文献

- [1] 林恬,张学涛,马骊群.基于数字化设计制造协同飞机计量保障体系架构探讨[J].计测技术,2018,38(2):59-63.
- [2] 王掩刚,任思源,国瑞,等.叶表和端壁组合抽吸对跨音速压气机稳定性影响[C]//中国工程热物理学会,2011.
- [3] 王掩刚,牛楠,任思源,等.跨音速压气机转子叶表和端

壁抽吸效果对比研究[C]//中国工程热物理学会,2010.

- [4] 南向谊,刘波,靳军,等.超声速压气机转子叶片吸力面抽气抑制附面层分离的机理[J].航空动力学报,2007,22(7):1093-1099.
- [5] 孙玲.转子尖部间隙布局对压气机性能影响的实验研究[D].陕西:西北工业大学,2003.
- [6] 陈仰军.尺寸效应对轴流压气机性能影响研究[D].四川:电子科技大学,2010.
- [7] 王玉,刘涛,单纯利,等.航空发动机叶片评价方法[J].计测技术,2011,31(6):33-36.
- [8] 史小强,吴宝海,张定华.航空发动机叶片加工质量检测技术发展现状与趋势[J].航空制造技术,2015(12):80-84.
- [9] 张宝峰.航空发动机叶片测量现状及新方法分析[J].科技创新导报,2016(20):14-16.
- [10] 李学哲,石照耀,陈洪芳,等.航空发动机叶片型面测量技术研究现状与趋势[J].北京工业大学学报,2017(4):557-565.
- [11] 刘永泉,孟德君,史文斌.一种压气机叶片展向波纹度的定量检测方法:中国ZL201511024676.5[P]2016.05.11.
- [12] 宋金榜,易海云.航空发动机涡轮叶片气膜孔加工工艺[J].工具技术,2020,54(12):85-89.
- [13] 程云勇,张定华,卜昆,等.基于工业CT测量数据的空心涡轮叶片三维壁厚分析[J].机械强度,2009,31(05):791-796.
- [14] 吴庆辉,许剑伟,方向,等.单晶空心涡轮叶片壁厚测量方法比较[J].无损检测,2017,39(07):54-57.
- [15] 吴小梅,李伟光,陆峰.钛合金叶片防护涂层研究——十五科研项目工作总结[J].装备环境工程,2006,3(3):116-118,129.
- [16] 李宏,沙爱星,张志敏.航空发动机叶片涂层的应用及发展简述[J].空军装备,2004(3):50-52.
- [17] 郝兵,李成刚.表面涂层技术在航空发动机上的应用[J].航空发动机,2004,30(4):38-40.
- [18] 曹斌,何小妹,王一璋,等.一种叶片前后缘削边形状计算方法[J].计测技术,2019,39(2):9-13.

收稿日期:2021-02-03

基金项目:工信部民用飞机专项科研项目(MJ-2016-J-92)

作者简介

何小妹(1977-),女,研究员,博士,硕士研究生导师,航空工业计量所金牛专家、几何量专业副总师。主要研究方向为复杂曲面测量与校准、线纹参数测量与校准、角度参数测量与校准。所承担科研项目获集团等科学技术奖6项,已发表论文40余篇,获授权发明专利1项,软件著作权1项。

