

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.02.13

转矩/功率标准装置的研制及应用

秦海峰, 王磊, 王晶露

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 转矩转速测量仪常用于发动机等设备的机械功率测量中, 其测量的技术参数主要包括转矩、转速和功率。当前转矩转速测量仪的校准大多采用静态扭矩和转速分别校准的方法, 与使用状态存在较大偏离。文中介绍了一种用于对转矩转速测量仪进行多参数同步校准的转矩/功率标准装置, 并对其总体机械结构、转矩发生系统的设计原理以及转矩测量模型的建立和测量不确定度影响因素等重要内容进行了介绍。影响因素分析和试验验证结果表明, 装置复现转矩量值的测量不确定度不超过 0.2%。采用本装置对多种类型的转矩转速测量仪进行了校准, 应用结果表明, 该装置可以实现在旋转状态下施加标准转矩的功能, 达到了预期的技术指标, 可为该类测量仪器在接近于工作状态的方式下进行多参数同步溯源提供技术手段。

关键词: 转矩转速测量仪; 机械功率; 转矩; 多参数同步校准; 不确定度

中图分类号: TB93

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)02-0101-06

Development and Application of Torque/Power Standard Device

QIN Haifeng, WANG Lei, WANG Jinglu

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

Abstract: Tacho-Torque measuring instruments are often used in the measurement of mechanical power of engines and other equipment. The measured technical parameters include torque, speed and power. Currently, the calibration of torque and speed measuring instruments mostly use the method of calibrating static torque and speed separately, which deviates greatly from the state of use. This paper introduces a torque/power standard device for multi-parameter synchronous calibration of a tacho-torque and power measuring devices. The overall mechanical structure, the design principle of standard torque generation system, the establishment of torque measurement model and the influence factors of measurement uncertainty are introduced. Through influencing factor analysis and experimental verification, it is concluded that the measurement uncertainty of the device's recurrence value is less than 0.2%. The device is used to calibrate various types of tacho-torque measuring instruments, and the results show that the device can achieve the function of applying the standard torque in the rotating state, and achieve the expected technical indicators, It can provide a technical means for the multi parameter synchronous traceability of this type of measuring instruments in the way close to the working state.

Key words: tacho-torque measuring instrument; mechanical power; rotational torque; multi parameter synchronous calibration; measurement uncertainty

0 引言

转矩转速测量仪由传感器和测量仪表组成, 常用于测功装置或其他功率设备中, 主要对发动机等设备的机械功率进行测量。其中, 转矩转速传感器主要分为应变式、压磁式、磁电感应式、光电式等, 均可在旋转状态下进行扭矩的测量, 并可将测得的转矩和转速转换为电量信号传输至相应的测量仪表进行显示输出^[2]。测量仪表通常还会根据传感器同步测得的转矩和转速信号, 通过相应的公式进行机械功率的计算, 并同步显示。

转矩转速测量仪作为一种测量仪器, 必须经过校准溯源来保证测量数据的准确性和可靠性。由于技术条件的限制, 尽管此类测量仪的工作状态均为高、低速旋转下的动态测量, 但目前国内只能采用静态扭矩和转速分别校准的方法, 与使用方法存在较大差异, 导致校准数据的准确性和适用性存疑。

1 转矩转速测量仪及其校准现状

如图 1 所示为当前开展转矩传感器扭矩参数校准的常用标准扭矩机的典型结构示意图, 采用的是通过杠杆和砝码的形式来复现标准扭矩, 并通过支承刀口

传递到传感器的承扭轴的工作模式,其校准完全是一种静态扭矩的模式。由于校准状态与实际使用状态存在较大偏离,使校准数据的可靠性打了折扣^[3-4]。

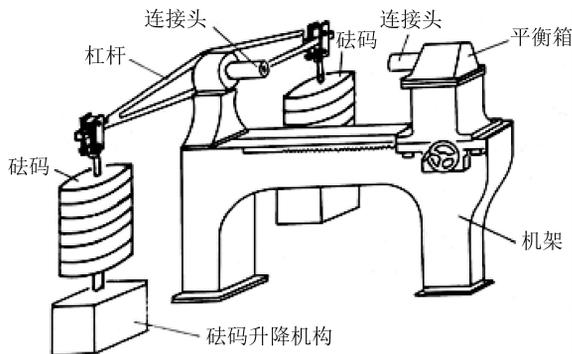


图1 静重式扭矩标准机结构示意图

为适应扭矩动态校准的需求,德国联邦物理技术研究院(PTB)曾开展过一些研究工作^[3],并研制了一台可以实现最大扭矩 100 Nm,转速范围 5 ~ 150 r/min,最大功率为 1 kW 的扭矩校准系统,其结构外形如图 2 所示,复现功率参数的相对扩展不确定度为 0.2%。该装置量程和功率较小,适用性有限。

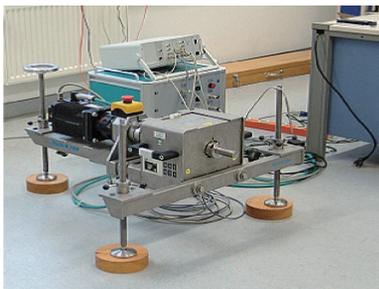


图2 德国 PTB 的扭矩校准设备

为了解决常用量程范围内扭矩转速测量仪扭矩、转速和功率的多参数同步校准,航空工业计量所开展了相应技术研究工作,研制了可以实现标准扭矩/功率准确复现和校准的扭矩/功率标准装置。

2 标准装置的整体设计

扭矩/功率标准装置在设计过程中将静重式扭矩标准机和测功装置的结构特点进行了有机结合,采用了将机械力矩转换为电磁力再转换为机械力矩并加载到转轴上的原理,实现了扭矩和转速的同步高精度复现,并可同步得到标准功率值,该装置可用以开展相应量程范围扭矩转速测量仪的多参数同步校准。

装置复现的机械功率与转速和转速之间的关系^[4-5]按式(1)进行计算得到,可见功率与扭矩和转速均呈正比。

$$P = \frac{TN}{9549} \quad (1)$$

式中: P 为机械功率, kW; T 为扭矩, Nm; N 为转速, r/min。

扭矩/功率标准装置整机实物如图 3 所示,主要由主机系统和控制系统组成。主机系统主要用来实现标准扭矩的复现、被测仪器的安装以及标准扭矩的施加等功能。控制系统主要实现扭矩的加载控制、电能的回收利用以及校准过程中的测量控制和数据处理等功能。

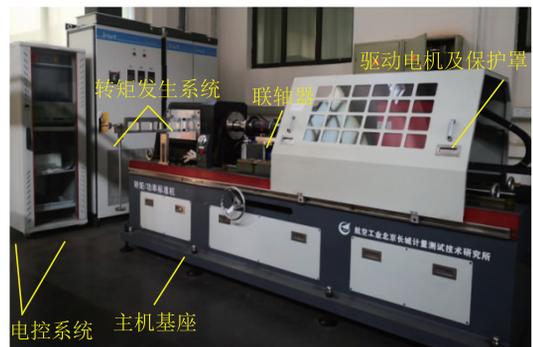


图3 扭矩/功率标准装置

装置的主机系统主要由基座、扭矩发生系统、联轴器、驱动电机等组成的。其中基座主要用于各功能部件的安装和固定,要求结构稳定和定位精度高,同时要有较高的固有频率,避免动态工作时产生共振等不利影响。标准扭矩发生系统用于产生标准扭矩和功率,并加载到系统旋转轴系及被测传感器上。联轴器主要用于连接各个部件的轴系并传递轴向扭矩,联轴器需要设计适合的结构以适应于高速旋转状态,并具有尽量小的转动惯量。装置还设计了被测传感器支撑座,用于支撑传感器外壳,保证传感器的测扭轴在高速旋转时能保持外壳部分的稳定并且不引入径向载荷。装置的驱动电机用于提供动力,保持稳定的转速,驱动整个轴系进行带负载的旋转。

工作过程中,由驱动电机带动联轴器、被测传感器和扭矩加载系统主轴进行旋转并达到设定的转速,通过加载系统来进行稳态扭矩的施加和耦合,使整个轴系在旋转过程中承受所需达到的扭矩^[6]。

装置设计的扭矩测量上限为 500 Nm,转速测量上限为 5000 r/min。系统工作过程中额定电功率的设计上限为 110 kW,由于此限制,在实际工作中,扭矩和转速在同步控制时需要协调设置量值上限。如当扭矩设置为 500 Nm 时,按照功率上限的限制,系统转速的测量上限为

$$N = \frac{P \times 9549}{T} = \frac{110 \times 9549}{500} = 2100.12(\text{r/min}) \quad (2)$$

在实际工作过程中,针对装置消耗电能的回收进行了针对性设计,实际消耗的电功率在最大状态下仅为系统机械功率结算结果的30%左右。

3 标准转矩发生系统的结构设计

由于转速参数的准确实现技术较为成熟,因此装置在设计过程中的主要难度在于标准转矩的实现。

在装置的机械结构中,标准转矩发生系统用于复现标准转矩,是保证功能和准确度水平实现的关键组件,其结构设计和不确定度控制是实现标准量值准确复现需要重点考虑的问题。

标准转矩发生系统的结构设计如图4所示。系统主要由一个定制的交流异步伺服电机(简称加载电机)、一套用于产生标准扭矩的力臂杠杆和砝码套组、一对杠杆限位机构以及一个用于实现功率驱动的伺服电机(简称驱动电机)等组成。

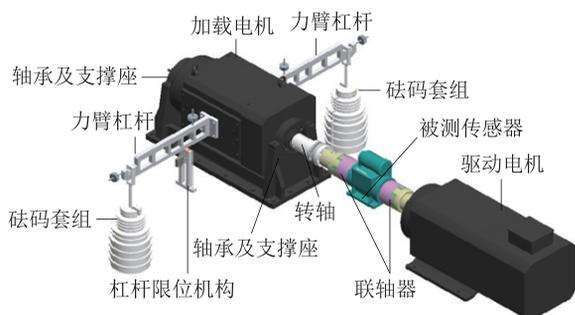


图4 标准转矩发生系统结构示意图

其中加载电机外壳(定子)设计为浮动结构,力臂杠杆固接在加载电机机壳上,电机转轴(转子)与机壳之间由两组轴承支撑。轴承部分设计为组合嵌套结构,主要目的为使定子与转子之间的摩擦力足够小、电机磁间隙足够稳定,同时也保证系统整体具有较高的谐振频率,在高速旋转过程中不会产生较为明显的振动现象。

工作时系统给定子线圈供电产生磁场拖动机壳及负载并保持平衡,转子旋转切割磁场产生耦合转矩。定子和转子之间的转矩是一对大小相等方向相反的相互作用力^[7]。当装置加载电机在等转矩状态下稳定工作时,其转子与定子之间的电磁力和整流子摩擦力等都是相互作用的关系,并全部转化为转矩输出。系统输出的标准转矩是由砝码和力臂杠杆来产生,其大小

按式(3)进行计算。

$$T = FL \quad (3)$$

式中: T 为转矩, Nm; F 为施加砝码复现的总力值, N, L 为力臂的长度, m。

在砝码产生标准转矩的基础上,综合考虑整体结构中对输出转矩值产生影响的摩擦转矩、附加惯性力矩以及其他力矩损耗引入的影响量之后,即得到了实际施加到被测传感器上的转矩。在装置研制过程中,如何鉴别、计算、精密控制以及精确测量以上影响量的大小,也是提升装置量值准确度水平的重要研究工作之一。

基于装置的功能需要,加载电机定子与常规电机不同,可在一定角度范围内沿系统中轴线转动。定子允许旋转角度通过限位机构加以限制,设计为 $\pm 15^\circ$ 。在工作过程中,不同转矩值的加载需要通过不同质量的砝码来实现,由于砝码设计为按一定的梯度进行逐级加卸,因此加卸过程中,功率负载也呈现台阶式的改变。在工作过程中,当加载电机外壳因砝码负载变化而发生旋转时,通过控制加载电机电流来产生电磁力变化,从而实现系统的再次平衡^[8]。系统平衡时,轴系承受的转矩就等于按公式(2)计算得到的结果。

系统中杠杆的设计如图5所示,其有效力臂长度设计为由加载电机中轴线到杠杆端头用于悬挂砝码吊挂的中心刀口刀线之间的距离。



图5 加载电机及力臂杠杆

装置杠杆臂长设计为800 mm,以500 Nm转矩测量点为例,该测量点对应的所需施加砝码的质量^[9]为

$$m = \frac{F}{gL(1 - \frac{\rho_a}{\rho_w})} = \frac{T}{gL(1 - \frac{\rho_a}{\rho_w})} = \frac{500}{9.80142 \times 0.8 \times (1 - \frac{1.2}{7900})} = 63.7760(\text{kg}) \quad (4)$$

式中: g 为当地重力加速度, m/s^2 ; ρ_a 和 ρ_w 分别为空气密度与砝码密度, kg/m^3 。

4 转矩量值的测量不确定度影响因素分析

装置在工作时,由驱动系统带动被测转矩转速测量仪,同步进行转矩、转速和功率参数的校准,装置给出标准示值,并由转矩转速测量仪进行测量值的显示,比较二者之间的差异从而得出示值测量误差等校准结果。标准装置和被测传感器之间通过联轴器进行连接,并随整个轴系在旋转状态下工作。通过精密设计,加载电机内部的相互作用对外部输出转矩产生的影响极小。

根据上述测量工作原理,可知装置所复现转矩参数的测量不确定影响因素主要包括砝码复现的力值、力臂有效长度、转矩灵敏度(集中反映加载电机支撑轴承摩擦力矩、加载电机电力线的附加力矩以及平衡控制系统的分辨力等因素的影响)以及轴系转动惯量产生的附加转矩(由于轴系部件不同轴引起)等。

因此,装置在稳定工作状态时,其复现的转矩参数的测量模型为

$$T = FL \pm T_B \pm T_D \quad (5)$$

式中: T_B 为转轴灵敏度; T_D 为轴系转动惯量产生的附加转矩。

针对装置开展的量值溯源性校准试验主要有五个方面:①对砝码质量进行精确称量;②对力臂长度进行现场原位校准(经仿真分析和精密控制,杠杆的挠度变形和水平位置控制偏差引入的影响可忽略),如图6所示为装置杠杆力臂长度原位校准现场;③对加载电机外壳静态启动力矩和旋转状态下的转矩灵敏度进行

测量(二者取大值);④对轴系转动惯量进行测量和计算;⑤开展装置测量重复性试验。



图6 装置杠杆臂长现场校准

对以上试验得到的各方面数据结果进行综合分析,可得到装置复现转矩量值的测量不确定度水平。以500 Nm, 600 r/min 测量点为例,其转矩测量不确定度影响量的分析结果如表1所示。

表1 转矩测量不确定度影响因素分析

不确定度因素	相对极限误差	区间半宽度	分布规律	包含因子	相对标准不确定度
砝码力值	$\pm 5 \times 10^{-5}$	5×10^{-5}	正态	2	2.5×10^{-5}
杠杆臂长	$\pm 1 \times 10^{-4}$	1×10^{-4}	均匀	$\sqrt{3}$	5.8×10^{-5}
转矩灵敏度	3.2×10^{-4}	1.6×10^{-4}	均匀	$\sqrt{3}$	9.1×10^{-5}
惯量附加转矩	1×10^{-5}	5×10^{-6}	均匀	$\sqrt{3}$	2.9×10^{-6}
测量重复性	2×10^{-3}	—	—	—	6.8×10^{-4}

各不确定度影响量彼此独立互不相关^[10],则装置转矩示值的相对合成标准不确定度 $u_{cr}(T)$,可按照式(5)计算。

$$u_{cr}(T) = \sqrt{u_r^2(F) + u_r^2(L) + u_r^2(T_B) + u_r^2(T_D) + u_r^2(S_r)}$$

$$= \sqrt{(2.5 \times 10^{-5})^2 + (5.8 \times 10^{-5})^2 + (9.1 \times 10^{-5})^2 + (2.9 \times 10^{-6})^2 + (6.8 \times 10^{-4})^2} = 6.9 \times 10^{-4} \quad (5)$$

式中: $u_r(S_r)$ 为由测量重复性分量引入的标准不确定度。

取 $k=2$,则装置转矩示值的相对扩展不确定度 $U_r(T)$ 按照式(6)计算。

$$U_r(T) = 2 \times u_{cr}(T) = 1.4 \times 10^{-3} \quad (6)$$

同理,可对装置其他典型转矩转速测量点进行试验和分析。如图7所示为工作转速为600 r/min时部分典型转矩测量点测量不确定度的分析结果,可见,所有结果均不超过0.2%。

同理,对装置转速参数的相对扩展不确定度进行分析,其结果均不超过0.03%($k=2$);对装置功率参数的相对扩展不确定度进行分析,其结果均不超过0.2%($k=2$)。

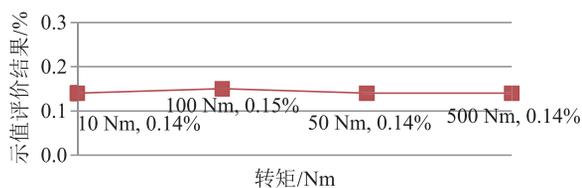


图7 部分典型测量点的不确定度评价结果

注:图7中测量点标注的两个量分别为转矩, Nm; 转矩不确定度,%。

5 应用试验

装置研制完成后,首先选用高准确度转矩转速测量仪,开展了利用本装置进行多参数同步校准与利用传统标准装置进行扭矩和转速单参数校准结果的对比

试验。

试验对象选用德国某公司生产的 TB40B 型盘式结构转矩转速传感器，配套 1-MX460B 型采集模块。试验前按照 JJG 924 - 2010《转矩转速测量装置检定规程》^[11]的方法，采用静重式扭矩标准机和转速标准机分别对该传感器及配套测量仪表进行了扭矩（静态）和转速的单参数标定，使其扭矩和转速分别按“Nm”和“r/min”为单位进行指示。

对标定过的测量仪在本装置上开展校准试验，传感器的安装状态图 8 所示。校准时，通过本装置进行转矩和转速的同步驱动和控制。先按设定目标进行转速驱动，然后逐级施加目标转矩，稳定后，记录测量仪的转矩、转速和功率示值。

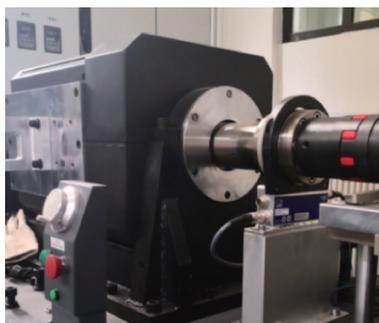


图 8 传感器安装状态图

如图 9 所示分别为该测量仪的转矩参数的校准结果，可见，转矩测量重复性和示值误差均得到了理想的测量结果，且与单参数静态标定的结果也高度一致。

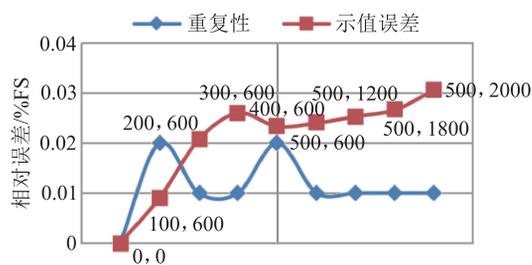


图 9 部分转矩测量点校准结果

注：图 9 中测量点标的两个量分别为转矩，Nm；转速，r·min⁻¹。

如图 10 和图 11 所示分别为该测量仪的转速和功率参数的校准结果，可见，各项指标也均得到了理想的测量结果，且转速量结果与单参数标定结果也高度一致。

此外，利用本装置还开展了其他结构类型转矩转速传感器的多参数同步校准试验，均取得了满意的结果，充分验证了装置工作的可靠性和广泛的适用性。

如图 12 和图 13 分别为某圆轴结构和卡环式结构传感器的试验现场安装状态。

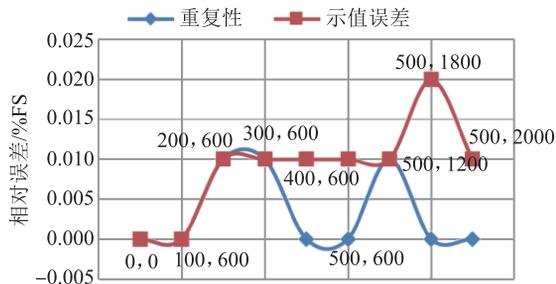


图 10 部分转速测量点校准结果

注：图 10 中测量点标准的两个量分别为转矩，Nm；转速，r·min⁻¹。

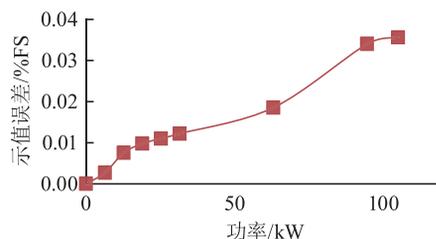


图 11 部分功率测量点校准结果



图 12 圆轴结构传感器校准

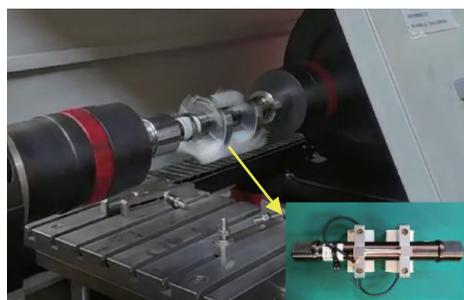


图 13 某圆轴结构和卡环式结构传感器的试验现场安装

6 结束语

通过技术设计、加工生产以及调试试验，研制了可进行转矩、转速、功率参数同步校准的标准装置。经过对装置复现量值的测量不确定度进行分析和评价，结果表明，各典型点复现转矩、转速和功率量值均达到了预期设计目标。

装置在研制过程中重点解决了多项关键问题,如标准转矩的准确发生、摩擦力矩的有效消减、联轴器的合理设计以及电能的循环利用等等,同时在电力线附加转矩和转动惯量等影响因素的控制方面也取得了良好的效果。

后续将进一步开展各种类型测量仪的动态校准,积累更多的数据和经验,以期对装置的合理应用、操作规范和注意事项等进行进一步的分析研究。

参 考 文 献

- [1] 张永祥,明廷锋,张帅. 应变扭矩的测量不确定度分析[J]. 测试技术学报, 2018, 32(03): 7-12.
- [2] 金炜. 关于航空发动机测功机校准相关问题的探讨[J]. 计测技术, 2009, 29(04): 44-47.
- [3] Jürgen Andrae, Werner Nold, Georg Wegener. Traceability of torque transducers under non-rotating operating conditions[C]// Proceedings, XVII IMEKO World Congress, Dubrovnik, Croatia, 2003.
- [4] 刘鹏,王达. 测功机转矩校准新方法及其不确定度分析[J]. 中国标准化, 2018, (04): 210-212.
- [5] 顾俊杰,王欢,郭凯,等. 船用柴油机功率测量不确定度评定[J]. 柴油机, 2016, 38(5): 18-20.
- [6] 禹精达. 传动轴扭矩测量技术及精度分析[D]. 太原: 中北大学, 2012.
- [7] 王晶露,秦海峰. 一种标准转矩发生系统设计及误差分析[J]. 机械研究与应用, 2020, 33(2): 52-55.

- [8] 郭贵勇. 杠杆组件的结构性能对扭矩标准力臂杠杆平衡的影响分析[J]. 科技视界, 2017, 7(32): 66-68.
- [9] 秦海峰,张泽光,吴扬. 扭矩标准装置结构及不确定度现状分析[J]. 计测技术, 2002, 22(1): 40-41.
- [10] 全国法制计量管理技术委员会. JJF 1059.1-2012 测量不确定度评定与表示[S]. 北京: 中国质检出版社, 2012.
- [11] 全国力值硬度计量技术委员会. JJG 924-2010 转矩转速测量装置检定规程[S]. 北京: 中国计量出版社, 2010.

收稿日期: 2021-02-01

基金项目: 工信部民用飞机专项科研项目(MJ-2016-J-94)

作者简介



秦海峰(1975-),女,研究员,研究领域为力值、扭矩、多分量力专业的静态、动态及综合计量测试技术。任全国力值硬度重力计量专业委员会委员,全国试验机标准化委员会副秘书长,全国机械振动、冲击与状态检测标准化技术委员会委员,国家计量标准一级考评员。

1997年毕业于吉林大学,同年到航空工业北京长城计量测试技术研究所工作至今。主持承担了国家相关科研项目十余项,在“小力值标准研制”、“多分量力校准装置研制”、“测功装置现场校准技术研究”、“正弦动态力校准技术研究”等领域取得了10余项国家发明专利,多项科研成果获得集团和部级科技进步奖多项。负责完成制修订国家计量检定规程规范十余项,发表科技论文20余篇,编写技术著作3部。