

高端测力仪器技术发展综述

秦海峰*, 张毅治, 陈伟, 刘思博

(中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 介绍了力测量技术的发展脉络, 论述了机械式、液压式、电阻应变式、压电式等传统测力技术以及光纤测力、电磁测力、量子测力等新兴测力技术的原理、特点与应用情况, 阐述了航空航天、高端装备制造等战略新兴产业快速升级背景下, 高端测力仪器高精度、极值化、多维度、高动态、智能化、工程化的发展方向。分析了当前高端测力技术的研究进展, 探讨了力值溯源体系的发展现状与构建思路, 阐述了静态/动态力校准、多分量力标定、不确定度评定的技术现状与难点, 指出传统测力技术在精度、量程、环境适应性等方面仍需提升。展望了高端测力仪器技术的未来发展前景, 提出未来需通过新材料与新工艺创新、跨学科协同攻坚、与物联网/大数据/人工智能等新兴技术深度融合, 推动高端测力仪器技术的产业化落地, 为国家制造业高质量发展提供技术支撑。

关键词: 测力仪器; 力值溯源体系; 极值力; 多维力; 动态力; 智能化; 工程化; 环境适应性

中图分类号: TB93; TH82

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2026) 03-0030-12

Review of the technological development of high-end force measuring instruments

QIN Haifeng*, ZHANG Yizhi, CHEN Wei, LIU Sibao

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

Abstract: This paper introduces the development trajectory of force measurement technology, as well as the working principles, technical characteristics and applications of traditional force measurement technologies, including mechanical, hydraulic, resistance strain gauge and piezoelectric methods, and emerging techniques such as fiber-optic, electromagnetic, and quantum force measurement. It expounds the development directions of the high-end force measuring instruments in terms of high precision, extreme force value, multi-dimension, high dynamic performance, intellectualization and engineering application against the background of rapid upgrading of strategic emerging industries such as aerospace and high-end equipment manufacturing. It analyzes the research progress of current high-end force measurement technology in various directions, and discusses the development status and construction ideas of the force value traceability system, as well as the technical status and core difficulties of static / dynamic force calibration, multi-component force calibration and uncertainty evaluation. It points out that traditional force measurement technologies still need to be improved in terms of accuracy, measurement range and environmental adaptability. The future development is outlined, proposing the need for innovation in new materials and processes, interdisciplinary collaboration, and deep integration with such emerging techniques as internet of things, big data, and artificial intelligence to drive the industrialization of high-end force measurement

收稿日期: 2026-03-02; 修回日期: 2026-04-06; 录用日期: 2026-04-27; 发表日期: 2026-06-28

基金项目: 国家“十四五”计量技术基础科研项目(JSJC202420XXXX)

引用格式: 秦海峰, 张毅治, 陈伟, 等. 高端测力仪器技术发展综述[J]. 计测技术, 2026, 46(3): 30-41.

Citation: QIN H F, ZHANG Y Z, CHEN W, et al. Review of the technological development of high-end force measuring instruments[J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46(3): 30-41.



instruments and provide technology support for national high-quality manufacturing development.

Key words: force measuring instrument; force value traceability system; extreme force; multi-dimensional force; dynamic force; intellectualization; engineering; environmental adaptability

0 引言

测力仪器在工业领域有十分典型、成熟的应用,一般由力传感器及配套的电信号测量系统构成,主要用于力值参数的测量。传统的测力仪器(如当前应用比较广泛的应变式力传感器等)主要基于静力效应实现测量,经过长期发展已取得较大进步。但是面对新环境、新要求,传统测力仪器也存在一定的不足——其分辨力、精确性及环境适应性等尚不能完全满足当前战略新兴产业关键场景的更高要求。

当下,高端装备制造等新兴产业正处于快速升级的重要阶段。在这样的大背景下,诸多重要场景对力值测量提出了极为严苛的要求。以飞机为例,其发动机矢量推力测试是确保发动机能够精准控制的基础,是飞机性能提升和飞行安全操控的关键,而测试环境和参数的复杂程度对测力仪器提出了越来越高的要求;对飞机起落架开展的落震试验关乎起落架的可靠性和安全性,要求所使用的力值测量技术准确度高,且能够适应试验过程中的瞬间冲击等动态条件;对飞机开展的全机静力及疲劳试验更是对力值测量提出了全方位的严格要求,涵盖精准度、稳定性以及在长时间试验过程中的环境适应性等多个方面。

力学量值传递的标准化需求变得日益迫切。在工业生产中,准确一致的力学量值传递是确保产品质量和生产过程可重复性的关键。只有实现力学量值传递的标准化,才能让不同车间、不同设备生产出的零部件具有良好的兼容性和互换性。而工业生产控制的智能化转型也是大势所趋,智能化生产需要更加精确、可靠和丰富的力值测量数据来实现自动化的生产控制,提高生产效率和产品质量。这些因素共同推动着力传感技术朝着高端化、多元化的方向不断演进^[1-2]。

在这样的背景之下,高端测力仪器技术的发展具有极其重要的意义。在工业研发和生产过程中实现对力参数的精准测量和把控,是推动制造

业高质量发展的关键因素之一,能够为制造业提供更加精确的测量手段和数据,助力企业提高产品质量和生产效率,保障生产过程的安全性和可靠性。

本文分析力测量技术的发展现状,介绍传统测力技术和新兴测力技术的原理、优缺点、适用环境,论述高端装备制造等战略新兴产业快速升级背景下,高端测力仪器高精度、极值化、多维度、高动态、智能化、工程化的发展方向。分析典型高端测力仪器应用需求,探讨力值溯源体系的建设情况,展望高端测力仪器与技术的未来发展前景,为相关领域的科研人员提供技术借鉴。

1 力测量原理及测力技术

随着科学技术的发展,力测量技术有清晰的发展脉络,即从基于机械杠杆、弹簧、液压测量的最初形式,发展到现在的电阻应变、压电、光纤等多种精密测量技术。力测量技术的每次重大进步都促使相关领域的测量精度提高、应用范围扩大,其发展史也是科学技术发展史的一个极好缩影。

1.1 机械测力

19世纪到20世纪中期是力测量技术的发展初期,当时工业生产、农业生产及基础科学研究大都只需要低精度的力测量手段,故力测量技术自然地围绕“直观指示、粗略计量”展开,所采用的测量原理主要是:利用机械结构的物理形变或流体压力来感知和测量力。当时的技术研发主要是解决“能否测量”的问题,而不是“如何精准测量”,也正因如此,此时的力测量仪表有结构简单、成本低廉、精度有限等特点。

最早的力测量装置以机械杠杆或机械弹簧式为主,其基本原理相对简单。早期的机械杠杆式测力装置(例如台秤、磅秤等)多用铸铁、钢材等刚性材料制作杠杆结构,借助调节杠杆支点位置的方式来实现不同量程的测量。弹簧测力计的工作原理如图1所示,此类设备以弹簧的伸缩形变直

接驱动刻度盘显示力值,其结构轻巧紧凑,很自然地成为实验室基础测力、农业中拉力测量、日常生活中简易称重等多种场合的理想选择。此类装置也有很直观的不足,即测量精度较低,一般为满量程(Full Scale, FS)的1%~5%,不宜用于精密测量;响应速度慢,不能可靠地测量动态力的瞬时值,只适合静态力或缓慢变化力的粗测;机械结构长期使用后会发生磨损、形变老化,测量误差会随时间累积而增大,需要定期校准维护。

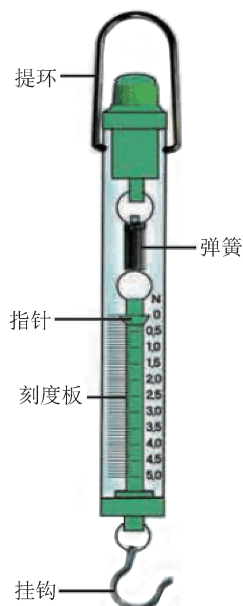


图1 弹簧测力计的工作原理

Fig.1 Working principle of the spring dynamometer

1.2 液压测力

随着工业生产向大型化、重型化发展,机械杠杆/弹簧式测力装置无法满足大力值测量的需求,基于帕斯卡原理的液压/气压式测力装置应运而生。其核心结构由压力发生装置、传递介质、指示机构组成,通过外力作用于活塞,使密闭介质产生压力,再通过压力与力的换算关系,实现力值的测量。液压式测力装置可测量的力值范围从几十千牛到数千千牛,甚至更大,广泛应用于重型机械制造、桥梁工程、矿山开采、船舶建造等领域,如应用于桥梁施工中的预应力测量的液压千斤顶(如图2所示)等。该类装置具有一定的技术优势,但同时也存在明显的技术局限性,如液压式装置的液压油泄漏问题会影响测量精度,还

可能造成设备污染与安全隐患;介质的温度敏感性较强,环境温度变化会导致介质体积、压力发生变化,产生温度漂移误差;介质的压缩性、管道的滞后效应导致测量响应速度较慢,存在明显的测量滞后,难以实现动态力的精准测量等。

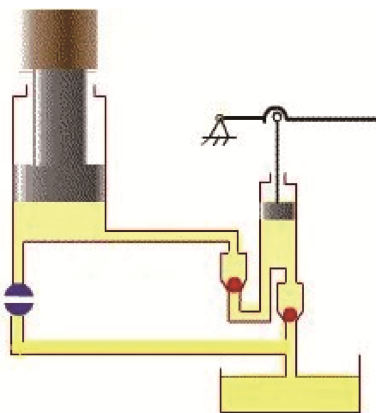


图2 液压千斤顶的工作原理

Fig.2 Working principle of the hydraulic jack

除前述两种装置各自的缺陷外,早期力测量技术也存在三个共性问题:

- 1) 信号输出形式为模拟显示(刻度盘、指针等),因此不能直接、可靠地进行力值的数字化记录、存储及传输,对数据的后续分析极为不利;
- 2) 没有完善的误差补偿机制,温度、湿度、振动等环境因素及机械磨损、介质泄漏等设备因素都容易引起测量误差增大,而当时尚无有效手段予以补偿;
- 3) 抗干扰能力极差,机械结构对振动、冲击敏感,液压系统对环境温度敏感,导致其测量稳定性不佳,难以满足复杂工况下精密测量的要求。

正因如此,早期力测量技术只能满足基础测量需求,而随着工业自动化、精密制造、基础科学研究的迅猛发展,更高精度、更复杂场景的测力需求不断出现,力测量技术向电测时代的转型已成必然。

1.3 应变式测力技术

从20世纪中期开始,随着材料科学、电子技术取得的长足进步,力测量技术也发生了实质性的飞跃,电测技术逐步取代传统机械、液压式测量技术,成为力测量领域的主流。电测技术的基本逻辑:把力的物理形变转换为可测量、可传输

电信号,再用电子技术对信号进行调理、放大、分析,由此解决“精确测量、动态测量”的问题,直接推动了力测量技术从“粗测”向“精测”的转型,更加契合精密制造、航空航天、汽车工业等对质量有极高要求的领域的发展需求。

电阻应变式测力技术因精度高、量程广、稳定性好等优势,成为该时期电测技术最成熟、最可靠的核心手段。电阻应变式测力技术的发展,离不开应变片的技术突破,尤其是金属箔应变片的问世。改进后的应变片具有灵敏度高、散热性好、粘贴方便、一致性强等优势,为电阻应变式测力技术的成熟奠定了基础。随着电子技术的进步,惠斯通电桥(如图3所示)、信号放大器等配套设备逐渐成熟,电阻应变式测力装置实现了产业化应用,迅速取代传统测力技术,成为工业测力领域的核心技术,至今仍在各类测力场景中广泛应用^[3-6]。

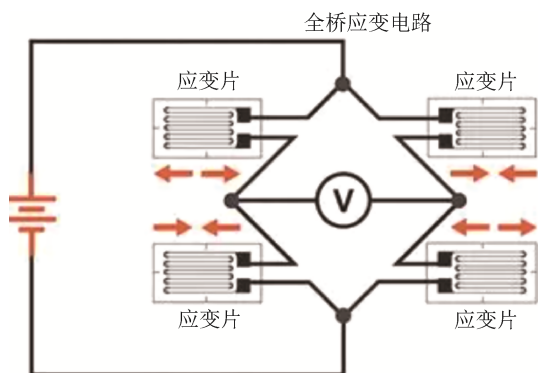
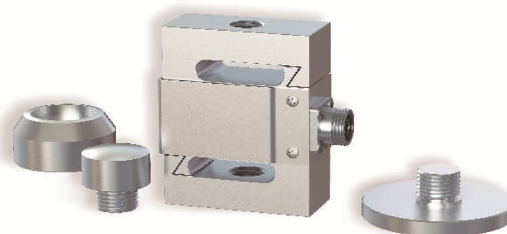


图3 惠斯通电桥

Fig.3 Wheatstone bridge

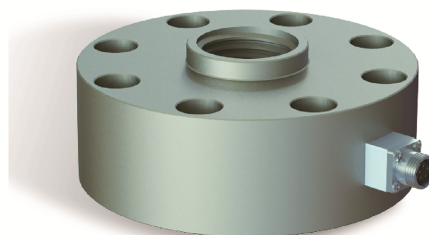
电阻应变式测力装置的基本结构可以归纳为弹性体、电阻应变片、惠斯通电桥、信号调理电路及若干辅助部件,其中弹性体是直接承受被测力并将其转换为弹性形变的部件,一般用强度高、弹性模量大的金属材料制造,如合金钢或铝合金。在弹性体的典型应力集中区域粘贴一组或若干组应变片,其电阻值随弹性体的形变而相应变化。弹性体的结构形式十分丰富,可以满足不同应用场合的要求。图4为三种不同弹性体结构的力传感器外形。电阻应变片的粘贴位置及粘贴方法具有极高的灵活性,将应变片接入惠斯通电桥,弹性体受力变形后应变片阻值变化,电桥失衡,输出与外力大小成正比的电压信号。信号调理电路对

该电压信号进行处理(即先放大,再滤波,最后进行温度补偿),得到可读、可记录的可靠电信号,最终由显示仪表直接给出力值读数,从而完成力的精确测量。



(a) S型力传感器及附件

(a) S-type force sensor and accessories



(b) 轮辐式力传感器

(b) Spoke-type force sensor



(c) 柱式力传感器及附件

(c) Column force sensor and accessories

图4 不同弹性体结构的力传感器

Fig.4 Force sensors with different elastic body structures

相较早期机械及液压式测力技术,电阻应变式测力技术实现了多方面的核心突破,改变了力测量的精度与应用场景:

1) 精度大幅提高

通过优化应变片材料、改进弹性体结构、完善信号调理电路,电阻应变式测力装置的测量精度普遍达到 10^{-4} 量级^[7]。

2) 响应速度提升

力感知的响应速度可达kHz级,能够捕捉动态

力的瞬时变化,打破了早期技术仅能测量静态力的局限^[8]。

3) 量程覆盖广泛

通过设计不同结构、不同尺寸的弹性体,配合不同规格的应变片,电阻应变式测力装置的量程可实现大范围覆盖——从微牛级(μN)的微小力测量(如生物力学、微纳操作)到兆牛级(MN)的大力值测量(如桥梁工程、重型机械)均可实现。

4) 稳定性显著优化

随着温度补偿技术、线性修正技术及密封工艺的成熟,电阻应变式测力装置的抗干扰能力显著提高。温度补偿技术能充分降低环境温度变化对测量结果的影响,能极好地控制温度漂移误差;线性修正技术能很好地修正弹性体、应变片的非线性误差,极大提高测量线性度;密封工艺能够可靠地防护灰尘、水汽、腐蚀性气体对内部元件的危害,显著提升测量设备的稳定性,如太原科技大学邝宇恒团队研发的一种高灵敏度柔性应变传感器,其在5 000次循环后仅表现出1.5%的信号衰减,有很好的稳定性^[9]。

1.4 压电式测力技术

20世纪中后期,随着压电材料的研发与应用,压电式测力技术快速崛起,其凭借极高的响应速度,成为动态力、高频力测量的核心技术,弥补了电阻应变式测力装置在高频动态场景中的不足。压电式测力技术的核心优势是响应速度快、动态性能好,可捕捉瞬时变化的力信号,可应用于冲击、爆炸、高频振动等极端动态场景。

压电式测力装置基于压电效应(如图5所示)设计,其组成部分主要包括压电晶体、电荷放大器及信号调理电路等^[10-13]。某些晶体材料(如石英、压电陶瓷)在受到外力作用时,其内部会产生极化现象,同时在表面产生等量异号的电荷,对电荷量进行测量,可推导出此外力的相应量值。由于压电晶体产生的电荷信号微弱且易衰减,需通过电荷放大器将电荷信号转换为电压信号,并进行放大、滤波处理;经信号调理后,输出可记录、分析的电信号,从而实现动态力的精准测量。

压电式测力技术最突出的优点是适用于动态力测量,其响应速度已达MHz级,比电阻应变式

的kHz级快很多,很自然地成为纳秒级瞬时动态力信号测量的理想选择,也特别适用于高频动态力、冲击载荷、瞬态力的测量。大连理工大学张军团提出了一种不对称传感器布置的压电力测试方法,其一阶自然频率达到2 124 Hz^[14];济南大学李军英团队研发的大负载机器人用多维力传感器,其3个力方向的固有频率数值可接近2 000 Hz^[15];大连理工大学袁明宇团队研发了基于压电力敏单元的航空发动机高动态矢量推力分布式测试系统,其固有频率为应变式系统的2倍^[16]。此外,压电式测力装置具有结构简单、体积小、重量轻、可集成于狭小空间等优势。

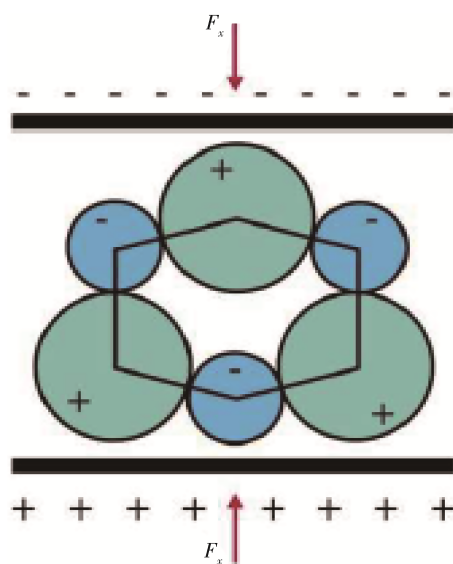


图5 压力作用下的压电效应示意

Fig.5 Schematic diagram of the piezoelectric effect under pressure

压电式测力技术也存在以下缺点与不足：①由于压电晶体产生的电荷会随时间逐渐泄漏,因此无法实现静态力的长期测量,仅适用于动态力测量;②测量结果受温度影响较大,需配备专用温度补偿模块;③电荷信号易受电磁干扰,需做好屏蔽处理;④压电式测力设备的成本高于电阻应变式测力设备,且需要专用的电荷放大器,适配场景相对单一。

1.5 典型新兴测力技术

本世纪以来,随着光电技术、新材料技术以及MEMS器件制造等新技术的发展,在力测量领域逐步涌现出多项新技术,较为典型的包括:

1) 光纤测力技术

通过光纤在受力时光信号的变化精确测力。光纤测力技术以抗电磁干扰、微型化、高精度、耐腐蚀、远距离传输为核心优势,是当前极端环境下力监控测量的主流方案。

2) 电磁力测量技术

利用通电线圈在恒定磁场中产生电磁力,此力与待测力实时平衡,通过电流大小精确反推得到力值。电磁力测量技术属于闭环高精度测量技术,在实验室天平、精密计量、质量比对领域应用较多,具有超高精度、极佳线性、快速响应等核心优势。

3) 量子力测量技术

利用量子态、量子纠缠、量子自旋、量子涨落、真空量子效应等微观量子物理效应,实现纳牛及更小量级分辨力的超微弱力精密测量。量子力测量技术在微纳操纵、生物医学机器人、细胞力学等方向的应用需求增长迅速。

4) MEMS测力技术

依托微机电系统,在硅片上微加工制成微型弹性敏感结构,将力载荷转化为电信号进行测量。MEMS测力技术属于微型化测力技术,主要适用于微型推力、穿戴测力、生物力学、惯性力测量等领域,所使用的装置体积小、功耗低、可批量生产、集成度高。

2 新型测力仪器需求

当前阶段新兴产业升级迅猛,力的测量在高端装备研制中具有举足轻重的地位,对新型测力仪器的实际需求进一步增加。航空航天、高端装备制造等领域均处在新工艺、新应用蓬勃发展的阶段,而传统测力仪器在许多方面已经不能很好地满足其需求。在高精度测试场合,要求测力仪器的测量误差更小;在复杂工况或极端环境中,需要测力仪器能可靠、稳定地工作,需要其具备更多测量功能,且有更优异的环境适应性。更重要的是,工业生产智能化转型正在加快推进,对测力仪器的智能化程度提出了更高要求——测力仪器需能够与智能化生产系统无缝对接,实现数据实时协同分析处理。新型测力仪器的研发已经

迫在眉睫。典型高端测力仪器需求场景举例如表1所示。

虽然传统测力技术拥有主流优势,但是目前其在精度、量程、维度、动态带宽及环境适应性等方面都已接近能力边界,因此有必要发展新型高端测力仪。下面对新型测力仪的需求作简要梳理。

1) “高精度”方向的本质诉求绝不是某个指标更优,而是要从“结构-材料-补偿-校准-修正”全链路入手,系统地提高测量结果的可信度。高精度需求已经从“传感器本体精度”扩展到了“系统级不确定度”。例如,发动机矢量推力测试中单一的推力测量不能直接可靠地支撑姿态/轨迹相关的推力分量解算结果,必然要对整个测量系统及其多种影响因素做严谨分析,需明确推力方向与分量分解的关系、试验台架装夹刚度、摩擦及侧向力如何引入系统性偏差等。故单纯提高传感器指标尚不能保证结果可信,必须采用结构设计合理、全量程覆盖、多循环验证、多方位校准的综合策略,方能真正建立可评定的不确定度闭环^[17]。

2) 多通道、宽量程、极值测量三者的需求都十分突出,不能忽视对中误差及装夹变形。极值力测量不但要“测得准”,更要“扛得住”,即在极限工况下保证结构安全,防止传感器过载或损坏,同时要设计成易于维护、便于校准的形式,以尽可能降低停机代价。微小力测量在微纳操纵、生物医学机器人、细胞力学等方向的需求正在迅猛增长,但此类场景所面对的共性难题是信噪比极低,热漂移及环境振动极易湮没有效信号,因此必须采用超高灵敏度测力原理、低噪声读出链路及隔振温控等系统工程手段予以解决。极值力测量的根本不是单纯让传感器“进行大参数或小参数测量”,而是要建立真正可靠、可溯源的系列化测量体系^[18]。

3) 多维力/力矩测量已经成为高端测力仪器重要的发展方向,其需求由机器人力控、风洞测力天平及结构载荷谱测试等多种应用共同驱动。协作机器人及空间机器人的末端执行器在装配、抓取、接触作业中都承受三向力及三向力矩,且

表1 典型高端测力仪器需求场景示例

Tab.1 Examples of typical application scenarios with requirements for high-end force measuring instruments

序号	应用场景	载荷特征	力测量时的相关要求
1	发动机矢量推力试验台	1) 大载荷; 2) 准静态为主, 叠加低频波动; 3) 多分量力的解算。	1) 高精度同轴加载结构; 2) 现场原位测量; 3) 温漂及附加载荷等影响分析和修正; 4) 系统不确定度评定。
2	全机静力与疲劳加载	1) 多通道同步; 2) 长时间稳定或脉动; 3) 载荷谱协调控制。	1) 多通道一致性管理; 2) 在线漂移监测; 3) 低延迟采样链路; 4) 工程化可靠性设计。
3	起落架落震/冲击试验	1) 冲击峰值大; 2) 峰值捕捉关键; 3) 多分量力测量。	1) 高带宽动态测力; 2) 动态校准/频响补偿; 3) 抗冲击结构; 4) 信号采集的快速与同步。
4	风洞天平(气动力多分量系统)	1) 多分量力测量; 2) 可能有振动; 3) 环境及温漂等的影响。	1) 低耦合结构设计; 2) 标定矩阵优化; 3) 解耦算法; 4) 温度等影响因素的补偿; 5) 系统不确定度评定。
5	空间/协作机器人末端力控	1) 多维力; 2) 动态过程; 3) 闭环控制敏感。	1) 低耦合六维紧凑结构; 2) 快速解耦; 3) 低延迟数字输出; 4) 过载保护等。
6	生物医学等微纳力操作	1) 极小力; 2) 信噪比极低; 3) 与显微系统耦合。	1) 高灵敏低噪声原理(MEMS/谐振/FBG等); 2) 隔振温控; 3) 数字滤波与漂移估计。
7	高低温/真空/辐照等特种工况	1) 温循环或真空辐照; 2) 长期运行; 3) 溯源困难。	1) 材料与封装工艺; 2) 热设计; 3) 抗辐照; 4) 远程诊断与健康管理。

注：微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS); 光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)。

接触方向变化极快, 控制回路对延迟、噪声都极为敏感, 若传感器耦合度高, 某一方向的载荷就会串扰到其他通道, 从而导致接触状态误判, 力控失稳甚至产生安全风险。风洞应变天平场景对多分量同步测量及低耦合有直接、明确的严苛要求: 升力、阻力、侧力及三轴力矩的综合误差及校准质量直接关系气动力数据的可信性。因此, 多维测力的关键基本能力包括低耦合结构设计、可重复且高效率的标定方法、解耦模型在温漂及长期运行中的稳定性保障。简而言之, 多维测力的“高端化”绝不是简单的传感器本体优化, 实质上是一场结构、标定、解耦算法、工程运维各

环节一体化能力的竞争^[19-23]。

4) 动态力测量及高带宽响应需求正因冲击/落震试验、爆炸冲击与超压响应、旋转机械振动载荷、伺服加载闭环控制等多种场景而被不断推升到新高度。起落架落震及结构冲击试验中最突出、最根本的问题是瞬态峰值大、频谱成分宽, 故传感器在面对冲击时必须满足“峰值不削顶、波形不失真、信号链不饱和”的要求, 并能可靠地采集强振动、强电磁扰动环境中的数据。旋转机械及发动机相关振动载荷测试中常见高频小幅与低频趋势叠加的信号, 因此需要同时保留波形细节及统计特征, 防止噪声、漂移对谱分析造成

误导。对于伺服加载闭环系统而言,力反馈的延迟、相位特性及噪声水平都会直接、实质性地影响控制稳定性及加载精度。动态测力的真正瓶颈不单是“能否采集到信号”,更重要的是如何准确给出动态标定及动态不确定度。面向动态力需求设计的新型高端测力仪器必然要与动态校准装置、频响建模及补偿方法协同发展^[24]。

5) 环境适应性及工程化能力已经从“附加要求”自然地演变为“关键门槛”。特种工业环境一般都具有真空、极端温度循环、辐照、腐蚀介质、强电磁干扰等严苛条件,而测量系统维护条件受限、运行周期极长,因此材料及封装工艺的可靠性、热设计及热失配控制、电子链路抗辐照及抗干扰能力、远程诊断与健康管理能力更直接地影响测量系统长期工作的稳定性。更重要的是,工程化本身提出了明确而迫切的快速校准与溯源需求:大型试验台架及现场测试设备难以频繁返厂校准,故必须设计可执行的现场校验/复核方案,同时配套实现对零点漂移、灵敏度漂移、异常噪声的在线监测及及时预警。因此,高端测力仪器的工程化设计实质上是以真实工况为起点,系统、严谨地构建全生命周期可靠性及可维护性体系^[25-27]。

综上所述,新型测力仪器的需求有“精度-量程-维度-带宽-环境”多种性能指标耦合的典型特征,故单纯从某一性能维度作增量优化不能很好地解决复杂场景下各约束的协调问题,高端测力技术的发展实质上是一个系统级协同、综合性优化过程。

3 高端测力技术发展

为满足新型测力应用需求,近些年高端测力技术的发展突飞猛进。区别于常规量程、环境以及成熟测量方案,当前高端测力技术的发展方向主要集中在高精度、极值化、多维度、高动态、智能化和工程化等方向。

3.1 高精度

高精度是高端测力技术发展的重要方向,需要借助各种综合技术手段,更好地满足各学科对高精度力值测量的迫切需求。具体而言,主要从3个方面入手:改进传感器材料及制造工艺以提高

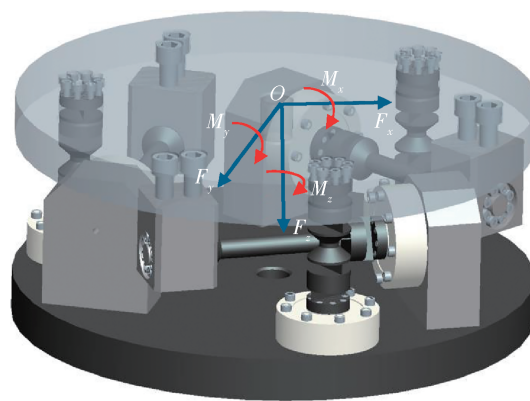
传感器灵敏度和长期稳定性;优化测量电路及信号处理算法以降低测量误差;强化对测量环境的控制及补偿以降低环境因素对测量结果的影响。

3.2 极值力

实现极值力准确测量是高端测力技术发展的重要方向,实际工业生产及科研试验中时常需要进行极大或极小力的检测,测力仪器需可靠地测量极值力。但是测量极值力本身就有若干难点,如传感器的原理设计、结构及材料创新、过载保护、保障测量系统的高灵敏度及可靠性等。近年来,应用量子、MEMS以及柔性测量技术的微小力测量方法已成为该领域科技发展的新亮点。另外,在传统测力技术的基础上进行结构并联组合以实现极大力测量的技术也在逐步完善中。

3.3 多维力

随着工业技术的迅猛发展,多维力的测量需求不断增长,多维力可由力矢量在空间三维坐标系中分解的多分量力模型来描述,某组合式多维力传感器测量原理如图6所示。需要有针对性地设计多维力传感器及其配套的测量系统,同时测量各方向力并准确解算、可靠校准,更要主动解决多维力测量中不可避免的耦合问题,保证测量结果的准确性符合要求。



注:坐标原点 O 位于小圆柱上表面的圆心。

图6 某组合式多维力测量平台结构示意图

Fig.6 Schematic diagram of a modular multi-dimensional force measurement platform structure

3.4 动态力

传统动态力传感器容易受电磁干扰、高温、强辐射等极端环境因素影响,故不能可靠地用于

电力、冶金、航空航天、深海等极端场景。近年来光纤动态力测量技术取得了快速的发展。该技术以光纤布拉格光栅及干涉式光纤传感原理为基础,把动态力引起的形变转化为光纤光信号的波长、相位变化,由此实现动态力的高精度测量,其最突出、最本质的优势是抗电磁干扰、耐高温、耐腐蚀、可远距离传输信号,满足极端环境下动态力测量的严苛需求。光纤动态力传感器还可方便地实现远距离组网测量,非常适用于大型结构(桥梁、大坝)的多点动态力同步监测。

3.5 智能化设计

智能化设计是高端测力仪器发展的必然趋势,智能化设计有利于实现测力仪器自动校准、自动诊断、自动补偿等功能。自动校准功能可使测力仪器在使用中自动、精确地调整测量参数,从而保证测量结果的可靠性;自动诊断功能对仪器工作状态进行实时监测,及时、准确地发现故障并排除,显著提高仪器可靠性;自动补偿功能对测量过程中各种环境因素及干扰因素自动进行补偿,直接降低测量误差。智能化设计还有利于测力仪器与各类设备、系统互联互通,实现数据共享、远程监控,切实提高生产效率和管理水平^[28-30]。

3.6 工程化设计

工程化设计对高端测力仪器的实际应用有直接、重大的意义,而环境适应性又是工程化设计中必须充分考虑的重要因素。实际工业生产及科研试验现场中使用的测力仪器大都处在高温、低温、高湿度、强振动、强电磁干扰等复杂环境中,因此,需对高端测力仪器进行专门的工程化设计,以提高其恶劣环境适应能力,可采取以下措施:用耐高温、耐低温的材料制造传感器及仪器外壳,对测量电路做专门的抗干扰设计,并加入隔热、保温、防潮的多种防护手段,由此保证仪器在现

源链一般自然、合理地由“标准装置-标准传感器-工作传感器-现场测力系统”逐级构成,其根本目标是让各级传递都满足可计量、可验证的原则。

对传统静态测力仪器而言,标准装置常以力标准机或标准测力仪为基础,通过控制加载实现力值复现,将标准值与实测值进行比较,完成被测仪器的校准。常见静态力校准设备包含静重式、叠加式、杠杆式和液压式等类型,其中,静重式校准设备具有精度高、稳定性好等优点,常用作基准;叠加式校准设备具有成本较低、量程范围广的特点,近年来越来越多地被计量、测试机构用于测力仪的校准。

对动态力的校准与溯源是高端测力体系中的难点与前沿技术。当前用于动态力校准的装置主要基于正弦力、脉冲力以及阶跃力等动态载荷发生原理,通过可控动态力发生系统生成参考输入,并比较和评估测力仪器的动态响应特性^[31-32]。

多维力(多分量力)的标定方法体现为载荷空间覆盖、解耦模型可辨识和误差传播链可控等方面。多维力传感器不可避免地存在维间耦合,标定的目标是在合理的加载组合下识别耦合关系,形成解耦矩阵或非线性解耦模型,并评估其不确定度。当前用于开展多分量力校准的装置主要基于静重式和参考式原理设计,其主要特征包括可覆盖实际应用的载荷数量和空间,并可通过矩阵条件数及参数可辨识性进行结果分析评估。在校准装置层面,现阶段德国物理技术研究院(Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB)、中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所(简称“航空工业计量所”)等机构的多分量力校准装置主要基于参考式原理,具有量程范围广、组合形式丰富等特点。图7为航空工业计量所研制的DFLL-250型叠加式多分量力校准装置,其关键结构包括13个单轴向加载器,通过在三维坐标系中进行合理布局并进行结构解耦设计和耦合加载来实现多维力的校准功能。静重式多分量力校准装置具有力源精度高、稳定性好以及小量程多维力友好等特点,图8为航空工业计量所研制的静重式多分量力校准装置加载力布局图^[33],其功能通过12组力值砝码及其加载机构组合实现。

4 力值溯源技术发展

高端测力仪器的竞争优势终归要体现为“可溯源的量值与可靠的不确定度评价”,因为这是科学测量最基本、最严格的要求,也直接关系重大装备试验结果能否复现、能否得到认可。力值溯

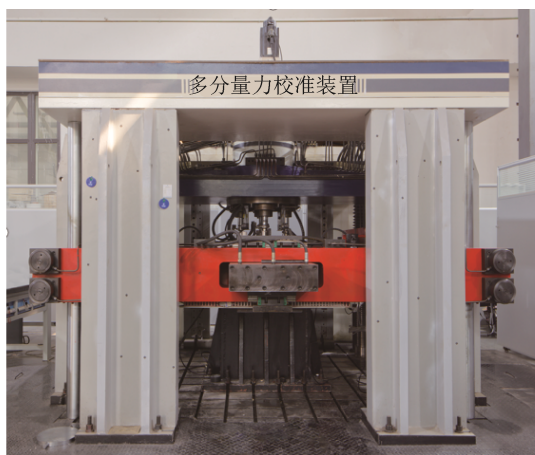


图7 叠加式多分量力校准装置

Fig.7 Superposition type multi-component force calibration device

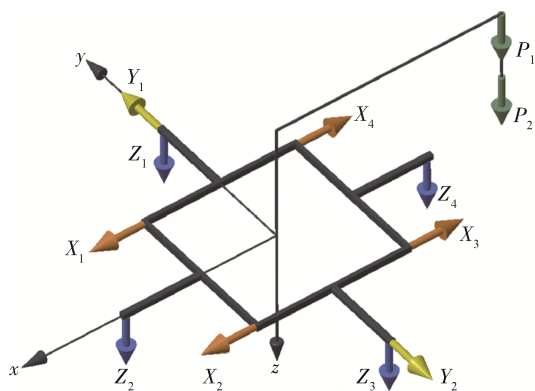


图8 静重式多分量力校准装置加载力布局

Fig.8 Loading force layout of the deadweight type multi-component force calibration device

对校准结果进行合理的不确定度评定也是一个重要环节。复杂测力结果的不确定度一般由以下因素引入的不确定度分量组成：标准装置、重复性及分辨力、非线性及迟滞、回零及蠕变、温度影响、偏心及对中误差、信号链噪声及漂移、(对多维/动态情况)耦合误差及频响误差。

计量及溯源的标准、方法不是高端测力的外部约束，而是其内生能力的有机组成部分，因此将高端测力仪器从实验室迁移到工程现场能力时，必然要以溯源链完整性、静态及动态校准方法的可执行性、多维标定的复现性以及系统级不确定度评定的合理性多种要素作为支撑。溯源用标准平台日趋数字化、测量手段日趋智能化，标准及方法学正在向软件化、流程化方向演化，这些与时俱

进的发展方向将有力推动高端测力体系性能提升。

5 结论

高端测力仪器技术在当前战略新兴产业快速升级的背景下具有重要的发展意义和广阔的应用前景。本文论述了传统测力技术的原理与特点，分析了新型测力仪器应用需求，探讨了高端测力技术在高精度、极值力检测、多维力测量、智能化以及工程化等方面的发展前景。高端测力仪器技术正处于不断发展和创新的阶段，虽然目前已经取得了一定成果，但该技术仍然面临许多挑战和问题，如跨学科协同创新的难度较大、全链条技术攻坚的任务艰巨等。未来，随着科技的不断进步，新材料、新工艺和新技术将不断应用于高端测力仪器的研发中，进一步提高其性能和质量。同时，跨学科协同创新和全链条技术攻坚将得到更加深入的推进，有望实现高端测力仪器技术的产业化和大规模应用。此外，高端测力仪器技术还将与物联网、大数据、人工智能等新兴技术深度融合，实现更加智能化、自动化和高效化的力值测量和应用，为国家重大装备制造业高质量发展提供更加强有力的支撑。

参考文献

- [1] 戴安舒, 宋瑶, 严建海, 等. 数智化转型驱动的运维管理新范式: 构建高端装备制造业的“技术-功能-组织”协同框架[J]. 工业工程, 2025, 28(6): 1-13, 29.
DAI A S, SONG Y, YAN J H, et al. A new paradigm of operations and maintenance management driven by digital and intelligent transformation: building a "technology - function - organization" collaborative framework for high-end equipment manufacturing[J]. Industrial Engineering, 2025, 28(6): 1-13, 29. (in Chinese)
- [2] 姜爱华, 程鼎, 薛晓渝. 物位测量仪表现状及发展趋势综述[J]. 化学工程与装备, 2018(5): 275-276.
JIANG A H, CHENG N, XUE X Y. Review on current situation and development trend of level measuring instruments [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2018 (5): 275-276. (in Chinese)
- [3] 陈潘布衣, 颜幸尧, 邓俊文, 等. 应变片力传感器对端子压接状态感知效果的研究[J]. 传感技术学报, 2025, 38(11): 1931-1939.
CHEN P B Y, YAN X Y, DENG J W, et al. Study on the

- sensing effect of strain gauge force sensor for terminal crimping state[J]. *Journal of Sensors Technology*, 2025, 38(11): 1931–1939. (in Chinese)
- [4] 吴振兴, 罗检民, 贺华, 等. 关于提高电阻应变式称重传感器综合性能的探讨[J]. *衡器*, 2024, 53(8): 13–16.
- WU Z X, LUO J M, HE H, et al. Discussion on improving the comprehensive performance of resistance strain gauge load cells[J]. *Weighing Apparatus*, 2024, 53(8): 13–16. (in Chinese)
- [5] 秦海峰, 刘思博, 刘永录. 力传感器在发动机推力试验工况下的技术特性分析[J]. *测控技术*, 2021, 40(2): 74–79.
- QIN H F, LIU S B, LIU Y L. Technical characteristic analysis of force transducer under engine thrust experiment conditions[J]. *Measurement & Control Technology*, 2021, 40(2): 74–79. (in Chinese)
- [6] 王玲璐, 陈柯行, 赵印明. 电阻应变式传感器数字化补偿技术[J]. *计测技术*, 2016, 36(增刊1): 196–200.
- WANG L L, CHEN K X, ZHAO Y M. Digital compensation technology for resistance strain gauge sensors[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2016, 36 (supplement 1): 196–200. (in Chinese)
- [7] GORBUSHIN A R, BOLSHAKOVA A A. Unsteady axial force measurement by the strain gauge balance[J]. *Measurement*, 2020, 152: 107381.
- [8] SÜLEYMAN Y, FARUK Ü. A dynamometer design for measurement the cutting forces on turning[J]. *Measurement*, 2006, 39(1): 80–89.
- [9] KUANG Y H, HU D, SUN P H, et al. High-sensitivity flexible strain sensor with the stress line extrusion effect[J]. *Measurement*, 2026, 269: 120763.
- [10] 李峥, 任宗金, 林山, 等. 压电式推力矢量测试系统传感器设计[J]. *航空发动机*, 2025, 51(6): 169–173.
- LI Z, REN Z J, LIN S, et al. Design of piezoelectric sensor-based vectored thrust measurement system[J]. *Aeroengine*, 2025, 51(6): 169–173. (in Chinese)
- [11] GORBUSHIN A R, KOZIK A E, ANOKHINA E N. Non-stationary load measurement using six-component strain-gauge balances[J]. *Measurement*, 2024, 226. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.114176.
- [12] PRATO A, FACELLO A, GERMAK A, et al. A comparative study of static, continuous, and dynamic calibration methods for high-precision low-force strain-gauge transducers[J]. *Measurement*, 2026, 258: 119568.
- [13] 蔡菁, 李程. 力加载点对压电式多分量测力平台测量结果的影响[J]. *计测技术*, 2017, 37(3): 56–58, 38.
- CAI J, LI C. The effect of the force load position to the measurement results of piezoelectric multi-component force measuring platform[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2017, 37(3): 56–58, 38. (in Chinese)
- [14] ZHANG J, ZHAO Y Q, LIU J L, et al. Research on piezoelectric force measurement methods with asymmetrical sensor arrangement[J]. *Measurement*, 2026, 266: 120432.
- [15] LI Y J, WANG G C, ZHANG J, et al. Dynamic characteristics of piezoelectric six-dimensional heavy force/moment sensor for large-load robotic manipulator[J]. *Measurement*, 2012, 45(5): 1114–1125.
- [16] YUAN M Y, MAI S L, WANG J, et al. Design of a distributed testing system for high-dynamic vector thrust of aero-engines based on piezoelectric force-sensitive units[J]. *Measurement*, 2026, 266: 120436.
- [17] 王磊, 秦海峰, 刘思博. 扭矩传感器的温度敏感性测试技术[J]. *中国测试*, 2022, 48(增刊1): 228–232.
- WANG L, QIN H F, LIU S B. Testing technology for temperature sensitivity of torque sensors[J]. *China Measurement & Test*, 2022, 48 (supplement 1): 228–232. (in Chinese)
- [18] YOU Y Q, TONG D, YANG W J, et al. Opto-mechano transduction in bioinspired cilia: a fiber-coupled micro-force sensor with tunable sensitivity[J]. *Optical Fiber Technology*, 2025, 95: 104398.
- [19] 刘思博, 秦海峰, 马鹏谋. 多分量力传感器线性解耦算法研究[J]. *计量与测试技术*, 2025, 51(2): 88–91.
- LIU S B, QIN H F, MA P M. Research on linear decoupling algorithm of multi-component force sensor[J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2025, 51(2): 88–91. (in Chinese)
- [20] RIZAL M, USMAN H, MUBARAK A Z, et al. Development of mini 4-axis dynamometer using semiconductor strain sensors for cutting force and torque measurement in micro/meso-scale machining[J]. *Measurement*, 2026, 259: 119620.
- [21] 罗晓平, 武博, 倪博. 空间对接机构缓冲试验台多分量力在线校准的实现[J]. *计测技术*, 2016, 36(增刊1): 109–113, 117.
- LUO X P, WU B, NI B. Implementation of on-line calibration for multi-component force of buffer test bed for space docking mechanism[J]. *Metrology & Measurement*

- Technology, 2016, 36(supplement 1): 109-113, 117. (in Chinese)
- [22] 华长春, 穆殿瑞, 陈健楠, 等. 无人机引导下多消防机器人协同作业[J]. 自动化学报, 2026, 52(2): 267-283.
- HUA C C, MU D R, CHEN J N, et al. Collaborative operation of multiple firefighting robots guided by UAVs[J]. Acta Automatica Sinica, 2026, 52(2): 267-283. (in Chinese)
- [23] 江文松, 王妍, 罗哉, 等. 六自由度机器人末端位姿校准误差链路分析[J]. 计测技术, 2025, 45(2): 48-55.
- JIANG W S, WANG Y, LUO Z, et al. Analysis of calibration error propagation in the kinematic chain of a six-DOF robotic manipulator's end-effector pose[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(2): 48-55. (in Chinese)
- [24] 梁志国, 王宁, 王吉鹏, 等. 动态力传感器计量校准规范述评[J]. 计量学报, 2025, 46(11): 1640-1647.
- LIANG Z G, WANG N, WANG J P, et al. Review on the metrological specifications for dynamic force transducers[J]. Acta Metrologica Sinica, 2025, 46(11): 1640-1647. (in Chinese)
- [25] 张学涛, 马腾达, 石旭东. 面向飞机运维的测试与计量数字化构想[J]. 计测技术, 2024, 44(3): 118-124.
- ZHANG X T, MA T D, SHI X D. Digitalization of testing and metrology for aircraft operation and maintenance[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(3): 118-124. (in Chinese)
- [26] ZHENG Y C, ZHU J, HE J T, et al. A low-cost, portable, and highly environmentally adaptive impact force sensor based on mechanoluminescence intensity ratio[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2026, 399: 117375.
- [27] ZANG H Y, WANG R X, LAI J H, et al. A temperature-compensated contact force sensor with adaptive capability for multi-medium micro manipulation[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2026, 397: 117179.
- [28] 欧阳壮, 王荣峰, 文浩. 浅谈建立数字化计量技术供给溯源体系[J]. 中国计量, 2024(10): 58-61.
- OUYANG Z, WANG R F, WEN H. Brief discussion on establishing a traceability system for digital metrology technology supply[J]. China Metrology, 2024(10): 58-61. (in Chinese)
- [29] 王德玲. 计量技术助力制造业智能化升级浅析[J]. 计测技术, 2018, 38(增刊1): 201-203.
- WANG D L. Brief analysis on metrology technology assisting intelligent upgrading of manufacturing industry[J]. Metrology & Measurement Technology, 2018, 38(supplement 1): 201-203. (in Chinese)
- [30] 林恬, 张学涛, 马骊群. 基于数字化设计制造协同的飞机计量保障体系架构探讨[J]. 计测技术, 2018, 38(2): 59-63.
- LIN T, ZHANG X T, MA L Q. Discussion on aircraft metrology assurance guarantee system based on digital design and manufacturing collaboration[J]. Metrology & Measurement Technology, 2018, 38(2): 59-63. (in Chinese)
- [31] 江文松, 吴娅辉, 李新良, 等. 动态力计量建模与分析方法综述[J]. 计测技术, 2022, 42(2): 2-12.
- JIANG W S, WU Y H, LI X L, et al. Review of modeling and analysis methods on traceable measurement of dynamic force[J]. Metrology & Measurement Technology, 2022, 42(2): 2-12. (in Chinese)
- [32] 李博, 杨军, 石玉松, 等. 不同校准装置对引压管腔动态特性校准[J]. 航空动力学报, 2019, 34(12): 2559-2568.
- LI B, YANG J, SHI Y S, et al. Calibration of dynamic characteristics of pressure tube cavity by different calibration devices[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(12): 2559-2568. (in Chinese)
- [33] 秦海峰. 多分量力的测试与校准技术介绍[J]. 计测技术, 2015, 35(3): 14-18, 23.
- QIN H F. The structure design for multi-component loading calibration device[J]. Metrology & Measurement Technology, 2015, 35(3): 14-18, 23. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨 李成成)



第一/通信作者: 秦海峰(1975—), 女, 正高级工程师, 主要研究方向为力值、扭矩、多分量力专业的静态/动态/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。主持承担十余项科研项目, 获奖多项。负责制/修订国家标准规范等二十余项, 发表相关科技论文数十篇。