张心明 李俊烨/著

结构特征量静态参数测试技术

Static Parameters of Structural Characteristic Quantity Measurement Technology

科学出版社

结构特征量静态参数测试技术

张心明　李俊烨　著

科学出版社

北　京

内 容 简 介

本书系统地介绍了结构特征量静态参数测试技术的原理与方法，主要包括质心测试技术、质偏测试技术、极转动惯量测试技术、赤道转动惯量测试技术，深入地阐述了动不平衡测试技术及多参数复摆法测试技术，并针对每一种测试技术进行了全面的描述，涉及研究现状、原理、精度分析等。在此基础上，还对静态参数测试系统的设备主体结构、控制系统、监视系统及软件系统进行了说明。最后，根据已有研究成果，阐述了静态结构特征量参数的标定与检测技术。全书理论简练，内容全面，结构完整，实用性强。

本书适用于高等院校和科研单位的研究生、高年级本科生和工程技术人员，也可供航空航天、汽车、武器装备、电机等领域从事测试技术的研究人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

结构特征量静态参数测试技术/张心明，李俊烨著.—北京：科学出版社，2016. 3

ISBN 978-7-03-047707-1

Ⅰ. ①结… Ⅱ. ①张… ②李… Ⅲ. ①参数测试－测试技术 Ⅳ. ①TM934

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 049425 号

责任编辑：张 震 姜 红/ 责任校对：李 影

责任印制：张 伟 / 封面设计：无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

http://www.sciencep.com

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 3 月第 一 版 开本：720×1000 1/16

2016 年 3 月第一次印刷 印张：13 1/2

字数：265 000

定价：80.00 元

（如有印装质量问题，我社负责调换）

前　言

随着科学技术的不断发展，测试技术已广泛应用于航空航天、机械、能源、仪器仪表、武器与军事、汽车与船舶及核技术等领域。结构特征量静态参数的测试在航空航天、汽车及武器等领域有着大量的应用需求，这些静态参数对产品的使用性能及品质有着决定性的影响，因此对结构特征量静态参数的测试技术的研究是迫切的。

结构特征量静态参数的测试一般包括质心测试、质偏测试、极转动惯量测试、赤道转动惯量测试及动不平衡度的测试。例如，在航天工业，人造卫星、运载火箭、战术导弹等就需要检测质量、质心、质偏、转动惯量等，以确定该产品是否符合设计要求，以及如何对该产品加以修正；在航空工业，需要检测飞机的质心、转动惯量，从而了解飞机的机动性能；在汽车工业，各种车辆以及转动部件必须检测其转动惯量和质偏值，以通过修正质偏来提高车辆的性能和寿命；在武器工业，反坦克导弹、巡航导弹、火箭弹以及各种炮弹都需要检测极转动惯量、赤道转动惯量、质量、质心、质偏等静态参数，从而确定这些静态参数对弹药的初始扰动、弹道轨迹和命中率的影响；坦克炮弹需要检测极转动惯量和赤道转动惯量，以确定其响应能力；在电机工业中，各种转子必须检测质量、质偏，通过修正来减少振动。此外，只要涉及转动动力学问题的产品都要检测其相应的静态参数，而对这些静态参数的测试所采用的测试技术将直接影响测量精度。

本书的著者长期在教学及科研领域从事精密与超精密加工、检测及装备技术的研究，自 2000 年起开始对结构特征量测试技术开展研究，提出了利用复摆法测量质心、质偏和转动惯量的测试技术并成功研制了相关测试仪器，部分研究成果已得到实际应用。几年来，著者所在课题组开展了多个相关领域的研究与开发，发表论文逾 60 篇，申报发明专利及实用新型专利逾 50 项，研制的相关设备已交付使用单位。

本书由张心明研究员撰写，李俊烨副教授统稿，主要参编人员有王长兴教授、尚春民研究员和徐鑫莉讲师。全书共分 8 章，分别对结构特征量静态参数测试技术的国内外研究现状、质心测试技术、质偏测试技术、转动惯量测试技术、动不平衡度测试技术、多参数复摆法测试技术、结构特征量静态参数测试系统、结构

特征量静态参数的标定与检验技术进行了阐述。本书的内容多来自著者及研究生的研究成果，在写作过程中得到了研究生的热情支持和建议，在此表示感谢！书中难免有不当之处，敬请读者批评指正。

张心明

2015 年 9 月于长春

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

目　　录

前言
第 1 章　绪论 …… 1
参考文献 …… 4
第 2 章　质心测试技术 …… 6
2.1　质心测试技术研究现状 …… 6
2.2　常见质心测量方法述评 …… 7
2.3　质心轴向位置 x 的测量及误差分析 …… 14
参考文献 …… 16
第 3 章　质偏测试技术 …… 18
3.1　质偏测试技术研究现状 …… 18
3.2　质偏测量方法研究及精度分析 …… 22
3.2.1　质偏静态测量法及精度分析 …… 22
3.2.2　质偏准静态测量法及精度分析 …… 51
3.2.3　质偏动态测量法及精度分析 …… 60
3.2.4　质偏方位角和曲率半径测量方案 …… 65
参考文献 …… 70
第 4 章　转动惯量测试技术 …… 72
4.1　转动惯量测试技术研究现状 …… 72
4.2　转动惯量测量方法 …… 74
4.2.1　扭振法测量转动惯量 …… 75
4.2.2　三线摆法测量转动惯量 …… 85
4.2.3　摆动法测量转动惯量 …… 87
4.3　阻尼对转动惯量测试的精度分析 …… 97
4.3.1　空气阻尼对转动惯量测量影响分析 …… 97
4.3.2　空气阻尼与摩擦阻尼同时存在时对转动惯量测量精度的影响 …… 100
4.3.3　空气阻尼和轴承阻尼对测量精度的影响 …… 104
4.3.4　空气阻尼对扭振的周期和振幅的影响 …… 109
4.3.5　库仑阻尼和空气阻尼同时存在对测量的影响 …… 113
4.4　$d=0$ 的复摆测量仪的测量方法和精度分析 …… 121
4.4.1　$d=0$ 复摆测量仪结构及自身参数确定 …… 121
4.4.2　考虑产品质偏后复摆法测量极转动惯量的方程及其解 …… 124

4.4.3　考虑产品质偏后复摆法测量赤道转动惯量的方程及其解 …… 128
4.4.4　$d=0$ 复摆的非线性解 …… 130
参考文献 …… 131
第 5 章　动不平衡度测试技术 …… 135
5.1　动不平衡测试技术研究现状 …… 135
5.2　动不平衡度的测量方法与计算公式 …… 137
5.3　动不平衡度 β 测量的误差变化规律 …… 140
5.4　动不平衡度静态测量方法及实验结果 …… 141
5.4.1　动不平衡度静态测量方法 …… 141
5.4.2　惯性积 J_{xy}、J_{xz} 的测量法 …… 141
5.4.3　用惯性积计算动不平衡度的精确计算公式 …… 142
参考文献 …… 144
第 6 章　多参数复摆法测试技术 …… 148
6.1　复摆的结构形式及自身参数的确定 …… 148
6.1.1　单摆与复摆 …… 148
6.1.2　复摆的托架结构形式 …… 149
6.1.3　复摆自身参数确定 …… 150
6.2　复摆多参数测量及误差分析 …… 152
6.2.1　质偏和转动惯量的测量与计算 …… 152
6.2.2　质偏和转动惯量的不确定度分析 …… 153
6.2.3　被测物体轴线与摆动转轴重合时复摆测量转动惯量 …… 155
6.2.4　被测物体倾斜时转动惯量的测量与计算 …… 157
6.2.5　被测物体轴线与摆动转轴重合时复摆法测量转动惯量误差分析 …… 159
6.3　惯性积的测量 …… 160
6.4　转动惯量和惯性积测量结果的讨论 …… 161
6.5　复摆的非线性方程求解及误差分析 …… 162
6.5.1　复摆的非线性方程及其解 …… 162
6.5.2　非线性解的误差分析 …… 164
参考文献 …… 164
第 7 章　结构特征量静态参数测试系统 …… 166
7.1　测试设备主体结构功能 …… 166
7.1.1　质心、质偏测试设备 …… 166
7.1.2　转动惯量测试设备 …… 168
7.2　测试设备控制系统 …… 172
7.2.1　质量、质心、质偏测量系统 …… 172

7.2.2　转动惯量测量系统……174
7.2.3　数据采集处理系统……176
7.3　测试设备监视系统……176
7.4　结构特征量测试设备软件系统……177
7.4.1　质量测量系统应用软件……178
7.4.2　前端数据采集处理系统应用软件……179
7.4.3　数据采集处理系统应用软件……180
7.4.4　软件具体实现……181
参考文献……187
第8章　结构特征量静态参数的标定与检测技术……189
8.1　结构特征量测试设备的标定、检验及测量方法……189
8.1.1　设备准确性标定与检验方法……189
8.1.2　质心质偏测试设备的标定与校准……192
8.1.3　转动惯量测试设备的标定与检验……198
8.2　主要技术参数标定方法……200
8.2.1　质心质偏测试主要技术参数标定……200
8.2.2　转动惯量测试主要技术参数标定……203
参考文献……206

第1章 绪 论

在军工及民用领域许多关键产品及零部件需要进行结构特征量静态参数的测试。静态参数主要包括质量、质心、质偏、转动惯量、动不平衡度等参数，这些参数决定了产品的性能及质量。对结构特征量静态参数的测试可满足国家对此类高性能产品的需求，确保产品性能的稳定可靠[1]。

在许多关系到国家发展的重要领域，如航空航天、精密仪器仪表、弹药武器、特种车辆、电机等，其产品的设计、生产、实验、验收等过程中经常需要测量产品或零部件的静态参数，这关系到产品设计的成败和质量[2-5]。对于弹药，其静态参数的测试是出厂前必须进行的一项检测。静态参数（质量、质心、质偏、转动惯量、动不平衡等）将会直接影响弹药的稳定性、操纵性，同时也会对飞行过程中的弹道轨迹、制导误差、圆概率偏差、单发弹的杀伤概率、杀伤区域等产生影响，还会影响到弹药的可靠性，因此在弹药的使用前一定要对箭弹、弹丸的静态参数进行测量[6-11]。弹药静态参数测量也是常规兵器试验的重要环节，它为弹药产品试验结果的分析研究及有关计算提供原始数据，并为评定产品的性能和可靠性提供依据。

目前国内结构特征量的测试精度有了一定的提升，其中，质心的测试精度可达 0.1mm，质偏的测试精度可达 0.01mm，转动惯量的测试精度可达 0.2%，动不平衡度的测试精度可达 0.05g·mm；被测产品的长度可达 8000mm，直径可达 600mm，质量可达 3000kg。

弹药特征的几何量和物理量统称弹药的静态参数，其中，质心的位置会对弹体的飞行速度和飞行的稳定性产生巨大的影响，并直接影响弹药的目标命中率；质偏的位置对弹体飞行的轨道有着决定性的作用，同样影响着弹体对目标物体的命中率；转动惯量对弹药的起始扰动和飞行稳定性等有较大的影响。弹药功能的成功实现，不仅需要发动机提供轨道修正，或改变姿态控制所需的动力，而且还需要能实现这种精确控制的高质量的弹药。弹药的动不平衡度是制约发射质量的一个动态特征参数，其测量方法也直接影响测量精度。为实现弹药精确的姿态控制，需要有精确的参数测量作为弹药质量的可靠保证[12-18]。因此，精确测量这些参数有着十分重要的意义。

弹药静态参数测试技术是关系弹药生产质量的重大关键性技术，随着生产与科学技术的迅速发展，对测试的精度和效率提出了越来越高的要求。弹药弹体几何尺寸的测试属于几何量测试，它是指对零部件和整机制造完工前后进行测量和

验收的过程。几何量测试的目的有两个。一是对加工后的零件做出合格性判断。只要测量得到的几何参数落在了公差范围之内，就判为合格，否则判为不合格。二是通过测试，寻找产生不合格品的根源，以便调整加工工艺系统，或采取有效措施，防止不合格品的产生，对保证加工质量起到主动控制的作用，尤其在自动化生产线上，更具有重要的意义[17,19]。

目前质心的经典测试方法主要有机械重定位法、不平衡力矩法、多支点称量法、动平衡法和多点测量法；质偏的测试方法主要有静态测量法、准静态测量法和动态测量法，其中静态测量法还分为称重测量法和力矩平衡法；转动惯量测试方法主要有扭摆法、三线摆法和复摆法。

转动惯量描述的是物体相对于旋转轴的转动惯性，转动惯量对军事领域尤为重要[20]，其值不仅与物体的几何形状和质量分布有关，而且还与旋转轴的位置等因素有关。对于形状简单的刚体，用计算方法可以得出；但对于形状复杂的或质量分布不均匀的只能用实验的方法测出来，可根据测量物体的不同、应用场合的不同而选择相应的测量方法进行测试[21-24]。弹体转动惯量是影响弹体稳定性的重要参数，弹体的操纵性也会受到转动惯量的影响，转动惯量还影响弹体飞行过程中的弹道轨迹，同时，转动惯量对弹体的制导误差、圆概率偏差等相关性能也将产生影响，因此对弹体的转动惯量的测量是必要的。转动惯量不仅是研究飞行体所需的物理量，还是控制飞行体轨道及飞行姿态的重要影响因素。转动惯量是各类弹箭弹头等中远程飞行武器及航天设备所需的重要测量参数。对于弹体而言，弹体设计的成败和质量的高低会受转动惯量影响，飞行弹体的稳定性也受到转动惯量的影响，与预定轨道的符合精度也受到转动惯量的影响，而且对于转动件而言，会影响到转动件的使用寿命，进而影响整个机构的使用期限[25,26]，所以对转动惯量的研究是十分有必要的。因此，转动惯量在科学实验方面有着重要的应用，在工业领域如科学实验、工程技术、仪表等也有着重要的应用。

结构特征量静态参数测试技术不仅涉及以上领域，在汽车、机械工业、航空航天等领域也有着重要应用。近年来汽车技术的发展，对转动惯量有了具体的要求，对相应惯性特性参数测量也有了相应的要求。为了合理地布置发动机总成，降低发动机因转动件转动惯量的误差引起的振动进而引起整车振动的影响[27]，要求合理地匹配发动机的悬置系统；这就要求对发动机每个转动件的惯量参数进行测量，所以不同型号的发动机动力总成惯性参数测量设备也相继研制出来。在机械系统中，机构的零部件和系统性能都会受到机构中转动件转动惯量的影响，转动件的工作性能和特性可以通过测量转动件的转动惯量进行确定。被测物体质量越大，对测量设备、工件的装卡等的要求也就越高，各个影响因素对其影响也就越大，所以其转动惯量测量精度很低。分析和研究现阶段航天器转动惯量的测量方法与技术以及弹体转动惯量的测量方法与技术，对该技术水平的提高是非常重

要的。转动惯量的测量精度的提高，可以提高武器系统的可靠性，提高其精确打击目标的能力，对精确地控制飞行物体的运行轨迹有着现实的意义[11,23,28,29]。

需进一步指出的是，转动惯量的三种主要测试方法中，扭摆法由于具有使用的金属扭杆扭精度高、机构简单、容易操作、实验数据不确定度小等优点，被广泛用于转动惯量测量。复摆法所用设备简单、制造容易，工程中应用居多，这种方法的测量范围宽，适用面广，成本低，由测量结果可知复摆法是可以测量弹体的转动惯量的，且精度较高，复摆法的机械结构比扭摆法的结构要简单得多，而且操作更容易、安全系数大、节省测量时间，且设备费用低，有很好的发展前景。三线摆法是测量小物体时常用的方法，具有操作简单、准确度高的特点，但测量大质量的物体时不安全，测量小型弹箭时，其精确很高，优于1%，测量大型弹箭等产品时可用不对称三线摆，其测量准确度优于4%。转动惯量的测量方法除了上面这些，还有其他的一些方法，如落体法、单线摆法等。落体法也有其特定的用途，如测量机构中旋转体的转动惯量，落体法还可用于测量大质量、大冲量的物体，精度能达到3%，但测量大质量的物体时，吊装难度系数大、安全系数低。为分析影响转动惯量测试精度的关键因素，著者把阻尼对转动惯量测试精度影响进行了阐述，分析论证了空气阻尼、摩擦阻尼、轴承阻尼和库仑阻尼对转动惯量测试精度的影响，对复摆测法测量转动惯量也进行了着重介绍。

动不平衡度对弹药的空中飞行姿态、运动轨迹和命中率有重要的影响，常常采用动平衡机对其进行测量，国内动平衡理论及设备的研究与国外相比差距较大。动平衡机标定和测试中误差较难估算，导致最终的计算结果精度难以精准确定，测试过程较烦琐，需要配置针对不同弹药的各种装夹部件和拖动设备等，为此著者提出了动不平衡度测试的新方法，其核心是采用转动惯量测试设备代替动平衡机来完成测试的复摆法，不仅可以减少设备投资，简化测试程序，节省人力，还可以获得可信度较高的测试精度。

为实现结构特征量静态参数的测试需要有相关的测试系统，测试系统一般需要有相关测试设备、控制分系统、监视分系统和测试软件等。为实现结构特征量静态参数的精确测试，在进行质心、质偏、转动惯量等静态参数测试前需对测试设备进行必要的标定、检验及校准，包括质心、质偏、L值、L_1值、Le值、传感器参数K值等。具体测试系统的简介及相关设备及参数的标定、检验和校准方法在本书第8章中论述。

综上所述，大力发展相关产品结构特征量静态参数测试技术的研究具有重要的工程应用价值，对提高相关领域产品工业设计、实验和生产能力的总体水平、缩短产品的研制和批量生产周期、降低实验成本、保障批量生产产品的性能与质量有着十分重要的意义，因此开展此类研究是十分必要的。

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

参 考 文 献

[1] 夏燕兰. 弹箭力学参数综合测试系统的设计. 南京：南京理工大学硕士学位论文，2006.

[2] 薄悦. 提高质心测量灵敏度的关键技术研究. 郑州：郑州机械研究院硕士学位论文，2004.

[3] 姚杰. 重型卡车车架连接方式的静态特性分析. 大连：大连理工大学硕士学位论文，2005.

[4] 张磊乐. 细长杆件质量特性参数测量技术及设备研究. 郑州：郑州机械研究院硕士学位论文，2008.

[5] 谢兰英. 航弹摆差与几何量检测系统研究. 长春：长春理工大学硕士学位论文，2006.

[6] 原亚旭，包建东. 小口径弹丸静态参数测量方法研究. 电子测量技术，2012，35（33）：38-41.

[7] 吴祥海. 漫谈自动武器测试技术. 测试技术学报，1997，11（3）：35-42.

[8] 费业泰. 误差理论与数据处理. 第 5 版. 北京：机械工业出版社，2000.

[9] 丁雪松. 某型号舱段转动惯量测量系统的研制. 哈尔滨：哈尔滨工业大学硕士学位论文，2007.

[10] 刘建营. 固体火箭发动机质心测量技术评论. 固体火箭技术，1991，4：77-85.

[11] 于明进，程勇，吴波，等. 试验确定发动机转动惯量的一种新方法. 农业机械学报，2005，36（6）：34-37.

[12] Foiles W C，Allaire P E，Gunter E J. Rotor balancing. Shock and Vibration，1998，05：5-6.

[13] 王文周，于治会. 小型弹体转动惯量的测定. 宇航计测技术，2002，22（2）：40-50.

[14] Zhang X M，Wang L M，Liu J H. Study on relation between dynamic imbalance degree and product of inertia. Journal of China Ordnance，2008，4（1）：65-68.

[15] Bishop R E D，Gladwell G M L. The vibration and balancing of an unbalanced flexible rotor. Journal of Mechanical Engineering Science，1959，1（1）：66-77.

[16] Lyons D P. Obtaining optimal results with filar pendulums for moment of inertia-measurements. SAWE Paper，No. 3237，2002.

[17] 侯文. 大型弹箭及航天器转动惯量测量方法研究. 中北大学学报(自然科学版)，2008，29（6）：505-509.

[18] 李慧鹏，唐文彦，张春富，等. 导弹转动惯量测试系统及误差分析. 兵工学报，2007，28（2）：206-208.

[19] 张立明. 质量质心及转动惯量一体化测试系统设计. 哈尔滨：哈尔滨工业大学硕士学位论文，2013.

[20] 李化仪，张迎春，李葆华，等. 大弹体转动惯量测量仪的设计. 武器装备自动化，2003，22（5）：4-6.

[21] 李化义，张迎春，李葆华，等. 高精度转动惯量测量仪分析与设计. 计量学报，2004，25（3）：250-253.

[22] 李彤华，朱占刚，尚春民，等. 扭振法测弹体转动惯量的误差分析. 长春理工大学学报（自然科学版），2007，30（3）：63-66.

[23] 王超. 大尺寸飞行器质量特性测量关键技术研究. 哈尔滨：哈尔滨工业大学硕士学位论文，2014.

[24] 冯艳秋. 转动惯量测试系统设计及精度分析. 长春：长春理工大学硕士学位论文，2009.

[25] 黎磊，徐宝连，朱蕴璞，等. 弹箭力学参数综合测试系统设计. 弹箭与制导学报，2010，30（2）：233-236.

[26] 贝超. KKV 质量、质心、转动惯量一体化测量方法研究. 现代防御技术，2000，6：12-17.

[27] 张祖国，邵兴文，张雄华. 测量转动惯量的新装置. 应用技术，2007，36（1）：89-91.

[28] 牟向东. 轿车整车转动惯性测试方法与误差分析. 机械科学与技术，2002，6：896-898.

[29] 赵岩. 扭摆法转动惯量测量中的非线性问题研究. 哈尔滨：哈尔滨工业大学博士学位论文，2013.

第 2 章　质心测试技术

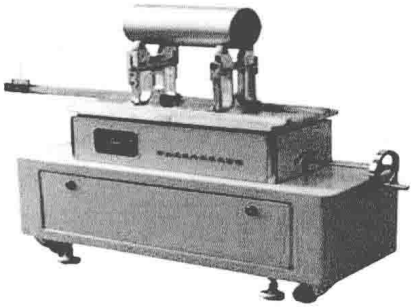
质量中心简称质心，是指物质系统上被认为质量集中于此的一个假想点。质心位置的测量是进行其他特性参数测量的基础，质心对飞行器产品的空间运动姿态、运动轨迹和精度有直接的影响[1]。质心位置在工程上有重要的意义，例如，要使起重机保持稳定，其质心位置应满足一定条件；飞机、轮船、车辆等的运动稳定性也与质心位置密切相关；此外，若高速转动飞轮的质心不在转动轴线上，则会引起剧烈振动而影响机器的正常工作和寿命。

质心位置（包括质心轴向位置 x 和质偏 e）是具有结构特征量产品的主要特征参数之一[2,3]，无论是生产厂家还是使用单位，对每个具有结构特征量的产品质心位置都必须进行严格的、精确的测试并予以标注。

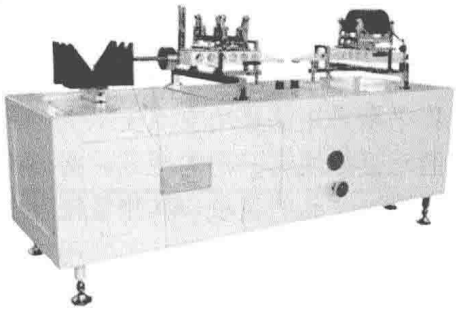
2.1　质心测试技术研究现状

西北工业大学的质量特性测量技术研究中心的一个 MPTA 系列的产品如图 2.1（a）所示。质量、质心测量台主要由控制系统、测量台和标校仪组成。测控系统包括工控机、打印机、测控箱等。测控系统安装在同一个控制柜中，其特点是支架上的滚动轮采用高精度的滚动轴承，确保滚动平稳和滚动力矩小，稳定性好；电机升降均安装有限位机构，提高了安全性；测量系统对调平要求不高，只需要在设备安装时进行一次调平工序，以后测量时不需要进行调平操作；试件可以安装在支架的任意位置，支架可以在测量平台内任意调整，满足不同测量试件的要求，通用性强。在合理选择传感器的精度和布置情况下，对于中小型弹药，一般其纵向测量误差小于 0.1mm，径向测量误差小于 0.05mm，通常情况下可以满足弹药测量精度的要求，因此得到了广泛的应用。

南京理工航兵静态参数测试中心所研制的 PGE03 型小型导弹引信质量、质心、质偏综合测试仪采用的是三点法测量原理，其质量测量精度为 0.1g，纵向测量精度小于 0.1mm，径向测量误差小于 0.01mm，如图 2.1（b）所示。



（a）



（b）

图 2.1　质量、质心、质偏测量台

2.2　常见质心测量方法述评

从物理学或力学角度研究物体的质心位置测量方法，按其测量原理来分类，大体可分为 4 种，分别是机械重定位法、不平衡力矩法、多支点称量法、动平衡法[4-9]。

1. 机械重定位法（悬挂法、刀口仪）

机械重定位法是用一个支点（刀口、悬挂点）支承全部产品的重量，并不断移动产品进行调整，使其对于支点达到平衡状态，此时的支承点即为产品的质心位置。

悬挂法的根据是，通过悬挂点的垂线必然经过自由悬挂体的质心。用不等长的柔性绳索连接在实测物的两端，然后自由悬挂在吊钩上。两端绳索的长度差决定悬挂角（即倾斜角）。一般情况下，悬挂角 45°为效果最佳。吊钩中心线必然通过物体的质心。

交换悬挂方向，重复上述操作，就可确定水平方向的通过质心的线。在标记板上的相交两线就构成物体的质心的投影平面。预先在物体上标记一个参照点，用经纬仪或铅垂定位通过参考点的参照线。在标记板上划出相交的水平与铅垂两条线后，再测量相交点两条参考线之间的距离。再对侧向重复上述程序，即可测定质心的横向位置。

此方法虽然不需要花较多的硬件成本，但是调整费时，特别是对较大的产品很难调整，且测量精度与操作者的技巧有关[10,11]，因此该方法目前已不常用。

2. 不平衡力矩法

不平衡力矩法是用支点支承大部分产品的重量，如果产品的质心相对于通过支点的垂直轴线有一定的距离，必然产生一个力矩，其值等于产品的质心距支点的距离乘以产品的重量。其测量精度主要和力矩值测量精度有关[12]，还和支承处的摩擦力和加工精度有关，通常用机械刀口支承，其质心测量误差小于 0.2mm。

安装被测物体，使其质量由无摩擦的支点支撑。如果物体的质心相对于通过支点的垂直线有一个距离，则必然产生一个力矩，其值等于物体的重量乘以该距离，这是一种依靠重力的静态测量技术，如图 2.2 所示。

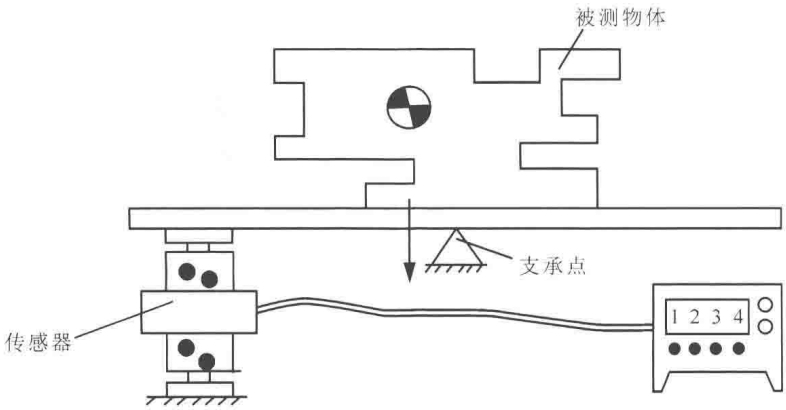


图 2.2　测量质心的不平衡力矩法示意图

图 2.3 显示出一个自由支点稳定型方法。在这个仪器中，用较小的配重水平调节，直到系统的质心在支点上方。图 2.4 所示的装置中增加了螺旋阻塞，以防止支架倾斜过量。

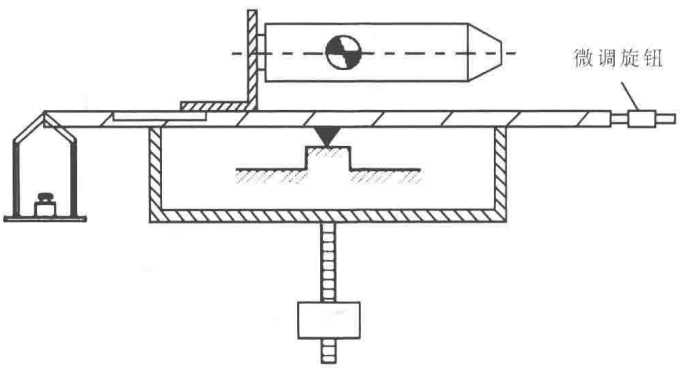


图 2.3　自由支点稳定型方法示意图

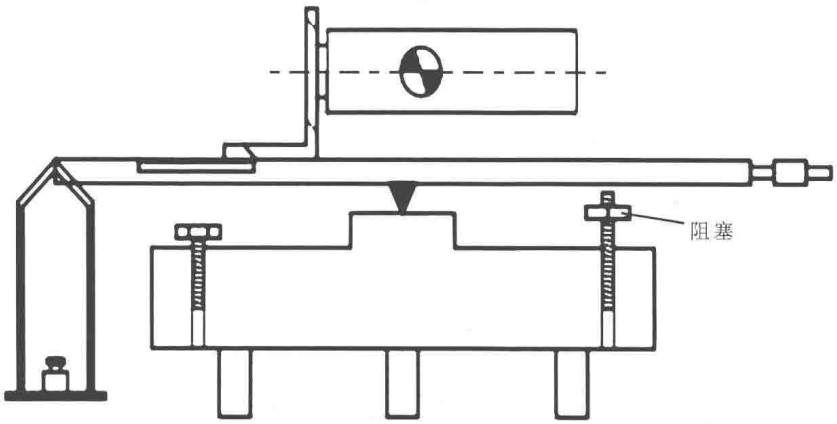


图 2.4　具有螺旋阻塞的不平衡力矩法示意图

3. 多支点称量法

多支点称量法是用三个或者更多的称重传感器共同支承测量台，质心通过各传感器相对基准中心的位置求矩计算。其结构简单，可以同时测量出产品的重量，也可以测量较大的试件[13,14]。西北工业大学的质量特性测量技术研究中心在测量质量、质心时采用了多支点测量方法，在同一测量台上同时测量出质量、质心。安装不同的夹具，可以测量各种不规则物体（如导弹发射架、飞机黑匣、电子组件等）；在测量平台上安装 V 形的支架，可以测量各种回转体（如导弹）。被测物体下面放置三个或三个以上的秤或测力传感器，由三点的支撑力及其位置可计算出物体的质心位置。这也是一种利用重力的静态测量技术，如图 2.5 所示。

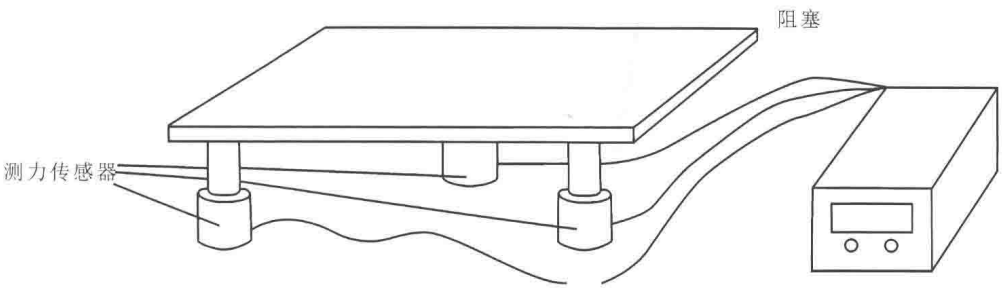


图 2.5　测量质心的多点称量法示意图

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com