

前言

理论力学实验是理论力学教学的重要组成部分。国防科技大学理论力学实验室主要承担“理论力学”“动力学与控制”“基础力学创新实践”等力学基础课程实验、全国周培源大学生力学竞赛、大学生科技创新项目等教学与实践任务。作者在近些年的理论力学实验课程建设和教学实践中通过不断探索,构建了由基础验证型、综合设计型、虚拟仿真型和创新研究型实验构成的进阶式理论力学实验教学内容体系,本教材即是对这些实验教学内容的系统总结。

本教材共分5章,第1章为绪论,系统介绍了理论力学实验教学内容体系、教学要求、数据处理方法及常用的实验测量装置;第2章为基础实验,包括转动惯量测定、静动滑动摩擦系数测定、陀螺仪运动演示、机械振动、转子动平衡等经典的演示型和验证型实验,满足对理论力学课程教学的实验验证需求;第3章为综合实验,包括自主研发的平面桁架静力学和刚体质量特性综合测量实验,满足对学生利用理论力学静力学和刚体动力学知识进行设计、实践和计算验证的综合实践分析能力培养的需求;第4章为虚拟仿真实验,包括自主研发的运动学测量与分析 and 刚体动力学与控制分析虚拟仿真实验,满足对学生基于复杂运动场景的质点和刚体运动合成、刚体动力学与控制分析验证能力培养的需求;第5章为创新实验,包括以理论力学知识体系为基础的全国周培源大学生力学竞赛团体赛和全国大学生实践创新竞赛项目,以及教学团队设计的第十五届全国周培源大学生力学竞赛“理论设计与操作”团体赛的两道竞赛试题,满足项目式教学方法对学生创新实践能力培养的需求。

本教材的出版得到了国防科技大学空天科学学院和理论力学教学团队的大力支持。限于作者的水平,教材中难免有疏漏和不当之处,敬请各位读者批评指正。

作者

2025年12月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 理论力学实验的内容体系	1
1.1.1 力学中的实验	1
1.1.2 理论力学实验	3
1.2 理论力学实验的教学要求	6
1.2.1 实验教学目的	6
1.2.2 实验教学程序	6
1.2.3 实验教学制度	7
1.3 实验数据处理方法	7
1.3.1 测量误差	8
1.3.2 不确定度	8
1.3.3 有效数字	9
1.4 实验测量装置	10
1.4.1 惯性测量装置	10
1.4.2 无线电测量装置	13
1.4.3 光学测量装置	14
第 2 章 基础实验	15
2.1 转动惯量测定实验	15
2.2 静动滑动摩擦系数测定实验	25
2.3 陀螺仪运动演示实验	29
2.4 机械振动实验	37
2.4.1 认识机械振动	37
2.4.2 利用“李萨如图”测量系统的固有频率	40
2.4.3 单自由度系统自由衰减振动固有频率和阻尼比的测量	50
2.4.4 拍振实验	53
2.5 转子动平衡实验	56

2.5.1	转子临界转速测试	57
2.5.2	转子结构变化对临界转速的影响	62
2.5.3	轴承座和底板的振动测试	63
2.5.4	滑动轴承油膜涡动和油膜振荡	65
2.5.5	柔性转子振型测试	67
2.5.6	转子启停机三维谱阵图及色谱图分析	69
2.5.7	临界转速伯德图	72
2.5.8	三点试重法转子动平衡	73
第3章	综合实验	77
3.1	平面桁架静力学综合实验	77
3.2	刚体质量特性综合测量实验	86
第4章	虚拟仿真实验	100
4.1	运动学原理测量与分析虚拟仿真实验	100
4.2	刚体动力学与控制分析虚拟仿真实验	127
第5章	创新实验	144
5.1	大学生力学竞赛选题	144
5.1.1	地图形状中心	145
5.1.2	纸桥过车	146
5.1.3	图形变换	147
5.1.4	看谁测得准	148
5.1.5	低频振动悬吊装置设计制作	151
5.1.6	张拉整体结构设计制作	153
5.2	大学生实践创新竞赛项目	156
5.2.1	无人机实践创新	156
5.2.2	小火箭实践创新	158
5.2.3	立方星实践创新	159
5.2.4	机器人创新实践	161
参考文献		164

第1章

绪 论

1.1 理论力学实验的内容体系

1.1.1 力学中的实验

力学是关于物质宏观运动规律的科学，人类运用力学知识进行生产实践可追溯到数千年以前，中国的寺庙和桥梁、埃及的金字塔、古罗马的万神庙等一些世界著名的古代建筑都体现了当时人们对力学知识的运用。但是，直到16世纪以后力学才逐渐形成理论和一门科学，成为许多工程与技术学科的基础。无论是在第一次、第二次工业革命中还是在从古至今的战争中，力学都发挥着重要作用。从弓箭、枪炮到导弹、原子弹，从航空、航天、航海、交通运输到水利、电力、机械、建筑都离不开力学，正如马克思所说：“力学是大工业的真正科学基础。”可以说，没有力学作为基础与支撑就没有近代工业，就没有众多的现代工程技术。

实验是科学研究的重要方法。17世纪的近代科学革命，就是从系统的实验观察开始的。爱因斯坦在1953年说过：“西方科学的发展是以两个伟大成就为基础的，那就是：希腊哲学家发明的形式逻辑体系(在欧几里得几何学得以体现)，以及(在文艺复兴时期)发现的通过系统性实验可以找出(事物间)因果关系的可能性。”爱因斯坦的话很精辟地概括了实验观察是一种最基本的科学研究方法。

实验在整个力学的发展与应用中发挥了重要的作用。力学理论不是凭空而来，它源于实验并在生产实践中得到发展。德国力学大师普朗特这样论述力学：“通过实验寻求物体运动本质，再导出数学方程得出定量结果，对此再用实验辨其真伪。”^[1]我国著名力学家谈镐生将“观察、实验、理论”归纳为科学方法三部曲。我国古代对力学有丰富的实践研究，春秋战国时期，《墨经》中记载了丰富的物理知识，涉及杠杆、斜面等简单机械原理；《考工记》对车辆制造、弓箭制作等工艺做了详细记载，体现了对力学原理的运用；东汉时期，张衡发明了地动仪，利用惯性原理检测地震方向，展现对物体运动特性的深刻理解；宋代沈括在《梦溪笔谈》中对小孔成像、凹面镜成像等现

象的研究, 涉及光学与力学交叉领域; 明代宋应星在《天工开物》中记载的生产技术成就中包含了大量对力学知识的应用。力学的知识虽然在古代就被人们在生产实践中运用, 但是由于缺乏科学实验, 这种知识一直没能上升为理论。达·芬奇是真正利用科学方法进行力学实验的第一人, 他做的铁丝拉伸实验比伽利略早一百年, 他定量地测出材料的强度极限, 同时还做过柱的压缩和梁的弯曲实验, 但是这些实验他只在笔记本中记录却并未公开发表。伽利略被公认为是力学研究的开创者, 他从实验出发上升到理论并且发表了论文和专著, 其中最有名的是比萨斜塔实验。当时流传着希腊学者亚里士多德的学说, 亚里士多德认为物体越重落地的速度越快。伽利略敢于挑战权威, 他在意大利比萨斜塔的塔顶抛出了质量不一的两个球, 结果这两个球同时落地。这一实验证明了物体的下落速度与物体的质量无关, 否定了古希腊以来人们关于物体质量大小决定下降速度快慢的认识, 推翻了亚里士多德的学说, 为近代力学的发展奠定了基础。在此基础上伽利略发表了《论重力》的论文, 论述了重力加速度为一常数, 末速与时间成正比, 落距与时间的平方成比例这一科学结论。1594年, 伽利略做了拉伸实验, 得出内力与截面面积成反比而与长度无关的结论, 写出《关于两门新科学的对话》的专著。伽利略有句名言: “测量一切可测之物, 并把不可测的变为可测”(Measure what is measurable, and make measurable what is not so)。英国人胡克做了一系列不同长度的金属丝拉伸实验, 测取其伸长度与力的关系, 得出伸长度与金属丝的长度有关。他还做了许多弹簧实验, 得出力与变形成正比的关系^[2]。1678年他为此写出有关论文, 后人称这种正比关系为胡克定律。荷兰人惠更斯通过研究单摆振动的等时性, 发明了世界上第一架摆钟, 并首次提出“运动的量”应包含方向的概念, 为现代动量守恒定律奠定了理论基础。法国人马里奥特做了木材、玻璃和纸张的拉伸实验, 实验表明胡克定律在一定载荷的范围内正确, 只是可以用来近似地描述一些材料在一定载荷范围内的力学特性。18世纪, 库仑做了砂石的强度实验、剪切实验和扭转实验。19世纪, 泊松发现了横向变形系数, 圣维南建立了圣维南原理, 还有柯西、欧拉、纳维等人的研究工作, 这些研究为后来的强度理论与线弹性理论的建立与完善奠定了实验和理论基础。20世纪, 实验测量的精度不断提高, 所研究的材料也越来越多, 人们开始关注对材料非线性力学性质的实验和理论研究。

21世纪以来, 新技术、新材料、信息和智能产业、国防与军工技术、环保与减灾等领域对力学提出了新的需求, 力学将在更广泛的领域与其他学科结合, 力学的研究对象也更复杂, 这将使实验在力学发展中的重要作用比以往更加突出, 其基础性、交叉性、技术性的学科特点更加明显。因为无论是微小尺度还是复杂过程的力学现象研究都需要力学实验作为基础, 据此建立合理的力学模型, 然后再进行计算机数值模拟, 实现这一过程既需要充分的实验研究工作, 又需要发展新的实验技术, 研制新的实验仪器, 设计新的实验方法。

1.1.2 理论力学实验

理论力学课程是一门历史悠久、体系严谨、具有基础性作用的重要课程,是工科许多专业的专业技术基础课。理论力学课程所教授的各种基础力学理论,是现代工程技术研究所必备的基础理论体系之一^[3-9]。理论力学的教学内容以牛顿运动定律和分析力学体系为基础,构建了研究物体机械运动规律的完整架构,古今中外的许多发明和重大工程都应用了理论力学知识。当前,各高校理论力学教学均侧重于理论知识,在实验方面多有欠缺。然而,实验在理论力学教学中具有其他教学形式不可替代的作用,一些重要的理论力学参数,例如:非均质物体的重心位置和惯矩惯积系数、动静摩擦系数、碰撞恢复系数、振动系统的固有频率等,虽然目前也可以通过仿真模拟的方法进行数值计算,但是都需要通过实验进行验证,并且动手实验可加深学生对理论力学基本概念的认识。

理论力学实验作为理论力学教学的重要组成部分,通过实验教学环节的实施,可以开阔学生的眼界,加强理解理论力学的工程概念,了解这门课程与工程实际的紧密关系,培养锻炼学生从实际工程和科学研究中抽取具体问题,学以致用和解决实际工程问题的能力。生产实践中大量与理论力学相关的产品和科研成果可作为理论力学实验教学的内容,通过实物展示、实验演示以及学生亲自观察、分析和动手实践的方式,进一步加深学生对理论力学知识体系的真实感受和深刻理解。

目前,国内成熟的理论力学实验大部分为演示型和验证型实验,教学目的也主要是加深对理论课程中一些基本原理的认识^[10-16]。作者在近些年理论力学实验教学和探索的不断探索中,认识到仅靠演示验证型实验还不足以启发学生主动思维和创新意识,不能有效地培养学生的工程意识及实践能力。因此,结合理论力学实验教学改革和实验室条件建设,理论力学实验也逐渐由演示验证型向综合设计型、创新实践型等扩展^[17-25]。经过近些年来的课程建设和教学实践,构建了进阶式理论力学实验教学内容体系。

1. 基础实验

基础实验主要为演示型和验证型实验,在实验教学中主要包括:刚体转动惯量测定实验、静动滑动摩擦系数测定实验、陀螺仪演示实验、机械振动实验等。理论力学基础实验教学环境如图 1.1 所示。

2. 综合实验

综合实验主要分为综合型和设计型实验。综合型实验是指在掌握一定的基础理论知识和基本操作技能的基础上,运用相关知识和实验方法对运动学或动力学参数进行综合测量的一种实验。而设计型实验是指给定实验要求和实验器材,由学生独立或分组自行设计实验方案并实现验证的一种实验。在实验教学中主要包括:刚体质量特性

综合测量实验、平面桁架静力学测试实验等。理论力学综合实验教学环境如图 1.2 所示。



图 1.1 理论力学基础实验教学环境



图 1.2 理论力学综合实验教学环境

3. 虚拟仿真实验

虚拟仿真实验是通过计算机模拟和数字化技术，将实验过程呈现在仿真环境中，使学生能够在仿真场景中进行实验操作的一种基于虚拟现实技术的教学手段。这种实验方式旨在克服传统实验教学中的一些限制，如设备和时间空间受限、安全隐患等，同时提供真实感的实验体验。通过选择科研项目中适合进行教学转化的内容，研制了虚拟仿真实验教学项目，主要教学内容包括：运动学原理测量与分析虚拟仿真实验、刚体动力学与控制虚拟仿真实验、空间多刚体动力学与控制虚拟仿真实验等，其中运

运动学原理测量与分析虚拟仿真实验的软件界面如图 1.3 所示。



图 1.3 运动学原理测量与分析虚拟仿真实验软件界面

4. 创新研究型实验

创新实验主要通过项目式教学开展，项目式教学是一种将理论教学与实际生活场景紧密结合的教学方法，它通过引导学生深入项目过程中进行体验、探索和创新，从而获得更为全面和详细的知识，并形成某项专业的技能。这种学习模式可以提高学生的动手能力和团队合作精神，激发他们对科学的浓厚兴趣。作者在实验教学中选取全国周培源大学生力学竞赛团体操作赛和大学生航空航天类创新实践竞赛选题，以项目式教学方法对学生进行创新实践能力培养。理论力学创新实验教学环境如图 1.4 所示。



图 1.4 理论力学创新实验教学环境

综合以上实验教学内容，理论力学实验课程包含的教学内容体系如图 1.5 所示。

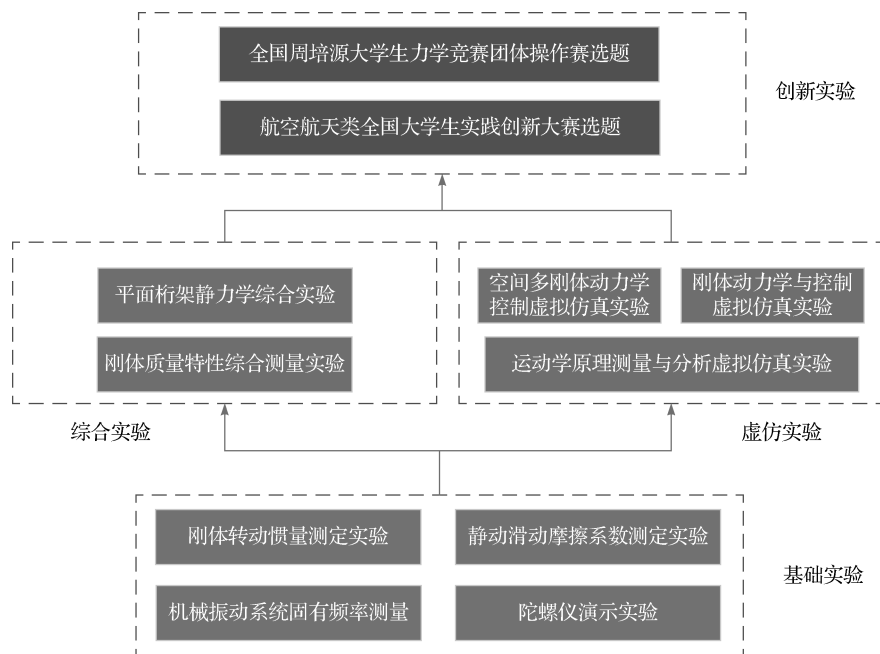


图 1.5 理论力学实验教学内容体系

1.2 理论力学实验的教学要求

1.2.1 实验教学目的

理论力学是航空航天、机械工程、工程力学、土木工程等工科专业的重要技术基础课程，是后续材料力学、飞行力学、流体力学、机械振动等一系列课程的理论基础。理论力学实验教学的目的是加强学员对理论力学概念和原理的直观认识，培养学员应用理论力学方法分析和解决实际问题的能力，包括对实际问题中力学概念的认知能力，对实际问题的抽象简化及力学建模能力，实验的动手操作能力以及实验的数据分析和处理能力。

1.2.2 实验教学程序

理论力学实验课程是一门基础力学实验课，也是学生在教师指导下独立进行操作和测试的一项实践性活动。为更好地遵循教学规律，循环渐进地实现理论力学实验课程的教学目的，将本课程的基本程序分为以下三个主要环节。

1. 实验前的准备工作

实验课课前应按照要求预习有关章节的内容,理解本次实验的目的和原理,完成预习报告。做好实验设备及测量工具的准备工作,熟悉操作规程。正式实验之前,准备工作需要经过任课老师检查。

2. 实验操作并测量数据

实验操作前,认真听取任课老师讲解,注意实验的要求、重点、难点及注意事项。按照实验步骤认真操作实验设备、观察实验现象并测量实验数据。遇到问题要认真思考和分析,实验设备故障要在老师指导下进行排除,确保实验安全。实验完毕后,检查实验数据是否齐全,并清理设备归还原处。

3. 撰写实验报告

实验报告是实验工作成绩的总结,应在充分理解实验原理、分析实验现象和数据的基础上进行撰写。实验报告要独立完成,应当数据完整、曲线和图表规范齐全,计算结果正确,并有分析和讨论。

1.2.3 实验教学制度

为培养学生良好的实验素质和严谨的科学态度,保证实验顺利进行和进一步提高教学质量,实验室制定以下实验制度:

- (1) 实验前必须认真预习,写出预习报告,经老师同意方可进行实验。
- (2) 上课必须严格按照实验要求和实验设备操作规范,认真进行实验,并做好相关实验记录。
- (3) 爱护仪器设备,不得随意违规操作,发生故障应当立即报告,不得自行处理。
- (4) 遵守课堂纪律,保持安静的实验环境。
- (5) 做完实验,经老师审查测量数据并签字后,学生应将仪器设备整理还原,将桌面和凳子收拾整齐方可离开实验室。
- (6) 按时完成实验报告,并在实验后一周内交给实验室。

1.3 实验数据处理方法

随着科学技术的飞速发展,实验数据处理与误差分析在理论和实际应用上都得到极大的提高和发展,从事各种实验研究的科技和工程技术人员都需要学习和掌握误差理论与数据处理方面的知识。只要有实验测量,就必然会产生测量误差。因此,对误差的特点、性质及分类要有一定的了解,并找出科学合理的办法加以消除。

1.3.1 测量误差

测量误差是测量过程中所得测量值与真实量值之间的差异。这种差异可能源于多种因素,包括仪器的不精确、测量方法的不完善及环境条件的变化等。了解误差的来源和特性,对于提高测量准确性和保证数据质量至关重要,如图 1.6 所示。

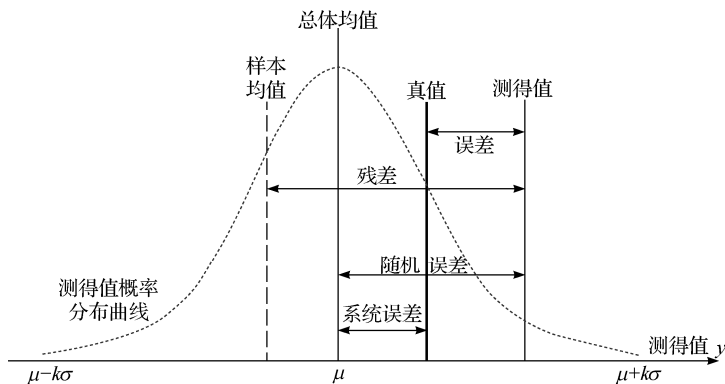


图 1.6 测量误差

测量误差可进一步细分为系统测量误差和随机测量误差。系统测量误差,简称系统误差,是指在多次重复测量中保持恒定或按可预见方式变化的误差分量。其参考量值通常为真值,或是测量标准测得值(其测量不确定度可忽略),或是约定的量值。系统误差可通过修正进行补偿。造成系统误差的原因可能包括:测量方法不够完善、仪器和试剂质量不佳、操作过程中的失误及环境条件的变化等。

随机测量误差,简称随机误差,是在重复测量中以不可预见方式变化的误差分量。其参考量值是对同一被测量进行无数次重复测量后得到的平均值。随机误差主要由实验人员操作不规范、测量范围不足以及实验条件的变化等因素造成。

值得注意的是,测量误差与测量中出现的错误或过失是两个不同的概念。测量误差专指在测量过程中不可避免按一定规律变化的差异,而错误或过失则是指操作人员的主观失误或疏忽。

1.3.2 不确定度

测量不确定度,简称不确定度,是与测量结果紧密相连的一个关键参数。它用来表征测量值的分散性,是一个非负的参数。由于测量误差的不可避免性,测量值的准确程度总是存在一定的不确定性。

测量不确定度通常由多个分量综合而成,如图 1.7 所示。这些分量中,一部分可以通过对一系列测量值的统计分布进行分析,采用测量不确定度的 A 类评定(即由随机效应导致)来进行评估,这种评定方法的结果通常用标准差来表示。而另一部分分量,则可以根据经验或其他相关信息所构建的概率密度函数,通过测量不确定度的 B 类评

定(即由系统效应引发)来进行评估, 同样, 这种评定也采用标准偏差进行量化。

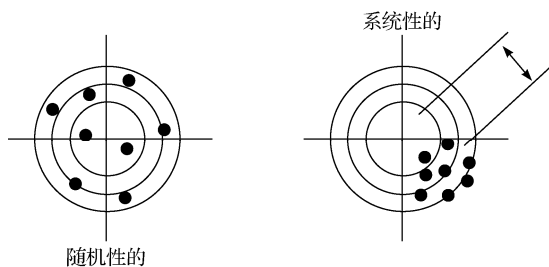


图 1.7 测量不确定度

1.3.3 有效数字

在实验的数据处理中, 为简化运算过程, 在进行计算之前, 需要对各直接测量量的有效数字进行适当的取舍和数值的进舍修约, 这就必须建立并遵守一定的数值进舍规则。除了常用的四舍五入规则之外, 在理论力学实验中经常使用的还有以下两种修约规则。

1. 四舍六入五留双修约规则

以要求测量或计算结果保留四位有效数字为例, 规则如下。

(1) 第五位有效数字小于或等于 4 时, 直接舍去尾数。例如:

$$16.0329 \rightarrow 16.03$$

(2) 第五位有效数字是大于或等于 6 时, 将尾数舍去并向前进一位。例如:

$$20.0282 \rightarrow 20.03$$

(3) 第五位有效数字是 5, 且后面数字均是 0 时, 应看 5 前面一位数字的奇偶性。奇数时, 向前进一位; 偶数时, 舍去尾数。例如:

$$12.1750 \rightarrow 12.18 \quad 12.26500 \rightarrow 12.26 \quad 32.0950 \rightarrow 32.10$$

(4) 第五位有效数字是 5, 且后面有非 0 数字时, 无论 5 前面一位数字的奇偶性, 也不管 5 后面, 非 0 的数字在哪一位, 都向前进一位。例如:

$$12.07501 \rightarrow 12.08$$

2. 0.5 修约规则

以要求测量或计算结果保留三位有效数字为例, 规则如下。

(1) 首位有效数字是 1 时, 第三位有效数字按照第四位数字四舍五入方式修约。例如:

$$102.4 \rightarrow 102$$

$$102.5 \rightarrow 103$$

(2) 首位有效数字是 2~9 时, 第三位有效数字修约成 0 或 5。例如:

$$502.4 \rightarrow 500$$

$$502.5 \rightarrow 505$$

$$507.4 \rightarrow 505$$

$$507.5 \rightarrow 510$$

总结如下:

$$2.4 \rightarrow 0 \quad 2.5 \rightarrow 5 \quad 7.4 \rightarrow 5 \quad 7.5 \rightarrow 10$$

修约之后用科学记数法可表示为

$$0.005024 \rightarrow 5.00 \times 10^{-3}$$

1.4 实验测量装置

实验中的测量装置通常是通过对物体运动状态的量化分析, 获取速度、加速度、位移、角度等关键参数的技术工具。随着航空航天技术、工业自动化、竞技体育科学化、医疗康复精准化等需求的提升, 这类设备在运动控制、智能制造、生物医学等领域价值日益凸显。以航空航天领域为例, 运动测量装置的作用至关重要, 直接决定飞行试验数据的准确性与试验结论的可靠性。这类测量设备涵盖惯性测量装置、激光跟踪仪、高速摄像系统等, 能够实时捕获飞行器的姿态、速度、位置等关键运动参数, 为装备研发与改进提供核心数据支撑。测量是实验设计与分析的核心环节, 以下介绍几种工程中常用的运动测量装置。

1.4.1 惯性测量装置

1. 加速度计

加速度计是测量加速度的仪表, 液浮式加速度计如图 1.8 所示。当物体具有很大的加速度时, 物体及其所载的仪器设备和其他无相对加速度的物体均受到能产生同样大的加速度的惯性力, 即受到动载荷, 欲知动载荷就要测出加速度。其次, 要知道各瞬时飞机、火箭和舰艇所在的空间位置, 可通过陀螺平台惯性导航系统连续地测出其加速度, 然后经过积分运算得到速度分量, 再次积分得到一个方向的位置坐标信号, 而三个坐标方向的仪器测量结果就综合得出运动曲线并给出每瞬时航行器所在的空间位置。再如某些控制系统中, 常需要加速度信号作为产生控制作用所需信息的一部分,