

绪 论

0.1 机械基础实验技术课程的性质与任务

机械基础实验技术是一门旨在培养机械类学生具有初步的实验设计能力、基本参数测定与相关测试仪器操作能力和实验分析能力的技术基础课程。

科学实验作为人类三大实践活动之一,是人们正确认识客观世界、评价理论科学性与真理性的标准,同时对提高人类的生产力水平也起到巨大的推动作用。作为培养未来的机械工程师和创新型人才的高等机械工程教育,使学生掌握科学的实验方法和基本的实验技能是十分重要的。

长期以来,在高等工程教育中偏重基础理论体系的改革而忽视了学生实验技能的培养,使得许多工科毕业生不具备简单的、具有一定精度的工程实验的能力。特别是在当今计算机与信息技术高速发展的社会环境中,学生对实际动手操作和真实实现的工程实验渐渐失去兴趣,而对计算机辅助实验或“虚拟现实”实验非常热衷。当被问及“实验数据是否可靠”时,学生往往很茫然,因为在他们的头脑中会有一种观念:“从计算机中输出的测定结果难道还会不准确吗?”虽然数字和信息技术的引入使实验技术从规模上、精度上和速度上都有了质的飞跃,但是实验设计方法和实验基本技能的培养仍然是培养学生进行科学实验的基础。本课程的主要任务是通过一定的科学实验方法的理论学习和机械基础实验的实际训练,做到以下几点:

(1) 使学生了解机械基础实验在机械设计中的重要作用,了解其中的科学理论方法,培养学生科学、系统的工程实验观念。

(2) 掌握机械基础实验中常用评价参数的内容、测定方法及相关仪器设备的选择和使用方法。

(3) 初步具备根据工程实际情况正确设计实验、进行实验及分析实验结果的能力。

(4) 培养具备在实验过程中独立发现问题、解决问题、动手实践和分析研究的能力。

(5) 了解现代工程实验方法和理论的新发展及其在机械基础实验领域中的应用。

0.2 机械基础实验技术课程的内容

随着科学技术的迅猛发展和现代化工业生产的发展需要,工程实验的规模越来越大,不仅需要占用越来越多的实验仪器,还需要有多方面的资金、人力、物力的支持,特别是多种学科的支持,工程实验已经成为一个系统工程,而其理论和方法的研究亦已经发展成为一门独立的学科。工程实验理论指导人们在实验之初对实验进行规划、选择足够精密的测试仪器和适当的方法、确定必要的实验次数等,以保证实验条件的一致性、实验数据的可靠性和实验结果的科学性。工程实验理论作为一门技术基础理论涉及许多行业的多种科学实验的共性问题,需要以数学(特别是概率论、数理统计和随机过程理论)、物理学、计量学等作为它的理论基础,因此其知识范围是极其广泛和复杂的。在本书中,仅就机械基础实验中涉及的一些工程实验理论作为各类实验的理论基础给读者作简单介绍,以期使读者在学习过程中加深对实验方法科学性和系统性的认识,并能够在实验技能的学习中运用这些基本理论,即理论联系实际。另外,机械基础实验的内容广义上应该是涵盖了工程材料、金属工艺、机械设计、机械制造、互换性与公差测量等学科,但本书仅以机械设计和机械制造中涉及的一些机械基本性能测试实验技术为载体,介绍机械基础实验中所用到的基本参数及其测量手段和方法,从而达到培养学生基本实验技能的目的。这是因为机械产品的设计和制造是为了满足人们的消费需要而进行的,而所设计和制造的产品是否满足消费者对其功能的需求,最终是要依据一些基本机械性能指标(例如,产品的运动和动力特性、噪声、振动、工作效率、工作精度、摩擦磨损特性等)来评价的。了解和掌握这些基本参数的测量与评价实验方法,对学生今后从事机械设计和科学研究工作具有指导意义。

0.3 机械基础实验技术课程的学习方法

机械基础实验不是简单地观察一些物理现象或验证一些基本理论。通过对本课程的学习,学生应该体会到科学实验的意义,学会科学实验所需的基本技能。因此,在学习本课程的过程中要注意以下几个问题。

1. 正确的科学理论指导是完成一个成功实验的基本保证

实验是根据一定目的,运用必要的手段,在人为控制的条件下,观察、研究事物本质和规律的一种实践活动。实验本身的目的性、被控制性决定了人们在实验开始时必须先进行设计。而实验设计需要工程设计人员不仅掌握本学科领域的专业理论知识,还要熟悉相关的测试技术,了解能够完成一定精度要求的可选测试仪器设备及其使用方法以及数

据处理的相关理论等。例如,在实验设计初始阶段,工程设计人员就必须根据所要达到的实验目的确定要测试哪些物理量,这些被测物理量将在后续的实验分析中起到什么作用。简而言之,即在设计实验时要明确被测定的物理参数是什么和为什么要测量这些参数。因此,工程设计人员只有具备一定的专业知识,才能选准影响实验结果的相关物理量,减少实验的盲目性。又如,在获得大量实验数据后,要正确处理实验结果,也需要具备实验数据处理的相关数学知识,以得到真实可信的实验分析结果。

2. 正确认识实验结果对科学理论的作用,培养勤于思考、严谨求实的科学作风

理论分析和实验研究是科学研究工作的两个重要手段。科学家们总是试图解释或预测基于已经存在的理论建立起来的分析模型所做实验而获得的结果,一旦发现实验结果与现存的理论不符时,他们首先会将怀疑的目光投向实验结果,然后是相关的理论。有些情况下,在确认了实验结果的合理性后,会根据获得的新实验结果修正一些理论。无论怎样,理论分析的结果只有通过相应的实验验证才能最终成为科学理论。在工程实验中,工程设计人员同样需要通过一定数量的实验才能验证其根据相关理论设计的产品是否满足工作要求。

在本课程的学习中,既有一些基本的验证型实验,也有提高实验能力的综合型和研究型实验。无论哪种实验获得的实验结果,我们都应该本着实事求是的态度,对获得的“不理想数据”从实验物理模型、测试手段或方法、数据采集和处理等方面认真地进行反思和探究,直到找到问题的症结所在。要敢于问为什么。在实验技术课程的学习中要杜绝篡改和杜撰实验结果的行为,应该使自己增加探求未知的欲望,培养善于思考、严谨求实的科学作风。

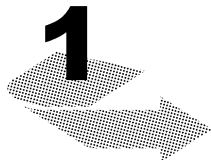
3. 循序渐进,注重实验基本理论和基本技能的学习和训练

机械基础实验技术课程一般是机械类学生第一次接触到较系统和较专业的基本实验技能训练,它与前序理论基础课程中一些偏重验证型的实验相比较,在被测物理量的复杂程度、随机特性、实验规模、数据处理的方法等方面都有较大的差别,因此学习上有一个逐渐适应的过程,要注意基本实验技能的培养。它包括:①对给定的验证型实验方案原理的理解,进而对综合型和研究型实验方案进行设计的能力;②掌握常用测量仪器设备的类型与操作方法,进而能够根据实验精度要求正确选择测试仪器设备的能力;③初步掌握原始实验数据的记录要求、实验数据处理的基本理论和分析实验结果的能力;④撰写实验报告的能力。另外,实验基础理论部分的知识是进行实验设计所需要的初步知识,学生要有意识地在后续实验技术的学习过程中加强联系和应用,以建立科学的实验观念。

4. 认识工程实验的复杂性和综合性,在实验中培养团队协作精神

绝大部分的机械工程实验不同于一般的“科学研究”实验,如在普通物理或普通化学

中的基本实验,一个人可以独立完成。机械工程实验往往与机械工程实际相联系,规模和复杂程度加大,因此在实验组织和实施过程中不仅涉及多种技术和知识,而且往往需要多人的协同与合作。在本课程中设置的绝大部分机械基础实验,都需要以小组的形式来组织完成,它不仅需要每个成员具有熟练的实验技术,还需要成员之间具有相互沟通和交流的能力,所以要自觉地在实验过程中培养团结协作的能力。



机械实验与常用设计方法

1.1 机械实验的意义

实验又称“试验”，指根据一定目的，运用必要的手段，在人为控制的条件下，观察、研究事物的实践活动。本书中统一采用“实验”一词，个别章节中若国家标准采用“试验”，仍按国家标准表述。

科学实验是指根据一定目的，运用一定的科学仪器设备等物质手段，在人工控制的条件下，观察、研究自然现象及其规律性的社会实践形式。实验是获取经验事实和检验科学假说、理论真理性的重要途径。它可以纯化、简化或强化和再现研究对象，延缓和加速自然过程，充分体现人的主观能动性和创造性。科学实验的范围和深度随着科学技术的发展和社会的进步不断扩大和深化。科学理论对科学实验有能动的指导作用。

机械实验是科学实验的一个重要组成部分，同样也是人们验证新理论或假说的科学性的重要手段，也是用来研究和测定机械产品（或系统）性能指标，进而创新和改进产品的途径。另外，在机械设计与制造的实践中，机械实验具有更广泛的应用。一些复杂和对环境因素影响较敏感的问题，必须通过实验的方法来解决。例如，各种机械中所使用的工程材料的力学性能、运动副之间的摩擦系数、磨损量大小、润滑油的物理特性参数等都必须通过实验的方法才能获得准确、可靠的结果。这些参数和特性用数值计算的方法是不能准确预知的。因此，在机械工程领域中，机械实验是重要的定性和定量的研究手段。即使在科学技术飞速发展的今天和未来，实验方法也不可能被理论或其他方法所替代。

1.2 机械实验的主要类型

机械实验根据其用途可以分为验证实验、模型实验、性能实验和计算机仿真实验等^[2]。下面就各类实验的主要特征、用途进行简单的介绍。

1.2.1 验证实验

所谓验证实验是指用来验证新理论和新计算方法的实验。一个新理论或新计算方法的提出,必须要以实验为前提,其计算结果必须经过实验的验证。例如关于齿轮承载能力的计算方法,就是德国慕尼黑大学齿轮研究室通过长期的实验研究,在积累了大量实验数据的基础上提出的。目前这个计算方法和系统的实验数据已经成为 ISO 6336(国际齿轮承载能力计算方法标准)的基础。

1.2.2 模型实验

在机械设计中,对于一些结构复杂、重要的零部件或机械产品的关键工作性能和测定等,可以先制作出相应的模型,然后在实验室中进行模型实验,测定模型中的应力、变形或性能,再将模型实验结果推广到原型中,这类实验称为模型实验。模型实验不仅可以减少实验变量、更合理地组织实验,更重要的是可以使一些复杂的或不能够直接进行研究的实验课题转化成可操作和可控制的实验研究问题。例如,光测弹性实验、飞行器的风洞实验、水中航行器的水槽实验、轧钢机轴承等大型零部件性能测试模型实验等。

为了保证模型实验的结果能够正确推广到真实情况,模型实验必须以相似理论为基础,在相似模型上进行。相似模型实质上是一种把待研究的物理过程(物理想像)的特征量加以缩小或放大以提供给实验测量的实验装置。相似模型建立的核心是和待研究现象的物理相似,包括几何尺寸、时间、运动(或速度场)、动力(或力场)、温度、密度等的相似。总之,相似就是指在对应瞬间的对应点上,表征该现象的所有特征物理量的大小各有确定不变的比值;如果是矢量,还应该方向一致或夹角恒定。

模型实验的相似理论分析和模型建立的方法,可参见本章参考文献[4]。

1.2.3 性能测定实验

机械产品的设计是为了满足人们生产和生活的需要而进行的,其性能的好坏直接影响到使用者的经济利益和人身安全。因此,对机械性能的定量测量是保证产品达到设计性能的重要手段。机械产品的性能定量测量一般包括零件、部件和整机 3 个方面。这类实验属于性能测定实验。

为了保证机械产品性能测定实验的可靠性和统一性,目前制定了许多有关的行业标准和国家标准。例如,《滚动轴承零件硬度试验方法》(JB/T 7361—1994)和滚动轴承-密封深沟球轴承防尘、漏脂、温升性能试验规程(JB/T 8571—1997),是对机械中重要零部件滚动轴承性能指标的测定实验方法,属于零件性能的性能测定标准;《圆柱齿轮减速器加载试验方法》(JB/T 9050.3—1999)制定的是部件的性能指标测定标准;《汽车制动系统结构、性能和实验方法》(GB 112676—1999)是对整机性能的性能测定标准。

其他如润滑油的粘温特性的测定、机械系统传动效率的测定、机构运动学和动力学性能的测定、机床噪声和振动的测定等都属于性能测定实验的范畴。

1.2.4 计算机仿真实验

在机械工程领域,由于受客观条件的限制常常不能对研究的对象直接进行实验。如航天器研制过程中对其各种性能指标的测试问题、特殊工况(如高温、真空、高压、有毒环境)下机械装置的工作性能测定、机械产品设计中的预装配等。在这种情况下,可采用间接实验的方法,即建立一个与研究对象或过程相似的模型,通过模型间接地研究原形的运动规律性。这种间接实验技术就是系统仿真技术。根据模型的类别,系统仿真主要分为物理仿真和数学仿真。物理仿真是根据真实系统的物理性质构造系统的物理模型,并在物理模型上进行实验,即上面提到的模型实验方法;数学仿真是根据真实系统的数学关系构造数学模型,并在数学模型上进行实验。由于数学仿真一般是在计算机上对系统的数学模型进行实验,故数学仿真就是通常所说的计算机仿真。

随着计算机技术的发展,仿真作为一种研究新产品、新技术的科学手段,在航空、航天、造船、兵器以及国防科研相关的行业中首先发展起来。经过半个多世纪的发展,到今天仿真技术已经成为以控制论、系统论、相似原理和信息技术为基础,以计算机和专用物理效用设备(虚拟现实技术)为工具,借助系统模型对实际或设想的系统进行动态实验研究的一门综合性技术,它是一种真正的系统实验方法,广泛应用于各类系统的全生命周期活动及人员训练决策等过程中,并显示了巨大的社会效益和经济效益。目前,世界上较先进的用于计算机仿真实验的机械设计自动化软件有:美国 PTC 公司开发的用于机械产品设计的 PRO/E、用于机械系统动力学分析计算的 ADMAS、用于有限元计算的 ANSYS、用于大变形力学计算的 MARC 及用于设计分析的 IDEAS 和 SUN、SGI 计算机工作站等。

1.3 实验设计

实验对科学研究和生产实践具有重要的意义,其目的在于揭示、验证或测定事物的本质特征和相互联系或定量关系。为保证实验结果的准确性和可靠性,必须在实验之前对实验任务、原理方案、实验步骤、实验仪器设备、实验数据采集、实验结果分析和处理方法等进行科学的、精心周密的整体构思、规划和确定。这就是实验设计问题。

1.3.1 实验的基本要素

实验一般包括 3 个基本要素,即实验者、实验手段和实验研究的对象。

(1) 实验者 实验者是认识的主体。科学实验就是实验者针对实验研究对象采用一定的实验手段进行的一系列操作活动。它包括体力和脑力活动。脑力活动是指利用前人的劳动成果,即前人所获得的科学技术成就、理论知识和实验方法,并将其体现在实验手段中的思维活动。另外,实验者感觉器官在实验过程中获取信息的能力、实验者的理论水平和逻辑思维能力、实验者的操作技术水平也属于认识的主体。

(2) 实验手段 实验手段主要指工具、仪器和实验装置。实验手段有两个基本功能:一是控制和干预实验对象,使实验研究对象的性能能够产生或显露出来;二是使实验结果能够准确及时地记录下来。即实验者借助于实验手段能够对研究对象施加影响。从这个意义上讲,实验手段是人们认识客观事物的真正媒介。

(3) 实验研究的对象 实验对象既包括物质的运动,也包括精神的运动;既可以大到浩瀚宇宙,也可以小到微观的神经元;既可以是有生命的运动,也可以是无生命的运动;既可以是自然实体,也可以是人造实体。

总之,在实验中,实验者是主体,是最积极的因素;实验手段和实验研究的对象则属于实验的客观内容,不论它们是人造的还是自然提供的,都是客观存在的,并都符合客观运动规律。

1.3.2 实验的基本特性

科学实验具有现实性、可控性、多样性和不可预知性 4 个基本特性。

(1) 现实性 所有实验都是为了解决某一实际问题或验证某种理论而设置的,所以对所有实验都希望它能够真实、准确地反映事物的本质或变化规律。

(2) 可控性 实验与现实不同,它们是一种对现实事物或某种空间规律的研究手段,实验的可控性使研究者能够根据研究目的控制影响实验的相关因素,从而达到更有效地反映某些因素的影响规律的目的。

(3) 多样性 实验的多样性体现在两个方面:一是实验形式的多样性,各种不同研究领域有不同的实验形式,即使同一领域,同一个实验目的也会存在不同的实验方案;其次是实验结果的多样性,实验结果的多样性不仅表现在其表现形式上,而且对同一实验任务,采取不同的实验方案或测试手段也可能会得到不同的实验结果。这些实验结果可能真实地反映出现实存在,也可能不真实地反映现实,即实验结果的有效性和实验设计有关。

(4) 不可预知性 尽管研究者进行实验的初衷是获得预期的实验结果,而且实验在某种程度上又是可控的,但由于实验所具有的现实性,其实验结果本身仍具有一定的不可预知性。这一点可能会使研究者感到一些困惑,但是也为探求未知提供了空间。

1.3.3 实验的一般程序

明确实验的一般程序是保证实验有条不紊地顺利进行的前提。实验的过程可以分为3个步骤：准备阶段、实施阶段、总结阶段。下面就这3个阶段的主要工作内容进行简单的介绍。

1. 准备阶段

在准备阶段,实验者首先要明确实验任务,然后根据实验任务选择实验对象、拟定实验方案、设计实验、组织实验人员和准备实验物质条件。

1) 明确实验任务

在实际的研究工作中,通常需要完成一系列的实验,在每项实验之前,都要首先明确实验目的。纵观科学发展的历史,科学实验的目的有3种:第一种是为了搜寻和揭示未知的自然现象、自然属性、自然规律,因为此类实验的目的在于探索未知,所以将其定义为创新实验;第二种是为了验证或否定某种量的考察,称为验证实验;第三种是对已知事物或关系进行定量考察,即测定实验。各种实验任务都是为了探索和发现某种自然规律,都要了解过去不知道或不清楚的事物,而且都具有理性思维作为实验指导的共同特征,即要先想后做。由于在研究工作初期一般还不能够完全明确具体任务,所以应该随着研究工作进展的实际情况,逐步将实验任务具体化。

2) 选择实验对象

明确实验任务后,应进一步确定实验需要的研究对象。实验研究的对象是很复杂的,实验对象选择是科研中一个十分重要的问题,它对实验结果起着关键性作用。选择实验对象的标准和条件,以及制定这些标准和条件的依据和理由都应该有详细的说明,并且在实验过程中不要轻易地改变实验对象和确定实验对象的标准及条件,以免影响研究结果。

实验对象的选取标准一般要遵循下面的原则:

(1) 实验对象要具有代表性 人们认识事物总是从事物的个性到共性,实验研究就是通过对个别(部分)对象的实验观察、分析研究,得出一般性结论。因此实验对象选择时首先要注意其代表性。有人认为所谓代表性就是对象的集中性,即受试对象各方面条件一致,构成均匀。集中性强可以减小由个体差异带来的误差,研究结果容易显现出来,易于得到较理想的实验结果。但是,集中性强也造成其实验结果适用范围变窄,普遍性较差。实践证明,过分强调实验对象的集中性构成既无必要也不可能。过分的典型、集中容易丧失代表性。当然,选择实验对象时忽略集中性也是不对的,它会因为对象个体间各方面差异太大,而难以得到正确的实验结果,也谈不上具有代表性。所以,只有从代表性出发同时兼顾集中性,正确处理代表性和集中性的关系,才能保证实验对象的正确选取。

(2) 实验对象选取不能带有主观性(或偏见) 要避免实验对象选取时的主观性需要

注意两个问题：一是要按照全体样本的本来面目从中随机抽取。数理统计学中的“随机抽样”方法就是一种很好的科学方法。实验对象是否严格遵循“随机抽样”原则，是衡量其是否具有代表性的主要依据。二是要保证取样（实验对象）有一定的数量。由于样本的差异性很大，量少则无法保证其代表全体。实验对象数目的多少没有统一规定，应视具体情况而定。一般可根据样本差异性大小（可由均方差系数来估算）、代表性如何、实验的难易程度和损耗大小等因素决定。例如，进行纤维强度实验时样本一般取 30 个以上；但进行氢弹或原子弹试验时，样本往往只有 1 个。如果不能确定实验对象是否具有代表性，就不能用相应的数据估算全体的估计值，也不能算出样本比较组的相差程度是否显著等。正确选取实验对象的个数的数理统计方法，可参阅有关工程实验方法的专门书籍。除确定实验对象及其合理数目外，还应围绕研究对象进行必要的调查研究。主要包括对前人有关工作的调查，对实验对象的现场调查，对实验对象的测试和理论分析，从而为拟定实验方案打好基础。

3) 拟定实验方案

实验方案的拟定，实际上是对实验可行性的研究。其目的在于对将要进行的工作做一个初步的分析和考虑，并以此明确技术路线的具体实施办法。它包括依据实验任务、目的确定实验内容；分析实验中要获得的科学事实；确定获取这些事实的方法；通过设计实验手段与制造专用设备等方法来物化设计思想等。

因为实验要动用许多科学仪器和设备，牵涉许多人力和物力，所以不能草率行事，实验方案必须经过讨论和审批才能够付诸实施。

4) 设计实验

通过运用某种方法对实验中的各种因素进行合理安排，从而能用最少的实验次数、较少的人力和物力投入，达到理想的实验效果。针对不同的实验问题，有不同的实验设计方法，在 1.3.3 节中将会详细介绍。可以根据实验考虑的相关因素，灵活选用相应的方法。

5) 组织实验人员

进行科学实验既要重视实验中的技术问题，也不能忽视实验的科学管理工作。根据实验任务、实验方案的要求，合理组织和调配实验人员是实验科学管理的主要内容之一。应该根据实验的规模，安排好各项程序，做好相关人员的组织工作。另外，要特别注意实验安全性问题。实验前，应该对实验的危险性有足够的估计，采取相应的、可靠的安全措施，确保实验人员的人身安全和实验的顺利进行。

6) 准备实验物质条件

实验物质条件的准备包括实验器材、实验所必需的材料、经费预算和时间安排等。

在科学实验中，实验器材是研究的手段。实验器材包括准备装置、控制装置、直接用于实验的实验装置、实验数据采集处理装置、模拟装置等。这些手段的基本功能是取得信