



材料力学实验教学的课程设计¹⁾

李敏* 李依伦[†] 陈伟民^{**、2)}

* (北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京 100191)

[†] (巴黎-萨克雷大学土壤、结构与材料力学实验室, 法国巴黎 91190)

^{**} (中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要 实验实践类教学是专业培养计划的重要组成部分, 相对于理论课程, 理论课程配套实验或实验实践类课程在师资配置、教学方法与课程内容方面更需提升。对于教学实验内容与要求的设计, 目前存在流程固化和测试数据为本的趋势。教学实验的目的和作用的教学内容设计与评价标准设定的基础, 这也是“回归初心”的体现。本文通过材料力学实验课程现状分析, 探讨教学实验课程的内容设计与实施模式。

关键词 实验教学, 课程设计, 材料力学

中图分类号: O341 文献标识码: A doi: 10.6052/1000-0879-21-073

COURSE DESIGN OF MATERIAL MECHANICS EXPERIMENT TEACHING¹⁾

LI Min* LI Yilun[†] CHEN Weimin^{**、2)}

* (School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

[†] (Lab. MSSMat, Centrale Supélec, Université de Paris-Saclay, Paris 91190, France)

^{**} (Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100191, China)

Abstract Experimental teaching is an important part of training plan. Compared with theoretical courses, experimental courses need to be improved in terms of teacher allocation, teaching methods and course content. For the design of content and requirements of teaching experiment, there is a trend of process solidification and test data-based. The purpose and function of teaching experiment is the basis of teaching content design and evaluating standard setting. Through the analysis of the present situation of material mechanics experiment course, this paper attempts to discuss the standard and implementation mode of teaching experiment course design.

Keywords experimental teaching, course design, mechanics of materials

为了说明本文论述的目的, 首先叙述一次我作为学院教学指导委员会成员的实验教学听课记录。

当天实验的内容是测量材料的弹性模量与泊松比, 在实验课教师讲解了基本要求与步骤后, 各小组同学开始了操作。实验操作第一步是对板状金属试样施加 2 kN 预载, 我附近的三人小组为了获得试验机控制显示界面上精确的 2000.00 N 数字, 反复操

作的时间超过了 10 分钟。

内心有些焦灼的我使用尽量和蔼的语调提点: “同学, 你知道为什么需要施加预载吗?”

一旁观察显示数字的学生看我一眼后并未如我想象般, 或沉默思索, 或紧张陈述, 而是反问道: “老师, 你是做研究工作的吧?”

没有获得正常反馈, 我有些许愣神, 迟疑着回

2021-02-26 收到第 1 稿, 2021-03-19 收到修改稿。

1) 中科院先导项目资助 (XDA22000000)。

2) E-mail: wmchen@imech.ac.cn

引用格式: 李敏, 李依伦, 陈伟民. 材料力学实验教学的课程设计. 力学与实践, 2022, 44(1): 138-142

Li Min, Li Yilun, Chen Weimin. Course design of material mechanics experiment teaching. *Mechanics in Engineering*, 2022, 44(1): 138-142

答：“是，我做一些研究工作。”

于是旁边的同学带着果不其然的表情说：“我就知道，因为您做研究工作就习惯问为什么；而我们，按照实验手册的要求做，不问为什么。”

我看着同学并不像玩笑的脸，没有再提及诸如试样夹紧、消除间隙、预载不需要特定数值等话题。剩下的课堂时间里，观察着同学们忙碌点击鼠标、拷贝数据到 EXCEL 表格显示曲线、再拷贝图表与数据生成合格的实验报告文档，我不禁思考一个问题：实验教学的目的是什么？

1 实验教学的表象与问题

以上的陈述听来像一个笑话，但的确是真实发生的事件。我也观察过材料力学实验课的其他内容，以及固体和流体专业其他实验课程，流程与状态基本相同。

(1) 教师的讲解除设备操作与安全提示外，主要是测试步骤与数据处理公式；

(2) 学生操作仪器设备，根据实验手册要求读取数据填写表格，计算得到实验结果形成实验报告；

(3) 教师巡视实验现场除保证安全外，主要工作是辅助学生实施顺畅的实验过程；

(4) 各小组中学生有操作与记录的分工，小组内与小组间的交流关注实验数据是否趋同；

(5) 学生与教师交流较少，主动“召唤”老师多是仪器操作出现异常，很少观察到与教师交流讨论数据偏差的原因，从未观察到讨论实验方案中安装、加载、测试与处理中存在的问题。

在“和谐”有序的实验课程上，可以感受到的“主题”是获得正确的实验数据，更有“认真负责”的教师在黑板或 PPT 上给出标准数据供学生参考，甚至开发了相关应用程序，可以自动处理实验数据并给出符合实验报告要求的数表曲线。

实验，如果狭义理解为理论分析与计算数据的验证，对于材料力学中材料基本力学性能的数据与图像，是否有必要开设学生实验环节？没有学生怀疑教科书与手册中给出的数据，每位学生重复获得相同数据是否有意义？

如果实验课程的目的是实验设备操作培训，以及材料力学性能测试流程学习，以学校（北京航空航天大学）每年学习材料力学课程的近 2000 名学生作为样本，毕业生将来工作中涉及材料力学性能测试

的比例应该非常低，而专门从事材料力学性能测试工作的毕业生人数可以忽略。基于该样本数据，学校是否有必要投入大量的实验室运行经费？更何况还需投入运行经费百倍的教学实验室设施建设，以及相关教学实验室面积和实验教学队伍。

很显然，特定数据获取与特定设备操作并不是实验课程的目的，至少不是主要目的（在这一点上，此处的“特定”数据与设备与前述的“特定”预载有类似之处），实验项目应该是一类“载体”，通过教学实验环节达到学生能力培训的目的。如果偏离了基本方向，现象表现为学生缺乏思考与质疑，底层原因是实验教学设计与任务要求不合理。

2 实验教学的地位与目的

自从伽利略开创自然科学领域的现象观察——假说提出——逻辑推理——实验验证模式，作为研究方法的重要组成部分，与实验相关的测试原理、仪器介绍、方法步骤、数据处理等内容逐步成为教学内容，与之相应地，实验室面积、设备类型、台套数目等硬件条件也成为目前评价专业办学水平的量化指标。在培养计划学分比例中，教育部规定工科专业的实验实践部分大于 20%，尽管做不到“三分天下”，但相比基础理论与计算方法，从本科到研究生阶段，实验课程与实验项目所占比例在逐步增加。

与科学技术发展呈现的日新月异不同，各专业的课程配套教学实验项目保持相对稳定，国内外高校均是如此。以专业人员的视角，目前开设的教学实验项目与内容偏于基础与常规，考虑到高校充足的办学经费与研究经历各异的教师背景，没有形成教学实验项目“百花齐放”的原因一定不是“软硬”条件不足。教育工作者形成共识维持相对稳定的教学实验项目与内容，与知识的学习模式和传授效率相关。

(1) 从主观感受入手，通过尝试、认知、思考、总结，最终获得“经验式”知识，这种知识获取模式符合学习的自然规律，印象深刻、图像感强、不易忘却，事实上目前绝大多数与技能技巧相关的职业培训教学仍然采用这种实践——总结——实践的模式；

(2) 随着人类认识世界的深入，自然科学体系结构逐步丰富完善，需要继承与传授知识的总量爆发性增长。尽管专业分类不断细化，但即使对于相对“狭窄”的领域方向，采用体验式学习模式完成高等

教育基础内容,在知识传递的效率方面仍难以胜任。因此,基于前人总结的知识编写教材,通过教师的逻辑演绎讲授主线与难点,帮助学生快速了解知识体系的“框架”,这是目前高校绝大多数课程的教学方法,尽管课程中也会有例证与应用,但其目标仍是展示逻辑推理结果的正确性与有效性。

保证知识传递高效率的演绎式学习胜在宏观全貌,但在主观感受与细节认知方面有不足,这也是需要配套习题训练与教学实验的原因之一。另一方面也是实验教学地位的体现,与培养学生能力体系相关:人才培养的任务体现在学生的知识结构与能力体系,不同专业的知识结构有一定差异,但是能力体系指标大致相同,美国麻省理工学院曾经给出七大类35条的体系指标(见附录),观察其中各条目,从发现问题、估计与定性分析、带有不确定性的分析、解决方法和建议、实验性的探索、假设检验、确定主次与重点、解决问题时的妥协、判断和平衡、执着与变通……,相比理论课程为了引导学生思考的问题设计,实验教学的步骤与内容天然满足学生认知进程,直接对应能力培养体系指标点,这是实验教学环节不可或缺的主要原因。

认识到实验教学需要达成的目的,回归问题的本源,就不难理解目前实验课堂上学生为什么缺乏思考与质疑,因为教学实验设计与任务要求没有提供学生思考与质疑的“土壤”,进而失去了能力培养的“空间”。形如本文记录的状况:如果实验目标与评价标准就是弹性模量与泊松比数值本身,过程与细节必然不是学生的关注点,加之教师为了保证实验过程的高效顺畅,提前完成了试件贴片、安装、调试到数据表格准备等各项工作,相当于替代学生“避开”所有发现问题的机会,最终均获得“双赢”的结果——学生高效完成实验报告得到分数,教师批改形式统一的报告降低工作量,唯一“失落”的是实验的目的。

与之类似的问题也出现在目前着力推进的虚拟仿真实验项目,为了解决教育资源不均衡以及替代危险环境实验,教育部提出发展虚拟仿真实验项目的初衷是合理的,但是对于具备实验条件的高校使用虚拟仿真实验替代现场实验是不合理的:与前述问题类似,虚拟仿真实验过程中所有的流程和数据是预设赋值,学生不仅没有发现问题的机会,甚至没有“犯错”的机会,也就失去了能力培养的机会。

3 实验教学的设计与建议

为了达到能力培养的目的,避免毕业工作时“回炉”的高成本,教师有必要审视实验教学的目的,设计教学实验的内容与要求。事实上,在实验教材中对于实验设计、操作要求、数据采集、处理方法的设定原因有或多或少的说明,如果实验任务与评价不涉及这些细节,少有学生会主动关注“底层”的机理。

目前高校工科机械大类的材料力学教学实验在8~16学时之间,均开设的基本实验是低碳钢的单轴拉伸材料力学性能、金属材料弹性模量与泊松比(试验机操作与电测桥路原理属于配套),其他诸如四点弯(三点弯)梁截面应变分布、压杆失稳临界载荷、曲拐弯扭组合、带孔板应力集中等属于可选类型^[1-5],根据学时量、实验室条件、专业背景的差异,各校不尽相同。此处以前述材料弹性模量与泊松比实验为例,提出系列实验教学设计,仅供实验教师参考。

保持实验主体内容不变(常规要求称为O方案),提出不同的要求并以此作为评价指标之一。

(1) 载荷分为 N 步施加($N \approx 10$),根据相邻两点计算弹性模量 E ,给出 E 随载荷 F (或应变 ε ,应力 σ 均可)的变化曲线,分析偏差及其分布,给出机理性说明与改进方案(该方案不加预载,但其目的就是预载及其设定原则);

(2) 对于 N 步载荷获得的数据,分别采用相邻两点、四点、六点……计算 E ,利用三点、五点、七点……线性拟合计算 E ,给出相对偏差较小的计算模式,以及数据采集点的范围,并说明原因或机理(该方案训练学生根据已有数据定性与定量表征问题,给出合理方案提高工作效率);

(3) 以(1)或(2)为基础要求,除金属材料外添加一、两种材料类型,例如单向碳纤维单层板(或单向玻璃纤维单层板)、橡胶板(或亚克力板,非夹层类型),重复以上的工作,修正原先的结论(实验性的探索,多样性的认知,执着与变通);

(4) 以常规实验(O方案)为基础,要求学生多试样或不同位置贴片(或教师挑选贴片质量各异预制试样),多点测试与分析,比对同一数据处理方式的结果,采用体视显微镜观察贴片细节,给出问题猜测与分析(如果教师预制贴片,尽量包含粘贴不均匀、部分虚粘、角度偏差等类型);

(5) 以 O 方案为基础测试三种材料试样 (例如 (3) 方案中材料), 要求研究保载时间对于测量数据的影响 (在较高的应力水平区域), 比对不同材料给出效率与精度均衡的方案 (根据加载设备类型不同, 可以保载观测蠕变或保持位移观测松弛; 教师预选 3 种蠕变性能有明显差异的试样材料);

(6) 以常规实验 (O 方案) 为基础, 使用相同材料制作的均匀截面长梁试样, 悬臂支撑 (简支可选) 进行自由端挠度测试并算出弹性模量 E , 对比使用单轴拉伸实验获取的弹性模量 E , 分析偏差的原因 (类似的方案还包括自由 —— 自由梁/悬臂梁/简支梁频率测试反算弹性模量 E ; 使用长梁端部受低速冲击测试弹性波速度反算弹性模量 E 等等, 可以联合其他力学类实验室共同开展);

(7) 以 (6) 方案为基础, 采用长高比分别为 3, 5, 10, 20 的悬臂梁测试挠度, 分析结果差异并给出说明 (事实上, 对于挠度测试, 边界条件与理论模型不一致造成的影响最为显著, 悬臂梁固支端最好采用小厚度通孔多螺栓夹紧, 且约束夹块不能倒角, 在此基础上, 铁木辛柯梁与欧拉梁的差异才能更好体现)。

以上列出的以单轴拉伸实验为基础的实验方案与测试数据类型并不是固化的, 只是本文以拉伸实验展开讨论的自然延续, 教师可以根据实验室条件以及理论课程进度进行筛选或设计, 此处展示多种方案意在说明: 测试类型与数据并不关键, 通过实验项目培养学生的能力体系才是目的。为了使绝大部分学生受益并降低由于实验报告多样化带来的工作量, 建议通过学校提供的教学平台或线上方式, 将各组实验报告交由学生们互评, 教师挑选典型案例让学生课堂展示并点评。

事实上, 各类测试实验均有标准 (例如材料力学教学实验主要涉及拉伸试验 GB/T 228.1—2010; 材料弹性模量测定 GB/T 22315—2008; 扭转试验 GB/T 10128—2007 等), 实验教材中各项要求的基础就是国家标准, 以上提及的各类方案也是标准制定过程中可能涉及因素的展示, 完成各类实验后意识到标准的来历对于学生将来的科学研究与工程设计生涯非常重要。这里再提及一件与弹性模量测试相关的实例: 笔者曾经参与北京飞机维修工程有限公司公务机内部改装项目, 分析人员使用部件地面试验结果验证有限元模拟结果时发现变形有较大差

异, 为了寻找偏差来源对于构成部件的复合材料板进行了力学性能验证, 其结果与生产厂家给出的弹性模量完全一致; 后来通过研究复合材料单轴拉伸试验的国家标准发现, 在标准中确定弹性模量所取试验数据偏于中高应力 (应变) 区域, 而内部改装结构部件的分析状态主要对应于低应力区域。后重新采用拉伸试验低应力 (应变) 区数据计算弹性模量, 由此获得部件变形的有限元分析数据与地面试验结果高度吻合。这个实例并非说明国家标准存在问题, 对于纤维复合材料, 特别是高分子纤维复合材料, 低应变区与中高应变区的模量差异明显大于金属材料, 对于大量使用长纤维复合材料的航空航天工程, 材料主要工作在中高应力区域, 且低应变区的非线性程度更强, 所以国家标准选择中高应力区数据计算弹性模量是合理的, 但并不是普适的。由此可见, 了解数据测试中各类问题, 可以针对具体问题提出解决方案, 远比测试数据本身更为重要。

教学实验的目的是培养学生分析与解决问题的能力, 在设计教学实验内容、设定评价标准时, 教师对照相关能力体系指标 (如附表), 作为实验内容选择和评价等级的标准, 这也是“不忘初心”的体现。

4 小结

实验教学相比理论教学, 在学生能力培养方面具有独特的地位, 各高校在实验教学方面开展了创新性与综合性实验探索, 包括近期的虚拟仿真实验课程建设。本文从实验教学目前的地位与目的出发, 思考了实验教学的内容设计对学生能力培养的促进作用, 以材料力学中基础实验内容为例, 提出一些改进的建议, 意在说明相对于具体的实验结果, 过程更加重要; 相对于实验流程的实施, 设定实验流程的机理更关键, 期望通过实验教学地位与目的的探讨, 以目标导向模式引导教师关注学生能力培养体系。

参 考 文 献

- 1 刘鸿文, 吕荣坤. 材料力学实验, 第 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2017
Liu Hongwen, Lü Rongkun. Experiments on Mechanics of Materials, 4th edn. Beijing: Higher Education Press, 2017 (in Chinese)
- 2 同济大学航空航天与力学学院力学实验中心编. 材料力学教学实验, 第 3 版. 上海: 同济大学出版社, 2012

- Experimental Center of Mechanics, School of Aeronautics, Astronautics and Mechanics, Tongji University. Experimental Teaching on Mechanics of Materials, 3rd edn. Shanghai: Tongji University Press, 2012 (in Chinese)
- 3 靳帮虎. 材料力学实验. 南京: 东南大学出版社, 2018
- Jin Banghu. Experiments on Mechanics of Materials. Nanjing: Southeast University Press, 2018 (in Chinese)
- 4 董继蕾. 材料力学实验, 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2019
- Dong Jilei. Experiments on Mechanics of Materials. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2019 (in Chinese)
- 5 邹广平. 材料力学实验基础, 第2版. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2018
- Zou Guangping. Experimental Basis on Mechanics of Materials, 2nd edn. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2018 (in Chinese)

(责任编辑: 胡漫)

附录: 能力体系指标

1 工程推理和解决问题的能力

- 1.1 发现问题和系统地表述问题
- 1.2 建模
- 1.3 估计与定性分析
- 1.4 带有不确定性的分析
- 1.5 解决方法和建议

2 实验和发现知识

- 2.1 建立假设
- 2.2 查询印刷资料和电子文献
- 2.3 实验性的探索
- 2.4 假设检验与答辩

3 系统思维

- 3.1 全方位思维

- 3.2 系统的显现和交互作用

- 3.3 确定主次与重点

- 3.4 解决问题时的妥协、判断和平衡

4 个人能力和态度

- 4.1 主动性与愿意承担风险

- 4.2 执着与变通

- 4.3 创造性思维

- 4.4 批判性思维

- 4.5 了解个人的知识、能力和态度

- 4.6 求知欲和终身学习

- 4.7 时间和资源的管理

5 职业能力和态度

- 5.1 职业道德、正直、责任感

- 5.2 职业行为

- 5.3 主动规划个人职业

- 5.4 与世界工程发展保持同步

6 团队工作

- 6.1 组建有效的团队

- 6.2 团队工作运行

- 6.3 团队成长和演变

- 6.4 领导能力

- 6.5 形成技术团队

- 6.6 交流

7 交流的策略

- 7.1 交流的结构

- 7.2 书面的交流

- 7.3 电子及多媒体交流

- 7.4 图表交流

- 7.5 口头表达和人际交流