



铁路路基动力测试数据分析实验教学设计

罗强^{1,2}, 冯桂帅^{1,2}, 张良^{1,2}, 蒋良潍^{1,2}

(1. 西南交通大学土木工程学院, 成都 610031; 2. 高速铁路线路工程教育部重点实验室, 成都 610031)

摘要: 在实验教学改革背景下, 采用“科学研究与实验教学相结合”思路, 依托列车荷载作用下路基动力响应测试数据分析方法, 结合 Origin 软件集成的绘图和分析功能, 进行了铁路路基动力测试数据分析的实验教学设计, 介绍了实验教学的流程和内容, 针对教学内容进行了详细阐述并给出了操作案例。实验教学在传授传统专业知识的基础上, 采用了新的实验技术, 更新了实验内容并完善了教学方法。实践表明, 学生对实验现象及其背后科学原理的理解普遍加深。该实验教学可作为铁道工程专业路基工程课程教学的补充。

关键词: 实验教学; 铁路路基; 列车荷载; 动力测试; Origin 软件

中图分类号: U213.1

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20200283

Experimental Teaching Design of Dynamic Test Data Analysis of Railway Subgrade

LUO Qiang^{1,2}, FENG Guishuai^{1,2}, ZHANG Liang^{1,2}, JIANG Liangwei^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Key Laboratory of High-speed Railway Engineering, Ministry of Education, Chengdu 610031, China)

Abstract: Given the background of experimental teaching reform, this paper conducts the experimental teaching design of dynamic test data analysis of railway subgrade by adopting the idea of combining scientific research with experimental teaching, relying on the data analysis method of the subgrade dynamic response test under the train load, and combining with the drawing and analysis functions integrated by Origin software. In addition, the process and content of the experimental teaching are introduced, the teaching contents are expounded in detail, and the corresponding operation cases are given. Based on imparting traditional professional knowledge, the experimental teaching adopts new experimental techniques, updates the experimental contents, and improves the teaching methods. The practice indicates that students' understanding of experimental phenomena and the scientific principles are generally deepened. This experimental teaching is seen as supplementary to the subgrade engineering course in the major of railway engineering.

Key words: experimental teaching; railway subgrade; train load; dynamic test; Origin software

长期以来, 高等学校本科生实验教学存在如下问题:

1) 验证型实验居多, 设计型实验偏少, 开放型实验更是凤毛麟角, 学生难以进行有效的思考和探索^[1-2];

2) 实验教学以经典内容和传统方法为主, 缺乏与前沿科技的联系, 难以激发学生的学习热情和创造力^[3];

3) 实验大多局限在理论层面, 未能与实际问

题相联系, 难以提高学生运用所学理论解决实际问题的能力^[4]。由此, 在保证实验教学内容的前提下, 采用新的实验技术, 不断更新教学内容并完善教学方法不失为实验教学改革的一个重要方向^[5]。

对于西南交通大学而言, 教师手中丰富的科研成果是十分宝贵的潜在实验教学资源, 将科研与教学紧密结合无疑是一种提高实验教学水平的有效途径^[6-7]。因此, 在学校双一流建设进程中, 探索将教师科研成果转化为本科生创新性综合实

收稿日期: 2020-06-19; 修回日期: 2020-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(51878560); 西南交通大学本科教育教学研究与改革项目(1903041)。

作者简介: 罗强(1963-), 男, 博士, 教授, 主要从事路基工程与土工技术教学研究。

验的有效模式，使教学内容在不失经典的前提下更具前沿性，以此来激发学生的科研创新思维并提升实验教学质量，现实意义重大^[8-9]。

此外，交通运输工程位列西南交通大学“双一流”建设学科名单，而“路基工程”是该学科铁道工程专业本科生的一门专业基础核心课程，必须高效保障实验教学质量。将教师科研成果融入本科生的实验教学中，更新该课程实验教学的内容和方法^[10]，可作为学校“双一流”建设在本科教学中的一次有益尝试。

1 铁路路基动力测试

铁路运输具有显著的社会经济效益，如何

提高基础设施的服役性能、延长使用寿命一直是行业科学研究热点。对于路基工程而言，掌握列车移动荷载作用下路基土工结构的动力响应特性可为路基工作状态评估及长期性能预测提供依据^[11-12]。因此，分析路基在列车荷载作用下的动态响应对路基动力稳定性研究十分必要。

路基动力响应指标涉及力学指标(动应力)和振动指标(位移、速度、加速度)，不同工况条件下上述指标的变化情况可反映路基动力作用的差异。各指标的具体形式如表 1 所示。路基动力测试分为外业和内业两个阶段，不同的工作阶段对应不同的工作任务且具备各自的技术特点。

表 1 路基动力测试项目及参数形式

测试项目	动应力	振动位移	振动速度	振动加速度
幅值参数	峰值	峰-峰值	有效值	峰值
常用单位	kPa	10 ⁻³ mm	mm/s	m/s ²

1.1 外业数据测试

携带测试仪器深入铁路工程现场，通过埋在路基不同位置处的各类传感器，采集列车通过测试断面时路基的动力响应是外业的主要工作内容。如图 1 所示，为外业所用仪器设备，IMC 动态数据采集系统搭配拾振器、土压力盒、信号放大器和便携式电脑等设备可实现对上述动力响应参数的测试。如图 2 所示，为综合检测车运行通过路基测试断面的照片。列车采用“T+6M+T”的动力分散型编组方式，总长 203 m，车轴数 32，轴重不大于 15 t，车辆固定轴距 2.5 m、定距 17.5 m。列车通过路基测试断面期间的动应力时程序列如图 3 所示，图中 16 组“M 形”波形和 32 个峰值点与列车 16 个转向架和 32 个轮轴相对应。峰值点与轮轴之间对应关系明确，峰值相近但不完全相同，表明测试所得动应力值具有随机变量的特征。



图 1 外业测试设备



图 2 检测列车

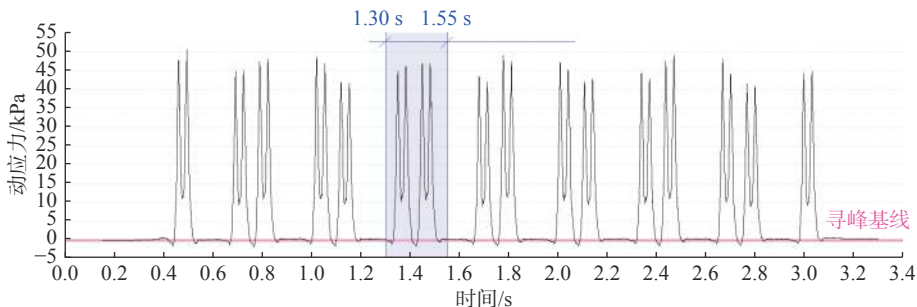


图 3 动应力时程信号

1.2 内业数据分析

内业的主要任务是对测试所得动力响应信号进行处理和分析^[13],其工作流程为:平滑降噪—峰值分析—统计计算。

1) 由于电子元件内部热运动或测试环境中外部电磁干扰的存在,测试信号波形图上会产生“毛刺”,导致波形不平滑。通过平滑降噪可以消除噪声干扰,降低测试误差。

2) 列车具有多对车轴,整列车通过路基测试断面时,相当于给路基面施加了一个加载频率与行车速度有关的循环荷载,每次加载都会使路基面产生动力响应,不同的动力响应指标对应不同的幅值参数。对图3所示信号而言,需要进行峰值分析以得到各车轴作用下的动应力峰值。

3) 由于路基动力响应的幅值参数表现出随机变量的特征,信号分析的最后步骤是对幅值参数进行统计计算,得到其均值、方差及分位值等特征值,以量化指标来评价路基的动力响应。涉及工况对比时,还可以通过箱线图、小提琴图等统计图来进行对比分析。

2 实验设计

2.1 可行性分析

显然,考虑时间、安全、成本等因素,安排大学生赴现场开展路基动力测试不具备可行性。另外,铁道线路进入运营期后也不具备开展现场教学实验的条件。因此,路基动力测试外业部分不适宜引入到实验教学中。相反,由于内业仅涉及实验数据的处理分析,可在实验室内面向学生开展创新性个性化教学实验,具备引入到实验教学中的可操作性。

实际科研工作中,内业信号处理和分析大多使用配套成熟的商业软件完成。其中,Origin软件集科学绘图与数据分析功能于一体,绘图及计算性能强大,在业内深受好评,是一款出色的工具类软件。本文所使用版本为Origin 2019b。

2.2 教学方法

结合教学实验的科研背景,在开展实验教学时可采用如下3个流程^[14]。

1) 由于外业所涉及的工况条件不同,如断面位置、路基结构、轨道类型、行车速度、车辆荷载和信号类型等,开展实验教学前宜根据试验条件将所

采集到的响应信号进行分类整理,建立相应数据库。

2) 抽取任意数量的工况,搭配不同的试验条件,编制实验内容不同的任务书,指导学生使用Origin软件进行数据处理,考察不同试验条件下路基动力响应信号的差异,完成路基动力作用分析,编制实验报告书。

3) 指导学生建立多个学习小组开展实验竞赛,鼓励学生进行主动思考和交流,小组成员共同完成实验报告。在此过程中,锻炼学生思考与交流的能力,培养其竞争与合作的意识。

2.3 教学内容

实验教学以“路基工程”课程教学内容为基础并作适当拓展,应包含以下内容:

1) 轨枕承担轮载力的分担模式,路基承受列车荷载的计算模型;

2) 路基面动应力幅值和纵横向分布规律,动应力沿深度衰减特征;

3) 路基面动变形幅值及纵横向分布特性,路基各结构层动变形衰减趋势;

4) 路基各结构层振动速度、振动加速度幅值及变化规律;

5) 动应力、动位移、振动速度、振动加速度实测曲线的典型特征,运用Origin软件进行数据分析和处理的一般方法。

2.4 学生应掌握的关键问题

学生应在课程完毕后掌握以下关键问题:

1) 掌握有砟/无砟轨道路基面动应力沿轨道纵横向的分布规律,理解有砟/无砟轨道路基面承受的列车荷载作用模式差异;

2) 掌握路基动应力沿深度的衰减规律,理解路基承受列车荷载作用模型构建原理和计算方法;

3) 掌握基床结构动变形的幅值范围和计算模式;掌握路基振动速度和加速度沿深度的衰减规律;

4) 掌握高速铁路、重载铁路、普速客货铁路在路基动力响应方面的差异,尤其随运行速度、列车轴重及轴距等因素的变化趋势;

5) 掌握国内外规范方法对路基动力稳定性的评价技术,熟悉动应力、动变形、振动速度和加速度等评价指标的限值;

6) 掌握运用Origin软件进行数据处理和分析的流程及方法。

3 实验案例

以“京张高铁”路基动力测试为实验背景，如图 3 所示检测列车以 280 km/h 通过路基测试断面测得的动应力信号为算例，说明基于 Origin 工具开展实验教学的流程和内容。

3.1 平滑降噪

Origin 软件中的“Smooth”工具提供了 7 种平滑方法，包括相邻平均(adjacent averaging)、Savitzky-Golay 法、百分位滤波(percentile filter)、快速傅里叶滤波(FFT Filter)、LOWESS、LOESS 和二项式法(binomial method)。由于信号类型及噪声差异，上述方法使用范围不同，降噪性能也存在差异。

1) 相邻平均法是一种计算指定数据点周围指定范围内数据的平均值，以平均值替换原始数据点的方法。通过设置窗口大小调节平滑程度。设置较大的窗口值可获得较好的平滑效果，但该方法存在较严重的削峰现象，在窗口较大时易造成信号失真。

2) Savitzky-Golay 法是 Savitzky 和 Golay 于 1964 年公布的一种信号降噪方法^[15]。该方法以指定数据点周围局部多项式回归取代相邻平均法的算术平均思想，保持较好平滑效果的同时可有效保留峰值数据特征。即使窗口较大，该方法仍具备优越性。

3) 百分位滤波主要用于消除幅值异常噪声，在抑制奇异值方面效果较好。尤其是中值滤波(50% 百分位)对表现为局部尖峰的散粒噪声抑制效果显著。

4) FFT 滤波通过 FFT 变换得到信号的频谱，设置阈值指定截止频率，实现低通滤波，抑制高频噪声。

5) 当存在大量数据点时，使用 LOWESS 或

LOESS 法可有效检测嘈杂数据趋势。

6) 二项式法通过构造以二项式系数为权重的加权移动平均滤波器以实现低通滤波。

激活工作表(workbook)，在 Origin 菜单栏中依次执行“Analysis: Signal Processing: Smooth”即可激活“Smooth”工具。如图 4 所示为采用“Savitzky-Golay”法时的“Smooth”对话框。其中，“Input”与“Output”分别用于指定输入数据和输出数据的位置；可通过“Point of Window”指定窗口大小，窗口值越大曲线越平滑；“Boundary Condition”提供了反射、重复、周期、外推 4 种边界条件；“Polynomial Order”用来指定“Savitzky-Golay”法多项式阶数。

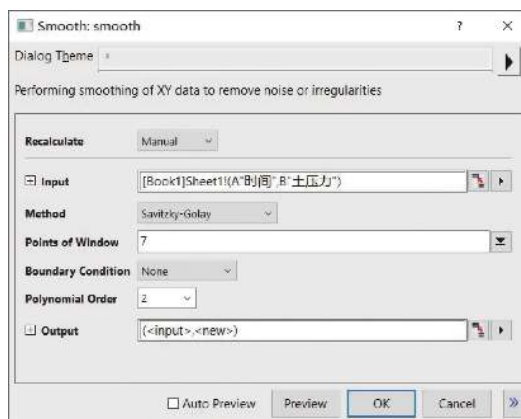
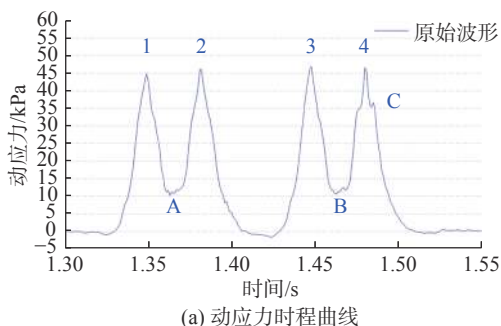
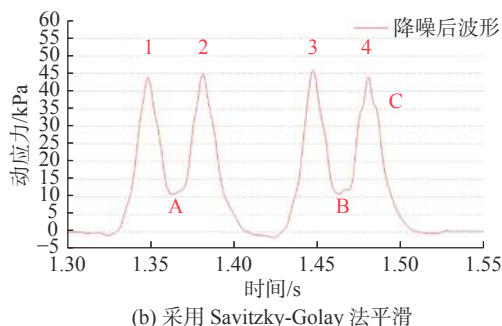


图 4 Smooth 对话框

如图 5 所示，以图 3 动应力时程曲线数据 1.30~1.55 s 区域(图 5(a))为例，当采用图 4 所示 Savitzky-Golay 法进行平滑，得到降噪后的波形如图 5(b)所示。不难看出，图中平滑处理后原始波形上 A、B、C 三点处毛刺消失。同时，降噪后的波形较好地保持了原始信号的峰值特征，图中所示 4 个峰值点未产生较大的削峰现象，平滑效果较好。



(a) 动应力时程曲线



(b) 采用 Savitzky-Golay 法平滑

图 5 平滑降噪效果

3.2 峰值分析

在 Origin 菜单栏中依次执行“Analysis: Peaks and Baseline: Peak Analyzer”即可激活“Peak Analyzer”工具。该工具具备一个向导式交互窗口,通过预览窗口指导用户完成峰值分析并可实时查看结果。可通过将每个步骤中的设置保存为主题来批量处理相似的数据文件。

Peak Analyzer 可实现的功能包括:峰值积分(integrate peaks)、创建基线(create baseline)、减去基线(subtract baseline)、寻峰(find peaks)以及峰值拟合(fit peaks)。以算例中图3所示信号为例,选择寻峰功能,分析流程如图6所示。

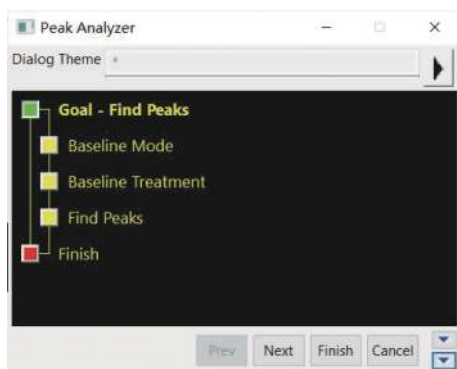


图6 寻峰分析流程

图中,基线模式(baseline mode)用于创建基线;基线处理(baseline treatment)旨在调整基线并执行基线减除。基线设定完成后,在寻峰(find peaks)页面中进行必要的参数设置后,即可得到峰值点序号及其横、纵坐标值等数据信息。点击完成(Finish)可完成寻峰,并将结果存档。

1) 基线模式

根据输入信号种类及特征的差异,程序提供了如下几种基线创建模式,分别为:常量(constant)、自定义(user defined)、使用现有数据集(use existing dataset)、XPS(仅针对X射线光电子谱)、最大/最小值(Min & Max)、终点加权(end points weighted)、非对称最小二乘平滑(asymmetric least squares smoothing)、直线(straight line)。常量(constant)模式中,基线为一条水平直线,参数为纵坐标Y的值。依据信号类型,可将Y设置为输入数据的最小/最大值、中位数以及任意自定义值等。本算例中,采用如图7所示参数,将基线设置为自定义Y=0,结果见图3。

2) 基线处理

寻峰模式下,当基线模式采用常量(constant)时,基线处理只涉及是否自动执行基线减除这一选项。当基线模式选择其他方式或执行峰值积分、分值拟合时,该流程涉及基线修改等选项。

3) 寻找峰值

通过以下步骤可实现寻峰,即自动检测峰值,过滤不需要的峰值以及手动添加、修改或删除峰值。

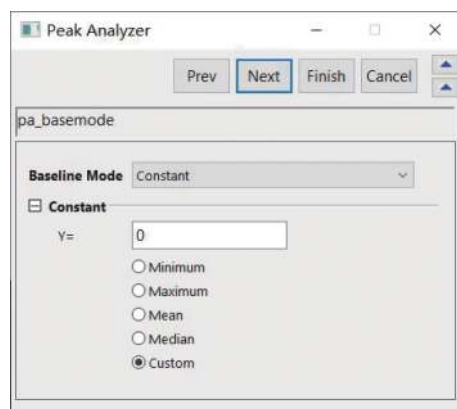


图7 基线设置

自动检测峰值的常用方法有:局部最大值法(local maximum)、窗口搜索法(window search)和一阶导数法(1st derivative)。

1) 局部最大值法通过比较目标点与最近的数个相邻点的值以确定最大值,可以通过设置相邻点的数目来扩大比较范围。

2) 窗口搜索法是将给定大小的窗口沿信号波形进行扫描,进而搜索窗口内最大值的方法。可采用绝对窗口值或相对窗口值定义窗口大小。

3) 一阶导数法的原理在于:峰值点处曲线的一阶导数为零。使用该方法时,需进行平滑处理,以便准确定位峰值位置。

自动检测峰值完成后,需要对检测结果进行筛选,滤除不需要的目标。筛选方式有两种:一种是使用高度阈值来剔除小于阈值的数据;另一种为控制峰值点数目,从信号首端开始,超过数目限值的峰值点将不被识别。对于经过自动检测和峰值过滤后,仍未被识别或需要滤除的峰值点,可进行手动添加、修改或删除,直到符合要求的所有峰值点全部被识别完毕,点击完成即可保存结果。取消勾选“自动查找(enable auto find)”选项即可开启手动添加或删除功能。

采用如图 8 所示的寻峰参数设置方式，所得图 3 测试曲线峰值点的详细信息如表 2 所示。

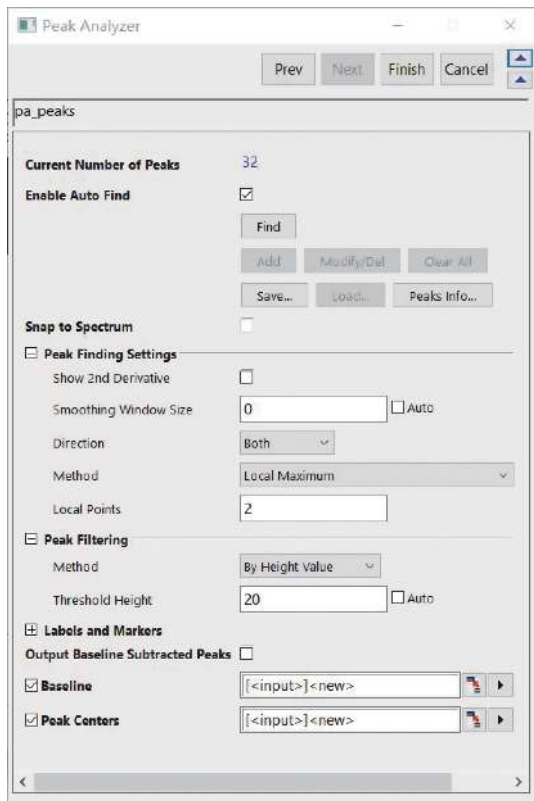


图 8 寻峰设置

3.3 统计计算

Origin 软件提供有许多适合于一般统计计算的功能，例如描述性统计、方差分析和假设检验等。此外，还可绘制包括箱型图、散点矩阵、概率图及小提琴图等在内的多种统计图表。其中，描述性统计用于计算数据集的最大/最小值、平均

值、标准差及分位值等基本统计特征量，是统计分析的基本步骤，旨在获取数据的基本情况。

选择“Statistics: Descriptive Statistics: Statistics on Columns”，可进行“列统计”，计算数据的描述性统计值。在该对话框中，使用“Input Data”指定数据分析范围，在“Quantities to Compute”中指定统计分析指标的类型，“Computation Control”用来指定权重、方差因子和分位数插值的算法。表 3 为表 2 中所列 32 个峰值动应力的统计特征值，表中分位值插值算法采用平均法经验分布(empirical distribution with averaging)。

表 2 动应力峰值

序号	时刻/s	峰值/kPa	序号	时刻/s	峰值/kPa
1	0.46	46.88	17	1.78	47.43
2	0.49	48.69	18	1.81	45.87
3	0.69	43.63	19	2.01	45.76
4	0.72	44.01	20	2.04	43.81
5	0.79	46.30	21	2.11	41.17
6	0.82	46.33	22	2.14	41.29
7	1.02	47.70	23	2.34	43.80
8	1.05	45.22	24	2.37	41.60
9	1.12	41.43	25	2.44	46.35
10	1.15	40.83	26	2.47	47.69
11	1.35	43.87	27	2.67	45.54
12	1.38	44.80	28	2.70	43.11
13	1.45	45.90	29	2.77	40.54
14	1.48	44.12	30	2.80	40.01
15	1.68	42.20	31	3.00	42.52
16	1.71	40.41	32	3.03	43.96

表 3 统计特征值

指标	数值/kPa	指标	数值/kPa
平均值	44.15	最小值	40.01
标准差	02.44	最大值	48.69
上四分位	46.10	中位值	43.99
下四分位	41.90	极差	08.68
平均值的95%置信区间上限	45.03	平均值的95%置信区间下限	43.27

描述性统计完成后，执行“Plot: Statistical”即可打开统计绘图对话框，进行数据可视化处理。统计绘图中较为常用的有箱线图和小提琴图，如图 9 所示。其中，a 信号为图 3 所示动应力时程曲线统计特征数据，b 信号为相同试验条件下不同行车速度时程曲线的对照数据。图中，箱型垂直范围为四分位距(IQR)， $IQR=上四分位(Q3)-$

下四分位(Q1)，垂向轴须长度表示内限区间中非异常数据最大值与最小值之间的范围，内限定义为 $(Q1-1.5 \times IQR, Q3+1.5 \times IQR)$ ，可将内限以外数据点视为异常数据，不参与统计。分析图 9 可知：a 信号数据较为集中，而 b 信号相对分散；动应力峰值的中位值表现为 a 信号略大于 b 信号；两组数据均未出现异常值。

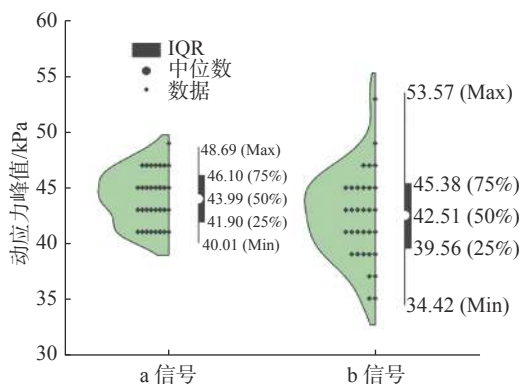


图9 小提琴图

4 教学效果反馈

针对实验教学效果,开展了涵盖81名学生的问卷调查,结果显示:92.59%的学生认为实验教学有助于加深对铁路路基在列车荷载下的动力响应认识;62.96%的学生认为小组内的交流合作锻炼了自己的团队协作能力;82.72%的学生认为依托计算机软件的教学提升了学习积极性。另外,针对后续实验教学课程的完善,有教师建议可丰富数据库中的实测数据,针对线路类型和等级开展对比分析,进一步加深对铁路路基动力特性的认识。

5 结束语

本文以铁道工程专业“路基工程”课程实验教学为基础,结合作者的科研内容,进行了以列车荷载作用下路基动力测试数据分析为主要内容的实验教学设计,旨在引导学生探讨铁路路基动力响应的基本规律。该实验教学设计,教学内容突出综合性,教学方法突出创新性,可较好地激发学生的科研兴趣和专业热情。将教师科研活动引入实验教学中是教学实验改革的积极尝试,必将促进西南交通大学专业性实验教学质量的提升,为学校“铁道工程”国家级一流本科课程建设提供支持。

参考文献

- [1] 徐承焱,王培龙,寇珏,等. 矿物加工工程专业实验课程改革与实践[J]. 实验科学与技术, 2019, 17(3): 94-99.
- [2] 温淑莲. 土力学综合性实验教学模式研究[J]. 实验室科学, 2016, 19(4): 142-144.
- [3] 虞俊超,陈翠红,徐利斯,等. GC-MS/MS在研究生实验教学中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(12): 204-207.
- [4] 杨溥,贾传果,刘立平,等. 工程实验与理论教学的融合方法研究[J]. 高等建筑教育, 2020, 29(1): 140-147.
- [5] 李福海,靳贺松,胡丁涵,等. 国际化趋势下建筑材料实验教学改革探讨[J]. 实验科学与技术, 2019, 17(3): 140-146.
- [6] 白蓝,刘媛. 基于科研成果的综合性创新实验教学设计[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(11): 179-182.
- [7] 张立春,吕弋,衣晓凤,等. 在化学综合创新实验教学中引入科学研究的探索[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(12): 191-196.
- [8] 王志强,左国才,陈新保,等. 科研成果转化为课程实验教学资源的研究与实践——以空间分析课堂实验教学改革为例[J]. 当代教育理论与实践, 2019, 11(6): 108-112.
- [9] 葛镜,余泽太,严建桥,等. 高校实验教学和管理新模式探索[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(3): 234-236.
- [10] 宋哲,冯秋菊. 教师科研引入“电子科学技术专业实验”课程教学模式的探索[J]. 实验科学与技术, 2018, 16(6): 71-74.
- [11] 陈虎,罗强,张良,等. 高速铁路CRTS II型板式无砟轨道路桥过渡段振动特性测试分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(1): 81-88.
- [12] 聂如松,梅慧浩,冷伍明,等. 重载铁路过渡段路基动力响应特性试验研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(5): 101-115.
- [13] 赵江萍,孙斌,赵玉晓. 滚动轴承远程故障诊断实验系统设计[J]. 实验室研究与探索, 2014, 33(10): 121-124.
- [14] 王蕾,姜志海,张新慧. 基于电网结构的电压稳定性分析实验教学设计[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(11): 169-173.
- [15] SAVITZKY A, GOLAY M J E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures[J]. *Analytical Chemistry*, 1964, 36(8): 1627-1639.

编辑 张俊