

非线性多层框架振动设备设计及教学应用

刘清华, 姜东

南京林业大学机械电子工程学院 江苏 南京 210037

[摘要] 弹簧、梁和板类结构的恢复力特性和振动力学分析是理论力学课程的重要内容, 了解弹簧、梁和板类结构的约束类型、刚度阻尼、运动学及动力学特性对提升学生认识理论力学中静力学、运动学和动力学部分内容具有重要作用。然而, 在很多学校的理论力学教学环节, 是不配置实验教学设备的。本项目拟设计一种涵盖理论力学静力学中约束类型及受力分析、运动学中点的合成运动及动力学中动能定理的实验设备, 包括电机旋转运动转化为直线运动的曲柄滑杆机构、梁连接的多层框架、局部非线性振子、传感器、数据采集系统及上位机。通过激励、安装、测试和后期处理软件让学生体验把理论拓展到实际工程中的快乐, 助力构建“理论力学联系工程振动”的教学方法。

[关键词] 梁板结构; 动力学特性; 多层框架; 振动实验; 理论力学教学

[中图分类号] 0311 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1687-9534(2025)-0099-63 **[收稿日期]** 2025-10-10

一、引言

梁板弹簧结构、曲柄滑杆机构、多层框架结构等部件中的静力学、运动学和动力学的教学内容占据着理论力学教育极其重要的地位^[1]。理论力学第一部分静力学涉及很多约束类型, 如铰链、轴承和滚动铰支座等; 理论力学第二部分运动学内容涉及点的运动合成定理; 理论力学第三部分涉及动能定理和拉格朗日方程等^[2]。设计一种激励-振动测试系统, 从而帮助学生直观了解理论力学中上述核心章节内容, 从实践角度增强学生对理论力学的理解深度具有关键作用^[3,4]。尽管, 市场上目前有部分公司在试制各种实验仪器服务于理论力学教学, 如武汉先导时代科技有限公司开发的理论力学智能多功能实验台, 可以实现单自由度系统变形、受迫振

动和转动惯量测试等内容。但是, 目前各大院校在理论力学相关教学过程中, 还是主要以简单多连杆结构实验教具为主, 具有结构简单易于操作的优点, 但功能单一。学生在学习过程中, 难以将理论力学中静力学、运动学和动力学内容联系到一个整体, 从而很难运用所学的知识服务于工程实践^[5]。

本项目旨在建立一个涵盖理论力学中静力学、运动学和动力学的多层框架激振测试系统, 这个系统涵盖很多理论力学学习中核心内容, 让学生直观了解约束类型、受力分析、摩擦力、点的速度和加速度合成定理、动能定理、单自由度到多自由度动力学分析等内容。项目实验装备主要包括: 电机-曲柄-滑杆结构、滑轨系统、含有局部非线性弹簧/梁的多层框架结构、数据采集和后处理软件

界面显示系统。电机-曲柄-滑杆机构能够为学生展示多种约束类型、受力分析、及运动学知识；滑轨系统和局部非线性弹簧/梁结构能够为学生展示摩擦力、变形、点的速度/加速度合成定理、动能定理等；而后处理模块能够直观显示运动信号和动力学信号的特征。各功能模块可以拆开带到课堂，从静力学、运动学到动力学均有相应的模块展示，当学完所有章节，所涉及振动系统又可以系统的回顾整个理论力学教学内容，从而显著提升学生对理论力学这门课的综合认识，还能提高学生动手理论力学实验能力，为培养机械工程领域尤其是高端装备振动与控制方向人才提供有力支撑^[6]。

二、实验台整体设计

非线性多层框架结构振动实验台，如图 1 所示，主要包括如下模块：1. 电机-曲柄-滑杆机构，如图 2 所示，通过调频器可以

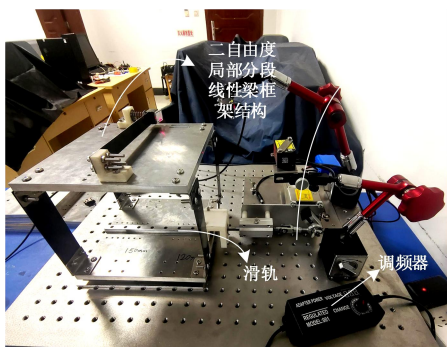


图 1 多层框架振动设备设计

三、实验台开发及教学应用

含局部非线性多层框架结构振动实验台，在理论力学教学中主要有如下应用。1. 多层框架系统涉及多种约束：轴承、平面固定端和滑轨（光滑接触表面约束）等，这些约束类型的受力分析对学生了解静力学第一

章至关重要。此外，电机-曲柄-滑杆机构到多层框架是一个复杂的系统，需要利用力学简图的形式分析力的传递，在理论力学第一章第四小节可以为学生提供现实案例。2. 电机-曲柄-滑杆机构，有利于理解刚体的平行移动、定轴转动、点的速度合成定理和加速

控制电机 600 转/分钟以下的转速，通过偏心轮形成曲柄结构，可以通过螺栓位置调节获得 0-15 毫米不同的偏心量，曲柄通过连杆结构连接一个滑杆，滑杆的激励行程可以通过偏心量控制，利用设计好的夹具可以连接到多层框架局部非线性梁结构，为多层框架的激励提供动力源。2. 多层框架梁结构主要包括滑轨结构、板结构、多根弹簧钢支撑梁、悬臂梁夹具、悬臂梁、外加碰撞弹簧、外加磁铁等。其中电机-曲柄-滑杆机构由滑杆夹具连接到滑轨结构，滑轨上布置有一层板，板的四个角留有安装孔，通过直角角码连接四个弹簧杆支撑梁，弹簧钢支撑梁上端继续通过角码连接另一层板结构；板结构的中间设置有夹具安装悬臂梁，悬臂梁末端通过碰撞弹簧或者磁力耦合形成分段线性、准零刚度、双稳态和三稳态刚度等。

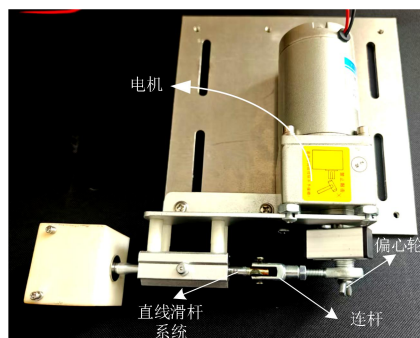


图 2 电机-曲柄-滑块结构样机

章至关重要。此外，电机-曲柄-滑杆机构到多层框架是一个复杂的系统，需要利用力学简图的形式分析力的传递，在理论力学第一章第四小节可以为学生提供现实案例。2. 电机-曲柄-滑杆机构，有利于理解刚体的平行移动、定轴转动、点的速度合成定理和加速

度合成定理等内容。3. 局部非线性多层框架实验装备, 可以包含多种非线性机构, 帮助学生理解悬臂梁变形、斜弹簧变形和钢丝绳变形等, 也可以帮助学生利用牛顿第二定律或者朗格朗日方程建立系统动力学方程。

(一) 电机-曲柄-滑杆模块

电机-曲柄-滑杆模块输出轴通过一个偏心轮连接到中间连杆, 连杆的末端通过销钉连接到滑杆上, 滑杆受到直线滑轨系统的双面约束作用, 只能做往复直线运动。这种机构在上理论力学第一章节时, 可以为学生展示存在哪些约束, 这些约束作受力时的原因是什么。如电机输出轴在两个轴承作用下转动, 限制了轴两个方向的位移, 因此画受力图是可以化成一个正交的分力; 连杆与直线滑轨连接依赖一根销钉, 这个销钉限制了连杆两个方向的位移, 这种光滑铰链约束在传动中起到重要作用; 直线滑杆受到滑轨系统的双面约束, 此时滑轨系统受力方向垂直

于接触面, 这又涉及光滑接触表面的约束问题。这种结构同样可以放在第二章运动学内容的部分章节中, 电机的输出轴做定轴转动, 连杆作平面运动, 直线滑轨系统做平行移动, 这有利于学生学习刚体的简单运动、点的合成运动和刚体的平面运动章节, 如给定各部件尺寸、电机转速和偏心距, 让学生求解直线滑杆的运动方程、速度和加速度等。

(二) 局部非线性模块

多层框架结构的核心部件是局部非线性模块, 局部非线性模块可以降低多层框架结构的振动, 在非线形振动抑制领域具有极其重要的作用。磁耦合悬臂梁(如图 3)、蝶形非线性弹簧(如图 4)和钢丝绳结构弹簧(如图 5)有利于学生理解不同结构力与位移关系, 即非线性刚度的概念, 无论是在理论力学中静力学和运动学部分章节内容理解, 还是在动力学中动能定理的理解都起到至关重要的作用。

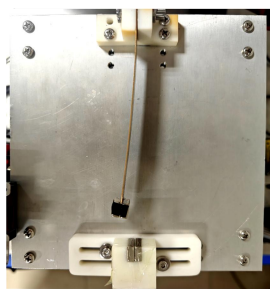


图 3 磁耦合悬臂梁

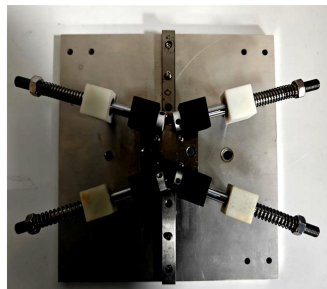


图 4 蝶形非线性弹簧

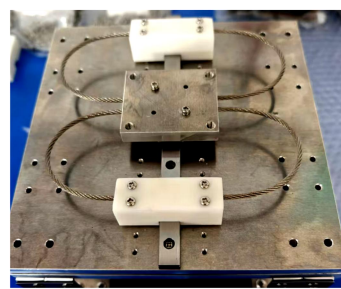


图 5 干摩擦钢丝绳弹簧

在教学应用上, 这三种结构主要是带领学生, 直观感受动力学章节中牛顿第二运动定律及动能定理的运用。悬臂梁在磁力耦合作用下屈曲时(双稳态)、蝶形弹簧载稳态平衡位置弹簧都处于压缩状态、钢丝绳弹簧结构在变形时不仅储存弹性势能也由于干摩擦

阻尼消耗了能量, 这些结构在受到激励作用下动能与势能的相互转化以及能量的耗散, 对学生理解理论力学动力学章节里面的定律极其重要。

(三) 多层框架模块

多层框架模块是电机-曲柄-滑杆模块+

局部非线性模块+支撑梁框架模块，支撑梁的作用是连接每一层板结构，每一层板相当于一个自由度，每一层板上又连接有局部非线性模块，形成另一个自由度。第一层板连接一个非线性结构形成一个二自由度结构，多层框架结构由这种二自由度结构串联而形成多自由度结构。这种结构的动力学建模可以采用牛顿第二定律也可以采用拉格朗日方程，有利于学生理解理论力学中动力学建模内容，了解能量的相互转化关系，为机械振动和非线性振动中模态和非线性模态的理解打下基础。

四、实验台深层次创新应用

依托含局部非线性的多层框架结构振动平台、传感器、数据采集卡和自主开发的后期处理软件界面，非线性多层框架结构振动实验装备已经成功应用于理论力学的教学环节，通过 PPT 视频展示和学生线下进实验室做实验的方式，显著提升了学生认识约束、熟悉受力图、熟练计算点的速度和加速度合成及刚体平面运动例题和理解动力学中动能定理/拉格朗日方程等内容。此外，含局部非线性多层框架结构振动实验装备，成功应用于机械工程专业本科毕业设计的实验验证，取得了较好的毕业设计成绩。同时，计划通过与国内机械优势学科高效开展校际合作、

参考文献：

- [1]袁青.“双一流”背景下学科交叉研究生培养探究—以南京航空航天大学航宇与力学学科为例[J].教育信息化论坛,2025,(05):97-99.

资源共享等方式，将这个非线性多层框架结构振动实验台应用于更多高校，开发更多功能不仅满足本科教学，还能应用于研究生的科研创作。

五、结语

非线性多层框架结构振动实验装备通过电机-曲柄-滑杆机构、多层框架结构及多种非线性模块，让学生直观体验理论力学课本中的约束类型、受力分析、摩擦力、点的合成运动、刚体的平面运动、动能定理的实验验证等内容。填补了目前理论力学教学中无实验设备教学的问题，为高校理论力学的实践教学提供了标准化、高效化的尝试，也为机械振动领域的研究搭建了前沿的探索平台。未来，非线性多层框架结构振动实验平台将持续推动高端装备动力学教育与科研创新，为祖国培养高端装备力学与控制人才持续发力。

基金项目：本文系 2025 年国家自然科学基金青年科学基金项目（C 类）“丘陵山地机器人变刚度高阻尼轮腿耦合隔减振机理及辨识方法”（12502011）研究成果。

作者简介：刘清华（1994-），男，汉族，安徽六安，博士，讲师，非线性振动测试；姜东（1985-），男，汉族，湖北天门，博士，副教授，副院长，转子动力学。

- [2]孙毅.理论力学第九版[M].高等教育出版社,北京,2023.

- [3]李欣业,杨理诚.机械振动第五版[M].清华大学出版社,北京,2016.

[4] 胡海岩, 金栋平, 王在华. 应用非线性动力学 [M]. 北京航空航天大学出版社, 北京, 2025.
[5] 陈恩惠, 税国双. 新工科背景下“理论力学”课程改革的探索与实践[J]. 教育教学论坛, 2024, (28): 108-112.

[6] 陈立群. 专业课程教学中的通识教育—以一般力学类课程为例[J]. 中国大学教学, 2024, (10): 33-37.

Design and Educational Application of Nonlinear Multi-Frame Vibration Equipment

Liu Qinghua, Jiang Dong

School of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing
210037, Jiangsu Province

Abstract: The analysis of restoring force characteristics and vibration dynamics in spring, beam, and plate structures constitutes essential components of theoretical mechanics courses. Understanding the constraint types, stiffness damping, kinematic, and dynamic properties of these structural systems plays a crucial role in enhancing students' comprehension of statics, kinematics, and dynamics within theoretical mechanics. However, many institutions lack experimental teaching facilities for theoretical mechanics instruction. This project proposes designing an experimental system integrating theoretical concepts such as constraint types and force analysis in statics, composite motion of points in kinematics, and kinetic energy theorem in dynamics. The system includes a crank-slider mechanism converting motor rotation to linear motion, multi-layer frames connected by beams, localized nonlinear oscillators, sensors, data acquisition systems, and a host computer. Through excitation, installation, testing, and post-processing software, students can experience the joy of applying theoretical knowledge to practical engineering, thereby facilitating the development of an "integrative teaching method linking theoretical mechanics with engineering vibration."

Keywords: Beam-plate structures; Dynamic characteristics; Multi-layer frames; Vibration experiments; Theoretical mechanics education