

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2021.03.019

起重机械振动主被动混合控制方法研究

邵静

(新疆石河子职业技术学院,新疆 石河子 832000)

摘要:为了解决低电压环境下起重机械振动位移应变高的问题,采用主动振动控制法,通过降低起重机械闭环传递函数共振峰处响应完成起重机械振动的初步控制;通过被动振动控制抵消压电片沿厚度方向与起重机械矩形板之间的振动获得压电应变位移,保证压电片振动方向与起重机械矩形板振动方向相反以及压电片与起重机械矩形板间相对轴向力大小一致、方向相反,完成起重机械振动的被动控制,实现起重机械振动的主被动混合控制。实验结果表明,所提方法降低了起重机械振动位移,且需要的控制输入电压均低于主动控制和被动控制法,说明采用所提方法的起重机械振动控制效果更佳。

关键词:起重机械;振动;主被动;混合控制

中图分类号:TH21 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)03-0072-04

Study on Active and Passive Mixed Control Method for Vibration of Lifting Machinery

SHAO Jing

(Xinjiang Shihezi Vocational and Technical College, Shihezi 832000, China)

Abstract: In order to solve the problem of high vibration displacement and strain of hoisting machinery under low voltage environment, the active vibration control method is adopted to reduce the response at the resonance peak of the closed-loop transfer function of the hoisting machinery to complete the preliminary control of the hoisting machinery vibration. Passive vibration control is used to offset the vibration between the sheet in the thickness direction and the rectangular plate of the hoisting machine to obtain piezoelectric strain displacement so as to ensure that the vibration direction of the piezoelectric sheet is opposite to the vibration direction of the rectangular plate of the hoisting machine, and the relative axis between the piezoelectric sheet and the rectangular plate of the hoisting machine direction force is the same but with opposite direction. Thus the passive control of the crane lifting machinery vibration is completed and the active and passive hybrid control of the crane vibration is achieved. The experimental results show that the proposed method has better effect in lifting machinery vibration control with the vibration displacement of the hoisting machinery being reduced and the required control input voltage being lower than that of the active control and passive control.

Keywords: lifting machinery; vibration; the lord passive; hybrid control

0 引言

起重机械具有质量轻、耗能低等优势,在空间操作技术中广泛应用。起重机械动力系统中常产生振动现象,降低起重机械的运动精度和稳定性,因此对起重机械中的振动控制十分必要。常用的起重机械振动控制包括主动控制、被动控制两种。前者控制采用形状记忆合金、压电材料等制成作动器或传感器,将其与起重机械中的弹性四连杆机构相连形成一体,该方法根据传感器内部参数变化对外部处理器作出反应,然后对作动器施加电压,完成对弹性四连杆机构动态变形的控制;后者采用阻尼大的黏弹性材料制作起重机械的弹性四连杆机构零件,改变柔性机构的动力学特征^[1]。两种方法分别对起重机械中柔性机构振动控制时,虽起到一定控制作用,但需要外部控制电压输入较大,且容易导致起重机械处在不稳定运行状态。

本文结合两种控制方法的振动控制优势,提出起重机械

振动主被动混合控制方法,提升起重机械振动控制性能,实现低电压环境下起重机械的高质量控制。

1 起重机械振动控制

1.1 主动振动控制法

起重机械中振动主动控制方法,能对输入的外部激励和结构的响应实时跟踪和预测^[2],还可通过作动器控制被控起重机械,改变起重机械系统特性,使起重机械结构和系统性能符合一定的优化准则,实现降低或抑制起重机械结构振动的目的。振动主动控制方法包括前馈控制和反馈控制两种,对起重机械振动的控制包括基于波动和模态方式两种,模态控制(反馈控制)起重机械振动侧重在起重机械的全局特性,波动控制(前馈控制)侧重控制起重机械中振动能量在机械中的传递^[3-5]。

基于模态的反馈主动控制振动结构如图1所示。误差

作者简介:邵静(1967—),女,河南商丘人,副教授,研究方向为机械加工。

振动信号 $e(s)$ 由起重机械输出 $y(s)$ 信号和参考信号 $r(s)$ 相减得出, 即 $e(s) = r(s) - y(s)$ 。误差振动信号在 $h(s)$ 补偿环节后直接作用到起重机械 $g(s)$ 上, 作动器通过补偿信号 $h(s)$, 在保证起重机械系统稳定运行的同时, 得到较好的振动控制效果。针对小阻尼的起重机械振动反馈控制, 分为基于模式的反馈控制和主动阻尼振动控制两种^[6]。

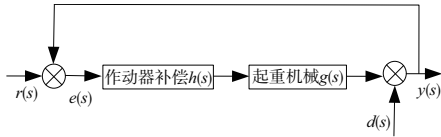


图1 基于模式的反馈主动控制振动结构图

主动阻尼振动控制目标是降低起重机械闭环传递函数共振峰处的响应 $f(s)$, 采用公式(1)表示传递函数:

$$f(s) = \frac{y(s)}{r(s)} = \frac{g(s)h(s)}{1+g(s)h(s)} \quad (1)$$

此时的传递函数除在共振峰处幅值响应减小外, 在其他状态时与 $g(s)$ 非常接近。主动阻尼需要恰当的作动器作为输出力, 主动阻尼振动控制可在不需要起重机械结构精确模型环境下^[7], 实现起重机械稳定运行时的振动控制, 主动阻尼振动控制实现需要作动器和传感器辅助实现。

基于模式的反馈控制可在起重机械特定频带内, 不论外界因素 $d(s)$ 如何变化, 均可控制起重机械某变量的变化, 见式(2)。

$$f(s) = g(s)h(s) \frac{y(s)}{d(s)} = \frac{1}{1+g(s)h(s)} \{g(s)h(s)\} \quad (2)$$

从式(2)分析看出, 起重机械外界影响处于较大频率范围时, 需要较大 $g(s)$ 和 $h(s)$ 值才可确保 $f(s)$ 值较小, 起到对起重机械振动的初步控制, 但主动振动控制无法对起重机械振动位移准确控制。因此须采用被动控制降低机械振动位移应变。

1.2 被动振动控制法

起重机械振动的被动控制, 通过压电材料和阻尼片间逆压电效应, 使压电材料得到与起重机械弹性四连杆机构中矩形板振动方向相反的振动, 此时的阻尼片提升矩形板的局部阻尼, 实现对起重机械矩形板振动被动控制。

1) 压电效应

向压电材料施力会产生机械变形, 产生机械变形同时材料表面会产生极性不同电荷, 因此可通过在压电材料表面接入不同电极, 使压电材料内部出现电荷运动, 致使材料产生机械变形^[8]。图2为压电材料的压电效应示意图。

压电效应本质为起重机械电能与机械能的耦合与转化过程, 该过程表示如下:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} & T_{15} & T_{16} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} & T_{25} & T_{26} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} & T_{35} & T_{36} \\ T_{41} & T_{42} & T_{43} & T_{44} & T_{45} & T_{46} \\ s_{51} & s_{52} & s_{53} & s_{54} & s_{55} & s_{56} \\ s_{61} & s_{62} & s_{63} & s_{64} & s_{65} & s_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & l_{13} \\ l_{21} & l_{22} & l_{23} \\ l_{31} & l_{32} & l_{33} \\ l_{14} & l_{24} & l_{34} \\ d_{15} & d_{25} & l_{35} \\ d_{16} & d_{26} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

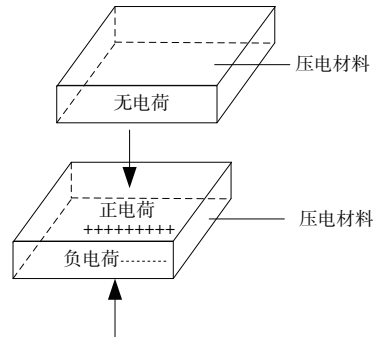


图2 压电材料压电效应示意图

其中: T, l 和 ε 分别表示弹性柔性系数、压电材料的应变常数以及介电常数; γ 为不加电场时的压电应变; σ 为应力; τ 为坐标轴间应力; d 为耦合系数; W 表示压电材料的弹性模量。

2) 压电应变位移

通常压电材料压电应变为三维应变, 在进行课题研究时需将压电片粘贴在起重机械矩形板上, 使压电片沿厚度方向的振动与起重机械矩形板振动相互抵消, 将压片沿厚度方向极化, 观察压电片在厚度方向振动^[9], 并简化压电方程为二维, 得到无电场影响时的压电片应力、应变位移结果。压电片处于力学自由状态并沿极化方向施加电场时的总压电应变位移表示为

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{W_c} & \frac{v_c}{W_c} & 0 \\ \frac{v_c}{W_c} & \frac{1}{W_c} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2(1+v_c)}{W_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_{31} \\ l_{32} \\ 0 \end{bmatrix} W_z \quad (4)$$

式中: W_c 和 v_c 表示压电材料的泊松比; $W_z = U/h_c$ 。式中 γ_{xy} 不包括 W_z , 即不外加电场作用, 因此可忽略外加电场对压电片的应变影响, 可将压电片总应变即起重机械矩形板应变位移用下式表示:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{W_c} & \frac{v_c}{W_c} \\ \frac{v_c}{W_c} & \frac{1}{W_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_{31} \\ l_{32} \end{bmatrix} W_z \quad (5)$$

同理获取压电片(起重机械矩形板应变)的电位移结果:

$$D_x = [l_{31} \quad l_{32} \quad l_{33}] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} + [\varepsilon_{31} \quad \varepsilon_{32} \quad \varepsilon_{33}] \begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix} = l_{31}(\sigma_x + \sigma_y) + \varepsilon_{33} W_z \quad (6)$$

假设在厚度为 h_2 的起重机械矩形板上粘贴一个长、宽分别为 L_c 和 h_c 的压电片, 使压电片在 z 轴方向极化, 并在该压电片施加电压 U 。

向压电片施加适当大小的电压, 保证电压片振动方向与起重机械矩形板振动方向相反^[10], 使压电片与起重机械矩形板间轴间力大小一致, 方向相反。

当压电片与矩形板间粘贴较强时忽略黏性材料厚度,

此时将压电片应变与矩形板间应力视为一致,如下式所示:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{cx} \\ \varepsilon_{cy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \end{bmatrix} = \frac{z}{\rho} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\rho = \frac{W_2 T}{M(1-\nu_2)} \quad (8)$$

式中: ρ 为压电片与矩形板间弯曲变形曲率; W_2 为矩形板弹性模量; ν_2 为泊松比; I 为截面惯性矩。

压电片沿 z 轴极化后,使 $d_{31} = d_{32}$,将式(8)代入式(7),得到压电片对起重机械矩形板的轴力 F 和力矩 M 表示式:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = b \int_{\frac{h_2}{2}}^{\frac{h_2}{2}+h_c} \begin{bmatrix} \sigma_{cx} \\ \sigma_{cy} \end{bmatrix} dz = b \int_{\frac{h_2}{2}}^{\frac{h_2}{2}+h_c} \begin{bmatrix} \frac{W_c}{1-\nu_c^2} & \frac{\nu_c W_c}{1-\nu_c^2} \\ \frac{\nu_c W_c}{1-\nu_c^2} & \frac{W_c}{1-\nu_c^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_{31} & \frac{U}{h_c} - \frac{z}{\rho} \\ l_{31} & \frac{U}{h_c} - \frac{z}{\rho} \end{bmatrix} dz \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \end{bmatrix} = b \int_{\frac{h_2}{2}}^{\frac{h_2}{2}+h_c} \begin{bmatrix} \frac{W_c}{1-\nu_c^2} & \frac{\nu_c W_c}{1-\nu_c^2} \\ \frac{\nu_c W_c}{1-\nu_c^2} & \frac{W_c}{1-\nu_c^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_{31} & \frac{U}{h_c} - \frac{z}{\rho} \\ l_{31} & \frac{U}{h_c} - \frac{z}{\rho} \end{bmatrix} z dz \quad (10)$$

式中: b 表示常数系数。通过上述过程,得到被动振动控制输出为

$$B_d = \frac{FMD_x}{W_z} \quad (11)$$

完成起重机械的主被动控制方法,为实现主被动联动混合智能控制,需对上述两种控制方法进行综合,则有

$$H_z = \frac{IB_d f(s)}{T_i} \quad (12)$$

式中 T_i 表示PC端实时控制系数。利用式(12)进行主动和被动控制自适应切换,完成起重机械振动的主被动混合控制,通过计算机的干涉,实现机械运作的智能控制。为检验本文方法的有效性,需对其进行实验验证。

2 实验分析

实验的目的是验证本文方法控制起重机械中振动的有效性,利用计算机仿真控制实际振动。以图3所示的起重机械设备为研究对象,实验主要仿真控制该起重机械弹性四连杆机构振动响应情况,同时,本文将采用Matlab7.0仿真软件记录测得数据波形,以便于分析。

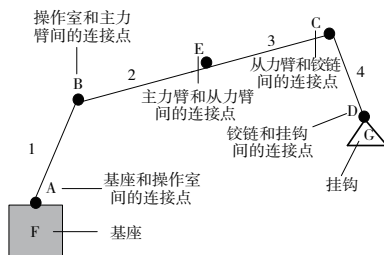


图3 起重机械设备

图3中,各点间的连接线分别代表不同的杆,这些杆通过各点相连,构成起重机的弹性四连杆。起重机械中弹性四连杆机构中各构件均具有弹性且连杆表面也覆盖弹性材料。在弹性材料表面上添加电压片,并将图3连杆分为左、右两部分,形成一个多输入和输出的系统,其中挂钩G处悬挂质量为0.046kg的集中质量。起重机械弹性四连杆机构的构件以及压电片材料尺寸如表1所示。

表1 构件以及压电材料尺寸 单位:m

构件与材料	长度	宽度	高度
曲柄	0.20	0.13	0.015
连杆	0.52	0.13	0.013
摇杆	0.52	0.13	0.013
机架	0.50	—	—
PVDF(聚偏氟乙烯)	0.52	0.13	0.001 11

起重机械弹性四连杆机构构件的弹性模量和密度分别为2.1GPa和1790kg·m⁻³,PVDF(聚偏氟乙烯)弹性模量和密度分别为71GPa和2710kg·m⁻³,且压电应变常数 d_{31} 和应力常数 g_{31} 分别为 $2.4 \times 10^{-1} \text{ m} \cdot \text{V}^{-1}$ 和 $217 \times 10^{-1} \text{ V} \cdot \text{m} \cdot \text{N}^{-1}$ 。

实验根据图3中E点的振动位移变化情况作为判断振动控制效果的优劣,采用STC数字式多功能振动校验设备获取位移变化结果。为突出本文方法对起重机械弹性四连杆机构构件振动的控制效果,将未采用任何控制方法的E点位移变化结果为实现参照,结果分别如图4和图5所示。

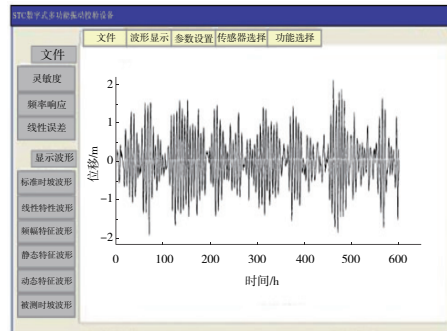


图4 未采用任何控制方法的E点位移变化结果

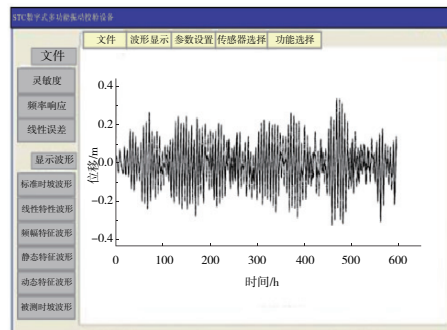


图5 本文方法的E点位移变化结果

对比图 4 和图 5 中 E 点位移变化结果可得,未采用任何振动控制方法前起重机械弹性四连杆机构件 E 点的振动位移变化幅度较大,振动位移值接近 2 m;采用本文方法振动控制后,E 点振动位移变化值低于 0.4 m。结果表明,本文方法可一定程度控制起重机械由于振动产生的位移变化,降低起重机械中的振动位移。

为进一步验证本文方法用于控制起重机械振动的优越性,考虑不同厚度黏弹性材料在不同控制微分增益下对振动控制输入和振动控制效果的影响,假设黏弹性材料厚度为 1.3 mm,控制增益值 K_s 为 10^5 ,控制波动 J_1 和控制输入电压 J_2 用下式表示:

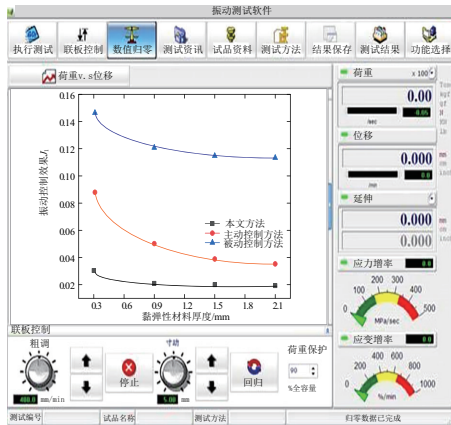
$$J_1 = \frac{1}{E_s} \int_0^E y^E y dt \quad (13)$$

$$J_2 = \frac{1}{E_s} \int_0^E V_c^E V_t dt \quad (14)$$

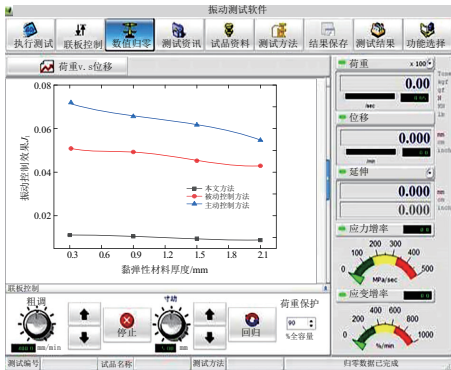
式中: J_1 越小表明振动控制效果越好, J_2 值表明方法在振动控制时需要的输入控制电压较小; y 表示控制点的输出响应; V_c 表示振动控制输入电压; E 为起重机械弹性四连杆机构件的运动周期。

采用振动测试软件统计 K_d 微分增益值在 10^4 和 10^5 的振动控制波动和输入控制电压分别如图 6 和图 7 所示。

从图 6 可以看出,在不同微分增益值时本文方法振动控制波动 J_1 值均低于被动控制方法和主动控制方法,振动控制效果呈现出被动控制方法 < 主动控制方法 < 本文方法的结果,且存在振动控制波动随黏弹性材料厚度增加而减低的效果。

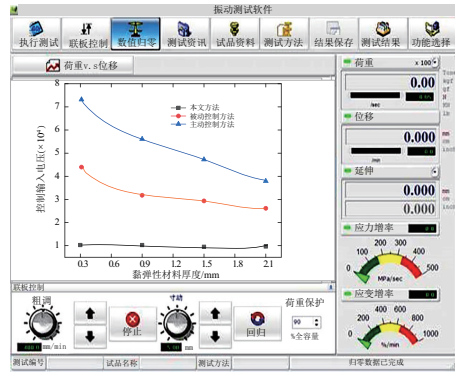


(a) 微分增益值在 10^4 时三种方法振动控制波动

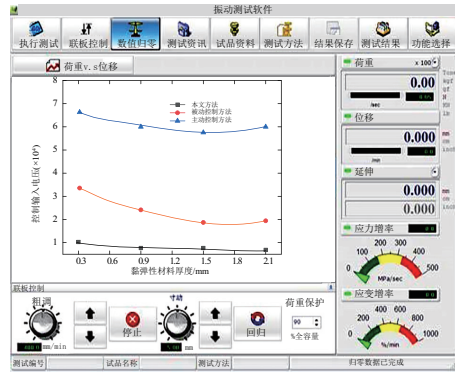


(b) 微分增益值在 10^5 时三种方法的振动控制波动

图 6 不同微分增益下的振动控制波动



(a) 微分增益值为 10^4 时三种方法控制输入电压



(b) 微分增益值为 10^5 时三种方法控制输入电压

图 7 不同微分增益下的振动输入电压

从图 7 可以看出,本文方法在微分增益值为 10^4 时控制起重机械弹性四连杆机构件振动所需的控制输入电压随黏弹性材料厚度变化波动不明显,且控制输入电压值较小;而采用被动控制和主动控制方法需要的控制输入电压值较大,且随黏弹性材料厚度变化明显;同样分析微分增益值为 10^5 时三种方法的振动控制输入电压,结果可得:本文方法所需的控制输入电压随黏弹性材料厚度增加而降低,输入电压始终较小;而另外两种方法的控制输入电压虽有一定程度降低,但始终高于本文方法的幅度,表明本文方法的振动控制效果优于主动控制和被动控制法,且振动控制时仅需较小的输入电压。

3 结语

本文将主动控制和被动控制混合用于控制起重机械振动,有效地将两种方法的控制结合在一起,共同完成对起重机械振动位移的高质量控制,且在振动控制时需要的控制输入电压值较小,有利于在低电压环境下实施振动控制,是一种实用度高的振动控制方法。

参考文献:

[1] 金鑫,林益帆,谢双义,等. 漂浮式风力机混合振动控制[J]. 太阳能学报, 2020, 41(11): 261-266.
 [2] 马建国, 帅长庚, 李彦. 旋转机械主被动混合隔振虚拟样机技术及实验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(9): 285-291.
 [3] 邵敏强, 杨雨田, 杨志甫, 等. 车载系统主被动联合振动控制研究[J]. 力学季刊, 2018, 39(1): 148-155.

(下转第 79 页)

奖(或金奖)5人。徐婷教员受邀参加第三届全军院校图学与机械基础青年教师教学法观摩活动,进行示范授课,并为全院教员进行公开示范授课,为提升全院教员的教学质量发挥积极作用。

2) 教学内容体系完善

基于以在线平台为基础的混合式教学模式改革的需要,重新构建了教学内容体系,全面梳理了课程知识点,编写了《机械基础课程导学手册》和自编教材,在线平台上系统性地介绍了课程知识单元的学习要点、学习方法、疑难问题求证,典型例题解答等,导学效果明显。

3) 教学资源丰富

在线平台上传了配套开发的多媒体动画700余幅、工程案例20余个,建成了《机械基础》网络课程,获大学信息化教学资源评比二等奖。基于大学SPOC教学平台建设了《机械基础》在线课程,拥有较为完善的在线课程资源库,开发的机械基础系列微课获江苏省微课大赛二、三等奖3项。

4) 教育教学改革研究成果丰硕

课程组教员完成校级教育教学研究课题5项,2项为优秀;院级教研课题6项,3项为优秀。徐婷教员探索实践的《在线教学及翻转课程教学法》被评为大学优秀教改课程。课程组教员近两年来在《教育学》《机械研究与应用》《理工大学智慧课堂》等重要期刊上发表教研论文10余篇。研究成果在“第三届军队院校图学与机械基础综合学术会议”上进行了交流,扩大了教研成果的影响面。

5) 学员自主学习意识和能力提高,教学质量明显提升

学员通过在线自主学习,总点击量超过1万次以上,SPOC课目前网上教学累计达1260多人次,课程教学质量明显提升。近三年的教学实践分析,课程考试平均成绩逐年提高,平均成绩依次为80.5分、82.03分、84.34分。近年来,课程教学中,学员提出了近百项机械创新课题,作品共获“全国机械创新设计大赛”及“全国机器人大赛”一等奖15项、二等奖16项;江苏省大赛一等奖27项,二、三

等奖28项;大学“卓越杯”科技创新竞赛一等奖4项;大学优秀毕业设计成果6项。

5 结语

探索实践证明,在专业课教学中采取基于在线平台的混合式教学模式,虽然存在一定的难度和问题,但只要加以重视,积极应对,就是一种很好的创新性教学实践方法。它有助于促使教员转变教育观念,有助于学生整体素质的提高和教学质量的稳步提升。课程组将继续践行教学改革,探索提出更加适应新形势下人才培养目标的混合式教学模式,以促进信息技术与军校专业课程教学的全面、深度融合。

参考文献:

- [1] 马玉丽,张冬梅.混合式教学模式的研究[J].青岛远洋船员职业学院学报,2016,37(1):59-62.
- [2] 张骊宇.基于翻转课堂的混合式教学模式探索与实践——以人力资源管理综合实训课程为例[J].青岛职业技术学院学报,2018,31(5):48-51.
- [3] 林立芹,丁路娟.以学生自主学习能力的培养为导向的混合式教学设计[J].中国多媒体与网络教学学报(中旬刊),2018(12):48,71-72.
- [4] 李红英,丁建党.工程类本科专业技术基础课程教学模式改革与实践[J].高教论坛,2013(11):64-66,72.
- [5] 林莉兰.混合式学习模式下高校网络自主学习及评价活动调查[J].中国电化教育,2016(11):74-78.
- [6] 张其亮,王爱春.基于“翻转课堂”的新型混合式教学模式研究[J].现代教育技术,2014,24(4):27-32.
- [7] 王广政,徐代忠,刘华丽,等.军校本科工程类课程混合式教学模式研究[J].解放军理工大学学报(军事科学版),2017(2):68-73.
- [8] 唐建,徐代忠,柏林元,等.军校本科课程考核模式探析——以理工大学为例[J].解放军理工大学学报(军事科学版),2017(1):65-70.

收稿日期:2020-06-16

(上接第75页)

- [4] 董明晓,韩松君,梁立为,等.平头塔式起重机起重臂在回转运动中振动响应分析[J].中国工程机械学报,2019,17(5):419-422.
- [5] 杨京昊,董明望,辜勇.基于Simulink的混合动力起重机建模与仿真[J].起重运输机械,2020(9):55-60.
- [6] 张国臣.起重机混合动力系统控制策略的研究[J].内燃机与配件,2019(3):0-181.
- [7] 申永红.基于喷气压电驱动器的机械振动主动控制研究[J].

机械设计与制造工程,2019,48(1):123-126.

- [8] 周强,张志纯,龙志林,等.考虑表面效应的压电纳米梁的振动研究[J].应用数学和力学,2020,41(8):853-865.
- [9] 班朋,朱由锋,王强,等.一种混合控制半主动悬架的非线性振动分析[J].计算机仿真,2019,36(9):147-151,167.
- [10] 吴昊,张洵安.巨子有控结构体系非线性地震响应的半主动控制[J].地震工程与工程振动,2017,37(5):155-161.

收稿日期:2021-01-11