

舰载机阻拦装置原理可视化教学设计与实践

覃海波, 高富东, 王海东, 曹海龙

海军航空大学青岛校区 山东 青岛 266041

[摘要]针对舰载机阻拦装置相关课程装备理论复杂、工作原理抽象的特点, 基于 Matlab/Simulink 平台搭建装置系统仿真模型, 联合 Matlab App Designer 设计用户可视化界面, 并完成仿真模型与用户界面间的实时数据交互, 通过学员自主设置初始运行参数, 输出舰载机与阻拦装置各分系统关键参数随阻拦过程的变化情况, 发挥了学员学习主观能动性, 破解了传统教学方法难以展示系统动态特性的问题, 体现了学为中心的教学理念。

[摘要]Matlab Simulink; App Designer; 阻拦装置; 可视化教学

[中图分类号] G641 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1647-9234(2023)-0031-01 **[收稿日期]** 2023-10-21

一、引言

舰载机阻拦装置是搭载于航母用于回收着舰飞机的关键装备^[1], 深刻理解其工作原理和关键性能参数的变化规律, 是阻拦装置装备执掌人员的必备能力。

为帮助装备执掌人员在校学习期间夯实专业基础、深刻理解舰载机阻拦装置装备原理, 课程组采取了多种教学手段: 一是通过对阻拦装置各分系统进行原理分析、建立数学模型、推导得到关键参数的解析解, 学员普遍反映相关内容理论性太强, 计算过程复杂, 所得结果难以理解; 二是开发阻拦装置工作过程动画, 来直观展示其工作过程, 有效解决了工作原理抽象的问题, 但是无法展示关键参数的变化趋势, 学员依然存在“知其然而不知其所以然”的学习困境。因此, 该部分教学内容存在学生难学、教师难教的“两难”现象, 亟需一种新的教学方法, 将难以理解的模型和公式具体化, 同时可动态展示阻拦装置关键参数随阻拦过程的变化情

况。

可视化教学是一种借助二维或三维图形、动画和实物影像等手段, 将抽象的教学内容具体化, 以提高学习者学习效率和学习能力的教学方法。张乐平等^[2]针对电机与拖动基础课程教学内容抽象的特点, 提出了一种基于 3D 动画、ANSYS 有限元仿真与 LabVIEW 虚拟实验的系统化解决方案; 周魁斌等^[3]为优化火灾动力学与火灾风险评估课程教学效果, 基于 Matlab 构建池火灾模型并开展交互界面设计, 使学生直观理解池火灾对周边环境产生的热辐射损伤; 孙毅超等^[4]针对电力电子技术课程实践性、综合性强的特点, 基于 Matlab 开发了课程可视化教学平台, 有效提升了课程教学效果; 苏彦涛等^[5]针对大学物理课程机械波相关教学内容概念抽象、理论性强、难以理解的问题, 基于 Matlab 构建平面简谐波模型, 设计图形用户界面, 方便学生深刻理解机械波的传播、叠加、干涉与驻波现象。

上述文献通过构建课程可视化教学工具/平台,有效解决了教学内容理论性强、概念抽象、难以理解的问题。为此,本文拟借鉴相关文献成果思路,通过理论推导建立美军航母 MK7-3 型液压缓冲式阻拦装置各分系统数学模型,然后借助 Matlab Simulink 搭建阻拦装置全系统仿真模型,同时基于 Matlab App Designer 设计可视化界面,在完成模型侧与界面侧实时数据交互的基础上,实现在设置系统初始运行参数后,输出阻拦机、滑轮缓冲装置、钢索末端缓冲装置等阻拦装置关键分系统运行参数,以及舰载机过载、速度、位移等重要变量随阻拦过程的变化曲线,为舰载机阻拦装置原理教学提供一种新方案。

二、阻拦装置系统建模

液压缓冲式舰载机阻拦装置主要由阻拦机分系统、控制系统、缓冲系统、钢索系统及辅助系统等五大分系统组成。

2.1 阻拦装置数学模型

(1) 阻拦机主液压缸

主液压缸柱塞加速度 L'' 满足

$$L'' = \frac{36F_T - (D_p + P_a)A_p}{M} \quad (1)$$

式中: F_T 为钢索张力; D_p 为凸轮阀前后压差; A_p 为柱塞面积; M 为柱塞质量。

P_a 为蓄能器压力,满足

$$P_a = \frac{P_0 L_x^{1.4}}{(L_0 - L)^{1.4}} \quad (2)$$

式中: P_0 为蓄能器初始压力; L_0 为蓄能器气腔长度; L 为主液压缸柱塞位移。

(2) 控制系统凸轮阀及其驱动系统

凸轮阀前后压差 D_p 满足

$$D_p = \frac{rou(A_p L')^2}{2C_d^2 A_0^2} \quad (3)$$

式中: L' 为主液压缸柱塞速度; C_d 为凸轮阀阀口流量系数。

凸轮阀阀口节流面积 A_0 满足^[6]

$$A_0 = \pi d_v h_v \sin \omega (1 - \sin 2\omega) \left(\frac{h_v}{2d_v} \right) \quad (4)$$

式中: d_v 为阀口直径; ω 为锥形阀顶角的 0.5 倍。凸轮阀阀芯开度 h_v 满足

$$h_v = -0.0002L^2 + 0.0012L + 0.2926 \quad (5)$$

凸轮阀流量系数 C_d 满足^[6]

$$C_d = C_v C_c = 3.126M^{-0.111} 1.1A_0^{-0.217} \quad (6)$$

式中: C_v 为速度损失系数; C_c 为面积收缩系数。

(3) 缓冲系统滑轮缓冲装置

滑轮缓冲装置活塞加速度 L_h'' 满足

$$L_h'' = \frac{2F_T \cos \beta - (D_{ph} + P_{hx})A_{hhp}}{M_{hhp}} \quad (7)$$

式中: A_{hhp} 为活塞面积; M_{hhp} 为活塞质量。

β 为滑轮缓冲装置活塞与滑轮组索夹角,满足^[7]

$$\cos \beta = \frac{2rh + (H - L_h) \sqrt{(H - L_h)^2 - (2r)^2 + h^2}}{(H - L_h)^2 + h^2} \quad (8)$$

式中: h 为垂直导向滑轮与穿越甲板滑轮间距的 0.5 倍; r 为动滑轮半径; H 为穿越甲板滑轮与动滑轮间距; L_h 为滑轮缓冲装置活塞位移。

D_{ph} 为滑轮缓冲装置流量控制阀阀口压差,满足

$$D_{Ph} = \frac{\rho(A_{hhp}L_h')^2}{2(A_{hhv1}C_{hhv1})^2} \quad (9)$$

式中： ρ 为液压油密度； L_h' 为活塞速度； A_{hhv1} 为滑轮缓冲装置流量控制阀阀口面积； C_{hhv1} 为滑轮缓冲装置流量控制阀流量系数。

P_{hx} 为滑轮缓冲装置蓄能器压力，满足

$$P_{hx} = \frac{P_{hhx0}V_{hhx0}^{1.4}}{(V_{hhx0} - L_h A_{hhp})^{1.4}} \quad (10)$$

式中： P_{hhx0} 为蓄能器初始压力； V_{hhx0} 为蓄能器初始体积。

(4) 缓冲系统钢索末端缓冲装置

钢索末端缓冲装置工作活塞加速度 L_m'' 满足

$$L_m'' = \frac{F_{Tm} - P_m A_{md}}{M_{md}} \quad (11)$$

式中： F_{Tm} 为末端钢索张力； M_{md} 为工作活塞质量； A_{md} 为工作活塞面积。

钢索末端缓冲装置工作阀体压力 P_m 为

$$\begin{cases} P_m = P_z & ; L_m' \geq 0 \\ P_m = P_z + \frac{\rho(A_{md}L_m')^2}{2(A_{mdv}C_{mdv})^2} & ; L_m' < 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中： P_z 为主液压缸压力； A_{mdv} 为钢索末端缓冲装置流量控制阀阀口面积； C_{mdv} 为钢索末端缓冲装置流量控制阀流量系数。

(5) 钢索系统

阻拦装置被拉出至甲板的滑轮组索长度 LL 满足：

$$LL = 2L_h + 18L - L_m \quad (13)$$

式中： L 为主液压缸活塞位移； L_h 为滑轮缓冲装置活塞位移； L_m 为末端缓冲装置活塞位移。

根据飞机位移与甲板钢索布局关系得到

$$LL = \sqrt{y^2 + L_a^2} - L_a \quad (14)$$

联立式(13)与式(14)，求二阶导得^[7]

$$2L_h'' + 18L'' - L_m'' = \frac{y^2 + \dot{y}\dot{y}}{\sqrt{y^2 + L_a^2}} - \frac{(y\dot{y})^2}{\sqrt{(y^2 + L_a^2)^3}} \quad (15)$$

式中： L_h'' 为滑轮缓冲装置活塞加速度；

L'' 为主液压缸柱塞加速度； L_m'' 为末端缓冲装置工作活塞加速度； L_a 为 0.5 倍阻拦索甲板跨距； y 、 y' 与 y'' 分别为为飞机位移、速度与加速度。

2.2 飞机着舰阻拦动力学模型

在阻拦过程中，舰载机冲跑角度 θ 满足^[8]

$$\theta = \arcsin\left(\frac{L_a}{\sqrt{L_a^2 + y^2}}\right) 180/\pi \quad (16)$$

舰载机甲板平面所受合力 F_y 满足

$$F_y = F_e - 2F_T \cos \theta = my'' \quad (17)$$

式中： F_e 为发动机推力； m 为着舰飞机质量

2.3 系统模型搭建

根据第 2.1 节与 2.2 节阻拦过程飞机与阻拦装置数学模型，基于 Matlab/Simulink 平台搭建飞机阻拦着舰与液压缓冲式阻拦装置全系统仿真模型，并保留变量交互接口，系统仿真框图如图 1 所示。

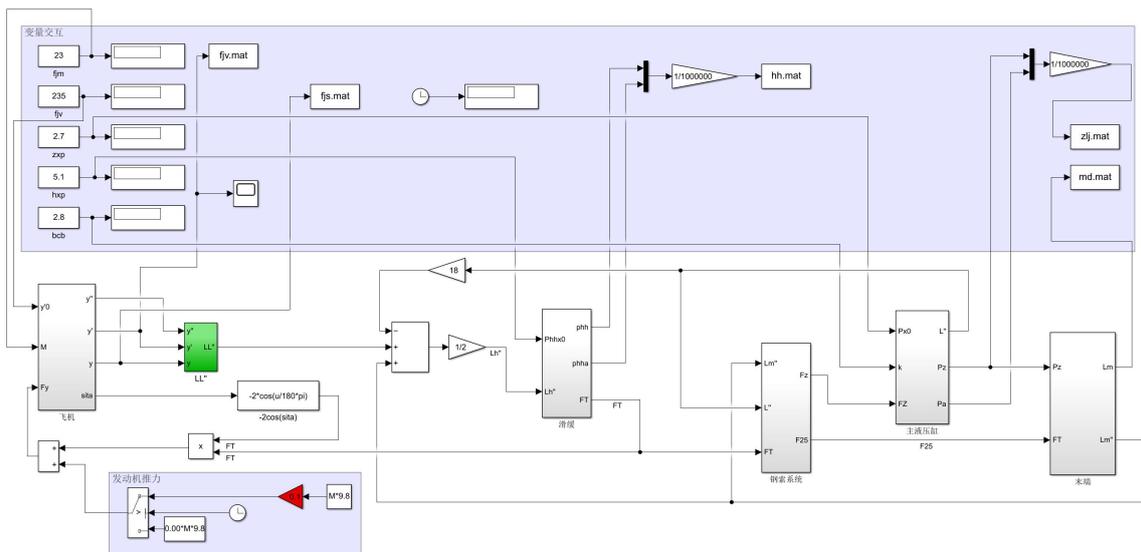


图 1 全系统仿真框图

三、用户可视化界面设计

基于 Matlab App Designer 创建“液压缓冲式阻拦装置工作特性计算软件”APP 后，对图形用户界面进行控件布局设计与后台脚本编写，并完成与图 1 所示系统仿真模型间的变量交互，以动态展现舰载机阻拦过程飞机与阻拦装置关键变量的变化趋势。

可视化教学图形界面布局如图 2 所示，教学图形界面包括六个选项卡组，分别对应初始界面、参数设置界面、舰载机、阻拦机、滑轮缓冲装置与钢索末端缓冲装置等六个子界面。其中，舰载机、阻拦机、滑轮缓冲装置与钢索末端缓冲装置四个子界面为仿真结果输出界面。

3.1 初始界面

在启动软件的过程中，后台完成初始化参数加载，并进入初始界面。



图 2 可视化教学图形界面布局

3.2 参数设置界面

参数设置界面如图 3 所示，该界面主要用于完成“加载模型”、“设置参数”与“启动仿真”三项操作。



图 3 参数设置界面

“加载模型”按钮用于启动位于软件工作目录中的 Simulink 仿真模型，该仿真模型用于后台变量计算与输出。

“设置参数”指设定关键仿真变量的初始值，主要包括着舰飞机重量、着舰飞机速度、阻拦机蓄能器初始压力、滑轮缓冲装置蓄能器初始压力、凸轮阀臂长比等变量；其中，“仿真时间”为 Simulink 仿真模型输出的飞机阻拦时间，其在仿真模型运行过程中实时动态更新。

在完成仿真初始参数设置后，点击“启动仿真”按钮，开始仿真计算，并实现仿真数据的动态交互。

3.3 仿真结果输出界面

在学员自主设置仿真参数并启动仿真的基础上，可视化教学图形界面可输出相应仿真结果，输出界面如图4至图7所示。仿真结果输出界面用于显示阻拦过程中舰载机相关状态量，以及阻拦装置阻拦机、滑轮缓冲装置与钢索末端缓冲装置等分系统关键状态量的变化情况，展示方式为输出以上状态参数随阻拦时间的变化曲线。

(1) 舰载机

舰载机状态参数显示界面如图4所示，该界面主要用于显示飞机冲跑速度与飞机冲跑位移随阻拦时间的变化趋势，随着阻拦的进行，飞机速度不断减小至0，飞机位移增大至90米左右后停止。

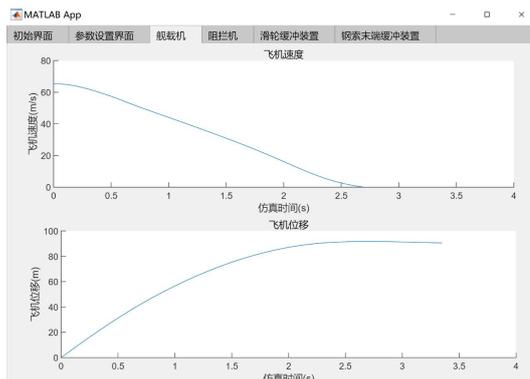


图4 舰载机状态参数显示界面

aircraft

(2) 阻拦机

阻拦机状态参数显示界面如图5所示。该界面主要用于显示阻拦机主液压缸油压与蓄能器压力随阻拦时间的变化情况。其中，主液压缸油压反映了阻拦过程中阻拦力的基本变化情况，随着阻拦的进行，主液压缸油压呈现出先迅速上升，而后基本维持平稳，最后快速下降的变化趋势。

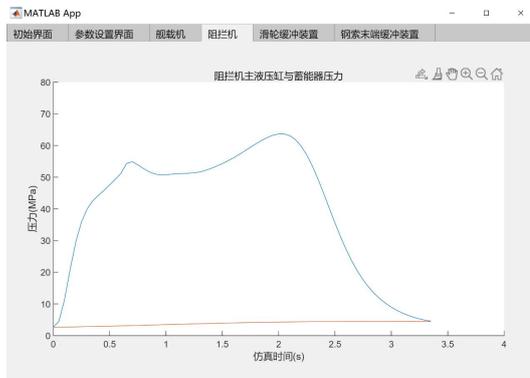


图5 阻拦机状态参数显示界面

(3) 滑轮缓冲装置

滑轮缓冲装置状态参数显示界面如图6所示，该界面主要用于显示滑轮缓冲装置液压缸油压与蓄能器压力随阻拦时间的变化情况。滑轮缓冲装置主要用于削减阻拦初期钢索峰值张力，因此在阻拦的初始阶段，装置

液压缸油压会迅速上升。

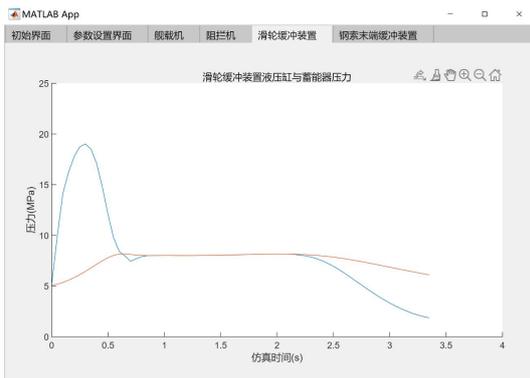


图6 滑轮缓冲装置状态参数显示界面

device

(4) 钢索末端缓冲装置

钢索末端缓冲装置状态参数显示界面如图7所示，该界面主要用于显示钢索末端缓冲装置活塞杆随阻拦时间的变化情况。在阻拦初期，滑轮组索末端的钢索会出现不同程度的松弛，为了张紧末端滑轮组索，预防舰载机在阻拦过程中出现大范围偏移，钢索末端缓冲装置通过借助来自主液压缸的油压，驱动工作活塞杆向液压缸内部动作，因此在阻拦初期钢索末端缓冲装置工作活塞杆位移迅速增大。

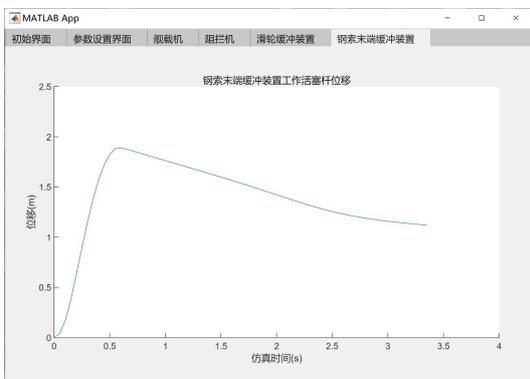


图7 钢索末端缓冲装置状态参数显示界面

四、结语

本文利用 Matlab Simulink 与 App Designer 开发设计了一套舰载机阻拦装置原理可视化教学平台，平台集参数设置、舰载机与阻拦装置关键状态参数输出等功能于一体。该可视化教学平台借助成熟计算机仿真软件，实现了节约教学成本、简化教学过程、提升教学质量的效果，是对传统理论推导或动画展示等教学手段的有效补充和完善。与此同时，平台为学员提供了一种自主探究实践工具，激发了学员的学习兴趣，加深了学员对装置原理的理解，有助于提升学员的实践操作能力，充分体现了学为中心的教學理念。

参考文献：

- [1] 谢朋朋, 彭一明, 魏小辉, 等. 设计及弯折波的舰载飞机偏心拦阻动力学分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(8): 1582-1591.
- [2] 张乐平, 杨迎新, 杨迟. “电机与拖动基础”课程的可视化教学研究[J]. 萍乡学院学报, 2022, 39(3): 91-95.
- [3] 周魁斌, 王秀珍. 基于 MATLAB GUI 的池火灾热辐射特性虚拟仿真实验与可视化教学[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(5): 82-88.
- [4] 孙毅超, 冯树先, 姜宁秋, 等. “电力电子技术”可视化教学平台设计与实现[J]. 电气电子教学学报, 2022, 44(1): 22-25.
- [5] 苏彦涛, 宋家琪, 于永芹. Matlab

APP Designer 在大学物理机械波可视化教学中的运用[J]. 创新创业理论研究与实践, 2022, 1(2): 25-28.

[6] 张智, 闻子侠, 朱齐丹, 等. 舰载机阻拦过程动力学仿真[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 35(5): 571-579.

[7] 马玲. 飞机着舰阻拦仿真分析研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.

[8] 张智, 闻子侠, 朱齐丹, 等. 舰载机阻拦过程动力学仿真[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 35(5): 571-579.

作者简介: 覃海波(1991-), 男, 湖北宜昌人, 博士, 讲师, 主要从事舰面航空保障相关的教学与科研工作; 高富东(1981-), 男, 吉林桦甸人, 博士, 副教授, 主要从事舰面航空保障相关的教学与科研工作; 王海东(1976-), 男, 山东安丘人, 硕士, 副教授, 主要从事舰面航空保障相关的教学与科研工作; 曹海龙(1988-), 男, 山东安丘人, 硕士, 讲师, 主要从事舰面航空保障相关的教学与科研工作。

Design and practice of principles visualization teaching of carrier-based aircraft arresting gear

QIN Haibo, GAO Fudong, WANG Haidong, CAO Hailong

(Qingdao Campus of Naval Aviation University, Qingdao, Shandong 266041, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of complexity of equipment theory and abstraction of operating principle of the course of carrier-based aircraft arresting gear, the system simulation model is built based on Matlab/ Simulink platform, and the user visualization interface is designed with Matlab App Designer, and the real-time data interaction between the simulation model and the user interface is completed. With the independent setting of the initial operating parameters by students, the transformation law of key parameters of each subsystem of carrier-based aircraft arresting gear is putout, which gives full play to the students' subjective initiative in learning and breaks the problem that the traditional teaching methods are difficult to show the dynamic characteristics of the system, and embodies the learning-centered teaching concept.

Keywords: Matlab Simulink; App Designer; arresting gear; visualization teaching