

doi: 10.7690/bgzdh.2024.07.020

某 82 速迫新型供弹系统及其多体动力学仿真分析

薛德宸, 何永, 散天泽, 胡元涛

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 针对目前速射迫击炮供弹系统自动化程度不足的问题, 基于 82 速射迫击炮设计一种结构紧凑、供弹稳定可靠的新型供弹系统, 并进行跨平台的机电系统联合仿真研究。供弹系统采用可抛弃弹荚供弹方式, 能够实现密排弹舱布置, 提高系统携弹量, 可快速完成迫击炮连续自动射击; 为验证供弹系统供弹过程, 利用动力学软件 Adams 和控制分析软件 Simulink, 建立供弹系统多体动力学模型和机电联合仿真模型, 并对其进行仿真分析。仿真分析结果表明: 控制系统动态特性稳定可控, 可为物理样机设计提供理论依据。

关键词: 供弹系统; 动力学; 机电联合仿真

中图分类号: TJ31 **文献标志码:** A

A New Feeding System for 82 Rapid-fire Mortar and its Multi-body Dynamics Simulation Analysis

Xue Dechen, He Yong, San Tianze, Hu Yuantao

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to solve the problem of insufficient automation of the ramming system of rapid-fire mortar, a new ramming system with compact structure and stable and reliable ammunition feeding was designed based on 82 rapid-fire mortar, and a cross-platform co-simulation study of electromechanical system was carried out. The ammunition feed system adopts a disposable ammunition pod feed mode, can realize that arrangement of closely arranged ammunition bays, improves the ammunition carry capacity of the system, and can quickly complete the continuous automatic firing of mortars; In order to verify the feeding process of the ammunition feeding system, the multi-body dynamics model and the electromechanical co-simulation model of the ammunition feeding system were established by using the dynamics software Adams and the control analysis software Simulink, and the simulation analysis was carried out. The simulation results show that the dynamic characteristics of the control system are stable and controllable, which can provide a theoretical basis for the design of the physical prototype.

Keywords: feeding system; dynamics; mechanical-electronic co-simulation

0 引言

传统 82 自动迫击炮采用炮闩前冲原理, 自动迫击炮前冲击发, 其优点是迫击炮后坐力小^[1-3], 不足之处在于传统 82 自动迫击炮采用刚性弹夹, 弹药装填形式需要采用人工供弹, 供弹过程需要人工干预。

李广威^[4]设计了一种迫弹自动前装机构, 优化机构提高了供弹稳定性, 但供弹系统仍需人工参与。王扬^[5]设计了一种可实现弹舱不跟随身管俯仰的节片式柔性供弹方式的无链供弹机构, 但仅适用于中小口径迫击炮自动供弹系统, 对中口径迫击炮自动供弹系统依旧困难^[6]。王月桐^[7]设计了一种大口径迫击炮自动装填系统的回转弹舱, 并针对性地设计了前后限位器^[8]。

目前, 自动供弹系统的设计主要难点在于: 1) 弹舱结构不够紧密导致空间浪费; 2) 链式供弹运转

过程中会产生附加动载荷、振动、冲击和噪音, 不利于控制; 3) 弹舱重量过大, 无法跟随身管俯仰。为解决传统 82 自动迫击炮自动供弹相关问题, 笔者设计一种新型 82 自动迫击炮供弹系统, 并进行机电联合的动力学仿真分析^[9]。

1 新型 82 自动迫击炮供弹系统

新型 82 自动迫击炮供弹系统(如图 1)设计射速为 40 发/min 以上, 是一种采用弹荚密排式弹舱方式的连续供弹系统, 采用协调-供弹-输弹的过程实现弹舱自动取弹连续发射。其中, 协调包括了顶弹荚、摆弹荚、上弹荚 3 个动作, 供弹包括了供弹到位、退荚 2 个动作, 输弹为炮闩输弹动作。

为验证弹丸从供弹到入膛的整个过程, 笔者建立供弹系统多体动力学模型和其机电控制系统, 分析供弹系统动作协调及响应。

收稿日期: 2024-03-08; 修回日期: 2024-04-18

第一作者: 薛德宸(1995—), 男, 四川人, 硕士。

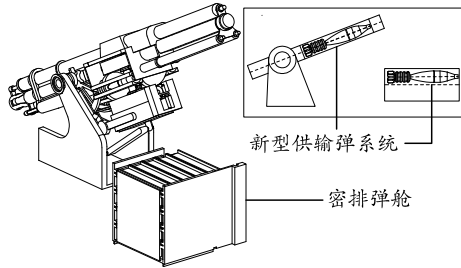


图 1 新型 82 自动迫击炮供弹系统原理

2 机电系统联合仿真流程

新型供弹系统机电联合仿真流程如图 2 所示。

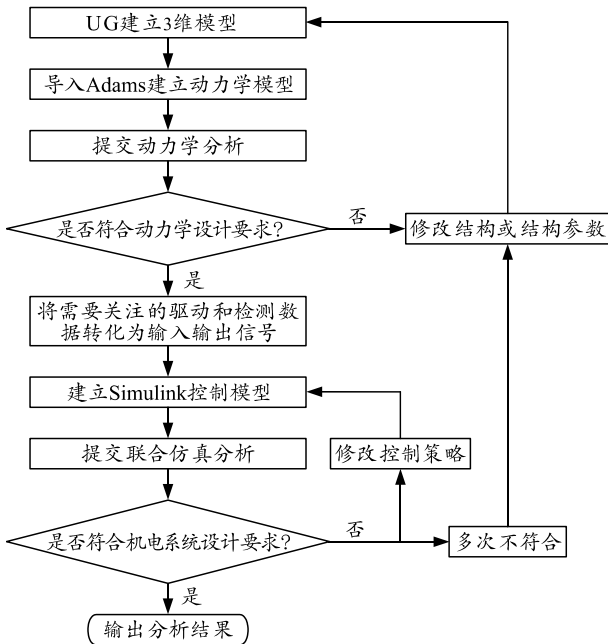


图 2 新型 82 自动迫击炮供弹系统机电联合仿真流程

笔者首先设计并进行了新型供弹系统 3 维实体建模，并导入 Adams 仿真软件^[10-11]；然后经简化，添加相关约束、载荷和驱动等运动副和接触关系，建立多体动力学模型；之后，将重点关注的驱动和检测数据转化为系统输入和输出信号，导出控制子系统，在 Simulink 软件中添加控制相关模块，建立 Adams/Simulink 机电联合仿真模型。仿真计算过程中，Adams 虚拟样机与 Simulink 控制模块可实时数据交换，Adams 求解器求解系统动力学状态方程，Simulink 求解系统控制方程^[12]。在建立上述机电联合仿真模型的基础上，可通过调整控制策略、系统结构及其参数，分析不同参数和控制策略的影响及相应的动力学响应。

3 结构及工作原理

3.1 供输弹系统结构

某 82 自动迫击炮新型供输弹系统主要由弹舱、

协调臂杠杆机构、顶送机构和转膛机构组成，如图 3 所示。

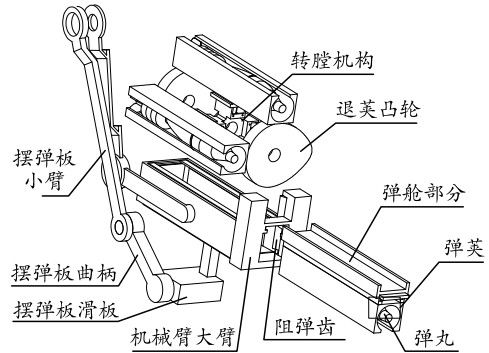


图 3 供弹系统结构

笔者设计一种正长方体外形结构的弹荚，可容纳不规则外形的迫击炮弹，可使供弹系统采用密排储运发方式的弹舱结构。供弹系统可利用弹荚的规则外形与凸轮配合实现自动退壳。

3.2 供输弹系统工作原理

供输弹系统动作流程及时序如图 4 所示。



图 4 系统时序

1) 顶弹杆推动带弹弹荚挤压协调机械臂上阻弹齿、摆弹板侧面挡板进入协调机械臂杠杆机构的摆弹板空腔。面朝协调机械臂杠杆机构方向的弹荚表面接触并压缩摆弹板底部挡板，阻弹齿扭簧弹性复位使弹荚定位。

2) 协调机械臂大臂带动带弹弹荚转动到预定角度，等待转膛机构转动到指定位置。

3) 协调机械臂小臂旋转摆动摆弹板前进 114 mm，转膛机构的棘齿挤压进入带弹弹荚，实现带弹弹荚的携持。携持完毕，协调机械臂小臂反方向转动与协调机械臂大臂接触复位。

4) 转膛机构带动带弹弹荚旋转 90°到达预装载位置，前一发弹丸到达炮弹入膛位置，紧接着由炮尾推弹杆推入身管膛内，发射弹丸后推弹杆复位。

5) 转膛机构旋转同时，机械臂大臂带动摆弹板回到初始位置，并重复 1)和 2)中过程。

6) 转膛机构带动弹荚再次旋转 90°，利用凸轮机构将弹荚寄出携弹机构，排出弹荚。

4 供弹系统多体动力学模型及仿真

4.1 供弹系统多体动力学模型建模及仿真计算

供弹系统流程及其拓扑关系如图 5 所示。供弹系统拓扑明细如表 1 所示。

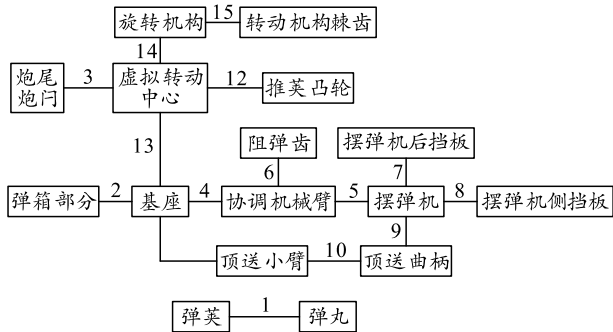


图 5 供弹系统拓扑关系

表 1 供弹系统拓扑明细

代号	联接关系	运动副数量	代号	联接关系	运动副数量
1	固定副	1	8	移动副	2
2	固定副	1	9	转动副	1
3	移动副	1	10	转动副	1
4	旋转副	1	11	转动副	2
5	移动副	1	12	固定副	2
6	转动副	2	13	转动副	1
7	移动副	1	14	转动副	1

其中，除基座、炮尾推杆、虚拟转动中心、机械臂小臂、机械臂曲柄、转动机构以外，弹荚与其他各零部件先后均有接触关系。

本文中，弹荚和其他各零部件之间采用纯接触的方式^[13]，模拟弹荚从供弹到退荚的整个过程；因此，需要将仿真中的系统参数分别设定。

对弹荚添加力，力表达式为：

$$\text{step}(\text{time}, 1, 0, 1.1, \text{Force_Feed}) + \text{step}(\text{time}, 1.25, 0, 1.4, -\text{Force_Feed}).$$

对协调机械臂大臂添加移动驱动，驱动表达式为：

$$\text{step}(\text{time}, 1.4, 0, 1.65, \text{shejiao}) + \text{step}(\text{time}, 2.15, 0, 2.45, -\text{shejiao}).$$

对虚拟转动中心添加转动驱动，驱动表达式为：

$$\text{step}(\text{time}, 0, 0, 1, \text{shejiao}).$$

对转膛机构添加转动驱动，驱动表达式为：

$$\text{step}(\text{time}, 1.85, 0, 2.15, -90\text{d}).$$

对炮尾推杆添加移动驱动，驱动表达式为：

$$\text{step}(\text{time}, 1, 0, 1.15, 500) + \text{step}(\text{time}, 1.15, 0, 1.3, -500) + \text{step}(\text{time}, 2.15, 0, 2.3, 500) + \text{step}(\text{time}, 2.3, 0, 2.45, -500).$$

对机械臂摆弹板添加移动驱动，驱动表达式为： $\text{step}(\text{time}, 1.45, 0, 1.7, 114) + \text{step}(\text{time}, 1.7, 0, 1.85, -114)$ 。

在阻弹齿与协调机械臂大臂之间、旋转机构与转膛机构棘齿之间添加扭簧。在机械臂摆弹板与摆弹板后挡板、摆弹板侧挡板之间添加弹簧。

4.2 弹荚的位移响应

通过仿真分析可得弹荚在各个射角条件下的位移和角度响应，如图 6 所示。

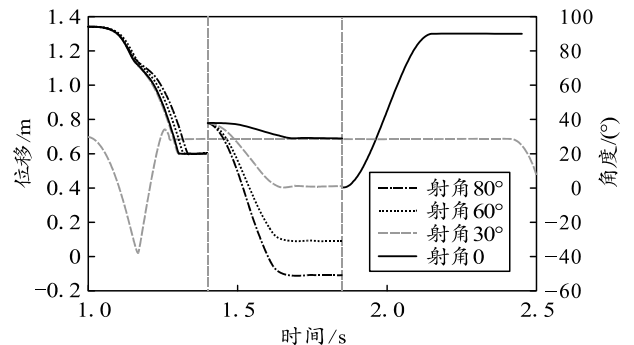


图 6 多刚体模型供弹系统弹荚位移与角度特性

图中横轴为时间轴，从 1 s 开始，为火炮绕耳轴俯仰到高低射角的时间，可见供弹系统循环周期为 1.45 s 左右。仿真结果显示供弹过程每个供弹周期包含 3 个阶段，分别对应顶弹过程、摆弹过程和上弹过程。第 1 个阶段对应时间 1~1.4 s，显示了顶弹过程中弹荚沿摆弹板 x 轴方向移动的位移。第 2 个阶段对应时间 1.4~1.85 s，显示了摆弹过程中不同射角工况下，弹荚绕耳轴旋转中心的旋转角度。第 3 个阶段对应时间 1.85~2.15 s，显示了上弹过程中弹荚绕转膛机构轴的旋转角度。由上图可见，在不同射角下，供弹系统循环周期均不大于 1.5 s，表明其可实现 40 发/min 的射速，供弹系统模型可靠，可用于机电联合动力学仿真。

4.3 弹荚的速度响应

多刚体模型供弹系统弹荚的速度及角速度响应如图 7 所示。

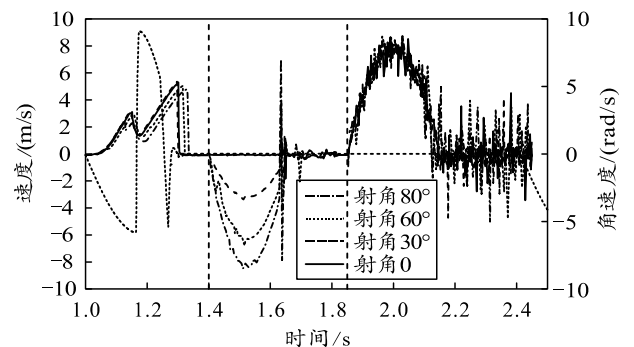


图 7 多刚体模型供弹系统弹荚速度与角速度特性

图中 1~1.4 s 为顶弹过程，显示的是弹荚沿摆弹板 x 轴方向的运动速度。可见顶弹过程中，弹荚先作匀加速运动，接触到摆弹协调机构内腔后受接触摩擦力影响，速度会有降低，然后再增大到峰值。1.4~1.85 s，为摆弹过程中不同射角工况下，弹荚绕耳轴旋转的角速度。显示了摆弹过程中角速度的变化趋势，随射角增大，角速度峰值会有所增大。

1.85~2.15 s，为上弹过程中弹荚绕转膛机构轴的旋转角速度，峰值为 8.42 rad/s。

5 机电系统联合仿真

5.1 控制器模型

笔者利用 Matlab/Simulink 建模环境仿真模块，建立了自适应模糊 PID 控制器，如图 8 所示。

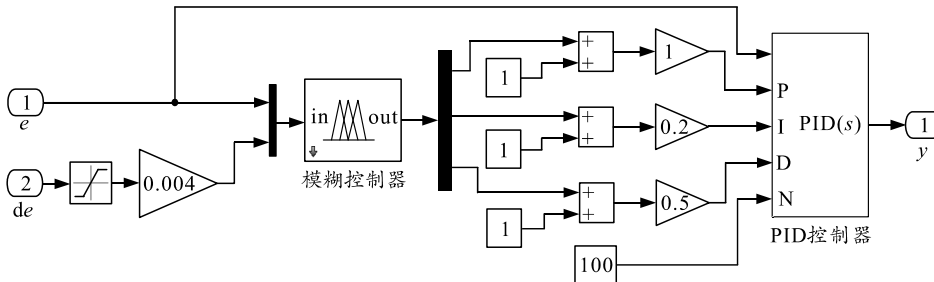


图 8 模糊 PID 控制系统模块

在 Matlab 命令行键入 fuzzy，进行模糊模块设计，并可利用曲面观察器显示所设置的模糊模块的 k_p 、 k_i 、 k_d 特征，如图 9 所示。

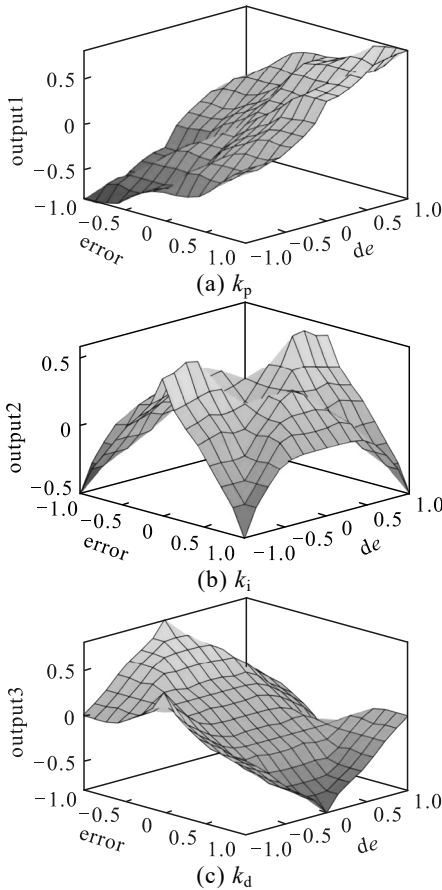


图 9 模糊模块 k_p 、 k_i 、 k_d 观察器

5.2 Adams/Simulink 联合动力学仿真

新型供弹系统机电联合仿真模型建立过程^[14]如下：

1) 在 Adams 软件中导出模型。

将供弹系统中的上述驱动抑制，并将其与检测数据分别设置为状态变量。利用 Adams 中的 Controls 工具将状态变量设置为输入输出信号，目标软件设置为 Matlab，如图 10 所示。

输入信号	机械系统输入	输出信号	机械系统输出
rotate_ershou		M_Danjia_position_feed	
feed_force		M_Danjia_velocity_feed	
rotate_dabi		M_Danjia_accelerate_feed	
feed_up		M_Danjia_rotate_dabi_angle	
rotate_virtual		M_Danjia_rotate_dabi_angle_velocity	
		M_Danjia_rotate_dabi_angle_accelerate	
		M_Danjia_rotate_virtualrotate_angle	
		M_Danjia_rotate_virtualrotate_angle_velocity	
		M_Danjia_rotate_virtualrotate_angle_accelerate	
		M_Goal_angle	
		M_Goal_angle_xietiaoqi	
		M_Goal_feed_up_position	
		M_Goal_angle_virtualrotate	

图 10 Adams 模型的输出

2) 在 Matlab 软件中导入 Adams 模型。

在 Matlab 的命令行窗口中键入 Feed_System，Matlab 工作区将储备相应数据，接着输入 Adams_sys 建立 Simulink 的供弹系统 Adams 模块，Adams 模块内容显示如图 11 所示，其 Adams_sub 子系统内容显示如图 12 所示^[12]。

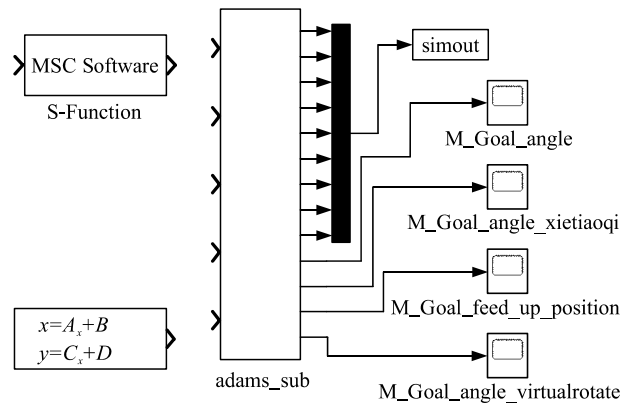


图 11 Adams 供弹系统模块

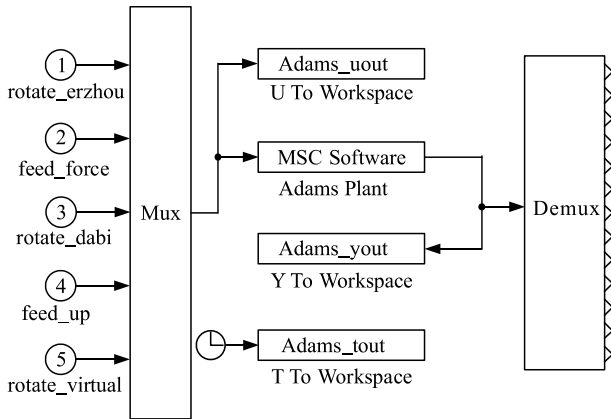


图 12 Adams 供弹系统模块内部模块

可双击 Adams_sub 系统中 Adams Plant 模块调整 Adams_sub 子系统^[14]。设置 Interprocess option 为 PIPE (DDE), 设置 Animation mode 为 interactive, 设置 Simulation mode 为 discrete, 设置通信间隔为 0.005 s。

3) 在 Simulink 中建立机电联合仿真模型。

将 Adams_sub 模块替换被控对象模块, 构建新型供弹系统机电联合仿真模型, 如图 13 所示。

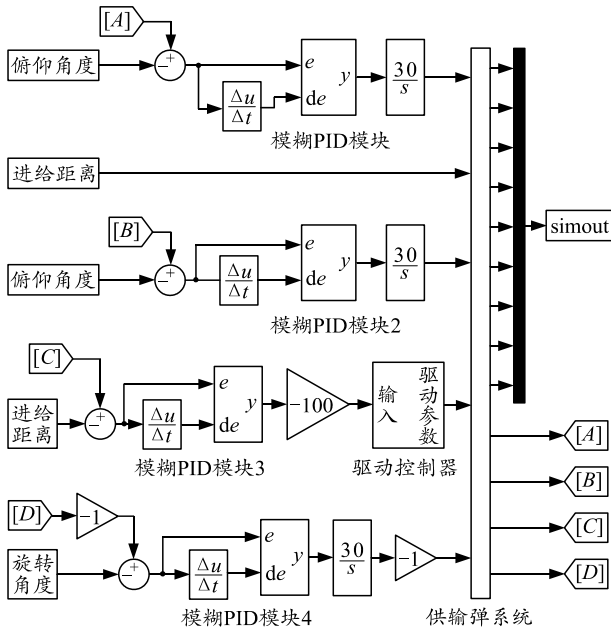


图 13 供弹系统机电联合仿真模型

5.3 联合仿真及结果

以 30°俯仰角为例, 在 Simulink 中设置仿真时长 1.5 s。为考察伺服系统静态特性, 对炮身俯仰、协调器俯仰、摆弹进给和转动机构转动的动作添加斜波信号, 以显示供弹系统具有以固定速度跟踪目标的能力。

图 14 为供弹系统协调器俯仰斜波响应曲线, 图 15 为供弹系统协调器俯仰斜波响应误差曲线。

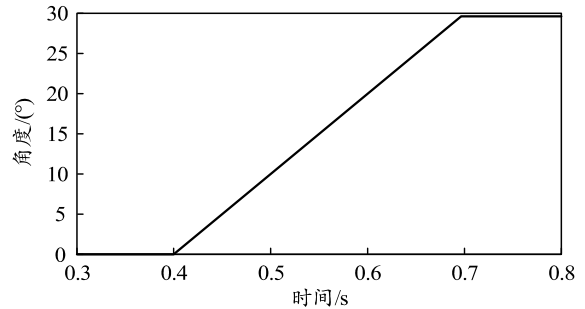


图 14 协调器俯仰斜波响应曲线

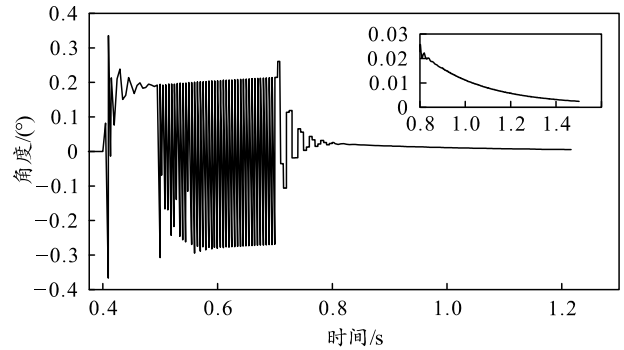


图 15 协调器俯仰斜波响应误差曲线

由上图可知, 供弹系统协调器俯仰运动过程误差小于 0.4°, 到达目标位置时误差小于 0.03°, 其精度远远高于利用 PID 控制器的控制系统, 系统具有很好的响应斜波信号的能力, 表明利用模糊 PID 控制器的供输弹机电系统具有较好的调速特性。

图 16 为协调器俯仰斜波响应时输入到大臂的转速, 其大小维持在 0 上下浮动, 运行平稳。

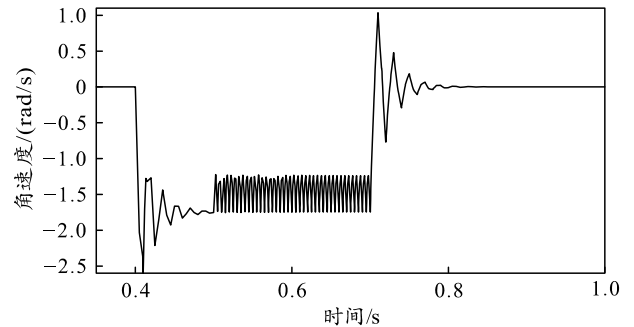


图 16 协调器俯仰斜波响应大臂转速

通过机电系统联合仿真分析, 验证了笔者设计的新型供弹系统机电系统设计的合理性和可靠性, 为供弹系统的进一步改进设计提供了依据。

6 结束语

笔者基于某 82 速射迫击炮, 设计了一种密排弹舱布置的新型供弹系统。仿真分析了弹荚对控制输入的位移、速度与加速度响应, 验证了系统的多体动力学性能及其响应, 在此基础上, 建立了基于 Adams 和 Simulink 控制模块的机电联合仿真模型并

进行了仿真，考察了供弹系统机电系统参数对各部件运动特性的影响。

在笔者建立的联合仿真模型的基础上，可修改和调整相应的控制参数，并配合机械结构几何参数的调整和优化，进一步调节系统的性能，对供弹系统进一步的结构优化提供参考。

参考文献：

[1] 杨军荣, 何永. 自动迫击炮的供输弹方式研究[J]. 火炮发射与控制学报, 1997(4): 40-44.

[2] 蒋潇蓉, 郝家耀, 周君涛, 等. 基于 ADAMS 的某无后坐炮发射动态仿真分析[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(8): 17-21.

[3] 王亚平. 火炮与自动武器动力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014: 231-236.

[4] 李广威. 迫击炮自动前装填机构动力学仿真与分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2020, 41(4): 49-52, 79.

[5] 王扬. 无中心节片式柔性导引结构设计及运动特性分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.

[6] 方献军. HyperMesh&HyperView(2017X)应用技巧与高

级实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018: 266-290.

[7] 王月桐. 迫击炮齿形链式回转弹仓设计与分析[J]. 机械传动, 2017, 41(4): 81-84, 105.

[8] 张义民. 机械振动[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019: 11-15.

[9] 陶齐冈, 何永, 赵威, 等. 基于 ABAQUS 的某车载迫击炮车架结构有限元分析[J]. 兵工自动化, 2013, 32(10): 37-39.

[10] CAD/CAM/CAE技术联盟. Adams2018 动力学分析与仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2020: 281-287.

[11] 宋超, 贾亦卓, 王东军, 等. 基于 ADAMS 的装甲车行进间射击动态特性分析[J]. 兵工自动化, 2021, 40(7): 67-71.

[12] 毛保全, 刘新亮, 汪凡, 等. 基于 ADAMS 和 MATLAB 的遥控武器站机电联合仿真[J]. 兵工自动化, 2011, 30(8): 27-30.

[13] 徐桐, 贺剑, 曹立军, 等. 刚柔耦合的火箭炮高低调炮动力学仿真[J]. 兵工自动化, 2019, 38(9): 44-48.

[14] 李勇, 郑建国. 基于刚-柔耦合理论的某供弹机构的仿真分析[J]. 兵工自动化, 2017, 36(8): 20-23, 43.

(上接第 81 页)

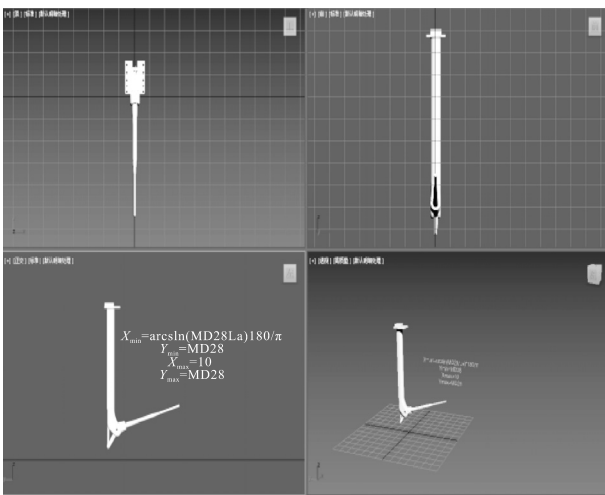


图 7 机构模拟运动

5 结论

随着飞行器研制对模型支撑系统的要求越来越高，风洞试验模型支撑系统的发展趋势是大角度范围、大承载能力、控制精度高、机动性好、具有多种支撑形式。对 4 m×3 m 风洞大迎角机构的机械装

置和硬件控制进行优化升级，基于 LabVIEW 重新编写上位机软件，实现了上位机和 PLC 控制器之间基于 TCP/IP 协议的 Socket 通讯。引入虚拟支杆，更精确地计算大迎角下模型的坐标与角度。设计模型防撞识别系统，可有效避免模型与风洞发生碰撞事故。该控制软件提高整体系统运行中的稳定性、安全性，简化试验流程，提高试验效率，有利于促进我国空气动力学研究的发展。

参考文献：

[1] 刘晓伟, 秦永明, 欧平. 一种新型大迎角风洞试验系统研制[J]. 测控技术, 2003, 32(9): 123-126.

[2] 沈礼敏, 沈志宏, 黄勇. 低速风洞大迎角张线式支撑系统[J]. 流体力学实验与测量, 1998(3): 10.

[3] 吴军强, 范召林, 贺中, 等. 2.4 m 跨声速风洞大迎角试验技术研究[J]. 流体力学实验与测量, 2004, 18(3): 43-48.

[4] 阎成. 1.2 m 风洞大迎角控制系统研制[D]. 长沙: 国防科技大学, 2003.

[5] 宋洪亮. 运动控制系统中的上位控制单元[J]. 经济技术协作信息, 2004(21): 35-35.