

doi: 10.7690/bgzdh.2021.07.002

模块药输药机输药仿真研究

王 健¹, 陈龙淼¹, 范 云², 朱伟成²

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094; 2. 中国人民解放军第 32380 部队, 北京 100072)

摘要: 为保证弹药自动装填系统的可靠性, 通过建立虚拟样机的方法对模块药输药机不同状态下的输药动作进行仿真。使用 CREO 创建出模块药输药机的 3 维结构模型, 将其模型输入到 ADAMS 中, 建立模块药输药装置的虚拟样机模型, 使用 MATLAB/SIMULINK 仿真平台搭建以经典的 PID 控制算法为核心的模块药输药机控制模型, 在 ADAMS 与 MATLAB 中建立接口进行数据交互, 完成模块药输药机联合仿真系统的搭建并进行仿真。结果表明, 该模型能满足实际输药的需求。

关键词: 模块药; 输药机; 链传动; 虚拟样机; 联合仿真

中图分类号: TJ306 **文献标志码:** A

Study on Simulation of Modular Drug Delivery Machine

Wang Jian¹, Chen Longmiao¹, Fan Yun², Zhu Weicheng²

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China;

2. No. 32380 Unit of PLA, Beijing 100072, China)

Abstract: In order to ensure the reliability of the ammunition automatic loading system, the simulation of the drug delivery action of the modular drug delivery machine in different states is carried out by establishing a virtual prototype. Creo is used to create a 3D structure model of the modular drug delivery machine. The model is input into Adams to establish the virtual prototype model of the modular drug delivery device. The control model of the modular drug delivery machine is built with the classic PID control algorithm as the core by using Matlab/Simulink simulation platform. The interface is established in Adams and MATLAB for data interaction to complete the joint simulation system establishment and simulation. The results show that the model can meet the needs of actual drug delivery.

Keywords: modular drug; drug delivery machine; chain drive; virtual prototype; joint simulation

0 引言

现代战场对火炮的射速要求极高, 为在短时间内发射大量炮弹, 可靠的弹药自动装填系统成为现代火炮的关键技术之一^[1]。模块药输药机作为弹药自动装填系统的关键部分具有承上启下的作用。模块药输药机在初始位置接收并储存来自药仓的模块药, 并由药协调器把模块药输药机协调至炮尾并与其轴线重合, 之后通过输药链条组成的传动系统把模块药输送至药室, 最后输药链条返回原位, 输药机回归初始位置, 完成输药的一次循环。目前, 虚拟样机技术越来越成熟, 已被应用到机械制造、航空航天等方面, 特别在军事武器方面, 虚拟样机技术贯穿了武器装备的设计、研制、生产、维护的全过程^[2]。笔者通过 ADAMS 与 MATLAB 对模块药输药机输药进行了联合仿真, 利用 PID 控制输入力矩使模块药输药机可在不同的输药角度准确地把模块药输送到药室, 并对模块药输药机输药的仿真结果

进行分析, 可为后期的模块药输药机的结构优化、探索新的控制算法和进行故障状态分析提供依据。

1 模块药输药机的结构及工作原理

整个模块药输药机系统由传动系统和起约束作用的壳体组成。传动系统包括输药电机、减速器、编码器、链轮、链节、滚轮、销轴和推药板; 起约束作用的壳体由导轨托药盘、链盒、链轮盒和止退器等组成^[3]。模块药输药机结构组成如图 1 所示。模块药输药机通过链盒上的连接板与药协调器相连^[4]。输药机工作过程: 在初始位置接收来自药仓推来的模块药, 通过药协调器协调至炮尾并与其对齐, 输药电机与减速器相连, 减速器传动轴与链轮相连。当需要进行输药工作时, 输药电机接收到指令开始转动, 为链轮提供驱动力矩, 链轮与链条啮合, 从而带动整个链条运动, 链轮内孔与编码器轴相连, 编码器会实时反馈链轮的角位移给控制系统, 以保证输药动作的控制精度。输药链条运动同

收稿日期: 2021-04-25; 修回日期: 2021-06-05

作者简介: 王 健(1996—), 男, 江苏人, 硕士, 从事兵器科学与技术研究。E-mail: 870852661@qq.com。

时也会带动推药板运动，推药板在运动的过程中会推动托药盘中的模块药，将模块药输入药室中，之后模块药输药机协调至接收模块药的位置，推药板和链条回归原位置，完成输药的一个周期。

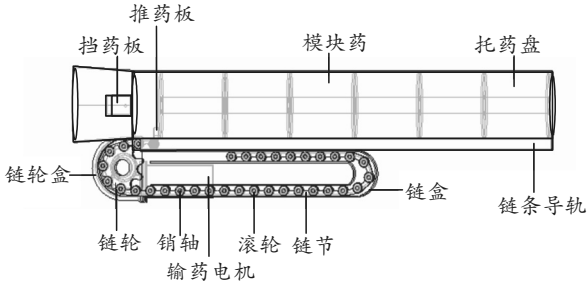


图 1 模块药输药机结构

2 模块药输药机联合仿真系统总体设计

对模块药输药机联合仿真系统进行设计，首先用 CREO 绘图软件建立模块药输药机 3 维结构模型，将其模型输入到 ADAMS 中，使用 ADAMS 中的功能命令建立模块药输药机的虚拟样机模型。利用 MATLAB 设计出链轮的规划位移曲线和使用的控制算法，并在 ADAMS 与 MATLAB 之间建立互通模块进行数据交互，MATLAB 利用算法把规划轨迹转化为力矩使 ADAMS 中的输药机模型进行输药运动，ADAMS 将输药机在运动仿真过程中的链轮转动角位移反馈给 MATLAB，MATLAB 根据控制算法调整输入力矩，使输药机按照准确的规划轨迹运动；形成了如图 2 所示的闭环控制、数据交互联合仿真系统。

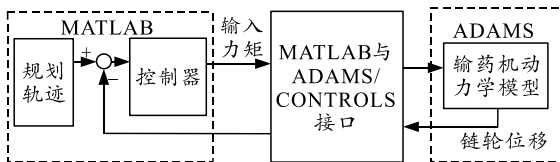


图 2 联合仿真系统

3 模块药输药机虚拟样机机械系统设计

模块药输药机联合仿真首先要建立模块药输药机的实体 3 维模型，使用 CREO 完成输药机各个零件的建模以赋予其材料属性，模块药材料定义为 nylon，推药板前端材料定义为 rubber，其他零件均定义为 steel；对输药机完成装配后保存为 X_T 文件格式，在 ADAMS 中导入模块药输药机模型，根据各个零件之间的关系建立约束和接触关系，设置相应参数。如图 3 所示，模型各个零件的拓扑关系：链盒、托药盘、滚轮导轨布尔合成一个元件并与大地为固定副链接，滚轮和链节围绕销轴转动，链节之间也围绕销轴转动，链轮与大地为转动副链接。

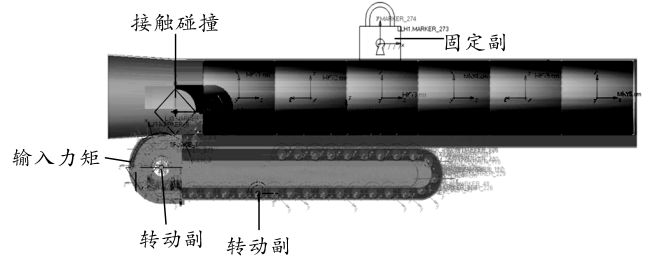


图 3 输药机机械系统模型

4 模块药输药机虚拟样机控制系统设计

4.1 输药机期望轨迹设计

对控制系统的链轮角位移进行规划轨迹设计，依据实际工程的输药要求，用托药盘中的模块药全部输出时的链轮角位移轨迹来进行设计，规划链轮的角位移曲线如图 4 所示。

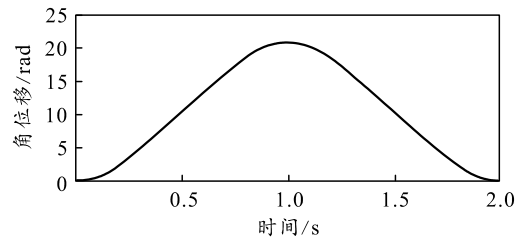


图 4 理想轨迹曲线

药筒内最大可存放 6 块模块药，每块模块药长 175 mm，推药板距离托药盘末端的距离为 1060 mm，因此要将药筒内的模块药全部推出，则输药链条带动推药板的运动距离应为 1060 mm。链轮有 8 个轮齿，节距为 40 mm，因此链轮旋转一个周期，推药板的推药距离为 320 mm。如果把托药盘中的模块药全部推出，链轮的旋转次数为 3.3 次，转过的角度为 20.8 rad。对链轮的角位移进行规划，可分为匀加速输药、匀速输药、匀减速输药、匀加速返回、匀速返回和减速返回 6 个阶段。匀加速和匀减速阶段加速度均为 111 rad/s²，匀速运动阶段速度为 27.7 rad/s 和 -27.7 rad/s，总时间为 2 s。链轮角位移规划轨迹曲线为二阶可导的平滑曲线，可避免链轮在传动过程中因角加速度频繁变化导致链轮与链条啮合冲击增大，使输药更加平稳。

4.2 PID 控制应用

传统的模块药输药机控制系统是开环控制，输药电机输入的是固定力矩，正常状态下可完成输药但精度不高，PID 控制具有鲁棒性强，内容简单的特点，使模块药输药机输药更加可靠。PID 控制链轮的控制规律为：

$$y(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt + k_d (de(t)/dt); \quad (1)$$

$$e(t) = \theta - \theta_d \tag{2}$$

式中： $y(t)$ 为系统控制量函数； k_p 为比例增益系数； k_I 为积分增益系数； k_D 为微分增益系数； $e(t)$ 为系统误差函数； θ 为系统输出值； θ_d 为规划轨迹给定值。

在模块药输药机联合仿真过程中，需要对 k_p 、 k_I 、 k_D 这 3 个系数不断地进行调整，才能降低误差带来的影响，使模块药输药机获得更好的控制效果。

5 模块药输药机联合仿真系统

5.1 联合仿真系统搭建

对于模块药输药机机械系统的导出，先是在 ADAMS 中设计状态变量，可实现机械系统和控制系统的交互；把力矩定义为输入变量，链轮的角位移、推药板的速度、模块药的速度等变量定义为输出变量，把这些变量和机械系统关联，并利用 ADAMS 中的子模块 CONTROLS 将模块药输药机机械系统输出为 MATLAB/SIMULINK 中的一个模块。联合仿真机械子系统如图 5 所示。

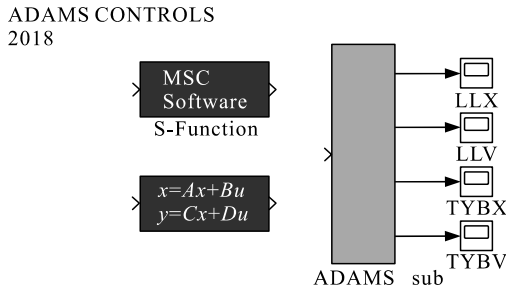


图 5 联合仿真机械子系统

对于模块药输药机控制系统模型，采用 MATLAB 中的 SIMULINK 模块进行设计。如图 6 所示，将 ADAMS 中的模型导出为 SIMULINK 机械子系统模块，结合 SIMULINK 中的控制模块搭建联合仿真系统。将链轮角位移理想曲线与实际的角度位移曲线误差作为控制量，调整链轮的力矩大小。将托药盘中的模块药输入药室中，链轮转过的角度为 20.8 rad。在仿真过程中，对模块药输药机的系统响应进行检测，并将数据输出，如链轮角速度和角加速度，以及模块药的运动情况。

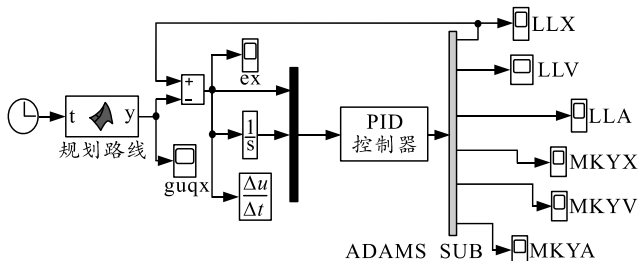


图 6 联合仿真系统模型

5.2 联合仿真实验

完成联合仿真系统搭建后，对输药角度为 0°时的空载输药机进行仿真，考虑输药机输药阶段和链条返回阶段，设置仿真时间为 2 s，仿真步长为 0.000 05 s，ADAMS 与 SIMULINK 之间数据交互间隔为 0.005 s。仿真结束后对仿真结果进行分析，通过 SIMULINK 中的数据记录模块采集推药板和链轮运动特性，结果如图 7—9 所示。

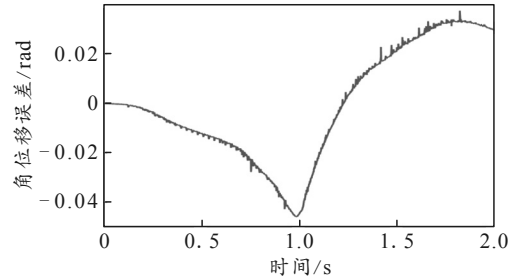


图 7 链轮角位移误差曲线

链轮带动链条运动过程中，由于链盒与链条的接触碰撞，链条与链轮的啮合碰撞，链条自身惯性和链节碰撞的影响会增大链轮运动的误差，但从误差曲线上看，输药过程中的链轮位移误差控制在 0.05 rad 之内，满足模块药输药机在实际工程中所给出的误差控制在 0.1 rad 以内的要求；所以采用 PID 控制算法建立的控制系统经过参数调节后能满足输药机的工作要求。

依据规划轨迹对输药链条运动进行控制，如图 8 所示，由于受链传动多边形效应影响，链轮的角速度并不是恒定的，在 27.7 rad/s 附近上下波动，且速度变化具有一定的周期性，验证了本次仿真的正确性。

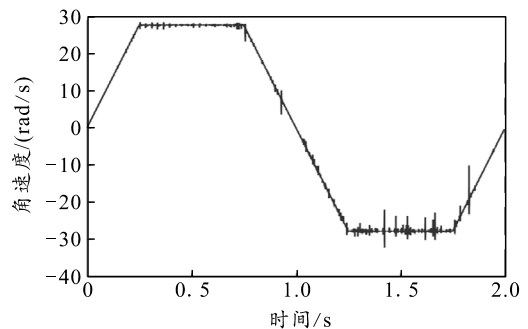


图 8 链轮角速度曲线

如图 9 所示，在链轮发生转动阶段，由于受到链节相互碰撞和多边效应的影响，并且链条在与链轮啮合时也存在一些冲击性的加速度，因此链轮的转速会出现加速减速的周期性变化，加速度绝对值的最大值为 8 080.87 rad/s²。

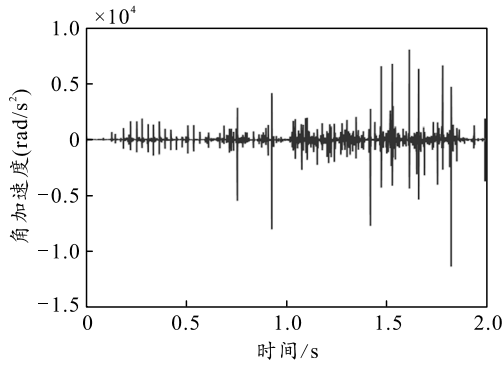


图 9 链轮角加速度曲线

模块药输药机在不同的角度和负载进行输药时，运动情况有差别。考虑输药机的最大负载，忽略模块药之间的碰撞，对输药角度分别在 0°、30°、60°时，输药机的输药阶段、模块药运动进行仿真分析。因为输药链条返回阶段没有模块药的影响，所以只考虑了输药阶段，也就是 1 s 内的运行情况。

模块药在输药机托药盘中有 9 个阶段，首先推药板从初始位置开始运动，在 A 点推药板与模块药碰撞并推开模块药，使模块药在 AB 段做加速度减小的加速运动，BC 段时模块药做减速运动，运行到 C 点推药板和模块药再次碰撞并推开模块药。之后模块药在 CE 段做加速度减小的加速运动，在 DE 段做减速运动，并在 E 点推药板和模块药进行第 3 次接触使模块药在 EF 段加速。当推药板的速度大于模块药速度时进行第 4 次碰撞，第 4 次接触也发生在 EF 段，最后模块药以减速运动至推药阶段结束。模块药速度曲线如图 10 所示。

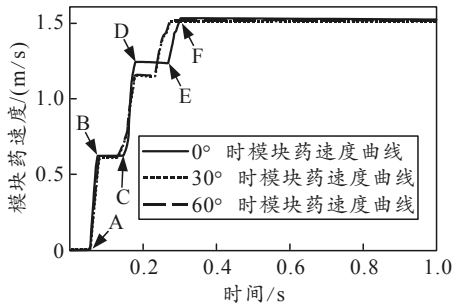


图 10 模块药速度曲线

由于输药角度在大于 30°时，模块药速度变化趋势基本相似，与输药角度 0°时有较大差别；所以选取输药角度为 0°与 60°时的模块药合力和输入力

矩进行比较分析。

模块药在输药角度 0°和 60°时所受力在托药盘轴向方向上的合力，随着推药板和模块药接触次数的增加，推药板对模块药的作用力是逐次减小的。如图 11 所示，并可清楚地观察到第 4 次碰撞的出现。

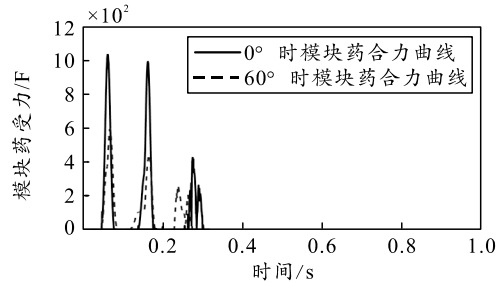


图 11 模块药合力曲线

6 结论

笔者利用 ADAMS 和 MATLAB 对模块药输药机输药进行仿真。首先，在 CREO 中建立模块药输药机的 3 维模型并导入 ADAMS 中添加接触约束、状态变量生成输药机机械系统模块；然后，在 MATLAB 中建立控制模块，使用 PID 对输药机机械系统进行控制，形成了模块药输药机联合仿真系统。从仿真结果可知：模块药输药机可以 2 s 准确地完成输药并返回，链轮的规划轨迹和实际轨迹误差较小在 0.05 rad 内，可以满足实际输药需求，得到了模块药输药机正常运行下的状态特征。笔者分析了不同输药角度对模块药运行状态影响，为之后优化模块药输药机、探索新的控制方法、研究模块药输药机的故障状态提供了依据。

参考文献：

- [1] 魏富江. 某协调输药机的结构设计及优化[D]. 南京: 南京理工大学, 2019: 8.
- [2] 刘大素, 钱林方, 陈光宋, 等. 某输弹机开式链传动建模及动力学特性分析[J]. 兵工学报, 2018, 39(11): 2109-2117.
- [3] 闫鹏程, 郝驰宇, 孙华刚, 等. 基于 RecurDyn 的开式链传动输弹机动力学联合仿真研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2015, 36(2): 31-35.
- [4] 管佳伟, 李志刚. 基于 ADAMS 与 MATLAB 的药仓推药链联合仿真[J]. 机械与电子, 2020, 38(9): 27-31, 36.