

某两自由度弹药提升装置的建模、实验及仿真研究

赵孟奇,张英子

(南京理工大学 机械工程学院,江苏 南京 210094)

摘要:弹药自动装填系统的研究已经成为火炮武器平台中机械系统设计的关键和难点,基于一种两自由度弹药提升装置,并根据该装置的工作原理构造数学模型,搭建实验平台,建立PID控制回路,同时创建该模型的虚拟样机模型,使用动力学仿真软件 Recurdyn 和 Matlab/Simulink 进行联合仿真,并通过实验与仿真的数据进行对比,验证该装置的可行性和所采用控制的有效性。

关键词:弹药提升装置;PID控制;联合仿真

中图分类号:TP391.9 文献标志码:B 文章编号:1671-5276(2020)01-0111-04

Modeling, Experiment and Simulation Study of Two-DOF Ammunition Lifting Coordination Device

ZHAO Mengqi, ZHANG Yingzi

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

Abstract: The study of ammunition automatic filling system becomes the center and difficulty of mechanical system design in artillery weapon platform. Based on a two-degree-of-freedom ammunition lifting device and its working principle, this paper establishes its dynamic model, builds the experimental platform and PID control loop. And then, the virtual prototype model of the model is established. The dynamic simulation software Recurdyn and Matlab/Simulink are used for joint simulation. The feasibility of the device and the effectiveness of the control are verified by comparing the experimental and simulation data.

Keywords: ammunition lifting device; PID control; co-simulation

0 引言

火炮是各个国家军队装备数量最多和使用最频繁的武器之一,具有威力大、射界广等优点^[1]。

弹药自动装填系统的研究已经成为火炮武器平台中机械系统设计的中心和难点,也逐渐成为火炮武器装备自动化、精确化、轻型化、智能化与信息化发展的必然需求^[2]。

本文以某坦克自动装填系统弹药协调器的研究为背景,根据一种两自由度弹药协调器的工作原理,基于第二类拉格朗日方程构造该模型的数学建模,搭建实验平台,建立该模型的虚拟样机模型,通过实验数据和仿真数据的对比,探讨两自由度弹药提升协调装置的可行性,验证所采用控制方法的正确性。

1 两自由度提弹装置的工作原理和动力学建模

1.1 工作原理

本文研究的两自由度弹药提升装置主要功能是从弹仓中接收弹丸及从药仓中接收装药模块,并将弹丸和装药

模块传输到炮尾,实现与炮膛轴线的对齐后,再通过输弹机和输药机将传输到炮尾的弹丸和模块装药可靠、一致地推入药室。

图1为两自由度弹药提升装置的工作原理图。

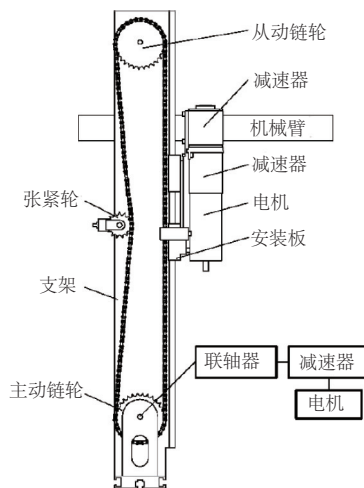


图1 两自由度弹药提升装置的工作原理

两自由度弹药提升装置由支架、提升部分和回转部分组成,采用链传动的方式来实现弹丸和模块装药的提升动

作。主动链轮在下,从动链轮在上。在链条的左侧安装一个张紧轮从而保证链传动的承载能力,回转部分安装在链条的右侧。回转部分包括电机、减速器和连接着接收弹丸和模块装药的机械臂,它可以沿着轨道上下滑动,机械臂可以实现任意角度的转动^[3]。

1.2 动力学模型

图2为两自由度提弹装置的简化模型。

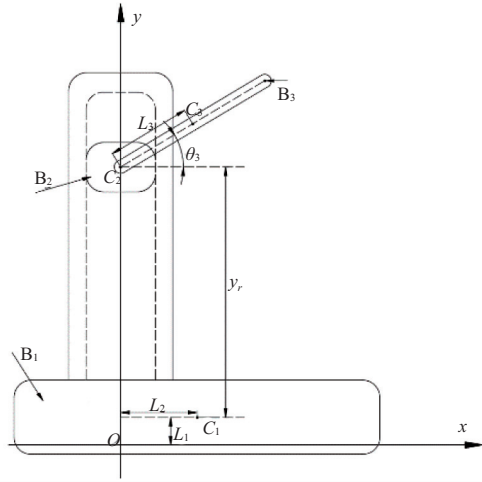


图2 弹药协调器的简化动力学模型

图2中, xOy 为笛卡儿坐标系; B_1 、 B_2 、 B_3 分别表示车体、弹药传输机械臂的提升部分与回转部分; C_1 、 C_2 、 C_3 分别为 B_1 、 B_2 、 B_3 的质心。假设 B_3 的转轴过 C_2 点; θ_3 为 B_3 的角位移, y_r 为 B_2 相对 B_1 的位移; L_2 、 L_3 为图示几何尺寸。定义 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 与 (x_3, y_3) 分别为 C_1 、 C_2 、 C_3 的坐标。

设定 B_1 、 B_2 、 B_3 的质量分别为 m_1 、 m_2 、 m_3 , B_3 相对其质心的转动惯量为 J_3 。选择 y_r 与 θ_3 为系统的广义坐标,根据第二类Lagrange方程建立了上述简化系统的动力学模型。

1) 动能

显然 B_1 、 B_2 作直线运动, B_3 作平面运动,则系统的动能可以表示为(点号表示对时间的导数):

$$T = \frac{1}{2}m_1(\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) + \frac{1}{2}m_2(\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) + \frac{1}{2}m_3(\dot{x}_3^2 + \dot{y}_3^2) + \frac{1}{2}J_3\dot{\theta}_3^2 \quad (1)$$

式中各质心坐标与广义坐标的关系为: $x_1 = L_2$; $y_1 = L_1$; $x_2 = 0$; $y_2 = y_r + L_1$ 。

进一步可得系统动能为:

$$T = \frac{1}{2}(m_2 + m_3)\dot{y}_r^2 + \frac{1}{2}(m_3L_3^2 + J_3)\dot{\theta}_3^2 + m_3L_3\cos\theta_3\dot{y}_r\dot{\theta}_3 \quad (2)$$

2) 广义力

定义 Q_1 、 Q_2 分别为各广义坐标上的广义力,根据虚功原理,可得广义力 Q_1 为:

$$Q_1 = \frac{\delta W_1}{\delta y_r} = \frac{\sum_i F_i \delta y_r}{\delta y_r} = \frac{[u_1 - (m_2 + m_3)g] \delta y_r}{\delta y_r} =$$

$$u_1 - (m_2 + m_3)g \quad (3)$$

同理,可以求得:

$$Q_2 = u_2 - m_3L_3g\cos\theta_3 \quad (4)$$

其中: δy_r 、 δW_1 分别为虚位移与虚功, F_i 为 Q_1 上的主动力系; u_1 、 u_2 分别为 B_1 、 B_2 所受的主动控制力; g 为重力加速度。

3) 动力学方程

定义广义坐标向量 $\mathbf{q} = (q_1, q_2)^T = (y_r, \theta_3)^T$,将式(1)~式(4)带入第二类Lagrange方程,得:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

导出系统的动力学方程:

$$\mathbf{H}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{E}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{u} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{H}(\mathbf{q})$ 为系统的惯量矩阵; $\mathbf{E}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 为包含科氏力、离心力的向量; $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ 为重力向量; $\mathbf{u} = (u_1, u_2)^T$ 为系统所受的广义控制力向量。各项表达式分别为:

$$\mathbf{H}(\mathbf{q}) = \begin{pmatrix} m_2 + m_3 & m_3L_3\cos\theta_3 \\ m_3L_3\cos\theta_3 & m_3L_3^2 + J_3 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{pmatrix} -m_3L_3\sin\theta_3\dot{\theta}_3^2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{q}) = \begin{pmatrix} (m_2 + m_3)g \\ m_3L_3g\cos\theta_3 \end{pmatrix} \quad (9)$$

2 实验装置介绍

2.1 实验平台

根据1.1-1.2节所叙述的两自由度弹药提升装置的工作原理,搭建了两自由度弹药提升装置的实验平台,其结构组成如图3所示。



图3 两自由度提弹装置的实验平台

链传动部分中,链条选用04C标准链条,链轮齿数为24。电机选用Maxon公司直流无刷电机EC45,减速器选用GP52行星齿轮减速器,其参数如表1及表2所示。

表1 直流无刷电机 EC45 的基本参数

参数	回转电机	提升电机
型号	136 210	136 207
额定电压/V	24	24
空转转速/(r/min)	8 670	5 000
空载电流/mA	897	341
额定转速/(r/min)	7 970	4 300
额定转矩/(mN·m)	311	331
额定电流/A	12.5	7.51
堵转转矩/(mN·m)	4 400	2 540
堵转电流/A	167	55.8

表2 GP52 行星齿轮减速器的基本参数

参数	回转电机	提升电机
减速比	113:1	353:1
转动惯量/(g·cm ²)	9.3	9.4
最大连续转矩/(N·m)	30	30

2.2 控制器简介

本实验采用的控制器为型号为 EPOS270/10。这款控制器适用带有 hall 传感器的无刷直流电机,电机的输出功率可达 700 W,可以满足实验的要求,控制器与电机的接线图如图 4 所示^[4]。

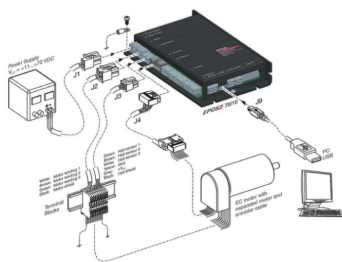


图4 电机与控制器的接线图

3 虚拟样机模型

3.1 动力学模型

根据 1.1-1.2 节所叙述的两自由度弹药提升装置的工作原理和动力学模型,使用 Solidworks 软件建立该装置的三维模型,并将三维模型导入到多体动力学建模软件 Recurdyn 中,使用 Merge 命令将三维模型中各部件固接为架体、提升部分和回转部分,并添加运动副、驱动力和驱动力矩。两自由度弹药提升装置的虚拟样机模型如图 5 所示。

3.2 电机数学模型

建立如图 6 所示的直流电机等效电路,设电动机的电



图5 两自由度弹药提升装置的虚拟样机模型

枢回路的电阻为 R_a , 电枢电感为 L_a , 电枢电压和电流分别为 u_a 和 i_a , 得到电枢回路的电压方程:

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + e = u_a \quad (10)$$

$$e = C_e \dot{\theta}_m \quad (11)$$

$$\dot{\theta}_m = \omega_m \quad (12)$$

式中: e 为直流伺服电机的反电动势; C_e 为反电动势常数。

设电动机的转子转动惯量为 J_m , 根据力平衡方程即可得到机械回路力平衡方程:

$$J_m \ddot{\theta}_m = T_m - T_L \quad (13)$$

$$T_m = C_m i_a \quad (14)$$

式中: T_L 为负载力矩; T_m 为电动机驱动力矩; C_m 为直流伺服电机的转矩常数。

电枢回路电磁时间常数: $\tau_L = \frac{L_a}{R_a}$, 单位为 s;

将 τ_L 代入式 (10), 整理得:

$$u_a - e = R_a \left(i_a + \tau_L \frac{di_a}{dt} \right) \quad (15)$$

将等式两侧取拉普拉斯变换, 则可以得到电压与电流间的传递函数为:

$$\frac{i_a(s)}{u_a(s) - e(s)} = \frac{1/R_a}{\tau_L s + 1} = \frac{1}{L_a s + R_a} \quad (16)$$

故根据式 (14)、式 (16) 可得到电枢电压 u_a 到输出转矩 T_m 的传递函数:

$$\frac{T(s)}{u_a(s) - e(s)} = \frac{C_m}{L_a s + R_a} \quad (17)$$

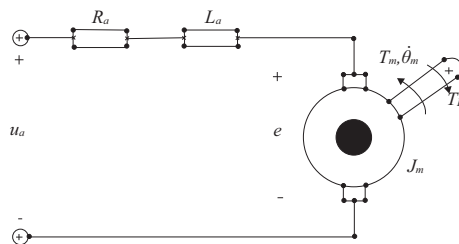


图6 直流电机等效电路图

3.3 控制系统

设置提升部分输入为托弹板沿导轨进行滑动的位移值,翻转部分输入为托弹板绕电机回转中心翻转的角位移,将电机数学模型简化为电枢电压到输出转矩的传递函

数写入至 MATLAB/Simulink 中,将输出的转矩经减速器放大后输入至 RecurDyn Client Block 模块,通过运算得出所需要的位移、速度、角位移、角速度等数据反馈至控制系统中。联合仿真模型如图 7 所示,仿真类型为变步长仿真,设置合适的参数,并将仿真时间设置为 4.55 s。

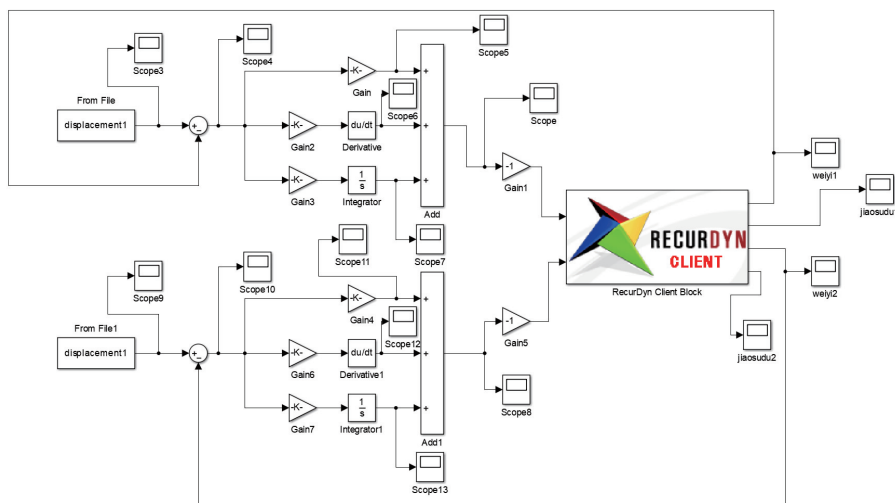


图 7 联合仿真模型

4 实验数据与联合仿真数据对比

使用 Matlab 曲线拟合工具将实验数据曲线与仿真数据曲线叠加,得到提升和回转部分角位移的实验数据与仿真数据对比曲线图,如图 8-图 9 所示。

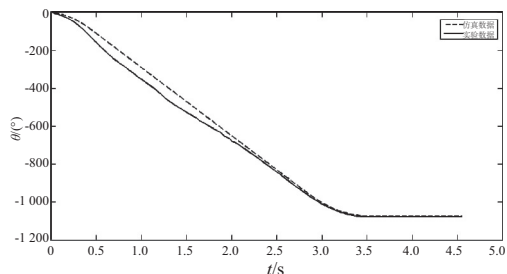


图 8 提升部分角位移的仿真与实验数据对比图

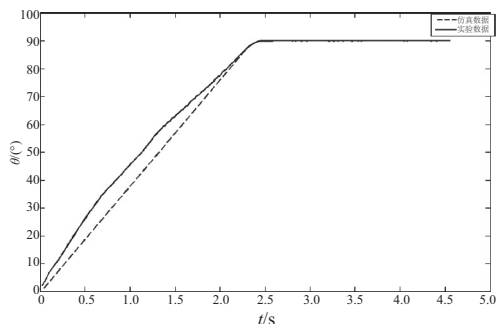


图 9 回转部分角位移的仿真与实验数据对比图

由图 8-图 9 可得提升部分到位后的仿真角位移和实验角位移差值为 5° ;回转部分到位后的仿真角位移和实验角位移差值为 0.8° 。在弹药提升过程中实现了对期望轨迹的跟踪。因此对协调过程采用 PID 控制可以得到较好的控制效果。

5 结语

- 1) 根据两自由度提弹装置的工作原理和解析模型,搭建了该模型的实验平台,创建了虚拟样机模型。
- 2) 通过实验数据与仿真数据的对比,验证了本文所采用 PID 控制的有效性以及两自由度弹药提升装置的可行性。
- 3) 本研究所做的工作对两自由度弹药提升装置的设计与实现具有重要的工程实践意义。

参考文献:

- [1] 肖本勇,郑建国. 变阻力火炮制退机结构设计[J]. 机械制造与自动化, 2018,47(3):212-215.
- [2] 侯保林,樵军谋,刘琼敏. 火炮自动装填[M]. 北京:兵器工业出版社,2010.
- [3] 郭宇飞,侯保林. 弹药协调器结构和位置控制动力学分析[J]. 兵工学报,2013,34(4):392-397.
- [4] 呼延箫扬. 两自由度弹药提升协调装置比例模型的实验及仿真研究[J]. 机械制造与自动化, 2016,45(5):107-110.

收稿日期:2018-12-06