

一种货舱门伺服控制器的设计与仿真

智文静¹, 李国材¹, 王团辉¹, 郑维娟¹, 屈王博¹, 李通²

(1. 航空工业庆安集团有限公司航空设备研究所, 西安, 710077; 2. 西北工业大学自动化学院, 西安, 710129)

摘要 为降低某型窄体客机货舱门机电作动器(EMA)的功率需求,并有效控制未知扰动对控制器的影响,提出了一种融合速度比例积分(PI)控制器和电流滞环跟踪控制算法。首先,对EMA工作过程中的复杂载荷工况进行深入分析,从而获得货舱门在实际工作过程中的负载特性。其次,基于货舱门负载特性对控制器的运动控制过程功率需求进行了匹配设计,实现了控制器的架构和主要功能电路的设计。最后,为验证所提出控制策略的有效性,在MATLAB/Simulink软件中构建了控制器的模型,并对货舱门开关门运动过程进行仿真。仿真结果证明所提出的控制策略能够将转速波动范围控制在 ± 120 r/min以内,有效降低了系统的功率,还显著提升了控制器对外部扰动的动态响应能力。

关键词 负载特性;货舱门;直线作动器;伺服控制器;Simulink

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.06.001

中图分类号 V242 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)06-0001-08

A Design and Simulation of a Cargo Door Servo Controller

ZHI Wenjing¹, LI Guocai¹, WANG Tuanhui¹, ZHENG Weijuan¹, QU Wangbo¹, LI Tong²

(1. Aviation Equipment Research Institute, AVIC Qing'an Group Co., Ltd., Xi'an 710077, China;

2. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract In order to reduce the power demands of the electromechanical actuator (EMA) for a cargo door at a certain type of narrow-body aircraft and effectively control the impact of unknown disturbances on the controller, this paper designs a high-performance servo controller, and proposes a method of integrating velocity PI controller and current hysteresis tracking control by strategy. First, on the basis of deeply analyzing the complex load conditions during the operation of the EMA, the load characteristics of the cargo door in actual working conditions are obtained. And then, based on the load characteristics of the cargo door, the power demands of the controller's motion control process are matched and designed, achieving the design of the controller's architecture and the main functional circuit. Finally, to verify the effectiveness of the proposed control strategy, a model of the controller is constructed by MATLAB/Simulink software, and the opening-and-closing motion process of the cargo door is simulated. The simulation results show that the proposed control strategy can control the speed fluctuation range within ± 120 r/min, effectively reducing the system's power consumption and significantly enhancing the controller's dynamic response capability to external disturbances.

收稿日期: 2024-04-23

基金项目: 国家级民用飞机专项科研资助项目(MJZ-2018-S-43)

作者简介: 智文静(1985-),男,宁夏银川人,高级工程师,研究方向为民用飞机舱门作动控制技术。E-mail:zhiwj001@avic.com

引用格式: 智文静,李国材,王团辉,等.一种货舱门伺服控制器的设计与仿真[J].空军工程大学学报,2024,25(6):1-8. ZHI Wenjing, LI Guocai, WANG Tuanhui, et al. A Design and Simulation of a Cargo Door Servo Controller[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(6):1-8.

Key words load characteristics; cargo door; linear actuator; servo controller; Simulink

货舱门作动器是民用飞机实现货舱门开关的关键部件之一,通常安装在货舱门和机身结构之间,通过作动器的伸出和缩进完成货舱门的开关。传统的液压伺服技术曾是民机上开关货舱门执行机构的主流选择,但随着多电能源技术的崛起,这一领域正在经历着深刻变革^[1]。近年来,随着多电能源的应用彻底改变了传统飞机的作动技术,机电作动器(electromechanical actuator,EMA)、电动静液作动器(electro-hydraulic actuator,EHA)和电备份液压作动器(electro backup hydraulic actuator,EBHA)等新型作动器正逐渐取代传统的液压伺服作动器(hydraulic servo actuator,HSA)应用于现代民用飞机上^[2-4]。其中,EMA因其质量轻、结构简单、效率高以及维护和存储方便等特点^[3],在民用飞机的舵面、起落架和机身舱门上的应用日益广泛。EMA的优势使其成为全电飞机作动发展的趋势之一,也预示了未来飞机作动技术的新方向。

在飞机作动多电化技术的研究中,对舵面驱动的探索是主要热点研究内容之一,相比之下对民机舱门作动技术的应用研究较少。文献[5]对货舱门收放机构的载荷及运动特性开展了深入研究,利用 Simulink 软件构建了货舱门收放机构的计算模型,并获取了收放机构载荷、速度和加速度的变化参数。文献[6]为满足某型民用飞机货舱门的开启和关闭要求,设计了一套货舱门的开启机构,通过 MATLAB 软件对机构进行动力学仿真分析及优化,最终使得该机构的载荷显著降低。文献[7]对某型飞机货舱门机构的研究中,采用了多体动力学建模分析方法,通过仿真准确模拟货舱门的运动过程,并基于此结果对结构进行了优化设计。文献[8]则关注于飞机货舱门开关过程中的低功率需求和电机制动过程中泵升电压产生的原因,为此建立了货舱门电作动器开关舱门过程的仿真模型,并通过仿真和试验分析,成功降低了作动器的功率需求且有效地抑制了泵升电压。文献[9]在对货舱门开闭运动过程研究中,针对负载、产品结构参数以及未知扰动等因素,提出了货舱门滑膜控制和改进比例-积分-微分控制(proportional integral derivative control,PID)相结合的复合控制策略,有效降低了系统稳态误差,并显著改善了系统动态性能。文献[10]提出了一种自适应线性

自抗扰控制器(linear active disturbance rejection control,LADRC),以实现强大的抗干扰性能并降低EMA的噪声敏感性。文献[11]提出了将遗传算法应用于多电飞机作动系统的优化设计中。文献[12]提出了一种基于双小脑模型关节控制器(cerebellar model articulation controller,CMAC)神经网络的鲁棒自适应输出反馈控制策略,实现对仅具有位置信号的机电作动器的高精度跟踪控制。

通过对货舱门运动机构的深入研究可知,负载特性在货舱门运动机构的设计至关重要,并且对于作动器伺服控制器的功率和质量具有决定性作用。此外,较好的功重比对作动器的性能提升有着显著的效果。然而,现有研究中的控制算法成本较高,并且未提及货舱门作动器的控制精度问题。本研究通过分析货舱门负载特性,准确获取货舱门作动器的载荷参数和运动控制过程中的功率需求。在此基础上,提出一种融合速度PI控制器和电流滞环跟踪控制算法的低成本控制策略。该策略能够有效控制货舱门的转速在一定范围内,从而显著提升系统的控制精度和对外部扰动的抵抗能力^[13]。

1 货舱门作动器的负载特性

负载特性通常定义为负载力和负载速度的关系,在设计货舱门作动器时,负载特性的选择对伺服控制器的功率需求是至关重要的。负载特性决定了所需的驱动力矩和速度,影响伺服控制器的控制对象选型、功率电路设计和控制策略的制定。为了实现货舱门的全状态驱动控制,伺服控制器必须具有足够的功率满足货舱门实际开关门过程中负载特性的要求。

在飞机舱门系统中,负载特性和舱门伺服控制器存在着匹配设计关系。货舱门负载特性包括重力负载、惯性负载、摩擦负载、突风负载、密封弹性载荷和压力差负载等,这些负载直接影响货舱门作动器的功率需求和运行稳定性。伺服控制器作为控制货舱门作动器的关键组件,其设计需要充分考虑货舱门的负载特性,以确保货舱门能够准确、平稳地执行开启和关闭动作。为了精确控制货舱门的开关过程,首先需要对货舱门的负载特性进行深入分析和建模仿真。通过理论分析、建模仿真和模拟负载试

验的方法,可以获得货舱门的负载特性。本文根据货舱门在不同工况下载荷情况,选取最严酷工况下的载荷作为货舱门作动器的设计载荷,实际载荷值如表 1 所示。因载荷分析过程不是本文论述的重点,故不再赘述。

表 1 最严酷工况下的货舱门作动器载荷表

Tab.1 Load of cargo door actuators under the most severe working conditions

参数	载荷/kN
工作载荷	15
最大工作载荷	25
限制载荷	40
最大把持载荷	46

通过对货舱门负载特性的研究,将最严酷工况下货舱门作动器的负载特性与运动控制过程功率需求进行了匹配设计,从而获得货舱门作动器伺服控制器的控制需求并设计最优的控制策略。

2 货舱门伺服控制器的设计

2.1 货舱门作动器的方案

图 1 为本文设计的一种集成型货舱门作动器(EMA)的结构原理图,该作动器采用了伺服控制器、电机和滚珠丝杆式执行机构集成为一体式设计结构,具有结构紧凑和安装简单的优点。伺服控制器作为货舱门作动器的核心组件,主要功能是负责精确地控制电机正反转,以驱动滚珠丝杠将旋转运动转换为直线运动,实现货舱门的精确开关门的操作。在电动操作模式下,控制器控制电机驱动传动线系,包括单向离合器、力矩限制器和行星齿轮减速器,实现力矩和转速的精确传递。而在手动操作模式下,控制器允许操作人员通过控制面板进行手动操作,确保在电气故障情况下,货舱门仍可安全操作。这种设计不仅提升了系统的可靠性,也显著增强了飞机的安全性和任务执行的可靠性。

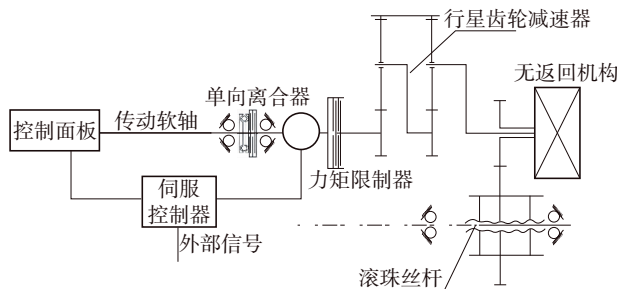


图 1 货舱门作动器的结构原理

Fig.1 Structural schematic diagram of cargo door actuator

2.2 控制器的控制需求和控制策略设计

2.2.1 控制器的控制需求

根据货舱门作动器负载特性的研究结果,可设计出与负载特性相匹配的货舱门开关门时电机速度控制曲线,如图 2 所示。在电机速度控制的全过程中要求控制器精确调控电机的转速,确保转速稳定在设定的上下限范围内,同时将转速误差控制在 400 r/min 以内,从而保证货舱门开关门时位置角度的精度要求。

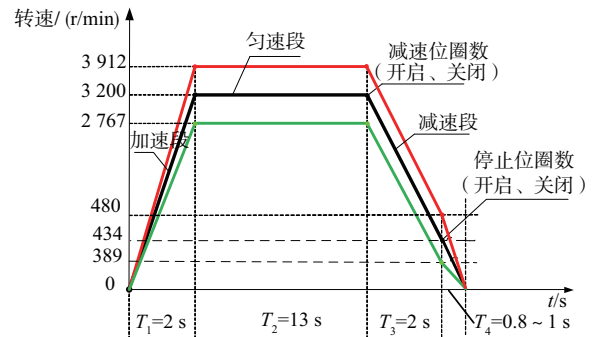


图 2 开关门时电机速度控制曲线

Fig.2 Motor speed control diagram when cargo door is opened and closed

2.2.2 控制器的控制策略及控制流程图

如图 3 所示,控制器的控制回路结合了速度 PI 控制器和电流滞环跟踪控制算法,以实现电机的高精度控制。控制器从电机霍尔传感器采集反馈信号,实时计算并调整电机转速,确保其快速响应并精确跟随预设值。速度环在调速过程中起主导作用,它能快速响应给定转速的变化,使电机转速实时跟随给定值,同时在稳态条件下最小化转速误差。速度环输出信号即为电流环给定信号,其限幅值直接决定了电机允许的最大电流。电流滞环作为内环控制,通过调整脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)波的占空比,有效地抵抗负载扰动和转速波动。在转速动态变化的过程中,电流环确保电机能够获得允许的最大电流,从而加快系统动态响应速度^[13]。

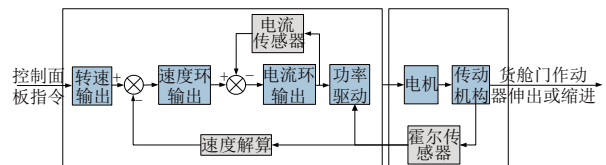


图 3 控制器的控制回路

Fig.3 Controller control loop block diagram

此外,当电机出现过载或者堵转的异常情况时,控制器会立即限制电枢电流的最大值,以实现快速自

动保护。同时,控制器还能接收控制面板的指令,并结合速度环接收到的电机转动圈数和位置反馈信息,

控制输出相应的转速作为速度环的给定值,实现对电机的闭环控制。控制器的具体控制流程如图 4 所示。

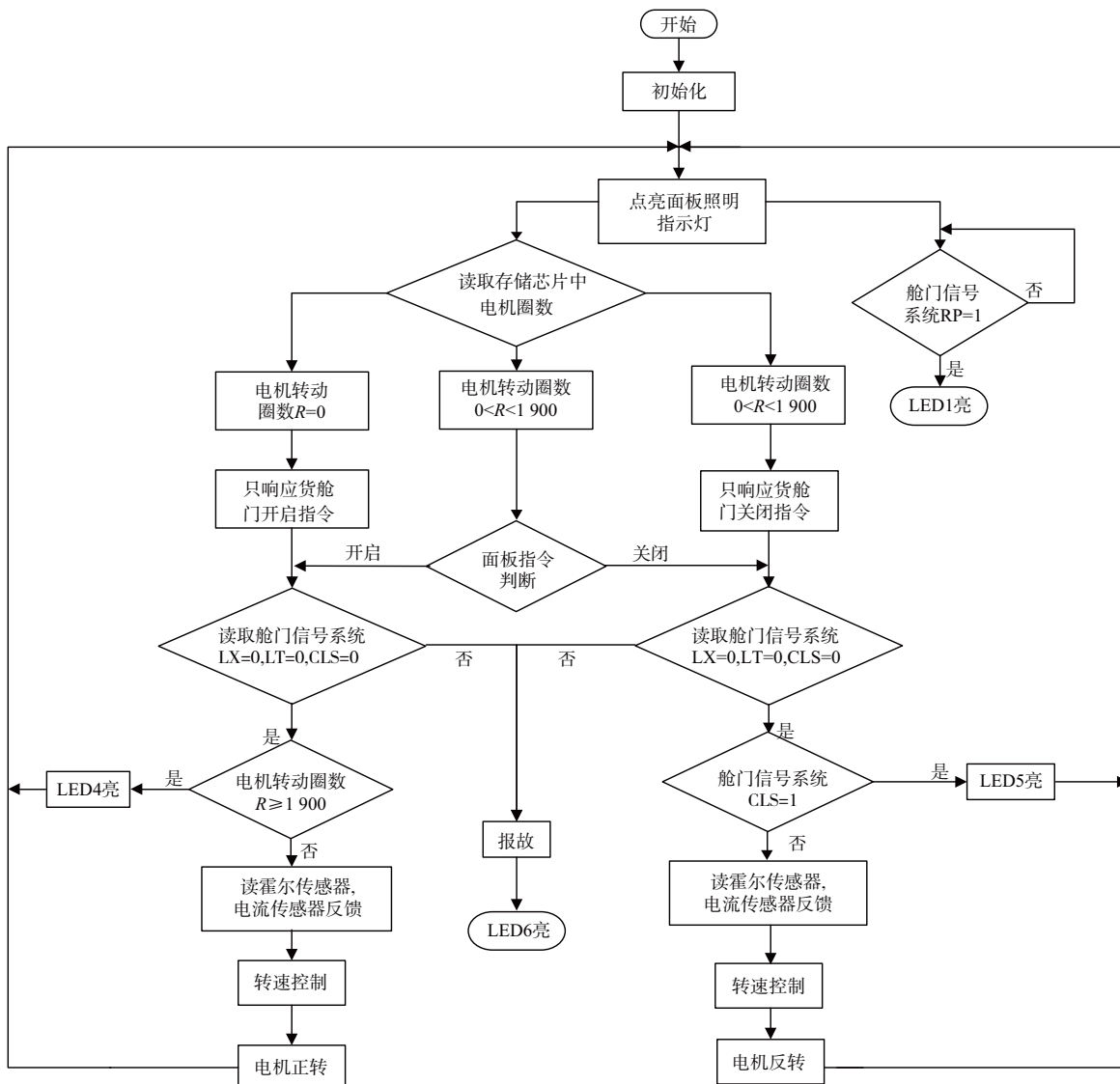


图 4 控制器控制流程

Fig. 4 Controller control flow

1)速度环。速度环负责实现电机转速的快速响应和精确跟随给定值。在稳态运行中,速度环能有效降低转速误差,并具备良好的抗负载变化能力。通过霍尔传感器获取电机转子的三相位置信号,经过主控芯片的处理,转化为精确的电机转速值。速度环的输出信号作为电流环的给定值,其限幅值决定了电机允许的最大电流。

2)电流环。电流环作为电机调速内环,其主要作用是确保电机电流紧密跟随电流给定信号的变化,并对母线电压的波动提供有效的抗干扰能力。在速度变换过程中,电流环能够加速调节过程,并在电机出现过载或者堵转等异常情况下迅速限制电机电流,防止电机受到损伤^[14-15]。

2.3 控制器的架构设计

控制器的总体架构如图 5 所示,控制器实时接

收起落架系统的轮载信号和舱门信号系统的舱门位置状态信号,为控制逻辑提供实时数据。当接收到控制面板的指令后,控制器根据预设逻辑控制电机转动,驱动滚珠丝杆伸出推动货舱门打开。在开启过程中,控制器通过比较位置指令与实际丝杠位置信号的差值,并通过位置、转速和电流控制模块的综合解算,输出当前状态下的双路 PWM 波对丝杠的位置伺服控制^[2]。为了确保系统稳定,控制器还具备反向电动势抑制功能和过压保护机制。当检测到电机反向电动势过大或驱动模块过压时,主控芯片能迅速响应切断驱动信号并在控制面板上指示故障,便于快速故障定位和处理。同时,主控芯片实时监测母线电压,一旦检测到电压超出安全阈值,控制器将启动泵升电压的泄放机制,进一步增强控制器的稳定性和安全性^[2,16-18]。

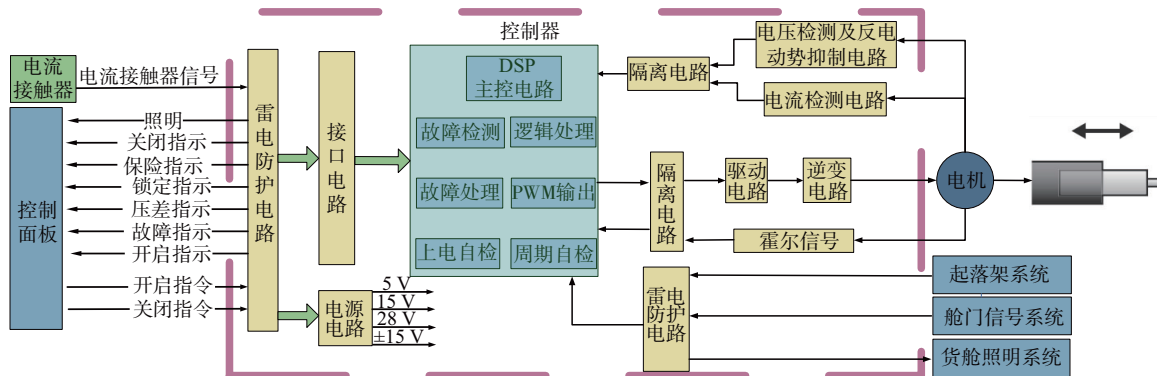


图 5 EMA 控制器的总体架构

Fig. 5 EMA and control system overall structure

2.4 控制器的电路设计

2.4.1 电源电路设计

电源电路负责为主控芯片和外围电路提供稳定的电源,并为电机提供动力用电。其关键功能包括:①电源滤波器用于减少电源线上的传导类干扰;②稳压电路由瞬态抑制二极管、浪涌抑制电路和电容电阻组成,有效抑制电压尖峰、过欠电压浪涌以及电源瞬时中断;③DC-DC 电源模块将 28 V 输入电源进行转换,为控制电路和监控电路提供所需的电源。

2.4.2 主控电路设计

主控电路由主控芯片及其外围电路构成,主控芯片选用了美国 TI 公司推出主控芯片数字信号处理器 TMS320F2812,该芯片采用高性能静态互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)技术,主频高达 150 MHz,同时具有丰富的外设接口。它在直流电机和伺服控制领域表现卓越,且与其他 28xx 系列芯片内核结构和寄存器兼容,代码和指令完全兼容,便于产品的后续升级^[19-20]。

主控电路原理框图如图 6 所示,其主要模块包括:

- 1)电源转换模块。该模块采用电源转换芯片,将 5 V 外部电源转换为 3.3 V 和 1.8 V,确保 DSP 的稳定运行。
- 2)看门狗模块。在控制器启动和运行过程中,监控主控芯片的工作状态和工作电压,确保能稳定运行并实现可靠复位。
- 3)I/O 模块。该模块主要接收控制面板的指令,实时反馈货舱门的状态,实现操作人员与系统的人机交互。
- 4)转速控制模块。根据控制逻辑输出 PWM 信号,驱动货舱门的电动操作。同时,它还接收来自霍尔传感器、电流传感器和舱门信号系统的信号,实现对作动器和货舱门运行状态的实时监控和调节。
- 5)故障监控模块。该模块负责故障状态的监

测,并对故障采取相应的处理措施。同时,它还具备在控制面板上对故障状态进行指示的功能,便于操作人员快速识别并处理故障。

6)数据存储模块。使用非易失性静态随机存取存储器,在货舱门开启过程中记录电机转动的圈数,确保数据的可靠存储。

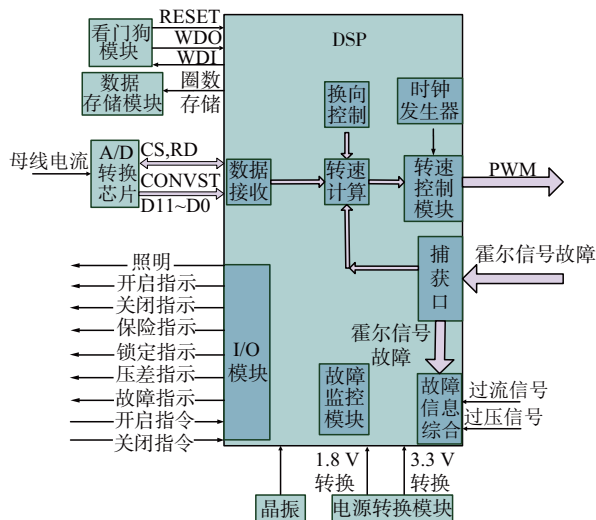


图 6 主控电路原理

Fig. 6 Main control circuit block diagram

2.4.3 电机驱动电路设计

驱动电路主要作用是将电机控制信号经过光电耦合和功率放大,然后输出至电机,实现对电机的转速和转向的精确控制。

本文所选的直流无刷电机额定电流为 14 A,当电机以额定功率输出时(效率取 70%),直流母线电流平均值为:

$$I_a = 14 / 0.7 = 20 \text{ A} \quad (1)$$

考虑到 1.5 倍过载情况,电机在最大功率输出时,驱动电路的直流母线电流最大值为:

$$I_{a\max} = 20 \times 1.5 = 30 \text{ A} \quad (2)$$

同时,当电机最大功率输出时,驱动电路的功率管电流峰值计算为:

$$I_{\max} = \sqrt{2} I_{a\max} = 42.42 \text{ A} \quad (3)$$

根据峰值电流的计算值,通过计算可得功率管额定电流选择原则为:

$$I_N \geq 2I_{a\max} = 84.84 \text{ A} \quad (4)$$

根据主电路母线电压峰值,可得功率管额定电压选择原则为

$$U_N \geq 2U_{dc} = 56 \text{ V} \quad (5)$$

根据上述计算结果,选择了 IR2130 型三相桥驱动芯片和 MCDA100D 桥式整流器。所选整流器具备漏源电压耐压 $V_{dss} = 100 \text{ V}$ 和连续漏极电流 $I_d = 100 \text{ A}$ 的特性,栅源极阈值电压 $V_{GS} = 2 \sim 4 \text{ V}$, 这些参数均满足设计需求。

2.4.4 监控电路设计

监控电路的核心功能是监测电机的工作状态,主要包括 2 个方面:一是电机过流监控。利用高精度电流传感器实时监测电机的直流母线电流。一旦检测到电流超过设定的安全阈值,比较电路会迅速判断并发出过流信号。该信号将立即传递至主控电路,主控芯片随即切断对电机的驱动信号,以防止过流对电机造成损害。二是电压监测与反电动势抑制。实时监测母线电压,并在电机运转时有效抑制反电动势。在电机工作过程中,若出现无返回机构失效情况(即反电动势电压超标),开关管将立即打开,功率电阻吸收反电动势电压,保护控制器内部元件免受损害。

3 货舱门伺服控制器的仿真分析

在民用飞机的产品设计方法上,基于模型的系统工程(model-based systems engineering, MBSE)已成为一种至关重要的验证工具。尽管在第 2 节已经完成了货舱门伺服控制器的硬件电路设计,但考虑到实物制造成本和试验台定制周期,本文选择使用 MATLAB/Simulink 软件进行控制器的建模和仿真验证。这种方法不仅凸显了模型在设计过程中的核心作用,而且通过仿真可以在早期设计阶段发现系统潜在的问题,为设计迭代和优化提供重要依据。这有助于确保产品的需求满足性和安全性,同时降低研发成本和风险^[21-23]。基于已确定的控制策略,本文建立了货舱门伺服控制器的仿真模型,如图 7 所示。在建模过程中,详细设置了控制器的控制参数和无刷直流电机的参数,具体参数值见表 2 和表 3。此外,将货舱门作动器的负载特性参数纳入模型,作为被控制对象的输入。最后,通过 Simulink 软件进行仿真分析,旨在验证控制器的性能表现是否达到预期^[23-26]。

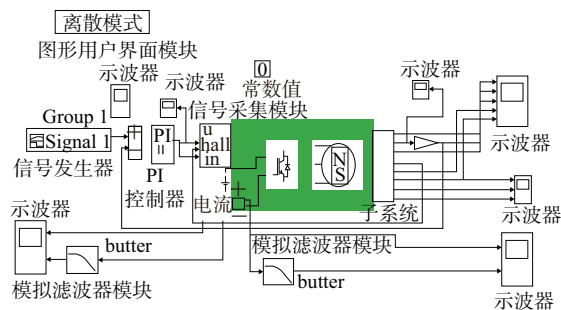


图 7 货舱门伺服控制器的仿真模型

Fig. 7 Simulation model of servo controller for cargo door

表 2 仿真模型中的控制参数

Tab. 2 Control parameters in the simulation model

速度环	电流环	母线储能电容
$K_p = 10$	滞环幅值 $\pm 1 \text{ A}$	560 uF
$K_i = 2$	运算周期 $100 \text{ }\mu\text{s}$	
速度输出限幅 $\pm 100 \text{ A}$		
运算周期 $100 \text{ }\mu\text{s}$		

表 3 直流无刷电机参数

Tab. 3 DC brush-less motor parameters

参数	值
电机相电阻/ Ω	0.018 6
电机单相电阻/ Ω	0.022 6
电机力矩常数/ $\text{N} \cdot \text{m}/\text{A}$	0.045
电机转动惯量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$	4.4×10^{-5}
极对数 P	5
额定电压/ V	28
额定电流/ A	≤ 14

为了模拟真实环境下的工作状态,在仿真中加入了约 0.1 N/m 的扭矩扰动,以模拟空载的工况。控制器驱动电机在 $0 \sim 2 \text{ s}$ 加速阶段将电机转速提升至 $3\ 200 \text{ r/min}$,随后进入 13 s 的匀速运动阶段。为了优化仿真效率,将匀速运动的仿真时间缩短至 2 s ,经过分析这一调整对整个系统仿真的影响微乎其微。然后,电机进入 2 s 的减速阶段,电机转速逐渐降低至 434 r/min 。最后,电机以 434 r/min 的转速持续运行 $0.8 \sim 1 \text{ s}$,最终减速至完全停止。这样的仿真设置不仅贴近实际工况,还显著缩短了仿真时间,提高了设计效率。

图 8 为控制器速度指令响应的仿真曲线,图中黑色曲线为电机速度指令曲线,蓝色曲线为不加滤波的仿真结果,紫色曲线为加滤波的仿真结果,通过仿真结果可知:①在转速小于 $1\ 000 \text{ r/min}$ 的低速段,电机的实际转速与指令转速之间存在着 $\pm 200 \text{ r/min}$ 的误差。该误差是由于电机本身的动态特性和机械负载的扰动所引起;②随着转速的增加,转速误差逐渐减小。主要原因是电机内部的某些非线性因素(如磁阻、摩擦等)在高转速时对电机

性能的影响相对较小;③在 3 200 r/min 匀速段内,由于增加了电流和 0.1 N/m 力矩扰动,转速存在一定的波动。这些波动主要来源于外部干扰或系统内部的不确定性;④为了减小低速段的转速误差,采用了一阶低通滤波器对速度指令进行处理。通过滤波处理,低速误差可以控制在 100 r/min 左右,而在 500 r/min 以上的转速误差则可达到 50 r/min 左右。证明滤波器能够有效减少低速段的转速误差,提高系统的稳定性。

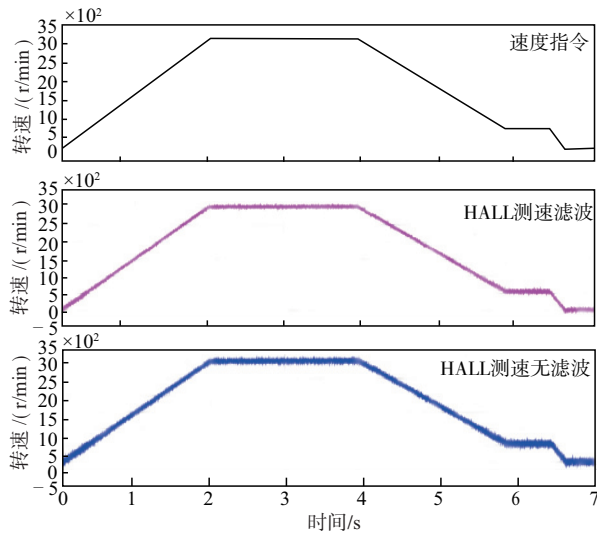


图8 控制器速度指令响应的仿真曲线

Fig. 8 Controller responds to the speed instruction

4 结语

本文通过对货舱门负载特性的深入分析,确定了作动器的载荷参数和运动控制过程中的最优功率需求,进而设计了一套高性能且经济实用的伺服控制器方案。为了验证所提出的控制策略的可行性,在 Simulink 中构建了仿真模型,基于控制参数、直流无刷电机参数和机械负载特性参数进行了仿真。仿真结果表明,采用融合速度 PI 控制器和电流滞环跟踪控制算法的低成本控制策略能够有效控制作动器电机转速,显著提高控制精度和系统抗扰动能力,为实际系统开发和调试提供了重要的参考依据。

在进一步研究中,将致力于完善仿真模型,考虑外部系统信号和控制面板指令信号的时延以及这些因素对伺服控制器的影响。同时,为了应对系统参数变化和不确定性干扰,将探索引入基于滑膜控制算法和扰动观测器的 PID 复合控制策略,以增强系统的动态性能和稳定性。此外,计划在试验台上对产品进行验证,并将实际测试结果与仿真数据进行对比分析,从而进一步优化控制策略和仿真模型,为相关领域的研究和应用提供坚实的支持。

参考文献

- [1] 姚雄华,邓军锋,冯蕴雯. 运输类飞机舱门设计[M]. 北京:国防工业出版社,2017:4-11.
YAO X H, DENG J F, FENG Y W. The Doors Design of Transport Aircraft[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017: 4-11. (in Chinese)
- [2] 付永领,刘和松,庞尧,等. 机载直驱式机电作动器的伺服控制器设计研究[J]. 测控技术, 2010, 29(7): 36-40.
FU Y L, LIU H S, PANG Y, et al. Design of Controller for Airborne Direct Drive Electro-Mechanical Actuators [J]. Measurement & Control Technology, 2010, 29(7): 36-40. (in Chinese)
- [3] 余健. 基于 FPGA 的飞机货舱门作动器控制策略研究[D]. 北京:中国运载火箭技术研究院, 2019.
YU J. Research on Control Strategy of Cargo Door Actuation System Based on FPGA[D]. Beijing: China Academy of Launch Vehicle Technology, 2019. (in Chinese)
- [4] 王首浩,仲悦,郑起佳,等. 基于 APSoC 冗余智能控制驱动平台研制[J]. 导弹与航天运载技术, 2023(4): 50-54.
WANG S H, ZHONG Y, ZHENG Q J, et al. Development of Redundant Intelligent Control Driving Platform Based on APSoC[J]. Missiles and Space Vehicles, 2023(4): 50-54. (in Chinese)
- [5] 雷萍,刘冬平. 基于 Simulink 的货舱门收放机构建模与仿真[J]. 航空科学技术, 2018, 29(11): 50-54.
LEI P, LIU D P. Modeling and Simulation of Lifting and Lowering Mechanism of Cargo Door Based on Simulink [J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29(11): 50-54. (in Chinese)
- [6] 郑维娟,智文静,杜秀军. 民机货舱门开启机构分析和优化[C]//2020 中国航空工业技术装备工程协会年会论文集. 北京:《测控技术》杂志社, 2020: 438-441.
ZHENG W J, ZHI W J, DU X J. Analysis and Optimum of Cargo Door Open Mechanism[C]// Proceedings of 2020 China Aviation Industry Technical Equipment Engineering Association Annual Meeting. Beijing: Measurement & Control Technology Press, 2020: 438-441. (in Chinese)
- [7] 罗涛,张引妮. 某型飞机货舱门操作力分析与优化[C]// 2019 Altair 技术大会论文集. 上海:澳汰尔工程软件有限公司, 2019: 1-8.
LUO T, ZHANG Y N. Analysis & Optimization about Operating Force of the Cargo Door in a Certain Type Aircraft[C]// Proceedings of the 2019 Altair Technical Conference. Shanghai: Aoter Engineering Software Co., Ltd., 2019: 1-8. (in Chinese)
- [8] 余健,聂振金,王鑫,等. 飞机货舱门电作动系统负载匹配设计[J]. 航天制造技术, 2019(2): 23-27.
YU J, NIE Z J, WANG X, et al. Cargo Door Electro-

- mechanical Actuation System Design on Load Matching[J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2019(2):23-27. (in Chinese)
- [9] 周素莹,李亚伦,王泽坤,等. 飞机电动货舱门位置伺服系统的复合控制策略研究[J]. *微电机*, 2023, 56(5):31-35.
- ZHOU S Y, LI Y L, WANG Z K, et al. Research on Compound Control Strategy of Aircraft Electric Cargo Door Position Servo System[J]. *Micromotors*, 2023, 56(5):31-35. (in Chinese)
- [10] LIU C Q, LUO G Z, QUAN X L, et al. Adaptive LADR-Based Disturbance Rejection Method for Electromechanical Servo System[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, 56(1):876-889.
- [11] QI H T, FU Y L, QI X Y, et al. Architecture Optimization of More Electric Aircraft Actuation System[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2011, 24(4):506-513.
- [12] HU J, CAO M M, BAI Y C, et al. Dual Cerebella Model Neural Networks Based Robust Adaptive Output Feedback Control for Electromechanical Actuator with Anti-Parameter Perturbation and Anti-Disturbance[J]. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2024, 38(4):1457-1476.
- [13] 罗维玲. 无刷直流电机控制策略及停车定位问题的研究[D]. 长沙:中南大学, 2009.
- LUO W L. Research on Control Strategy and Parking Location of Brush-Less DC Motor [D]. Changsha: Central South University, 2009. (in Chinese)
- [14] 白龙,孙楚,周元钧. 航空机电作动器的混合整流全状态反馈控制[J]. *航空学报*, 2016, 37(6):1940-1952.
- BAI L, SUN C, ZHOU Y J. Full-State Feedback Control of a Novel Hybrid Rectifier Applied to Aircraft Electric Actuator Load[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(6):1940-1952. (in Chinese)
- [15] 郝振洋,胡育文,黄文新. 电力作动器中永磁容错电机及其控制系统的发展[J]. *航空学报*, 2008, 29(1):149-158.
- HAO Z Y, HU Y W, HUANG W X. Development of Fault-Tolerant Permanent Machine and Its Control System in Electro-Mechanical Actuator [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, 29(1):149-158. (in Chinese)
- [16] 刘金琨. 先进PID控制 MATLAB 仿真[M]. 北京:电子工业出版社, 2023:54-80.
- LIU J K. Advanced PID Control MATLAB Simulation [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2023:54-80. (in Chinese)
- [17] 毛志鑫,王立发,徐轶昊. 一种飞机舱门控制设备和控制方法;CN111593962B[P]. 2021-06-18.
- MAO Z X, WANG L F, XU Y H. The Invention Relates to an Aircraft Door Control Device and a Control Method;CN111593962B[P]. 2021-06-18. (in Chinese)
- [18] BARZKAR A, GHASSEMI M. Electric Power Systems in More and All Electric Aircraft; a Review[J]. *IEEE Access*, 2020(8):169314-169332.
- [19] 王忠勇,陈恩庆. TMS320F2812 DSP 原理与应用技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2012:8-30.
- WANG Z Y, CHENG E Q. TMS320F2812 DSP Principle and Application Technology [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2012:8-30. (in Chinese)
- [20] 周鹏,许钢. DSP 原理与实践-基于 TMS320F28x 系列[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2023:10-50.
- ZHOU P, XU G. Principle and Practice of DSP-Based on TMS320F28x Series [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2023:10-50. (in Chinese)
- [21] 魏科鹏,胡健,姚建勇,等. 航空机电作动器神经网络快速终端滑模控制[J]. *航空学报*, 2021, 42(6):116-125.
- WEI K P, HU J, YAO J Y, et al. Fast Terminal Sliding Mode Control of Neural Networks for Aeromechanical Actuators[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(6):116-125. (in Chinese)
- [22] 周高峰,李峥峰,张琦. MATLAB/Simulink 机电动态系统仿真及工程应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2022:24-27.
- ZHOU G F, LI Z F, ZHANG Q. MATLAB/Simulink Electromechanical Dynamic System Simulation and Engineering Application [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2022:24-27. (in Chinese)
- [23] 王六平. PID 控制系统设计使用 MATLAB 和 Simulink 仿真与分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2023:24-27.
- WANG L P. PID Control System Design and Automatic Tuning Using MATLAB/Simulink [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2023:24-27. (in Chinese)
- [24] 李腾辉,谢寿生,彭靖波,等. 航空发动机模糊 PID 趋近律滑模控制器设计[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2018, 19(2):15-20.
- LI T H, XIE S S, PENG J B, et al. A Design of Sliding Mode Controller for Aero-Engine Based on Fuzzy PID Approaching Law[J]. *Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition)*, 2018, 19(2):15-20. (in Chinese)
- [25] LIU C Q, LUO G Z, CHEN Z, et al. A Linear ADRC-Based Robust High-Dynamic Double-Loop Servo System for Aircraft Electro-Mechanical Actuators [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019, 32(9):2174-2187.
- [26] WANG J Y, ZHANG H, MIAO Q. Source Free Unsupervised Domain Adaptation for Electro-Mechanical Actuator Fault Diagnosis[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, 36(4):252-267.

(编辑:陈斐)