

基于 LabVIEW 的混电推进系统上位机设计

王爽¹, 曲涛², 林平¹

(1. 大连理工大学 控制科学与工程学院, 辽宁 大连 116024;

2. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110000)

摘要: 随着航空业的发展, 动力系统的革新格外受关注, 其中混合电推进系统技术极具发展潜力, 为实现对混电推进系统的控制及监测, 开发设计了一套混电推进系统的上位机; 该上位机应用 LabVIEW 语言设计, 涵盖了界面设计与功能设计, 实现了指令下发、数据监测及数据保存的功能; 该上位机经 Simulink 仿真模型测试, 实现了上位机接收显示仿真模型的发电机功率、电池功率、负载功率、直流母线电压和电池 SOC 数据; 经电机实物测试, 实现了上位机设定电机转速指令及对电机 q 轴电流、 d 轴电流和转速的监测; 经两次测试验证了上位机在数据交互、处理与保存方面的可靠性, 上位机在测试中表现出良好的功能性与稳定性, 能够满足混电推进系统在实际工程中的应用需求。

关键词: LabVIEW; 混电推进系统; 上位机; 串口通信; 数据交互

Upper Computer Design of a Hybrid Propulsion System Based on Labview

WANG Shuang¹, QU Tao², LIN Ping¹

(1. School of Control Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. China Aviation Development Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110000, China)

Abstract: With the development of the aviation industry, it is crucial for the innovation of the power system, of which the hybrid electric propulsion system technology has great potential for development. An upper computer with a hybrid electric propulsion system is developed, which can control the hybrid propulsion system and monitor its parameters. This upper computer is designed based on LabVIEW, which includes the interface design and function design, thus achieving the command issuance, parameter observation, data storage; By testing the Simulink simulation model, the upper computer receives and displays the generator power, battery power, load power, direct current (DC) bus voltage and battery state of charge (SOC) data of the simulation model; After motor testing, the speed command of the upper computer and q -axis current, d -axis current and speed detection are achieved. Through 2 tests, the upper computer verifies the reliability of the data interaction, data processing and data storage, with a good function and stability, which satisfies the application requirements of hybrid propulsion systems in actual engineering.

Keywords: LabVIEW; hybrid propulsion systems; upper computer; serial port communication; data interaction

0 引言

在全球航空业迅猛发展的时代背景下, 航空研发机构和制造企业对航空业的节能、环保及可持续性的重视与日俱增, 减少航空器排放、降低油耗已成为航空工业发展的重要方向, 因此动力系统的革新愈发受关注。在众多动力系统架构中, 分布式混合电推进系统的架构展现出了良好的发展前景^[1]。混合电推进系统作为新型推进系统的一种^[2], 其核心在于利用传统发动机驱动发电

机, 通过发电机为分布在机翼或机身上的多个电机和螺旋桨供电, 进而由这些电机驱动螺旋桨产生绝大部分或全部的推力^[3]。

混电推进系统相较于传统的动力推进系统, 对飞机原有的气动结构进行了改善, 实现了等效涵道比的大幅提升, 进而减少油耗。采用分布式推进型式的飞行器, 其螺旋桨滑流可以显著提升桨盘后方的空气流速, 优化飞行性能, 增强机翼结构稳定性, 实现短距起飞^[4]。作为一种将燃油动力和电力结合的复合动力系统, 混合动

收稿日期: 2024-09-09; 修回日期: 2024-10-21。

基金项目: 国家自然科学基金项目(62203085)。

作者简介: 王爽(2002-), 女, 硕士研究生。

通讯作者: 林平(1991-), 男, 博士, 副教授。

引用格式: 王爽, 曲涛, 林平. 基于 LabVIEW 的混电推进系统上位机设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(10): 235-243.

力推进系统的核心优势在于能够高效地利用能源^[5]。该系统的设计可优化飞行器在宽工况下单一动力的效率,其续航时间得到显著提升,从而满足长时间飞行任务的实际需求,具有重要的现实意义^[6]。

混电推进系统作为新一代航空动力技术,受到了世界各国的广泛关注^[7]。美国国家航空航天局(NASA, national aeronautics and space administration)先后开展了多个飞机项目^[8],比如 SUGAR Volt、“飞马”(PEGA-SUS)支线飞机^[9]和横列式直升机,俄罗斯自 2017 年 7 月起开始了混电推进系统相关项目的研究,建造了一个 500 kW 级的混电推进系统概念模型^[10],随后,俄罗斯进一步推进了针对 19 座飞机的 2 000 kW 级动力系统的研发,并进行了试飞验证^[11]。

尽管我国对混电推进系统的研究相较于欧美国家起步较晚,但在国家政策的大力扶持以及高校与航空发动机企业的紧密合作下,其发展速度并不逊色于其他国家。2012 年 7 月,辽宁通用航空研究院研发的混合动力无人机成功完成首飞。该无人机采用燃料电池和锂电池作为供电电源,在巡航和降落阶段,燃料电池能独立驱动电动机运行^[12]。2015 年,沈阳航空航天大学的康桂文指导研究了关于通用飞机油电混合动力系统设计与性能仿真^[13],通过应用飞机动力学,对一款双座飞机进行油电混合动力方面的改进,说明了混电机相较于其他动力飞机的优势,提出了电推进系统的能效优化方法。2020 年,雷涛等人^[14]在西北工业大学飞机电推进技术工业和信息化部重点实验室的基础上,针对分布式电推进飞机动力系统,开展了仿真建模与评估优化研究。2022 年,中国航发沈阳发动机研究所的刘一雄等人^[15]应用多目标遗传算法,设计了一种混合动力航空发动机及其优化设计方法,并在设计过程中对传统发动机和电力发动机的性能进行了全面考量。

分布式混合电推进系统的发展,不仅为航空动力技术带来了革命性的变化^[16],也为实现航空器的节能减排和可持续发展提供了新的思路与方案。但混电推进系统较为复杂,为保证混电推进系统能够正常运行,全面了解其运行状态并对其运行过程实时控制是很有必要的。因此,针对混电推进系统设计上位机是系统正常运行的必要条件。

随着计算机技术的进步,虚拟仪器逐渐兴起,国家政策大力支持发展混合电这一动力架构,混电推进系统的上位机在功能方面由简单的数据监测向智能化系统诊断发展,比如指令下发、故障诊断、数据保存等。李晓锦等人^[17]设计的混合动力汽车上位机平台,实现了发动机和电机效率点追踪、能量流动画显示和路况统计 3 种功能;黄丽莹^[18]搭建的油电混合动力系统,完成了动力系统的配置优化,设计了仿真监控系统;邵斌等

人^[19]开发的混合动力汽车 CAN 网络信号监测与故障诊断系统,利用 LabVIEW 的 Web Server 技术实现了远程监测功能,能够根据参数进行故障诊断与报警。

本设计依托大连理工大学复杂控制系统研究所的“油电混合分布式推进系统供电网络与电源管理研究及集成验证”项目和国家自然科学基金项目开展,在该项目中,上位机的作用至关重要。上位机能够读取混电推进系统运行期间的状态参数,将读取的数据展示在人机交互界面,方便操作人员查看;并且操作人员可以通过上位机下发指令至高性能控制器,从而对混电推进系统进行控制。

1 系统结构及原理

基于 LabVIEW 的混电推进系统上位机平台以混联混合动力构型、数据采集技术为基础,实现对混电推进系统数据的精准监测、对系统工作参数的设定、运行工况的选择以及实时数据的保存等功能。

1.1 系统组成

混电推进系统整体框架如图 1 所示。操纵台上位机与下位机的高性能控制器进行通信,上位机显示可视化操作界面,方便用户给定指令并观测系统数据。

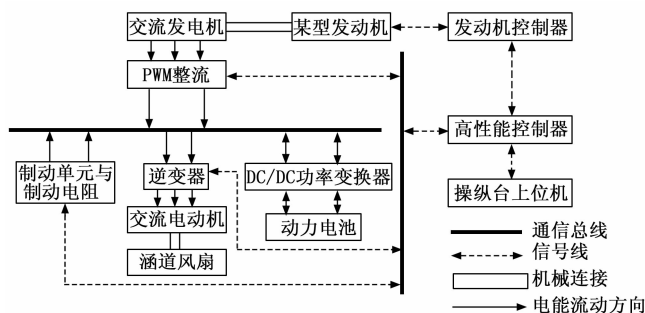


图 1 混电推进系统组成框图

1.2 混电推进系统的 5 种工况

混电推进系统正常工作的情况下,典型稳态工况存在如表 1 所示的 5 个工作状态。混电推进系统为工况 1 时,动力电池直接给电动机供电,发电机发电为零(动力电池已经充好电);混电推进系统为工况 2 时,发电机直接给电动机供电,动力电池供电为零;混电推进系统为工况 3 时,发电机和动力电池共同给电动机供电;混电推进系统为工况 4 时,发电机给动力电池和电动机供电;混电推进系统为工况 5 时,发电机给动力电池供电。

表 1 工作状态描述

工作状态编号	描述
工况 1	动力电池直接给电动机供电,发电机发电为零(动力电池已经充好电)
工况 2	发电机直接给电动机供电,动力电池供电为零
工况 3	发电机和动力电池共同给电动机供电
工况 4	发电机给动力电池和电动机供电
工况 5	发电机给动力电池供电

1.3 上位机功能设计

上位机需要对混电推进系统进行状态采集及实时控制，具体功能如下：1) 系统运行工况选择及参数配置；2) 系统运行状态参数采集；3) 系统运行状态参数保存；4) 系统运行状态参数波形显示；5) 系统的故障记录及操作日志记录。

混电推进系统的运行期间,上位机接收到高性能控制器发送的直流母线参数、电动机参数、发电机参数、电池参数和 DC/DC 功率变换器参数等数据后,将这些数据处理后在上位机的人机交互界面动态显示;同时在上位机中可以选择混电推进系统的 5 种典型工况并设置不同工况的相关参数,并发送指令给下位机。

1.4 控制原理

混电推进系统的控制原理如图 2 所示。上位机与高性能控制板之间通过 RS485 接口, 采用 Modbus 协议进行通信。高性能控制板与电池管理系统 (BMS, battery management system) 之间的通信方式为 CAN 通信, 与系统各部件 (变频器、PWM 整流、DC/DC 功率变换器、PT100 变送器) 之间采用 RS485 接口标准的串行通信方式。

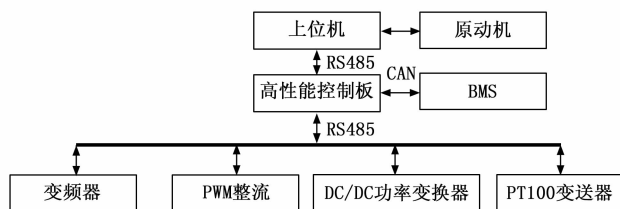


图 2 混电推进系统控制原理框图

2 系统硬件设计

2.1 系统硬件组成

混动推进系统分别由制动单元与制动电阻、交流发电机、逆变器、交流电动机、涵道风扇、DC/DC 功率变换器、动力电池、直流母线、通信总线、高性能控制器、上位机操纵与显示系统、某型发动机和发动机控制器组成。

混动推进系统的直流母线上配置了制动单元与制动电阻,通过对制动单元与制动电阻的控制,对直流母线电压进行调整,防止在特殊条件下,直流母线电压超过安全值。变频器留出 380 V 的交流电接口,便于给直流母线提供谐波分量小的高质量 540~600 V 直流电,能给系统内所有的控制器上电和对直流母线进行预充电,也便于给动力电池充电,系统进行试验之前,便于使得动力电池保持在充满电的状态。系统内不含主动整流器和充电机,厂房内不用提供相应的供电条件,降低了成本。

2.2 电机实验平台

电机是混电推进系统中重要的组成部分。以

CSM105-PM2P-50-5P5 型号电机为实验平台, 测试上位机功能。上位机设定电机转速来控制电机, 并实时监测电机的 q 轴电流、 d 轴电流和转速。

该实验平台主要包括高速对拖电机、配电柜和控制板三部分。其中高速对拖电机包括主电机和从电机两部分，均为永磁同步电机，是电机实验平台的核心组件。主电机永磁同步电机用作驱动电机，与控制板通信，接收控制板传来的指令；从电机永磁同步电机用作对拖负载，与主电机共轴，模拟不同工况下的负载情况；配电柜是电机实验平台的电气控制中心，主要用于提供电力供应和电气保护等功能；控制板是电机实验平台的控制中心，主要用于执行电机控制算法和监控电机运行状态，和永磁同步电机通信，核心部件是 STM32F103 芯片。

2.3 通信系统

上位机与电机之间的通信为全双工通信。Labview上位机通过串口与 RS485 接口进行串行通信, RS485 接口接控制板的 UART3 串口, 通讯原理如图 3 所示, 其中主电机是用控制板驱动的永磁同步电机, 从电机作为负载电机使用。计算机上位机与电机系统控制板之间建立通讯, 是通过选择通信串口、设置波特率、数据比特位等信息来实现的。

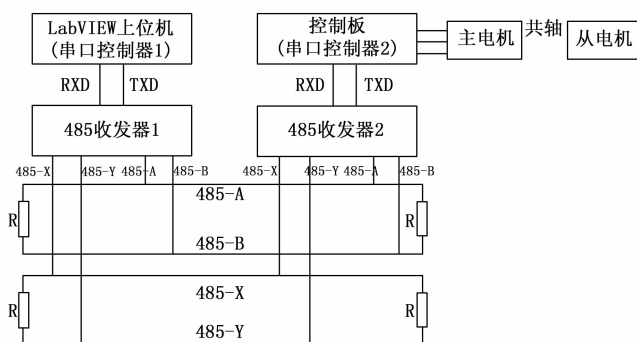


图 3 通信原理图

3 系统软件设计

3.1 上位机系统设计框架

本文中的上位机采用的编程语言是美国 NI 公司开发的 LabVIEW^[20]。本文对混电推进系统测试过程中的开关量信号、数字量信号和故障信号分析后,所设计的混电推进系统上位机应具备通信功能、数据处理功能、数据保存功能和界面美化的效果。具体模块功能如下:

1) 串口通信模块: 上位机配置串口后可与下位机通信, 完成向下位机的指令发送以及接收下位机的数据。

2) 数据处理模块: 上位机接收的下位机初始数据不具有可读性, 需进行处理后在上位机界面正常显示。上位机将处理后的数据在表格中动态显示并绘制相应波形图, 波形图可以选择查看指定某一参数曲线或同时查

看所有参数曲线；同时当下位机发生故障时，上位机界面显示并记录下位机传来的故障信号。

3) 数据存储模块：在上位机工作过程中按下保存键，上位机能够将波形图数据存储为 csv 文件，方便操作人员查看系统运行情况。

4) 界面美化模块：在进入系统前设计登录界面，保障系统安全；选择工况后，操作界面自动切换至对应工况的能量流动效果图并切换至相应工况的参数输入面板；对表格的行首编号，便于数据的有序记录，且操作日志表格显示隔行变色的效果，便于操作人员查看信息。

混电推进系统的运行期间，上位机接收到高性能控制器发送的直流母线参数、电动机参数、发电机参数、电池参数和 DC/DC 功率变换器参数等数据后，将这些数据处理后在上位机的人机交互界面动态显示；同时在上位机中可以选择混电推进系统的 5 种典型工况并设置不同工况的相关参数，并发送指令给下位机。其系统设计框架如图 4 所示。

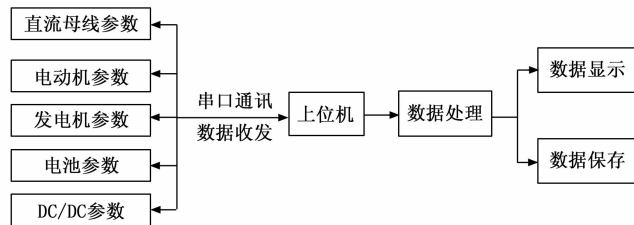


图 4 上位机设计框架图

3.2 上位机人机交互界面设计

根据以上功能的设计需求，并考虑到操作的友好性和便利性，上位机的人机交互界面设计了登录界面、操作界面和串口配置界面。

上位机设计登录界面，以保证系统安全性。登录界面的设计如图 5 所示。通过程序设计，可以保证上位机运行后登录界面始终最先出现。设计登录界面可以避免未被授权的人访问系统，准确输入用户名及密码后按下登录键即可进入系统操作界面。



图 5 登录界面

操作界面的设计如图 6 所示。操作界面的设计采用模块化的思想，该界面主要分为 6 个模块。

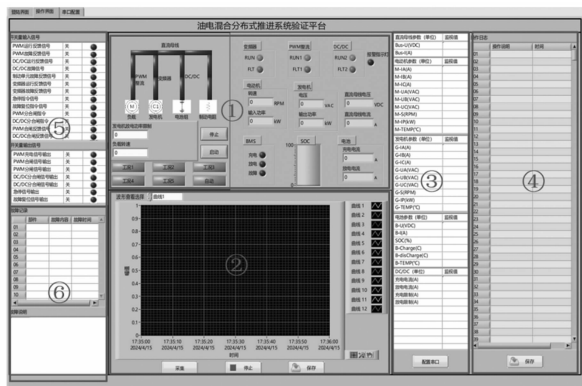


图 6 操作界面

1) 上位机的写命令区，实现主控面板的命令设定。具备 5 种典型工作模式及自动模式切换按钮，实现对高性能控制器的控制；选择不同工况后对应的能量流动方向在此动态显示；变频器、PWM 整流、DC/DC 的运行状态指示灯显示；电动机、发电机、直流母线电压相关检测数据的设定；电池管理系统、电池组相关运行状态指示灯及监测数据显示。

2) 可进行各状态量的采集，显示所选择的数据波形，包括直流母线电压/电流值、电动机电压/电流值、发电机电压/电流值、电池的电压/电流值、SOC 值、DC/DC 的充电/放电电流值等；可在波形选择列表中选择所要监视的波形数据；可将数据保存至 excel 文件中。

3) 实时显示电动机、发电机、直流母线、电池、DC/DC 的运行参数，数值为连续量，进行持续动态显示。

4) 记录系统中操作动作并显示。

5) 显示系统中开关信号的状态，可显示开关量名称及状态，其中红灯表示故障信号灯。

6) 记录系统中发生的故障并说明。

串口配置界面的设计如图 7 所示，用户在此界面对串口进行配置，实现上位机与下位机的通信。在此界面中，用户可以选择串口并设置波特率、停止位、数据位、奇偶校验等数据，通过恰当的串口配置实现和下位机的通信，同时可以在此界面直观观察到当前上位机与下位机通信的原始数据传输情况。按下“返回操作界面”按键后，界面跳转回操作界面。

3.3 通信功能

串口通信主要通过 VISA 函数来完成。VISA 函数是 LabVIEW 中用于控制和管理各种仪器通信的工具，它提供了统一的接口和功能，利用 VISA 配置串口、VISA 读取和 VISA 写入函数等，可以实现串口配置和数据读写等操作，从而使上位机能够与各种设备进行通信并交换数据。串口通信功能主要采用事件结构来完成，通过不同的事件触发执行相应的程序分支，从而实现相应功能。

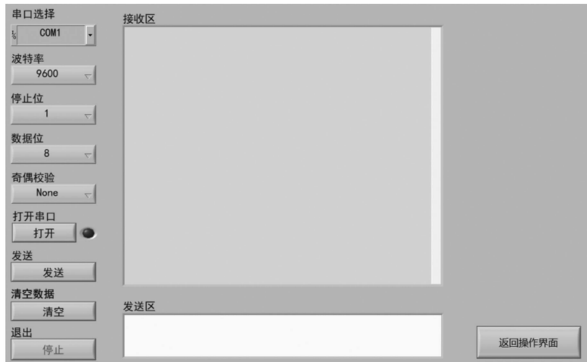


图 7 串口配置界面

在串口配置界面中，配置好串口后，按下“打开串口”按钮，触发事件，进入相应事件结构分支。通过“VISA 清空 I/O 缓冲区”函数，对串口的接收缓冲区和传输缓冲区进行清空。按下“打开串口”按钮后，按钮值为真，串口指示灯亮，表示当前串口已打开。利用选择函数判断按钮值的真假，若按钮按下，则将值 50 传递设置为超时时间，否则设置为值 -1。即当“打开串口”按钮按下，每隔 50 ms 执行一次超时事件分支；当“打开串口”按钮未按下，执行超时结构的时限为 -1，永不执行超时事件分支。

数据接收的流程如图 8 所示。在超时事件分支结构内实现读取串口数据的功能。按下“打开串口”按钮后，每 50 ms 执行一次超时事件分支，即每 50 ms 读取一次串口数据。通过属性节点得到串口当前写入数据的位数，判断数据位数不为 0 即有数据写入时进入条件结构的“真”分支，接入 VISA 读取函数，将读取缓冲区的值在接收区显示，并利用“连接字符串”函数将接收区字符串进行拼接，使传来的新数据连接在旧数据后显示，保证数据的连续性。

数据发送的流程如图 9 所示。按下“发送”按钮后，若串口指示灯亮即串口已打开，执行条件结构的“真”分支，利用“VISA 写入”函数将发送区内数据写入配置的串口，即向下位机发送数据。

3.4 数据处理功能

串口读取的数据通常不具有可读性，需要对数据进行处理后才能在上位机正常显示。由于对上位机分别进行了混电推进系统 Simulink 仿真模型测试和电机实物测试，两次测试下位机发送的数据规则不同，因而上位机相应的数据处理方式也不同，对此分别进行说明。

3.4.1 仿真模型测试的数据处理

LabVIEW 上位机接收仿真模型传来的数据，每组数据中含 5 个有效数据，依次为发电机功率、电池功率、负载功率、直流母线电压和电池 SOC。其中每个数据占 8 个字节，不设置每组数据的帧头帧尾。在配置串口前，需增加“VISA 设备清零”函数，在串口配置

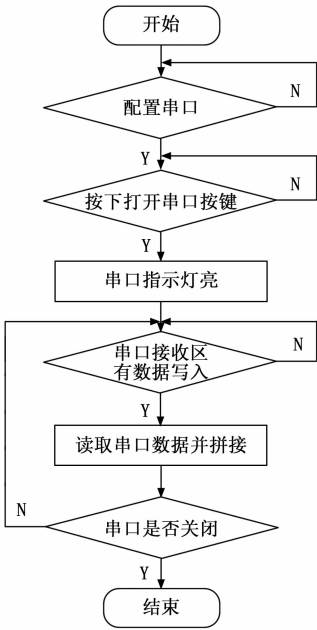


图 8 数据接收流程图

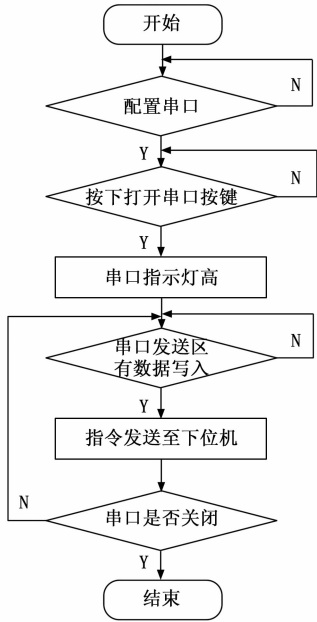


图 9 数据发送流程图

之前先对设备的输入和输出缓冲区进行清零，从而避免发生数据超限错误。

上位机接收到数据后，首先将 5 个数据按字节数分隔开，分别进行处理；将数据转为字符串格式后，利用“从字符串还原”函数，输入字节顺序与仿真模型字节顺序相匹配，均设置为小端模式，即可还原得到原本数据，为簇类型；将数据利用“替换数组子集”函数，即可完成数据在数值表格中的动态显示。

为使数据波动变化便于观测，将数据波动实时显示在波形图表内。5 个参数数据捆绑后如果直接输入波形

图表显示,则有概率出现野值,导致波形显示不完全或无法显示,故进行去野值编程,利用“判断范围并强制转换”函数,判断当前新值与上一个值的差值绝对值小于 50 时,可将该值传输至波形图表内;若差值大于 50,判定该值为野值,舍去该值。

通过波形选择枚举控件,可以在波形图中只显示所选参数对应的单条曲线,也可以选择同时显示全部参数曲线。通过枚举控件连接事件结构,结构内嵌 for 循环,当波形查看选择枚举的值和当前 for 循环次数的 i 值相等时,通过属性节点选定该条活动曲线并设置曲线可见,从而实现各条曲线可选显示的效果。

混电推进系统的仿真模型测试的数据处理流程如图 10 所示。

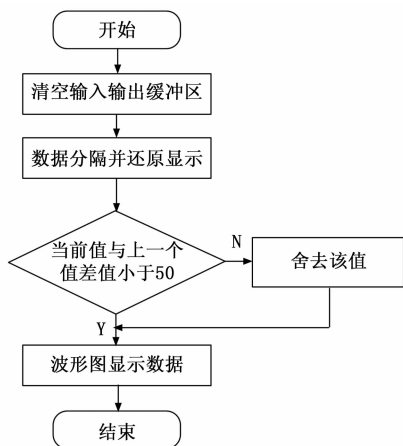


图 10 仿真模型测试数据处理流程图

3.4.2 电机实物测试的数据处理

在电机实验平台进行上位机的实物测试时,上位机设定电机转速后,下位机每 5 ms 返回一组测试数据,一组数据占 36 个字节,每组数据的帧头为 03FC,帧尾为 FB04,帧头帧尾各占两个字节;每组数据内共含 8 个有效数据信息,每个数据占 4 个字节,其中前 3 个数据分别对应电机的 q 轴电流、 d 轴电流和转速,第四个数据对应电机发生的故障编号。

上位机首先对下位机传来的数据进行处理,将数据复原为可读的十进制数。当串口读取到数据时,判断字节数不为 0 后进入程序,通过“匹配模式”函数来截取帧头帧尾之间的数据,从而获取每组数据信息,通过移位寄存器实现读取缓冲区数据的连续搜索。帧头帧尾之间的数据通过强制类型转换来转换为一维数组类型,即每个有效数据占一维数组的 4 个连续元素。利用“数组子集”函数获得一维数组中前 32 个数据组成的子数组,该子数组中不含帧头帧尾,均为有效数据,且随着下位机数据的持续发送,子数组内数据不断更新。子数组中每 4 个数据输出为一个新数组,并转为字符串数据类型。

测试发现下位机传来的每个数据中 4 个字节是反序

的,在交换字后再次交换字节可以正常显示。由于下位机数据会把实际的物理意义上的参数(电流/电压/速度等)转换为定点数并标么化,上位机如果想准确显示数值则需要反标么化并将定点数转换为浮点数。将处理后的 8 个数据创建为一维数组,当截取的 32 个字节有效数据不为空字符串时,数组通过隧道传出 while 循环,此时数据处理已完成。

上位机将处理后的数据在表格中进行动态显示。传出 while 循环的数组是不断增加新行的二维数组,新行为下位机传来的最新一组数据处理后的值,即二维数组的每列对应不同参数。通过“数组大小”函数获取当前最新行的索引值,获得最新一组数据后经数据类型转换可在上位机前面板模块 3 中表格内动态显示。

处理后的数据同时在波形图中有选择地进行动态显示。由于波形图以二维数组的行来显示波形,当前二维数组每列代表一个参数,故需要进行数组转置后再在波形图中显示。当波形图接收到二维数组时,对于数组中的每一行,波形图会将其作为一组独立的点来处理,将二维数组中的每一行绘制为一条独立的曲线,并在波形图中显示出来。

当前以电机 51 号过热故障为例,当下位机传来的第四个有效数据为 51 时,代表电机发生过热故障,在前面板故障记录表格中显示故障编号及内容。

电机实物测试的数据处理流程如图 11 所示。

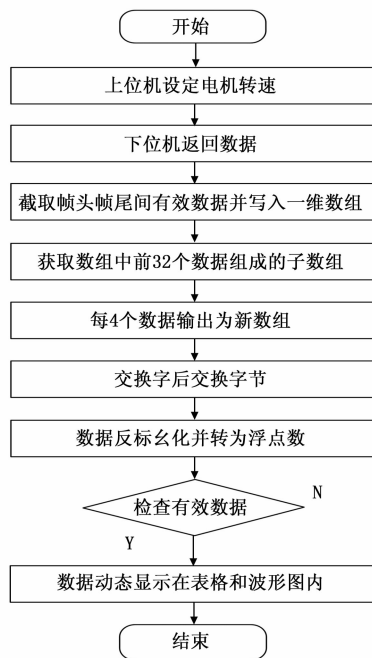


图 11 电机实物测试数据处理流程图

3.5 数据保存功能

上位机具有数据保存功能,可将系统运行参数变化保存为 csv 文件。对应的流程如图 12 所示。

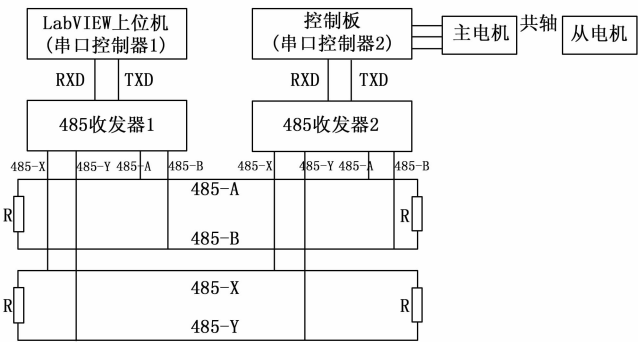


图 12 数据保存流程图

运行上位机系统后，在进行数据接收过程中按下保存按键，即可在与上位机的 VI 文件的相同路径下创建一个名为“数据记录”的 csv 类型文件，若文件已存在则创建新文件并覆盖原文件。将表头写为一维数组常量，通过“创建数组”函数与待保存的数据拼接为一个数组，利用“写入带分隔符电子表格”函数，将二维数据写入电子表格。由于 csv 文件的特性，分隔符设为英文逗号。数据的保存可以方便操作人员随时查看系统的运行情况和参数变化。

3.6 界面美化功能

在人机交互界面进行适当美化，主要分为登录界面的设计、5 种工况对应的能量流动图与参数设定面板切换设计和表格美化设计三方面展开。

3.6.1 登录界面的设计

登录界面的设计可以提高系统的安全性与可靠性。上位机运行后，首先自动清空用户名和密码，同时将选项卡中的登录界面常量赋值给选项卡局部变量，以保证程序运行后登录界面先出现；当按下登录按键时，执行相应事件结构分支内程序，即判断当用户名和密码均正确时，进入操作界面；同时通过外加 while 循环，保证界面选项卡在程序运行过程中的任意时刻均可通过不同按钮触发来进行界面切换。

3.6.2 5 种工况的能量流动图及参数面板切换

混电推进系统共有 5 种典型工况，不同工况对应着不同的能量流动关系，在上位机界面显示不同的能量流动效果。当用户按下不同的工况选择按钮时，操作界面会显示相应工况对应的能量流动效果图，该效果采用流水灯逻辑来实现，通过设定 500 ms 的延时，实现相邻布尔灯的轮流闪烁；同时参数设定选项卡切换至当前工况对应的所需要设定的参数，方便用户针对当前工况进行相应的指令下发。

3.6.3 表格美化

为方便数据的标识和索引，通过利用 for 循环的循环次数 i 赋值，实现对操作日志表格和故障记录表格行首进行编号；同时设置操作日志表格隔行变色效果，通

过遍历所有单元格，并判断当前单元格所在行为奇数行还是偶数行，据此为单元格填色，奇数行即数据发送操作记录行为黄色，偶数行即数据接收记录行为绿色，方便用户分辨当前行代表的操作。

4 实验结果与分析

该上位机的测试分为 Simulink 混电推进系统仿真模型测试和电机实物平台测试两部分，分别验证了该上位机与混电推进系统通信的功能以及与实际通信的实际应用功能。

4.1 实验说明

4.1.1 Simulink 仿真模型测试

上位机首先与 Simulink 仿真模型通信进行测试，确保设计的上位机可以正常与混电推进系统之间进行数据交互。上位机与仿真模型的数据交互模拟真实操作环境，对上位机的通信功能、数据处理逻辑以及人机交互界面进行预先验证，从而确保上位机设计的准确性和可靠性。通过仿真测试高效地识别并修正潜在的设计缺陷，优化系统性能，能够在后续的实物测试中实现更加稳定和精确的通信与控制。

上位机的测试所应用的混电推进系统仿真模型在 Simulink 平台搭建。该部分测试内容主要包括上位机数据接收和数据处理的测试，包括表格数据正常显示和波形正常显示。

在电脑中创建一对虚拟串口，上位机和混电推进系统仿真模型依托虚拟串口进行通信。将仿真模型中 scope 模块的数据发送，在上位机中监测混电推进系统仿真模型的发电机功率、电池功率、负载功率、直流母线电压和 SOC 数据变化并保存数据。

4.1.2 电机实物测试

上位机与电机实物通信进行测试，确保上位机在实际应用中的功能性和稳定性。

上位机基于现有的电机实验平台进行混电推进系统的部分测试，测试内容主要包括上位机指令发送、数据接收和数据处理的测试，包括表格数据正常显示、波形图的波形正常显示和数据正常保存，均需进行实际测试来检验上位机设计情况。

设计实验如下：首先进行电机的故障测试，测试电机发生 51 号过热故障时上位机能否正常显示记录。然后进行电机空载状态下转速连续改变的测试，在电机空载状态下，上位机每隔十秒向电机发送转速指令 3 000、4 000、5 000、6 000 r/min，在上位机中实时观测电机返回的 q 轴电流、 d 轴电流和转速数据变化并保存数据。

4.2 实验数据

4.2.1 Simulink 仿真模型测试

以发电机功率为例，结果如图 13 所示。仿真模型

和 LabVIEW 上位机串口配置完成后, 仿真模型运行得到的数据在上位机的数值表格和波形图中均正常显示, 波形选择功能正常。当前时刻发电机功率波形数据与电池功率波形数据互为相反数, 负载功率为 0, 此时发电机给电池充电, 符合实际情况。

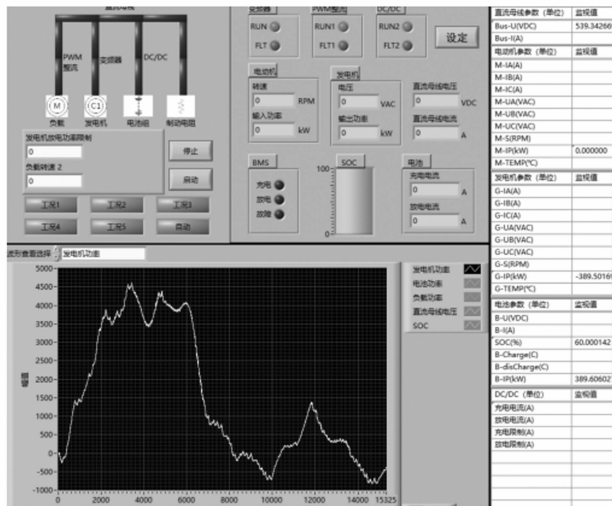


图 13 仿真模型测试部分结果图

4.2.2 电机实物测试

设定电机出现 51 号过热故障, 此时观察上位机, 电机的 q 轴电流、 d 轴电流和转速均为 0, 上位机的故障记录面板能够正常记录电机的故障信息, 结果如图 14 所示。

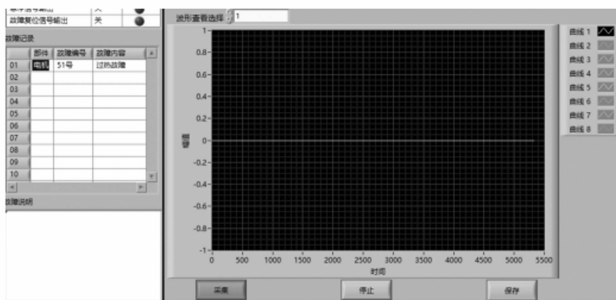


图 14 电机故障测试结果图

以电机空载情况下转速连续改变得到的转速波形图为例, 结果如图 15 所示。从图中可以看出, 转速的变化情况和上位机指令发送一致。由于 PI 控制, 给定转速指令瞬间, 会出现超调现象, 转速指令会暂时高于给定值, 随后转速会回到给定值。上位机设定电机转速后, 表格内可实时监测到当前系统数据变化, 同时可以在波形图中选择查看数据。

4.3 对比分析

在上位机的测试中, 不仅进行了仿真实验, 还进行了实物实验, 以验证仿真模型的准确性和实物系统的可

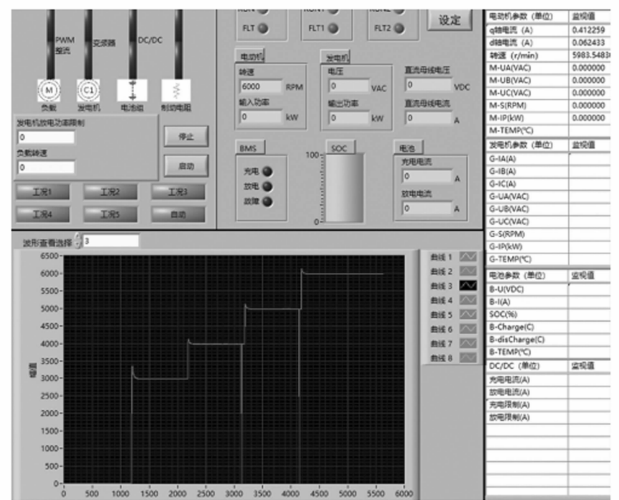


图 15 电机实物测试部分结果图

行性。仿真实验主要基于 Simulink 软件进行, 通过建立混电推进系统的数学模型来模拟其在工况 5 下的行为。仿真实验的优势在于成本较低, 易于控制实验条件, 但仿真模型无法完全模拟实物系统中的所有物理现象。实物实验则在电机平台上进行部分实物测试, 进行了实际的电机操控及响应。

仿真测试实验结果显示, 在假定为工况 5 的条件下, 混电推进系统的发电机功率、电池功率、负载功率、直流母线电压和电池 SOC 值均在预期范围内, 符合实际情况。电机实物测试实验结果表明, 上位机能够正常控制并监测电机部分, 实验数据符合预期。

通过上位机与混电推进系统仿真模型的通信, 验证了该上位机未来应用在混电推进系统实物平台的可靠性。仿真模型对应的混电推进系统实物平台正在搭建, 暂用电机对拖实验平台来完成混电推进系统的部分实物测试, 从而完成了电机部分功能的实物实验测试, 验证了该上位机应用在实物平台上的可靠性。

4.4 结果分析

经检测, 该上位机功能强大, 具有数据监测功能、控制功能、数据保存功能和界面美化效果功能。数据监测功能实现了对下位机数据的实时采集, 同时可以在波形图中选择指定参数, 观测其变化规律。控制功能使上位机可以进行对下位机的参数设定, 实现指令下发。数据保存功能使得操作人员能够随时对系统启动时刻至当前时刻运行产生的数据进行保存, 方便人员的查看与记录。界面美化效果功能使得上位机界面更加友好, 实现了不同工况下的动态能量效果显示, 营造了美观的操作界面。

5 结束语

本文依托大连理工大学复杂控制系统研究所的“油

电混合分布式推进系统供电网络与电源管理研究及集成验证”项目, 为了对混电推进系统进行测试, 本文借助 LabVIEW 软件, 设计了混电推进系统的上位机。该上位机可对混电推进系统进行控制, 并能采集系统运行过程中的多种参数, 具体包括对直流母线、电动机、发电机、电池、DC/DC 运行参数及系统故障信息进行采集, 并完成波形图的显示。数据保存功能为数据的记录及对比提供了便利。实验结果显示, 作为混电推进系统的上位机, 该上位机具有工程推广应用价值。

参考文献:

[1] 王妙香, 王元元. 电动飞机的误解分析与研究综述 [J]. 航空科学技术, 2019, 30 (5): 3-8.

[2] 张小伟. 蓄势待发的新一轮动力革命 [J]. 大飞机, 2014 (6): 38-41.

[3] 朱炳杰, 杨希祥, 宗建安, 等. 分布式混合电推进飞行器技术 [J]. 航空学报, 2022, 43 (7): 48-64.

[4] 李嘉诚, 盛汉霖, 陈 欣, 等. 混合动力分布式电推进飞行器总体设计 [J]. 航空动力学报, 2024, 39 (9): 156-168.

[5] RENDÓN M A, SANCHEZ R C D, GALLO M J, et al. Aircraft hybrid-electric propulsion: Development trends, challenges and opportunities [J]. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, 2021, 32 (5): 1244-1268.

[6] OELBERG E. A hybrid optimal control approach to maximum endurance of aircraft [D]. Concordia University, 2018.

[7] 廖忠权. 2022 世界电动系统进展 [J]. 航空动力, 2023 (1): 23-26.

[8] 高 杨. NASA 电气化飞机推进系统控制方案分析 [J]. 航空动力, 2023 (2): 34-38.

[9] BRELJE J B, MARTINS R J. Electric, hybrid, and tur-

[13] MAKIN T R, MICERA S, MILLER L E. Neurocognitive and motor-control challenges for the realization of bionic augmentation [J]. Nature Biomedical Engineering, 2023, 7 (4): 344-348.

[14] 秦海鹏, 秦 瑞, 施晓芬, 等. 基于模型预测的四足机器人运动控制 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2024, 58 (8): 1565-1576.

[15] ZHENG H, LU Y, JIE J, et al. Gaussian adaptive strategy based multi-objective evolutionary optimization for path planning on uneven terrains [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2023, 9 (1): 539-546.

[16] 金书奎, 寇子明, 吴 娟. 煤矿水泵房巡检机器人路径规划与跟踪算法的研究 [J]. 煤炭科学技术, 2022, 50 (5): 253-262.

boelectric fixed-wing aircraft: a review of concepts, models, and design approaches [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2018, 104 (C): 1-19.

[10] 廖忠权. 航空混合电推进系统发展研究 [J]. 航空动力, 2018 (2): 45-50.

[11] 秦 江, 姬志行, 郭发福, 等. 航空用燃料电池及混合电推进系统发展综述 [J]. 推进技术, 2022, 43 (7): 6-23.

[12] 李正浩. 通用飞机油电混合动力系统优化与仿真 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2016.

[13] 康桂文, 孙振祥. 通用飞机油电混合动力系统设计与性能仿真 [J]. 沈阳航空航天大学学报, 2015, 32 (2): 23-27.

[14] 雷 涛, 孔德林, 王润龙, 等. 分布式电推进飞机动力系统评估优化方法 [J]. 航空学报, 2021, 42 (6): 44-63.

[15] 刘一雄, 莫 姐. 一种混合动力航空发动机及其优化设计方法 [P]. 中国: CN202210406872. 2, 2022-07-12.

[16] 张小伟. 面向 2030 年的分布式混合电推进技术 [C] // 北京: 中国航空工业发展研究中心, 2015: 5.

[17] 李晓锦, 王红磊, 倪计民, 等. 一种基于 LABVIEW 的混合动力汽车新型上位机平台的设计 [J]. 汽车工程, 2013, 35 (4): 312-316.

[18] 黄丽莹. 油电混合动力系统配置优化及仿真监控设计 [D]. 北京: 北京交通大学, 2022.

[19] 邵 斌, 朱茂桃, 张 彤, 等. 混合动力汽车 CAN 网络信号监测与故障诊断系统的开发 [J]. 汽车技术, 2009 (2): 46-50.

[20] ZHAN W, PORTER J R, MORGAN J A. Experiential learning of digital communication using LabVIEW [J]. IEEE Transactions on Education, 2014, 57 (1): 34-41.

[17] 吴聪懿, 徐云浪, 陈椿元, 等. 基于物理引导的 RBF 神经网络逆模型在 ZTT 运动平台前馈控制中的应用 [J]. 动力学与控制学报, 2025, 23 (1): 78-85.

[18] 吴 量, 顾义凡, 邢 彪, 等. 基于线性二次型调节器的四轮转向与分布式集成控制方法 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2024, 54 (9): 2414-2422.

[19] 吴永刚, 梁华为. 基于自适应模型预测的无人车跟踪控制方法研究 [J]. 制造业自动化, 2023, 45 (2): 198-202.

[20] 杨梓豪, 王庆领. 基于分层强化学习的多无人机协同围捕方法 [J]. 海军航空大学学报, 2025, 40 (4): 567-575.

[21] 周 维, 过学迅, 裴晓飞, 等. 基于 RRT 与 MPC 的智能车辆路径规划与跟踪控制研究 [J]. 汽车工程, 2020, 42 (9): 1151-1158.