

靶弹一体化测发系统设计与实现

荣念通, 丁军辉

(中国人民解放军 91851 部队, 辽宁 葫芦岛 125000)

摘要: 针对靶弹测试系统和发射控制系统独立设计、成本高、功能重叠等问题, 通过采用 PXI 总线技术, 对靶弹测试系统和发射控制系统进行一体化集成设计, 在保证测试覆盖性与发射控制逻辑正确性的同时, 实现装备小型化和功能提升; 针对系统高可靠性、安全性要求, 采用硬件继电器逻辑和软件程控逻辑相结合的控制方案, 分解功能需求至不同设备、软件, 协同配合实现测试及发射过程安全性控制; 采用定时中断触发机制解决方法, 基于系统特定硬件环境, 实现了靶弹模飞动态测试; 实际应用表明, 系统满足靶弹的全弹测试、动态测试、射前检查、发射装置控制、模拟/实弹发射要求。

关键词: PXI 总线; 测发一体化; 发射控制; 动态测试; 安全性

Design and Implementation of Integrated Test and Launch Control System for Target Missiles

RONG Niantong, DING Junhui

(Unit 91851, PLA, Huludao 125000, China)

Abstract: In response to the issues of independent design, high cost, and overlapping functions of the target missile testing system and launch control system, a PXI bus technology is used to make an integrated design for the target missile testing system and launch control system, and minimize equipment and improve functions, with the testing coverage and the launch control logic correctness ensured. For the high reliability and safety requirements of the system, a control scheme combining hardware relay logic and software programmable logic is presented to decompose the functional requirements of different devices and software, and cooperatively achieve safety control during testing and launch processes. Based on the specific hardware environment of the system, a timing interrupt is used to achieve the dynamic testing of target missile modeling flight. Practical application shows that the system meets the requirements of full missile testing, dynamic testing, pre launch inspection, launch device control, and simulation/missile launch.

Keywords: PXI bus; integrated test and launch control system; launch control; dynamic test; security

0 引言

靶弹是用于模拟强敌导弹的“蓝军”装备^[1], 在飞控系统、动力系统上与传统导弹基本一致, 其测试和发射控制往往沿用导弹测试与发射控制模式, 测试系统主要完成靶弹电气正确性检查、设备功能检查、指令条件检查、模飞测试等技术准备任务^[2], 发射控制系统则完成靶弹的射前检查、参数解算装订与发射控制等任务^[3]。

随着装备系统内部结构复杂程度的提高, 测试系统更加注重测试覆盖性, 总线形式上多采用 VXI、CPCI、PXI、LXI 等^[4]。发射控制系统则更加注重信号时序的

逻辑性, 总线形式上多采用 VXI、CPCI、PLC 等^[5]。受制于地面测试系统技术阵地应用和发射控制系统装备平台应用的属性不同, 国内外导弹/靶弹测试与发射控制系统往往分别独立设计, 系统及软件庞大复杂、开发成本高、兼容性差。

在靶弹测试与发射控制本质上, 均是由控制设备向弹上发送激励信号, 通过实时检测弹上设备响应信号或读取响应信息, 给出靶弹工作状态和测试结果, 区别在于靶弹测试设备需要对弹上各系统进行详细的结果判定, 以确定各系统是否工作正常, 是全弹系统工作状态的详细测试检查过程; 发射控制设备为确保靶弹发射的

收稿日期:2024-08-12; 修回日期:2024-10-08。

作者简介:荣念通(1988-),男,硕士,工程师。

通讯作者:丁军辉(1979-),男,硕士,高级工程师。

引用格式:荣念通,丁军辉. 靶弹一体化测发系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(9):161-167, 199.

便捷性与快速性^[6]，仅定性检测弹上各设备是否正常并定量检测关键少数信号，主要对靶弹发射控制过程进行逻辑控制。由于两种设备在功能上存在一定重叠，单独设计极大造成了软硬件资源的浪费。

为此，本文利用 PXI 总线设备体积小、模块化、低价位、实时性强的特点，采用一体化思想，设计一套小型化测试发射控制系统，集成地面测试与发射控制功能，实现了模飞动态测试与高可靠安全保障，有效保证了测试覆盖性和发射控制的逻辑性，精准适配靶弹测试与发射控制使用场景，使靶弹技术准备与发射过程安全、可靠、便捷。

1 设计原则

当前靶弹多采用数字控制体制和在弹集中式测试策略，即由测试或发射控制系统发出指令，弹上综控机识别后收集对应信息并以数字形式下传，地面系统接收、解析、判断后给出正常或异常结论。该工作模式大幅缩减了地面系统为获取弹上信息所需配置的硬件资源规模，使系统仅需分配信号检测与激励资源、通信资源即可实施靶弹测试和发射控制^[7]。由于测试与发射控制工况信号覆盖性、逻辑性及安全性要求高，为此，在系统设计中，主要注重以下原则：

1) 合理分配测试资源，实现测试与发射控制资源共用：

靶弹测试和发射控制过程在信号逻辑关系、流程时序上存在较大的不同，所需的测试资源也存在较大的差异。为此，针对不同工况的资源要求，合理设计模拟量、开关量和数据通信资源，实现整个使用工况的资源覆盖^[8]。

2) 注重安全性设计，设计多种安全控制手段：

靶弹的测试与发射控制场景均为带火工品工作场景，在技术准备过程中容易因设备信号隔离失败、激励信号给出错误等造成热电池激活、误点火等情况的发生^[9]，可通过软硬件综合调理实现测试发射控制过程中的多重安全控制。

3) 在极小硬件条件下，实现靶弹模飞动态测试：

靶弹的模飞动态测试是检查被测靶弹整个飞行过程动态响应是否正确的主要方式^[10]，该测试工况具有大数据量、高实时性和时间同步要求高等特点，可通过利用设备串口中断模式，在不增加硬件系统规模的前提下，实现靶弹的模飞动态测试。

2 系统总体设计

一体化测试与发射控制系统由发射控制器、测试/发射控制台、测试与发射控制电缆、信号转接箱等任务设备及自检模拟器、电池模拟器等辅助设备组成，具备全弹测试、动态模飞、射前检查、模拟/实弹发射等功

能，系统组成如图 1 所示。

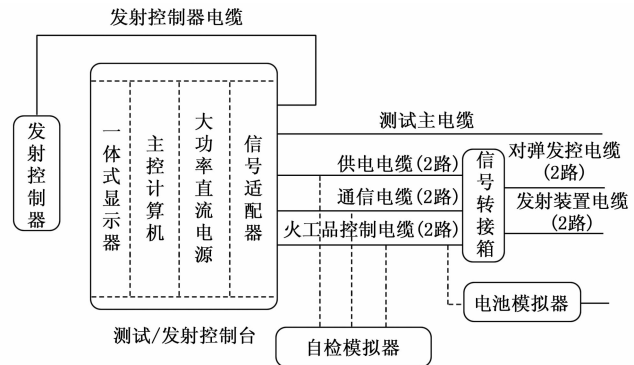


图 1 系统组成框图

测试/发射控制台是整个系统的核心，采用基于 PXI 虚拟仪器架构设计^[11]，硬件上由主控计算机、一体化显示器、大功率直流电源以及信号适配器组成，呈一体化结构，主要完成靶弹测试及发射控制信号、状态信号的采集与输出任务。软件由机箱及模块驱动软件、硬件资源管理软件、测试发射控制软件三部分组成，通过调用不同的软件模块完成单元测试、综合测试、安控通道检查、模飞检查、模拟发射、发射装置控制、射前检查和发射控制等任务。发射控制器和信号转接箱分别完成远程遥控发射、信号监视和信号转接任务。

2.1 硬件设计

2.1.1 主控计算机

主控计算机与信号适配器一体化集成设计，系统机箱为非标结构，由前后面板、底板、内部电路等组成。前面板配置 AC-DC 电源电压及电流显示表头，直流供电开关、交流 220 V 供电开关，向弹供电、射检正常、舵机供电指示灯等；后面板设计供电、测试、发射控制等任务相关连接器。主控计算机采用 PXI-8119 嵌入式控制器，与 PXI 模块一同安装于 PXI-1402 机箱内，通过与信号适配器集成设计，使之同时具备单枚靶弹测试、双发靶弹发射控制及发射装置控制功能。主控计算机组成如图 2 所示。

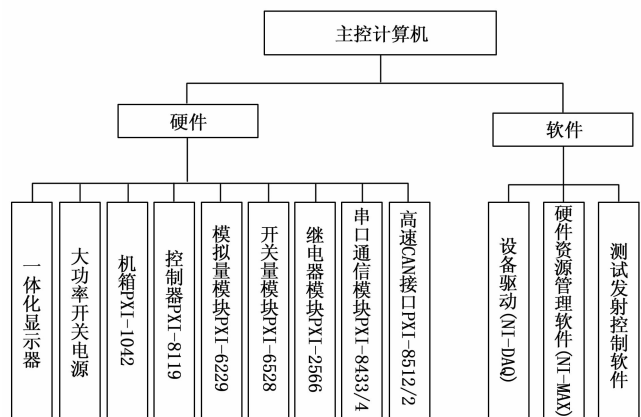


图 2 主控计算机组成图

1) 测试通道设计:

根据任务需求, 测试通道需要具备数字量输入输出、大电流输出及控制、模拟量检测、关键信号状态指示等功能。具体实现上, 通过 PXI-8433 串口通信模块, 实现弹上数字量的输入和采集; 通过 PXI-2566 继电器模块和 PXI-6528 开关量模块配合信号适配器完成开关量、大电流的输出及控制; 通过利用 PXI-6229 模拟量模块实现弹上模拟量的测量。

2) 发射控制通道设计:

根据任务需求, 发射控制通道需要具备开关量输入输出、继电器控制、RS-422 和 CAN 数据通信、大电流输出及控制等功能。不同信号控制与采集的实现原理与测试通道设计基本一致。与发射装置之间的通信通过 PXI-8512 高速 CAN 接口实现。

发射控制通道电气逻辑与发射控制软件流程直接相关, 是发射控制软件自动执行的必要条件, 为此, 单独设计了发射控制逻辑电路, 该电路与外部电气逻辑和发射控制器中的控制软件协同配合, 共同完成发射控制任务^[12]。发射控制电路按功能可分为 3 个部分, 靶弹供电、通道 1 发射控制逻辑、通道 2 发射控制逻辑。靶弹供电继电器由 PXI-6528 模块的固态继电器控制, 射检软件根据靶弹自检软件流程顺序接通对应通道的控制供电和地面检测供电回路; 发射控制通道 1、通道 2 逻辑设计原理相同, 硬件上相互独立, 主要包括保险电路、激活/点火状态采集电路、激活/点火发射控制电路^[13]、与发射控制器的通信电路等; 具体实现上, 由发射控制软件控制主控计算机内的 PXI-2566 模块电磁继电器^[14], 再由该继电器常开点控制信号适配器的电池激活和发动机点火继电器, 进而输出激活指令或点火指令。发射控制通道点火电路电气逻辑如图 3 所示。

2.1.2 信号适配器

信号适配器在进行测试/发射控制任务时, 起上下联通作用^[15], 主要对信号进行转接/变换、进行弹上直流供电、发射控制逻辑控制、关键信号指示等, 可实施单枚靶弹测试和两枚靶弹射检发射控制工作。

1) 测试通道设计:

信号适配器内部与靶弹测试任务相关的组件主要包括靶弹供电、地面检测供电、舵机供电、模拟发射零点回路等。地面测试场景仅进行单枚靶弹测试, 故测试用靶弹供电和地面检测供电与发射控制通道 2 的靶弹供电和地面检测供电共用相同电路以节约设备资源, 供电电源采用内置 AC-DC 变换器; 舵机供电采用大容量直流接触器进行控制, 供电电源使用外置 200 A/28 V 大功率开关电源, 保证舵机供电回路与靶弹控制供电回路相互独立; 模拟发射零点回路采用 PXI-2566 模块内的单刀双掷继电器控制^[14], 常闭点为未发射状态, 继电器

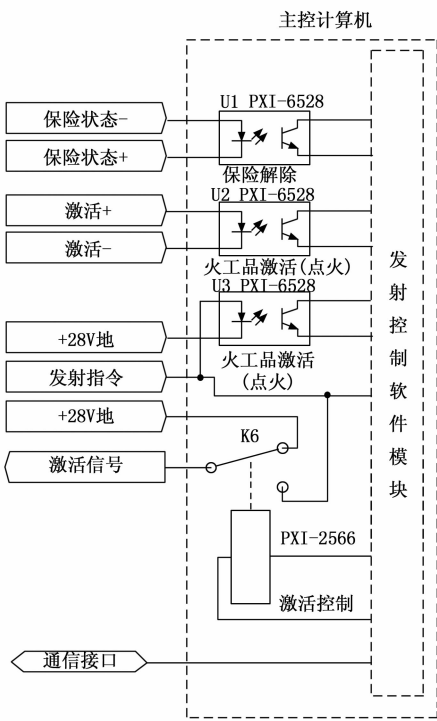


图 3 发射控制通道点火电路电气逻辑

受控后常闭点断开, 给出模拟发射零点; 测试通道模拟惯组数据装订串口与发射控制器通信串口分时复用。

2) 发射控制通道设计:

信号适配器内发射控制通道主要实现发射控制供电、保险控制、电池激活控制、点火控制等功能, 供电与安全电气逻辑全部由继电器逻辑构成。为确保火工品回路安全, 设计点火控制电路, 引至发射控制器内, 由发射控制器进行对应通道的解除/恢复保险开关控制, 未连接发射控制器或保险未解除条件下, 弹上火工品点火线路为短路状态, 确保工作过程安全。

发射控制供电依靠控制台面板手动开关 S1 和大电流继电器 K1 和 K2 组合实现。未供电时, 开关 S1 完全切断发射控制正负供电线路, 继电器 K1 和 K2 的常闭点短接, 确保输出至保险继电器 K4 的电平相同。保险控制回路由 K3 和 K4 继电器构成, 未解保时, K4 继电器常闭点短接, 激活或点火继电器常开点等电位, 同时 K4 继电器线包一端直接接地, 另一端通过 K3 常闭点接地, 确保 K4 可靠控制。K3 继电器由发射控制器发出的“保险控制信号”控制, 发射控制器未接入发射控制台或未解除保险前, 该信号一直处于悬空状态, K3 继电器维持常闭状态不变, 保证发射控制系统处于保险状态。电池激活回路和点火控制回路原理相同, 以点火控制回路为例, 点火控制回路分别由继电器 K5 和主控计算机内的继电器 K6 实现, 未动作时常闭点短接, 确保火工品点火线路为短接状态, 同时 K5 和 K6 继电器线包通 K1 和 K2 继电器短接至 +28 V 地, K5 和 K6 控

制端等电位。点火控制线路的 K5、K6 继电器和电池激活线路的继电器动作受激活信号控制, 该信号由发射控制软件转接发射指令输出, 确保电池激活或点火只可能在发射指令有效且执行到激活或点火发射控制流程条件下触发, 有效保证发射安全^[16]。信号适配器内供电与点火电气逻辑如图 4 所示。

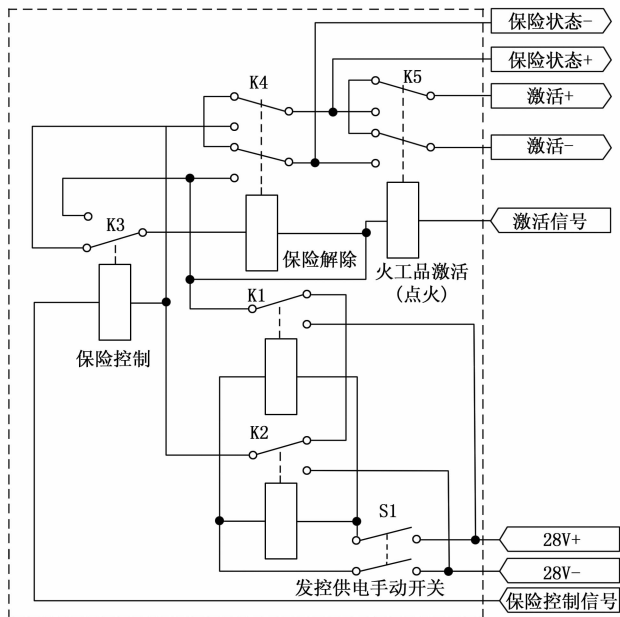


图 4 信号适配器内供电与点火电气逻辑

2.1.3 发射控制器

发射控制器由金属壳体、对外接插件、信号指示灯、开关按钮、内部电路组成, 采用手持式结构, 每个发射通道设计供电、解除保险、发射 3 个按钮开关和自检正常、装订正常、保险/战斗状态、发射正常指示灯等人机接口, 具备远程触发单发/双发靶弹发射、显示发射控制过程靶弹关键状态功能。

发射控制器内部电路包括计算机模块、供电电路、信号指示灯线路、发射开关及自保电路等。计算机模块采用 DSP 架构, 通过 RS422 接口与测试/发射控制台进行通信, 通信采用查询—应答通信模式, 内部软件主要完成发射控制器自检及状态指示、与测试/发射控制台握手、射检状态数据接收与指示、保险解锁监控与保险状态指示、发射状态监控、电池激活及发动机点火状态监控等功能; 触发发射按钮后, 测试/发射控制台只向发射控制器发送装订状态、激活状态、点火状态帧, 发射控制器只显示不应答; 为确保可靠发射, 内部单独配置发射自保继电器, 发射按钮触发后, 使发射信号处于自保状态, 确保发射指令可靠发出。发射控制器电气原理如图 5 所示。

2.1.4 信号转接箱

信号转接箱主要用于将测试/发射控制台引出的供

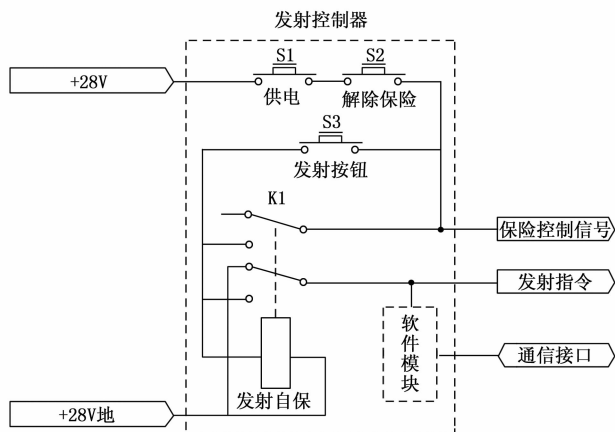


图 5 发射控制器电气逻辑

电、火工品控制和数字通信信号进行转接, 经阻抗匹配后分别引出对弹发控电缆和发射装置电缆, 设计的主要目的是减少对弹电缆数量, 便于多种测试/发射控制工况下的火工品安全控制与信号模拟。

2.2 软件设计

系统机箱及模块驱动软件和硬件资源管理软件直接采用 NI 公司标配的 NI-DAQ^[17] 和 NI-MAX, 不另行开发。靶弹测试发射控制软件为设备应用软件, 采用 LabWindows/CVI 平台开发完成^[18], 运行环境为 Windows 环境, 主要包含单元测试、综合检查、安控装订、模拟飞行、模拟发射、射前检查、发射控制、发射装置控制等 8 个模块, 功能上分为测试和发射控制两个功能项。软件总体框架如图 6 所示。

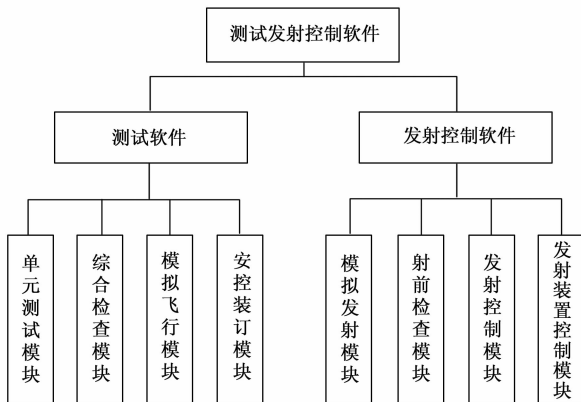


图 6 测试发射控制软件总体框架

测试软件具备串行数据装订、靶弹下传数据接收/解析/显示、控制大电流输出、控制开关量及模拟量信号输出及采集、测试过程信号及状态显示等功能, 能配合完成弹上各功能模块检查、综合检查和模飞动态测试等任务; 发射控制软件具备参数解算及串行数据装订、靶弹下传数据接收/解析/显示、控制大电流输出、控制开关量信号输出及采集、发射控制过程信号及状态显示

等功能。软件能够详细给出测试及发射控制的过程信息和结果信息, 及时、准确提示异常状态并提供人工干预接口, 支持单发靶弹测试或单/双发靶弹射检发射控制任务。软件流程如图7所示。

2.2.1 软件安全性设计

软件安全性设计该系统整体设计的关键内容之一, 设计上需要充分考虑不同使用工况以及可能发生的安全性问题, 进行可靠的多重安全保护设计, 避免发生误动作、不动作情况。本系统测试及发射控制软件采用独立模块调用设计, 软件执行过程中, 采取硬件继电器逻辑和软件程控逻辑协同配合的控制方案, 确保测试及发射控制过程安全可靠^[19]。

1) 测试软件安全性设计:

在测试软件设计中, 设置了明确的提示项, 确认靶弹火工品短接和热电池隔离, 测试过程中将靶弹安全状态检查作为执行测试流程的前置项, 只有返回靶弹安全状态字正常(电池激活及点火电路可靠短路)条件下, 才会执行靶弹测试项, 在测试流程上有效确保测试安全^[12]。

2) 发射控制软件安全性设计:

在发射控制软件设计中, 重点关注电池激活控制和

火工品安全控制。激活和点火控制工作流程以靶弹射前检查正常完成, 人工选择转入发射控制阶段为起始点, 包括人工听令执行解除保险(恢复保险)、发射动作和随后自动执行的电池激活及激活电压判断、点火动作等, 上述动作中解除保险为可逆动作, 其余动作均不可逆串行顺序执行, 中途出现异常则发射控制自动停止, 发射失败。整个工作流程由主控计算机、信号适配器和发射控制器等设备相互配合完成, 各设备间通过指令和反馈协同工作, 确保发射控制过程状态明确、全程可控。

协同信号中, 解除保险指令和发射指令由发射人员在发射控制器端听令按压对应开关生成。信号适配器内保险状态解除/恢复信号给出后, 由主控计算机采集对应状态并以数据通信形式送达发射控制器, 发射人员判断后听令执行发射动作。为确保可靠, 发射控制器同时发出发射指令电气信号和发射指令数字通信信号至主控计算机, 主控计算机确认两路发射信号同时有效后, 依次自动执行电池激活、激活电压测判、发动机点火操作, 并同步将激活及点火状态发送至发射控制器。发射指令有效前, 发射控制软件和发射控制器软件分别独立

控制发射流程, 流程控制逻辑条件必须在两套软件中均有效, 发射流程才能正常执行; 发射指令有效后, 发射控制软件独立实施流程控制, 发射控制器只具备发射控制状态显示功能, 不干扰发射控制主流程执行。发射控制软件协同工作流程如图8所示。

2.2.2 模飞动态测试功能设计

模飞动态测试是地面测试系统必须具备的功能, 能够有效检查靶弹飞行过程中的时序和动作响应是否正确。其主要工作过程为: 在测试状态下, 由地面测试系统代替运动的弹载测姿定位传感器, 以毫秒级精度实时产生、发送惯组模拟数据或卫星导航设备模拟数据至弹载导航计算机或飞控(安控)计算机^[20], 驱动靶弹模拟飞行, 地面静止条件下检查靶弹执行导航数据的正确性和飞行安全控制执行的正确性。

模拟数据产生、发送功能实现的关键在于实时性。长期以来, 在非实时操作系统环境下, 测试系统一般通过控制嵌入式单片机系统或DSP系统实现实时数据发送, 除测试系统原有配置外, 需要单独按需定制嵌入式系统^[21]。在操作模式上, 首先由上位机生成模拟飞行数据文件统一下载到嵌入式系统中, 嵌入式系统接收起飞零点信号后, 按照时间实时向弹上发送对应数据文件。该工作模式充分利用了嵌入式系统的强实时性, 时序上可确保与弹载机严格

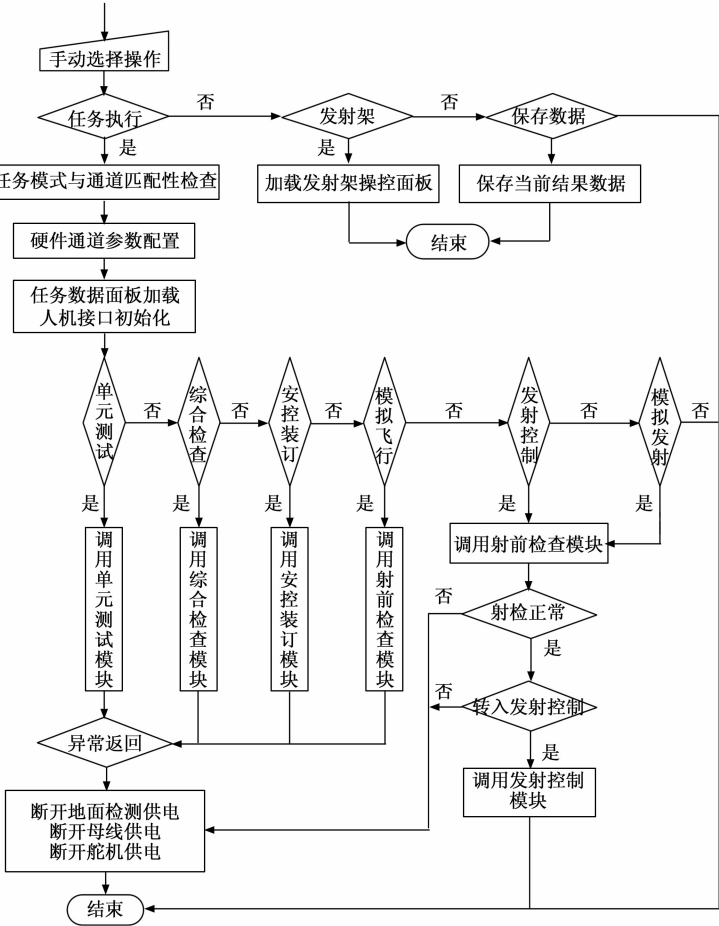


图7 测试发射控制软件流程

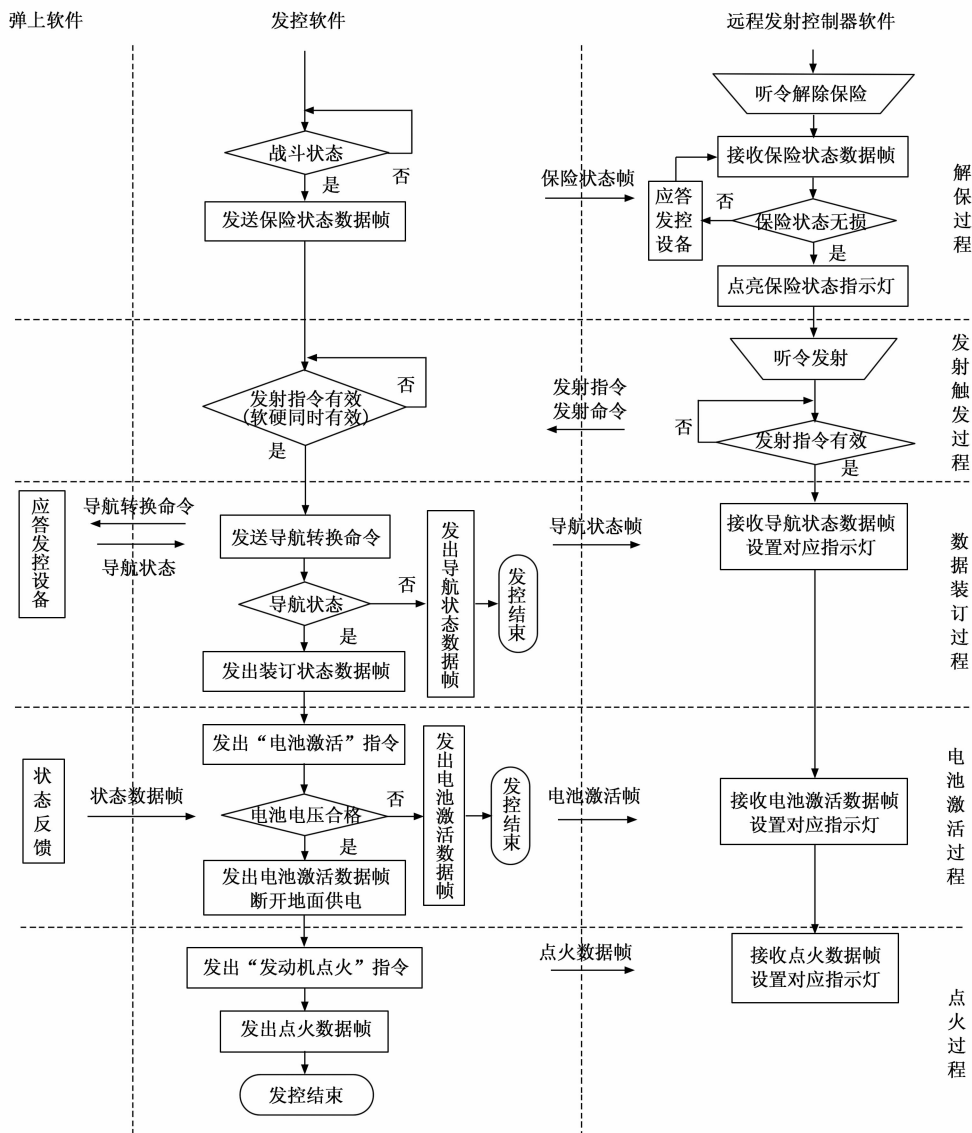


图 8 发射控制软件协同工作流程图

同步，但受制于嵌入式系统的板载存储空间和下载写入速度影响，该模式适用于数据量较小环境，在模飞动态测试需要使用较大数据文件或进行多弹道测试时，就对内部存储器和嵌入式系统工作性能要求极高，带来极大硬件成本的同时，也难以满足测试任务需求。

为实现测试覆盖性，实现大数据量、多弹道的模飞动态测试，利用 PXI 总线的触发和同步机制，进行模拟飞行模块软件设计。通过设置地面测试设备串口中断，由测试串口向弹载计算机定期（5 ms）发送飞控仿真真数据帧（时间、惯导角速率及加速度信息），通过设置该数据帧接收回调函数，在函数内部实现惯导模拟数据发送，实现了在 Windows 环境下模拟数据的实时发送功能。其工作逻辑框如图 9 所示。

其中，定时计数器集成在 PXI-6229 模块中，数字通信模块为 PXI-8433，模拟数据存储在 EXCEL 文件中^[22]，实时数据发送的核心实现代码为：

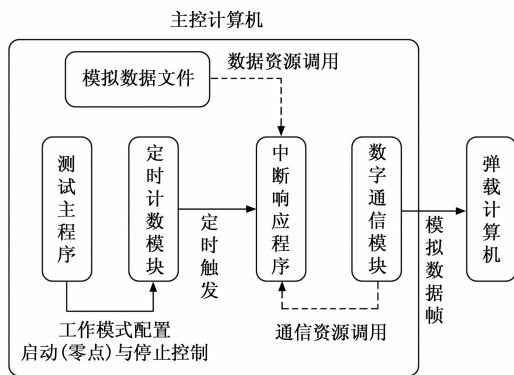


图 9 模飞动态测试工作逻辑框图

```
//打开 Excel 模拟数据源文件
Result=ExcelRpt_ApplicationNew(0,&NG_Application);
If (Result<0) {return -1;}
//新建 WorkBook 句柄
```

```
Result = ExcelRpt_WorkbookOpen ( NG_Application, Buf,
&NG_WorkBook);
if (Result<0) {return -1;}
//获取 Sheet 句柄,作为定时中断发送函数的参数使用
ExcelRpt_GetWorksheetFromIndex(NG_WorkBook,1,&NG_WorkSheet);
//获取数据文件的总行数
ExcelRpt_GetWorksheetAttribute(NG_WorkSheet,ER_WS_ATTR_USED_RANGE,Buf);
Lines= strtoul(Buf+8,NULL,10);
//创建定时中断方式任务句柄
DAQmxCreateTask("",&NG_taskHandle);
//采用 20MHz 时钟源,并以时钟个数方式给定定时周期
DAQmxCreateCOPulseChanTicks ( NG_taskHandle," Dev1/ctr0","","/Dev1/20MHzTimebase", DAQmx_Val_Low, 0.0, 100000,100000);
//配置定时器为连续脉冲串输出模式
DAQmxCfgImplicitTiming ( NG_taskHandle, DAQmx_Val_ContSamps,100);
//注册脉冲串输出中断响应函数
DAQmxRegisterSignalEvent(NG_taskHandle, DAQmx_Val_CounterOutputEvent, 0, ( DAQmxSignalEventCallbackPtr ) SIMComCallback,NULL);
//配置中断响应函数为高优先级
DAQmxTaskControl (NG_taskHandle, DAQmx_Val_Task_Commit);
//定时中断启动
DAQmxStartTask(NG_taskHandle)。
```

利用上述方法,成功将模拟卫星导航定位数据、模拟加速度数据、模拟角速度数据以 5 ms 为周期精确传输至弹上计算机,可靠实现了靶弹的模飞动态测试功能。

3 试验验证

该一体化测发系统与某型靶弹配合进行技术准备和发射控制试验,通过实际操作使用验证测发系统的功能达成情况、安全性情况。功能性及安全性试验验证结果表明:该一体化测发系统能够通过信号激励、模拟量/数字量的采集、数据指令发送及接收完成靶弹的单元测试、综合检查、安控装订、模拟发射/飞行及发射控制等任务,完成了多枚靶弹的测试与发射控制,测试过程与发射过程功能正常、安全可靠。在靶弹技术准备和发射任务中,靶弹软件逻辑、硬件逻辑执行可靠,多重安全保护手段到位。部分测试结果如图 10 所示。

动态模飞测试试验,通过测试设备读取靶弹飞行过程中惯性导航设备输出的理论数据值并向弹上计算机发送数据,检查靶弹的各舵机工况与实际理论值是否一致。验证结果表明:弹上能够可靠执行测试设备上传的靶弹惯组信息,在地面状态下有效检验了靶弹飞行过程中各设备的动态响应,靶弹的速度数据、飞行姿态数

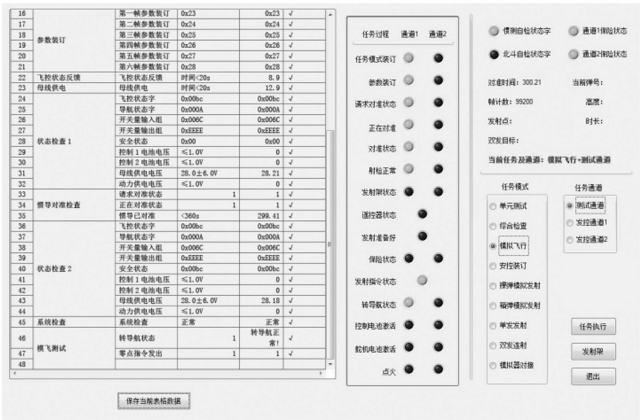


图 10 测试结果

据、舵机反馈数据与设计规划值一致。模飞状态下的速度数据、舵机动态响应数据与理论值对比如图 11、图 12 所示。

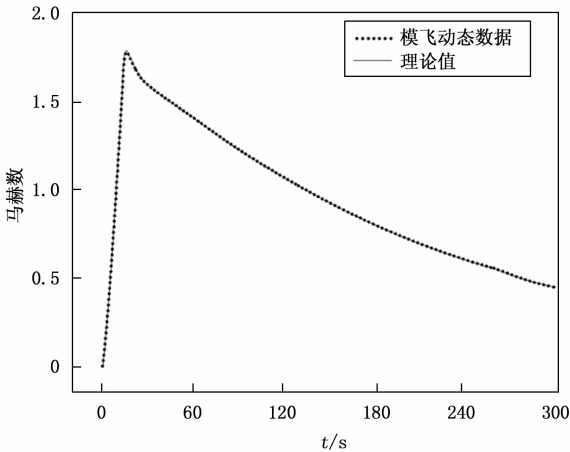


图 11 模飞速度数据与理论值对比

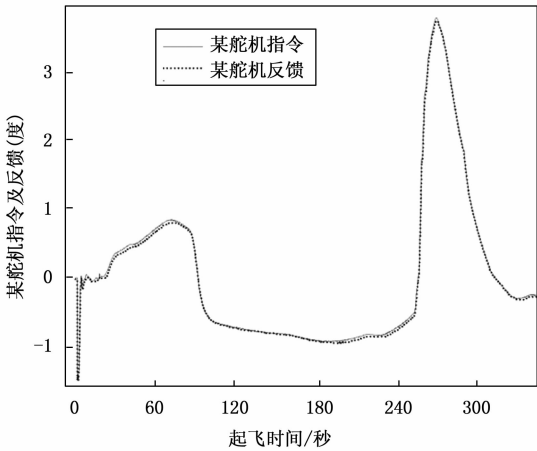


图 12 模飞状态下舵机动态响应数据

4 结束语

本文通过电气逻辑适配、软硬件协同控制、设备分

(下转第 199 页)