

某系列化导弹试训多任务模拟 设备设计与实现

单时卓

(中国人民解放军 92941 部队, 辽宁 葫芦岛 125001)

摘要: 为构建内外场虚实结合试训环境, 提升导弹装备试验鉴定水平和部队防空反导训练效果, 设计研制了某系列化导弹试训多任务模拟设备, 创新提出了兼容系列化弹型、兼容不同工作模式、多通道相互独立、检测与故障定位的设计方案, 综合采用嵌入式微系统电路设计技术、基于 ARM+FPGA 的多功能软硬件集成方法、PHM 实时管理技术、数字采集与识别技术, 实现了导弹模拟设备多功能、多用途的试验与训练保障能力, 解决了现有常规导弹模拟器模拟武器型号单一、状态单一、数量单一的技术问题, 成功应用于导弹装备试验鉴定与部队训练演练中, 成果经验可推广设计研制其他系列化导弹模拟设备; 文章详细介绍了该设备的总体方案、系统功能、关键技术设计、软硬件设计以及实验结果分析等内容。

关键词: 某系列化导弹; 试训多任务; 模拟设备; 设计与实现; 试验与训练

Design and Implementation on the Simulation Equipment for Certain Serialized Missile Test and Training Multitasking

SHAN Shizhuo

(Unite 92941 of PLA, Huludao 125001, China)

Abstract: In order to construct the training environment of the combination of virtualness and reality, improve the weapon evaluation test and training for air-and-missile defense effect, the simulation equipment for certain serialized missile test and training missions was designed and developed, which innovatively proposed the design scheme of compatible with serialized missiles, compatible with different working modes, independence of multiple channels, and detection and fault location. and synthetically adopted the circuit design technology of embedded microsystem, multifunctional software and hardware integration method based on ARM+FPGA framework, PHM real-time management technology, and digital acquisition and identification technology. it realized the multifunction and multi-purpose test and training ability of the missile simulation equipment, solved the technical problems of single type, single status, and single quantity of existed missile simulation equipment, and successfully applied in conventional missile equipment testing, identification, and military training exercises. the achievements and experience can be promoted to design and develop other series of missile simulation equipment. This paper provides a detailed introduction to the overall plan, system functions, key technology design, software and hardware design, and analysis of test results of the device.

Keywords: certain serialized missile; test and training missions; simulation equipment; design and implementation; test and training

0 引言

目前, 装备试验和舰艇部队的训练主要包括实弹打靶、靶标跟飞以及本舰武器系统训练等手段, 前两种训练手段组织复杂、成本高, 不能满足日常训练的要求, 而本舰武器系统训练作为常态化训练的有效手段, 由于受到现有导弹模拟器的能力制约, 不能达到逼真或实战的训练效果。近 20 年, 美军持续强化 LVC 概念, 利用合成环境集成实装, 并统一模拟器架构, 达到“真实—虚拟—构造仿真”的训练环境^[1]。靶场采用同样的发展思路, 基于外部复杂目标环境构建和内场仿真交汇的内外场联合试训方式^[2], 为舰空导弹武器系统试验训练提供了更加经济、简单、实

用的试训保障手段, 较好的适应了新形势下舰空导弹武器系统试验与实战化训练需求。某系列化导弹试训多任务模拟设备是内外场联合试训保障条件建设的重要组成部分, 其具有小型化、便携式、操作方便、功能强大等优点, 能够实现武器系统在不同工作状态且非实弹条件下的作战全流程模拟, 保障了舰面实装的发射闭环工作。该通用模拟设备可在作战、训练两种工作状态下模拟实弹, 有效解决了部队配套模拟器型号单一、状态固化(训练)、数量有限等制约实战化试训任务开展的瓶颈难题, 满足了当前装备试验与部队训练急需, 同时开创了系列化、多用途导弹模拟设备研制的新模式。

收稿日期: 2023-03-16; 修回日期: 2023-04-03。

作者简介: 单时卓(1979-), 男, 大学本科, 高级工程师。

引用格式: 单时卓. 某系列化导弹试训多任务模拟设备设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(1): 127-132, 149.

1 系统结构及原理

1.1 系统结构

系统结构主要由硬件和软件组成。采用以嵌入式微处理器为核心单元的模块化设计，便于发射系统的维护，同时可增加与发射系统的信息交互性；具有真实导弹的电气接口，与发射控制系统通过脐带电缆进行硬件接口连接，根据发射控制系统的命令和信息，模拟设备响应执行并反馈。为实现模拟设备的功能性能要求，模拟设备软件需要并行处理多个任务，每个任务负责完成一部分工作，系统软件通过 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 操作系统实时高效地完成任务之间的调度，从而保证系统对信息采集及处理的高实时性要求，极大程度上满足导弹发射全部工作过程的需要。

系统硬件结构如图 1 所示，原理结构如图 2 所示。
系统软件体系结构如图 3 所示。

1.2 工作原理

模拟设备工作过程是根据上级武器控制指令信息，按照相关匹配的通信协议，采用软硬件集成与独立分支工作流程设计，完成响应与应答的模拟动作，当进入导弹不可逆工作模拟流程后，其工作特点与常规模拟器一致。但有别于常规的导弹模拟器，该设备通过硬件设置弹型，软件识别弹型码实现弹型模拟，通过硬件设置状态，软件识别工作状态码实现状态模拟，通过独立多通道配置实现多数量模拟，从而实现针对不同任务保障的多功能、多用途工作原理。

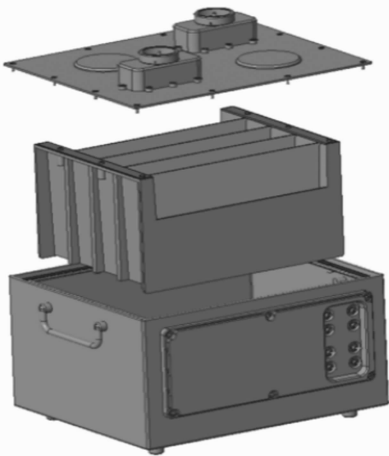


图 1 模拟设备硬件结构图

模拟设备工作流程如图 4 所示。

武器系统通过武器控制台对导弹进行发射控制操作，在武器系统工作过程中，当模拟设备收到发控系统传送的作战指令后，实时模拟导弹在位查询、导弹加/断电、弹位选择、导弹初始参数装订、导弹发射过程的信号回路，回告信息给发射系统和武器系统。同时，模拟设备通过采集模拟电路信号，实时显示导弹弹上各节点信号。其主要工作流程为：

1) 在模拟设备准备阶段，模拟设备通过连接器与外部

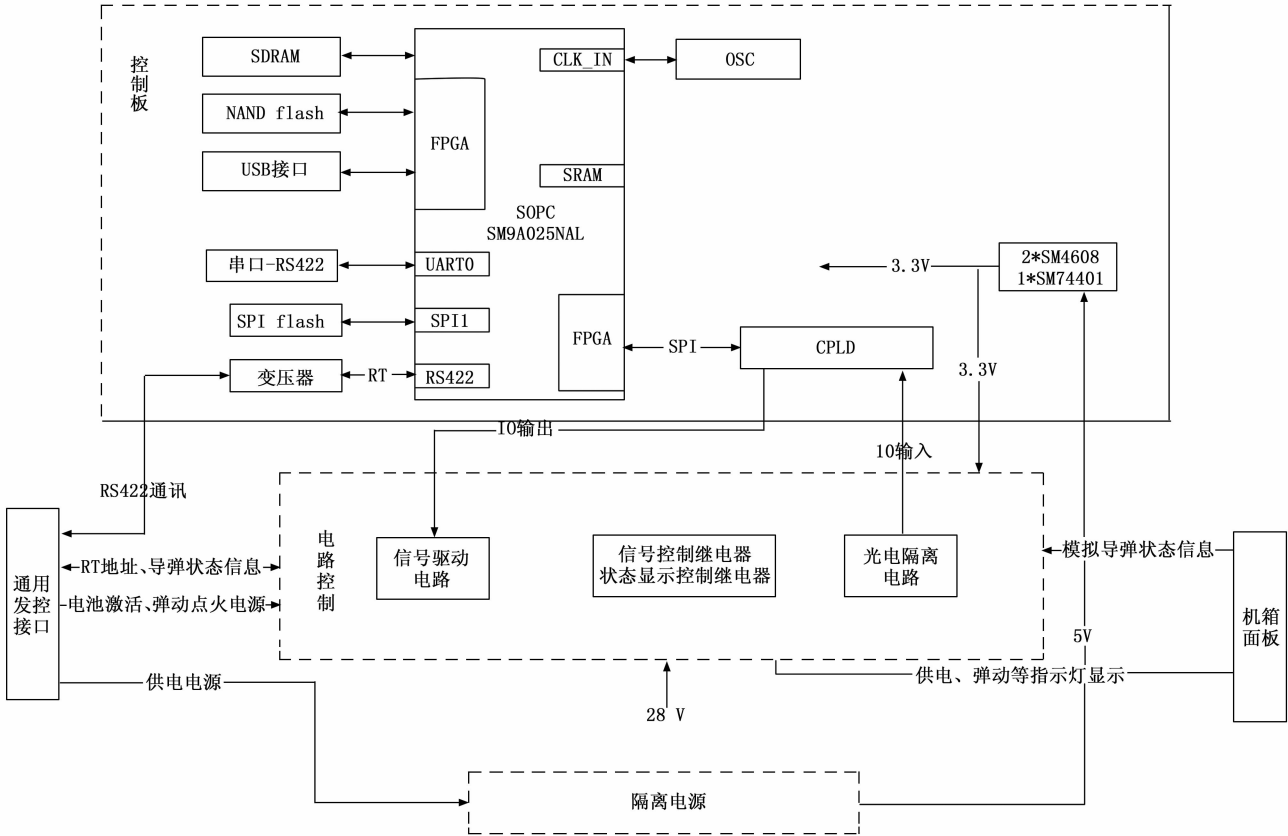


图 2 模拟设备原理结构图

设备进行连接，并根据拨码开关设置弹型和状态；发控单元供电后，对模拟设备进行供电，嵌入式处理器完成主函数启动后响应分支函数的调用。

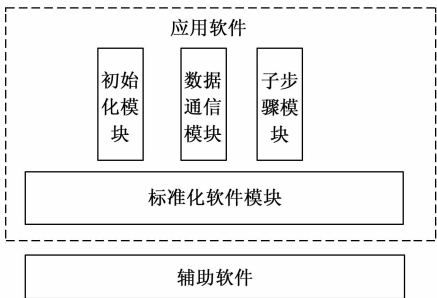


图 3 模拟设备软件体系结构图

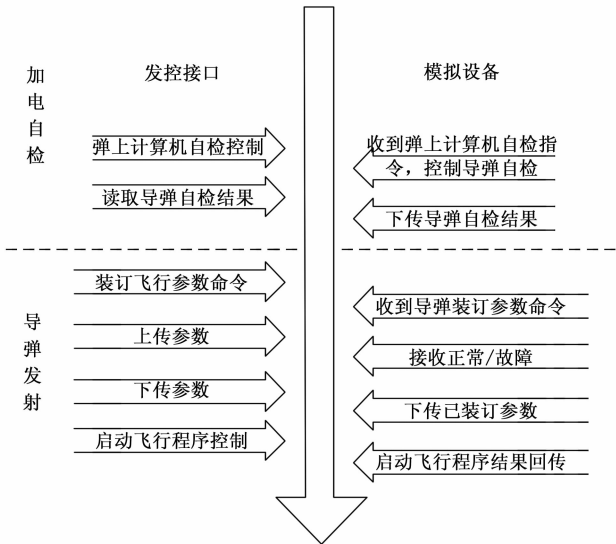


图 4 模拟设备工作流程图

- 2) 在导弹供电过程中，模拟设备完成导弹供电回路，模拟输出电压信号，输出电流。
- 3) 在弹上机自检过程中，模拟设备接收上级武器控制设备发送的“弹上机自检”命令，回复响应的应答信息进行响应，当收到上级设备发送的“弹上机自检结果下传”后，模拟设备回复响应弹型的自检结果信息。
- 4) 模拟设备接收上级设备发送的“惯导对准”命令，回复响应的应答信息进行响应，当收到上级设备发送的“惯导对准结果下传”后，模拟设备回复响应弹型的自检结果信息。
- 5) 在导弹发射阶段，模拟电池、燃气发生器激活回路，激活后，模拟输出电压信号，输出电流。
- 6) 同时，模拟设备软件完成上级设备的飞控命令响应回复，并根据弹型回传响应的参数信息。

2 方案设计

该设备以某系列导弹为对象，按照不同任务需求针对性研制的导弹模拟设备，通过集成弹地电气接口、需求设

置、弹地信息交互和工作过程仿真等设计，完成高一致性导弹通用模拟装置设计^[3]，具备对弹型、导弹工作状态和导弹数量进行适装匹配的能力，可在弹库非作战位置进行布设，为部队开展的新样式、新模式的装备试验鉴定和实战化训练等军事任务提供所需的导弹模拟环境。

通过与真弹一致的接口接入武器系统，主要用于接收武器系统的作战指令，完成导弹架上环节的工作过程，并实时向武器系统模拟回送同真弹一致的各项工作信息^[4]。可以同时模拟多枚导弹，并可同时、独立按照发射系统和武器系统给出的作战指令进行导弹工作模拟。通过硬件电气接口与发控系统连接实现导弹数量的模拟；通过人工选择控制实现弹型和工作状态的模拟；通过接收武器系统信号指令，按照系统软件逻辑进行分时响应多任务处理，并引入多弹型、多状态自主可控电路设计^[5]，为武器系统提供导弹架上工作的加/断电、状态、离架等各类时序信号，配合舰载武器系统完成各项试训任务；通过结构设计、硬件设计、软件设计、可靠性设计、标准化设计、安全性设计及电磁兼容性设计，实现系列化、多功能的使用要求。

2.1 系统功能

该设备与发射系统相连接，用于模拟导弹架上行为，能够为导弹武器系统提供导弹架上信号，正常按时序接收、模拟、反馈相关控制信号，闭合武器系统完成导弹离架前的完整作战过程，配合武器系统完成功能性能检查、武器系统训练、武器系统作战演练等实际任务。同时具有导弹操作过程显示功能，便于工作过程状态监视和故障定位。其主要功能包括^[6-7]：

- 1) 模拟弹上信息处理器通信接口，完成弹地通信过程的等效模拟；
- 2) 模拟弹上设备工作过程，完成包括导弹加/断电、设备自检、装订参数、各通路激活、启动飞控、导弹离架、信号回告等时序信号回路的等效模拟；
- 3) 模拟弹上电气工作过程，完成包括弹上电池工作状态、电气控制工作状态的等效模拟；
- 4) 可选择性模拟同系列的不同弹型，包括同系列化导弹的基本型、升级型；
- 5) 可选择性模拟武器系统适配的工作模式，包括模拟器工作模式或实弹工作模式；
- 6) 同时模拟多发导弹（现有基础上数量可拓展）离架前的工作过程及节点状态；
- 7) 能够实现弹型设置、类型设置、导弹供电、各通路激活、惯导状态、导弹起飞等工作节点显示功能。
- 8) 可配合武器系统完成自检、训练、演练及故障检测。

2.2 主要指标

在研究分析某系列舰空导弹武器系统装备使用要求的基础上，确定模拟设备的主要技术指标，保证其具备配合武器系统完成特定军事任务的能力。其总体层面主要功能、性能技术指标可以概括为：接口电气、状态显示、供电回路、供电激活回路、弹型设置、工作状态设置、弹地通信、通信速

率、信号时序、连续工作时间、电源电路特性、外形尺寸、可靠性、维修性、测试性、电磁兼容性和三防性能等^[8-9]。

2.3 关键技术

采用嵌入式微系统电路设计技术,提出了基于 ARM+FPGA 的多功能硬件接口集成方法^[10-12],并建立了无源识别与有源信息确认的双重安全设计机制,实现了系列导弹多弹型、多状态、多数量组合的导弹模拟背景,为了保证该模拟设备的保障真实性与实用性,以某系列化武器系统工作原理为基础,对四方面关键性技术进行了设计与实现。

1) 兼容系列化弹型设计与实现

弹型设置集成在该模拟设备电气接口中,电气接口采用不同的分离信号线方式^[13],进行多类弹型的导通信号线搭建。在该通路中引入拨码开关进行多条分立信号的通断控制,外部设备通过检测模拟设备内部分立信号线,完成不同导弹类型的无源识别,从而区别不同弹型状态。同时,在不同导通电路中接入 I/O 采集点,在模拟设备加电时,该导通信号通过可编程数字量 I/O 引入嵌入式 ARM 处理器中,ARM 处理器通过检测该点数字量 I/O 值完成模拟设备自身识别弹型上的判断,模拟设备软件根据识别的弹型完成响应的软件分支,同步将带有弹型标识的信息回告给武器系统,完成系列化导弹不同弹型设计的实现。

2) 兼容两种工作模式设计与实现

两种工作模式设置通过电路控制实现,在电路中串入拨码开关进行电路控制,并引入可编程数字量 I/O 以感知开关的闭合、数字事件的触发或固态继电器的动作,从而对电路的通断进行判断,设置拨码位置使电路导通或者断开,完成模拟器和导弹两种工作模式的设置。在电路接通或者断开时,I/O 采集模块识别该信号,内部嵌入式 ARM 处理器通过 I/O 信号进行工作模式的判断,从而控制软件进入相应的分支,完成工作流程。

3) 多通道相互独立设计与实现

模拟设备采用相互独立多通道接口实现一个模拟设备具有模拟多发导弹的功能。不同通道分别采用相互独立的连接器、电源模块、拨码开关模块、通信模块、继电器控制与状态显示模块配合模拟设备软件完成多通道功能的实现。

4) 检测与故障定位设计与实现

运用 PHM 实时管理技术^[14],引入分立信号控制手段,完成模拟结果识别,通过数字采集技术,对模拟接口电路进行信号实时采集,实现弹型种类、工作状态的判断显示,按发射流程精准控制导弹加/断电、弹上机供电、通路激活、导弹起飞等弹上信号的反馈,回告各节点信息给武器系统,在模拟设备与武控系统显示界面直观查看与判断各工作节点完成情况,实现过程深度监测和故障定位的功能。

3 硬件设计

3.1 硬件组成

设备硬件主要由结构箱体、连接器、指示灯、拨码开关、专用模拟板等组成。在模拟设备加电之前,根据不同要求通过拨码开关对导弹类型和状态进行设置;模拟设备

是通过与真实导弹相同的连接器电气接口进行加电,在嵌入式处理器启动后,完成模拟设备自检,通过模拟弹上信息处理器通信接口,完成弹地通信过程、模拟弹上设备工作状态,包括导弹加电回路、遥测加电回路、弹上电气控制装置回路等;模拟弹上电池工作状态及电气控制装置工作状态;模拟设备在工作时使用指示灯信号显示当前的工作状态,显示内容包括模拟设备供电、遥测供电、导弹供电、导弹起飞等时序信号指示。

3.2 硬件方案设计

3.2.1 结构箱体

箱体材料为不锈钢板,表面喷涂防腐漆,可拆卸部分与箱体连接处采用导电材料进行密封,并作防水处理,以保证 EMC 与防潮防水的要求;有 4 路对外接口,位于箱体正上方,其中两路安装专用连接器,另外预留两路用于功能扩展;前面板安装工作状态指示灯与拨码开关;两侧安装塑胶把手,底部安装橡胶脚垫;内部安装热镀锌板,用于固定 PCB 主板。

箱体 3D 效果如图 5 所示。

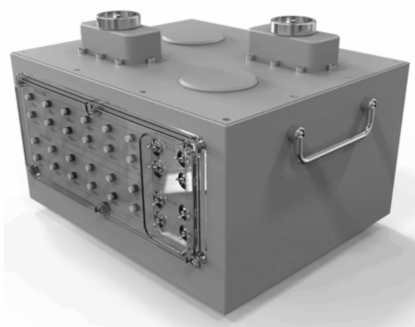


图 5 箱体效果图

3.2.2 连接器

连接器与真实导弹的连接电缆接口一致,是模拟设备与发射系统的电气和通讯接口,密封于箱体上方,用于与导弹发控电缆相连接。

3.2.3 指示灯和拨码开关

指示灯和拨码开关位于箱体的正前方,由上至下共分为四组,分别配合模拟 4 组导弹通道,共 24 个指示灯和 8 个拨码开关,指示灯用于显示各个节点工作状态,拨码开关用于设置弹型以及进行工作状态切换。

指示灯和拨码开关设计效果如图 6 所示。

3.2.4 专用模拟板

专用模拟板为模拟设备核心组件,直接同连接器进行连接,用于模拟导弹工作过程,完成弹地通讯。通过 PCB 板集成电源模块、通信模块、拨码设置模块、状态显示模块、处理模块,完成模拟设备加电自检、弹型选择、工作模式选择、电路控制、时序节点处理、指令接收与反馈、导弹离架信号产生等导弹架上工作过程的等效模拟。

3.3 硬件模块设计

按照设备功能要求,硬件主要可细分为电源模块、通

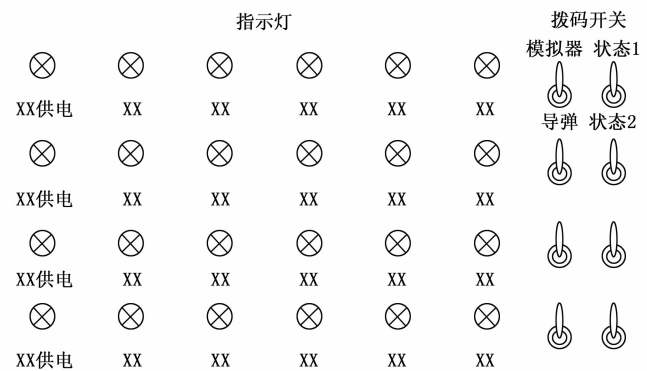


图 6 指示灯与拨码开关效果图

信模块、拨码设置模块和状态显示模块四部分。

3.3.1 电源模块

输入为 28 VDC，包括滤波电路、防反接电路、一组 3.3 VDC 电源输出、一组 5 VDC 电源输出、一组 48 V 电源输出、一组 28 V 电源输出，用于保障各模块供电。

3.3.2 通信模块

多个 RS422 通信接口，由芯片隔离后与嵌入式处理器通信，模拟弹上信息处理器通信功能，模拟器软件加载在嵌入式处理器内，按照弹型设置相关信息完成对应类型导弹的各项通信任务。

3.3.3 拨码设置模块

多组拨码开关，拨码开关为“8421”码开关，由光耦隔离后与嵌入式处理器通信，通过拨码设置完成不同导弹类型和工作状态的切换。

3.3.4 状态显示模块

由继电器和 LED 显示灯组成。此模块通过外部的信号实现继电器的导通和关断，控制 LED 的点亮与熄灭，来模拟电路的工作状态。

模拟设备硬件模块关联原理如图 7 所示。

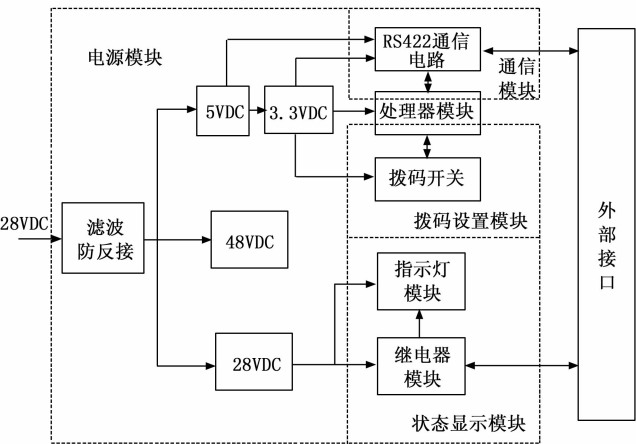


图 7 硬件模块关联原理框图

4 软件设计

4.1 软件组成

系统软件由技术应用程序和标准化软件组成。技术应

用软件用于支撑整体系统功能的实现，主要包括初始化模块、命令处理模块^[15]、通信模块。其中，命令处理模块主要包括弹上设备自检命令模块、弹上设备自检结果下传命令模块、上传装订参数命令模块、下传装订参数命令模块、启动飞行控制程序命令模块、静态导航命令模块、静态导航结果下传命令模块等。标准化软件用于底层软件的建立、软硬件接口的配置实现、底层软件提供应用层软件的封装。软件体系设计如图 8 所示。

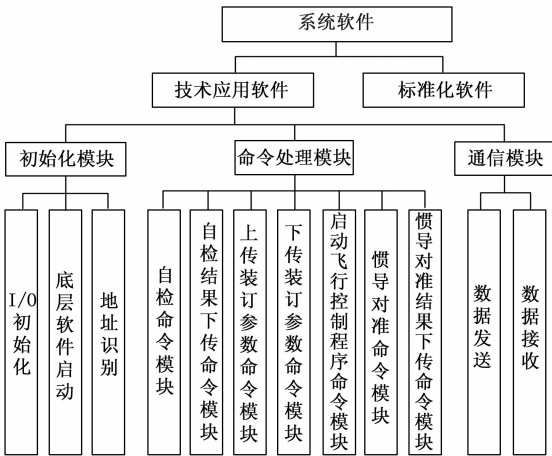


图 8 软件体系设计图

4.2 软件方案设计

模拟设备软件为基于 ARM 的嵌入式软件，主要使用到 ARM 的 GPIO 和 UART 功能^[16-18]，通过 GPIO 设置软件系统的工作模式，通过 UART2 实现串行 RS422 通信。软件运行在每个专用模拟通道模块计算机模拟板的单片机上，CPU 片内 RAM 和 FLASH 为主程序的存储单元，运行环境为无操作系统快速启动环境。

模拟设备软件主要用来完成模拟导弹上电自检，完成与发控系统的信息交互，接收发控系统的命令，模拟导弹执行相应操作，配合完成导弹的测试和发射控制等信息交互。根据模拟设备的工作要求，更好地达到试训多任务保障目的，对软件方案设计^[19-20]如下：

1) 模拟设备系统软件与武器系统在导弹准备中弹上机自检、弹上机自检结果回传信息交互。接收武器系统命令，并回复相应的应答信息，在接收进行弹上机自检结果回传指令后，再依据弹型进行相应固态命令的回复。

2) 模拟设备系统软件与武器系统在导弹准备中装订参数、参数下传信息交互。接收武器系统命令，并回复响应的应答信息，在接收进行参数下传指令后，再依据弹型进行响应固态命令的回复。

3) 模拟设备系统软件与武器系统在导弹准备中专项检查结果下传信息交互。接收武器系统命令，并回复响应的应答信息，在接收进行检查结果下传指令后，再依据弹型进行响应固态命令的回复。

4) 模拟设备系统软件与武器系统在模拟导弹发射阶段启动飞控命令的响应。接收各节点时序消息队列后，及时

回复协议中的应答信息，真实模拟弹地通讯与导弹不可逆工作过程。

4.3 软件接口设计

软件系统内部运行关系主要是通过接口函数来实现，模拟设备软件内部接口相互独立。数据内部结构访问关系如表 1 所示。

4.4 软件流程设计

模拟设备软件通过内部通信接口与外部及内部组件进行信息交换。模拟设备与发射控制系统通过 RS-422 总线相连，进行命令及数据传输。模拟设备加电复位后由 boot 程序将引导软件由 EPROM 加载到芯片的内部 RAM 中运行，引导软件自动完成软件加载、软件初始化、上电自检，之后开始等待弹地命令，当收到命令时则执行相应的操作，进行各种初值、参数及控制信息的传输。弹地通讯采用异步串行通讯方式，通讯速率为 38.4 kbps，8 位字长，两个停止位，发送及接收均无奇偶校验。针对不同的命令，命令代码是唯一的，根据命令的不同，对所带参数的要求也不一样。命令传输时要求先传高字节，再传低字节。

主控部分主要完成对硬件初始化模块、软件初始化模块、设备自检模块、命令处理模块等的调用。软件流程设计框图如图 9 示。

表 1 数据内部结构访问关系

序号	数据结构	访问关系	说明
1	DATAQUEUE	UART2_Exception()	串行数据环形缓冲区数据结构
2	g_byBufMBRec0	TaskUartProcess()	接收数据
3	g_byBufMBSnd0	TaskUartProcess()	发送数据
4	rcv_buf0	UART2_Exception()	接收缓冲区
5	snd_buf0	UART2_Exception()	发送缓冲区
6	SP_B	ProtocolParser()	协议数据
7	SP_J	ProtocolParser()	协议数据

5 实验结果与分析

该试训多任务模拟设备研制完成后，先后在海军不同舰队配合导弹型号装备试验鉴定、作战舰艇防空反导训练及演训工作，在构建的 LVC 虚实结合试训环境中，配合导弹武器系统共执行完成导弹模拟发射任务 200 余次，涉及的工作科目包括导弹型号装备基础功能、性能检验、多目标拦截服务能力检查、混装混射能力检查、单目标拦截训练、同向多目标拦截训练、抗多方向饱和攻击训练、虚实结合防空反导演训等。对导弹武器系统工作数据、工作过程及模拟设备状态显示等情况进行综合对比分析后，完成了对该模拟设备主要功能、性能技术保障能力的检验与评估，具体的分析比对结果如表 2 所示。

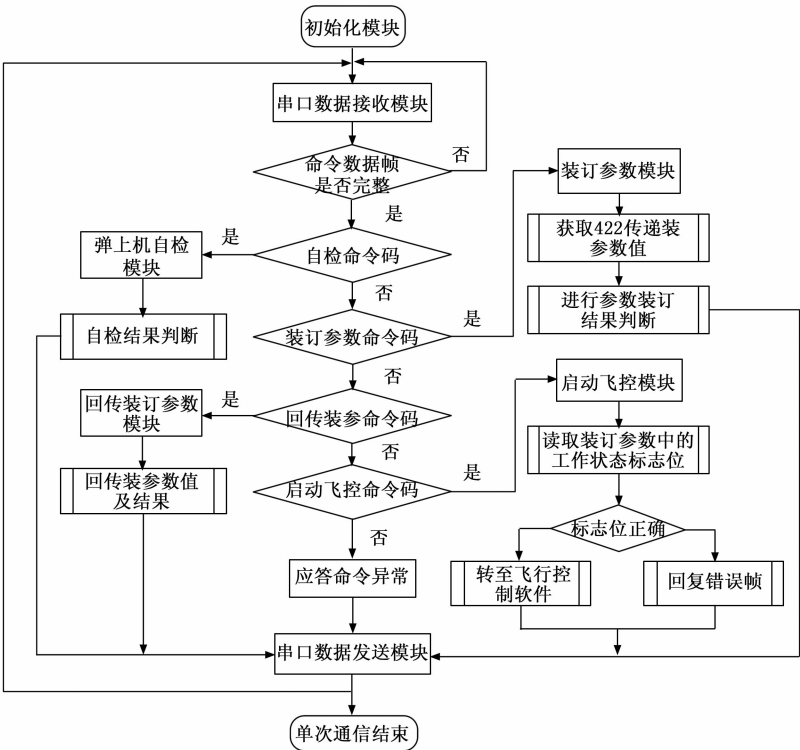


图 9 软件流程设计框图

表 2 模拟设备实验结果分析

序号	实验内容	技术要求	实验结果
1	通道数量	2 路,可升级为 4 路	2 路,升级能力由设计保证(预留接口及空间)
2	模拟弹型	可模拟基本型与升级型导弹	功能验证,能够正确模拟基本型与升级型导弹
3	工作状态	可分别模拟“模拟器”与“实弹”状态	功能验证,能够分别正确模拟“模拟器”与“实弹”状态
4	信号时序	可按导弹工作过程等效模拟加电、自检、弹动等 8 个节点状态,时序偏差不大于 30 ms	能够等效模拟加电、自检、弹动等 8 个节点状态,时序偏差均值为 11 ms
5	节点显示	可显示加电、自检、弹动等 8 个节点工作过程	能够正确显示加电、自检、弹动等 8 个节点工作过程
6	弹地通信	RS-422 串行异步通信	设计保证,采用 RS-422 串行异步通信
7	通信速率	38.4 kbps	38.4 kbps
8	电压输出	接入 28 V,按导弹内部工作要求分别输出 5 V、3.3 V、48 V、28 V 四组电压	由专用测试手段采集到 5 V、3.3 V、48 V、28 V 四组电压输出
9	连续工作时间	12 h	实际测试时间为 24 h,工作正常
10	故障检测	具备故障检测能力	通过人工设置方式模拟故障,能够在故障状态回告故障节点

(下转第 149 页)