

基于 CPCI 总线的雷达导引头测试系统设计与实现

王子龙¹, 路景泽²

(1. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471000; 2. 北京航空航天大学, 北京 100191)

摘要: 雷达导引头是空空导弹的核心部件, 实现导弹探测、制导和控制等功能, 其性能的优劣直接影响着导弹跟踪和截获目标的准确率; 为了全面测试空空导弹雷达导引头, 设计开发了一种基于 CPCI 总线的雷达导引头测试系统, 并完成了软硬件设计; 硬件部分完成了调理电路的设计、外设的搭建以及硬件电路方面的可靠性设计; 软件部分协调控制雷达导引头、角位置模拟器、回波模拟器 and 转台, 通过部件之间数据流的传输, 完成了各个模块的测试功能; 该系统能够真实模拟雷达导引头的工作环境, 设置导引头参数, 接收处理导引头发回的信息, 进而测试雷达导引头的精度、灵敏度、可靠性等指标; 实际应用表明, 该系统工作性能良好, 可靠性高, 能够长期稳定运行, 达到了设计要求。

关键词: 空空导弹; 雷达导引头; CPCI; 信号调理

Realization and Research of Test System for Radar Seeker Based on CPCI Bus

Wang Zilong¹, Lu Jingze²

(1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471000, China; 2. Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Seeker is the core component of the airborne missile. It achieves detection, guidance and control functions. Its performance will directly affect the missile tracking and intercept accuracy. In order to test the Radar Seeker completely, the Radar Seeker test system based on CPCIbus is designed in this paper. The subject introduces the design of the IPC, hardware board, conditioning circuit and peripheral, especially the reliability of the circuit. The software system coordinated control products, angular position simulator, echo simulator and rotary table. Then the system finished the test function of each module and product testing through the flow of data transmission. The system can simulate the workplace of radar seeker, set the parameters of the seeker and receive information transmitted by the seeker. And then the precision, sensitivity, reliability of seeker can be tested by the system. The experiment and application show that this test system has good performance, high reliability, and achieve the design requirement.

Keywords: air to air missile; radar seeker; CPCI; signal conditionin

0 引言

空空导弹 (air to air missile, AAM) 是当前和未来空战的主要格斗武器, 对夺取制空权具有不可替代的作用。导引头是导弹系统实现精确制导的重要部件之一, 导引头在导弹系统中的主要任务是自主搜索、识别和跟踪打击目标, 并为控制系统提供控制信息, 控制系统根据导引头提供的信息调整导弹飞行参数, 进而打击跟踪目标。雷达导引头是主流的导引头之一, 在空空导弹装备战机之前, 要对雷达导引头的生产过程, 控制软件, 装配过程进行完整的测试, 以保证导引头的精度和可靠性。在雷达导引头外场试验的性能测试中, 需要动用各种测量站和装备车辆来协同实验^[1]。

雷达导引头测试在保证导引头出厂性能上起着非常重要的作用, 完善的室内测试是外场试验进展顺利的一个重要保障, 这样也可以减小产品的研制成本。为了在室内完成对雷达导引头的分机和整机的调试, 验证导引头对各种极端环境的适应能力, 设计开发了一种基于 CPCI 总线的雷达导引头测试系统, 该系统能够对雷达导引头进行准确测试^[2]。

1 系统结构及原理

测试设备的逻辑结构框图如图 1 所示。基于 CPCI 总线的控制通讯计算机系统是测试系统的总控制器, 负责处理导引头

发送的信息, 给导引头发送飞控控制信号, 控制转台状态, 检测控制电源; 信号调理单元负责导引头与工控机之间传输信号的转换, 保证导引头和工控机能正常通讯。计算机系统、信号调理单元、产品电源、回波信号模拟器、角位置模拟器、工装夹具等共同组成导引头测试系统^[3]。

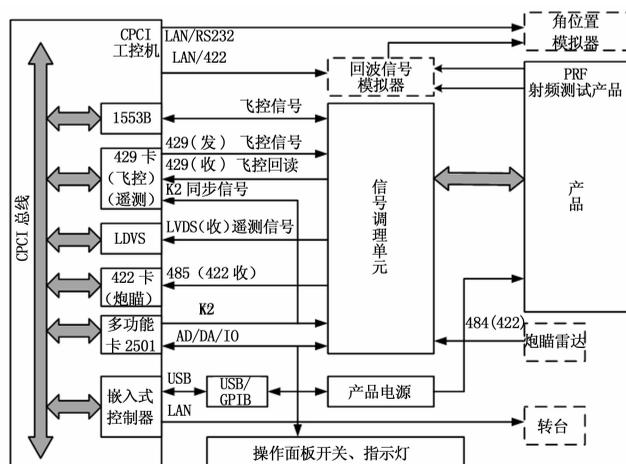


图 1 测试设备逻辑结构图

测试设备基于 CPCI 总线结构, 因此具有坚固、可靠、易于扩展、高速等优点。图 1 给出了各模块的实际连接关系, 从图中可以看出测试设备结构呈模块化, 并且具备了一定的扩展空间, 如 CPCI 总线插槽, 计算机接口等。

在产品性能测试过程中, 测控计算机担负整个测试流程的

收稿日期:2016-04-27; 修回日期:2016-05-26。

作者简介:王子龙(1983-),男,山西平陆人,本科,主要从事空空导弹测试技术、系统集成与虚拟仪器。

控制，完成产品各项性能参数的测试、分析与计算，包括对回波信号模拟器的控制和响应信号的采集。控制通讯计算机是测试设备的核心，应当选用高性能、高可靠性的工控机。在此，选用凌华 CPCI 总线工控机，可以满足测试设备的要求。数据采集通信单元主要负责产品的通讯与测试，所需要的通讯接口卡为 CPCI 总线的 1553B、ARINC-429 卡和 RS-422/485 卡；测试板卡为集 AD/DA/IO 于一身的多功能数据采集卡。

实际测试过程中，测控计算机通过数据采集通信单元等模块完成对转台，炮瞄雷达，角位置传感器等测试模块和雷达导引头的控制或通信。计算机控制转台模拟目标运动，在各种复杂条件下测试雷达导引头的灵敏度，进而判断雷达导引头是否合格。

2 系统硬件设计

2.1 信号调理单元设计

信号调理单元分为 AD/DA 信号调理和数字 IO 信号调理，由于控制和通讯单元与产品的工作电压不同，各自发出的模拟和数字信号需要经过信号调理单元才能给对方使用。

2.1.1 AD/DA 信号调理

AD/DA 通道的信号调理主要是对 DA 卡或产品发出的模拟电压信号进行缓冲、驱动、放大或衰减，以适应测试设备和产品的电气需求。本系统模拟信号调理单元配置了 4 路 DA 和 8 路 AD，精度不低于 12 位^[4]。

DA 输出调理电路如图 2 所示。该电路为比例运算电路，VR 为调零电位器，用于调节输出电压的零点。DA out/DA in = R₂/R₁，R₁、R₂ 应当选用低温漂的精密电阻，通过改变 R₁、R₂ 的阻值实现 DA 输出电压的放大或衰减。

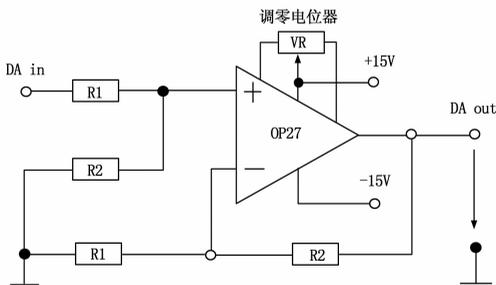


图 2 DA 输出调理电路原理图

AD 输入调理电路与输出调理电路相同，只是对输入电压的放大倍数不同。

2.1.2 数字 IO 信号调理

数字 IO 信号调理单元配置了 8 路 DO 和 8 路 DI。数字输入通道接收产品的输出状态，包括产品自检、截获、天线状态等，经隔离调理后一方面送到工控机的数字输入端 (DI) 被采集，另一方面送到机柜前面板用于状态指示。工控机的数字输出通道 (DO) 发出产品所需要的驱动 (控制) 信号，如工作状态切换、导弹离架指令、K2 同步信号等，经过缓冲、驱动后从调理电路的输出端口给出。

2.2 硬件可靠性设计

测试设备的可靠性设计主要从以下几个方面进行：元器件的选型，降额设计，热设计、电子电路的可靠性设计^[5]。

(1) 选择元器件要遵循以下几点原则：

- 1) 参考优选产品目录，尽量从所列厂家采购器件；
- 2) 选用的元器件其技术条件中规定的环境条件达到或高于设备技术条件的规定要求；

3) 压缩元器件的品种、规格，选择经过使用考验的元器件；

4) 尽量采用金属壳体的连接器；

(2) 在设计过程中采用降额设计，降额设计准则如下：根据元器件对系统安全性、可靠性的影响确定降额等级；对比较重要的部件采用 I 级降额；其余器件可以采用 II 级降额。

(3) 设备内部有大功耗单元，在器件布局时，保证大功率设备互相远离，发热芯片均安装散热片，并在机柜上安装散热风扇。

(4) 简化电路设计，选用大规模 FPGA 芯片，数据传输采用串行总线，降低系统复杂性，加强可靠性。

3 系统软件设计

3.1 测试软件设计

为了缩短软件开发周期，提高软件的可靠性，本系统测控软件由开发效率高的 C# 语言开发^[6]。在测试之前，要对雷达导引头测试系统进行参数配置，包括控制外设的硬件通道的配置，测试时遥测协议的修改等。同时，需要测试的项目较多，有些测试项之间相互独立，用户可以根据需求添加、修改或者删除测试任务。所以在设计测试系统的时候，不仅要完成基本的功能设计，还要据有一定的通用性和扩展性，可以根据测试任务的调整升级测试软件。良好的通用性可以使用户在短时间内掌握软件的操作，即使外部硬件接口变化，用户也可以通过简单的配置实现软件的复用^[7]。

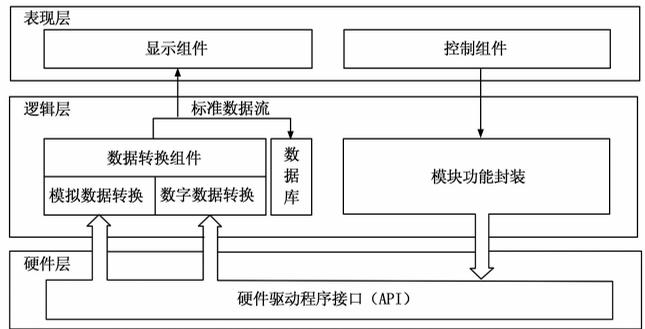


图 3 测试软件的层次结构图

本系统中测试软件的层次结构如图 3 所示，分为硬件层、逻辑层和表现层。硬件层程序是顶层软件与外部硬件信息交互的媒介，包括 RS422、ARINC429、AD 卡 2501、LVDS 采集卡等的程序接口函数；系统的逻辑层负责处理底层硬件的众多应用程序接口，通过调整不同板卡的数据流，完成与上层界面控制指令的匹配；表现层通过调用封装的动态库函数完成对板卡的操作，实现数据信息的采集和处理^[8]。

本测试软件根据测试要求将系统的功能按照模块划分，每个模块都包含通用的接口，当用户需要添加测试任务时，调用原来的接口函数，添加新的测试流程即可。本系统主要的功能模块有人机界面、电源管理、测控模块、数据处理、通信、数据存储与回放模块等^[9]。

3.2 自检设计

测试设备的自检对于测试设备和被测产品的安全性和可靠性有着重要的意义。自检内容主要涉及电源单元、422、429 通讯、数字 IO 和 AD/DA 通道。供电电源单元通过其本身的 GPIB 接口对输出电压、电流进行回读自检。422、429 通讯、

数字 IO 和 AD/DA 通道^[10], 可以采用自发自收的方式构成闭环自检。

根据自检信号的种类不同, 需要采取不同的自检策略。对于 AD/DA 和 DO/DI 信号, 信号输出后会一直保持, 直到下次 DA 或 DO 输出, 因此通过先输出后查询的方式采集信号; 对于 422 和 429 信号需要先打开接收通道, 后开始发送, 这样才能接收到自检信号^[11]。自检流程如图 4 所示。

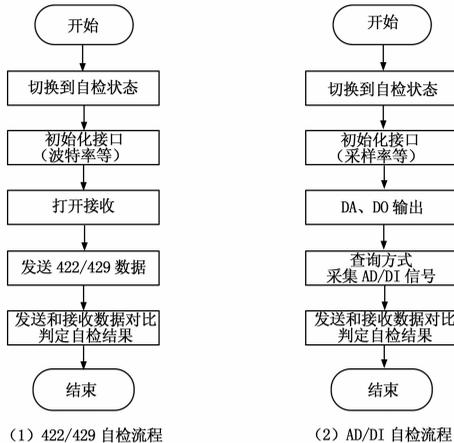


图 4 通讯卡自检流程图

3.3 软件可靠性设计

测试程序采用模块化设计, 软件系统可划分为功能独立的模块, 而且模块之间的控制转移服从马尔科夫过程。通过分析模块的失效率来考察整个系统的运行状态^[12], 假设经过长期的统计测试之后, 得到系统中的数据采集模块在一个运行周期内的失效率为 λ , 故障排除之后从非正常的情况转变为正常状态的概率为 1, 根据已知条件我们可以推出数据采集部分的状态转移概率矩阵是:

$$Y = \begin{pmatrix} 1-\lambda & \lambda \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中: λ 是指数据采集不正常的概率, 数据采集功能保持正常的概率为 $1-\lambda$, 在这一运行周期内, 数据采集部分经过故障排除, 转变为可以正常执行采集功能的概率为 1, 依旧不正常的概率为 0^[13]。如果想要预计数据采集模块运行 n 个周期之后的状态, 可先计算出数据采集部分的 n 周期状态转移概率矩阵为:

$$Y^{(n)} = Y^n = \begin{pmatrix} 1-\lambda & \lambda \\ 1 & 0 \end{pmatrix}^n \quad (2)$$

设本次模块的初始状态向量 $B = (1, 0)$, 将初始状态向量乘以 n 步向量转移矩阵, 得到模块在第 $n+1$ 周的状态为:

$$B \times Y^{(n)} = \begin{pmatrix} 1-\lambda & \lambda \\ 1 & 0 \end{pmatrix}^n \quad (3)$$

这样可以算出模块在第 $n+1$ 个运行周期功能完备 (即状态为 1) 的概率和状态为 0 的概率。根据矩阵论的性质, $Y^{(n)}$ 中所有 $Y_{ij} > 0$, 根据马尔可夫的遍历性可知该马氏链具有遍历性^[14], 即数据采集部分在长时间运行之后, 会得到一个稳定的状态转移概率。设此概率的向量为 $Y(2) = (y_1 + y_2)$, 则有方程组:

$$\begin{cases} y_1 = (1-\lambda)y_1 + y_2 \\ y_1 = \lambda y_1 \\ y_1 + y_2 = 1 \end{cases} \quad (4)$$

解方程组就可以得到稳态概率向量 (y_1, y_2) , 即数据采集部分在长时间运行后处于正常的概率为 y_1 , 失效概率为 y_2 ^[15]。

4 试验结果与分析

该测试系统用于某型雷达导引头测试。控制目标做半圆周、零点左圆周和零点右圆周运动, 在这 3 种情况下启动回波信号目标模拟器, 通过控制衰减器的衰减量, 使模拟器输出的目标回波信号的功率按照固定值进行衰减, 直到雷达无法跟踪到目标, 即获得衰减量的临界值, 计算雷达导引头的灵敏度, 判断是否符合要求。

根据雷达导引头测试系统在不同状态下的单项测试和整体测试的测试情况, 通过测试数据的分析得知, 测试系统与导引头之间可以进行稳定的通信, 同时, 系统可以有效的控制外部设备——回波模拟器、转台、角位置模拟器; 对数据进行解析、储存和计算之后可以知道测试结果在预期范围内。软件在完成所有测试流程的过程中运行流畅, 经过 72 小时拷机, 未发生任何故障问题, 测控系统工作性能良好, 可靠性很高。

5 结论

该测试系统以具有 CPCI 总线的工控机为基础, 由转台, 角位置模拟器, 回波信号模拟器, 以及各种信号调理卡等外设组成, 测试软件采用模块化设计思想, 提高了系统的可靠性和可扩展性。该测试系统已用于某型雷达导引头测试, 实际应用表明该测试系统测试准确、稳定可靠, 达到了设计要求。

参考文献:

- [1] 宫朝霞, 王 蕾. 国外空空导弹发展综述 [J]. 飞航导弹, 2011 (4): 60-67.
- [2] 秦 浩, 张学宏. 导引头控制软件的一种测试设计方法 [J]. 航空计算技术, 2008 (4): 84-86.
- [3] 刘学斌. 基于 PXI 和 LabWindows/CVI 的某型空空导弹数据采集分析系统设计 [J]. 电子质量, 2012 (7): 27-28+37.
- [4] 郝尊瑞. 基于 C/S 架构的抛物面天线反射面测温系统平台设计 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [5] 张小琴. 基于虚拟仪器的飞行控制组件综合测试系统研制 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [6] 周兴仁. GARMIN G1000 系统总线分析与数据转换平台研究 [D]. 广州: 中国民用航空飞行学院, 2011.
- [7] 岳宏达, 何卫国, 曾 漫. 基于 PXI 总线的舵机综合性能测试系统 [J]. 计算机测量与控制, 2013 (9): 2339-2341.
- [8] 宋兵兵. 机载短程无线通信系统的设计与实现 [D]. 北京: 北方工业大学, 2009.
- [9] 尚伟林. AFDX Gateway 软件的设计与实现 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2010.
- [10] 谢 冰. 基于 LabWindows/CVI 的某产品自动测试系统软件设计 [D]. 山西: 中北大学, 2013.
- [11] 王 勇, 张 欣, 钱玉莹. 航空雷达数据总线技术研究 [J]. 科技信息, 2009, 15: 417-418.
- [12] 刘 钦, 孙志永. 基于 pmac 的数控系统设备状态显示与监控 [J]. 现代制造技术与装备, 2008 (1): 63-64.
- [13] 张 哲. 基于接口控制文档的机载总线测试软件的实现 [D]. 西安: 长安大学, 2014.
- [14] 郑 玉. USB-ARINC429 总线通信接口的设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [15] 陶 慧, 于守谦, 刘 夏. 适于测控系统的文件存储结构研究 [J]. 计算机应用与软件, 2010 (11): 145-148.