

# 基于 VPX 总线的潜射导弹综合电气系统集成化设计

马瑞萍<sup>1</sup>, 刘丙杰<sup>2</sup>, 杨继锋<sup>2</sup>

(1. 海军装备研究院, 北京 100086; 2. 海军潜艇学院, 山东 青岛 266119)

**摘要:** 针对当前型号装备存在的带宽不足、体积庞大、信息共享程度不高、硬件标准化程度不高等问题, 提出了潜射导弹测控系统集成化设计使用需求、维修保障需求、环境对系统的需求、信息采集与共享需求, 对 VPX 总线与 PXI、VXI、LXI 总线的可选择性、速度、集成度、体积、精度、电磁屏蔽等性能进行了对比, 提出了潜射导弹地面综合电气系统集成化设计方案, 该方案包括指挥控制中心、中间控制系统和执行部分三层网络结构; 针对潜射导弹测试控制信号, 提出了基于 VPX 总线的测控系统设计方案, 并分析了主要组成及其功能; 通过对此方案的验证试验及分析可知, 潜射导弹综合电气系统采用 VPX 总线设备可实现集成化、小型化, 满足部队使用与维修保障需求。

**关键词:** 潜射导弹; VPX 总线; 综合电气系统

## Integrated Design of Comprehensive Electrical System of Submarine—Launched Missile Based—on VPX Bus

Ma Ruiping<sup>1</sup>, Liu Bingjie<sup>2</sup>, Yang Jifeng<sup>2</sup>

(1. Navy Equipment Institute, Beijing 100086, China; 2. Navy Submarine Academy, Qingdao 266119, China)

**Abstract:** To overcome lack of bandwidth, huge of volume, difficulty of information sharing, lack of standardization of current equipment, the paper proposed integrated design requirement of testing—controlling system of submarine—launched missile, including of using requirement, preparing requirement, environment requirement. The paper contrasted VPX bus with other buses, and proposed integrated design scheme of comprehensive electrical system and testing - controlling system based on VPX bus of submarine—launched missile. The integrated design conclude three network layers: command layer, middle layer and actuator layer. The paper proposed testing and controlling design scheme based on VPX bus, and analysis its functions. The validating experiment demonstrated that the proposed design scheme can implement integration and miniaturization and meet application and maintenance requirements of army.

**Keywords:** submarine—launched missile; VPX bus; comprehensive electrical system

### 0 引言

随着计算机技术和网络技术的迅速发展, 现代信息战对潜射导弹地面综合电气系统的信息化水平、维修保障能力提出了很高的要求。

潜射导弹地面综合电气系统是武器系统测试、发射的核心部分。由于潜艇内部空间小、环境恶劣、维修保障困难, 这就对地面综合电气系统的可靠性、维修性提出了很高的要求。当前, 导弹地面电气系统采用了 VXI 总线、PXI 总线、LXI 等总线设备, 包括测控系统、指挥控制系统、瞄准系统等, 大大提高了装备的模块化、集成化水平。但是存在带宽不足、体积庞大、信息共享程度不高、硬件标准化程度不高等问题。

新型潜射导弹地面综合电气系统在设计中要充分考虑潜射武器需求及技术成熟度水平。为此, 本文提出基于 VPX 总线的潜射导弹测控系统集成化设计方案。

### 1 潜射导弹测控系统集成化设计需求

以往型号导弹武器在使用中存在的装备类型多、型号多、接口多的问题, 给用户的使用保障带来很大困难。针对此问题, 提出潜射导弹测控系统集成化设计需求。

#### 1.1 使用需求

根据当前潜射导弹在部队使用中存在的问题, 对新型潜射

导弹测控系统的使用需求主要有:

1) 装备操作便捷, 要求不高。

提高装备自动化程度, 减少人员操作内容, 且操作简单、便捷, 操作内容对人员的技术水平、熟练程度要求不高。

2) 界面显示内容要符合部队使用要求。

界面显示内容要容易理解, 与导弹发射无关的显示内容、与基层级维修无关的显示内容应取消, 增加装备状态信息, 为操作人员提供装备总体状态信息。装备界面色彩搭配合理, 界面布局结构要清晰。

3) 关键操作具备防误操作功能。

为了防止在心理紧张、长期水下航行等特殊情况下的关键误操作情况发生, 应设置导弹发射、均衡等关键误操作预防功能, 提高武器系统的安全性。

4) 装备具有训练模式, 实现装备作战、训练一体化。

所有装备应具有作战、训练等多种模式, 提供等效外部条件和模拟训练环境, 为部队海上训练提供保障条件。

5) 装备体积尽量小, 适应潜艇空间要求。

#### 1.2 维修保障需求

1) 装备具备故障诊断功能。

装备应具备板卡级故障诊断功能, 为部队维修设备提供维修建议; 故障诊断范围尽可能大。

2) 装备拆卸方便。

装备的可拆卸性决定了装备的维修性和保障性。装备在设计之初就应考虑可拆卸问题, 装备的可拆卸范围应充分考虑潜艇的空间、基层级维修要求等问题。

收稿日期:2016-12-11; 修回日期:2017-02-21。

作者简介:马瑞萍(1965-),女,陕西蒲县人,高级工程师,博士学位,主要从事导弹测控方向的研究。

3) 提高装备的模块化、标准化水平。

装备(模块)型号、类型尽可能少,装备接口类型、型号尽可能减少,部件尽可能采用标准化、模块化水平,提高装备的互换性和维修性。

4) 尽量采用总线通信方式,减少电缆数量。

当前装备的电缆数量、种类非常多,给部队的使用和维护保障带来很大影响。新型潜射导弹应尽量采用以太网、串口、无线等总线通信方式,减少电缆数量总类。

### 1.3 环境对系统的需求

潜艇空间狭小,环境恶劣,对装备的小型化和环境适应能力提出很高的要求。潜射导弹测控系统要求在满足装备操作维护的前提下,尽量小型化设计,并且满足防潮、防盐雾、防震动等要求。

### 1.4 信息采集与共享需求

由于以往相似型号武器信息共享不充分,不及时,导致大量工作重复进行,严重影响了装备的战备完好性。新型潜射导弹要求所有装备测试信息、环境信息、操作信息、装备状态信息、维修保障信息实现实时采集,并能以一定的方式实现共享,及时掌握装备状态,并对同型号武器装备提供数据参考。

## 2 VPX总线及总线对比

目前测控总线主要包括PXI、VXI、LXI,各类总线性能比较如表1所示。

表1 总线性能比较表

参数	可选性	速度	集成度	体积	精度	电磁屏蔽	兼容性	互换性
VXI	一般	33M/S	较强	中	一般	必须	一般	一般
PXI	强	134M/S	较强	小	一般	可选	一般	强
LXI	弱	>100M/S	强	中	高	可选	强	最强
VPX	弱	>1G/S	强	中	高	必须	强	强

通过上述分析,可以发现VPX总线在速度、集成度、精度、电磁屏蔽、兼容性、互换性等方面有较大的优势,所以本文选择VPX总线作为新型潜射导弹测控系统的基本总线。

VPX总线在众多文献中都有介绍,本文仅介绍与潜射导弹地面综合电气系统集成化设计的相关内容。

VPX(VITA 46)总线采用高速串行总线替代并行总线是其最主要变化。VPX支持RapidIO、PCIE和Advanced Switching Inter connect等现代的工业标准的串行交换结构,来支持更高的背板带宽。这些高速串行交换可以提供每个差分对250 MB/s的数据传输率,1个信道最高1 GB/s的理论速率。VPX的核心交换提供32个差分对,组成4×4的信道端口,每个信道都是双向的。VPX总线的理论合计带宽为8 GB/sec<sup>[3-4]</sup>。

OPENVPX标准是在VPX的基础上定义的系统级兼容框架,OPENVPX是系统级标准,而VPX是板级标准<sup>[3]</sup>。OPENVPX并不能替代VPX,两者互为补充,二者使VPX模块兼容性更好,系统集成时,可以不再依赖某一具体厂家,系统集成更加容易。

## 3 基于VPX总线的潜射导弹地面综合电气系统集成化设计

### 3.1 地面综合电气系统集成化设计

地面综合电气系统主要功能是实现多枚导弹的测试、保

障、发射准备和发射。与陆基导弹、舰载导弹不同之处在于,潜射导弹发射的所有准备工作都是在水下进行,而且需要实现多枚导弹的齐射,这就需要充分考虑水下环境和水下发射保障问题。据此,潜射导弹地面综合电气系统组成如图1所示。

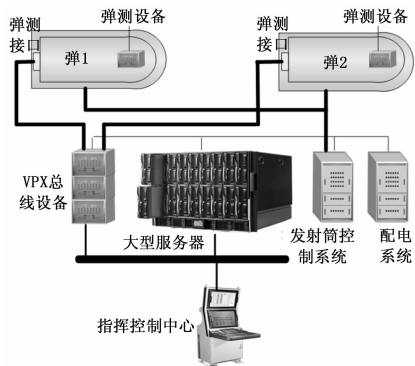


图1 综合电气系统集成化结构图

系统分为三层,第一层为指挥控制中心,主要由计算机系统及数据采集设备组成,主要实现导弹发射控制的关键阶段及关键流程的指挥和控制,并汇总搜集导弹及其他设备的状态。

第二层为中间控制系统,由大型服务器组成,完成接收指挥控制中心指令,向指挥控制中心传输数据,发送测试、发射筒控制指令,计算弹道参数,接收导弹测试数据,预测导弹装备状态及故障诊断等功能。中间控制系统采用集成优化设计方案,将以往的分分布式计算机及相关部件集成为一个大型服务器,大大减小设备体积,利于操作和维护保养。大型服务器内置测试软件、数据处理软件、控制软件、弹道计算软件、辅助决策软件等。

第三层为执行部分,包括基于VPX的测控部分和发射筒控制部分。测控部分主要与弹上系统相连,完成导弹的测试、发射和控制任务,发射筒控制部分主要完成发射筒的均压、阀门控制等功能。

### 3.2 基于VPX总线的测控系统设计

#### 3.2.1 硬件设计

测控系统主要完成导弹控制系统、伺服机构、发动机等分系统的测试和控制任务。主要测试、控制信号包括:直流电压、交流电压、电流、频率、时序信号、数字信号等。被测信号如表2所示。

表2 被测信号及控制信号信息

序号	信号类型	信号范围	通道数
1	直流电压	0~48V	60
2	交流电压	0~220V	32
3	电流	0~30A	26
4	频率	0~1MHz	12
5	时序信号	0~5V,100Hz	8
6	数字信号	0~10V	86
7	继电器控制信号	0~48V	96
8	总线通信信号	以太网、RS485等	25

根据潜射导弹测控系统设计需求,提出如图2所示的测控系统硬件设计结构图:

VPX系统由VPX机箱、主控板、功能板组成。VPX机箱符合(VITA 46)规范,主要搭载主控板、RapidIO板、数

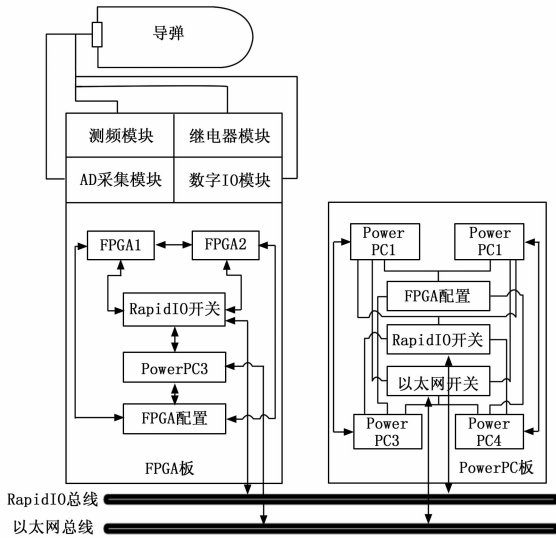


图 2 基于 VPX 总线的测控系统原理图

字 IO 板、以太网总线等总线通信背板。VPX 背板上的连接器为全互连的结构。机箱中有 2 个独立的电源模块，机箱采用风冷散热。

主控板卡由两片 FPGA 和一片通用双核处理器 PowerPC 组成。板卡上设置 4 个 FMC 接口，分别安装了测频模块、AD 数据采集模块、数字 IO 模块、继电器模块。这些模块通过导弹的弹测接口与导弹连接，对导弹各个分系统进行测试、控制，并将测试数据送入 FPGA，FPGA 对测试数据进行处理、判断、存储。在 FPGA 与 PowerPC 以及 VPX 的 P1 口之间使用 RapidIO 交换机确保芯片间和模块间 10Gbps 的数据传输<sup>[5]</sup>。为了系统的灵活性，减少系统接口电缆，FPGA 卡使用工业以太网接口，提高系统维修性。

测控系统的信息处理系统由功能板卡完成，该板卡包含 4 块 PowerPC 模块以及各接口开关。该板卡通过 RapidIO 口与 FPGA 板卡互联，接收各个模块的原始测试数据。在对数据进行综合处理后，将导弹状态信息传输至指挥控制中心。PowerPC 板卡可以完成所有数据的处理。所有 VPX 总线测试信息都通过以太网传输至中间控制系统。

### 3.2.2 软件设计

软件包括发射流程软件、系统测试软件、弹道计算软件、状态监控软件等。所有软件均安装在大型服务器内。发射流程软件主要实现导弹发射流程的配电、技术准备、流程控制、点火等功能，发射流程软件采用模块化、容错设计方案。系统测试软件主要实现控制系统测试控制、测试数据分析、测试结果传输等功能。弹道计算软件主要完成动基座条件下的弹道参数计算。状态监控软件主要完成导弹装备的状态监控，并实时给出发射决策。

系统软件的通用化要求不仅要考虑软件的当前需求，还要考虑未来的软件扩展需求，并灵活适应测试系统用户不同的需求。

系统软件采用通用的体系结构，满足不同用户需求。根据不同潜射导弹武器系统的需求，提出测试软件体系结构分为四层：通信层、控制层、测试方法层和测试应用层，体系结构如图 3 所示。

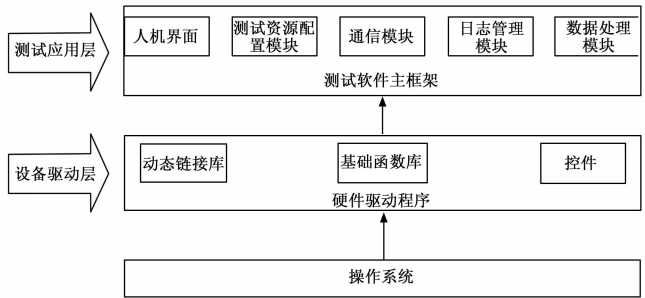


图 3 系统软件通用体系结构

系统软件一般包括设备驱动层和测试应用层。设备驱动层一般将测试软件中与硬件相关的部分封装成 DLL 动态库或控件等通用模块，用于控制硬件设备完成实际的测试。设备驱动层不能独立运行，必须依靠测试应用层的调用。测试应用层包括用户界面控制模块、测试资源配置模块、通信模块、日志管理模块和数据处理模块等。用户界面控制模块是人机交互的窗口，负责控制指令的发送与状态的监视。测试资源配置模块将测试数据与系统软件进行分离，利用 XML 描述系统配置信息，软件通过读取 XML 文件，对不同的测试任务配置不同的测试资源。这样可以通过更改 XML 配置文件来满足不同测试需求，而无需对测试程序进行修改。通信模块负责设备之间的通信。日志管理模块用来记录操作指令、设备状态、信号交互等信息，以备日后分析查询。数据处理模块是对发送的数据根据既定协议填充侦结构，对接收的数据进行解析、保存和分析。上述功能模块单独开发，最终集成到整个软件框架中，完成系统测试。

## 4 实验验证与分析

为了验证上述设计方案，项目组组建了一套验证试验系统，VPX 总线设备采用 6U 机箱，内置 AD 采集模块、继电器控制模块、数字 IO 模块、CPU 模块等 4 块功能模块，服务器采用浪潮服务器，基本配置为：2 颗 XeonE5-2609，内存 8 G，硬盘 1T \* 2，双千兆网口；导弹采用自研导弹信息等效器模拟弹上信号，包括模拟信号、数字信号、频率信号、时序信号灯。系统外部总线采用 1 000 M 工业以太网总线。内部软件包括中心控制软件、测试软件、弹道计算软件等。测试、发射程序模拟当前型号武器系统基本功能。

对验证系统同时对若干发导弹同时进行功能测试、速度测试、模块匹配性测试，测试结果如表 3 所示。

表 3 功能测试

弹量	信号测试	数据传输	发射流程
1	✓	✓	✓
2	✓	✓	✓
X	✓	✓	✓

表 4 速度测试

弹量	测试速度	数据传输速度	发射流程时间
1	0.20s	0.001s	310s
2	0.25s	0.002s	330m
X	0.52s	0.006s	360m

表 5 模块匹配性测试

弹量	指挥中心与中间层匹配性	中间层与前端执行系统匹配性
1	✓	✓
2	✓	✓
X	✓	✓

表 6 体积与人员需求对比

	本系统	当前型号
体积	2m×4m×1.6m	2m×30m×1.6m
人员数量	3	——

从上述验证系统试验结果看, 本文提出的基于 VPX 系统的集成化设计思路基本正确, 技术实现也具有可行性, 系统间信号匹配良好, 测试速度非常高, 系统体积也比当前型号体积大大减小, 装备操作人员数量也大大减少。

### 5 结束语

根据上述分析, 一枚导弹的测试与控制只需两块板卡即可

(上接第 131 页)

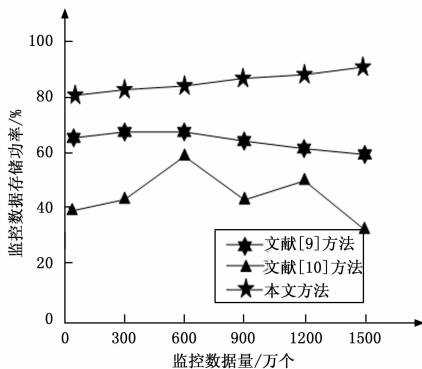


图 3 不同方法下监控信息数据存储功率对比

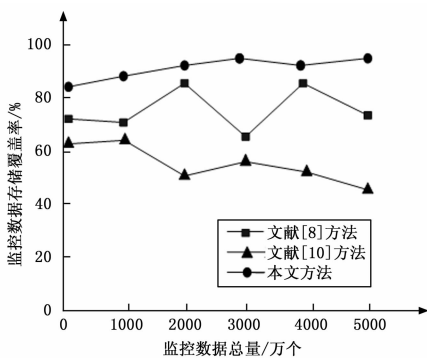


图 4 不同方法下监控数据存储覆盖率对比

对监控数据的存储, 没有基于几何控制的公路施工智能监控系统数据存储覆盖率高, 这表示文献 [8]、文献 [10] 所提方法在数据存储过程中丢包率很高。因为在利用本文方法对监控数据进行存储时, 采用了蛇形时隙数据存储算法对传输来的监控数据进行存储, 存储中重复蛇形时隙过程, 直到将公路施工终端的监控信息数据全部存储到监控系统中心。证明了本文所提方法在进行数据存储时, 数据丢失率低, 稳健性强, 是切实可行的公路施工智能监控系统设计方法。

仿真实验证明, 所提方法可以稳定高效地对公路施工监控

完成, 一个 8 槽 VPX 机箱可同时完成 4 枚导弹的测试与控制, 大大缩小了装备体积, 且数据传输速率、处理速度有了很大幅度的提高, 由于 VPX 在制冷、可靠性等方面要求与 VXI 总线相近, 完全可以满足潜射导弹测控系统的设计要求。本文提出的验证方案只是对若干发导弹进行的, 且软件模块采用的是模拟软件, 与实际软件有一定的差异, 但是对系统验证效果影响不大。

### 参考文献:

[1] 吉玉洁, 张小林. VPX 总线标准研究及其在无人机中的应用展望 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (4): 1112-1115.  
 [2] VPX: VMEbus for the 21 Century [DB/OL]. [http://pdf. www. ge. com](http://pdf.www.ge.com).  
 [3] 王 燕, 曹子剑, 水道雁. 基于 VPX 总线的高速数字电路测试系统研究及应用 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (1): 4-6.  
 [4] 蒙 佳. VPX 抗恶劣环境通信计算平台关键技术研究 [J]. 测控技术, 2012, 31 (10): 88-92.  
 [5] 郑东卫, 陈 矛, 罗丁利. VPX 总线的技术规范及应用 [J]. 火控雷达技术, 2009, 38 (4): 73-77.

系统进行设计, 成为了公路施工安全因素的重要体现形式, 在公路区间测速、公路施工突发事件检测分析、施工质量等方面有着重要意义, 减少了公路施工误报警率, 提高了监控夜视性能, 鲁棒性较好, 为公路施工监控系统的设计开辟了新路径。

### 3 结束语

采用当前方法对公路施工监控系统进行设计时, 无法监测到施工盲点, 导致监控效果误差大, 存在公路施工质量低, 施工人员人身安全无法得到保障的问题, 提出一种基于几何控制的公路施工智能监控系统设计方法。并通过仿真实验证明, 所提方法可以低延时, 高精度地对公路施工监控系统进行设计, 具有良好的应用价值, 为该领域的发展指明了方向, 可借鉴意义较强。

### 参考文献:

[1] 余建辉, 林荣安, 习艳会. 公路路面施工监测信息化管理系统研究 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2015, 32 (5): 34-39.  
 [2] 张伟龙, 李 刚, 王雨翔. 高速公路高清智能视频监控系统架构与功能设计 [J]. 小型微型计算机系统, 2014, 35 (7): 1667-1670.  
 [3] 李佳伟. 某地铁延伸线视频监控系统设计方案研究 [J]. 铁道工程学报, 2015, 32 (2): 97-102.  
 [4] 王江丽, 刘德强, 王 俊, 等. 高速公路综合监控管理系统实现 [J]. 测绘科学, 2015, 40 (1): 117-121.  
 [5] 张显伟, 薛 晔, 杨 杰. 丰满水电站重建工程三期独立运行计算机监控系统设计方案 [J]. 水利水电技术, 2016, 47 (6): 111-114.  
 [6] 沈叶飞, 陈一馨, 董华祥, 等. 压路机施工过程监控信息化管理系统研究 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2014, 31 (12): 103-106.  
 [7] 刘东海, 孙源泽, 巩树涛, 等. 水电工程进场公路路基压实质量实时监控系统 [J]. 水力发电, 2015, 41 (6): 81-85.  
 [8] 刘 洋, 韩泉泉, 赵 娜. 无人机地面综合监控系统设计与实现 [J]. 电子设计工程, 2016, 24 (14): 110-112.  
 [9] 李智慧, 刘卫景, 刘文峰, 等. 地铁施工对上部建筑结构安全性影响的在线监测系统设计与实践 [J]. 隧道建设, 2014, 34 (10): 990-996.  
 [10] 张晓峰, 黄林冲. 黄土隧道施工过程自动化监测系统构建与安全性分析 [J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13 (5): 914-920.