

小型化低成本运载火箭测控设备设计研究

高飞¹, 王璐璐², 李芳野¹, 谢望¹, 韩飞¹, 江坤¹, 徐昕¹

(1. 上海航天电子技术研究所, 上海 201109;

2. 中国船舶集团有限公司第704研究所, 上海 200031)

摘要: 随着商业航天和型号发射任务愈加密集, 总体单位对小型化低成本运载火箭地面测发控设备的需求更加迫切, 提出了运载火箭测控设备小型化低成本设计思路, 通过选择高集成化、多通道、相对体积小的功能板卡或元器件, 合理排布器件, 最大化利用机箱内部空间, 采用虚拟表头、指示灯、按钮丰富软件功能和显示界面, 提高软件自动化程度达到测控设备小型化设计; 成熟度高、质量稳定的商业货架产品、国产化产品通过降额设计和合理冗余设计能达到低成本效益的同时不影响其可靠性。

关键词: 测发控设备; 小型化; 低成本

Research on Miniaturization and Low Cost Measurement and Control Device of Launch Vehicle

GAO Fei¹, WANG Lulu², LI Fangye¹, XIE Wang¹, HAN Fei¹, JIANG Kun¹, XU Xin¹

(1. Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China;

2. No. 704 Institute of CSSC, Shanghai 200031, China)

Abstract: With the increasing density of commercial space and type of tasks, the needs for the miniaturization and low cost measurement and control device of launch vehicle are urgent, a design of miniaturization and low cost is put forward by using high-integration, multi-channel, small media board or component, properly arranging component, maximally making use of internal space of the case, adopting the software function and interface of the virtual meter, indicator light and button, and improving degree of software automation. The design of derating and proper redundant is realized by choosing commercial products and homemade products with high maturity and stable quality, which achieves low cost and does not affect the reliability of products in the meantime.

Keywords: measuring and controlling device; miniaturization; low cost

0 引言

随着商业航天的快速发展, 商业航天测控领域得到极大的促进^[1], 体积较大、成本较高的传统运载火箭测控设备已逐渐不能满足实际的使用需求, 用户对于运载火箭测控装备小型化、低成本、功能齐全、质量稳定的需求日益旺盛。立足于向使用方提供实用、好用的装备, 同时提高快速发射运载火箭的市场竞争力, 本文以某型号运载火箭测量系统供配电测试设备为研究对象, 对小型化低成本运载火箭测控设备设计开展分析与研究。主要从元器件选型、产品结构优化和软件功能优化方面分析了运载火箭测控设备小型化设计原则, 从选用成熟货架产品、国产化产品、冗余设计方面研究了产品低成本设计原则。

1 小型化设计原则

某型号运载火箭测量系统旧版供配电设备前后面板和连接电缆如图1所示, 机柜高约2米, 旧设备的面板按钮均为机械式按钮, 需要人员在现场前端进行设备的操作和状

态的记录、检测等, 同时电源设备的面板较大, 设备体积大, 重量大, 不便于人员对设备的搬运和维护。用于供配电设备完成功能自检的等效器如图2所示, 等效器的体积较大, 不能安装在机柜内, 人员搬运不方便。

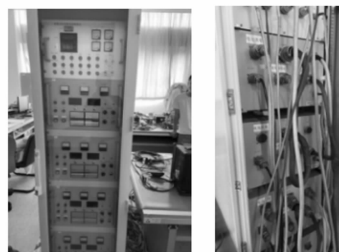


图1 旧版供配电设备前后面板及连接电缆实物图

测控设备设计要求保证其可靠性、可测试要求和友好的人机操作界面要求以及环境适应性要求, 同时设备要求操作简单易行, 数据显示清晰易读。在满足测试、报警要

收稿日期: 2023-02-23; 修回日期: 2023-03-01。

作者简介: 高飞(1993-), 男, 江苏淮阴人, 工学硕士, 工程师, 主要从事运载火箭地面测发控系统设计与集成方向的研究。

引用格式: 高飞, 王璐璐, 李芳野, 等. 小型化低成本运载火箭测控设备设计研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(6): 66-72.



图 2 旧版等效器实物图

求的前提下, 设备的电路设计应简单、可靠, 同时采取必要的元器件降额措施。

1.1 元器件选型

航天电子的发展对元器件小型化提出了要求, 受到设备体积的限制, 留给元器件的安装空间相当有限, 而且在元器件小型化发展的同时, 性能还不能降低, 否则会影响产品功能^[2]。

文献 [3] 和 [4] 通过使用高度集成、模块化、小型化的芯片减少额外器件的使用, 对设备进行优化整合, 充分合理利用板间空间, 实现测控系统硬件的小型化设计。为了尽量减小供电控制组合的体积、重量, 选择高集成化、多通道、多功能、相对体积小、高可靠性的功能板卡或元器件。新研供电控制系统输出采用 NI 数字 I/O 模块加达林顿管驱动模块作为继电器的控制装置。离散量输入信号控制继电器闭合, 继电器将数字 I/O 模块输出的 5 V 电源信号连接到相应的 I/O 通道。模拟量电流和电压的采集使用 NI 的高精度数据采集卡、分流器、高精度电阻和隔离模块实现。

为保证产品可靠性以及便于后期维护, 板卡、元器件尽量选择型号上成功发射使用过的产品。供电控制组合 I/O 卡选择 NI 数字 I/O 板卡, 模拟量采集选择 NI 数据采集卡, 达林顿管选择 ULN2803A, 大功率继电器选择宏发工业级继电器, 信号继电器选择松下继电器, 隔离模块选择研华 ADAM 模块, 等效器内部大功率电阻选用四川永星线绕电阻器。供电控制组合内元器件如图 3、图 4 所示。

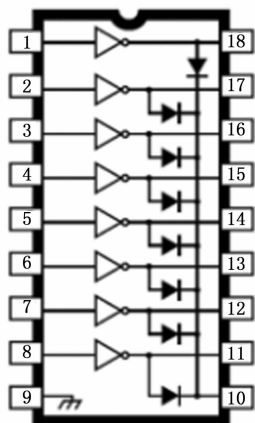


图 3 达林顿数字 I/O 驱动模块 ULN2803

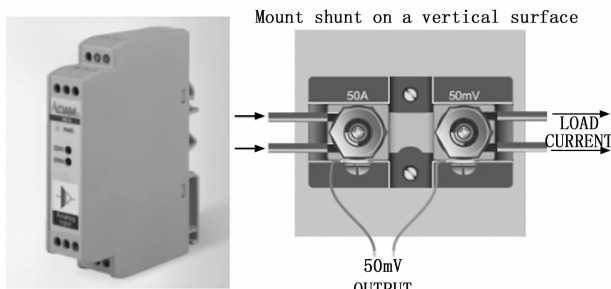


图 4 隔离 DC 输入/输出模块和分流器

AD 采集卡最大支持单端 32 路或差分 16 路模拟信号输入, 电压采集范围±10 V, 分辨率达到 18 位, 远满足精度 0.05 V 的要求。I/O 卡支持 96 通道输入输出, 每通道电流驱动 24 mA, 输入-0.5~5.5 V, 输出 0~5 V, I/O 逻辑电平 5 V。达林顿管 ULN2803A 最大输入电压 30 V, 连续输出电流 500 mA, 能可靠驱动继电器。大功率继电器触点耐压值 48~125 V/100 A, 远满足实际要求 28 VDC/32 A。隔离模块输入包括分流器 0~50 mV 输入和分压电阻 0~10 V 输入。供电控制组合选用的器件或板卡均为商业货架产品, 经过市场竞争且大批量投产的商业货架产品在体积、研制周期、成本方面比体制内产品占有显著优势。

1.2 产品结构优化

在元器件小型化基础上, 根据设备功能需求合理排布器件, 提高可维护性^[5], 设备优化设计后能最大化利用机箱内部空间, 有效减小设备体积。新研供电控制组合箱体设计成 8 U 高度可上 19 英寸机架的金属箱体, 箱体后面板安装有与箭上产品连接连接器、与 4 台电源连接连接器、数字 I/O 板卡/数据采集卡信号输入接线端子、220 V 电源输入连接器等, 与旧供电控制组合相比, 优化了连接器选型、控制与采集信号整合, 减少了对接口连接器数量。

供电控制组合前面板下部的盖板可上下翻转打开, 方便继电器板子更换维护, 有效缩短了现场维护更换时间。为满足用户使用需求, 方便时刻观察地面对箭上供电状态和关键信号采集, 组合前面板设置有配电器 2 地面加电、电池 2 加电、T1~T6 路加电、助推 (I~IV) 地面加电、助推 (I~IV) 电池加电、T11 加电 (I~IV)、T12 加电 (I~IV)、起飞信号共 25 个指示灯和 4 个电源输出测量接口及组合电源开关。

为便于转运和使用, 箭上配电器等效器设计成小单机形状, 后面板根据真实配电器接口设计, 前面板配置了数字压力表、箭上供电状态指示灯、箭上关键信号接收指示灯、箭上控制信号输出按钮, 既满足验证地面产品功能正确性要求, 又减小了产品体积, 5 个等效器可同时放置于机柜工具箱内, 供电系统设备连接框图如图 5 所示。

对供电控制组合机箱、电源机箱、配电器等效器机箱进行小型化结构设计, 控制组合体积受后面板连接器数

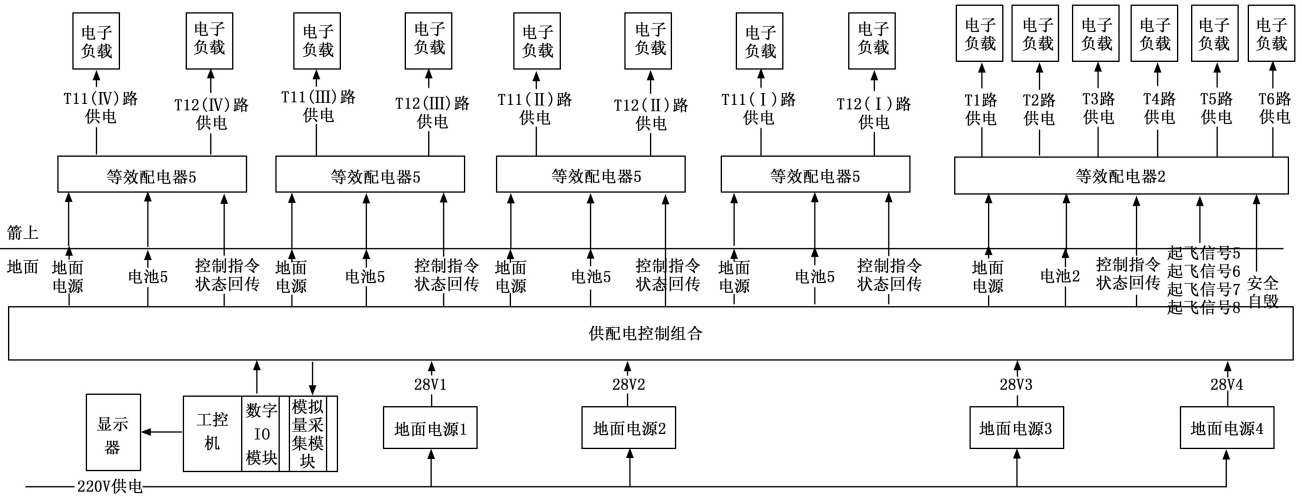


图 5 供电系统设备连接框图

量影响而不能太小，最终控制组合机箱、电源机箱、等效器机箱的高度分别为 8 U、2 U、2 U，控制组合、电源整机重量小于 20 kg，等效器整机重量小于 5 kg。控制组合前面板设置合理的指示灯和输出电压测量接口，后面板均匀合理分布对外航插件。整套供电设备全部集成于高度 1.5 m 机柜内，实现了小型化结构优化。

1.3 软件功能优化

主控软件实现信号的可靠性采集和自动输出控制，软件界面采用虚拟显示或控制的表头、指示灯、按钮等控件代替实体器件能有效减小设备体积。供电控制测试设备只保留了箭上部分关键控制信号状态指示灯和按钮，确保主控软件和硬件之间工作的协调性与正确性。

为了提高软件的自动化程度，防止误操作，并减少人员的工作量和操作复杂性，可将部分控制操作在软件中做成自动逻辑去执行，如将箭上远端电压补偿切换、转电前地面电源断电、转电后地面电源断电、紧急断电地面电源断电控制通过软件自动执行。

软件以虚拟表头形式显示所有电源输出电压、电流，地面母线电压、对箭输出电流，以及箭上各配电器反馈的电压。以虚拟指示灯形式显示电源状态、箭上转电好、引爆状态。以数字表头形式显示起飞时间、加电时间。当电源状态异常（过压、过流、过温）时，可以声光形式予以报警。

软件以虚拟按钮开关形式控制地面电源通断、各通路通断、转电指令、安全自毁信号、模拟零秒、模拟姿态信号等。当设备异常断电时，会自动断开所有通路，避免第二次加电时出现误动作。软件以流程屏形式记录所有操作时间，电源的电压、电流曲线可存盘进行回溯、分析。人机界面设计效果如图 6 所示。界面上包含 4 台电源状态、芯级供电状态、助推供电状态、测试流程、芯级供电指令控制按钮、助推供电指令控制按钮、电源连接控制按钮、紧

急控制按钮。软件界面通过分区域和不同标题填充颜色让操作人员能够快速定位操作指令或状态读取判别。



图 6 主控软件人机界面

供电新、旧设备功能变化情况如表 1 所示。小型化设计后的供电设备不仅功能更加丰富，体积更加轻便，解决了旧设备体积大、操作不便、功能不全等缺点。

表 1 供电新、旧设备功能变化情况

序号	项目	新设备	旧设备
1	KVM 触摸屏	有	无
2	电压电流起飞时间	触摸屏全显示	实体表头
3	信号指示灯	触摸屏显示+实体状态灯	实体状态灯
4	控制开关	触摸屏显示	实体按键
5	芯级电源测量接口	有	无
6	助推电源测量接口	有	无
7	继电器安装	印制板	底板固定
8	软件根据逻辑自动执行输出控制	有	无

2 低成本设计原则

随着商业航天快速发展和型号任务更加繁重，总体单

位对地面测发控产品的研制费用、周期、质量控制的更加严格, 地面测控产品正朝着小型化、低成本, 短研制周期趋势发展。文献 [6] 对比了国内外货架产品不同理念, 阐述了货架产品进军航天装备设计思路, 为航天装备货架建设提供参考借鉴。文献 [7] 介绍了在航天装备上使用市售设备的标准接口, 就可利用市场自身的创造活力, 减少费用并缩短研制周期。模块化现成系统既能在短期内提供现代化技术, 又可在以后作为功能扩展与技术引进的基础。在商业航天及运载型号测发控产品研制中采用商业货架产品, 如普通车用继电器和民用元器件等, 商业货架产品替代定制军品可有效控制产品研制成本及周期。国外在商业货架产品进军军品研制领域比我们要早, 西方国家率先提出采用民用产品、服务以及技术作为其防务采办系统运行的政策, 产品研制过程中优先考虑从民用产品领域获得国内外技术、系统以及设备。随着商业货架产品迅猛发展, 产品性能更加稳定可靠, 商业货架产品进军商业航天及运载型号测控领域成为必然趋势^[8]。

2.1 选用商业货架产品

货架产品具有通用性强、成熟度高、质量稳定、产能满足需求、市场需求强等特点^[9]。根据研究总结国外的研究成果, 商业航天及运载型号测控领域选用商业货架产品应遵循性能原则、经济性原则、环境适应性原则、可靠性原则、维修保障原则^[8]。选用商业货架产品的前提条件是满足性能原则和经济性原则。商业货架产品需满足商业航天及运载型号测控产品技术指标及接口要求等。在寿命周期费用上采用商业货架产品必须是合算的。对于产品使用的特殊环境要求商业货架产品必须能正常可靠工作, 同时必须与现有的维修保障体系相协调, 满足快速诊断、更换和持续保障需求。

我们经过大量实践验证, 证明商业货架元器件可以选择额定值大于军品元器件额定值数倍的产品来提高元器件可靠性, 比如军品继电器触点额定负载 28 V 50 A, 可选择商业货架继电器触点额定负载 28 V 100 A, 通过增大触点额定功率提高可靠性, 元器件可靠性提高的同时成本仍得到了较好的控制。定制功能板卡研制周期和成本相对较高, 在投产数量较少的情况下推荐选择常用的成熟货架产品, 采用货架板卡具有装备研制进度快、研制费用低、技术成熟、批量大、兼容性好等优势。

地面测发控产品主要功能之一是实现火箭直流供电, 体制内研制的直流电源为了提高产品可靠性, 元器件选用级别多为国军标级, 电源面板上实体按钮、灯、表头较多, 软件功能比较简单、体积较大。随着商业货架电源技术更加成熟, 功能更加丰富, 采用商业货架电源结合热备冗余的设计方案可解决现有运载地面直流电源设备体积较大, 成本较高、研制周期长问题。供配电设备选择的 HY-PM 40-63 直流电源输出电压 DC 0~40 V 可调, 输出最大电流 63 A, 各项指标均优于任务书要求, 电源同时具有远端补偿、过压、过流等保护机制。商业直流电源可通过主副机

热备冗余设计提高可靠性, 电源接收上位机软件 UDP 控制指令时, 可通过上位机软件单条指令发送接收允许重复发送来提高电源通讯可靠性。

2.2 国产化产品替代

文献 [10] 介绍了电子元器件国产化替代的现实意义, 指出目前元器件替代存在的主要问题。文献 [11-12] 列举了目前军用电子元器件国产化替代应用暴露出的问题, 对问题进行思考分析, 提出了相应的措施和对策。随着国内电子元器件研制单位的技术攻关和国家的大力支持, 国产电子元器件性能水平取得了较快发展, 部分国产电子元器件的性能已接近或达到了国际先进水平^[13]。

由于运载火箭测控设备需要完成开关量控制、逻辑控制、通信、信号采集等复杂功能, 设计时大多采用 PLC 模块或者 PXI 功能板卡实现上述功能。

PLC 作为一类成熟可靠的工业级产品, 且具有易上手、开发周期短等优势, 因此 PLC 在运载火箭测控设备中起到了不可替代的作用。长期以来, 我国运载火箭测控设备 PLC 的采购, 从 20 世纪的日系 (三菱、欧姆龙), 到 21 世纪初的欧系 (西门子、施耐德), 都逃不开进口产品的影子。从 2020 年开始, 测发控系统开始进入统型设计的时代, 在多个新运载火箭型号测发控系统的设计中, PLC 仍然继承了传统运载火箭测发控系统中产品型号的选型。2022 年, 新研某型号运载火箭动力测发控系统的配套提上了日程, 自 2020 年新冠疫情不断恶化, 在全球范围内掀起了一场愈演愈烈的芯片大短缺“战争”。由于芯片产品研发难度高、周期长, 投入成本高, 因此芯片的价格不断上涨, 间接地影响了国际 PLC 市场, 一套模块的价格从十几万, 涨到几十万, 一些特殊的型号甚至涨价 10 几倍。截止目前, 国际 PLC 市场的价格涨幅趋势只增不减。西门子 PLC 大幅提价、甚至对华禁售的消息传来, 极大的影响了运载火箭测控设备的开发成本。当进口电子元器件遭遇停产断档、禁运等情况, 而武器装备又急需使用时, 国产化替代显得尤为重要和紧迫, 国产化替代验证成为保证武器装备质量与可靠性的重要一环^[14-15]。

为打破 PLC 设备进口壁垒, 经多方比较并经过严格的实验验证, 将新研某型号运载火箭动力测发控系统中西门子 PLC 替换为浙江中控自研的国产 PLC 可解决进口元器件成本高昂、技术封锁等问题。为验证国产 PLC 性能, 针对 PLC 的工作模块以及冗余机制开展实验。

4~20 mA 模拟量采集模块采集电流值接近满量程过程中, 采集数据与电流表内数据偏差逐步增大, 最大偏差 0.1 mA, 此偏差不影响在动力测发控系统中的应用, 模块进行矫正动作后, 则没有随着电流值增大后的偏差。因此考虑此偏差可能由使用的仪表带来, 不影响动力测发控系统中的应用。电压采集偏差小于 ± 0.001 V, 晶体管输出模块反应时间稳定, DI 到 DO 响应时间为 15 ms 左右, 即使加上继电器响应时间 3~5 ms 之间, 整体反应时间可控制在 20 ms 以内。同时, 使用晶体管输出模块虽可解决输出通

道时延问题,在组态软件中将引起时延要求较高的输入通道,如触发连接器脱落动作的点火、起飞等信号硬件接线中设计到同一个模块当中,并在组态软件中将该模块硬件变量设置为变化更新,并将连接器脱落指令相关语句在事件任务中执行,则有较好的联锁响应时间表现。

浙江中控国产 PLC G5Pro 控制系统支持 CPU 机架冗余、电源冗余、网络冗余、通讯模块冗余、IO 模块冗余。适用于大规模的应用场景,具备全面的冗余措施、快速的冗余切换时间、完善的诊断机制,极大地提高了系统的冗余容错能力,保证系统整体的可靠性。在冗余机制验证方面,借用浙江中控 PLC G5Pro 系列模块进行冗余系统搭建,搭建冗余系统如图 7 所示,采用双环网架构,对运载火箭测控设备常用的 CPU 冗余、输出模块冗余以及模拟量输入模块冗余进行了验证。

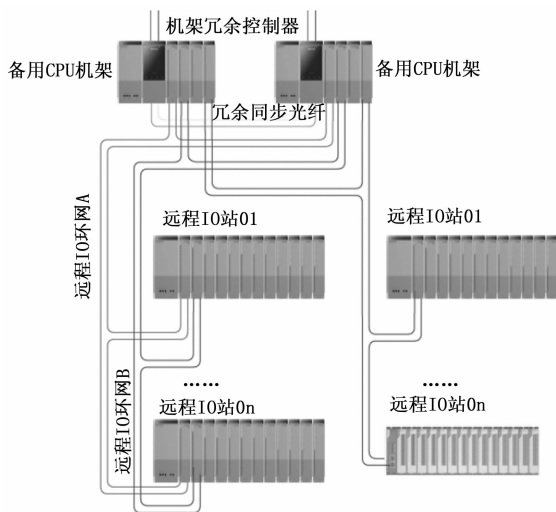


图 7 国产化 PLC 环网冗余系统示意图

类似图 7 冗余系统中,在远程 I/O 站上使用输出模块,模拟网线断开等故障,均可正常输出。输出模块输出通道没有因为冗余系统中单点故障导致输出中断。对单个 CPU 模块进行断电等操作也未影响模块正常输入输出功能。

后又在从站中配置模拟量输入模块,并验证模拟量输入模块的相邻冗余模式,即从站中相邻位置上使用同样规格两块模拟量输入模块。通过浙江中控成品线缆连接到同一块端子板上。当有 4~20 mA 电流流过时,两个模块中有一个输入模块为主用模式,当拔掉该模块上线缆模拟输入故障时,则备用模块正常接入工作,反应切换时间在 5 ms 之内。该功能在动力测发控系统内推荐使用,解决了之前测发控系统对电流采样采用西门子模块测试时的单点环节。相较于西门子 PLC,浙江中控国产 PLC 除了 CPU、DI、DO、电源模块以及通信模块具备冗余功能以外,AI 模块新增了冗余功能。如果其中一个 AI 模块失效,备份 AI 模块接入采集工作,提高了模拟量采集的可靠性。

实验结果证明国产 PLC 在性能、可靠性指标上不低于同价位日、欧进口 PLC,部分技术指标甚至优于进口产品。

秉承“大胆论证,谨慎验证”的原则,我们将国产 PLC 首次应用于新研运载火箭测发控系统的自检设备(等效器),并在 2022 年顺利完成 Y1 首飞,最终取得圆满成功。为国产 PLC 后续在型号对箭测试产品中的全面应用打下坚实基础。

在成本方面,以动力测发控系统某设备为例,所选用的 PLC 模块较少,经核算该设备的主要模块分别选用西门子 PLC 和浙江中控国产 PLC,选用西门子 PLC 的成本为 212 704 元,而选用浙江中控 PLC 的成本为 146 000 元,成本降低了 66 704 元,较前一代测控设备成本降低了 31.4%。

PLC 国产化的替代,是我所运载火箭测控设备走出进口产品“包围圈”的重要一步。在此次运载火箭测控设备 PLC 国产化替代探索的过程中,一方面,在满足性能与可靠性的前提下显著地降低了设备采购成本,同时也大幅缩减了设备订购周期;另一方面,打破了西方国家对我国航天领域在技术层面的“卡脖子”的现状,实现掌握技术自主的目标。最终形成了经济成本控制、时间成本降低、可靠性提高和基本功能保障“四赢”的良好局面,为运载火箭测控设备和我所其他领域产品的国产化替代起到了良好的示范作用。

2.3 合理冗余设计

在工业过程控制领域,对主控制模块和重要的输入输出模块进行冗余设计,一般配置为控制器冗余、总线冗余、通信冗余,可以降低故障风险,提高系统的可靠性和稳定性^[16-18]。常用冗余设计是采用一个以上 CPU、冗余 IO 模块进行控制。文献 [19] 介绍了一种采用小型 PLC 实现冗余配置的方案,2 台完全相同的小型 PLC 控制器通过信号检测装置来判断 PLC 控制器功能是否正常,发出主从切换信号,实现热备冗余。文献 [20] 设计了一种动态可配置的冗余 I/O 模块系统,包括控制器、I/O 底座、I/O 模块和通信总线,I/O 模块会周期性上送主备 I/O 模块标志,使控制器能实时监视 I/O 模块状态,并在 I/O 模块出现双主时提供解决方案,使 I/O 模块重新决策进入正常运行方式。文献 [21] 基于可靠性基础理论分析了单系统、2 单元并联冗余系统、3 取 2 表决冗余及 2 乘 2 取 2 冗余 PLC 系统的可靠性、平均故障时间和可用性。

某型号测发控系统关键设备如发控设备、动力测控设备、配气台测控设备均采用西门子 S7 冗余 PLC 系统,其中 S7 冗余 CPU 模块为西门子去年推出的冗余系统专用 CPU 模块,冗余 PLC 主站按照“热备用”模式中的活动状态冗余性原理来运行。对于一些重要发控指令,配置 3 个 I/O 从站对应通道同时输出,接通三选二继电器或直接对箭上进行状态控制,一般控制指令采用双冗余控制方案,对于所有反馈的开关量通道均采用双冗余通道配置。在该种配置方法下,当任意一个 I/O 从站模块发生故障时,其他两个模块正常输出,都可以保证系统指令执行的安全可靠。系统如图 9 所示。

目前大部分 PLC 厂家只在大型 PLC 系统中推出冗余型

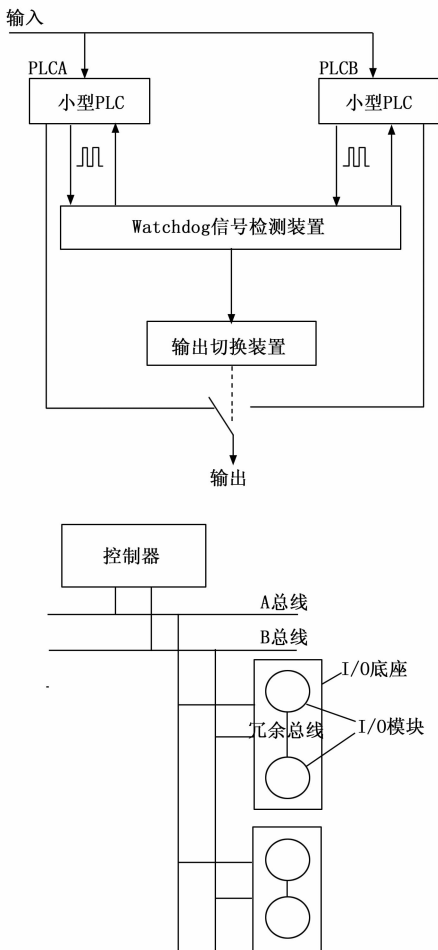


图 8 文献 [19] 和文献 [20] 冗余设计方案

出冗余大大提高了设备成本。为降低研制成本,地面测控设备可适当缩减冗余设计。通过以往大量的工程测试经验表明,CPU在实际使用中出现故障的概率极低,在项目成本有限及设备性能要求不高的情况下可以不考虑CPU的冗余设计,I/O从站也可以从多个从站改为单个从站,对于一些重要的控制指令采用双冗余设计。为保证冗余控制可靠性,双冗余通路设置在从站不同的模块,这样可避免单个I/O模块故障时双冗余控制通路同时失效。

某商业航天运载火箭地面发控PLC设备用于实现火箭的控制指令上传、状态采集、配电、发动机点火、紧急断电等功能,使用的模块包括CPU模块、开关量输入模块、开关量输出模块、模拟量采集模块等。

发控PLC设备控制系统采用单CPU、单从站模式,对于箭上重要指令输出通过从站中3个不同模块(三选二冗余)或者2个不同模块(双冗余)控制输出,防止出现单路失效导致的指令误发或指令漏发模式,其原理如图10所示。

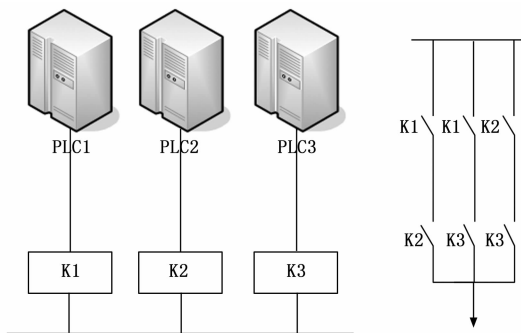


图 10 三选二控制指令输出

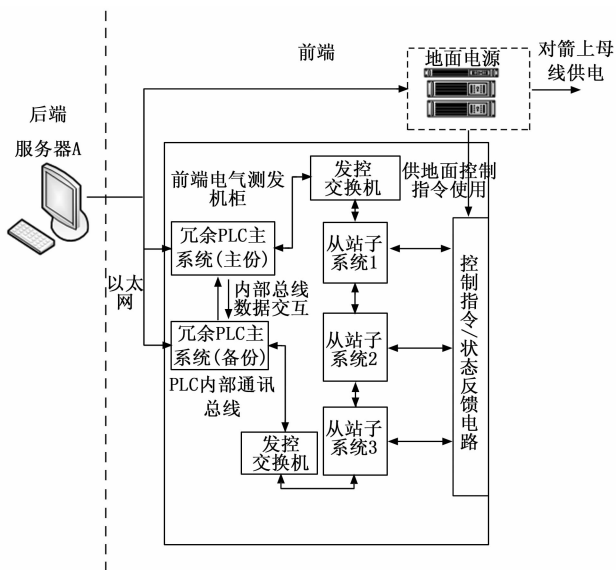


图 9 系统框图

为进一步提高产品通用性,地面发控PLC设备在原来基础上进行了设计改进,将所有PLC模块单独设计成一台可多型号通用的设备,将内部预留的IO模块输出全部引出至输出接口实现最大化设计,同时后续还可以通过增加模块实现更多对箭信号的控制与采集,极大提高了测控设备的通用性,从而实现低成本设计。该控制系统已经过蓝箭朱雀运载火箭系统集成综合试验考核和首飞验证,系统运行可靠,未出现质量问题,得到用户的充分认可。

3 结束语

本文提出了运载火箭测控设备小型化低成本设计思路。地面测控设备可通过选择高集成化、多通道、相对体积小和功能板卡或元器件,合理排布器件,最大化利用机箱内部空间,采用虚拟表头、指示灯、按钮丰富软件功能和显示界面,提高软件自动化程度达到测控设备小型化设计。商业货架产品通过降额设计、国产化产品替代、合理冗余设计能达到低成本效益的同时不影响其可靠性。

参考文献:

[1] 赵力文. 商业航天测控关键技术问题研究 [C] //第三届中国

PLC,而在小型PLC系统中没有推出冗余型PLC,且大型的冗余型PLC系统价格昂贵,CPU热备冗余或者多从站输

空天安全会议论文集, 2021: 326-330.

- [2] 刘旭梅. 元器件小型化的需求与技术动态 [J]. 行业资讯, 2014, 33 (6): 81-82.
- [3] 陈秋宇. 一种小型化弹载无线测控系统设计 [D]. 北京: 北方工业大学, 2023.
- [4] 姜宁宇. 高可靠小型化测控单元的研制 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [5] 张 星. 潜艇电源设备结构设计及热设计优化研究 [D]. 镇江: 苏科技大学, 2019.
- [6] 姜盛鑫. 面向航天装备的货架产品准入审查流程探索研究 [J]. 航天工业管理, 2022 (12): 43-47.
- [7] RANKIN R E. 军用系统采用民用产品的成功经验 [J]. 系统工程与电子技术, 1986 (1): 77-81.
- [8] 李 伟. 商用货架产品的可靠性风险控制方法 [J]. 工程与技术, 2004 (3): 34-37.
- [9] 施 帆, 朱 放. 宇航产品货架管理模式研究 [J]. 航天工业管理, 2015 (6): 3-6.
- [10] 毕锦栋, 郑丽香, 周军连, 等. 电子元器件国产化替代工作探讨 [J]. 质量与可靠性, 2015 (3): 35-40.
- [11] 李永梅, 李先亚, 赵永兴, 等. 国产器件替代应用中问题分析与对策 [C] //2021年中国航空工业技术装备工程协会年

(上接第 45 页)

- [2] SMITH S M, WASTNEY M E, O'BRIEN K O, et al. Bone markers, calcium metabolism, and calcium kinetics during extended-duration space flight on the Mir space station [J]. *Journal of Bone and Mineral Research*, 2005, 20 (2): 208-218.
- [3] 刘 菁, 冷非凡, 高玉海, 等. 太空微重力环境诱导骨丢失的研究进展 [J]. 解放军医药杂志, 2021, 33 (3): 112-116.
- [4] RUCCI N, CAPULLI M, PIPERNI S G, et al. Lipocalin 2: a new mechanoresponding gene regulating bone homeostasis [J]. *Journal of Bone and Mineral Research*, 2015, 30 (2): 357-368.
- [5] NABAVI N, KHANDANI A, CAMIRAND A, et al. Effects of microgravity on osteoclast bone resorption and osteoblast cytoskeletal organization and adhesion [J]. *Bone*, 2011, 49 (5): 965-974.
- [6] SCHMIDT M A, GOODWIN T J. Personalized medicine in human space flight: using Omics based analyses to develop individualized countermeasures that enhance astronaut safety and performance [J]. *Metabolomics*, 2013, 9 (6): 1134-1156.
- [7] HARADA S, RODAN G A. Control of osteoblast function and regulation of bone mass [J]. *Nature*, 2003, 423 (6937): 349-355.
- [8] RAM V S, SUDHAKAR U, MITHRADAS N, et al. Bonebiomarkers in periodontal disease: a review article [J]. *Journal of Clinical and Diagnostic Research: JCDR*, 2015, 9 (1): 07-10.
- [9] GRIGORIEV A I, OGANOV V S, BAKULIN A V, et al. Clinical and physiological evaluation of bone changes among astronauts after long-term space flights [J]. *Aerospace and Environmental Medicine*, 1998, 32 (1): 21-25.

会论文集, 2021: 567-569.

- [12] 姜广顺. 防空导弹装备电子元器件国产化问题探讨 [J]. 航空维修与工程, 2017 (6): 36-39.
- [13] 禹 焯. 浅谈装备零备件国产化替代中的质量监督 [J]. 中国军转民, 2022 (2): 48-49.
- [14] 李永梅. 军用进口电子元器件的国产化替代验证典型案例分析 [J]. 质量与可靠性, 2017 (5): 30-33.
- [15] 崔帼艳. C 研究所电子元器件国产化项目的质量管理研究 [D]. 南京: 东南大学, 2020.
- [16] 杨昌群. 双环网冗余的 PLC 系统在油气管道中的应用 [J]. 中国仪器仪表, 2020 (5): 30-33.
- [17] 张 帆. 冗余技术在 PLC 控制系统可靠性提高中的应用 [J]. 价值工程, 2020, 39 (11): 233-235.
- [18] 王虎军. 冗余技术提高 PLC 控制系统可靠性的研究 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (12): 4016-4018.
- [19] 王龙南. 采用小型 PLC 搭建冗余控制系统的研究与实践 [J]. 机电信息, 2019 (20): 34-35.
- [20] 臧 峰. 冗余 I/O 模块切换方法的设计与实现 [J]. 自动化仪表, 2020, 41 (8): 56-60.
- [21] 孟 君. 基于不同冗余结构的 PLC 系统可靠性与可用性研究 [J]. 电子技术应用, 2016, 42 (9): 80-83.

- [10] 于翠屏, 刘元安, 李杨柳, 等. 柔性电子材料与器件的应用 [J]. 物联网学报, 2019, 3 (3): 102-110.
- [11] 董文举, 孔令斌, 康 龙, 等. 超级电容器电极材料及器件的柔性化与微型化 [J]. 材料导报, 2018, 32 (17): 2912-2919.
- [12] 金 欣, 畅旭东, 王闻宇, 等. 基于聚二甲基硅氧烷柔性可穿戴传感器研究进展 [J]. 材料工程, 2018, 46 (11): 13-24.
- [13] LIU T, DANGI A, KIM J N, et al. Flexible thin-film PZT ultrasonic transducers on polyimide substrates [J]. *Sensors*, 2021, 21 (3): 1014.
- [14] HONG Y, WANG B, LIN W, et al. Highly anisotropic and flexible piezoceramic kirigami for preventing joint disorders [J]. *Science Advances*, 2021, 7 (11): eabf0795.
- [15] JIN P, FU J, WANG F, et al. A flexible, stretchable system for simultaneous acoustic energy transfer and communication [J]. *Science Advances*, 2021, 7 (40): eabg2507.
- [16] 高丹华. 轴向传输超声骨密度仪设计 [D]. 南京: 南京大学, 2014.
- [17] ELLIOT J R, FENTON A J, YOUNG T, et al. The precision of digital X-ray radiogrammetry compared with DXA in subjects with normal bone density or osteoporosis [J]. *Journal of Clinical Densitometry*, 2005, 8 (2): 187-190.
- [18] 戴如春, 张 丽, 廖二元. 骨质疏松的诊治进展 [J]. 中国医刊, 2008, 43 (4): 4-6.
- [19] 李旭鸿, 侯 曼, 仰红慧. 骨密度的测定方法及影响因素 [J]. 天津体育学院学报, 2005, 20 (3): 62-65, 89.
- [20] MULLER M, MOILANEN P, BOSSY E, et al. Comparison of three ultrasonic axial transmission methods for bone assessment [J]. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 2005, 31 (5): 633-642.