

# 新型航天器电气综合一体化架构研究

刘 飞, 姚 旺, 欧连军

(中国运载火箭技术研究院研究发展中心, 北京 100076)

**摘要:** 随着电子技术的发展, 电子元器件的体积越来越小, 处理器的运算能力越来越强, 存储器的容量越来越大, 总线的传输速率越来越高, 电子设备的集成度越来越高, 成本越来越低; 在这样的背景下, 航天器电气综合系统设计理念也在与时俱进, 为降低电气系统体积重量和功耗, 以提高航天器的任务能力, 同时为加快研制进度, 降低研制成本, 迫切需要开展新型航天器电气综合一体化架构研究, 文章主要对比国外航空航天领域飞行器先进电气综合系统架构, 分析了目前国内航天器电气系统综合设计中存在的缺陷和弊端, 结合我国未来新型航天器对电气综合系统的需求, 提出了我国新一代航天器电气综合系统一体化设计的基本原则, 并对系统软硬件体系架构及具体的功能实现方式进行了初步的设想。

**关键词:** 航天器; 电气综合系统; 一体化设计

## Research on Electrical System Integrative Architecture of New Spacecraft

Liu Fei, Yao Wang, Ou Lianjun

(China Academy of Launch Vehicle Technology Research and Development Center, Beijing 100076, China)

**Abstract:** With the development of electronic technology, the volume of electronic components is getting smaller and smaller, the computing power of the processor is becoming more and more powerful, the capacity of the memory is growing, the transmission rate of the bus is getting higher and higher, electronic devices are becoming more and more integrated, the cost is getting lower and lower. Under such background, the design concept of the electrical system design of the spacecraft is also advancing with the times, to reduce the volume weight and power consumption of the electrical system, in order to improve the spacecraft's mission capability, at the same time to speed up the development of the progress, reduce development costs, an urgent need to develop a new type of electronic integrated structure of spacecraft. In this article, compared with the advanced international electrical system architectures, analyzed the disadvantages of internal electrical system architectures on the aviation and spaceflight. To meet the need of new spacecraft electrical system, the integrative design base principle of new spacecraft electrical system in China is presented. Also, the software and hardware architecture and the realizing method of functions are assumed.

**Keywords:** spacecraft; electrical system; integrative design

## 0 引言

我国传统的航天器多按功能划分为若干分系统, 各分系统独立设计, 如控制、遥测、外测、安全、动力等系统。各系统独立设计, 系统间接口关系复杂。与国外先进航空航天器电气综合技术存在代差。差距主要体现在如下几个方面:

- 1) 系统集成度低, 单机质量重、功耗高、体积大、接口复杂, 优化设计仅限于在分系统层面, 不能保证整体性能最优, 余量设计未能统筹考虑;
- 2) 资源利用率低, 系统扩展成本高, 随着系统功能的不断增加, 设备重量、功耗和成本的增加将逐步变得不可接受;
- 3) 总线带宽的限制, 系统之间的数据共享能力有限, 无法实现系统之间的有效协同和综合化设计。航天器不断引进新的功能(如目标探测、互联互通)、新的能力(信息融合、), 增加了系统功能的复杂度;
- 4) 单机产品均为定制, 兼容性与互换性差, 研制成本高;
- 5) 系统电缆连接复杂, 电缆网的设计、生产、安装、测试等环节工作量很大且容易出现质量问题。

随着新的航天器功能越来越多, 性能要求越来越高, 对电

气综合的要求也更高, 原有的系统架构已无法适应这些新的要求, 急需在借鉴国外相关领域的先进理念的基础上结合实际的需求开展新一代航天器电气综合架构的研究。

## 1 典型飞机航电综合系统研究

美军的 F-35 战机将航电综合系统划分为 8 个域, 体系架构见图 1, 分别为飞行器人机接口、在线传感器、火控、外部通信、任务、诊断及健康检测管理、核心处理、数据收集, 其核心处理机包括 2 个标准机箱, 提供大于 25 个模块插槽, 内部总线采用 RapidIO 及 FC 总线通信, 通过空余槽位及模块自身更新支持系统功能升级。核心处理机主要包括 7 种模块类型, 分别为通用处理模块、带 I/O 通用处理模块、信号处理模块、带 I/O 信号处理模块、图像处理模块、FC 交换模块、电源供电模块等。

F-35 软件架构见图 2, 采用面向对象的软件设计技术, 系统定义了 150 多种系统类结构, 每个系统类为一个软件配置项, 系统类之间为松耦合, 设计了中间件, 针对 FPGA 设计了 FPGA 抽象层, 内部通信遵循标准协议, 并采用通用设计模式解决通用性问题。

## 2 典型飞行器综合电子系统研究

欧洲过渡试验飞行器 (IXV) 是欧空局负责的试验性再入飞行器项目, 目的是验证一种能以高超声速进行无动力机动再

收稿日期:2015-11-03; 修回日期:2016-04-15。

**作者简介:** 刘 飞(1982-), 男, 河北沧县人, 硕士研究生, 主要从事航电综合总体技术方向的研究。

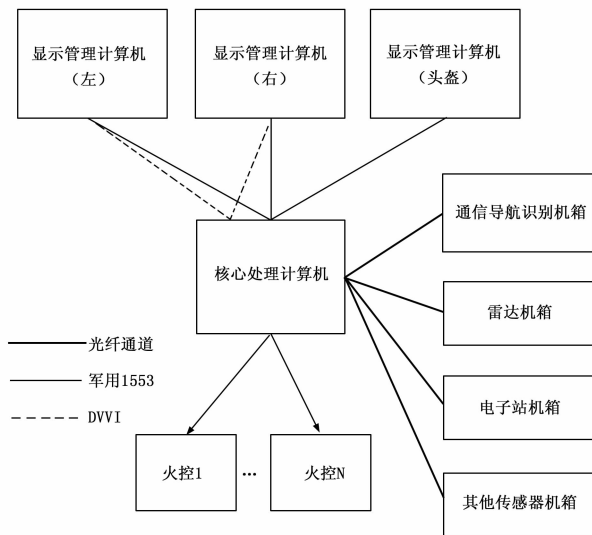


图 1 F-35 航电综合体系架构

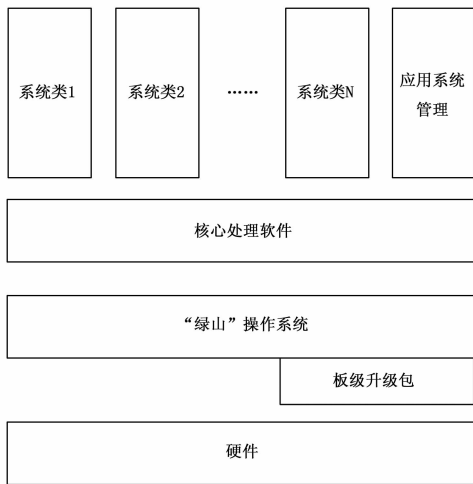


图 2 F-35 软件架构

入飞行的升力体结构，被外界称为欧洲版的迷你“航天飞机”。

IXV 综合电子主要由 POW（电源）、DHS（数据处理）、RTC（遥测遥控）、FPCS（反作用和多面控制）等部分组成。

## 2.1 电源

电源部分主要由 1 台 PPDU（电源保护和分配器）、2 块独立功能电池和 2 块冗余的火工品电池（锂离子电池）组成。采用成熟的 28 V 直流母线架构，沿用 GAIA、哨兵 1 号、ATV 等成熟型号的技术。

其中，PPDU（电源保护和分配器）中集成设计了 28 V 一次配电控制功能、DC/DC 变换功能、RCS 电磁阀控制功能和火工品起爆控制功能。

## 2.2 数据处理部分

数据处理部分负责数据的采集、存储、实时和延时传输。系统架构采用基于 1553B 总线、串行总线和以太网的多总线架构设计。从功能上分为两层，分别负责试验数据和关键数据处理。整个体系架构的核心是一台中心 OBC（板载计算机），负责控制和执行整个飞行任务。数据记录器用于存储由 DAU（数据采集单元）采集到的数据。GPS 和 IMU（惯性测量单

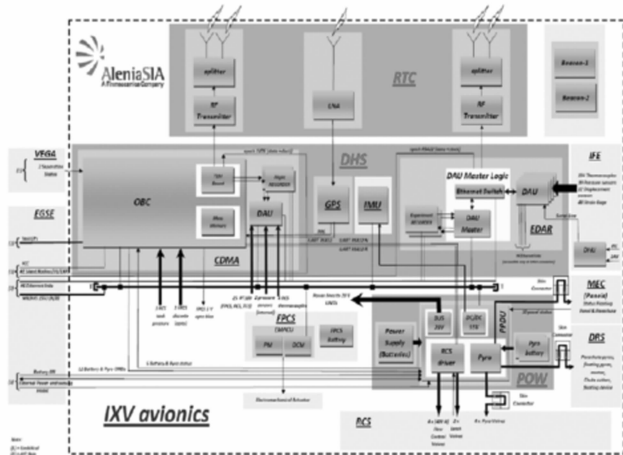


图 3 IXV 综合电子系统架构

元）负责执行导航任务。

关键数据处理部分主要与 GNC 任务相关，关键数据主要包括 GNC 遥测数据和飞行器健康状态数据，这些数据被存储在两个冗余的数据记录器中。该部分的硬件包括 OBC、IMU、GPS、DAU 和 24 G 的记录器。

OBC 采用 LEON2-FT 微处理器核，运行在 50 MHz，它是整个飞行器航电综合的核心。主要负责制导导航控制和舵面控制，还负责将重要遥测信息按照 CCSDS 标准进行编码，在地面站不可见情况下将数据存储到记录器，当地面站可见时再将数据下传。

关键数据处理部分的 DAU 是一台商用货架产品，主要用于采集重要的传感器信息（压力、温度、应变、存储状态等），并通过 1553B 总线发送给 OBC。

GPS 接收机用于提供位置、速度和 GPS 时间信息。GPS 数据以 1 Hz 频率发送给 OBC。

IMU 采用 QUASAR3000，已应用于阿里安 5 和织女星火箭，以 100 Hz 的更新速率通过 1553B 总线发送给 OBC。

试验数据处理部分主要用于管理试验的飞行数据。主要采集温度、压力、应变、加速度等传感器数据以及红外图像。和关键数据类似，也设计了实时存储和延时发送功能，配置了 2 台冗余的数据记录器。

## 2.3 遥测遥控部分

RTC（遥测遥控）系统分别为关键数据及试验数据提供独立的下行链路（1 mbps）。为确保天线的全向覆盖，在飞行器两侧对称设计了冗余的遥测发射天线和试验数据发射天线。

## 2.4 反作用和舵面控制部分

OBC 通过 1553B 总线将控制指令发送给 EMACU（作动器控制单元），两个专用的电池并联使用来给伺服提供能源，EMACU 的逻辑电路由 28 V 直流母线供电。

# 3 对国内航天器电气综合系统设想

## 3.1 航天器电气综合系统功能

综合对国外航空航天器电子设备发展体系架构的分析，结合实际需求，未来航天器电气综合系统随着架构的变化必然带来功能的重新整合，其应具备的基本功能如下：

### 3.1.1 飞行控制功能

飞行控制功能要完成航天器在轨或大气层内飞行、制导与控

制任务。它通过导航器件、执行机构、处理器等在航天器全任务过程的运动参数测量、轨迹实现和姿态控制任务,实现航天器姿态、航迹、气动外形和结构模态的控制。航天器控制功能运行是否正常、控制决策是否合理直接关系到飞行任务的成败。

首先,需要敏感器件测量航天器的飞行状态,然后由处理器根据预置指令进行比较计算,输出控制信号给执行机构来驱动操纵舵面,从而产生空气动力和力矩来控制航天器的飞行状态,其飞行控制功能主要包括:

- 1) 完成控制律解算并输出控制与制导指令至执行机构,实现整个飞行任务期间的轨道控制;
- 2) 实现俯仰、滚转、航向三轴姿态控制;
- 3) 实现高度、速度(马赫数)、升降速度稳定控制和空中侧向纠偏控制;
- 4) 实现动压、法向过载限制和保护,防失速保护。

### 3.1.2 统一供电功能

统一供电功能包括为航天器各仪器设备提供及分配稳定可靠的电能,实现对电能调节、变换、控制、分配、传输功能,实现故障隔离、信息通信等。

调节功能指对母线输出功率进行全部调节型、部分调节型或者不调节;变换功能指通过变换电路实现不同等级电压和品质的变换;控制功能指对蓄电池组的充电、放电控制,包括充电电流限制控制、过充电保护控制、过放电保护控制。

分配功能指通过功率开关器件实现对供电电源的开关控制,负责航天器地面电源和内部电源的切换,接受航天器飞行程序指令对仪器设备供电开关进行加断电控制;需要特别指出的是火工品起爆控制也属于电能分配功能。

传输功能指以输电电缆的形式将电能传输到用电仪器设备端。

故障隔离功能指通过熔断器保护、过压过流自动或遥控断电保护实现将故障隔离。

信息通信功能指对支路电流、母线电压等信息进行采集检测,并通过下位机总线将供电状态遥测送至管理计算机。

### 3.1.3 天地一体化无线通信功能

天地一体化无线通信功能作为航天器航电系统的重要功能,主要完成航天器的遥测、遥控、数传、外测、飞行安全、天馈及布站设计。

### 3.1.4 任务管理功能

任务管理功能基于对航天器信息的集中管理,实现面向全任务阶段的顶层管理,具体包括时序管理、配电管理、数据管理及时间管理等功能。时序管理按照时间先后顺序以确定的逻辑关系组织不同的任务,不同的任务可以采用时间触发或者事件触发方式实现,时序管理同时需要考虑故障应急处理流程;配电管理通过配电支路通断控制实现不同设备的加断电,满足在不同任务剖面及任务模式下全飞行器的工作状态,解决应急工况及能源平衡等问题;数据管理包括遥测数据管理、遥控数据管理及数传数据管理,涉及数据采集、传输、存储等过程,通过数据的集中管理实现航天器的信息综合化,为航天器的智能化提供了实现基础;时间管理包括为航天器提供统一的时间基准、时间校准等功能,通过统一的时间基准实现航天器上不同系统、不同任务之间的同步性,保证时序逻辑的正确性。

任务管理通过建立航天器的顶层管理系统,实现全任务阶段统一调度管理,是实现不同系统不同功能之间协调的关键,

是实现航天器自主管理、智能化管理的核心。

## 3.2 系统体系架构及功能实现方式设想

### 3.2.1 电气综合总体实现思路

按照一体化集成的设计思路,以信息为核心,从信息感知、信息传输和信息处理3个方面进行系统功能划分,将单个电子设备的控制、信息处理、供配电等功能进行剥离,对系统计算、存储、处理的资源进行统筹优化分配,以高性能信息处理平台为核心,通过交换式网络实现各分布式单元与处理平台间的高速信息交互,通过嵌入式实时操作系统对系统资源统一调度和分配,实现系统各项功能的协同工作。

系统主干网络采用时间触发以太网总线,完成各部分(核心处理器、地面监控计算机、传感器前端和执行机构的后端)之间的信息交互,满足高速、高可靠的需求,便于系统升级与扩展;机内采用标准化的高速串行总线,实现各单元模块标准化互联设计,结合嵌入式实时操作系统,可提高系统架构的扩展能力和兼容能力。

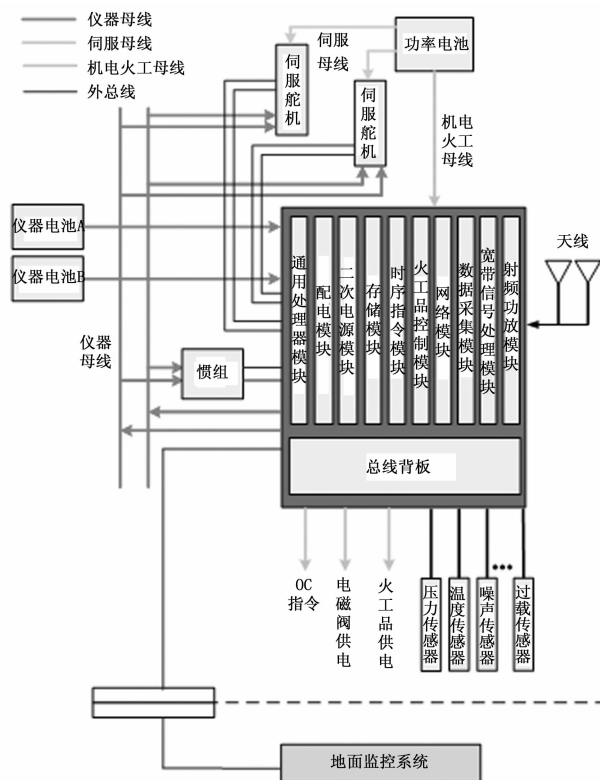


图4 航天器电气综合系统硬件架构设想

### 3.2.2 电气综合硬件架构设想

#### 3.2.2.1 核心单元

采用基于VPX背板总线的机箱作为核心单元,实现导航解算、姿态控制、时序控制、载荷数据处理、供配电、对天对地通信等功能。

1) 通用处理器模块作为电气综合的任务管理和信息处理核心,负责导航算法、飞行控制及全系统资源管理等,并接收来自通用模块的健康监测信息,具备将异常模块隔离的功能;

2) 配电模块接收电池和地面电源输入,能够实现一次电源的加断电、转电和紧急关机控制;

3) 二次电源模块接收配电模块的一次配电输出,经滤波

器组由一次电源变换为二次电源供给核心单元背板；

4) 时序指令模块接收通用处理器模块的时序控制指令，能够实现电磁阀驱动、舵机控制和不带电触点输出；

5) 数据采集模块主要完成速、缓变量信号采集功能，具备无线接收功能，通过背板串行总线接收其它模块状态、数据等遥测信息，将各项测量数据汇总编帧，按照格式输出到宽带信号处理模块和存储模块；

6) 火工品控制模块接收通用处理器模块的火工品控制指令，实现火工品的安全可靠起爆；

7) 存储器模块主要完成数据收发、文件管理、存贮控制等功能；

8) 宽带信号处理模块实现从射频前端到基带处理通过软件配置，具备工作频带可配置、发射/接收频点可设置、信号放大增益可控制、处理带宽可配置、处理信号形式多样化等功能；

9) 射频功放模块接收宽带信号处理模块的输出，射频功放模块完成多种类型射频信号的功率放大和低噪放接收；

10) 网络模块负责核心单元与地面监控系统以及其他单机之间的外部高速数据交换。

### 3.2.2.2 分立设备

伺服舵机、惯组、天线、蓄电池组以及传感器按照独立设计考虑。

1) 舵机采用驱动器和执行机构一体化设计，通过外总线与核心单元实现信息交互；

2) 激光惯组只作为敏感器件实现姿态、位置信息的感知，并通过外总线与核心单元实现信息交互；

3) 各频段收发天线通过综合口径设计，在单天线上实现多信号收发功能；

4) 仪器电池采用双冗余设计，实现双母线供配电架构，仪器电池和功率电池均采用异型设计充分利用安装空间；

5) 传感器部分采用传感器、变换器一体化设计，由核心单元实现传感器的供电和数据采集处理。

### 3.2.3 系统软件架构设想

软件遵从“结构层次化、软件模块化、模块构件化”的设计原则。

#### 1) 结构层次化：

系统软件进行分层设计，为每一层分配标准的业务范围，层与层之间采用标准数据交换接口。这样，软件设计人员可以根据所承担的任务角色，关心那些仅与自身功能相关的部分，而无须关注在其他分层中的处理细节，简化设计。同时，软件分层之间使用标准接口，使得由于技术更新等原因造成的单个分层的修改不会对其它层的软件造成大的影响，有利于软件系统的维护与扩展。

#### 2) 软件模块化：

软件采用标准模块化设计，将不同的软件功能模块，集成到系统平台软件中，模块接口及相互间通信采用统一的设计标准和协议。同一层中模块之间是相互独立的，一个模块的实现不依赖于同层其它模块。良好的模块设计可以使系统易于裁剪和升级。

#### 3) 模块构件化：

对软件模块作进一步的业务梳理，划分成若干个基本构件，实现更高层次的软件重用和资源整。建立软件构件库，

在新任务软件开发时，通过组装已有成熟构件来实现部分通用需求，从而达到快速开发的目的。

按照“结构层次化、软件模块化、模块构件化”的设计原则，电气综合系统软件体系结构设计如图 5 所示。



图 5 系统软件架构设想

软件的应用层包括数据管理、飞行控制、电源管理、时间管理、安全管理、健康管理、载荷管理、导航解算、任务管理、射频综合等功能模块，分别实现各类高层应用功能。

服务层包括标准函数库，符合欧空局 SOIS 规范和 PUS 规范的服务中间件，运行在驱动层与应用层软件模块之间，提供标准功能服务，实现应用程序任务间同步、互斥以及临界和共享资源的访问协议，以标准接口形式隐藏了底层数据处理和通信过程细节，使得上层软件模块开发时不必关心底层实现，专心处理与具体应用功能相关的问题。

驱动层提供管理单元硬件的访问接口，它将服务层和应用层与底层硬件隔离开来，使得硬件技术状态改变时只需修改驱动层相关模块，而不会影响到上层应用。

## 4 结束语

随着电子技术的不断发展，航天器电气综合系统将在微电子技术、计算机技术、网络技术等推动下，其综合化程度将向芯片级综合化方向发展，标准化和通用化程度将进一步提高，系统将更加的软件化和智能化。

### 参考文献：

- [1] 陈颖, 苑仁亮, 曾利. 航电电子系统模块化综合系统集成技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [2] 蒲小勃. 现代航空电子系统与综合 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.
- [3] 朱维. 航天器综合电子系统技术研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [4] 程胜, 蔡铭. 航天高可靠嵌入式实时操作系统原理与技术 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2012.
- [5] (奥) 沃尔夫格. 综合化模块化综合电子系统的分布式平台——对未来航空电子系统及其认证需求的见解 [M]. 北京: 中航出版传媒有限责任公司, 2015.
- [6] (英) 图利, (英) 怀亚特. 飞机电气和电子系统——原理、维护和使用 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2011.