

飞行器航空电子系统 发展及组成结构研究

Study on Development and Structure of Avionics System in Vehicle

中航工业第一飞机设计研究院 钱向农 魏学航 杨丰辉 林义光



钱向农

硕士,高级工程师,主要研究方向为航空电子系统设计。

现代航空电子系统是分布的传感器和处理器组件形成的机载网络,它们由日益复杂的软件进行支持,这些软件需要经过仔细的验证和确认。自动控制系统使航空电子系统的精度和安全性越来越高,而座舱中的自动化功能使飞行员越来越了解飞行过程。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.04.086

行控制,与其他机载子系统或飞行器及地面控制设备进行通信。从无人飞行器到先进的战斗机和运输机,航空电子系统和设备拥有“飞行、导航、控制”功能,让机组人员能够熟练监视和管理飞行器整个工作过程,而不是直接操纵和控制飞行器飞行。在人工飞行过程中,对于现代电传座舱,使用电信号而不是机械连接传动信号进行控制;而对于无人驾驶的空间飞行器,通过航空电子系统进行远程监视和控制。今天,飞行器系统平台的操作者通过一组嵌入式传感器和远程传感器,持续监视和控制整个系统。驾驶人员通过像GPS系统这样的辅助导航设备,借助于空中交通管理设备指示,能够精确引导飞机进行飞行;工作人员则通过空中交通管理系统以及来自机载应答机的

数据,同时结合地面传感器(雷达设备)共同工作。无人的空间飞行器借助于地面控制设备和系统控制能够连续工作,有人驾驶的空间飞行器则依赖于自动监视功能和控制综合功能、远程任务控制系统指示以及机组人员发出操作指令,进行飞行和工作。所有的飞行器平台都有一个共同的目标,即在比较苛刻的环境中及有限的传感器数据条件下安全有效地执行任务。

现代航空电子系统是分布的传感器和处理器组件形成的机载网络,它们由日益复杂的软件进行支持,这些软件需要经过仔细的验证和确认。自动控制系统使航空电子系统的精度和安全性越来越高,而座舱中的自动化功能使飞行员越来越了解飞行过程。研发人员正在提高和改进机

近年来,我国政府逐渐将航空飞行器发展项目,如支线系列客机、大型系列飞机(包含干线客机、大型特种运输机)、无人系列飞机,以及空间飞行器发展项目(载人飞船系列、卫星系列)列为国家级重点工程。上述飞行器的航空电子系统^[1-4]相关研究内容同时也成为“十二五”及“十三五”国家重点科研项目。

航空电子系统和设备是上述飞行器和机载网络的基本组成部分。航空电子系统利用传感器感知并进

载网络系统,这主要包括分布在机上和机下各处的信息资源,这些信息源对于完成任务起到安全和有效的保障作用。

飞行器系统的研制 目的和任务

飞行器系统研制有多种用途:可以进行客运及货运,可以从机载传感器中收集和发布数据,进行通信或充当信息传送平台。

太空飞行器平台包含了从无人飞行器、低轨道卫星到上百吨载人和运货的大型运输平台;飞机种类有固定翼飞机、直升旋翼以及小型无人飞机;太空飞行器包括从以太阳能动力的地球轨道飞行器,到载人探测器、登陆车和飞船等种类。

民用飞机领域主要是客机和货机。安全、成本与效率是这些机型考虑的主要因素。民机飞行空域越来越繁忙,安全与高效飞行促使研究人员研发三余度的飞行管理系统^[2],它能够精确地导航、引导和控制飞机。下一代空中运输系统主要依赖于高性能的网络系统提供的信息,该系统组成可以提供实时的交通信息和气象信息,飞行器和地面站可以共享以上信息,从而提高了安全性分析和支持高密度空域飞行的能力。民机航空电子系统目前主要采用分布式系统结构^[5],由各种传感器和控制器根据需求组成各种机载网络。这样的系统结构减少了重量,提高了效率,改进了解决问题的方式。另外,还有一些通用航空和医疗、法律及交通监视专用的飞机,由于成本和重量等因素,其航空电子系统在组成结构方面受到限制。无人飞机系统在军事领域不断扩大,但在民用领域按照规章制度需要登记和检查,航空电子系统组成也受到一些规定限制。

随着人类对太空领域的不断探索,卫星技术快速成长。通信卫星可以完成实时多媒体传输,将信息传

给广大观众;基于卫星的系统,例如GPS系统,增强了精确定位能力;天文学家、气象学家、地理学家和气候学家等则可以从地球轨道和外太空搜集大量的数据。但是,由于太空飞行器研制和发射成本高、工作环境特殊(需抵抗各种辐射和热环境)、在太空维修困难,因此,低成本和高可靠性是系统设计和研发考虑的主要因素,这要求它的航空电子系统必须是“健壮”和可靠的。此外,载人太空飞行器还要考虑系统的余度,以减少宇航员面临的各种风险。

飞行器航空电子系统 演变过程

随着电子和计算机技术的不断进步,航空飞行器和太空飞行器的电子系统正在不断演变。

1 航空飞行器系统^[6]

最早的动力飞行器只有很少的几项航空电子设备,如最早的怀特飞机上只配备了码表、发动机转速计数器以及风力计。二战后,飞机上又有了气压高度表和空速表、指示磁航向的罗盘以及发动机转速表与温度指示器(见图1)。



图1 “骆驼”型飞机座舱布置

到二战前夕,像DC-3飞机装备了更昂贵的仪表板(见图2),包括空速指示器、高度计、垂直速度指示设备(VSI)、陀螺方向仪、转弯指示及姿态指示。

传统的真空仪表相互之间并不共享信息,机组人员完全人工负责“航空电子系统信息综合”,对飞机各系统提供的实时飞机状态(位置、姿态、大气环境和低速)以及设备性能

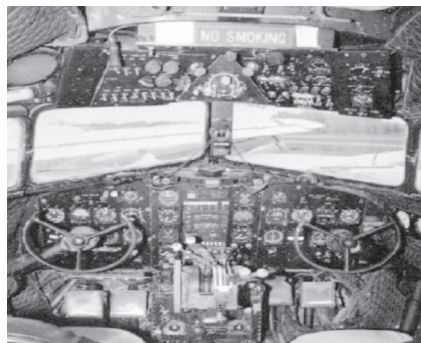


图2 DC-3型飞机座舱航空电子设备

进行综合理解后,依靠人工转换各仪表中的指示信息。目前,航空电子系统根据高层次的飞行计划管理,以及通过飞行控制、导航、发动机和燃油管理,结合空中交通管制,能够综合管理各种任务。虽然现代数字航空电子系统已经使座舱功能发生了革命性的改进,但飞行座舱某些功能区域,尤其是通用航空,仍然依靠基本仪表进行飞行。事实上,飞机最初配备的是真空仪表,现在已升级到数字航空电子系统,后者作为前者的补充手段出现,但并不完全代替原始仪表的作用。交通管制技术越来越成熟,已经从目视交通管制飞行以及机场塔台交通管制飞行,发展到基于雷达的数字化飞行导引飞行,管理人员可以监视所有飞机实时的飞行轨迹(见图3)。

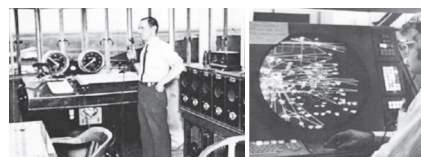


图3 目视空中交通管制工作过程

二战以后,飞机飞行变得越来越快和容易操纵,并得到先进的监视、导航和自动飞行系统的支持。地面无线电导航台网络建立后,能够支持飞机全天候飞行。自动方位确定设备(ADF)——最早建立的无线电信标系统,能够使飞行员识别相对于无向信标的方位。通过识别两个或更多的无线电信号,飞行员可以通过三角测量原理大致确定飞机位置。

VHF (甚高频) 全向信标设备 (VOR) 改进了 ADF 设备功能, 可以对方位信息进行编码, 并传给无线电台站。VOR 设备结合距离测量设备 DME, 可以提供方位和距离信息, 确定相对于单个台站的二维位置。配备仪表着陆进近设备 ILS 的机场可以提供精确方位和下滑信号, 引导飞机进行标准的着陆进近过程。机场跑道区域的导航台站网络可以帮助飞行员和空管人员进行导航和航路管理。罗兰系统 (LORAN) 开发后, 可以提供远距离低频导航信号, 用于飞行和海上导航。自从出现了卫星导航系统后, 例如全球定位系统 GPS, 罗兰系统已经终止使用。最近出现的 WAAS 广域增强系统, 正在成为标准的精密导航系统。虽然由于 GPS 设备的使用, VOR 和 NDB 设备在导航方面的作用逐渐降低, 但 ILS 设备作为 GPS 系统的备用设备, 仍然在精密进近方面发挥作用。

自动飞行系统在一战后首次使用, 它通过陀螺仪独立、稳定地控制飞机倾斜角和俯仰角。二战以后, 自动飞行系统逐渐成熟, 同时协同处理多个导航信号, 允许飞机自动保持水平飞行, 按照指定的爬升率、磁航向, 或沿着指定的方位朝向 / 背向无线电台站飞行。在 20 世纪六七十年代, 数字航空电子系统集成在先进的运输机和军用飞机中。今天根据数字航空电子系统研发的飞行管理系统是自动飞行系统技术的延伸, 能够快速和精确引导飞机按照从起飞到着陆的全过程飞行。在机载网络中, 多个信号可以共享, 利用网络它们从单个设备传递到整个座舱系统 (见图 4), 能够显示大部分有价值的信息。



图4 “塞斯纳”型飞机座舱航空电子设备

各种不断发展的先进传感器和通信技术可以提供气象信息, 提高了飞行效率和安全度。所有安全度要求很高的航空电子设备硬件和软件必须根据美国 RTCS/DO-178B 标准进行认证, 在国际上也有其他类似的标准。

2 太空飞行器系统^[6]

太空飞行器使用的航空电子系统同样是复杂的, 这是因为飞行器系统组成很复杂, 同时使用的环境更加复杂。太空飞行器系统包含多个组成部分, 每个系统都含有自己的航空电子子系统, 例如发射器系统、基本运载系统 (卫星)、1 个或多个二级运载系统 (探测车、探测器)。对于载人的太空飞行器, 宇航服具有自身的电子系统与传感器系统; 同时, 除了运载系统和飞行器辅助系统之外, 根据机组人员使用和人机接口系统的需要, 太空飞行器整个系统组成是不断扩充和增加的。虽然载人航天飞行已经得到广泛关注, 但是大多数太空飞行器系统还是无人的, 包含的技术有系统新技术验证、地球轨道通信与监视技术、太空卫星系统应用技术、行星卫星轨道控制技术、行星表面探测技术等。

太空飞行器航空电子系统具有相同的基本功能。发射器必须将运载系统发射到指定轨道上, 包括推进器激活和分离; 如果发射器不能预期工作, 任务就必须终止。一旦发射太空飞行器后, 必须控制它的运动轨迹, 保持与地面控制设备的通信, 并管理机载系统 (包括运载系统和动力系统)。其中, 无人太空飞行器必须能够开始和保持与地面站之间的联络, 支持各种工作和状态, 下传信息, 更新指令和软件信息; 载人的飞行器必须保障宇航员生活, 以及提供与无人飞行器相似的其他系统。一方面, 虽然今天太空飞行器电子系统组成和早期平台上的电子系统基本类似, 但因为技术不断提高, 可以处

理大量的数据, 进行通信和完成各种任务, 同时硬件体积和重量在不断缩小。在个人计算机出现之前, 空间飞行器飞行由大而重的计算机进行控制, 如图 5 和图 6 所示。除了大尺寸之外, 存储器容量也很低。今天飞行器使用的机载软件的指令数量大大减少, 但能够成功地管理各种任务。另一方面, 空间飞行器机载软件^[7-8]规模在迅速增加, 如源代码行数从 1968 年太空飞行器使用的 1000 行增加到 21 世纪的百万行。地球人造卫星目前可以管理通信和导航网络, 处理大量的数据信息, 这在早期设计人员看来难以想象。尽管太空飞行器技术在不断进步, 但是航空电子系统需要面对并处理光和热环境及各种辐射引起的诸多问题。

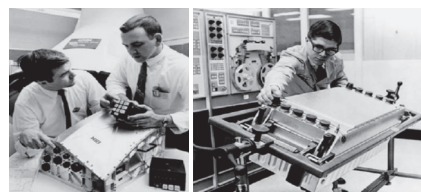


图5 Gemini型和Saturn型传统计算机系统

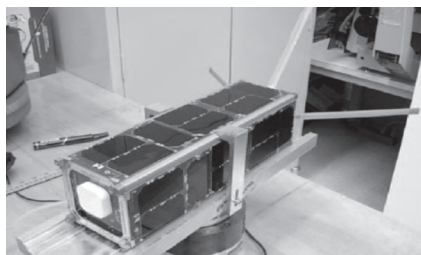


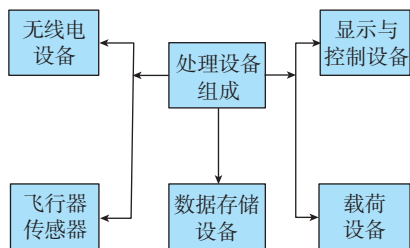
图6 “女神”探测器及航空电子系统

现代航空电子系统

航空和太空飞行器电子系统经历了不断发展的过程, 从最早的模拟电子设备、早期的计算设备演变到当前高度集成的传感器、处理器、控制器及通信设备系统构型。为了突出说明航空和太空飞行器电子系统具有的共同特点, 本研究概括论述通用系统平台中包含的通用组成, 并讨论其中的相似点和不同点; 之后详细讨论了航空飞行器和太空飞行器电子系统的功能。

1 航空电子系统一般组成^[9]

今天,所有的航空飞行器和太空飞行器航空电子系统都共享一套通用的基本航空电子系统组成结构。如图7所示,在中央位置具有1个或多个处理器,收集、处理和发布数据。一些数据完成本地存储,其他数据通过无线设备传输给地面,以及通过显示设备显示给飞行员。飞行器运载系统可以包含单独的航空电子系统,如无人机拥有的照相系统。飞行器处理器可以选择备用方式直接控制运载系统,如卫星系统带有的图像和通信系统。



处理设备包含嵌入式微处理器、数字信号处理器(DSP)、可编程逻辑阵列单元(PAL)以及含有实时操作系统(RTOS)^[8]的处理器,通过此操作系统,可以进行人工编程。小型无人飞机系统可以通过使用含有微处理器的自动驾驶仪进行飞行,而大型运输机包含复杂的微处理器网络系统,处理器可以监控和综合管理所有的飞行器子系统。航空和太空飞行器拥有数据链以及导航无线电发射和接收设备,有人驾驶的飞机和太空飞行器也使用声音通信设备。飞机和太空飞行器均有一组显示和控制设备。当然,无人驾驶飞机和太空飞行器没有机载人机接口,依靠来自远程工作站提供的数据显示和控制信息。

2 航空飞行器航空电子系统

数字航空电子系统装备航空飞行器后,系统组成范围包含从单一的自动飞行系统到完整的飞行管理系统。图8说明基本子系统是通过单

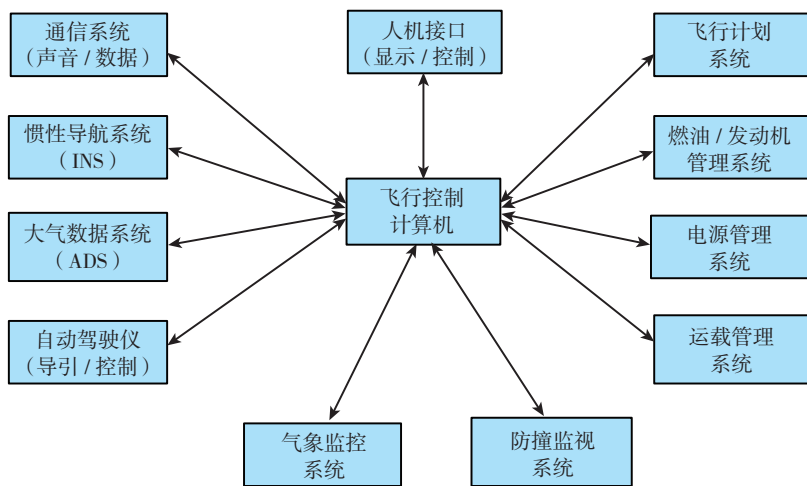
个或分布式处理器形成网络集成与综合(飞行控制计算机)。民用运输机使用的完整飞行管理系统包含图8中所有的子系统,而一架小型无人机可能仅仅包含基于微处理器的自动飞行系统,几乎没有对其他子系统的管理。

如上所述,系统无线电传感器可以进行有声通信以及接收导航信号。数据链设备期望能够成为标准设备,允许飞机接收气象和交通信息,以及对其他飞机广播传输其位置和飞行数据,比如通过ADS-B协议(自动相关性广播监视协议)完成任务。座舱显示方面,在玻璃座舱中使用LCD屏提供各种各样的信息,范围从传统的速度、高度、姿态到系统状态、交通和气象。电传控制方式已经取代飞行员与控制设备之间的机械连接控制方式,它通过飞行控制计算机产生电信号,然后生成相应的控制信号传给激励器。电传控制方式可以减少大量的机械连接,并增加控制输入信号校准和使用的灵活度。惯性导航系统(INS)包含IMU和GPS单元,它们能够提供全部惯性位置和姿态估计数据。大气数据系统(ADS)或大气数据惯性参考系统(ADIRU)可以生成风速矢量,包括风速、攻角和侧滑角测量值。自动驾驶仪可以计算1条参考轨迹,遵守飞行计划(导

引指令),以及输出指令给控制机构和发动机,以使飞机按照轨迹飞行。机上飞行计划制定者创建基于航路点的飞行计划,并根据风速预计出时间和油量需求。飞行计划制定者要求提供指定的目的地或航路点清单,以及航空公司提供的优选航路,这些都可以从数据库中检索得到。

航空电子系统目前支持机载交通防撞子系统(TCAS),它能够自动显示和探测附近的交通状况,然后按照需要建议飞行员执行爬升/下降飞行,以避免碰撞。飞行员可以执行、忽略或修改TCAS系统提出的方案,也可以遵守交通管制系统提出的备用方案。在当前高密度的飞行空域中,防撞技术被视为一项具有挑战的技术。

如图8所示,尽管“飞行控制计算机”处于集成状态,但是现代飞行管理系统仍属于高度分布的系统。虽然在座舱里有余度飞行控制计算机,但是具有监视和控制作用的处理器分布于全机身。图8中显示了各种各样的“管理”模块,包括燃油、发动机、电源以及运载管理模块。每个模块都由各自制造商提供,机载网络允许所有的处理模块相互进行通信。除确认和验证软件之外,实时操作系统和网络协议必须是高可靠性的、标准的。机载网络过去依靠传统总线



连接,遵守 ARINC 标准和 1553B 标准;现在的航空电子系统则依靠无线或光纤连接,达到重量最小、高度综合化的目标。

下面对大型航空飞行器典型航空电子系统加以分析^[1-2]。

(1)波音 787 飞机航空电子系统结构。

波音 787 飞机是波音 757/767 家族的后继机型,采用了 100M 位/A664 协议作为数据传输方式,成为此飞机的航空电子“中枢”结构。与空客 A380 选择 COTS 产品数据总线类似,波音已选择不同的系统结构用于航空电子和飞机功能系统综合。

波音 787 系统结构如图 9 所示,主要航空电子系统功能和计算任务功能由两个相同的计算资源机柜(CCR)分担。这些机柜和飞行座舱、其余航空电子组件以及其他飞机系统形成接口,共同完成一系列功能,此功能与波音 777 飞机的信息管理系统(AIMS)功能相同。每个机柜包含 4 个通用处理模块、网络交换机和两个光纤传输模块,同时采纳第三方供应商提供的模块,如柯林斯公司提供的显示处理模块。

波音公司将多达 20 个远程数据集中器(RDC)单元分布于飞机各个部分,完成模拟、离散和连续数字信号的采集功能,这些信号来自航空电子系统和飞机其他各系统的传感器

和受动器。此外,还有多达 20 个远程分布式电源处理单元(RPDU),用于飞机各区域的用电负载设备。采用的方法是:在飞机各个区域分别布置传感器、控制回路设备与电源设备。在某些条件下,单一功能 LRU 单元还用于某项功能,例如航空电子系统发电控制单元(GCU)。

波音 787 采用的双余度数据网络(CDN)使用 A664 协议,可以支持铜绞线和光纤接口,通信速度分别是 10M/s 位和 100M/s 位。

(2)空客 A380 飞机航空电子系统结构。

A380 飞机是第一架大规模采用 COTS 技术的民用飞机,该技术被用于航空电子系统和飞机其他各系统的综合与集成。即使 A429、CAN 等航空总线同时使用的条件下,A380 仍采用 100M 位 AFDX 总线作为中央通信主干网络。A380 飞机结构分成几个功能区域,并支持显示如下:

- 显示单元: 8 × 彩色玻璃平板显示设备;
- 座舱区域: 综合设备柜;
- 动力区域: 综合设备柜;
- 应用区域: 综合设备柜。

这些区域通过双余度 AFDX 总线交换机网络进行互联,该网络提供的高性能数据传输系统遍布于全飞机。

在 AFDX 总线网络和 IMA 计算模块之间的区间包含航空电子核心

组成。22 个相同的输入和输出处理模块(CPIOMS)提供核心计算功能,它们相当于 3 个 MCU 设备。CPIOM 硬件设备总共由 7 个不同类型的子设备组成。

- CPIOMA: 机柜(4);
- CPIOMB: 机柜(4);
- CPIOMC: 显示和能源(2);
- CPIOMD: 显示和能源(2);
- CPIOME: 能源,完成功能涉及电子系统(2);
- CPIOMF: 处理单元,完成功能涉及燃油系统(2);
- CPIOMG: 处理单元,完成功能涉及起落架系统(2)。

虽然各个 CPIOM 模块细微之处有些不同,但都拥有一套相同的设计与支持工具。这些工具具有相似的组成部分,其主要差异是输入/输出(I/O)设置不同,这些设置因飞机子系统功能不同而不同。

特殊高度集成的子系统在核心航空电子系统之外工作,它们和核心航空电子系统形成接口。这些系统按功能划分为:发电机控制单元;飞行控制系统;全权限数字发动机控制单元(FADEC)。

这样设计的优点是:共用公共核心模块,跨越几个功能区域;标准化处理单元;共用软件工具、标准和开发语言;不需要多个专门的 LRU 单元,即使一些 LRU 单元可以单独工作;能够容纳和使用特殊的接口;好处遍布整个飞机;改进 OEM 操作手册和航空公司后勤保障。

这些优点使将来系统结构整体升级更方便。A380 机型的 AFDX/IMA 设计方法已经被军用运输机 A400M 机型采用,并且令人信服地应用于 A350XWB 宽体客机机型。

(3)未来大型飞机航电系统解决方案。

近年来,大型飞机工程研发组织根据 3 个位于飞机中心区域相同的处理单元及数个分布于飞机各区域

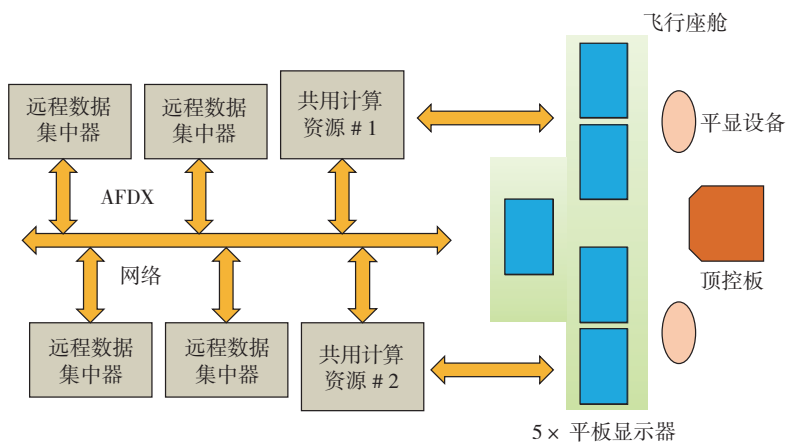


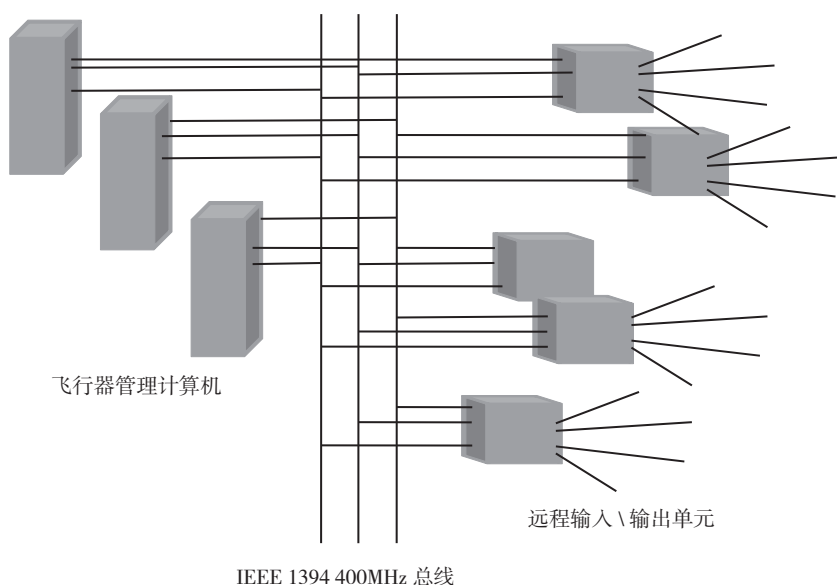
图9 波音787航电系统顶层组成图

的远程输入/输出单元,已经研发了一个典型的大型飞机航电系统组织及管理结构。三余度 IEEE1394 数据总线正在使用,如图 10 所示。

未来,大型飞机的航电系统解决宗旨及发展方向是:将采用综合模块化体系结构和开放式系统结构;将综合地面更多的功能(空管、规划、监视、评估等功能),智能化程度更高;所有机载系统适用的技术将被认为是最佳的技术选择。

3 太空飞行器航空电子系统^[3]

太空飞行器已经比目前研制的航空飞行器具有集成度更高的系统构型(见图 11)。在太空工作环境下,设备需要进行防光和防热保护,这样太空飞行器系统设备的布置可能会出现问題,处理技术也不能落后于航空飞行器。在地球上,假设计算机在基本数学计算方面不会犯错误。在太空,光热辐射可能会引起“浮点运算”错误,称为单位取反。当这种情况出现时,会造成不正确的计算结果,或改变存储器中的数值。因此,软件工程师在写代码时必须考虑这种情况。使用计算冗余方法和错误校验方法可检测出这样的事件,以保留正确结果。



IEEE 1394 400MHz 总线

图10 大型飞机航电系统管理架构图

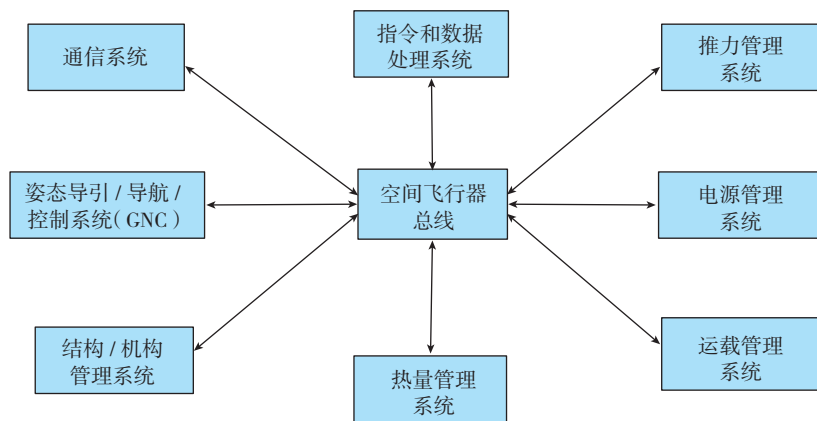


图11 太空飞行器航空电子系统组成

结束语

航空电子系统正在大大提高人们的工作能力,面对越来越复杂的任务,可以更加安全和有效地操控飞行器系统平台。小规模无人系统能够可靠、自动地工作,能够被一般人员操纵;大规模系统造价昂贵,但是在传感器、安全性和网络方面已达到了前所未有的水平。本文总结了航空飞行器和太空飞行器的航空电子系统的演变过程,描述了一些方法,用以指导工作人员监听和监视这些飞行器。还有一些问题,随着航空电子系统不断升级,研究人员正在逐渐解

决。

随着任务量越来越大,接收数据的容量限制、与地球作用距离限制、通信延迟等会对空间飞行器的任务执行造成影响。以上技术带来的挑战会推动自动化技术进步,不仅对操作者有帮助,而且会推动空间飞行器平台系统形成独立的网络系统。这样的技术进步要求工程师和操作者不仅要理解本专业领域的基本原理,而且要理解和掌握各个系统之间的设计、验证以及安全操作等知识。

参考文献

- [1] 金德琨.民用飞机航空电子系统.上海:上海交通大学出版社,2010:105-110.
- [2] 伊恩·莫伊尔,阿伦·西布里奇.民用航空电子系统.北京:航空工业出版社,2009:50-55.
- [3] Kayton.载人飞船航空电子系统.IEEE,1989.
- [4] Moir,Seabridge.军用航空电子系统.AIAA,2006.
- [5] 斯比策 C R.数字航空电子系统.北京:科学出版社,1992:150-155.
- [6] 王勇领.系统分析与设计.北京:清华大学出版社,1991:90-95.
- [7] 中国航空学会.第六届中国航空学会科技论坛.北京:航空工业出版社,2014:1384-1385.
- [8] Dvorak D L. NASA 飞行软件复杂度研究.AIAA,2009.
- [9] Helfrick A.航空电子系统原理.第五届航空电子通信会议论文集,2009.

(责编 谷雨)