

文章编号:1000-8055(2013)10-2391-10

航空发动机分布式控制系统技术分析及系统方案

宋军强^{1,2}, 潘慕绚¹, 黄金泉¹

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 中国航空工业集团 航空动力控制系统研究所, 江苏 无锡 214063)

摘 要: 分析了航空发动机分布式控制系统的系统结构、通讯总线、智能元件、高温电子元器件及分布式电源总线等领域的研究现状, 并进行技术成熟度评估。结果表明: 航空发动机分布式控制系统研究处于基础研究阶段, 各项技术成熟度(TRL)主要处于 TRL1~TRL2。针对某涡扇发动机提出基于 TTCAN(时间触发控制器局域网协议)总线的过渡分布式和部分分布式两种控制系统方案, 分析了各方案中系统结构、控制功能和信号交互特点, 以期对航空发动机分布式控制系统进一步研究提供参考。

关 键 词: 航空发动机; 分布式控制系统构架; 通讯总线; 智能元件; 高温电子元器件; 电源总线; 分布式控制系统方案; 技术成熟度

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Technology analysis and system scheme for aero-engine distributed control system

SONG Jun-qiang^{1,2}, PAN Mu-xuan¹, HUANG Jin-quan¹

(1. College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Aviation Motor Control System Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Wuxi Jiangsu 214063, China)

Abstract: The status, progress and technology readiness level of the system architecture, communication bus, smart components, high temperature electronic components and power bus for aero-engine distributed control system were analyzed and evaluated. The results show that the studies for aero-engine distributed control system are at fundamental phase and the technology readiness level (TRL) is TRL 1 to TRL 2. According to the analysis and evaluation aforementioned, two potential schemes of distributed control system for a turbofan were proposed, including transitionally distributed control and partially distributed control based on TTCAN bus, and the system architectures, control functions and communication traits were discussed, providing a reference for future development of the aero-engine distributed control system.

Key words: aero-engine; architecture of distributed control system; communication bus; smart components; high temperature electronic components; power bus; scheme of distributed control system; technology readiness level

收稿日期: 2012-08-09

网络出版地址:

基金项目: 航空科学基金(2011ZB52021); 中央高校基本科研业务费青年科技创新基金(NZ2012112);

江苏省高校优势学科建设工程

作者简介: 宋军强(1972—), 男, 浙江奉化人, 研究员, 博士生, 主要从事航空发动机控制研究。

随着航空发动机在气动热力学和机械方面的不断发展,其性能和效率达到一个前所未有的水平,发动机控制系统由机械液压式控制(HMC)发展为全权限数字电子式控制(FADEC)^[1]. 集中式 FADEC 系统无论在性能提高还是结构质量减少方面都比传统 HMC 系统具有明显优势.

然而,现代战机对发动机性能和推质比/功质比要求在不断提高. 美国于 1988 年启动的高性能航空发动机技术(IHPTET)计划,提出发动机推质比提高一倍,发动机生产和维护费用减少 35% 的目标^[1-3]. 2006 年美国提出 IHPTET 计划的后续通用的经济可承受的先进涡轮发动机(VAATE)计划,进一步对发动机的通用性、经济可承受性提出更高要求^[4]. 新的控制算法、控制策略将显著增加 FADEC 处理器的负担. 此外,当前执行机构占控制系统总质量的 15%~20%,比例较高,且随着其他控制功能的增加,其质量和成本还将相应增加^[1]. 如何在扩大发动机控制系统功能的同时,减少系统费用和质量,是 FADEC 系统面临的挑战.

如同 20 世纪 70 年代,HMC 由于质量和费用丧失其控制能力和优势一样,集中式的 FADEC 系统现在也遇到同样的问题. 控制系统要减少发动机总质量,提高其性能,降低成本,最为有效的办法就是将发动机控制系统由集中式控制结构向分布式控制结构过渡,减少推进系统控制器和附件系统质量,增加系统通用性、可靠性^[1,5].

在航空发动机分布式控制概念提出至今的 20 多年中,在分布式控制系统构架、通讯总线、智能元件(智能传感器和智能执行机构)、高温电子元器件、电源总线等方面都取得了显著进展,本文将针对这些领域中的研究开展技术成熟度分析,并对航空发动机分布式控制系统多方案进行对比,以为航空发动机分布式控制系统进一步研究提供有益参考.

1 航空发动机分布式控制技术分析

1.1 分布式控制系统构架

20 世纪 90 年代分布式控制系统提出之初,指出集中式控制系统结构与分布式控制系统结构之间最显著的区别是其工作中的空间结构. 集中式控制中,信息处理即数据操作和控制决策等都是在同一地点完成,分布式控制却刚好相反,如图 1 和图 2 所示. Thompson 等^[6]开展了发动机分布

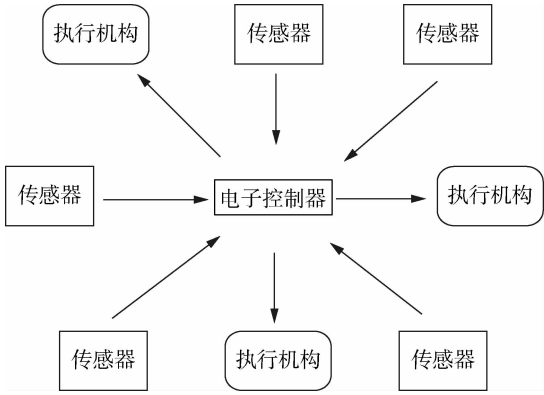


图 1 集中式控制构架

Fig. 1 Architecture for centralized control

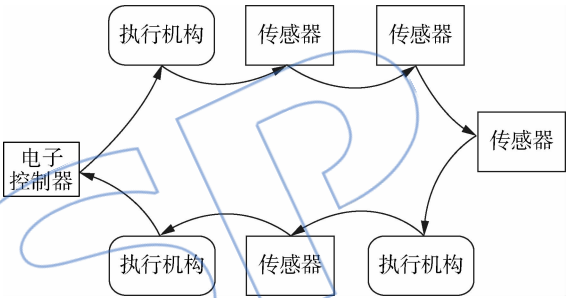


图 2 分布式控制构架

Fig. 2 Architecture for distributed control

式控制系统构架优化研究,提出环形拓扑结构在减少质量方面更优,但对于发动机分布式控制系统具体构架并未获得最终结论.

到 21 世纪初,发动机分布式控制系统结构有多种形式^[3,5,7],如过渡分布式控制系统(TDCS)、部分分布式控制系统(PDCS)、完全分布式控制(FDCS). 这 3 种分布式控制系统的可能实现形式如图 3~图 5 所示,部件连接如图中实线所示,信号交互如虚线所示.

过渡分布式控制系统中,传感器与执行机构

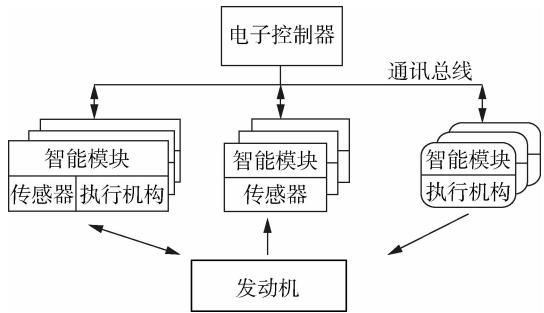


图 3 过渡分布式控制构架

Fig. 3 Architecture for transitionally distributed control

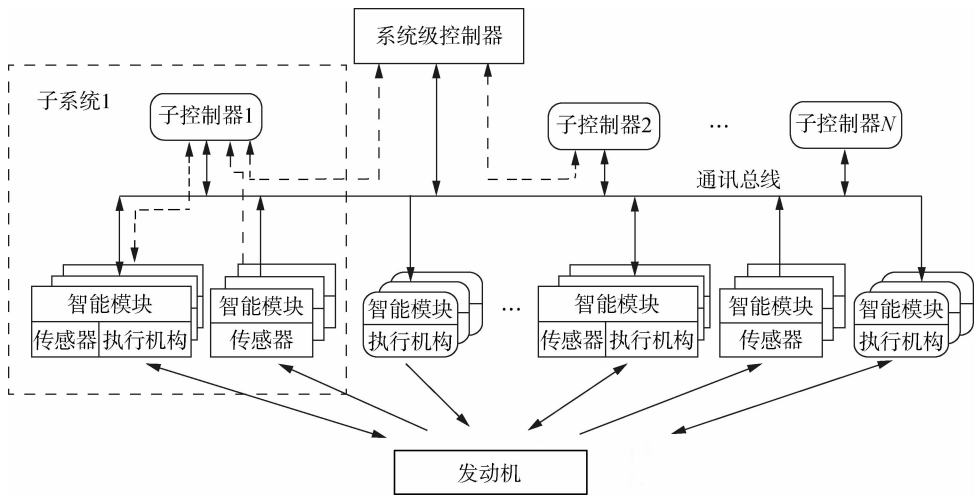


图 4 部分分布式控制构架

Fig. 4 Architecture for partially distributed control

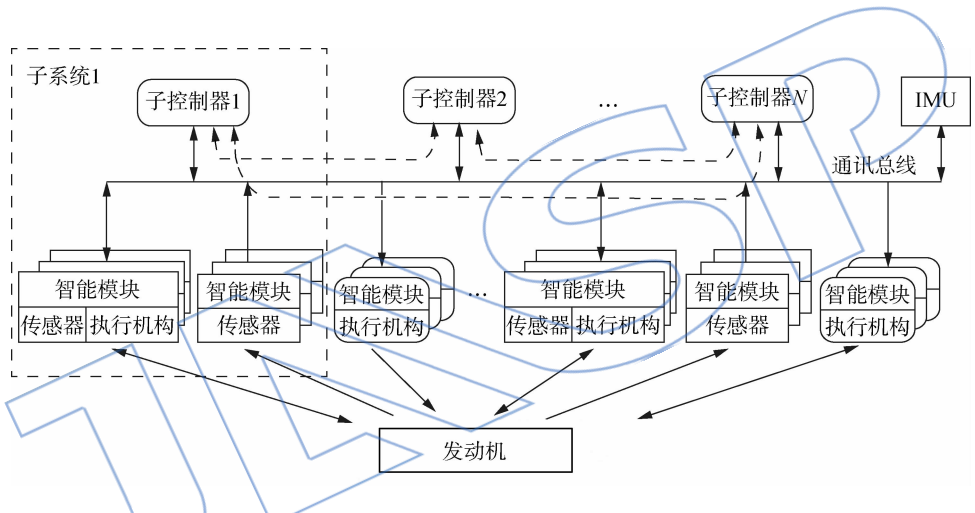


图 5 完全分布式控制拓扑构架

Fig. 5 Architecture for fully distributed control

的电源调理及分配、模数/数模(AD/DA)转换、信号限幅、量级转换等功能打包在一个智能模块中,形成智能传感器和智能执行机构,实现与电子控制器的分离。信号交互中,电子控制器与智能传感器、智能执行机构之间仍为点到点传输形式,即智能传感器与智能执行机构间没有信息的交互。电子控制器仍实现大部分集中式控制的功能,如转速系统控制、限制保护控制、开/关加力控制等。

部分分布式控制系统是由系统级控制器、智能传感器、智能执行机构、子控制器等控制节点构成的一个网络。子控制器实现局部闭环控制,如风扇子控制器实现风扇转速控制、燃油子控制器实现供油量闭环控制等。系统级控制器实现系统级任务,如起动控制,并完成各子控制器之间的监视、协调和管理。控制过程中,子控制器所需相关系统级信息,如发动机控制规律等来自系统级控

制器,子控制器间没有直接的数据交互。

完全分布式控制系统是由智能传感器、智能执行机构、子控制器等控制节点构成的一个网络。它与部分分布式控制系统的不同在于每个子系统都具有独立控制器,不需要通过系统级控制器获取有关系统信息,如子系统的控制规律,而是将自身子系统信息与所获取的其他子系统信息相结合,完成相应的控制任务。各子控制器间直接通过数据总线交换信息,并通过发动机控制系统综合管理单元(IMU)完成子控制器的监视、管理和协调。

根据 NASA 及美国国防部的技术成熟度(TRL)定义^[8],航空发动机分布式控制系统结构研究技术成熟度如表 1 所示。由表可知,分布式控制系统结构研究技术成熟度较低,研究正处于由理论向应用研究转变阶段。

表 1 航空发动机分布式控制系统结构研究技术成熟度

Table 1 TRL of distributed control system in architecture of aero-engine

	过渡分布式控制系统	部分分布式控制系统	完全分布式控制系统
应用	已开展相关研究,预期应用于航空发动机数控系统 ^[9]	已应用于涡扇、涡轴发动机数控系统仿真研究 ^[7,9-10]	尚处于方案设计论证,预期可以应用于航空发动机数控系统及工业控制系统 ^[3]
TRL	TRL 2	TRL 2	TRL 1

1.2 分布式通讯总线技术

现代先进航空发动机的传感器、执行机构等已逾百个,传感器或执行机构工作的环境温度可从-40℃至超过2000℃^[11].考虑控制系统所需传感器和执行机构,分布式控制系统通讯总线节点数不少于32个,至少具有双冗余度,耐高温能力能达到500℃甚至更高.要达到这些指标涉及到的研究难点包括:①保证发动机实时控制的高精度、高容错数据总线通讯协议;②通讯总线软、硬件接口规范;③高温环境下的通讯技术.

美国在总线技术方面开展了多个相关研究计划.2004年,NASA马歇尔航空飞行中心(MSFC)的推进系统高效航空电子技术(PHIAT)计划针对美国军标,TTP/C(时间触发协议),TTCAN等11种现有通讯协议进行分析比较,并提出采用TTP/C实现模块化实时控制系统^[12].2007年,Behbahani等提出基于OSI(开放式系统标准)的发动机分布式控制系统,预期能够满足分布式通讯和电源的电气接口^[3].2008年,Culley等评估发动机分布式控制通讯需求,分析了分布式通讯技术中面临的数据传输实时性、容错及高温电子元器件等方面面临的挑战^[13].除此之外,

工业界开展了大量分布式控制系统所需通讯技术的研究.DECWG(发动机分布式控制工作组)主要为分布式控制系统中接口展开工业标准研究,其中IEEE1451(美国电气和电子工程师协会的1451通讯协议)为传感器提供了一个通用的智能变送接口^[14].我国在21世纪初开展基于CAN(控制器局域网)总线的发动机分布式控制系统通讯技术研究,并构建发动机分布式控制系统原型^[15-16].

虽然在发动机分布式控制通讯技术领域已开展大量研究工作,但迄今未有一种专门适用于航空发动机分布式控制系统的通讯接口与协议.本文选取一部分有可能对于航空发动机分布式控制系统通讯技术研发有参考价值的通讯协议进行成熟度分析与评价,详情如表2所示.由表可知,当前大多数工业领域中的通讯总线技术都较为成熟,在相应领域完成使用验证.受到高温电子元器件技术发展限制,航空发动机控制领域中通讯技术成熟度较低.考虑到发动机分布式控制实时性、容错等要求,TTP/C,TTCAN总线可作为其通讯总线的候选总线.

表 2 航空发动机分布式通讯技术成熟度

Table 2 TRL of distributed communication technology of aero-engine

通讯技术	类型	应用领域	生产制造水平	TRL (航空发动机)	TRL (其他)
MIL-STD-1553	为数据总线定义电气及协议特性的军用标准	航天飞机、军用飞机和船舶	有可售硬件及公开的专用软件设计工具说明书	TRL 2	TRL 9
TTP/C	Vienna 大学和 TTTech 公司研发的用于安全关键、实时分布式系统的同步容错协议	空客 380 仓压控制、M-346 和 F16 的电子控制器电路切换/互锁系统	有可售硬件及注册后可获取的专用软件设计工具说明书	TRL 2	TRL 9
FlexRay	基于 FlexRay 总线开发的高速汽车控制的确定性容错总线	车辆测试原型	只有 FlexRay 成员可以获得硬件和开发软件说明书	TRL 2	TRL 9

续表					
通讯技术	类型	应用领域	生产制造水平	TRL (航空发动机)	TRL (其他)
TTCAN	由 CAN 协议扩展的时间触发、高精度全局时间的总线标准	概念汽车/汽车原型	有可售硬件及专用软件设计工具,有公开性说明书	TRL 2	TRL 9
Fibre Channel	ANSI(美国国家标准学会)标准集合,高带宽(100 MB/s)串行通讯总线,支持多种拓扑结构、协议和传输介质	商业计算网络中的 SANs(存储局域网),现有军用电子设备的更新,联合攻击机	可售硬件,无专用设计软件,有公开性说明书	TRL 2	TRL 9
IEEE1451	用于智能传感器与执行机构的开放式、通用、网络独立的通讯接口,具有变送器电气数据定义表(TEDS)	智能传感器与执行机构网络	有可售硬件,专用软件设计工具和公开性说明书	TRL 2	TRL 9

1.3 智能元件

智能传感器和智能执行机构的应用广泛,尤其是工业领域,针对其研究较多,研究技术及结果对于发动机分布式控制系统智能传感器和智能执行机构的研制具有良好的参考价值. 20 世纪 90 年代,美国众多研究者开发了无线位移、加速度传感器等,利用微机电系统(MEMS)技术和无线传输技术,实现无线传感器的网络化^[17]. 到 20 世纪初,NASA 资助 Stennis 航天中心开展智能传感器技术研究,构建了由智能传感器、智能执行机构及其他设备构成的智能系统框架,已应用到火箭系统的台架试验中,并计划进一步应用于系统智能监控管理中^[18]. 2002 年欧洲启动为期 3 年的高效能传感器网络(EYES)计划,并获得欧洲最大的通讯方案供应商阿尔卡特信息技术中心的支

持. 美国 DARPA(国防高级研究计划局)资助了嵌入式网络软件技术(NEST)计划,为智能传感器开发提供一种开放式软硬件平台^[19]. 在其上开发的微智能传感器,如压力传感器、温度传感器等已经应用于分布式实时控制^[20]、目标跟踪、监视、定位系统等^[21-22].

我国研究者也针对发动机智能温度传感器、智能转速传感器及智能位置控制器等开展了研究^[23-25].

对与航空发动机分布式控制系统相关的智能传感器进行技术成熟度分析,见表 3. 由表可知受到高温技术限制,应用于航空发动机的智能传感器和智能执行机构研究的技术成熟度较低,而在其他领域中生产技术较为成熟,已有相关产品出售.

表 3 航空发动机智能传感器技术成熟度
Table 3 TRL of smart component of aero-engine

智能传感器		智能执行机构
应用领域	飞机、航空发动机、火箭、桥梁、高速公路、建筑物	飞机、航空发动机、汽车、工业生产
所装配系统	桥梁、高速公路及建筑物的健康监控系统,火箭监视系统	钢铁厂焦水控制系统、泵站控制系统等
元器件	智能压力传感器、光电传感器、温度传感器等	智能作动筒、智能液压马达、智能伺服电机、智能步进电机等
生产制造水平	有工业级产品可售,如 Honeywell PPT 系列智能压力传感器,STT 系列智能温度传感器,MAXIM 智能温度传感器	有工业级产品可售,如 RPMTECH 公司的 MHPQW 系列智能执行机构

续表

智能元件	智能传感器	智能执行机构
TRL(航空发动机 低温环境)	TRL 4	TRL 4
TRL (航空发动机 高温环境)	TRL 2	TRL 2
TRL(其他)	TRL 5~TRL 6	TRL 5

1.4 高温电子元器件

发动机工作环境温度范围为 $-60^{\circ}\text{C}\sim 1700^{\circ}\text{C}$,甚至更宽,超声速飞行中,压气机机匣表面温度超过 300°C ,涡轮、喷口等机匣表面温度高达 $350^{\circ}\text{C}\sim 600^{\circ}\text{C}$ ^[1,11]. 分布式控制系统子控制器、智能传感器、智能执行机构、通讯总线、电源总线中相关电子元器件都面临高温工作环境,如主动燃烧控制、主动间隙控制中子系统设计需要考虑上述部件中电子元器件耐高温性能.

分布式控制系统中,高温电子元器件按照工作温度可以划分为中温和高温. 中温电子元器件的工作温度为 $125^{\circ}\text{C}\sim 250^{\circ}\text{C}$. 20 世纪 90 年代末及 21 世纪初, Johnston 等提出使用绝缘硅(SOI)、碳化硅(SiC)和氮化镓(GaN)来实现电子元器件耐高温的方法^[26],但在高温环境中电阻、电容等元件限制了其使用^[27-29]. 美国空军研究实验室(AFRL)成立了由 14 名企业和学术界成员构成的美国高温电子委员会,启动高温电子元件(HiTEC)计划,研究并商业化基于 SOI 高温(200°C)的集成电路元件^[30]. 经过 HiTEC 计划的努力,到 21 世纪初,初步形成了基于 SOI 的微控制器、静态随机存储器(RAM)等部件的商业生产线,这些元件能够工作在高达 225°C 的环境下^[31]. NASA 开展的中温级别的 SOI 元件长期工作温度可以达到 250°C . 但必须注意的是发动机整体工作温度范围要高于 SOI 的工作范围,尤其是温度上限,因而仍需开展耐受更高温度的电子元器件研究.

高温电子元器件的工作范围为 $250^{\circ}\text{C}\sim 500^{\circ}\text{C}$. 基于 SiC 的高温晶体管技术、复杂集成电路中的多级连接结构、恶劣环境中的高性能封装和互连技术等是其主要研究内容. 基于 SiC 的场效应管在 500°C 下持续工作时间已超过 500h ^[32]. NASA 研制的基于 SiC 的放大器、晶振等芯片长期工作温度可以达到 500°C ^[33]. 这些研究成果未来可适用于航空发动机高温环境下通讯总线、电

源总线、智能节点等的硬件研制. 如 AFRL 资助的推进设备工作组(PIWG)计划中,罗-罗, Kulite 等半导体产品公司和 Wright 州立大学共同参与研制高温动态压力传感器,其中硅基封装使得传感器工作温度可达 600°C ^[34].

适用于航空发动机分布式控制系统中的高温电子元器件研究取得了良好的进展,但是迄今只有部分 SOI 投入分布式控制系统研究, SiC 元器件没有投入商业使用. 航空发动机高温电子元器件技术成熟度如表 4 所示. 由表可知,基于 SOI 的高温电子元器件和基于 SiC 的技术相较,前者已有少量商业生产线,技术更为成熟,而后者仍处于实验室研究阶段. 针对航空发动机, NASA 研究表明高温电子元器件研究技术成熟度为 TRL 2~TRL 3.

1.5 分布式电源总线

分布式电源总线是发动机分布式控制系统的生命线,它决定着系统工作可靠性和有效性. 依据航空发动机分布式控制特点,其分布式电源总线研究难点在:①电源高温电子元器件;②分布式电源拓扑结构;③高温电源设计技术.

1.4 节中所述高温电子元器件通用性研究成果可用于分布式电源总线研制,在此不赘述. 20 世纪末, Sobanski 等提出分布式电源拓扑结构可能存在 4 种候选方案,并对比了它们的优缺点^[35]. 在此基础上,有研究者分析认为采用高频、高电压的梯形交流+交流电/直流电变换(AC/DC)的方案是发动机分布式电源的不错选择^[36]. 候选的发动机分布式电源在工业领域得到广泛研究和应用,而面向发动机高温环境下的电源设计技术,如高温下电容和电磁元件的大小、电磁干扰、损失保护、基于高温元器件的电路设计方法和设备封装等都尚未开展深入研究. 因而,受到高温制约发动机分布式电源技术发展仍处于基础阶段,其技术成熟度如表 5 所示.

表 4 航空发动机高温电子元器件技术成熟度

Table 4 TRL of high-temperature electronic component of aero-engine

	SOI 部件	SiC 部件
应用领域	汽车、风洞、材料加工等	汽车、深井钻探、材料加工等
所装配系统	用于电机驱动	SiC 高温动态压力传感器装配于 Honeywell AS907
元器件	基于 SOI 的微控制器、静态 RAM、 门阵列、晶振等各种模拟元件	基于 SiC 场效应晶体管(JFET)的晶振、 计数器的逻辑电路和放大器、差动放大电路
生产制造水平	已有局部的商业生产线	处于实验室研究制造水平
TRL(航空发动机)	TRL 2~TRL 3	TRL 2~TRL 3
TRL(其他)	TRL 5~TRL 6	TRL 3~TRL 4

表 5 航空发动机分布式电源技术成熟度

Table 5 TRL of distributed power of aero-engine

	28 V DC 电源	DC 开关电源	DC 线性稳压电源	单相 AC 电源	三相 AC 电源
应用领域	航空发动机电子 控制器	汽车、工业过程 控制等	飞机、汽车、工业 控制、计算机	航天、计算机、通 讯设备等	飞机、航天、卫星、 工业控制等
元器件	传统 IC(集成 电路)元器件 (<125℃)	传统 IC 元器件 (<125℃)	传统 IC 元器件 (<125℃)	传统 IC 元器件 (<125℃)	传统 IC 元器件 (<125℃)
生产制造水平	有工业级产品 未有高温下产品	有工业级产品 未有高温下产品	有工业级产品 未有高温下产品	有工业级产品 未有高温下产品	有工业级产品 未有高温下产品
TRL	TRL 1~TRL 2	TRL 1~TRL 2	TRL 1~TRL 2	TRL 1~TRL 2	TRL 1~TRL 2

2 航空发动机分布式控制系统方案

考虑航空发动机分布式控制系统设计的复杂性和渐进性,本文以某涡扇发动机为对象,分别提出过渡分布式控制系统方案和部分分布式控制系统方案。

2.1 过渡分布式控制系统方案

考虑某涡扇发动机控制功能包括起动状态、慢车状态、节流状态、中间状态及以上、加减速过程、开关加力过程所涉及的转速控制、压比控制、燃油小闭环控制、限制保护控制(含转速、压气机压力、涡轮后温度等)、导叶角度控制、防喘与消喘控制、防冰控制、加力接通与切断控制、加力燃油控制等。上述控制功能涉及的传感器信号有油门杆角度 α_{pla} 、飞行高度 H 、马赫数 Ma 、高低压转子转速 n_1 和 n_2 、压气机出口压力 p_3 、涡轮后压力 p_6 、尾喷口面积 A_8 、主燃油流量 W_f 、加力燃油流量 W_{fa} 、风扇导叶角度 α_1 、压气机导叶角度 α_2 、涡轮后温度 T_6 、点火信号 I_{ig} 等。涉及执行机构信号有燃油量指令 $W_{f,com}$ 、加力燃油量指令 $W_{fa,com}$ 、尾

喷口面积指令 $A_{8,com}$ 、导叶指令 $\alpha_{1,com}$ 和 $\alpha_{2,com}$ 等。 α_{pla} 、 H 、 Ma 信号由飞行控制系统经总线传输给电子控制器。对于其他信号,考虑减少线束及智能传感器中信号调理电路数量,将空间位置分布较为接近的传感器和执行机构合并为一个智能节点。当然随着通用性要求的提高,未来智能传感器和执行机构将更具独立性。考虑发动机控制实时性要求,采用 TTCAN 总线实现电子控制器与智能节点间的数据交换。过渡分布式控制系统结构如图 6 所示,ARINC 为美国航空电子工程委员会提出的数字式信息传输系统。由图可知,该过渡分布式控制系统电子控制器与智能节点之间仍然是点到点连接。

2.2 部分分布式控制系统方案

根据某涡扇发动机结构,将发动机控制系统分为 5 个控制子系统,即风扇控制子系统、压气机控制子系统、燃油控制子系统、涡轮及加力燃烧控制子系统和尾喷口控制子系统。它们与系统级控制器和预测健康管理单元一同构成某涡扇发动机部分分布式控制系统,如图 7 所示。参考该发动机

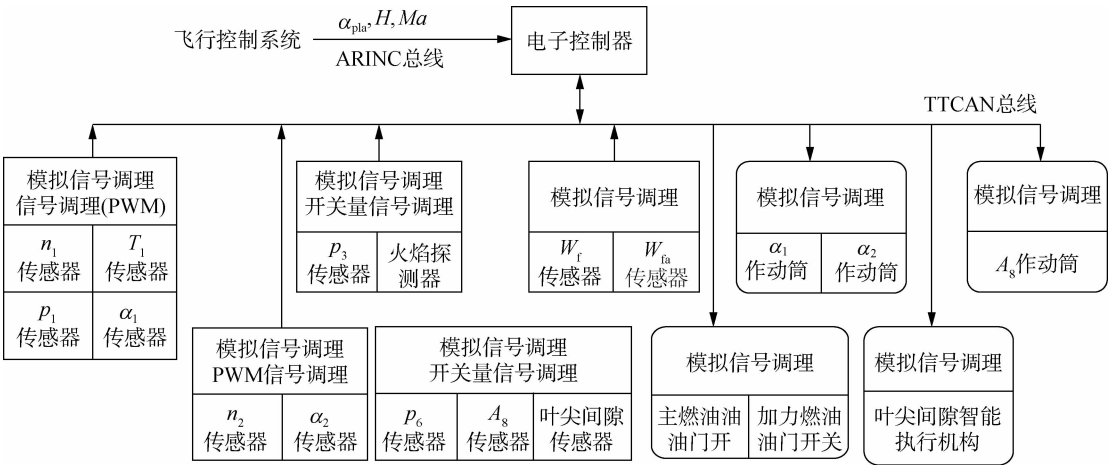


图 6 涡扇发动机过渡分布式控制系统
Fig. 6 Transitional distributed control system for turbofan

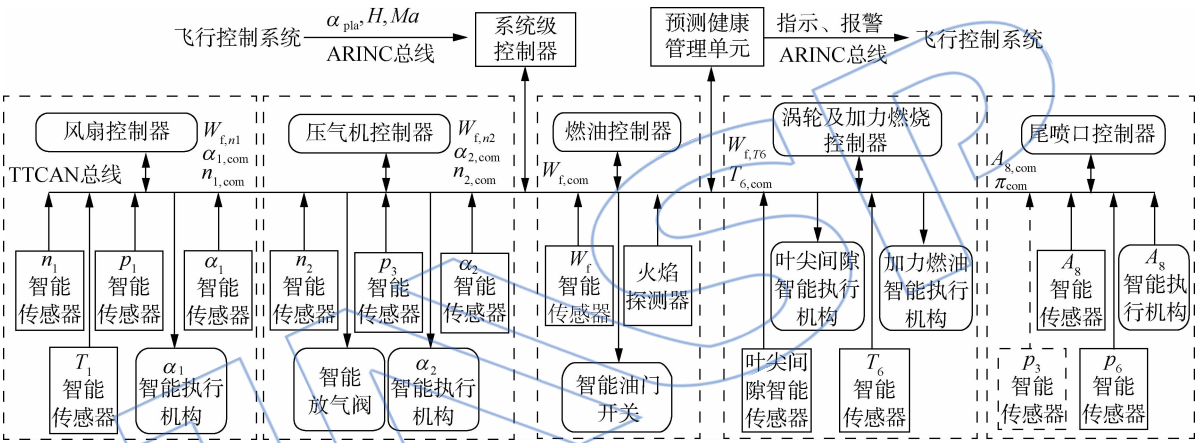


图 7 涡扇发动机部分分布式控制系统
Fig. 7 Partially distributed control system for turbofan

控制计划,该部分分布式控制系统中风扇控制器实现 n_1 控制(含 n_1 限制保护控制)、 α_1 控制等. 压气机控制器实现 n_2 控制(含起动控制、慢车状态控制、节流状态控制、加减速控制、 n_2 限制保护控制、停车控制)、 α_2 控制、超压限制控制、防喘及消喘控制等. 燃油控制器实现燃油 W_f 小闭环控制、点火控制等. 涡轮及加力燃烧控制器实现 T_6 限制控制、叶尖间隙主动控制、加力接通和切断控制、加力燃油 W_{fa} 小闭环控制等. 尾喷口控制器实现慢车、节流状态下 A_8 开环控制、中间状态及以上的压比 π 控制等. 上述控制功能所涉及智能传感器和智能执行机构与相应子控制器之间通过总线进行信息交互,数据总线采用 TTCAN 总线.

以燃油控制为例,系统级控制器根据控制计划通过 TTCAN 总线将指令信号 $n_{1,com}$ 、 $n_{2,com}$ 和 $T_{6,com}$ 发送给相应子控制器. 子控制器计算得到 $W_{f,n1}$ 、 $W_{f,n2}$ 和 $W_{f,T6}$ 并发送给系统级控制器,其根据所得燃油数据及控制计划得到燃油流量指令

$W_{f,com}$ 传输给燃油控制器,由其实现原集中式控制中的燃油小闭环控制. 又如,压气机控制器和涡轮控制器都需要 p_3 信号实现限压保护控制和压比控制,因而 p_3 通过总线以广播形式发送给它们. 综上可知,各个子控制器与电子控制器以及它们之间存在信息的交互,形成网络.

3 结 论

本文分析航空发动机分布式控制系统在系统结构、智能元件、通讯总线技术、高温元器件及电源总线技术方面的发展现状,分析了各项技术成熟度,得到以下结论:

受到分布式控制系统具体结构划分、实时高可靠通讯总线技术、高温电子元器件技术的制约,分布式控制系统研究仍处于基础研究阶段. TTP/C、TTCAN 总线可作为其候选通讯总线,且环形总线拓扑结构减少质量效果最优. 迄今未有针对发动机分布式控制的高温智能传感器与智

能执行机构。基于 SiC 的高温电子元器件将是智能元件、分布式总线及电源中耐高温硬件的基础。高频、高电压的梯形交流 + AC/DC 的电源方案可作为发动机分布式电源的一个选择。

考虑到研发风险、成本及技术成熟度,我国发动机分布式控制系统研究中可优先考虑过渡分布式控制系统研究,在此基础上进一步实现发动机部分分布式控制系统的工程应用。因此,本文针对某涡扇发动机提出过渡分布式控制和部分分布式控制两种方案,以期为后续研究提供有益的参考。

参考文献:

- [1] Lewis T J. Distributed architectures for advanced engine control systems[R]. AGARD-CP-572, 1996.
- [2] Culley D, Thomas R, Saus J. Concepts for distributed engine control[R]. NASA TM-2007-214994, 2007.
- [3] Behbahani A, Culley D, Smith B, et al. Status, vision, and challenge of an intelligent distributed engine control architecture(postprint)[R]. SAE 2007-01-3859, 2007.
- [4] 黄春峰,刘志友. 航空智能发动机的研究进展[J]. 航空制造技术, 2009(19): 32-37.
- [5] Ballal D R, Zelina J. Progress in aero engine technology (1939-2003)[R]. AIAA-2003-4412, 2003.
- [6] Thompson H A, Chipperfield A J, Fleming P J, et al. Distributed aero-engine control systems architecture selection using multi-objective optimization[J]. Control Engineering Practice, 1999, 7(5): 655-664.
- [7] Pakmehr M, Mounier M, Fitzgerald N, et al. Distributed control of turbofan engines[R]. AIAA 2009-553, 2009.
- [8] Conrow E H. Estimating technology readiness level coefficients[R]. AIAA 2009-6727, 2009.
- [9] Culley D, Sanjay G. Distributed control architecture for gas turbine engine[R]. NASA-A 854515, 2009.
- [10] Culley D, Paluszewski P J, Storey W, et al. The case for distributed engine control in turbo-shaft engine systems [R]. NASA/TM-2009-215654, 2009.
- [11] Culley D, Garg S, Hiller S J, et al. More intelligent gas turbine engines[R]. NOTO Science and Technology Organization, RTO-TR-AVT-128, 2009.
- [12] Gwaltney D A, Briscoe J M. Comparison of communication architectures for spacecraft modular avionics systems[R]. NASA TM-2006-214431, 2006.
- [13] Culley D, Behbahani A. Communication needs assessment for distributed turbine engine control [R]. NASA-TM-2008-215419, 2008.
- [14] Lee K C, Kim M H, Lee S, et al. IEEE 1451 based smart module for in-vehicle networking systems of intelligent vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(6): 1150-1158.
- [15] 李光耀,郭迎清,王海泉. 基于 CAN 总线的航空发动机分布式控制系统通讯研究[J]. 测控技术, 2009, 28(1): 62-69.
- [16] 何鹤环,郭迎清. 基于 DSP 和 CAN 的航空发动机分布式控制系统设计[J]. 航空计算技术, 2006, 36(1): 30-32.
- [17] HE Guhuan, GUO Yingqin. Design of distributed control system for aero-engines based on DSP and CAN[J]. Aeronautical Computing Technique, 2006, 36(1): 30-32. (in Chinese)
- [18] Spencer B F J, Ruiz-Sandoval M E, Kurata N. Smart sensing technology: opportunities and challenges[J]. Journal of Structural Control and Health Monitoring, 2004, 11(4): 349-368.
- [19] Mahajan A, Chitikeshi S, Bandhil P, et al. Intelligent sensors: an integrated systems approach [R]. NASA-20060018297, 2006.
- [20] Havinga P, Etalle S, Karl H, et al. EYES: energy efficient sensor networks[R]. Venezia, Italy: 4th IFIP International Conference on Personal Wireless Communications (PWC), 2003.
- [21] Stankovic J, HE Tian, Abdelzaher T, et al. Feedback control scheduling in distributed real-time systems[C]// Proceedings of the 22nd IEEE Real-Time Systems Symposium. London, UK: IEEE, 2001: 59-70.
- [22] WANG Qixin, CHEN Weipeng, ZHENG Rong, et al. Acoustic target tracking using tiny wireless sensor devices [R]. Palo Alto, US: 2nd International Conference on Information Processing in Sensor Networks, 2003.
- [23] HE Tian, Krishnamurthy S, Stankovic J, et al. Energy-efficient surveillance system using wireless sensor networks [R]. Boston, US: 2nd International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, 2004.
- [24] 徐科,黄金泉,张天宏,等. 基于 DSP 的航空发动机转速传感器设计[J]. 推进技术, 2004, 25(2): 180-186.
- [25] XU Ke, HUANG Jinquan, ZHANG Tianhong, et al. A speed sensor design based on DSP for aeroengine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2004, 25(2): 180-186. (in Chinese)
- [26] 徐科,黄金泉,崔勇. 航空发动机分布式智能位置控制器 [J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(10): 1060-1066.
- [27] XU Ke, HUANG Jinquan, CUI Yong. Aeroengine distributed smart position actuator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(10): 1060-1066. (in Chinese)
- [28] 崔勇,黄金泉. 航空发动机双余度智能位置控制器设计 [J]. 推进技术, 2005, 26(6): 535-539.
- [29] CUI Yong, HUANG Jinquan. Dual-redundancy smart position controller design for aeroengine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(6): 535-539. (in Chinese)
- [30] Johnston C, Crossley A, Sharp R. The possibilities for high temperature electronics in combustion monitoring [R]. London, UK: Advanced Sensors and Instrumentation Systems for Combustion Processes, 2000.

- [27] Grzybowski R R. High temperature passive components for commercial and military applications[R]. Honolulu, US; 32nd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1997.
- [28] Grzybowski R R. Long term behavior of passive components for high temperature applications: an update[R]. Albuquerque, US; 4th International High Temperature Electronics Conference, 1998.
- [29] Grzybowski R R. Advances in electronic packaging technologies to temperatures as high as 500 °C[R]. San Diego, US; High-Temperature Electronic Materials, Devices and Sensors Conference, 1998.
- [30] Williams M C, Strakey J P, Surdoval W A. The U. S. department of energy, office of fossil energy stationary fuel cell program[J]. Journal of Power Sources, 2004, 143(1): 191-196.
- [31] Ohme B, Larson M, Riekels J, et al. Progress update on Honeywell's deep trek high temperature electronics project [R]. Santa Fe, US; High Temperature Electronics Conference, 2006.
- [32] Tihanyi J, Mitlenhner H, Bartsch W. Silicon carbide junction field effect transistor; US, 6365919 B1 [P]. 2002-04-02.
- [33] Hunter G W, Neudeck P G, Beheim G. M. An overview of high-temperature electronics and sensor development at NASA Glenn Research Center[R]. Journal of Turbomachinery, 2003, 125(4): 658-664.
- [34] Ned A A, Kurtz A Z, Beheim G. Improved SiC leadless pressure sensors for high temperature, low and high pressure applications[EB/OL]. [2012-01-01]. [Http://www.kulite.co.uk/docs/technical_papers/ImprovedSiCLeadless.pdf](http://www.kulite.co.uk/docs/technical_papers/ImprovedSiCLeadless.pdf).
- [35] Sobanski K, Martin K, Greenway B, et al. Gas turbine distributed control systems: power supply and communication data bus design considerations[R]. ASME Paper 98-GT-41, 1998.
- [36] 黄金泉, 徐科. 航空发动机分布式控制系统结构分析[J]. 航空动力学报, 2003, 18(5): 698-704.
HUANG Jinquan, XU Ke. Distributed control systems for aeroengines: a survey [J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(5): 698-704. (in Chinese)