

文章编号: 1000-8055(2003) 05-0698-07

航空发动机分布式控制系统结构分析

黄金泉, 徐 科

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 对近年来航空发动机分布式控制系统的研究作了简要分析。重点分析了航空发动机分布式控制系统的结构、功能和优点; 比较了几种分布式数据总线和电源总线的优缺点, 并指出了适用于航空发动机分布式控制系统的数据总线和电源总线选择; 分析了发动机运行环境对开发分布式控制系统的影响, 并提出了可能的解决方案; 指出了开展航空发动机分布式控制系统研究的重要性和未来的发展方向。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 航空发动机; 分布式控制系统; 数据总线; 电源总线

中图分类号: V233. 7

文献标识码: A

Distributed Control Systems for Aeroengines: A Survey

HUANG Jin-quan, XU Ke

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: With the development of full authority digital electronic control for aeroengines, distributed control will become an important and promising direction of aeroengine control. The research on distributed control systems for aeroengines in recent years is reviewed. The structure, functions, advantages of aeroengine distributed control systems are emphatically expounded. The advantages and disadvantages of data buses and power buses for aeroengine distributed control systems are compared, and the choices of data buses and power buses are proposed. Influences of the aeroengine running environments on developing aeroengine distributed control systems are analyzed. The importance of developing aeroengine distributed control systems and the future development trend are discussed.

Key words: aerospace propulsion system; aeroengines; distributed control systems; data buses; power buses

1 引 言

在过去的几十年内, 国外航空发动机控制系统完成了从机械液压控制到全权限数字电子控制(FADEC)的转变^[1, 2], 国内FADEC的研制也取得了突破性进展。随着飞机性能的不断提高, 对航空发动机的性能也提出更高的要求, 推进系统的控制不仅局限于发动机控制, 还要对进气道和矢

量喷管进行控制^[3, 4]。控制功能的增加和控制变量的不断增多, 使控制系统越来越复杂, 从而使控制系统的研制周期加大, 研制和维护成本增加, 可靠性降低。目前, 航空发动机控制正在向小型化、综合化、高性能、高可靠性方向发展^[5], 一个很有前途的新型控制系统就是分布式控制系统(图1)。美国军方、大型发动机公司和高校已开展这方面的研究, 资料显示, 2005年左右分布式控制系统

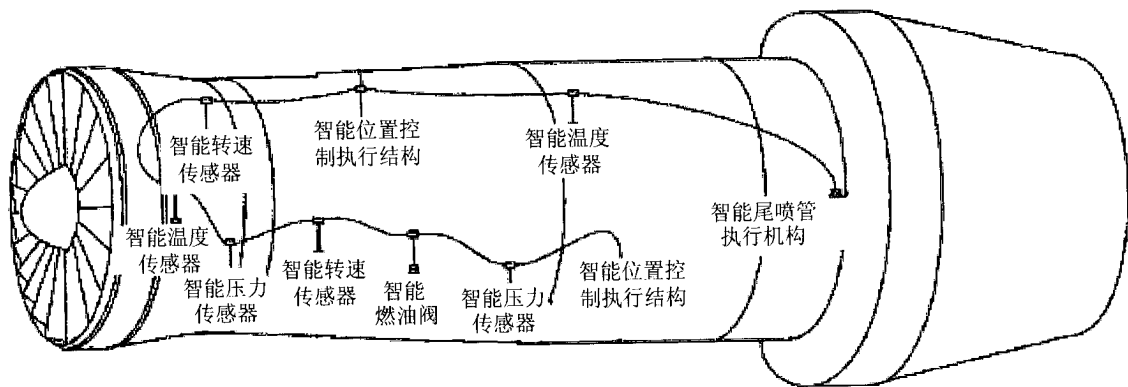


图1 航空发动机分布式控制系统的一般布局

Fig. 1 General overall arrangement of aeroengines distributed control systems

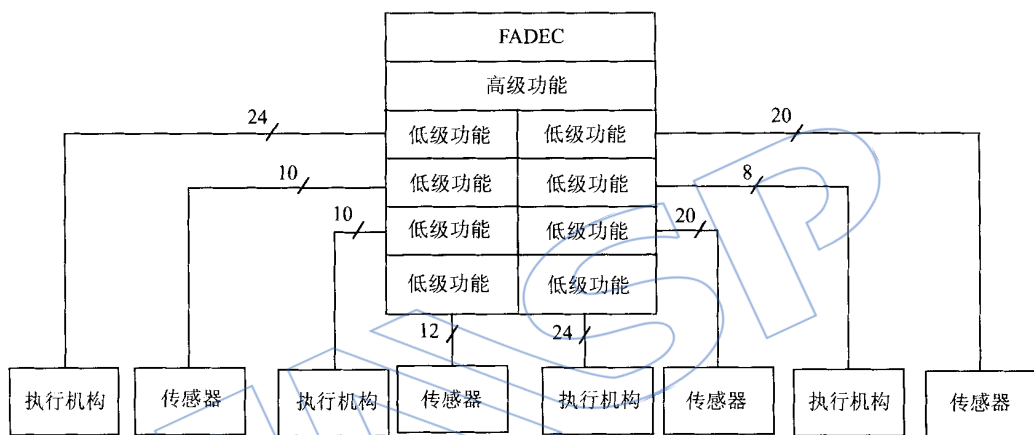


图2 典型的集中式控制系统结构图

Fig. 2 Typical structure of centralized control systems

将首先应用于先进的大型民用发动机,稍后将应用到先进的军用发动机。分布式控制成为目前及今后航空发动机控制的重要发展方向^[6,7]。

2 分布式控制系统的结构和功能^[8]

目前大多数航空发动机控制系统采用集中式结构(图2)。其中,FADEC与发动机现场的执行机构、传感器等输入、输出装置相连,现场装置没有处理控制的能力,通过连线与FADEC传递信号,由FADEC来完成所有的处理控制功能(包括低级功能和高级功能),如信号采集与处理、控制算法运算、控制信号输出、与飞机接口、参数显示、状态监控、故障诊断、安全保护等。

分布式控制系统把低级处理功能从FADEC下放到现场的执行机构和传感器中,FADEC仅仅完成高级功能,在执行机构和传感器中装入微处理器,使之成为智能执行机构和智能传感器(统称为智能装置或灵巧系统),并通过数据总线与

FADEC通讯(图3)。

智能传感器将测量到的信号转化为数字信号提供给FADEC。智能传感器实现的低级功能包括:激发、解调/解码、冗余管理、与数据总线接口。用智能传感器代替FADEC实现激发、解调/解码功能减轻了电缆的重量。一些简单功能,如滤波、A/D、时间平均、测量、偏移、线性化、温度补偿等,可以由现场控制器完成。智能传感器以固定的速率通过数据总线向FADEC发送信号和状态信息。

智能执行机构从FADEC接受位置指令,对执行机构进行闭环控制。智能执行机构实现的低级功能包括:闭环反馈、冗余管理、操作模式控制、内测试、与数据总线接口。FADEC通过数据总线以固定的速率给执行机构发位置指令。

FADEC只执行高级功能,如控制计划、总线仲裁、命令发送等。FADEC通过冗余数据总线与智能装置相连,智能装置的供电通过冗余分布式

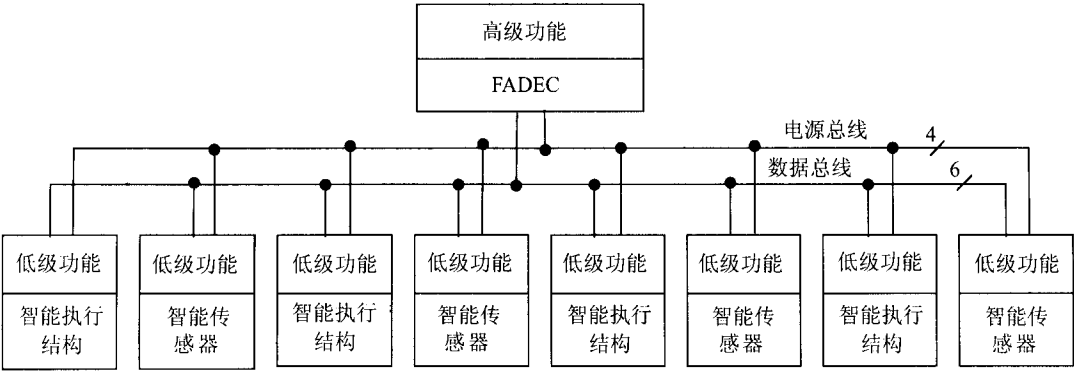


图3 典型的分布式控制系统结构图

Fig. 3 Typical structure of distributed control systems

电源总线提供。智能装置的操作模式由 FADEC 决定, 但由装置自己来管理。在控制系统的开始阶段, 智能装置的电源和操作模式的改变都和 FADEC 保持协调, 每个智能装置定时地向 FADEC 报告它的操作模式。

3 分布式控制系统的优点

3.1 减轻控制系统的重量, 特别是电缆部分

在集中式控制系统中, 双余度的发动机控制系统包含10~20个执行机构和10~30个传感器, 其中 FADEC 控制电缆由几百条线组成。由于连线很长, 信号线、绝缘层、屏蔽层和接头大大增加了控制系统的重量。一般整个控制系统的重量占发动机总重量的15%~20%。在分布式控制系统中, 用电源和数据总线代替现有的集中连接可以减轻系统的重量。在分布式控制系统中, FADEC 与智能装置的通讯采用冗余数据总线和冗余电源总线来代替集中式中点到点的连线, 可以大大减少连线的数量、重量和接口数。

3.2 缩短研制周期和降低设计费用

集中式控制中由于传感器和执行机构各不相同, 其接口和软件也不相同, 所设计的硬件和软件专用性很强。当传感器或执行机构改型或增加时会影响到整个系统的设计。集中式控制的任何改变都会影响到整个控制器的结构, 即使部分软件改变, 整个软件也需要重新测试, 且其测试费用昂贵。分布式控制采用通用模式和标准接口, 从而缩短了开发周期, 降低了研制成本。智能装置的控制单元由多年研究经验的开发商提供, 大量的投资用于研究如何优化系统的可靠性、尺寸、重量和费用等。在分布式控制系统中, 开发商可以通过重新使用或修改原有的设计得到新的智能装置来减少

费用, 与集中式控制不同, 由于分布式控制系统设计周期短, 开发商可以降低费用。

3.3 减少故障, 提高可靠性和可维护性

分布式控制系统的总线连线相对于集中式系统的点到点连线不易损坏, 从而减少了故障, 提高了可靠性。智能装置能够实现局部反馈控制、内测试和诊断, 能隔离自发故障, 是一种在线可替换单元(LRU), 这将大大提高可维护性, 降低维护费用。

3.4 适应新技术的变化

提供通用模板和标准接口, 可以适应传感器和执行机构的发展变化, 使 FADEC 能够适应新的发动机类型和部件的变化; 智能装置的更换具有适应性, 增加了新技术引进的机会, 可以最大限度的再利用和适应新的系统。

3.5 采用分层结构

分布式控制系统的另一大优点就是采用分层结构, FADEC 只实现高级功能, 智能传感器和智能执行机构来实现低级功能。另外, FADEC 从而有能力实现复杂的控制方法, 提高发动机性能。分层结构相对简单且具有共性, 功能分开可以大大提高系统的工作效率, 降低故障, 提高可靠性。分布式控制系统的种种优点使得它必然会代替现有的 FADEC 系统。

4 数据总线

在分布式控制系统中, FADEC 到远程节点的

通讯应当确保可靠性和发动机瞬态性能。数据总线必须具有鲁棒性和可靠性, 数据总线的布局应当确保在节点掉电和节点故障的情况下不会影响总线控制器和其他节点之间的通讯, 总线上的

传送错误率必须非常低,同时还必须考虑节点的电源需求和物理体积以及总线的费用。目前已经使用的数据总线包括商业飞机的 ARINC 总线和军用飞机的 MIL-STD-1553 总线。下面是几种可能的分布式控制系统的总线布局。

4.1 点到点连接

点到点连接实际上不是一个总线,但它相对于集中式系统仍然有很多改进。虽然每个远程节点和其他节点一样执行同样的功能,但是每个节点和 FADEC 的通讯是通过一条点到点的专用线路进行的。这种布局使节点间不会相互影响,有很高的隔离错误能力。驱动器非常简单,仅需要较小的驱动能力,这可以降低电源的要求。远程节点的接口非常简单,可以减少系统尺寸和费用,缺点是导线数目很多。

4.2 环形总线

环形总线通过一个环形结构连接每个节点,每个节点都需要给下一个节点传递总线上的信息。输出驱动器是单负载的,结构简单。这种布局很容易受错误影响,一个错误节点也许会使整个总线瘫痪。商用环形总线用继电器来解决这个问题,但是在高温振动环境下则不行。

4.3 线形总线

线形总线布局的导线数目是最少的,但需要 FADEC 来控制总线通讯。相对于点到点而言,这个布局要复杂一些,需要更加复杂的收/发器。驱动器在未工作时呈高阻态,并能驱动很多节点。总线设计应考虑避免错误和节点掉电使整个总线瘫痪。

下面比较一下可能用于分布式控制系统的总线总线的优点^[9~13]。

4.3.1 MIL-STD-1553^[10]

MIL-STD-1553 是使用变压器耦合方式来匹配阻抗和隔离错误的线形总线,需要很高的驱动电流,电路的体积大。MIL-STD-1553 的费用非常高,协议集成电路和收发器可以不打搅现场微处理器而自动处理总线信息。MIL-STD-1553 支持最大节点数目较少,最多 31 个,对于今后日益复杂的控制系统,这个数目可能少了点。MIL-STD-1553 的数据传输率是 1 M/S,相对较低。MIL-STD-1553 的主要优势在于它是一个目前已经应用的工业标准,它采用标准接口,绝缘硅(SOI)的应用使得它能够适应发动机内部恶劣的高温环境,相对而言较为可靠。

4.3.2 Field bus

Field bus 是一个国际标准,可以被传感器和执行机构的制造商支持,但是这个标准目前尚未完全建立起来。Field bus 的一个主要缺点是它的协议比较复杂,需要典型的 16 位信息传送。半导体的制造商也开始着手生产适用于 Field bus 的高温(200℃)电子元件,使得 Field bus 可能适应于发动机的高温环境。Field bus 的一个显著优点就是节点非常多,多到 65536 个。Field bus 的数据率是 2.5 M/S,其费用较低。

4.3.3 CAN^[11,12]

CAN 是在汽车工业中发展起来的总线。在汽车应用中,CAN 总线用来连接发动机控制单元、传感器、刹车系统等。其主要问题是 CAN 总线还没有在航空上应用过,而且 CAN 需要特殊的收发器,这种收发器目前只能工作在 125℃,还不能适应航空发动机 200℃ 的高温。随着高温电子技术的发展,这个问题有望解决。这个总线有很多潜在的优点,能够降低系统费用。CAN 所能携带的节点数是 211 或 229 个,数据传输率是 1 M/S。

尽管 MIL-STD-1553 面临着可靠性和容错等问题,而且费用、体积、功耗都很高,但它是目前唯一能够工作在 200℃ 温度下的总线标准。即使是将来,任何一个能够工作在 200℃ 温度下的芯片都是比较贵的。但是,尺寸、体积、电源电流等问题可以用更加合适的总线来解决。Field bus 和 CAN 总线可能工作在高温下,但要等到它们在工业中得到广泛应用时,其费用才会比较合理。

数据总线还有 MIL-STD-1773, ARINC429, ARINC629, GE custom 等。MIL-STD-1773 使用了光电内部连接,但将来适用于 200℃ 温度的光电接口是比较困难的。ARINC429 因为硬件原因造成延时,从 FADEC 发送 16 位指令到电子接口单元(EIU)的时间以及在 EIU 上运行 16 位加法的时间长达 674 Ls,大于要求的 188 Ls。ARINC629 不能及时响应命令。GE custom 布局对于发动机控制而言是最优的,但目前仅处于实验室阶段,而且也不太可能发展成为一个标准。

综上所述,考虑分布式控制系统的尺寸、效率、可靠性等因素,应当采用线形总线。在线形总线中,主要考虑是 3 种总线: MIL-STD-1553, Field bus 和 CAN。这 3 种总线各有优缺点,从传输率、芯片集成度、可靠性、高温电子器件的发展前景来看,Field bus 和 CAN 是两个很有发展前途的总

线。

5 分布式电源

在高温环境下,分布式电源设计是一个技术难题。那些工作在传统温度下的方法不再适用于高于 150°C 的温度环境下。例如:在传统的温度下,使用高频率来减小电容的体积,而高温引起的磁特性的变化会削弱高频率带来的好处。因此,电容器的体积和磁特性的变化是高温电源设计的关键问题。转化频率的选择应当充分考虑滤波电容的体积和高温下磁特性的变化。与集中式控制一样,电源的另一个问题是电磁干扰(EMI)和瞬态保护。

从FADEC到远程智能装置的电源分布有三种方式:

- (1)交流总线+ AC/DC;
- (2)直流总线+ DC/DC;
- (3)集中式+ DC/DC。

考虑到第三种方案电源电缆重量未减轻,可以不予考虑。主要考虑前两种方案。分布式控制系统各种供电电源各有优、缺点^[13,14]。

5.1 DC开关电源

采用FADEC现有的28VDC电源向远程终端供电,每个终端节点都有一个DC开关电源。节点电源把FADEC的28VDC转换为控制器上模拟和数字电路的DC电压($\pm 5\text{ V}$, $\pm 12\text{ V}$)。这个方案对现有的FADEC只有很小的改动,电源使用效率高。不过由于大电容、磁特性和电磁干扰,使它的花费和体积较大。

5.2 DC线性稳压电源

该方案简化了远程终端的电源设计。由于线路损失和稳压器的低效率,FADEC需要增加额外的DC/DC转换器。FADEC为每个节点提供一个单极电压和一个双极电压。节点上的三个稳压器输出三个电压。从高温的观点来看,该方案的优点是简单、波段宽、无电磁干扰。但电源使用效率低,需要大型交流发电机和FADEC稳压输出。

5.3 单相方波AC

采用单相交流电源供电,FADEC需要一个DC/AC的转换器。远程节点的电源设计需要整流、滤波和稳压。从FADEC到远程终端需要三根线。假如驱动器是真正的桥式结构,那么三根线可以减少到两根线。远程终端电源可以通过一个全波整流来减少滤波电容的数目。为防止线路损失

和温度带来的部件变化,每一个节点仍需要稳压器、大型电容和磁铁,要考虑谐波和电磁干扰,采用梯形波形以减少电磁干扰。

5.4 单相正弦波AC

用单相正弦波来代替单相方波会减少谐波,但增加了FADEC设计的复杂性,而且在每个远程终端上需要更多的滤波电容,增加了远程终端电源设计的复杂性。

5.5 三相正弦波AC

采用三相正弦波AC来供电,需要修改FADEC的电源设计以提供三个独立的DC/AC转换器和一个时基。通过锁相技术,PWM把DC电压转换为三相正弦波。通过滤波去除由电压转换引起的高频谐波。从FADEC到远程终端一般需要四根线。每个远程终端需要一个三相转换器、整流器和稳压器。该方案的复杂性对减少费用和减轻重量无益。

DC总线可以是28 V或270 V,AC总线可以是115 V/400 Hz。这三种电压都可以由MIL-STD-704D提供,都能够使用在军用飞机上,270 V的电压将用在下一代军用飞机上。但这三种电压都不能很好的应用于分布式控制系统。100 kHz/峰值电压100 V的交流电将是一个很好的选择,相对于DC总线而言:每一个EIU仅仅需要一个复绕组的变压器,部件数目少,从而可靠性高,重量轻;AC总线比DC总线更稳定;每个EIU仅仅需要简单的半导体,比DC更适应高温;高频使变压器更小;高电压使电缆上的电流损失达到最小。

交流总线的缺点是:由于AC/DC转换器的效率比DC/DC转换器低,因此电源分布的效率比直流总线低。整个交流总线的效率预计可以达到68%,而DC/DC转换器的效率却可以达到86%。

综上所述,DC电源和AC电源各有优缺点,直流总线+ DC/DC和交流总线+ AC/DC也是各有千秋,设计的时候可以根据具体情况具体分析。如果综合考虑的话,采用高频率,高电压的梯形交流+ AC/DC到是一个很不错的方案。

6 发动机运行环境对开发分布式控制系统的影响

发动机分布式控制系统的节点必须工作在 -55°C 到 250°C 的环境中,一个减少温度对嵌入式电

子元件影响的可行方法是利用发动机燃油作为冷却剂。利用燃油冷却, 电子元件可以工作在 -55°C 到 130°C 的环境中, 半导体器件的连接部分温度达到 150°C 。即使在这样一个温度环境下, 目前还没有一个模拟电子元件能够适应, 所以必须使用专用集成电路。而且油冷需要冷却管道、冷却泵和热交换器, 从而增加系统的重量和体积, 因此油冷法对于分布式控制系统不适用。

硅具有非常好的高温性能, 能够稳定工作在 200°C 以上的温度, 而且低电源的硅设备已经被广泛应用在各个领域^[15]。温度在 200°C 左右时, 目前主要采用绝缘硅(SOI)技术; 当温度更高时, 有3种主要的解决办法: 碳化硅(SiC), GaN, 金刚石。后两种尽管有很出色的高温性能, 但还不成熟, 所以目前看好的主要是 SiC 技术。

绝缘硅技术是一种高温电子技术, 它通过使用厚氧化层和绝缘体来阻止泄漏, 可以使集成电路工作在 300°C 。在这个温度下, 必须采用新的方法来确保电路能正常工作, 通过增加电路中的交叉部分和减少电流密度来防止电子漂移的方法使集成电路适应高温环境。但是, 在这个温度下, 器件的封装和内部连接是很重要的问题, 高温会导致内部金属间的故障。因此, 从应用的角度出发, SOI 器件应被限制在 230°C 的连接温度下。

发动机的内部振动也是一个不可忽略的因素, 尤其当把控制器下放到传感器和执行机构中, 这个问题显得更为突出。在选择智能装置微处理器控制芯片的时候要注意它的抗振性能。

发动机运行环境对智能装置微控制器的体积也提出了新的要求, 它的体积要小到能够满足目前的紧密封装。使用目前的 SOI 技术, 一个单通道的执行机构控制器需要 600 cm^3 的体积。目前普遍认为, 为了适应将来分布式控制的需要, 单通道微控制器的体积应当限制在 120 cm^3 以内。

大量的 SOI 部件已经或即将用于分布式控制系统, 它能够工作在需要的温度下。Honeywell 公司可以提供多种高温电子产品。数字器件有: 微处理器 HT83C51、SRAM HT6256、门阵列、晶振, 模拟器件: 运放、模拟开关、多路转换器、5V 参考电压、11 位 A/D、功率器件: N 通道 MOSFET、稳压器。通过改进将能在高温下更加可靠, 体积也更小。由于其较低的产量和较小的需求量, 导致目前 SOI 器件非常昂贵。不过随着 SOI 器件在工业生产、汽车、航空航天、石油勘探等领域的大量应用, 其需求量逐渐增加, 竞争市场开始形成, SOI 的价

格会越来越合理。

从上面我们可以看到, 高温电子技术的发展已经使航空发动机分布式控制系统的应用成为可能。

7 展 望

大概有5种可能的电源方案, 2~4种数据总线可供选择, 因此造成分布式控制系统有十几种可能的方案存在。目前市场对于航空发动机分布式控制系统的支持还很有限, 由于费用较高, 预计每年全球航空发动机的市场需求不超过2万套。在目前的工业水平下, 设计和发展一个分布式的远程终端系统大概要花费1千万到1千5百万美元。为了获得比现有的集中式控制系统更多的好处, 发动机分布式控制系统中每个节点大概要花费1千美元。为了发展分布式控制系统, 必须加速其在整个工业领域的应用, 建立起一个完全的国际标准。

将来分布式控制系统的影响和接受程度主要取决于航空工业解决可靠性和重量问题的能力以及标准的建立。费用、市场时间、尺寸和重量驱动着系统标准的建立。分布式控制系统中, 电源和数据总线的标准接口显得尤为重要。电源和数据总线的选择应当被限制在有限的几个方案中, 以降低研制费用。智能装置的设计也是分布式控制系统的关键技术。

相对于集中式控制来说, 航空发动机分布式控制系统无论从控制结构、控制方法和控制系统的实现等方面都有本质的不同, 系统的重量、性能和可靠性将大大提高, 有很多问题值得研究。国外研究表明, 分布式控制系统取代集中式控制系统的收益不亚于全权限数字电子控制取代机械液压控制的收益。所以我们应该早做研究, 瞄准国外的先进技术, 缩短与国外的差距。

参考文献:

- [1] Sisson, Patterson B Faymon, David K. Digital Control Brings Large Turbofan Benefits to the Regional Jetliner Turbofan Market [J]. American Society of Mechanical Engineers (Paper), 1994, 6: 13- 16.
- [2] Carlson R J, West P M. Azouz D E. Digital Control System Development for an Intercooled Recuperated Gas Turbine[J]. American Society of Mechanical Engineers (Paper), 1993, 5: 24- 27.
- [3] Gridley, Marvin C. Walker, Steven H. Inlet and Nozzle Technology for 21st Century Fighter Aircraft[J]. American Society of Mechanical Engineers (Paper), 1996, 6: 10- 13.

- [4] Egorov I N, Kreitin G V. Optimum Control of Variable Components in Aircraft Gas Turbine Engines under Non-Stationary Flow Disturbances at the Inlet [J]. American Society of Mechanical Engineers (Paper), 1994, 6: 13- 16.
- [5] Balakrishnan S R. Evolution of Control Systems for Aircraft Gas Turbine Engines under Development [J]. Journal of the Aeronautical Society of India, 1996, 48(1): 96
- [6] 孙健国. 面向21世纪航空动力控制展望[J]. 航空动力学报, 2001, 16(2): 97- 102.
- [7] 方昌德. 多(全)电发动机[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2002, 15(2): 54- 58.
- [8] Schley W R. Distributed Flight Control and Propulsion Control Implementation Issues and Lessons Learned[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, January, 1999, 121: 96- 101.
- [9] Shaffer P L. Distributed Control Systems for Turbine Engines [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, January, 1999, 121: 102- 107.
- [10] Fletcher T R. Convenient Airborne MIL-STD 1553 multiplex Data Bus Data Acquisition System[J]. Canadian Aeronautics and Space Journal, Dec, 1993, 39(4): 185- 190.
- [11] Thompson H A, et al. A CANbus-Based Safety-Critical Distributed Aeroengine Control Systems Architecture Demonstrator [J]. Microprocessors and Microsystems, 1999, 23: 345- 355.
- [12] 王振华, 朱国力. 基于CAN总线的开放式网络数控系统研究[J]. 机电工程, 2000, 17(3): 46- 48.
- [13] Kurt Sobanski, et al. Gas Turbine Distributed Control Systems: Power Supply and Communication Data Bus Design Considerations[R]. ASME 98-GT-414, The International Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition Stockholm, Sweden, June, 1998.
- [14] 陈卫昀, 严仰光. 分布式电源[J]. 电力电子技术, 1999, 4(2): 82- 85.
- [15] Jay Goetz. High Temperature Electronics for Sensor Interface and Data Acquisition[C]. Sensors Expo, October 7, 1998.