多电发动机分布式控制系统总体方案研究

贾淑芝，吴　新，李　斌
（中航工业沈阳发动机设计研究所，沈阳 110015）

贾淑芝(1965)，女，自然科学研究员，主要从事航空发动机控制与预先研究工作。

收稿日期：2011-02-26

摘要：多电发动机控制系统十分复杂，需要采用分布式控制。分布式结构易于从部件级到子系统级再到系统级进行试验，同时大多数试验可通过仿真程序同步进行。基于某型发动机技术平台的分布式控制系统总体方案，在保留原平台的控制功能和控制规律基本不变的情况下，按多电发动机控制要求，大量采用电介质替代燃油介质实现控制功能，并按分布式控制方式进行系统总体方案设计。重点验证了新增控制功能、新原理控制元件和控制方法以及分布式控制总体运行模式，使其能在现有发动机平台上进行多电发动机分布式控制关键技术验证。

关键词：多电发动机；分布式控制；电力驱动；涡扇发动机

Concept Research on Distributed Control System of More Electric Engine

JIA Shu-zhi, WU Xin, LI Bin
(AVIC Shenyang Engine Design and Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: The distributed control was required to adopte for the control system of the more-electric technology due to its complexity. The control system can be easily validated by simulation from parts, subsystems to systems, and most validation can be simultiniously conducted. An overall design proposal of distributed control system was proposed based on a technical platform of turbofan engine. According to MEE (More Electric Engine) demands, the proposal was designed using electrodynamic based on the original control functions and laws. The MEE key technologies, such as new control functions, new control elements, new control methodologies and overall operation modules can be validated on this platform.

Key words: more electric engine; distributed control; electrodynamic; turbofan engine

0　引言

多电航空发动机关键部件和系统主要包括磁悬浮轴承、备用轴承、内置式起动/发电机和分布式控制系统等，其关键技术的进展主要取决于这些部件技术的突破和其一体化设计技术的完善。

多电发动机控制系统的特点是大量控制附件采用电力驱动替代了液压驱动，采用装在发动机内部的内置式起动/发电机和磁浮轴承等。控制系统和其分系统均很复杂。采用分布式控制方式可以使发动机复杂性降低，质量减轻，可靠性提高，维修性和故障隔离特性改善，全寿命成本降低；还可以大大减轻中央控制器的计算负担，为采用复杂的控制规律和先进的控制算法提供保证。同时，由于每个智能装置均可以进行自检和诊断，从而降低了维修成本，并在采用新的元件级技术时对中央处理计算机的改动最小，设计和升级的灵活性大。因而，对涡扇发动机应用多电技术的分布式控制系统的总体方案进行研究很有必要。

1　控制系统总体方案

该控制系统以某型涡扇发动机为技术平台，取消了发动机中央传动机构和回油管路等附件，控制附件由原来机械传动改为由电力驱动。保持原有发动机的主要控制功能和控制规律不变，增加磁浮轴承控制和内置式起动/发电机的控制。

本方案主要验证多电发动机分布式控制系统的运行模式及电力驱动和磁浮轴承的控制功能。因此，涉及的发动机工作模式不包括加力状态和喷口控制。

分布式控制系统的组成如图 1 所示,包括供油系统控制器、状态控制器、中央控制器、起动 / 发电机控制器、主动磁浮轴承控制器、低压压气机导向器调节步进电机控制器、高压压气机导向器调节步进电机控制器、喷口调节步进电机控制器、主点火系统控制和参数采集与处理系统 9 部分。通过核心控制单元中央控制器和各子控制器共同工作,在发动机稳态和过渡态工作时实现各种控制和状态监控等功能。

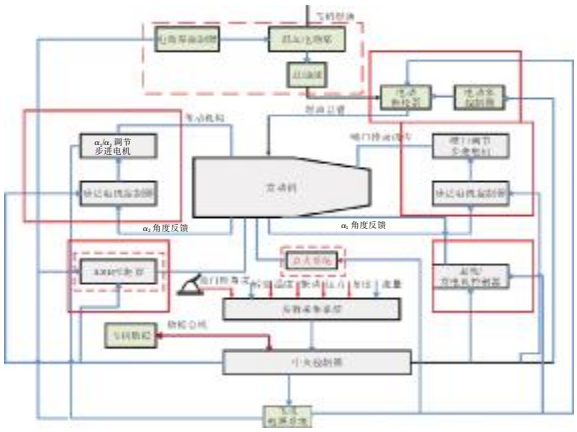

图 1　分布式控制系统原理

以下重点叙述分布式控制系统在原控制系统基础上需要改变的控制功能。

1.1　中央控制器功能

中央控制器通过带余度的高速数据总线与安装在发动机上的新型智能传感器和多个子控制器相连,每个子控制器都具有一定的数字处理能力,可完成当地控制功能;中央控制器作为飞机通讯总线上的 1 个节点,与飞机控制器共享数据资源,实现发动机与飞机的综合控制。

中央控制器根据来自飞机的操纵指令,控制发动机各子控制器完成发动机的起动控制、状态控制和发动机状态监视功能。除中央控制器完成整机的监视外,发动机状态监视系统各子系统完成各自的监视、故障诊断和隔离功能。

1.2　发动机起动控制

发动机由电动机起动。起动控制点火时序保持不变,供油则是按起动供油控制规律进行控制。同时,增加了磁浮控制程序和起动连锁。在电机旋转之前,要保证磁浮轴承悬浮起来。对内置式起动 / 发电机还要有起动与发电功能转换的控制。起动控制原理如图 2 所示。

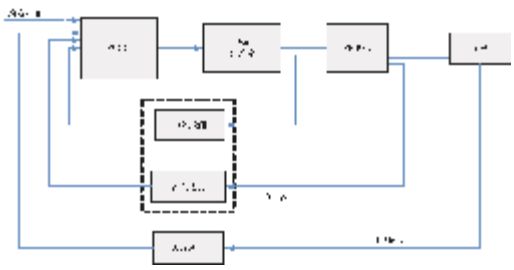

图 2　起动控制原理

1.3　发动机几何调节控制

发动机的几何调节包括低压、高压压气机导向叶片角度控制和喷口的收放控制。α_1 控制的原理如图 3 所示(α_2 控制的原理与此相同)。通过来自中央控制器的低压、高压压气机导向叶片角度给定信号与来自发动机低压、高压压气机导向叶片角度实测反馈信号比较的差值,控制步进电机带动涡轮蜗杆机构和叶片导向器传动机构达到设定位置;通过来自中央控制器的高压转子换算转速,控制步进电机带动涡轮蜗杆机构和喷口收放装置达到预定位置。喷口控制原理如图 4 所示。

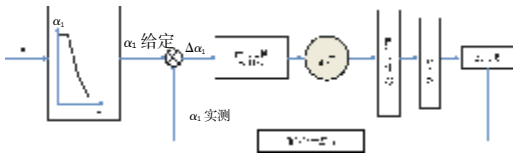

图 3　发动机几何调节控制原理

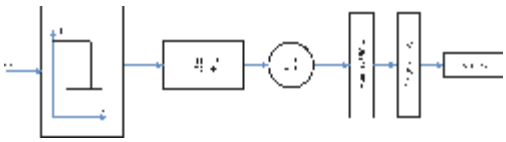

图 4　喷口控制原理

1.4　发动机状态控制

发动机状态控制原理如图 5 所示。

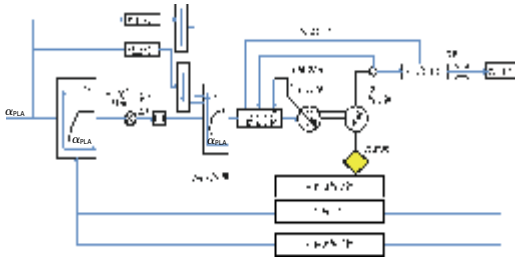

图 5　发动机状态控制原理

发动机状态控制主要完成发动机节流、中间和过渡状态的发动机控制功能。

在发动机节流和过渡状态下，通过控制主燃油流量来实现对发动机转速的控制。燃油流量的控制由电动燃油泵按发动机的控制规律要求，直接按需供油，与发动机转速没有直接关系，无需回油。来自油门杆的操纵信号通过中央控制器解算出对应的主燃油流量需求，输出控制信号给电动燃油泵控制器（质量流量）。由电动燃油泵控制器采集流量传感器的反馈信号（体积流量），根据燃油温度反馈信号对燃油流量进行修正，计算出齿轮泵供出的质量流量，输出控制信号控制电机的转速。为精确控制电机转速，电动燃油泵带有转速闭环。电机驱动齿轮泵按设定的转速旋转，齿轮泵输出的燃油经过液压管路和喷嘴到达发动机的主燃烧室。

与节流状态不同，在发动机中间状态，主燃油流量控制增加了 n_1、n_2 和 T_6 调节通道的增量最小值选择器。

通过中央控制器内部 n_1、n_2 和 T_6 限制值控制规律，求取相应各参数设定值、增量和增量最小值。

为保证在发动机中间状态下主燃油流量控制计划的实现，最小值选择器选择 n_1、n_2 和 T_6 三者偏差最小的信号作为主燃油调节通道的控制信号，由控制器将其转换成主燃油流量的变化，通过电动燃油泵控制系统去完成主燃油流量的调节。

1.5 主动磁浮轴承控制

在接到来自中央控制器的发动机起动指令后，由发动机主动磁浮轴承系统进行主动磁悬浮的控制。对控制系统的要求是：磁轴承系统在整个发动机工作过程中要保证具有良好的稳定性，在发动机相应的临界转速下要有足够的阻尼，同时要有良好的抗突加载荷能力。单自由度磁浮轴承控制系统原理如图 6 所示。磁浮轴承控制系统组成包括电磁铁、转子、控制器、功率放大器、转子位移传感器和位置控制器等。其中，位置控制器有电流控制器和电压控制器 2 种。电流控制算法简单，易于实现 PD 或 PID 控制，适于小型系统；电压控制模型更为精确，鲁棒性好，适于大型或超大

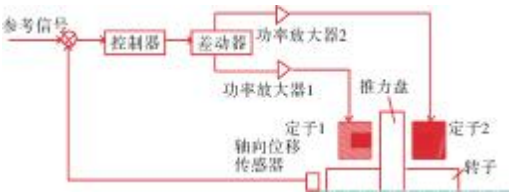

图 6 磁浮轴承控制系统原理

型系统。功率放大器一般采用开关功放，优点是功耗小、效率高、体积小。位移传感器目前应用最多的是电涡流式传感器，具有灵敏度高、线性测量范围大且成本低、体积小等优点。

磁浮轴承控制系统可通过调整控制参数来改变磁浮轴承转子系统支承的刚度和阻尼，改善磁浮轴承转子系统的动力学性能，实现主动控制。

2 多电发动机控制系统关键技术

2.1 控制系统技术难点

（1）由于大量采用电力驱动，对系统抗电磁干扰能力要求更高。

（2）控制器、智能传感器、作动器安装位置工作环境苛刻（温度高、振动大）。

（3）轻质量的变速、变流量电动燃油泵和高精度可控步进电机制造技术。

（4）磁浮轴承控制系统可靠性和耐高温、轻质量、小型化硬件设计技术。

（5）分布式控制系统的总体结构和运行模式。

（6）余度多路传输光纤总线。

（7）多余度数字处理机和并行处理技术。

2.2 技术措施和研究方向

（1）采用高速数据传输总线、光导通信总线、光学接口和光纤传感器；

（2）发展能在 350～400 ℃高温下长期工作的耐高温半导体器件、绝缘技术和绝缘材料；

（3）研究以砷化镓等材料为基础的能与光纤总线一起工作的集成电路设计技术和生产工艺；

（4）采用高功率密度（高频响）的电动机和工作效率较为稳定的齿轮泵，发展耐高温有机基复合材料和金属基复合材料；

（5）开展以冗余设计为主要途径的容错技术、电子元器件的集成化 / 微型化 / 低功耗技术研究；

（6）开展高温电子设备的热管理技术研究。

3 结束语

多电分布式控制的采用，将简化控制结构，提高控制系统的可靠性。多电发动机不仅将改变传统航空发动机的结构布局，而且将引进采用新的控制功能、控制模式、控制原理的控制元件和控制方法，从而引起发动机控制系统的重大改革。

基于涡扇发动机多电技术控制系统（下转第 25 页）