

装于波音 737-700/800 飞机上的 CFM56-7 发动机与装于波音 737-300/400/500 上的 CFM56-3 型发动机既相似又有发展,而从 3 型发动机到 7 型发动机的改变体现了发动机控制模式的变化。本文分别阐述了两种发动机的具体控制和指示方式。

# 波音 737 飞机发动机控制及指示技术的发展

# Development of Boeing737 Aircraft–engine Control and Indication

◎张正洋 / 中国民航学院 机电学院

**航**空发动机的工作状态是随着飞机飞行条件的变化而变化的,要使发动机在飞行中保持给定的工作状态按所希望的规律来改变发动机的工作状态,就必须对发动机进行控制(包括推力控制、过渡控制和安全限制等)。

CFM56-3 型发动机主要用功率管理控制器 (PMC) 和发动机主控制器 (MEC) 进行控制; CFM56-7 型发动机主要用电子

发动机控制器 (EEC) 和液压机械组件 (HMU) 来进行油路和气路控制。

## CFM56-3 型发动机的控制和指示

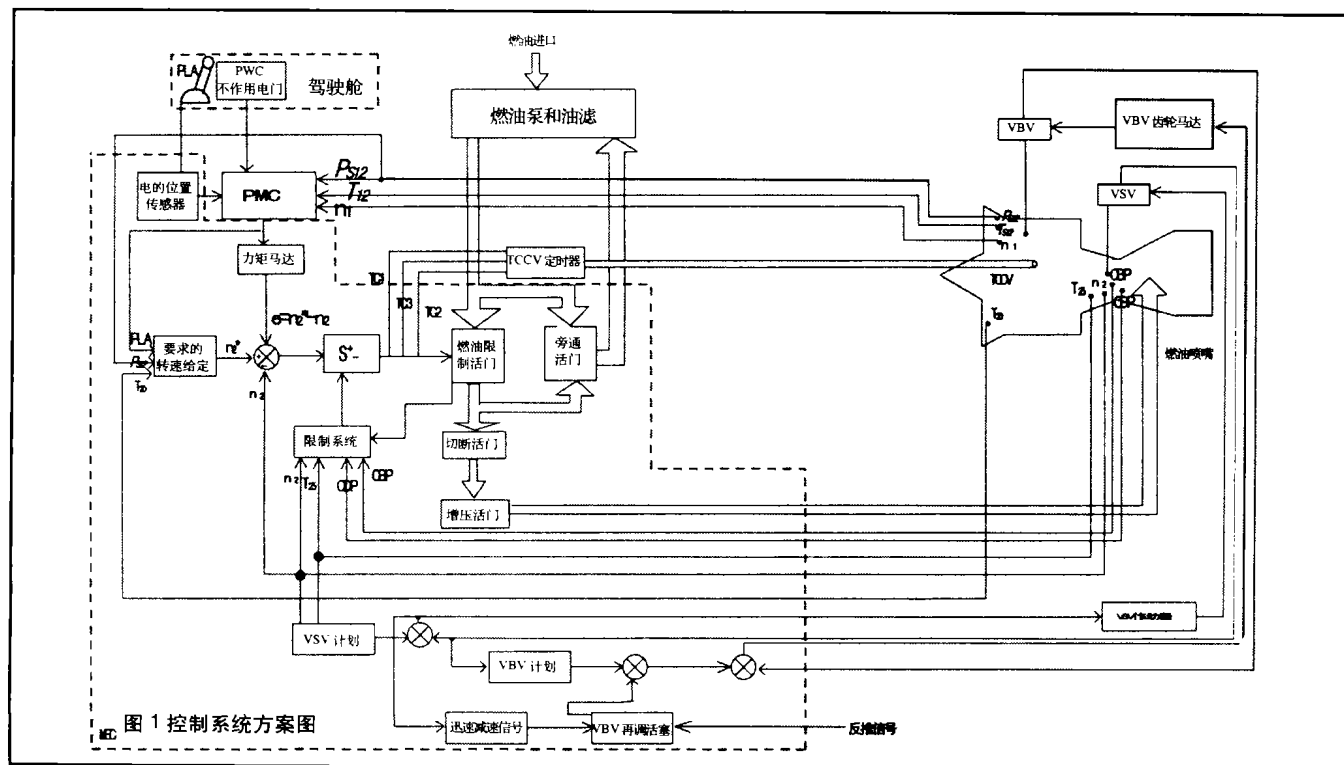
### 1. 发动机燃油和控制系统

发动机控制系统的液压机械部件包括 MEC、风扇进口温度 (FIT) 传感器、V BV 的液压马达和作动器、VSV 作动器、高压压

气机 (HPC) 进口温度传感器、高压涡轮间隙控制活门 (HPTCCV)。电气部件包括功率管理控制器 (PMC)、控制发电机、风扇转速传感器、风扇进口温度传感器和风扇进口静压传感器。

发动机的控制是通过使用功率杆,燃油切断杆、MEC 和 PMC 实现(如图 1)。

MEC 是一个液压机械组件,响应功率杆输入并按发动机控制变量修正调节核



心发动机转速 N2。MEC 在所有工作状态通过计量到燃油喷嘴的流量控制发动机转速 (N2), 使用燃油泵后燃油作为液压介质。MEC 通过感受高压压气机出口压力 (CDP)、高压压气机引气压力 (CBP)、压气机进口温度 (CIT)、风扇进口温度 (T2) 和高压转子转速 (N2), 对这些参数进行放大计算, 确立加、减速燃油限制。将计算的限制值与实际燃油流量比较, 当实际燃油量接近限制值时 MEC 就起作用。MEC 根据 N2 和 CIT 信号计划 VSV 位置, 并用高压燃油通到 VSV 作动器改变 VSV 静子叶片角度, 按照 VSV 计划的函数确定 VBV 活门的开度。MEC 通过 N2 信号, 输出压力 TC1 和 TC2 操作 HPTCCV 的位置。

MEC 提供独立于功率杆位置的燃油可靠切断和泵卸荷系统。

PMC 是一个模拟式电子监控装置, 它由 N2 控制发电机供电, 并在有限的权限内调准 MEC 给定风扇转速 N1。当 PMC 接通, 由感受的风扇进口温度和静压信号自动计算起飞 N1。功率杆角度信号用于选择推力大小; 推力大小用于确立通过控制 MEC 燃油流量要求达到的风扇转速。当 PMC 断开, 由 MEC 提供 N2 转速调节。

## 2. CFM56-3 型发动机指示

发动机指示 (EIS) 是为了监控发动机的工作状态而提供的指示。CFM56-3 型发动机指示系统主要是在驾驶舱中的发动机主显示组件和副显示组件上。主显示组件提供推力模式、N1 手动设置、排气温度 (EGT)、N1 转速、N2 转速、燃油流量 (FF)、燃油耗量 (FU) 指示。当 EGT、N1、N2 超限时, 发动机的各参数会存储在存储器中, 维护时, 可以通过连接 ARINC429 总线的连接器获得超限时的发动机工作情况。副显示组件提供大气总温 (TAT)、发动机滑油压力、滑油温度、滑油量、振动值、液压系统 A 和 B 的压力及油量。发动机振动值由飞机振动系统 (AVM) 提供, 发动机振动传感器、N1 和 N2 传感器将信号给 AVM 调节器, 经 AVM 调节器处理后送至副显示组件。AVM 调节器可以记录发动机各单元

体的振动情况, 特别是能提供振动故障数据, 可以通过连接 ARINC429 总线的连接器访问这些数据。

## CFM56-7 型发动机的控制和指示

### 1. 发动机燃油和控制系统

发动机燃油和控制系统由燃油输送、控制和显示组成。发动机燃油和控制系统与发动机和飞机系统之间有数字信号和模拟信号连接。EEC 是发动机系统的主要控制部件, 它计算输入数据并输出信号控制发动机的工作。EEC 与发动机连接的部件包括: 程序塞、HMU、发动机空气控制系统、发动机传感器、燃油控制、EEC 交流发电机、点火系统。它与飞机系统的接口包括: 电子显示装置 (DEU)、启动杆停止指令、发动机防火电门、交流 (AC) 转换汇流条 1 或 2、自动油门计算机、推力杆角度 (TLA)、反推套筒位置。DEU 和自动油门计算机是通过 ARINC429 数据总线与发动机燃油和控制系统连接。EEC 通过 DEU 与发动机和燃油显示、启动杆慢车或关断指令、大气惯性基准数据组件 (ADIRU) 1 和 2、飞行管理计算机 (FMC) 和控制显示组件 (CDU)、飞行数据采集组

件 (FDAU) 连接, 如图 2 所示。

### (1) 发动机燃油控制的实现

EEC 是发动机燃油和控制系统的核心, 它是一个双通道 (A 和 B 通道) 计算机, 发动机运行时, 两个通道之间通过数据连接 (CCDL) 通信 (一个是主用通道, 一个是备用通道)。EEC 从 A 或 B 收到信息, 并计算逻辑控制指令控制发动机。正常时, EEC 电源由 EEC 交流发电机提供, 转换汇流条 1 和 2 为备用电源。发动机程序塞 (ID) 提供发动机配置数据给 EEC。

EEC 通过 DEU 进行飞机与发动机系统的数据交换。发动机启动时, EEC 收到发动机启动信号, 提供发动机启动的保护。当启动杆移到慢车位时, 启动杆提供点火信号给 EEC, EEC 控制发动机点火系统和逻辑控制燃油计量活门 (FMV) 至慢车位置。当启动杆在关断位时, 高压关断活门 (HPSOV) 关断, 启动杆给 EEC 信号告诉发动机处于关闭模式。反推 (T/R) 套筒上的线性差动传感器 (LVDT) 传输 T/R 套筒位置给 EEC, EEC 用这个信号控制反推下的 FMV 位置。EEC 从发动机防冰和引气系统得到数据控制 FMV 以保持推力。自动油门计算机从 EEC 中得到油门解算器角度 (TRA) 和最大额定推力数据, 它用这些数

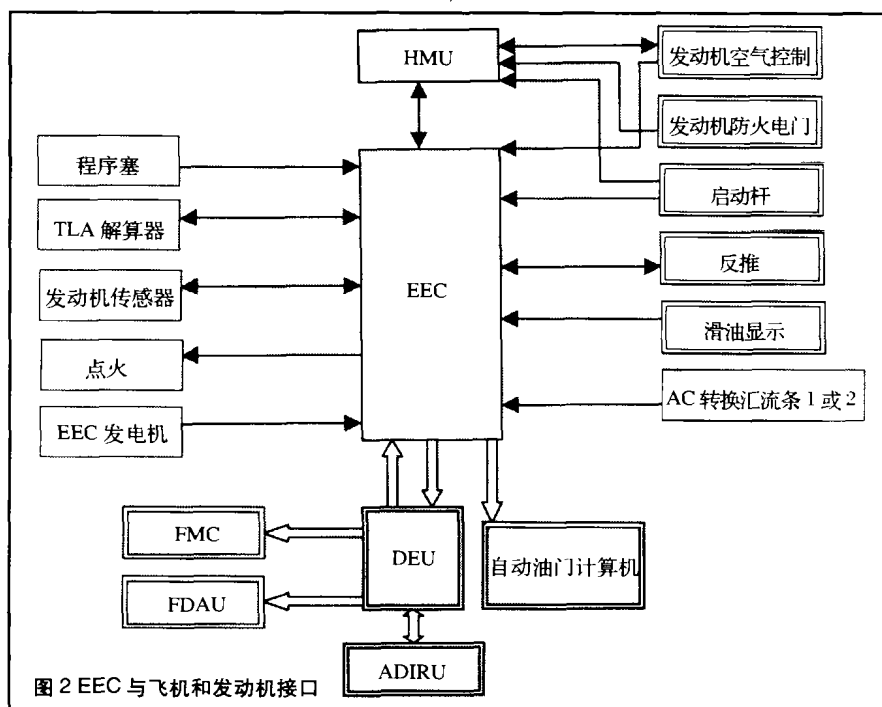


图 2 EEC 与飞机和发动机接口

## 工程与技术 ENGINEERING & TECHNOLOGY

据计算油门杆角度(TLA),操作推力杆。ADIRU提供大气总压、总温给EEC,EEC用这个数据计算发动机推力。FMC提供一些数据给EEC。CDU显示发动机维护数据,并发出指令给EEC做系统自检。FDAU收集发动机参数数据,并将这些数据传给飞行数据记录仪(FDR)。

### (2) EEC与发动机传感器联系

EEC用PT25传感器提供的HPC进口温度和T12传感器提供的风扇进口温度控制伺服燃油系统及FMV位置;用PT25传感器提供的HPC进口压力监控和控制发动机运行;用T3传感器提供的压气机排气温度控制FMV、瞬态引气活门(TBV)、BSV(燃烧级活门)、高压涡轮主动间隙控制(HPTACC)活门;用HPTACC传感器提供的HPT罩温度控制HPTACC系统;用T49.5传感器提供的涡轮排气温度传给DEU,防止发动机启动时EGT超温。EEC用N1、N2速度传感器提供的N1、N2速度控制FMV位置,并把他们发送给DEU。N1、N2速度传感器也可以直接将N1和N2值传给DEU。EEC用P0传感器提供的外界大气压力和PS3传感器提供的HPC排气压力控制伺服系统和FMV位置,P0提供的数据也是大气总压的备用选择,如果EEC不能从ADIRU中得到总压数据,则EEC用P0提供的数据取代总压。

HMU从EEC和飞机收到燃油计量和发动机伺服指令信号,给发动机伺服系统和燃烧室提供燃油。HMU将EEC指令信号转变成伺服燃油液压信号,HMU控制电液伺服活门(EHSV)操纵FMV、TBV、HPATCC活门、LPTACC活门、VBV、VSV伺服系统。EHSV提供伺服燃油压力给伺服系统,EEC收到的电气信号操纵EHSV中的扭矩马达。扭矩马达操纵活门,EEC监控EHSV的位置。

HMU中有一个机械的超转调节器,当他感受到N2超转时,将旁通活门开大,减少流入FMV的油量从而减小N2转速。EEC监控它的工作状况。

EEC的工作有三种模式:正常模式、软备用模式、硬备用模式,用EEC电门灯表明

三种工作模式。正常模式下,EEC从ADIRU中得到PT数据,当PT数据不正确或没有时,EEC进入软备用模式,此时,EEC用TAT、标准日温度、上一次相对于标准日温度变化的有效值确定马赫推力额定值。EEC在软备用模式,推EEC电门至OFF位,移动推力杆至慢车位时,EEC进入硬备用模式,此时,EEC用从电子压力和高度表估算的马赫数额定推力及在额定中心点温度时计算的标准日变化温度确定马赫推力额定值(在硬备用模式下没有发动机超转保护)。

### 2. CFM56-7型发动机指示

CFM56-7型发动机指示系统主要是在驾驶舱中的中央显示组件上。如果上中央显示组件有故障,则显示在下中央显示组件上。显示组件提供显示的发动机参数与3型发动机类似。

当发动机参数超限时,其相关数据存在存储器中,能够在显示系统上看到超限情况发生,并在控制显示组件(CDU)的维护自检索引页中查询超限信息。维护自检索引页中选择发动机(ENGINE)菜单,可以查询发动机的最近的和历史的故障情况包括故障描述、故障信息号和放行标准,并可进行地面测试,检查EEC、反推互锁、作动筒、点火器是否正常,监控控制回路、控制压力、控制温度、燃油系统、滑油系统、转速。帮助维护人员进行故障隔离。

振动系统的AVM信号调节器的功能有:计算发动机振动值和提供振动值给显示系统;保存发动机振动的历史数据;提供振动平衡的算法帮助发动机配平;隔离振动系统故障和保存故障数据。AVM信号调节器的指示通过其前端的自检(BITE)电门和液晶显示来实现。

### 3. CFM56-7型发动机控制与指示相对于CFM56-3型发动机的发展

CFM56-3型发动机的控制主要由MEC和PMC实现,属于监控型发动机电子控制器。MEC为液压机械式控制器,是核心控制器,通过液压计算应供燃油量,进行发动机的完全控制,包括启动、加速、减速、转速控制。PMC具有监督能力,对推力(功率)进行精确控制,并对发动机的重要

参数(如排气温度和转速等)进行安全限制。PMC故障时,完全可以用MEC单独控制,但不能精确控制推力。

CFM56-7型发动机控制和指示是综合数字技术、微电子技术以及计算机技术在航空发动机控制领域的具体实现,其核心部件EEC属于全权数字电子控制(FADEC),所有的控制计算由EEC电子计算机实现,然后通过电液伺服机构输出控制液压机械装置(HMU),操作各个活门和作动器。HMU属于执行机构。

从CFM56-3型发动机控制和指示技术到CFM56-7型发动机的变化体现了传统的监控型发动机电子控制器到FADEC的发展。以EEC为核心的CFM56-7型发动机的控制与指示相对于以MEC(机械部件)为核心的CFM56-3型发动机有以下几点进步:

- 以电传操纵(如推力的设置、燃油关断的控制)取代了CFM56-3型的机械缆绳操纵;

- 提供了对启动的保护控制;

- 控制显示组件(CDU),可以存储更多的故障信息并隔离故障和测试发动机部件性能。AVM调节器有液晶显示并且可用平衡算法进行计算;

- 有安全的放行标准警告系统;

- 可以进行数据装载;

- 双通道设计,三种工作模式。

由于EEC是电子控制,易于实现双通道设计,使发动机的控制成为容错余度控制,大大提高了发动机的使用效率和安全性可靠性。

### 结束语

CFM56发动机控制从液压机械加电子监控发展成全权数字电子控制(FADEC),大大提高了控制技术水平;从波音757、767型开始应用的EICAS系统,到成功应用于波音737-700/800,带来驾驶舱显示技术水平的变化。

新型控制及指示技术的应用,使得发动机的故障检测、隔离发展到新水平,使用/维修更科学化、规范化。 □