

150 座级商用发动机控制技术对比分析

张亦程

(中航工业航空动力控制系统研究所,无锡 214063)

A Contrastive Analysis of Commercial Aeroengine Control Technology for 150-seat Aircraft

Zhang Yicheng

(AVIC Aviation Motor Control System Institute, Wuxi 214063)

摘要: 主要对现役 150 座级商用发动机 CFM56-5B、CFM56-7B、V2500 以及下一代 150 座级商用发动机 LEAP X、GTF 的控制技术进行初步分析,包括对 FADEC 系统组成、燃油系统、各项控制技术及超转保护的分析,并对现役及下一代 150 座级商用发动机控制技术进行对比分析,初步分析出其各项技术的差异,最后给出分析结论并提出发动机控制新技术的建议。

关键词: FADEC; 电子控制器; 功率管理; 主动控制; 超转保护

[Abstract] This paper presents a preliminary analysis of aeroengine control technology for CFM56-5B, CFM56-7B, V2500 in service and Next Generation LEAPX and GTF, which maily mounted on 150-seat aircraft. In this paper, it focuses on the analysis of FADEC system construction, fuel system, various control technologies, and overspeed protection. It also performs a contrastive analysis between the in service commercial aeroengine control echnology and next generation aeroengine, both for 150-seat aircraft. After a preliminary analysis of differences among various techonologies, there is a conclusion and some suggestions in respect to new control techonologies.

[Keywords] FADEC; EEC; Power Management; Active Control; Overspeed Protection

0 引言

全权限数字电子控制——FADEC 是高性能飞机发动机以及高水平一体化控制必然采取的控制形式。FADEC 通过使用发动机系统监视、自测试、故障隔离技术,改进维修效率。由于实施计算机辅助查找故障,不仅给机上和地面维修带来方便,也使发动机维修成本降低了。

FADEC 系统是基于计算机的电子系统,提供对发动机所有工作阶段的全部控制,通过响应飞机的推力命令控制发动机输入,并为飞机提供信息,以实现机舱指示、发动机状态监视、维护报告和故障排查。

1 发动机控制技术分析

1.1 CFM56-5B 发动机控制技术分析

CFM56-5B 是高涵道比、双转子涡轮风扇发动机,可以为 A319、A320 和 A321 飞机提供动力装置。

FADEC 系统由下列主要部件组成:

- (1) 一个双通道数字电子控制器;
- (2) 液压机械单元(HMU);
- (3) 外设零部件如阀、作动器和传感器等。

1.1.1 燃油分配系统

燃油分配系统如图 1 所示。

1.1.2 控制技术分析

(1) 燃油控制技术

燃油控制规律根据发动机控制率和工作条件,计算燃油计量活门(FMV)的给定信号。

燃油计量功能根据油门杆解算器角度(TRA)的命令和环境条件,调节发动机燃油流量以控制风扇转速或高压转子转速。

(2) 功率管理控制技术

功率管理提供两种推力设置模式:

- ① 手动推力模式:功率由一个油门杆输入控制;
- ② 自动推力模式:功率由来自飞机飞行管理导航计算机(FMGC)的一个风扇转速给定信号输入控制,但是,功率被限制在不少于正常慢车功率或大于 FADEC 在当前模式下设置的限制值范围内。

(3) 变几何控制技术

变几何控制主要有:

- ① 可变静子叶片角度(VSV)控制;
 - ② 可变放气活门(VBV)控制;
 - ③ 瞬态放气(TBV)控制。
- ##### (4) 间隙控制技术
- 间隙控制技术主要包括:
- ① 高压涡轮间隙控制(HPTCC);
 - ② 低压涡轮间隙控制(LPTCC)。
- ##### (5) 具有反推控制技术

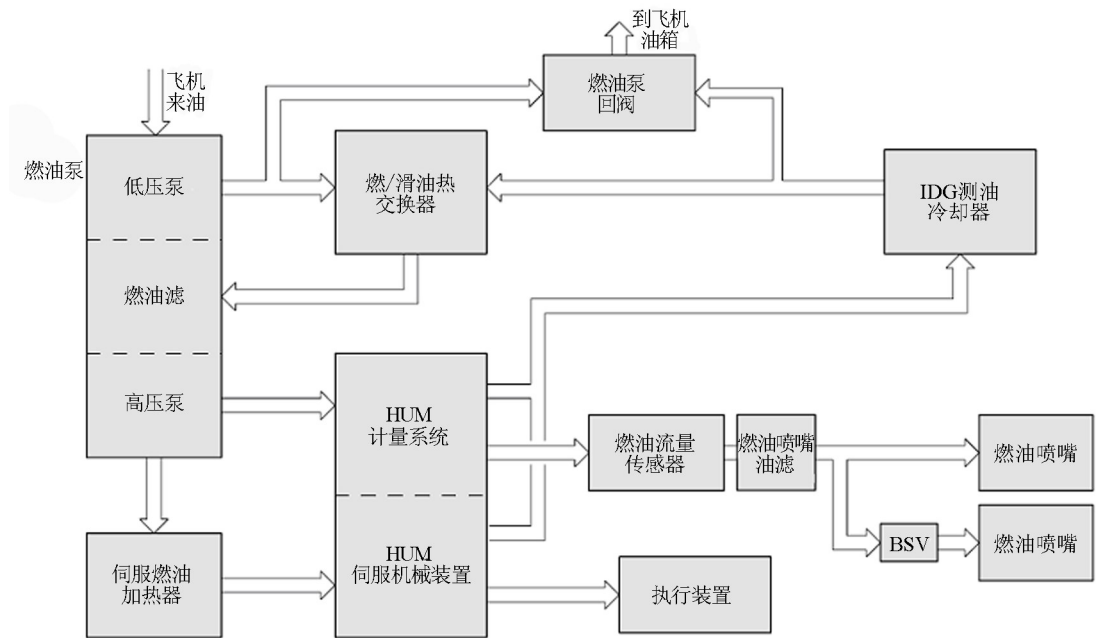


图1 CFM56-5B 发动机燃油分配系统框图

(6) 具有故障诊断技术

(7) 燃烧室分级活门(BSV)控制技术

燃油分区活门能使燃油输送到的 10 个燃油喷嘴关闭。这既提高了本区燃油的丰富程度,同时又能防止在减速过程中发动机出现熄火。

(8) 燃油返回阀(FRV)控制技术

FRV 的控制根据下列条件进行:

- ① 飞行/地面状态;
- ② 发动机滑油温度;
- ③ 油箱内温度;
- ④ 巡航状态结束或没有结束。

1.1.3 超转保护功能

CFM56-5B 发动机控制系统超转保护装置采用机械液压超转保护,可防止发动机超过稳态转速 106% N₂。

1.2 CFM56-7B 发动机控制技术分析

CFM56-7B 是高涵道比、双转子涡轮风扇发动机,可以作为波音 B737-600、-700、-800 和 -900 飞机的动力装置。

FADEC 系统组成有:

- (1) 一个双通道数字电子控制器;
- (2) 液压机械单元(HMU),把来自电子控制器的电信号转换成液压信号;
- (3) 外设零部件如阀、作动器和传感器等用作控制和监视。

1.2.1 燃油分配系统

燃油分配系统如图 2 所示。

1.2.2 控制技术分析

(1) 燃油控制技术

燃油控制规律根据发动机控制率和工作条件,计算燃油计量活门(FMV)的给定信号。

燃油计量功能根据油门杆解算器角度(TRA)的命令和环境条件,调节发动机燃油流量以控制风扇转速或高压转子转速。

(2) 功率管理控制技术

功率管理提供两种推力设置模式:

- ① 手动推力模式:功率由一个油门杆输入控制;
- ② 自动推力模式:功率由自动油门计算机操纵油门杆,电子控制器直接采集油门杆输入控制。

(3) 变几何控制技术

变几何控制主要有:

- ① 可变静子叶片角度(VSV)控制;
- ② 可变放气活门(VBV)控制;
- ③ 瞬态放气(TBV)控制。

(4) 间隙控制技术

间隙控制技术主要包括:

- ① 高压涡轮间隙控制(HPTCC);
- ② 低压涡轮间隙控制(LPTCC)。

(5) 具有反推控制技术

(6) 具有故障诊断技术

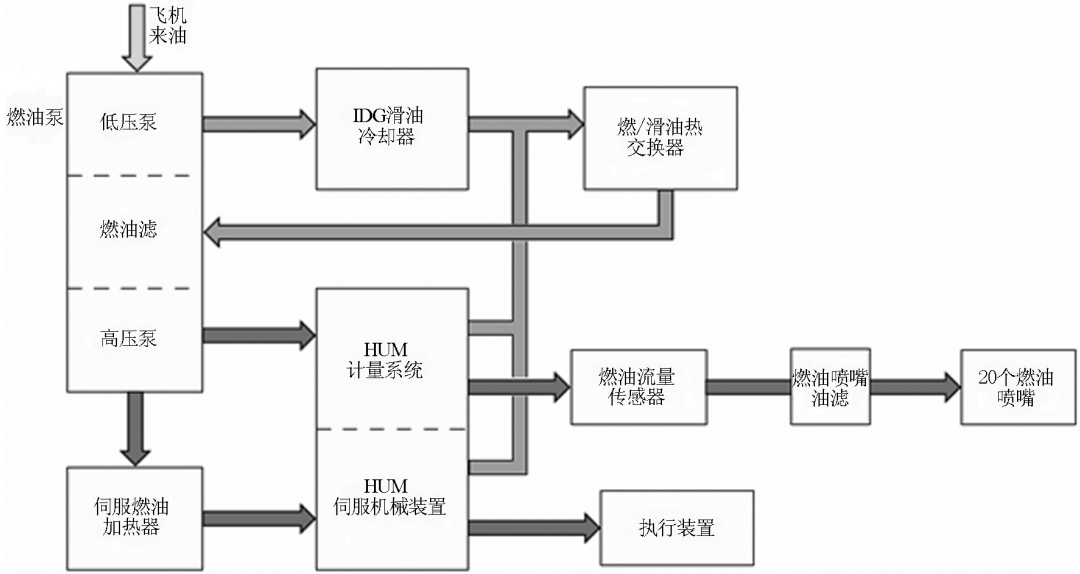


图2 CFM56-7B 发动机燃油分配系统框图

1.2.3 超转保护功能

CFM56-7B 发动机控制系统超转保护装置采用机械液压超转保护,可防止发动机超过稳态转速 106% N2。

1.3 V2500 发动机控制技术分析

V2500 是双转子轴流高涵道比涡扇发动机,可以作为 A320 和 MD-90 飞机的动力装置。

FADEC 系统主要由下列部件组成:

(1)电子控制器(隔震的)安装在发动机风扇机匣上,也是空气冷却的组件;

(2)燃油计量装置(FMU);

(3)专用的永磁式发电机(PMA);

(4)对于静子叶片、发动机放气、主动间隙控制、第10级冷却控制、发动机和整体传动交流发电机(IDG)的热管理控制作动系统;

(5)传感器;

(6)电缆和启动系统部件。

1.3.1 燃油系统

燃油系统如图3所示。

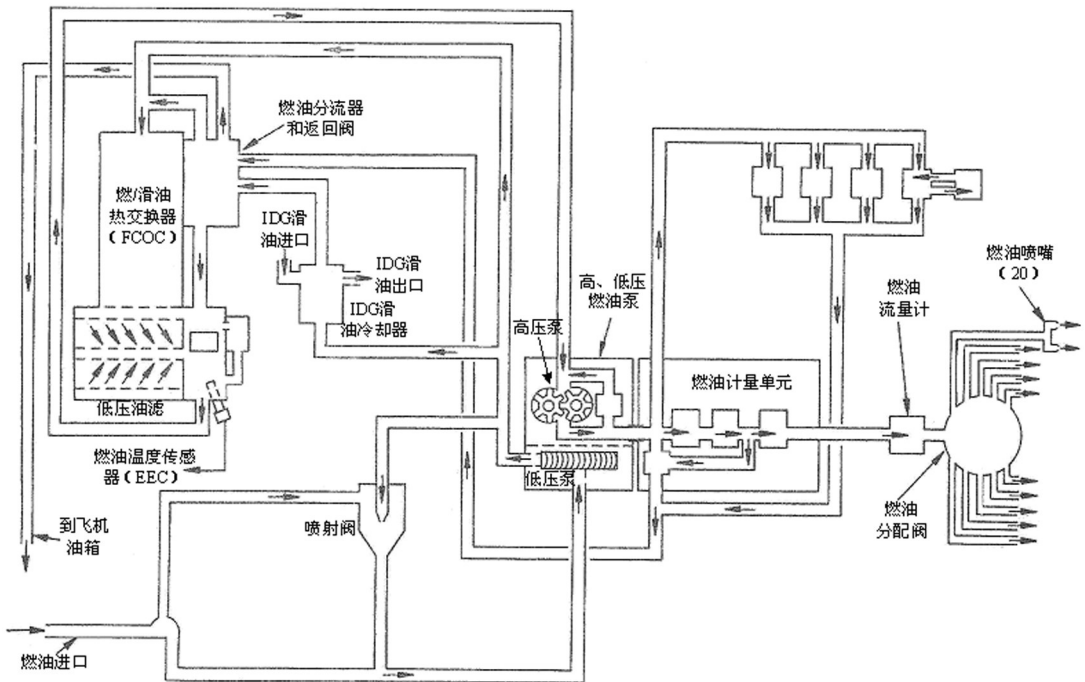


图3 V2500 发动机燃油系统结构简图

1.3.2 控制技术分析

(1) 燃油控制技术

稳态主控制方案是调节燃油流量给定发动机压力比(EPR)。如果电子控制器不能感受 EPR 或计算 EPR 参考值,将转换到风扇转速控制方案。

(2) 功率管理控制技术

功率管理提供以下两种推力设置模式:

- ① 手动推力模式:功率由一个油门杆输入控制;
- ② 自动推力模式:功率由自动油门伺服机构操纵油门杆,电子控制器直接采集油门杆输入控制。

(3) 变几何控制技术

变几何控制主要有:

- ① 可变静子叶片 (VSV) 控制;
- ② 增压级放气活门 (BSBV) 控制。

(4) 间隙控制技术

主动间隙控制 (ACC) 系统通过保证高、低压涡轮在最合适的叶片顶端空隙下工作,来提高发动机的性能。这是通过调整高压涡轮和低压涡轮机匣上冷却管空气流量,以减少涡轮机匣的热量增长来实现的。

(5) 具有反推控制技术

(6) 具有故障诊断技术

(7) 高压涡轮冷却空气控制技术

高压涡轮冷却空气活门供给压气机第 10 级的空气冷却高压涡轮和低压涡轮的不同零件。活门操作是作为高压转子转速和高度的函数并包含 2 个位置的电门提供反馈信号到电子控制器。

(8) 滑油和燃油温度控制技术

燃油、发动机滑油和 IDG 滑油的加热和冷却是由燃油冷却的滑油冷却器 (FCOC)、空气冷却的滑油冷却器 (ACOC) 和 IDG 冷却器在电子控制器的管理下实现的。电子控制器控制的部件包括燃油分流器活门、ACOC 空气调节活门和燃油箱回油活门。燃油、发动机滑油和 IDG 滑油温度由热电偶测量传送到电子控制器。

1.3.3 超转保护功能

V2500 发动机控制系统超转保护装置采用电子超转保护,其电子超转保护功能与 CPU 功能相互独立,超转保护逻辑示意图如图 4 所示。在核心机超转情况下,输出控制信号控制液压机械装置中的超转活门,减少发动机燃油流量到最小值。超转活门

位置指示提供给电子控制器,超转活门同主计量活门串联。通常,两个通道中不管哪个处于控制状态,超转保护系统都将起作用。

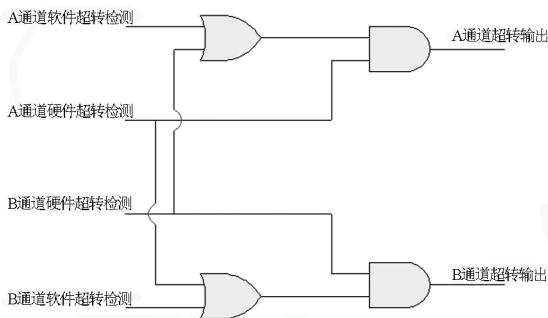


图 4 V2500 发动机超转保护逻辑示意图

1.4 LEAP X 发动机控制技术分析

LEAP X 发动机将采用智能发动机诊断技术,从而进一步降低用户维护费用;增加了可变风扇喷口面积控制技术;而直接测量涡轮叶尖间隙的主动控制技术还需要根据该技术的发展确定是否采用,目前直接测量涡轮叶尖间隙的传感器的可靠性指标还未达到要求,还有待进一步完善改进。

智能发动机诊断技术能根据发动机的状态来调节涡轮叶尖间隙,从而达到降低燃油消耗的目的;在飞行中,能将部件的故障信息传至地面的维修基地。在飞机着陆后,地面维修人员就可以采取针对性的措施,这样可以减轻维修的工作量和降低维修费用。

1.5 GTF 发动机控制技术分析

GTF 发动机在风扇和低压压气机间引入减速齿轮箱,目的是为了使得低压转子在能够取得较高效率的高转速下工作,以匹配高压转子的最佳使用速度,而风扇在气动损失和噪声都小的较低转速下同时工作,可实现通过增大发动机涵道比,使发动机可靠性提高的同时耗油率、使用与维修成本、噪声均降低。

在控制方面,GTF 发动机管理系统具有先进的诊断和预测能力。增加了可变风扇喷口面积控制,该技术在 GTF 验证发动机中进行了验证,达到 TRL P6(技术完备等级 6 级)——发动机验证/样机。

2 发动机控制技术对比分析

2.1 现役发动机控制技术对比分析

CFM56-5B、CFM56-7B 和 V2500 发动机的 FA-DEC 系统的组成基本相同,电子控制器均采用双通

2.1.3 超转保护功能对比分析

CFM56-5B、CFM56-7B 发动机超转保护功能都采用机械液压超转保护;而 V2500 发动机超转保护功能采用电子超转保护。机械液压超转保护独立于电子控制器,技术比较成熟,但会带来控制系统重量的增加;电子超转保护与 CPU 功能相互独立,技术比较先进,相比机械液压超转保护可减轻控制系统重量,可对超转保护功能进行检测。

2.2 发动机控制新技术对比分析

LEAP X 发动机将采用智能发动机诊断技术,从而进一步降低用户维护费用。

GTF 发动机将采用先进诊断和发动机管理系统,具有先进的诊断和预测能力。

LEAP X 发动机与 GTF 发动机在控制方面发展方向基本一致,都将采用先进的发动机诊断技术,都具有可变风扇喷口面积控制技术。

2.3 现役发动机与下一代发动机控制技术对比分析

通过以上分析可以看出,新发动机控制技术比现役发动机控制技术先进,主要体现在以下方面:

- (1) FADEC 的处理能力和存储能力的大幅提升;
- (2) 具有先进的发动机诊断和预测能力;
- (3) 增加了可变风扇喷口面积控制。

3 结论

3.1 现役发动机控制技术对比分析结论

目前,CFM56-5B、CFM56-7B 和 V2500 发动机 FADEC 的功能基本相同,均具有以下功能:

- (1) 功率管理控制;
- (2) 自动和手动起动控制;
- (3) 燃油控制;
- (4) 参数限制保护;
- (5) 变几何控制;
- (6) 涡轮主动间隙控制;
- (7) 反推控制;
- (8) 发动机状态监视与故障诊断;
- (9) 超转保护功能。

目前,CFM56-5B/3 和 CFM56-7B/3 为相应的改进型发动机,在排放、噪音和耗油率方面有所改进,采用的新技术包括:宽旋风扇、3D 叶片设计、涡

轮采用新材料、FADEC III,涵道比达 5.1~5.6,EGT 裕度具有 120°。由于采用改进设计,不同推力等级的发动机不是通过 EGT 降额使用实现的,而是主要通过 FADEC III 的控制,同时保证工作效率和使用寿命。

综合以上分析比较可知,V2500 发动机控制系统采用的技术相对比较先进,滑油和燃油温度控制比 CFM56-5B 和 CFM56-7B 发动机的控制先进,且采用电子超转保护功能,技术比较先进,并可对超转保护功能进行检测。

3.2 发动机控制新技术建议

FADEC 系统开始向第三代产品转变,如 HIS-PANO-SUIZA 公司(法国 Snecma)联合开发和制造的 FADEC III 已安装在波音 777 飞机的发动机 GE90-115B 和 A380 飞机的发动机 GP7200 上。第三代 FADEC 的处理能力提高 10 倍多,存储能力提高了 8 倍,提供了更大的控制系统余度,成本更低。它使用了柔性设计方法,能使控制装置快速而简便地实现重构,以适应新的用途,其可靠性更高,维护更方便,且具备后续技术升级的能力。FADEC III 双通道处理器能全面操作所有发动机控制系统,容许单参数故障和各类多参数故障,而不会对发动机的工作造成不利影响。FADEC III 的高速处理器和大容量储存器将首次允许在高度仿真的发动机性能模型中加入故障诊断逻辑,通过计算“虚拟传感器”值并与其他测得的发动机参数进行比较,从而鉴别出是一个传感器失效还是其他部件的问题。FEDEC III 将逐渐成为民用发动机控制的新标准。

从发展的观念看,在现有成熟的发动机 FEDCE 系统的基础上,应重点考虑发展飞机/发动机综合控制技术和发动机健康管理技术。

参考文献:

- [1] CFM56-5B TRAINING MANUAL(FADEC),1998.6.
- [2] CFM56-5B TRAINING MANUAL(ENGINE SYSTEMS),2000.12.
- [3] CFM56-7B TRAINING MANUAL(ENGINE SYSTEMS),2005.2.
- [4] V2500-D5 MAINTENANCE COURSE NOTES.
- [5] V2500 A1 & A5/D5 Engine Systems.
- [6] 许春生,马乾焯.航空发动机电子控制[M].中国民航出版社,1999.2.