

# 民用飞机发动机反推力装置作动系统的应用研究

## The Application Study of Engine Thrust Reverse Actuation System for Civil Aircraft

柯杰 戚学锋 王鹏 杨铁链 / Ke Jie Qi Xuefeng Wang Peng Yang Tielian

(上海飞机设计研究院,上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

### 摘要:

首先对民用飞机发动机反推力装置的出现、作用、工作原理以及最新的发展趋势进行了简要而系统的阐述。对液压反推力装置作动系统和电反推力装置作动系统的构架和控制原理进行权衡分析,阐述了其在研制中应该注意的问题和考虑的因素,并对今后工作的开展提出了意见。

**关键词:**反推力装置;液压反推力装置作动系统;电反推力装置作动系统;反推控制器;全权限数字电子控制器

[Abstract] This paper simply and systemic describes the appearance, function, working principle and development direction of TRS, and makes a trade study for the architecture and control schematic between HTRAS (Hydraulic Thrust Reverse Actuation System) and ETRAS (Electrical Thrust Reverse Actuation System), and describes the consideration which should pay attention to in the development phase, and provides some proposals for the future work.

[Key words] Thrust Reverse Set; Hydraulic Thrust Reverse Actuation System; Electrical Thrust Reverse Actuation System; Thrust Reverse Control Unit; FADEC

## 0 引言

反推力装置是大型民用客机发动机的重要组成部分,是大涵道比涡扇发动机常用的减速设备,是民用大型客机及大涵道比涡扇发动机研制的关键技术。高涵道比涡扇发动机采用冷气流反推力装置,即将外涵道堵塞迫使外涵道气流向斜前方喷出,产生反向推力。本文系统介绍了发动机反推力装置的出现、作用、工作原理以及研究进展等方面内容,针对反推力装置作动系统的技术特点阐述了其研制中应该注意的问题和考虑的因素,并介绍了其最新的发展趋势和方向<sup>[1]</sup>。

## 1 反推力装置的出现及作用

发动机反推力装置是从20世纪50年代开始发展起来的。其最初应用于军用飞机,目的是通过缩

短滑跑距离来提高飞机起飞和着陆的机动能力。随着飞机短距离起飞和降落(STOL)性能的提出,反推力装置得到了快速的发展。50年代末,在应用于军用飞机的同时,反推力装置开始应用于中、小型民用客机上。到20世纪70年代以后,反推力装置逐渐广泛地应用到大型民用客机上。这些飞机均采用涡喷或涡扇发动机作为动力装置,与之相适应的反推力装置不断发展,技术逐渐完善。目前,发动机反推力装置作为大型军用和民用运输机缩短着陆滑跑距离、增加飞机着陆控制安全性的必要手段得到了广泛应用<sup>[2]</sup>。

发动机反推力装置是用来改变发动机风扇气流方向以产生反向推力的装置。在飞机正常着陆时,可以缩短飞机在干燥和湿滑跑道上的着陆滑跑距离;反推力装置也可用于飞机应急着陆和终止起飞,但不能用于倒车。

## 2 液压反推力装置作动系统的工作原理

反推力装置的作动方式有气动式、液压式、机械式和电动式等。目前大部分现役飞机都采用液压反推力装置作动系统。

### 2.1 液压反推力装置作动系统构架

液压反推力装置作动系统是通过飞机液压系统提供液压源来驱动反推罩展开和收起,改变发动机气流方向从而产生反向推力的装置。单发一般采用2个半反推罩,包括4个作动筒、1个隔离控制阀、1个方向控制阀、1套同步作动杆及反推力释放管路,2套有锁作动筒和1个反推罩锁,以防止反推力装置失效打开,由飞机液压系统提供液压源,液压反推力装置作动系统架构图如图1所示<sup>[3]</sup>。所有作动筒连接到同步驱动柔性杆上,采用三道非指令防护,作动筒锁和手动驱动单元位置根据用户需要灵活设置。

每个半反推罩包含2个作动筒控制和1个线性可变位移传感器。液压作动系统包括4个液压同步作动筒(2个有锁作动筒和2个无锁作动筒)、1个液压控制器、2套同步手动驱动装置、附属的管路和连接装置。

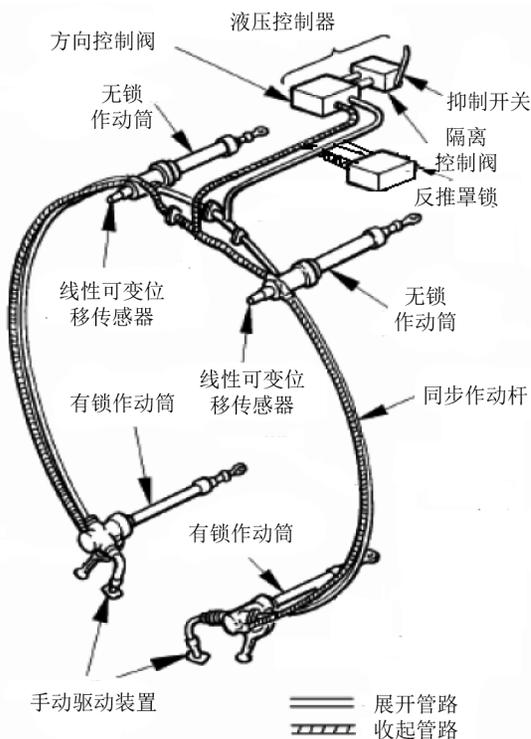


图1 液压反推力装置作动系统构架图

### 2.2 液压反推力装置作动系统控制原理

反推力装置控制系统由全权限数字电子控制器(FADEC)、油门台、发动机接口控制装置、数据控制单元、方向控制阀、隔离控制阀、反推罩锁和继电器组成。通过飞行员给油门台上的反推力杆指令,同时FADEC、发动机接口控制装置判断飞机满足作动要求后,控制作动系统按时序动作,反推罩按照指令打开或关闭。反推力装置控制系统控制反推罩打开时,作动筒驱动滑动整流罩内壁后移,挡住外涵道向后排出的气流,使之反向从叶栅排出产生反推力;反推罩关闭时,风扇气流向后排出,产生正推力,反推力装置示意图如图2所示。

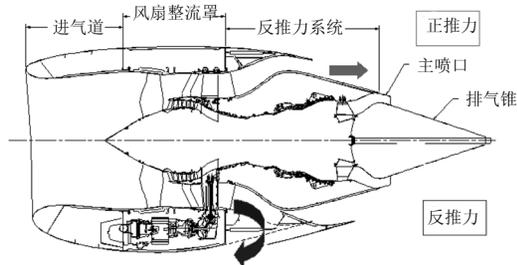


图2 反推力装置示意图

#### 2.2.1 反推力装置展开

反推力装置通过反推力杆指令,同时FADEC、发动机接口控制装置判断飞机满足作动要求后,控制作动系统打开反推罩。FADEC控制隔离控制阀、方向控制阀的电磁线圈;发动机接口控制装置控制反推罩锁的电磁线圈,控制原理如图3所示<sup>[4]</sup>。

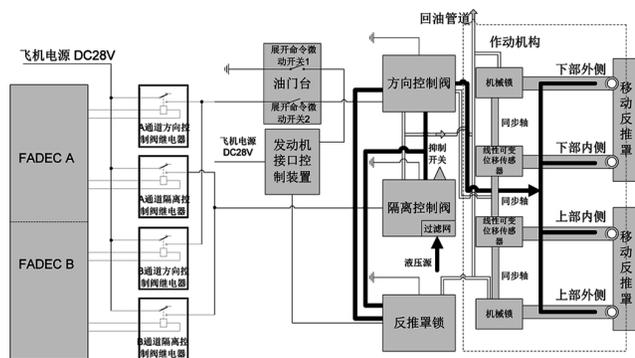


图3 液压反推力装置作动系统控制原理图

当向后拉起油门台上的反推力后,FADEC根据收到的反推力杆角度信号,将发动机功率控制到反推慢车功率,同时反推慢车位置的两个展开命令微动开关闭合,一个用于发动机接口控制装置控制反推罩锁,另一个用于FADEC控制方向控制阀。

飞机的发动机接口控制装置收到微动开关信号后,接通反推罩锁的电磁线圈打开油路。此时

FADEC 检测反推监控信号,当系统正常时,FADEC 控制隔离控制阀的电磁线圈打开高压供油油路。高压油通过隔离控制阀、方向控制阀到达反推罩锁,该锁在油压作用下开始打开。高压油通过隔离控制阀、方向控制阀到达反推力作动筒的收起腔,此时反推力装置处于过锁紧状态。同时,FADEC 控制方向控制阀的电磁线圈打开油路。

当反推罩锁打开后,高压油通过反推罩锁到达方向控制阀内作动筒的作动腔,方向控制阀内作动筒动作接通反推力作动筒展开腔的供油,此时反推力作动筒展开腔和收起腔均为高压油。在高压油作用下,反推力作动筒内的机械锁打开。机械锁打开后,由于反推力作动筒展开腔面积大于收起腔,所以在压差作用下反推力装置开始展开。线性可变位移传感器反馈展开位置信息,当反推展开大于 90% 时,FADEC 认为反推力装置完全展开,可保持当前的状态,允许相应增大反推力功率的指令。

FADEC 控制具有连锁功能,以防反推力意外打开。这个连锁是通过每发 FADEC 的 A、B 通道分别控制 4 个飞机继电器,实现对隔离控制阀、方向控制阀的电磁线圈的通电控制来完成的。隔离控制阀可中断液压源,方向控制阀可终止高压油流向作动筒。同时,如果反推力装置意外打开,FADEC 可控制发动机的推力保持在慢车状态,以减少对飞机安全的危害。每个 FADEC 通道同时经硬线或总线接收反推力装置内部液压作动筒线性可变位移传感器信号、作动筒开关状态信号及飞机传送的起落架系统轮载信号、反推力杆角度信号和轮速信号来判断其是否满足反推力装置工作要求。

### 2.2.2 反推力装置收起

反推力装置控制系统通过反推力杆指令,同时 FADEC、发动机接口控制装置判断飞机状态,满足作动要求后,控制反推罩关闭。

飞行员推反推力杆到正慢车,油门台上反推慢车位置的 2 个微动开关断开,FADEC 根据收到的油门杆角度信号将发动机功率控制到正慢车功率并控制方向控制阀的电磁线圈接通低压回油油路,造成从反推罩锁到达方向控制阀内作动筒作动腔的高压油接到低压回油油路,方向控制阀内作动筒动作返回并使反推力作动筒展开腔接通低压回油油路,此时反推力作动筒收起腔仍为高压油,在高压油作用下反推力作动筒开始收起。当线性可变位移传感器反馈处于收起位置,且反推展开小于 10%

时,FADEC 认为反推力装置完全收起。当反推力装置完全收起后,反推罩锁自动锁紧。

飞机的发动机接口控制装置收到触点开关断开信号后,延时控制反推罩锁的电磁线圈接通低压回油油路,使从隔离控制阀过来的高压油直接到回油油路,失去高压油作用的反推罩锁自动锁紧。

最后,FADEC 延时控制隔离控制阀的电磁线圈断开高压供油油路。

## 3 反推力装置的发展趋势

液压反推力装置作动系统技术成熟,正在被现役飞机广泛使用,但是该反推力装置由于包含液压管、液压油、各种接头和阀门等部件,维护不便;作动复杂且连接作动器效率低,在结构失效下及大载荷条件下有着固有限制。然而,电反推力装置作动系统可以有效解决这种问题。

### 3.1 电反推力装置作动系统构架

目前新一代某型宽体客机已采用电反推力装置作动系统,可解决液压反推力装置作动系统存在的问题。电反推力装置作动系统一般由反推控制器、FADEC、驱动装置、反推罩锁、机械作动筒和柔性连杆组成。4 个机械作动筒驱动反推罩,机械作动筒由驱动装置驱动。柔性杆连接四个机械作动筒以保证其作动的同步性。左下、右上方向的作动筒上安装有主锁装置,上部两个作动筒安装有线性可变位移传感器,用于探测作动筒的位置,并向 FADEC 反馈信号。整个电反推力装置作动系统的运行由 FADEC、反推控制器和发动机接口控制装置来控制 and 监控,电反推力装置作动系统架构如图 4 所示。

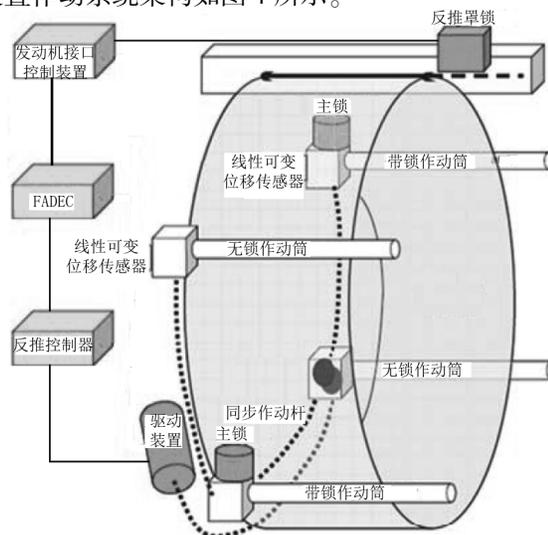


图 4 电反推力装置作动系统构架

### 3.2 电反推力装置作动系统控制原理

飞机着陆接触地面后,发动机接口控制装置执行内部逻辑判断反推力装置满足展开条件后发出指令至油门台微动开关1;当飞行员需要使用反推力装置时,将反推力杆移至反推力位置,微动开关1随之闭合,从而控制反推罩锁通电解锁。微动开关2随反推力杆移动闭合,向发动机接口控制装置发出展开反推的指令,发动机接口控制装置根据从航电综合处理器采集到的相关数据,执行内部逻辑判断,若满足反推力展开的设定条件,即控制接通飞机到反推控制器的交流115V电源。FADEC同时监控发动机接口控制装置、航电综合处理器、反推控制器和油门台的状态信号,并根据状态信息执行内部逻辑判断,若满足反推力展开的设定条件,则向反推控制器发出指令;反推控制器根据指令信号打开位于两个作动筒上的主锁,从而实现三道锁的全部解锁;同时向驱动装置供电,在驱动装置的作用下作动筒带动反推罩向后滑动展开。

反推力装置完全展开后,若飞行员将反推力杆移出反推力位置,FADEC通过对反推力杆角度的监控,收到反推关闭的指令并传至反推控制器,反推控制器控制反推作动系统作动收回反推罩,在确认反推罩完全收回后,FADEC向发动机接口控制装置发出指令将反推罩锁锁紧,控制原理图如图5所示。

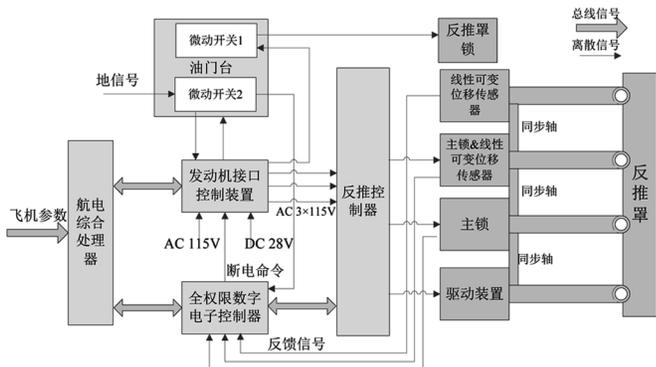


图5 电反推力装置作动系统控制原理图

### 3.3 电反推力装置作动系统关键问题

#### 3.3.1 安全性

根据设计要求和广泛的使用经验,液压反推力装置作动系统可以达到非常高的安全级别。液压反推力作动系统级别由反推力失效导致飞行安全的预计可以达到 $3 \times 10^{-18}$ 每飞行小时,远超过要求标准 $3 \times 10^{-13}$ 每飞行小时,而电反推力装置作动系统的安全级别略低,由反推失效导致飞行安全的预计达到 $3 \times 10^{-12}$ 每飞行小时。

#### 3.3.2 用电负荷及重量

电反推力装置作动系统通常的用电功率大约为20KVA,这对电源系统发电机的容量提出了新的要求,电源系统在设计初期需考虑发电机容量和重量的增加。同时,需考虑电反推力装置作动系统部件总重量与传统液压反推力装置作动系统部件总重量的变化,据初步计算电反推力装置作动系统总重量比液压反推力装置作动系统总重量轻。

#### 3.3.3 谐波干扰电网的考虑

电反推力装置作动系统一般采用飞机电网供电方式,然而,由于反推控制器内采用整流管和功率管开关等器件,均会产生较强的谐波干扰,会对飞机电网造成冲击,影响飞机电源系统的供电品质而不满足电源系统对用电设备的要求。因此,在设计初期需进行必要的仿真试验,可以采取增加反推控制器的整流级别或者采用专用发电机为电反推力装置作动系统供电,同时,需综合考虑重量和成本等因素。

## 4 总结

本文首先对民用飞机发动机反推力装置的出现、作用、工作原理以及最新的发展趋势进行了简要而系统的阐述。对传统的液压反推力装置作动系统和最近出现的电反推力装置作动系统的构架和控制原理进行权衡分析,针对反推力装置的技术特点阐述了其研制中应该注意的问题和考虑的因素,并对今后工作的开展提出了意见。本文分析的反推力装置都为在役飞机的反推力装置,这对我国民用飞机发动机反推力装置的设计具有一定的参考价值,也可供大涵道比涡扇发动机反推力装置的研制参考使用。

### 参考文献:

- [1] 蔡元虎,宋江涛,邓明.大型民机发动机的特点及关键技术[J].航空制造技术,2008(1):44-47.
- [2] 沙姜,徐惊雷.发动机反推力装置及其研究进展[C].中国航空学会2007年学术年会,2007,动力专题22:1-4.
- [3] 邵万仁,叶留增,沈锡钢,杨海,谢业平.反推力装置关键技术及技术途径初步探讨[C].中国航空学会2007年学术年会,2007,动力专题24:1-4.
- [4] 宋静波.波音737飞机动力装置:CFM56-3 & APU[M].广州:中山大学出版社,2008(8):167-169.