

# 起飞推力自动控制系统权衡分析

## Trade-off Analysis of ATTCS

■ 李登 / 中国航发商发

起飞推力自动控制系统 (ATTCS) 是否在民用客机上应用, 各国的技术路径大不相同。这种不同源于对发动机推力管理的理念不一致, 同时也与发动机的发展水平息息相关。

**起** 飞推力自动控制系统 (ATTCS) 是在起飞过程中能自动探测单发失效, 并自动增加起飞推力的系统。该系统在支线客机中已有成功的使用案例, 然而是否也可用于其他民航客机, 需要对飞机和发动机进行权衡分析。全面而系统的权衡分析, 可以帮助飞机在研制初期对该系统的使用进行科学决策。

### ATTCS的功能与架构

ATTCS是飞机起飞过程中使用的完整自动系统, 包括感受发动机失效、输送信号、驱动燃油调节器/功率杆、用工作发动机上的其他装置增加发动机功率以得到预期的推力/功率增量, 以及向驾驶舱提供系统工作信息的所有机械和电气装置。在飞机起飞或复飞阶段, ATTCS应能感知单发失效, 并发送指令使另一台正常工作的发动机增加推力。

ATTCS主要包括3个子系统, 如图1所示。第一个子系统为推进系统的全权限数字式电子控制 (FADEC) 系统, 用于探测单发失效和燃油控制; 第二个子系统为驾驶舱的指示系统, 用于指示 ATTCS 处于接通或准备状态, 并能提供一台发动机已经失效的充分警告; 第三个子系统为其他线缆或设备, 用于传输信号<sup>[1]</sup>。

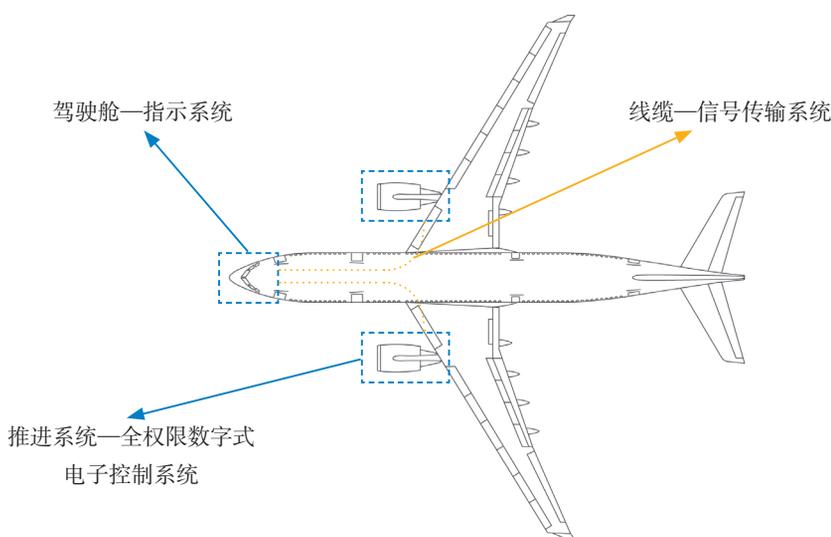


图1 ATTCS架构

### ATTCS应用案例

ARJ21飞机由CF34-10A发动机提供动力, 每台发动机都由FADEC系统单独控制, 且应用了ATTCS, 从表1可知, 当ATTCS激活时, 发动机的推力可以增加8% ~ 9%。

苏霍伊SSJ100系列飞机由SaM146发动机提供动力, 从表2可知, 当ATTCS激活时, 发动机的推力增加

了10% ~ 13%。

CN235-300飞机由CT7-9C3发动机提供动力, 当ATTCS激活时, 发动机的推力增加了大约7%。

### ATTCS性能分析

是否采用ATTCS, 对于发动机的推力等级设计是不一样的, 当前民用客机一般采用典型的等额定推力调

表1 CF34推力对比表

型号	CF34-10A	CF34-10E5
最大起飞推力/kN	77.4	83.6
正常起飞推力/kN	70.9	77.3

表2 SSJ100推力对比表

型号	1S15	1S17	1S18
最大起飞推力/kN	68.4	76.9	79.1
正常起飞推力/kN	60.0	68.4	71.6

节计划。

ATTCS的采用分两种情况：第一种情况是双发正常（AEO）起飞，此时发动机采取的是正常的功率提取和客舱引气；第二种情况是单发失效（OEI）起飞，此时发动机采取的是单发功率提取和客舱引气。对于采用ATTCS的推力等级设计，针对双发正常和单发失效，分别对应了两种不同的发动机推力等级，即正常起飞推力（NTO）和自动推力储备（APR）。在双发正常起飞状态，采用NTO推力等级，在单发失效起飞状态，ATTCS由FADEC系统激活，发动机自动进入APR推力等级。

当大气温度低于拐点温度时，APR和NTO为等额定推力，且APR大于NTO。发动机排气温度（EGT）随着大气温度的增加而升高。当大气温度高于拐点温度时，等额定推力调节计划限制了EGT，使之维持在某个特定温度水平而不再升高，且由于APR的推力大于NTO，导致APR下EGT高于NTO。基于以上的分析，如果采用了ATTCS，对于航线运行来说，绝大部分时间是双发正常起飞的场景，即发动机处于NTO推力等级，EGT较低，有益于延长发动机部件的使用寿命。只有在单发失效的场景下，发动机处于APR推力等级，此时推力和EGT才会提高。

当不采用ATTCS时，也分两种情况，包括AEO起飞和OEI起飞。对于AEO起飞和OEI起飞两种场景，唯一的区别是单发失效的情况下，正常工作的发动机承担了两台发动机所需提供的功率和客舱引气，这就导致了单发失效场景下的推力偏低。

由于单发失效起飞属于偶发事

故，概率极低，绝大多数时间属于双发正常起飞，所以后续的分析只考虑双发正常起飞这种场景。通过性能分析，如果采用ATTCS，推力会降低约9%，低压转子物理转速降低约90r/min，高压转子物理转速降低约220r/min，排气温度降低约56K。由此可见，采用ATTCS带来的收益是非常可观的。

### 发动机部件寿命影响

发动机旋转部件的使用寿命，主要受物理转速和温度这两个因素影响。根据航线的统计数据表明，温度越高热端部件的寿命消耗越快，且随着温度的升高，寿命消耗的速率呈指数级增长。

经分析，采用ATTCS的构型，风扇盘低周疲劳寿命增加约20%，高压压气机盘低周疲劳寿命增加约8%，涡轮盘低周疲劳寿命增加约20%，可见采用ATTCS可以显著提高风扇盘、高压压气机盘和涡轮盘的使用寿命。

### 适航取证分析

对于CCAR-33部发动机取证来说，是否采用ATTCS对于33.28条款的适航符合性工作没有影响。

对于CCAR-25部飞机取证来说，如果采用了ATTCS，需要开展额外的飞机CCAR-25部取证工作，并对发动机的可靠性和安全性设计提出更高的要求。直接相关的CCAR-25部适航规定包括以下部分：25.904 起飞推力自动控制系统及附录I起飞推力自动控制系统的安装。具体要求主要包括：在临界时间间隔内，ATTCS失效不应妨碍进入最大批准起飞推力或功率，或必须证明是不可能事件。ATTCS失效不应导致推力或功率的显著损失或减少，或必须证明是极不可能事件。此外，必须表明在临界时间间隔内ATTCS和发动机同时失效是极不可能的。起飞过程中在临界点发生一台发动机失效而ATTCS发挥作用的情况下，必须符合CCAR-25部所有适用的性能要求。

从以上可以看出，对于CCAR-

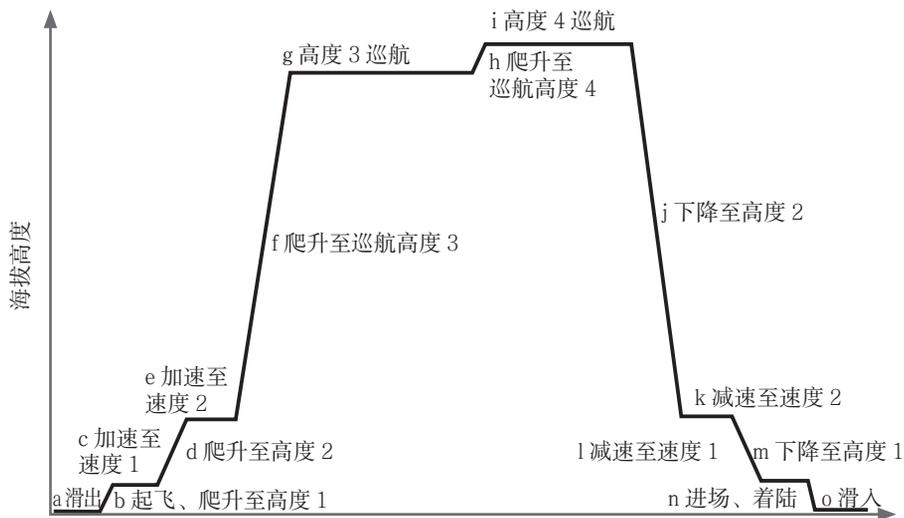


图2 典型的飞行剖面

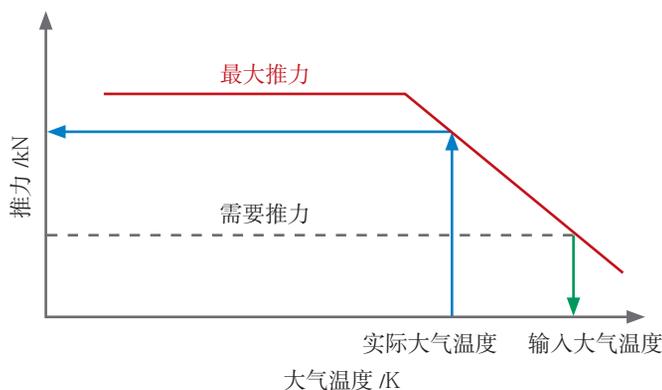


图3 灵活起飞发动机推力等级设计

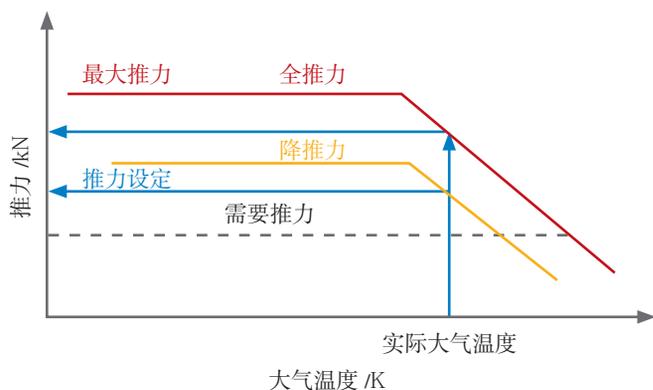


图4 降推力起飞发动机推力等级设计

25部飞机取证，采用ATTCS增加了飞机取证的工作量和难度，此外相关条款在民用客机上取证的经验缺乏以及相关航线运营数据的缺乏都会增加CCAR-25部取证的不确定性。

## 航线运营分析

采用ATTCS后，可以显著提高发动机部件的寿命，此外还可以降低航线运行和维护成本。基于发动机的成本分析量化模型，发动机制造厂商可以计算出由于起飞推力降低所带来的成本降低。

据统计，每飞行小时的发动机翻修成本大概为400~450美元，降低25%的推力能降低5%的翻修成本。总体而言，降低20%的推力可使航空公司的成本降低约10万美元。因此，考虑到采用ATTCS可以降低正常起飞推力约10%，如果成本分析模型以线性模型来预估，则每年能给航空公司降低约5万美元的成本。

对于不同类型的飞机，采用ATTCS的影响不同。不同类型飞机的飞行剖面不同，图2展示了一个典型的飞行剖面，总共15个飞行段，从飞行段a至飞行段o，其中b为起飞段。正常来说，从飞行段b起飞、

爬升过程持续时间约为2min。对于支线客机，整个飞行段为1~1.5h，飞行段b占整个飞行时间的2.2%~3.3%；对于干线窄体客机，整个飞行段为2~3h，占比约为1.5%；对于干线宽体客机，整个飞行段为7~10h，占比为0.3%~0.5%。可见，采用ATTCS所带来的收益，支线客机要比干线客机显著。此外，飞机制造厂商可以从飞机操纵性的角度，对于ATTCS进行权衡分析，包括起飞场长和航程等。

基于以上的分析，采用ATTCS可以通过降低起飞推力，从而减少发动机部件维护成本，增加发动机部件的可靠性和寿命，提升运行的安全性和效率。

在实际航线运行过程中，可以通过灵活起飞和降推力起飞两种方法降低正常起飞推力。基于CCAR-25部适航规定，这两种方法可以结合起来使用，最大的正常起飞推力可以降低25%左右。

对于灵活起飞来说，通常是通过输入一个比实际大气温度更高的假设温度，来降低正常起飞推力，具体如图3所示。对于降推力起飞来说，对于给定的大气温度，在起飞的时候，选择一个比最大起飞低，

但能满足正常起飞的推力等级，具体如图4所示。

基于以上的分析，灵活起飞和降推力起飞，以及两种方法的结合，都可以降低正常起飞推力，从而带来与采用ATTCS类似的收益。这些手段，都可以用来降低飞机运行的燃油消耗。

## 结束语

通过综合分析，采用ATTCS可以带来更低的排气温度，从而提高发动机部件寿命并降低运行维护成本。此外，在单发失效情况下的推力自动控制，可以减少飞行员的工作强度。但是，采用ATTCS同样增加了系统的复杂度和CCAR-25部飞机取证的成本和风险，采用ATTCS带来的收益，在实际的航线运行过程中，也可以通过灵活起飞和降推力起飞等方式达到。

航空动力

（李登，中国航发商发，工程师，主要从事民用航空发动机整机集成与验证）

## 参考文献

- [1] 王朝蓬,汪涛,马志平.某民用涡扇发动机抑制ATTCS触发逻辑验证[J].现代机械,2017(3):80-82.