

# 民用航空发动机增推起飞设计方法初探

## Discussion on Bump Rating Design of Civil Aero Engine

■ 曾涛 / 中国航发商发

增推起飞 (bump rating) 是通过牺牲发动机排气温度 (EGT) 裕度获取更大的推力, 并通过飞行员人工选择予以激活的额外起飞推力等级, 适用于特定的高原运行场景。增推起飞发动机在设计时须重点考虑性能方案和操控方案。

中国是世界范围内高原机场较多的国家之一, 因此, 高原运行成为国内民用航空器设计和运行必须考虑的问题。例如, CFM国际公司为中国商飞C919飞机提供的LEAP-1C发动机包括了C28、C30和C30B1等3种性能构型, 其中C30B1提供了增推起飞 (bump rating), 以支持C919飞机的高原运行需求。本文以国人民用飞机和航空发动机的设计经验为基础, 参考国外成熟方案, 给出民用航空发动机增推起飞的设计方法, 希望可以为有高原运行需求的发动机的研制提供一定参考。

### 增推起飞的需求来源 发动机高温高原运行分析

机场标高在1524 ~ 2438m的机场称为高原机场, 机场标高在2438m以上的机场称为高高原机场<sup>[1]</sup>。高原机场运行的典型特点之一是发动机推力衰减, 而在高温高原机场运行条件下发动机推力衰减尤为显著。典型的涵道比为10:1的干线飞机发动机起飞推力高度特性如图1所示, 温度特性如图2所示。标准天温度下, 1524m高度静态起飞推力衰减至海平面的95%, 2438m高度下衰减到海平面的86%。而高温条件下, 以热天 (ISA+40°C) 静态起飞状态为例, 2438m高度发动机推力进一

步衰减至海平面状态的72%。

高温高原条件下起飞推力的衰减, 使得民用飞机必须对起飞质量进行限制, 进而影响飞机载客量或者航程。但是, 在航线运营中常常出现针对高温高原条件的特定载客量和航程需求, 例如, 在夏季保证昆明至哈尔滨的满载运行。如何在高温高原条件下保证飞机的满载运行需求成为一个必须考虑的问题。

### 高原增推备选方案对比

在保持发动机基本构型的前提下, 增大高原状态起飞推力通常有两种解决方案: 第一种是高原型发动机, 提高发动机高原状态的排气温度 (EGT) 限制, 从而获得更大

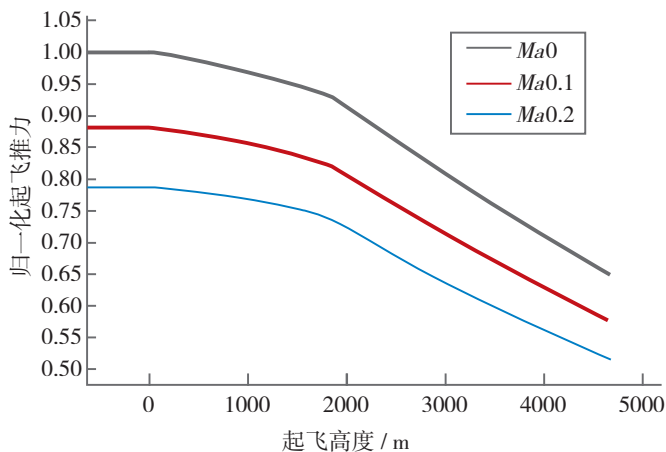


图1 典型干线飞机发动机起飞推力高度特性

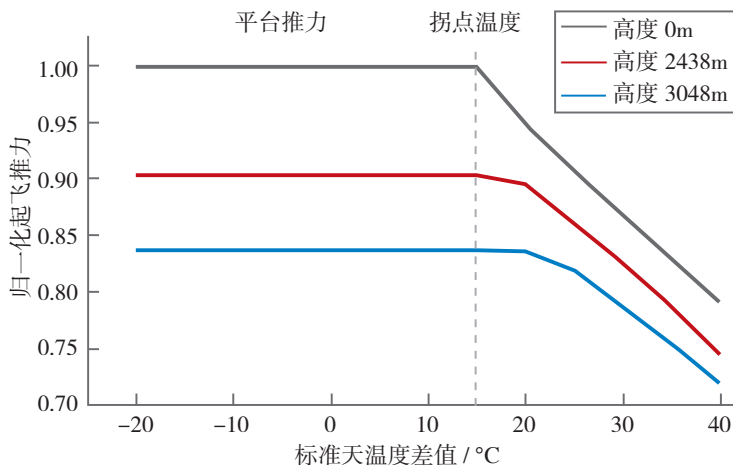


图2 典型干线飞机发动机起飞推力温度特性

发动机推力；第二种是增推起飞发动机，发动机正常起飞推力保持不变，额外设计一个具备更大起飞推力的增推起飞等级，日常运行采用正常起飞推力，在特定飞行需求（环境温度、起飞质量）下，由飞行员人工激活增推起飞，实现更大起飞推力。

高原型发动机与增推起飞发动机的性能调整思路并无本质不同，都是通过牺牲EGT换取更大推力，但二者之间的差异有两点：一是发动机默认运行功率，高原型发动机的默认运行功率高于增推起飞发动机；二是飞行员的操作，增推起飞发动机存在正常起飞和增推起飞两种起飞推力，飞行员须操作激活增推起飞。

高原型发动机飞行操作简单，但日常运行在较高EGT水平，导致经济性下降；增推起飞发动机采用较低的起飞推力作为基线功率，仅在特定状态下采用增推起飞，运行经济性优于高原型发动机，但须飞行员额外操作导致系统复杂度较高。综合考虑经济性和飞行员操作负担两个因素，高原型发动机方案适用于长期运行在高原航线的飞机；而增推起飞发动机适用于兼顾高原航线和平原航线且仅需在少数状态下采用更高起飞推力的飞机。

综合以上，增推起飞可定义为

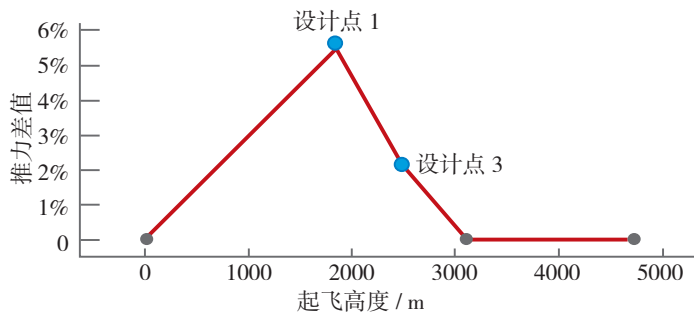


图4 推力差值高度特性曲线 (Ma 0)

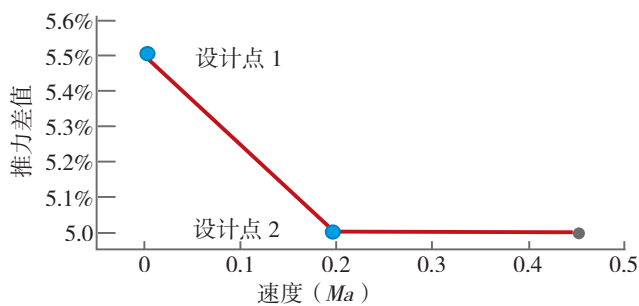


图5 推力差值速度特性曲线 (高度1829m)

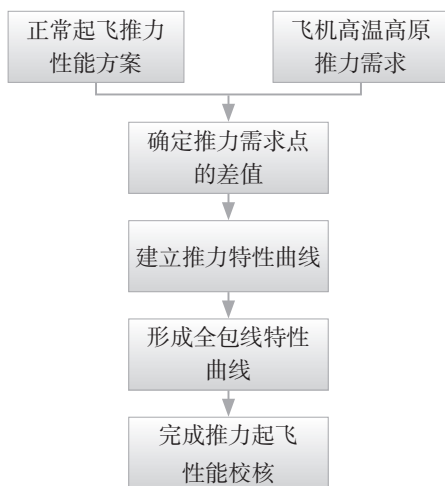


图3 增推起飞性能方案设计流程

一种通过牺牲发动机EGT裕度获取更大的推力并通过飞行员人工选择予以激活的额外起飞推力等级，因此增推起飞的设计应包括性能方案和操控方案两方面的考虑。

### 增推起飞性能方案设计 基于飞机需求的增推起飞性能 设计流程

增推起飞作为一种额外的起飞

推力等级，其性能方案应在正常起飞推力的基础上对标飞机需求开展设计。因此，增推起飞的性能设计思路是基于飞机需求和发动机正常起飞推力在设计点的差值来建立特性曲线，而后通过特性曲线的联合求解得到全包线范围内增推起飞与正常起飞推力的差值，最终在正常起飞推力基础上叠加大差值得到全包线的增推起飞性能方案，具体流程如图3所示。

#### 增推起飞性能设计实例

假定飞机高温高原推力需求和发动机正常起飞推力数据如表1所示，飞机推力需求高于发动机正常起飞推力能力，推力差值在2.2% ~ 5.5%之间。

基于表1数据建立高度特性线如图4所示，建立高度特性线目的是确定增推起飞与正常起飞在全高度范围内的推力差异特性。须针对不同速度分别建立单独的高度特性曲线。不同高度间采用线性假设，

表1 飞机高温高原需求和发动机正常起飞推力对比

设计点	高度/m	环境温度/°C	速度 (Ma)	正常起飞推力/kN	高温高原推力/kN	推力差值
1	1829	ISA+25	0	120.0	126.0	5.5%
2	1829	ISA+25	0.2	93.4	98.0	5.0%
3	2438	ISA+25	0	115.6	118.1	2.2%
4	2438	ISA+25	0.2	88.9	91.3	2.7%

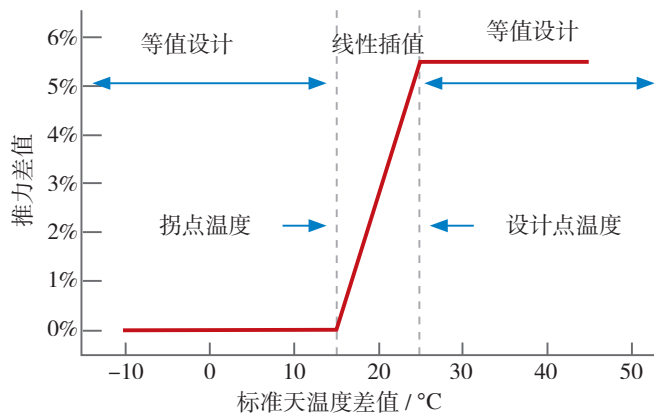


图6 推力差值温度特性曲线 (1828m, Ma0)

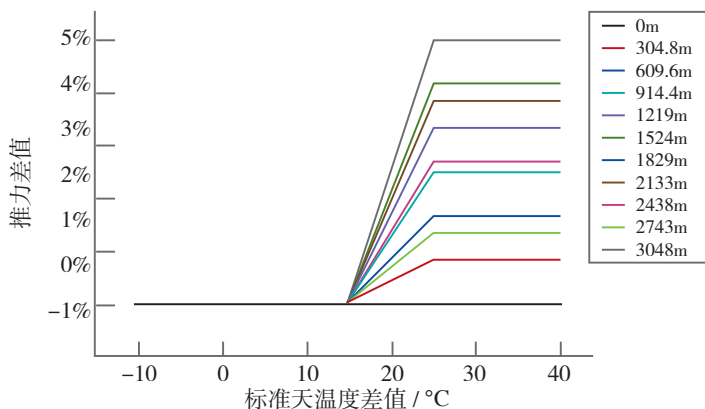


图7 Ma0状态下增推起飞与正常起飞推力全包线差值特性

图4同时标出了与表1中设计点的对应关系。

基于表1数据建立速度特性曲线,确定增推起飞与正常起飞在全速度范围内的差异特性,如图5所示。针对不同高度需分别建立单独的速度特性曲线。通常,在不同设计点间取线性内插,设计点范围外采用等值外插。

基于表1数据建立温度特性曲线,确定增推起飞与正常起飞在全温度范围内的差异特性,如图6所示。对于拐点温度和设计点温度之间的区域,采用线性插值;对于低于拐点温度的区域和高于设计点温度的区域,采用等值外插。

将高度、速度、温度3种特性曲线联合求解进行线性插值,即可得到增推起飞与正常起飞在包线内任意高度、速度、温度条件下的推力差值。基于表1数据及形成的特性曲线,可得到Ma0状态下增推起飞与正常起飞推力全包线差值特性,如图7所示。

利用差值特性和正常起飞推力基准值,即可得到全包线范围内任一状态的增推起飞的推力值。而后基于增推起飞推力值进行发动机性能方案校核,即可得到最终的增推

起飞性能方案。

### 增推起飞操控方案设计

对于增推起飞发动机,同时存在正常起飞和增推起飞两种起飞功率。为了实现增推起飞可靠、便捷的激活,其操控方案有硬按钮和软按钮两种。

硬按钮方案是指通过设置在油门台上的硬按钮进行手动激活,每台发动机由独立的激活按钮进行控制。为了防止误操作,通常在硬按钮上增加一个保护装置。目前A320和A330采用了硬按钮的方案。

软按钮方案是指在飞行管理计算机或者其他系统上设置软件控制开关,由飞行员通过一定操作激活增推起飞。在专利《用于控制飞机的额外起飞推力的方法和装置》中,给出了一种通过软件按钮实现的增推起飞激活方案<sup>[2]</sup>。

硬按钮操作便利,但需要对油门台进行改装,引入按钮硬件和信号线,导致系统质量的增加。软按钮方案虽不会增加质量,但相对于硬按钮,飞行员操作时间长。基于以上特点,在设计中可根据质量和使用场景需求综合选择操控方案。一般而言,硬按钮方案适用于空中紧急使用增推起飞的场景,软按钮

方案适用于在起飞前进行推力设定且无须在空中紧急使用的场景。

### 结束语

增推起飞是一种在正常起飞推力等级之外额外增加的可选起飞推力等级,是高温高原推力问题的典型解决方案。由于其经济性的优势,增推起飞适用于兼顾高原和平原运行场景的民用飞机。本文对增推起飞的性能方案和操控方案设计方法进行了阐述,而增推起飞对发动机寿命影响的换算关系、增推起飞的试验验证方法、增推起飞对运行安全性的影响等仍须进一步细化。希望随着国产民用航空发动机和飞机项目的研发进展,最终形成完整的增推起飞设计、验证与评估体系。

航空动力

(曾涛,中国航发商发,高级工程师,主要从事飞发一体化和发动机集成设计研究)

### 参考文献

- [1] 孙宏,赵庆伟,魏坤鹏.高高原机场复飞限重计算方法研究[J].民航学报,2019,3(06):12-14.
- [2] 曾涛,戚学锋,王鹏,等.用于控制飞机的额外起飞推力的方法和装置:CN103057711B[P].2012-12-04.