

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2018.01.022

# 机场条件对民机起飞性能影响规律初探

## An Exploration About Influence of Airport Condition to Airliner's Takeoff Performance

张陈力子<sup>1</sup> 田永亮<sup>1</sup> 张 帅<sup>2</sup> / ZHANG Chenlizi TIAN Yongliang ZHANG Shuai

(1. 上海飞机设计研究院, 上海 201210; 2. 北京民用飞机技术研究中心, 北京 102209)

(1. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China;

2. Beijing Aircraft Science and Technology Research Institute, Beijing 102209, China)

### 摘 要:

为了研究机场海拔、温度及跑道污染对大型民航运输机起飞性能的影响规律,采用理论分析结合模型计算的方法,回归统计出机场条件对起飞场长的影响规律。首先,介绍并分析了起飞性能的影响要素(机场高度、温度、跑道条件、发动机推力、增升装置)及其影响关系;其次,建立了自动满足适航要求的民机起飞性能计算模型;再次,利用该模型计算不同机场条件下飞机起飞性能;最后,将结果分析归纳总结成图表,为飞机设计及运营人员提供参考。

**关键词:** 起飞性能; 机场高度; 机场温度; 跑道污染; 起飞场长

**中图分类号:** V35

**文献标识码:** A

[Abstract] In order to study the influence of altitude, temperature and runway contamination on takeoff performance of large civil aircrafts, theoretic analysis as well as model calculation was used to deduce the relationship between airport condition and takeoff field length. Firstly, several main factors were introduced and analyzed, which were airport altitude, temperature, runway condition, SLST (sea level static thrust) and high lift device. Secondly, a calculation model which can automatically satisfy the airworthiness requirement of airliner takeoff was developed. Thirdly, takeoff performance at different airport conditions was calculated with this model. Finally, the data was summarized and several types of charts were provided as reference for aircraft designers and operators.

[Keywords] takeoff performance; airport altitude; airport temperature; runway contamination; takeoff field length

## 0 引言

飞机起飞过程是影响民机安全的至关重要的环节,机场海拔、机场温度、跑道条件对起飞性能均有很大影响。高海拔处空气稀薄,同样转速下发动机推力较平原有所下降。以运7飞机为例,起飞重量20 t时,海平面起飞距离不到500 m,而在海拔4 000 m时需1 500 m<sup>[1]</sup>。在中国,海拔1 500 m以上的地区占国土面积的1/3,其中有8座机场的海拔位于世界前10<sup>[2]</sup>。高温也会影响发动机推力,对高海拔机场影响更甚。中国大部分地域夏季炎热,高温严重影响飞机起降性能。西宁曹家堡机场(海拔高度2 179 m)自1992年开航至2008年,共出现

了160天极端高温天气,数次出现因高温导致的航班延误<sup>[2]</sup>。跑道遭受污染等特殊情况时,也会引起额外的阻力并降低刹车性能进而影响起飞平衡场长。

因此,有必要研究机场条件影响民机起飞的成因,并通过精确的计算模型定量分析并总结这些因素单独或综合作用下,对起飞性能的影响规律,为民机设计和运营提供参考。

## 1 起飞相关因素

从运营角度分析,受机场高度、温度、跑道污染的影响,飞机发动机推力、刹车装置效率产生变化,导致起飞距离和二阶段爬升梯度的变化,为了满足单发失效二阶段爬升适航要求,有时需要改变增升

装置偏转角。本节将介绍这些因素,并阐述它们之间的影响关系。

### 1.1 机场高度

随着机场海拔高度的增加,大气密度和压力降低。密度下降导致进入发动机的空气流量减小;压力下降导致发动机各截面压力降低。这些因素共同导致发动机推力下降<sup>[3]</sup>。

### 1.2 机场温度

当大气温度增加时,空气密度降低,进而导致空气流量降低。此外空气更难压缩,发动机增压比降低,涡轮进出口温差减小,尾喷口气体动能降低。这些因素共同导致推力下降。

### 1.3 跑道污染

根据 CAAC(Civil Aviation Administration of China,中国民用航空局)的定义,污染跑道是指飞机起降需用距离的表面可用部分的长和宽内超过 25% 的面积被超过 3 mm 深的积水或者被当量厚度超过 3 mm 水深的积雪、湿雪、干雪或者压紧的雪和冰等污染物污染的跑道。污染物分为液体和硬质污染物。前者包括积水、融雪等,后者包括干雪、冰等。污染物不仅使得刹车时摩擦力减小,而且液体污染物还会增大滑跑阻力导致起飞场长增加。本文忽略污染物对飞机方向控制性能的影响和滑水对飞机造成的影响,将重点讨论摩擦力减小和阻力增加带来的影响。污染物类型和滑动摩擦系数的关系见表 1<sup>[4]</sup>。

表 1 污染物类型及摩擦系数

污染物类型	厚度 /mm	阻力是否增加	摩擦系数	
液体污染物	积水	3~15	是	
	融雪	3~15	是	
	湿雪	5~30	是	0.17
	干雪	10~130	是	0.17
硬质污染物	湿雪	小于5	否	0.17
	干雪	小于10	否	0.17
	实雪	0	否	0.20
	冰	0	否	0.05

$$\mu = -0.0632(v/100)^3 + 0.2683(v/100)^2 - 0.432(v/100) + 0.3485 \quad (1)$$

其中,速度  $v$  的单位为 kn。

### 1.4 发动机推力

高涵道涡扇发动机因其优秀的高亚音速经济性、大推力、可靠性,广泛应用于民机。发动机起飞推力是影响起飞过程最直接的因素,推力越大,产生的加速度越大,达到离地速度所需的距离就越短。单发失效时,大推力的发动机能够产生更大的爬升梯度。所以推力越大对起飞越有利。

### 1.5 增升装置

增升装置对提升起飞性能有重要影响,是新一代民用运输机提高起飞重量、缩短起飞距离、增强机场适应性的关键。前缘增升装置主要采用缝翼和前缘下垂,打开后可以增大失速迎角,以更大的迎角产生更大的升力,工作位固定不能连续调节。后缘增升装置依据缝的个数及是否后退可以分为多种类型,目前,后缘增升装置设计朝着简单高效的方向发展。后缘襟翼偏角连续可调,起飞状态下通常设为 15°~20°,超过 20°襟翼产生的阻力往往会使起飞距离增加。

如果飞机在高海拔机场或高温下运营,发动机推力下降,为降低气动阻力,不得不减小襟翼偏角以满足爬升梯度要求,但这会导致起飞场长的增大。如果将襟翼偏角设为 0 仍然不能满足,则需要延迟抬前轮,机场将付出更多的场长代价,以满足起飞要求。

## 2 计算模型

为了准确分析机场条件对飞机起飞性能的影响,本文建立了详细的满足基本适航规定的民机起飞计算模型<sup>[5]</sup>。改变模型中的机场条件参数,可研究其对性能指标的影响。本节首先简要叙述性能模型计算的指标和采用的方法,并将重点介绍污染物所引起阻力的计算方法。

### 2.1 起飞过程

完整的起飞过程包括起飞场道阶段和起飞航道阶段,前者为飞机从地面静止至起飞安全高度,后者为起飞安全高度至 457.2 m(1 500ft)上空。本文的分析针对前一阶段。

### 2.2 性能指标

起飞性能指标包括起飞场长(TFL)、平衡场长(BFL)、单发失效二阶段爬升梯度(2nd Grad)、起飞失速速度( $v_{stall}$ )、决断速度( $v_1$ )、单发失效安全高度速度( $v_2$ )、全发安全高度速度( $v_3$ )等。起飞场长是

指平衡场长和 1.15 倍全发起飞距离中更大的一个。达到决断速度  $v_1$  时单发失效,继续起飞和中断起飞所需的长度相等,此时对应的总距离为平衡场长。极限的二阶段爬升梯度是指,在起飞安全高度,增升装置位于起飞位置,起落架收起,最外侧的一台发动机失效,脱离地效影响,速度不小于  $v_2$  ( $v_2$  不小于 1.2 倍起飞失速速度) 时的最大爬升梯度。CCAR25 规定,此时的爬升梯度不能小于 2.4% (双发) 或 2.7% (三发) 或 3% (四发)。

从设计和运营角度,希望在满足二阶段爬升梯度要求的同时,起飞场长尽量小。起飞场长是反映起飞性能最直观和全面的参数,故本文选取该指标作为分析比较的对象。

### 2.3 计算方法

起飞性能相对于其它性能更难计算,它是一个变化很快的动态过程,低速气动特性难以预测,飞行员的驾驶技术对起飞影响也很大。起飞性能的计算主要有两种方法,经验公式法和步长积分法<sup>[6]</sup>。前者根据统计公式求解,快速简便但精度不高。后者将整个过程分为很多小段,对每一段的各状态量分别求解然后累加,这种方法更能反映真实物理过程,精度更高。步长积分法在分析起飞过程中很复杂的阶段时仍然需要采用近似方法,例如抬前轮过程、离地过程等。

本模型采用步长积分法<sup>[5]</sup>,从飞机静止,针对每一个小时间段,分别计算推力、气动特性、地面支持力、摩擦力、速度、距离,然后累加得到总结果。抬前轮过程的阻力和速度变化复杂并且受飞行员技术影响,分析模型假设该阶段速度不变。单发失效的情形,该速度取  $v_2$ ,全发起飞的情形,该速度取  $v_2 \sim v_3$  的中间值。从地面到安全高度的航迹采用圆弧近似,单发失效的情形,载荷系数取 0.2 g;全发起飞的情形,载荷系数取 0.4 g。

为了准确体现大气环境对发动机的影响,推力的计算采用基于部件级热循环的发动机分析模型,根据各个部件特性,选定发动机的控制方案,给定飞行条件和发动机工作状态,按照各部件共同工作关系确定工作点,计算出发动机特性。

### 2.4 液体污染物引起的阻力

污染物会导致飞机起飞时阻力增加,包括位移阻力和飞溅冲击阻力。位移阻力是由于轮胎滚过污染物并通过使污染物向侧面和前方发生位移做

功而产生的阻力;飞溅冲击阻力是因轮胎将液体飞溅至机身而产生的阻力<sup>[7]</sup>。

#### 2.4.1 位移阻力的计算

当污染物为液体或硬质时,引起的阻力不尽相同,为此本文分别建立了阻力模型<sup>[8]</sup>。

##### 1) 液体污染物

液体污染物引起的单个轮胎的位移阻力如式(2),多个轮胎的位移阻力之和近似等于单个阻力累加。

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho v^2 b d \quad (2)$$

其中,  $\rho$  为污染物的密度,  $v$  为地速,  $b$  为污染物表面上的有效轮胎宽度,  $d$  为污染物厚度,单位均为国际标准单位。  $C_D$  的系数与速度的关系如图 1 所示<sup>[9]</sup>。

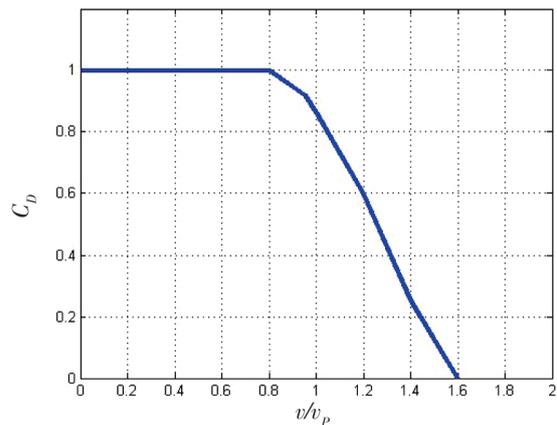


图1 速度对阻力系数的影响

##### 2) 硬质污染物

硬质污染物引起的单个轮胎的总位移阻力计算公式为式(3),多个轮胎的位移阻力之和近似等于单个阻力累加。

$$D = D_C + D_D \quad (3)$$

$D_C$  为雪受轮胎压缩产生的阻力,  $D_D$  为雪粒在垂直方向发生位移所产生的阻力<sup>[10]</sup>。

$$D_C = 74\ 000 b d \quad (4)$$

$$D_D = (56/R + 9/d) b d^2 v^2 \quad (5)$$

$d$  为雪的厚度,  $b$  为表面的轮胎宽度,  $v$  为地速,  $R$  为轮胎半径,单位均为国际标准单位。

#### 2.4.2 冲击阻力的计算

污染物为积水、融雪和湿雪时,飞溅冲击阻力  $C_{D,spray}$  可参考 EASA 的统计经验如式(6),污染物为

雪花时,飞溅冲击阻力可忽略不计,因为雪花的速度和密度都很小。

$$C_{D,spray} = 0.02L \quad (6)$$

其中  $L$  为水花顶部到达机身底部高度时的接触位置点之后的浸湿机身长度,单位为 m。

### 3 分析结果

以某双发机型为例,选取不同机场海拔、温度、跑道条件,分别计算起飞场长。整理归纳出机场海拔、温度、污染物对起飞场长的影响规律,其中为了保证对比的科学性,需要控制单发失效二阶段爬升梯度不变。

#### 3.1 襟翼偏角设置

为了保证对比的科学性,进行单次起飞分析时,选取最优的起飞襟翼偏角,使单发失效二阶段爬升梯度正好满足适航规定。某型飞机在特定起飞重量下的 2nd Grad 随襟翼偏角变化如图 2 所示,那么最佳起飞襟翼偏角即为  $18^\circ$  左右。

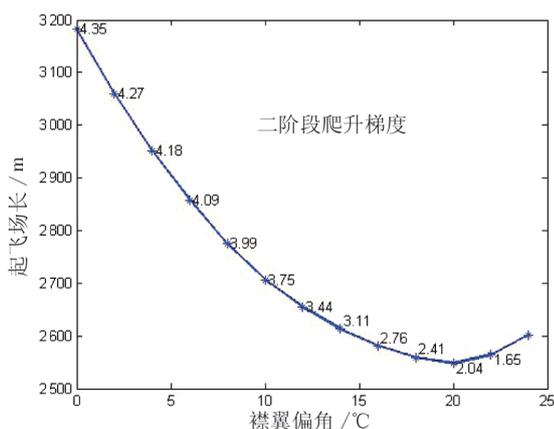


图 2 某型飞机不同襟翼偏角下的起飞场长和二阶段爬升梯度

#### 3.2 起飞场长计算结果

选取某双通道客机为算例(主要参数如表 2 所示),将机型参数代入本文第二节所述的民航起飞计算模型,采用步长积分法,对起飞过程进行仿真,得到起飞平衡场长等起飞性能数据。随后,通过循环改变机场海拔、温度、跑道污染物种类、污染物厚度等起飞条件参数,得到起飞场长的变化,形成场长矩阵,继而由这些数据挖掘出机场条件对场长的影响规律。例如当机场高度在  $0 \sim 2\,500\text{ m}$ , 温度在  $\text{ISA} - 35^\circ\text{C} \sim \text{ISA} + 35^\circ\text{C}$  时,起飞场长的变化见

表 3。

表 2 某双通道客机机型主要参数

参数名	参数值	单位
座位数	315	-
机身长度	66.8	m
翼展	64.7	m
机翼面积	440	$\text{m}^2$
1/4 弦线后掠角	35	deg
机身直径	5.96	m
最大起飞重量	268	t

表 3 某双通道客机起飞场长随高度和温度的变化

H	ISA				
	-35	-30	...	+25	+30
0	2 176	2 214	...	2 907	3 118
500	2 382	2 425	...	3 211	3 457
1 000	2 619	2 667	...	3 567	3 964
1 500	2 910	2 958	...	4 109	*
2 000	3 237	3 298	...	*	*
2 500	3 802	3 870	...	*	*

注: \* 表示无法满足爬升梯度要求

#### 3.3 机场高度和温度对起飞场长的影响

由计算数据统计可得机场高度和温度共同作用下起飞场长相对标准场长的变化比例如图 3 所示,标准场长选取海平面标准温度对应的起飞场长。可注意到,在温度达到  $\text{ISA} + 15^\circ\text{C}$  时,温度的影响作用突然变大,这主要是因为发动机推力在温度小于  $\text{ISA} + 15^\circ\text{C}$  前变化平缓,当温度大于  $\text{ISA} + 15^\circ\text{C}$  后,推力下降变快。该表可用于飞机总体设计或运营人员初步估计在非标准起飞条件下的起飞场长。

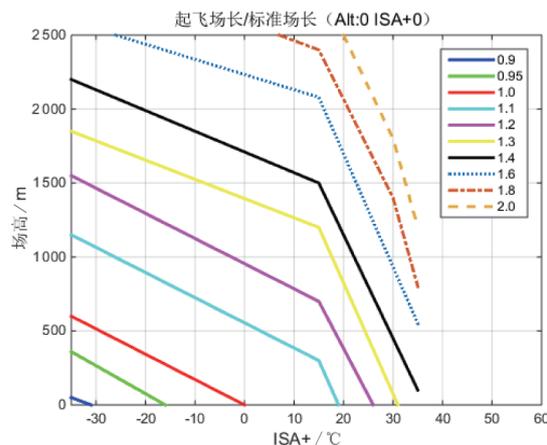


图 3 场高和温度对客机起飞场长的影响

### 3.4 液体污染物的影响

跑道污染分为液体污染物和硬质污染物。前者对起飞的影响随污染物的厚度而变化,但后者没有这种变化。液体污染物对起飞场长的放大比例系数如图4所示。起飞场长与污染物的厚度呈线性关系。

由于不同的液体污染物厚度变化范围不同,为了将各类污染物的图线绘制在统一的横坐标下,不同污染物采用了不同的“单位厚度”。计算时选取的污染物比重(即密度)在图中有所标注,实际情况下,如果污染物比重有所变化,相应的起飞场长近似呈等比例变化。

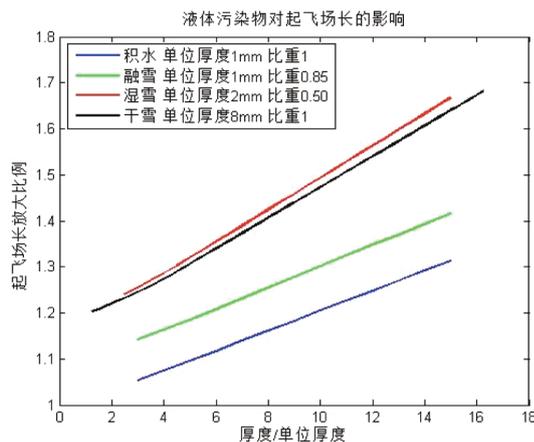


图4 液体污染物对起飞场长的影响

### 3.5 固态污染物的影响

固态污染物对起飞时的阻力几乎没有影响,主要通过影响刹车摩擦系数进而影响起飞场长。对于不同的固态污染物,对起飞场长的放大比例如表4所示。可见,冰对起飞的影响是十分明显的。此外,在有冰的跑道上起飞难以操作前轮转向,加剧了起飞的危险。

表4 固态污染物对起飞场长的影响

固态污染物种类	起飞场长放大倍数
湿雪	1.24
干雪	1.22
实雪	1.20
冰	1.42

## 4 结论

本文分析了对起飞性能有重要影响的因素,利用性能程序定量地计算和统计机场条件对起飞场长的影响规律。

上述过程表明:

1) 对于海拔超过1 500 m的高原机场,如再遇上ISA +15 °C以上高温,将严重降低飞机的起飞性能,应采取减小起飞重量等措施;

2) 液体污染物对起飞性能的影响与厚度相关,少量积水影响不大,但当液体污染物厚度增大后,影响程度呈线性变化;

3) 在各类硬质污染物中,由于冰对刹车效能的影响,导致其对起飞性能影响最大。

### 参考文献:

- [1] 张志刚,王百争,王和平. MA60飞机高原机场起飞性能研究[J]. 飞行力学,2006,24(4): 65-69.
- [2] 蔡良才,王海服,朱占卿,种小雷. 高原机场飞机起滑跑距离计算方法[J]. 交通运输工程学报,2013,13(2): 66-71.
- [3] 刘志有,侯敏杰,马前容. 高度对航空发动机地面试验性能的影响[J]. 航空动力学报,2006,21(2): 381-384.
- [4] KIHILGREN. Rolling Resistance of Aircraft Tires in Dry Snow [M/OL]. Sweden, 1997 [2017-01-03] <https://trid.trb.org>.
- [5] 张陈力子,祝雯生,余雄庆. 民机概念设计阶段性能分析程序快速开发方法[J]. 民用飞机设计与研究,2016(1): 28-31.
- [6] 柳子栋,詹浩,邓阳平. 跑道特性对飞机起飞性能影响的仿真研究[J]. 航空计算技术,2010,40(3):41-43+47.
- [7] 霍志勤,韩松臣. 基于案例推理和规则推理融合的跑道侵入事件调查[J]. 中国安全科学学报,2012,22(07):53-58.
- [8] 鲁素芬,张磊. 污染跑道上的起飞着陆性能计算研究[J]. 民用飞机设计与研究,2012(4):15-18.
- [9] THOMPSON W E. Measurements and Power Spectra of Runway Roughness at Airport in Countries of the North Atlantic Treaty Organization; NACA-TN-4303 [R]. National Advisory Committee for Aeronautics, 1958.
- [10] ES G W H V. Method for Predicting the Rolling Resistance of Aircraft Tires in Dry Snow [J]. Journal of Aircraft,1999, 36(5):762-768.

### 作者简介

张陈力子 男,硕士,工程师。主要研究方向:民机总体设计;E-mail: clz\_zhang@sina.com

田永亮 男,博士,高级工程师。主要研究方向:飞机性能分析;E-mail: tianyongliang@comac.cc

张帅 男,博士,高级工程师。主要研究方向:飞机总体综合设计与分析;E-mail: zhangshuai@comac.cc