

# 污染跑道上的起飞着陆性能 计算研究

## Study of Takeoff and Landing Performance Calculation on Contaminated Runway

鲁素芬 张 磊 / Lu Sufen Zhang Lei

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

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

### 摘 要:

为保证飞行安全,对污染跑道上飞机起飞着陆性能进行研究具有十分重要的意义。目前,相关规章还没有对污染跑道上的起飞着陆性能要求进行明确规定,但是几乎所有的飞机制造商都提供了在污染跑道下飞机起降的性能数据。通过对 FAA、EASA 和 CAAC 的规章以及相关资料的研究,整理了用于污染跑道上飞机起降性能的计算方法,对性能分析工作具有一定的指导意义。

**关键词:**污染跑道;起飞性能;着陆性能

[Abstract] The study of takeoff and landing performance on contaminated runway is of great significance for safe flight. However, there is no relevant requirement for this aspect in current regulations, but most of the aircraft manufacture provides the performance data on contaminated runway. This paper clears up methods for takeoff and landing performance calculation on contaminated runway based on the study of FAA、EASA、CAAC regulations and related papers, and provides guidance for aircraft performance design.

[Key words] Contaminated Runway; Takeoff Performance; Landing Performance

## 0 引言

根据波音公司对 2001 年到 2010 年之间发生的世界商用喷气式飞机灾难事故结果的统计,飞机在起飞和进近着陆阶段发生的事故占有事故的一半以上,其中起飞和初始爬升阶段占 17%,最终进近和着陆阶段则高达 36%,而在起飞着陆阶段发生的事故中,接近 52% 的事故是冲出或偏出跑道<sup>[1]</sup>,发生此类事故的一个重要原因与湿跑道和污染跑道有关。因此,为保证飞行安全,对污染跑道上飞机起飞着陆性能进行研究具有十分重要的意义。本文通过对 FAA、EASA 和 CAAC 的规章以及相关文献资料进行研究,整理了用于污染跑道上起降性能的计算方法,为污染跑道的起降性能计算提供支持。

## 1 污染跑道和污染物的定义

目前,FAA 规章中对污染跑道还没有明确要

求,在 AC 91-6A 中对在有积水、融雪和雪的跑道上运营的飞机提供了指导意见,并且不允许在深度超过 0.5in(13mm)的上述跑道上起飞<sup>[2]</sup>。在 AC 25-13 中则有污染跑道的明确定义。

而 EASA 则在 CS25 AMC25.1591 中明确规定了污染跑道和污染物的定义,规定应在飞行手册中给出飞机在污染跑道上运行的性能数据和机组操作程序,并提供了污染跑道上的起飞着陆性能的计算方法<sup>[3]</sup>。

CAAC 在“航空承运人湿跑道和污染跑道运行管理规定”(AC-121-FS-2009-33)中也明确规定了污染跑道的定义,提供了污染跑道上着陆性能的计算方法,并且规定在跑道表面有超过 13mm(0.5in)(含)深的积水或当量厚度的其他污染物时禁止飞机起降<sup>[4]</sup>。

根据 CAAC 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

(单块或多块区域之和)被超过 3mm(0.118in)深的积水,或者被当量厚度超过 3mm(0.118in)水深的融雪、湿雪、干雪,或者压紧的雪和冰(包括湿冰)等污染物污染的跑道。而 FAA 和 EASA 的定义则有少许差别,即污染跑道是飞机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 3.2mm(0.125in)深的积水或融雪,或者雪或冰的聚集等覆盖的跑道。三者都认为如果跑道的重要区域,包括起飞滑跑的高速段或起飞抬轮和离地段的跑道表面被上述污染物覆盖,也应该算作污染跑道。

以下是 EASA 关于各种污染物的定义,假定污染物分布在整个道面上,且厚度均匀,污染物比重均匀。

(1) 积水(standing water):厚度超过 3mm 的水。

(2) 融雪(slush):具有高含水量的部分融化的雪或冰,水可以从中轻易流出,假定比重为 0.85。融雪通常是只在接近 0°C 才能发现的瞬态情况。

(3) 湿雪(wet snow):受到压缩时会粘在一起的雪,当受到挤压时水无法从中轻易流出,比重假定为 0.5。

(4) 干雪(dry snow):新降的可以吹起的雪,或遭手紧压后一旦松手又会散开的雪(通常也称为松雪),比重假定为 0.2。关于比重的假定不适用经受过自然老化过程的雪。

(5) 压实的雪(compact snow):被压实成固体的雪,飞机在压实的雪的道面上以典型操作压力和载荷滑动不会产生大的轮辙。

(6) 冰(ice):在道面上冻结的水,包括压实的雪转变成为光滑冰面的状况。

## 2 污染物对飞机起降性能的影响

污染物对飞机起降性能有很大的影响,会降低刹车和方向控制的性能。与刹车性能相关的因素包括摩擦力的减小和阻力的增加。不同的污染物类型对性能的影响也有所不同,硬质污染物只会导致摩擦力减小,而液体污染物既使得摩擦力减小,又增加了阻力并导致滑水。硬质污染物包括湿雪(厚度小于 5mm)、干雪(厚度小于 10mm)、压实的雪和冰。液体污染物包括积水、融雪、湿雪(厚度在 5mm~30mm 之间)和干雪(厚度在 10mm~130mm 之间)。

### 2.1 污染物的摩擦力

摩擦力的大小与轮胎磨损程度和充气压力、道

面状态以及防滞系统的性能等有关。在实际运营过程中,飞机的摩擦系数和根据测试设备测得的摩擦系数一般是不同的,而使用不同的摩擦测量仪器测得的摩擦系数的差别也较大。

表 1 中给出的是 EASA 关于不同的污染物和摩擦系数之间的关系,它是最保守的默认值,可以用试验证据和假定值来取代。在没有任何直接试验数据的情况下,要计算飞机性能,可以使用这些摩擦系数。

表 1 AMC25.1591 中污染物类型和摩擦系数的关系

污染物类型		厚度 (mm)	计算假定的比重	阻力是否增加	摩擦系数 $\mu$
液体污染物	积水	3~15	1.0	是	见公式(1),速度大于滑水速度(注1)时, $\mu$ 取 0.05
	融雪	3~15	0.85	是	
	湿雪	5~30	0.5	是	0.17
	干雪	10~130	0.2	是	0.17
硬质污染物	湿雪	小于 5	-	否	0.17
	干雪	小于 10	-	否	0.17
	压实的雪	0	-	否	0.20
	冰	0	-	否	0.05

$$\mu = -0.0632 \left[ \frac{V}{100} \right]^3 + 0.2683 \left[ \frac{V}{100} \right]^2 - 0.4321 \left[ \frac{V}{100} \right] + 0.3485 \quad (1)$$

式中, $V$ 的单位为节。

注 1:飞机在受积水、融雪或湿雪污染的道面上高速运动时会发生滑水,滑水速度  $V_p$  如式(2)所示<sup>[5]</sup>:

$$V_p = 9\sqrt{P} \quad (2)$$

式中, $V_p$ 为地速,单位为节; $P$ 为轮胎压强,单位为  $\text{lb}/\text{in}^2$ 。

公式(2)是目前广泛使用的滑水速度公式,其推导如下所示<sup>[6]</sup>。

当轮胎在被水覆盖的表面上滚动时,产生的流体动力升力为:

$$L = C_{Lh} 1/2\rho V_p^2 S \quad (3)$$

其中, $\rho$ 为液体的密度, $S$ 为接触(footprint)面积, $C_{Lh}$ 为流体动力升力系数。

又由于:

$$L/S = p \quad (4)$$

因此,公式经转化, $V_p$ 可以表示为:

$$V_p = \sqrt{\frac{2}{C_{Lh}} \sqrt{\frac{p}{\rho}}} \quad (5)$$

自由滚动轮胎的  $C_{Lh}$  为 0.7, 这个值是基于大量的试验得到(包括全尺寸飞机),  $\rho$  的值取水的密度, 则公式(5)即可简化为公式(2)。

基于在民机中使用的新轮胎类型(如子午线轮胎), 文献6还给出了新的滑水速度公式。

$$V_p = \lambda \frac{L_f}{W_f} \sqrt{\frac{p}{\rho}} \quad (6)$$

其中,  $\lambda$  为常数, 取决于表面纹理、胎面和水的深度;  $L_f$  为接触面积的长度;  $W_f$  为接触面积的宽度;  $p$  为轮胎压强;  $\rho$  为液体的密度。

表2中给出的是 CAAC 的 AC-121-FS-2009-33 中关于刹车效应、道面条件(污染物类型)和摩擦系数之间的关系。

表2 刹车效应、道面条件与摩擦系数的关系

刹车效应			预期的关系	
术语	定义	跑道表面条件	ICAO	
			代码	$\mu$
好	刹车减速效果和方向控制正常。	水层厚度不大于 3mm(0.125in) 干雪厚度小于 19mm(0.75in) 压紧的雪, OAT 不大于 15°C	5	0.4 及更高
好到中			4	0.39 ~ 0.36
中	刹车减速效果明显变差, 方向控制能力略降低	干雪厚度大于等于 19mm(0.75in) 撒沙处理过的积雪 撒沙处理过的冰 压紧的雪, OAT 大于 15°C	3	0.35 ~ 0.3
中到差			2	0.29 ~ 0.26
差	刹车减速效果严重变差, 方向控制能力可能严重降低, 有滑水可能	湿雪 融雪 水层厚度大于 3mm(0.125in) 冰(没有融化)	1	0.25 ~ 0.21
劣	预期刹车效果为零, 方向难以控制注意: 此条件下禁止滑行、起飞和着陆	冰(正在融化) 湿冰	9	0.2 及更低

## 2.2 污染物的阻力

液体污染物的阻力分为位移阻力(Displacement

Drag)和飞溅冲击阻力(Spray Impingement Drag)。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而做功产生的阻力, 而飞溅冲击阻力是因轮胎将液体喷溅至机身而产生的阻力<sup>[3]</sup>。

### 2.2.1 位移阻力的计算方法

#### 2.2.1.1 污染物为积水、融雪和湿雪

单个轮胎的位移阻力计算公式为:

$$D = C_D 1/2 \rho V^2 S \quad (7)$$

其中,  $\rho$  为污染物的密度,  $S$  为轮胎在污染物中的正面面积,  $V$  为地速。

$$S = b \times d \quad (8)$$

其中,  $d$  为污染物厚度,  $b$  为污染物表面上的有效轮胎宽度, 可按式(9)计算:

$$b = 2W \left[ \left( \frac{\delta+d}{W} \right) - \left( \frac{\delta+d}{W} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

其中,  $W$  为轮胎最大宽度,  $\delta$  为轮胎压缩量。

对于速度低于滑水速度  $V_p$  的单独轮胎,  $C_D$  值可取为 0.75。

典型双轮起落架其阻力为单轮阻力的 2.0 倍(包括干扰); 对于典型的四轮小车式布局, 阻力为单轮阻力的 4 倍(也包含干扰); 对于六轮小车式布局, 一个合理的保守估算建议取为单轮阻力的 4.2 倍<sup>[7]</sup>。

当速度超过  $V_p$  时, 阻力在飞机离地时减少至 0,  $C_D$  的系数与速度的关系如图 1 所示, 对位移阻力系数和冲击阻力系数都适用。

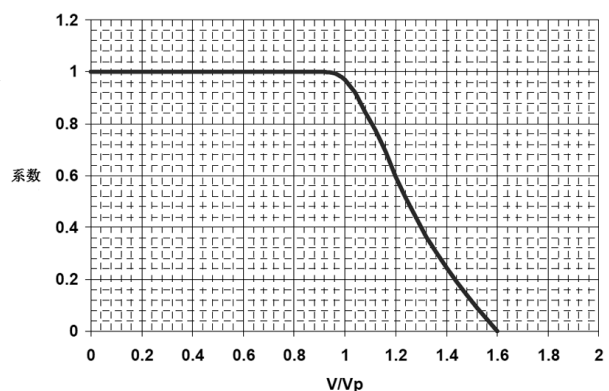


图1 速度对阻力系数的影响

#### 2.2.1.2 污染物为干雪

单个轮胎的总位移阻力计算公式为<sup>[8-9]</sup>:

$$D = D_C + D_D \quad (10)$$

$D_C$  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。

比重为 0.2 的雪的阻力(单位为 N)如下所示。

当轮胎压力>100 psi 时:

$$D_c = 74\,000\,bd \quad (11)$$

$$D_D = (56/R+9/d)bd^2V_g^2 \quad (12)$$

当  $50 \leq$  轮胎压力  $\leq 100$  psi 时:

$$D_c = 56\,000\,bd \quad (13)$$

$$D_D = (52/R+8/d)bd^2V_g^2 \quad (14)$$

其中,  $d$  为雪的厚度,单位为 m;  $b$  为表面的轮胎宽度,单位为 m;  $V_g$  为地速,单位为 m/s;  $R$  为轮胎半径,单位为 m。

双轮起落架上的阻力为两个单轮阻力的简单叠加。小车式起落架只需要考虑前轮的阻力,作用在后轮上的阻力可以忽略。作用在小车式起落架上的阻力假定为与双轮构型的阻力相等。所有其它多轮构型都可以用同样的方式处理。

### 2.2.2 飞溅冲击阻力的计算方法

#### 2.2.2.1 污染物为积水、融雪和湿雪

在液体污染物中运动产生的阻力分为水花与飞机结构直接作用的阻力和表面摩擦阻力两部分。文献 10 给出了由于水花直接冲击产生阻力的计算方法,文献 11 给出了表面摩擦阻力的计算方法。

式(15)为 EASA 给出的一个相对简单保守的经验公式,该方法将表面摩擦阻力转换为只基于前轮阻力测量值的当量位移阻力系数。此公式对应速度小于滑水速度  $V_p$  的情况。

$$C_{D_{\text{spray}}} = 8 \times L \times 0.0025 \quad (15)$$

其中,  $C_{D_{\text{spray}}}$  用于总的前轮位移面积( $b \times d \times$  轮胎数目),  $L$  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 ft。此公式也可以用于主轮水花打到后机身的情况,对于主轮只有最内侧的轮胎溅水到机身上,此时相应的位移面积只有主轮的一半。

然而,有研究者指出 EASA 的经验公式是基于 20 世纪 60 年代在运输机(Convaair 880, Trident)上的水池试验结果,该方法过于简单<sup>[12]</sup>。他针对水污染的跑道给出了阻力的计算公式,并与飞行试验进行了对比如图 2 所示,图 3 是飞行试验结果和计算结果的比较。

#### 2.2.2.2 污染物为干雪

试验表明来自轮胎的飞溅雪花是有限的,只有少量会溅到机身上。飞溅雪花的速度和密度比水花要小很多。因此,雪冲击机身产生的阻力可以忽略不计。



图 2 Citation II 飞行试验

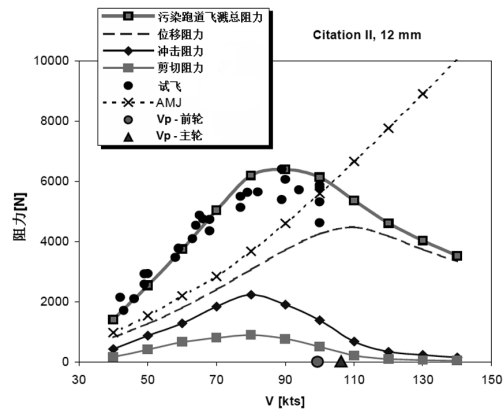


图 3 飞行试验结果和计算结果的比较

## 3 污染跑道上的起降性能计算方法

### 3.1 污染跑道上的起飞性能计算

除非对污染物的影响进行修正,否则污染跑道上的性能假设与湿跑道是相同的(如起飞的离地高度为 15ft,使用反推力)。为了确定起飞距离,采用依据 CS 25.149(g) 确定的  $V_{MCG}$  值确定最小速度  $V_1$ 。

根据适航条款要求,污染跑道上定义的起飞距离、起飞滑跑距离和加速停止距离都与湿跑道上的相似,起飞距离定义为干跑道起飞距离和污染跑道单发起飞距离中的较大者;起飞滑跑距离定义为污染跑道单发起飞滑跑距离和污染跑道全发起飞滑跑距离的 1.15 倍中的较大者;加速停止距离定义为干跑道加速停止距离、污染跑道单发和双发加速停止距离中的较大者。与湿跑道相比,除需要考虑污染跑道上摩擦系数及污染物阻力外,其余计算方法都相同,公式如(16)~(18)所示。

$$TOD_{\text{污染}} = \text{MAX}(TOD_{\text{干}}, TOD_{N-1\text{污染}}) \quad (16)$$

$$TOR_{\text{污染}} = \text{MAX}(TOR_{N-1\text{污染}}, 1.15 TOR_{N\text{污染}}) \quad (17)$$

$$ASD_{\text{污染}} = \text{MAX}(ASD_{\text{干}}, ASD_{N-1\text{污染}}, ASD_{N\text{污染}}) \quad (18)$$

### 3.2 污染跑道上的着陆性能计算

与起飞性能一样,污染跑道上的着陆性能也受

(下转第 22 页)

### 3 结论

该型 T 尾飞机为避免进入“深失速”,保证飞机进入失速后的安全性,安装了失速保护系统,本文针对失速试飞高风险、高难度及失速保护系统的特点,结合适航验证要求,对失速试飞方法进行了研究,为相似布局飞机的设计及失速试飞方法提供参考。

(上接第 18 页)

到摩擦系数和污染物阻力的影响,且使用反推力。对于污染跑道,应在计算空中段距离时假设从 50ft 高度到在跑道上接地之间存在 7s 的时间差。在缺乏试飞数据证实存在更低的值时,接地速度假定为入口速度的 93%<sup>[3]</sup>。地面减速段距离的计算方法和起飞加速停止距离的计算类似。根据 EASA 和 CAAC 的规定,在污染跑道上所需的着陆距离为湿跑道上所需的着陆距离和污染跑道上实际着陆距离的 1.15 倍中的较大者,如式(19)所示:

$$RLD_{污染} = MAX(RLD_{湿}, 1.15ALD_{污染}) \quad (19)$$

表 3 为 CAAC 规定的在指定道面条件的距离数据不可用时用于评估的距离换算表,同时表 3 中的系数是基于使用最大人工刹车、使用自动扰流板(如果装备)以及反推工作前提下得到的。对于无反推的运行(或不能使用反推),表 3 中的计算结果还要再乘以 1.2。表 3 中的系数不能用于评估自动刹车条件下的着陆距离要求。在 FAA 的 SAFO 06012 中也有相同的表格<sup>[13]</sup>。

表 3 指定道面条件的距离数据不可用时用于评估的距离换算表

道面条件	报告的刹车效应	干跑道所需着陆距离的换算系[注]
湿道面和干雪	好	0.9
压紧的雪	中	1.2
湿雪,融雪,积水,冰	差	1.6
湿冰	劣	禁止着陆

注:干跑道所需着陆距离乘以换算系数所得数值相当于指定道面条件实际着陆距离加上 15% 的余量。

### 4 结论

污染跑道上飞机的起飞着陆性能计算在滑水速度公式的表达方式、EASA 和 CAAC 关于污染物的厚度范围存在差异、如何定义各种污染物的厚度

#### 参考文献:

- [1] 中国民用航空总局. CCAR-25, 中国民用航空规章第 25 部[S]. 北京:中国民用航空总局,2001.
- [2] 李勤红,屈玉池,赵杰,等. 运输类飞机合格审定飞行指南[M]. 西安:中国飞行试验研究院,2003.

以及如何对计算出的污染跑道性能数据进行验证等方面有待进一步完善。本文通过对 FAA、EASA 和 CAAC 以及相关资料的研究,整理了用于计算污染跑道上起降性能的方法,对于性能分析工作具有一定的指导意义。

#### 参考文献

- [1] Boeing Commercial Airplanes, Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents, 2011.
- [2] AC91-6A, Water, Slush, and Snow on the Runway, FAA,1978.
- [3] CS-25, Certification Specifications for Large Aeroplanes, Amendment 11, EASA, 2011.
- [4] AC-121-FS-2009-33. 航空承运人湿跑道和污染跑道运行管理规定. 中国民用航空局飞行标准司,2009.
- [5] Walter B. Horne and Robert C. Dreber, “Phenomena of Pneumatic Tire Hydroplaning”, NASA, 1963.
- [6] G. W. H. van Es. Hydroplaning of modern aircraft tires, NLR-TP-2001-242, 2001.
- [7] ESDU Data Item 90035. Frictional and Retarding Forces on Aircraft Tyres. Part V; Estimation of Fluid Drag Forces. November 1990, with Amendment A,1992.
- [8] Van Es, G. W. H. . Method for Predicting the Rolling Resistance of Aircraft Tires in Dry Snow. AIAA Journal of Aircraft, 1999.
- [9] Van Es, G. W. H. . Rolling Resistance of Aircraft Tires in Dry Snow. National Aerospace Laboratory NLR, Technical Report TR-98165, 1998.
- [10] ESDU Memorandum No. 95. Impact Forces Resulting From Wheel Generated Spray; Re - Assessment Of Existing Data, 1997.
- [11] ESDU Data Item 98001. Estimation of Airframe Skin-Friction Drag due to Impingement of Tyre Spray,1998.
- [12] J. H. M. Gooden. CRsray-Impingement drag calculation of aircraft on water-contaminated runways. National Aerospace Laboratory NLR, NLR-TP-2001-204, 2001.
- [13] FAA SAFO 06012 Landing Performance Assessments at Time of Arrival (Turbojets),2006.