

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2018.01.018

大型客机积水跑道起降附加阻力评估

Additional Drag Assessment on Standing Water Runways for Large Civil Aircraft

徐长群 陶 超 / XU Changqun TAO Chao

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

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

摘 要:

在飞机整个飞行过程中,起降阶段尽管时间占比很小,却是飞行事故的多发阶段。近几年国内外污染跑道起降冲出和偏离跑道的事故和事故征候不断发生。发生此类事故的一个重要原因就与湿跑道和污染跑道有关。为了保证飞行运行的安全,应确定飞机在污染跑道上的飞行性能。飞机在污染跑道上起降时污染物产生的附加阻力,对飞机的起降性能有很大的影响。分析了积水污染跑道上轮胎溅水图型的形成机理,研究了附加阻力的计算评估方法。算例表明,积水跑道附加阻力与积水深度近似成线性正比关系,与飞机地面滑跑速度近似成平方正比关系。该方法的计算结果符合规律、量级合理,达到了工程应用要求。

关键词: 积水跑道;附加阻力;性能评估

中图分类号: V35

文献标识码: A

[Abstract] According to statistical results, the takeoff and landing phases are the accident-prone phases of the whole flight mission although they take up very short proportion of the total flight time. In recent years, incidents and accidents of overrun or deviation from runway have occurred several times while takeoff and landing on the contaminated surface. Wet and contaminated runway should be responsible for these accidents. In order to keep the aircraft safety, the flight performance on a contaminated runway should be determined. Contaminates induce additional drag for aircraft operating on contaminated runways, which make great influence on the takeoff and landing performance. The mechanism of water spray pattern caused by tires is analyzed, the calculation and assessment methods of additional drag on standing water contaminated runway are researched. Example indicates that the standing water addition drag is basically proportional to water depth and aircraft ground speed's square. The tendency and magnitude of calculation results are credible, and the method is accurate enough to be applied to engineering assessments.

[Keywords] standing water runway; additional drag; performance assessment

0 引言

根据波音公司对 2001 - 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,在飞行的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,在起飞和初始爬升阶段发生的重大事故占 17%,最终进近和着陆阶段则高达 36%;起飞和初始爬升阶段发生的机上事故占 25%,最终进

近和着陆阶段则为 24%。在起飞着陆阶段发生的机上事故中,超过 50% 的事故是冲出或偏出跑道造成的,发生此类事故的一个重要原因就是湿跑道和污染跑道^[1]。

污染跑道是指跑道的表面覆盖了一定厚度的水以及水的不同存在形式的污染物的跑道,比如积水、融雪、干雪、压实雪、冰等。飞机在污染跑道上起飞着陆时,污染物的存在将改变飞机所受的外力,

进而改变其起飞着陆性能。外力的改变主要表现在两个方面,一是在一定条件下会产生污染物附加阻力,二是轮胎与地面的摩擦力会发生改变。飞机起飞着陆时跑道污染物导致的外力改变,对飞机的性能 and 安全性都有非常重要的影响,对这一领域的研究是一个庞大的课题。

由于积水是最常见的污染物表现形式,因此本文仅针对积水跑道上污染物附加阻力这一切入点,分析附加阻力对飞机性能的影响,进一步分析附加阻力的形成机理,从而给出附加阻力的评估方法,并结合国内某民航客机飞行试验的结果进行算例分析,最终总结出一套可用的积水附加阻力评估方法,供国内民机设计和运输机设计参考。

1 积水跑道附加阻力的影响

当飞机在积水跑道起飞时,积水产生的附加阻力会降低飞机的滑跑加速性能,使得飞机场长显著增加甚至导致飞机难以完成起飞。

图 1 给出 BAC 1-11 飞机在融化雪跑道上的附加阻力试验结果^[2]。可以看出,直到到达某个最大值之前,附加阻力正比于飞机地面滑跑速度的平方。从最大值这一点开始,附加阻力开始降低。这一点的飞机地面滑跑速度,即是“滑水速度”(hydroplaning/aquaplaning speed)。

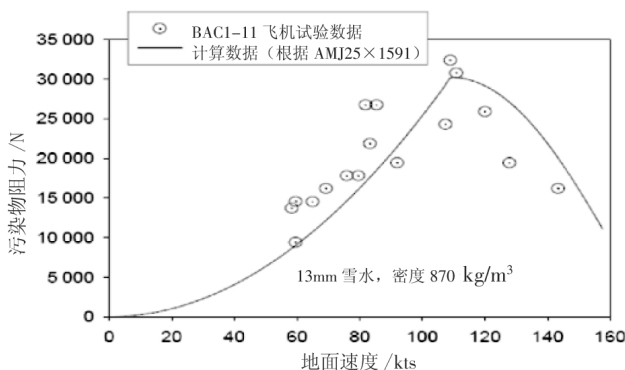


图 1 附加阻力随飞机速度的变化

2 溅水图型和附加阻力的形成机理

飞机在积水跑道上滑跑时,跑道上的水由于受到轮胎迅速挤压而向四周喷溅,如图 2 所示。其中,喷溅到机轮前方的积水形成的水柱,被称为轮胎溅水的头部喷流。头部喷流向前喷射的初始速度大于飞机的地面速度,并受气动和重力影响逐渐减

弱。由于,头部喷流的轨迹是向前的,喷流一般情况下不会进入发动机(无论是翼吊布局还是尾吊布局)造成发动机推力损失,但仍会带来附加阻力^[3]。

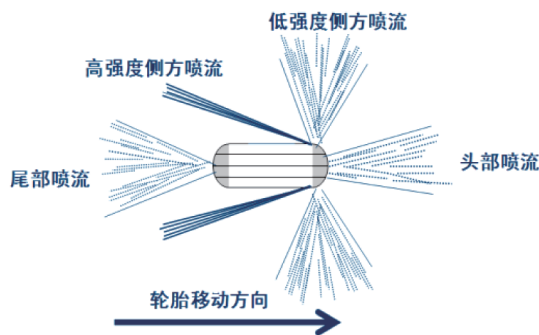


图 2 单轮胎溅水图型示意图(俯视图)

同理,积水被横向挤压形成的水柱,称为侧方喷流。具体来说,侧方水柱的横向运动受到轮胎边缘侧面水墙的阻挡,会被吸收掉部分横向能量。一方面,水墙的阻挡使得原本横向移动的水改变了方向并飞溅到水面上方;另一方面,水墙吸收的能量推动了更多的水飞溅到空中。

从英国布里斯托尔大学实验室获取的溅水图片中可以看出,侧方喷流大概分成两个部分,如图 3 所示。



图 3 布里斯托尔大学实验室实验

一部分是由轮胎旋转而带起的侧后方水柱,该水柱同时受到轮胎挤压、侧方水墙的阻挡、高速旋转轮胎的带动作用,以一定的角度向侧后方喷射,形成侧方水柱的主要部分,该水柱的强度很大,对飞机的影响也最为强烈,被称为高强度侧方喷流。另外一部分为低强度侧方喷流,则是由于水流被打碎后形成的水花,位置介于头部喷流和侧方主喷流之间。该水柱强度较弱,产生的附加阻力较

小,喷溅高度有限,对飞机的影响较小,在进行性能评估的时候可以忽略这部分。

对于双轮胎构成的起落架,其溅水图型与单轮胎起落架的溅水图型有所区别。在两个轮胎的相对方向,侧方水柱将混合在一起,形成一道新的水柱,如图 4 所示。

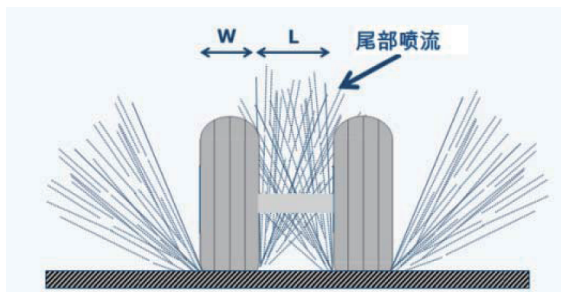


图 4 双轮胎溅水图型示意图(前视图)

该水柱向后方喷溅出去,强度很大,极有可能对后方机体造成损坏。大型客机的主起落架一般位于机翼内部,后方是后缘襟翼,所以该水柱打到后缘襟翼上,会产生极大的冲击力,造成襟翼变形,如图 5 所示。



图 5 被喷流击伤的后缘襟翼

3 积水跑道附加阻力的评估方法

根据上一节关于溅水图型的分析,飞机在积水跑道上起降,轮胎喷流产生的附加阻力将包括位移阻力和喷溅阻力,喷溅阻力又可分成摩擦阻力、冲击阻力,即:

$$D = D_D + D_F + D_I \quad (1)$$

位移阻力是由于轮胎在积水跑道上滑跑时,水被挤向轮胎侧方或者前方而导致的阻力。

喷溅到机体上的水顺着机体表面流动而导致的阻力被称为摩擦阻力。喷流直接冲击机体部件,在飞机轴向产生的冲击力分量,被称为冲击阻力。

3.1 位移阻力评估

由于轮胎的做功使得本来位于轮胎正前方的

水发生了位移,因此这部分阻力被称为位移阻力。根据起落架的结构形式,位移阻力的评估分为单轮和多轮两种情况。

1) 单轮起落架

轮胎的位移阻力由下式给出:

$$D_D = C_D 1/2 \rho v^2 S \quad (2)$$

式中, ρ 为污染物的密度, S 为污染物上轮胎前表面的面积, v 为地面速度,各项需要在相容的单位制下。

$$S = b \times d \quad (3)$$

式中, d 为积水的深度, b 为积水表面高度上的有效轮胎宽度,可以用下式计算:

$$b = 2W \left[\left(\frac{\delta + d}{W} \right) - \left(\frac{\delta + d}{W} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

式中, W 为轮胎的最大宽度, δ 为轮胎垂直形变,可以从轮胎制造商的“载荷-变形”曲线查得,各变量的几何意义参考图 6。

对于式(2)中的阻力系数 C_D ,如有型号研制经验,可参考前期型号研制取得的数据值;如果没有型号研制经验,若要获取该数据值可以使用 CFD 方法进行模拟计算,或者可以进行试飞进而用工程方法回归出来。如果上述条件都不具备,则对于单胎情况,当飞机地面速度小于滑水速度 v_p 时,其 C_D 可使用保守值 0.75,当飞机地面速度大于滑水速度 v_p 时,则要考虑滑水的影响,详见参考文献[4]。

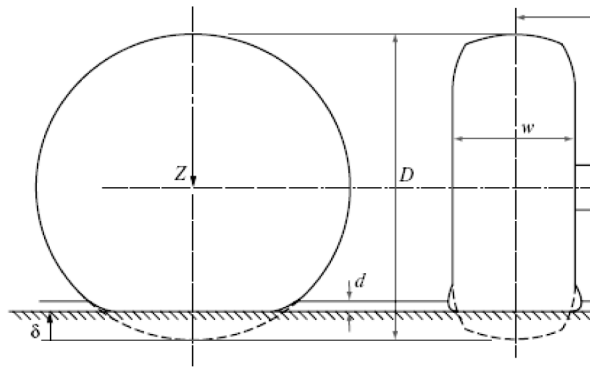


图 6 轮胎几何形状示意图

2) 多轮起落架

对于多轮组成的起落架,目前仍以单轮的方法进行计算,然后根据工程经验考虑一个系数,即:

$$D_D = n \cdot C_D 1/2 \rho v^2 S_D \quad (5)$$

典型的双轮式起落架的阻力是单轮式的两倍,即 n 取 2,这包括干扰的影响。四轮小车式布局的

阻力是单轮阻力的 4 倍,即 n 取 4。六轮的小车式布局的阻力保守估计是单轮式阻力的 4.2 倍,即 n 取 4.2。

3.2 摩擦阻力评估

要评估摩擦阻力,必须要首先确定溅水图型,以便与飞机的几何形状进行比较进而确定溅水区域。跑道上的积水在飞机轮胎滑跑时的喷溅角度,受到飞机速度、负载、轮胎外形和尺寸、积水深度等因素的影响。

水柱溅起的角度在 10° 到 20° 之间,这个值的大小与飞机的速度和降雨/降雪的深度有很大关系,受飞机轮胎的几何形状影响很小。水平和垂直方向的喷流角度计算方法参考文献[5]和文献[6],该方法也可在没有试验证明的情况下使用。

通过这个方法可以获得机身上被水柱喷溅的部位,从而判断出前轮带起的水柱是否会冲击到主起落架或敞开的起落架舱、机翼前缘和发动机短舱,而主轮起落架溅起的水柱是否会撞击到后机身或者襟翼上。

这里先讨论表面摩擦阻力的计算方法,下面一节再讨论直接冲击阻力的计算。

摩擦阻力可由式(6)计算:

$$G_{F_m} = C_{F_m} q S_{wet_m} \quad (6)$$

式中, C_{F_m} 为摩擦系数, q 为动压, S_{wet_m} 为浸润面积。

多个区域总的阻力由式(7)计算:

$$\sum G_{F_m} = \sum_{m=1}^m C_{F_m} q S_{wet_m} \quad (7)$$

其中,对于侧方喷流和尾部喷流:

$$q = q_0 = \frac{1}{2} \rho_w \sigma v^2 \quad (8)$$

对于头部喷流:

$$q = q_0 (1 - k)^2 \quad (9)$$

式中, k 为水柱的速度与飞机地面速度的比值。在不同的位置, k 值不同,动压也不同。

关于表面摩擦导致的阻力,即轮胎喷流和飞机的浸润部件表面之间存在相对速度而引起阻力,文献[7]给出了详细的解释及计算方法,当有多处喷流作用在相同的机翼或者机身表面时,采用单个计算出的较大阻力值而不是将他们简单地叠加起来。

一个可替代的简单保守的摩擦阻力的经验算

法是将摩擦阻力转换成等效的阻力系数,基于单独的前轮阻力测量结果,公式如下:

$$D_D = 1/2 \rho v^2 S_D \times C_{D, spray} \quad (10)$$

$$C_{D, spray} = 8 \times L \times 0.0025 \quad (11)$$

$C_{D, spray}$ 将作用于整个前轮位移面积 ($b \times d \times$ 轮子数量), L 是从前起落架尾部喷流与机身下部接触点开始机身上浸湿的长度,用 ft 表示。这个关系式仍然适用主轮溅起冲击后半机身的喷流,此时,每一个主起落架单元只涉及到最里面的最前机轮溅起的内侧喷流,所以相对应的位移面积是主轮面积的一半。

3.3 冲击阻力评估

在飞机设计之初,飞机表面直接遭受溅水的冲击产生的阻力是应当考虑的^[8]。当有大量喷流垂直或者倾斜地撞击在飞机的部分结构时,应当考虑喷流造成的阻力或者动量的损失。

关于冲击阻力的详细评估,首先需要研究喷流在不同空间位置的强度分布。将喷流在空间某一位置的强度分布图投影到机体表面,就可以得到机体表面受到喷流冲击的压强分布图,进而求出直接冲击阻力。由式(12)进行计算:

$$G_I = \sum_{m=1}^m \tau_m S_{wet_m} \quad (12)$$

式中, G_I 为冲击力, τ_m 为受冲击机体表面的压强分布, S_{wet_m} 为浸润面积。

需要注意的是,这里的冲击力总是垂直于机体表面的,该冲击力沿飞机速度方向的分量才是冲击阻力,而垂直于速度方向的分量则变成升力或侧向力。故,式(12)还需做如下转化:

$$D_I = \sum_{m=1}^m G_I \cos \alpha_m \quad (13)$$

式中, D_I 为冲击阻力, $\cos \alpha$ 为速度方向的投影。

3.4 滑水速度的影响

滑水速度对积水跑道附加阻力系数的影响,主要表现为:积水跑道附加阻力随着飞机滑跑速度的增加而迅速增加;当滑跑速度达到滑水速度 v_p 时附加阻力达到最大值;当滑跑速度大于滑水速度时,附加阻力开始显著地衰减;当速度达到起飞离地速度时,附加阻力衰减为 0。根据试验结果分析得到滑水速度影响因子,如图 7 所示。另外,滑水速度不随污染物的密度变化^[9]。

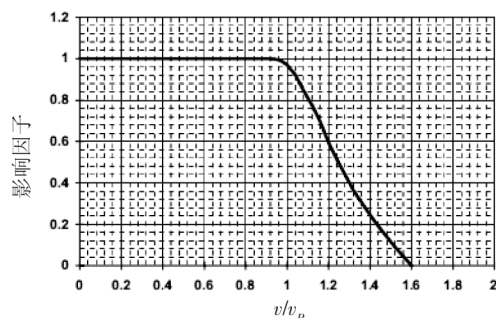


图7 速度对阻力系数的影响

计算公式如下:

$$F = -0.54 + 7.24 \left(\frac{v_G}{v_P} \right) - 8.01 \left(\frac{v_G}{v_P} \right)^2 + 2.31 \left(\frac{v_G}{v_P} \right)^3 \quad (14)$$

此式均适用于位移阻力、摩擦阻力和冲击阻力的计算。

4 算例分析

选用某民用飞机作为算例机型,对本文的方法进行验证。算例飞机前起落架和主起落架均为双轮胎结构。图8为积水深度为6.4 mm、12.7 mm、19 mm时的积水跑道总附加阻力的计算结果。图9~图11分别给出了积水跑道附加阻力的构成。

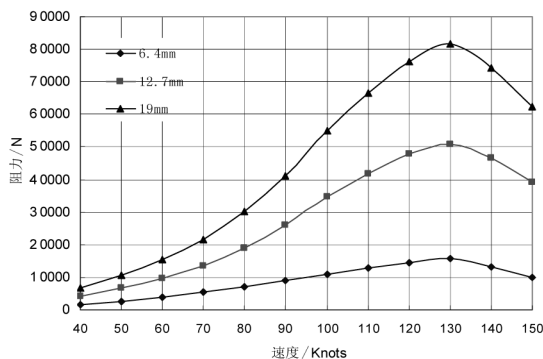


图8 算例:不同积水深度的总附加阻力

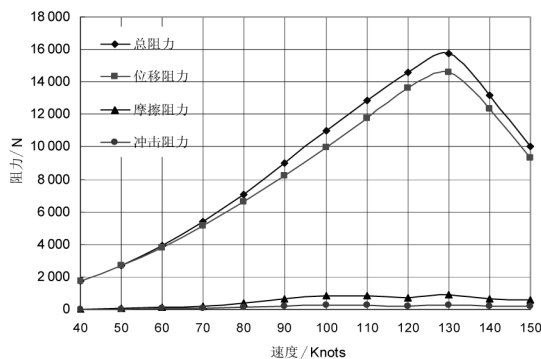


图9 算例:积水深为6.4 mm时的阻力构成

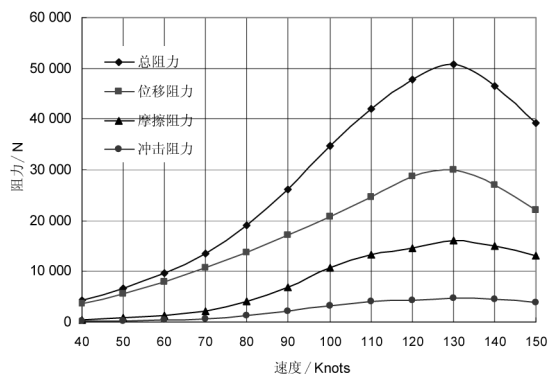


图10 算例:积水深为12.7 mm时的阻力构成

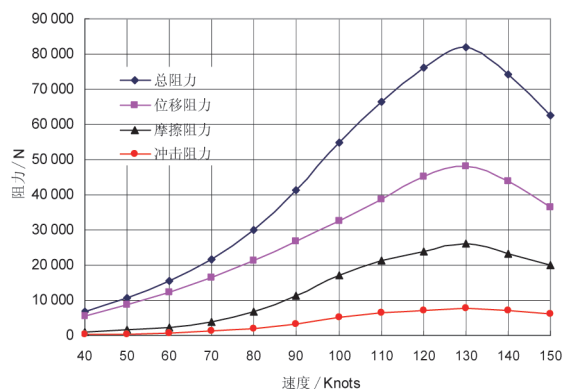


图11 算例:积水深为19 mm时的阻力构成

由图8可以看出附加阻力随着飞机滑跑速度的增加而迅速增大,当速度达到滑水速度后,附加阻力增加到峰值,随后速度继续增加而附加阻力开始减小。如前文所述从曲线上看,附加阻力和速度的平方近似成正比。

一般而言,积水跑道附加阻力与积水深度近似成线性正比关系。然而,图9说明,积水深度在6.4 mm时附加阻力偏小主要为位移阻力,摩擦阻力和冲击阻力较小。这是因为轮胎喷流的角度和水深有着直接的关系,当水深较低时轮胎喷流和机体接触的面积比较小,甚至摩擦和冲击阻力可以被忽略。

算例验证表明,积水跑道附加阻力与积水深度近似成线性正比关系,与飞机地面滑跑速度近似成平方正比关系,与飞机地面滑跑速度近似成平方正比关系。经过与国外某飞机的计算与试验结果对比,该方法的计算结果符合规律、量级合理。

5 结论

积水跑道带来的附加阻力对于飞机的起飞着陆性能有很大的影响。积水跑道上的附加阻力主

要由位移阻力、摩擦阻力和冲击阻力构成。本文给出了飞机在积水跑道上起降时污染物附加阻力的评估方法,并使用算例对该方法进行了验证,结果表明,该方法符合规律、量级合理,可以在没有试验试飞数据时作为一种初步的快速评估手段。

参考文献:

- [1] Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents [R]. Chicago: Boeing Commercial Airplane, 2011.
- [2] ES Van G W H, ROELEN A L C, KRUIJSEN E A C, GIESBERTS M K H. Safety aspects of aircraft performance on wet and contaminated runways: NLR-TP-2001-216 [R]. Nationaal Lucht-en Ruimtevaartlaboratorium, 2001.
- [3] The Order of Magnitude of Drag due to Forward Spray from Aircraft Tyres: ESDU Memorandum [R]. United Kingdom, 1998.
- [4] Frictional and Retarding Forces on Aircraft Tyres. Part V: Estimation of Fluid Drag Forces: ESDU Data Item 90035 [R]. United Kingdom, 1992:12-20.
- [5] Estimation of Spray Patterns Generated from the Side of Aircraft Tyres Running in Water or Slush: ESDU Data Item 83042 [R]. United Kingdom, 1983:3-12.
- [6] DAUGHERTY Robert H, STUBBS Sandy M. Measurement of Flow Rate and Trajectory of Aircraft Tire-Generated Water Spray: NASA-TP-2718 [R]. National Aeronautics and Space Administration, 1987.
- [7] Estimation of Airframe Skin-Friction Drag due to Impingement of Tyre Spray: ESDU Data Item 98001 [R]. United Kingdom, 1998:5-12.
- [8] Impact Forces Resulting From Wheel Generated Spray: Re-Assessment Of Existing Data: ESDU Memorandum No. 95 [R]. United Kingdom, 1997:3-41.
- [9] Operations on Surfaces Covered with Slush: ESDU Memorandum No. 96 [R]. United Kingdom, 1998: 5-35.

作者简介

徐长群 男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机总体设计;E-mail: xuchangqun@comac.cc

陶超 男,博士,工程师。主要研究方向:飞机总体设计,飞行器控制;E-mail: taochao@comac.cc