轮胎滚动溅水与垂直入水相似性分析

张显鹏, 徐绯*, 任选其, 杨扬

西北工业大学航空学院, 计算力学与工程应用研究所, 西安 710072

* E-mail: xufei@nwpu.edu.cn

收稿日期: 2017-03-06; 接受日期: 2017-11-22; 网络版发表日期: 2018-02-02

航空科学基金(编号: 2016ZD53038)和中央高校基本科研业务专项资金资助项目

摘要 飞机在积水跑道上滑跑时, 轮胎溅起的水可能进入发动机, 导致发动机出现掉转、喘振甚至熄火等现象. 以往对机轮溅水问题的研究主要采用全机溅水试验的方法, 这样的试验价格昂贵, 且得到的有效数据有限. 首先, 通过对轮胎溅水机理的分析, 根据流动相似理论以及切片法思想, 阐述了轮胎滚动溅水与垂直入水的相似性. 然后, 使用LS-DYNA商业软件分别建立了基于SPH-FEM耦合方法的弹性带翻边轮胎滚动溅水与垂直入水模型, 根据数值计算结果分析了两系统中侧向喷溅的形成机理, 并对比了两种侧向喷溅的正视溅水形态、溅水速度以及翻边的作用效果. 结果表明, 当两系统中轮胎速度存在一定对应关系时, 两种侧向喷溅的正视形态存在相似性. 最后, 根据这种相似性提出了采用轮胎垂直入水试验研究机轮溅水形态的新方法, 为该问题的研究提供了新的思路.

关键词 飞机轮胎, 溅水, 光滑粒子流体动力学(SPH), 流动相似理论, 切片法

1 引言

为避免由机轮溅水引起的发动机掉转等问题, 适航条例要求民用飞机在适航项目中进行全机溅水试验^[1], 来确保飞机在积水跑道上滑跑时发动机不会吸入有危险的进水. 这类试验通常在实际机场跑道设计安装水槽, 针对不同的适航要求进行全机的溅水滑跑试验, 使用摄像机记录试验过程, 根据试验视频判断是否有成股直射水流进入发动机. 若试验结果不符合适航标准, 则需对现有机型进行改进, 比如使用挡水板、翻边轮胎等抑制溅水机构来改变溅水形态, 减小发动机进水量.

为缩短研发周期, 需在飞机设计阶段便能对轮胎的溅水形态做出较为准确的判断, 从而在设计过程中优化整体布局, 使发动机等关键部位避开溅水区域. 国外学者在这方面做了大量研究工作, 主要可分为试验研究^[2-5]和理论分析研究^[6-8]. 试验研究规模都比较大, 一类是在实验室中建水池取单个轮胎开展的试验, 以美国国家航空和宇宙航行局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)为例^[4], 制造了水槽, 设计了飞溅水量的收集装置, 针对不同水深、不同飞机速度、机翼是否影响等参数进行了试验研究, 得到了大量珍贵的数据, 但试验轮胎构型简单, 且滑跑速度较低, 对目前型号飞机的溅水试验指导意义有限;

引用格式: 张显鹏, 徐绯, 任选其, 等. 轮胎滚动溅水与垂直入水相似性分析. 中国科学: 技术科学, 2018, 48: 931-938

Zhang X P, Xu F, Ren X Q, et al. Similarity of spray generated by tire rolling in the water and falling into water (in Chinese). Sci Sin Tech, 2018, 48: 931-938, doi: 10.1360/N092017-00071

另一类是与适航验证试验条件完全相同的全机溅水试验, 通常试验通过拍摄溅水过程并根据拍摄位置反演推算不同的溅水形态, 但由于拍摄位置距离飞机较远, 溅水形态无法准确描述, 且试验容易受到机场跑道平整度、侧风等不可控因素的影响, 重复性难保证, 这些因素直接影响溅水试验结果的测量和分析。显然, 这样的试验耗资巨大, 且得到的有效数据有限。理论分析方法主要可分为经验分析法和数值计算方法。经验分析法是根据1998年的ESDU-83042文件^[6]提出的一种基于大量试验研究的经验方法, 该方法首先假定溅水起点, 假设溅水是线性变化的形貌, 在此基础上定义了侧视角、俯视角等溅水形态刻画参数, 给出了计算溅水角的经验公式; 但由于其经验性强, 若偏离公式的取值范围计算, 结果偏差较大, 且无法估计轮胎细节构型变化以及挡水板、轮胎翻边等抑制溅水机构对溅水形态产生的影响。数值计算方法主要包括CRspray^[8]、光滑粒子流体动力学(smoothed particle hydrodynamics, SPH)^[9]等粒子计算方法。CRspray方法从水滴受力的角度去分析, 对于水被溅起后的扩散范围的计算要相对准确, 并且可以计算侧风等对水飞溅的影响, 但其初始溅水角度、速度等参数是通过ESDU方法估算出来的, 因此同样适用范围有限。SPH方法及其衍生方法是无网格粒子法的主要类型, 而且已经被融入许多商业软件之中, 目前在飞机轮胎溅水^[10,11]问题上显示了良好的应用前景。

本文首先从流体受力的角度分析了轮胎溅水机理, 结合流动相似理论^[12]提出了当轮胎滚动溅水与垂直入水两系统中轮胎与水的相对速度存在一定对应关系时, 两系统产生的侧向喷溅存在相似性的观点, 并借鉴船舶力学中的切片法思想^[13]给出了两速度的对应关系; 然后应用LS-DYNA商业软件建立了基于SPH-FEM耦合方法的轮胎溅水数值模型, 根据数值计算结果分析了两系统中侧向喷溅的形成机理, 并对比了各对应速度下的正视溅水形态, 验证了其相似性; 最后, 根据这种相似性提出了通过轮胎垂直入水试验研究机轮溅水形态的新方法, 该方法与以往的研究方法相比有以下优点: (1) 试验规模较小、装置简单、成本低; (2) 可近距离拍摄溅水的形成及发展过程, 有利于溅水机理的分析以及数值模型的验证; (3) 试验重复性强, 可针对水深、轮胎入水速度、轮胎细节形状及翻边构型等多个因素开展正交试验, 分析各因素对溅水形态

的影响, 得出规律性的结论。

2 轮胎溅水机理分析

2.1 滚动溅水机理

飞机在积水跑道上滑跑产生的溅水问题属于浅水喷溅问题, 机轮在碾压水膜过程中对水膜产生强烈扰动, 使轮胎周围产生高速射流和喷溅。喷溅主要由舰艏喷溅、侧向喷溅和卷甩喷溅^[14]组成, 可从流体受力的角度分析3种喷溅的产生机理。轮胎滚动过程中相对于水膜的运动可分解为向前的平动以及绕质心的转动, 相应地可将其对水的作用力分解为沿胎面法向的压力 P 和沿切向的黏性力 τ , 如图1所示。其中压力 P 又可分解为水平方向的力 P_x 和竖直方向的力 P_y , P_x 对水产生向前冲击作用, 形成舰艏喷溅; P_y 向下挤压水体, 使轮胎下方产生向两侧的射流和喷溅, 形成侧向喷溅。黏性力 τ 使小部分水黏附在胎面上, 跟随轮胎转动一段时间后向后方射出, 形成卷甩喷溅。

2.2 垂直入水溅水机理

轮胎垂直入水过程中, 轮胎与水之间的运动相对简单, 只有竖直方向的运动, 因此轮胎主要对水产生向下挤压的作用, 将水向四周排开, 形成侧向以及前后方向的射流和喷溅。

3 相似性分析

飞机滑跑溅水过程中, 侧向喷溅的水量最大, 且最有可能进入发动机, 因此本文将主要分析轮胎滚动溅水与垂直入水两系统产生的侧向喷溅的相似性。根据流动相似理论, 两相似流动系统需满足几何相似、运动相似和动力相似3个条件。

3.1 几何相似

几何相似就是几何形状相似, 即两个系统的对应

图1 轮胎滚动过程中对水的作用力

长度具有同一比例, 对应角相等. 当轮胎滚动溅水与垂直入水系统中轮胎构型相同且水深相同时, 便满足几何相似条件, 且比例系数为1. 对于弹性轮胎而言, 还需保证溅水过程中轮胎变形相同.

3.2 运动相似

运动相似是指流体运动的速度场相似, 即在满足几何相似的两个系统中, 在对应瞬时, 对应点上的速度方向相同, 大小成同一比例. 轮胎滚动溅水与垂直入水两系统中速度场方向显然不同, 但根据喷溅形成机理, 可将滚动过程中轮胎对水的扰动作用解耦, 认为溅水沿横向的飞溅运动仅由轮胎对水的向下挤压作用产生, 故只需考虑横向上两系统的相似性. 另外, 轮胎绕质心的转动仅对流体产生沿胎面切向的黏性力, 而挤压作用由轮胎向前平动产生, 因此在分析轮胎向下挤压水速度时可将滚动过程简化为向前平动过程. 此时可借鉴船舶力学中的切片法思想, 如图2所示, 考虑轮胎前方一固连于大地的横平面 L , 当轮胎通过这个平面时, 可将轮胎对此平面内的扰动看作是二维横向轮胎切片由 A 点到 B 点垂直入水对水的作用, 故侧向喷溅的形成过程可看作无数个轮胎切片垂直入水过程的叠加. 这一过程中轮胎切片的垂向位移可根据几何关系确定: 假定轮胎为刚体, 设水深为 h , 轮胎半径为 R , 轮胎航向速度为 v , 轮胎质心由 O 运动到 O' 的过程所经过的时间为 t , 则

$$l_{AB} = l_{DB} - l_{DA} = \sqrt{R^2 - l_{O'D}^2} - l_{DA}, \quad (1)$$

其中,

$$l_{DA} = l_{OC} = R - h, \quad (2)$$

$$l_{O'D} = l_{CA} = \sqrt{R^2 - l_{OC}^2} - l_{AA'}, \quad (3)$$

$$l_{AA'} = l_{OO'} = vt. \quad (4)$$

垂向位移 l_{AB} 再对时间 t 求导便可得到轮胎切片的垂向速度:

$$v_y = \frac{v\sqrt{R^2 - (R-h)^2} - v^2t}{\sqrt{R^2 - \left[\sqrt{R^2 - (R-h)^2} - vt\right]^2}}, \quad (5)$$

$$t \in \left(0, \frac{2\sqrt{R^2 - (R-h)^2}}{v}\right).$$

垂直入水系统中, 轮胎对水的作用同样可看作无

图2 切片法思想示意图

数个切片垂直入水对水作用的叠加. 对于浅水问题, 轮胎涉水区域可近似地看作平直段, 故可认为各切片构型相同, 且与滚动轮胎切片构型一致. 因此当垂直入水系统中轮胎速度与滚动系统中轮胎切片垂向速度相同时, 两系统在横向上存在运动相似, 且比例系数为1.

从式(5)可看出轮胎切片的入水速度是随时间不断变化的, 这在轮胎垂直入水试验中不易实现. 对于飞机轮胎溅水问题而言, 航向速度很大, 积水很浅, 因此轮胎切片与水接触的时间很短, 故可在轮胎垂直入水试验中适当放宽速度条件, 使用轮胎切片入水过程的平均速度代替瞬时速度:

$$v_y' = \frac{h}{\Delta t} = \frac{vh}{\sqrt{R^2 - (R-h)^2}}. \quad (6)$$

式(5)和(6)都是在假设轮胎为刚体的前提下推导的, 适用于轮胎刚度较大, 滚动过程中下沉量可忽略的情况. 若轮胎下沉量不可忽略, 则应对式(6)进行修正. 如图3所示, 设轮胎下沉量为 δ , 则轮胎切片入水过程中在竖直方向经过的距离为 $h+\delta$, 故式(6)可改为

$$v_y' = \frac{h+\delta}{\Delta t} = \frac{v(h+\delta)}{\sqrt{R^2 - (R-h-\delta)^2}}. \quad (7)$$

对于出水过程, 若仅研究无翻边轮胎的溅水问题, 可以不考虑轮胎出水速度, 因为喷溅在轮胎入水过程中形成, 形成之后立即与轮胎分离, 不再受轮胎的影响; 但对于带翻边轮胎而言, 则必须考虑出水速度, 因为滚动过程中轮胎不断向前运动, 翻边的作用时间有限, 因此需在落水试验中保证翻边作用时间与滚动相同.

3.3 动力相似

动力相似是指两系统在对应瞬时, 对应位置处各

图3 考虑轮胎下沉量时的入水平均速度计算

作用力的方向相同,大小成同一比例.飞机轮胎虽然要承受机身所传递的载荷,但这部分载荷由地面支反力提供,而其传递给水体的载荷实质上是以惯性力作用的动量传递而导致的,故只与两者间的相对运动有关,与地面支反力无关.因此当两系统满足上述速度相似条件时,在横向上轮胎传递给水体的动量相同,动力相似自然满足.

综上所述,当轮胎垂直入水系统中水深、轮胎构型以及轮胎变形程度与全机溅水试验相同,且轮胎下落速度与飞机滑跑速度满足一定关系时,两系统中形成的侧向喷溅满足比例系数为1的流动相似性.

4 数值模拟

在进行轮胎垂直入水试验之前,可首先通过数值计算来验证两系统的相似性.文献[10]已对轮胎溅水问题的数值建模方法进行了一定的研究,本文在此基础上建立了基于SPH-FEM耦合方法的弹性轮胎溅水模型,改进了轮胎网格划分方法,使轮胎变形与实际情况更吻合,并调整了水体模型中的SPH粒子间距,得到了更准确的溅水形态.

4.1 滚动溅水模型

4.1.1 轮胎模型

为了抑制轮胎溅水,多种机型选用带翻边轮胎来改善溅水角度,使溅水避开发动机等关键部位,因此在讨论相似性时还需考虑翻边作用效果是否一致.本文根据某客机前轮构型建立了单侧带翻边轮胎数值模型,具体尺寸见图4.真实轮胎的结构较复杂,主要由胎面、胎体帘布层、带束层、胎侧、钢丝圈、气密层和轮毂构成.由于本文主要关注溅水形态,而溅水形态只

与轮胎外形以及变形有关,与其内部结构无关,故可将轮胎简化为轮毂、胎侧、胎面、翻边和气密层5部分(图5),通过调整各区域材料参数使轮胎受载后的变形情况与真实轮胎相符即可.参考一般轮胎的建模方法^[15],轮毂使用刚性材料,胎面、胎侧和翻边使用Mooney-Rivlin超弹性材料,气密层使用弹性材料,在气密层上施加0.53 MPa均布压力以模拟轮胎胎压,在轮毂上施加竖直向下的22 kN集中力以模拟飞机前轮受载.飞机滑跑过程中轮胎的滚转力矩是由其与地面之间的摩擦力提供的,因此在数值模型中仅对轮毂施加沿航向的平动速度,通过设置轮胎与地面之间的摩擦系数使轮胎滚动,这样与实际情况更相符.

4.1.2 水体模型

水体采用SPH方法建模,通过NULL材料结合GRUNISEN状态方程模拟水的属性,具体参数见表1. SPH方法的计算精度与计算效率取决于粒子间距,粒子间距越小,计算精度越高,同时计算时间越长,因此在正式计算之前应通过试算的方式确定合适的粒子间距.试算结果表明,本模型粒子间距在2 mm以下时计算结果收敛.为提高计算效率,在固定粒子间距的前提下应尽量缩小水域尺寸.通过建立不同水域尺寸的数值模型进行试算发现,当水域横向尺寸大于400 mm、航向尺寸大于200 mm时,侧向溅水形态趋于稳定.最终,水域尺寸确定为横向400 mm×航向200 mm,水深为16 mm,各方向粒子间距均为2 mm,粒子总数为

图4 轮胎构型

图5 (网络版彩图)轮胎数值模型

表 1 水体材料参数

GRUNISEN状态方程	C (m/s)	S_1	S_2	S_3	γ_0	a
	1480	2.16	-1.985	0.2268	0.5	2.67
NULL材料	ρ_0 (kg/m ³)			μ_0 (kg/(m s))		
	1000			7.68×10^{-3}		

160000.

4.2 垂直入水模型

垂直入水模型中轮胎和水体建模方法均与滚动模型一致, 仅将轮胎移至水面正上方, 并改变轮胎的速度. 由于轮胎为弹性体, 不能应用式(5)来计算滚动过程中轮胎切片的垂向速度, 故需根据滚动模拟结果来获得垂直入水模型的轮胎速度, 具体方式如下: 在滚动结果中选取图6所示截面, 输出该截面上轮胎切片从入水到出水过程中的垂向速度-时间曲线, 然后使用这条曲线作为与该滑跑速度对应的轮胎垂直入水速度加载曲线, 这样便保证了两系统的速度相似性.

图 6 (网络版彩图)轮胎切片的选取

5 数值结果分析

5.1 轮胎变形对比

弹性轮胎溅水过程中的变形情况对最终溅水形态影响较大, 其中无翻边侧的影响主要在于胎侧与地面接触角的大小, 而翻边侧主要是翻边高度的影响. 因此为满足几何相似条件, 不仅要求两系统轮胎构型相同、水深一致, 还要求轮胎的变形过程一致. 图7所示为轮胎滚动及相应下落过程中轮胎切片的最大变形, 图8所示为两切片变形过程中翻边高度 H 以及胎侧与地面夹角 θ 的变化过程, 可见两切片变形过程基本一致, 因此两系统满足几何相似条件.

图 7 (网络版彩图)轮胎滚动与下落最大变形对比

5.2 侧向喷溅形成机理对比

为便于分析, 分别从滚动溅水以及垂直入水数值结果中取一横截面上的水粒子, 观察粒子运动轨迹. 如图9所示, 两系统中侧向飞溅的水粒子均可根据运动轨迹分成3个区域, 各区域位置基本一致, 且水粒子运动方式相同: 区域 I 为胎肩附近表层水粒子, 受轮胎扰动后直接向斜上方飞溅, 区域 II 为轮胎下方深层水粒子, 受到轮胎与地面的挤压, 形成水平方向的射流,

然后冲击区域 III, 推动液膜向外扩展, 并在冲击位置形成向上的射流, 产生飞溅. 由此可见, 两系统侧向喷溅的形成机理相同.

5.3 侧向喷溅形态对比

对于飞机轮胎溅水问题, 判断其是否会进入发动机的主要依据是正视溅水角度和竖直方向溅水速度, 因此本文用这两个参数来表征溅水形态. 图10(a)所示为滑跑速度46.3 m/s的轮胎滚动溅水模拟结果, 可看出侧向溅水在形成初期基本沿线性发展, 故定义溅水内轮廓切线与地面夹角为正视溅水角. 图10(b)所示为采用4.2节方法得到的轮胎变速垂直入水结果, 可见与滚动溅水形态基本一致. 由于4.2节方法在试验中应用难度较大, 为增加试验可行性, 本文还针对轮胎以式(7)

图 8 (网络版彩图)轮胎滚动与下落变形过程对比翻边高度变化过程(a)以及胎侧与地面夹角变化过程(b)

图 9 (网络版彩图)侧向喷溅形成机理对比. (a) 滚动; (b) 下落

计算得到的平均速度垂直入水的情况进行了模拟, 结果如图10(c)所示. 可见其无翻边侧溅水形态与滚动结果基本一致, 而翻边侧略有差异, 造成差异的原因是轮胎匀速下落过程无法精确保证翻边变形过程及作用时间与滚动过程一致.

5.4 溅水形态随滑跑速度变化

大量试验数据表明^[6], 侧向溅水形态是与飞机滑

跑速度相关的, 因此需进一步研究不同速度下两系统的相似性. 按照同样方法建立不同滑跑速度的轮胎滚动溅水模型以及相应的变速、匀速垂直入水模型, 对比两系统的正视溅水角以及竖直方向溅水最高速度, 结果如表2和图11所示.

计算结果表明: (1) 随着入水速度的增加, 轮胎滚动、变速下落和匀速下落3种工况中的溅水角度和速度变化趋势相同, 均呈增加趋势; (2) 3种工况无翻边侧的溅水形态基本一致; (3) 至于翻边侧, 变速下落产生的溅水形态相较于匀速下落而言更接近滚动结果. 因此在该相似性的实际应用过程中, 采用变速下落过程可满足几何相似、动力相似和运动相似3个条件, 从而得到相对准确的溅水形态; 若仅研究无翻边轮胎, 则采用匀速下落工况即可较准确地得到相应的滚动溅水形态; 至于翻边轮胎, 采用匀速下落工况会造成一定的误差, 此时应尽量保证翻边作用时间与滚动过程一致, 从而减小误差.

综上所述, 轮胎滚动溅水与垂直入水两系统产生的侧向喷溅在正视溅水形态上存在相似性. 因此, 可在飞机设计阶段针对机轮开展单轮垂直入水试验, 得

图 10 (网络版彩图)侧向喷溅水粒子速度云图

表 2 正视溅水角对比

滑跑速度	有无翻边	溅水角 (°)		
		滚动	变速下落	匀速下落
25.7 m/s	有	37	35	37
	无	48	49	49
36 m/s	有	40	41	42
	无	48	49	50
46.3 m/s	有	41	41	44
	无	48	49	50

图 11 (网络版彩图) 溅水速度随滑跑速度变化。(a) 翻边侧; (b) 无翻边侧

到正视溅水角度和速度, 然后根据轮胎与发动机相对位置判断溅水是否可能进入发动机, 以便于及时优化

整体布局, 或设计合适的挡水机构, 降低发动机进水的可能性, 为日后的适航试验做充足的准备, 从而缩短研发周期。

6 讨论与结论

(1) 从流体受力的角度分析了轮胎溅水机理, 将轮胎对流体的作用解耦, 认为溅水沿横向的飞溅运动由轮胎对水体在竖直方向上的挤压作用产生;

(2) 结合流动相似理论以及切片法思想可推出: 对于浅水喷溅问题而言, 当轮胎滚动溅水与垂直入水两系统中轮胎构型相同、水深相同, 且轮胎与水之间的相对速度存在一定对应关系时, 两系统中产生的侧向喷溅存在流动相似性;

(3) 采用SPH-FEM耦合方法建立了弹性轮胎滚动溅水与垂直入水数值模型, 计算结果验证了两系统中侧向喷溅的形成机理以及正视喷溅形态的相似性, 说明了采用轮胎垂直入水试验的方法研究飞机滑跑溅水问题的可行性, 为该问题的研究提供了新的思路, 有良好的应用前景;

(4) 分析过程中未考虑轮胎打滑的影响, 打滑后溅水形态的变化以及相似性有待进一步研究。

参考文献

- 1 戚学峰, 曾涛. 民用飞机动力装置溅水试验适航验证方法. 航空发动机, 2013, 39: 55-58
- 2 Robert C D, Walter B H. Ground-run tests with a bogie landing gear in water and slush. NASA Technical Report, Note D 3515, 1966
- 3 Martin C S. Hydrodynamics of tire hydroplaning. NASA Technical Report, 1966
- 4 Robert H D, Sandy M S. Measurements of flow rate and trajectory of aircraft tire-generated water spray. NASA Technical Report, 1987
- 5 Barrett R V. Research into slush drag, wheel spray and aquaplaning at Bristol University using small pneumatic tyres. ARC Reports and Memoranda No. 3682, 1970
- 6 Mitchell D J. ESDU83042 Estimation of spray patterns generated from the sides of aircraft tyres running in water of slush. Technical Report. London: The Royal Aeronautical Society, 1998
- 7 van Es G W H, Roelen A L C, Kruijsen E A C, et al. Safety aspects of aircraft performance on wet and contaminated runways. NLR Technical Report, 2001
- 8 Gooden J H M. The effect of crosswind on engine ingestion during take-offs from water contaminated runways. NLR Technical Report, 2012
- 9 刘谋斌, 宗智, 常建忠. 光滑粒子动力学方法的发展与应用. 力学进展, 2011, 41: 217-234
- 10 徐维, 李亚南, 高向阳, 等. 机场污染跑道飞机轮胎的溅水问题. 航空学报, 2015, 36: 1177-1184
- 11 Qu Q, Zhang F, Liu P, et al. Numerical simulation of water spray caused by a rolling airplane tire. J Aircraft, 2016, 53: 182-188
- 12 侯国祥. 流体力学. 北京: 机械工业出版社, 2015. 110-113
- 13 马山, 宋竟正, 段文洋. 二维半理论和切片法的数值比较研究. 船舶力学, 2004, 8: 35-43
- 14 张凡. 大型飞机机轮溅水机理与抑制方法数值研究. 硕士学位论文. 北京: 北京航空航天大学, 2015. 6-10
- 15 朱林培. 基于LS-DYNA的轮胎滑水特性研究. 中国制造业信息化, 2009, 38: 72-75

Similarity of spray generated by tire rolling in the water and falling into water

ZHANG XianPeng, XU Fei, REN XuanQi & YANG Yang

Institute for Computational Mechanics and Its Applications, School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

The spray produced by aircraft tire running on wet runway may enter the inlet of engines, and lead to the compressor stall, surge, or even combustor flameout. Scholars used to study this problem by full-scale aircraft spray test, which may cost a lot, and get only a little valid data. According to the analysis of the interaction between tire and water, the similarities of the spray generation and propagation by tire rolling in the water and tire falling into water are proposed based on combining the strip method with the fluid similarity theory. Then the numerical models of an elastic chined tire rolling in the water and falling into water are established by coupled smoothed particle hydrodynamics (SPH) and finite element method (FEM) in LS-DYNA software. According to the numerical results, the mechanism of the side plume is given. The front views of the side plume in these two spray systems are compared to certify the similarity. At last, the test of tire falling into water is recommended to investigate the basic phenomenon of aircraft tire spray based on this kind of similarity.

aircraft tire, spray, smoothed particle hydrodynamics, fluid similarity theory, strip method

doi: [10.1360/N092017-00071](https://doi.org/10.1360/N092017-00071)