

低平尾灭火机投水纵向响应问题分析研究

杨旭

(中国人民解放军 95885 部队, 陕西 西安 710089)

摘要:针对低平尾常规布局灭火机在采用重力投水系统时出现的纵向抬头响应问题,通过分析灭火机作业过程中气动特性的变化机理,提出了一种刚性水体的假设方法,用以模拟水体对飞机气动特性的影响,初步揭示了该现象的内在机理。在此基础上对空间流场进行分析,给出最优的涡流发生器布局并进行了理论验证。投水试飞试验结果表明,安装涡流发生器能够有效减轻由水体引起的抬头力矩,显著降低投水瞬间的推杆力大小,保障灭火机飞行作业安全,为其他固定翼灭火机的研制提供设计与改装参考。

关键词:灭火机;流体仿真;投水响应;涡流发生器;布局设计;飞行试验

中图分类号:V211 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-2758(2026)01-0012-05

灭火飞机是多个大国应对森林火灾的主要装备,其中大中型灭火机是固定翼消防灭火作业的主力机型,一般由原有军民运输类飞机平台改装而来^[1]。固定翼飞机大载水量投放时,短时间内飞机整机质量变化剧烈,将会引起纵向响应问题^[2],特定构型以及投水系统的飞机响应均有不同,严重时会影响飞机的操纵性和安全性。庞巴迪 CL415 飞机在执行投水操纵过程中并未产生剧烈的纵向响应,只需要中等程度的操纵即可维持飞机的姿态^[3]。安 32 飞机在执行投水试飞时,发现飞机会产生一个突发的向上俯仰力矩,其所承受的实际过载为 3.3g,远大于理论计算值 1.4g,究其原因:飞机在投水后,水流击打在飞机平尾上,导致飞机俯仰力矩平衡被破坏,飞机在大迎角状态飞行,从而显著增加了纵向过载。后续通过重新设计投水系统避免飞机水流击打至平尾从而解决了该问题^[4]。

国内外文献资料中,针对大型灭火飞机投水动态响应特性的研究屈指可数。为了节约飞行试验高昂的成本和周期,国内外学者主要通过风洞试验和 CFD 仿真方法研究灭火机投水过程中飞机的纵向响应。Varner^[5]针对麦道-87 投水的动态响应问题,提出建立水体的刚体模型假设,采用 CFD 仿真方法

获得飞机投水时的气动特性变化,并利用风洞试验进行验证。罗琳胤等^[6]采用小孔出流理论对飞机的投水量进行数值模拟,并利用气动力最小状态拟合技术进行非定常气动力建模,依次分析飞机平飞和俯冲投水时的动态响应。

低平尾灭火机于 2023 年开展研发试飞时,该飞机翼展 29.2 m,机身长度 24.7 m,投水过程中也产生了明显的抬头现象。初步判断投水时机身下方突然出现的大量水体阻挡了气流的流动,气流在水体后产生分离,使得机身尾部出现大面积的负压区,后机身和平尾下表面吸力增加,进而引起飞机在短时间内的急剧抬头,飞机迎角增大,过载增加。为分析这一问题,本文结合 Varner 的研究成果,根据实际试飞情况,提出一种新的刚性水体模型,结合 CFD 仿真验证了投水纵向响应的发生机理,在此基础上给出能有效减轻抬头力矩的涡流发生器最优布局,并通过飞行试验验证,保障了灭火机飞行作业安全,为其他固定翼灭火机的设计与改装提供了参考。

1 刚性水体假设

本文提出了一种将水体模拟为刚体进行建模的仿真方法,将多相流计算简化为单向流,避免了多相流收敛困难的问题。首先通过观察分析低平尾灭火机投水的过程,根据实际投水的结果绘制水体在

XOZ 平面上的投影曲线。在 YOZ 平面,依据王永亮等^[7]提出的投水半扩展厚度估算公式,将水体按照对应的扩散角进行扩散,可建立如图 1 所示的模型。

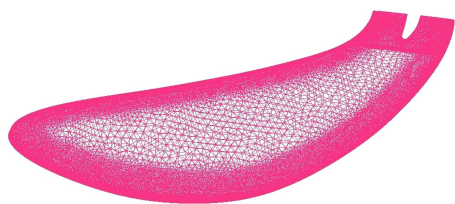
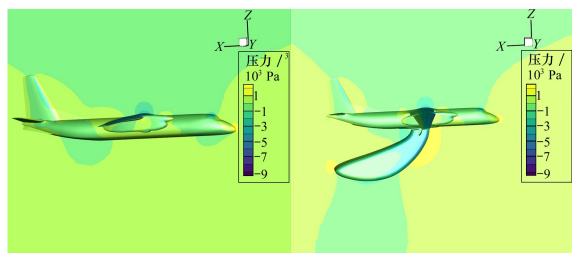


图 1 水体模型示意图

为验证该水体模型的正确性,采用与飞行试验相同的条件(航向来流速度 70 m/s,迎角 4°),进行有/无水体的对比仿真计算,水体采用壁面边界条件,计算结果见表 1,压力分布如图 2 所示。

表 1 俯仰力矩对比

构型	C_m	调平所需 $\delta_e / (^\circ)$	$C_{m,平尾}$	$C_{m,机身}$
全机(无水体)	-0.091 3		-0.079 3	0.035 9
全机(有水体)	0.065 8	4.76	0.016 2	0.093 0



a) 无水体影响压力分布 b) 有水体影响压力分布

图 2 压力分布对比图

计算结果表明,增加水体模型后,气流沿航向的流动受到阻挡,在水体后方形成了负压区,飞机的抬头力矩增加,与理论分析结果吻合。同时将增加的抬头力矩折算为配平所需升降舵偏度,对比低平尾灭火器实际投水试飞数据中升降舵偏角 δ_e 的变化量为 5.36°,误差为 0.6°(即 11%),认为该水体模型近似合理,可以定性满足仿真需求。

2 纵向抬头响应缓解措施分析

将原有重力投水系统更改为增压投水系统会显著增加飞机质量,减少商载,同时会大幅更改飞机构型。为避免对原飞机平台进行较大改装,以较低成

本来缓解低平尾重力投放灭火器投水抬头这一现象,按照刚性水体假设分析结果,拟采用在机腹处布置涡流发生器的方案解决这个问题。加装涡流发生器是一种消除局部气流分离且设计改动小、工程实用性高的有效措施^[8]。涡流发生器作为典型的被动流动控制技术,其外形类似于小展弦比机翼,能够在近壁面处诱导产生同向或者反向的控制涡对,将高能来流卷入近壁面,为边界层内气流注入动量,推迟或消除边界层流动分离,可以实现增升减阻、改善整流罩气流分离等效果,因此在亚/超声速飞行器中得到了广泛的应用^[9-10]。

根据涡流发生器的原理,需要将其布置在高能量的区域,利用其卷起的涡流将高能量的区域导入低能量的区域,进而缓解水体引起的负压区,降低灭火器投水过程中的纵向抬头力矩。考虑能量大小及效用,需从位置和外形 2 个维度对涡流发生器的布局进行分析。

通过分析图 2 的压力分布,应该将涡流发生器布置在投水舱门后方,此处有明显的负压区,结合压力分布和飞机的外形,涡流发生器航向位置选择布置在舱门后 0.16 m 处。在该航向位置基础上,观察机腹展向剖面空间流场,在机腹沿周向选取垂直于物面航向速度的区域建立参考线(与对称面夹角 0°,12°,30°,42°),进行空间速度分析。由图 3 可以看出,舱门之间的间隙导致水流中间形成一个无水的通道,气流在流过该通道时加速,因此 0°参考线位置的速度高;12°参考线位置处于水体后方,速度较低。需将涡流发生器布置在 0°~12°参考线位置之间,且头部指向内侧,确保将高能量的气流导入低能量区域。

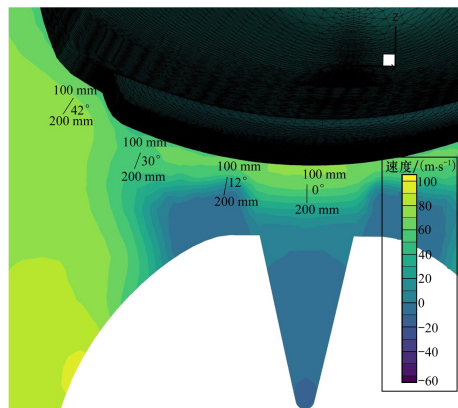


图 3 展向剖面空间速度

涡流发生器设计要求高出边界层,结合低平尾灭火机气动特性,高度选择 200 mm,展弦比为 0.5,抛物线根据经验设计。图 4 显示涡传导的距离与偏转角度成呈正比。根据计算结果,当涡流发生器偏转角度超过 30°时形阻过大,故偏转角度选择 25°。

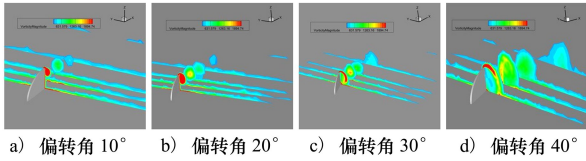


图 4 涡流发生器不同偏度对比图

3 涡流发生器试验验证

3.1 仿真分析验证

根据上文确定的布局形式,将一对涡流发生器布置在低平尾灭火机机腹处,选取不同的构型进行 CFD 仿真对比计算,仿真软件为 CFX,条件为飞行速度 70 m/s,海拔高度 0 m。图 5 为涡流发生器产生的涡量图,水体存在前提下,有/无涡流发生器的压力分布和流线示意图如图 6 所示。结合图 5~6 可以看出,涡流发生器的存在使得机腹后部拖出了 2 个漩涡,给予涡流发生器外侧气流向下的诱导速度,使得低能量的气流远离飞机表面,同时将通道内的高能量气流补充进来,减弱水体存在引起的负压。

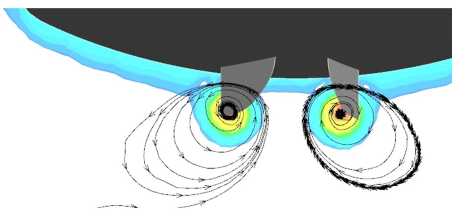


图 5 涡流发生器涡量和空间流线图

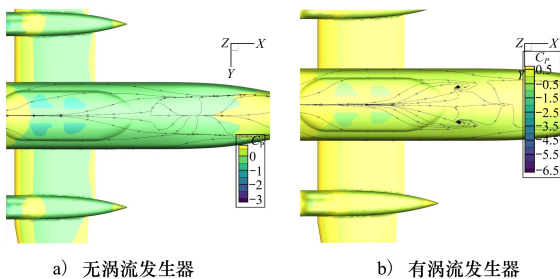


图 6 压力分布和流线示意图

析可知,在无水体的条件下,该涡流发生器布局并未对飞机的纵向静稳定性产生影响,极大地减少了飞机平台改装的工作量,有效缩短研制周期。同时在水体影响的前提下,布置有涡流发生器的构型相比原始构型纵向静稳定导数 $C_{m\alpha}$ 增加 0.002,增加百分比为 6%,可以缓解水体引起的飞机抬头现象。

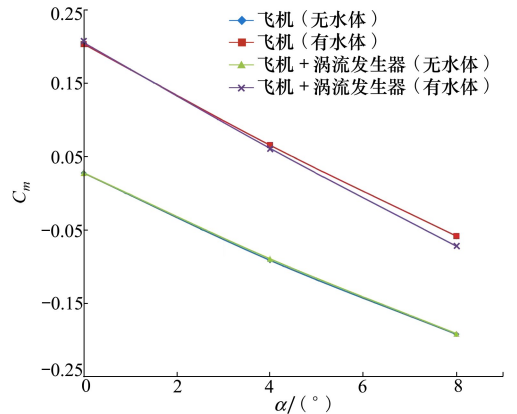


图 7 不同构型俯仰力矩对比

3.2 试飞验证分析

根据上文 CFD 的结论,如图 8 所示,在低平尾灭火机机腹上安装涡流发生器并进行对比试飞验证。如图 9 所示,通过机载加装摄像机进行水流流体观察。飞机投水后水并未直接击打飞机平尾区域,投放后水流主要作用于腹鳍及平尾区域下方,飞机机腹安装涡流发生器后,能够将高能量气流补充到低能量的区域,水流能够更快与机体分离。试飞结果显示,升降舵偏度的峰值从 7.38°降低到 5.36°,升降舵偏度变化量从 5.36°减小至 3.34°,推杆力从

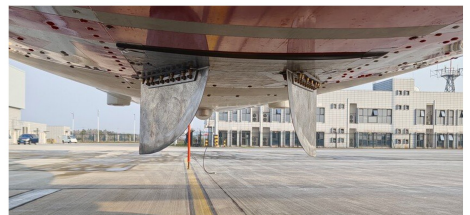


图 8 涡流发生器安装示意图



a) 无涡流发生器构型(水流上卷) b) 有涡流发生器构型(水流下移)

不同构型的俯仰力矩计算结果如图 7 所示。分

图 9 不同构型下投水作业示意图

53.7 kg降低到 30 kg, 涡流发生器的使用显著降低了抬头力矩, 改善了投水过程中水体对全机气动特性的影响, 证明该涡流发生器布局有效, 可以用于灭火飞机研制。

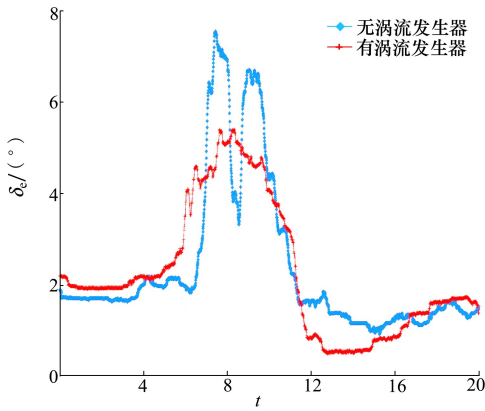


图 10 试飞结果对比曲线

4 固定翼灭火机研制改装建议

除专门针对火灾场景设计的水陆两栖飞机外, 其余固定翼消防灭火飞机均为成熟飞机平台改装而来。结合低平尾重力投水飞机纵向抬头响应这一显著特征可知, 对于新研制及改装灭火机建议优选高、中平尾布局飞机, 以更符合稳定的投水响应这一需求。当选择成熟的低平尾常规布局飞机作为灭火机平台时, 优先设计加压投水系统以避免重力投水系统水流导致飞机俯仰力矩产生显著变化。如进一步受限于质量指标限制或系统研制复杂度等因素选择重力投水系统时, 可进一步探究加装一种或多种不同结构形式的气动补偿缓解措施。图 11 给出了为满足稳定的投水响应特征需求的固定翼灭火机研制改装流程, 该流程为其他固定翼灭火机的研制提供

了设计与改装参考。

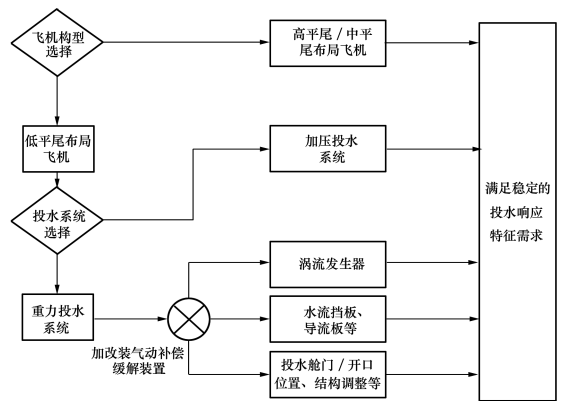


图 11 基于投水纵向响应问题的固定翼灭火机研制改装建议流程

5 结论

本文通过对低平尾灭火机投水过程的研究, 探究了低平尾重力投放灭火机投水抬头现象的产生原因, 即投水后水体导致了机身后部平尾下方产生了负压区。提出一种将水体模拟成刚体并进行 CFD 仿真的方法, 分析了灭火机投水过程中的气动特性变化, 初步揭示了低平尾灭火机纵向抬头的机理。由于常规布局灭火机在国内的研究较少, 本文仅对投水响应进行定性分析, 后续仍需开展大量试验验证工作以获取更多数据。在水体引起的负压区这一理论上结合涡流发生器的工作原理, 设计了一种可应用于灭火机的涡流发生器布局方式, 仿真验证及投水试飞验证表明该方法可有效降低灭火飞机投水过程由于水体引起的抬头力矩。同时给出了固定翼灭火机研制改装建议流程, 对国内灭火飞机研制和改装设计具有很大的参考价值。

参考文献:

[1] 蔡志勇, 石含玥, 赵红军, 等. 水陆两栖飞机灭火飞行仿真系统构建与仿真[J]. 航空学报, 2023, 44(6): 215-230. Cai Zhiyong, Shi Hanyue, Zhao Hongjun, et al. Construction and simulation of amphibious aircraft fire-fighting flight simulation system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(6): 215-230. (in Chinese)

[2] 杨荣, 吕继航. 水陆两栖飞机动载荷特性数值分析[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2016, 33(3): 18-24. Yang Rong, Lü Jihang. Dynamic load characteristic of large firefighting amphibious aircraft[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2016, 33(3): 18-24. (in Chinese)

[3] Mike Gerzanic. Flight-test: Bombardier 415 the superscooper[EB/OL]. (2009-08-22) [2024-10-22]. <https://www.flight-global.com/flight-test-bombardier-415-the-superscooper/88562.article>.

[4] Alex Mladenov. An-32P firekiller[EB/OL]. (2023-11-05) [2024-10-22]. <https://www.airattackmag.com/articles/an-32p->

firekiller.

- [5] Varner W Daniel. The aerodynamics of a civil transport in aerial firefighting[R]. AIAA-2019-3697.
- [6] 罗琳胤, 吕继航. 灭火飞机投水动态响应特性[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(6): 798-802.
Luo Linyin, Lü Jihang. Dynamic response analysis of water dropping for firefighting aircraft[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(6): 798-802. (in Chinese)
- [7] 王永亮, 蔡志勇, 赵红军. 大型灭火飞机投水算法研究[J]. 微计算机信息, 2012, 28(9): 265-266.
Wang Yongliang, Cai Zhiyong, Zhao Hongjun. Study of the algorithm for dropping water with air tanker[J]. Microcomputer Information, 2012, 28(9): 265-266. (in Chinese)
- [8] 梅源, 刘毅, 赵新新, 等. 一种下单翼飞机近距耦合导流片的设计与研究[J]. 佳木斯大学学报, 2024, 42(4): 78-82.
Mei Yuan, Liu Yi, Zhao Xinxin, et al. Design and research on the close coupled guiding vanes for a low wing aircraft[J]. Journal of Jiamusi University, 2024, 42(4): 78-82. (in Chinese)
- [9] Özden M, Keskin S, Sezer A E, et al. Computational modelling of control of laminar separation bubble over an airfoil using an integrated tubercle and vortex generator[J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2026, 146(2): 675.
- [10] 黄红波, 陆芳. 涡流发生器应用发展进展[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 35(3): 611-614.
Huang Hongbo, Lu Fang. Research progress of vortex generator application[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 35(3): 611-614. (in Chinese)

Longitudinal drop-water response analysis of low-flat-tailed firefighting aircraft

Yang Xu

(Unit 95885 of People's Liberation Army, Xi'an 710089, China)

Abstract: The low-flat-tail conventional-layout firefighting aircraft produces the obvious longitudinal head-up response when the gravity water-drop system is used. In order to solve this problem, through the theoretical study of the aerodynamic characteristic change principles during the aircraft's firefighting, a rigid water body assumption method is put forward to simulate the effect of the water body on the aerodynamic characteristics of the firefighting aircraft, and the intrinsic mechanisms of the water body are preliminarily revealed. On this basis, the spatial flow field is analyzed, and the optimal vortex generator layout is given and theoretically verified. The water-drop trial flight verification results show that the installation of a vortex generator can effectively mitigate the head-up moment caused by the presence of water bodies and that the mitigation measure is a low-cost and high-efficiency aerodynamic mitigation measure, which significantly reduces the magnitude of the instantaneous pushrod force of the water drop and guarantees the safety of a firefighting aircraft's flight, providing a design and modification reference for the development of other fixed-wing firefighting aircraft.

Keywords: firefighting aircraft; fluid simulation; water drop response; vortex generator; layout design; flight test

引用格式: 杨旭. 低平尾灭火飞机投水纵向响应问题分析研究[J]. 西北工业大学学报, 2026, 44(1): 12-16.

Yang Xu. Longitudinal drop-water response analysis of low-flat-tailed firefighting aircraft[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2026, 44(1): 12-16. (in Chinese)