

文章编号:1000-8055(2011)12-2676-08

探头式结冰探测器安装位置分析

朱程香, 孙志国, 付 斌, 朱春玲

(南京航空航天大学 航空宇航学院, 南京 210016)

摘 要: 通过求解雷诺时均 Navier-Stokes(N-S)方程获得空气流场,采用欧拉法求解水滴运动场获得水滴运动轨迹.通过计算来流液态水含量等值线距离部件表面的垂直距离,获得部件不同位置上的广义水滴遮蔽高度.研究了不同飞行条件和气象条件下的广义水滴遮蔽高度大小.根据探头式结冰探测器安装位置要求确定探头式结冰探测器的合理安装区域.通过分析不同的状态参数对广义水滴遮蔽高度的影响,为结冰探测器安装位置计算状态参数的选取提供了数据支持.

关 键 词: 结冰探测器; 水滴遮蔽高度; 安装位置; 水滴轨迹; 欧拉法; 空气流场

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Analysis on installation location of probe-style ice detectors

ZHU Cheng-xiang, SUN Zhi-guo, FU Bin, ZHU Chun-ling

(College of Aerospace Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Navier-Stokes (N-S) equations were solved to obtain the air-flow field around the geometry, and Eulerian method was used to obtain the water droplet trajectories. Based on these results, generalized shadow height of water droplet could be calculated by computing the vertical distance between the geometry and the freestream liquid water content (LWC) isoline. Generalized shadow height of water droplet under various flight and meteorological conditions were calculated. Locations of probe-style ice detectors were determined according to the installation requirement. With the results, effects of various flight and meteorological parameters on generalized shadow height of water droplet were analyzed, providing a guidance for choosing appropriate calculation conditions for the installation location of ice detector.

Key words: ice detector; shadow height of water droplet; installation location; water droplet trajectories; Eulerian method; air-flow field

飞机结冰会严重影响飞机的气动性能和操纵品质,因此安装飞机防除冰系统对于保证飞行安全至关重要;获得正确的结冰探测信号,自动或指导机组人员手动开启防除冰系统也是非常关键的.结冰探测器用于实时探测飞机结冰信号,当飞机进入结冰气象条件,或者飞机关键部位结冰厚度达到一定程度时,发出报警信号.根据警报信

号,开启飞机防除冰系统,降低飞机在结冰条件下失事的可能性.

结冰探测器从功能特点上可分为探头式和平膜式两种^[1].探头式结冰探测器通常安装在机头表面,暴露在外界环境中的探头通过探测外界气象条件或结冰探测器探头表面的结冰情况判断是否需要开启防除冰系统.平膜式结冰探测器安装

收稿日期:2010-12-27; 修订日期:2011-03-30

基金项目:国家自然科学基金(10972106)

作者简介:朱程香(1984—),女,江苏如皋人,博士生,主要研究飞机结冰数值模拟与飞机防除冰系统设计验证.

在容易结冰的部位,如机翼、尾翼表面等,这类探测器体积小、质量轻,可齐平保形安装,减小探测器对所安装部位气动外形的影响。结冰探测器不仅要满足性能要求,而且要满足安装位置要求。

国内外对结冰探测器的结构、工作原理及性能研究比较深入^[1-2],但是对安装位置选择办法的报导相对较少。2001 年,Cober S G 等指出只要结冰探测器位于水滴遮蔽区外,则安装位置对于探测结果影响不大^[3],说明了水滴遮蔽高度对于结冰探测器安装位置的重要性。Jackson D G 等从理论上分析了结冰探测器的性能和安装位置要求^[4],但是至今没有公开文献详细阐述确定探测器安装位置的计算方法和分析过程。

本文重点阐述了探头式结冰探测器安装位置的分析方法,定义液态水含量(liquid water content,简称 LWC)小于来流液态水含量的区域为广义水滴遮蔽区,计算不同条件下的广义水滴遮蔽高度,确定探头式结冰探测器合理安装区域,同时研究了飞行参数和结冰气象参数对于广义水滴遮蔽高度的影响,为进行探头式结冰探测器安装位置分析时确定计算状态参数提供理论支持。

1 理论基础

要保证结冰探测工作信号的可靠性,应确保其探头位于水滴遮蔽区之外^[4],同时还应保证探测器的各项参数对结冰条件足够敏感。基于这个思想,应通过计算分析,找出机头表面水滴遮蔽区的界限,并分析影响机头探测器敏感性的几个参数的最佳位置,即可从理论角度确定机头结冰信号探测器的合理安装区域。

在水滴的撞击区后面存在一个没有水滴的区域,即水滴遮蔽区,此区域内液态水含量为零。水滴遮蔽高度为固体壁面到距离表面最近一条水滴运动轨迹线之间的垂直距离。水滴遮蔽区的边界线可通过对空气和水滴流场耦合求解,将离机头表面最近的水滴运动迹线识别后得到。

机头探测器敏感性综合体现在探头自身的结冰速率 W_d 上^[4],研究 W_d 的影响参数可见其与以下几个参数成正比关系

$$W_d \propto \beta_d \cdot \omega_d \cdot V_d \cdot n_d$$

为保证探测器足够敏感,就是保证探测器探头所处位置上的 W_d 在飞机周围两场中位于最大值,由于机身周围流场各处不同,但机翼作为机身典型部件,其周围的空气场和水滴场均具有代表意义,且其表面综合指标 W_w 也在机身周围流场

中处于相对高的水平,因此一般都选择机翼的作为评价标准,也就是要求

$$W_d > W_w \quad (1)$$

由于

$$W_w \propto \beta_w \cdot \omega_w \cdot V_w \cdot n_w$$

式中 β, ω, V, n 分别为局部水收集系数、液态水含量、气流速度和冻结系数,下标 d 为探测器探头上的相应数据, w 为机翼表面的相应数据。

分析式(1)可见,其基础为

$$(\beta_d/\beta_w) \cdot (\omega_d/\omega_w) \cdot (V_d/V_w) \cdot (n_d/n_w) > 1 \quad (2)$$

式(2)成立依赖于各子项表达式分别满足

$$\beta_d/\beta_w > 1; \omega_d/\omega_w > 1;$$

$$V_d/V_w > 1; n_d/n_w > 1.$$

由于探头式结冰探测器尺寸相对于机翼而言非常小,其局部水收集系数比机翼表面的局部水收集系数大很多,因此只要探测器探头位于水滴遮蔽区外, $\beta_d/\beta_w > 1$ 总是成立的。

冻结系数是指部件表面冻结的水滴质量与收集到的水滴质量之比,它是部件表面的几何外形以及液态水含量 ω 、水滴平均容积直径 d_{mv} 、气流速度和温度的复杂动态函数,无论是探测器本身还是机翼表面,其各点的气流速度和冻结系数都随飞行状态改变而改变,因此在实际设计过程均不予专门考虑。

由于撞击区域外机翼表面的液态水含量均小于来流值,因此为保证 $\omega_d > \omega_w$,只要保证 $\omega_d > \omega_0$ (ω_0 为来流液态水含量)。因此本项工作的重点就聚焦在如何通过计算分析,寻找能保证 $\omega_d > \omega_0$ 的区域,以保证探头所处位置对结冰气象条件的敏感性。

综合以上分析可知,结冰探测器的安装位置必须满足两个条件:

1) 结冰探测器必须避开水滴遮蔽区,即 $\omega_d > 0$;

2) 为保证结冰探测器对结冰参数的敏感性, $\omega_d > \omega_0$ 。

因此结冰探测器安装位置处的液态水含量应满足 $\omega_d > \omega_0$ 。为便于分析结冰探测器的合理安装位置,本文采用广义水滴遮蔽高度来综合考虑以上两个安装条件。

下面就广义水滴遮蔽高度计算展开详细论述,当然,结冰探测器在飞机上的最终安装位置还应考虑与其他设备相互之间的干扰及飞机结构限制等多种因素,本文同时对飞行状态的改变和结

冰气象条件的改变对广义水滴遮蔽高度这一关键参数的影响进行了计算分析,得出的结论对今后进行结冰探测器安装位置计算分析时选择计算状态点提供理论依据。

2 计算方法

无论是广义水滴遮蔽区域分析还是探头周围液态水含量计算,其前提都要开展流场计算。

2.1 流场计算

求解非定常 Navier-Stokes(N-S)方程,湍流模型采用 $k-\varepsilon$ 两方程模型^[5-6]。由于水滴体积分数很小,一般在 10^{-6} 量级,因此忽略水滴对空气流场的影响,空气流场与水滴运动场采用单向耦合。

2.2 水滴轨迹计算

本文采用欧拉法计算水滴运动场,基于质量守恒和动量守恒原理建立控制方程如下^[7]:

$$\frac{\partial(\alpha\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha\rho\mathbf{u}) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\alpha\rho\mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha\rho\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = K\alpha\rho(\mathbf{u}_a - \mathbf{u}) + \alpha\rho\mathbf{F} \quad (4)$$

式中 α 为水滴体积分数, $\mathbf{u}$ 为水滴速度矢量, $\mathbf{u}_a$ 为空气气流速度矢量, ρ 为水滴密度, $\mathbf{F}$ 为除空气阻力之外的其他外力。

K 为惯性系数,表示如下:

$$K = \frac{18\mu_f}{\rho_w d_w^2}, f = \frac{C_d Re_w}{24}$$

且

$$\frac{C_d Re_w}{24} = \begin{cases} 1 + 0.15 Re_w^{0.687} & (Re_w \leq 1000) \\ 0.44 \cdot Re_w & (Re_w > 1000) \end{cases} \quad (5)$$

$$Re_w = \frac{\rho_a |\mathbf{u}_a - \mathbf{u}| d}{\mu_a} \quad (6)$$

式中 C_d 为阻力系数, μ_a 为空气的动力黏度, ρ_a 为空气密度, d 为水滴直径。

基于有限体积法求解方程(3),方程(4),采用四阶 Rung-Kutta 格式离散时间项,中心差分格式离散空间项,进出口边界速度和体积分数均取来流值,壁面边界采用无穿透性边界条件^[8-9],若 $\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} < 0$ ($\mathbf{n}$ 为壁面法线单位向量),则水滴不会撞击到固体壁面,此时体积分数和水滴速度均取上一个时刻数值,若 $\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} \geq 0$,则水滴撞击在固体壁面,此时体积分数和水滴速度均置为零。

局部水收集系数是指微元表面实际水收集率

与最大可能水收集率之比,根据水滴运动场的计算结果,采用如下计算公式^[10],可获得局部水收集系数 β 。

$$\beta = \frac{\alpha(\mathbf{u} \cdot \mathbf{n})}{\alpha_\infty V_0} \quad (7)$$

式中 $\mathbf{n}$ 为壁面法线单位向量, α_∞, V_0 分别为来流体积分数和来流气流速度。

图1为相同计算条件下,采用本文所述计算方法与试验数据^[8]的对比图,可以看出,本文计算结果与试验数据吻合较好,说明本文计算方法是正确有效的。

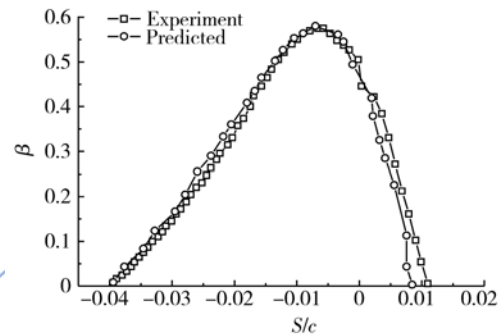


图1 局部水收集系数对比图

Fig.1 Comparison of local collection efficiency for predicted and experiment data

2.3 广义水滴遮蔽高度分析

在部件周围存在一个液态水含量小于来流液态水含量的区域^[11],即广义水滴遮蔽区,此区域内液态水含量均小于来流液态水含量.广义水滴遮蔽高度为固体壁面到来流液态水含量等值线之间的垂直距离^[12]。

广义水滴遮蔽高度的大小可以根据水滴运动场的计算结果,进行如下处理获得(以纵向半机身为例):

1) 垂直于机身中轴线截取二维几何面作为该位置的广义水滴遮蔽高度分析截面;

2) 以同样的方法该截面相应的三维流场计算结果中水滴场的计算结果截取出来,并在二维图形上显示 $\omega = \omega_0$ 的等值线,如图2中深颜色曲线;

3) 在二维截面上任意取一点A向外作法向线,该法线与 $\omega = \omega_0$ 的等值线的交点为B,线段AB的长度即为A点对应的广义水滴遮蔽高度;

4) 以二维截面的上表面起始点对应的角度为 0° ,下表面结束点对应的角度为 180° ,将各点对应的广义水滴遮蔽高度随角度表示,如图2中

所示.

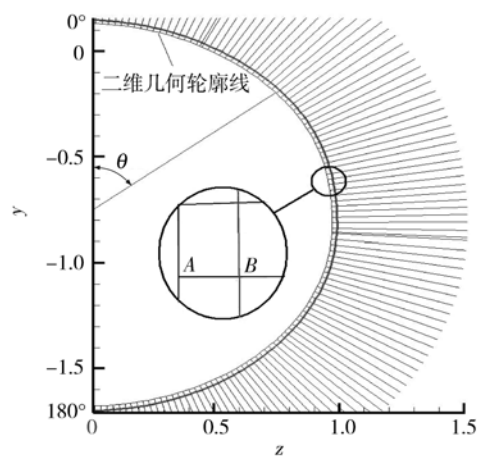


图 2 广义水滴遮蔽高度示意图
Fig. 2 Schematic diagram of generalized shadow height of water droplet

3 计算结果分析

3.1 探头式结冰探测器安装位置分析

本文以某型飞机机头为研究对象,采用上述计算方法计算了在表 1 所示的计算条件下的流场和水滴运动场. Case 2 条件下机头周围的网格划分及空气流场压力云图如图 3 所示. Case 2 条件下水滴轨迹和液态水含量分布云图计算结果如图 4 所示,图中机头附近浅色区域即为水滴遮蔽区.

在机头表面截取 3 个典型截面,分别命名为 1#, 2#, 3# 截面. 由于结冰探测器不能安装在飞机雷达罩表面,因此 1# 截面位于雷达舱之后约 50 mm 处,又结冰探测器应避开舱门,以防止其与雷达罩之间的相互干扰,3# 截面位于舱门向机头方向打开时所到达位置之前约 50 mm 处,2# 截面位于 1# 与 3# 截面中间,其位置如图 3 所示.

表 1 计算状态参数
Table 1 Condition parameters used for the simulations

Case	飞行高度 H/m	结冰温度 T/K	飞行马赫数 Ma	飞行攻角 $\alpha/(^{\circ})$	液态水含量 $\omega/(\text{g}/\text{m}^3)$	水滴平均容积直径 $d_{mv}/\mu\text{m}$
1	6 000	263.15	0.406	4	0.5	20
2	3 000	263.15	0.6	4	0.5	20
3	3 000	263.15	0.406	0	0.5	20
4	3 000	263.15	0.406	10	0.5	20
5	3 000	263.15	0.406	4	0.5	25
6	3 000	263.15	0.406	4	0.5	30

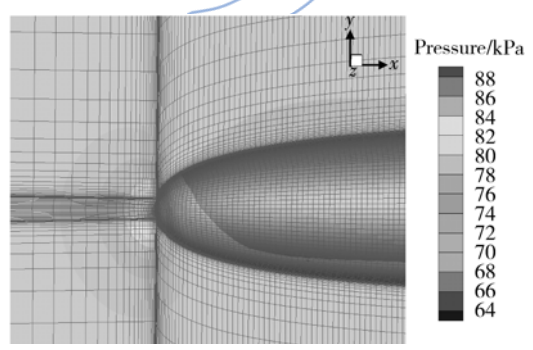


图 3 机头周围网格及压力分布云图
Fig. 3 Grid and pressure distribution around the aircraft nose

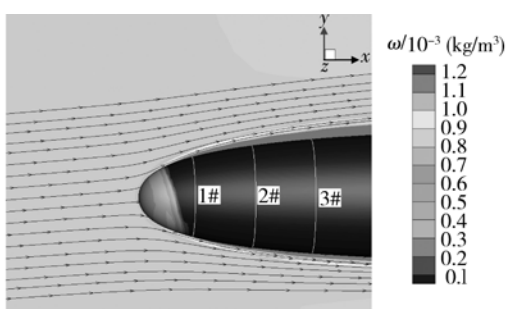


图 4 机头周围水滴运动轨迹及液态水含量分布云图
Fig. 4 Water droplet trajectories and LWC distribution around the aircraft nose

采用 2.3 节所述的后处理方法分别绘制这三个截面的广义水滴遮蔽高度曲线.

如图 5 所示,为 1# 截面在表 1 所示的 6 个计算条件下的广义水滴遮蔽高度曲线,图中水平直线为探测器高度线,本文中探测器高度为 25

mm. 由图 5 可以看出,角度在 $65^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 范围内广义水滴遮蔽高度小于探测器高度,因此在 $65^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 范围内安装探头式结冰探测器是合理的.

图 6 为 2# 截面在表 1 所示的 6 个计算条件下的广义水滴遮蔽高度曲线. 可以看出,角度在

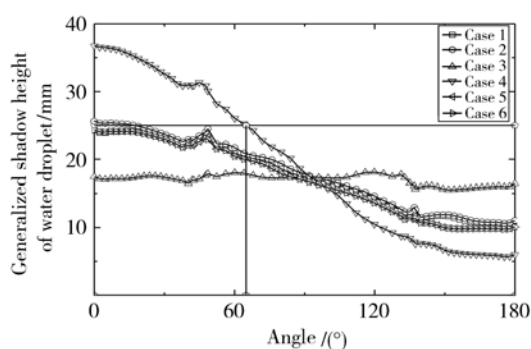


图5 1#截面广义水滴遮蔽高度曲线

Fig. 5 Generalized shadow height of water droplet on section 1

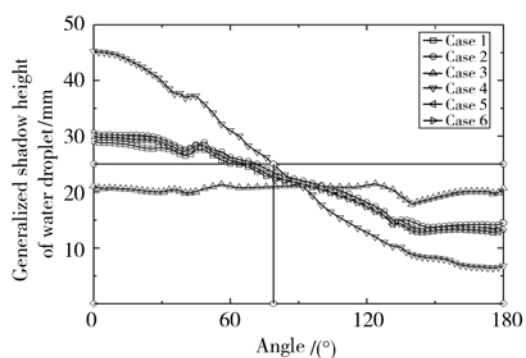


图6 2#截面广义水滴遮蔽高度曲线

Fig. 6 Generalized shadow height of water droplet on section 2

79°~180°范围内广义水滴遮蔽高度小于探测器高度,在这个范围内安装探头式结冰探测器是合理的。

图7为3#截面在表1所示的6个计算条件下的广义水滴遮蔽高度曲线。可以看出,角度在94°~180°范围内广义水滴遮蔽高度小于探测器

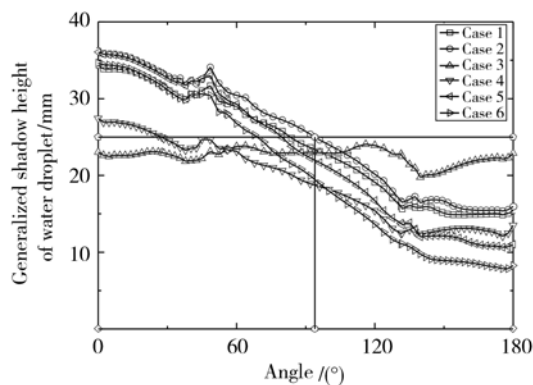


图7 3#截面广义水滴遮蔽高度曲线

Fig. 7 Generalized shadow height of water droplet on section 3

高度,在这个范围内安装探头式结冰探测器是合理的。

综合以上分析,在表1所示的计算条件下,根据广义水滴遮蔽高度要求,结冰探测器可以安装的范围如图8阴影区域所示。

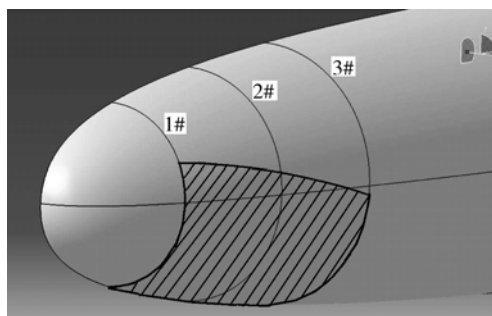


图8 结冰探测器的合理安装位置

Fig. 8 Reasonable installation location of probe-style ice detector

结冰探测器的安装位置还应考虑其他飞机结构限制,如风挡,逃生通道,前起落舱表面均不能安装结冰探测器,同时,还应考虑飞机上已有传感器的影响,保证结冰探测器和其他传感器互不干扰。

进行适航认证时,要求结冰探测器能够在CFR25部附录C所述的结冰环境范围内均能够满足安装位置要求。即使采用CFD(计算流体动力学)方法也很难计算所有的条件下的广义水滴遮蔽高度,因此需要研究各个参数对于广义水滴遮蔽的影响,为探头式结冰探测器安装位置分析计算状态参数的选择提供数据支持。

3.2 飞行状态和结冰气象条件参数对探头式结冰探测器安装位置影响分析

保持表1中case 1状态其他参数不变,仅改变飞行高度,分别计算飞行高度为0,1200,3000,6000 m时机头3#截面广义水滴遮蔽高度曲线,如图9所示。可以看出,飞行高度越高,同一个位置上广义水滴遮蔽高度越大,这主要是因为飞行高度越高,空气压力和密度越小,水滴相对雷诺数(Re_w)越小,水滴与空气之间的黏性阻力越小,水滴运动轨迹偏离空气流线的幅度越大。

图10显示了其他条件相同,飞行马赫数为0.1,0.3,0.406,0.6时机头3#截面广义水滴遮蔽高度曲线。可以看出,飞行马赫数越大,同一个位置上广义水滴遮蔽高度越大。飞行马赫数增大时,水滴雷诺数增大,水滴相对雷诺数增大,水滴

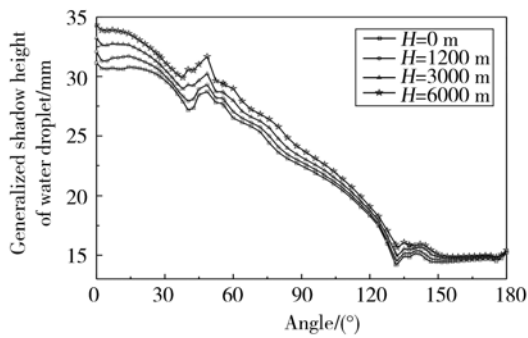


图 9 广义水滴遮蔽高度随飞行高度的变化关系
Fig. 9 Generalized shadow height of water droplet at different angular positions with various flight heights

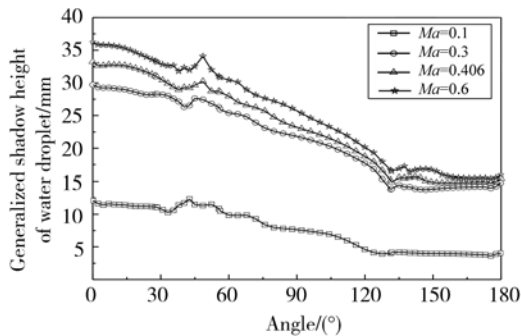


图 10 广义水滴遮蔽高度随马赫数的变化关系
Fig. 10 Generalized shadow height of water droplet at different angular positions with various flight Mach numbers

与空气之间的黏性阻力增大,同时水滴初始动量也增加,且增长幅度较黏性阻力大,因此水滴运动轨迹偏离空气流线的幅度增大。

图 11 为广义水滴遮蔽高度随结冰温度的变化关系,由于结冰温度对于水滴运动轨迹的影响非常小,因此其对广义水滴遮蔽高度的影响也非常小,不同温度条件下广义水滴遮蔽高度的相对误差均小于 5%。

图 12 为飞行攻角分别为 0° , 4° , 8° , 10° 时机头 3 号截面广义水滴遮蔽高度曲线对比图。可以看出,在机头上表面,广义水滴遮蔽高度随攻角的增大而增大,在机头的下表面,广义水滴遮蔽高度随攻角的增大而减小。这是因为飞行攻角增大时,机头上表面的撞击范围减小,下表面水滴撞击范围增大,从而导致机头上表面水滴运动轨迹曲率增大,广义水滴遮蔽高度增大,下表面水滴运动轨迹曲率减小,广义水滴遮蔽高度减小。

图 13(a)为水滴平均容积直径 d_{mv} 分别为 15,

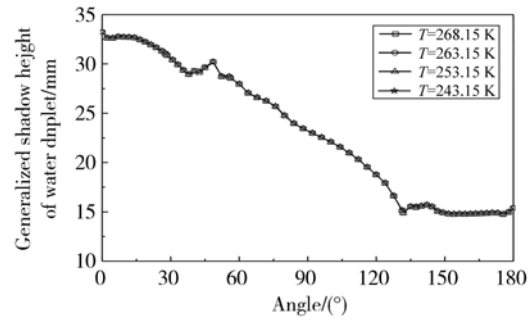


图 11 广义水滴遮蔽高度随结冰温度的变化关系
Fig. 11 Generalized shadow height of water droplet at different angular positions with various temperatures

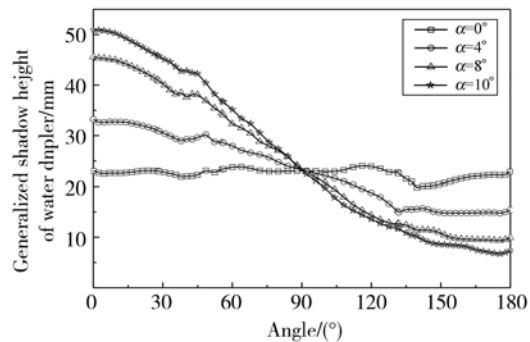


图 12 广义水滴遮蔽高度随飞行攻角的变化关系
Fig. 12 Generalized shadow height of water droplet at different angular positions with various flight attack angles

20, 25 μm 时机头 3 号截面广义水滴遮蔽高度曲线。由图 13(a)可以看出,当 $d_{mv} < 25 \mu\text{m}$ 时,广义水滴遮蔽高度随着 d_{mv} 的增加而增大。图 13(b)为 d_{mv} 分别为 25, 30, 35, 40, 45 μm 时机头 3 号截面广义水滴遮蔽高度曲线。由图 13(b)可以看出,当 $d_{mv} > 25 \mu\text{m}$ 时,广义水滴遮蔽高度随着 d_{mv} 的增加而减小。上述结果说明,随着 d_{mv} 的增大,广义水滴遮蔽高度先增大后减小,存在一个峰值,出现这种现象的原因是 d_{mv} 不同时,水滴相对速度雷诺数不同,由式(5)可知, f 的计算方法也不同,当 $Re_w < 1000$ 时,惯性系数 $K \propto d_w^{-1.313}$, 当 $Re_w > 1000$ 时,惯性系数 $K \propto d_w^{-1}$, 若仅考虑水滴重力的影响, $F \propto d_w^3$, 因此方程(4)的右侧为 d_w 形如 $ad_w^{-1} + bd_w^3$ 或者 $ad_w^{-1.313} + bd_w^3$ (其中 a, b 为系数)的函数,当 d_w 小于某一数值时,随着 d_{mv} 的增大, K 的减小趋势占主导地位,因此水滴轨迹偏离气流流线的幅度增大,广义水滴遮蔽高度增大;当 d_w 大于某一数值时,随着 d_{mv} 的增大, F 的增大趋势占主导地位,因此水滴轨迹偏离气流流线的幅

度减小,广义水滴遮蔽高度减小.在本文计算条件下,此峰值出现在 $25 \sim 30 \mu\text{m}$ 之间.

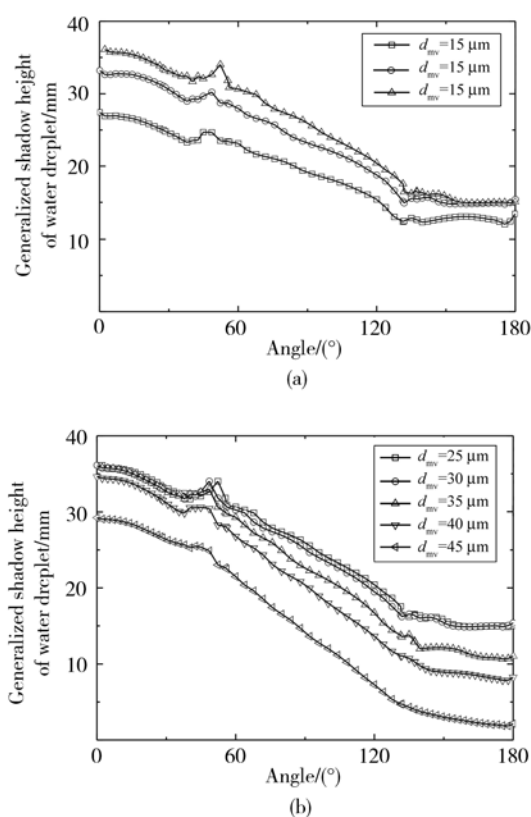


图13 广义水滴遮蔽高度随水滴平均容积直径的变化关系

Fig. 13 Generalized shadow height of water droplet at different angular positions with various d_{mv}

图14显示了液态水含量 ω 对于广义水滴遮蔽高度的影响,可以看出不同 ω 条件下广义水滴遮蔽高度的相对误差均小于5%,由此说明 ω 对水滴运动轨迹和广义水滴遮蔽高度的影响非常小.

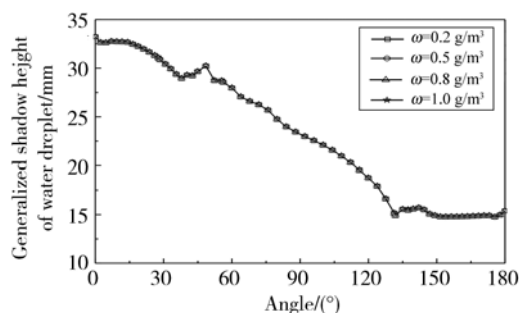


图14 广义水滴遮蔽高度随液态水含量的变化关系

Fig. 14 Generalized shadow height of water droplet at different angular positions with various ω

根据以上分析,进行结冰探测器位置选择仿真计算的状态参数应该包括以下几种状态点以确定飞机的最大广义水滴遮蔽高度值:最大飞行高度,最大飞行马赫数,最大或最小攻角(根据飞机的上下表面进行区分),以及广义水滴遮蔽高度达到峰值时对应的 d_{mv} 值.

4 结 论

本文从理论上分析了结冰探测安装位置要求,在流场计算的基础上,提出了机头广义水滴遮蔽高度确定方法,并结合结构等因素,以算例为例,阐述了探头式结冰探测器安装位置的确定方法,通过改变飞行状态参数和结冰气象条件参数,研究了不同参数改变对广义水滴遮蔽高度这一影响探头式结冰探测器安装位置关键参数的影响,得出以下结论:

- 1) 广义水滴遮蔽高度随飞行高度及飞行马赫数的增大而增大.
- 2) 机头上表面广义水滴遮蔽高度随飞行攻角的增大而增大,下表面广义水滴遮蔽高度随飞行攻角的增大而减小.
- 3) 广义水滴遮蔽高度随水滴平均容积直径 d_{mv} 的增大出现先增大后减小的趋势,存在一个 d_{mv} 值,使得广义水滴遮蔽高度达到最大.
- 4) 结冰温度和液态水含量 ω 对广义水滴遮蔽高度的影响非常小,在进行探测器安装位置分析计算的状态参数选择时,可以忽略这两个参数的影响.

上述结论可对新研飞机进行结冰探测器安装位置确定时选择计算状态提供理论依据,同时本文提供的分析方法可作为探头式结冰探测器安装位置的确定方法.

参考文献:

- [1] Bowden D T, Gensemer A E, Skeen C A. Engineering summary of airframe icing technical data[R]. FAA Technical Report ADS-4, AD608865, 1964.
- [2] Marchman J F III, Manor D. A cheap, effective icing detector for general aviation aircraft[R]. AIAA79-1823, 1979.
- [3] Cober S G, Korolev A V, Isaac G A. Assessing characteristics of the rosemount icing detector under natural icing conditions[R]. AIAA 2001-0397, 2001.
- [4] Jackson D G, Owens D G, Cronin D J, et al. Certification and integration aspects of a primary ice detection system [R]. AIAA 2001-0398, 2001.
- [5] Chung J, Choo, Y, Reehorst A, et al. Navier-Stokes analysis of the flowfield characteristics of an ice-contaminated

- aircraft wing[R]. AIAA-1999-0375,1999.
- [6] Shim J, Chung J, Lee K D. A comparison of turbulence modeling in flow analysis of iced airfoils[R]. AIAA 2000-3920,2000.
- [7] Wirogo S, Srirambhatla S. An Eulerian method to calculate the collection efficiency on two and three dimensional bodies[R]. AIAA 2003-1073,2003.
- [8] Tong X L, Luke E A. Eulerian simulation of icing collection efficiency using a singularity diffusion model [R]. AIAA 2005-12466,2005.
- [9] Iuliano E, Brandi V, Mingione G, et al. Water impingement prediction on multi-element airfoils by means of Eulerian and Lagrangian approach with viscous and inviscid air flow [R]. AIAA 2006-1270,2006.
- [10] Bourgault Y, Habashi W G, Dompierre J, et al. An Eulerian approach to supercooled droplets impingement calculations[R]. AIAA 1997-15259,1997.
- [11] 裴燮纲, 韩凤华. 飞机防冰系统[M]. 北京: 航空专业教材编审组, 1985.
- [12] Cabler S J M. Aircraft ice protection[R]. [S. l.]: Federal Aviation Administration Advisory Circular, AC No. 20-73A, 2006.