

飞机积冰后若干飞行力学问题综述

苏 媛, 徐忠达, 吴祯龙

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 回顾飞机积冰后若干飞行力学问题研究的历史与现状, 着重介绍了积冰飞机气动数据的获取途径、积冰飞机飞行力学建模与飞行仿真、积冰对飞机稳定性和操纵性的影响以及积冰对飞机飞行性能的影响。在已有飞机积冰后飞行力学问题研究的基础上, 提出了飞机积冰后飞行力学问题研究领域需要解决和关注的若干问题, 包括通过数值模拟方法获取积冰飞机的气动数据、完善积冰对飞机气动导数影响的计算模型以及加强平尾失速方面的研究。今后需要进一步对模拟冰风洞、数值模拟方法和平尾失速进行研究, 并获取更多实验数据。

关 键 词: 飞机; 积冰; 飞行力学; 飞行性能; 稳定性; 操纵性

中图分类号: V212.1

文献标志码: A

Overview of several ice accretion effects on aircraft flight dynamics

SU Yuan, XU Zhong-da, WU Zhen-long

(School of Aeronautic Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: An overview of the studies about several ice accretion effects on aircraft flight dynamics was presented here. Special attention was paid to the following areas: the way to obtain the aerodynamic data of iced aircraft, the flight dynamic modeling and simulation of iced aircraft, the effect of ice accretion on the stability and handling quality characteristics as well as the flight performance. Based on the progress of existing research in these areas, some key issues deserving more attention of the researchers for resolution are addressed, including: obtaining the aerodynamic data of iced aircraft through numerical simulation method, consummating the calculation model of effects of ice accretion on aircraft aerodynamic derivatives and enhancing the investigation on stall problems of tailplane. The simulated ice wind tunnel, numerical simulation method, stall of tailplane should be further studied and more test data should be obtained in the future.

Key words: aircraft; ice accretion; flight dynamics; flight performance; stability; controllability

飞机积冰是飞机在遭遇积冰气象条件时经常遇到的表面某些部位聚积冰层的现象。积冰会改变飞机的气动外形, 影响空气流场, 导致飞机阻力增大, 升力减小, 严重时将导致飞行事故的发生。

美国 1973—1977 年的飞行事故统计数据显示, 由飞机积冰引起的飞行事故占总飞行事故的

2.56%, 积冰导致的致命事故占总致命事故的 4%。1976—1979 年, 1981—1988 年, 积冰导致的飞行事故多达 542 起^[1]。自 20 世纪 90 年代以来, 飞机积冰导致民航客机发生了多起严重事故, 美国 Safety Advisor^[2]给出的 1990—2000 年由于飞机积冰导致的飞行事故统计数据表明, 在所有气

收稿日期: 2013-05-09

基金项目: 航空科学基金(2009ZA51007)

作者简介: 苏媛(1966—), 女, 山东菏泽人, 副教授, 博士, 主要从事飞行力学与控制方向的研究。

象因素带来的飞行事故中,12%是由于飞机积冰导致的,并且其中92%是在飞行中发生积冰。

我国幅员辽阔,南北、东西范围很大,国土面积中高寒地区、山地、大面积水域等占有相当大的比例,气象条件较为复杂,广泛存在着积冰气象条件。同时,随着我国国民经济的进步和航空事业的发展,飞行密度提高,全天候飞行需求增大,飞行中遭遇积冰的几率也会随之大大地增加。

虽然现在多数飞机都装有防冰、除冰系统,但是由于不同积冰条件下,积冰严重程度以及防冰、除冰系统的工作情况存在一定差异,带冰飞行仍然很难避免。因此,积冰条件下对飞机空气动力特性、稳定性、操纵性以及飞行性能等飞行力学特性的研究十分重要,很多这一领域的研究已经展开,并取得了重大的进展。

本文在回顾和介绍了当前积冰对飞机飞行力学特性影响的研究现状与进展的基础上,根据积冰对飞机飞行力学特性影响研究的特点和发展需要,对该领域目前存在的问题进行了总结并对今后的发展方向做出了展望。

1 积冰飞机气动数据的获取

积冰飞机气动数据是积冰条件下飞机飞行力学特性研究的基础,只有明确积冰对飞机气动系数、气动导数、操纵导数等气动数据的影响,才可以直接分析飞机积冰前后升阻系数、稳定性导数、操纵导数等的变化;也可以为建立积冰飞机气动导数的计算模型提供依据,从而进行积冰飞机的飞行仿真分析。目前获取积冰飞机气动数据的途径主要有3种:飞行实验、风洞实验和数值计算。

1.1 飞行实验

飞行实验方法的基本思路是,对积冰飞机进行飞行实验,选择一定的飞行动作,应用参数辨识方法获取飞行数据,并对飞行数据做进一步的计算分析,从而获取积冰飞机的气动数据。按照积冰的来源,积冰飞机飞行实验可以分为自然环境积冰飞行实验和带人造模拟冰型飞行实验。

飞行实验方法的实验条件最接近飞机真实积冰飞行情况,因此这种方法是获取积冰飞机气动数据最直接、最可靠的方法。尤其是在分析飞机积冰位置或积冰范围不同的情况时,虽然也可以应用风洞实验方法进行,但由于在目前风洞可用的低雷诺数下很难获得质量较高的数据,因而虽然飞行实验成本较高,多数数据仍然主要来自于飞

行实验^[3]。

早在1948年,Preston和Blackman^[4]已经开始采用飞行实验方法尝试测量积冰对飞机气动性能的影响,并获得了试飞飞机C-46在自然积冰条件下阻力所受的影响,为飞行实验方法研究积冰问题开辟了一条道路。

目前,飞行实验方法已经取得了较为广泛的应用,具有代表性的是NASA研究中心利用“双水獭”飞机^[5-7]完成的包括尾翼积冰研究计划(TIP)^[8-9]等大型研究项目在内的许多研究项目,为积冰飞机飞行力学研究提供了大量有价值的气动数据。

通过试飞数据获取飞机气动数据是飞行实验研究中十分重要的一个环节。1999年Miller和Ribbens^[10]采用两种模型对飞机的飞行实验数据进行了计算:平面地球线性模型(SWR)^[11]和球形地球非线性模型(OFFIT)^[12],应用计算得出的飞机气动数据建立飞机模型,并与DHC-6飞机在几种操纵输入情况下的试飞数据进行了对比,具有很好的一致性。

我国在积冰飞机飞行实验方面也有一定的进展,文献^[13]将Y12-II飞机自然积冰和带人造临界冰型飞行实验数据与无冰时的基准数据进行比较,来研究自然积冰和带人造临界冰型情况升力系数、阻力系数、拉杆力、失速速度的变化;针对Y-7飞机也进行了类似的实验^[14-15]。

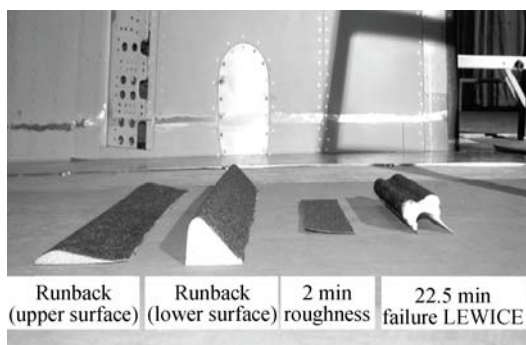
1.2 风洞实验

根据积冰来源的不同,针对飞机积冰问题进行的风洞实验可以分为冰风洞实验和模拟冰型风洞实验。

冰风洞实验的方法是在风洞中模拟飞机的积冰环境,使飞机、机翼、翼型等或者其模型在风洞之中产生积冰,同时测量气动系数和气动导数。由于建造冰风洞难度大、成本高,而且测量难度较大,研究中一般应用冰风洞进行积冰冰型的预测,对于测量飞机气动系数和气动导数一般采用模拟冰型风洞实验。

模拟冰型风洞实验是将需要进行实验的冰型人工做成模型固定在飞机上某个部位,然后进行气动力的测量,模拟冰型一般是经过冰风洞实验或者数值模拟计算得出的最具代表性的临界冰型,如图1所示^[16]。

作为获取积冰飞机气动数据的另一种方法,风洞实验与飞行实验相比,具有低成本、低风险、针对性强等优点,但是由于风洞实验条件的限制

图 1 模拟冰型示例^[16]Fig. 1 Examples of simulated ice shape^[16]

(风洞大小、雷诺数等),某些情况下得到的结果需要进一步的对比分析才可应用。

利用风洞实验对积冰的研究可以上溯到 70 年前,1940 年 Johnson^[17]应用风洞对 Lockheed Electra 飞机的同比例缩小模型进行了积冰前后静态飞行性能、稳定性导数和操纵导数变化的研究。

近年来,国外风洞实验技术研究一直在持续不断地发展。Lee 等^[18]通过三维模拟冰型风洞实验,对不同尺寸比例和雷诺数比例机翼气动系数进行比较,分析了几何比例与雷诺数对机翼气动性能的影响。Ruff 以及 Saeed 等^[19-23]利用积冰缩比理论进行了全机或大部件的缩比风洞实验研究。文献[24-25]研究了风洞内积冰气象条件的模拟方法和迎风面积冰实验方法。1997 年, NASA^[26]针对一个双发短航程运输机在 NASA Langley 研究中心,采用飞机 1/8 比例缩小模型,进行了静态风洞实验,测量了积冰对飞行性能及稳定性的影响。在德国诺伊堡,针对 DHC-6 Twin Otter, Cessna business jet, Lockheed S-3B Viking 三种飞机同比例缩小模型的动态风洞实验已经进行^[27],并获取了大量的实验结果。

我国在风洞实验研究方面相对落后一些。冰风洞方面,国内的进展与国外的差距非常明显,目前我国只有武汉航空仪表厂拥有用于航空仪表实验的小型冰风洞,主要用于各航空仪表,例如空速管、攻角传感器、大气总温传感器和积冰信号器等

的积冰验证实验,尚不能用于飞机或者其大部件积冰的研究,但随着我国研发大型运输机和大型客机计划的逐步实施,飞机积冰问题受到了更多的关注,2007 年,国家正式立项将在中国空气动力研究与发展中心建立一座具有一定规模的大型冰风洞^[28]。在模拟冰型风洞实验方面,目前国内开展的研究仍然比较少,数据也比较缺乏,有待进

一步地发展。

1.3 数值计算

用数值计算预测飞机积冰的形状,是随着计算流体力学(CFD)的发展,从 20 世纪 80 年代开始兴起的。积冰过程是一个流固耦合的过程,但是,在数值模拟过程中,考虑到这种流固耦合很弱以及计算的可行性,一般将积冰过程看作是一个准定常的过程,即认为在某一个短暂的时间段内,空气绕流流场与水滴运动轨迹不受到积冰外形变化的影响,而在下一个计算时间段内,积冰外形重新生成,才会产生影响变化^[29]。故在这一个短暂的时间段内,预测积冰的数值模拟方法可概括为 3 步:首先,计算翼型、机翼或者飞机等研究对象的绕流流场,确定流场内各控制体的速度、温度、压力等参数;然后,通过求解确定流场中过冷水滴运动的控制方程,计算水滴撞击特性;最后,根据质量守恒和能量守恒定律建立积冰生长模型,对积冰过程进行模拟,进而获得积冰形状。

用数值计算方法研究积冰对气动特性的影响,是在已经通过飞行实验、风洞实验或者数值计算等获得了飞机或者机翼等研究对象积冰外形的基础之上,通过求解带有一定湍流模型的 N-S 方程,获得流场信息和气动力,对带冰研究对象的绕流流场进行数值计算,进而分析积冰对飞机或部件气动特性的影响。

2 积冰飞机飞行力学建模与飞行仿真

虽然分析飞机的飞行力学特性最直接可信的方法是飞行实验或者风洞实验等实验方法,通过实验方法可以直接获得积冰飞机的飞行数据并进行分析,但是由于实验方法成本高、风险大,而飞机面临的积冰条件和飞行动作又是多种多样的,通过飞行实验或者风洞实验等实验方法不可能全面地分析飞机在各种积冰情况下的飞行力学特性,因此计算机仿真技术成为分析积冰飞机飞行力学特性必不可少的工具。

2.1 积冰对飞机气动参数影响的计算模型

描述积冰对飞机气动参数的影响是积冰飞机飞行力学建模的一个至关重要的环节,一般可以通过分析已有的飞行实验、风洞实验以及数值模拟获得的积冰飞机气动数据,归纳总结获得。目前这一领域的研究仍处于比较不完善的阶段,方法的种类较少;现有方法的精度也比较低,适用范围受到限制。

2000年,Bragg等^[30]提出了一种物理意义明显、结构简单的描述积冰影响的模型,可用于估算积冰后飞机的气动参数,如式(1)和式(2)所示

$$C_{(a)ice} = (1 + \eta_{ice} k'_{ca}) C_{(a)} \quad (1)$$

$$k'_{ca} = k_{ca} (\eta / \eta_{ice}) \quad (2)$$

式中 η_{ice} 为积冰参数,主要体现飞机遭遇到的积冰严重程度,与飞机自身无关,仅依赖于积冰环境条件; η 为飞机积冰严重性参数,用于表征积冰对某种特定飞机气动特性影响; k_{ca} 为积冰对飞机气动参数的影响参数,对于给定的飞机是常值, $C_{(a)ice}$ 为计及积冰影响后 $C_{(a)}$ 的值。

目前的研究是基于 NASA 的“双水獭”飞机及 NASA 刘易斯积冰研究风洞的积冰数据库(在所有的 115 个积冰案例中大约 86% 是基于 NACA0012 翼型)进行的。

这种方法采用积冰严重性参数描述不同积冰条件对飞机气动参数的影响,形式简单,物理意义清晰,但是积冰相关影响参数 k_{ca} 取决于飞机的结构布局、翼型等固有参数,不同型号的飞机具有不同的 k_{ca} 。因此该方法只能使用在 k_{ca} 已经通过实验方法获得或者推算出的飞机型号上,对于估算该飞机在各种气象条件下的气动参数变化情况具有非常大的意义。

Lampton 等^[31] 在根据 DeHavilland Twin Otter 飞机的试飞数据分析 Cessna 208B 的飞行特性的研究中,提出了一种基于一定导数变化范围的估算方法。根据实验数据,各个气动导数与操纵导数积冰后的变化范围为 5%~25%,据此,提出了 f_{ice} 的概念来描述积冰对启动导数的影响, f_{ice} 大于 0.75 且小于 1.25, f_{ice} 具体数值大于 1 或者小于 1 要根据该导数在积冰后的变化来判断。根据此方法,积冰对飞机各气动系数或导数的影响就可以作为一个参量,人为确定。该方法以试飞、风洞数据为基础,确定了一个导数变化的范围,提出了参数 f_{ice} 应用于对积冰飞机气动、操纵导数的描述。方法虽然欠缺精度,并且随意性较大,但是可以方便地应用于不同类型的飞机积冰后导数的估算。

一些探索性的工作也在进行。文献[32]使用神经网络方法预测了冰型对翼型气动性能的影响,并指出神经网络方法可以很好地预测翼型的气动性能,并且具备替代目前的 η 方法体现积冰对飞机的影响的潜力。文献[33]通过对 Convair 580 飞机的建模研究指出,积冰气象条件的微观处理参数与积冰后气动导数的变化具有建立联系

的趋势,去量纲化的参数 γ 有希望作为一个指标参数,去体现积冰后配平以及稳定性和操纵性导数的变化。

积冰对飞行安全的威胁是广泛的,从民航客机到商务飞机再到运输机,它们的安全飞行都受到积冰的困扰;飞机在自然条件下遭遇的积冰气象条件也十分复杂,远非试飞或风洞实验数据所能覆盖。因此,根据已获得的试飞或风洞实验数据估算其他型号飞机积冰后的气动参数,或者根据同一型号飞机在试飞或风洞实验积冰气象条件下的气动系数、气动导数数据,估算该飞机在其他气象条件下的气动参数变化情况,从而最终建立积冰气动导数影响模型,成为一项非常实用的课题。但是目前这一方面的研究仍然很不完善,目前研究中应用最为广泛的是通过使用积冰严重性参数 η 来预测积冰影响的方法,虽然形式简单,物理意义清晰,但是只能使用在具有飞行实验或全机风洞实验数据的飞机型号上,今后这一方面的研究需要对多种类型的飞机进行多种积冰条件下实验,通过更多的实验数据来进行更深入的研究。

2.2 积冰飞机飞行仿真模型

随着对积冰问题研究的深入,以及计算机数值仿真技术的发展,通过飞行仿真分析积冰对飞机飞行的影响已经成为积冰研究领域应用较为广泛的方法。积冰飞机飞行仿真的基础是建立积冰对飞机气动参数的影响模型以及积冰飞机动力学模型,在此基础上,一方面可以通过对比积冰飞机与未积冰飞机的仿真结果分析积冰对飞机稳定性、操纵性的影响;另一方面可以进行飞行包线保护以及容冰控制等方面的研究。更进一步,可以在积冰飞机动力学模型的基础上开发飞行模拟器,训练飞行员在积冰飞行情况下对飞机的操作能力,以减少积冰飞行事故的发生。

现在,应用数值计算方法已经可以较合理地预测翼型或者机翼积冰的形状;可以方便地计算出积冰对流场的破坏、积冰后的气动参数等^[34];也能够作为飞行实验的数值模拟方法对积冰条件下飞机的飞行进行仿真。虽然数值计算方法是一种间接的模拟方法,精度还有待验证与提高,但是其成本远小于实验研究,使得数值计算成为飞机积冰问题研究的重要手段。

分析积冰后飞机的稳定性及操纵性需要建立可靠的积冰飞机飞行力学模型,进而利用数值计算方法对积冰飞机的飞行特性进行分析,能够有

效地预测积冰对飞机飞行特性的影响^[35]。

分析飞机的稳定性一般采用线性状态空间模型来描述. 文献[36]采用未知扰动项描述积冰对飞机的影响, 由状态空间模型建立飞机线性纵向动力学模型, 可以方便地进行积冰飞机稳定性、操纵性的研究分析。

软件 MATLAB 提供的 FDC(flight dynamics and control)工具箱将传感器噪声、大气扰动模型等因素引入飞机非线性飞行力学模型, 能较全面地反映飞机飞行力学特性^[37]. Sharma 等^[38]分析了积冰对自动驾驶飞机稳定性和操纵性的影响, 采用小扰动方程进行积冰后的稳定性分析, 用 FDC 进行操纵响应仿真。

2000 年, Dale 在文献[39]中介绍了 TAILSIM 软件仿真模型, 用于“双水獭”飞机平尾积冰模拟, 并与“双水獭”飞机“pushover”和“thrust transition”两种飞行动作的试飞数据对比, 飞机输出的响应与试飞数据一致性较好, 其中一个结果如图 2 所示(n 为法向过载)。

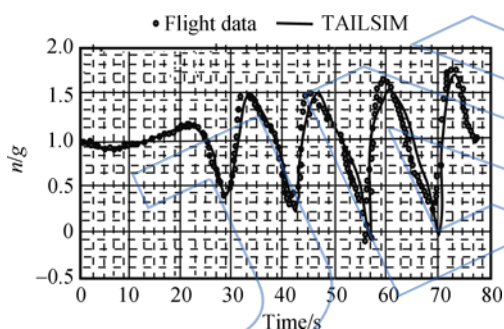


图 2 TAILSIM 仿真模型结果与试飞数据的对比^[39]

Fig. 2 Comparison between TAILSIM simulation model and flight data^[39]

2004 年, Krzysztof 等在文献[40]中, 采用四元数方法建模仿真飞行, 模拟了 TS-11 Iskra 飞机在积冰环境的爬升过程. 对描述飞机运动的参数进行了模拟, 再现了该飞机失事的过程, 如图 3 所示。

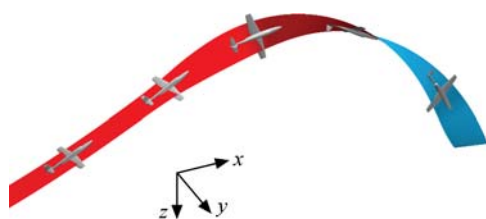


图 3 飞机失事过程再现^[40]

Fig. 3 Reappearance of flight accident^[40]

在进行积冰飞机飞行力学特性的研究时, 需要依据不同的研究目的和对象, 建立适当的线性或非线性飞行力学模型. 在进行飞行品质研究、积冰飞机的参数识别等时, 可使用小扰动线性模型; 飞机积冰适航分析时可能会涉及到临界飞行状态, 例如平尾失速特性, 非线性状态明显, 则必须采用合适的非线性动力学模型. 为了便于计算, 并考虑到原始气动数据的情况, 在某些情况下, 即使不采用小扰动方程, 但仍需要采用纵向、横向分开的飞机非线性运动方程^[41]。

3 积冰对飞机稳定性、操纵性的影响

3.1 积冰对飞机稳定性的影响

受到积冰的影响, 积冰飞机的稳定性会受到一定的影响, 积冰飞机气动外形的变化对飞机气动导数产生影响, 使得飞机的响应时间、峰值都会产生一定的变化^[42-43]。

飞机的静稳定性主要由静稳定性导数来体现. 文献[5]的飞行实验表明, 在平尾人工模拟冰型情况下, 纵向握杆静稳定裕度下降 5%. 文献[7]采用平尾和垂尾前缘模拟冰型, 通过试飞研究了积冰对飞机纵向稳定性的影响, 在襟翼闭合状态, 代表纵向稳定性的气动导数俯仰力矩斜率在积冰后增大了大约 10% (俯仰刚度减小 10%), 当襟翼偏角为 10° 时, 俯仰力矩斜率增大达到 17%. 同时, 实验表明, 积冰情况下飞机的方向稳定性也会下降。

目前分析动稳定性的主要手段是采用小扰动方程建模, 对积冰前后飞机纵、横向各模态特征根进行计算. 文献[44]分析了积冰对国内某型飞机动稳定性的影响, 与未积冰相比, 积冰飞机的短周期模态周期增大; 长周期模态周期减小; 整体来看, 积冰对纵向动稳定性的影响不大. 横侧动稳定性与积冰前相比, 滚转模态与荷兰滚模态有明显的不稳定趋势, 尤其是荷兰滚模态特性恶化十分明显. 文献[45]基于可扩展标记语言(XML)建立积冰后飞机气动增量模块计算飞机纵向稳定性. 通过对积冰后纵向运动参数时间响应计算, 直观地表现了积冰飞机纵向稳定性的变化. 结果显示飞机机翼积冰后仍能保持飞机的纵向稳定, 而尾翼积冰后稳定性受到很大影响, 主要原因是尾翼的气动中心离飞机气动中心较远, 力臂较大, 导致积冰对飞机的俯仰力矩影响较大, 从而导致飞机稳定性受到较大影响。

3.2 积冰对飞机操纵性的影响

3.2.1 铰链力矩

由于积冰改变了机翼或尾翼的气动外形与表面粗糙度,导致分离涡的产生,翼面气流提前分离,表面的压力分布发生改变,将影响到舵面的铰链力矩。Bragg^[46]根据翼型以及三维机翼的实验数据进行了分析气动性能、力矩的研究,分析了大直径过冷水滴(SLD)积冰对飞行控制的影响,指出大直径过冷水滴积冰会导致翼面压力分布发生变化,产生负方向的铰链力矩,并有可能进一步导致副翼的反向和失效。

目前对于铰链力矩研究的一个主要目的在于通过机载铰链力矩传感器采集的力矩信息判断翼面积冰情况,并进一步预测出飞机的失速迎角等飞行状态。1999年,Gurbacki和Bragg^[47]测量了NACA23012翼型随襟翼偏角变化的铰链力矩和非定常铰链力矩,非定常铰链力矩是测量积冰导致流场分离的铰链力矩的方均根。从测量结果上看,对铰链力矩测量可以用来预测在迎角失速前的气流分离情况,同时铰链力矩的测量也可以用来判断飞机积冰的位置。文献^[48]指出,铰链力矩随着迎角的变化而变化,并产生一定的波动,该波动由一不稳定系数来表征,它在升力出现极大值之前出现极大值,并且该不稳定系数的变化在升力曲线的线性阶段就可被观察到,因此可根据襟翼处不稳定铰链力矩值的变化来提前预知失速。

积冰条件下机翼的失速迎角比干净外形时要小,不同的积冰极限、积冰位置对失速迎角的影响也不同,在失速来临之前襟翼处非定常铰链力矩系数发生突变并具有一定的安全裕量。

3.2.2 操纵导数

操纵导数是体现飞机操纵性的一个重要方面,通过操纵导数可以直观地分析飞机操纵效率的变化。文献^[5]在自然积冰情况的飞行实验显示,全机积冰情况下升降舵操纵效率下降15%,只有尾翼积冰情况下,下降9%。1993年,Ratvasky等^[7]从“双水獭”飞机的试飞实验数据确定了积冰后飞机的纵向稳定性导数和操纵导数,并进行了分析。分析结果表明,平尾和垂尾积冰对纵向静稳定性、升降舵效率以及方向舵效率有很大的影响,下降幅度为10%~20%;而对偏航阻尼、俯仰阻尼的影响相对比较小。

2002年,Whalen等^[49]通过“双水獭”飞机的两次积冰试飞数据,分析了积冰对飞机升力、阻力

以及各个稳定性导数及操纵导数的影响,并将除冰系统引入试飞,分析了不同位置除冰的作用。飞行数据通过反复控制倍脉冲和单脉冲以及一些标准的飞行动作(比如爬升、下降、转弯)获得。对试飞数据的分析结果揭示了很多可以用来鉴别、描述积冰对飞机影响的结果。例如,积冰为明冰的情况下升力线斜率下降了28%,俯仰力矩斜率也有明显下降,但同时副翼操纵效率表现出了较小的变化。2003年,Thomas等^[50]根据“双水獭”飞机积冰试飞数据(试飞采用CFD计算出的冰型模拟积冰,包括ICE01和ICE02两种积冰范围),应用多种飞行策略对多项飞行导数、操纵导数进行分析。

3.2.3 仿真分析

计算机仿真分析是研究飞机飞行力学问题的一个必要手段。在建立了可信的飞行力学模型的基础之上,对积冰后飞机飞行的仿真在一定程度上可以替代飞行实验。通过飞行仿真不仅可以更随意地选择需要分析的飞行状态,而且可以更方便地获得飞机的飞行数据,更直观地观察各个飞行参数在不同操纵输入情况下的响应,从而更加全面深入地分析积冰对飞机操纵性的影响。

通过计算机仿真可以分析在不同积冰严重程度下飞机的飞行情况。文献^[40]采用四元数方法建模,进行仿真飞行,模拟了TS-11 Iskra飞机在积冰环境的爬升过程。对描述飞机运动参数的时间响应进行了计算。部分结果如图4所示(其中 λ 的绝对值越大表示积冰越严重)。文献^[51]在顺风突风扰动情况下,分别对无积冰、弱积冰和严重积冰情况下飞机飞行参数的时间响应进行了计算。

Lampton等^[31]通过仿真分析预测了积冰对横航向稳定性和操纵性的影响。利用“双水獭”飞机试飞的结果,将积冰下各气动参数、导数加以简单的比例变换,作为积冰的影响模型,应用于Cessna 208B飞机的仿真分析,并与试飞结果进行了对比。采用横航向小扰动状态空间方法建模,并将升力系数、阻力系数按翼面分解,从而实现左右机翼非对称积冰的仿真。通过该文条件下对左右机翼非对称积冰的仿真,可以看出,飞机运动迅速地进入不稳定状态,对飞行安全威胁极大,如图5所示。

应用类似的方法,Lampton等在2007年^[52]和2008年^[53]分别以Cessna 208B飞机的纵向小扰动模型和六自由度全机小扰动模型为基础,进行了纵向和全机积冰条件的飞机仿真分析,通过

比较积冰前后在一定操纵策略下飞行参数的变化分析积冰对飞机稳定性和操纵性的影响,其中一个结果如图 6 所示 ($1 \text{ kt} = 1.852 \text{ km/h}$, $1 \text{ ft} = 0.3048 \text{ m}$).

文献[44]对国内某型飞机积冰前后的升降舵、副翼和方向舵单位阶跃响应分别进行了计算,并从模态的角度对飞行仿真结果进行了分析.通过升降舵单位阶跃响应分析得出,积冰后长周期

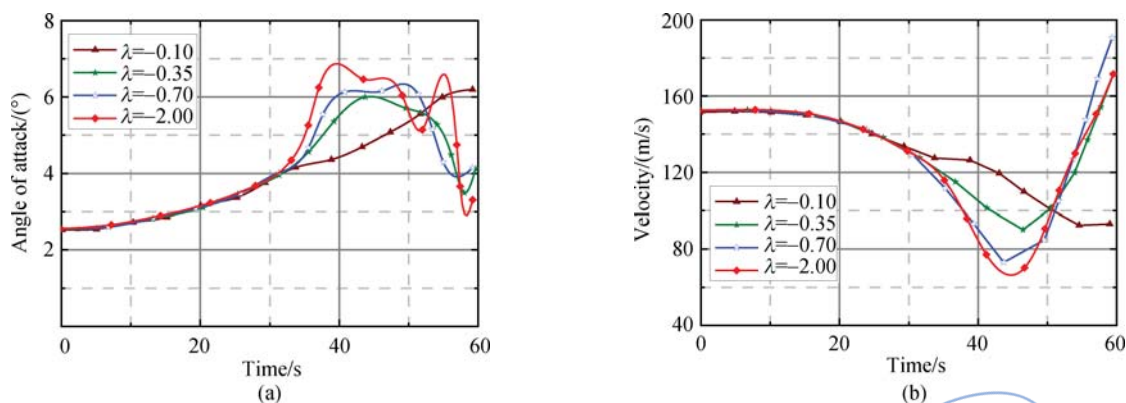


图 4 爬升情况下的飞行参数仿真^[40]

Fig. 4 Simulation of flight parameters during climbing flight-course^[40]

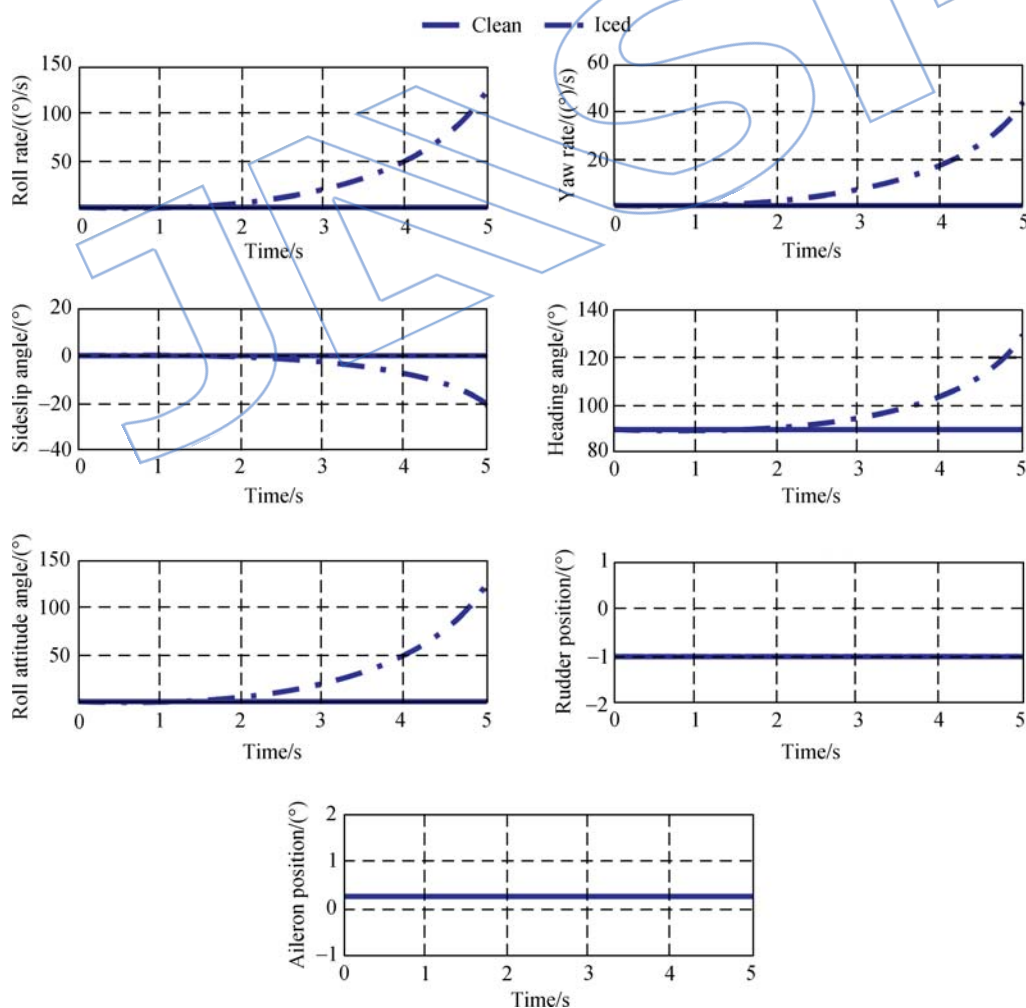
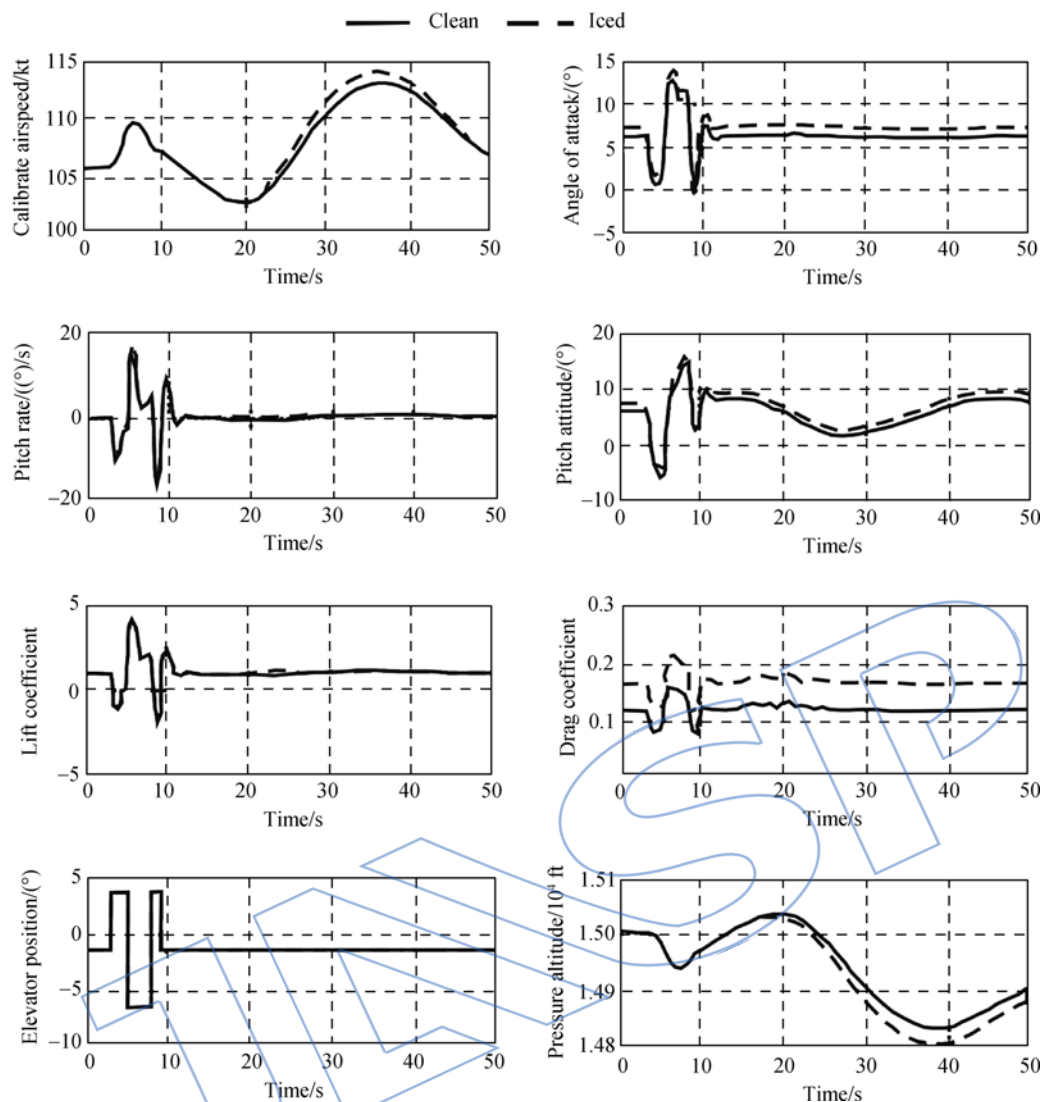


图 5 右侧机翼部分积冰情况飞行参数随时间的变化^[31]

Fig. 5 Time histories of flight parameters with right wing half partly iced^[31]

图 6 积冰前后纵向飞行参数比较^[53]Fig. 6 Comparison of longitudinal state parameters for clean and iced aircraft^[53]

模态的飞行速度和俯仰角响应的稳态值略有减小,初始响应变慢;短周期模态的迎角与俯仰角速度初始响应的峰值增大,响应变慢。副翼与方向舵阶跃输入的响应结果表明,侧滑角、滚转角、滚转角速度以及偏航角速度与积冰前相比,积冰后的响应都更加不平稳,而且出现较大振荡,这在一定程度上体现了模态特性的恶化。

利用仿真可以方便地分析当遭遇积冰条件时飞机的飞行状态以及各操纵舵面的响应情况。文献[30]采用 FDC 建立了飞机六自由度非线性仿真模型,对积冰过程进行了数值模拟(η 从 0 逐渐增加到 0.1),并计算出了干净飞机与遭遇积冰过程的飞机分别在定常转弯和巡航(发动机功率不变,高度为 2000 m)情况下参数的时间响应。通过对仿真结果的分析,可以看出在发动机功率和高度不变的情况下,速度、迎角、升降舵偏角均受到

积冰的影响,如图 7 所示。

文献[30]分别对机翼、尾翼和全机积冰情况下飞机的巡航状态(速度为 70 m/s,高度为 2000 m)进行了仿真,积冰情况为 η 从 0 逐渐增加到 0.1,通过仿真结果分析了不同部位积冰对飞机飞行的影响,如图 8 所示(1 lbt $\approx$ 4.45 N)。从图中可以看出,按照平尾积冰、机翼积冰、全机积冰的顺序,积冰对飞机飞行的负面影响逐渐增大。

文献[38]分析了积冰对自动驾驶飞机稳定性和操纵响应的影响,用小扰动方程进行积冰后的纵向稳定性分析,用 FDC 进行操纵响应仿真。对于俯仰角保持模式(PAH)的闭环线性分析指出,在积冰情况下系统仍然稳定,但是前提是操纵舵面等工作正常;通过 FDC 飞行仿真分析得出,在 PAH 和高度保持模式(ALH)自动驾驶模式下,飞行品质恶化明显,积冰前后升降舵的偏转情况

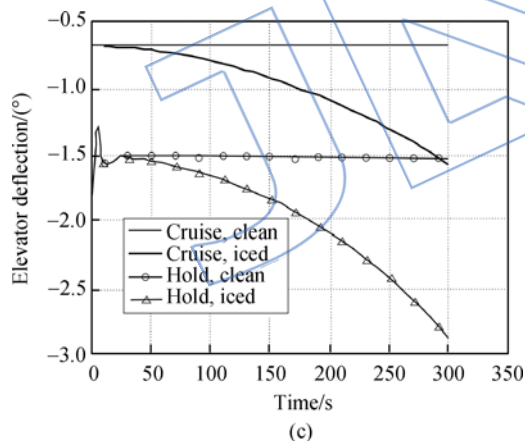
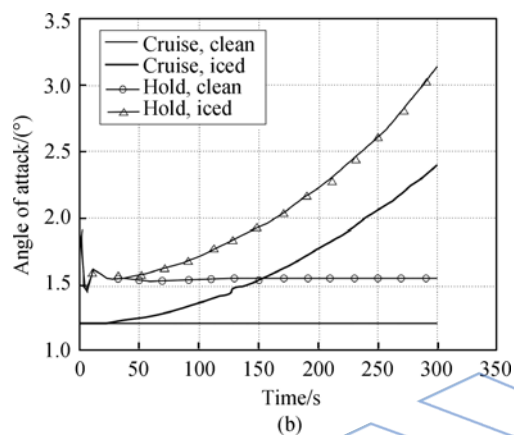
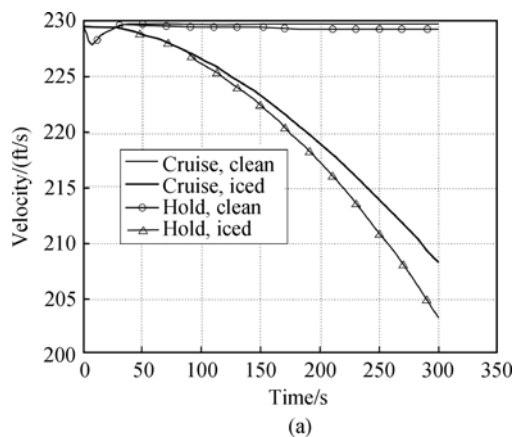


图7 飞机的速度、迎角以及升降舵偏角的时间响应^[30]
Fig. 7 Aircraft response of velocity, angle of attack and elevator deflection with time^[30]

变化明显, 结冰后出现了升降舵偏转饱和的情况。其中在增大俯仰角 11.5° 的自动驾驶情况下, 干净飞机与结冰飞机的升降舵偏角时间响应如图9所示。从图中可以看出, 干净飞机的升降舵响应很合理并且充足(图9(a)); 但是在飞机结冰情况下, 为达到指定飞行动作, 飞机的升降舵偏角已经达到饱和, 这对于飞机操纵来说是十分危险的(图9(b))。

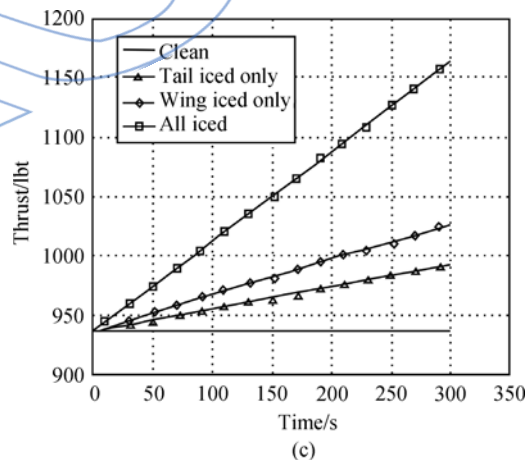
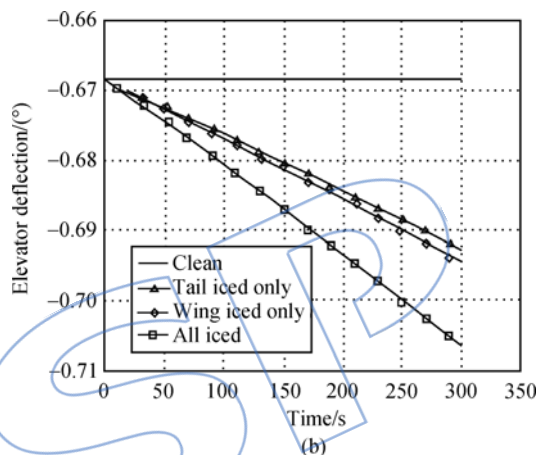
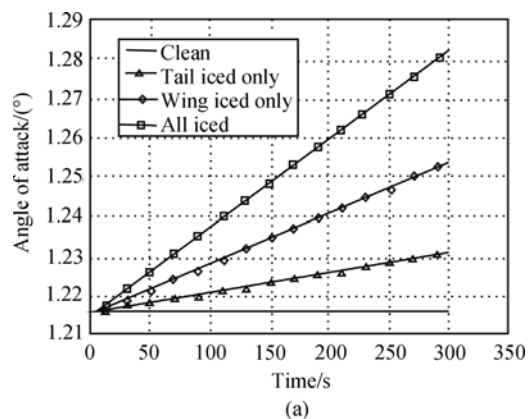
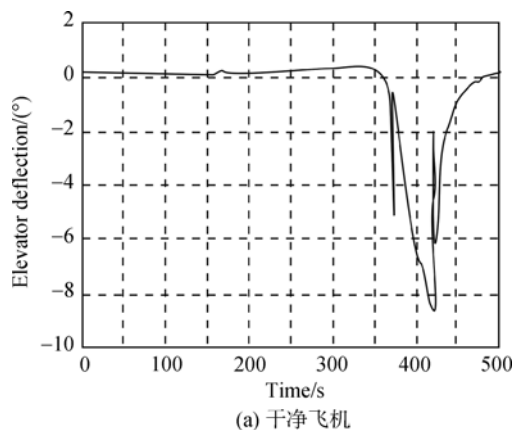


图8 机翼、尾翼、全机结冰的影响^[30]

Fig. 8 Effect of ice accretion on wing, tail, all aircraft^[30]



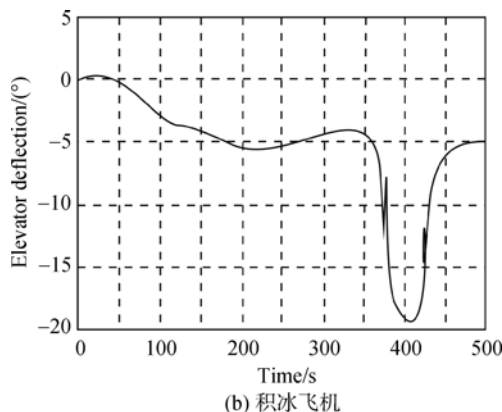


图9 自动驾驶情况下增大俯仰角 11.5° 的升降舵偏角时间响应^[38]

Fig. 9 Elevator deflection response with time to pitch up maneuver of 11.5° at autopilot mode^[38]

4 积冰对飞机飞行性能的影响

飞机飞行性能是描述飞机质心运动规律的诸参数,基本飞行性能包括最大水平飞行速度、最小水平飞行速度、爬升率、升限和上升时间等,影响飞行性能的主要因素是飞机的升力、阻力、发动机推力以及失速特性.结合积冰问题,假定发动机推力受积冰的影响可以忽略,积冰对飞机飞行性能的影响主要由积冰对飞机升阻特性的影响和对飞机失速特性的影响两个方面体现.

4.1 积冰对飞机升阻特性的影响

积冰对飞机升阻特性的影响主要体现在积冰飞机相对于干净飞机升力系数、阻力系数以及爬升率等直观参数的变化.

飞机积冰后,飞机的升力系数减小,阻力系数增大;阻力系数增大幅度远大于升力系数减小的幅度,在防冰系统未开启的情况下,阻力系数的增大量可以达到 100% 甚至 200% 以上.1948 年 Preston 和 Blackman^[4] 最早用试飞方法尝试测量积冰对飞机气动性能的影响,获得了试飞飞机 C-46 在自然积冰条件下阻力所受的影响.在一次严重的积冰情况下,阻力增量达到了 81%,并且做出了“飞机对操纵的响应已经达到了最低限度的临界值”的描述.1971 年,Leckman^[54] 针对活塞螺旋桨飞机 Cessna Centurion 在最大积冰条件下(液态水质量浓度为 0.46 g/m^3 ,水滴平均当量直径为 20 mm,飞行高度为 200 miles,1 mile 约等于 1.61 km)进行了试飞,结果表明,在不使用和使用防冰系统的情况下,飞机阻力分别增大 275% 和 90%,这对飞机性能的影响无疑是巨大的.1984

年,Cooper 等^[55] 通过对 King Ai 200T 飞机积冰前后爬升速率的比较,直观地分析了积冰对飞行性能的影响.试飞结果展现了积冰前后飞机的爬升速率与来流速度、发动机功率的关系,从中不难看出积冰后飞机的爬升性能大幅降低,如图 10 所示.

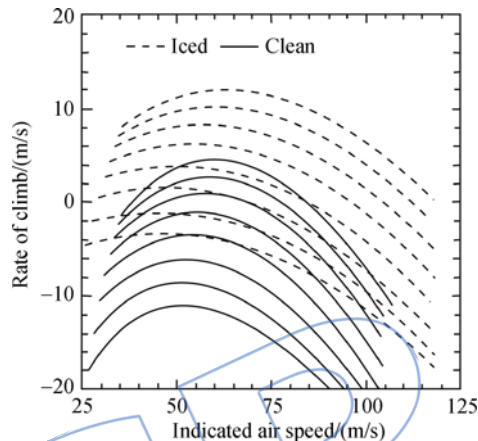


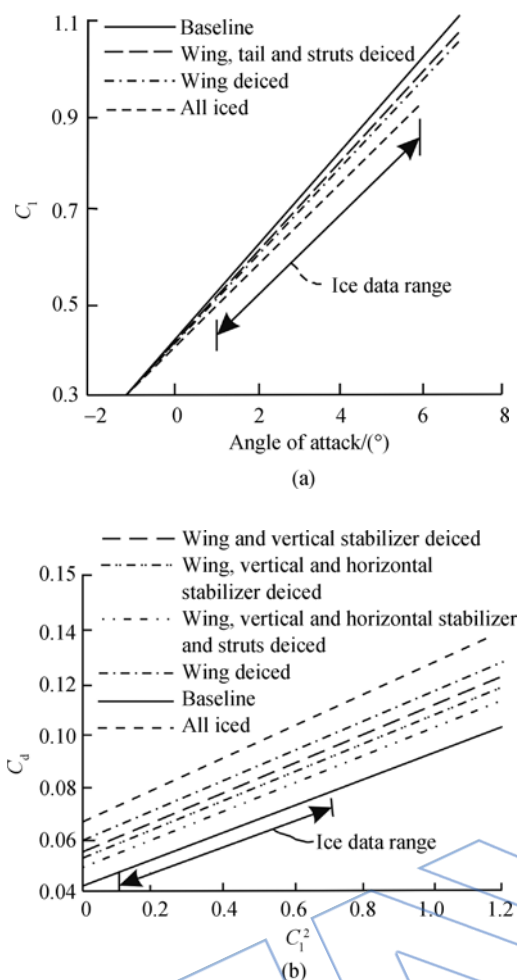
图10 积冰后飞机爬升速率的变化^[55]

Fig. 10 Change of climb rate of aircraft with ice accretion^[55]

1986 年,Ranaudo^[5] 对“双水獭”飞机在两次积冰遭遇条件下的表现做了非常详尽的报告,其中在液态水质量浓度为 0.20 g/m^3 、温度为 -5.3°C ,水滴平均当量直径为 $15 \mu\text{m}$ 的气象条件下,不同积冰位置(防冰系统开启状况不同)的升力系数 C_l 和阻力系数 C_d 如图 11 所示.

Marcia^[56] 1996 年根据 King Air 200T 飞机 1990 年 2 月到 3 月和 1991 年 1 月到 3 月的试飞数据分析了积冰对该飞机飞行性能的影响,包括升力、阻力、爬升率;与风洞实验数据进行了对比,并评估了积冰严重指数.分析指出,升力系数下降最多达到 35%,有 68% 的情况下降在 10% 以内.阻力增加可以高达 230%,爬升率下降可以达到 6.9%.飞行性能下降最大的情况出现在液态水质量浓度大于 0.2 g/m^3 ,水滴直径大于 $30 \mu\text{m}$,温度高于 -10°C 的情况.文献[57]通过对大量实验数据进行的数值计算,拟合出了翼型的气动系数增量函数,使之成为半经验公式,以福克 100 型客机为算例飞机,对飞机带 3 种典型冰型的主要飞行性能进行了计算分析.

防冰系统的开启可以减轻积冰对飞机升阻特性的影响,从而改善飞行性能,但同时也要注意,即使对机翼、尾翼等升力面进行防冰,飞机的升力和阻力依然会受到较大的影响.1985 年,

图 11 结冰后飞机升阻力系数的变化^[5]Fig. 11 Change of lift and drag coefficients with ice accretion^[5]

Mikkelsen 等^[58]进行了自然结冰试飞,验证了结冰冰型,同时测量了结冰机翼的阻力和飞机整体性能的降低.这些试飞实验表明,即使飞机机翼除冰,飞机的阻力仍然比结冰前增加 26%.文献^[59]通过加拿大的 AIRS (Alliance Icing Research Study) 1.5 和 AIRS II 的试飞数据(14 个关闭防冰系统和 20 个防冰系统开启)的结果,对防冰系统开启和关闭的情况进行细致的分析.指出,防冰系统开启,在较长时间结冰情况下,零升阻力增加大约 100%,升致阻力系数增加大概 85%;防冰系统关闭情况下,升致阻力系数增量可以达到 165%.这一情况也再次说明了防冰的难度以及研究结冰情况下飞机飞行力学特性的重要性.

4.2 结冰对飞机失速特性的影响

4.2.1 机翼失速

飞机结冰会导致机翼的最大升力系数下降,

失速速度增大;在严重的情况下最大升力系数降低量可以达到 30%以上,失速速度增大可以达到 10%以上.由于在 20 世纪六七十年代发生了一系列结冰造成的飞行事故,1976 年瑞典和苏联成立了联合机构,从结冰的机理、气象以及空气动力学角度研究结冰问题^[60].1977 年,在他们的第 1 份报告中,多种模拟冰型(不同厚度、形状)的风洞实验结果^[61]表明,最大升力系数下降大约 25%,失速速度增大 12%左右.同时,结果表明,结冰的形状远比结冰的厚度对飞机气动性能的影响要大.试飞数据显示由于机翼前缘结冰最大升力系数下降 31%,失速迎角减小 3°.他们 1979 年的第 2 份报告显示,由于在下表面气流过早分离,即使是在翼面前缘轻度的结冰,也可以导致升降舵效率下降高达 35%^[62].

结冰会导致机翼的失速迎角降低.1994 年,为了进一步研究平尾结冰气动性能和飞机的空气动力学,平尾结冰项目(tailplane icing program, TIP)开始展开研究^[8,63].风洞实验和试飞都被列入研究范围之内;风洞实验采用了“双水獭”飞机的平尾部分的模型,试飞飞机为改装的“双水獭”飞机,从风洞实验数据发现,即使是采用 inter-cycle 结冰冰型,失速迎角也会降低 2.3°,如果采用 LEWICE and S&C 冰型,失速迎角将降低 9.5°.在一系列的试飞中发现,随着结冰程度的加重,升降舵失效将会提前.针对一种飞行策略时,干净飞机的临界升降舵偏角是 6.7°,而结冰冰型为 LEWICE and S&C 时只有 1.3°.

很多针对分析机翼的失速迎角的研究也已经展开.2001 年, Frank 等在文献^[64]中对三维机翼结冰后失速迎角与最大升力系数的降低量的关系进行了分析,指出失速迎角的降低量与最大升力系数的下降比例成近似线性的关系.该结果具有很重要的适用意义,之后被很多飞行包线保护方面的研究所应用.如图 12 所示,其中不同形状的数据点代表不同实验所得的数据.

4.2.2 平尾失速

平尾失速是指平尾迎角超过平尾失速迎角而导致的飞机俯仰平衡受到严重破坏,以及俯仰操纵能力丧失的现象.平尾失速通常是由平尾翼面流场的气流分离造成,根据迎角正负的不同,分为正平尾失速和负平尾失速两种.20 世纪 50 年代以来,平尾失速导致的飞行事故时有发生,平尾结冰会对飞机飞行安全构成很大的威胁,据美国联邦航空管理局(FAA)和 NASA 统计,1976—1994

年,发生了至少 16 起与平尾积冰相关的飞行事故,造成了 139 人死亡^[8]. 图 13 为一次平尾积冰失速导致飞行事故的示意图^[65].

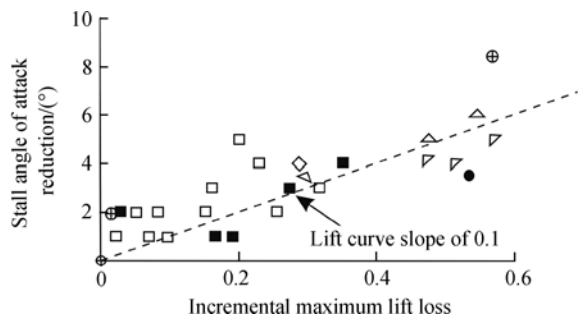


图 12 失速迎角降低量与最大升力系数的关系^[64]

Fig. 12 Relation of stall angle of attack reduction and the maximum lift coefficient^[64]

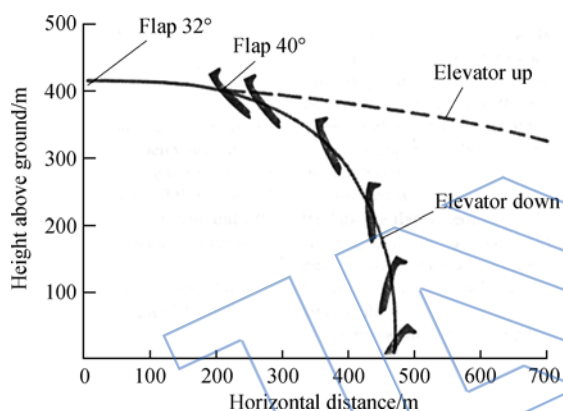


图 13 1977 年瑞典斯德哥尔摩的飞行事故示意图^[65]

Fig. 13 Sketch of flight accident in Stockholm, Sweden in 1977^[65]

文献^[66]分析了积冰对平尾性能的影响,指出导致平尾失速的原因主要有 4 个,包括积冰严重程度的增大、襟翼偏角的增大、稳定飞行中速度增加或者机动飞行时速度的减小、发动机推力的增大(推力作用在飞机重心的上方),并指出了平尾失速改出的方法。

1994 年开始,NASA/FAA 开始进行 TIP,其中平尾失速研究被列为重点项目展开^[67]. 文献^[68]对 DHC-6 飞机的试飞数据进行分析,采用包括干净飞机在内的 4 种情况进行的试飞,指出襟翼偏角对于平尾失速的作用最大,飞行速度增大以及发动机推力增加也对平尾失速起到一定作用;同时提出升降舵的配平角以及铰链力矩可以作为观察积冰导致的平尾性能下降的参数. 2003 年,文献^[50]通过“双水獭”飞机积冰试飞数据,用

CFD 计算出的冰型模拟积冰(ICE01 和 ICE02 两种积冰范围),应用多种飞行策略对多项飞行导数、操纵导数进行分析,并着重分析了机翼和平尾的失速问题,指出平尾模拟冰型积冰导致升降舵控制力异常,当襟翼偏转 30° 或以上时将出现平尾失速,并且平尾失速是从前缘开始。

虽然积冰导致的平尾失速问题受到了广泛的重视,但是由于平尾积冰失速情况比较复杂,目前的研究仍然不够充分,特别是缺乏积冰后机翼或者是襟翼打开诱导的在平尾处的下洗作用方面的研究,以致确定平尾失速的边界比较困难。

5 积冰飞机飞行包线保护

飞机飞行包线综合地体现了一架飞机安全飞行的高度和速度范围,飞行包线保护系统通过设计控制律、限制器等使飞机在包线范围内能够安全地飞行^[69].

包线保护系统是飞行安全操纵中的一个重要部分,一般飞机都有自动或人工的包线保护^[70]. 在积冰条件下,由于机翼、尾翼等其他部分的积冰造成升力系数、阻力系数以及爬升率等飞行性能的恶化,因此,干净飞机的飞行包线不再适用(保险的范围会缩小),如果飞行员或者自动驾驶系统仍然按照干净飞机的飞行包线去操纵飞机,就很有可能发生飞行事故. 例如,在 1997 年发生的 Comair 航空公司空难中,具有失速警告系统的安全板没有给飞行员提供有效的警告,这主要是因为飞机的机翼上有积冰现象,导致气动特性下降,而失速警告系统在设计时没有考虑到气动特性下降的因素,不能调整其警告量以补偿由于积冰而导致的失速警告边界缩小. 因此飞行包线保护作为一个应对飞机飞行性能下降的手段,显得十分重要。

2002 年,Merret 等^[70]通过“双水獭”飞机试飞或翼型实验数据,分析了最大升力系数、失速速度、舵面最大偏角等与积冰后阻力增量、迎角增量、铰链力矩等的关系,预测了飞行包线的范围. 同时考虑了风切变、暴流等其他因素对积冰后飞行包线的影响,并用 FDC 模型进行了仿真。

2003 年,Hossain 等^[69]提出了一种积冰条件下飞行包线保护(iced aircraft envelope protection, IAEP)的方法:通过选择重要参数,根据配平状态实时预测该参数的边界值,同时根据实时状态和输入预测该参数的下一时间的值,两者相比之后决定控制量的输入,从而避免风险. 并且使

用 FDC 仿真了开环与闭环 PAH 的包线保护结果,仿真以机翼升力系数降低量和失速迎角的关系预测失速迎角以确定飞行包线边缘,仿真结果表明,该飞行包线保护方法可以为飞行员提供足够的时间确定飞行包线边界的位置,以避免由于积冰造成飞行包线的变化导致的飞行事故的发生.图 14 为其中一个代表性的结果,其中虚线为在线确定的临界迎角,可以看出,应用 IAEP 系统后,飞机的迎角响应没有超过临界迎角,表明包线保护系统可以减小积冰飞机失速的风险.

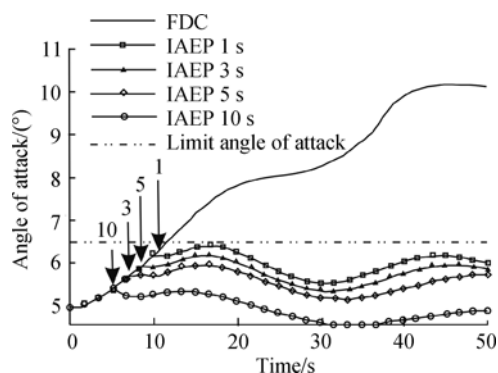


图 14 不同时间间隔的 IAEP 的表现^[69]

Fig. 14 Performance of IAEP with different time steps^[69]

作为飞机积冰后飞行力学问题研究的一个方面,积冰飞机飞行包线保护与飞行安全关系最为直接紧密,具有很强的实用价值,目前已经成为国内外研究的一个热点问题,并且已经取得了很多的进展.但是目前的研究范围主要限于以机翼失速为边界的包线保护,缺少以平尾失速、滚转异常等为包线边界的研究.

6 飞机容冰控制研究

容冰控制是随着积冰基础研究的不断完善而建立起来的新研究课题,其本身也是一个不断发展的课题,近 30 年来,这一方向的研究吸引了越来越多的重视,其中最具代表性的研究当属伊利诺斯大学 Bragg 提出并领导的飞机智能积冰系统 (smart icing system, SIS) 研究^[71].

飞机智能积冰系统研究的主要思路是:通过检测飞机的积冰状况及飞机防、除冰系统的工作状况,将数据反馈至积冰管理系统,确定积冰对飞机气动特性、稳定性及操纵性的影响情况,改变飞行包线范围,使飞机在积冰情况下能够按新的飞行包线安全飞行.基于 SIS 思路的研究,目前所取得的主要成果有:文献[72]较为详细地介绍了

SIS 对飞行安全的重要作用,并详细总结了该研究初期的研究成果;文献[30]研究了不同积冰情况对飞机气动参数的影响,建立了一套使用积冰严重性参数 η 来描述积冰影响的估算方法;Ansell 等^[73]使用襟翼和操纵舵面铰链力矩来预测飞机失速的包线保护系统;文献[74]研究了神经网络方法在识别积冰飞机飞行特性方面的应用;Hossain 等^[75]对飞机遭遇积冰后的包线保护问题进行了进一步研究,自适应控制技术被引入其中;文献[76-78]深入研究了“runback”和“SLD”两种特定的冰型对飞机气动力的影响.

除 SIS 之外,还有很多学者也在容冰控制领域展开研究,并取得了显著的进展.文献[79]利用神经网络和自组织网络映射来检测飞机结冰,并取得良好的仿真效果;Melody 等^[80-81]研究了 H_∞ 参数识别方法在在线检测飞机积冰方面的应用;文献[82-84]利用容错控制技术、卡尔曼滤波、神经网络技术等来研究飞机积冰的识别检测、控制重构等问题.

7 结 论

近些年来,飞机积冰后飞行力学问题的研究已经越来越受到国内外学者的重视,并且已经取得了十分明显的进展,但是这一领域的研究还远远没有达到完善,仍然存在一些需要继续研究的问题.通过对国内外在积冰对飞机飞行力学影响领域的研究进展和成果的分析,针对国内外在飞机积冰后飞行力学问题领域的研究,提出以下几点需要引起注意的问题:

1) 模拟冰型风洞相对于冰风洞对实验设备的要求比较低,操作也相对简便.目前国外已完成了很多模拟冰型风洞实验,但是国内缺乏这一方面的研究.

2) 目前积冰飞机气动数据的获取主要依赖于飞行实验以及风洞实验,不仅成本较高而且有一定的技术难度,而数值模拟方法具有其特有的经济有效、适用范围广的优势,因此应增加对数值模拟方法的研究,提高计算精度,从而更加便捷地获取积冰飞机的气动数据.

3) 作为积冰飞机建模的一个重要环节,目前积冰对飞机气动导数影响的计算模型仍然不够完善.目前研究中应用最为广泛的通过使用积冰严重性参数来预测积冰影响的方法,虽然形式简单、物理意义清晰,但是只能使用在具有飞行实验或全机风洞实验数据的飞机型号上.今后这一方面

的研究需要对多种类型的飞机进行多种积冰条件下实验,通过更多的实验数据来进行更深入的研究。

4) 对于平尾失速的研究仍然不够完善。缺乏便捷的预测平尾失速的方法,在飞行包线的设计上也缺少以平尾失速为边界条件的包线保护方法。

参考文献:

- [1] Reehorst A, Chung J, Potapczuk M, et al. Study of icing effects on performance and control ability of an accident aircraft[J]. *Journal of Aircraft*, 2000, 37(2): 253-259.
- [2] Safety Advisor. Aircraft icing [EB/OL]. [2013-05-01]. <http://www.aopa.org/-/media/Files/AOPA/Home/Pilot%20Resources/ASI/Safety%20Advisors/sa11.pdf>.
- [3] Bragg M B, Perkins W R, Sarter N B, et al. An interdisciplinary approach to inflight aircraft icing safety[R]. AIAA 98-0095, 1998.
- [4] Preston G M, Blackman C C. Effects of ice formation on airplane performance in level cruising flight[R]. NACA TN 1598, 1948.
- [5] Ranaudo R J. The measurement of aircraft performance and stability and control after flight through natural icing conditions[R]. AIAA 86-9758, 1986.
- [6] Ranaudo R J, Batterson J G. Determination of longitudinal aerodynamic derivatives using flight data from an icing research aircraft[R]. AIAA 89-0754, 1989.
- [7] Ratvasky T P, Ranaudo R J. Icing effects on aircraft stability and control determined from flight data[R]. AIAA 93-0398, 1993.
- [8] Ratvasky T P, Van Zante J F, Riley J T. NASA/FAA tailplane icing program overview[R]. AIAA 99-0370, 1999.
- [9] Ratvasky T P, Van Zante J F, Sim A. NASA/FAA tailplane icing program: flight test report[R]. NASA/TP-2000-209908, 2000.
- [10] Miller R, Ribbens W. The effects of icing on the longitudinal dynamics of an icing research aircraft[R]. AIAA 99-0636, 1999.
- [11] Vladislav K, James G B, Patrick C. Determination of airplane model structure from flight data using modified stepwise regression[R]. NASA TR-1916, 1981.
- [12] Morelli E A. Global nonlinear aerodynamic modeling using multivariate orthogonal functions[J]. *Journal of Aircraft*, 1995, 32(2): 270-277.
- [13] 于庆芳. Y12-II型飞机结冰对其飞行特性影响的试飞研究[J]. *飞行力学*, 1995, 13(2): 63-70.
YU Qingfang. Flying test research of the icing and its effects on flight performance for Y12-II aircraft[J]. *Flight Dynamics*, 1995, 13(2): 63-70. (in Chinese)
- [14] 李勤红, 乔建军. Y7-200A飞机模拟冰型飞行试验[J]. *飞行力学*, 1998, 16(3): 73-76.
LI Qinhong, QIAO Jianjun. Flight test of simulated ice shape for Y7-200A airplane[J]. *Flight Dynamics*, 1998, 16(3): 73-76. (in Chinese)
- [15] 李勤红, 乔建军, 陈增江. Y7-200A飞机自然结冰飞行试验[J]. *飞行力学*, 1999, 17(2): 64-69.
LI Qinhong, QIAO Jianjun, CHEN Zengjiang. Natural icing flight test for Y7-200A aircraft[J]. *Flight Dynamics*, 1999, 17(2): 64-69. (in Chinese)
- [16] Thomas P R, Billy P B, Sam L. Current methods for modeling and simulating icing effects on aircraft performance, stability and control[R]. AIAA-2008-6204, 2008.
- [17] Johnson C L. Wing loading, icing and associated aspects of modern transport design[J]. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 1940, 7(2): 43-54.
- [18] Lee S, Ratvasky T P, Thacker M, et al. Geometry and Reynolds-number scaling on an iced business-jet wing[R]. AIAA-2005-1066, 2005.
- [19] Ruff G A, Anderson D N. Quantification of ice accretions for icing scaling valuations[R]. AIAA 98-0195, 1998.
- [20] Saeed F, Selig M S, Bragg M B. A design procedure for subscale airfoils with full-scale leading-edges for ice accretion testing[R]. AIAA 96-0635, 1996.
- [21] Reehorst A L, Potapczuk M, Ratvasky T. Wind tunnel measured effects on a twin-engine short-haul transport caused by simulated ice accretions[R]. AIAA 96-0871, 1996.
- [22] Saeed F, Selig M S, Bragg M B. A hybrid airfoil design method to simulate full-scale ice accretion throughout a given C(D)-range[R]. AIAA 97-0054, 1997.
- [23] Bencic J. Application of pressure-sensitive paint to ice accreted wind tunnel models[R]. AIAA-2000-0834, 2000.
- [24] Haemeier H E, Schaefer A S. National security space architect space weather architecture study[R]. AIAA 99-0626, 1999.
- [25] Bartlett C S. Icing test capabilities in the aero propulsion system test facility at the Arnold Engineering Development Center[R]. AIAA 94-2471, 1994.
- [26] Reehorst A, Potapczuk M, Ratvasky T, et al. Wind tunnel measured effects on a twin-engine short-haul transport caused by simulated ice accretions, data report[R]. NASA TM 107419, 1997.
- [27] Lee S, Barnhart B P, Ratvasky T P, et al. Dynamic wind-tunnel testing of a sub-scale iced business jet[R]. AIAA-2006-0261, 2006.
- [28] 朱东宇. 翼型结冰过程的数值模拟[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
ZHU Dongyu. Numerical simulation of ice accretion on airfoil[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009. (in Chinese)
- [29] 马超. 飞行器积冰的数值模拟研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2012.
MA Chao. Numerical simulation research of ice accretion on aircraft[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [30] Bragg M B, Hutchison T, Merret J, et al. Effect of ice accretion

- on aircraft flight dynamics[R]. AIAA-2000-0360, 2000.
- [31] Lampton A, Valasek J. Prediction of icing effects on the lateral/directional stability and control of light airplanes [R]. AIAA-2006-6487, 2006.
- [32] Pokhariyal D, Bragg M B, Hutchison T, et al. Aircraft flight dynamics with simulated ice accretion [R]. AIAA-2001-0541, 2001.
- [33] Hui K, Wolde M, Brown A. Flight dynamics model of turboprop transport aircraft icing effects based on preliminary flight data [R]. AIAA-2005-1068, 2005.
- [34] 钟国. 翼型防/除冰系统的数值模拟[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2010.
- ZHONG Guo. Numerical simulation of airfoil anti-icing and deicing system [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [35] Miller R, Ribbens W. The effects of icing on the longitudinal dynamics of an icing research aircraft [R]. AIAA 99-0636, 1999.
- [36] Melody J W, Basar T, Perkins W R, et al. Detection and classification of aircraft icing using neural networks [R]. AIAA-2000-0361, 2000.
- [37] Rauw M O. FDC1. 2: a simlink toolbox for flight dynamics and control analysis [D]. Delft: Delft University of Technology, 2001.
- [38] Sharma V, Voulgaris P. Effects of ice accretion on aircraft autopilot stability and performance [R]. AIAA-2002-0815, 2002.
- [39] Dale W H. An evaluation of an analytical simulation of an airplane with tailplane icing by comparison to flight data [R]. NASA/CR-2000-210561, 2000.
- [40] Krzysztof S, Maciej L, Edyta L, et al. Aircraft climbing flight dynamics with simulated ice accretion [R]. AIAA-2004-4948, 2004.
- [41] 程泽荫. 民航飞机适航飞行品质初探[J]. 飞行力学, 1994, 12(1): 13-22.
- CHENG Zeyin. The preliminary research of the flying quality requirements of China civil aviation regulation [J]. Flight Dynamics, 1994, 12(1): 13-22. (in Chinese)
- [42] 钟长生, 杜亮, 洪冠新. 飞机结冰引起的飞行动力学问题探讨[J]. 飞行力学, 2004, 22(3): 64-68.
- ZHONG Changsheng, DU Liang, HONG Guanxin. The exploration of flight dynamics problem on aircraft icing [J]. Flight Dynamics, 2004, 22(3): 64-68. (in Chinese)
- [43] 王起达. 结冰后飞机的纵向稳定性和操纵性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [44] 袁坤刚, 曹义华. 结冰对飞机飞行动力学特性影响的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(9): 1929-1932.
- YUAN Kungang, CAO Yihua. Simulation of ice effect on aircraft flight dynamics [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(9): 1929-1932. (in Chinese)
- [45] 王起达, 王同光. 基于XML技术的结冰后飞机纵向稳定性计算[J]. 飞机设计, 2009, 29(4): 22-25.
- WANG Qida, WANG Tongguang. Calculation of the aircraft longitudinal stability with ice accretion basing on XML technology [J]. Aircraft Design, 2009, 29(4): 22-25. (in Chinese)
- [46] Bragg M B. Aerodynamics of supercooled-large-droplet ice accretion and the effect on aircraft control [R]. Springfield, US: FAA International Conference on Aircraft Inflight Icing, 1996.
- [47] Gurbachi H M, Bragg M B. Sensing aircraft icing effects by flap hinge moment measurement [R]. AIAA 99-3149, 1999.
- [48] Gurbachi H M, Bragg M B. Unsteady aerodynamic measurement on an iced airfoil [R]. AIAA-2002-0241, 2002.
- [49] Whalen E, Lee S, Bragg M. Characterizing the effect of ice on aircraft performance and control from flight data [R]. AIAA-2002-0816, 2002.
- [50] Thomas P R, Kurt B, William R, et al. Iced aircraft flight data for flight simulator validation [R]. NASA/TM-2003-212114, 2003.
- [51] 王明丰, 王立新, 黄成涛. 结冰对飞机纵向操稳特性的量化影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(5): 592-595.
- WANG Mingfeng, WANG Lixin, HUANG Chengtao. Computational effects of ice accretion on aircraft longitudinal stability and control [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(5): 592-595. (in Chinese)
- [52] Lampton A, Valasek J. Prediction of icing effects on the dynamic response of light airplanes [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2007, 30(3): 722-732.
- [53] Lampton A, Valasek J. Prediction of icing effects on the coupled dynamic response of light airplanes [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2008, 31(3): 656-673.
- [54] Leckman P R. Qualification of a light aircraft for flight in icing conditions [R]. Society of Automotive Engineers, SAE Paper 710394, 1971.
- [55] Cooper W A, Sand W R, Veal D L, et al. Effects of icing on performance of a research airplane [J]. Journal of Aircraft, 1984, 21(9): 708-715.
- [56] Marcia K P. Response of a research aircraft to icing and evaluation of severity indices [J]. Journal of Aircraft, 1996, 33(2): 291-297.
- [57] 蒋天俊. 结冰对飞机飞行性能影响的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- JIANG Tianjun. Investigation of icing accretion influences on aircraft flight performance [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. (in Chinese)
- [58] Mikkelsen K L, McKnight R C, Ranaudo R J. Icing flight research: aerodynamic effects of ice and ice shape documentation with stereo photography [R]. AIAA 85-0468, 1985.
- [59] Brown A P. Preliminary correlation of AIRS inflight icing lift/drag and propulsive efficiency degradations with environmental conditions [R]. AIAA-2005-1067, 2005.
- [60] Trunov O K, Ingelman-Sundberg M. On the problem of horizontal tail stall due to ice, aerodynamic background and comparison between results from wind tunnel and flight tests [R]. [S. l.]: Swedish-Soviet Working Group on Scientific-Technical Cooperation in the Field of Flight Safety

- Report No. JR-3, 1985.
- [61] Trunov O K, Ingelman-Sundberg M. Methods for prediction of the influence of ice on aircraft flying characteristics [R]. [S. l.]: Swedish-Soviet Working Group on Scientific-Technical Cooperation in the Field of Flight Safety Report No. JR-1, 1977.
- [62] Trunov O K, Ingelman-Sundberg M. Wind tunnel investigation of the hazardous tail stall due to icing [R]. [S. l.]: Swedish-Soviet Working Group on Scientific-Technical Cooperation in the Field of Flight Safety Report No. JR-2, 1979.
- [63] Van Zante J F, Ratvasky T P. Investigation of dynamic flight maneuvers with an iced tailplane [R]. AIAA 99-0371, 1999.
- [64] Frank T L, Abdollah K. Effects of ice accretions on aircraft aerodynamics [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2001, 37 (8): 669-767.
- [65] Ratvasky T P, Van Zante J F, Riley J T. NASA/FAA tailplane icing program overview [R]. AIAA 99-0370, 1999.
- [66] 钟长生, 张斌, 洪冠新. 结冰对平尾性能的影响及平尾失速分析 [J]. *中国民航飞行学院学报*, 2004, 15 (6): 6-12.
- [67] Ratvasky T P, Van Zante J F, Sim A. NASA/FAA tailplane icing program: flight test report [R]. NASA/TP-2000-209908, 2000.
- [68] Ratvasky T P, Van Zante J F. In-flight aerodynamic measurements of an iced horizontal tailplane [R]. AIAA 99-0638, 1999.
- [69] Hossain K N, Sharma V, Bragg M B, et al. Envelope protection and control adaptation in icing encounters [R]. AIAA-2003-0025, 2003.
- [70] Merret J M, Hossain K N, Bragg M B. Envelope protection and atmospheric disturbances in icing encounters [R]. AIAA-2002-0814, 2002.
- [71] 应思斌. 飞机容冰飞行控制系统设计的理论与方法研究 [D]. 上海: 复旦大学, 2010.
- [72] Bragg M B, Basar T, Perkins W R, et al. Smart icing systems for aircraft icing safety [R]. AIAA-2002-0813, 2002.
- [73] Ansell P J, Bragg M B, Kerho M F. Envelope protection system using flap hinge moment measurements [R]. Chicago: 28th AIAA Applied Aerodynamics Conference, 2010.
- [74] Melody J W, Pokhariyal D, Merret J, et al. Sensor integration for inflight icing characterization using neural networks [R]. AIAA-2001-0542, 2001.
- [75] Hossain K N, Sharma V, Bragg M B, et al. Envelope protection and control adaptation in icing encounters [R]. AIAA-2003-0025, 2003.
- [76] Whalen E, Bragg M B, Lee S. Characteristics of runback ice accretions airfoils and their aerodynamics effects [R]. AIAA-2005-1065, 2005.
- [77] Broeren A, LaMarre C, Bragg M B, et al. Characteristics of SLD ice accretions on airfoils and their aerodynamic effects [R]. AIAA-2005-0075, 2005.
- [78] Whalen E, Broeren A, Bragg M B. Considerations for aerodynamic testing of sealed runback ice accretions [R]. AIAA-2006-0260, 2006.
- [79] Johnson M D, Rokhsaz K. Using artificial neural network and self-organizing maps for detection of aircraft icing [R]. AIAA-2000-4099, 2000.
- [80] Melody J W, Basa T, Perkins W R, et al. Parameter identification for inflight detection and characterization of aircraft icing [J]. *Control Engineering Practice*, 2000, 8 (9): 985-1001.
- [81] Melody J W, Hillbrand T, Basar T, et al. H_{∞} parameter identification for inflight detection of aircraft icing: the time-varying case [J]. *Control Engineering Practice*, 2001, 9 (12): 1327-1335.
- [82] Caliskan F. Neural network based icing identification and fault tolerant control of a 340 aircraft [J]. *International Journal of Electrical, Computer and Systems Engineering*, 2007, 1 (2): 98-103.
- [83] Aykan R, Hajiyev C, Caliskan F. Aircraft icing detection, identification and reconfigurable control based on Kalman filtering and neural networks [R]. AIAA-2005-6220, 2005.
- [84] Aykan R, Hajiyev C, Caliskan F. Kalman filter and neural network-based icing identification applied to A340 aircraft dynamics [J]. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2005, 77 (1): 23-33.