

# 地面结冰气象条件模拟控制技术研究

## Research on Ground Freezing Weather Conditions Simulating Control Technology

中航工业空气动力研究院 明 强 魏 然 贾 丹  
中国商飞上海飞机设计研究院 沈 东

**[摘要]** 地面结冰气象条件模拟系统是为模拟大气环境下结冰气象条件设计的,也是为发动机短舱防冰系统除冰试验设计的结冰控制系统。控制系统利用外部低温气象条件在试验区域内模拟真实大气环境形成结冰气象条件,并根据试验区域内结冰情况调节结冰颗粒大小及含水量,通过试验规律寻找到一套完整的结冰控制技术,除满足短舱防冰系统除冰试验要求外还能够满足相关多种特种试验,是利用大气环境建立的简易结冰风洞试验平台。

**关键词:** 地面结冰气象条件 过冷水滴 结冰控制系统 多回路控制

**[ABSTRACT]** The ground freezing meteorological condition simulation system is a freezing control system which designed by simulating atmospheric freezing meteorological conditions to meet nacelle anti-ice system icing tests. Using an external cryogenic meteorological conditions, the control system forms freezing meteorological conditions by simulating real atmospheric weather conditions in the test area. Then according to the icing conditions to adjust the ice particle size and water content, we find a complete freeze control technology by the testing law which meets the requirements of the nacelle anti-ice system deicing test and a variety of special experiments. The ground freezing meteorological condition simulation system is simple icing wind tunnel experiment platform which is built by using atmospheric environment.

**Keywords:** Ground freezing meteorological conditions Supercooled water droplet Freezing control system Multiloop control

飞机结冰是飞机飞行时外表面上水分积聚冻结成冰的现象,它影响飞机的气动外形和飞行安全,给飞行带来极大危害,而飞机防冰系统是保障飞机飞行安全的重要研究项目。要验证飞机防冰设备系统的可靠性,就必须模拟大气条件下结冰气象条件。

高空飞行中,飞机表面通常会伴随有 3 种不同形式

的结冰现象:水滴结冰、干结冰和升华结冰,这里介绍的结冰控制系统是模拟最多发的水滴结冰现象的。水滴结冰是指飞机部件表面的平衡温度低于冰点,那些存在于对流层下部、温度低于冰点但未冻结的过冷水滴撞击并积聚冻结于部件前缘表面而发生的结冰现象<sup>[1]</sup>。一些国家建有专门的结冰风洞研究平台,用来评估飞行器结冰和防冰的试验研究<sup>[2]</sup>,目前国内还没有该方面的试验能力。

模拟地面结冰气象条件究其本质为特种风洞试验,需要系统除能为试验区域提供稳定的流场外,还需在试验区域模拟出符合试验要求的大气现象。根据飞机空中飞行结冰条件的特点,试验区域可利用室外低温环境,寻找试验所需的大气环境,以配合试验设备实现模拟效果。地面结冰气象条件模拟系统是为短舱防冰系统除冰试验设计的,可以模拟大气条件下结冰气象条件建立结冰控制系统<sup>[3]</sup>。为满足结冰试验要求,系统需具备喷水雾化功能,并能利用低温环境在试验区域内使水雾遇冷空气后形成过冷水滴(温度低于 0℃ 而仍未冻结的云滴、雨滴)<sup>[4]</sup>,在达到试验目标后形成结冰颗粒。除此为满足不同试验需求,该控制系统需要能够控制过冷水滴粒径大小及单位体积内含水量,并能根据试验现场不同气象条件,调整有效试验区域,是一套利用大气环境建立的完善的结冰控制系统。

## 1 系统设计及主要技术指标

根据地面结冰气象条件控制技术试验特点,试验设备主体为开口直流式风洞,采用变频控制,用以调节试验区域风速,提供稳定流场。为稳定流场并达到防尘防沙目的,风洞前后端需设有防沙网及阻尼网。在风洞后端阻尼网之外设计了特殊翼型的格栅,用以安装 121 个喷嘴组成的喷雾矩阵用来形成水雾,喷水雾化要能覆盖距风洞 7m 外的试验区域,其面积达 3.5m<sup>2</sup>;供水系统采用变频控制及电动调节阀配合的方式,对水压、流速、水含量及粒子粒径进行控制。系统由多变频泵及电磁阀门组成,确保输送到喷嘴内的压力相同,水流量稳定,粒子颗粒大致均匀。考虑到外部环境对喷雾矩阵供水管

路的影响,喷雾采用水气结合的喷雾方式,管路由双管路结构组成,气路管路包裹水路管路,通过高温气路保障水路管路在水循环系统到达喷嘴之前不冻结。调节管路内水、气温度,使喷出的水雾在空气中达到凝结临界状态,形成低温状态下的过冷水滴,该微粒会在试验区(距离喷嘴要求范围内)遇到物体附着后凝结,形成冰粒。

系统在试验区域安装雾滴谱仪,用以测量过冷水滴粒径及含水量,确保结冰模拟环境有效,同时雾滴谱仪与控制系统形成回路,可根据大气环境变化对系统进行微调,满足试验区环境稳定。微差压传感器用以对风速进行校准,同时系统在各个监控节点设有相关传感器,通过检测不同节点变化对系统进行微调。由于系统需监控环节多,需要系统运行时对各个监控点进行实时监控分析,及时调整控制节点。

根据以往研究结论,风洞水滴平均直径(MVD)是所有参数的函数。98%以上的结冰情况水滴直径小于 $30\mu\text{m}$ ,不同模型比例和风洞试验温度下,风洞试验风速 $U_m$ 和水滴直径(MVD)的关系。从中可以看出试验区被测飞机的比例与水滴直径的关系(这在以往常规风洞的小模型测量中是无法实现的)<sup>[5]</sup>。根据计算,试验区域适合的大气环境需满足环境温度 $-1\sim-9^\circ\text{C}$ ,最佳大气密度为 $1.224\text{kg}/\text{m}^3$ ,运动粘性系数 $\nu$ 为 $1.3826 \times 10^{-5}\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ ,除此控制系统的被控节点风速、液态水含量及过冷水滴粒径均需根据现场大气环境进行调节,可控范围液态水含量为 $0.2\sim 3\text{g}/\text{m}^3$ ,粒子颗粒 $5\sim 50\mu\text{m}$ ,单位时间喷雾装置喷水量 $Q$ 能够实现 $60.75\sim 607.5\text{L}/\text{h}$ <sup>[6]</sup>,以满足在试验区域形成试验需要的结冰气象条件<sup>[7]</sup>。据此控制系统可分为风洞变频控制节点及喷水雾化控制节点两部分,用以提供试验区域流场及水雾。这里要求风速调节可在 $0\sim 15\text{m}/\text{s}$ 范围内,试验区域提供大于 $2.3\text{m}$ 的试验半径,完全覆盖试验目标。为真实模拟大气结冰现象,喷水设备都进行过MVD、LWC标定(MVD为粒子粒径、LWC为水含量),以保证被控参数的可靠性及试验数据准确。

## 2 结冰控制系统组成及实现

控制系统采用多回路控制实现喷雾,具体控制单元包括主控计算机、PLC300、气路温控器、水路温控器、水循环变频、气循环变频、水路电动调节阀、气路电动调节阀、电磁阀、风洞变频、雾滴谱仪、现场简易气象站及各个单元监控传感器组成(图1)。

主控计算通过PLC采集现场简易气象站大气温湿度及风速,通过计算选取符合现场环境的系统参数。由PLC控制风洞变频器达到试验要求风速,控制水、气温

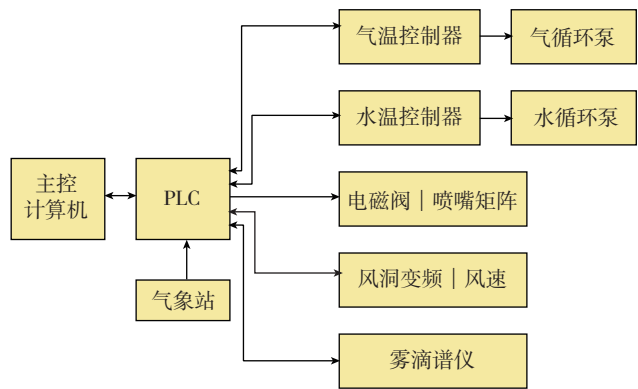


图1 控制系统框图

Fig.1 Control system block diagram

度控制器调节系统水路气路温度,并由温控表对水路气路温度进行温度微调,确保恒温。待温度调节完成,打开水、气循环泵,通过监控管路温度状态正常后打开控制喷嘴矩阵的电磁阀,开始喷雾。在试验有效区域安装雾滴谱仪,测量过冷水滴粒径大小及水雾含水量,将采集信号反馈主控计算,由主控计算机根据试验需求进行综合调整,通过调节水气路电动调节阀开度、水气循环泵频率等调节过冷水滴粒径及含水量。同时系统供水系统设有独立的高纯度纯水系统过滤精度,最大杂质颗粒 $\leq 50\mu\text{m}$ ,出水电阻率小于 $10\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$ ,保障进入试验区域水雾无外来粒子。

多回路控制由系统软件通过PLC的I/O模块对系统的各个环节进行监控反馈,根据控制节点的监控传感器数据进行分析,以此对水路、气路、风速变频等各控制环节进行微调,满足试验区的技术指标。这里主控软件利用的数据建模计算是通过被控过程中被控输出和控制输入的维数相等,即 $r=m$ ,输入与输出一一对应可组成 $m$ (或 $r$ )个子系统,对每个子系统分别进行控制器的设计,设第 $i$ 个子系统的预测模型为:

$$x(k+1) = A_i x(k) + B_i u_i(k) + \overline{B}_i \overline{u}_i(k) \quad (1)$$

这样的好处是每一个控制环节作为独立单元并入计算,分析简单。同时系统在微调阶段为线性单一调整,即对各个控制环节逐一控制,这也同时降低了整个系统的功耗,提高了系统的稳定性。由于计算量大、反馈环节多,这种设计降低了系统响应时间,但大幅度提高了系统控制精度,加上该风洞需要的是调整后稳定的试验区域,对系统响应无较高要求,这种设计无疑更适合该系统特点。

## 3 试验技术研究

根据模拟地面结冰气象条件需求,该系统要求实现试验区域过冷水滴粒径在 $(20 \pm 5)\mu\text{m}$ 量级,液态水含

量为  $3\text{g}/\text{m}^3$ , 试验所需环境温度为  $-1\text{℃} \sim -9\text{℃}$ , 风向与流场方向一致。试验区域内, 利用雾滴谱仪测量过冷水滴粒径以及含水量, 并同时监测供水管路温度、压力、风洞风速及控制节点参数。对控制管路压力与水滴粒径之间的关系曲线趋势拐点进行分析, 并进行了重复性实现, 以验证规律的准确性, 如图 2 所示。通过对管路调整及控制阀门精度修正, 粒子颗粒控制精度可达到  $\mu\text{m}$  量级。同时通过流量测量找到试验区域含水量与管路水流量之间的关系曲线, 如图 3 所示。通过试验得到控制节点与试验区域参数的规律, 对控制系统进行调整, 可对试验区域内的模拟地面结冰气象条件环境进行控制, 图 4 为  $-7\text{℃}$  环境温度、 $9\text{m}/\text{s}$  风速下通过雾滴谱仪测

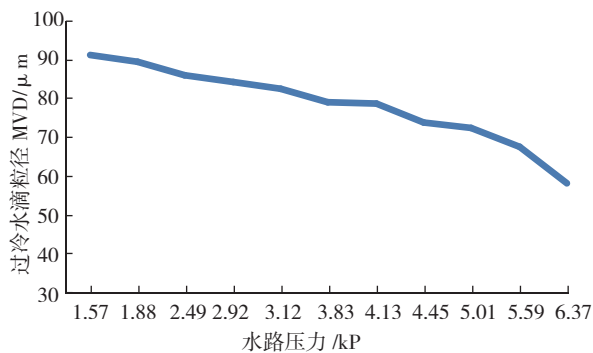


图2 过冷水滴粒径测量

Fig.2 Size measurement of supercooled water droplets

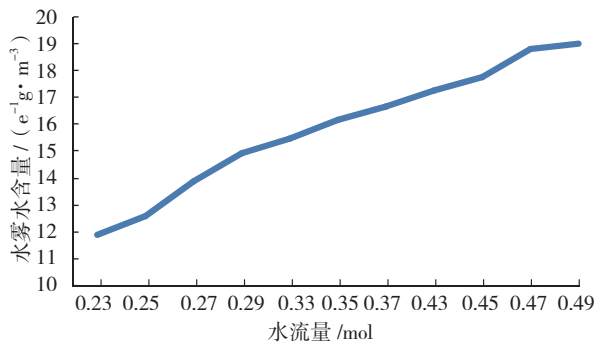


图3 过冷水滴含水量测量

Fig.3 Water content measurement of supercooled water droplets

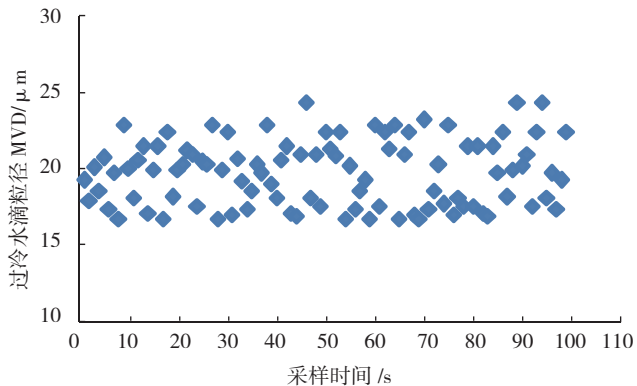
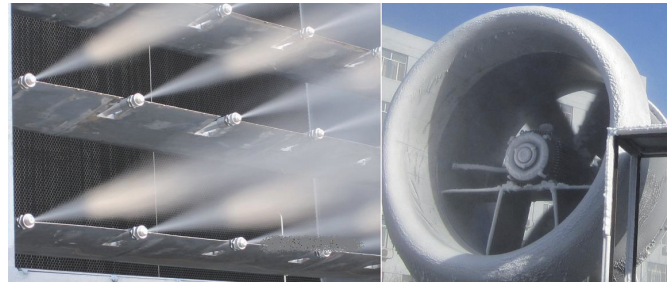


图4 试验区域过冷水滴粒径测量

Fig.4 Size measurement of supercooled water droplets in test area

量到的试验区域内过冷水滴粒径, 这也符合以往对结冰风洞单尺寸分布水滴直径标定结果及分析的研究<sup>[8]</sup>, 根据测量结果, 在一段时间以上的测量过程中, 控制系统能够根据反馈数据将粒子粒径控制在一个稳定的区间内。

经多次试验得到该系统能够对试验区域内 MVD  $20\sim 50\mu\text{m}$ 、LWC  $0.3\sim 3\text{g}/\text{m}^3$  水滴进行控制, 可以稳定试验区域内的各个所需数据, 满足了地面结冰气象条件模拟系统设计控制范围要求, 图 5 为试验现场照片。



(a) 喷嘴工作状态 (b) 试验测试设备结冰状态

图5 试验现场图

Fig.5 Test site map

## 4 结束语

通过系统构建及大量试验, 地面结冰气象条件模拟系统实现设计之初的目标。该系统在低温环境下能够在试验区域内模拟大气环境形成结冰气象条件, 并根据试验需求调节过冷水滴颗粒大小及含水量, 试验范围宽泛, 数据稳定可靠, 在满足短舱防冰系统除冰试验要求的同时还能够满足相关多种特种试验, 为我国拥有自己的结冰风洞提供了理论基础, 为具备完备的结冰试验能力积累了经验。

## 参考文献

- [1] 沈海军. 飞机防冰与除冰的若干技术. 飞机工程, 2004(1):54-55.
- [2] 战培国. 结冰风洞研究综述. 试验流体力学, 2007,9(3):92-93.
- [3] 李林. 结冰对民机飞行性能的影响研究. 飞行力学, 2004, 9(3):12-13.
- [4] Bragg M B, Broeren A P, Blumenthal L A. Iced-airfoil aerodynamics. Progress in Aerospace Sciences, 2005, 41(5): 323-362.
- [5] 范洁川. 飞机结冰风洞试验模拟研究. 气动研究与试验, 2006,23(2):1-7.
- [6] 李勤红. 7-200A 飞机模拟冰型飞行试验. 飞行力学, 1998,9(3):74-75.
- [7] Cebeci T, Kafyeke F. Aircraft icing. Annual Review of Fluid Mechanics, 2003, 35: 11-21.
- [8] 易贤. 结冰风洞水滴直径标定方法研究. 实验流体力学, 2010,24(5):36-41.

(责编 良辰)