

结冰风洞智能化电加热风扇叶片防除冰系统

熊建军, 赵 照, 冉 林, 赵杰毅

(中国空气动力研究与发展中心 结冰与防除冰重点实验室, 四川 绵阳 621000)

摘要: 结冰风洞风扇转子系统叶片结冰导致电机负载增加, 振动超限, 影响结冰风洞试验安全和试验效率。转子系统是大尺度高速转动部件, 处于低温、100%湿度环境, 叶片结冰探测、加热区温度监测、地面大功率加热电源向转子系统各叶片可靠供电是难点; 建立了基于风扇转子振动监测和电机转速/试验段风速比的智能化结冰预警系统; 研制了前缘内置电加热膜的复合材料防冰叶片; 基于复杂工况环境和需求研制了多通道高线速度导电滑环, 加热电源经过滑环和转子空心轴径向传输到各叶片, 解决了电源和温度线缆从地面到转子系统风扇叶片布置、安装等问题, 完成了大尺度风扇转子多叶片加热电源和温度信号可靠传输, 实现了风扇叶片防除冰系统智能化启动或单动闭环控制; 系统运行4年多, 通过持续优化改进, 实现了试验中风扇叶片防冰或试验后快速除冰, 应用效果好, 降低了试验安全风险, 提高了风洞试验能力。

关键词: 风扇叶片; 转子振动; 电加热膜; 智能化结冰预警; 导电滑环; 防冰; 除冰

Anti-Icing and Deicing System for Intelligent Electric Heating Fan Blades in Icing Wind Tunnels

XIONG Jianjun, ZHAO Zhao, RAN Lin, ZHAO Jieyi

(Key Laboratory of Icing and Deicing Control, China Aerodynamics Research & Development Center Low Speed Institute, Mianyang 621000, China)

Abstract: In icing wind tunnels, the blades of the fan rotor system freeze cause an increase in motor load and vibration exceeding the limit, which affects the safety and efficiency of the icing wind tunnel test. The rotor system is a large-scale high-speed rotating part, in the environment of low temperature and 100% of humidity. It is difficult to detect blade icing, monitor the temperature of heating zone, and provide reliable power supply to each blade of the rotor system from the ground high-power heating power supply. An intelligent icing early warning system based on the vibration monitoring of fan rotors and the ratio of motor speed to wind speed in test section is established. A composite anti-icing blade with electric heating film in the leading edge is developed. A multi-channel high speed conductive slip ring based on complex working conditions and requirements is developed, and a heating power supply is radially transmitted to each blade through the slip ring and rotor hollow shaft, thereby solving the arrangement and installation of the power supply and temperature cables from the ground to the fan blades of the rotor system, which completes the large scale fan rotor multi-blade heating power supply and the reliable transmission of temperature signals, and realizes the fan blade anti-icing system intelligent startup or single-action closed-loop control. The system has been running for more than 4 years. Through continuous improvement, the anti-icing of fan blades during the test or rapid icing after the test has been achieved, with a good application effect, thus reducing the risk of test safety, and improving the capability of wind tunnel testing.

Keywords: the fan blades; rotor vibration; electrothermal heating film; intelligent icing warning; slip rings; anti-icing; de-icing

0 引言

结冰影响飞行器的安全性和性能, 结冰风洞是研究、

评估飞行器结冰与防除冰技术的地面试验设备^[1-2]。结冰风洞是回流式低速风洞, 动力系统使用大功率风扇电机驱动风扇转子系统产生气流速度。试验过程中, 喷雾

收稿日期:2024-06-30; 修回日期:2024-08-08。

作者简介:熊建军(1971-),男,硕士,正高级工程师。

引用格式:熊建军,赵 照,冉 林,等. 结冰风洞智能化电加热风扇叶片防除冰系统[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(8): 234-241.

系统产生的云雾随气流流动, 先后经过稳定段、试验段、扩散段、导流片和风扇段等, 部分未沉降的过冷水滴撞击风扇叶片, 导致叶片前缘结冰。喷雾时间、液态水含量、水滴直径、气流温度等参数直接影响风扇叶片结冰速率。叶片结冰严重影响结冰风洞安全运行, 降低试验效率^[3-4]。尤其喷雾时间超过 30 min 的试验状态叶片结冰更严重, 限制了结冰风洞试验能力^[5-6]。为保证结冰风洞安全稳定运行, 必须解决复杂工作环境下风扇叶片结冰问题。国内外风力机叶片结冰相关的数值计算、试验和防除冰技术文献较多, 在风力机叶片防除冰技术应用领域, 大多处于研究和试验阶段, 没有技术成熟的大规模应用^[7-8]。与风力机比较, 结冰风洞风扇转子直径在几米量级, 转速高, 未见国内外其他结冰风洞风扇叶片防除冰相关文献报道。目前电加热和热气防除冰技术在航空领域有广泛的应用, 技术成熟。综合考虑现场条件、成本和控制技术, 电加热更适合应用到风扇叶片防除冰。由于风扇转子为大尺度、高转速旋转部件, 必须解决叶片结冰感知、防除冰控制和强弱电信号传输等问题。在原风扇转子系统基础上, 建立了智能化结冰预警系统, 研制了内置加热单元的防冰风扇叶片和高转速多通道导电滑环, 在风扇叶片加热单元和地面控制柜间设计了多级线路连接点, 方便导电滑环、风扇叶片更换和线缆固定, 完成地面控制柜和大尺度转子系统风扇叶片组件间多通道强弱电传输, 实现结冰风洞试验过程中风扇叶片防冰或试验后快速除冰。

1 风扇叶片结冰危害

结冰风洞中, 风扇段位于第二拐角段后, 安装在风扇段的风扇电机通过膜片联轴器驱动风扇转子系统同步旋转, 叶片对空气做功, 风扇叶片前后气流产生压强差, 使风洞内空气流动起来, 产生试验段模拟的流场环境, 结冰风洞回路结构如图 1 所示。流场控制采用试验段稳风速外环、风扇电机稳转速内环串级调节, 稳风速控制时, 系统随洞体回路阻塞度变化自动调节电机转速, 保持试验段风速稳定。常规低速风洞模型姿态引起阻塞度变化一般小于 5%, 试验段风速恢复时间在 5 s 以内。结冰风洞则完全不同, 随着试验进行, 风洞洞壁、防护网和风扇叶片等结冰加剧, 风扇叶片翼型尤其前缘变化显著, 风洞阻塞度持续增加。某些严苛试验工况, 如液态水含量大、喷雾时间超 30 min, 为稳定试验段风速, 风扇电机转速持续升高, 电机转速/试验段风速非线性严重, 风扇段声响异常, 风扇振动超限, 严重影响结冰风洞安全运行, 试验被迫停止^[9-10]。以结冰风洞主试验段某工况试验过程为例, 试验过程中风扇电机转速和试验段风速变化如图 2 所示。从图 2 看出, 给定风速下, 风扇叶片结冰前, 风扇电机转速稳定; 风扇叶

片结冰后, 风洞阻塞度逐渐增大, 为稳定试验段风速, 电机转速升高 30%, 直到停止喷雾后电机停车。本工况液态水粒径 MVD 为 40 μm, 液态水含量 LWC 为 1.29 g/cm³, 喷雾时间 20 min。如果喷雾时间更长, 风扇叶片结冰更加严重, 电机转速进一步升高, 试验安全隐患大。

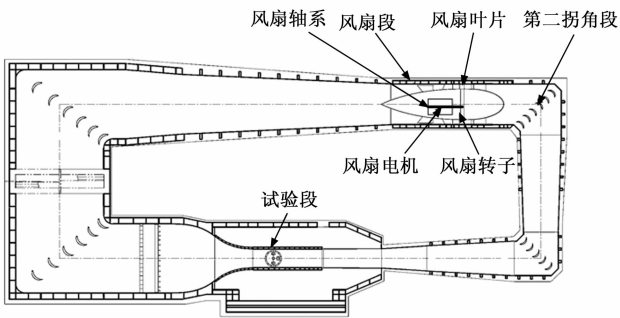


图 1 结冰风洞回路结构

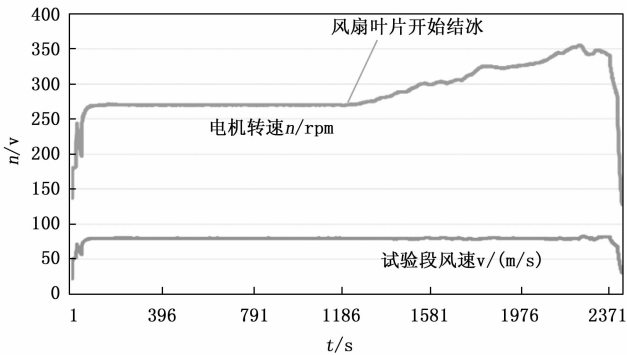


图 2 结冰试验过程中电机转速和试验段风速变化

2 叶片防除冰系统组成

叶片防除冰系统包括叶片结冰智能感知、电加热风扇叶片、加热电源、电源和信号传输等。

2.1 叶片结冰智能感知

叶片防除冰系统必须准确感知叶片结冰信息, 采用稳定可靠的防除冰技术。风扇叶片安装在转子轮毂四周, 单只叶片不超过 30 kg (包括叶柄、碳梁、泡沫芯和复合材料等), 叶片翼尖最高线速度超过 200 m/s。对于飞机机头、风力机机舱或其它场所, 通常在水滴收集系数较大区域安装结冰传感器感知结冰信息^[11-12]。目前结冰传感器类型较多, 各型飞机上谐振式、磁致伸缩和光纤式结冰传感器技术成熟。结冰传感器主要感知安装区域结冰气象或结冰厚度, 达到一定阈值后报警, 连锁启动防除冰系统。结冰传感器有一定重量和安装要求, 要求叶片预留安装接口和信号传输通道, 目前还不能安装在现有的风扇叶片上, 国内风力机和螺旋桨飞机都没有将结冰传感器安装在叶片的先例。根据结冰风洞

运行经验, 通过以下方法可以间接判断叶片结冰和结冰强度: 一是叶片结冰后风扇噪声变化; 二是风扇电机转速/试验段风速比增大, 三是风扇轴系振动增大。以上测试传感器不需要在叶片安装, 通过风扇段内安装噪声频谱分析仪测试噪声, 动力监控系统读取风扇电机转速和试验段风速, 风扇轴系安装振动速度/位移传感器。以上参数实时监测, 通过大数据研究, 对每个参数设定合理的阈值, 当以上 3 个参数任意 2 个超过设定阈值, 叶片结冰报警, 通过界面参数和警示灯, 提醒运行人员, 必要时启动风扇叶片防除冰系统。同时在风扇段头罩侧洞体外, 安装了摄像监视窗口, 可以实时监视叶片结冰状态。该摄像头安装在洞体观察窗玻璃外侧, 玻璃有电加热防护, 风扇叶片前后有补光, 保证摄像监视图像清晰。该摄像机不是高速相机, 只用于静态监视叶片前缘结冰状态, 不能实现旋转过程叶片结冰监视。图 3 为风扇叶片结冰状态监测视频截图, 从截图看出, 静态能清晰看到风扇叶片前缘结冰信息。

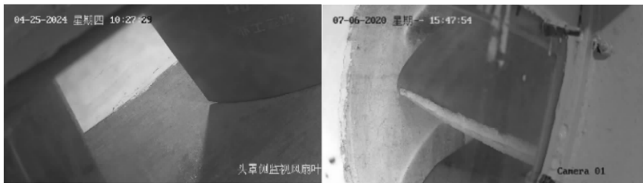


图 3 风扇叶片结冰状态监测视频截图

2.2 电加热风扇叶片

国内螺旋桨飞机叶片有的采用外置电加热单元防除冰, 将电热丝嵌入复合绝缘材料内预制成外置加热单元后真空热压粘附在叶片前缘防除冰, 设计阶段预留加热单元和线路接口, 保证安装加热单元前后翼型不变。考虑现场环境和使用要求, 结冰风洞风扇叶片采用绝缘玻璃布包裹电加热单元内置在叶片前缘表层碳纤维布内, 加热单元导线通过叶片端面接线盒接入叶柄中心孔引出^[13-14]。各叶片生产工艺一致, 保证每只叶片加热单元电阻约 55 Ω , 各叶片加热单元并联后电阻约 0.5 Ω 。与飞机叶片外置加热单元比较, 内置加热单元一体成型, 不易脱落, 防护更好。内/外置加热单元的叶片结构如图 4 所示。

电加热叶片设计时, 对叶片电加热防护区域、防冰功率开展了仿真计算和试验验证, 叶片上下表面的防冰范围按照弦向 20% 设计^[16], 单位面积防冰功耗约 1 W/cm²。电热防冰叶片由碳梁、蒙皮、泡沫芯、中空叶柄及加热单元等组成^[17]。为防护复合材料叶片高温受损, 在每只叶片加热单元内布置 Pt100 热电阻, 温度信号线随加热电源线布置, 每只叶片的温度和加热电源线沿叶柄中孔穿出, 所有线缆经过紧固后汇聚到风扇转子中心轴, 线缆束穿过转子轴通孔, 再与滑环的温度

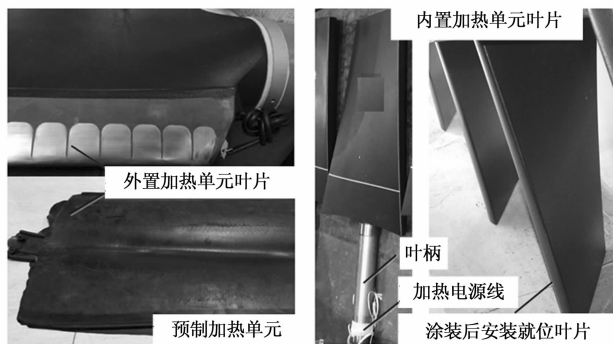


图 4 内/外置加热单元叶片结构

和加热电源环道连接。各叶片加热单元性能和工作环境一致, 为简化控制系统结构, 所有风扇叶片加热单元并联, 实时监控各叶片加热单元温度, 计算各叶片加热单元温度平均值作为反馈, 实现风扇叶片温度闭环控制。

2.3 加热电源

加热电源安装在风洞外控制柜内, 电源输出经断路器、线缆、导电滑环等供电回路为风扇转子各叶片加热单元供电加热。通过防冰功率计算, 加热电源选用最大输出功率 100 kW 可调直流电源, 输出电压 DC 0 ~ 220 V 无级调节, 最大输出电流 450 A, 电源带通讯接口, 作为一个子站嵌入风洞动力控制系统, 实现风扇叶片电加热自动控制。为避免叶片加热单元大电流频繁通断, 叶片电加热控制系统根据给定温度与反馈温度差值分段控制加热电源电压输出, 保证加热电流相对稳定。

2.4 电源和信号传输

风扇转子系统直径 6.5 m, 最高转速 600 rpm, 采用双轴承支撑, 转子轴一端与风扇电机轴驱动端通过膜片联轴器直连。风扇叶片安装在轮毂外缘四周。叶片数量 27 支, 单只叶片加热功耗超 2 kW。转子系统结构复杂, 工作环境特殊, 湿度长期 100%。为实现风扇叶片电加热控制, 必须将地面加热电源稳定可靠传输到所有风扇叶片形成加热回路, 同时将所有叶片温度信号实时传输到控制系统。图 5 为风扇叶片加热电源和信号传输框图。

原风扇转子系统设计了电动推杆变距机构调节叶片安装角。叶片变桨距时, 伺服电机驱动升降机推动转子内推盘, 推盘带动滑块和曲柄连接的所有叶片同步转动到指定角度。由于转子上支撑叶柄的自润滑轴承长期处于低温潮湿环境, 较少动作, 维护困难, 自润滑轴承锈蚀严重, 叶片变桨距系统无法正常运行。转子系统改造后, 变桨距系统的驱动机构、推杆、推盘各铰链机构已经拆除。转子空心轴内空间作为叶片加热电源和温度信号传输通道。基于风扇整流罩内工况环境、加热电源和信号传输需求, 研制了多通道高线速度导电滑环。导电滑环转子法兰通过止口插入转子空心轴端, 轴向用 6 颗

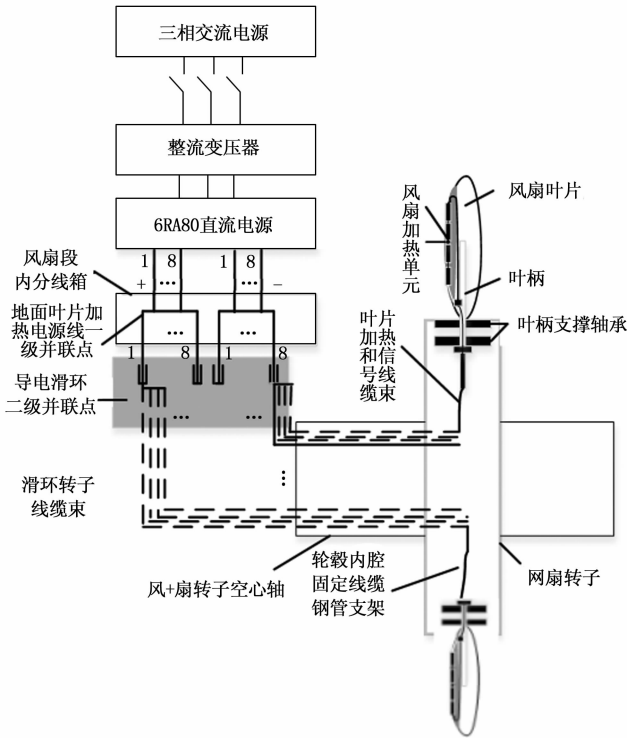


图 5 风扇叶片加热电源和信号传输

螺杆紧固。转子系统空心轴端如图 6 所示。



图 6 转子系统空心轴端结构

为实现叶片加热电源和温度信号稳定传输，加热电源线依次从地面控制柜输出线、管沟接入风扇段头罩内分线箱端子，该分线箱为一级并联点。加热电源正负母线分别与导电滑环定子的 8 根线缆并联，分别接入功率环道定子导电刷，导电刷以“人”形结构压在滑环转子各环道，使导电刷与环道紧密接触实现两个相对旋转机构的动力不间断传输。温度信号传输方式与加热电源一致，温度巡检仪安装在分线箱内。滑环定子共 4 束线缆，加热电源正/负母线各为 1 束，温度信号线缆 2 束。电源线每束为 8 根线缆外套波纹管，每根线缆分别接入滑环 1 个环道。加热电源正/负母线分别占用 8 个环道并联，每个环道对应转子输出线再与 4 根线缆并联，滑环转子分别输出 32 根正/负电源线，每只叶片分别接入 1 根正/负电源线，余 5 根正/负母线备用。滑环定子 2 束温度信号线缆，每束线缆为 16 根线缆外套波纹管，

每根温度信号线缆分别接入滑环 1 个信号环道，共占用 54+10（备用）个环道。导电滑环转子输出正/负电源线和温度线缆延长后，在转子内腔沿径向传输，依次经过转子内两根线缆固定钢管支架分别接入每只叶片线缆连接支座端子，再经过线缆与每只叶片加热单元和温度传感器连接。各叶片温度信号直接接入分线箱内温度巡检仪，经过通讯将温度信号传输到地面叶片加热控制系统实时显示和控制。转子系统电源和信号线缆布置如图 7 所示。

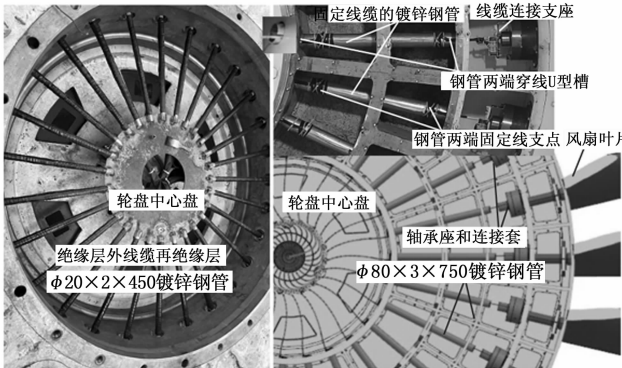


图 7 转子系统电源和信号线缆布置

3 关键技术及解决

3.1 大尺度、高转速风扇叶片电加热防除冰技术

大尺度、高转速转子系统风扇叶片防除冰没有成熟经验借鉴。由于技术难度和条件限制，风扇叶片防除冰只有基于现有条件，才能持续优化设计。

风洞建设时期，针对 3 个试验段最高风速对应风扇电机转速、电流和功率等问题，设计了风扇叶片变桨距系统，没有考虑风扇叶片防除冰问题。为解决风扇叶片结冰问题，在风扇转子和支撑轴承无法改造条件下，利用转子系统和支撑轴承轴向间隙，设计了两套分半、碳刷式旋转供电机构，解决了狭窄空间内高湿度环境下旋转供电装置结构、绝缘和线缆布置等问题，将加热电源从地面引入高速旋转风扇转子上的每只叶片加热单元；同时基于无线传输技术，将部分叶片温度信号稳定传输到地面控制系统作为温度反馈。安装调试表明，风扇叶片防除冰系统应用效果好。考虑碳刷寿命，每次需要操作两套碳刷压紧/移开机构，碳刷和环道暴露在潮湿环境有电离的风险，安全风险大^[18]。

随后利用风扇叶片变桨距系统改造，反复踏勘现场条件，利用转子空心轴和轮毂空间，研制了专用导电滑环，改造轮毂内部结构，解决电源和信号线缆传输和布置问题，叶片所有供电线缆不裸露，优化控制系统结构，实现了风扇叶片电加热智能控制^[19-20]。

3.2 复杂环境下多套电加热叶片供电和信号安装技术

风扇转子上所有叶片采用一套电源加热，各叶片加

热单元并联运行,各叶片温度信号独立传输到地面控制系统,大尺度、高转速转子系统上布置了 27 套叶片组件的加热电源和温度信号线缆。转子内线缆数量多,速度高,施工后转子中心盘不能再进入维护,必须解决线缆在转子和叶柄内布置、紧固和方便拆卸等问题,解决转子内电源和信号线缆防松、防脱、防晃动以及绝缘受损问题。每套叶片组件线缆自导电滑环转子出线到叶片加热单元有 4 个连接点:1)导电滑环内转子出线并接点;2)转子空心轴内导电滑环转子出线与转子内导线连接点;3)转子内导线与叶柄内导线连接点;4)叶片端面接线盒内叶柄内导线与加热单元连接点。一旦上述 4 个连接点及沿途线缆固定点松动,各线缆和连接点将承受较大的径向力。图 8 是转子内导线与叶柄内导线连接和固定方式,调试发现转子线缆束被离心力甩向叶片侧。

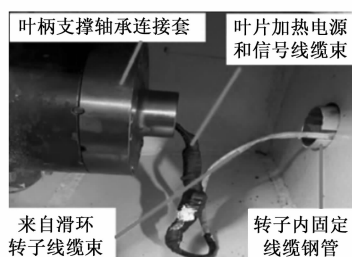


图 8 转子内导线与叶柄导线连接和固定方式

针对转子内线缆布置问题,依据现场条件,从转子系统中心盘径向到每只叶片线缆连接支座,分别焊接了两根管径不同的钢管支架固定线缆,支架上包裹绝缘层,钢管支架两端设计线缆固定点,用扎带多点固定好线缆,确保线缆和连接点不会被高速转子径向离心力甩向叶片方向。由于所有叶片加热单元并联,为便于测试叶片加热电阻和温度传感器性能,在叶片支撑轴承连接套上,设计了线缆连接支座,支座上有接线端子。针对线缆在叶柄内晃动损伤绝缘问题,在叶柄 $\varphi 50$ mm 中心孔内填充泡沫棒,防止直径不到 $\varphi 10$ mm 线缆束在中心孔内晃动,又不增加叶片组件重量。图 9~11 分别为转子中心盘、转子内线缆固定、叶片线缆连接支座。

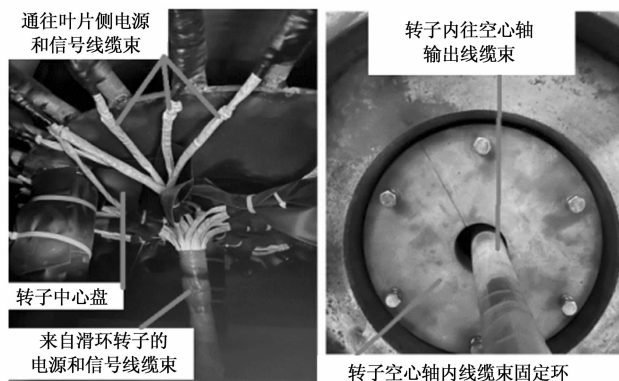


图 9 转子中心盘线缆固定

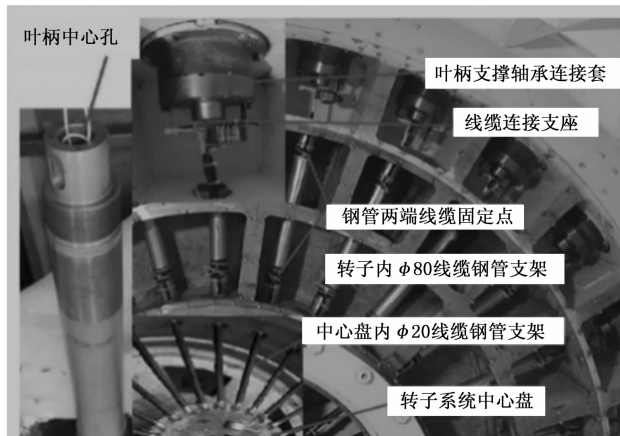


图 10 风扇转子内线缆固定

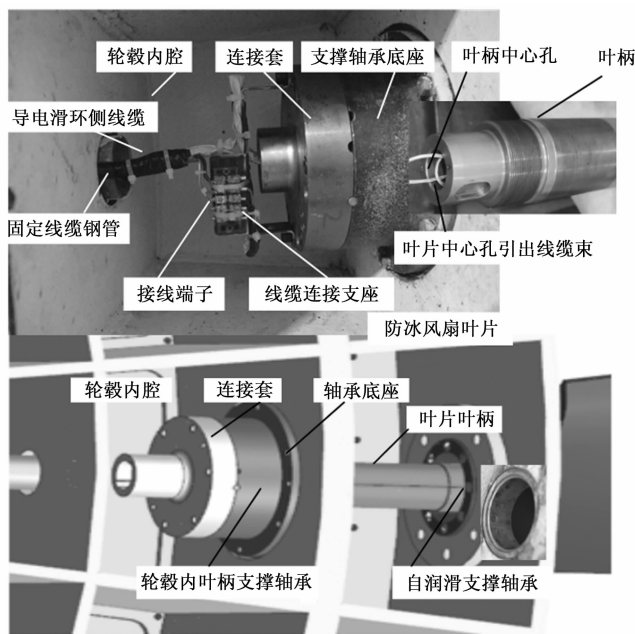


图 11 叶片线缆连接支座

3.3 大尺度高转速旋转机构多通道强弱电传输技术

试验中风扇叶片随转子系统高速旋转,为将地面电源安全可靠传输到各风扇叶片加热,必须实现两个相对旋转机构的电源和信号不间断传输,导电滑环可以实现以上功能。由于现场安装条件和环境特殊,导电滑环外形、接口、通道数量和电气特性必须适合现场条件和传输要求。经现场踏勘,导电滑环转子法兰安装在转子系统空心轴端(轴端结构如图 6 所示),利用轴端螺孔固定导电滑环转子法兰,保证滑环转子中心与风扇转子轴同心度,同时利用风扇转子支撑轴承座设计滑环定子止转机构^[21-22]。滑环定子线缆与风扇段头罩内分线箱接线端子连接,滑环转子线缆穿过转子空心轴、轮盘中心盘后,在轮盘内分别与各叶片加热电源线并联,与叶片温度信号线一对一连接。

导电滑环防护等级 IP65,工作温度 $-40 \sim +135$ $^{\circ}\text{C}$,

共 80 个环道, 其中功率环道 16 路, 每环道传输电流 $\geq 40\text{ A}$, 加热电源正/负母线分别采用 8 路 40 A 并联, 最大传输电流 320 A。功率环定子/转子导线采用 AF-200-4 mm² 镀银航空导线。信号环 64 路, 其中 27 只叶片需要 54 路, 备用 10 路, 用于传输叶片前缘内置的 Pt100 温度信号。信号环定子/转子导线采用 AFPF-200-2 $\times$ 0.15 mm² 双绞屏蔽镀银航空导线。导电滑环外形和安装现场如图 12 所示。

4 系统安装与调试

系统安装时, 由于转子中心盘施工后不能再进入, 导电滑环作为易损件, 必须考虑后期更换安装, 叶片加热和信号线缆经转子中心盘后进入空心轴, 在空心轴轴端与导电滑环转子线缆连接。如果采用航空插头连接, 现场施工也非常不便。系统安装采用点到点接线。由于线缆数量多, 各线缆逐一对接后再绝缘防护, 线缆束直径大且较硬, 接线后径向收缩范围有限。安装时先做工装将滑环定子托住, 滑环转子输出线缆与空心轴输出线缆径向接线空间不到 5 cm, 且保证各接线一一对应, 接线完成后再将整束线缆塞进空心轴。待后期更换滑环时, 将滑环法兰脱开, 用工装将定子托住, 再将滑环转子线缆束从空心轴移出, 将接线部位切断, 再将新滑环转子线缆与空心轴输出线缆一一对接后安装就位。

滑环定子 4 束线缆呈自然松弛状态, 再与风扇段内分线箱端子接线, 防止滑环定子线缆给定子增加剪切力。

滑环安装就位后, 先测试导电滑环与风扇转子轴同心度。通过调整导电滑环转子安装法兰与风扇转子轴端面垫片厚度, 保证达到同心度指标。系统接线完成后, 风扇转子系统头罩侧盖板未封闭前, 可以到头罩内

各叶片线缆连接支座处, 在端子上断开接线, 测试各叶片加热单元电阻, 确保各加热单元线缆无短路或断路, 再测试加热导线对地绝缘, 确保导线对地绝缘电阻达到 1 M Ω 以上; 测试各也叶片温度传感器电阻, 通常都在 110 Ω 左右。再到控制柜侧测试各加热单元并联后电阻和导线对地绝缘电阻, 系统接线无误后再通电测试。

风扇叶片电加热功能测试时, 风洞动力系统不启动, 手动盘车使风扇转子系统低速转动。先采用温度闭环手动模式, 设置叶片温度和加热加压, 启动叶片电加热系统, 实时监测各叶片温度信号是否正常, 各叶片加热功能是否正常。在风扇段处, 用手持红外温度测试仪测试每只叶片前缘温度, 测试各叶片加热区域温度分布。各叶片通电测试结果如图 13 所示。从测试结果看, 各叶片加热部位功能正常, 温度分布均匀, 温度反馈正常。

为防止叶片加热单元温度过高导致受损, 叶片智能自动加热和手动加热均设计了连锁控制, 当叶片结冰智感知、电机转速、气流总温、线路绝缘、温度反馈等参数均满足加热条件, 叶片电加热防除冰系统才能启动; 满足任一停止条件, 叶片防除冰系统立即停止。

5 系统试验与应用

系统试验和应用前, 编写试验大纲, 明确试验目的、步骤和方法。试验目的是测试系统功能和应用效果: 1) 风扇叶片防冰控制模式切换; 2) 智能化结冰预警系统参数优化; 3) 电加热防冰叶片试验与分析。根据设计系统可以采用智能化自动和单动温度闭环模式。智能化自动模式时, 系统根据风扇轴振动、风扇段噪声和风扇转速/试验段风速比变化, 自动启动和停止风扇叶片电加热防冰系统。试验后除冰通常采用单动温度闭

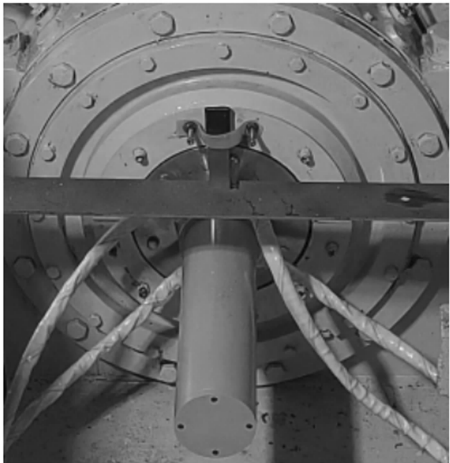
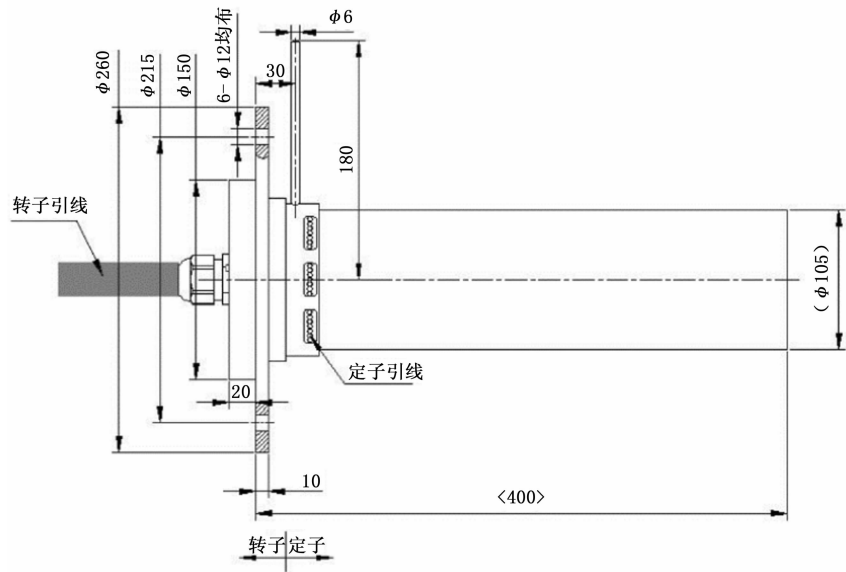


图 12 导电滑环外形和安装现场



图 13 风扇叶片电加热温度测试

环模式，设置叶片温度和加热电压，启动除冰系统，通过叶片温度反馈和视频监视，待叶片除冰完毕停止叶片电加热除冰系统。通过优化智能化结冰预警系统各阈值参数，叶片电加热防冰系统实现自动启动。在某典型工况下完成叶片电加热防冰试验，试验过程中叶片电加热防冰系统启动过程监控参数曲线如图 14 所示。从图 14 看到，风扇叶片结冰前，试验段稳风速控制精度高，稳

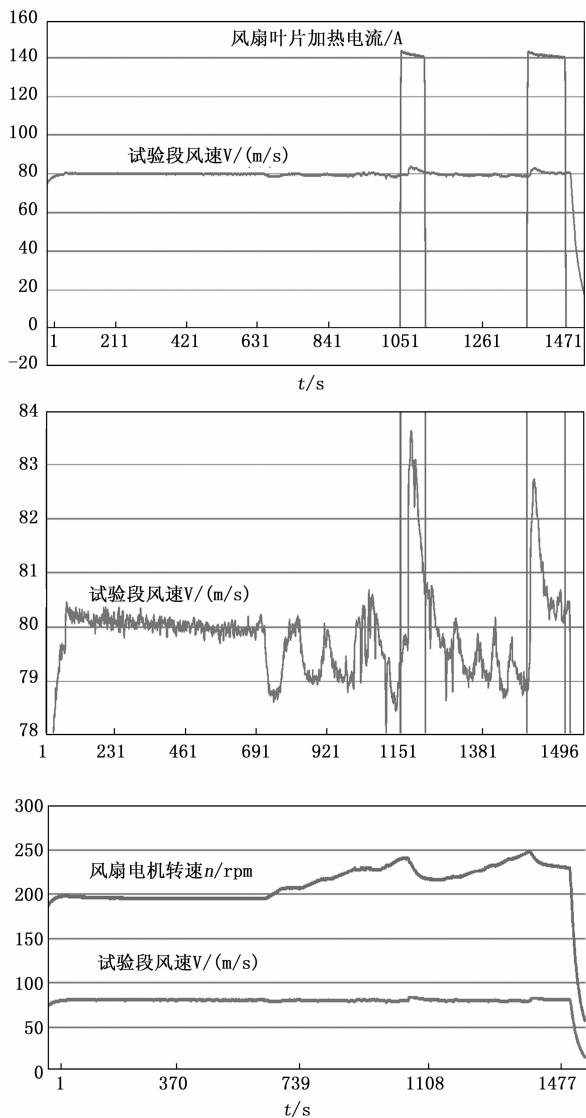


图 14 叶片结冰后风速、电机转速、加热电流变化曲线

态精度超过 0.2%；随着风扇叶片逐步结冰，叶片翼型发生改变，风扇电机转速逐步升高，试验段风速稳态控制精度变差，甚至出现振荡；风扇叶片电加热防冰系统启动后，试验段风速稳态控制精度有变好的趋势，风扇电机转速下降；由于风扇叶片电加热防冰开启时间短、防冰功率不足，叶片前缘结冰又逐步严重，再次启动风扇叶片电加热防冰系统，试验段风速稳态控制精度有变好的趋势，风扇电机转速逐步下降。图 15 为试验后风扇叶片除冰视频记录，叶片电加热除冰系统启动后，30 s 内风扇叶片前缘冰全部脱落。系统试验后直接投入结冰风洞各项试验应用中。

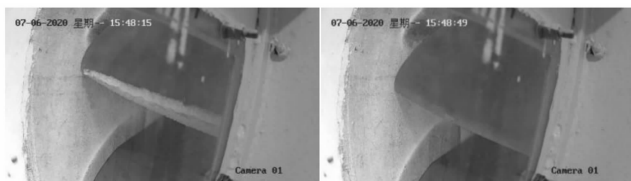


图 15 试验后叶片电加热启动后 30 s 后冰脱落

6 结束语

系统建立了风扇叶片智能化结冰预警，研制了前缘内置电加热膜的复合材料防冰叶片和多通道高线速度导电滑环，解决了电源和温度线缆从地面到转子系统风扇叶片布置问题，完成了大尺度风扇转子系统多路加热电源和温度信号可靠传输，实现了多工况下风扇叶片电加热防冰或试验后快速除冰，各项技术指标达到设计要求。系统运行 4 年来，系统应用效果较好，满足结冰风洞云雾包线范围内不同液态水含量任意喷雾时间要求，达到设计技术要求，提高了风洞试验能力和试验效率。由于导电滑环随风扇转子同步旋转，滑环使用寿命 1 000 万转，而风扇转子每年超过 2 000 万转，为保证系统可靠性，导电滑环必须定期更换。同时风扇转子系统动平衡要求高，要求所有叶片电加热防冰功能同时有效，任一叶片加热单元失效系统将无法安全工作，对电加热风扇叶片、加热电源和信号传输、控制系统可靠性要求高，后续将加强系统运行维护，建立叶片电加热快速维修技术，保证系统安全可靠运行。

参考文献：

- [1] 郭 龙, 王梓旭. 3 米×2 米结冰风洞用户手册 [Z]. 中国空气动力研究与发展中心, 2014.
- [2] 裘燮纲, 韩风华. 飞机防冰系统 [M]. 北京: 航空专业教材编审组, 1985.
- [3] NICHOLLS J A, et al. Intermittent detonation as a thrust producing mechanism [J]. Jet Propulsion, 1957, 27 (5): 534-541.
- [4] PHILIP S A. Wind tunnel and propulsion test facilities;

supporting analyses to an assessment of NASA's capabilities to serve national needs [R]. America: NASA, 2004.

[5] 刘根林, 沈海军. 飞机防冰与除冰技术综述 [J]. 江苏航空, 2003 (4): 18-20.

[6] DAVID W H. The Cranfield University icing tunnel [R]. AIAA2003-901.

[7] KAMEL A K. Mixed phase icing simulation and testing at the Cox icing wind tunnel [R]. AIAA2003-903.

[8] MA L Y, XIONG L Y, LIU L Q, et al. Experimental study on electro-thermal deicing technique for carbon fiber composite [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33 (1): 54-61.

[9] MA H, ZHANG D L, MENG F X, et al. Experiment of electro-thermal anti-icing on a composite assembly [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34 (8): 1846-1853.

[10] CROCE G, BEAUGENDRE H, WABASHI W G. CH-T3D: FENSAP-ICE conjugate heat transfer computations with droplet impingement and runback effects [R]. AIAA Paper 2002-0386, 2002.

[11] LI Q Y, ZHU C L, BAI T. Simplification of de-icing excitation and influential factors of the electro-impulse de-icing system [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33 (8): 1384-1393.

[12] 王勋年. 低速风洞试验 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.

[13] 徐燕, 李洒路, 陈浩, 等. 基于极点配置控制的风机叶片颤振控制研究 [J]. 测控技术, 2017, 36 (1): 51-58.

[14] 朱春玲, 朱程香. 飞机结冰及其防护 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.

[15] 林贵平, 卜雪琴, 申晓斌, 等. 飞机结冰与防护技术 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.

[16] 熊建军, 倪章松, 李昱, 等. 防冰总压/静压探针结构及控制系统设计与应用 [J]. 测控技术, 2019, 38 (4): 132-136.

[17] 熊建军, 郭龙, 王茂, 等. 旋转叶片电加热防冰系统设计与应用 [J]. 测控技术, 2020, 39 (9): 118-123.

[18] 熊建军, 易贤, 冉林, 等. 一种控制律电加热防/除冰控制系统: ZL202010137500.5 [P] 2021-11-02.

[19] 熊建军, 倪章松, 郭龙, 等. 一种防冰风扇叶片电加热温度闭环控制方法: ZL201910254937.4 [P] 2019-3-30.

[20] 倪章松, 熊建军, 郭龙, 等. 一种导电滑环结构: ZL201910253818.7 [P] 2019-03-30.

[21] 熊建军, 冉林, 赵照, 等. 一种防冰风扇组件以及防冰风扇系统: ZL202310527764.5 [P]. 2023-07-14.

[22] 赵杰毅, 熊建军, 赖庆仁, 等. 一种风洞风扇桨叶固定装置及可调桨叶安装角风洞风扇: ZL202310849278.5 [P]. 2023-07-12.

[10] JING C Q, SHU H Y, SHU R, et al. Integrated control of electric vehicles based on active front steering and model predictive control [J]. Control Engineering Practice, 2022, 121: 105066.

[11] 李绍松, 王旭阳, 范阳群, 等. 基于稳定状态预测的汽车侧向稳定性控制 [J]. 长春工业大学学报, 2021, 42 (5): 385-393.

[12] 王旭阳. 极限工况下汽车侧向稳定性控制研究 [D]. 长春: 长春工业大学, 2023.

[13] 张志勇, 湛唯一. 分布式驱动电动汽车操纵稳定性 AFS/DYC 协同控制 [J]. 西华大学学报 (自然科学版), 2025, 44 (2): 48-59.

[14] 吴相稷, 杨秀建, 陈峥, 等. 极限操纵工况下 CACC 汽车队列的非线性动力学特性 [J]. 中国公路学报, 2024, 37 (9): 301-311.

[15] 陈建锋, 叶贻财, 吴强, 等. 含 AFS/DYC 主动分配优化的 4WID-EV 横向稳定性控制策略 [J]. 重庆理工大学学报 (自然科学版), 2022, 36 (8): 94-100.

[16] SUN M, HU Y. Integrated control of torque and emission of a diesel engine based on LPV-MPC [J]. IET Control Theory & Applications, 2020, 14 (20): 3610-3620.

[17] JIN X, YU Z, YIN G, et al. Improving vehicle handling stability based on combined AFS and DYC system via robust Takagi-Sugeno fuzzy control [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 19 (8): 2696-2707.

[18] TERMOUS H, SHRAIM H, TALJ R, et al. Coordinated control strategies for active steering, differential braking and active suspension for vehicle stability, handling and safety improvement [J]. Vehicle System Dynamics, 2018, 57: 1-36.

[19] 张利鹏, 刘欣, 刘帅帅, 等. 双模耦合驱动智能电动汽车对开坡道行驶稳定性控制 [J]. 中国公路学报, 2024, 37 (3): 204-215.

[20] YOUNG K D, UTKIN V I. A control engineer's guide to sliding mode control [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1999, 7 (3): 328-342.

[21] ZHAO J, WONG P K, MA X, et al. Chassis integrated control for active suspension, active front steering and direct yaw moment systems using hierarchical strategy [J]. Vehicle System Dynamics, 2017, 55 (1): 72-103.