

基于分布式光纤测温的结冰风洞 喷雾耙温度场测量

赵 照, 熊建军, 张平涛, 冉 林, 李自雨

(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: 为了实时获取结冰风洞喷雾耙温度场数据, 需要采用温度传感器采集温度信号, 传统的热电阻式温度传感器需要连接大量长距离线缆, 占用大量喷雾耙内部空间; 为提高温度场测量的质量效率, 对基于分布式光纤测温的结冰风洞喷雾耙温度场测量技术进行了研究; 首先, 分析了喷雾耙温度场测量概况, 研究了分布式光纤测温方法; 其次, 设计了 U 型光纤布线方法, 建立基于分布式光纤测温的结冰风洞喷雾耙温度场测量系统; 最后, 实现了 20 层喷雾耙温度场全局测量, 并对喷雾耙温度场分布进行了详细分析; 经实际应用表明, 喷雾耙温度场测量系统可为喷雾耙电加热系统提供了温度反馈, 大大提高了温度场测量效率。

关键词: 结冰风洞; 喷雾耙; 温度场; 分布式光纤测温

Temperature Field Measurement of Spray Bar in Icing Wind Tunnel Based on Distributed Optical Fiber Temperature Measurement

Zhao Zhao, Xiong Jianjun, Zhang Pingtao, Ran lin, Li Ziyu

(Key Laboratory of Icing and Anti/De-Icing, China Aerodynamics Research and Development Center,
Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to obtain the temperature field data of the spray bar in the icing wind tunnel in real time, temperature sensor needs to be used to collect the temperature signal. The traditional thermal resistance temperature sensor needs to connect a large number of long-distance cables, which takes up a large amount of internal space of the spray bar. For improving the quality and efficiency of temperature field measurement, the measurement technology of spray bar temperature field in icing wind tunnel based on distributed optical fiber temperature measurement is studied. Firstly, the general situation of measuring temperature field of spray bar is analyzed, and the distributed optical fiber temperature measurement method is studied. Secondly, U type optical fiber wiring method is designed, and the temperature measuring system of spray bar in icing wind tunnel based on distributed optical fiber temperature measurement is established. Finally, the global temperature measurement of 20 layers of spray bars is realized, and the temperature field distribution of spray bar is analyzed in detail. The practical application shows that the spray bar temperature field measurement system can provide temperature feedback for the spray bar electric heating system, and improves the measurement efficiency of the temperature field greatly.

Keywords: icing wind tunnel; spray bar; temperature field; distributed optical fiber temperature

0 引言

高空云层中存在过冷水滴, 飞行器遭遇过冷水滴时会出现结冰现象, 影响飞行性能, 严重时导致部件损坏甚至造成机毁人亡的重大事故^[1-2]。结冰风洞作为开展结冰与防除冰的重要地面模拟设施, 在适航审定中发挥重要的作用^[3]。中国空气动力研究与发展中心 3 米×2 米结冰风洞于 2013 年建设完成, 由喷雾系统、制冷系统、高度模拟系统和动力系统等多个子系统组成。其中, 喷雾系统是结冰风洞的关键配套设备, 用于模拟飞行器穿越含有过冷水滴云层遇到的高空云雾环境, 由喷雾耙架、水处理系统、水气

加热系统、水气压控制系统等组成^[4]。

喷雾耙架处于低温潮湿的稳定段内, 存在供水管路结冰堵塞的风险。管路结冰会导致调节阀、电磁阀、传感器等精密设备被膨胀的冰挤压损坏, 严重危害喷雾系统安全运行。为了防止供水管路结冰堵塞, 采用电加热系统对喷雾耙供水管路进行加热, 为了实时监测加热后喷雾耙内部温度, 目前采用的是喷雾耙中心部位布置两线制 4~20 mA 输出的热电阻式温度传感器, 通过长距离线缆与洞外采集模块连接, 实现喷雾耙内温度信号采集与存储。长距离的大量线缆铺设占用大量空间, 且长时间处于低温潮湿环境

收稿日期: 2020-07-08; 修回日期: 2020-08-21。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2015CB755800)。

作者简介: 赵 照(1993-), 男, 安徽灵璧人, 硕士, 工程师, 主要从事风洞测控技术及传感器设计方向的研究。

通讯作者: 熊建军(1971-), 男, 四川广安人, 硕士, 高级工程师, 主要从事风洞测控技术方向的研究。

引用格式: 赵 照, 熊建军, 张平涛, 等. 基于分布式光纤测温的结冰风洞喷雾耙温度场测量[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(3): 14-17, 22.

易导致部分线缆老化。此外, 由于喷雾耙内部空间有限, 无法布置足够多的热电阻式温度传感器, 导致无法获取喷雾耙内全局温度。近些年来, 随着光纤传感技术的发展, 分布式光纤测温系统 (DTS) 因其具有安装简便、高灵敏度、寿命长的特点, 被广泛应用于温度场测量^[5-6]、状态监测^[7-13]等领域。

本文基于现有结冰风洞喷雾系统, 在不改变喷雾耙结构的基础上, 针对喷雾耙低温潮湿、空间狭小等复杂环境, 建设了一种基于分布式光纤测温的喷雾耙温度场测量系统, 通过在喷雾耙内部布置测温光纤, 研制分布式光纤装置, 实现了喷雾耙内部全局测温, 对于喷雾耙温度场分布研究具有重要的参考意义。

1 结冰风洞喷雾耙温度场测量概况

3 米 × 2 米结冰风洞利用喷雾系统喷雾耙产生结冰云雾, 喷雾耙架上共布置 20 层喷雾耙, 每层喷雾耙上均布 50 个喷嘴, 共计 1 000 个喷嘴, 每层喷雾耙外侧安装有 1 台水路入口调节阀和 1 台水路出口调节阀, 气路共用 1 台电动调节阀调压后经电动截止阀分成 20 路进入喷雾耙, 通过控制水压与气压来调整结冰风洞云雾场环境, 喷雾耙架示意图如图 1 所示, 喷雾耙架长 11 m, 高 8 m。

喷雾耙温度场测量需要获取 20 层喷雾耙内部温度, 采用分布式光纤测温系统对整个喷雾耙内部进行测温, 实时显示所有测温点的数据, 为喷雾耙电加热系统提供温度反馈。

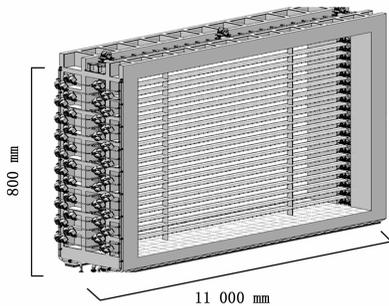


图 1 喷雾耙架示意图

2 分布式光纤测温系统

2.1 系统组成

分布式光纤测温系统是一种实时性强、连续性好、可靠性优的温度测量系统, 集光纤通信、传感、信号解调、报警控制等功能于一体, 具有测温精度高、定位精度高、占用空间小和不受电磁干扰等特点, 分布式光纤测温主机内部包含激光器、耦合器、微弱信号检测器、控制处理单元及数据采集与处理软件等模块, 系统组成如图 2 所示。

为满足喷雾耙温度场测温需求, 分布式光纤测温系统的技术指标如表 1 所示。

2.2 分布式光纤测温技术原理^[14]

分布式光纤测温原理是基于光时域反射原理和背向拉曼散射效应对温度的敏感从而实现温度监测。激光器发出的

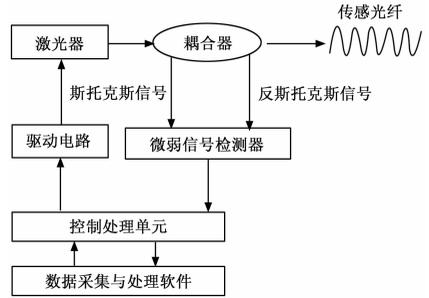


图 2 系统组成

表 1 技术指标

指标	参数
测温距离	2.5 km/通道
测温范围	-40 ℃ ~ 120 ℃
测量通道数	4
测温精度	±1 ℃
定位精度	0.5 m
测量时间	2 s/通道

光在光纤中传播, 与光纤中的分子以及不均匀的杂质等相互作用发生拉曼散射, 拉曼散射包括斯托克斯光和反斯托克斯光。其中, 反斯托克斯光对光纤所在环境温度变化较为敏感, 斯托克斯光对环境温度不敏感, 可作为参考光, 反斯托克斯光与斯托克斯光的比值可以用来计算温度值。

首先利用高速数据采集测量散射信号的回波时间对散射位置定位, 测量入射光与反射光的时间差 t , 散射光位置至入射端距离 l 为:

$$l = \frac{ct}{2n} \quad (1)$$

式中, c 为光速, n 为光纤折射率。

反斯托克斯光与斯托克斯光的比值与温度之间存在如下关系:

$$\frac{I_a}{I_s} = ae^{\frac{h\nu}{kT}} \quad (2)$$

式中, I_a 为反斯托克斯光, I_s 为斯托克斯光, a 为温度相关系数, h 为普朗克系数, $h = 6.626 \times 10^{-34}$ Jgs, ν 为拉曼平移量, 单位 m^{-1} , k 为玻尔兹曼常数, $k = 1.380 \times 10^{-23}$ JgK⁻¹, T 为绝对温度值。

由式 (2) 可知测温点的绝对温度值为:

$$T = \frac{h\nu}{k[\ln a - \ln(I_a/I_s)]} \quad (3)$$

由公式 (1) 和公式 (3) 可以得到分布式光纤各测温点的位置及温度值。

3 喷雾耙温度场测量系统设计

3.1 喷雾耙温度场测量系统总体设计

喷雾耙温度场测量系统主要由工控计算机、PLC 控制柜, 测温主机、测温光缆及光缆接头等组成。喷雾耙测温系统框架示意图如图 3 所示。为实现喷雾耙温度场测量系

统介入结冰风洞工业以太环网,测温主机测温主机通过测温光纤获取喷雾耙内部温度信息后,采用 485 通信将温度信息传递给 PLC,PLC 通过 Profinet 接入风洞以太环网,远程主机通过风洞以太环网读取所有温度信息,采用 Labview 编写上位机界面,实现对喷雾耙温度场数据的采集、显示与存储。

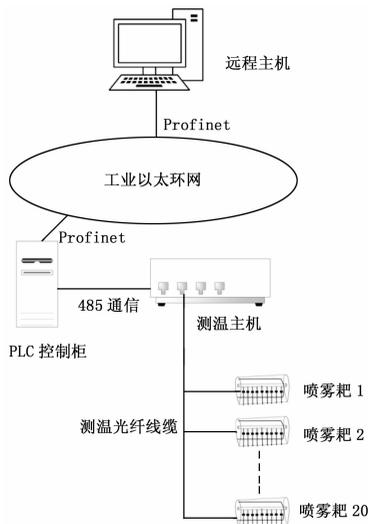


图 3 喷雾耙测温系统框架示意图

3.2 测温系统硬件搭建

喷雾耙温度场测量系统硬件搭建主要包含光纤线缆布线与测控系统集成。

3.2.1 光纤线缆布线方法

测温光纤选用 65/125 μm 多模光纤,考虑到喷雾耙内低温潮湿以及空间狭小的环境,光纤线缆要有足够的弯曲韧性,因此光纤线缆采用铠装护套,对光纤具有较好保护作用。

光纤线缆在喷雾耙内部采用 U 型布置,布线示意图如图 4 所示,光纤线缆从喷雾耙一侧进入成 U 型绕回,耙架内部布置 1 根光纤线缆,耙与耙之间通过穿孔将 1 根光纤线缆布置在 20 层喷雾耙内。喷雾耙长 11 m,高 8 m,每层喷雾耙内采用 U 型布线,考虑到线缆弯曲走线,每层喷雾耙内部所需光纤长度为 25 m 左右,20 层喷雾耙则需要 500 m 左右,加上耙与耙之间的长度以及喷雾耙架至测温主机之间的长度,估计喷雾耙架内部需要 600 m 左右。

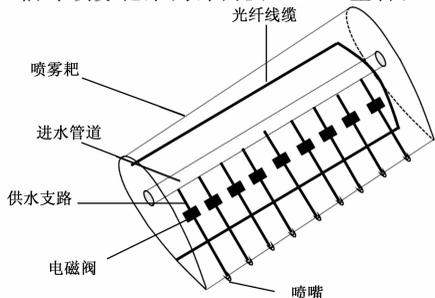


图 4 喷雾耙内光纤布线示意图

通过实际铺设,在每层喷雾耙入口处及出口处做好标记,喷雾耙内光纤的入口及出口米标如表 2 所示。可知,喷雾耙架共用光纤 593m,每层喷雾耙内部光纤平均长度为 23 m 左右,数据与施工前预估值近似。通过每个喷雾耙中的入口及出口米标,就可以得到单个耙中的温度分布,将 20 层数据进行分析,就可以获取喷雾耙全局温度场分布。

表 2 喷雾耙入口及出口光纤米标

层号	入口米标/m	出口米标/m
1	57	80
2	83	106
3	109	132
4	135	159
5	162	186
6	189	213
7	216	240
8	242	267
9	269	294
10	297	322
11	325	348
12	350	373
13	376	401
14	404	429
15	432	456
16	458	483
17	486	510
18	513	538
19	540	565
20	567	593

3.2.2 测控系统集成

测控系统集成主要包含光纤测温主机的配置、控制系统 PLC 配套以及环网交换机子站。

分布式光纤测温主机采用 DC 24 V 供电,主机对光电原始信号进行处理后,得到测温光纤各位置的温度信息,测温主机具备 485 通信接口用于数据传输。

控制系统本地控制柜面板上配置 12 寸触摸屏,用于本地操作和监控功能。控制柜内部 PLC 采用西门子 S7-300 PLC,考虑到分布式光纤测温系统具备 485 接口,因此配备 485 通信模块用于通信,下位机采用西门子 TIA 博途软件,将 593 个测温点变量分为多个子块,采用轮询方法,实现对所有测温点温度的通信读取。

为实现测控间计算机远程监测,在现有风洞工业以太环网内配置环网交换机子站,采用西门子网络交换机 SCALANCE X204-2,该交换机具备 2 个 10/100Mbit/s RJ45 端口和 2 个 100Mbit/s 多模 BFOC 接口。将 PLC 通过网线连接至交换机网口上,即可实现接入环网。

3.3 上位机软件设计与应用

上位机采用工业控制计算机,配置 CPU i7, 256G SDD, 2T HDD, 24 英寸 LCD, 具备以太网接口。上位机软件采用 Labview 设计,通过 NI OPC 服务器读取 PLC 变

量, 实现温度信息的获取, 该软件还可实现喷雾耙温度场数据存储为 Excel 格式文件, 用于后续数据分析。

为清晰显示喷雾耙内部温度场分布情况, 编写喷雾耙温度场色谱显示软件, 实现对温度场进行实时监控、分析, 喷雾耙温度场界面如图 5 所示。每层喷雾耙长 11 m, 共 11 个测温点, 为提高温度数据的可靠性, 取测温点 5 s 的温度数据平均值作为该点温度值, 每个喷雾耙内部温度分布通过色谱方式显示在上位机软件上, 从左到右分别代表各测温点的温度分布, 从软件界面中可以实时清晰监测温度场分布, 界面右侧分别代表每层喷雾耙的平均温度。

喷雾耙平均温度可用于喷雾耙电加热系统的自动控制, 以喷雾耙平均温度作为反馈, 控制喷雾耙电加热系统各回路的通断。设定每层喷雾耙温度的上下限, 若喷雾耙平均温度低于下限值, 则该层喷雾耙电加热回路接通; 喷雾耙平均温度高于上限值, 则该层喷雾耙电加热回路断开。

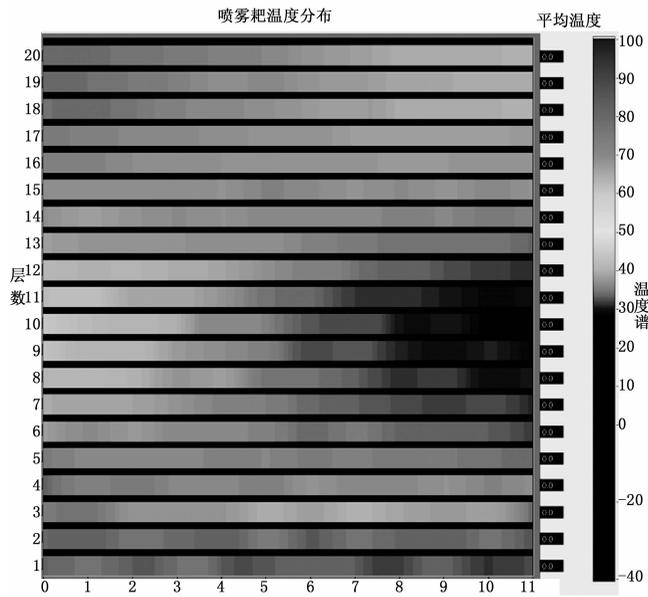


图 5 喷雾耙温度场监测界面

4 喷雾耙温度场测量结果与分析

4.1 光纤温度分布

为测试光纤测温系统在喷雾耙内的应用效果, 在结冰风洞试验过程中, 分别获取光纤测温系统在喷雾耙电加热系统未加热与加热时光纤温度分布曲线, 如图 6 所示, 其中横坐标为光纤在 20 层喷雾耙内分布的米标, 纵坐标为测温点温度值, 米标 57 m 之前的光纤为喷雾耙架外侧至测温主机之间的部分, 左下角两个温度骤降位置为光纤熔接处。

如图 6 中虚线部分所示, 在喷雾耙电加热系统不开启的时候, 受结冰风洞长期低温环境影响, 喷雾耙内温度较低, 且分布均匀。如图 6 中实线曲线所示, 喷雾耙电加热系统开启后, 喷雾耙内部温度呈大幅度上升趋势, 曲线呈现 M 型分布, 共 20 个 M 型曲线, 分别代表 20 层喷雾耙内部的温度分布。以第一层喷雾耙温度曲线为例, 两个

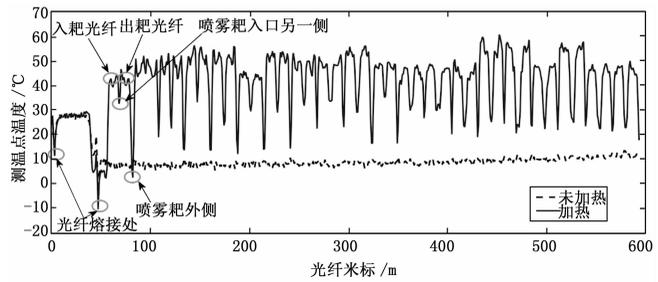


图 6 整根光纤温度分布

高峰部分为喷雾耙内光纤往返的测温点的温度, M 型曲线中间低谷为喷雾耙另一侧 (光纤 U 型转弯处) 的温度值, 因喷雾耙外侧暴露在稳定段低温环境中, 相对于喷雾耙内测得的温度较低。

4.2 喷雾耙温度场分布

为了获取喷雾耙内部的温度场分布, 将每层喷雾耙内 U 型来回的温度点取平均值, 每层喷雾耙共 11 个测温点, 利用监测软件存储的 Excel 格式温度场数据, 采用 Matlab 编程获取喷雾耙内部温度场分布云图。喷雾耙电加热系统未开启与开启时, 喷雾耙内部温度场分布云图分别如图 7、图 8 所示, 其中横坐标是指每层喷雾耙测温点, 纵坐标是指喷雾耙的层号数。从图 7 中可以看出, 在喷雾耙电加热系统未开启时, 喷雾耙全局温度在 9 °C 左右附近。从图 8 中可以看出, 喷雾耙电加热系统开启后, 喷雾耙内部温度上升至 50 °C 左右, 喷雾耙入口及喷雾耙另一侧温度较低, 导致这一现象是因为喷雾耙两侧靠近稳定段内部低温环境, 散热较多, 加热效果相对较差。

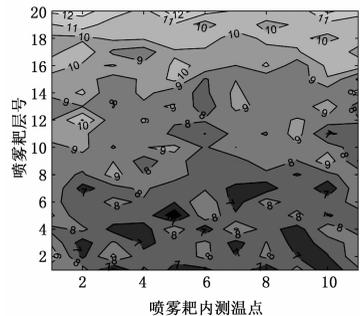


图 7 电加热系统未开启喷雾耙温度场分布

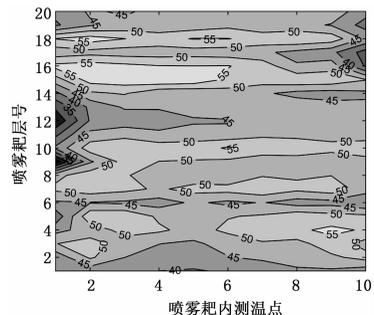


图 8 电加热系统开启后喷雾耙温度场分布

(下转第 22 页)