

基于红外双波长系统的机翼结冰检测研究

曹峰玮¹, 王虹^{1,3*}, 黄经纬¹, 宋庆和^{1,3}, 陈靓^{1,3}, 夏海廷^{2,3}, 魏佐金¹,
杨柏韬¹, 欧阳菱静¹

(1. 昆明理工大学 理学院, 云南 昆明, 650500;

2. 昆明理工大学 民航与航空学院, 云南 昆明, 650500;

3. 云南省低空经济和无人机技术创新中心, 云南 昆明, 650500)

摘要: 针对飞机机翼结冰检测中传统单波长法或热像法依赖复杂数据处理, 难以实现机翼冰层厚度的快速、稳定反演, 且机翼曲面结构引起的检测光入射角度变化带来测量误差等问题, 本文提出一种基于红外双波长系统的非接触式机翼结冰检测方法。该方法依据朗伯-比尔定律, 结合翼面结构特征建立冰层厚度测量模型, 并引入自适应角度修正因子 θ 以校正机翼弧度引起的测量误差, 且通过优化标定流程显著提升了检测效率, 实现机翼冰层厚度的快速、精确检测。经仿真与实验验证, 结果表明, 四种探测角度下该数学模型的冰层厚度检测结果决定系数 R^2 均在 0.9 以上, 均方根误差 RMSE 最大为 0.4037, 在探测角度为 15° 至 18° 范围内, 相对误差介于 5.2% 至 13.1% 之间, 其中 15° 时误差最低(5.2%), 18° 时误差最高(13.1%)。本方法建立了融合几何光路与双波长吸收的物理模型, 通过自适应角度修正, 能够满足机翼结冰检测的多数应用场景需求, 该方法在机翼结冰检测中具有较高的反演精度, 从根本上克服了机翼弧度曲面带来的测量误差, 为高精度结冰检测系统的开发提供了新的技术途径。

关键词: 红外双波长; 机翼结冰检测; 非接触式测量; 朗伯-比尔定律; 结冰厚度测量模型

中图分类号: TP212

引言

飞机机翼结冰使其表面粗糙度和形状发生改变, 导致飞机的升阻特性下降, 影响飞机的飞行性能、安全性以及操控性, 被公认为对飞行安全最具挑战性的威胁之一。为了确保飞机飞行安全, 在特定天气下飞机起飞前需要提前检测机翼结冰情况并做防除冰处理。因此, 飞机机翼结冰的精确检测对于飞行安全具有重要的科学意义^[1]。

飞机机翼结冰检测技术多样, 其工作原理各异。目前, 基于不同物理原理发展出了多种方法: 例如, 通过机械振动特性变化的谐振法、利用光信号调制或衰减的光学法、依据电参数变化的电学法、依赖温度传感的热学法、以及基于波导特性改变的波导法等, 还有结合多种原理的混合法, 这些方法可根据其核心物理机制进行系统分类^[2-3]。

光纤传感技术在飞机机翼结冰探测领域的发展, 体现了从原理验证到性能优化的过程。英国于 2003 年率先将光纤传感器应用于此领域^[4], 随后, 针对早期技术存在的局限性, 各国研究机构开展了大

量研究。例如, 华中科技大学于 2009 年开发了双头光纤式探冰传感器, 有效解决了传统光纤传感器难以区分水与冰的关键问题^[5]。在提升探测性能方面, 西班牙国家航空航天技术研究所 2022 年研制的传感器在雾凇冰条件下表现出高精度与快速响应的优势, 但其冰层厚度测量可靠性仍有待提升^[6]。此外, 技术的集成与创新也推动了传感器性能的飞跃, 如美国俄亥俄州辛辛那提大学利用微机电系统技术, 成功融合了光纤与压力传感原理, 研制出一种兼具良好线性度、高灵敏度和快速响应的光交互器件, 为结冰探测传感器的设计提供了重要思路^[7]。

以光纤为代表的接触式传感器, 在应用于机翼结冰检测时, 仍面临一系列由“接触式”测量原理本身带来的固有限制。首先, 不仅响应存在滞后, 难以捕捉结冰初始瞬态, 且其信号易受飞行中机体振动、载荷变化等无关因素的干扰, 信噪比不高。其次, 在工程集成与维护层面, 为实现有效传感, 光纤网络需要在机翼内部进行复杂的布设, 这增加了系统的安装复杂性与维护成本; 传感器一旦损坏, 维修或更换极为困难。最根本的问题在于其空间感

基金项目: 国家自然科学基金 (62165007, 62401527); 云南省基金项目 (202401AU070205)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (62165007, 62401527); the Foundation of Yunnan Province (202401AU070205)

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: wanghongee@163.com

知能力,难以实现对整个翼面“场”的连续、二维成像,难以精确评估冰层的横向分布、不均匀增长及局部重点结冰区域,从而限制了防除冰系统检测的精确性与效率^[8]。

在飞机机翼结冰探测的非接触测量领域,美国 NASA 的 Glenn 研究中心在 2014 年证明了可见激光扫描技术扫描结冰外形的精确度和可靠性,使用的 Romer Absolute SI 激光扫描仪检测精度为 0.03mm^[9]。西北工业大学于 2015 年开发的红外激光三维扫描装置,能将光信号转换为电信号并重建结冰图像,从而计算冰层厚度,有效提升了传统点扫描的测量效率^[10]。Wang 等人提出了一种创新的聚焦超声换能器,旨在扩展冰的探测能力范围。采用压电复合材料构型,该聚焦超声换能器以柔韧性和纤细轮廓为特征,聚焦效果是通过弯曲机制实现的。聚焦超声换能器展示了其检测铝皮表面冰块的有效性^[11]。Renno 等人提出一种新型结冰检测系统,能够同时测量飞机上的冰层积聚情况以及飞机周围大气的结冰危险潜力。该系统由微波谐振单元测量冰层积聚,以及一个光学单元估算飞机周围大气的结冰危险潜力^[12]。

相较于航空领域的结冰探测,非接触测量技术在地面气象状态监测中的应用更为成熟。在路面气象检测方面,红外光学方法展现出多种技术路径,如:徐松松团队借鉴国外光强法经验,开发了双波长路面状态检测设备。该设备通过分析双波长激光的反射强度并结合路面温度数据,实现对不同路面状况的识别。研究还运用几何光学原理,阐释了散射光功率空间分布与路面气象状态间的关联,证明了双波长耦合测量的有效性^[13]。Du 等人利用水冰相变时温度梯度的差异来量化冰膜厚度,同时借助反射光强测定积雪厚度,并在江河实地验证了该方法的实用性^[14]。Piccardi 等人提出通过探测红外光在沥青路面散射后的偏振态变化来识别危险路况。其系统采用两个光电二极管,分别测量反射光强度和反向散射强度,据此区分干、湿、水、冰等不同路面状态。研究还进一步优化了光路结构,证实光源同侧单光电二极管布局具有最高的探测效率^[15]。张颖等人在 2023 年提出基于短波红外双波长的探测方法实现路面水膜厚度和结冰厚度的测量,10mm 范围内精度达±0.35mm。综合而言,红外路面检测技术主要依赖于对反射光谱特征、光强变化以及偏振信息的捕获,并借助数学方法处理信

号,最终实现路面气象状态的精确判别^[16]。

在红外双波长技术的应用中,Lv 等人利用自制的双波长大气气溶胶激光雷达实验性地反复了气溶胶粒子的有效半径^[17]。Fang 等人提出一种通过整合 355nm 和 532nm 波长多通道偏振激光雷达信号,提升大气边界层(ABL)高度检测精度的新方法,该方法能有效减轻噪声影响,并在复杂气溶胶条件下提供更稳定、更准确的 ABL 高度估计^[18]。

通过分析现有研究方法后,目前飞机机翼结冰探测方法存在易受环境影响,受机翼弧度影响导致后续计算复杂等问题。综上,本文提出基于红外双波长系统实现对机翼冰层厚度精确测量,红外光探测法充分利用了激光照射距离远,方向性好的优点,通过测量机翼在特征波长下的后向散射光强计算冰层厚度,引入角度自适应参数 θ 修正因机翼弧度产生的测量误差,并进一步优化参数标定流程快速标定参数,实现高精度的机翼结冰厚度检测。

1 理论分析

1.1 机翼结冰检测模型

本文基于红外双波长激光检测系统对飞机机翼结冰厚度进行检测,利用介质对不同波长激光束的吸收率不同,根据两种不同波长激光的后向散射能量差值来反演机翼结冰厚度^[19]。朗伯-比尔定律是描述光在均匀介质中吸收行为的基本定律,为定量分析提供了理论依据。该定律表明,一束单色光穿过特定厚度的均匀液体层时,其透射光强度与入射光强度之间存在特定的指数衰减关系^[20]:

$$klc = \ln(I_1/I_2), \quad (1)$$

其中 I_1 为入射光强, I_2 为透射光强, $\ln(I_1/I_2)$ 为吸光度, k 为吸光系数, l 为液体层的厚度, c 为吸收介质浓度。由该公式可知,介质的吸收系数越大或光程越长,透射光强衰减越显著,这为通过测量光强衰减来反演介质浓度或厚度提供了直接的理论依据。作为一条普适性定律,朗伯-比尔定律广泛适用于气、液、固各相均匀介质。然而,在实际工程应用中,常因介质非均匀性、光路散射或杂散光干扰等因素,导致测量偏离理想模型。因此,往往需要结合具体应用场景与实测数据,对基于该定律的算法进行校准、补偿或改进,以提升测量的可靠性与精度。光在介质中传播时,其能量会因介质的本征吸收而衰减,不同波长的光,其吸收系数不同。

根据光在介质中的传播特性,分析 1310nm 与 1550nm 波长激光在冰中的传播特性发现:1310nm

波长激光具有相对较低的吸收系数和较高的反射率,其较大的穿透深度使得透射或后向散射光强对冰层厚度的变化极为敏感,因此适合作为主探测波长。1550nm 波长激光则表现出高吸收系数和低反射率的特性,其在冰层中信号衰减剧烈。这一特性使其对冰层表面状态或近表层信息敏感,可作为辅助波长用于校正主波长信号中的表面反射干扰。基于这两种波长在冰中吸收和反射特性的显著差异,通过同时测量其后向散射信号强度,并分析两者信号强度关系随冰层厚度的变化,即可建立模型,反演冰层厚度。

对公式(1)左右两边取指数,由于冰介质为纯的、均匀的固体,因此吸收介质浓度 c 为常数,将其与吸光系数合并。分别代入 1310nm、1550nm 激光,可得:

$$I_{1310} = I_1^{1310} \cdot e^{-k_1 \cdot l}, \quad (2)$$

$$I_{1550} = I_1^{1550} \cdot e^{-k_2 \cdot l}, \quad (3)$$

其中, I_1^{1310} 和 I_1^{1550} 分别为 1310nm 与 1550nm 波长的入射光强, I_{1310} 与 I_{1550} 分别为 1310nm 与 1550nm 波长的反射光强, k_1 与 k_2 分别为两个波长下两种激光的吸收系数。通过标定入射功率,使得 1310nm 与 1550nm 的入射光强归一化为 I_1' , 采用差分法建立厚度关系,取 1mm 冰层厚度为参考探测光强差,公式(2)与公式(3)做差,可得:

$$\Delta I(l) = I_{1310} - I_{1550} = I_1' (e^{-k_1 \cdot l} - e^{-k_2 \cdot l}), \quad (4)$$

$$I_0 = I_{1310} - I_{1550} = I_1' (e^{-k_1} - e^{-k_2}), \quad (5)$$

由此可得归一化差分信号:

$$\Delta I(l)/I_0 = (e^{-k_1 \cdot l} - e^{-k_2 \cdot l}) / (e^{-k_1} - e^{-k_2}), \quad (6)$$

对上述比值取自然对数,在结冰检测场景中,当特定波长的光穿透冰层时,其衰减程度与冰层厚度及冰的光学特性直接相关。令 k 为冰层在双波长作用下的等效吸收系数, D 为待测冰层厚度,可建立基础关系式:

$$D = k \cdot \ln [(I_{1310} - I_{1550})/I_0], \quad (7)$$

其中, I_0 为无冰状态下或参考厚度下的基准光强差。该式表明,冰层厚度与两波长光强差的对数值呈线性关系。然而在实际环境中,机翼表面可能形成霜冰,冰层内部存在冰晶结构差异,对光的散射作用有显著影响,导致相同厚度下光学衰减特性发生变化^[21]。为此,引入冰型校正系数 α ,用于补偿因冰晶结构差异引起的测量偏差:

$$D = k \cdot \ln [(I_{1310} - I_{1550})/I_0] + \alpha, \quad (8)$$

此外,机翼表面具有复杂气动外形,传感器光

轴与检测点法线方向往往存在夹角,即入射角 θ 。实际厚度与红外光在冰层中的路径 L 关系为:

$$D = L \cdot \cos \theta, \quad (9)$$

该角度会影响光在冰层中的实际穿透路径长度及表面反射率,进而改变表面光学信号。为修正这一几何效应,引入角度自适应因子 θ ,将实际穿透路径修正为实际厚度的余弦函数关系:

$$D = k \cdot \ln [(I_{1310} - I_{1550})/I_0] \cdot \cos \theta + \alpha, \quad (10)$$

在斜入射条件下,需将光学信号的对数值乘以入射角余弦进行路径归一化,再结合冰型校正,最终获得真实的冰层厚度。此模型实现了机翼曲面几何效应的系统性补偿,为翼面结冰厚度检测提供了更稳健的物理描述。

1.2 仿真实验

本文的仿真研究基于红外双波长激光检测理论,构建了一套非接触式冰层厚度测量仿真模拟系统,测量精度为毫米级。此系统精准模拟双波长激光与机翼结冰介质的相互作用过程,为后续实验设计提供可靠的仿真数据支撑。该仿真系统以双波长激光后向散射差分测量原理为核心,采用蒙特卡罗光子传输方法,对激光与冰层交互的微观物理过程进行高精度数值模拟,实现了光子级传播行为到系统级性能评估的整体建模。

1.2.1 模型建立

针对上述理论分析,为准确模拟激光在冰层中的传播过程及后向散射信号特性,本文建立了基于蒙特卡罗方法的三维光学传输模型^[22]。该模型综合考虑了冰层的光学特性、几何结构以及探测器接收特性,精确描述双波长红外激光在空气-冰层-铝合金基底三层介质中的传播行为。

模型包含三个主要部分:发射系统、冰层介质和接收系统。发射器位于冰层上方高度 $h=10\text{mm}$ 处,以 15° 的入射角向冰层表面发射激光束。冰层厚度 d 在 1.0mm 至 5.5mm 范围内变化,步长为 0.5mm,覆盖了航空器表面典型积冰厚度范围。冰层下方为铝合金基底,模拟飞机机翼材料。探测器探测角度为 15° ,且与激光器关于机翼表面法线对称布置,接收孔径半径为 1mm,这种配置最大限度地减少了系统体积,符合航空器应用的紧凑性要求。

冰层的光学特性具有明显的波长依赖性,根据冰在近红外波段的吸收光谱特性,选择 1310nm 和 1550nm 作为工作波长。在这两个波长处,冰的吸收

系数存在显著差异,为差分检测提供了物理基础。对两种波长的激光,冰层的折射率分别为 1.307, 1.305。吸收系数和散射系数根据纯净冰的光学特性进行设置,其中 1550nm 波长处冰的吸收较强,为 0.8m^{-1} ,而 1310nm 波长处吸收较弱,为 0.5m^{-1} 。散射系数分别为 15.0m^{-1} 和 8.0m^{-1} ,各向异性因子 $g=0.87$,反映了冰晶的前向散射特性。铝合金基底采用复折射率模型,其实部代表反射特性,虚部表征吸收特性。

本研究采用基于权重追踪的蒙特卡洛方法对光在冰层中的传输过程进行数值模拟。每个光子包被赋予初始权重 $W_0=1$,模拟过程包括步长随机抽样、位置更新、权重衰减、边界处理及散射方向计算等核心步骤。为提升计算效率,引入一种基于权重的自适应生存判定机制:当光子权重低于阈值 10^{-7} 时,以概率 $p=0.03$ 决定是否终止其追踪;若继续追踪,则将其权重放大 $1/p$ 倍保持统计无偏性。每个冰层厚度条件下模拟 $N=10^5$ 个光子,以保证接收信号的统计误差小于 1%。

本文的仿真算法包含光子传播、后向散射信号分析和厚度-光强差模型建立。模拟光子的完整传播路径,并对 1310nm 波长与 1550nm 波长接收的信号进行对比,分析不同厚度下接收信号的差异,建立冰层厚度与光强差的关系模型,为实际冰层厚度检测提供理论支撑。

1.2.2 仿真结果分析

如图 1(a)所示,展示了不同厚度下探测器接收到的双波长后向散射光强功率,发现 1550nm 波长信号随冰层厚度增加呈现明显的衰减趋势。当冰层厚度从 1mm 增至 5mm 时,接收功率从 18.7mW 下

降至 17.1mW,这种强烈的衰减特性主要源于 1550nm 波长处冰层较高的吸收系数。相比之下,1310nm 波长信号衰减较为平缓,在相同厚度范围内从 18.8mW 下降至 17.8mW。这一差异为双波长差分检测提供了物理基础。图 1(b)所示,展示了模型的拟合效果,模拟数据点与拟合直线吻合度高,仿真关系模型决定系数 $R^2=0.9331$,拟合效果优异,均方根误差 RMSE 为 0.3061mm,在 1~5mm 检测范围内,满足检测精度要求。

该模型充分考虑了实际物理过程,为后续的信号分析和厚度反演提供了可靠的仿真基础。通过调整模型参数,可以模拟不同环境条件下的冰层检测场景,为系统设计和优化提供理论指导。

1.3 机翼结冰检测平台

基于仿真结果,设计光学实验平台,如图 2 所示,该机翼结冰光学检测平台是一个集多波长传感、主动探测与智能分析于一体的高精度系统。其核心由 1310nm 与 1550nm 双波段红外脉冲激光器、532nm 绿光引导激光器、光电探测器、高速数据采集卡及计算机构成。

为简化模型,忽略激光在空气中的衰减,基于冰对不同波长激光的反射与吸收特性差异,并综合考虑激光器成本,本研究采用双波长差分探测法进行冰层厚度检测。选择反射与吸收特性较为均衡的 1310nm 激光作为主探测光;同时,选用吸收强、反射弱的 1550nm 激光作为辅助探测光。通过对比两路信号的差分,可有效抑制因冰面反射波动引入的干扰,从而提高厚度反演的精确性。在本平台中,以 532nm 绿光作为视觉引导光源提供实时视觉定位与扫描路径监控,确保检测区域精准覆盖,提高实验平台的操作可靠性与场景适应性。

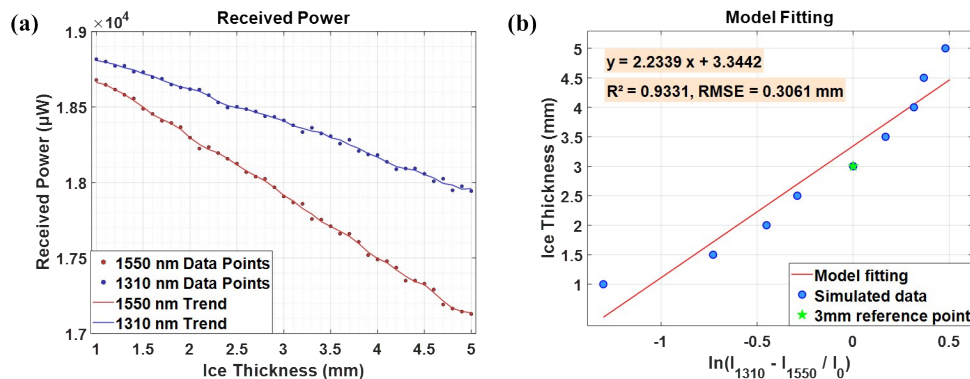


图 1 冰层厚度与光强差的关系模型仿真结果图: (a) 不同冰层厚度下接收器光功率图; (b) 关系模型拟合结果图

Fig. 1 Simulation results for the relationship between ice thickness and the difference in light intensity: (a) Receiver optical power at different ice thicknesses; (b) Fitting results for the relationship model

两路红外激光经调制后以 20mW 的峰值功率输出,该功率经仿真与实验验证,可在穿透最大设计冰层厚度后,仍使后向散射信号强度显著高于探测器本底噪声,同时严格处于探测器线性响应区间,避免信号饱和或器件损伤,为系统稳定工作提供保障^[23]。

平台工作时,同时发射两种不同波长的红外激光束和绿色的引导激光束,分束镜将红外激光束与引导光束耦合为共轴光束并使共轴光束沿同一光路照射至被测机翼材料表面,聚光透镜汇聚来自被测表面的后向散射光,光电探测器接收经聚光透镜汇聚后的后向散射光,并将其转换为电信号,传回计算机进行实时数据处理。

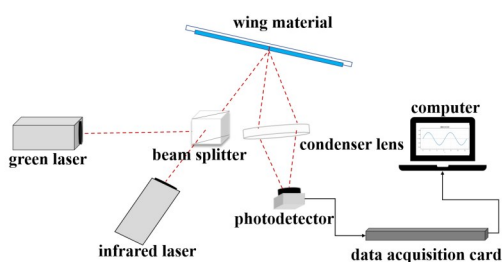


图2 红外双波长结冰检测平台的光路原理示意图

Fig. 2 Optical path principle schematic diagram of dual-wavelength infrared ice detection platform

在实验中,通过改变探测角度、探测距离来分析冰层厚度与光强的关系,使用光学平移台调整激光器出射角度和探测距离。初始探测角度为 15° ,调制 1310 nm 与 1550 nm 波长激光的输出功率均为 20 mw,利用制冷设备对待测铝合金板进行结冰处理。

探测器接收到后向散射光强,并由数据采集卡转化为电信号,设探测信号的电压值为 U ,差值电压为 $\Delta U = U_{1310} - U_{1550}$,记录从 1mm 厚度到 5mm 厚度,以 0.5mm 为间隔下的所有差值电压。

在信号处理阶段,首先通过高斯滤波与数字带通滤波抑制噪声与环境干扰;随后提取 1310 nm 与 1550 nm 回波信号的幅值特征,计算其归一化差分指数,构建差分吸收模型,以抑制表面反射波动并反演冰层光学厚度。进一步,结合角度自适应校正模型与冰型补偿系数,将光学特征量转换为物理厚度值,实现冰层厚度的量化检测。

为有效抑制环境光噪声与探测器暗电流,充分利用了脉冲激光的时域特性,通过在数据采集卡或

探测器前端设置可编程时间门控,系统仅在激光脉冲飞行至目标区域并返回的精确时间窗口内开启采样。该策略能有效滤除持续的环境光背景及暗电流噪声,显著提升信噪比。在实验验证阶段,采用局部遮光罩或暗箱对光路进行屏蔽,以准确评估本底噪声水平。

在检测原理层面,该探测方法与航空领域成熟的无损检测技术具有高度等效性。其采用脉冲激光发射、时域信号接收与解析的工作模式,与激光雷达技术流程一致,可视为一种面向冰层介质光学特性的小尺度差分吸收激光雷达。该方法不仅实现了冰层厚度的定量反演,更具备了激光雷达技术高精度、非接触、可成像的优点。

基于上述原理与架构,该实验平台展现出良好的工程普适性与可扩展性。其检测对象不限于飞机机翼,通过适配不同的扫描机构与安装方案,可广泛应用于发动机进气口、直升机旋翼、风力发电机叶片、高铁受电弓等多种关键曲面结构的结冰监测,为各类运输工具与能源设备的主动防除冰系统提供可靠的光学传感解决方案。

综上所述,对探测光路的理论分析及激光光源的优化筛选,为本研究的冰厚测量方法奠定了核心理论依据;而实验平台的成功搭建,则为实现精准测量提供了可靠的硬件基础。此外,对各影响因素作用程度的量化分析,也为后续测量系统的参数优化与误差控制提供了关键设计依据。

2 实验与分析

2.1 冰厚测量实验

该实验中,激光器固定于一个光学平移台上,本次实验的测量距离为 30~40cm 的调节范围,探测角度为 $15^\circ \sim 20^\circ$ 。为模拟真实机翼环境,实验选用铝合金(型号 6061)作为基底材料,其样品尺寸设计为长 10mm × 宽 10mm × 高 10mm。结冰过程通过一个大功率半导体制冷器精确控制实现:将铝合金基底紧贴制冷面,通过持续降温使其表面温度低于冰点,从而使基底材料表面生成均匀冰层。

冰层厚度的标定与生成采用定量注水冻结法,使用注射器每次向低温铝合金基底表面均匀注入 10ml 的纯净水,并在恒定低温下使其完全冻结。通过前期标定验证,在此条件下形成的均匀透明冰层厚度约为 1mm。通过重复此过程,可逐层累积生成最大约 10mm 的厚度冰样,为系统提供已知厚度的标准测试样本。

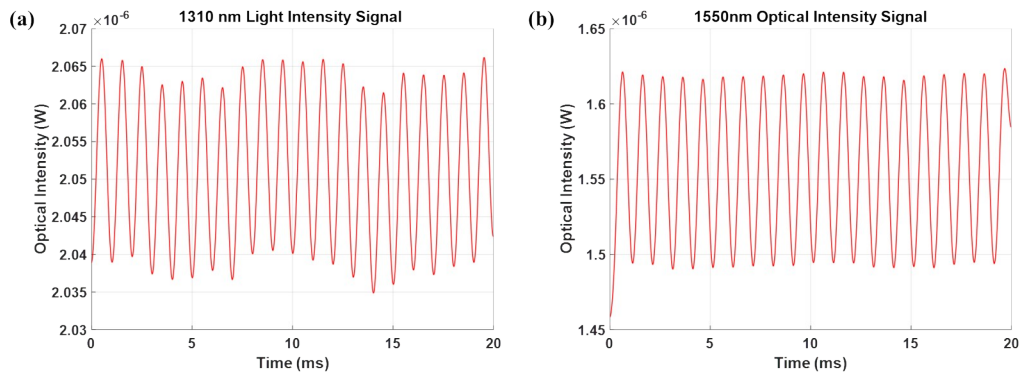


图3 冰层厚度3mm时1310nm与1550nm原始信号波形图: (a) 1310原始波形; (b) 1550原始波形

Fig. 3 Original signal waveforms at 1310 nm and 1550 nm when ice layer thickness is 3 mm: (a) 1310 nm raw waveform; (b) 1550 nm raw waveform

如图3所示为冰层厚度3mm时1310nm与1550nm波长的后向散射原始信号波形,信号为周期稳定的正弦波,无明显噪声干扰,由图中可见1310nm波长表现出光强的明显波动,说明该波长对冰层的光学特性更敏感,更容易捕捉到冰层厚度的变化,主要反映冰层的吸收与散射;1550nm波长的光强波动更平稳,说明其在冰中的传播和散射特性更稳定,主要反映几何路径和表面反射。

该实验通过可调的几何参数、模拟的机翼材料、可控的结冰环境与可精确复现的冰厚,构建了一个高度可控、可重复的标定与验证系统,为后续信号分析与算法反演提供了可靠的数据基础。

如图4(a)所示,1310nm与1550nm波长的最大后向散射光强都随着冰层厚度的增加而下降,1550nm波长的下降趋势和幅度更明显;如图4(b)所示,1310nm与1550nm光强差值随着厚度的增加持续上升,在5mm时略有回落,整体保持在较高水

平。说明双波长光强差值对冰层厚度变化敏感,可用于冰层厚度反演,为冰层厚度检测系统提供了精确的标定曲线,是后续参数标定的基础和依据。

2.2 不同实验条件下参数标定

对于冰层光学吸收系数 k 与受冰晶结构差异影响的校正系数 α 的标定,由于薄冰层在结冰过程中其表面易形成不均匀的微结构或产生细微的“丘陵状”起伏,导致表面平整度较差。这使得薄冰的厚度测量精度较低,直接影响了基于薄冰层后向散射数据进行光学厚度参数反演的准确性。

为解决上述问题,选择采用3mm厚度的冰层作为标定基准。3mm冰层在实验室条件下可通过可控的逐层冻结稳定制备,其表面平整度显著优于薄冰层。其次,该厚度可产生足够强的吸收衰减信号,使探测器能够获得高信噪比的测量数据。3mm是一个适中的、可精确测量与复现的厚度值,便于进行重复性实验验证。

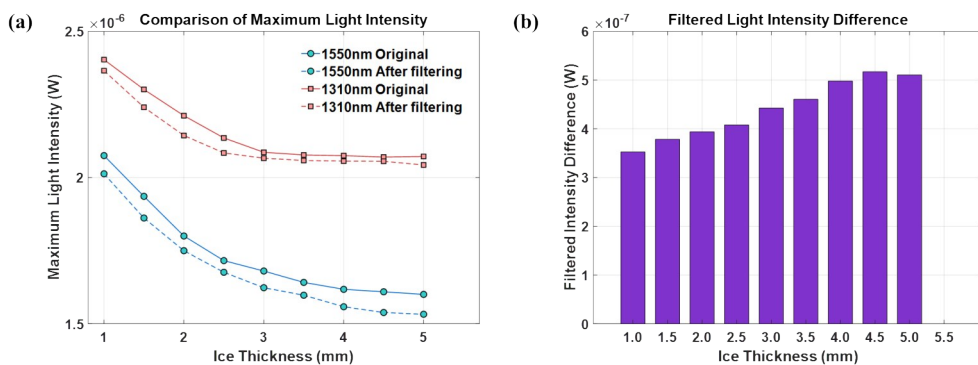


图4 不同冰层厚度下1310nm与1550nm波长后向散射光强对比图: (a) 1310nm与1550nm不同冰层厚度下最大光强对比图; (b) 1310nm与1550nm不同厚度下光强差值图

Fig. 4 Comparison of Backward Scattering Intensity at 1310 nm and 1550 nm for Different Ice Thicknesses: (a) Comparison of maximum light intensity at 1310 nm and 1550 nm for different ice thicknesses; (b) Difference in light intensity between 1310 nm and 1550 nm for different ice thicknesses

具体参数标定方法如下:在严格控制的实验室环境下,在铝合金试件表面制备表面平整、厚度均匀的3mm标准冰样。在激光探测角为 15° 至 20° 范围内进行结冰厚度检测实验。首先,调节双波长信号强度使探测光强达到平衡,并在确认绿光指示区域结冰状态正常后开始数据采集。实验测量了冰厚从1mm至5mm,间隔0.5mm条件下,1310nm与1550nm波长的后向散射光强值。通过将测量数据代入基于比尔-朗伯定律构建的光学传输模型,并辅以冰层表面反射率的精确补偿,可以确定冰层在两个工作波长下的有效吸收系数 k 与校正系数 α 。随后,依据式(8)对所得数据进行处理,绘制出冰层厚度 D 与 $\ln[(I_{1310} - I_{1550})/I_0]$ 之间的关系曲线,通过拟合确定参数 k 与参数 α 的数值。如图5(a)、图5(b)、图5(c)、图5(d)中所示,不同探测角度下冰层厚度测量模型拟合图。其决定系数 R^2 在0.9022~0.9821之间,均方根误差RMSE介于0.1728mm~0.4037mm之间,表明 k 值与 α 值的反演结果符合预期,反演精度较高,无明显系统误差,具有较好的拟合效果。

如表1所示,不同探测角度下,标定得到的参数 k 与参数 α 数值。经过大量实验验证,影响冰层吸收系数 k 值的主要因素在于探测角度,参数 k 值随探测角度的增大而增加,这是由于角度增大导致进入探测器的光强减弱所致。另一方面,校正系数 α 主要受冰结构差异影响,其值在本实验探测角度范围内未发生显著变化,故可视为常数,经标定取值为3.2。

表1 k 与 α 随探测角度变化表Table 1 Variation of k and α with Detection Angle

| Angle θ° | k | α |
|----------------------|-------|----------|
| 15 | 9.72 | 3.1396 |
| 16 | 21.53 | 3.2639 |
| 17 | 30.99 | 3.2985 |
| 18 | 37.52 | 3.2551 |

2.3 结冰厚度测量实验

将表1所得参数 k 与校正系数 α 代入公式,即可确立用于冰厚反演的数学模型。为验证该模型,在固定探测距离为30cm的条件下,于机翼材料上分别制备了1mm至5mm、步进0.5mm的系列冰样。针对每一冰厚,分别采用 15° 、 16° 、 17° 、 18° 四种激光入射角进行实验,系统测量并记录了1310nm与1550nm双波长激光的探测光强值。

Fig. 5 model fitting results for ice thickness at different detection angles, along with comparisons between measured thickness and actual thickness: (a) Model fitting plot at a detection angle of 15° ; (b) Model fitting plot at a detection angle of 16° ; (c) Model fitting plot at a detection angle of 17° ; (d) Model fitting graph at a detection angle of 18° ; (e) Comparison of measured thickness and actual thickness at a detection angle of 15° ; (f) Comparison of measured thickness and actual thickness at a detection angle of 16° ; (g) Comparison of measured thickness and actual thickness at a detection angle of 17° ; (h) Comparison of measured thickness and actual thickness at a detection

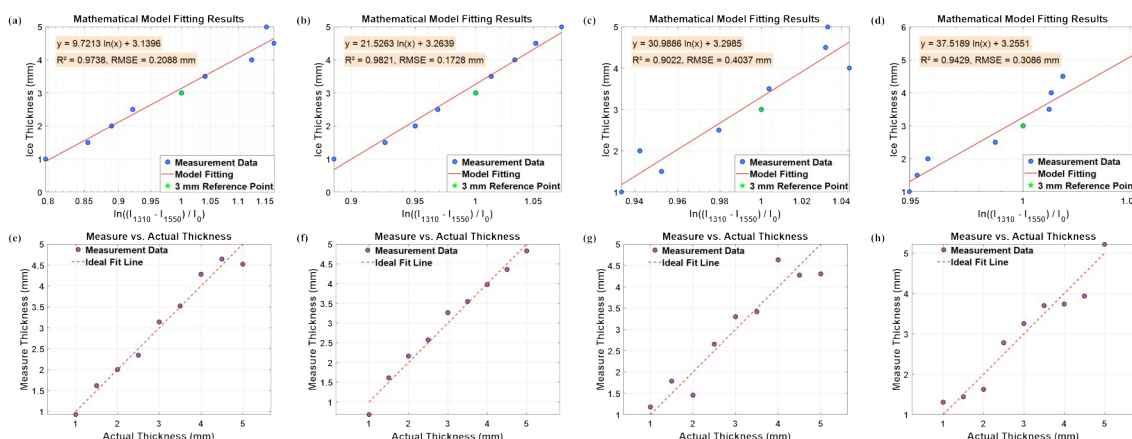


图5 不同探测角度下冰层厚度模型拟合结果图与测量厚度和实际厚度对比图:(a)探测角度 15° 下模型拟合图;(b)探测角度 16° 下模型拟合图;(c)探测角度 17° 下模型拟合图;(d) 18° 探测角度下模型拟合图;(e)探测角度 15° 下测量厚度与实际厚度对比图;(f)探测角度 16° 下测量厚度与实际厚度对比图;(g)探测角度 17° 下测量厚度与实际厚度对比图;(h)探测角度 18° 下测量厚度与实际厚度对比图

angle of 18° .

图 5(e)、图 5(f)、图 5(g)、图 5(h) 分别为探测角度为 15° 、 16° 、 17° 、 18° 下结冰的测量厚度与实际厚度的对比图, 图中红色虚线标示了冰层真实厚度参考线, 结果显示, 在不同冰层厚度与探测角度下, 实验测量厚度与实际厚度之间的误差均保持在较小范围内, 变化趋势一致且吻合良好, 有效验证了数学模型的有效性。该结果为进一步发展高精度、非接触式冰层探测技术提供了可靠的实验依据。

2.4 模型改进

大量实验数据的分析表明, 系数 α 在不同探测角度下趋于稳定, 而系数 k 随探测角度变化显著。基于以上分析, 我们设计了一个“一次标定 α , 分角度标定 k ”的高效策略。将系数 k 设为探测角度 θ 的函数, 即 $k = f(\theta)$, 而 α 视为全局常数。

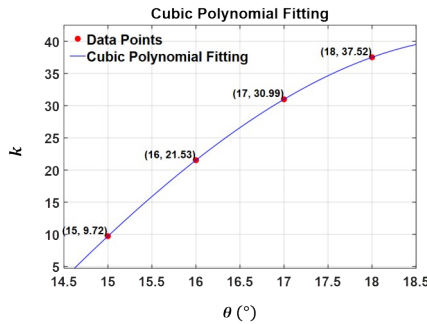


图 6 标定参数 k 拟合函数图

Fig. 6 Calibration parameter k fitting function graph

在不同探测角度下, α 可视为常数, 标定实验简化为: 只需测量两个不同厚度下的光强差, 即可直接解算出该角度下的 k 值。将不同探测角度下的 k 值拟合为一个平滑的 $k = f(\theta)$ 函数。如图 6 所示, 拟合得到的函数为: $f(\theta) = -0.0967\theta^3 + 3.4650\theta^2 - 25.9083\theta - 55.0300$, 从而实现标定一个探测角度下的 k 值, 就可以计算出不同探测角度下 k 值, 大幅简化了标定流程。

2.5 误差分析

本系统误差主要包含系统误差与随机误差两类。系统误差主要由硬件固有特性偏移产生, 其中激光器中心波长易受环境温度波动影响而发生漂移。实际工作波长偏离标定值时, 会直接改变光在冰介质中的特征吸收系数, 进而在差分运算中引入基准标定误差。该类误差具有确定性、方向性与可重复性, 是制约系统测量准确度的主要系统误差源。

随机误差则源于探测过程的物理本征极限, 探测器暗电流、散粒噪声及热噪声等固有其本底噪声造成的误差。在厚冰层或低反射率表面等弱信号探测场景下, 系统信噪比降低, 随机噪声对测量结果波动的影响更为显著。同时, 实验室制冰过程中冰层表面结霜、局部厚度分布不均等非均匀性因素, 亦会引入附加随机误差。

图 7 给出 15° 、 16° 、 17° 、 18° 等四个探测角度下冰层厚度反演模型的误差分布情况。从整体趋势来看, 模型在绝大多数厚度点上的测量精度较高。图 7(a)、图 7(b)、图 7(c)、图 7(d) 给出不同角度下结冰厚度测量绝对误差分析, 分析得出不同冰层厚度下冰层厚度测量值均能实现对冰层厚度的有效反演, 误差分布整体较为集中, 无显著系统性偏差。平均绝对误差 MAE 整体介于 $0.146 \sim 0.345$ mm 之间, 均方根误差 RMSE 介于 $0.173 \sim 0.404$ mm 之间, 整体误差水平处于较低区间, 表明厚度反演具有良好的检测精度与稳定性。从误差变化趋势来看, 不同厚度下误差存在一定起伏, 个别厚度点误差相对突出, 但整体并未出现持续偏大或偏小现象, 极端误差对整体结果的影响也处于可控范围, 无严重异常偏差。说明模型对冰层厚度变化具有较好的适应性, 所采用的红外检测方法具备可靠的定量检测能力。图 7(e)、图 7(f)、图 7(g)、图 7(h) 给出不同角度下结冰厚度残差和相对误差散点图, 对比分析可以得出, 在该温度区间内, 所采用的红外双波长冰层厚度检测方法整体具备良好的精度。平均绝对残差 MAR 整体介于 $0.146 \text{ mm} \sim 0.345 \text{ mm}$ 之间, 平均相对误差 MRE 整体介于 $5.2\% \sim 13.1\%$ 之间, 表明模型对冰层厚度的反演精度较高、稳定性良好。仅在个别厚度点出现相对突出的误差值, 但整体未对模型的整体可靠性造成显著影响。

经分析, 这些较大的误差值对应于实验过程中冰层自身状态的不确定性。冰层在自然凝结或人工制备时, 其表面并非理想光学平面, 可能存在局部凹凸、微小气泡夹杂或密度不均等现象。这些微观结构差异会轻微改变激光的散射特性与透射率, 从而对探测光强信号引入难以完全消除的随机干扰, 最终在反演计算中表现为个别厚度值的预测偏差。尽管如此, 这些由冰层状态引起的离散误差点并未呈现出明显的系统性规律, 且未影响整体误差的统计特征。因此, 可以认为该误差在可接受范围内, 属于实验测量中的固有不确定性。

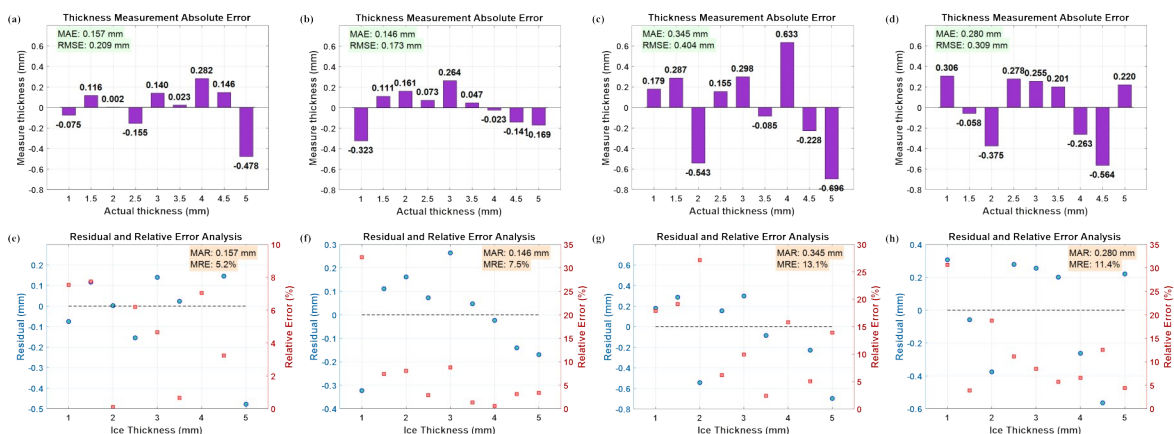


图7 不同探测角度下结冰厚度误差分析图: (a) 探测角度 15° 下结冰厚度绝对误差分析图; (b) 探测角度 16° 下结冰厚度绝对误差分析图; (c) 探测角度 17° 下结冰厚度绝对误差分析图; (d) 探测角度 18° 下结冰厚度绝对误差分析图; (e) 探测角度 15° 下结冰厚度残差和相对误差散点图; (f) 探测角度 16° 下结冰厚度残差和相对误差散点图; (g) 探测角度 17° 下结冰厚度残差和相对误差散点图; (h) 探测角度 18° 下结冰厚度残差和相对误差散点图

Figure 8 Error analysis diagrams of icing thickness at different detection angles: (a) Analysis of Absolute Error in Ice Thickness at a Detection Angle of 15° ; (b) Analysis of Absolute Error in Ice Thickness at a Detection Angle of 16° ; (c) Analysis of Absolute Error in Ice Thickness at a Detection Angle of 17° ; (d) Analysis of Absolute Error in Ice Thickness at a Detection Angle of 18° ; (e) Scatter plot of ice thickness residuals and relative errors at a detection angle of 15° ; (f) Scatter plot of ice thickness residuals and relative errors at a detection angle of 16° ; (g) Scatter plot of ice thickness residuals and relative errors at a detection angle of 17° ; (h) Scatter plot of ice thickness residuals and relative errors at a detection angle of 18°

表2 不同探测角度下误差分析表

Table 2 Table of Error Analysis for Different Detection Angles

| Angle/ $^\circ$ | R^2 | RMSE |
|-----------------|--------|--------|
| 15 | 0.9738 | 0.2088 |
| 16 | 0.9429 | 0.3086 |
| 17 | 0.9821 | 0.1728 |
| 18 | 0.9022 | 0.4037 |

如表2所示,四种探测角度下的冰层厚度检测结果决定系数 R^2 均在0.9以上,均方根误差RMSE最大为0.4037,该误差可以认为合理。

随着入射角度改变,光束在冰层内部的光程值、反射点位置发生变化:角度偏离法线越大,光在冰-空气界面损耗越强,进入冰层内部的有效信号减弱,探测器信噪比随之降低,进而放大随机误差。同时,实验室制备冰层存在表面结霜、局部厚度不均、微观粗糙度各向异性等非理想结构,不同入射角度下,光束会照射到冰层的不同区域,使得测量结果对冰体局部不均匀性更为敏感。

3 结论

本文主要研究一种面向航空安全应用的机翼结冰检测方法。该方法的核心是基于红外双波长

激光探测技术,通过建立1310nm与1550nm两个特征波长照射在冰层的后向散射光强探测系统,分析双波长光强信号差值与冰层厚度的关系,实现对冰层存在与否及其厚度的非接触、高精度识别。

在理论层面,本文以朗伯-比尔定律为基础,构建了冰层厚度与后向散射光强之间的物理模型。通过仿真发现,在不同冰层厚度下,两波长的后向散射光强差值呈现稳定且规律的变化趋势,这一特征关系为直接通过光强信号反演冰层厚度提供了关键依据。

在技术实现上,本研究提出了一种创新的参数标定策略:通过获取单一探测角度下参数 α 与 k 随厚度的变化规律,成功推导出该参数在不同探测角度下的通用标定函数。这一方法有效解决了传统红外结冰检测技术中需要进行复杂、繁琐的多探测角度标定的难题,显著提升了系统的实用性和工程化可行性。

在实验验证部分,研究模拟了机翼表面结冰的多种典型场景,通过测量不同厚度冰层下特征波长的后向散射光强,系统不仅能够可靠地判断结冰状态,更能实现厚度的精确测量,测量精度达到 ± 0.3 mm,从而为后续除冰系统的精准启动与除冰效率评估提供了实验依据。本方法的适用条件主

要为 1mm 至 5mm 范围内的薄冰检测。在环境光干扰较弱或阴天等弱背景光环境下,系统可保持较高测量精度;同时,该方法需在探测角度已知且固定的条件下使用,以保证测量结果的准确性与可靠性。

综上所述,本方法在精度与可行性方面均表现出良好潜力,未来为推进该技术的实际应用,还需进一步研究并克服机场复杂环境光的干扰,同时致力于提升检测装置的集成度、便携性与环境适应性,简化参数标定流程,以实现更高精度、更可靠的机翼结冰实时监测。

References

- [1] Xin H Z, Li C, Sang W M, et al. Airfoil icing and aerodynamic characteristics prediction based on multi-task learning [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2026, 47(10): 132983.
(辛惠竹,李晨,桑为民,等.基于多任务学习的翼型结冰与气动特性预测[J].*航空学报*), 2026, 47(10): 132983
- [2] Tang Z X, Wang R T, Jin Z Y. Review of aircraft icing detection technology [J]. *Measurement & Control Technology*, 2025, 44(12): 1-12.
(唐梓潇,王若彤,金哲岩.飞机结冰探测技术综述[J].*测控技术*), 2025, 44(12): 1-12.
- [3] Liu D J, Yang C X, Liu S J. Analysis of aircraft icing detection methods and de-icing technologies[C] China Aviation Industry Technology & Equipment Engineering Association. Proceedings of 2022 Annual Conference of China Aviation Industry Technology & Equipment Engineering Association. Comac Civil Aircraft Flight Test Center, 2022: 424-427.
(刘多静,杨春霞,刘升君.飞机结冰探测方法和除冰技术分析[C]//中国航空工业技术装备工程协会.2022年中国航空工业技术装备工程协会年会论文集.中国商飞民用飞机试飞中心; 2022: 424-427.
- [4] Ge J, Ye L, Zou J. A novel fiber-optic ice sensor capable of identifying ice type accurately[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 175: 35-42.
- [5] Li We, Chen Y C, Zhang M, et al. Novel icing detection system based on optical waveguide technique[J]. *Instrument technique and sensor*, 2009, (12): 85-87.
- [6] Gonzalez M, Frövel M. Fiber Bragg grating sensors ice detection: Methodologies and performance[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 346: 113778.
- [7] Frovel M, Maeso A B F-M, Aguero A, et al. System and method for detecting ice formation on a body [Z]. Patents-Google. 2023
- [8] Taylor H F. Fiber optic sensors based upon the Fabry - Perot interferometer [M]. *Fiber Optic Sensors*. CRC Press, 2017: 35-64.
- [9] Zhan P. G. Review on development trends of foreign icing wind tunnels [J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2020 (12): 84 - 88.
(战培国.国外结冰风洞发展动向综述[J].*飞航导弹*), 2020, (12): 84-88.
- [10] Gong X L. Research on 3-D optical measurements for ice shape growth in icing wind tunnel [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015.
(龚晓亮.结冰风洞中冰形生长的光学三维测量研究[D].西安:西北工业大学,2015
- [11] Wang Y, Wang Y, Chen S, et al. Focused ultrasonic transducer for aircraft icing detection[J]. *Ultrasonics*, 2025, 147: 107509.
- [12] Renno N O, Backhus R, Butler T, et al. A new type of aircraft icing detection system[J]. *Scientific Reports*, 2026, 16(1): 210.
- [13] Xu S, Ruan C, Feng L. Road surface condition sensor based on scanning detection of backward power[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(5): 050801.
- [14] Du C, Wang Q, Liu X, et al. Research and application of ice thickness and snow depth automatic monitoring system [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2016, 66(2): 325-331.
- [15] Piccardi A, Colace L. Optical detection of dangerous road conditions[J]. *Sensors*, 2019, 19(6): 1360.
- [16] Zhang Y. Research on the method of non-contact road water and ice monitoring based on short-wave infrared laser [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2023.
(张颖.基于短波红外激光的非接触式道路积水结冰监测方法研究[D].重庆理工大学, 2023, 000608.
- [17] Lyu Z, Liu D, Mao J, et al. Research on effective radius retrievals of aerosol particles based on dual-wavelength lidar [J]. *Remote Sensing*, 2025, 17(8): 1383.
- [18] Fang Z, Li S, Yang H, et al. A dual-wavelength Lidar boundary layer height detection fusion method and case analysis[C] *Photonics*, 2025, 12(8): 741.
- [19] Shi C, Xie M B, Zheng W B, et al. Study on multi-wavelength thin film thickness determination method [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2024, 43(6): 813-819.
(施策,谢茂彬,郑伟波,等.多波长薄膜厚度检测方法研究[J].*红外与毫米波学报*), 2024, 43(6): 813-819.
- [20] Rose H. Breakdown of the Lambert-Beer Law [J]. *nature*, 1952, 169(4294).
- [21] Guo H R, Shen S C, Su L W. Review on measurement of aircraft icing shapes [J]. *Measurement & Control Technology*, 2025, 44(11): 1-9.
(郭浩然,申世才,苏龙伟.飞机结冰冰形测量研究综述[J].*测控技术*), 2025, 44(11): 1-9.
- [22] Zhao T F, Ke X Z. Monte Carlo simulations for non-line-of-sight ultraviolet scattering coverage area [J]. *Acta Physica Sinica*, 2026, 61(11): 114208.
(赵太飞,柯熙政. Monte Carlo方法模拟非直视紫外光散射覆盖范围[J].*物理学报*), 2012, 61(11): 285-296.
- [23] Lee S, Song H J. Accurate statistical model of radiation patterns in analog beamforming including random error, quantization error, and mutual coupling[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(7): 3886-3898.

Research on aircraft wing icing detection based on infrared dual-wavelength system

Cao Feng-Wei¹, Wang Hong^{1,3*}, Huang Jing-Wei¹, Song Qing-He^{1,3}, Chen Jing^{1,3}, Xia Hai-Ting^{2,3}, Wei Zuo-Jin¹, Yang Bai-Tao¹, Ouyang Ling-Jing¹

- (1. Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan, 650500, China;
2. Faculty of Civil Aviation and Aeronautics, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan, 650500, China;
3. Yunnan Low-Altitude Economy and UAV Technology Innovation Center, Kunming, Yunnan, 650500, China)

Abstract: Traditional single-wavelength or thermal imaging methods for aircraft wing icing detection rely on complex data processing, making it difficult to achieve rapid and stable inversion of wing ice thickness. Additionally, measurement errors arise from variations in the angle of incidence of the detection light caused by the curved surface structure of the wing. To address these issues, this paper proposes a non-contact wing icing detection method based on an infrared dual-wavelength system. This method establishes an ice thickness measurement model based on the Lambert-Beer law and the structural characteristics of the wing surface. It introduces an adaptive angle correction factor, θ , to correct measurement errors caused by the curvature of the wing. Furthermore, by optimizing the calibration process, the method significantly improves detection efficiency, enabling rapid and accurate detection of wing ice thickness. Simulation and experimental validation demonstrate that the coefficient of determination R^2 for ice thickness measurements from this mathematical model exceeds 0.9 across all four detection angles, with a maximum root mean square error RMSE of 0.4037. Within the detection angle range of 15° to 18° , the relative error ranges from 5.2% to 13.1%, with the lowest error (5.2%) occurring at 15° with the highest error occurring at 18° (13.1%). This method establishes a physical model that integrates geometric optical paths with dual-wavelength absorption. Through adaptive angle correction, it can meet the requirements of most application scenarios for wing icing detection. The method achieves high inversion accuracy in wing icing detection, fundamentally overcoming measurement errors caused by the curvature of the wing surface, and provides a new technical approach for the development of high-precision icing detection systems.

Key words: infrared dual-wavelength, Aircraft wing icing detection, non-contact measurement, Lambert-Beer Law, Ice thickness measurement model