

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413226

飞行器多层透明风挡谱域低相干测量方法研究*

张涛¹, 夏仁波¹, 赵吉宾¹, 徐金亭², 孙玉文²

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所 沈阳 110169; 2. 大连理工大学机械工程学院 大连 116086)

摘要:透明风挡是飞行器的关键结构件,必须具有优异的性能。为减轻重量,飞行器透明风挡采用“有机玻璃-透明聚碳酸酯-有机玻璃”的异质多层复合式结构,其性能与透明件各层的厚度紧密相关。现有测量方法无法满足飞行器透明风挡高效率、高精度厚度逐层测量的综合性需求。为此,提出飞行器多层透明风挡谱域低相干测量方法。首先通过正交色散提升色散能力,从而增大测量量程,然后建立透明件厚度与光谱波数之间的映射模型,并利用高精度平行平晶标定了模型参数,最后搭建了测量系统。实验结果表明所提出的方法最大量程超过41 mm,具有微米级的测量精度,测量速度小于8 ms,能够满足飞行器多层透明风挡厚度测量的需求。

关键词:飞行器;透明风挡;谱域低相干;厚度测量

中图分类号: TH113 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Research on the spectral-domain low-coherence measurement method for multilayer transparent wind shield of aircraft

Zhang Tao¹, Xia Renbo¹, Zhao Jibin¹, Xu Jintong², Sun Yuwen²

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China;

2. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116086, China)

Abstract: The transparent windshield is a key structural part of the aircraft, which requires outstanding performance. To reduce weight, the aircraft's transparent windshield utilizes a heterogeneous multi-layer composite structure of "organic glass-transparent polycarbonate-organic glass", where the performance is closely related to the thickness of each layer of the transparent windshield. Existing measurement methods cannot meet the comprehensive requirements for efficient and high-precision layer-by-layer thickness measurement of the transparent windshield. Therefore, a new method for spectral-domain low-coherence measurement of the multi-layer transparent windshield is proposed. Firstly, by using the orthogonal dispersion to enhance dispersion capability, the measurement range is increased. Then, a mapping model between the thickness of the transparent windshield and the spectral wavenumber is formulated, and the model parameters are calibrated with high-precision parallel flat crystal. Finally, a measurement system is established. Experimental results show that the proposed method has a maximum range exceeding 41 mm, with micrometer-level measurement accuracy, and a measurement speed less than 8 ms. It can meet the requirements for thickness measurement of the multilayer aircraft transparent windshield.

Keywords: aircraft; transparent wind shield; spectral-domain low-coherence; thickness measurement

0 引言

风挡是战斗机、运输机和大型客运飞机等飞行器的关键功能结构件,被誉为“飞行器”的眼睛,要求其具有良好的气动外形、承载能力、隐身能力、防撞能力,以及苛

刻的光学性能^[1-2]。传统航空飞行器透明风挡全部由单层有机玻璃构成。为满足透明件优良承载能力和防撞能力,传统透明件通常设计的较厚。然而,这种设计也带来了一个明显的问题,即航空飞行器透明件的重量相对较大。这种重量增加既会导致飞行器燃油效率下降,也会导致飞机在变向和高速飞行时的动态响应变差,进而影响到飞行的

收稿日期:2024-08-30 Received Date: 2024-08-30

* 基金项目:国家资助博士后研究人员计划C档项目(GZC20232882)、中国博士后科学基金第74批面上项目(2023M743703)、辽宁省博士科研启动基金项目(2024-BSBA-55)资助

稳定性和安全性。因此,对于航空飞行器而言,需要在保证透明件承载能力和防撞能力的前提下,尽可能地降低其重量,从而提高航空飞行器的性能和飞行效率。

为此,近年来研究人员研发了飞行器多层透明风挡,其采用的是“有机玻璃-透明聚碳酸酯-有机玻璃”的异质多层复合式结构^[2-3],该结构可在提升透明件防撞性能、承载能力的同时减轻重量。飞行器多层透明风挡的承载能力、隐身性能以及苛刻的光学性能指标与材料特性有关,但更取决于加工过程中对透明件形状、壁厚及其表面质量的控制,尤其是中间耦合层(由透明聚碳酸酯构成)的厚度的精确控制。

目前国内外用于飞行器透明风挡测量的方法主要有超声测量^[4-5]、基于接触式测量的三坐标/轮廓仪测量法^[6-7]、基于机器视觉的摄影测量法/结构光测量法^[8-9]、共聚焦色散法^[10-12]、干涉测量法^[13]和低相干干涉法^[14-17]等方法。超声测量法精度较差。接触式透明件测量方法虽然测量精度较高,但需要与透明件接触,极易造成各种划伤,甚至导致产品的报废。基于机器视觉的方法往往需要在透明件上粘贴额外靶点或者投射激光条纹,操作复杂。此外,以上两类方法只能测量透明件的整体厚度或表层廓形,无法测量飞行器多层透明风挡每一层的厚度。因此这些方法往往用于传统透明风挡的测量。

虽然共聚焦色散法可以高精度地测量透明件每一层的厚度,但其量程一般仅为几毫米。因此,在使用这种方法测量透明件各层厚度时,需要预先了解每层透明界面的初步位置,并逐步通过额外的位移台移动来确定每个透明界面的确切位置。通过这种方式,可以进一步确定每一层透明件的厚度。这种方式需要反复多次测量,无法通过一次测量实现透明件每层厚度的测量,不仅效率低下,也会引入额外的机械运动误差。

低相干干涉法利用光的干涉原理,通过光程差测量透明件的厚度,具体又可分为时域低相干法^[18-19]和谱域低相干法^[20-21]。时域低相干法具有测量量程大、精度高等特点,基于此方法,刘富国等^[14]提出了透明件中心厚度光纤低相干测量方法。时域低相干方法的主要问题是参考臂进行机械扫描,因此测量速度较慢、效率低,且测量精度易受温度、振动等环境扰动的影响。相比于时域低相干方法,谱域低相干方法不需要参考臂的机械扫描,因此具有测量速度快、受环境扰动小、重复精度高等优势。然而传统谱域低相干方法受光栅光谱分辨率的限制,其量程一般在 10 mm 以内,只能测量较薄的透明件,无法满足飞行器多层透明风挡的测量需求。

综上所述,现有测量方法,无法满足飞行器多层透明风挡每一层厚度高精度、高速、无损测量的综合性需求。谱域低相干测量方法以其高精度、高速、无损测量的优势,有望为飞行器多层透明件的测量提供解决方案,其关

键在于提高量程。

为此,本文提出了基于光谱正交色散的飞行器多层透明件大量程谱域低相干测量方法。利用光栅垂直方向色散与虚像相控阵列水平方向色散组成了正交色散的模式,大幅提升了系统色散能力,从而实现了谱域低相干方法量程的提升。在此基础上,提出了基于高精度平晶的光谱标定方法,实现了波数与透明件厚度映射关系求解。最后,搭建了测量平台,进行了实验验证,实验结果证明了所提出方法的有效性。

1 多层透明风挡谱域低相干测量原理

谱域低相干测量方法的基本原理为宽带光源发出的参考光与测量光相遇形成干涉光谱信号,光谱相机采集干涉光谱信号,然后对光谱信号进行解调,即可得到透明件厚度。

1.1 谱域低相干测量系统原理

飞行器多层透明风挡谱域低相干测量系统由宽带光源、光纤耦合器、准直器、光栅、虚像相控阵列、光谱相机、计算机,以及若干光纤和透镜组成。宽带光源发出的光依次经过 光纤耦合器、准直器 1、聚焦透镜 1 后照射在透明件上。打在透明件上的光被透明件不同界面反射后原路返回,从不同界面反射回光存在光程差,形成低相干干涉。低相干干涉光依次经过准直器 2、柱透镜、虚像相控阵列、光栅后,被聚焦透镜 2 聚焦在光谱相机靶面上。计算机对光谱相机采集的干涉光谱信号进行解调即可得到透明件的厚度。低相干干涉光经过虚像相控阵列后产生垂直方向的色散,然后又被光栅在水平方向上色散,该过程也被称之为正交色散。本文所测量透明件的结构如图 1 所示,所搭建谱域低相干测量系统的原理图如图 2 所示。

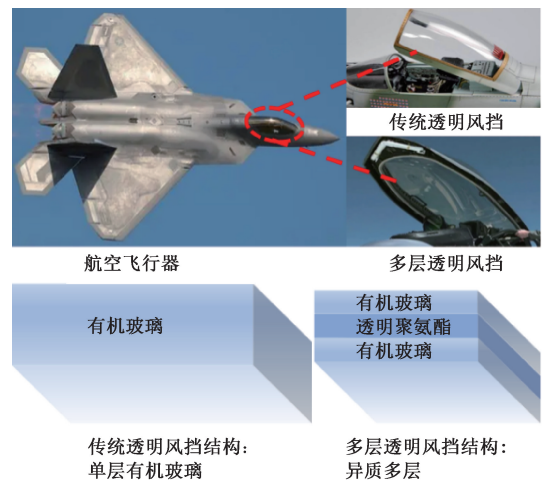


图 1 多层透明风挡和传统透明风挡对比

Fig. 1 Comparison of multi-layer transparent windshield and traditional transparent windshield

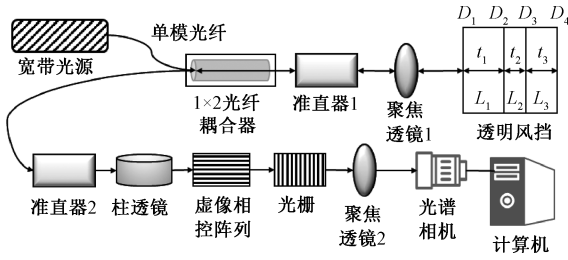


图2 谱域低相干测量系统原理

Fig. 2 Schematic diagram of low coherence measurement system in spectral domain

谱域低相干测量方法原理,其最大量程与光谱分辨率之间的关系可表示为:

$$Z_{\max} = \frac{\lambda_0^2}{4n\varepsilon} \quad (1)$$

式中: λ_0 是宽带光源的中心波长; n 是光通过介质的折射率; ε 为光谱分辨率,其由谱域低相干测量系统的色散能力决定,系统色散能力越强,光谱分辨率就越小,量程就越大。介质折射率 n 由透明件材料决定,由式(1)可知,提高谱域低相干方法量程的手段是增大宽带光源中心波长 λ_0 或减小系统光谱分辨率 ε 。但宽带光源中心波长难以有较大幅度的提升,且提升成本。因此,提升谱域低相干方法量程最有效的手段是提升系统色散能力,从而减小系统光谱分辨率 ε 。

正交色散系统的光谱分辨率由光栅光谱分辨率和虚像相控阵列光谱分辨率二者之中的最小值决定。光栅的光谱分辨率为:

$$\varepsilon_c = \frac{\lambda_0}{N} \quad (2)$$

式中: N 是光斑范围内的光栅刻线数。虚像相控阵列是一种具有很强色散能力的光学器件,其光谱分辨率为:

$$\varepsilon_v = \frac{\lambda_0^2(1-Rr)}{2\pi n_v t \cos \theta_i \sqrt{Rr}} \quad (3)$$

式中: R 和 r 分别为虚像相控阵列入射面和出射面的反射率; n_v 是虚像相控阵列的折射率; θ_i 是光的入射角; t 是虚像相控阵列的厚度。由于虚像相控阵列可以做的较厚,所以虚像相控阵列的光谱分辨率 ε_v 可以很小。由式(2)和(3)可知虚像相控阵列与光栅共同组成的正交色散能够大幅提升系统的色散能力,从而提升测量系统量程。

1.2 谱域低相干信号解调方法

将飞行器多层透明风挡每一层分别记为 L_1, L_2, L_3 , 其厚度记为 t_1, t_2, t_3 表面分别记为 D_1, D_2, D_3, D_4 表面反射率记为 R_1, R_2, R_3, R_4 , 从透明件每一层表面到耦合器处的光程记为 Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 , 则光谱相机采集到的光谱信号可以表示为:

$$I(k) = \frac{\rho}{4} \left[S(k) \sum_{i=1}^4 R_i \right] + \frac{\rho}{4} \left\{ S(k) \sum_{i \neq j=1}^4 \sqrt{R_i R_j} \cos[2k(Z_i - Z_j)] \right\} \quad (4)$$

式中: $S(k)$ 是光源的功率谱函数; ρ 是光谱相机的灵敏度; k 是波数。式(4)的第1项是非干涉项,第2项是从透明件各个界面反射回来光产生的干涉项。对式(4)做逆傅里叶变换,可得:

$$FT^{-1}[I(k)] = \frac{\rho}{8} \left[\Gamma(Z) \sum_{i=1}^4 R_i \right] + \frac{\rho}{8} \left\{ \Gamma(Z) * \sum_{i \neq j=1}^4 \sqrt{R_i R_j} \delta[Z \pm 2(R_i - Z_j)] \right\} \quad (5)$$

式中: $\Gamma(Z)$ 是光源功率谱函数 $S(k)$ 的傅里叶变换结果; $*$ 表示卷积运算; $\delta(\cdot)$ 为 Delta 函数。

式(5)的第1项是直流项,是透明件各个界面直接反射回的光引起的,第2项是自相关项,是由透明件各个界面反射回的光互相干涉造成的,自相关项中包含了透明件样品的厚度信息。根据式(5),对飞行器多层透明风挡,光谱相机采集到的干涉光谱信号经过处理后可以得到如图3所示的干涉信号。

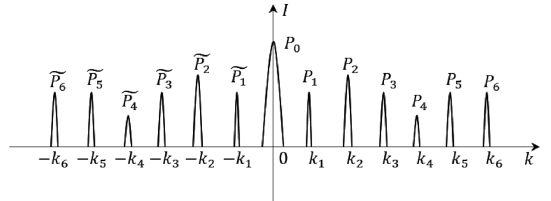


图3 多层透明风挡谱域干涉信号

Fig. 3 Diagram of spectral domain interference signal of multi-layer transparent windshield

如图3所示, P_0 是直流项, $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$ 分别是透明件界面 $D_2D_3, D_3D_4, D_2D_4, D_1D_2, D_1D_3$ 和 D_1D_4 之间反射光互相干涉产生的峰值信号。 $\tilde{P}_1, \tilde{P}_2, \tilde{P}_3, \tilde{P}_4, \tilde{P}_5, \tilde{P}_6$ 是 $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$ 关于直流项的镜像对称。根据式(5),信号峰值所在位置与波数成正比,而波数又与光程差成正比,即:

$$\Delta Z = \alpha k \quad (6)$$

式中: α 是比例系数。由于波数可以通过干涉信号峰值所在位置直接读出,因此只需要标定出波数与光程差之间的比例换算系数,即可求出光程差。再结合材料折射率以及各个界面之间的光程差,就能实现透明件每一层厚度的测量。以透明件 L_1 为例,假设其折射率为 n_1 ,光在其上表面 D_1 与下表面 D_2 的光程差满足:

$$\Delta Z_1 = Z_2 - Z_1 = \alpha k_1 = 2n_1 t_1 \quad (7)$$

式中: k_1 是光谱信号峰值横坐标与直流项光谱信号峰值横坐标之间的差值,此时透明件 L_1 层厚度 t_1 可由

$t_1 = \alpha k_1 / 2n_1$ 求取。

2 比例系数 α 标定与测量系统搭建

根据谱域低相干信号解调原理, 需要标定系统比例系数 α , 本文提出基于高精度平晶的光谱标定方法, 求解 α 。系统的基本结构不变, 仅将透明件替换为高精度光学平晶。

如图 4 所示, 光学平晶的厚度 t_0 和其折射率 n_0 是已知的。此时系统测得的光学平晶干涉光谱信号峰值横坐标与直流项峰值横坐标之间的差值为 k_0 , 根据以下公式计算比例系数:

$$\alpha = 2n_0 t_0 / k_0 \quad (8)$$

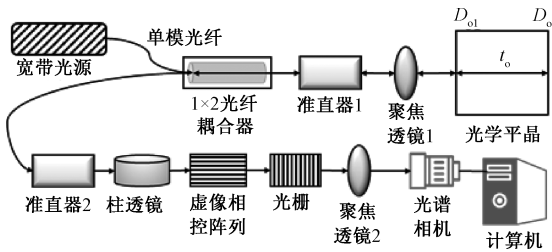


图 4 比例系数 α 标定原理

Fig. 4 Schematic diagram of scale coefficient α calibration principle

根据系统原理图, 搭建如图 5 所示的飞行器多层透明风挡谱域低相干测量系统。系统采用的是中心波长 λ_0 为 840 nm, 带宽为 30 nm 的宽带光源, 系统中采用的光纤、透镜、光纤耦合器等光学元器件均与该宽带光源适配。1x2 光纤耦合器的分光比为 50/50。准直器 1 的焦距为 50 mm, 聚焦透镜 1 的焦距为 50 mm。准直器 2 的焦距为 5 mm, 柱透镜的焦距为 200 mm, 聚焦透镜 2 的焦距为 100 mm。光栅的中心波长为 830 nm 采用透射式结构, 刻线数 N 为 1 200, 并且以满足利特罗角的方式安装。

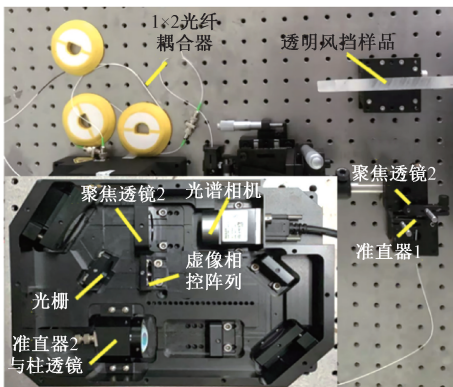


图 5 谱域低相干测量系统

Fig. 5 Diagram spectrum domain low coherence measurement system

虚像相控阵列为 K9 玻璃材质, 其厚度 t 为 2.4 mm, 入射面反射率 R 为 99.9%, 出射面反射率 r 为 95%, 折射率 n_v 为 1.5168, 安装入射角 θ_i 为 3° 。光谱相机的原始分辨率 $1\,440 \times 1\,080$, 像素尺寸为 $3.45\ \mu\text{m} \times 3.45\ \mu\text{m}$, 最大分辨率时帧率 227 fps。本系统中, 干涉光被聚焦透镜 2 聚焦在光谱相机的成像靶面, 成像区域大小为 $93 \times 1\,440$, 此时相机的最大帧率为 1 200 fps。

3 实验结果和讨论

3.1 比例系数 α 标定结果及系统精度评价

首先利用光学平晶对系统比例系数 α 进行标定。如图 6 所示, 所用的光学平晶为一级平行平晶, 其表面平整度误差小于 $0.1\ \mu\text{m}$, 两表面平行度误差小于 $0.08\ \mu\text{m}$, 平行平晶 1 的厚度为 41.000 0 mm, 平行平晶 2 的厚度为 40.620 0 mm, 平行平晶 3 的厚度为 16.000 0 mm, 平行平晶 4 的厚度为 15.620 0 mm。本文利用平行平晶 1 标定比例系数, 然后利用标定好的系统, 测量平行平晶 2、平行平晶 3、平行平晶 4 的厚度, 以验证系统的测量精度。所用平行平晶在中心波长 λ_0 为 840 nm 时的折射率 n_0 为 1.526 3。

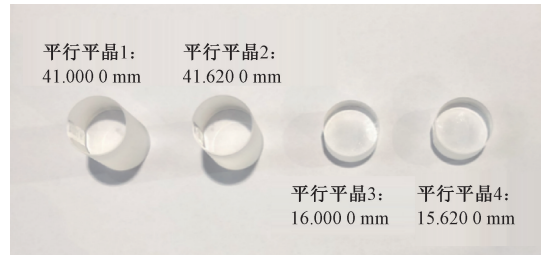


图 6 比例系数标定所用的平晶

Fig. 6 The flat crystal used for calibrating the scale coefficient

光谱相机采集到的平行平晶 1 的原始干涉光谱见图 7。光谱相机采集到的原始干涉光谱大小为 $93 \times 1\,440$, 取光谱图中最亮的区域, 并按照顺序将原始光谱信号展开为一维, 得到图 8 所示的待解调干涉信号。对

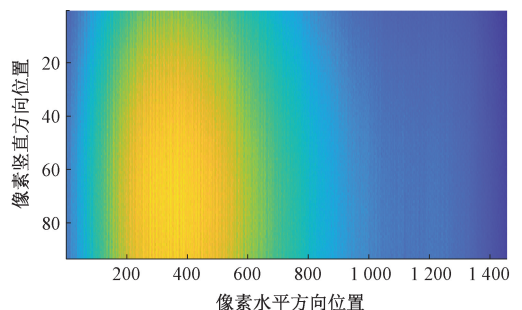


图 7 平行平晶 1 原始干涉光谱

Fig. 7 Original interference spectra of parallel crystal 1

图8所示的待解调干涉信号依次执行强度归一化、贝塞尔非线性插值、以及色散补偿,得到图9所示平行平晶1初步解调信号。随后对图9所示的初步解调信号执行快速傅里叶变化,得到图10所示的平行平晶1干涉信号最终解调图。

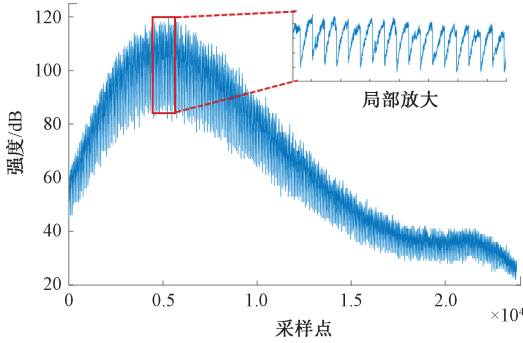


图8 平行平晶1待解调干涉信号

Fig. 8 Interference signal diagram to be demodulated for parallel crystal 1

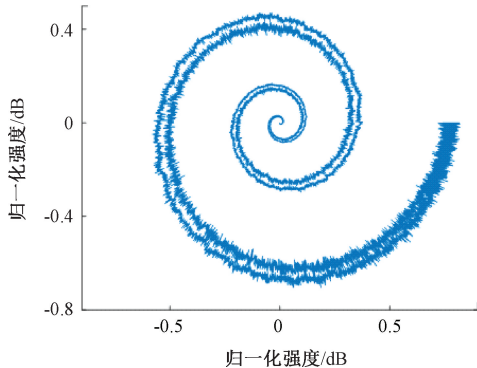


图9 平行平晶1干涉信号初步解调

Fig. 9 Preliminary demodulation diagram of parallel crystal 1 interference signal

如图10所示,平行平晶1干涉信号最终解调图上可以观测到3个峰值信号,分别是直流项 P_0 ,平行平晶上下表面反射光互相干涉产生的峰值信号 P_1 ,以及其关于直流项目的镜像对称 \bar{P}_1 ,符合理论预期结果。图10中 P_1 峰值信号横坐标与直流项 P_0 横坐标之间的差值 k_0 为

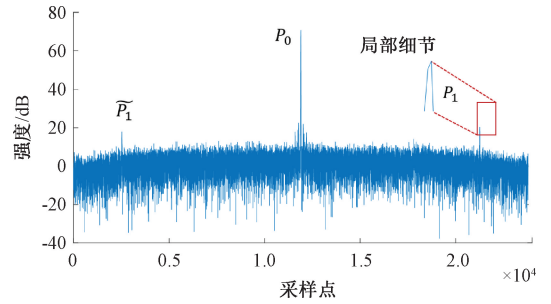


图10 平行平晶1干涉信号最终解调

Fig. 10 The final demodulation diagram of the parallelogram 1 interference signal

9 371, 将其带入式(8), 即可求出比例系数 α 为13.3557。重复测量100次, 测量结果见图11。如图11所示, 100次测量的平均结果为13.3621, 本文将其作为比例系数的默认值。

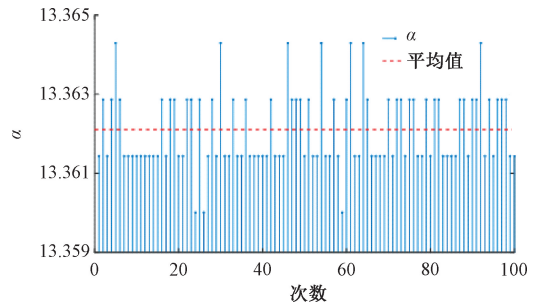


图11 比例系数标定结果

Fig. 11 Calibration result of scale coefficient

完成标定后, 使用搭建的测量系统, 测量标准平行平晶2、3、4的厚度, 进一步验证比例系数 α 标定以及测量系统的准确性。对每个平行平晶, 重复测量100次, 与真实值比较, 分析测量误差。如表1所示, 平行平晶2、3、4的100次测量的平均误差分别为0.0039、0.0191、0.0019 mm; 最大误差分别为0.0122、0.0207、0.0024 mm; 标准差分别为0.0015、0.0021、0.000063 mm; 相对误差分别为0.0096%、0.1195%、0.0126%。

表1 平行平晶厚度测量结果表

Table 1 The results of parallel crystal thickness measurement

编号	实际厚度/mm	测量厚度/mm	平均误差/mm	最大误差/mm	标准差/mm	相对误差/%
平行平晶2	40.620 0	40.616 1	0.003 9	0.012 2	0.001 5	0.009 6
平行平晶3	16.000 0	16.019 1	0.019 1	0.020 7	0.002 1	0.119 5
平行平晶4	15.620 0	15.618 1	0.001 9	0.002 4	0.000 063	0.012 6

对测量结果进行了统计,并绘制误差高斯分布直方图。如图 12 所示,拟合出的高斯曲线均值 μ 为 0.008 3,标准差 σ 为 0.007 8。95% 置信区间的上界为 0.02,下界为 -0.01,实际数据点落在 95% 置信区间内的比例为 100%。高精度平行平晶厚度的测量实验结果表明所搭建的谱域低相干测量系统具有较高的测量精度与较高测量稳定性,测量量程超过 41 mm,能够满足飞行器多层透明风挡厚度逐层测量需求。

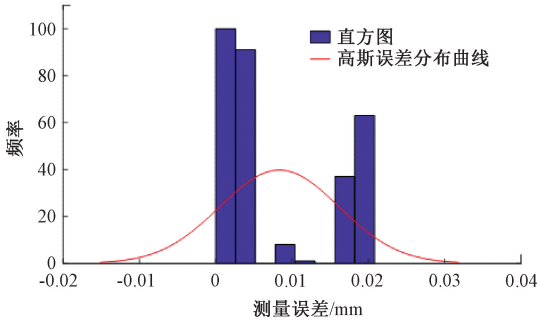


图 12 平行平晶测量误差高斯分布

Fig. 12 The histogram of Gauss distribution of measurement errors in parallel crystals

3.2 飞行器多层透明风挡测量精度评价

与测量平行平晶厚度的实验步骤基本一致,测量飞行器多层透明风挡的厚度,进一步验证所提出方法的有效性。首先利用测量系统采集其原始干涉光谱图,如图 13 所示。

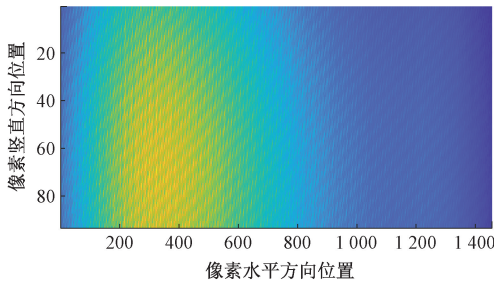


图 13 多层透明风挡原始干涉光谱

Fig. 13 Original interference spectrum of multi-layer transparent windshield

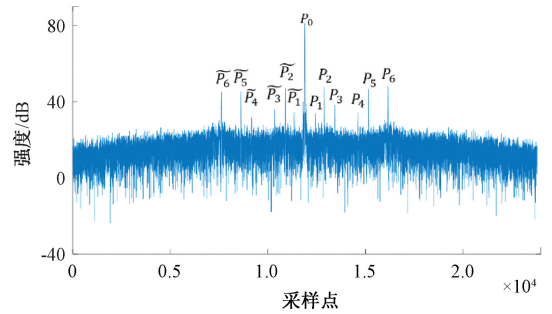


图 14 多层透明风挡干涉信号最终解调

Fig. 14 The final demodulation of multi-layer transparent

对图 13 所示的透明件原始干涉进行解调,得到图 14 所示的透明件干涉信号最终解调图,可在解调图上观测到 6 组关于直流项目对称的峰值,与 1.2 节的理论分析相符。根据 1.2 节的理论分析,峰值信号 P_1 是从透明件界面 $D_2 D_3$ 反射回来的光互相干涉产生的,因此将 P_1 峰值信号的横坐标位置与直流项峰值横坐标之间的差值 k_1 、比例系数 α 以及 L_2 层透明件的折射率 n_2 ,代入式 (7) 即可求得该层透明件的厚度 t_2 。同理,利用干涉信号峰值 P_4 ,可测量新一代航空飞行器透明风挡 L_1 层的厚度 t_1 ;利用干涉信号峰值 P_2 ,可测量透明件 L_3 层的厚度 t_3 。

本文测量的多层透明风挡 L_1 层和 L_3 由有机玻璃构成,该材料在中心波长 840 nm 红外光下的折射率 $n_1 = n_3 = 1.487$; L_2 层由透明聚氨酯构成,其在在 840 nm 中心波长下的折射率 $n_2 = 1.720$ 。 L_1 层的实际厚度为 12.250 0 mm, L_2 层的实际厚度为 2.120 0 mm, L_3 层的实际厚度为 4.470 0 mm。

表 2 给出了飞行器多层透明风挡每层厚度的测量结果。重复测量 100 次,统计了 100 次测量的平均误差、最大误差、标准差,以及相对误差。飞行器多层透明风挡 L_1 、 L_2 和 L_3 层的厚度 100 次平均测量误差分别为 0.008 7、0.011 5、0.012 8 mm;最大测量误差分别为 0.015 7、0.020 3、0.014 0 mm;测量标准差分别为 0.003 6、0.004 9、0.002 0 mm;测量相对误差分别为 0.078 1%、0.541 1%、0.281 1%。

表 2 多层透明风挡每层厚度测量结果

Table 2 Measurement results of each layer thickness of multi-layer transparent windshield

编号	实际厚度/mm	测量厚度/mm	平均误差/mm	最大误差/mm	标准差/mm	相对误差/%
L_1	12.250 0	12.258 7	0.008 7	0.015 7	0.003 6	0.078 1
L_2	2.120 0	2.131 5	0.011 5	0.020 3	0.004 9	0.541 1
L_3	4.470 0	4.482 8	0.012 8	0.014 0	0.002 0	0.286 0

图 15 对透明件 L_1 层的厚度测量结果进行了统计,并绘制误差高斯分布直方图。如图 15 所示,拟合出的高斯曲线均值 μ 为 0.008 7,标准差 σ 为 0.005 4。95% 置信区间的上界为 -0.002 0,下界为 0.019 4,实际数据点落在 95% 置信区间内的比例为 85.00%。图 14 对透明件 L_2 层的厚度测量结果进行了统计,并绘制误差高斯分布直方图。如图 15 所示,拟合出的高斯曲线均值 μ 为 0.011 5,标准差 σ 为 0.004 9。95% 置信区间的上界为 0.021 3,下界为 0.001 6,实际数据点落在 95% 置信区间内的比例为 85.00%。图 15 对透明件 L_3 层的厚度测量结果进行了统计,并绘制误差高斯分布直方图。如图 15 所示,拟合出的高斯曲线均值 μ 为 0.012 8,标准差 σ 为 0.002 0。95% 置信区间的上界为 0.016 7,下界为 0.008 8,实际数据点落在 95% 置信区间内的比例为 100%。上述测量结果表明所提出的飞行器多层透明风挡谱域低相干测量方法具有较高的测量精度,可满足透明件测量需求。

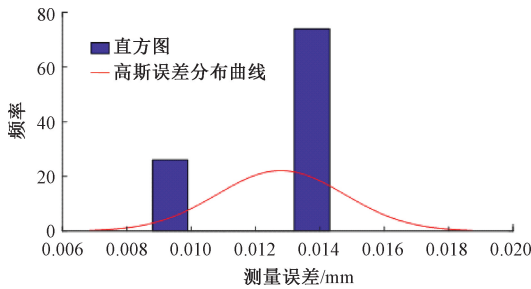


图 15 平行平晶测量误差高斯分布

Fig. 15 The histogram of Gauss distribution of measurement errors in parallel crystals

如图 16 所示,对所提出飞行器多层透明风挡谱域低相干系统的测量速度进行分析。系统测量速度主要由两部分组成,一部分是光谱相机采集光谱图像的时间,其与光谱相机设置的曝光时间相关,记为 τ_0 ;另一部分是光谱信号解调时间,记为 τ_1 。

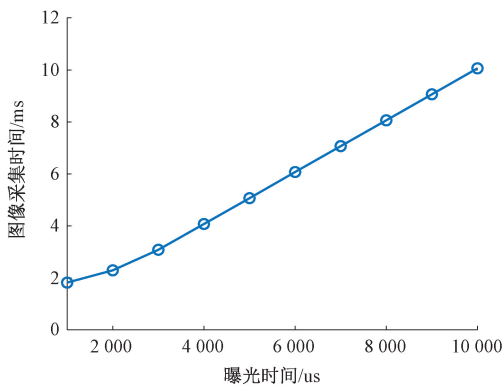


图 16 图像采集时间与曝光时间之间的关系

Fig. 16 Relationship between image acquisition time and exposure time

图 16 给出了不同相机设为不同曝光时间时 τ_0 的值。如图 16 所示,光谱相机采集图像时间 τ_0 随着曝光时间的增大而增大。太小的曝光时间导致信息信噪比过低,而太大的曝光时间不仅可能造成过曝光也会增加测量时间。综合考虑测量时间与信噪比的平衡,本文将曝光时间设为 5 000 μs ,此时光谱相机采集图像的延迟 τ_0 为 5.066 7 ms。

重复执行解调过程 100 次,统计光谱信号解调时间 τ_1 ,并绘制箱线图。如图 17 所示,中位数为 2.551 9 ms,最大值为 2.808 1 ms,最小值为 2.500 ms。本文取最大值 2.808 1 ms 为光谱信号解调时间 τ_1 的默认值。根据上述实验结果,本文所提出方法测量一次的时间 $\tau = \tau_0 + \tau_1$ 为 7.874 8 ms。

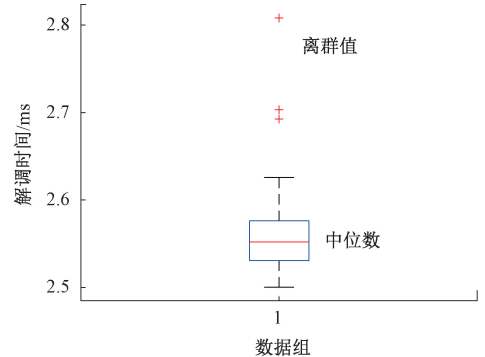


图 17 光谱信号解调时间

Fig. 17 Box diagram of demodulation time of spectral signal

4 结 论

本文针对飞行器多层透明风挡厚度逐层高精度、高效率、无损测量的需求,提出了基于正交色散的大量程高精度谱域低相干测量方法。此外,还建立了光谱信号波数与透明件厚度的映射模型,提出了基于高精度平行平晶的光谱信号解调方法与映射模型比例系数求解方法。搭建了谱域低相干测量系统,测了高精度平行平晶厚度以及飞行器多层透明风挡样品的厚度,实验结果表明所提出的方法具有较高的精度、测速度和较大的量程,为飞行器多层透明风挡的测量提供了新的思路。

参考文献

- [1] 孙炜,范金娟,刘槟滔. 飞机座舱玻璃爆裂原因分析[J]. 失效分析与预防, 2020, 15(3): 202-206.
SUN W, FAN J J, LIU B T. Analysis on the cause of broken of an airplane canopy[J]. Failure Analysis and Prevention, 2020, 15(3): 202-206.
- [2] 冯海兵. 美国五代战斗机座舱透明件技术的应用进展[J]. 科技导报, 2021, 39(9): 24-35.

- FENG H B. Application progress for technology of American fifth generation fighter's wind shield[J]. *Science and Technology Review*, 2021, 39(9): 24-35.
- [3] 杨波, 赵培林, 蔡三军, 等. 新一代战斗机座舱盖关键技术与设计方法[J]. *航空学报*, 2020, 41(6): 307-317.
- YANG B, ZHAO P L, CAI S J. Key technologies and design of new generation fighter canopy[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(6): 307-317.
- [4] 张敏婧, 赵英亮, 王黎明, 等. 基于改进 STA/LTA 的高精度超声测厚方法研究[J]. *国外电子测量技术*, 2021, 40(10): 117-122.
- ZHANG M J, ZHAO Y L, WANG L M, et al. Research on high precision ultrasonic thickness measurement method based on improved STA/LTA[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2021, 40(10): 117-122.
- [5] 赵宁, 孙铭聪, 刘苗苗, 等. 一种测量液膜厚度的超声相控阵实验装置[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(3): 170-178.
- ZHAO N, SUN M C, L M M, et al. Ultrasonic phased array experimental device for liquid film thickness measurement[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2024, 45(3): 170-178.
- [6] 路伟光, 王帼媛, 王海亮, 等. 浅谈工业制造业中几何量测量技术及应用[J]. *航空精密制造技术*, 2019, 55(5): 43-46.
- LU W G, WANG G Y, WANG H L. A brief talk on geometric measurement technology and its application in industrial manufacturing industry[J]. *Aerospace Precision Manufacturing Technology*, 2019, 55(5): 43-46.
- [7] 王东方, 李全松, 贾鹏, 等. 三坐标测量曲率半径误差评价的新方法研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(2): 186-192.
- WANG D F, LI Q S, JIA P, et al. New method of error evaluation for test of curvature radius by CMM[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(2): 186-192.
- [8] 邱海超, 刘安, 唐朝清. 基于正弦结构光激励的透明材质缺陷检测方法[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(8): 173-180.
- QIU H CH, LIU AN, TANG CH Q. Automatic defects detection method for transparent materials based on sinusoidal structured light[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(8): 173-180.
- [9] GUO H Y, ZHOU H W, BANERJEE P P. Use of structured light in 3D reconstruction of transparent objects[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(5): B314-B324.
- [10] 刘其广, 徐飞飞, 赵吉斌, 等. 大型复杂曲面透明件非接触在线测量与建模方法[J]. *机械科学与技术*, 2020, 39(11): 1728-1732.
- LIU Q G, XU F F, ZHAO J B. Non-contact measurement and modelling methods of transparency with large complex surface[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2020, 39(11): 1728-1732.
- [11] YU Q, ZHANG Y L, SHANG W, et al. Thickness measurement for glass slides based on chromatic confocal microscopy with inclined illumination [J]. *Photonics*, 2021, 8(5): 170.
- [12] YU Q, ZHANG K, CUI CH C, et al. Method of thickness measurement for transparent specimens with chromatic confocal microscopy[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(33): 9722-9728.
- [13] 陈恺, 祝连庆, 刘昭君, 等. 基于光纤激光频率分裂效应的折射率/厚度双参量测量研究[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(11): 27-34.
- CHEN K, ZHU L Q, LIU ZH J, et al. Measurement of refractive index and thickness based on the fiber laser frequency splitting effect[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(11): 27-34.
- [14] 刘富国, 查学军, 杨波, 等. 基于光纤低相干干涉技术的透镜中心厚度测量方法研究[J]. *应用激光*, 2016, 36(5): 605-610.
- LIU F G, ZHA X J, YANG B, et al. Study on the method of measuring the center thickness of the lenses based on low-coherence interferometry of optical fiber[J]. *Applied Laser*, 2016, 36(5): 605-610.
- [15] ZHANG T, XIA R B, ZHAO J B, et al. A spectral-domain low-coherence method for measuring composite windshield thickness[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 1-14.
- [16] ZHANG T, XIA R B, ZHAO J B, et al. Low-coherence measurement methods for industrial parts with large surface reflectance variations[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 7006514.
- [17] KUHNHOLD P, NOLVI A, TERESCHENKO S, et al. Transparent layer thickness measurement using low-coherence interference microscopy[J]. *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IX, Part 2*, 2015, 95252F.
- [18] LIU SH Q, YU F H, HONG R, et al. Advances in phase-sensitive optical time-domain reflectometry[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2022, 5(3): 200078.

- [19] BOSSCHAART N, AALDERS M C G, VAN LEEUWEN T G, et al. Spectral-domain detection in low-coherence spectroscopy[J]. *Biomedical Optics Express*, 2012, 3(9): 2263-2272.
- [20] TANG D W, GAO F, JIANG X Q. On-line surface inspection using cylindrical lens-based spectral-domain low-coherence interferometry[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(24): 5510-5516.
- [21] KANDE N A, DAKHANE R, DUKKIPATI A, et al. SiameseGAN: A generative model for denoising of spectral-domain optical coherence tomography images[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2020, 40(1): 180-192.

作者简介



张涛, 2016 年于武汉理工大学获得学士学位, 2023 年于中国科学院大学获得博士学位, 现为中国科学院沈阳自动化研究所副研究员, 主要研究方向为工业光学测量与检测、测量装备开发。

E-mail: zhangtao2@sia.cn

Zhang Tao received his B. Sc. degree from Wuhan University of Technology in 1996, and received his Ph. D. degree from Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences in 2004. He is currently an associate researcher at Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include Industrial optical measurement and inspection, development of measurement equipment.



赵吉宾(通信作者), 1996 年于合肥工业大学获得学士学位, 2000 年于山东大学获得硕士学位, 2004 年于中国科学院沈阳自动化研究所获得博士学位, 现为中国科学院沈阳自动化研究所研究员, 主要研究方向为数字化工艺与智能装备、数字化测量。

E-mail: jbzha@sia.cn

Zhao Jibin (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 1996, received his M. Sc. degree from Shandong University in 2000, and received his Ph. D. degree from Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences in 2004. He is currently the principal investigator at Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include digitalized processes and intelligent equipment, digitalized measurement.



孙玉文, 1994 年于西安交通大学获得学士学位, 2000 年于大连理工大学获得博士学位, 现为大连理工大学教授, 主要研究方向为数字化设计与制造、数控加工技术与装备。

E-mail: ywsun@dlut.edu.cn

Sun Yuwen received his B. Sc. degree from Dalian University of Technology in 1994, and received his Ph. D. degree from Dalian University of Technology in 2000. He is currently a professor at Dalian University of Technology. His main research interests include digital design and manufacturing, CNC machining technology and equipment.