

基于智能跑道光栅阵列传感器的机型辨识方法

李盛 刘安 郭金鼎

Aircraft type identification method based on FBG sensing array of smart runway

LI Sheng, LIU An, GUO Jinding

引用本文:

李盛, 刘安, 郭金鼎. 基于智能跑道光栅阵列传感器的机型辨识方法[J]. 应用光学, 2024, 45(2): 453–460. DOI: 10.5768/JAO202445.0208002

LI Sheng, LIU An, GUO Jinding. Aircraft type identification method based on FBG sensing array of smart runway[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(2): 453–460. DOI: 10.5768/JAO202445.0208002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0208002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

机场跑道临时关闭警示灯的光学设计

Optical design of airport temporary runway closure warning light

应用光学. 2017, 38(2): 200–204 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0201008>

基于叠栅的Bragg光纤光栅综合方法的研究

Study of Bragg grating synthesis methods based on superimposed fiber grating

应用光学. 2019, 40(4): 699–703 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0408001>

基于拉锥光纤布拉格光栅的法布里-珀罗应变传感器的仿真研究

Simulation of Fabry-Perot strain sensor based on tapered fiber Bragg grating

应用光学. 2020, 41(5): 1129–1136 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0508002>

基于多视场拼接的飞机偏心定位距精确测量

Accurate measurement of aircraft eccentricity based on multi-field splicing

应用光学. 2018, 39(3): 379–384 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0303002>

基于阵列波导光栅的边缘滤波温度解调系统

Edge filter temperature demodulation system based on arrayed wave-guide grating

应用光学. 2021, 42(5): 898–905 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0503004>

弯曲光纤布拉格光栅靶式流量传感器的研究

Study on bending fiber Bragg grating target flow sensor

应用光学. 2017, 38(2): 336–340 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0208002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 02-0453-08

基于智能跑道光栅阵列传感器的机型辨识方法

李 盛¹, 刘 安², 郭金鼎²

(1. 武汉理工大学 光纤传感技术与网络国家工程研究中心, 湖北 武汉 430070;

2. 武汉理工大学 信息工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘 要: 针对当前机型辨识方法易受环境影响的不足, 提出了一种新的基于智能跑道光栅阵列传感器的机型辨识方法。利用光栅阵列横向布置光缆采集飞机滑跑通过时的分布式振动响应, 通过分析多测区时程脉冲响应特征, 确定主辅起落架通过光缆的时差。通过光栅阵列纵向布置光缆感知飞机的滑行轨迹, 采用多项式拟合确定飞机滑行速度。基于飞机主辅起落架的测试值与理论值的匹配关系对飞机型号进行辨识, 利用某机场试飞及开航2个月内的航班信息进行方法检验。结果显示, 提出的机型辨识方法识别准确率可达98.44%, 可以对B757、B738、A320和A321机型进行有效辨识。

关键词: 机型辨识; 智能跑道; 光栅阵列; 机场

中图分类号: TN253; TP212

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0208002

Aircraft type identification method based on FBG sensing array of smart runway

LI Sheng¹, LIU An², GUO Jinding²

(1. National Engineering Research Center of Fiber Optic Sensing Technology and Networks, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings that the current aircraft type identification method is easily affected to environmental influences, a novel aircraft type identification method based on fiber optic Bragg grating (FBG) sensing array of smart runway was proposed. The distributed vibration response of the aircraft taxiing was collected by using the FBG array buried horizontally under the pavement. By analyzing the time-history impulse response features of multiple measurement areas, the time differences between the main and auxiliary landing gears passing through the optical cable were determined. The taxiing trajectory of the aircraft was sensed by the FBG array buried longitudinally under the pavement, through which the taxiing speed of the aircraft was determined by polynomial fitting. The aircraft type was identified based on matching relationship between the test value and the theoretical value of the main and auxiliary landing gears of the aircraft. The aircraft information in the test flight and the initial two-month operation of a certain airport were used for method verification. The results show that the identification accuracy of the proposed identification method can reach 98.44%, which can effectively distinguish the B757, B738, A320 and A321 models.

Key words: aircraft type identification; smart runway; fiber optic Bragg grating array; airport

引言

随着机场起降飞机日趋大型化、航班密度增

加、机场运行时间延长, 机场道面运维压力日益增大。为了有效延长道面的使用寿命, 保障飞机安

收稿日期: 2023-04-19; 修回日期: 2023-08-21

基金项目: 国家自然科学基金 (61875155, 52108472); 湖北省自然科学基金 (2020CFB144)

作者简介: 李盛 (1980—), 男, 博士, 研究员, 主要从事基于光纤传感监测大数据的机器学习/深度学习模型、结构状态监测与评价、结构计算与数值仿真、光纤智能材料与结构方面的研究。E-mail: lisheng@whut.edu.cn

全运行,国内外相继开展了基于跑道各类信息监测^[1-3]的智能跑道^[4]研究及实践。凌建明^[5]等系统梳理了智能跑道的主要功能与实现路径,并指出机型辨识是实现飞机滑跑轨迹精细推演的必要监测指标。

目前,机型辨识的方法中,卫星遥感图像识别技术^[6]主要通过高分辨率图像捕捉飞机边缘轮廓特征实现飞机静态下的机型识别^[7]。该方法在天气状态不佳时,卫星图像分辨率无法确保机型辨识的准确性,且无法对运动状态的飞机开展机型辨识。激光或红外测距仪^[8-9]能够直接读取距离,由于所需要的设备数量少、布置简单,因此将测距反馈的轮迹几何关系与飞机轮组信息进行匹配,是机型辨识及评价轮迹横向偏移的常用方法。SCHOLZ F W^[10-11]针对波音 747 机型报导了采取该方式在约翰肯尼迪机场和安克雷奇机场的应用效果。国内基于测距原理的机型辨识工作也已被相继用于成都天府机场^[3]、上海虹桥机场^[12]。然而,基于上述原理开展机型辨识受光线及环境影响大^[13],且相对长距离跑道起降范围,测距仪仅能辨识通过监测断面的飞机机型。光纤传感器因具有体积小、灵敏度高、不易受环境影响等优势,近年来被广泛应用于土木工程结构的监测^[14]。其中,光栅阵列传感技术已在地铁^[15]和桥梁^[16]监测中得到应用,但在机场领域中还未有基于光栅阵列传感监测的相关报导。

为弥补上述方法的不足,并拓展光栅阵列技术在机场领域的应用,本文基于某刚性道面下方已

布设有全域光栅阵列传感器^[17-18]的智能跑道,开展机型辨识新方法的研究。研究中利用光栅阵列可识别并跟踪运动物体轨迹^[19]的优势,求解飞机的滑跑速度,通过传感探头的脉冲响应捕捉飞机鼻轮和主起落架依次通过传感探头的时差,并基于实测的主辅起落架间距和飞机轮组已知信息之间的匹配策略来开展机型辨识。

1 基于振动信号感知的机型辨识方法

1.1 检测光栅阵列振动信号原理

基于光栅阵列振动传感可获取用于支持机型辨识的原始信号。图1给出了光栅阵列的振动检测原理。激光器发射的激光光源经过脉冲调制器调制成脉宽固定的脉冲光信号,然后经过掺铒光纤放大器(erbium-doped optical fiber amplifier, EDFA)对脉冲光信号进行增强,通过环形器1进入光栅阵列,阵列中的光栅作为反射镜反射具有特定中心波长的窄带光,相邻2个光栅的反射光再通过环形器进入3×3耦合器,经过迈克尔逊干涉仪的长臂和短臂后被法拉第旋转镜(Faraday rotator mirror, FRM)反射为4束。当干涉仪两臂差与相邻两光纤光栅间距相等时,时序上位于中间的2束光在耦合器相遇并产生干涉现象。使用3个光电探测器将3×3耦合器的3路输出干涉光信号转换成电信号,高速数据采集卡会采集该电信号,最后上传至上位系统进行信号的分析处理。当光纤因外部振动而变形时,反射光的干涉相位会发生变化。使

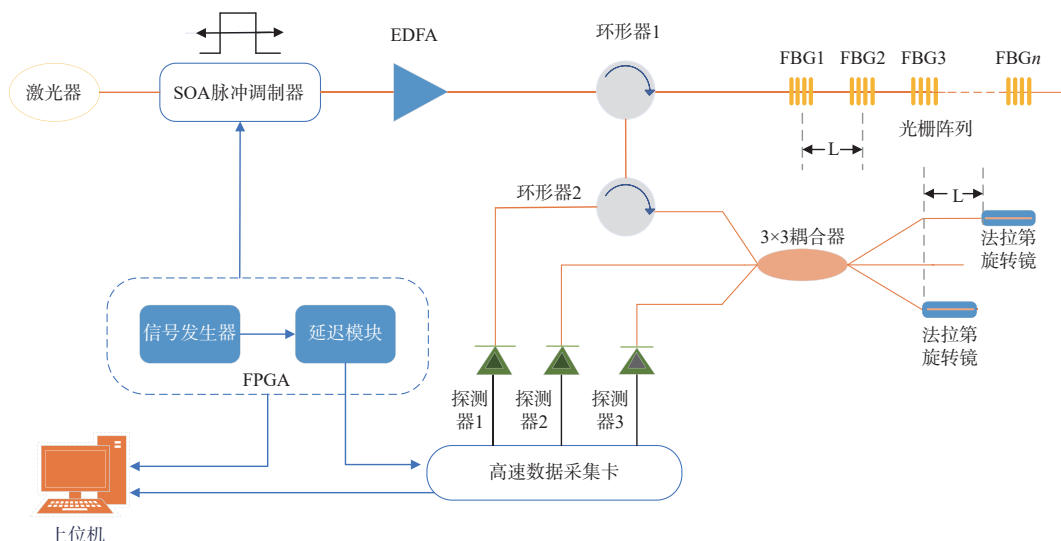


图1 光栅阵列振动检测原理

Fig. 1 Vibration detection principle of grating array

用 3×3 耦合器解调相位差^[20],重建振动信号的时域波形。其中,参数 L 表示2个相邻光栅探头之间的物理距离,即测量时测点间的空间分辨率。法拉第旋转镜则用于抑制解调过程中反射光的偏振效应。此外,光时域反射技术^[21]用于确定光纤中的振动位置。

1.2 机型辨识方法

如图2所示,开展机型辨识的光栅阵列振动信号主要来自于沿跑道纵向和横向布置的振动传感光缆。基于该种传感器布置模式下的机型辨识流程如图3所示。当飞机滑跑通过道面时,纵向传感

光缆上的分布式光栅传感器用于识别跟踪飞机的运行轨迹,通过对轨迹进行拟合可以计算得到飞机的滑跑速度。横向光缆上的传感器探头则用于提取飞机滑跑通过时鼻轮和主起落架依次通过的时间差。根据飞机滑跑通过横向传感光缆时的速度 v 和前后轮组通过的时间差 Δt 可以计算得到鼻轮和主起落架的间距 L_t ,将其与已知鼻轮和主起落架间距 L_r 进行匹配即可开展机型的辨识。由于联络道一般对称于跑道中间分布,将横向传感光缆布置于跑道中部可以兼顾跑道两端着陆飞机的机型辨识。

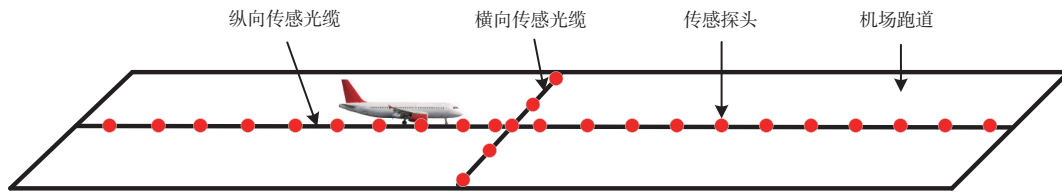


图2 机型辨识光栅阵列传感光缆布设示意

Fig. 2 Schematic layout of grating array sensing optical cable for aircraft type identification

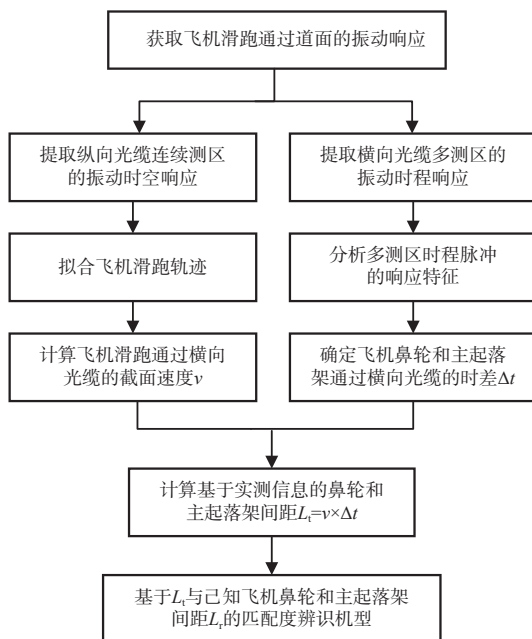


图3 机型辨识流程

Fig. 3 Flow chart of aircraft type identification

2 现场试验

2.1 工程背景

如图4所示,某机场智能跑道系统在建设过程中,在上水稳面层开槽,在跑道面积为 $45\text{ m}\times 3\,600\text{ m}$ 的区域内,布设了10根直径为 13.5 mm 的层绞松套铠装光栅阵列振动传感光缆。埋设过程中,光栅阵列振动传感光缆分别由跑道的南北两侧向中间敷设,并在跑道中部向跑道东侧依次引出两端尾缆进行光缆对焊。其中,每根振动光缆内的传感器探头间距为 3 m ,以保证组成跑道全域范围内每块 $4.5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 的道面板块下方均至少有一个振动探头。该布设方式可满足对飞机在跑道上任意位置滑跑通过时的运动轨迹跟踪。其中,振动光缆基于武汉理工大学拉丝塔在线动态刻栅平台制备。振动信号的采集选用武汉烽理光电有限公司FBG-DAS-3000型光栅阵列振动解调仪进行信号解调。

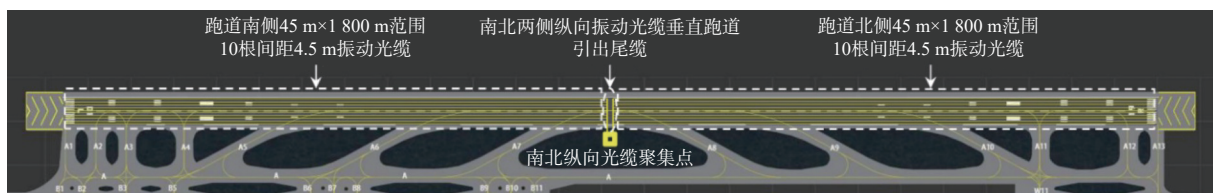


图4 某机场智能跑道系统西跑道道面下方振动光缆布设示意

Fig. 4 Schematic layout of vibrating optical cables under west runway of airport smart runway system

2.2 试验设计

机型辨识试验主要围绕机场实际起降的飞机来开展。开航前,机型为B757的某编号飞机在2.1介绍的某机场两条跑道分别完成了两起两降的试飞任务。其中,着陆于图4西跑道的一趟试飞滑跑数据相对完整,被用于参与方法的预试验研究。预试验的主要目的在于筛选跑道中部横向布置的光缆上可以准确反映飞机鼻轮和主起落架依次通过时间差的有效测区。开航后,由于初期起降机场的航线有限,试验主要对开航两月内3种机型共计64趟飞机着陆滑跑信息开展机型辨识效果的检验。表1给出了试飞及开航后参与方法研究和检验的飞机已知几何参数。

由于飞机在跑道上通过时主要沿跑道中心线滑行,因此45 m宽跑道中间两仓道面下方的3.6 km长振动光缆上的信号响应更为显著。因此,试验主要选择了如图5中第5根纵向光缆的振动信号来捕捉飞机的运动轨迹,并计算飞机滑跑速度。

由于跑道南北侧的10根纵向光缆在进行信号对接时,引出信号的方向由西向东,且考虑到飞机沿跑道中心线滑跑,因此,飞机鼻轮和主起落架通过跑道中部时,横向布设光缆感知的时域脉冲主要参考1#~4#光缆中部区域的传感探头时程响应。试飞阶段预实验以表1内已知的B757飞机几何信息为验证目标,在图5时域脉冲关注区域内,分析并确定能有效反馈鼻轮和主起落架通过中间横向布置光缆区域时间差的传感测区。这些确定的测区为开航后的机型辨识流程提供图3中的 Δt 信息。

表1 参与试验飞机机型及已知几何参数
Table 1 Aircraft types involved in test and known geometric parameters

阶段	试飞	开航	m	
飞机机型	B757	A320	A321	B738
飞机主辅起落架间距 L_{r-a}	18.29	12.64	16.90	15.60

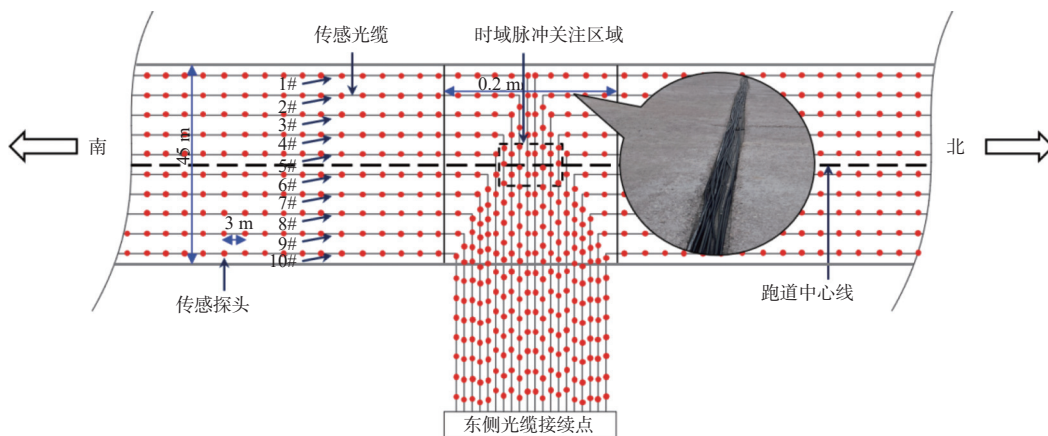


图5 道面下方振动传感光缆布设细节示意

Fig. 5 Detailed layout of vibration sensing optical cable under pavement

2.3 试验结果

预试验阶段及开航后参与方法验证中的4种主要机型飞机在沿跑道中心线运动时的轨迹图如图6所示,从轨迹可以看出飞机接地运动时的变速滑行过程。

对于飞机滑跑通过中部横向布置光缆区域的速度求解以图6(a)的轨迹为例,选取跑道中部左右各15 m区域11个测区最大幅值响应作为各测区的位置,基于多项式拟合可以得到飞机在跑道上滑跑通过该区域的时间与位置的拟合方程(1)。对(1)式进行求导可得该区域如式(2)的时间与位

置关系:

$$t = 1.23 \times 10^{-5} x^3 - 4.382 \times 10^{-4} x^2 + 3.648 \times 10^{-2} x + 62.03 \quad (1)$$

$$v^{-1} = \frac{dt}{dx} = 3.69 \times 10^{-5} x^2 - 8.764 \times 10^{-4} x + 3.648 \times 10^{-2} \quad (2)$$

式中: $x \in [0, 30]$, 对应跑道里程1785 m~1815 m的30 m范围; t 为与 x 对应的拟合时间。

将30 m范围的中间位置 $x = 15$ m代入式(2),并计算其倒数,即可得到飞机通过跑道中部的速度值 $v_{B757} = 31.6$ m/s。

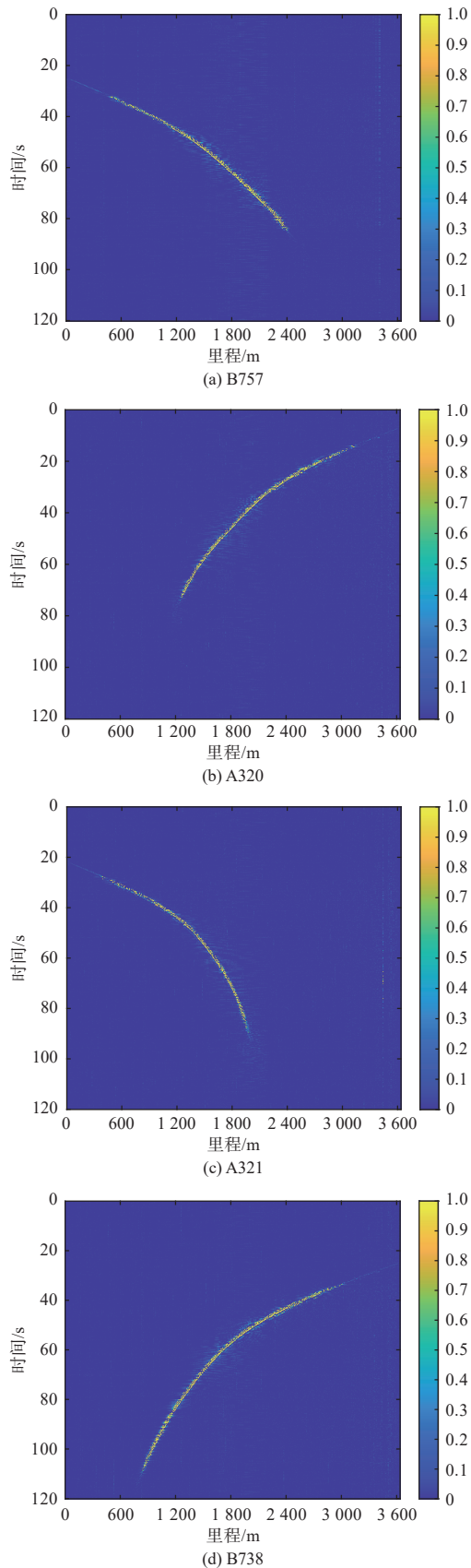
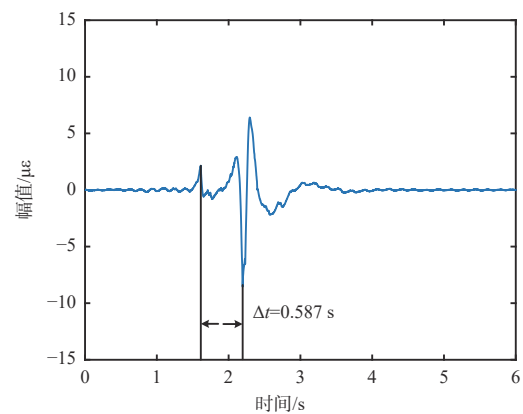


图6 4种典型机型着陆滑跑轨迹瀑布图

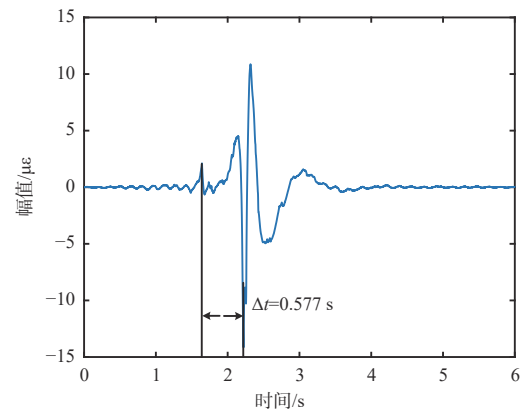
Fig. 6 Detailed layout of vibration sensing optical cable under pavement

以表1中已知的B757鼻轮与主起落架间距离为检验目标,经筛选分析,图7给出了图5跑道中部时域脉冲关注区域内,可以表征机型辨识流程中 Δt 信息的6个有效振动测区。可以观察到6个测区的波形特征基本一致,在推测 Δt 范围内的左、右侧脉冲分别对应鼻轮和主起落架通过时刻前提下,6个测区 Δt 的均值0.582s与 v_{B757} 的乘积结果已与表1中B757的已知信息十分接近。

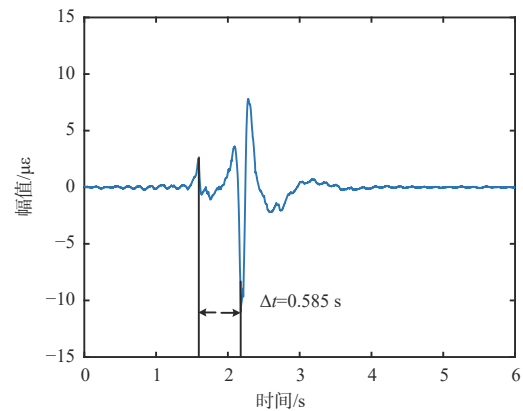
以开航后如图6(b)的某趟B738轨迹为例,采取相同的方式可以得到飞机通过跑道中部的速度 $v_{B738} = 27.2 \text{ m/s}$,用于确定该趟航班 Δt 均值的有效



(a) 1 仓 616 测区



(b) 2 仓 616 测区



(c) 3 仓 617 测区

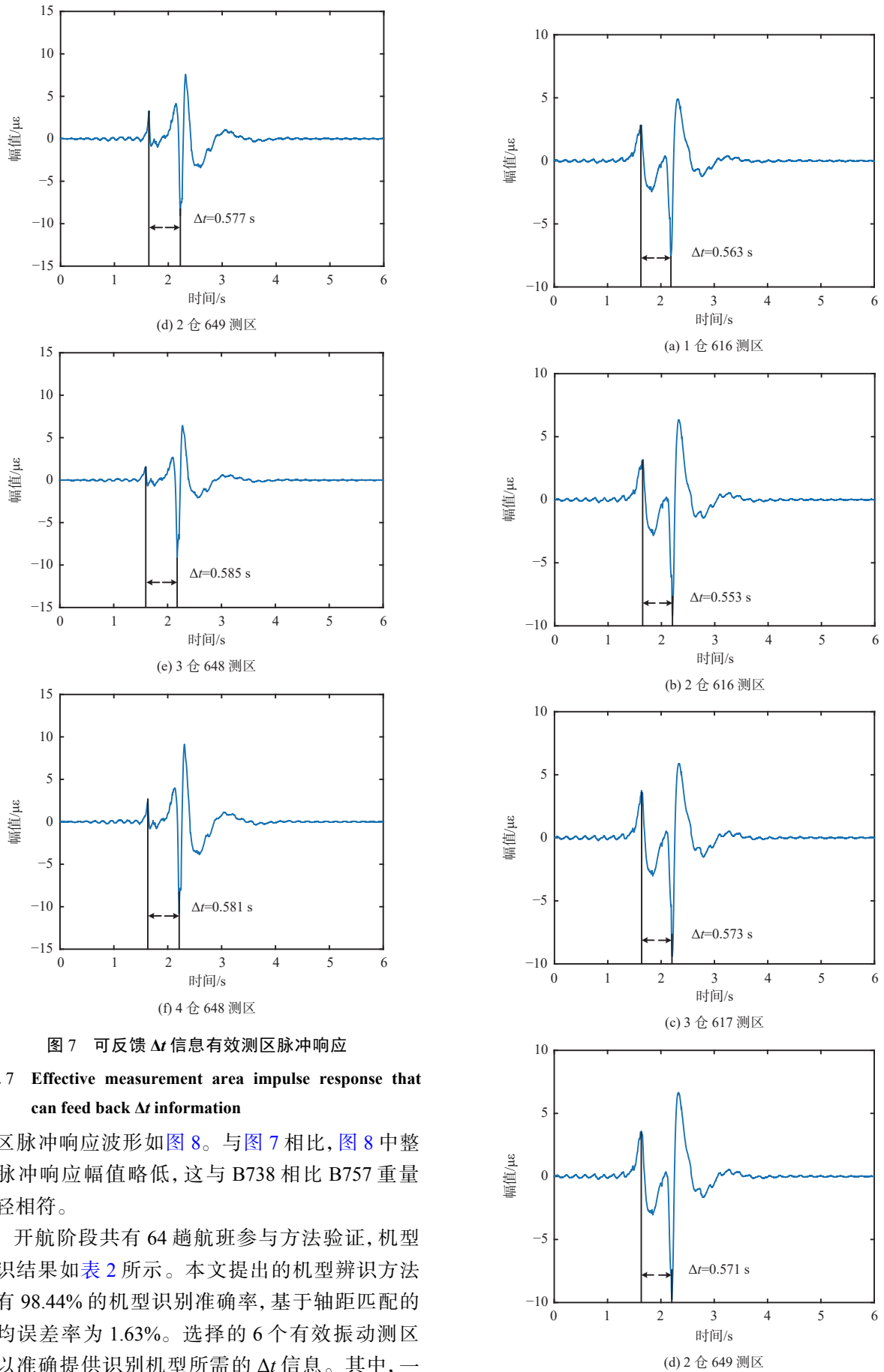
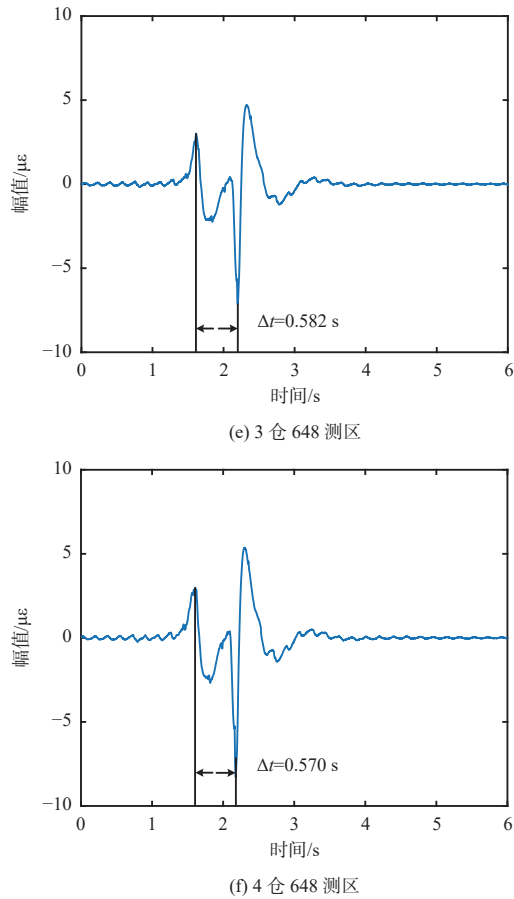


图 7 可反馈 Δt 信息有效测区脉冲响应

Fig. 7 Effective measurement area impulse response that can feed back Δt information

测区脉冲响应波形如图 8。与图 7 相比,图 8 中整体脉冲响应幅值略低,这与 B738 相比 B757 重量更轻相符。

开航阶段共有 64 趟航班参与方法验证,机型辨识结果如表 2 所示。本文提出的机型辨识方法具有 98.44% 的机型识别准确率,基于轴距匹配的平均误差率为 1.63%。选择的 6 个有效振动测区可以准确提供识别机型所需的 Δt 信息。其中,一

图 8 B738 通过时有效测区 Δt 信息Fig. 8 Δt information derived from effective measurement area during passage of B738

趟 B738 被误识别为 A321, 出现概率为 1.56%。误识别的原因可能在于飞机滑行通过跑道中部出现了微小的横偏, 造成图 5 横向缆中的 6 个选定测区不能正确表征飞机前后轮组通过的时间差 Δt 。为了改善该现象, 后期将继续积累此类小概率事件样本, 并对算法进一步优化。

表 2 运营阶段机型辨识结果

Table 2 Identification results of aircraft types during operational stage

飞机机型	实际架数	识别架数	识别准确率/%	轴距误差率/%
A320	17	17	100	1.77
A321	24	24	100	1.66
B738	23	22	95.65	1.47

3 结论

本文提出了通过光栅阵列传感器采集飞机滑跑时的分布式振动响应以辨识飞机机型的方法。

某机场开航 2 个月内的试验结果表明, 提出的机型辨识方法不受环境气候影响, 计算简单高效, 时效性强, 具有 98.44% 的辨识准确率。由于目前机场处于开航阶段, 航班机型及数量有限, 后续将积累更多样本对识别策略进行进一步验证和完善。

参考文献:

- [1] CHOU C P, CHENG H J. Analysis of concrete joint movements and seasonal thermal stresses at the Chiang Kai-Shek international airport[J]. Journal of the Eastern Society for Transportation Studies, 2005, 6: 1217-1230.
- [2] AIQADI I L, PORTAS S, CONI M, et al. Runway instrumentation and response measurements[J]. Transportation Research Record, 2010, 2153(1): 162-169.
- [3] 凌建明, 张瑞菊, 方意心. 成都天府国际机场智能跑道管理系统[J]. 四川建筑, 2022, 42(增刊1): 209-212.
LING Jianming, ZHANG Ruiju, FANG Yixin. Intelligent runway management system of Chengdu Tianfu International Airport[J]. Sichuan Architecture, 2022, 42(S1): 209-212.
- [4] 赵鸿铎, 李琛琛, 刘诗福, 等. 机场智慧飞行区内涵、分级与评价[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(8): 1137-1142.
ZHAO Hongduo, LI Chenchen, LIU Shifu, et al. Concept, intelligence rating, and evaluation of smart airfield in airport[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2019, 47(8): 1137-1142.
- [5] 凌建明, 方意心, 张家科, 等. 机场智能跑道体系架构与关键技术[J]. 土木工程学报, 2022, 55(2): 120-128.
LING Jianming, FANG Yixin, ZHANG Jiake, et al. Framework and key technologies of airport smart runway[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(2): 120-128.
- [6] ZHI Z W, SHOU H W, XIAO F W, et al. A benchmark data set for aircraft type recognition from remote sensing images[J]. Applied Soft Computing, 2020, 89: 106132.
- [7] 欧阳欢, 范大昭, 郭静, 等. 结合显著性检测与特征匹配的飞机目标识别[J]. 测绘通报, 2020(3): 1-6.
OUYANG huan, FAN Dazhao, GUO Jing, et al. Aircraft target recognition based on saliency detection and feature matching[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020 (3): 1-6.
- [8] 柳鸣, 张国玉, 安志勇, 等. 大量程脉冲激光测距仪性能检测方法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9): 2679-2683.

- LIU Ming, ZHANG Guoyu, AN Zhiyong, et al. Detection method for ranging performance of pulsed laser range finder with wide measuring range[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(9): 2679-2683.
- [9] RIEMENSBERGER J, LUKASHCHUK A, KARPOV M, et al. Massively parallel coherent laser ranging using a soliton microcomb[J]. *Nature*, 2020, 581(7807): 164-170.
- [10] SCHOLZ F. Statistical extreme value analysis of ANC taxiway centerline deviations for 747 aircraft[R]. [S.l.]: FAA and The Boeing Company, 2003.
- [11] SCHOLZ F. Statistical extreme value analysis of JFK taxiway centerline deviations for 747 aircraft[R]. [S.l.]: FAA and The Boeing Company, 2003.
- [12] 袁捷, 史恩辉, 雷电, 等. 上海虹桥国际机场飞机轮迹横向偏移规律研究[J]. *中国民航大学学报*, 2015, 33(2): 1-6.
- YUAN Jie, SHI Enhui, LEI Dian, et al. Lateral deviation pattern and model of aircraft wheel path on Shanghai Hongqiao International Airport[J]. *Journal of Civil Aviation University of China*, 2015, 33(2): 1-6.
- [13] 郭豪, 邱琪, 马娜, 等. 不同能见度下激光测距仪最大测程的数值算法[J]. *红外与激光工程*, 2013(12): 3330-3334.
- GUO Hao, QIU Qi, MA Na, et al. Numerical algorithm for maximum range of laser rangefinder in different visibility[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013(12): 3330-3334.
- [14] JAYAWICKREMA U M N, HERATH H M C M, HETTIARACHCHI N K, et al. Fibre-optic sensor and deep learning-based structural health monitoring systems for civil structures: a review[J]. *Measurement*, 2022, 199: 111543.
- [15] 李盛, 邱阳, 南秋明, 等. 基于超弱光栅传感阵列的钻机违法入侵地铁线路识别定位方法[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(20): 202-207.
- LI Sheng, QIU Yang, NAN Qiuming, et al. A method for identifying and locating illegally invading subway lines by drilling rigs based on ultra-weak Bragg fiber optic grating sensing array[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(20): 202-207.
- [16] 陈考奎, 李院峰, 周次明, 等. 基于弱光纤布拉格光栅阵列的桥梁应变测量[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(7): 87-96.
- CHEN Kaokui, LI Yuanfeng, ZHOU Ciming, et al. Bridge strain measurement based on weak fiber Bragg grating array[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(7): 87-96.
- [17] YANG M H, BAI W, GUO H Y, et al. Huge capacity fiber-optic sensing network based on ultra-weak draw tower gratings[J]. *Photonic Sensors*, 2016, 6: 26-41.
- [18] NAN Q M, LI S, YAO Y Q, et al. A novel monitoring approach for train tracking and incursion detection in underground structures based on ultra-weak FBG sensing array[J]. *Sensors*, 2019, 19(12): 2666.
- [19] 朱东飞, 王永皎, 杨烨, 等. 基于光栅阵列的城市轨道交通列车定位与测速方法[J]. *光子学报*, 2019, 48(11): 159-166.
- ZHU Dongfei, WANG Yongjiao, YANG Ye, et al. Urban rail train positioning and speed measuring method based on grating array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(11): 159-166.
- [20] TIAN L, WANG J H, ZHENG Y, et al. Realization of the asymmetrical 3×3 optical interferometer accelerometer demodulation algorithm[C]//2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. Changsha, China: IEEE, 2010: 972.
- [21] BAI Q, WANG Q L, WANG D, et al. Recent advances in Brillouin optical time domain reflectometry[J]. *Sensors*, 2019, 19(8): 1862.