

基于激光测风雷达的机场低空风切变识别算法

范琪¹, 郑佳锋^{2*}, 周鼎富¹, 朱克云², 张杰², 童文皓¹, 罗雄¹

(1. 西南技术物理研究所, 四川成都 610225;

2. 成都信息工程大学大气科学学院高原大气与环境四川省重点实验室, 四川成都 610225)

摘要:介绍了低空风切变识别的研究情况,提出了一种基于激光测风雷达的机场低空风切变识别算法,针对性设计了重点监测区域和告警方式;并于2016年春季和2018年春季,在气候、地形复杂度不同的多个机场进行低空风切变监测试验,通过分别与国外某型激光测风雷达以及同时段航空器报告结果做对比,评估本文算法的切变识别能力。试验结果表明,本文算法可以有效监测到激光测风雷达探测范围内的低空风切变,命中率可达88%以上。

关键词:低空风切变;激光测风雷达;航空安全

中图分类号: TN958.98 文献标识码: A

Research on airport low-level wind shear identification algorithm based on laser wind radar

FAN Qi¹, ZHENG Jia-Feng^{2*}, ZHOU Ding-Fu¹, ZHU Ke-Yun², ZHANG Jie²,

TONG Wen-Hao¹, LUO Xiong¹

(1. Chengdu Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610225, China;

2. College of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology, Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225, China)

Abstract: This paper introduces the research situation of low-level wind shear identification, and proposes a low-level wind shear recognition algorithm based on airport application for laser wind radar. The key monitoring areas and warning methods are designed in a targeted manner. Low-level wind shear data in this paper are collected from the LIDAR wind field detection tests conducted from January to April 2016 and December 2017 to June 2018 at several airports with different climate and terrain complexity. The shear identification capability of the algorithm was evaluated by comparing with the results of a foreign company's LIDAR and aircraft voice report. The experimental results show that the algorithm can effectively detect low-level wind shear in the detection range of laser wind radar, and the hit rate can reach over 88%.

Key words: low-level wind shear, laser wind radar, civil aviation safety

PACS:42. 62. Eh

引言

航空气象中,把近地面高度在600 m以下,一定距离内风矢量(风向、风速)在空中水平和(或)垂直

距离上的变化称为低空风切变,其具有突发性强、生命期短、空域低、尺度小、强度大等特点^[1-3]。当飞机在空速小、距地高度低的起降阶段遭遇低空风切变时,风切变会瞬间改变飞机的稳定飞行姿态,造

收稿日期:2019-09-19,修回日期:2019-04-03

Received date:2019-09-19, Revised date:2019-04-03

基金项目:国家重点研发计划(2018YFF01014100),四川省重大科技专项(2018TZDZX0006),成都信息工程大学人才引进项目(KYTZ201728)

Foundation items: Supported by National Key Research and Development Program Key Special Projects for Development of Major Scientific Instruments and Equipment (2018YFF01014100), and Fund Major Science and Technology Project in Sichuan Province (2018TZDZX0006), and Scientific Research Foundation of Chengdu University of Information Technology (KYTZ201728)

作者简介(Biography):范琪(1992-),女,宁夏固原人,工程师,硕士,主要从事激光测风雷达产品算法研究。E-mail:1432091537@qq.com

*通讯作者(Corresponding author):E-mail:zjf1988@cuit.edu.cn

成飞机颠簸、摇摆甚至坠机,是公认的空中隐形杀手^[4-5]。目前我国机场常用的低空风切变探测设备有超声风速计、多普勒天气雷达(TDWR)、风廓线雷达(WPR)。超声风速计探测高度为10 m,常多台布设于跑道两侧构成低空风切变告警系统(LLWAS)用于监测水平风切变,其监测高度受限,监测能力易受部署位置和数量的影响;多普勒天气雷达示踪物为大气云雨粒子,擅长探测由雷暴、锋面等系统性天气引发的低空风切变,对局地小尺度风切变、晴空湍流等监测能力不足;风廓线雷达示踪物为大气湍流,只能探测顶空区域风场,且低层风场易受地物杂波干扰可信度低,不利于识别低空风切变^[6-7]。激光测风雷达通过测量气溶胶粒子散射回波信号得到大气风场信息,作为新型风场探测手段,体积小、重量轻、抗干扰能力强、数据时空分辨率高,能提供十分精细的低空三维风场信息,可弥补传统设备在低空风切变识别能力上的不足,是目前晴空条件下识别低空风切变最有效的手段^[8-9]。

20世纪70年代Fujita通过调查三次严重飞行事故开启了对低空风切变研究的先河^[10]。随后,90年代Frehlich R和Hannon S M分析激光测风雷达回波特征进行风切变探测、飞机尾涡特性等研究,使得激光测风雷达用于保障航空安全成为可能^[11-13]。2002年,香港国际机场安装了全球首台业务化运行的激光测风雷达,同年Chan P W、Shun C M设计了基于激光测风雷达的下滑道扫描算法,用于反演飞机起降航道上的风切变,命中率可达75%以上^[14-15]。之后Chan P W又在原研究基础上增加了湍流耗散率剖面计算,并联合机场其他风场设备组建多元设备探测网,提高香港机场低空风切变命中率至90%以上^[16]。进入20世纪,深度学习大热,Liu J N K使用混沌振荡神经网络对低空风切变的生成、发展和演变进行预测,对深度学习与航空气象安全保障的结合进行了初步尝试^[17]。至今,国外基于激光测风雷达的风切变识别算法研究已相当成熟,并集成入雷达实现了商业化,如美国洛克希德马丁公司的WindTrace®、法国Leosphere公司的WindCube S400-AT系列、英国Halo-Photonics公司的Stream Line-Pro等,已成功在多个大型国际机场进行飞机安全保障工作,且表现不俗^[18-20]。但受限于激光测风雷达自主化研发能力,国内对基于激光测风雷达的低空风切变识别研究还比较少^[21-24]。

1 观测试验和仪器

昆明长水机场海拔2 103.5 m,有两条相互平行的东北-西南走向的跑道,03L/21R为西跑道,全长4 000 m,04L/22R为东跑道,全长4 500 m,两跑道之间相距1 900 m,与正北方向夹角为30°。长水机场周围地形复杂,3 km外有沿跑道走向的绵延山脉,西部最高为2 200 m,东部最高为2 500 m,长水机场如谷地一般被夹在其中,风场受地形影响严重,这使得昆明机场晴空颠簸和低空风切变频发,严重威胁飞行安全。2016年1月,国外某厂家在长水机场开展了为期四个月的低空风切变监测试验,试验数据记录了大量低空风切变过程。期间激光雷达架设于机场东跑道东侧,距跑道中心垂线距离847 m处,雷达采用6°仰角的PPI扫描,距离分辨率87 m,角度分辨率3°,水平探测盲区300 m,最大可测距离10 km(如图1(a)所示)。

西南技术物理研究所(以下简称西物所)于2014年研制出FC系列全光纤三维激光测风雷达,该雷达创造性的采用二轴光电扫描球结构,有效提高了系统光学效率,增强了结构的紧凑性,其灵活的伺服系统可实现对上半球空域任意方向风场测量,探测得到高精度、高时空分辨率的三维风场数据,结合二次产品反演算法可输出风廓线、水平风、迎头风、跑道侧风、低空风切变、尾涡、云参量等多种数据产品。FC系列激光测风雷达研制成功后,多次在沿海区域、远洋科考船、高寒地区进行试验,其风场探测性能和复杂环境适应性已经得到了有效验证。2017年12月西物所在西宁曹家堡机场开展了为期6个月的低空风切变观测试验。曹家堡机场海拔2 178 m,有一条东西走向跑道(11L-29R),机场被平均海拔2 500 m以上的山脉环抱,气流易产生过山扰动,威胁飞机本场起降安全。试验期间FC-III型激光测风雷达放置于11L端头,距触地点垂线距离100 m处位置。鉴于民航客机一般以6°仰角起飞,以3°~6°俯角降落,因此激光测风雷达配置了6°仰角的PPI扫描,距离分辨率75 m,角度分辨率3°,水平探测盲区100 m,最大探测距离可达10 km。通过对实时径向数据的快速反演计算,有效捕捉了多次低空风切变以及中小尺度天气演变过程,积累了宝贵的国产激光雷达机场实测数据(如图1b所示),FC-III型激光测风雷达主要性能指标见表1。

先利用国外某激光雷达在长水机场的试验数据,通过与同时段航空器报告和该国外雷达的低空



图1 激光测风雷达安装位置示意图 (a) 昆明长水机场, (b) 西宁曹家堡机场

Fig. 1 Installation position of wind lidar (a) Kunming Changshui International Airport, (b) Xining Caojiabao International Airport

表1 FC-III型激光测风雷达主要性能指标

Table 1 Parameters of the FC-III wind lidar

参数	FC-III激光测风雷达
重量	60 kg
波长	1.55 μm
扫描模式	PPI、RHI、DBS、下滑道
俯仰角	0°~180°
方位角	0°~360°
最大探测距离	≥ 10 km
最小探测距离	≤ 45 m
距离分辨率	30 m/50 m/75 m/100 m 可选
时间分辨率	15 s~2 min 可调
风向误差	$\leq 8^\circ$ (均方根误差)
风速误差	≤ 0.5 m/s (均方根误差)

风切变识别结果作对比,验证本文算法的低空风切变识别能力。再使用FC-III型激光测风雷达在曹家堡机场的实测数据,通过与同时段航空器报告作对比,进一步验证本文算法在环境、地形复杂度不同区域的风切变识别稳定性。

2 低空风切变识别告警研究

2.1 质量控制

雷达基数据中常存在奇异点和缺测问题,需对其开展质量控制以满足算法要求。本文采用“K-邻域频数法”对激光测风雷达速度场进行处理^[25],其原理如下:(1)选择一个 $M*N$ 的滑动窗口,把窗口内数据大小等距区分为 P 个区间, Δd 为区间间隔,窗口中心点的风速值为 V_{ij} ,则第 $P+1$ 个区间可表示为 $V_{ij} \pm \Delta d/2$;(2)统计 $M*N$ 窗口内风速值在不同区间的分布频数($X_1, X_2, X_3, \dots, X_p$)和 X' ,其中 X' 为与所需判断点数值相近的点的频数,令 X_{MAX} 是不同区间的分布频数中的最大值,取 V_p 为 X_{MAX} 所对应区间的中间值;(3)令窗口中心点的新值为 V'_{ij} ,则通过式

(1)可实现奇异点剔除和缺测填补,式中 K_1 为剔除的判别阈值, K_2 为缺测填补的判别阈值,无回波则用“0”代替。当窗口中心点原值 V_{ij} 不为0时,代表此为有效回波点,需判断该点是否为奇异点,若 $X' \leq K_1$,说明该窗口中心点周围很少存在与之数值相近的回波点,则该点为奇异点,需剔除;若 $X' > K_1$,即周围存在较多与之数值相近的回波点,判定为正常点,需保留。当窗口中原值 V_{ij} 等于0时,判断是否需缺测填补,当 $X_{\text{MAX}} \geq K_2$ 时,表明该窗口内存在大量有效点,可将 X_{MAX} 对应区间的中心点 V_p 赋值给 V_{ij} ; $X_{\text{MAX}} < K_2$ 时,表明窗口内无有效点或有效点很少,此时判定该点无需填补。

$$V'_{ij} = \begin{cases} 0 & V_{ij} \neq 0 & X' \leq K_1 \\ V_{ij} & V_{ij} \neq 0 & X' > K_1 \\ V_p & V_{ij} \approx 0 & X_{\text{MAX}} \geq K_2 \\ V_{ij} & V_{ij} \approx 0 & X_{\text{MAX}} < K_2 \end{cases} \quad (1)$$

“K-邻域频数法”中参数 $M, N, P, \Delta d, K_1$ 和 K_2 都具有明确的物理意义,其值的选择对剔除和填补结果影响很大。 Δd 过大会导致算法失效,过小则造成奇异点误删; K_1 过大会导致奇异点误判,过小会导致漏剔; K_2 过大会使缺测点无法得到填补,过小会导致过渡填补。考虑到低空风切变的气象尺度和激光测风雷达数据分辨率,对配置参数做了多组试验后给出最优参数配置如表2所示。

表2 “K-邻域频数法”在激光雷达速度场中的最优参数

Table 2 The optimal parameters of "K-domain frequency method" in wind lidar velocity field

数据类型	窗口大小	区间数	区间间隔	剔除阈值	补缺阈值	
	M	N	P	Δd	K_1	K_2
径向速度	3	3	15	4	3	5

2.2 识别算法

低空风切变是小尺度天气系统(水平尺度有几十米至十几千米、生命周期有几分钟至几小时的天气系统),其具有一定的生消周期、空间尺度和时间尺度,这为遥感设备的实时探测捕捉提供了可能。低空风切变有多种类别的划分方式,根据风向划分,可分为水平风的水平切变、水平风的垂直切变和垂直气流切变;根据飞机相对于风矢量的运动划分,可分为顺风切变、逆风切变、侧风切变和垂直风的切变。其界定依据不同属类不同,但究其本质低空风切变均为风矢量在空中水平和(或)垂直距离上的变化。当激光测风雷达进行低仰角的PPI平面扫描时,径向速度可以近似认为是大气风场在水平

面上的径向投影,结合最小二乘法在线性拟合方面的优势以及雷达数据沿径向分布的特点,分别计算速度的一维径向切变和一维方位切变,组合得到的是二维合成风切变,其与其他依据划分所得的低空风切变概念不同,但有联系,依然能够有效反应大气流场的不均匀特性。

径向切变值 C_{Rs} 是通过最小二乘法对雷达径向方向上 n 个距离库进行计算得到,如式(2):

$$C_{Rs} = \frac{\Delta v}{\Delta R} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i \sum_{i=1}^n r_i - n \sum_{i=1}^n v_i r_i}{\sum_{i=1}^n r_i \sum_{i=1}^n r_i - n \sum_{i=1}^n r_i^2} \cdot \frac{\Delta r}{(\Delta r + L_R)}, \quad (2)$$

其中, v_i 表示从径向计算点开始第 i 个距离库的径向速度, r_i 表示第 i 个距离库到雷达中心的距离, Δr 为距离库之间的间隔, L_R 为单位距离库长度。

同理,切向切变 C_{As} 是最小二乘法对雷达切向方向上 m 个距离库进行计算得到,如式(3):

$$C_{As} = \frac{\partial v}{r \partial \theta} = \frac{\sum_{i=1}^m v_i \sum_{i=1}^m \theta_i - m \sum_{i=1}^m v_i \theta_i}{\sum_{i=1}^m \theta_i \sum_{i=1}^m \theta_i - m \sum_{i=1}^m \theta_i^2} \cdot \frac{r \Delta \theta}{(r \Delta \theta + \frac{\pi r \times \varphi}{180^\circ})}, \quad (3)$$

其中, θ_i 表示从切向计算点开始第 i 个距离库的方位角, $\Delta \theta$ 为雷达方位角步进长度, φ 为雷达的角度分辨率。

将径向切变值 C_{Rs} 与切向切变值 C_{As} 进行合成,可得到 PPI 扫描模式下水平风场的风切变值 C_s , 如式(4):

$$C_s = \sqrt{C_{Rs}^2 + C_{As}^2} \quad (4)$$

WMO(世界气象组织)将风切变强度分为了轻度、中度、强烈和严重四个等级,当切变强度达到中度(≥ 0.068)及以上时进行告警(见表3)。已知,低空风切变对航空器的影响与飞机载重、空速、风切变强度有关,航空器载重越大、空速越高,其抗切变能力越强。截止2017年,我国颁证的民用航空机场共计229个,其中约80%为中小型机场,最常保障的机型为中小型飞机。结合我国民航业务现状,经机场实地试验后调整风切变告警阈值为 $C_s \geq 0.04(1/s)$ 较为合理,能有效的同时兼顾小、中、大型飞机的安全保障。

2.3 告警设计

激光测风雷达以 PPI 扫描方式探测机场上空风场变化,并对强度触发阈值的低空风切变进行告警,但并不是机场上空所有区域发生的低空风切变

表3 低空风切变强度标准

Table 3 Low-level wind shear strength standard

等级	风切变强度 (1/s)
轻度	<0.067
中度	0.068~0.138
强烈	0.139~0.206
严重	>0.206

都能对飞机产生足够的威胁,要选取重点区域进行针对性监测告警。而这需对飞机进近程序有初步的了解:飞机在本场飞行时遵循着一套固定的进近程序,称为“五边起降”^[26]。如图2所示,五边从机场上方俯视来看实际是一个四边形,但由于一边(离场边, Upwind)和五边(进场边, Final)的飞行性质、飞行高度和空速都不一样,所以以跑道作为间隔,把这条边一分为二,成了五边。整个五边起降程序中,突发于一边和五边的低空风切变对飞机产生的威胁最大,此时飞机的动力和高度不足,一旦遭遇低空风切变,飞行员反应和操作的时间特别短,极易发生重大飞行事故。飞机完成一边和五边程序时,水平航迹长度大约3 nm,因此对应 PPI 扫描模式的重点监测区域为:跑道及跑道两端3 nm 延长线区域,并对延长区域进行1 nm 间隔的网格划分。计算激光测风雷达 PPI 扫描范围内的风切变因子,仅对强度超过设定阈值且发生于重点监测区域的切变因子进行告警,其余区域的切变因子仅显示其所在位置供民航工作人员保障参考。

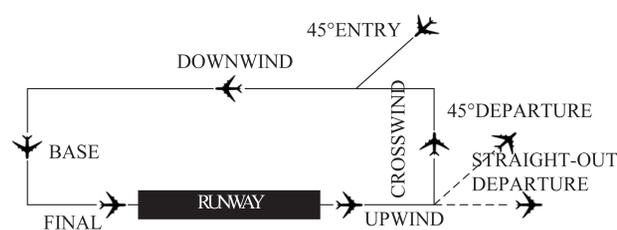


图2 飞机五边进近示意图

Fig. 2 Diagram of airfield traffic pattern

以昆明长水机场为例,加载跑道参数信息,低空风切变告警显示界面如图3所示。航空气象服务对象为航空气象人员、管制员、飞行员和飞行签派员,因所服务用户的需求不同产品提供方式不同。航空气象人员关注风切变识别信息的同时也关注原始风场波动情况,因此以原始风场叠加切变识别结果的方式提供切变产品显示(图3a所示),图中径向速度大小用颜色深浅表征,正负用冷暖色系区

分,暖色系表示风速值为正,风吹向远离激光雷达的方向,冷色系表示风速值为负,风吹向朝向激光雷达的方向,若风垂直于雷达扫描方向吹则风速值为零。管制人员、飞行员和飞机签派员更关注低空风切变发生位置和强度,因此以不叠加原始风场信息的方式提供切变产品显示(图3b),图中低空风切变的强度信息既可以用数值大小表示,又可用不同颜色来区分。

3 结果分析和讨论

3.1 识别结果分析

《国际民用航空公约》规定缔约国应当按照《国际航空气象服务》中的相应条款,安排其注册的航空器在航线上飞行时记录和报告观测到的信息,这就是航空器报告,其已作为重要的航线大气实况资料,被国内外气象机构同化进数值模式预报中。受限于探测风切变的手段匮乏,目前为止,航空器报告是相对最可靠的信息来源,可最大限度的为其他航空器以及地面气象人员提供机场的风切变信息。当飞机遭遇风切变时,飞行员需按照操作要求,结合机载设备探测到的实况信息,详细汇报并记录遭遇风切变的时间、高度、强度以及飞机为此所做的操作流程,其对于佐证风切变识别情况具有很强的说服力。

2016年1-4月,在长水机场共计收集到31份包含有低空风切变信息的航空器报告,结合长水机场逐小时天气实况资料,对风切变发生的时间、强度、位置、天气状况及识别结果进行统计,详细见表4。民航采用8云量,天气实况的判定依据为:晴天(总云量<2成)、多云(4成≤中低云量<7成)、阴天(中低云量≥7成)、雾天(大气中因悬浮的水汽凝结,使得相对湿度≥95%,能见度≤10 km的天气现象)、阵雨(不连续性降水)。这31例风切变中,发生于晴天的

有13例、多云3例、阴天2例、雾天3例、雨天10例;其发生位置处于跑道上的有8例、一边离场边的有9例、五边进场边的有14例,可见生成于以上区域的低空风切变的确易对飞机安全产生威胁,需给与重点监测。国外某型激光雷达波长为 $1.6\ \mu\text{m}$,恰处于水汽的强吸收带,大气中高饱和度的水汽分子会造成激光的传输衰减,从而影响算法对低空风切变的识别能力,因此发生于高湿天气下(雾天3例,阵雨天9例,阴天1例)的14例低空风切变,由于雷达测程衰减而导致的漏报高达11例。

为排除天气因素对算法识别能力的间接性影响,仅分析算法对剩余晴、多云、阴等干燥大气下的17例干性低空风切变的识别结果,这也恰是激光雷达擅长捕捉的类型。针对以上干性低空风切变,国外雷达命中13例,命中率为76.4%,漏报4例,其中3例为轻度低空风切变。本文算法命中15例,命中率为88.2%,漏报2例,仅1例为轻度低空风切变。对于成功捕捉到的15例低空风切变,本文算法告警持续时间最短仅有3 min,最长可持续10 min,平均告警持续时间维持在5 min左右,有力印证了低空风切变作为小尺度天气系统突发性强、生消周期短的特点,这也是其难以被探测设备捕捉到的原因。综上所述,本文算法对风场波动的敏感度要优于国外雷达算法,其可以更好的兼顾小型客机的安全保障,对低空风切变的识别能力更佳。

西宁位于我国西北部,属于典型的高原大陆性气候,太阳辐射强、降水量少、大风天全年占比大,其气候、环境、地理特性都与攀枝花迥然不同。分析西物所FC-III型激光测风雷达在西宁曹家堡机场的风场实测数据,可进一步验证算法的切变识别稳定性。试验期间,曹家堡机场共收集到5份包含低空风切变信息的航空器报告,结合同时段机场逐小

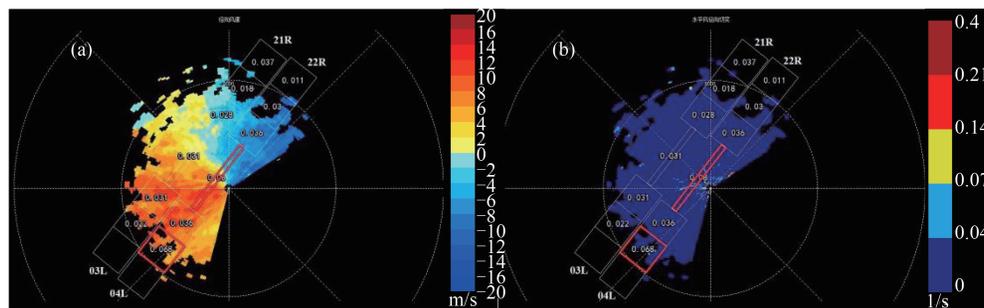


图3 低空风切变产品显示界面 (a) 切变识别信息叠加原始风场, (b) 不叠加原始风场

Fig. 3 Low-altitude wind shear product display interface (a) contains the original wind field, (b) does not contain the original wind field

表4 昆明长水机场低空风切变信息统计

Table 4 Statistics of low-altitude wind shear in Kunming Changshui International Airport

天气实况	时间	风切变强度	发生位置	国外某雷达算法	本文算法	本文算法告警持续时间/min	备注
晴	2/03 14:30	轻度	22R	命中	命中	3	
晴	2/03 18:31	不明	04L	漏报	命中	5	
晴	2/14 22:28	轻度	04L一边	命中	命中	7	
晴	2/14 22:52	中度	04L	命中	命中	3	
晴	2/17 12:50	强度	22R 五边	命中	命中	8	
晴	2/17 17:14	轻度	21R 五边	命中	漏报		
晴	2/17 17:39	轻度	21R 五边	漏报	命中	5	
晴	2/17 17:52	轻度	21R 五边	漏报	命中	6	
晴	3/12 12:41	中度	04L	命中	命中	9	
晴	3/15 10:20	中度	22R 五边	命中	命中	10	
晴	3/15 12:09	中度	21R 五边	命中	漏报		
晴	3/16 9:53	中度	21R	命中	命中	3	
晴	3/16 16:24	轻度	21R 五边	漏报	命中	4	
多云	3/14 17:12	不明	03L一边	命中	命中	3	
多云	3/22 13:44	中度	21R 五边	命中	命中	5	
多云	4/21 16:10	中度	03L一边	命中	命中	6	
阴	4/15 13:26	轻度	21R 五边	命中	命中	3	
阴	2/28 17:47	中度	21R 五边	漏报	漏报		
雾	2/17 20:51	轻度	03L一边	漏报	漏报		
雾	2/17 22:03	轻度	04L一边	漏报	漏报		
雾	2/17 22:07	不明	03L一边	漏报	漏报		
阵雨	2/28 18:25	轻度	04L一边	漏报	漏报		
阵雨	2/28 18:34	中度	04L一边	漏报	漏报		高饱和度和水汽造成激光衰减,雷达测程覆盖不到风切变发生区域
阵雨	2/29 14:44	不明	21R	漏报	漏报		
阵雨	4/02 17:34	中度	22R 五边	漏报	漏报		
阵雨	4/03 19:40	中度	22R 五边	漏报	漏报		
阵雨	4/17 15:34	不明	04L一边	漏报	漏报		
阵雨	4/19 13:53	轻度	21R 五边	漏报	漏报		
小阵雨	2/28 18:16	不明	04L	命中	命中		
小阵雨	3/21 13:02	不明	22R 五边	命中	命中		
小阵雨	4/16 21:55	不明	22R	命中	命中		

时天气实况资料,对风切变信息统计如下,详见表5。这5例低空风切变中,干性低空风切变占4例,降水天仅有1例;其发生位置处于一边离场边的有2例、五边进场边的有3例,均处于算法重点监测领域。沙尘粒子的平均半径一般小于0.1 mm,激光在传输过程中经沙尘粒子的多次吸收和散射会导致明显的衰减。因此,发生于西宁机场的5例低空风切变,仅在扬沙天漏报之外,其余皆被成功命中。算法对命中的4例低空风切变的持续告警时间最短维持了4 min,最长可达14 min,平均告警持续时间在8 min左右,符合小尺度天气系统的特征。整体可见,在环境复杂度不同的区域本文算法对低空风

切变依然保持着较高的识别稳定性。

3.2 典型个例讨论

3.2.1 辐合线诱发低空风切变

航空器报告记录:2016年2月17日12:50分(BJT),B737飞机在昆明长水机场22R五边着陆阶段一海里区域,距地高度200~500 feet(即:61~152 m)处遭遇强度风切变,飞机复飞。图4为同时段本文算法(左)和国外某激光雷达(右)识别到的低空风切变图。该日在长水机场跑道21R和22R五边一海里处,存在一个西南/东北风对立下的风场辐合带,这是由午后太阳辐射增强破坏机场上空逆温层,导致高空动量下传后被机场两侧西南-东北走

表5 西宁曹家堡机场低空风切变信息统计表

Table 5 Statistics of low-altitude wind shear in Xining Caojiabao international Airport

天气实况	日期时间	风切变位置	强度	本文算法	算法告警持续时间/min
晴	03/01 19:05	29R 一边	未知	命中	4
多云	02/19 20:30	11L 五边	轻度	命中	7
多云	04/26 13:28	11L 五边	未知	命中	14
小阵雨	06/10 15:36	29R 一边	未知	命中	
扬沙	04/05 15:15	11L 五边	未知	雷达探测范围覆盖不到无法判断	

向的山脉夹持,受地形影响而生成的辐合带,飞机降落经临此处时,风场突然从顺风转为逆风状态,会造成飞机姿态不稳,甚至180°翻转偏离航道,严重威胁飞行安全。

受辐合带影响,本文算法在12:44分于22R五边1 n mile内,距地高度86~107 m处,探测到强度为0.047(1/s)的轻度低空风切变并触发告警,之后持续在相同位置监测到平均强度为0.074(1/s),最大强度为0.101(1/s)的低空风切变,且风切变走势沿着辐合带散布,直到12:51分后低空风切变消失告警结束,整个告警时长持续8 min。可见发生于12:50分导致B737复飞的低空风切变被本文算法成功监测到,且其发生时间、水平落区、距地高度、强度大小与航空器报告记录结果一致性高。此外,毗邻的21R五边一海里也处于辐合带的延伸区域,但受激光测风雷达探测衰减的影响,该处低空风切变只能被间歇性识别到,其强度最大可达0.084,达到中度级别,若有飞机在21R跑道降落,也会遭遇风切变的威胁。反观国外某型激光测风雷达,其算法仅在12:50分于22R/21R五边1海里位置识别出速度变化为20节的中度低空风切变,切变告警时间仅持续了43 s,之后再未触发低空风切变告警,而该天导致低空风切变生成的辐合带一直持续在此压境,可见其算法对风场波动的敏感性度,对低空风切变的监测能力没有本文算法高。

3.2.2 突发微下击暴流

航空器报告记录:2018年4月26日13:28分(BJT),飞机在西宁曹家堡机场11L五边降落时突遇低空风切变,飞机复飞。图5为本文算法识别到的该时段低空风切变图(左列为径向速度图,右列为同时刻风矢量图)。从图中可知,从13:25分开始,在PPI扫描范围内11L一海里区域正负径向速度交叠间存(见黑色圈内),同时刻水平风矢一致朝西南向,算法在该区域识别到强度为0.064(1/s)的轻度

低空风切变并触发告警。13:28分,11L一海里区域径向速度不再杂乱而是发展形成明显的辐合带,背景风场依旧为西南风,但风矢量值比25分时刻有所增大,最大可达10 m/s以上,低空风切变强度增大至0.066(1/s),此时飞机本场降落经临此处,受辐合带影响姿态失衡,紧急拉升后复飞。13:30分,11L一海里区域径向速度形成了“负正负”交叠的速度场分布,风矢量也突然呈现明显辐散状,水平辐散尺度小于4 km,矢量值最大可达18 m/s,可见该时刻突发了微下击暴流(一种在地面或近地面附近引起灾害性强风的强下沉气流),相应的该处低空风切变强度也增强至0.084(1/s)。13:31分,微下击暴流发展成熟,下沉气流四散区域不断扩大,径向速度图中辐合带延伸闭合形成逆风区(被正速度包裹着的负速度,或相反),逆风区会生成破坏性大风,其风向多变、对流强烈,这使得该区域低空风切变强度增至最大0.091(1/s)。13:33分,微下击暴流进入消亡阶段,受背景西南风冲刷“负正负”的径向速度场结构在不断瓦解,下沉气流强度在不断减弱,风矢量四散的范围明显缩减,低空风切变强度也降低至0.064(1/s)。直至13:39分,微下击暴流彻底消亡,只剩下背景西南风在微扰动,但已不对飞行安全造成威胁,低空风切变告警结束,时长持续14 min,激光测风雷达完整监测到了突发性微下击暴流从生成、发展、成熟到消亡的风场演变全过程。

西宁曹家堡机场的风廓线雷达安装在11L跑道头,恰处于微下击暴流突发地附近。图6为4月26日风廓线雷达的垂直风产品图。图中横轴为时间,从12:10分记录到15:00分,时间间隔5 min,纵轴为垂直探测高度,最大测程4 000 m。垂直速度大小用颜色深浅表示,方向用冷暖色系区分,冷色表示上升运动,暖色表示下沉运动。由图可见,在12:10分到13:25分之间,该区域1 000 m以下是较为统一的暖平流(上升气流),1 000 m以上则为上升和下沉气

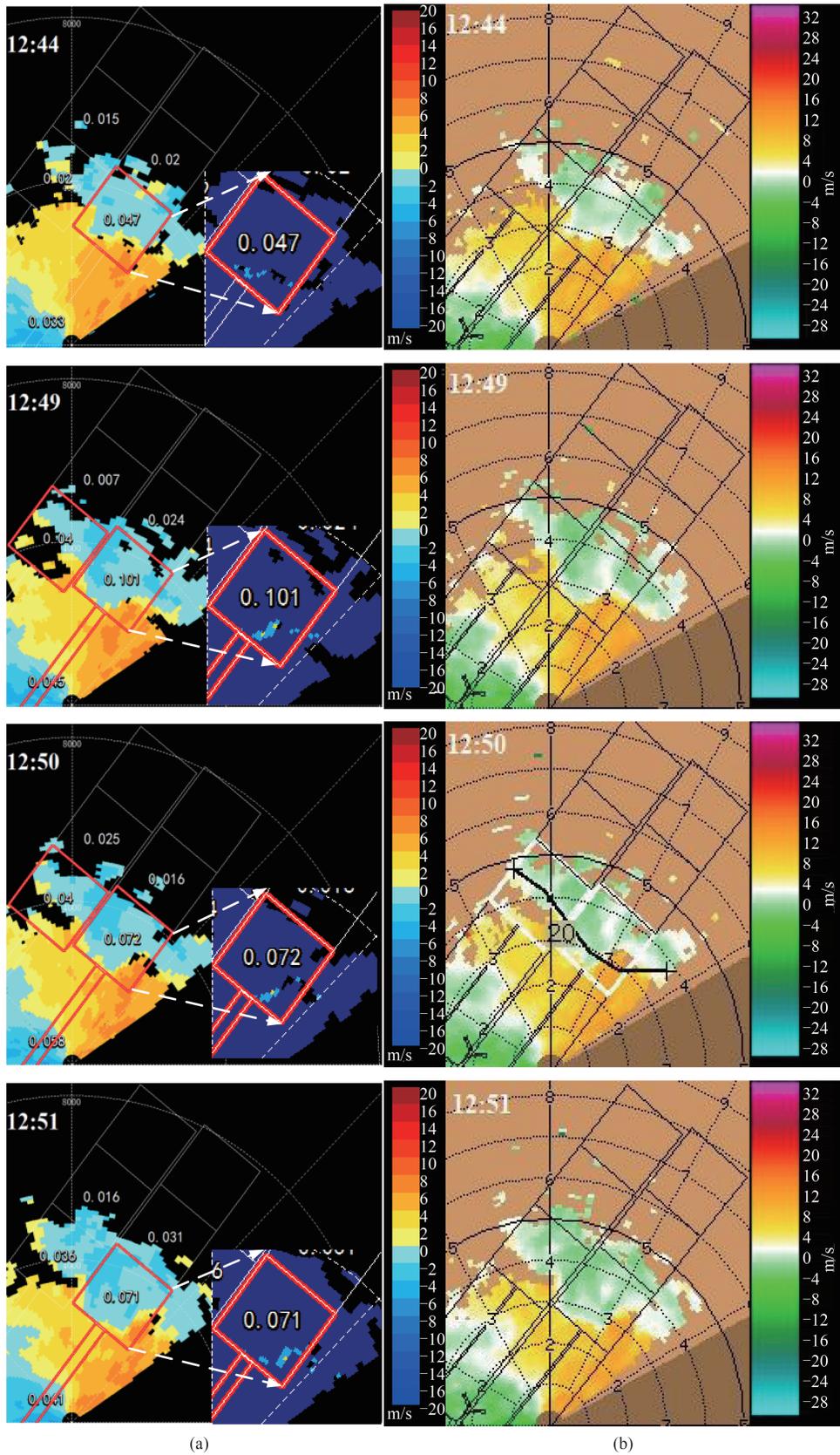


图4 2016年2月17日昆明长水机场低空风切变,仰角6° (a)本文算法识别得到的低空风切变, (b)国外某型激光雷达识别低空风切变

Fig. 4 Low-level wind shear at Changshui International Airport on February 17, 2016, elevation angle 6° (a) recognition results of the algorithm in this paper, (b) recognition results of the Some foreign lidar

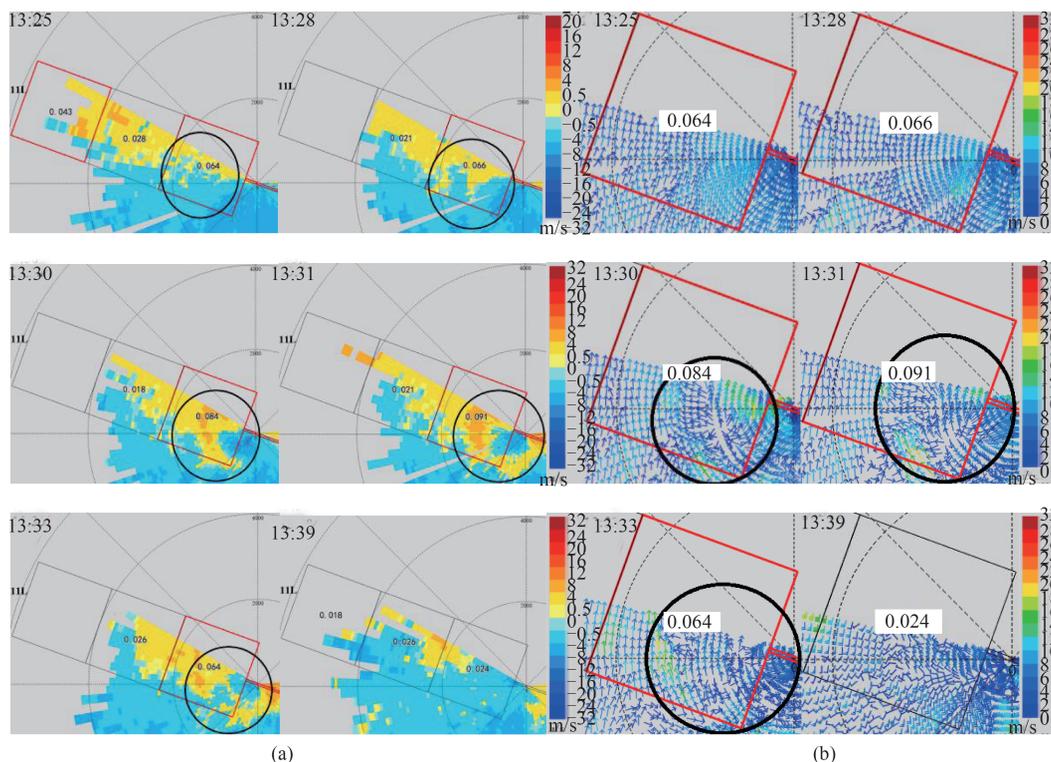


图5 2018年4月26日西宁曹家堡机场低空风切变识别图,仰角 6° (a) 低空风切变识别图, (b) 风矢量图

Fig.5 Low-level wind shear at Caojiabao international Airport on April 26, 2018, elevation angle 6° (a) low-level wind shear identification product, (b) wind vector product

流交叠区,有明显的对流存在;但13:25分至13:40分,存在于高空的对流转为了统一的下沉气流,且随着距地高度的降低,下沉气流在惯性的作用下风速值越来越大,最终以最大值 7.2 m/s 的速度砸向地面。13:40分以后,高空下沉气流消失,又转为了统一的上升暖平流。可见,此次过程确实为微下击暴流,且风廓线雷达监测到的强下沉气流出现的时间区间与激光测风雷达探测的微下击暴流生消时段吻合度非常高。由微下击暴流引发的低空风切变也被本文算法成功识别,且对切变的发生时间、位置、强度监测准确。此外,13:28分导致飞机复飞的风场不过是微下击暴流突发的前兆,这之后若还有航班起降,极易引发重大飞行事故,可见实时准确的机场低空风切变监测手段,确实能有效提高航空安全保障能力。

4 结论

本文基于低空风切变气象特征和激光测风雷达PPI扫描数据特点,提出了一种基于激光测风雷达的机场低空风切变识别算法;通过分析飞机本场

进近规范,合理规划了低空风切变重点监测区域,并针对性设计了切变产品的提供方式。在切变识别能力验证中,利用2016年1-4月国外某型激光雷达在昆明长水机场以及2017年12月至2018年5月西物所自研FC-III激光测风雷达在西宁曹家堡机场的低空风切变实测数据,通过分别与该国外激光雷达切变识别结果以及同时段航空器报告记录内容做对比,对算法进行综合评估。结果表明本文算法对风场波动的敏感度高,对低空风切变发生的时间、位置、强度以及持续时间识别准确,其低空风切变命中率可达88%以上,并在环境复杂度不同的机场中皆保持了相当稳定的切变识别性能。

References

- [1] ICAO. Manual on low-level wind shear [M]. International Civil Aviation Organization, 2005: 1-1.
- [2] WANG Qing-Mei, GUO Le-Le. Development of lidar in detection of low altitude wind shear[J]. *LASER and INFRARED*. (王青梅, 郭乐乐. 激光测风雷达在机场低空风切变探测中的应用. *激光与红外*). 2012, 42(12): 1324-1328.
- [3] DAI Li-Li, NI Xiao-Wu. Research of Doppler lidar for microscale wind shear-field detection[D]. Nanjing University

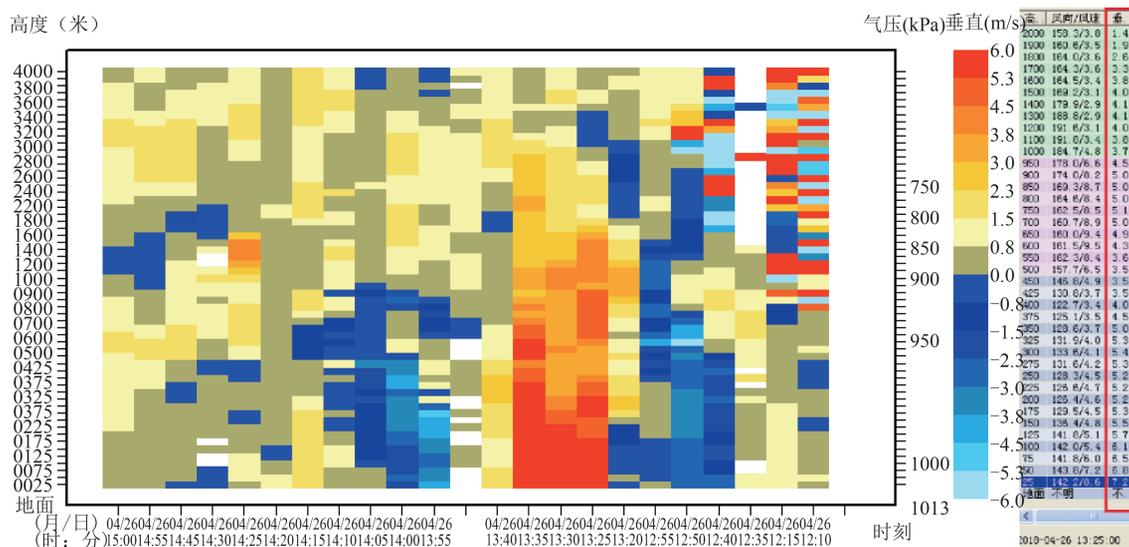


图6 风廓线雷达垂直风产品图

Fig. 6 Vertical wind product drawing of wind profile radar

of Science and Technology.(戴丽莉,倪晓武.探测微尺度风切变场的多普勒激光测风雷达研究.南京理工大学). 2010.

- [4] International Civil Aviation Organization (ICAO). ICAO Safety Report 2015 Edition.
- [5] International Civil Aviation Organization (ICAO). ICAO Safety Report 2016 Edition.
- [6] FAN Qi, ZHU Ke-Yun, ZHENG Jia-Feng, *et al.* Detection performance analysis of all-fiber coherent wind lidar under different weather types[J]. *Chinese Journal of Lasers*. (范琪,朱克云,郑佳峰.不同天气类型下全光纤相干激光测风雷达探测性能分析.中国激光).2017, **44**(2): 1-15.
- [7] Armijo L. A theory for the determination of wind and precipitation velocities with Doppler radars[J]. *Journal of the Atmospheric Science*, 1969, **26**(3):570-573.
- [8] Wu S, Liu B, Liu J, *et al.* Wind turbulence wake visualization and characteristics analysis by Doppler lidar[J].*Optics Express*, 2016,**24**(10):A762-A780;
- [9] Browning K A. Now casting[M]. New York Academic Press Inc,1982.
- [10] Frehlich R . Coherent Doppler lidar signal covariance including wind shear and wind turbulence [J]. *Appl Opt*, 1994, **33**(27):6472-6481.
- [11] Hannon S M , Thomson J A L , Henderson S W , *et al.* Wind shear, turbulence, and wake vortex characterization using pulsed solid state coherent lidar[J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 1995, **2464**:94-102.
- [12] Hannon S M , Clark T L . Lidar measurement of wind shear and turbulence and comparison with a predictive fine-mesh mesoscale model [J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 1996, **2737**:151-161.
- [13] Chan P W, Shun C M, Kuo M L. Latest developments of wind shear alerting services at the Hong Kong International Airport[C]. 14th Conference on Aviation, Range, and

Aerospace Meteorology, American Meteorological Society, Atlanta, Georgia. 2010.

- [14] Chan P W, Shun C M, Wu K C. Operational LIDAR-based system for automatic wind shear alerting at the Hong Kong International Airport[C]// 2002.
- [15] Hon K K , Chan P W . Application of LIDAR-derived eddy dissipation rate profiles in low-level wind shear and turbulence alerts at Hong Kong International Airport[J]. *Meteorological Applications*, 2014, **21**(1):74-85.
- [16] Liu J N K , Chan P W , Chan P W . Chaotic oscillatory-based neural network for wind shear and turbulence forecast with LiDAR data[M]. IEEE Press, 2012.
- [17] Pichugina Y L , Brewer W A , Banta R M , *et al.* Properties of the offshore low level jet and rotor layer wind shear as measured by scanning Doppler Lidar[J]. *Wind Energy*, 2016, **20**(6).
- [18] Antoniou I, Pedersen S M, Enevolden P B. Wind shear and uncertainty in power curve measurement and wind resources[J].*Wind Engineering*, 2009,**33**(5):449-468.
- [19] Choy B L, Lee O S M, Shun C M, *et al.* Prototype automatic LIDAR-based wind shear detection algorithms[C]. *10th conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*. 2004.
- [20] Hannon S M , Clark T L . Lidar measurement of wind shear and turbulence and comparison with a predictive fine-mesh mesoscale model [J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 1996: 151-161.
- [21] ZHUANG Zi-Bo, CHEN Xing, GAO Hao, *et al.* The recognition of lidar wind shear images based on probability support vector machines[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology* (庄子波,陈星,高浩,等.基于概率支持向量机的激光测风雷达风切变图像的识别.北京理工大学学报), 2014, **34**(4):412-416.
- [22] JIANG Li-Hui, TIAN Bai-Quan, XIONG Long, *et al.* Numerical simulations of low altitude wind shear based on Doppler lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering* (蒋立

- 辉,田百全,熊兴隆.基于多普勒激光测风雷达低空风切变的数值仿真.《红外与激光工程》,2012,41(7):1761-1766.
- [23] JIANG Li-Hui, YAN Yan, XIONG Xing-Long, *et al.* Doppler lidar alerting algorithm of low-level wind shear based on ramps detection[J]. *Infrared and laser Engineering* (蒋立辉, 闫妍, 熊兴隆, 等. 基于斜坡检测的多普勒激光测风雷达低空风切变预警算法. 《红外与激光工程》), 2016, 45(1):106001-0106001.
- [24] ZHANG Hong-Wei, WU Song-Hua, YIN Jia-Ping, *et al.* Airport low-level wind shear observation based on short-range CDL[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张洪玮, 吴颂华, 尹嘉萍, 等. 基于短距相干测风激光测风雷达的机场低空风切变观测. 《红外与毫米波学报》), 2018, 37(4):468-476.
- [25] LIANG Hai-Hei, ZHANG Pei-He, GE Rui-Sheng. Study of data processing of wind fields from Doppler weather radar[J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (梁海河, 张沛源, 葛润生. 多普勒天气雷达风场退模糊方法的研究. 《应用气象学报》), 2002, 5: 591-599+643-644.
- [26] ZHAO Yi-Fei, LIU Ran, WANG Hong-Yong. Analysis of final approach deployment procedures based on path objects[J]. *Journal of civil aviation university of china* (赵焜飞, 刘然, 王红勇. 基于航线对象的五边进近调配程序模块研究. 《中国民航大学学报》), 2013, 31(03):1-5.