

# 起飞着陆阶段风切变告警事件差异性分布研究

王奇<sup>1\*</sup> 张兆阳<sup>1</sup> 孙启祯<sup>2</sup> 焦洋<sup>3</sup> 王东<sup>1</sup> 孙宏<sup>1</sup>

(1. 中国民用航空飞行学院, 广汉 618300; 2. 中国民航局第二研究所, 成都 610042;  
3. 中国民航科学技术研究院, 北京 100028)

**摘要:** 风切变是民航局重点监控的红色不安全事件, 了解风切变事件的分布特性有助于行业更有效地开展飞行运行品质监控。通过对近两年触发风切变告警的航班 QAR 数据进行采集分析, 从告警高度上, 发现 80% 以上 RWS 风切变发生于 200 ft 以下的低空。从告警事件的飞行阶段分布上, 65% 以上发生于进近着陆阶段且以 RWS 类型为主, 起飞爬升阶段不到 35% 且以 PWS 类型为主。起飞爬升、进近着陆阶段告警事件分布存在的显著差异性与不同飞行阶段飞机重量、空速、俯仰姿态差异以及气象雷达的俯仰扫描模式设置有关。

**关键词:** 反应式风切变; 预测式风切变; QAR 数据; F 因子; 分布差异性

中图分类号: U8

文献标识码: A

OSID:



## 0 引言

低空风切变(windshear)是严重威胁飞行安全的重要天气现象, 由于其导致飞机能量急剧损失且发生时高度低, 极易引发坠机事故, 其严重危害性使民航局将其定义为需要重点监控的红色不安全事件<sup>[1]</sup>。据 ICAO 统计, 1980—1996 年间全球发生的由低空风切变导致的重大事故有 287 起<sup>[2]</sup>, 我国有记录的由风切变引发的重大飞行事故约占飞行事故总数的 31%<sup>[3]</sup>, 其中较为典型的是 1993 年一架波音 747-400 客机在降落香港启德机场时因遭遇低空顺风切变导致客机以 80 节的速度冲出跑道。近年来受全球异常天气变化影响, 航班报告的风切变遭遇事件频发, 已经引起了有关部门的高度关注。

快速存储记录器<sup>[4]</sup>(quick access recorder, 简称 QAR)数据能够反映出飞行过程中飞机自身和外界环境的状态特征。在基于 QAR 数据进行飞行品质监控方面, 国内外学者基于 QAR 数据对飞行安全和风险进行研究并建立了相应模型, 如重着陆<sup>[5-7]</sup>、飞行撞地<sup>[8]</sup>和风切变<sup>[9]</sup>等等。根据 QAR 数据, 我们

对近年来发生的风切变告警事件进行统计, 发现不同类别告警事件在各飞行阶段的分布具有显著差异性, 如进近阶段是告警高发阶段且主要为反应式风切变告警, 而起飞爬升阶段告警少且主要为预测式风切变告警。为了更好地帮助国内相关人员了解国内风切变事件发生的规律与特点, 本文利用航科院提供的风切变相关 QAR 数据对风切变事件期间相关运行参数的阶段特征进行统计分析, 并结合机载航电系统的风切变告警原理对导致分布规律的原因进行分析, 以帮助运行人员更好地认识各类风切变告警在不同飞行阶段发生的规律, 有助于其采取及时正确的处置措施。

## 1 风切变告警事件数据分析

本文利用中国民航科学技术研究院“飞行品质监控系统”采集了 2020 年 1 月至 2022 年 6 月来, 共计 131 起触发了风切变告警事件的航班 QAR 数据, 涉及预测式风切变<sup>[4]</sup>(predictive windshear, 简称 PWS)和反应式风切变<sup>[4]</sup>(reactive windshear, 简称 RWS)两种类型。其中, PWS 是指通过机载前视气

\* 通信作者. E-mail: wq22331456@163.com

引用格式: 王奇, 张兆阳, 孙启祯, 等. 起飞着陆阶段风切变告警事件差异性分布研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2023(3): 76-81. Wang Q, Zhang Z Y, Sun Q Z, et al. Research on the differential distribution of windshear warning events during takeoff and landing[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2023(3): 76-81(in Chinese).

象雷达对飞机前方一定范围内的风场发射相干脉冲然后接收回波探测湿气团的运动速度<sup>[10]</sup>,因此PWS告警所反映的是飞机航路前上方即将出现的风切变天气。但是受限于多普勒雷达的工作原理<sup>[10]</sup>,如果气流中缺乏可以产生足够回波的水汽,那么机载雷达的检测效率会降低,所以如果多普勒雷达没有报警不代表前方没有风切变事件。而RWS是指由飞机飞行增稳计算机<sup>[10]</sup>(flight augmentation computer,简称FAC)通过搜集在飞行环境中的系统信号、环境变量信号判断得出的飞机当前位置已经存在的风切变<sup>[10]</sup>。根据QAR数据对各类告警事件发生的高度和所处飞行阶段的分布情况进行了统计,如表1所示,可以得出以下主要结论:

表1 国内民航风切变告警事件分布数量特性统计  
(2020年1月至2022年6月)

高度/ft	起飞爬升		进近着陆/复飞		占比
	PWS	RWS	PWS	RWS	
0~50	9	4	2	19	25.96%
50~200	25	9	8	38	61.07%
200~400	0	1	1	4	4.58%
400~600	0	0	0	1	0.76%
600~800	0	0	0	0	0.00%
800~1 000	0	0	0	1	0.76%
1 000~7 000	0	0	0	9	6.87%
占比	25.95%	10.69%	8.40%	54.96%	

注:131起事件中有2起处于复飞阶段。

1) PWS与RWS告警事件的分布占比存在显著差异。在所有131起风切变事件中,反应式风切变RWS事件86起、占比65.65%,预测式风切变PWS事件45起、占比34.35%,且没有一起PWS事件与RWS事件存在前续关联性。根据机载航电系统对风切变的告警原理,当RWS告警触发时表示飞机已经处于风切变区域,而PWS告警表示在飞机前上方区域探测到可能的风切变,由此说明三分之二以上实际遭遇的风切变事件未能提前被机载气象雷达探测到,即当前机载气象雷达对于低空风切变的预警有效性还有待提升。

2) 风切变天气现象的高度分布。鉴于当RWS告警触发时表示飞机已经处于风切变区域,因此可近似用RWS告警触发时刻的飞机高度代表风切变

天气现象存在的高度。从表1所反映的RWS告警事件高度统计来看,风切变区域主要存在于200ft以下,占比超过80%(见表1),如果机组响应稍有延迟或处置不当极易导致危险撞地。

3) 告警事件的飞行阶段分布。从表1统计的各类告警事件的飞行阶段分布来看,起飞爬升阶段共48起,进近着陆阶段共81起,且起飞阶段主要以PWS为主(34起)、进近阶段主要以RWS为主(71起),为了解释风切变事件在不同飞行阶段的显著差异性,需要了解机载航电系统对各类告警风切变探测原理,并结合风切变事件中飞参数进行分析。

## 2 机载航电系统风切变告警原理

风切变的危险在于其导致飞机能量的急剧衰减,其危险程度不仅取决于风切变强度本身,还受到飞机空速大小影响,根据Bowles等人提出风切变危险因子(F因子)评估模型<sup>[11]</sup>:

$$F = \frac{\dot{W}_x}{g} - \frac{W_h}{V} \quad (1)$$

式中: $\dot{W}_x$ 为水平风速分量变化率, $W_h$ 为垂直风速分量(向上为正), $g$ 为重力加速度, $V$ 为飞机真空速。 $F$ 因子为正表示风矢量变化导致飞机能量衰减。不论PWS还是RWS事件,风切变告警的基本原理都是判断 $F$ 因子在一段连续时间(一般为5~10s)内的平均值 $\bar{F}$ 是否超过设定的阈值,见公式(2)至公式(4)<sup>[12]</sup>:

$$\bar{F} = \int_{t=t_0}^{t=t_0+\Delta t} \frac{F}{\Delta t} dt \quad (2)$$

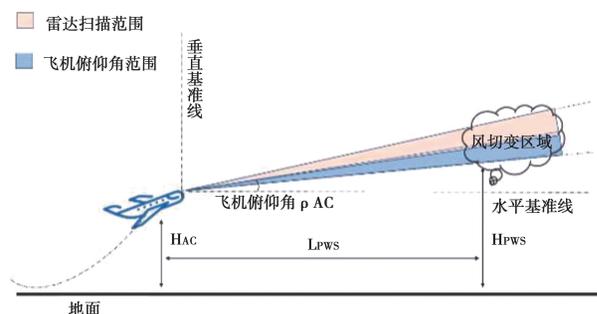
$$\bar{F} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t=t_0}^{t=t_0+\Delta t} \left( \frac{\dot{W}_x}{g} - \frac{W_h}{V} \right) dt \quad (3)$$

$$\begin{cases} \bar{F} \geq 0.105 & \Delta t \geq 10 \text{ s} \\ \bar{F} \geq \frac{1.049}{\Delta t} & 5 \text{ s} < \Delta t < 10 \text{ s} \\ \bar{F} \geq 0.210 & \Delta t = 5 \text{ s} \end{cases} \quad (4)$$

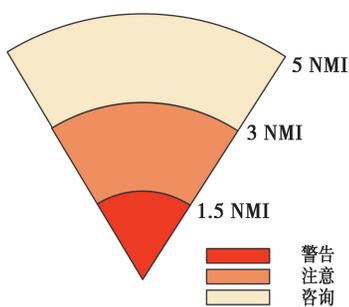
虽然PWS和RWS告警的主要依据都是 $F$ 因子,但两种告警获取参数的方式有所不同。RWS告警是借助机载飞行增稳计算机(flight augmentation computer,简称FAC),利用飞机惯性参数与空气动力学数据解算飞行动力学方程,计算飞机当前所处区域的 $\dot{W}_x$ (水平风速分量变化率)和 $W_h$ (垂直风速

分量),进而评估飞机能量持续损失衰减程度<sup>[8]</sup>。

与 RWS 告警依据 FAC 计算机不同,预测式风切变 PWS 告警原理是借助机载前视多普勒气象雷达向飞机前上方一定范围发射相干脉冲并接收反射回来的回波信号,测算前方湿空气团内的风矢量及其距离,其默认的雷达扫描俯仰范围是高于飞机纵轴 4°~8°仰角,水平范围是前方 1.5~3 NMI<sup>[14]</sup>(见图 1),根据测算出的前上方扫描区域内可见湿空气团的运动速度,以及当前飞机真空速计算 F 因子。所以 PWS 可以预警前方可能存在的风切变天气,但由于气象雷达仅能识别水滴的运动,因此 PWS 对于湿风切变(含有水分的风切变)探测更为有效。需要说明的是由于机载气象雷达默认的俯仰式扫描,因此 PWS 告警所探测到的风切变区域是位于飞机的前上方。



a) PWS 告警垂直扫描范围



b) PWS 告警水平扫描范围

图 1 PWS 告警示意图

### 3 进近阶段 RWS 事件高发特性分析

表 1 的统计数据表明 RWS 事件高发且主要集中在进近阶段,下面依据风切变告警原理,并结合 43 起 A320 系列机型的 RWS 风切变告警事件中的 QAR 数据分析其原因。图 2 和图 3 是对 43 起 A320 机型 RWS 告警事件中飞机相关参数统计,数据

表明:

- 1) 起飞阶段飞机重量集中在 60~65 t,进近阶段飞机重量集中在 55~60 t;
- 2) 起飞阶段指示空速集中在 150~165 kt,而进近阶段指示空速大部分为 130~135 kt。

可以看出,起飞爬升阶段飞机具有大重量、大姿态、低襟翼构型特点,空速偏大且处于增速过程,而进近着陆阶段飞机处于小重量、小姿态、高襟翼构型,相较于起飞爬升阶段飞机空速偏低且保持稳定。

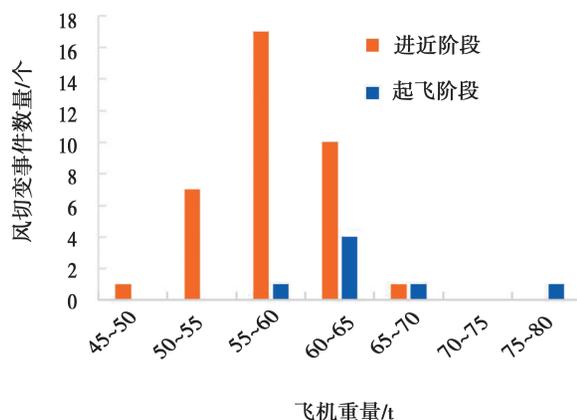


图 2 RWS 告警事件触发时刻飞机重量分布

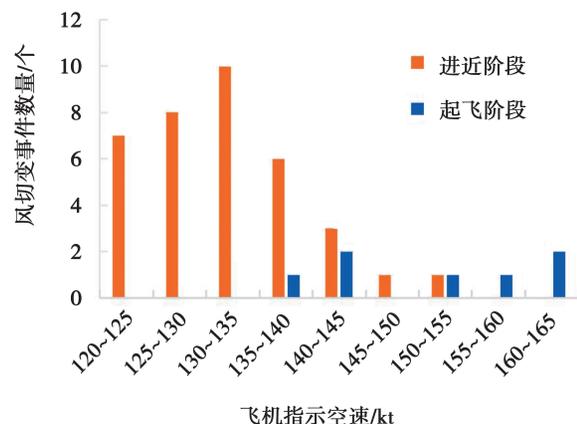


图 3 RWS 告警事件触发时刻飞机空速分布

根据 F 因子模型(公式 1),风切变导致的飞机能量衰减危险程度不仅取决于风切变本身的强度,还受到飞机空速大小的影响。在遭遇相同强度风切变时(即水平风速分量变化率与垂直风速分量都相同),起飞阶段飞机空速更高且此时飞机处于加速阶段,因此  $\bar{F}$  偏小且存在逐渐减小的趋势,不易

达到告警阈值;而进近阶段飞机空速偏小且飞机处于恒速飞行中,因此 $\bar{F}$ 偏大更容易达到告警阈值,这就验证了上述RWS告警事件占比较高且主要集中于进近阶段的结论。

#### 4 PWS告警事件分布特性分析

表1的统计数据还说明PWS事件总体占比较低(约为34.1%)且主要集中于起飞爬升阶段(约为26.2%),其主要原因与机载气象雷达的俯仰扫描角设置模式有关。从图1显示的机载气象雷达扫描原理示意图可知,其扫描主要水平范围是前方1.5~3 NMI,俯仰范围是飞机水平面以上 $4^\circ \sim 8^\circ$ 仰角,由此可推导出PWS告警时刻机载雷达探测到的风切变区域高度计算公式为:

$$H_{PWS} = H_{AC} + L_{PWS} \times \tan(\varphi_{AC} + 4^\circ) \quad (5)$$

式中: $H_{PWS}$ 是探测到的风切变区域底部高度(对于起飞爬升阶段的飞机)或者顶部高度(对于进近着陆阶段的飞机), $H_{AC}$ 是飞机发出PWS告警时刻高度, $L_{PWS}$ 是PWS告警时刻飞机至风切变区域的水平距离。设机载气象雷达水平扫描距离 $L_{PWS}$ 为1 NMI,根据公式(4)可计算出起飞爬升、进近着陆阶段几个典型状态(即不同高度不同俯仰姿态)的PWS所探测到的风切变区域高度,见表2。

表2 几个典型状态下PWS探测风切变区域高度

$H_{AC}/ft$	$H_{PWS}/ft$			
	$\varphi_{AC} = 0^\circ$	$\varphi_{AC} = 2^\circ$	$\varphi_{AC} = 4^\circ$	$\varphi_{AC} = 10^\circ$
0	425	639	854	1 515
50	475	689	904	1 565
100	525	739	954	1 615
200	625	839	1 054	1 715

受制于气象雷达俯仰扫描角度范围限制,不论是起飞爬升还是进近着陆阶段,PWS在最理想状态下(高度0~200 ft,飞机姿态角 $0^\circ \sim 4^\circ$ )仅对于1 000 ft高度以上区域的湿风切变可有效探测,而风切变天气主要发生于600 ft以下高度(见表1统计数据),这就解释了为什么现有机载气象雷达的俯仰扫描模式设置不利于发现大多数的风切变天气。

图4展示了起飞和进近阶段飞机俯仰角与高度的相关性。起飞阶段随着飞机高度增加,俯仰

角也逐渐增大(100 ft以上后达到 $15^\circ$ 规定姿态),而进近阶段俯仰角则稳定保持在 $2^\circ$ 左右。由此可以解释为什么PWS告警主要发生于起飞爬升阶段且高度集中于200 ft以下这一事实,因为当飞机起飞爬升到200 ft以后,飞机俯仰角也相应地增加到 $10^\circ$ 以上(见图4),而根据表1,此时气象雷达能够扫描到的风切变区域底已经超过1 700 ft,加之飞机空速不断增大,因此能够触发PWS告警的几率越来越低。

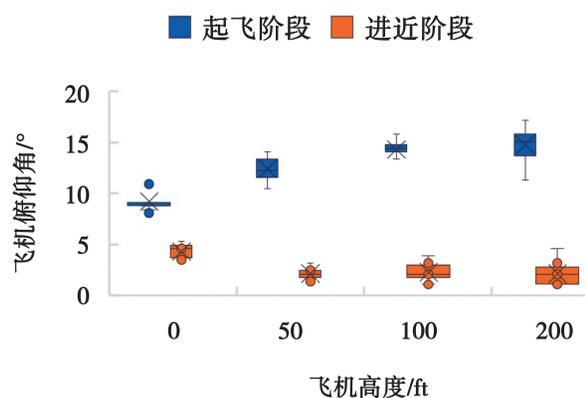


图4 起飞进近阶段飞机高度-俯仰角相关性

#### 5 关于PWS之后未续发RWS原因

对131起风切变告警事件的研究中发现:没有一起PWS事件之后出现RWS事件,即PWS之后未见续发RWS事件的案例。按机型手册<sup>[14]</sup>要求,进近阶段飞机的真空速约为140 kt,在发生PWS之后飞机水平位置移动到风切变附近需要约39 s(大约1 NMI),而此时飞机爬升的高度应当超过风切变发生的高度。由于飞行员响应需要一定时间,所以本文对43起A320系列机型启动风切变改出程序后30 s的飞机爬升高度进行统计(见图5)。结果表明不论进近阶段还是起飞阶段,飞机高度相较施加TOGA推力时刻均升高1 000 ft以上,结合表1统计数据,当到达风切变天气所在区域时其高度已越过风切变天气团,由此避免了RWS告警。由此也解释了为什么各机型的风切变改出程序均要求在任何情况下不论遭遇RWS或PWS,机组都应立即按程序实施改出操纵,使飞机尽快爬升增速以确保脱离可能存在的风切变天气区域。

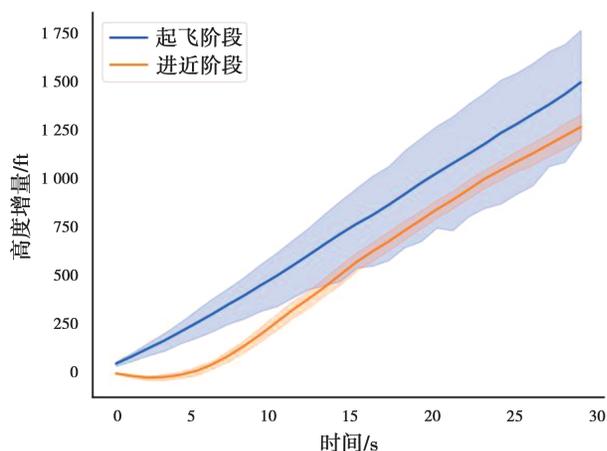


图 5 PWS 告警后实施风切变改出程序对飞机高度变化的影响

## 6 结论

本文利用航科院提供的触发风切变告警事件航班 QAR 数据研究了风切变告警事件分布规律,发现各类告警事件主要分布于飞机进近阶段且主要以反应式为主,起飞阶段告警少且主要为预测式。结合风切变告警原理,分析发现起飞阶段风切变告警少于进近阶段的原因是起飞阶段飞机空速较高且持续增速导致  $F$  因子不易超过告警阈值;起飞阶段告警多为预测式、进近阶段告警多为反应式的原因在于受机载气象雷达俯仰扫描模式限制,对于主要发生于 600 ft 以下的风切变难以有效探测。

### 参考文献:

- [ 1 ] 中国民用航空局. 航空器驾驶员指南:雷暴、晴空颠簸和低空风切变 [ M ]. 北京: 中国民航出版社, 2014.
- [ 2 ] 郭玮彪. 兰州中川机场风切变探测方法研究及特征分析 [ D ]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2022.
- [ 3 ] 张序, 刘岷江. 飞行中风切变的判断及处置 [ J ]. 中国民用航空, 2008(6): 62-64.
- [ 4 ] 郑磊, 池宏, 邵雪焱. 基于 QAR 数据的飞行操作模式及其风险分析 [ J ]. 中国管理科学, 2017, 25(10): 109-118.
- [ 5 ] 李旭. 基于飞行数据的民航客机重着陆可解释性研

究 [ D ]. 重庆: 重庆大学, 2021.

- [ 6 ] 李刚. 基于飞行训练数据的重着陆智能诊断研究 [ D ]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2021.
- [ 7 ] WANG L, ZHANG J Y, DONG C T, et al. A method of applying flight data to evaluate landing operation performance [ J ]. Ergonomics, 2019, 62(2): 171-180.
- [ 8 ] 郭超超, 赵慧冰. 基于 QAR 超限事件的可控飞行撞地风险分析与对策研究 [ J ]. 安阳: 安阳工学院学报, 2020, 19(4): 1-4.
- [ 9 ] HAVERDINGS H, CHAN P W. Quick access recorder (QAR) data analysis software for windshear and turbulence studies [ C ] // 1st AIAA Atmospheric and Space Environments Conference. San Antonio, Texas: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [ 10 ] 孙宏, 王静, 王东, 等. 低空风切变下 UPRT 特点研究 [ J ]. 现代计算机, 2022, 28(3): 19-24.
- [ 11 ] PROCTOR F H, HINTON D A, BOWLES R L. A wind-shear hazard index [ C ] // Preprints of 9th conference on aviation, range and aerospace meteorology, September 11-15, 2000, Orlando, Florida. [ S. l. : s. n. ], 2000: 482-487.
- [ 12 ] 于超鹏, 黄翔, 钱君, 等. TAWS 低空风切变探测与告警 [ J ]. 机械与电子, 2016, 34(8): 12-15; 20.
- [ 13 ] WOODSELL D L, FINLEY J A. Predictive and reactive windshear detection system and method; US 07557735B1 [ P ]. 2009-07-07.
- [ 14 ] Air Bus Company. A318/A319/A320/A321 Flight crew operation manual [ R ]. France: Air Bus Company, 2019.

### 作者简介

王奇男, 硕士。主要研究方向: 飞行品质分析。E-mail: wq22331456@163.com

张兆阳, 男, 硕士。主要研究方向: 飞行品质分析。E-mail: 18616539704@163.com

孙启祯, 男, 硕士, 实习研究员。主要研究方向: 民航空管装备。E-mail: sunqizhen@caacsri.com

焦洋, 男, 硕士, 副研究员。主要研究方向: 民航安全。E-mail: jiaoyang@mail.castc.org.cn

王东, 男, 硕士, 一级飞行员。主要研究方向: 飞行技术与航空安全。E-mail: wd-1120@163.com

孙宏, 男, 博士, 教授。主要研究方向: 民航运输管理, 飞行运行品质分析。E-mail: hanksun@263.net

## Research on the differential distribution of windshear warning events during takeoff and landing

Wang Qi<sup>1\*</sup> Zhang Zhaoyang<sup>1</sup> Sun Qizhen<sup>2</sup> Jiao Yang<sup>3</sup> Wang Dong<sup>1</sup> Sun Hong<sup>1</sup>

(1. Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618300, China;

2. The Second Research Institute of CAAC, Chengdu 610042, China;

3. China Academy of Civil Aviation Science and Technology, Beijing 100028, China)

**Abstract:** Windshear is a red unsafe event monitored by FAA, and understanding the distribution characteristics of windshear events can help the industry to carry out flight operation quality monitoring more effectively. In this paper, we analyzed the QAR data of flights triggering wind shear alerts in the past two years. From the warning altitude, more than 80% of RWS events occurred at low altitudes below 200 ft. From the distribution of warning events in flight phases, more than 65% occurred in the approach and landing phases and were mainly of RWS type, while less than 35% in the takeoff and climb phases and were mainly of PWS type. The significant variability in the distribution of warning events during takeoff and climb and approach and landing phases is related to the aircraft weight, airspeed, pitch attitude difference and the pitch and scan mode settings of the weather radar during the different phases.

**Keywords:** reactive windshear; predictive windshear; QAR data; F-factor; distribution variability

---

\* Corresponding author. E-mail: wq22331456@163.com