

大风背景下首都机场两条跑道低空风切变特征统计

李肖雅¹, 禹智斌^{2*}, 刘冬¹, 钟世斌¹, 苏豆豆¹

(1. 青岛华航环境科技有限责任公司, 山东 青岛 266000;
2. 哈尔滨工业大学(深圳), 广东 深圳 518055)

摘要: 利用北京首都机场 18R-36L、19-01 两条跑道南端入口附近的两台相干多普勒测风激光雷达的 RHI 扫描模式探测风速数据, 分别计算在不同的风速、风向区间内两条跑道及其南下滑道区域 600 m 高度下各高度层的径向风速平均偏差。结果表明: 在西北大风背景下, 18R-36L 跑道上空风速与同高度风速对比有偏小现象, 这与在相同背景风条件下三条跑道接地带区域观测到的风速特征相吻合。另外风速偏小现象在 300°~330°风向区间最显著, 且偏差最小值区域出现在 18R 跑道入口附近。通过风切变强度因子进一步统计在西北大风条件下 36L 和 01 跑道下滑道区域风切变发生的强度及位置。统计表明: 36L 跑道的风切变频次及强度整体高于 01 跑道, 其中 300°~330°风向区间两条跑道的风切变事件发生最频繁, 且顺风风切变频次明显高于逆风风切变频次, 但逆风风切变发生的高度比顺风风切变发生的高度要低。

关键词: 测风激光雷达; 风速偏差; 低空风切变; 统计分析

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210119

Low-level wind shear characteristic statistic of two runways of Beijing Capital International Airport based on strong wind background

Li Xiaoya¹, Yu Zhibin^{2*}, Liu Dong¹, Zhong Shibin¹, Su Doudou¹

(1. Qingdao Huahang Seaglet Environmental Technology Ltd., Qingdao 266000, China;
2. Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Data available in this study came from RHI scanning mode of two sets of coherent Doppler lidar which housed near the south entrance of runway 18R-36L and runway 19-01 in Beijing International Capital Airport, respectively. Average deviation of radial velocity at multiple heights below 600 meter above the ground level over two runways and their south glide path areas in different wind speed and direction ranges were calculated separately. Results show that under the strong northwest wind background radial wind speed over runway 18R-36L is relatively lower than other areas with same altitude, which is consistent with characteristic of wind speed observed in three runway touch down zones under the same wind background. In addition, this phenomenon is most significantly appeared in wind direction range of 300°-330° and the minimum negative deviation area appeared near the entrance of runway 18R. The intensity factor of wind shear was used for further statistics to determine the intensities and locations of low-level wind shear events along the glide path of runway

收稿日期: 2021-02-27; 修订日期: 2021-06-07

基金项目: 广东省重点领域研发计划 (2020B0303020001); 广东省基础与应用基础研究基金 (2020B1515120056); 民航安全能力项目 (TM2017-228-1/2)

作者简介: 李肖雅, 女, 工程师, 硕士, 主要从事测风激光雷达在民航、气象领域的的数据应用研究。

导师简介: 禹智斌, 男, 副教授, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为空间遥感探测技术、激光雷达探测技术、大气动力学及电离层。

36L and 01 in the strong northwest wind background. Statistics explain that the frequencies and the intensities of low-level wind shear happened on runway 36L are obviously higher than those happened on runway 01 in the same wind context. In 300°-330° direction range frequencies of low-level wind shear of two runways are both the highest and the frequency of following wind shear is significantly higher than the against wind shear, even though the heights of occurrence with following wind shear are relatively lower than the against wind.

Key words: wind lidar; wind speed deviation; low-level wind shear; statistic analysis

0 引言

低空风切变是指发生在 600 m 高度以下的平均风矢量在空间两点之间的差值,具有时空尺度小、突发性强的特点,是国际航空和气象界公认的飞机起飞和着陆阶段的无形杀手^[1]。低空风切变的发生有时是单纯大气运动造成的,有时是地理环境因素产生,或是上述两者综合所致,但气象是主要诱因^[2]。根据以往民航飞行事故统计,与低空风切变有关的飞行事故多发生在低空 300 m 高度以下的起飞和着陆过程中,尤其是着陆阶段^[3-4]。

首都机场位于北京市东北郊,地域开阔平坦,据多年地面自动站数据统计,机场冬春季易出现大风天气且以西北风向大风为主^[5],通过以往多次风切变天气个例分析发现,风切变的发生几乎都与大范围冷空气东移南下时在近地面形成西北大风有关^[6-7]。除大尺度天气影响外,机场及周边下垫面的影响也是机场低空风切变的原因之一。首都机场共 3 条南北向跑道,自西向东跑道编号依次为 18R-36L、18L-36R 和 19-01,经预报员长期观察发现,西北大风天气时利用 18R-36L 跑道进行起降收到的航空器风切变报告比其他两条跑道多,并初步认为这种现象可能与 18R 跑道距离周围建筑物和树木相距太近,冠层对跑道区域低空风产生了消减效应所致^[8]。

按民航相关规定机场配备的测风设备应包含地表风速计、天气雷达和风廓线仪等^[9],但在日常业务和研究中,首都机场低空风切变的观测和分析多基于跑道自观、天气图数据或数值模拟方法,但这些方式无法获取跑道及其外围区域真实的风切变观测数据,因此无法针对本场的地理和气候特点,就风切变造成的影响进行客观评估。近年来,随着各地机场飞行密度的激增,机场低空风切变探测技术的研究越来越得以重视,相较于传统天气雷达或测风设备,多普勒激光测风雷达具有高探测精度,不受地物杂波干扰,不

影响正常导航通信的特点,成为了晴空天气条件下机场探测低空风切变的有效工具和手段之一^[10]。在过去的研究中,测风激光雷达进行机场风切变观测多采用激光束与下滑道交叉扫描的探测方式,允许激光波束与下滑道存在一定范围夹角,并且下滑道风廓线数据的重构是假定在一定空间范围内风向具有一致性为前提展开的^[11-12]。由于雷达不能安装于跑道中心附近,这种测量方式将导致除下滑道与激光束的交点外,其余大部分数据点均不在下滑道所在的水平和高度位置上,另外激光束与下滑道之间的夹角会导致真实风速被放大或低估,造成风廓线上测风数据的偏差。

1 激光雷达及测量方式

在首都机场进行观测的两台测风激光雷达均为 WindPrint S40003D 型号,是一种小型化、全自动的相干多普勒测风激光雷达,其采用人眼安全 1 550 nm 激光波段,利用大气气溶胶后向散射特征实现对大气径向风速的测量,具有不影响目标运动,信号稳定,高精度、非接触等诸多优点^[13-14]。雷达的径向最大量程为 4~6 km,距离分辨率最小为 15 m,风速测量精度 0.1 m/s。根据机场用户的观测需求,冬春季采用平面位置显示(Plan Position Indicator, PPI)和距离高度显示(Range Height Indicator, RHI)模式进行交替扫描,监测跑道及起降区域低空风场变化;夏季则使用风廓线(Dopplar Beam Swing, DBS)扫描方式,监测跑道周围区域大气垂直对流运动。两部测风激光雷达分别放置于 36L 跑道及 01 跑道入口附近,与跑道入口的具体相对位置如图 1 所示,为便于区分文中用编号 01、02 分别代替。01 雷达放置在 36L 跑道入口南约 315 m,与跑道延长线的垂直距离为 135 m;02 雷达放置在 01 跑道入口南约 329 m,与跑道延长线的垂直距离为 145 m。文中仅采用激光雷达 RHI 扫描模式数据进行风切变的分析研究。考虑到雷达与跑道相

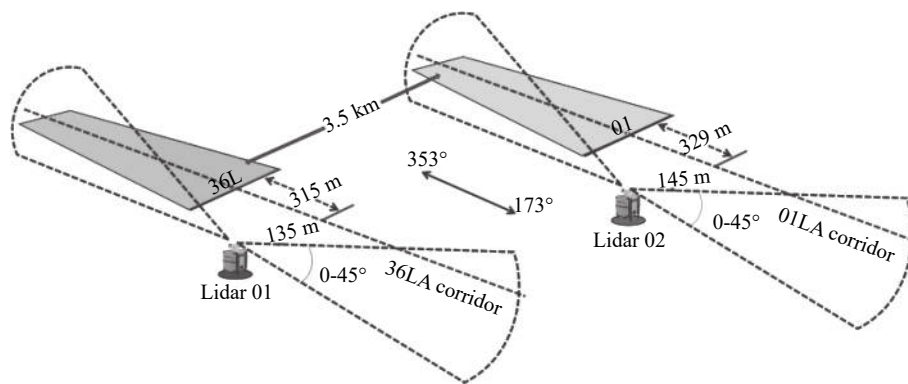


图 1 两台测风激光雷达的安装位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of installation position of two lidar

距不远,因此在平坦地形条件下可近似认为 RHI 观测区域与跑道区域风场具有相互代表性。

RHI 扫描模式是指雷达伺服固定方位角,激光光束以俯仰角变换的扫描方式获取径向风速数据,2019 年 1~4 月两部测风激光雷达共有 82 天的 RHI 扫描模式同期数据。两条跑道的磁方位相同,真方位差别不大,因此两部雷达 RHI 扫描模式的方位角设置均与跑道方向平行,为 353°和 173°,俯仰角设置为 1°间隔,0°~45°依次循环扫描。雷达完成一个方位角 RHI 扫描的时间约 45 s,记录的径向数据条数为 45 条。将同一部测风激光雷达连续执行的 353°和 173°两个方位角的 RHI 扫描数据面视为同一组分析数据,每 30 min 内雷达共采集到 4 组 RHI 模式数据。经统计 1~4 月期间两部雷达分别有 2535 组和 2532 组 RHI 观测数据。

2 数据处理方法

2.1 质量控制及极坐标转换

通过信噪比阈值对激光雷达数据进行质量控制。用 $P_S(N)$ 表示在一定时间内收集到信号光电子

数, $P_N(N)$ 表示同一时间内收集到的所有噪声光电子数,信噪比可以表示为:

$$SNR = \frac{P_S(N)}{P_N(N)} \quad (1)$$

通过对该型号设备大量历史观测数据统计得知,当雷达信噪比值低于 9 dB 时,对应的风速数据存在较多虚假值,为保证雷达测风数据的准确性,在进行数据统计前去除信噪比低于 9 dB 对应的测风数据。以每部测风激光雷达安装位置为坐标原点,将质量控制后,径向分辨率为 30 m、俯仰角间隔为 1°的一组极坐标激光雷达数据通过反距离加权插值法,转化为 20 m×20 m 距离分辨率的笛卡尔坐标数据。如图 2 所示,笛卡尔坐标系中待插值的数据点定会落在激光雷达 4 个数据点之间,若分别用 ρ 和 θ 表示极坐标数据对应的级径和级角坐标,那么测风激光雷达数据点在笛卡尔坐标系内对应的 x 、 y 轴坐标如公式 (2) 所示,其中 l 为激光雷达距离分辨率 30 m。公式 (3) 为反权重插值公式,假设笛卡尔坐标上点 $P(x', y')$ 落在极坐标系中的位置如图所示, $Z_1 \sim Z_4$ 为 P 点周围临近 4 个不为缺测值的极坐标数据点, $d_1 \sim d_4$ 分别为 $Z_1 \sim Z_4$ 到

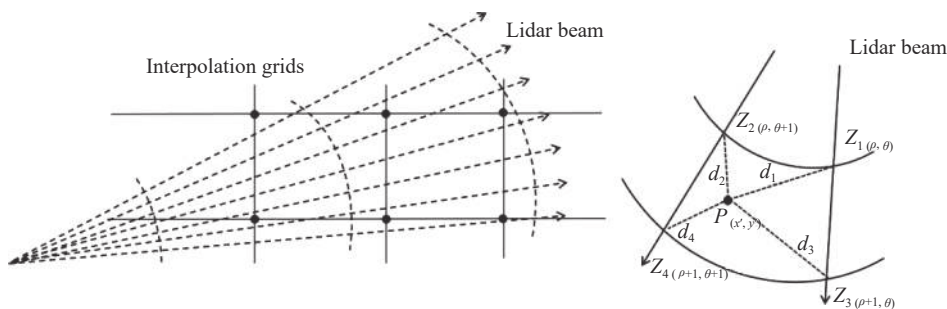


图 2 坐标转换示意图

Fig.2 Schematic diagram of coordinate transform

P 点的距离, 利用公式 (3) 可计算出 P 点在笛卡尔坐标中的风速值。

$$\begin{cases} x = (l-1) \cdot \rho \cos \theta \\ y = (l-1) \cdot \rho \sin \theta \end{cases} \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{aligned} d_{(i,j)} &= \sqrt{(x' - x_{(i,j)})^2 + (y' - y_{(i,j)})^2}, (i = \rho, \rho + 1; j = \theta, \theta + 1) \\ P(x', y') &= \frac{\sum_{j=\theta}^{j=\theta+1} \sum_{i=\rho}^{i=\rho+1} \frac{Z_{(i,j)}}{d_{(i,j)}}}{\sum_{j=\theta}^{j=\theta+1} \sum_{i=\rho}^{i=\rho+1} \frac{1}{d_{(i,j)}}} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

2.2 区间划分及偏差计算

提取首都机场 2019 年 1~4 月半小时 METAR 报

文中记录的平均风速风向信息, 将平均风速大于等于 5 m/s 的情况, 按 5~6 m/s、6~8 m/s、8~10 m/s 和 10~30 m/s 4 个范围划分, 再将每个风速范围, 按风向落在 150°~180°、180°~210°、210°~240°、240°~270°、270°~300°、300°~330°和 330°~360°7 个不同区间来划分, 总共 28 个统计区间。表 1 为按上述条件统计的各区间有效数据情况, 白色和灰色分别表示该区间有或无有效的测风数据, 去除无数据的区间后剩余 17 个统计区间。首都机场 1~4 月偏南风风向时 (150°~270°) 平均风速大多集中在 6 m/s 以下, 而偏北风风向时各风速段均有出现, 风向大于 330°时, 环境平均风速均大于 6 m/s, 可见冬春季节机场南风弱北风强, 大风天气多发生在偏北风条件下。

表 1 基于 METAR 报的风速风向区间划分

Tab.1 Division of wind speed and direction range based on METAR report

Wind speed/m·s ⁻¹	Wind direction range/(°)						
	150-180	180-210	210-240	240-270	270-300	300-330	330-360
5-6							
6-8							
8-10							
10-30							

将插值之后的测风激光雷达数据按观测时间落在 METAR 报文发报前后 15 min 范围内为原则进行时间上的匹配, 并分别归类到各个区间进行统计。研究和应用中认为遥感测风设备如测风激光雷达、微波风廓线雷达在相对平坦的地形条件下进行探测都是以假定同一高度风场均匀性为前提^[15-16]。首都机场的冬春季大风多是在大尺度冷空气系统过境影响下发生, 局地风湍流具有随机、瞬时和小尺度的特征, 经大量的平均数据统计这些随机湍流会被中和掉, 相同天气背景条件下由非大气因素形成的局部风场偏差会被显现出来。基于上述划分区间, 激光测风雷达测量区域在不同高度上的平均风速偏差通过以下方法求取:

(1) 对于每一组插值后的 RHI 数据, 以网格长度 20 m 为高度递进, 同一高度的径向风速为总样本, 按以下公式求每个高度单点风速与该高度平均风速的偏差:

$$x'_i = x_i - \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (4)$$

式中: x_i 为同一高度单点的径向风速值; n 为同一高度的数据样本总数。

(2) 求测量期间每个统计区间内各高度的风速偏差平均值。

2.3 各个风向区间偏差统计分析

图 3 和图 4 分别为 01 和 02 测风激光雷达在 17 个统计区间的径向风平均偏差图。横坐标为沿跑道平行方向与测风激光雷达位置的相对距离, 向北为负, 向南为正; 纵坐标为垂直高度, 阴影色标表示风速的偏差值, 单位为 m/s。如图可见在 150°~240°风向时, 首都机场 18R-36L 跑道上空区域风速总体表现为偏大, 19-01 跑道该区域风速变化则并不显著。在 270°~360°西北风条件下, 两条跑道低空区域都存在不同程度风速偏小的现象, 并且在 300°~330°风向区间负偏差值达到最小。风速偏小的区域主要集中在低空 400 m 高度以下, 跑道北入口内 1 km 范围, 随着西北风速增大, 该区域风速偏小的现象就越明显。对比可见, 西北风条件下 18R-36L 跑道风速偏小的现象比 19-01 跑

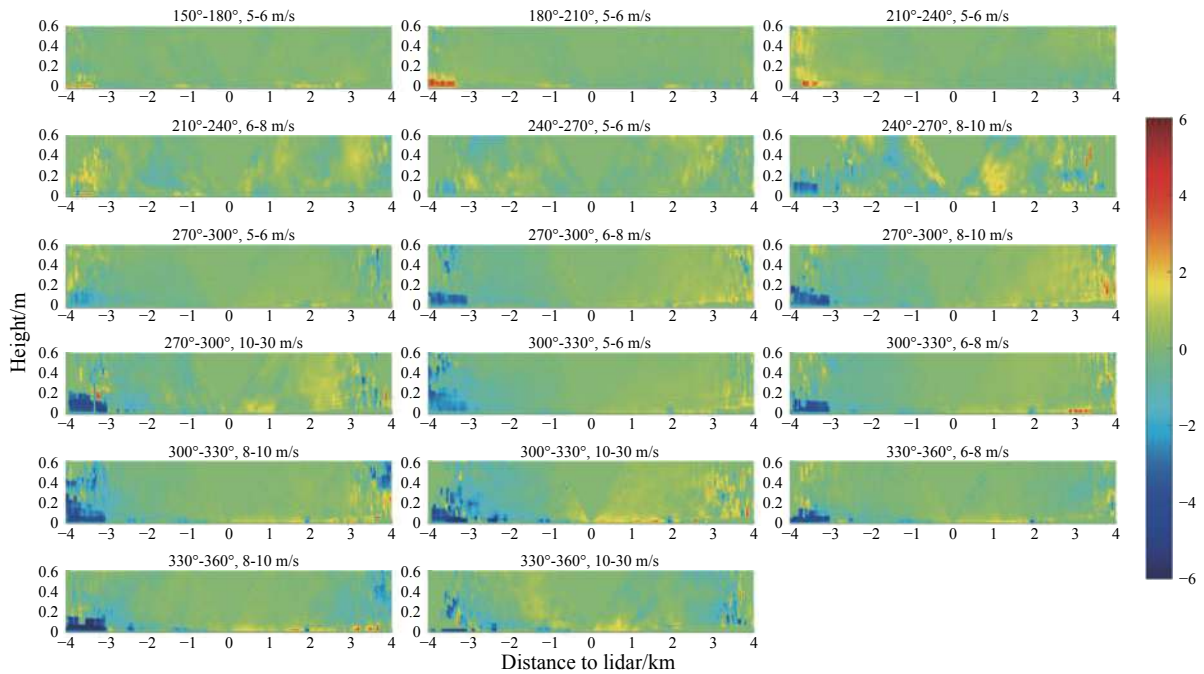


图 3 01 测风激光雷达在各个区间的径向风速偏差图

Fig.3 Radial wind speed deviation of lidar 01 in all different ranges

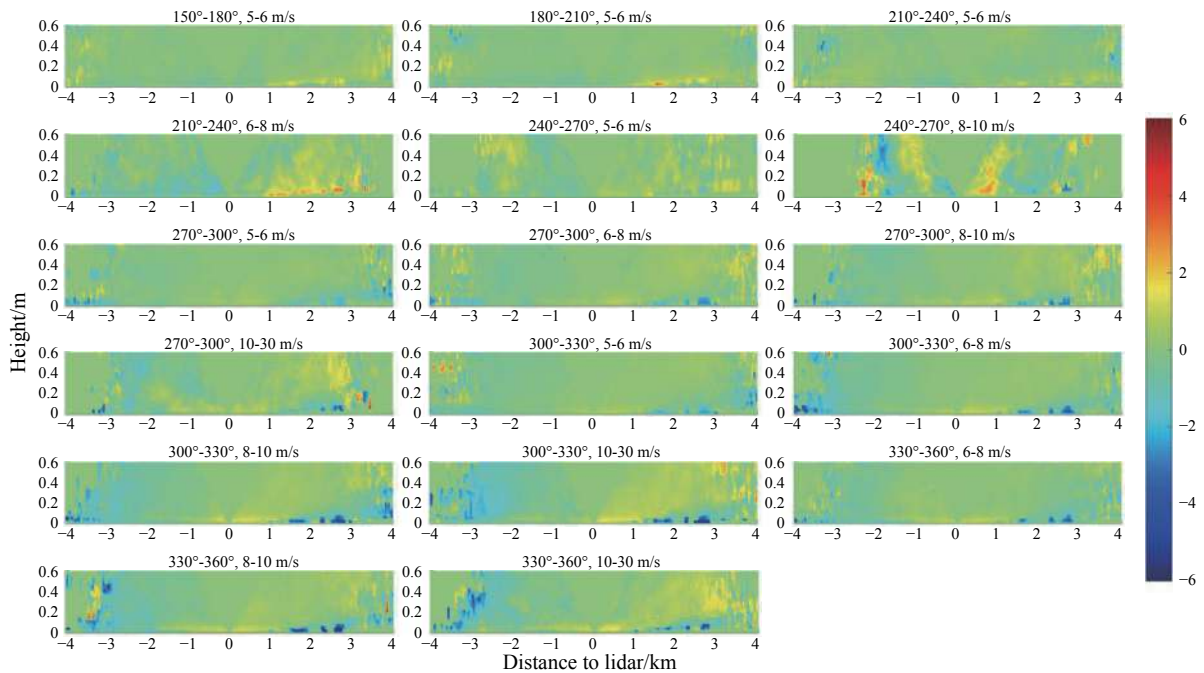


图 4 02 测风激光雷达在各个区间的径向风速偏差图

Fig.4 Radial wind speed deviation of lidar 02 in all different ranges

道要明显得多, 在平均风达到 10 m/s 以上时, 36L 跑道入口内风速负偏差值可达到-4~-6 m/s, 而 19 跑道入口风速负偏差大多为-2 m/s 左右。

两条跑道南向延长线低空区域的风速也出现了

明显不同的偏差变化趋势, 表现为 18R-36L 跑道南向延长线低空 100 m 以下风速为正偏差, 而 19-01 跑道该区域为负偏差。这可能是由于西跑道南向延长线区域是一片宽阔空地, 空气在此处聚流加速; 而东跑

道西侧为 3 号航站楼,在西北风情况下跑道周边区域由于建筑物尾流效应的影响导致风速减弱。

通过半小时发布的民航气象报文,对首都机场三条跑道南接地带区域风速按区间进行分类统计。具体为将 36L 跑道风速按 17 个区间划分,匹配其余两

条跑道在相同时刻,且风向区间相同的数据,求取三条跑道接地带在各区间的风速平均值。统计结果显示(图 5),相比其余两条跑道,在 270°~360°风向区间范围 36L 跑道风速存在明显偏小的现象,尤其在 270°~300°风向区间,36L 跑道与 01 号跑道相比差异最大。

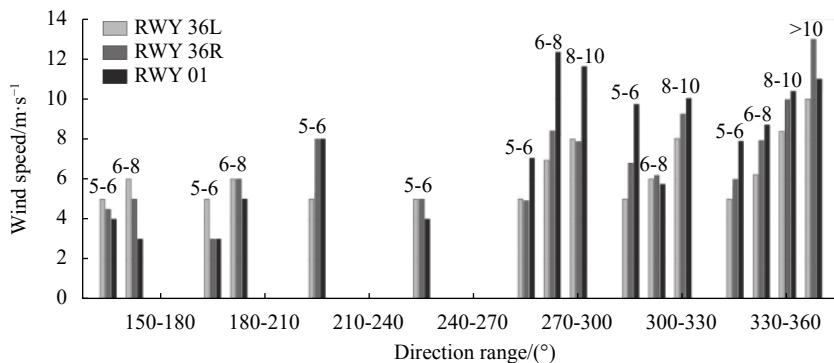


图 5 首都机场三条跑道南接地带风速的平均值统计

Fig.5 Statistics of average wind speed on south touch-down zone of three runways in Beijing Capital International Airport

3 下滑道风切变统计

下滑道是指飞机在进行着陆时相对地面的航迹^[17]。航空器以恒定空速进行五边进近时最优的下滑道角度是 3°,在西北风条件下首都机场 36L 和 01 跑道端

将用于降落,最优下滑道接地点位于跑道入口内约 450 m 处,如图 6 所示。通过分别查找测风激光雷达 173°方位角的 RHI 数据与下滑道空间上匹配的数据点,构建下滑道顶风廓线,并判断每条顶风廓线上是否存在风切变。

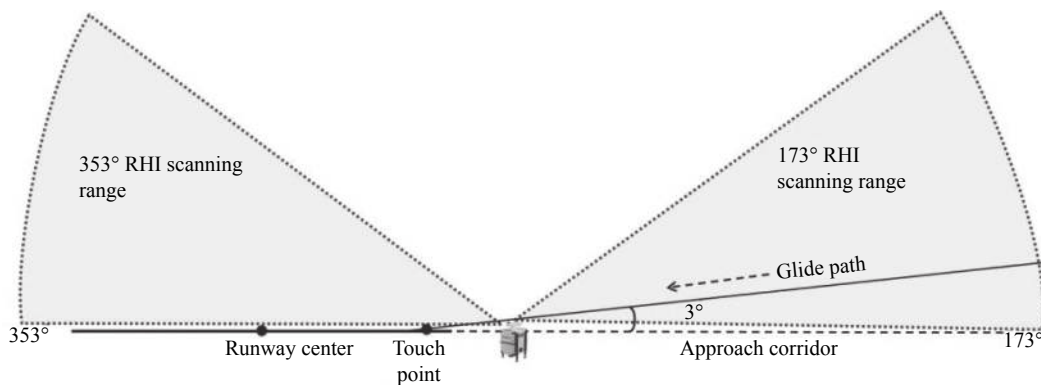


图 6 下滑道位置与激光雷达 RHI 扫描范围示意图

Fig.6 Schematic diagram of the relative position of glide path to lidar RHI scanning range

在以往研究中判断顶风廓线上是否存在风切变采用的是斜坡道检测的方法,为防止局部风速突变点对风切变判别的影响,检测前一般先对数据进行平滑处理,假定原始风廓线数据为 U ,经三点滑动平均处理后变为:

$$UI(k) = \frac{1}{3}U(k-1) + \frac{1}{3}U(k) + \frac{1}{3}U(k+1) \quad (5)$$

式中: UI 为经过平滑后的风速数据; k 为采样数据点。斜坡检测的方法是在平滑公式的基础上,利用差值公式判断两个采样点间的风速变化来确定风切变位置,但由于此方法检测样本间隔较大,且双斜坡检测的方法会跨越了两个风速的峰值区间,因此可能会造成有效数据丢失^[12],从而低估风切变的实际强度,因此采用逐点滑动检测的方法识别风切变可能更有效。

图 7 为下滑道上的顶风廓线示意图,横坐标表示到接地点的距离,左侧纵坐标为风速值,右侧纵坐标为下滑道高度,黑色粗斜线为 3°下滑道,黑色粗虚线为顶风廓线。以风廓线上距离接地点最远处风速点为检测起点,逐点滑动检测方法如下公式所示:

$$\begin{cases} UIW = UI(k) - UI(k + d) \\ R = L(k) - L(k + d) \\ UIW \geq 7.7 \\ 400 \leq R \leq 4000 \end{cases} \quad (6)$$

风廓线上两点间风速差用 UIW 表示,以国际民航组织规定的风切变阈值 15 kt(约 7.7 m/s) 作为风切变判断阈值^[18], k 为采样点, d 为采样间隔点, L 为廓线上的点到接地点的距离, R 为两点间距离差。在香港机场以往统计研究中发现, R 短于 400 m 的风切变历时太短(图 8(a)), 而 R 长于 4000 m 的风切变强度太弱(图 8(b)), 这些风切变往往不被飞行员觉察^[19-20], 因此统计中都不予以考虑。

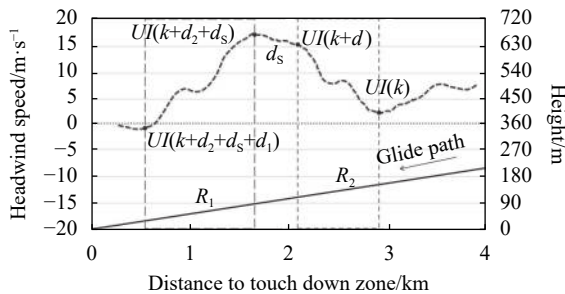


图 7 下滑道顶风廓线示意图

Fig.7 Schematic diagram of headwind profile on glide path

利用 Woodfield 和 Woods 提出的风切变强度因子公式计算每次风切变的强度因子 I ^[21], 来表征顶风廓线上达到风切变告警阈值的两点间的风速变化率, 并将强度因子绝对值最大值作为该次测量中风切变的告警数值依据。强度因子公式如下所示:

表 2 低空风切变频次统计

Tab.2 Statistics of low-level wind shear frequencies

Type	Runway number	Wind direction range/(°)		
		270-300	300-330	330-360
Against the wind shear	01	6	15	5
	36L	4	13	9
Following the wind shear	01	4	12	7
	36L	19	61	22

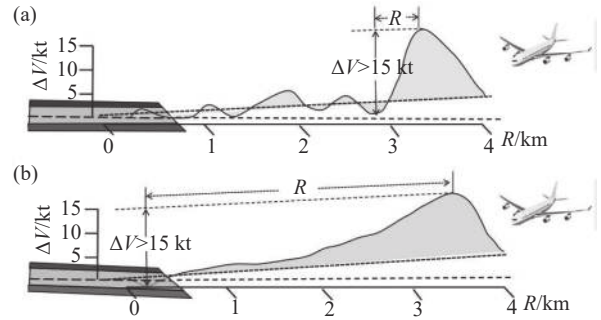


图 8 风廓线上两点间的距离与风速变化的关系示意图

Fig.8 Schematic diagram of relationship between the distance of two points on the wind profile and the change of wind speed

$$I = \frac{dV}{dt} \left(\frac{\Delta V}{V_{app}} \right)^2 = \frac{1}{V_{app}} \left| \frac{\Delta V}{R^{1/3}} \right|^3 \quad (7)$$

式中: $\frac{dV}{dt}$ 为风速变化率; ΔV 为廓线上两点间的风速差; V_{app} 为飞机标准进近速度, 参考香港机场风切变系统取 144 kt(约 74 m/s)。文中统计了满足公式(6)的设定条件, 且强度因子值不小于 1.5×10^{-3} (对应 $R=4000$ m) 的风切变事件。

一条风廓线上可能同时存在顺风切变和逆风切变, 着陆过程中顺风风切变对航空器的危害程度要大于逆风风切变, 因此逐点检测法首先要查找风廓线上是否存在顺风风切变, 如果存在, 则先确定顺风风切变所在位置区间, 再在该区间以外判别逆风风切变。图 7 展示了一次顶风廓线上同时存在顺风和逆风切变的情况, R_1 为顺风风切变区间, $k + d_2 + d_s$ 为起始位置点, d_1 为区间跨越的风速样本数。 R_2 为利用 R_1 区间以外的数据, 再次进行逐点判别后确定的逆风风切变区间, 其起始位置为 k , 与 R_1 相距 d_s 个采样点, 跨越的风速样本数为 d_2 。

表 2 为 2019 年 1~4 月期间, 实况风向为 270°~360°时, 36L 和 01 号跑道下滑道顶风廓线上的风切变频次统计, 两条跑道的逆风风切变告警次数都是

26 次,告警率约为 1%,但 36L 跑道的顺风风切变告警次数为 102 次,其中风向 300°~330°区间告警次数为 61 次,明显高于 01 号跑道的告警次数,告警率达到 4.2%,而 01 跑道该风向区间顺风风切变告警率仅为 0.95%。

图 9 为风切变强度发生强度箱线统计图,纵坐标表示风切变强度因子值,横坐标表示不同类型风切变。上下异常值截断线(内限)为 1.5 倍箱宽,中位线上方数值对应中位线具体数值,内限下方数值为风切变样本数,红色点表示异常值。统计表明 36L 跑道的强度因子整体高于 01 跑道的强度因子,该跑道顺风风切变强度因子的离散性相对较大。

图 10 分别为 36L 和 01 号跑道风切变发生的水平和垂直位置箱线图,纵坐标表示跑道和风切变类型,横坐标分别为风切变位置与跑道入口的相对距离或高度。蓝色虚线表示跑道南延长线,红、黑色箱线

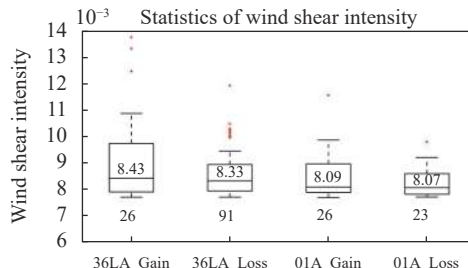


图 9 36L 和 01 号跑道风切变强度箱线图

Fig.9 Box plots of wind shear intensity on runway 36L and runway 01

分别表示风切变开始和终止的水平位置(图 10(a))或垂直高度(图 10(b))。可见两条跑道风切变水平起始位置大多集中在跑道入口外 4~3 km,对应的垂直高度在 200~140 m 左右。顺风风切变终止位置大多集中在跑道外 2~1 km,对应的垂直高度范围分别在 100~50 m 和 125~75 m 左右。总体而言,逆风风切变强度比顺风风切变强度强,但是顺风风切变发生的高度总体比较低。

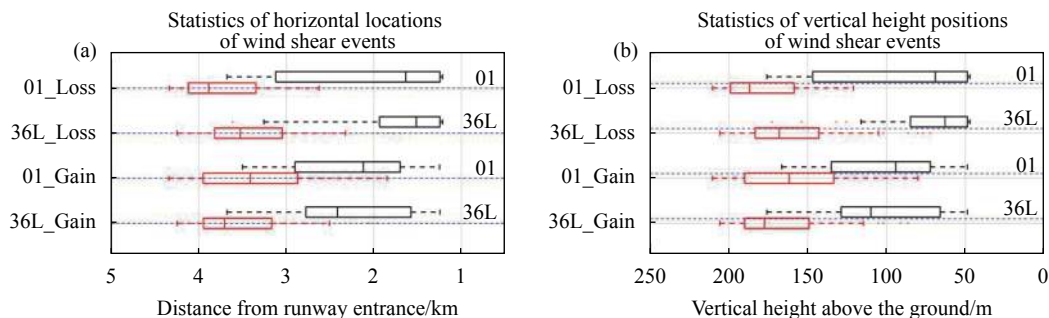


图 10 36L 和 01 号跑道风切变水平位置 (a) 和垂直高度 (b) 位置箱线统计图

Fig.10 Box plots of horizontal locations (a) and vertical height (b) positions of wind shear events on runway 36L and runway 01

4 结 论

激光测风雷达数据分析结果表明:在西北风背景条件下,首都机场 36L-18R 跑道相比于 19-01 跑道确实存在明显的风速偏小现象,在 300°~330°风向区间 36L 跑道接地带风速负偏差达到最小。风速偏小的数值及空间范围随环境风速增大而增加,主要集中在 400 m 高度以下,跑道入口内 1 km 的空间范围。通过对民航报文发布的机场三条跑道南接地带的风速进行统计也印证了 36L 跑道风速偏小的现象。

基于激光测风雷达 RHI 数据构建 36L 和 01 两条跑道的下滑道顶风廓线数据,并利用风切变强度因子

统计西北大风条件下两条跑道的风切变强度及发生位置。统计表明:36L 跑道的风切变频次明显多于 01 跑道,且大多数的风切变事件集中在 300°~330°风向区间。另外不论顺风还是逆风风切变,36L 跑道的发生概率均高于 01 跑道。就风切变性质而言,两条跑道的顺风风切变强度比逆风风切变整体强度弱,但顺风风切变发生的高度总体比逆风风切变低。

参考文献:

[1] Chen Yanliang. Aeronautical Meteorology of Modern Transport Aircraft[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1992. (in Chinese)

- [2] Wang Qingmei, Guo Lile. Development of lidar in detection of low altitude wind shear [J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(12): 1324-1328. (in Chinese)
- [3] Jacobi C, Siemer A H, Roth R. On wind shear at fronts and inversions [J]. *Meteorology & Atmospheric Physics*, 1996, 59(3-4): 235-243.
- [4] Peng Xiaofei. Analysis of the influence of low-level wind shear with aircraft on approach and landing phase [J]. *Science & Technology Economy Market*, 2010(7): 34-36. (in Chinese)
- [5] Sun Siyu. Analysis of the variation characteristics of surface wind speed in capital airport in 15 years [J]. *Scientific and Technological & Innovations*, 2018, 116(20): 93-94. (in Chinese)
- [6] Ma Minjin, Lin Chao, Zhao Surong, et al. Analysis and a numerical study of low-level wind shear over beijing capital International airpor [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2013, 49(3): 70-76. (in Chinese)
- [7] Ji Pengfei, Ding Yanli, Li Sheng. Analysis on the features of two low level wind shear and atmospheric circulation situation in beijing capital international airpor [J]. *Air Traffic Management*, 2013(2): 44-47. (in Chinese)
- [8] Zhang Ning, Jiang Weimei. Numerical simulation of the airflow influence on buildings within urban canopy[C]//The First Yangtze River Delta Science and Technology Forum-Meteorological Science and Technology Development Forum, 2004. (in Chinese)
- [9] ICAO. Manual on Low-level Wind and Turbulence[M]. Montréal, Canada: International Civil Aviation Organization, 2005: 10-47.
- [10] Lee Y F, Chan P W. LIDAR-based F-factor for wind shear alerting: different smoothing algorithms and application to departing flights [J]. *Meteorological Applications*, 2014, 21(1): 86-93.
- [11] Zhang H W, Wu S H, Wang W C, et al. Airport low-level wind shear lidar observation at Beijing Capital International Airport [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 96: 113-122.
- [12] Jiang Lihui, Yan Yan, Xiong Xinglong, et al. Doppler lidar alerting algorithm of low-level wind shear based on ramps detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 0106001. (in Chinese)
- [13] Chen Xing, Li Zhen, Zhuang Zibo, et al. A small scale wind shear detection algorithm of modified F-factor for wind-profiling lidar [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(4): 927-935. (in Chinese)
- [14] Hu Yang, Zhu Heyuan. 1.55 μm all-fiber coherent Doppler lidar for wind measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S1): S130001. (in Chinese)
- [15] Li Li, Wang Chanzhao, Xie Yafeng, et al. Wind field inversion technique for scanning wind lidar [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2): 251-258. (in Chinese)
- [16] Wang Guining, Liu Bingyi, Feng Changzhong, et al. Data quality control method for VAD wind field retrieval based on coherent wind lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(2): 0230002. (in Chinese)
- [17] Federal Aviation Administration. Airplane Flying Handbook[M]. Translated by Chen Xinhe. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2010. (in Chinese)
- [18] Que Guoliang. Low-level wind shear and its impact on flight [J]. *Flight Dynamics*, 1990(1): 70-76. (in Chinese)
- [19] Chan P W, Shun C M, Wu K C. Operational LIDAR-based system for automatic windshear alerting at the Hong Kong International Airport[C]//2th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, 2006.
- [20] Shun C M, Chan P W. Applications of an infrared Doppler lidar in detection of wind shear [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2008, 25(5): 637.
- [21] Jones J G, Haynes A. A peakspotter program applied to the analysis of increments in turbulence velocity[R]. US: Royal Aircraft Establishment Technical Report 84071, 1984.