

一次低空水平风切变的小尺度特征分析

张银昌^{1,2} 黄 菲³

(1. 北京大学物理学院,北京 100081; 2. 中国民航青岛空管站气象台;
3. 中国海洋大学海洋气象系)

提 要: 低空风切变对日益繁忙的机场越来越构成威胁,为了解其发展过程和规律,就青岛机场2002年3月20日06时37分左右(UTC)发生的一次强低空风切变进行了小尺度特征的分析,揭示了这种风切变产生的小尺度风压场调整过程的特征。分析的资料是从机场的自动观测系统中提取的风切变前后10分钟的数据。分析发现,在此过程中,最强风切变阶段主要表现为风向的强气旋式切变,而在开始和结束阶段则以跑道南北两侧水平风速切变为主。在风向切变急剧加强阶段,风场向气压场的调整过程占优,导致气压的快速升高,而当气压场向风场的调整过程占优时,跑道南北两侧的风向差又迅速减小。这种局地小尺度水平风切变的产生和发展,是由风场和气压场之间的相互调整以达到平衡的过程决定的,而这种小尺度的风压场相互适应过程所需要的特征时间则决定了风切变的持续时间。同时还分析了产生这种低空风切变的大尺度天气形势的特点,旨在探索产生强风切变的诱因,有助于预测低空风切变的产生,对飞行人员和航管人员都具有十分重要的意义。

关键词: 低空风切变 风压场调整 小尺度

Analysis of a Small-scale Low Level Horizontal Wind Shear Process over Qingdao Airport

Zhang Yinchang^{1,2} Huang Fei³

(1. Physical College of Peking University, Beijing 100871; 2. Air Control Management of Qingdao Airport;
3. Department of Marine Meteorology, Ocean University of China)

Abstract: Small-scale characteristics of a low level horizontal wind shear process occurring in Qingdao Airport on 20 March 2002 are studied. The results show that the small-scale adjustment process between wind field and pressure field is produced by the strong wind shear. The large-scale background synoptic process is also investigated and it is found that a fast-moving cold front causes the strong low level wind shear process over the Qingdao Airport. Exploring the induce

ment of strong wind shear and making prediction of wind shear are very important for flight staff and aviation controller.

Key Words: low level wind shear adjustment between wind field and pressure field small-scale

引 言

风切变是指在短时间风向风速发生明显变化的现象。水平方向上两点间单位距离内风速或风向的变化,称为水平风切变,而在垂直方向上的变化称为垂直风切变(航空上把垂直气流也称为垂直风,对飞行安全影响也很大)。低空风切变是指发生在距离地面 600m 高度以下的水平风的垂直和水平切变。造成低空风切变有诸多原因:下击暴流、阵风锋、快速移动的冷锋两侧、低空逆温层、低空急流等^[1]。低空风切变是造成众多飞行事故的原因之一,主要表现在对飞机起飞和降落的影响^[1-3]。对 1964—1988 年世界上发生的飞行事故统计得出,至少有 52 起主要是由风切变原因诱发的。由于低空风切变具有高度低、时间短、尺度小、强度大及难以预测等特点,对起飞上升和着陆下滑过程中的飞机威胁极大,往往造成飞行事故^[1],因此低空风切变被称为航空飞行的恶魔^[4]。

低空风切变警报系统(LLWAS)1970—1980 年代由美国联邦航空局(FAA)研发^[5],首先在 Denver 机场安置实验,现在已经在美国普遍应用。我国香港机场较早装有完善的风切变与湍流警报系统^[6],我国大陆只有广州白云机场 1998 年在香港科技大学的帮助下布置了一套基于自动气象站的低空风切变警报系统,用观测点上的数据和地形资料产生一个满足连续方程和热力学方程的 3 维风场,利用诊断模式发展了一个新的风切变警报系统,无论是理想的还是实际的情况,结果都和 LLWAS 类似算法的结果一致^[7]。但由于技术和资金原因,大多机场还无法实现风切变的监测,只有通过事后的诊断分析找出

发生的风切变原因以及相关要素瞬变的规律性,作为以后预报的依据。目前,国外的机场主要配备的是多普勒气象雷达或一种有 6 个最多达 32 个改进型测风点组成的低空风切变警报系统,收集的风矢量数据能及时探测出风切变的存在。对于风切变的发展演变规律,由于其极短的生命史和极小的空间尺度特征而少有研究和分析,许多机场仅就当地风切变产生的大尺度天气形势和环流特征进行分类和总结^[8-15],有关数值模拟和预测方面的研究也不多见^[16]。因此我们期望通过分析了解机场发生的风切变的小尺度发展过程和规律,便于机场气象台进行及时预报、警报。

1 大尺度天气形势分析

2002 年 3 月 20 日从西伯利亚来的较强冷空气正在快速向东扩散,在 00 时(UTC,下同)地面图上(图 1),锋面已靠近山东半岛,锋后等压线密集,气压梯度较大,高压中心强度达 1040hPa。地面锋线位于 850hPa、700hPa 槽线附近,北段槽线还前倾,因而锋面坡度较大,锋面两侧各气象要素差异也大。在 850hPa 高空图上(图 2)槽后是较深的冷槽,而槽前则是明显的暖脊,温度槽落后于高度槽,且槽后槽前等高线与等温线都几乎完全垂直,表明槽后有极强的低空冷平流,槽前有极强的暖平流,预示着该系统将有强烈的发展^[17],由于垂直于槽线的平流分量近似等于实际风速,槽线移动较快且进一步发展加深。同时冷暖平流在槽线前后呈对称分布(图略),即温度切变明显。如果冷暖气团的温差愈大,锋面坡度愈陡,则斜压性愈强^[17],这导致锋面前后风速差的增大。而此时青岛机场位于锋前西南风气流和强的暖平流区域中。

高空从 850hPa 到 500hPa 山东半岛处于

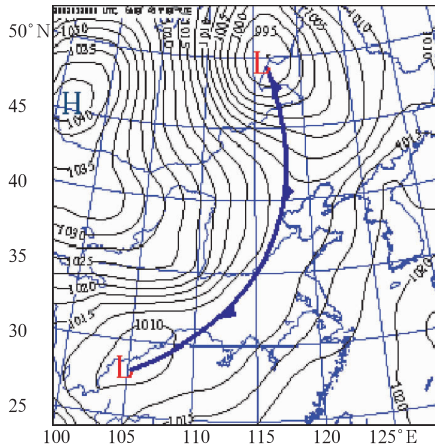


图 1 2002 年 3 月 20 日 00UTC 地面形势图

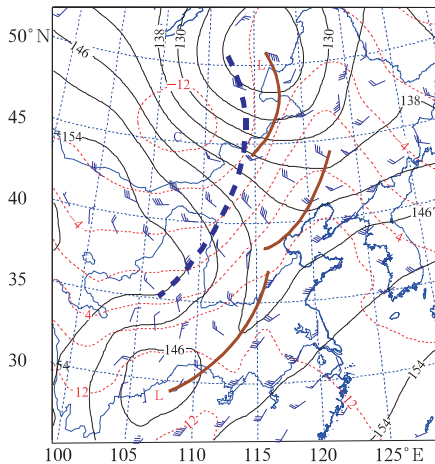


图 2 2002 年 3 月 20 日 00UTC 850hPa 高空形势图
实线为等高线,虚线为等温线,粗实线
为 850hPa 的槽线,粗虚线为 500hPa 槽线

槽前西南气流控制中,图 2 中 850hPa 槽较深,而较深的槽中垂直运动也较强^[17],由于动量的下传,地面风得到加强,流亭机场从上午到午后南风都在 $6\sim 9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。当锋面快速移到机场时,各气象要素的转变没有一个渐变过程,过渡区狭窄,从而产生强烈的风切变。

研究证明:当锋面过渡区较宽,风向风速渐变,风切变强度弱,对飞行基本没影响;若锋面较陡,锋面两侧温度大于 5°C ,锋面移动速度大于 $15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,锋面两侧就会出现较强的风切变^[18]。本次风切变过程锋面移动速度达到了 $15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,锋面从 00 时位置到达本场经过了 6 个多小时,速度大约是 $16\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,充分满足发生风切变的条件。

2 风切变的小尺度特征分析

从自动观测系统的记录中,我们调出了这一天气过程的全部记录,经分析,选取了风切变前后 4 分钟的风向风速以及气压资料:自记系统每 10s 一个记录,分跑道南北两个观测仪。青岛机场跑道磁向 $171^\circ\text{—}351^\circ$,2002 年时跑道长 2600m (2004 年延长至 3400m),风速计各距跑道两端 220m。表 1 记录了 4 分钟内跑道南北两端的风向风速、温度和场压(QFE)的变化过程,取 20s 间隔一个记录。可以看出,跑道两端风向风速发

表 1 2002 年 3 月 20 日 0636—0640UTC 风向风速和场压记录

时间 UTC(时分秒)	北端风(风向/风速)	南端风(风向/风速)	温度/ $^\circ\text{C}$	场压/hPa
063604	190.0/6.5	210.0/7.3	20.1	1006.7
063624	200.9/4.2	210.0/6.1	20.1	1006.8
063644	210.4/5.0	210.0/6.9	20.0	1006.9
063704	252.2/5.0	205.4/6.0	20.0	1007.0
063724	290.0/7.1	210.0/6.0	19.9	1007.3
063744	291.6/10.3	220.0/5.2	19.9	1007.6
063804	269.9/14.1	224.6/5.5	19.8	1008.0
063824	311.6/19.5	230.0/5.6	19.7	1008.5
063844	317.1/16.7	240.0/5.6	17.6	1008.8
063904	321.6/14.8	262.0/5.5	16.6	1008.7
063924	316.6/11.2	259.1/6.8	16.2	1008.5
063944	315.0/11.9	290.0/7.0	16.0	1008.3
064004	312.9/12.2	300.4/8.8	15.7	1008.4
064024	308.7/12.6	310.0/14.2	15.5	1008.4

风向单位:度;风速单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

生较大差异约在 06:37 左右,场压的变化基本和北端风速仪一致,但滞后北端风速 20s,在 06:38:24 时刻北端风速达到了其最大值 $19.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。而南端风速仪在滞后约 2 分钟后才转为北风且达到其最大风速 $14.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,此后南北两端风速趋于一致。

图 3 是跑道南北两端风随时间变化的矢量图,可以明显地看出北侧风切变产生时(06:37:24)有一个非常强的随时间顺时针方向旋转的风向突变,而跑道南侧的顺时针方向风转换则比跑道北侧晚 2 分钟(06:39:44),由于这个时间滞后,在南侧这种顺时针突变发生前,跑道北侧先转为西北风,跑道南侧依然保持西南风,所以跑道中间产生强烈的气流辐合和明显的气旋式风向切变,当跑道南北两侧均转为风向一致的北风后(06:40:24),也即风向切变不存在时,由于南侧跑道的西北风风速大于北侧的风速,气旋式的风速切变依然存在。结合图 4 中风速和场压随时间的演变过程图,分析表明,在风向切变产生之前的一分钟内(06:36:04—06:37:04),虽然跑道两侧都处于大尺度冷锋前的西南风气流中,但北侧跑道的风速小于南侧跑道的风速,表明已经有较弱的气旋式风速切变的产生,因而有弱的气流向跑道中部辐合,对应着气压的缓慢升高。当跑道北端风速突然转成北风后,由于南端跑道依然保持偏南风,产生强烈的气旋式风向切变,该阶段跑道北端的风速远大于跑道南侧的风速,故在跑道上形成强烈的气流辐合,并随着冷空气的侵入,温度也随之下降,导致跑道上气压的快速升高(06:37:24—06:38:44),在 06:38:44UTC 时达到最大气压 1008.8hPa,这个过程反映了以风场向气压场调整为主的适应过程。之后由于跑道上的气压升高,与跑道南北两端形成小尺度的气压差,这种气压差造成气流从跑道上向其南、北两侧流动,因而在跑道北侧产生南风异常,导致北端的北风风速迅速减小,而在跑道南端产生北风异常,大约 1 分钟调整后在 06:39:44UTC 时跑道南端的风速仪

也观测到了北风,此过程主要体现了以气压场向风场调整为为主的适应过程,在此过程中跑道中部的气压略有下降,在 06:39:44UTC 之后当跑道南北两侧都变为北风时,风压场之间的这两种调整过程达到平衡,跑道上的气压也就稳定下来,标志着这个小尺度的风切变过程的基本结束。由此可以看出,跑道两端的风在极小的时间尺度上随时间有明显的风向风速的脉动,且脉动不同步,这种差异造成了跑道上的水平风切变(包括风向和风速的切变)。

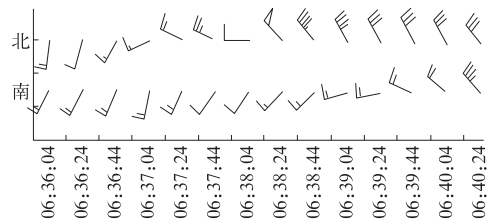


图 3 跑道南北两端风矢量随时间的变化

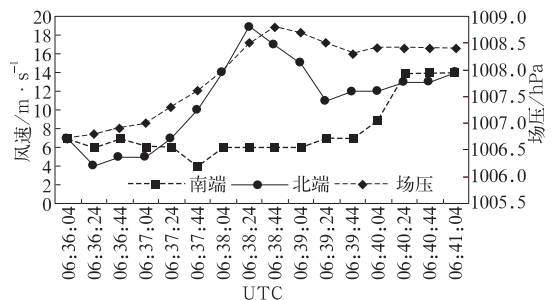


图 4 跑道南北两端风速及气压随时间的变化

进一步分析表明,风切变的时间尺度很小,此次过程仅 4 分钟的时间,跑道两端风向风速差异很大,且以风向差异造成的风切变强度最强。图 5 给出了同一时刻跑道两端的风向差和气压差随时间的变化曲线,气压差是指用每个时刻的场压减去开始时刻的场压所得到的。可以看出有 6 个时刻风向差超过 50° ,最大 80° ,而气压差最大 2.1hPa,这足以使风速产生瞬间的增大,从而引发风切变。具体来看,跑道南北两端的风向差从 06:37:04 突然急剧增大,在 06:37:24 达到最大值,早于北端风速达到最大值的时间约 1 分钟,且风向差表现为双峰结构的特点,在风向差

出现第二个峰值时,也就是第一个峰值出现 1 分钟后的 06:38:24,跑道北端的风速达到最大值,随后气压也达到其最大值。

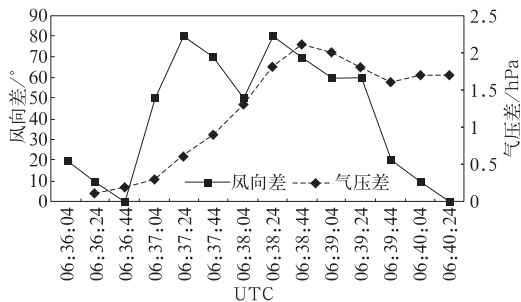


图 5 风向差及气压差随时间的变化

由此可见,这次强风切变过程主要表现为水平风向切变的急剧变化特征,只有在切变产生的初期和结束时表现为风速的气旋式切变,在风向切变急剧加强阶段,风场向气压场的调整过程占优,导致气压的快速升高,而当气压场向风场的调整过程占优时,跑道南北两侧的风向差又迅速减小。而温度的变化则完全是由锋后冷空气的侵入引起的,从图 6 可看出,在 06:38:24,温度有一个突变的拐点,呈直线下降,此时正是跑道北端北风达最大时。

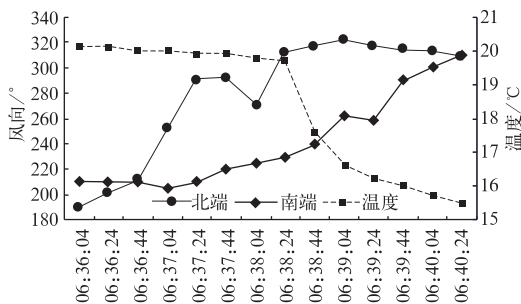


图 6 风向和温度随时间的变化

3 结 语

这次风切变过程,是由快速过境的冷锋过程造成的,前后共持续了约 10 分钟,强切变过程只维持了 4 分钟左右,是一个小尺度过程,其特点主要表现为:

(1) 最强风切变阶段主要表现为风向的

强气旋式切变。

(2) 在开始和结束阶段则以跑道南北两侧水平风速切变为主。

(3) 在风向切变急剧加强阶段,风场向气压场的调整过程占优,导致气压的快速升高。

(4) 当气压场向风场的调整过程占优时,跑道南北两侧的风向差又迅速减小。

(5) 这种局地小尺度水平风切变的产生和发展是由风场和气压场之间的相互调整以达到平衡的过程决定的。

(6) 这种小尺度的风压场相互适应过程所需要的特征时间则决定了风切变的持续时间。

参考文献

- [1] 刘志华,顾志涛. 低空风切变对飞行的危害及对策研究[J]. 飞行试验, 1998, 14 (1): 35-37.
- [2] 赵树海. 低空风切变与飞机起落安全[J]. 江苏航空, 1989, (4): 24-29.
- [3] 王朝霞. 低空风切变对飞机起飞及着陆的影响[J]. 陕西气象, 2001, (4): 9-11.
- [4] 李春生. 低空风切变—航空飞行的恶魔[J]. 中国民用航空, 2002, 18: 59.
- [5] 陈林. 风切变预警系统[J]. 民航经济与技术, 1998, 195: 41-44.
- [6] 庄卫方. 香港机场风切变与湍流报警系统简介[J]. 民航经济与技术, 1999, 213: 54-55.
- [7] 周洲,祝小平,张肇焱. 风切变飞行控制决策过程的计算化[J]. 西北工业大学学报, 1999, (1): 17.
- [8] 张路彤,贾东红. 一次低空风切变过程的初析[J]. 山西气象, 1991, (2): 23-26.
- [9] 冯彦华. 白云机场低空风切变的时空特点及其大气环流形势分析[J]. 广东气象, 2004, (4): 5-7.
- [10] 俞飞,姬鸿丽. 低空风切变的分析与预报[J]. 四川气象, 2001, 77(3): 18-19.
- [11] 陈礼义. 青岛机场一次冷流降雪诱发风切变过程分析[J]. 中国民航飞行学院学报, 2004, 15(4): 56-59.
- [12] 庄松寿. 深圳机场低空风切变分析[J]. 河南气象, 1996, (1): 17-18.
- [13] 王天奎,朱东升. 仙桃国际机场低空风切变的分析[J]. 空中交通管理, 2000, (1): 34-36.
- [14] 王春红. 乌鲁木齐机场东南大风的低空风切变特征及飞行安全保障[J]. 空中交通管理, 2001, (5): 34-37.
- [15] 蔡国盛. 咸阳机场一次低空风切变天气过程分析[J]. 陕西气象, 1997, (6): 3-5.
- [16] 孙磊. 机场附近低空风切变的数值模拟预测[J]. 中山大学学报(自然科学版), 42(增刊 2): 150-153.
- [17] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 天气学原理和方法[M]. 北京:气象出版社 2000. 10: 69-77.