

文章编号:1004-9045(2008)01-0054-05

多普勒天气雷达谱宽数据监测机场湍流强度的可行性初探

陈柏纬¹, 李卓民¹, 黄锦鸿²

(1.香港天文台, 香港; 2.香港城市大学, 香港)

摘要:选用 2 个典型的由地形导致香港国际机场地区出现扰动气流的个例, 对天气雷达的谱宽数据与激光雷达的涡流消散率的立方根进行了比较。结果表明, 对两组数据作点对点比较时, 两者基本上没有相关性, 其相关系数小于 0.10; 其空间平均值之间的相关性较好, 相关系数为 0.39-0.46。最后, 通过对多普勒天气雷达谱宽数据监测香港国际机场邻近地区湍流强度可行性的探讨, 提出了多普勒天气雷达的谱宽数据用于监测飞机航道上湍流强度的具体方法与构想。

关键词:湍流强度; 多普勒天气雷达; 多普勒激光雷达; 谱宽; 涡流消散率

中图分类号: P412.25 **文献标识码:** A

1 引言

香港国际机场担负着与内地及世界各地大量的客运、货运任务等, 这里每天平均有 800 架次飞机往返世界各地。该机场建在填海后形成的土地上, 其南面为大屿山, 山峦起伏, 最高峰海拔高度约 1 000 m, 各大小山峰之间的山谷海拔高度低至 400 m 左右。当有风从东至南以至从西南吹过这一山地时, 位于其下风方的香港国际机场及邻近区域就可能出现湍流, 并影响飞机安全起降。根据国际民航组织的相关标准^[1], 湍流强度以涡流消散率 (eddy dissipation rate, EDR) 的立方根 ($^{1/3}$) 分级, 当 $^{1/3}$ 在 $0.3-0.5 \text{ m}^{2/3} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间、 $>0.5 \text{ m}^{2/3} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 分别定义为中度 (moderate) 湍流和强烈 (severe) 湍流。

香港天文台承担着为香港国际机场航机升降提供湍流预警服务的职能。该天文台在机场附近安装了 1 部多普勒天气雷达, 同时安装了 2 台多普勒激光雷达系统。基于激光雷达在潮湿天气(如有雨或雾)下或云底较低时探测距离会缩短而天气雷达的探测距离较远(可与激光雷达互补), 本文通过对多普勒天气雷达的谱宽与激光雷达的涡流消散率的比较, 探讨多普勒天气雷达谱宽数据监测机场邻近区域湍流强度可行性。从理论上来说, 虽然有人早已证实天气雷达的谱宽不仅与湍流强度存在一定的关系^[2], 还受到风平均切变、天线旋转、雨点下降速度的频散、雨点震荡及摇晃等因素的影响, 但个别天气雷达种类是否能用来监测湍流, 仍有待于深入研究和进行实例分析。目前, 将天气雷达用于航空气象中的湍流监测研究工作主要集中在美国, 美国的此项研究选择的都是 WSR-

88D 雷达, 尚未涉及到机场多普勒天气雷达(TDWR), 更未使用激光雷达的湍流数据研究机场多普勒天气雷达谱宽的应用前景。因此, 本文通过比较多普勒激光雷达估计 $^{1/3}$ 值与多普勒天气雷达谱宽数据($^{1/3}$) (类似于风廓线仪的处理方法^[3]) 的比较, 重点在于讨论多普勒天气雷达监测湍流强度的可能性。

2 雷达技术参数与数据处理

安装在香港国际机场的多普勒天气雷达的主要作用是监测强对流天气及相关的风切变。该雷达波长为 5 cm, 在潮湿天气条件下可持续提供数十公里的可靠数据, 其天线高度距海平面约 60 m, 其技术参数见文献[4]。同时, 为监测机场区域内的风切变及湍流, 在机场还安装了 2 台多普勒激光雷达系统, 其技术参数见文献[5]; 这 2 台激光雷达使用的是波长为 2 μm 的激光束, 探测距离达 10 km, 可作多仰角扫描, 对机场飞机起飞跑道及下滑航道的风场进行监测; 其径向风数据的径向分辨率约 100 m, 方位角分辨率约 1°; EDR 可基于径向风数据以结构函数方法计算得到^[6]。本文考虑的激光雷达位于机场中间的空中交通管制大楼的楼顶(图 1), 雷达扫描器高于海平面约 50 m。

机场多普勒天气雷达的数据经过各样质量控制程序(包括去除什波、点目标及距离不肯定性等), 由雷达的数据处理运算程序直接输出, 本文只考虑最低仰角 0.6° 的数据。激光雷达的径向风数据用于计算径向结构函数, 并与 von Kármán 模型拟合, 可估计 $^{1/3}$; 径向风经过了质量控制程序处理, 包括确定是否在一定距离范围内连续存在数个可靠数据点, 并将每一个风数据点与邻近数据点作比较, 其具体处理方法见文

收稿日期:2007-12-05; 定稿日期:2008-01-24

作者简介:陈柏纬, 男, 1970 年生, 科学主任, 主要从事航空气象研究工作. E-mail: pwchan@hko.gov.hk

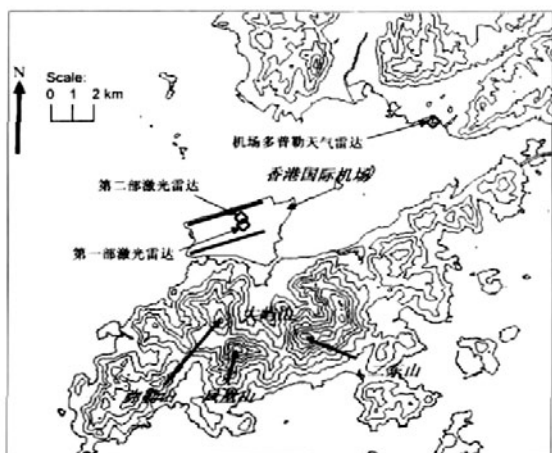


图 1 香港国际机场地形(等高线间隔 100 m)及多普勒天气雷达、激光雷达的安装位置

献[7]。如同天气雷达一样,其数据只考虑最低仰角 0° 的,扫描每 6 min 进行一次,连续 7 个扫描可积累足够的径向风相差用来计算结构函数,并估计 $\epsilon^{1/3}$ 的分布。在本文挑选的天气个例中,背景风分布变化均不大,湍流强度分布在这 7 个扫描时段(即 42 min)内且无显著变化,下文讨论的 $\epsilon^{1/3}$ 分布图所指的时间即为这 7 个扫描的结束时间。

3 湍流个例分析

出现在香港国际机场的 2 个不同背景风情况下的湍流个例均选自 2006 年夏季。针对这 2 个湍流个例,分析以多普勒天气雷达的谱宽数据 监测湍流强度的可行性。

3.1 ‘06.7’湍流个例

2006 年 7 月 15 日早上,强热带风暴“碧利斯”残余位于华南东部,使广东沿海及香港地区受西南风影响。图 2 a、b 分别给出机场多普勒天气雷达及激光雷达在当天 10 时 18 分(香港时,下同)的径向风数据。其数据显示,有强风到烈风程度的西南气流在机场附近出现,风速达 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。同时,天降微雨,当天 10~11 时机场降水 0.2 mm。天气雷达的探测距离超过了 40 km,而激光雷达的探测距离仅约 6 km。

图 2c、d 给出的是 15 日 10 时 18 分多普勒天气雷达的 σ 分布与激光雷达的 $\epsilon^{1/3}$ 图。从这 2 幅图上可见和 $\epsilon^{1/3}$ 分布的一些共同特征,如在大屿山岛上的弥勒山、凤凰山及二东山(图 1)下游及机场上空其数值较大,而在机场以西一条西南—东北向带状地带其数值则较小。

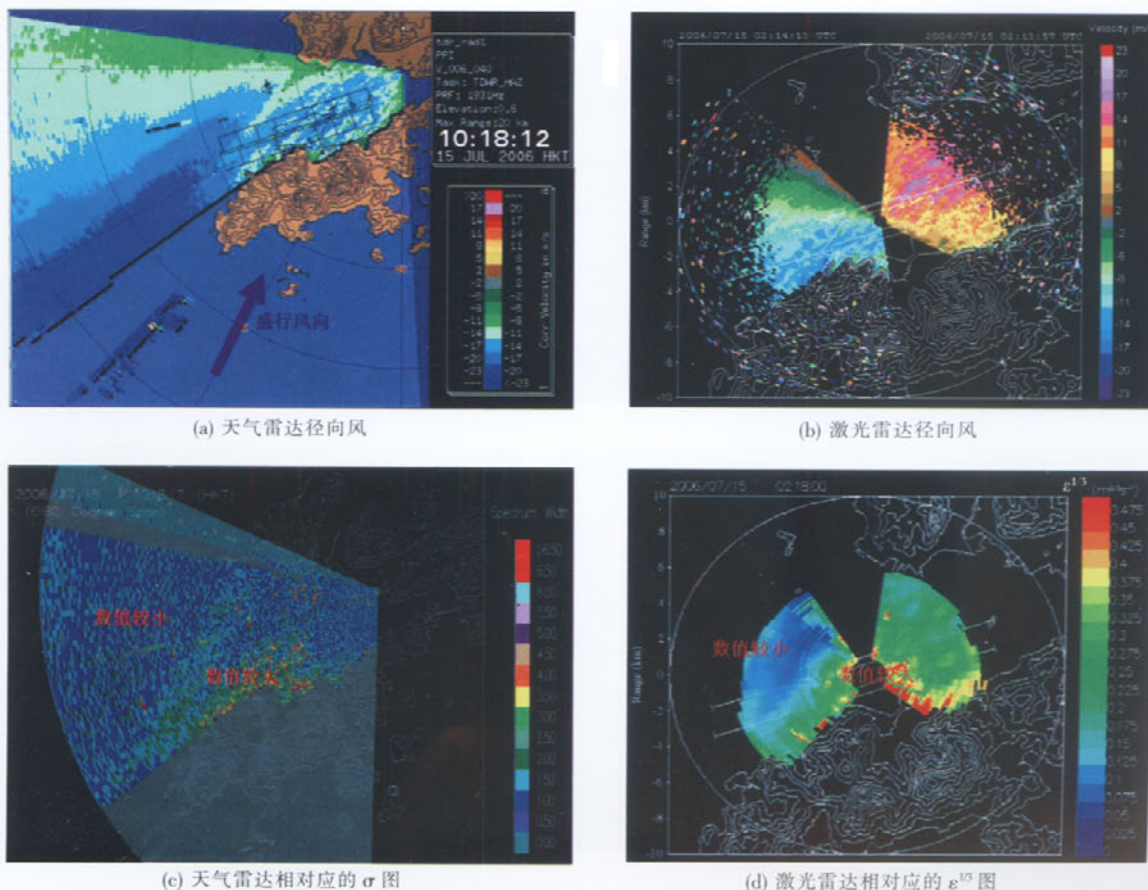


图 2 2006 年 7 月 15 日 10 时 18 分香港国际机场多普勒天气雷达及激光雷达探测数据的比较

上述共同特征为研究使用多普勒雷达天气雷达的谱宽数据监测湍流强度提供了可能。因此,将天气雷达及激光雷达的扫描地区投影至同一水平面,并对与 $\epsilon^{1/3}$ 作点对点比较。在机场上,天气雷达的波束离海平面约 175 m,激光雷达的光束则离海平面约 50 m;激光雷达 $\epsilon^{1/3}$ 的距离分辨率为 100 m,其方位角步距为 5° ;天气雷达 σ 的距离分辨率为 150 m,其方位角步距为 1° 。这里,对某一个 $\epsilon^{1/3}$ 数据点其距离 150 m、方位角 5° 内最接近的天气雷达的 σ 数据进行比较,从 7 月 15 日 10 时 00 分和 10 时 18 分的两组数据来看,其间基本上没有相关性(图略),相关系数低于 0.10。相关系数如此低,可能与天气雷达和激光雷达的波束位于不同高度有关,还可能受到了天气雷达谱宽数据中风切变及湍流耦合项的波动影响^[9]。另外,在 100~150 m 分辨率下,湍流在雷达采样空间(sampling volume)中的时间变化较大,由于天气雷达与激光雷达的采样时间不同(天气雷达为瞬时,激光雷达平均为 42 min),致使 σ 及 $\epsilon^{1/3}$ 之间出现较大差异。

考虑到天气雷达 σ 图及激光雷达 $\epsilon^{1/3}$ 图所具有的共同特征,可以显示 σ 与 $\epsilon^{1/3}$ 的空间平均,如在某些直线路段的平均值,可能较点对点的比较有更好的相关

性。同时,这些空间平均数也有实际应用价值,如反映飞机航道上的平均湍流强度等。首先,确定沿激光雷达径向方向(最远 10 km)的线取平均值;然后,根据文献[2], σ 的平均为均方根,同样对 $\epsilon^{1/3}$ 平均后再求立方根。图 3 为 σ 和 $\epsilon^{1/3}$ 的平均值在 7 月 15 日 10 时 00 分和 10 时 18 分两个时间的散布图,该图考虑到了激光雷达整个锥形扫描的所有径向方向。

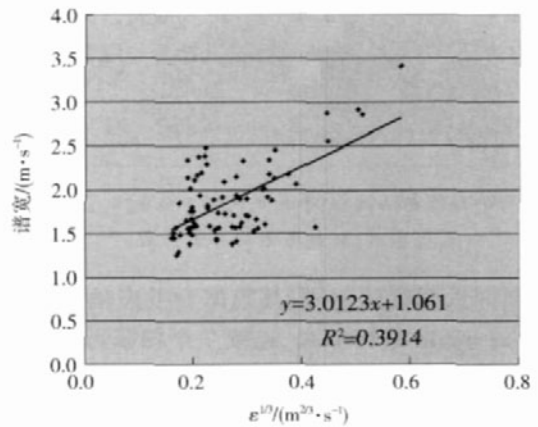


图 3 σ 和 $\epsilon^{1/3}$ 的平均值在 2006 年 7 月 15 日 10 时 00 分和 10 时 18 分两个时间的比较散布图

从图 3 中可见,两组数据存在较好的相关性,其

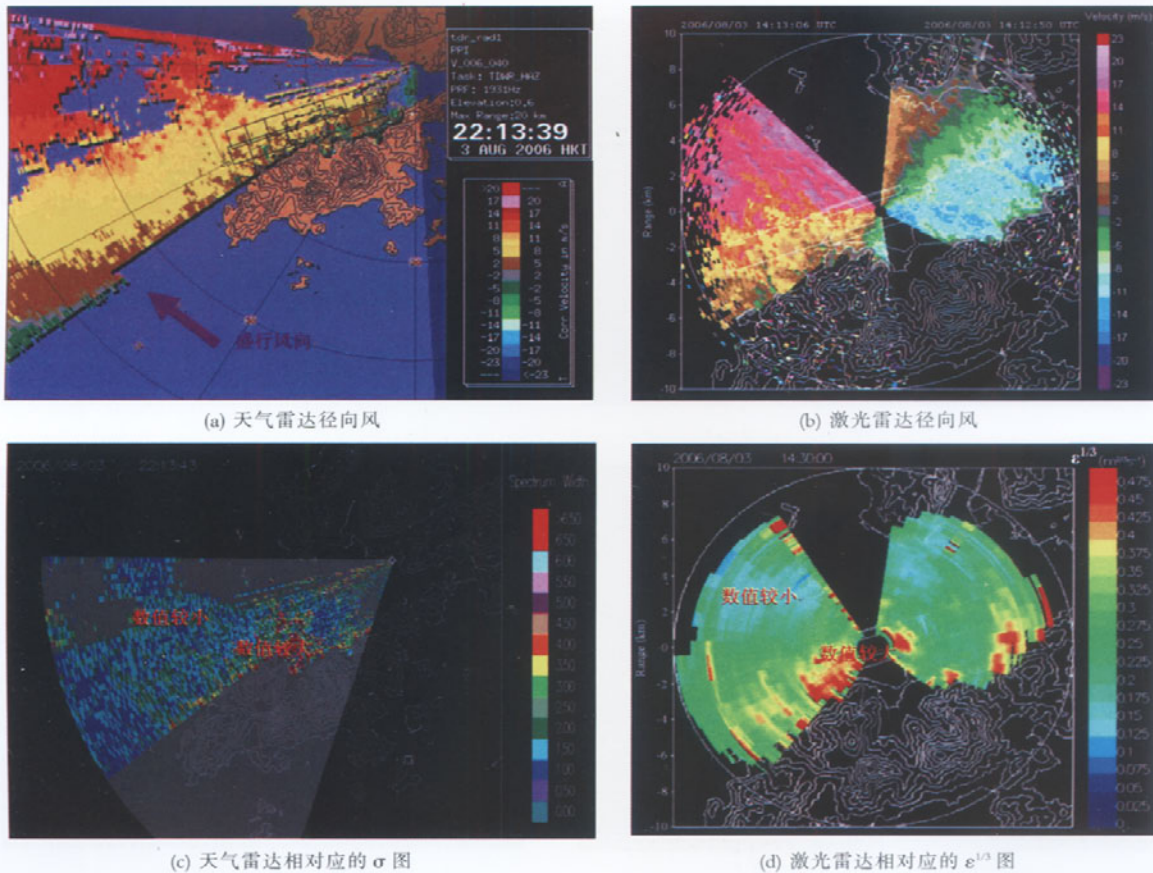


图 4 2006 年 8 月 3 日 22 时 13 分香港国际机场多普勒天气雷达及激光雷达探测数据的比较

相关系数约为 0.39,这可能是由于时空平均互换的结果。由此可知,天气雷达谱宽数据在线段上的平均值,有可能应用于监测飞机遇上的湍流强度;相对于激光雷达,天气雷达在潮湿天气下的监测范围较大,也就可以探测更大范围出现的湍流。

3.2 '06.8'湍流个例

2006年8月3~4日,位于中国南海北部的台风“派比安”向西北方向移动,在香港以西的湛江附近登陆,香港国际机场邻近地区为烈风程度的东南风所控制。图4a、b分别给出了8月3日22时13分该机场多普勒天气雷达及激光雷达的径向风,风速达 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,当天22~23时机场下小雨,其1h降水量为3.5mm;激光雷达的探测距离达9km,但10min后受较大降雨影响,探测距离下降至约2km;天气雷达的探测距离可达40km之外,但对机场以北海面的数据覆盖有限,这与雨水的均匀分布有关。

图4c、d分别给出的是8月3日22时13分天气雷达的 σ 与激光雷达的 $\epsilon^{1/3}$ 分布。从这2幅图上可见,虽然两部雷达的波束高度不同,但 σ 和 $\epsilon^{1/3}$ 两组数据分布具有一些共同特征,如大屿山山峰下游及机场上空其数值较大,而机场以西及西北海面上其数值较小。在8月3日14时10分、22时30分和8月4日07时00分三个时间,对上述两组数据作点对点比较时,其相关性同样很低(图略),其相关系数均低于0.10,这一结果与个例1的类似,相关系数偏低的原因也相同。同时,计算 σ 及 $\epsilon^{1/3}$ 沿激光雷达径向方向的平均值,对其值在8月3日14时10分、22时30分和8月4日07时00分三个时间的比较结果见图5。

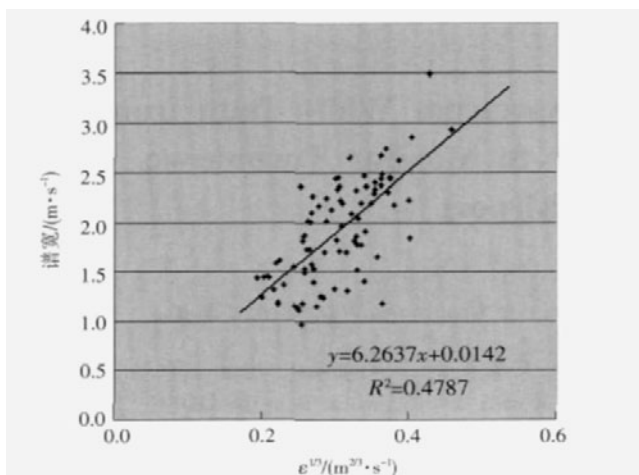


图5 σ 和 $\epsilon^{1/3}$ 的平均值在2006年8月3日14时10分、22时30分和8月4日07时00分三个时间的比较散布图

从图5中可见,两组数据的相关系数在作点对点比较时较高,达0.48。值得一提的是,这组数据的最小二乘线性拟合方程与2006年7月15日强烈西南

季风个例所获得的结果有所不同,其方程斜率(6.2637)较大而y轴截距(0.0142)较小,这表明不同天气条件下风切变对 σ 的影响有所不同。如不同背景风向相对于天气雷达径向方向而言会对 σ 的风切变项产生不同影响,从而导致这种最小二乘线性拟合方程及y轴截距的差异。因此,在不同的天气条件下,需建立天气雷达谱宽与EDR数值的经验关系,以便将谱宽数据应用于监测湍流强度。

4 应用谱宽监测湍流强度的可能方法与构想

基于上述2个个例分析结果,采用不同方案进行比较,其结果存在很大差异。因此,在应用多普勒天气雷达的谱宽数据监测湍流强度时,仍需选择多种方案继续进行比较分析,才能最终使之实现业务化。尽管如此,从上述2个个例分析中发现,多普勒天气雷达谱宽数据和多普勒激光雷达湍流消散率之间具有密切关系,将两者放在同一平面求相关和进行空间平均求相关存在本质差异,空间平均的相关性较好,这说明经过对合适方案的研究与完善,针对各种天气条件建立理论或经验方法实现多普勒天气雷达谱宽数据对机场湍流强度的监测是可能的。

通过上述2个个例的分析,探讨了应用机场多普勒天气雷达谱宽监测湍流强度的两种方法,一是将天气雷达及激光雷达的扫描地区投影至同一水平面上每一点的湍流强度,二是计算某条线段上的平均湍流强度。通过与激光雷达的数据比较发现,机场多普勒天气雷达谱宽在线段上的平均值与激光雷达的平均湍流强度数据较为吻合,显然第二种方法较为可行。类似的线段平均,有人在应用激光雷达的湍流强度数据时也曾作过探讨^[9],激光雷达湍流强度廓线虽在飞机下滑航道上可以求得,但要与飞机黑盒数据计算的湍流强度进行比较和在实际应用于湍流预警服务时,还需使用在下滑航道线段上计算的平均值。

要具体使用机场多普勒天气雷达的谱宽数据,可设想通过计算沿下滑航道线段的平均值来实现,如由机场跑道尾端至3海里外的线段,该线段所涉及的范围可作为低空湍流预警服务范围。从上述2个个例的分析结果可知,机场多普勒天气雷达谱宽平均值与湍流强度平均值的线性拟合关系在不同天气条件下有所不同,这可能与风切变对谱宽的影响有关,其具体影响和影响程度还需进行深入研究。在风切变对谱宽影响的关系还未探明之前,可考虑在不同典型强湍流天气条件下(如强烈西南季风及与台风相关的强烈东风或东南风下),建立机场多普勒天气雷达谱宽与湍流强度(由激光雷达或飞机黑盒数据计算)的经验关系,尤

其是在强烈湍流出现时谱宽的阈值与湍流强度的经验关系。

5 讨论

(1)本文初步研究了使用机场多普勒天气雷达的数据监测香港国际机场邻近地区的湍流强度的可行性,从选取的 2 个微雨个例分析来看,天气雷达的探测范围较激光雷达的大,有条件提供更大范围的湍流数据。然而,将天气雷达与激光雷达^{1/3}作点对点比较时(其扫描面均已投影到同一平面上),其相关性一般都很差,相关系数小于 0.10。究其原因,这可能是由于天气雷达和激光雷达的采样高度与时间不同所致。但两组数据的空间平均(如沿激光雷达径向方向平均)则存在较好的相关性,其相关系数达 0.39~0.46,这可能是时空平均互换的结果。

(2)本研究并未考虑风切变可能扩大天气雷达波谱的问题,而只假设主要与湍流有关。理论上讲,会受到方位角上的风切变及湍流耦合的影响^[6],垂直方向的风切变在层云降水情况下也会明显改变值(Valery Melnikov 及 Richard Doviak, 私人通信),此类效应将在今后的研究中予以考虑。

(3)基于个例分析结果,可以认为,机场多普勒天气雷达的谱宽数据能应用于监测湍流强度。其具体方法是,计算沿航机下滑航道线段上谱宽的平均值,并在不同强湍流天气条件下与湍流强度平均值建立经验关系。不难预见,当风切变及湍流耦合项等因素对谱宽的影响问题从理论上得到解决后,可以不必使用经验关系而以理论方法直接订正谱宽数据,从而由谱

宽直接计算得到湍流强度。

美国海洋及大气局国家强风暴实验室的 Richard J Doviak 博士曾对该文写作提出宝贵意见,谨致谢忱。

参考文献:

- [1] International Civil Aviation Organization (ICAO). Meteorological Service for International Air Navigation. Annex 3 to the Convention on International Civil Aviation [M]. 16th Edition, 2007:187.
- [2] Doviak R J, Zrnicek D S. Doppler radar and weather observations [M]. 2nd ed., Dover Publications, Inc., Mineola, NY., 1993:562.
- [3] Chan P W, Chan S T. Performance of eddy dissipation rate estimates from wind profilers in turbulence detection [C]. 11th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, 2004.
- [4] Shun C M, Johnson D B. Implementation of a Terminal Doppler Weather Radar for the new Hong Kong International Airport at Chek Lap Kok [C]. 6th Conference on Aviation Weather Systems, 1995.
- [5] Shun C M, Lau S Y. Implementation of a Doppler Light Detection And Ranging (LIDAR) system for the Hong Kong International Airport [C]. 10th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, 2002.
- [6] Chan P W. Generation of eddy dissipation rate map at the Hong Kong International Airport based on Doppler LIDAR data [C]. 12th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, 2006.
- [7] Chan P W, Shun C M, Wu K C. Operational LIDAR-based system for automatic windshear alerting at the Hong Kong International Airport [C]. 12th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, 2006.
- [8] Fang M, Doviak R J. Coupled contributions in the Doppler radar spectrum width equation [J]. Submitted to Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2007.
- [9] Chan P W. Comparison of turbulence intensity computed from LIDAR and aircraft data [C]. 24th International Laser Radar Conference, 2008.

Initial Study of the Feasibility of Using Spectrum Width Data from the Terminal Doppler Weather Radar to Monitor Turbulence Intensity over the Airport

CHEN Pai-wei¹, LI Zhuo-min¹, HUANG Jin-hong²

(1. Hong Kong Observatory, Hong Kong, China; 2. City University of Hong Kong, Hong Kong, China)

Abstract: Two typical cases of terrain-disrupted airflow disturbances at the Hong Kong International Airport (HKIA) are selected to compare the spectrum width data from the weather radar and the cube root of eddy dissipation rate from the LIDAR. Results show that, for point-to-point comparison, the two datasets basically do not have correlation with the correlation coefficient less than 0.10. The spatial averages of the two datasets show better correlation with the correlation coefficient in the order of 0.39~0.46. Finally, based on the feasibility study of applying the weather radar's spectrum width data to monitor turbulence intensity near HKIA, the paper discusses how the spectrum width data could be used for detecting turbulence along the flight paths.

Key words: Turbulence; TDWR; LIDAR System; Spectrum Width; Eddy Dissipation Rate