

Reprint 1121

香港国际机场应对强对流天气影响空域  
及机场运作的最新发展

李炳华、张冰、谢淑媚 & 周志坚

第廿一民航气象技术交流會，  
四川成都，2013年10月22 - 25日

# 香港国际机场应对强对流天气影响空域及机场运作的最新发展

李炳华 张冰 谢淑媚 周志坚  
香港天文台

**摘要：** 香港国际机场是世界最繁忙的民航机场之一。对于这个日平均超过一千班航机升降的机场，适切的航空气象服务尤为重要。为减少强对流天气对机场地面运作的影响，香港天文台于2008年在机场业务运行『机场雷暴和闪电预警系统』(ATLAS)，多年来已被证明能够保障机场工作人员和乘客的安全，得到业界高度评价。另一方面，为能更客观地评估在机场及邻近区域出现的强对流天气对飞行中的航机及空中交通的影响，天文台尝试利用航机的飞行位置信息结合天气雷达回波数据，以统计方法研究不同对流强度下航机作出绕避动作的机率。本文主要分为两部分：第一部分简述ATLAS，报告系统在2013年的发展；第二部分报告由天气造成飞机「等候」及「减速」绕避行为的雷达参数阈值及对应的概率。这些概率除可用于客观评估强对流对空中流量造成的影响外，对未来研发空域流量预报亦甚为有用。

**关键词：** 强对流天气、绕避、空域、机场

## 1 引言

恶劣天气是造成飞机航班延误的主要原因之一。香港位于亚热带地区，经常受到雷暴影响。为保障机场地勤人员的安全，在雷暴影响或极有可能影响机场时，停机坪上所有工作会即时停止。雷暴不仅对地面工作人员带来雷击的威胁，其伴随的风切变、湍流、积冰、阵风、低能见度等，都会威胁飞行安全，因此在航行时，如遇上强对流，飞机师一般会绕过雷暴，或在空中盘旋直到天气好转，如强对流在机场终端区内，特别是进场及离场航道，对航空交通流量有极大影响。针对影响机场的雷暴，及雷暴对航班的影响，天文台开发了一系列的研究及产品，其中包括『机场雷暴和闪电预警系统』(ATLAS)及雷暴对航空交通流量的概率研究。本文会概述天文台在这两方面的工作。

## 2 ATLAS

### 2.1 简述

根据统计，香港国际机场平均每年约有35至40天受雷暴影响。为减少地面工作人员遇上雷击的风险，香港天文台开发了『机场雷暴和闪电预警系统』(ATLAS) [1][2]，为机场员工发出闪电预警。ATLAS收集雷达和闪电数据，利用雷达回波来追踪雷暴的移动路径，透过外推法计算闪电的未来位置以预测闪电会否出现在机场范围内。如果探测到或预测机场及附近有闪电活动，天文台会发送预警讯号通知香港机场管理局；再由机场管理局透过自动语音信息、多线传真、响号及灯号向机场营运机构发出警告。ATLAS是世界上最早一批同时具备闪电监测和闪电预报能力的机场自动闪电预警系统。运行多年来被证明能够保障机场工作人员和乘客安全，同时亦不会为机场运作带来不必要的干扰，得到业界高度评价。

ATLAS由两部分组成：探测模组和预测模组。探测模组从天文台的『闪电定位信息系统』(LLIS)中提取最新的闪电数据，当中包括每次闪电的经纬度、分类(云地或云间)等资料。当雷达探测到机场15公里范围内有强的雷达回波(以33dBZ为阈值)，同时LLIS检测到机场五公里范围内有云地闪电(CG)，ATLAS便会发出黄色闪电预警。黄色预警的作用是提醒用户CG接近机场，让他们能预先做好安全准备。黄色预警生效时，机场停机坪上所有非必要的活动将会暂停。如LLIS检测到环绕机场岛一公里范围内有CG，ATLAS便会发出红色闪电预警。红色预警生效时，

停机坪上所有工作人员必须立即采取防护措施，而乘客也要留在安全的区域内。

在预测模组中，系统对机场 15 公里范围内最近 5 分钟出现的所有 CG 作出丛集分析，然后将个别丛集以不同大小的椭圆形代表。另一方面，系统利用天文台的『小涡旋』(SWIRLS)临近预报系统中的回波追踪技术，从雷达回波中得出对流系统的移动矢量（图 1）[3][4]。ATLAS 视该矢量场为闪电丛集的移动方向和速度，以「半拉格朗日平流方案」(Semi-Lagrangian Advection Scheme)把代表闪电丛集的椭圆组合外推 12 分钟。如果任一椭圆的外推路径会在下一分钟进入机场岛 1 公里范围或机场 5 公里范围，ATLAS 便会自动发出红色或黄色预警。

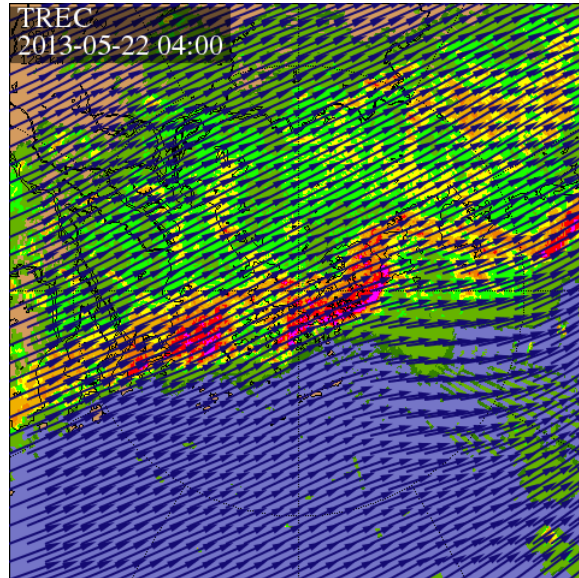


图 1 临近预报系统『小涡旋』分析的雷达回波移动矢量 TREC

为了适当地处理变化快速的闪电发展，ATLAS 的闪电丛集分析会实时进行，即每当新闪电数据进入系统会实时执行分析、外推及预测。ATLAS 同时采用了「时间滞后集合」(Time-lagged Ensemble - TLE)技术来增强预报的稳定性。TLE 程序将所有 12 分钟之内的预测值配上不同的权重来计算出预测总分，越新的预测权重会越高，相反较早期的预测权重较低（权重随时间线性下降，见图 2）。假如总分超越某一阈值，ATLAS 就会自动发出相应的预警。TLE 方法对快速变化的雷暴单体，以至持久而广泛的雷暴系统均有不错的预测表现。

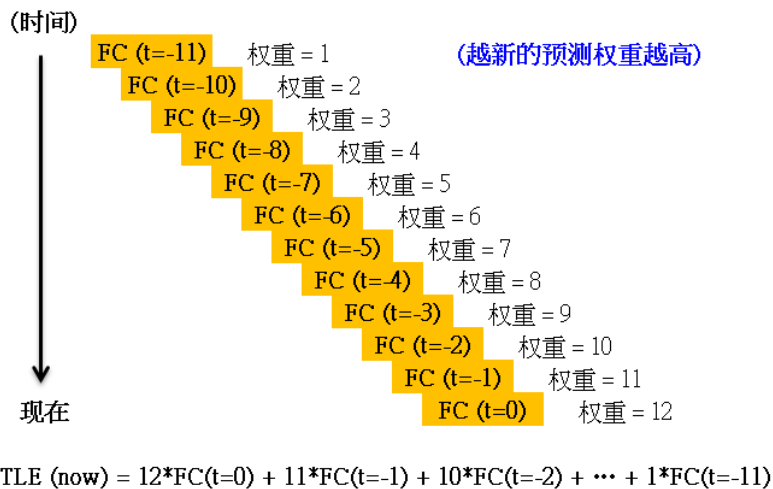


图 2 「时间滞后集合」(Time-lagged Ensemble - TLE)技术中权重的分配

## 2.2 ATLAS 的表现及分区顶警新服务

ATLAS 在 2008 年 3 月投入业务，为香港国际机场发出闪电预警。由于红色预警生效期间，停机坪上所有工作都会暂停，故此乘客登机/离机和等候行李的时间可能也会延长。准确的预测有助减少不必要的警告，缩短警告时间，减少对停机坪和其他室外运作的影响。经过五年多的业务运作，红色预警的五年平均成功率达 90%(图 3)。系统表现理想，一方面达到保障安全的要求，同时也能很好地控制警告发出的时间，减低闪电预警对机场运作带来的影响。

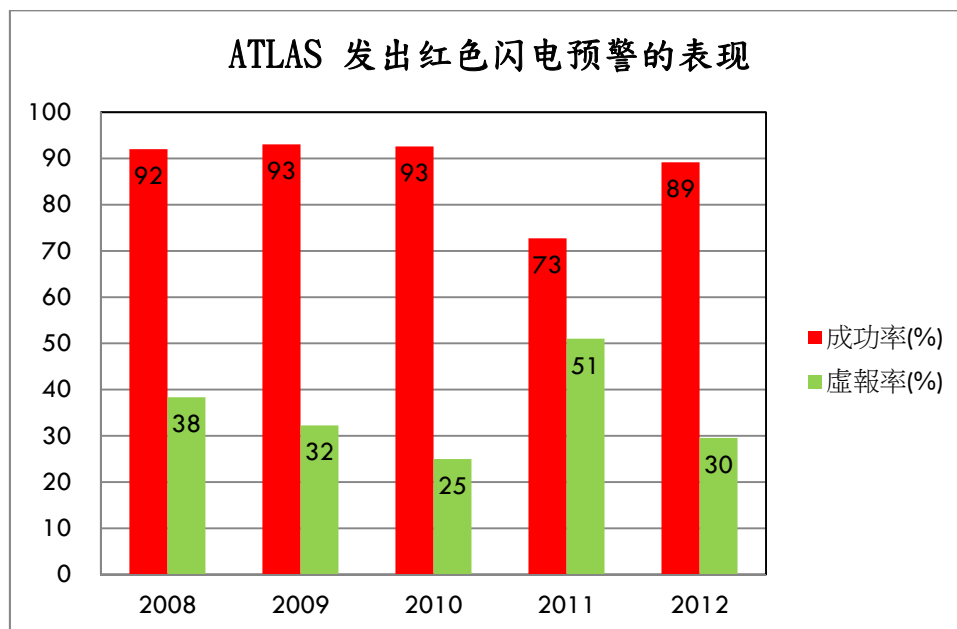


图 3 2008-2012 年 ATLAS 发出的红色闪电预警的表现

今年雨季开始，ATLAS 提供更精细化的分区预警。在原有的机场岛一公里范围 (Zone-B，图 4(a)) 之内，还加入包括客运大楼和空运中心两个机场重要区域一公里范围 (Zone-A，图 4(b)) 的预警。Zone-A 与 Zone-B 黄色闪电预警的发出条件相同。而红色预警方面，如果 ATLAS 只在 Zone-B 范围检测到 CG(图 5)，同时预测 CG 并不会在 Zone-A 范围内出现，则 Zone-B 会发出红色闪电预警，而 Zone-A 只会发出黄色闪电预警。如 Zone-A 也会受到 CG 影响，则 Zone-A 及 Zone-B 会同时发出红色闪电预警。这样不但保障了机场工作人员安全，亦可进一步减少恶劣天气对机场主要区域运作的干扰。



图 4(a) ATLAS 现有的预警范围。黄色边界为距离机场五公里范围，红色幼边界为机场岛 (Zone-B)，红色粗边界为其一公里范围。

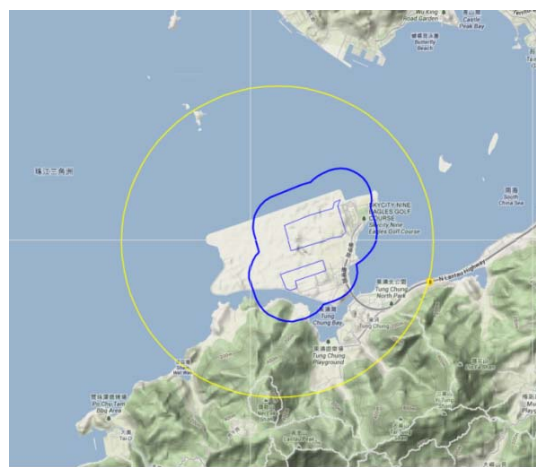


图 4(b) ATLAS 更精细的分区预警范围。蓝色幼边界分别为客运大楼及空运中心 (Zone-A)，蓝色粗边界为其一公里范围。

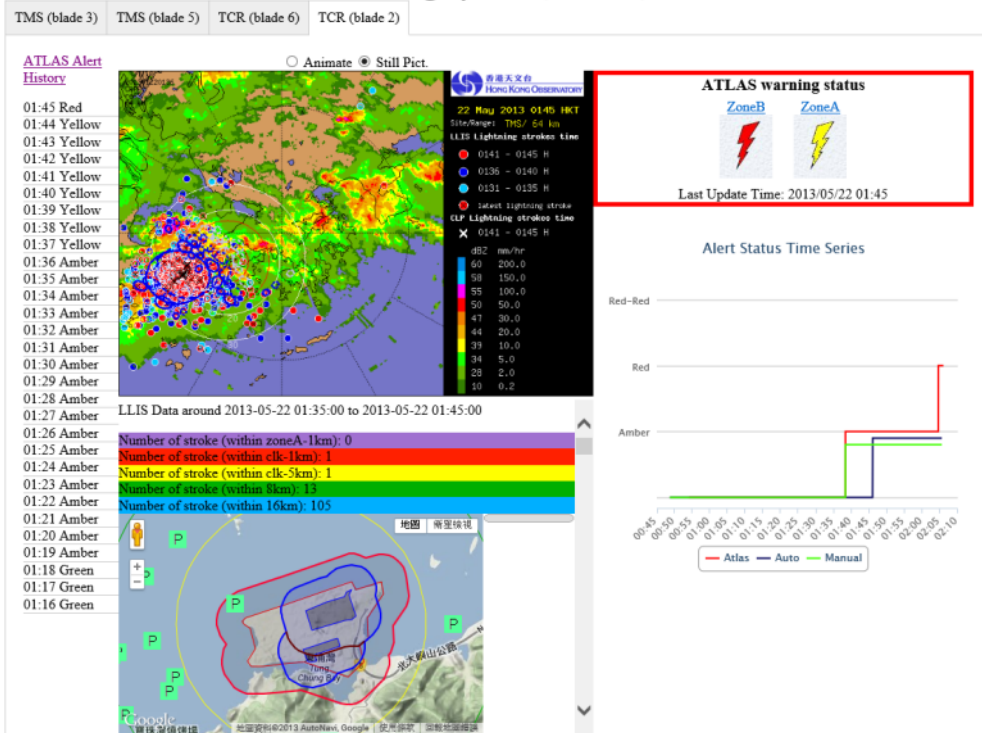


图 5 ATLAS 在机场岛西面检测到 CG，Zone-B 发出红闪，Zone-A 只发出黄闪。

经过半年时间的业务验证，分区预警的效果亦令人满意(图 6)。在 Zone-B 区域，红色闪电预警成功率有 94%，平均每次警告的生效时间约 12 分钟，总预警时间为 15 小时 29 分钟。在 Zone-A 区域，红色闪电预警成功率亦有 93%，平均每次警告的生效时间同样为 12 分钟，而总预警时间则为 10 小时 40 分钟，比 Zone-B 短了 5 小时(约三分之一时间)，在保障地勤人员的安全的大前提下，有效地缩短了红闪预警对机场运作的影响时间。

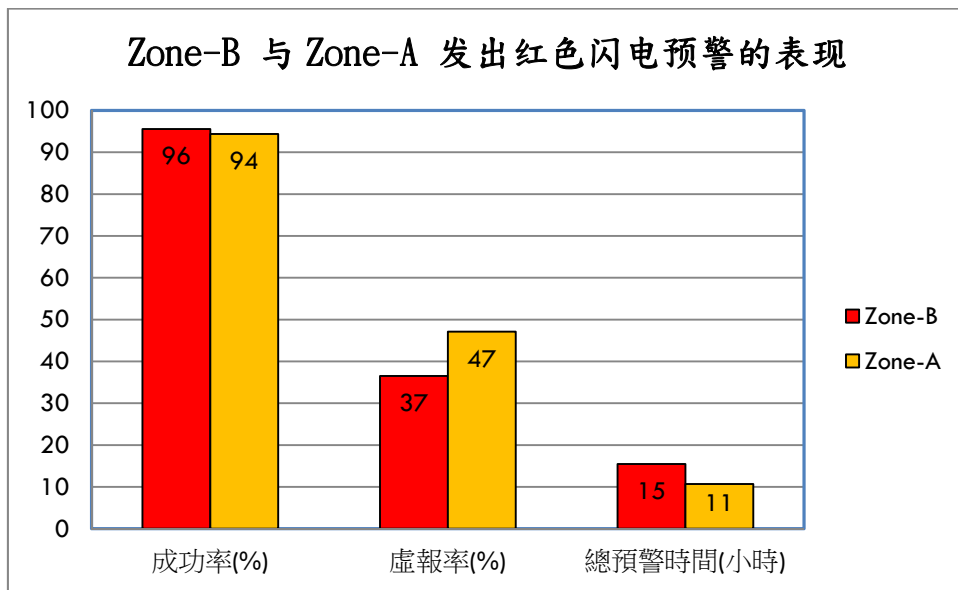


图 6 今年 ATLAS 分区预警的表现



### 2.3 强化预报能力的需求

虽然 ATLAS 的表现相当理想,但在某些情况下,其闪电预报能力仍有不足。今年 5 月 22 日,香港广泛地区受暴雨影响,天文台更一度发出了黑色暴雨警告。由半夜到上午六时,LLIS 在机场 5 公里范围探测到超过 200 次 CG。在上午 04:10 左右,有停机坪上的工作人员遭受雷击而受伤。图 7 (a) 、7(b)显示,在 22 日早上 04:09 有一雷暴区接近机场,闪电在距离机场 8 公里外围,当时 ATLAS 预测模组计算出闪电在 12 分钟后仍未影响机场 5 公里范围。然而,在下一分钟即 04:10,ATLAS 已探测到在机场岛上出现了 CG。虽然 ATLAS 的探测模块已立即发出了红色闪电预警,但工作人员始终无法及早躲避而遭受雷击。图 7(c) 、7(d)显示,在同一日早上 10 时过后强降雨区基本上已远离机场,但在 10:27 机场岛上突然再出现 CG,ATLAS 探测模块再度发出红色闪电预警,幸而这次闪电事件并没有造成任何人员伤害。可见即使有先进的仪器和预报技巧,闪电的发生始终存在不可预计的因素,对于提高闪电预测服务的准确度是个重大考验。

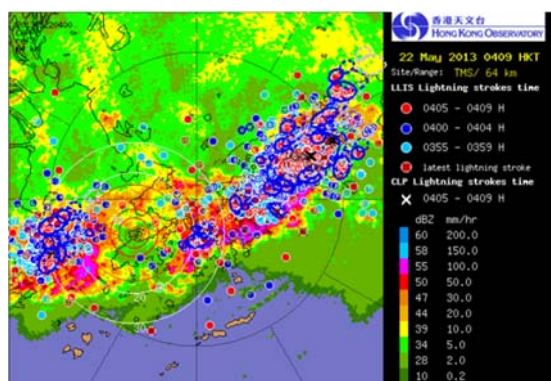


图 7(a) 2013 年 5 月 22 日 04:09

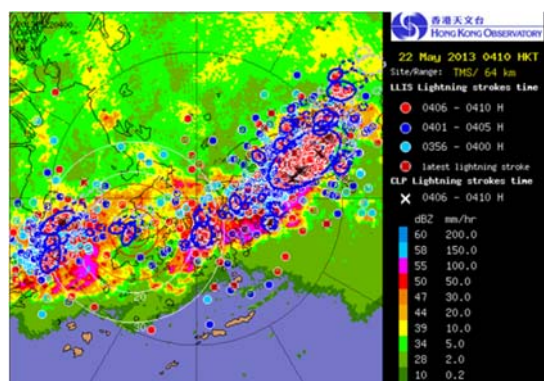


图 7(b) 2013 年 5 月 22 日 04:10

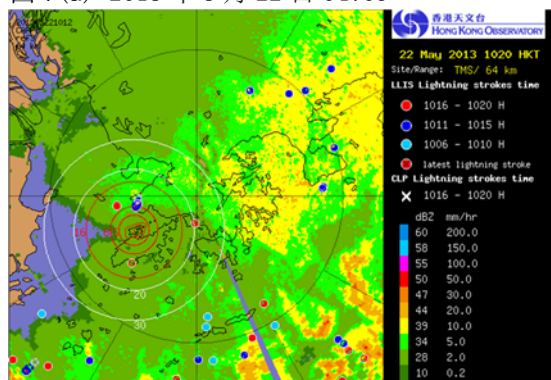


图 7(c) 2013 年 5 月 22 日 10:20

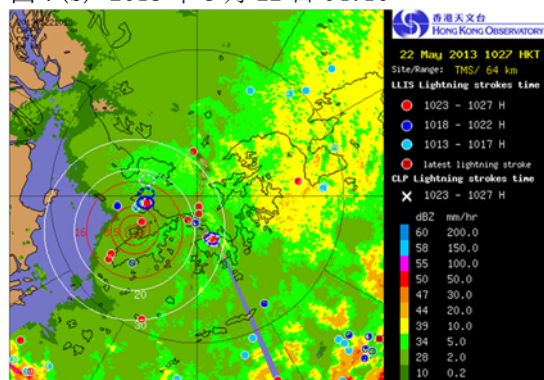


图 7(d) 2013 年 5 月 22 日 10:27

图 7 叠加在雷达图上的闪电分布图

如前所述, ATLAS 是以 CG 数据为作为预报基础。然而, LLIS 还有大量云间闪电 (cloud-to-cloud, CC) 未经 ATLAS 处理。研究发现, CC 与 CG 的比例随着雷暴发展过程的不同阶段而有所变化, 而此变化可反映强对流天气的发展过程 [5]。综合多个雷暴个案, 某些个案中机场附近先出现 CC, 随后再出现 CG。图 8 显示今年 8 月 17 日由 LLIS 探测到机场 100 公里范围内 CC 与 CG 数目一天中的变化。在某些时间, CC 比 CG 的数目还要多。虽然 LLIS 对探测 CC 的效率相对较低, 但在评估雷暴系统的发展和闪电预报上, 或有一定的价值。若能在 ATLAS 预测模组内适当地将 CC 和 CG 组合, 可能有机会提升 ATLAS 预报闪电的能力。

CC 及 CG 30 分鐘累積閃電數目

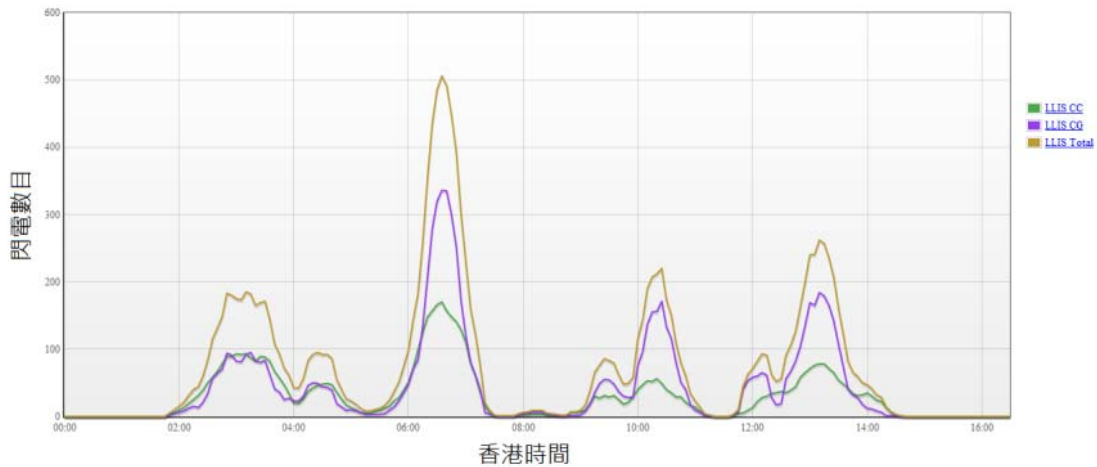


图 8 机场 100 公里范围内 CC 与 CG 数目在一天中的变化

### 3 对流天气对航空交通流量的概率研究

#### 3.1 研究背景

强对流天气是直接危及飞行安全的危险天气之一。若航机在空域等候区受恶劣天气影响，而未能及早调整飞行路线，航机可能需要在空中盘旋等候，甚至因燃料不足而需转飞其他机场。航空服务需求日增，香港国际机场的飞机起降量不断增加，因恶劣天气而受影响的航班数量亦随着上升，对航空交通及其运作造成严重影响。2011 年，国外研究人员 Matthews, M. P. 及 DeLaura, R. A. [6] 利用航机的实际航行路线对应至雷达回波数据，以云顶高度 (ECHO TOP) 和垂直累积液态水含量 (VIL) 及其可能带来之影响建立客观关系。为加强对于此方面的认知及了解强对流天气如何影响香港附近空域的航机，天文台亦尝试利用抵达香港国际机场的航班飞行数据及雷达数据作出统计分析。虽然无法得知航机的绕避行为是否在空管人员的指示下进行，但不管是空管或飞行人员主动提出，最终还是会影响航空交通的流量，因此会对所有绕避行为当时的天气雷达数据进行分析。下文简单介绍现阶段已完成之等候及减速两种绕避行为的自动辨识方法，并报告初步的研究结果。

#### 3.2 航班路线数据及雷达数据

研究透过分析 2011 年 4 月至 7 月期间，部分飞抵香港国际机场之航机的预定航行路线、实际航行路线、及其对应的雷达数据，探讨对流强度对航行路线的影响。雷达数据采用半径 256 公里范围，每 6 分钟间隔的三公里反射率 (REF3) 和垂直累积液态水含量 (VIL) 两项参数。

##### 3.2.1 预定航路

先假设两条分别为「由东面飞抵香港国际机场」及「由东北飞抵香港国际机场」的预定航行路线。该路线用良好天气情况下航机的实际航行路线来拟定。因不同航机进入机场的航道和降落所使用的跑道并不相同，所以预定航路不包括机场区域。以下图中皆以蓝色线代表预定航路。

##### 3.2.2 实际航路

利用香港民航处所提供约 900 班航机的实际航行路线作出分析。其中包括由东面和东北面飞抵香港国际机场的航机。以下图中皆以粉红色线代表实际航路。

### 3.3 分析方法

先根据实际飞行路线，以计算机程序分辨飞机所作出的绕避行为，再利用对应时间的雷达数据，抽取当时相对应的天气状况，再作统计分析。现阶段分析得较好的绕避措施有「等候」及「减速」。

#### 3.3.1 等候 (Holding)

「等候」是一种较常见绕避行为。当机场附近空域出现恶劣天气并不适合航机前进或降落，航机会在空中盘旋等候，直至前方天气好转。分辨此绕避行为的方法是检查实际飞行路线，当其中出现返回或回旋状态，就视为「等候」。图 9 显示一班由东北面飞向香港国际机场的航机。在初期飞行时段，航机按预定航路飞行。于中段时间，香港国际机场附近空域天气恶劣，航路受到影响，当时航机于天气良好的空域中盘旋等候，以避开机场周边之强对流天气。

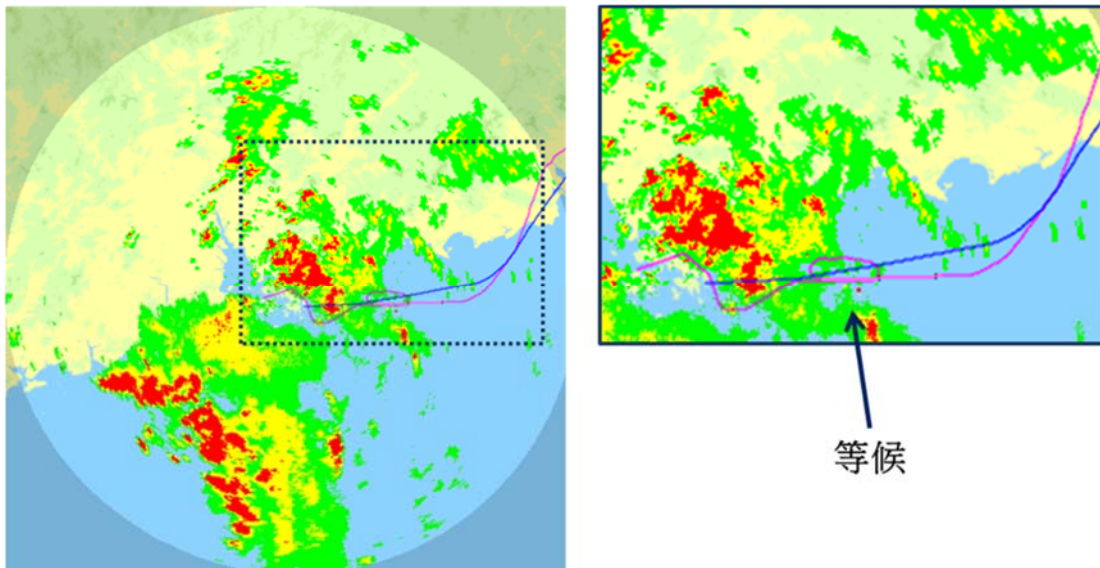


图 9 一班航机由东北面飞向香港国际机场，中途飞行员作出「等候」决定，在空中盘旋等候。红色为最高，表示反射率超过 41dBZ；黄色表示反射率超过 32dBz；绿色表示强度最低，反射率超过 20dBz。

#### 3.3.2 减速 (Slow Down)

另外一种绕避行为是「减速」。当航机飞行途中，目的地或预定航行路线前方出现强对流天气，飞行员会以锯齿状飞行路线迂回前进，以增加飞行距离，延迟飞机抵达机场的时间达到避开恶劣天气的目的。分辨此绕避行为的方法是对比实际飞行路线与预定航行路线之差别。当其中一部分出现以锯齿状的迂回飞行前进，则视为「减速」。图 10 显示一班航机由东面飞往香港国际机场以迂回方式飞行，该航班被标示为采取了「减速」的绕避动作。



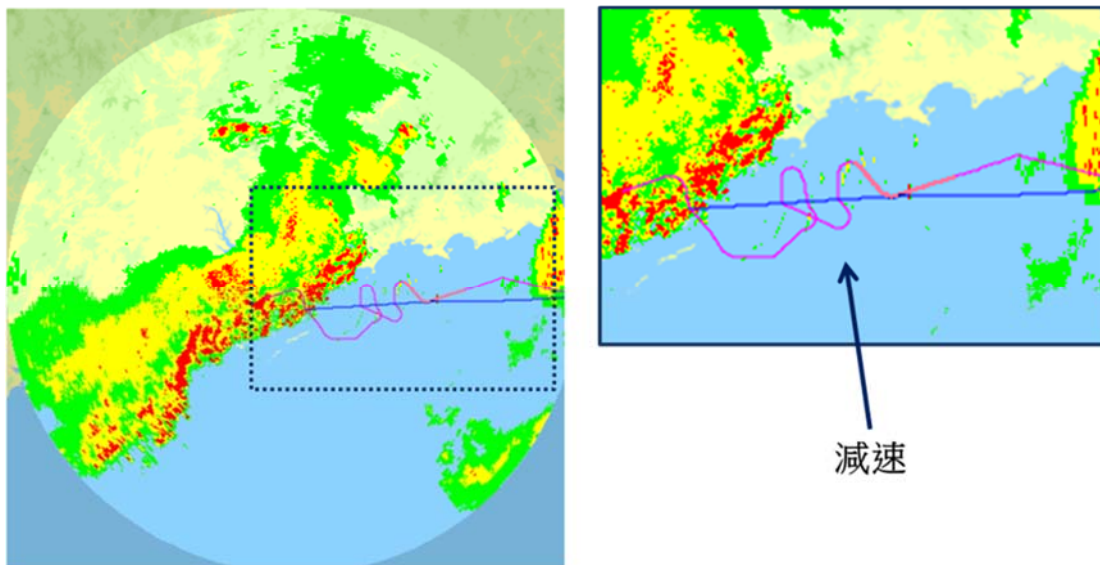


图 10 一班航机由东面飞向香港国际机场。途中飞行员利用「减速」将原本的飞行距离及时间延长。

对绕避行为进行分类后，计算机程序会依采取绕避行为的时间，记录雷达上的对流强度。图 11 中以啡色正方点代表香港国际机场位置，而黑色圆点则表示航班当时位置。程序会抽取包括机场、机场附近区域以及飞机前方之天气状况。图 12 显示需要的六个记录范围，分别为：机场(A)，机场邻近四个方位东(E)、南(S)、西(W)、北(N)，以及飞机前方(F)，在进行统计时，以所有范围中最强的参数值作为强对流强度的代表值。以图 12 为例，机场东面位置(E)较机场范围内(A)的天气情况恶劣，有可能影响抵达机场之航班。因此会以机场东面的雷达数据作统计而非机场上空的天气数据。对流强度以该范围内 REF3 和 VIL 的第 90 百分位数为代表参数。

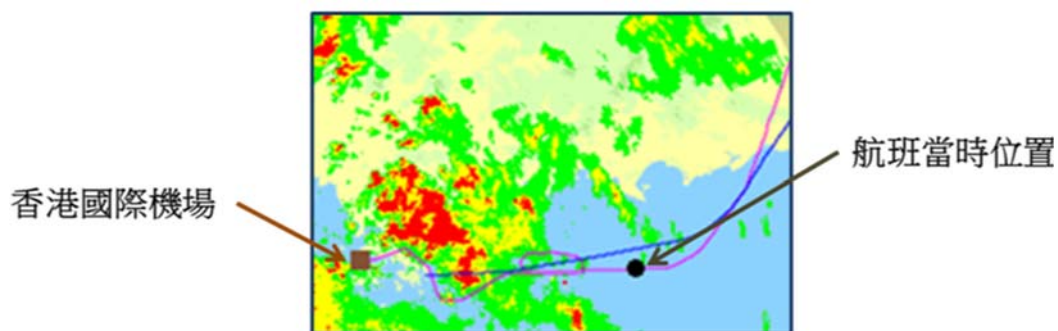


图 11 香港国际机场以及航班当时位置

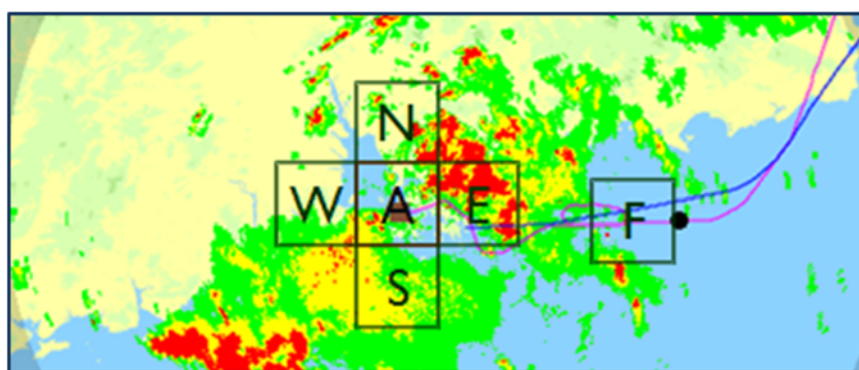


图 12 记录范围包括机场、机场附近区域以及飞机前方之天气状况。

### 3.4 初步结果

图 13 至图 16 显示 REF3 和 VIL 的第 90 百分位数之雷达参数阈值关系。

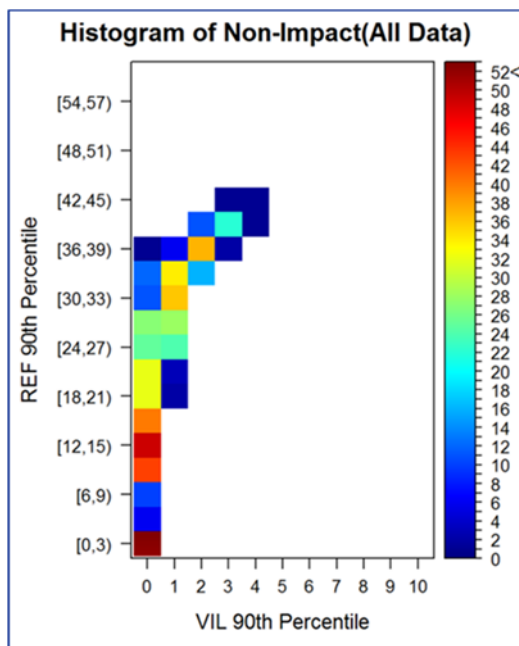


图 13 不受影响的航班数目

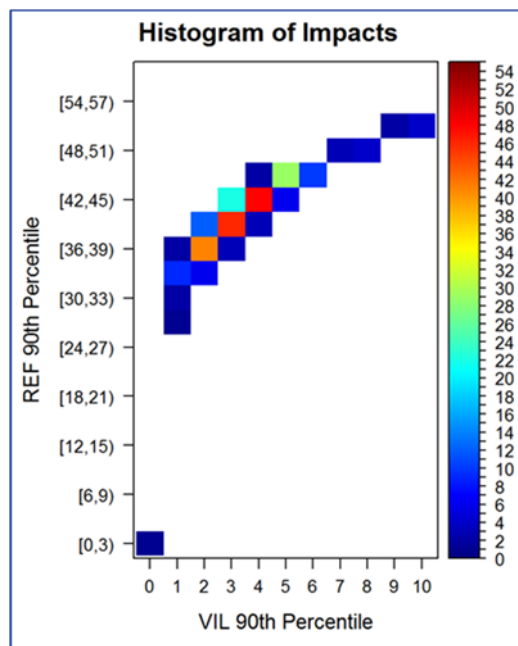


图 14 受影响的航班数目

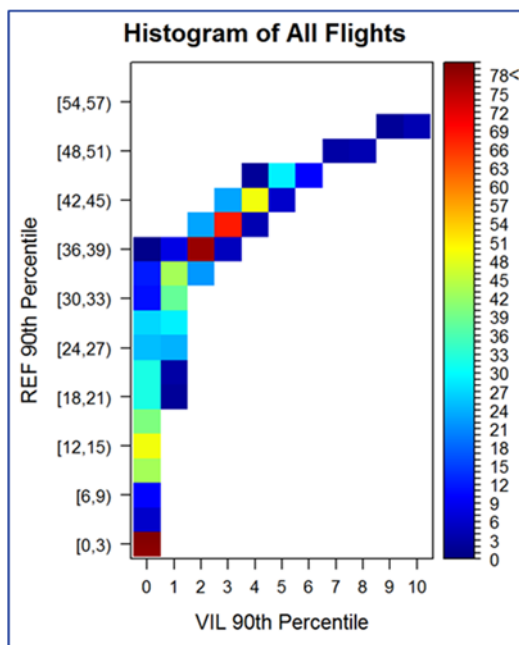


图 15 所有航班总和

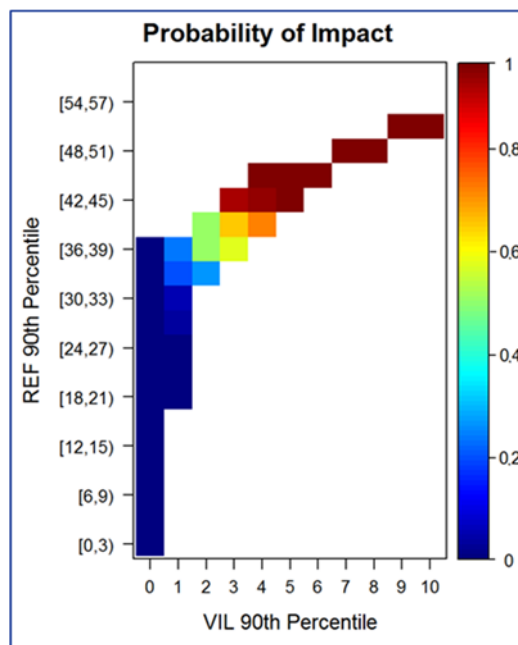


图 16 航班采取绕避行为的概率

在天气良好的情况下，大多数航班根据预定航行路线飞行，预定航行路线与实际航行路线之差距不大，故此在计算机程序上只要航班的实际航路和预定航路距离相差少于 10 公里，该航班便被视为不受影响。上方的图表分别列出不受影响的航班数目(图 13)、采取了等候或减速行为的航班数目(图 14)、以及将以上两者相加的航班数目(图 15)。图 16 则为航班采取绕避行为的概率。以上图表均以 X 轴为 VIL，单位为 mm；Y 轴为 REF3，以 dBZ 为单位。

图 13 显示不受影响的航班数目。当 REF3 低于 24 dBZ 并且 VIL 低于 2 mm 时，大部分航班

可在不受影响的情况下飞行。虽然有航班在 VIL 大于 3 mm 的情况下依预定航路飞行，但出现次数较少。图 14 显示采取绕避动作的航机数目。初步结果显示当 REF3 介乎 42-45 dBZ 及 VIL 在 4 mm 时，采取绕避动作的航机数目最多。从图 16 航班采取绕避行为的概率中可见，当 VIL 在 2 mm 或以下，航机采取绕避动作的机会比率较低。反之，当 REF3 大于 39 dBZ 且其 VIL 在 4 mm 或以上，航机有多于一半机会采取绕避动作。由此可见，飞行员确实会在恶劣天气下采取绕避措施。

对图 16 的概率进行平滑化及插值后即可得出对流活动对航机造成影响的概率对照图表(图 17)。虽然对照图表是以由东面或东北面飞往香港国际机场的航机资料得出，但考虑到航机的绕避动作与特定航线并没有太大关系，此对照图表应可通用于一般情况。对照图表将雷达回波参数转化为航机进行绕避行为的机会率，可用于客观评估强对流天气对空中流量造成的影响，对于空中交通的流量预报亦有参考价值。

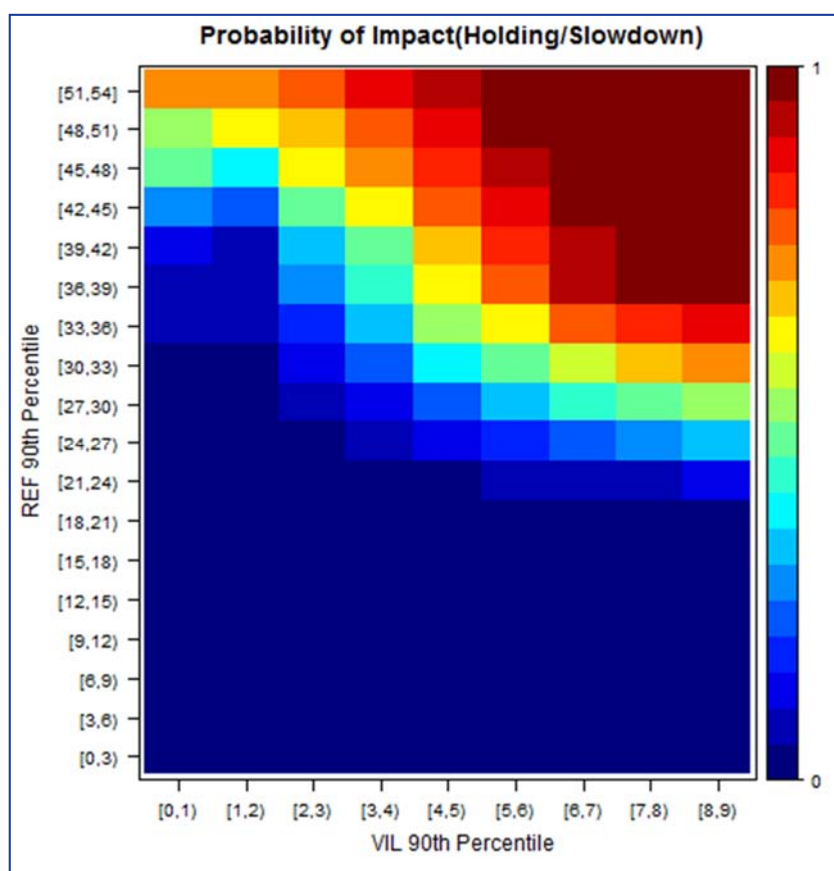


图 17 经平滑化及插值后的航班采取绕避行为之概率对照表

#### 4 总结

香港天文台利用临近预报技术，开发了世界上首套拥有探测及预警能力的自动化机场业务闪电警告系统。系统表现理想，红色预警的捕捉率平均达 90%。2013 年更推出机场分区闪电预警，一方面提升机场地面工作的安全，另一方面尽量缩短警告的生效时间，减少对机场核心区域运作的干扰。事实上，该技术适用的范围十分广泛，可应用于如电力公司、货柜码头、户外康乐场所和大型活动等等不同行业。在强对流天气对空中航机的影响研究中，天文台利用香港民航处提供的航机实际飞行路线及天气雷达的回波参数，找出因天气而造成航机绕避的机会。目前完成了「等候」和「减速」两种绕避行为。初步结果显示当 VIL 在 2 mm 或以下，航机较少采取绕避动作。相反，当航机遇上 REF3 大于 39 dBZ 且 VIL 在 4 mm 或以上的强对流天气，有多于一半机会采取绕避动作。研究得出的对流天气绕避概率对照图表，能将雷达探测到的对流强度转化为对

航机绕避的机会率,对空中交通的流量预报有参考价值,同时亦能为针对航空业界的强对流预报服务的阈值制订起着指导作用。

#### 参考文献

- [1] 李炳华、赵孔儒, 2007. 香港国际机场闪电临近预报系统的发展, 第二十一届粤港澳气象科技研讨会, 中国, 香港, 2007年1月24-26日
- [2] Li, P.W., S.Y. Lau and D.S. Lau, 2008: Development of a Lightning Nowcasting System for Hong Kong International Airport. 13th Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology, New Orleans, Louisiana, USA, 20-24 January, 2008.
- [3] Li, P.W. and E.S.T. Lai, 2004a: Short-range Quantitative Precipitation Forecasting Hong Kong, J. Hydrol. 288, 189-209.
- [4] Li, P.W. and E.S.T. Lai, 2004b: Applications of Radar-based Nowcasting Techniques for Mesoscale Weather Forecasting in Hong Kong, Meteor. Appl. 11, 253-264.
- [5] Chonglin Liu and Stan Heckman: The Application of Total Lightning Detection and Cell Tracking for Severe Weather Prediction, WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-2010).
- [6] Matthews, M. P., DeLaura, R. A., Modeling convective weather avoidance of arrivals in the terminal airspace, Massachusetts Institute of Technology, Lincoln Laboratory, 2011