

联合机场天气研究计划

葛 润 生

1982年夏季,由NCAR(国家大气研究中心)和芝加哥大学主持,在科罗拉多州丹佛市国际机场的周围,实施了联合机场天气研究(JAWS)的现场探测试验。这次现场探测试验集中了天气多普勒雷达、激光多普勒雷达、仪器飞机及地面自动气象站PAM系统等先进的探测仪器设备,有120多名科学家、工程师和各类技术人员参加,着重对严重影响飞机起飞和降落过程的下击暴流(Downburst)、阵风锋(Gust)、风切变等天气现象进行探测研究。这项研究工作与航空飞行保障密切相关,因此得到联邦航空局(FAA)、宇航局(NASA)和国家海洋大气局(NOAA)等部门的大力资助,且在今后的数年内,FAA、NASA等部门准备提供较多的经费来支持这方面的研究工作,本文着重介绍JAWS计划产生的背景、JAWS现场探测试验的仪器装备和实施情况,以及取得的一些初步结果。

一、背 景

近年来,航空飞行技术飞跃发展,大型客机的飞行性能不断提高,客机的飞行事故比起早先已大为减少,但仍有不少的严重事故发生。造成这些严重事故的原因,除了设备、机场管理等方面的因素外,机场附近气象条件的突变,特别是低层风的突变,也是一个重要因素。大型客机高空飞行性能的改善和机上装置天气雷达等设备,使得飞机在航线上飞行

时回避强对流天气的能力大为增强,但机场附近低层风的突变对飞机的起飞、降落仍是很大的危险。Anderson等人^[1]对1972—1977年间大型客机在起飞和降落时受低层风切变影响而造成的重大事

表 1 1972—1977年间因机场风突变造成的
民航客机的重大事故

班机航次	机 型	机 场	日 期	死亡人数	备注
Continental 63	波音 727	亚利桑那州图森	1977.6	0	起飞时
Eastern 66	波音 727	纽约肯尼迪机场	1975.6	113	降落时
Allegheny 121	DC-9	费城	1976.6	0	降落时
Aireast 317	Beech 99A	宾州约翰城	1974.1	12	降落时
Continental 426	波音 727	科罗拉多州丹佛	1975.8	0	起飞时
American 625	波音 727	维京岛圣汤姆	1976.8	37	降落时
Eastern 576	波音 727	北卡罗来纳州雷利	1975.11	0	降落时
TWA 669	波音 707	纽约肯尼迪机场	1972.12	0	降落时
Eastern 752	F-27	布索特	1974.5	0	降落时
PAM 806	波音 707	萨米亚岛帕哥帕哥	1974.1	97	降落时
Lberian	DC-10	麻省波士顿	1973.12	0	降落时
Atlantic 977	DHC-6	新泽西州卡帕梅	1976.12	4	降落时

故进行了统计(参见表1),其中1975年6月在纽约肯尼迪国际机场出现的一次严重事故,造成了113人的死亡。Fujita和Byers^[2]对这次事故的气象原因进行了调查研究,认为这次事故是由出现在雷暴回波前部的下击暴流所造成的,图1是Fujita和Byers根据事故出现前后历次航班飞机记录的风资料,推想出的下击暴流对Eastern 66航班飞机的作用图。1977

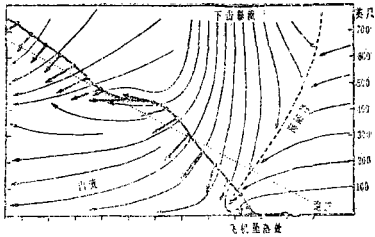


图1 Eastern 66失事前的航线图及推想的下击暴流的作用

年后民航航班机还出现数次重大的事故,其中1982年7月9日在路易斯安那州新奥尔良机场出现的一次事故是最为严重的,泛美航空公司的Clipper 759班机(机型为波音727)在起飞过程中遭遇到强烈的下击暴流作用,致使坠地失事,机上137名乘客和8名机组人员全部死亡,并使得机场8名工作人员死亡,16名受伤^[3]。事后,气象研究人员根据收集到的机场附近的气象资料进行分析,发现这次事故与1975年在纽约肯尼迪机场出现的事故有着相类似的原因。

美国的航空事业非常发达,人们外出旅行、出差常乘坐飞机。自然,下击暴流就引起了人们的重视,1982年8月另一起未造成事故的下击暴流事件也引起人们的注意。美国现任总统里根的座机在华盛顿机场降落后两分钟,机场即受到一次下击暴流的袭击,地面日记气象记录清楚地反映出下击暴流影响时气象要素的变化。正是这一原因,近年来FAA、NASA和NOAA对这方面的研究工作非常关心,JAWS计划就是在这种情形下形成的。它着重研究下击暴流、阵风锋、风切变等,特别着重于对这类天气的探测和警戒。

二、下击暴流、阵风锋研究的现状

与雷暴活动常相伴随的局地灾害性天气现象中,除了龙卷以外,阵风锋、下击暴流往往也带来局地的危害。据美国对1979年1—11月间全美局地灾害性天气现象统计的结果^[4],显示出阵风锋等造成局

地灾害的频数比龙卷造成灾害的频数要高,阵风锋等造成灾害的严重程度也仅比龙卷略低一些。在早期对局地灾害性天气的研究中,受探测设备和站网密度的限制,加上地面灾情调查不够细致,无法将阵风锋、下击暴流等造成的灾害与龙卷造成的灾害加以区分,而常把它们统统归结于龙卷,研究工作也偏重于龙卷,对阵风锋的研究较少,对下击暴流的研究则更少,开展也很晚。近年来,对阵风锋、下击暴流的研究则成了气象研究中的一个热门课题。

对阵风锋的研究开始得略早一些,随着天气雷达和其他探测设备的使用,对阵风锋的结构及其形成的原因有了一定的认识,Charba^[5]利用天气雷达探测资料和气象塔的观测资料,对阵风锋的结构进行了研究,给出它的物理图像。继之,Charba和Sasaki^[6]进一步用重力波理论对阵风锋作了解释。天气多普勒雷达的使用,使得对阵风锋的研究深入了一步,Zrnic等^[7]对单部天气多普勒雷达探测到的阵风锋特征进行了统计研究,为天气多普勒雷达自动检测阵风锋的工作打下基础。Wakimoto^[8]应用天气多普勒雷达和地面站对阵风锋的探测资料,探索了阵风锋的起因。Doviak和葛润生^[9]则应用天气多普勒雷达、气象塔、自动气象站的探测资料,仔细研究了阵风锋的热动力学结构和环境条件,并对阵风锋形成雷达回波的原因进行了研究。在业务使用上,美国也研制了一种由六个地面气象站组成的低空风切变警报系统(LLWSAS),供机场使用^[10],对阵风锋进行警戒。国内也曾运用天气雷达和地面气象站资料对阵风锋进行了研究^[11],并对阵风锋的起因进行了探索^[12]。总的来讲,目前对阵风锋的认识还是初步的,有许多方面值得深入探讨。

下击暴流的概念最早是Fujita和Byers^[13]在1972年提出的。随后,以Fujita为首的芝加哥大学的研究小组在这一方面做了很多工作,早期的工作是从对地面灾情状况细致调查研究着手的,得出了下击暴流的特征和现场表现,早期的研究工作总结在《下击暴流》这本书*^[14]中。1975年纽约肯尼迪机场的重大飞行事故后,下击暴流受到各方面的注意,1978年Fujita得到多方面资助后,在芝加哥地区组织了NIMROD(北伊利诺斯州下击暴流的气象研究)现场探测研究计划^[14]。在这次现场探测试验中,使用了NCAR的两部天气多普勒雷达和PAM地面自动气象站系统,以及NWS的常规天气雷达、探空及

* 这是翻译后的中文简化译名,原名参见[14]。

地面气象资料。从这次试验后发表的一些文章和报告来看,试验并不很理想,取得了一些好的阵风锋资料^[8],而对下击暴流的分析、研究报告并不多,但这一试验计划为JAWS计划作了准备工作,如NCAR的天气多普勒雷达在这次试验的基础上,研究了风切变自动检测软件等。除了芝加哥大学研究小组的工作外,Wolfson^[15]应用NSSL的天气多普勒雷达对俄克拉何马地区的下击暴流进行了研究。Leary^[16]利用对流云模式对下沉气流进行了理论研究。McCarthy等^[17]探索了运用天气多普勒雷达来警戒机场风切变的方法。Mahapatra等^[18,19]也进行了类似的分析和研究。但到目前为止,对下击暴流的研究还是很初步的,涉及到下击暴流的生成原因、风速结构等尚不清楚,对它的警戒、警报方法更有待于改善。

三、JAWS现场试验的仪器设备和实施情况

JAWS计划是在1980年酝酿形成的,其总的目的是研究对流活动造成的强下沉气流,这种下沉气流在近地层造成强的辐散气流,而引起局部的强风切变^[20]。具体的研究内容包含了三个部分:1.对低空风切变的研究,着重对微下击暴流(micro-Downburst)进行基本研究,研究它的成因、生命史、速度场结构等。微下击暴流是下击暴流的一种,其尺度更小,生命史更短。下击暴流的水平尺度通常是在0.4-40公里之间,微下击暴流的尺度则在0.4-4.0公里之间。2.对飞机性能的研究,即在微下击暴流的影响下,对飞机飞行性能进行研究,在这一部分包括对飞机飞行过程进行数字模拟,进行人工调整飞行的模拟试验,以及用仪器飞机进行测量等。3.对具体业务使用中的要求进行研究,研究如何应用地面探测、飞机测量和天气多普勒雷达系统,对低空风切变进行检测和警戒。JAWS计划是由NCAR和芝加哥大学负责、主持的,具体的负责人是NCAR的McCarthy和芝加哥大学的Fujita。整个JAWS计划中最重要的一个环节是一项较大规模的现场探测试验,JAWS现场探测试验在1982年的夏季进行,场地选择在科罗拉多州丹佛的国际机场附近。

下击暴流是一种小尺度的天气现象,微下击暴流的尺度更小,所以在JAWS现场探测试验中采用了很密的观测网来进行研究^[21]。在丹佛国际机场附近不到40×50平方公里的小区域内,布设了3部天气多普勒雷达、2部激光多普勒雷达、27个PAM地面自动气象站,还有5架仪器飞机进行探测。在试验期间,该区域内原设有的博尔德大气观

象台(BAO)的气象塔和为PROFS系统设立的3个地面气象站,以及机场设有的LLWSAS系统,均配合进行探测。图2是JAWS现场探测试验时仪器设备的布置图。

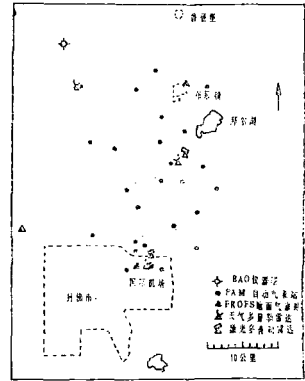


图2 JAWS现场试验的设备布置图

试验中使用的三部天气多普勒雷达都是NCAR的,其型号分别为CP-2、CP-3、CP-4,其中CP-2是10厘米波长的,CP-3和CP-4是5厘米波长的。这三部多普勒雷达均采用了脉冲对处理器(PPP)来实时地处理和获取速度信息,采用对数放大器及视频积分处理器(DVIP)来对回波强度进行较准确的测量。具体的性能参数见表2。这三部多普勒雷达布设成很小的三角形,边长分别为14.7公里、18.0公里和27.5公里。试验中雷达获取的资料全部采用相同的格式复制在1600 BPI的九迹磁带上,供事后分析研究使用。

用于JAWS现场试验的两部激光多普勒雷达来自两个单位,其中一部是NOAA/WPL(波传播实验室)的,架设在和CP-3天气多普勒雷达相同的地点上,另一部是NASA/Marshall(马歇尔宇航中心)的,架设在CP-4天气多普勒雷达同一个观测点上。这两部激光多普勒雷达的主要性能参数见表3。激光多普勒雷达主要用来测量风、湍流及气溶胶物质。由于激光多普勒雷达的波束非常窄,可以获得比天气多普勒雷达更为细致的资料,且受地物的干扰要小一些。这两部激光多普勒雷达也用来进行垂直方向的探测,获取气溶胶物质的垂直分布,以及水汽、二氧化碳的垂直分布廓线。

参加这次试验的5架仪器飞机,携带了多种飞机仪器,进行探测试验。怀俄明大学的超级King 200 T飞机,主要用来对对流单体的微物理特性进

表 2 JAWS 试验中三部天气多普勒雷达的性能参数

型号	波长	脉宽	平均发射功	重复频率	天线直径	有效增益	波束宽度	最小可测信号(10公里)	
								Z	V(测速度)
CP-2	10.67cm	0.4—1.5 μ s	59 dbm	960,480	8.35m	43.9db	0.97°	-25dbZ	-25dbZ
CP-3	5.45cm	1.0 μ s	55 dbm	1666,1250	3.66m	43.0db	1.17°	-10dbZ	-23dbZ
CP-4	5.49cm	1.0 μ s	55 dbm	1666,1250	3.66m	41.0db	1.09°	-24dbZ	-24dbZ

表 3 两部激光多普勒雷达的主要性能参数

型号	波长	发射能量(脉冲功率)	脉冲宽度	重复频率	口径尺寸
NOAA/WPL	10.6 μ	0.065—0.15 焦耳	2—8 μ s	1—25 Hz	28 cm
NASA/Marshall	10.6 μ	5 kW	1 μ s	200 Hz	30.54 cm

行研究,飞机上除携带进行常规探测的温、湿、三维风速的仪器外,还携有进行微物理参数测量的系统,可测量液态水含量、滴谱、液态水和固体水的浓度等参数。NCAR的Sabreliner N 307 D 主要用来对对流场中大尺度特征进行测量,携有测量气压、空速、测高、云含水量、云滴谱、水成物谱等的仪器设备,并配有照相摄影装置。NOAA的P-3 仪器飞机也参加了这次试验,主要使用P-3 飞机上装置的3厘米波长的天气多普勒雷达设备。P-3 机载天气多普勒雷达的频率为9325 MHz,发射功率为60 kW,天线的垂直波束宽度为1.9°,水平为1.35°,仰角可进行360°方位的扫描,方位角则在 $\pm 50^\circ$ 内扫描,雷达测量的不模糊距离为51.9海里,测速不模糊范围为 ± 12.9 米/秒。英国的HS-125 仪器飞机也参加了JAWS 现场试验,机上装备了测量三维风速的仪器和一台激光多普勒雷达系统(LATAS),用来对风、湍流测量。参加这次试验的NASA B-57 B 仪器飞机,除了携有测量常规温、压、湿、风的仪器外,还配有红外遥感辐射仪,用来测量地表面温度的分布。在仪器飞机进行探测时,地面上使用了具有两个天线装置的多飞机定位系统(MAPS),来确定每架飞机的地理坐标,每0.5秒钟给出一组数据,该系统是由NCAR发展的。

27个PAM地面自动气象站布设在丹佛机场的远处,平均站距约为3—4公里,每一个PAM站都进行干球温度、湿球温度、气压、 u 和 v 风速分量、降水量等的测量,每秒进行一次取样,对1分钟的平均

均值和1分钟间隔内的最大值进行记录。其中15个PAM站还配备了NOAA/WPL发展的气压跃变测量系统。

JAWS 现场试验中还应用了博尔德大气气象台仪器塔的观测资料,仪器塔的高度为300米,在10、22、50、100、150、200、250、300米等八个层次上架设仪器。采用声学风速仪和风杯风速仪测量三维风,采用热线温度表和石英温度表进行气温测量,使用冷镜式霜点仪测量湿度,另外在地面还进行绝对气压、波动气压、太阳辐射等项的测量。PROFS系统设置的地面气象站提供5分钟平均的干、湿球温度、气压、风向、风速、降水量、太阳辐射等数据。探空资料使用了国家天气局(NWS)在丹佛的探空站,探空密度增加到每天四次。

JAWS 现场探测试验从1982年5月15日开始,到8月13日结束,一共进行了91天,在这期间有75天出现了对流天气,对其中的38天,JAWS进行了有计划的探测试验。这次试验收集到大量的资料,这些资料不仅包含了有关风切变(下击暴流、阵风锋等)的资料,还包含了中尺度气旋、龙卷、冰雹和局地暴雨的资料。所有这些资料都以规定的格式,贮存入磁带,分别存放在NCAR、芝加哥大学、NOAA/WPL、NASA/Marshall等参加单位,从事这方面研究分析工作的人员可以向这些单位索取、复制。为了便于研究者检索有关的资料,NCAR专门出版了这次现场试验的综合报告^[21],逐日给出每日各项资料的收集情况和当天的天气概况。

四、JAWS 现场试验的一些初步成果

对1982年夏季JAWS 现场试验收集到的资料,目前还在进一步的分析研究中,从目前已公布的一些分析研究报告中,可以看到在以下的几个方面已取得一些初步成果。

1. 得到有关微下击暴流的一些统计特征^[22]。在JAWS 现场试验期间有33天探测到微下击暴

流,约占出现对流活动天数的40%以上。33天的微下击暴流日中一共判别出78个微下击暴流(其中70个左右是由天气多普勒雷达辨别的),平均每个微下击暴流日观测到2—3个微下击暴流。从微下击暴流出现的时间来看,从13时到20时均有发生,但最大值出现在14时到16时之间,另外在18时到19时有另一大值。微下击暴流造成的近地面最大风速差值在10—40米/秒,常见值为15—30米/秒。统计结果还发现微下击暴流的出现和对流单体回波强度的关系并不很密切,回波强度从0dbZ到80dbZ的对流单体都有可能出现微下击暴流,常出现微下击暴流的回波强度在25dbZ到70dbZ间。微下击暴流造成的最大风速差值与回波单体强度的关系也不密切。这些微下击暴流的统计特征为进一步研究其产生的背景条件提供了素材。

2. 通过多部天气多普勒雷达对微下击暴流的仔细探测,得到一些微下击暴流风场结构的图像。Kessinger等^[23]对这次现场试验中的三个例子进行了仔细的分析,其中一次伴随着强降水、冰雹出现的微下击暴流,出现在强回波区的边缘,其生命史维持了1小时,造成的最大辐散达到 15×10^{-3} /秒。另外两个例子是分别出现在弱的和中等强度的降水中,微下击暴流的生命史分别为10分钟和22分钟,但出现的最大辐散量并不弱,分别达到 20×10^{-3} /秒和 15×10^{-3} /秒。从双天气多普勒雷达资料处理后得到的水平流场结构中,可以看到微下击暴流形成的辐散流场近于对称结构。

3. 通过JAWS现场试验后,进一步论证了天气多普勒雷达系统在警戒低层风切变中的效用。JAWS试验中判别出的78个微下击暴流,其中90%以上是依赖多普勒雷达识别的。尽管布设的地面自动气象站网很密,间距达到3—4公里,但微下击暴流的尺度在0.4—4.0公里之间,地面站网常漏测,在一些地面站网和多普勒雷达同时测得的例子中,地面站网得到的数据也不足以很好地描述微下击暴流。如同时探测到的一次例子中,由地面站网资料计算出的最大辐散量为 2×10^{-3} /秒,而雷达测出的量达到 15×10^{-3} /秒。Wilson等^[24]的文章中进一步讨论了单部天气多普勒雷达对微下击暴流的最好警戒区域,研究了为保证机场完全,单站多普勒雷达的站址设置问题。

4. 应用JAWS现场探测的资料,对天气多普勒雷达探测到的资料 and 实际仪器飞机的测量进行了比较^[25],并进一步提出飞机在遭遇到微下击暴流袭

击时,如何变更飞机的航速和高度,来达到安全着陆。

JAWS现场探测获取了大量有关低层风切变和其他方面的资料,有助于人们对下击暴流等天气现象进一步认识,也有助于改善机场天气的警戒和警报工作。上面介绍的一些结果是初步的,随着对这些资料的进一步分析研究,肯定会获得更为丰富、更有用的成果。

参 考 文 献

- [1] Anderson, K. W. and B. A. Clark (1981), A study of wind shear effects on aircraft operations and safety in Australia, ARL-Sys-Report-24.
- [2] Fujita, T. T. and H. R. Byers (1977), Spearhead echo and downburst in the crash of an airliner, Mon. Wea. Rev. 105, 129—146.
- [3] National Transportation Safety Board, NTSB/AAR-83/02.
- [4] Fujita, T. T. (1981), Tornadoes and downburst in the context of generalized planetary scales, J. A. S., Vol. 38, No. 8.
- [5] Charba, J. (1972), Gravity current model applied to analysis of squall-line gust front, NOAA ERL NSSL-78.
- [6] Charba, J. and Y. Sasaki (1974), Application of gravity current model analysis of squall-line gust front, Mon. Wea. Rev. 102, 140—156.
- [7] Zrnac, D. S., R. J. Doviak and R. S. Ge (葛润生) (1983), Characteristics of gust front and downburst from single doppler radar data, preprints, 21st Radar Meteor. Conf.
- [8] Wakimoto, R. M. (1982), The life cycle of thunderstorm gust fronts as viewed with doppler radar and rawinsounde data, Mon. Wea. Rev. 110, 1060—1082.
- [9] Doviak, R. J. and R. S. Ge (葛润生) (1984), The thermodynamic structure of a solitary gust observed with doppler radar and a tall tower, J. A. S. will publish.
- [10] Bedard, A. J. (1979), A Thunderstorm gust front detection system, FAA-RD-79-55.
- [11] 葛润生 (1973), 北京地区的异常回波, 1973年雷达气象会议文集。
- [12] 葛润生 (1977), 雷暴云消散的一种可能机制, 雷达气象文集, 1977年。
- [13] Fujita, T. T. (1982), Tornado occurrences related to overshooting cloud-top heights as determined from ATS pictures, SMRP Res. paper 97, Univ. of Chicago.
- [14] Fujita, T. T. (1978), Manual of downburst identification for project NIMROD, SMRP Research paper 156, Univ. of Chicago (中译本

«下击暴流», 气象出版社, 1981 年版)。

- [15] Wolfson, M. M. (1981), Doppler radar observations of Oklahoma downburst, MIT partical fullfillmant of degree of master of science.
- [16] Leary, C. A. (1980), Temperature and humidity profils in mesoscale unsaturated downdr-afts, J. A. S. Vol. 37, No. 5.
- [17] McCarthy, J., E. F. Blick, and K. L. Elmore (1981), An airport wind shear detection and warning system using doppler radar—a feasibility študy, NASA Marshall Flight Center CR 3379.
- [18] Mahapatra, P. R., R. J. Doviak, and D. S. Zrnic (1982), Radar detection of low-level windshear affecting aircraft terminal navigation, proceedings of National Aerospace Meeting of institute of navigation, NASA-AMeS.
- [19] Mahapatra, P. R., D. S. Zrnic, and R. J. Doviak (1983), Optimum siting of NexRad to detect hazards at airports, J. of Aircraft, 20, 363—371.
- [20] McCarthy, J., J. Wilson, and T. T. Fujita(1982), The joint airport weather studies project, Bull. Amer. Meteor. Soc. 63, 12—22.
- [21] NCAR, The JAWS project operations summary 1982.
- [22] McCarthy, J., R. Roberts, and W. Schreiber (1983), JAWS data collection, analysis highlight, and microdownburst statistics, 同[7].
- [23] Kessinger, C., M. Hjelmfelt, and J. Wilson (1983), Low-level microburst wind structure using doppler radar and PAM data, 同[7].
- [24] Wilson, J., and R. Roberts (1983), Evaluation of doppler radar for airport windshear detection, 同[7].
- [25] Rodi, A. R., K. L. Elmore, and W. P. Mahoney (1983), Aircraft and doppler air motion comparisons in JAWS microdownburst, 同[7].