

利用飞机观测报告提高空中颠簸临近预报预警能力

曾志刚

民航厦门空中交通管理站 厦门市 福建省 361009

摘要:空中颠簸是飞机在飞行中可能遇到的由相应的天气所产生的特殊现象,对飞机结构、飞行操纵、仪表指示和旅客舒适与安全带来很大影响,甚至危及飞行安全,是民航飞行安全较难防范的安全隐患。观测是预报的基础,目前困扰空中颠簸预报的最大瓶颈是缺乏有效的空中颠簸观测手段,利用商用飞机观测报告有助于提高空中颠簸的预警预报能力。

关键词:空中颠簸 预警预报 飞机观测报告 AMDAR 计划

1 引言

空中颠簸是严重威胁飞行安全的天气现象之一,1958年10月17日,机型图-104,在莫斯科附近9000米高空突然遇到强烈颠簸,机翼折断,造成机毁人亡事故。1993年4月6日,机型MD11,在太平洋的阿留申群岛万米高空遭遇到空中颠簸^[1],30分钟内飞机急剧颠簸3次,飞机以每10秒中跌落1700英尺的惊人速度下坠,造成1名乘务员和1名乘客死亡,30多人头皮破裂,头骨骨折,另有100多人轻伤,这是一起因空中颠簸导致人员死亡严重事件。2009年5月16日,A319执行宁波至北京航班,在济南区域发生严重颠簸,与相对飞行的另一架航班飞行发生冲突,触发TCASRA告警,造成13名旅客和3名乘务员感到身体不适或受伤,造成飞机结构过载需全面检查,构成一起因晴空颠簸导致的运输航空严重事故征候。做好空中颠簸预警预报,提高空中颠簸的预报预警能力,是航空气象研究的重要课题。

造成飞机空中颠簸的颠簸层属于中小尺度天气系统,目前用于日常分析大尺度系统的观测资料,无论在时间尺度和空间尺度方面,都难于用在中小尺度系统的颠簸层分析,且目前没有直接观测大气湍流结构的手段,这就给空中颠簸的准确预报带来很大困难。观测是预报的基础,研究利用飞机观测报告,为空中颠簸观测提供新的手段,有助于提高空中颠簸的预警预报能力。

2 飞机空中颠簸

飞机在飞行中遇到扰动气流时,将受到不均匀的空气动力冲击,造成飞机左右摇晃、前后颠簸、上下抛掷及局部震颤等现象,使得飞机操纵困难、仪表不准,即为飞机颠簸(Aircraft-bumpiness)。

2.1 飞机产生颠簸主要原因

大气中的湍流是引起飞机颠簸的主要原因^[2]。当大气湍流的尺度与飞机尺度(15-150米)相近时,容易引起飞机的升力和仰角的显著变化,造成飞机颠簸。大气中湍流涡旋对飞机的作用是,给飞行中的飞机带来一种方向和强度均有明显变化的阵性风。阵性风以垂直突风与航向突风形式作用于飞行中的飞机,当大气湍流涡旋中的垂直突风和航向突风作用于飞行中的飞机,引起飞机升力不规则变化,造成飞机颠簸。当飞机在航路飞行(高空大速度飞行)时,垂直阵性气流(垂直突风)作用大,飞机起飞和降落(低空小速度飞行)或在急流轴中飞行时,水平阵风(航向突风)作用大。

2.2 飞机颠簸强度分类

飞机在飞行中遇到垂直阵风、水平阵风时，升力发生不规则，甚至激烈的变化，产生颠簸。依据飞机垂直方向抛掷的激烈程度：

轻度颠簸：飞机轻微抛掷，航向稍有摆动，乘员安全带稍拉紧。

中度颠簸：飞机抛掷明显增强，飞机姿态、高度、航向均有变化，空速有变化，乘员安全带绷紧。

严重颠簸：飞机姿态、高度、航向有很大和急剧的改变，空速变化大，飞机短时失去操纵，乘员安全带急剧拉紧。

2.3 飞机颠簸强度影响因子

飞机颠簸强度与湍流本身的性质及飞机飞行空速、飞机质量、高度有密切关系^[3]。

2.3.1 湍流强度及其不均匀性

湍流强度取决于垂直阵性气流和空气密度。垂直阵性气流和空气密度越大，引起飞机升力变化也越大，造成的颠簸越强，反之颠簸越弱。

2.3.2 飞机速度

飞机速度越大，飞机受到垂直阵性气流的冲击越强，升力变化越大，载荷因数变化就越大，颠簸则越强。高速飞机飞行速度越大，每次阵性气流的冲击的作用时间则会短，颠簸的振幅减小，则颠簸越弱。而在低速飞行条件下飞行速度越大，颠簸越强，

2.3.3 翼载荷

翼载荷大的飞机，单位机翼面积上承受的飞机重量大，受到的垂直阵风冲击后产生的加速度越小，所以颠簸较弱；反之翼载荷小的飞机，颠簸则较强。对同类飞机而言，颠簸强度则与载重量大小有关，载重量大时颠簸弱，载重量小时颠簸较强。

3 航空气象预报业务的空中颠簸预报方法

大气中的湍流涡旋是造成航空器颠簸的主要原因，在锋区、对流层顶或平流层中、气旋、高空槽、切变线及急流附近，存在较强的风切变，经常产生湍流。目前，在我国民用航空气象预报工作实践中，民航气象部门对空中颠簸的预报，通常的作业方法是根据天气形势和空中风场，分析飞行空域或航线上在什么时间、什么地方可能存在颠簸层，再利用探测资料和数值预报产品计算各种指数或使用统计预报方法对颠簸的强度进行分析，即定性预报与定量预报相结合，有时仅做定性预报。

3.1 定性预报

根据产生飞机颠簸的天气背景和山波，对空域飞行过程中可能出现的空中颠簸及强度进行预报^{[4] [5]}。

3.1.1 云中颠簸

云中颠簸出现频率较高，尤其在积状云中，常存在对流湍流发展最有力的不稳定层结，常出现异常强烈的垂直阵性气流和水平湍流阵风，飞机飞越时遭遇颠簸的频率和强度最大，特别是在浓积云和积雨中颠簸最强。在飞行中经常遇到的波状云，在层状云中出現颠簸频率接近 40%，一般表现为弱至中度颠簸，在紧贴云层上限或在密度不均匀的云中飞行，会出现强烈颠簸，在高积云、卷云中若与急流区相伴，则可出现强烈颠簸。

3. 1. 2 由天气系统产生的颠簸

分析不同天气系统产生的颠簸可预报颠簸对空域中飞行的飞机影响及颠簸强度。

3. 1. 2. 1 锋面系统

较强的颠簸多出现在锋面附近，在各种锋面中冷锋造成的颠簸最强。冷锋锋区颠簸强度取决于锋面强度、坡度、移动速度和大气层结稳定度，锋面强度越强、坡度越大、移动速度越快、大气层结不稳定越大，产生的湍流颠簸就越强。

暖锋云系中飞行相对平稳，颠簸不强、出现频率也比冷锋小。

锢囚锋云系中出现的颠簸强度与锢囚锋类型和锋区中温压场特点有关，分别与冷、暖锋区中的产生的颠簸相似。

3. 1. 2. 2 高空槽、切变线和高空低涡

在高空槽线和切变线附近，由于气流层气旋式变化，并常伴有冷暖温度平流，使大气层结不稳定，再加上气流辐合辐散，湍流容易发展，产生颠簸。在高空低涡区域，高空风很小，风向呈气旋式变化，且由于高空低涡多为冷涡，引起气层不稳定，导致湍流发展，当飞机穿越高空低涡时，容易遇到中度以上颠簸。

3. 1. 2. 3 高空急流

急流轴冷空气（低压一侧），风的水平切变和垂直切变均较暖空气（高压）一侧大，因此出现在急流轴低压一侧的颠簸较高压一侧为多且强，且颠簸频率和强度最大值都出现在急流轴下方靠低压的一侧。

3. 1. 2. 4 对流层顶附近

在对流层顶附近，特别是在对流层顶有断裂现象和对流层顶坡度较陡时，往往有较强的乱流现象，出现中度以上颠簸。

3. 1. 3 地形颠簸

在山区的动力因子和热力因子的共同作用下，常出现山谷环流、山地波，会产生上升气流速度和下沉气流速度很大的强烈湍流，飞机飞经这样的地区，就会产生强颠簸。判断地形颠簸强度取决于山脉的形态高度，及与相对于山体的风向风速和风随高度的变化。

3. 1. 4 晴空颠簸

晴空颠簸与晴空湍流密不可分。晴空湍流常指 6000 米以上高空，且与对流云无关的大气湍流。由于它不伴生可见的天气现象（除卷云外），飞行员难以发现，对飞行威胁很大。晴空湍流一般发生在空中温度水平梯度较大和风切变区域、流场的辐合辐散地带、流场的水平形变区，这些特定环境往往出现在锋区，对锋面进行分析，可预报由晴空颠簸引起的飞机颠簸，在锋面急流极地一侧，高空急流区附近，常出现晴空颠簸。

3. 2 颠簸的定量预报

3. 2. 1 指数颠簸预报^[4]

在定性分析基础上，使用颠簸指数进行颠簸的定量预报是预报业务中常用的方法。如 Ri 数、I 指数、Ti 指数、E 指数、SCATR 指数、L 指数、tcr 指数等。

3. 2. 2 利用判据预报颠簸^[5]

颠簸强度与飞机空速、空气密度、风的切变以及温度的水平和垂直梯度及温度的局地变化关系最为密切，可以根据以上因子从分析和统计资料中寻找判据进行颠簸预报。如根据风温探测资料确定一下 6 个判据：

风速 $\geq 25\text{m/s}$

风速垂直切变 ≥ 10 (m/s) /1000m

风速水平切变 ≥ 5 (m/s) /100km

风向垂直切变 $\geq 15^\circ$ /1000m

风速 6h 增强 ≥ 10 (m/s)

气温水平梯度 $\geq 2^\circ$ /100km

如果飞行高度上同时满足以上 3 个条件，就应预报有颠簸。

4 空中颠簸的观测与临近预报

在对飞行空域内中高空的颠簸层研究表明^[5]，观测到的颠簸层，在 100min 内，前后两次飞行观测，变化并不大，120-180min 后重复观测，则变化很显著，由此说明颠簸层的持续时间并不长，据统计，颠簸层持续 6h 以上的概率，通常不超过 50%。飞机试验表明，中高空的颠簸层一般具有比较明显的边界，飞机一旦进入其中，就会产生不同程度的颠簸，但在改变一定飞行高度(通常不过几百米)或改变航向后，又能迅速恢复正常飞行状态，说明颠簸层的厚度和范围并不大。颠簸层的水平尺度，则可以从几千米到几百千米。由于中高空的颠簸是中小尺度系统，持续时间不长，做好飞行空域内中高空颠簸的临近预报就显得尤为重要。

4.1 空中颠簸的观测与预报

空中颠簸的观测，对准确预报空中颠簸，特别是临近预报有重要作用。由于中高空的颠簸是中小尺度系统，目前用于日常分析大尺度系统的观测资料无论在时间尺度和空间尺度方面，都难于用在中小尺度系统的颠簸层分析，而目前直接观测大气湍流结构的手段还没解决，这就给空中颠簸的预报带来很大困难。在现行的民航气象预报作业方式中，虽难可以通过颠簸的定性预报和定量预报做出空中颠簸出现的时间、范围和强度，但由于缺少针对性的观测手段和方法，缺少空中颠簸的实时观测资料，要做出准确的颠簸预报还有很大困难。

4.2 空中颠簸观测报告

目前，对飞行区域中出现颠簸等重要天气还缺乏有效的、针对性的观测技术手段。在日常工作中，民航气象部门通过《语音方式航空器空中报告》，收集来自飞行航班的飞行员在遭遇空中颠簸时的报告而得到空中颠簸观测资料：当飞机遭遇空中颠簸时，飞行员将飞机遭遇到颠簸的时间、方位、飞行高度、颠簸强度等通过塔台管制员传递到各地民航气象部门，全国各地民航气象部门将收到的空中颠簸报告汇总到民航气象中心，由民航气象中心收集整理使用。通过《语音方式航空器空中报告》收集到的颠簸报告是由飞行员主动报告的，由于各种原因，空中颠簸报告在数量上还是有限的，如根据民航气象中心《语音方式航空器空中报告》资料统计，2013 年 4 月份、5 月份各收到 115 份、81 份中国飞行区域内航空器遭遇中度或强烈颠簸的报告；《语音方式航空器空中报告》通过人工传递，环节多，在时效上存在一定的延迟；颠簸强度是根据飞行员的感觉和目测来判断，主观明显，资料的客观性也存在一定问题。通过《语音方式航空器空中报告》收集到的颠簸报告，在颠簸样本数量、代表性、客观性和时效性还存在一定差距，由于中高空颠簸层具有持续时间短的特点，《语音方式航空器空中报告》收集的颠簸报告可以对已经作出的颠簸预报进行佐证，但对于空中颠簸临近预报作用有限。

5 飞机空中颠簸观测

目前，商用飞机上装载有探测仪，可测量飞机在飞行中遇到湍流颠簸时产生的过载，由此估算出飞机遭遇颠簸的强度。利用对商用飞机在飞行过程中遭遇颠簸时产生过载进行探测，可得到飞机空中颠簸客观观测资料，为空中颠簸实时观测提供新的手段。

5.1 飞机载荷因素与颠簸

5.1.1 飞机在湍流大气中飞行时受到的颠簸，其强度依据垂直方向上飞机承受的载荷因数（过载）变化，即飞机受到垂直加速度的变化来划分。飞机载荷因数（N）与飞机升力（Y）与飞机重力（G）的关系：

$$N=Y/G$$

5.1.2 为估算颠簸强度，使用过载增量 Δn ：飞机在湍流大气中飞行时所具有的加速度，以重力加速度 g 的倍数表示：

$$\Delta n = a / g \quad a \text{—飞机垂直加速度} \\ g \text{—重力加速度}$$

5.1.3 过载增量可通过机载加速计进行测量，通过测量飞机在飞行中遇到湍流颠簸时产生的过载增量，可得到飞机在飞行过程中遭遇空中颠簸强度的实时观测资料。

5.2 过负荷增量与飞机颠簸强度等级

表 1 为利用过载增量 Δn 估算的飞机颠簸强度等级

湍流（颠簸）强度	过负荷增量范围
无湍流	$ \Delta n \leq 0.15g$
轻度	$0.15g < \Delta n \leq 0.5g$
中度	$0.5g < \Delta n \leq 1.0g$
严重	$ \Delta n > 1g$

表 1

5.3 飞机空中颠簸观测资料使用的局限性

由于湍流对飞机的影响程度主要取决于湍流本身的性质和飞机空速、质量、高度等因素，因此，不能完全利用飞机空中颠簸观测资料作为判据预报空中颠簸，需要结合当时空域中天气形势和空中风场及飞机空速、质量、高度和湍流本身性质等情况来预测空中颠簸的产生、强度及未来发展趋势。

6 AMDAR 计划与飞机空中颠簸观测报告实时传递

民航飞机上都装有气象传感器以及自动数据收集和处理系统，由此可以把飞机在飞行中得到的气象数据自动转播到地面，这种就是 AMDAR（Aircraft Meteorological Data Relay，飞机气象数据转播）。AMDAR 资料是通过民航班机上的自动观测仪器获取探测数据并自动下传所得到的气象报文。

飞机空中颠簸观测资料需要及时传递到民航气象部门才能发挥资料的作用，航空器气象资料下传（AMDAR）的实现，使飞机空中颠簸观测资料实时下传成为可能。

6.1 AMDAR 计划

根据 ADMAR 计划,通过机载气象探测器和导航系统,可以实时将飞机在飞行中得到的气象数据自动转播民航气象部门。截止到 2013 年 01 月底,全国国内航空公司开通并下传 AMDAR 资料的飞机共计 173 架,其中,山东航空 43 架,南方航空 19 架,西藏航空 5 架,东方航空 15 架,四川航空 19 架,成都航空 10 架,厦门航空 62 架。下传的 AMDAR 资料作为一种气象观测资料因其观测模式的特殊性,与航班飞行的分布有着明显的空间和时间的分布特点,客观反映了飞行空域中的气象观测实况,其数据密度大,精度高。这些高密度的资料使得气象预报员能够连续地监测机场及其周边地区的气象要素及其时空变化特点,进而捕捉到一些常规探空观测难于发现的中小尺度天气系统及其演变趋势,为准确制作临近和短时预报提供了精细的预报依据。目前,通过 AMDAR 计划,民航气象部门每天可获得五万多份的飞机观测报告,这些资料可应用于机场临近预报、空中颠簸积冰预报、飞行计划制定及管制服务等方面。

6.2 AMDAR 资料内容

AMDAR 资料包含了飞行状态、飞机标识、飞行中的经纬度、观测时间即飞行时间、飞行高度、温度、水平风向、风速、颠簸、最大风等。民航气象部门通过质量控制,将包含以上内容的气象信息编写成 FM42 格式下发至各地民航气象台。以下是一份 ADMAR 资料 FM42 格式及内容:

AMDAR 0723 LVR CNFQYS 3711N 12043E 072347 F291 MS465 319/040 TB/ S//1

含义:巡航阶段 飞机标识: CNFQYS 位置:北纬 37 度 11 分 东经 120 度 43 分 观测时间:7 日 23 点 47 分世界时 飞行高度 29100ft(8870 米) 温度-46.5 风向风速 风向 319 度、风速 40 米/秒 颠簸 /表示缺测。(当颠簸 TB 指示码为 0 表示没有颠簸,1 为轻度颠簸,2 为中度颠簸,3 为严重颠簸,/表示缺测。)

AMDAR 资料包含了飞机空中颠簸观测资料,可通过解码和处理 AMDAR 数据中的飞机颠簸报告,加以研究利用,为空中颠簸预警预报提供有效帮助。

6.3 AMDAR 资料中的空中颠簸报告

AMDAR 资料中包含了飞机在空域飞行过程中观测到的空中颠簸资料,通过解码和处理 AMDAR 数据中的飞机颠簸报告分析判定飞机遭遇空中颠簸及强度。AMDAR 资料中高密度的航路高空气象观测记录,尤其是飞机颠簸报告,为空中颠簸的观测提供直接的手段。

AMDAR 资料由于具有较高的时空分辨率,反映了航线空域中的大气实况,弥补了探空观测时间间隔过长,特别是空中颠簸观测手段缺乏的不足,可为民航气象预报员提供航线上高时间分辨率的中高层大气实际状况及空中颠簸实况报告。目前,通过 AMDAR 下传的空中颠簸报告每天有一百多份,这比通过《话音方式航空器空中报告》收集到的颠簸报告一个月只有 100 多份要丰富的多,且 AMDAR 下传的空中颠簸报告为实时下传,经处理后可实时使用,时效性更高,资料的客观性更高,更为客观地反映了当时飞行空域空中颠簸发生的实际情况,可为临近预报提供更为丰富有效的空中颠簸观测报告。

7 飞机空中颠簸探测报告与空中颠簸临近预警预报

目前,国内航空公司参加 AMDAR 计划的飞机都是大型商用飞机,在中高层飞行时,其飞行速度和翼载荷比较一致,湍流强度是影响飞机颠簸强度的最大因素,不同飞机观测到的颠簸强度较客观反映了当时大气湍流对飞机的影响程度。通过解码 AMDAR 数据中的飞机

观测颠簸报告，可以客观描述飞机飞行过程中遭遇空中颠簸的时间、位置、高度、强度等。有了直接的颠簸观测资料，可以为空中颠簸临近预警预报提供的重要的依据。

图 1 是 2011 年 7 月 26 日 0200-2059 的中国区域 SFC-FL630 空域中飞机颠簸报告实况图^[6]。图中显示了该时段内中国区域 SFC-FL630 空域内所有报告中出现飞机颠簸的飞机位置。从图中可以看出，在这个时间段内，华东长三角地区飞行空域中出现比较多的颠簸情况。根据中高层颠簸特点，在后续几个小时内，在该飞行空域内颠簸有可能继续维持，据此，可做临近预报：在接下来的几个小时，该空域空中颠簸继续维持，并可向后续航班提出空中颠簸的预警。在图 2 显示，随后的 0300-3059 时段，长三角地区上空空域内继续存在飞机颠簸，一直到 0400-4059（见图 3）仍有飞机颠簸发生。

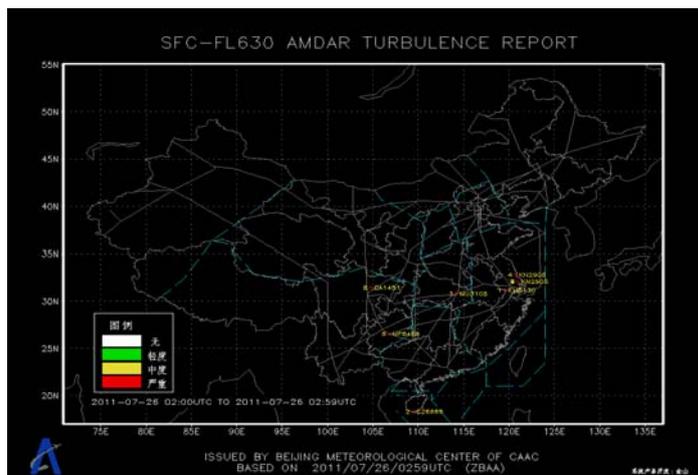
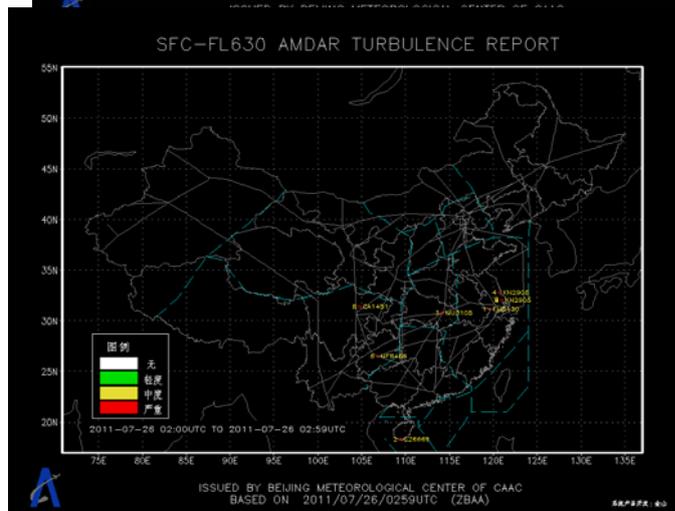
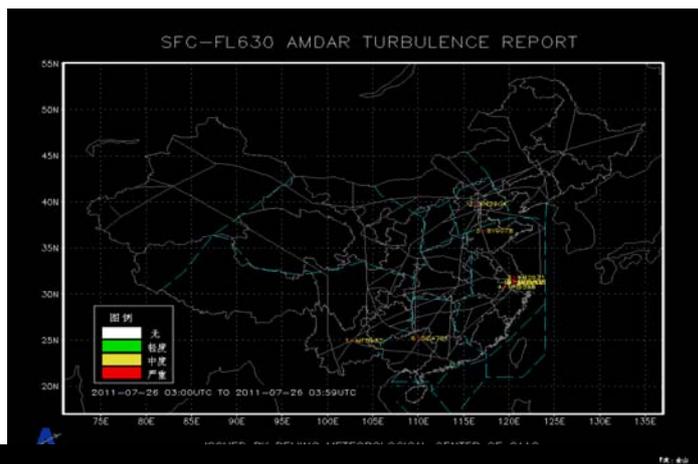


图 1 2011 年 7 月 26 日 0200-2059 的全国 SFC-FL630 高度飞机颠簸报告实况图



日 0300-3059
飞机颠簸报

图 2 2011 年 7 月 26 日的全国 SFC-FL630 高度飞机颠簸报告实况图

图 3 2011 年 7 月 26 日 0400-4059 的全国 SFC-FL630 高度飞机颠簸报告实况图

8 结束语

观测是预报和预警的基础，影响飞行安全的重要天气、灾害天气的预警需要观测信息和资料的直接支持，准确的航空气象预报也离不开实时连续的具有高时空分辨率的气象观测。困扰空中颠簸预警预报的最大瓶颈是缺乏有效的空中颠簸观测资料。中国民航重视航空器下传数据应用研究^[7]，促进对观测技术的有效应用，积极推进航空器下传气象数据在民航气象业务及服务中的普及应用，飞机观测信息将更多地应用于气象服务。随着民航的高速发展，民航机队规模扩大、航班、航线的密度快速增加，加入 AMDAR 计划的商用飞机将越来越多，飞机探测的覆盖面将越来越大，AMDAR 资料将越来越丰富，所获取的空中颠簸实测资料在时间和空间上将更为有效，为空中颠簸观测提供了新的手段，可为民航气象部门做好空中颠簸预警预报提供更为丰富的依据。进一步研究利用飞机空中颠簸观测报告，有助于提高空中颠簸预警预报能力。

参考文献：

- [1] 中国民用航空局空中交通管理局 中国民用航空空中交通管理系统安全风险通告
北京： 2013 年 P1-5,
- [2] 章澄昌 飞行与气象学[a] 北京：气象出版社. 2000 年. P189.
- [3] 章澄昌 飞行气象学[a] 北京：气象出版社. 2008 年. P148-149.
- [4] 周建华 航空气象业务[a] 北京：气象出版社. 2011 年. P181-184. P114-116.
- [5] 赵树海 航空气象学[a] 北京：气象出版社. 2004 年. P128-130. P144-158.
- [6] 金山 AMDAR 资料在航空气象预报中的应用[a]. 第六届海峡两岸航空气象与飞行安全
研讨会论文集 西安：2011 年. P169-173.
- [7] 中国民用航空局空管行业管理办公室 民用航空气象观测技术政策
北京： 2012 年. P19. 24.

作者信息:

姓名:曾志刚 性别:男

出生年月:1966年5月

职称:高级工程师

单位:民航厦门空中交通管理站

邮编:361009