

民航飞行技术与飞行安全科研基地研究系列丛书



..... FEIJI DIANBO

飞机颠簸

■ 王永忠 编著



西南交通大学出版社
<http://press.swjtu.edu.cn>

◎ 责任编辑 / 孟苏成
◎ 责任校对 / 韩松云
◎ 封面设计 / JADE HE



FEIJI DIANBO

ISBN 7-81104-102-2



9 787811 041026 >



ISBN 7-81104-102-2/V·006
定价: 25.00元

民航飞行技术与飞行安全科研基地研究系列丛书

飞机颠簸

王永忠 编著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·



内 容 简 介

本书密切结合飞行实际,全面系统地介绍了影响飞行安全的重要因素之一——飞机颠簸。从产生飞机颠簸的大气湍流出发,介绍了飞机颠簸的形成原理,飞机颠簸强度的估算、划分和影响因子,飞机颠簸层的基本特征,以及产生飞机颠簸的条件。同时,提供了几种有效预测边界层飞机颠簸和晴空颠簸的实用方法,探讨了飞机颠簸对飞行的影响,并给出了飞机颠簸的飞行处置方法。

本书是在民航飞行技术与飞行安全科研基地的资助下,为民航飞行、空中交通管制、飞行签派、机场地面运行和航行情报人员编写的,也可供民航飞行气象保障人员和相关专业研究生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

飞机颠簸 / 王永忠编著. — 成都: 西南交通大学出版社,
2006.1
(民航飞行技术与飞行安全科研基地研究系列丛书)
ISBN 7-81104-102-2

I. 飞... II. 王... III. 飞机—飞行安全—研究
IV. V328

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第058002号

民航飞行技术与飞行安全科研基地研究系列丛书

飞 机 颠 簸

王永忠 编著

*

责任编辑 孟苏成

责任校对 韩松云

封面设计 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段111号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

E-mail: cbsxx@swjtu.edu.cn

四川森林印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm × 230 mm 印张: 10

字数: 174 千字

2006年1月第1版 2006年1月第1次印刷

ISBN 7-81104-102-2/V · 006

定价: 25.00 元

图书如有印装问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

民航飞行技术与飞行安全科研基地研究系列丛书

委 员 会

主任委员：郑孝雍

副主任委员：李书文 陈布科 黎 新

委 员〔按姓氏笔画为序〕：

王大海 王照明 李卫东 李书文 李 宜

成义如 刘晓东 刘清贵 伍开元 朱代武

陈布科 张子彦 罗晓利 饶绍武

秘 书：孙海东



前 言

《飞机颠簸》这本书有助于民航飞行、空中交通管制、飞行签派、机场地面运行、航行情报和飞行气象保障人员全面系统地了解“飞机颠簸”这一飞行现象，从而更好地保障飞行安全。也是从事飞机颠簸研究人员学习的一本很有价值的参考书。撰写本书的目的在于使读者掌握与飞机颠簸密切联系的大气湍流的基础理论，懂得飞机颠簸的形成原理、强度、基本特征以及产生的条件；学会预测边界层飞机颠簸和晴空颠簸的方法；了解飞机颠簸对飞行的影响，掌握飞机颠簸的飞行处置方法，从而有效地利用相关飞机颠簸的知识，在每一次飞行前和飞行中都能对飞行区域的飞机颠簸情况做到胸中有数，避害趋利，顺利地完成任务，为提高民航的经济效益和保障飞行安全服务。

读者对飞机颠簸的掌握，主要包括三个方面：一是大气湍流的基本知识，即要了解湍流的简要特性，懂得大气中湍流的产生原因，熟悉大气中湍流的种类，为正确理解飞机颠簸打好基础；二是要掌握飞机颠簸的形成原理、强度、基本特征以及产生的条件，学会飞机颠簸的基本预测方法；三是要清楚飞机颠簸对飞行的影响，掌握飞行中对飞机颠簸的处置方法。

目前，全面系统地阐述飞机颠簸的著作在国内外还是空白，《飞机颠簸》一书填补了这一缺憾。本书在编写过程中参考并借鉴了国内外大量的、零散的参考资料和文献，坚持贯彻了理论联系飞行实际的原则，在取材上尽量反映国内外最新成果。书中的术语和单位按国际民航组织（ICAO）的要求，例如，飞行速度的单位使用了海里/小时（kn），飞行高度的单位用了英尺（ft）等，使之更加适合于民航各类专业人员的理解和需要。

全书共分9章。第1章回顾了飞机颠簸事故或征候事例；第2章是大气中湍流的一些知识；第3、4、5章探讨了飞机颠簸的形成原理、飞机颠簸的强度和飞机颠簸层的基本特征；第6章讨论了产生飞机颠簸的基本天气条件；第7章和第8章介绍了几种有效预测边界层飞机颠簸和晴空颠簸的方法；第9章论

述了飞机颠簸对飞行的影响及处置。

本书的编写出版，得到了“民航飞行技术与飞行安全科研基地”的大力资助，以及民航同行的帮助，在此深表谢意。

由于水平有限，缺点和错误在所难免，欢迎读者批评指正。

王永忠

2005 年 11 月于中国民航飞行学院



目 录

第 1 章 飞机颠簸简介	1
1.1 飞机颠簸的基本情况	1
1.2 部分飞机颠簸事故或事故征候事例	4
第 2 章 大气中的湍流	6
2.1 湍流的简要特性	6
2.2 大气中湍流产生的原因	9
2.3 大气湍流的种类	13
第 3 章 飞机颠簸的形成	24
3.1 不同尺度的湍流与飞机颠簸	25
3.2 湍流脉动对飞机的影响	26
3.3 飞机颠簸与各种气流的关系	35
第 4 章 飞机颠簸的强度	41
4.1 飞机颠簸强度的理论估算	41
4.2 飞机颠簸强度的划分	43
4.3 影响飞机颠簸强度的因子	46
第 5 章 飞机颠簸层的特征	49
5.1 大气湍流分布与飞机颠簸的关系	49
5.2 飞机颠簸层的时空分布	53
5.3 飞机颠簸层随纬度和高度的分布	55
5.4 我国飞机颠簸的分布	56
第 6 章 产生飞机颠簸的条件	58
6.1 产生飞机颠簸的天气系统	58
6.2 产生飞机颠簸的地区	70

6.3 产生飞机颠簸的其他条件	78
第7章 边界层飞机颠簸的几种预测方法	86
7.1 边界层急流型重力波与飞机颠簸	86
7.2 惯性振荡型边界层夜间低空急流与飞机颠簸	91
7.3 地面加热与飞机颠簸	98
第8章 晴空颠簸的几种预测方法	104
8.1 湍流动能的产生与晴空颠簸	105
8.2 锋生作用与晴空颠簸	107
8.3 重力内波与晴空颠簸	111
8.4 高空急流区与晴空颠簸	119
8.5 卫星云图上卷云云型与晴空颠簸	125
8.6 晴空湍流的天气图判断方法	132
第9章 飞机颠簸对飞行的影响及处置方法	135
9.1 颠簸对飞行造成的影响	135
9.2 飞行中颠簸的处置方法	139
9.3 未来航线机载飞机颠簸探测系统简介	142
9.4 飞机颠簸的业务预测综述	144
参考文献	150



第 1 章

飞机颠簸简介

飞机在飞行中遇到扰动气流，就会产生震颤、上下抛掷、左右摇晃，造成操纵困难、仪表不准等现象，这就是飞机颠簸。轻度颠簸会使乘员感到不适，甚至受伤；颠簸强烈时，一分钟内飞机上下抛掷十几次，高度变化数十米甚至几百米，空速变化 20 km/h 以上，飞行员虽全力操纵，飞机仍会暂时失去控制；当颠簸特别严重时，所产生的较大过载因素（亦称过载）会造成飞机解体，严重危及飞行安全。

1.1 飞机颠簸的基本情况

颠簸既可以发生在对流层的低层、中层和高层，也可以发生在平流层的低层。一般来说，飞机在穿越云层或遇到强大气流时，往往出现颠簸。在万里晴空中，有时也像平静的海面下藏有汹涌的暗流一样，偶尔会出现强烈的扰动气流，使飞机产生剧烈颠簸，航空气象专家称这种来无影去无踪的气流为晴空湍流（CAT）。湍流虽然不是每次都造成恶性飞行事故，但在机组来不及处理、乘客又未系安全带的情况下，也可能造成乘客受伤，甚至危及人身安全。

科学家研究发现，当喷射气流中的强风减速时，湍流就能产生，还会引起

气流上升。山上的气流与白天陆地散发的热量同样是导致湍流的原因。当湍流产生在 7~12 km 的高空,宽约 100 km、厚约 1 km 的范围内时,湍流能使没有固定住的物体在机舱中飞旋起来。通常,飞行员可以使用机载雷达避开常伴有湍流的云、雨和雷暴等湿性湍流,然而却无法探测到在晴空时出现的难以捉摸的晴空湍流。

如果没有天气预报,晴空湍流常使飞机不知不觉的进入颠簸区。引起飞机晴空颠簸的最主要的直接原因是来自空中风的切变和温度的切变。风和温度的切变又可分为水平切变和垂直切变两种,因而根据水平温度梯度和风切变的区域可以判断湍流可能存在的区域。

为了揭示大气湍流的秘密,目前美国的研究人员正在太平洋中部上空靠近急流的地方进行一系列气象飞行试验,试图找出引起大气湍流的气象学特征。美国国家海洋大气局(NOAA)正在寻找两种湍流:一种是在急流附近由强垂直切变层组成并发展成冬季风暴系统的湍流;另一种是急流通过大雷暴上方时形成的湍流,大雷暴能使急流减速。在这两种情况下,飞行员无法判断湍流的延伸距离,因为这些湍流是看不见的。目前,该研究已经取得的结果包括:① 已经识别出湍流盛行的厚度为 1 000 ft 以下的垂直层,这项发现有助于解释为什么一架飞机遇到晴空湍流,而其他飞机却没有遇到的疑问;② 发现了急流内部呈现海浪特征的垂直波动,这些波动也会像海浪一样破碎。研究者们已能够模拟出这些破碎的波动并将测量结果纳入试验性的预报模式中。这些新的发现将被用于改进业务预报。将来,我们乘坐飞机时可能不用再提心吊胆,担心飞机碰上晴空湍流了,因为航空气象专家早已把晴空湍流的准确位置告诉了飞行员。

飞机在空中出现颠簸主要是由天气原因造成的,如穿云颠簸、气流颠簸等。云中飞行能见度很差,影响飞行员目视飞行,造成操作困难,小型飞机会有比较明显的颠簸,而对于大中型飞机而言,这种影响相对小得多。此外,气流造成飞机颠簸的现象较为普遍。气流是流动不规则的空气,飞机在飞行过程中遇到较强气流时,就如同行驶在不平道路上的汽车一样,上下颤动、左右摇晃。目前的航班飞行中,当预计会遇到颠簸时,机组会提醒您系好安全带,这在一定程度上保证了飞行的安全。

但是,飞机颠簸依然是影响飞行安全的重要因素之一。较强的颠簸会危及飞行安全,特别是对高空飞行的运输机来说,湍流已成为威胁最大的气象因素

之一。影响飞行安全的气象因素中,以美国为例,湍流占第3位,仅次于雷暴和风切变(见表1-1)。根据美国国家安全委员会和联邦航空局搜集的资料显示,从1983年1月至1999年9月,在美国领空发生了128起颠簸造成的受伤事故和34起颠簸严重影响班机操纵的事故征候。据我国统计资料表明,北京地区有记录可查的中度以上飞机颠簸平均每年3~4次;西南和西北地区中度以上飞机颠簸平均每年可达8~9次。从空军的飞行情况看,飞机颠簸亦是影响航线飞行的重要因素之一。

表 1-1 飞行事故统计(美国 1960—1985 年)

天气现象	雷暴	风切变	湍流	结冰	下冲气流	冰雹	雷击	合计
次数	19	15	10	5	3	2	1	55

研究表明,飞机颠簸往往是特定天气形势和地理条件下的产物,它的形成和发展是有规律可循的。正确预报和设法避开空中颠簸区,是民航气象部门工作的主要任务之一。航空管制部门在条件允许的情况下,应尽可能地采取调配飞行高度或暂时绕航等方法,尽量避开主要颠簸区,从而保障飞行的安全与正常。但由于飞机颠簸的复杂性,飞行颠簸事故或事故征候还是常常发生。大多数情况下,飞机颠簸与天气系统是密切联系的。表1-2是我国在1963—1992年期间发生的与天气系统有关的飞机颠簸的统计资料。可以发现,槽线、切变线、锋面、急流、高空低涡、风切变较大区域以及地区性等天气因素是引起飞机颠簸的重要原因。

表 1-2 天气系统与飞机颠簸(中国 1963—1992 年)

天气图上直观表现形式	飞机颠簸出现的次数
高空槽且多位于槽前一侧	31
高空锋两侧或急流两侧	27
高空切变线	22
高空两支急流汇合处	3
高空低涡	1
风切变较大区域	6
情况不明	5
地区性的	5

1.2 部分飞机颠簸事故或事故征候事例

为了帮助理解飞机颠簸对飞行的危害程度,下面简要介绍部分飞机颠簸事故或事故征候事例。

1958年10月17日,苏联一架图-104客机在莫斯科附近9 000 m高空,突然遇到扰动气流造成强烈颠簸,使机翼折断而失事。

1971年11月22日,日本一架波音727大型客机在飞往东京途中,遇到扰动气流,发生强烈颠簸,使飞机无法操纵,10 s内飞机从9 300 m的高度掉到8 400 m,以后又继续掉到7 200 m,1 min 10 s后才恢复操纵。

1990年5月16日,从北京飞向东北地区的3架大型飞机(航班号2106、2211、2601),飞过赤峰后,在10 000~12 000 m高空,分别在不同时间遇上高空风切变,造成3架飞机都遭遇严重晴空颠簸。(高空风切变在天气图上十分明显,可惜未做预报)

1990年9月23日,某航空公司B2442号飞机,执行莎迦到北京航班任务,23点13分在伊斯兰堡上空,飞行高度为39 000 ft,突然遇到强烈晴空颠簸,持续时间约3~4 s,造成机上59人受到不同程度的撞伤和砸伤,其中27人伤势严重,3名心脏病患者经抢救后才脱离危险。客舱内饰板脱落,行李箱柜变形,飞机内部受损达68处。据飞行员后来报告,颠簸前高空风向不变,风速为10~20 kn,强烈颠簸发生后,高空风向为270°~280°,风速猛增为70~80 kn。

1992年5月22日,从上海飞往北京的波音767客机,19点22分在济南以南90 km、高度9 000 m处遇强急流和锋区产生的晴空颠簸,造成4位乘务员和旅客多人受伤(由于事前通知系好安全带,大大减少了受伤人数)。

1993年4月6日,北京时间6时30分,当地(阿留申)时间凌晨2时30分,我国某航空公司一架MD-11型远程宽体客机,从上海到洛杉矶的飞行途中,在太平洋的阿留申群岛万米高空失去控制,30 s之内飞机急剧颠簸了3次,飞机以每10 s跌落1 700 ft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人轻伤,飞机被迫在美国西米亚空军机场着陆。

1996年9月5日,一架法国航空公司的波音747-400客机,在布基纳法索的瓦加杜古附近,由于天气原因导致飞机剧烈颠簸,206名乘客中的3人受重

伤,其中1人伤势严重死亡。

1997年12月28日,美国联合航空公司一架飞往夏威夷的波音747客机,飞越太平洋时,在成田机场以东10 km上空,突然遇到强气流袭击,飞机骤降300 m,然后继续爬升,最后降落在日本成田机场。机上1名旅客死亡,110人受伤,有10多人伤势严重。

1999年10月17日中午,一架由昆明飞往香港的某航空公司的班机,在香港上空突然遇到一股强大气流,5~10 s内飞机急坠2 000 ft,导致45人撞向机舱顶部受伤。这场飞行事故的“罪魁祸首”就是人称飞机的“隐形杀手”——晴空湍流。

2002年1月26日,一架由海南经深圳飞往武汉的某航空公司波音757客机3358次航班,19时20分从深圳起飞时,因天气原因,机组人员提醒乘客系好安全带。20时30分左右,飞机在下降过程中遭遇飞机颠簸,机组人员再次提醒乘客系好安全带,此时,后舱两名正收拾东西的乘客因失重撞向机舱顶而受伤,颠簸过程持续约2 s。20时50分左右,飞机安全降落在武汉天河机场。

2003年10月10日,一架某航空公司的小型飞机行至航段中途,遭遇到了气流的强烈作用,出现飞机颠簸,并短时出现严重颠簸。经过飞行员的成功处置,飞机最后安全降落在济南机场。

2004年7月4日,某航空公司由北京飞往重庆的132次航班,16时05分由北京起飞,约30 min后,乘务员告诉乘客,飞机正遭遇气流,将可能出现剧烈颠簸,请乘客系好安全带。16时45分左右,飞机开始出现上下剧烈颠簸,并伴随左右大幅度摇摆,随后飞机颠簸幅度加大,飞机突然在2~3 s内像失控般直线下坠约300~400 m,行李舱内行李“刺啦”滑动的声音与客舱内男女乘客的惊叫声此起彼伏,此时,机舱尾部正在做供餐准备的5名空姐因飞机颠簸太剧烈,无法马上回到座位系好安全带,被惯性从飞机尾部一方甩向了另一方。16时50分,飞机颠簸才逐渐趋于平缓。18时35分,飞机安全降落在重庆江北机场。

2004年7月12日21时,从长沙飞往上海的MU5302航班,在即将降落时遭遇气流。据该航空公司介绍,MU5302航班在浙江嵊县上空7 500 m时,遭遇了“风切变”,机身出现了3次颠簸,未系安全带的乘客和空姐共计10名人员在颠簸中受伤。飞机降落虹桥机场后,受伤人员立即被送往医院急救,均无生命危险。

第 2 章

大气中的湍流

日常生活中，人们从缭绕的炊烟、飞扬的尘土、飘扬的花絮中发现，空气在较大范围的运动中还有许多局部升降涡旋的不规则运动。通常，空气的运动可以分为两种。一种是有规则的运动，它表明空气总的运动方向和速率；另一种是不规则的涡旋运动，表明空气的运动方向和速率存在不规则的变化。这种包含着不规则运动的气流是大气中经常出现的现象。气象学上把这种不规则的空气运动，称为扰动气流，或叫乱流，又称湍流。总体上讲，空气的涡旋主要包含两种运动方式，即绕水平轴旋转运动和绕垂直轴旋转运动。

湍流的研究是经典物理学没有完全解决的问题之一，对它的研究和理解比较困难，但湍流也是具有它自身的一些规律和特点的。下面就介绍有关湍流的一些基本知识。

2.1 湍流的简要特性

湍流是空气不规则涡旋运动的表现，又称乱流或扰动气流，其范围一般在几百米以内。湍流涡旋可绕水平轴、垂直轴或其他方向的轴旋转，因而，湍流涡旋中存在着尺度和速度都不等的垂直运动。在一定条件、一定高度范围内可

同时存在很多湍流涡旋，这些湍流涡旋可使垂直运动扩展到较高高度。

湍流涡旋通常是由大气中的气流切变引起的。气流切变是指气流间速度和方向的差异（见图 2-1）。造成气流切变的原因主要有热力和动力两种，它们分别形成热力湍流和动力湍流。

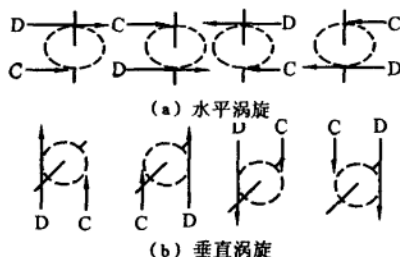


图 2-1 气流切变形成湍流涡旋

下面利用一个实例来显示大气湍流的某些特性。图 2-2 是在 2.5 h 内测得的近地表面风速的分布情况。观察图可以发现：

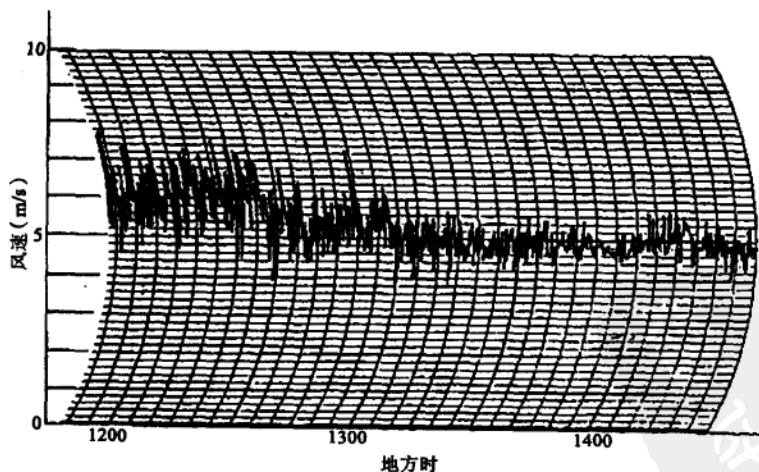


图 2-2 2.5 h 中，近地表面的风速分布

(1) 风速变化具有不规则性。这是湍流的重要特性之一。这种准随机性使它与其他的运动（如大气波动）相区别。

(2) 在中午和地方时 12 时 30 分之间的平均风速约为 6 m/s ，而稍晚一些时候（14 时和 14 时 30 分之间），平均风速减小到 5 m/s 左右。能够统计到一个稳定的平均值，这一点说明湍流并非完全无规律。

(3) 在曲线中，风速并不是从 0 m/s 变化到 100 m/s ，而是在一个有限的范围内变化。也就是说，湍流有一个可度量的和可确定的强度，图 2-2 中湍流强度表现为风速变化的垂直幅度。在中午和地方时 14 时之间，湍流强度表现出减弱的趋势。近中午时，瞬时风速常常比平均风速快或慢 1 m/s 左右，而在 14 时，风速相对于其平均值大约仅仅变化 0.5 m/s 。风速的这种有界性表明：我们可以用统计学来描述湍流强度。

(4) 图中似乎有许许多多风速变化的时间尺度相互叠加在一起。观察可以发现，在风速曲线上每两个小的峰值间的时间间隔大约是 1 min ，较大的峰值每 5 min 一次。图 2-2 中还能辨别出时间最短的变化大约是 10 min 。如果每一这样的时间变化都与不同大小的涡旋相联系，则可以认为：我们看到了大约大小在 $50 \sim 3000 \text{ m}$ 的涡旋存在，即看到了湍流谱。

图 2-3 是在近地面处测得的风速谱的一个例子。观察可以发现，最大的涡通常是最强的，大涡的运动能产生与涡尺度相同的风切变区，并能产生较小的涡。像这种湍流能从较大涡到较小涡的净传输叫做能量串级。在最小的涡那里，能量的串级被分子粘性耗散变成热能。Richardson（理查逊）在 1992 年把这种能量串级过程通俗地描述为：大涡包容着小涡，小涡中还有更小的涡，大涡的能量传给小涡，小涡传给更小的涡，直到被分子粘性吞噬。

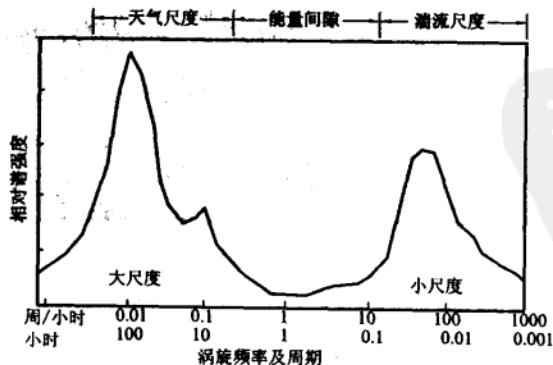


图 2-3 近地面测得的风速谱