

# 航空颠簸研究进展及其关键科技挑战

李耀辉<sup>1,2</sup> 邬涵皓<sup>1,2</sup>

1 中国民用航空飞行学院航空气象学院, 四川广汉, 618307

2 中国气象局航空气象重点开放实验室, 成都 641419

摘要: 颠簸是影响飞机安全运行最为常见的现象之一, 成因复杂, 探测预警难度大。在系统梳理国内外研究进展的基础上, 分别对颠簸的定义和成因、颠簸指数、颠簸对飞行的影响以及颠簸的探测和预警等方面的研究成果进行了综合评述。尽管相关研究已经取得明显进展, 有助于认识颠簸形成、提升颠簸探测预报能力, 但仍面临诸多科学挑战, 如颠簸湍流形成的多领域相互作用机理探索、颠簸探测感知和多源数据融合、AI 等新技术应用与发展等。希望可以给从事飞行、飞行器设计、航空气象等领域的学者和技术人员提供有益借鉴和必要参考。

关键词: 航空颠簸; 湍流; 颠簸指数; 进展和挑战

## Advances in Aviation Turbulence Research and the Key Scientific and Technological Challenges

LI Yaohui<sup>1,2</sup> WU Hanhao<sup>1,2</sup>

1 College of Aviation Meteorology, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307

2 Key Laboratory of Aviation Meteorology, CMA, Chengdu 641419

**Abstract:** Atmospheric turbulence is one of the most prevalent phenomena affecting aircraft flight safety, characterized by complex causes and significant difficulties in detecting and warning. Based on a systematic review of the research progress at home and abroad, we conduct a comprehensive commentary on the following four key aspects: the definition and causes of aircraft turbulence, the turbulence indices, the impact of turbulence on flight, and the turbulence detection and warning technology. It is found that there have been great research achievements made, which are helpful for understanding the formation of aircraft turbulence and enhancing the capability of detecting and forecasting the turbulence, but many scientific challenges still remain. The challenges include the in-depth exploration of multi-domain interaction mechanisms of aircraft turbulence formation, the application and development of new technologies such as aircraft turbulence detection, perception and multi-source data fusion, AI, etc. This is expected to provide some useful and essential references for scholars and technical professionals in aviation operation, aircraft design, aviation meteorology, and other related fields.

**Key words:** aircraft turbulence, atmospheric turbulence, turbulence index, progress and challenge

收稿日期:

基金项目: 中国气象局航空气象重点开放实验室 2023 年开放研究课题-飞机颠簸成因特征及智能预报模型研究 (HKQXT-2024001)

第一作者: 李耀辉, 主要从事(航空)气象科学研究及其相关技术发展.E-mail: li-yaohui@163.com

33      

## 引言

34      飞机颠簸是航空飞行中一个普遍且不可忽视的现象，商用客机货机、通航飞机、无人机等几乎所有飞  
35      行器都会遇到颠簸。这一现象会影响飞行员的操控能力，甚至威胁飞行安全。

36      随着全球航空运输业的快速发展，飞机颠簸对飞行安全的影响逐渐成为业界关注的焦点。据国际民用  
37      航空组织统计数据，飞机颠簸是导致航空事故和乘客伤害的重要原因之一（图 1）（ICAO, 2024）。遭遇  
38      严重颠簸时，飞机可能会经历剧烈的垂直速度波动，进而导致机身姿态严重失控，构成重大安全威胁。尽  
39      管现代飞机设计越来越注重结构安全性，并配备了先进的飞行控制系统，但颠簸仍然是飞行员面临的一大  
40      挑战。特别是在长时间的飞行中，持续的颠簸不仅会增加飞行员的操作负担，还可能导致乘客的身体不适  
41      或造成乘客受伤。此外，飞机颠簸对航空公司运营效率的影响也不容忽视，颠簸事件可能导致航班延误、  
42      航空器损坏、机组成员疲劳等问题，增加航空公司在维护和运营上的成本。

43      湍流是引起飞机颠簸的主因，国外研究较为深入，国内也有一些相关研究，但总体来看仍有待加强。  
44      最新研究表明，气候变化正显著影响湍流分布格局：中纬度晴空湍流、山地波湍流及热带-副热带近云湍  
45      流的强度与频率增加，未来高排放情景下全球遭遇中强度以上颠簸风险加剧（Kim et al, 2023）。北极地  
46      区晴空湍流频率预计本世纪中叶减少，但世纪末将逆转增加（Atrill et al, 2021）。国外学者在预报方法上  
47      也进行了有效探索，如，有研究指出采用多模式集合预报并结合多种颠簸指数可显著提升预报能力与经济  
48      价值（Storer et al, 2020）。同时，气候模型虽能有效诊断晴空湍流及其对气候变化的响应，但不确定性主  
49      要源于颠簸指数而非模型本身，改进颠簸指数是减少未来预报不确定性的关键（Williams and Storer, 2022）。  
50      在国内，胡伯彦等基于飞行员报告的统计分析（2011-2018 年共 11137 份），揭示了中国地区航空颠簸冬  
51      多夏少、高空主导、华北频发等基本时空特征，并指出了其强度和高度分布存在的年际变化趋势（胡伯彦  
52      等, 2021）。此后，有学者进一步基于 6498 份飞行员话音报的精细分析，不仅验证了颠簸“冬春多强、  
53      夏秋少弱”和“东多西少”的宏观特征，还研究了其与高空急流等天气系统的关联及特定航路上的“逗号”  
54      状空间分布形态（李克南等, 2024）。尽管如此，由于颠簸成因复杂，时空尺度小，缺乏有效的探测手段，  
55      精细化预报预警难度很大。因此，研究造成飞机在飞行过程中发生颠簸的大气运动的特征和机理以及有效  
56      的预报预警技术，既是大气科学问题，又能够帮助航空公司减少航班中的颠簸风险，确保飞行安全，提高  
57      航空运行效率。

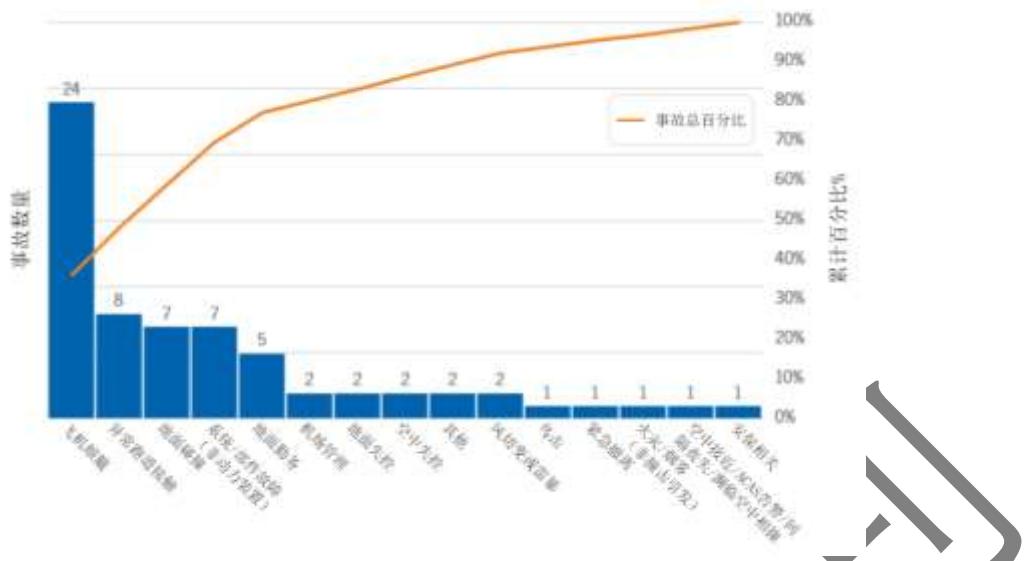


图 1 2023 年全球定期商业航班按事故类别分类的事故统计 [据参考文献 (ICAO, 2024) 修改]

随着气象探测技术和计算机技术的进步，基于多源数据融合的湍流精细化研究已成为主流趋势。特别是以激光雷达、高分辨率多普勒雷达为代表的主动遥感技术，正以前所未有的精度揭示颠簸湍流的精细结构与生成机理，例如重力波的传播与破碎过程（Imazio et al, 2023）；而人工智能与机器学习方法，则通过挖掘海量观测与模式数据中的复杂非线性关系，显著推动了颠簸预报预警技术的智能化与精准化革命（朱玉祥等, 2023; Lee and Chun, 2025）。通过融合多源观测数据、提升数值模型的分辨率、应用机器学习等新兴技术，未来的飞机颠簸研究有望取得进一步理论突破和更精准的预报预警技术创新。

## 1 颠簸的定义和成因

## 1.1 颠簸的定义

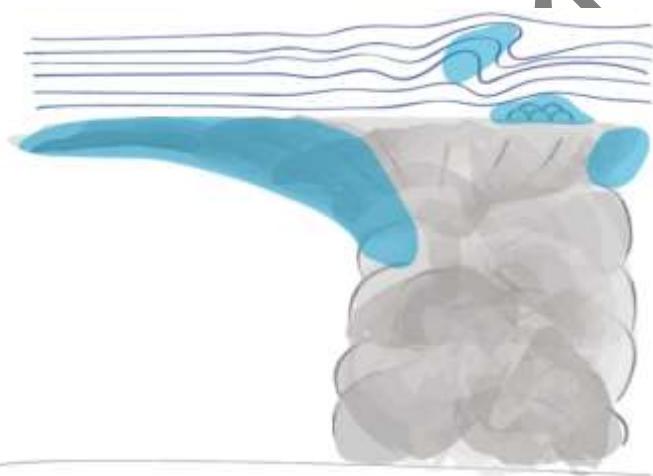
飞机颠簸是指飞机在飞行中遇到扰动气流，产生震颤、上下抛掷、左右摇晃，导致操纵困难、仪表失准等现象。飞机颠簸是由水平尺度介于  $100 \sim 1000$  m 的大气湍流引起的，也被称为飞机尺度湍流，飞机颠簸的强度取决于所遇到的湍流的强度，以及湍流对飞机产生多大影响 (Sharman and Lane, 2016)。航空层面讲，颠簸就是大气湍流从随机角度作用于空中飞行的航空器，造成航空器飞行失稳的现象。

## 1.2 颠簸的成因

根据定义，飞机颠簸源于大气湍流。湍流是一种非常复杂且不规则的流体运动形式，通常表现为混乱、不可预测且快速变化的流动模式，在大气中尤为常见。湍流的起因多种多样，通常由大气中的风速、气温、湿度、气流切变等因素共同作用产生。根据湍流的成因和影响特点，引起颠簸的湍流主要有以下五种类型：对流性湍流（convectively induced turbulence, CIT），低空湍流（low-level turbulence, LLT），山地波湍流（mountain wave turbulence, MWT），晴空湍流（clear-air turbulence, CAT），飞机尾涡引起的湍流（Sharman and Lane, 2016）。每种类型的湍流对飞机的影响程度也各不相同，并且每种类型的湍流的成因也有差异。

## 80 1.2.1 对流性湍流 CIT

81 对流性湍流与干热气流或对流云中的强烈上升、下降气流有关。对流性湍流通常分为两类：云内 CIT  
 82 和云外 CIT (Lester, 1994)。云内 CIT 主要发生在对流云内部，可通过雷达探测规避；云外 CIT 又称近  
 83 云湍流 (near-cloud turbulence, NCT) (Burns, 1966; Prophet, 1970; Pantley and Lester, 1990; Keller et  
 84 al, 1983)。近云湍流发生于云体上方或周围 (有时距云边界较远) 的晴空区，因其不可见且难以被标准  
 85 机载雷达或地面雷达监测，常导致意外颠簸事件 (图 2) (Sharman and Trier, 2019)。对流产生的重力波  
 86 是产生近云湍流的一个主要原因之一，并且可能是远离对流区域的湍流形成的主导因素 (Lane et al, 2012)。  
 87 深对流云是航空颠簸的重要湍流源，其内部深层对流过程可产生水平尺度约 50 ~ 1000 m 的中小尺度湍流  
 88 涡旋 (Kim and Chun, 2012)。针对近云湍流难以精准探测的痛点，利用多普勒天气雷达的速度谱宽观测  
 89 已证实，近云湍流的强度与对流云顶重力波的振幅呈显著正相关，这为对流激发重力波导致颠簸的机理提  
 90 供了直接观测证据。在此基础上，最新研究进一步发现，机载雷达多普勒谱宽作为尺度依赖的湍流度量，  
 91 能够更精准地捕捉不同尺度的对流性湍流，突破了传统探测手段对湍流尺度识别的局限，为近云湍流的实  
 92 时预警提供了新的技术手段 (Majewski et al, 2023)。



93

94 图 2 成熟雷暴中常见云外 CIT 生成区域 (蓝色标注区) 的示意图 [据参考文献 (Sharman and Trier, 2019) 修改]

95 Fig.2 Schematic diagram of common out-of-cloud CIT generation regions (blue area) inside a mature thunderstorm (modified  
96 according to Sharman and Trier, 2019)

## 97 1.2.2 低空湍流 LLT

98 低空湍流的成因包括：对流过程、锋面过境伴随的强风、白天在高温地表上方形成的干热对流以及由  
 99 气流经过地形障碍物 (山脉、丘陵、树木、建筑物) 或粗糙地形引起的机械强迫作用。低空湍流的湍流源  
 100 通常位于行星边界层内，在飞机起飞和着陆期间可能会造成重大安全隐患，特别是对于小型飞机而言。极  
 101 端低空湍流可能会导致乘客和机组人员伤亡以及飞机损坏或毁坏 (O' Connor and Kearney, 2019)。低空  
 102 湍流的强度由以下四个要素共同决定：低空风速、大气稳定度、离地高度和地形粗糙度 (通过地表粗糙度  
 103 参数  $z_o$  量化表征) (Sharman and Lane, 2016)。根据国际民航组织 (ICAO) 的定义，低空湍流遵循的空

104 间标准为高度低于 500 m, 距飞机跑道 5.6 km 以内, 逆风持续变化达到  $7.7 \text{ m s}^{-1}$  或以上, 其强度可以通过  
 105 湍能耗散率 (energy dissipation rate, EDR) 的立方根 ( $EDR^{1/3}$ ) 来量化 (Hon and Chan, 2014)。低空  
 106 湍流的研究对于蓬勃发展的低空经济至关重要。无人机等飞行器主要活动于大气边界层下层, 该层是航危  
 107 天气的高发区, 而当前对其高时空分辨率的监测预警能力尚存不足 (郭建平等, 2025)。国内学者已利用  
 108 高分辨率探空、风廓线雷达、测风雷达等手段在边界层结构与观测以及边界层湍流研究方面取得进展 (程  
 109 志刚等, 2025; 张笑妍等, 2025; 涂朝勇等, 2022)。为解决低空湍流监测分辨率不足的问题, 近年来地  
 110 基激光雷达组网观测技术的应用, 实现了低空边界层湍流的分钟级高分辨率探测, 为无人机低空飞行颠簸  
 111 预警提供了关键数据支撑 (程志刚等, 2025)。基于这些高分辨率观测数据, 最新研究构建的机器学习低  
 112 空湍流预报模型, 可有效提升全球低空湍流的预报能力 (Lee and Chun, 2025)。未来需融合新型观测与  
 113 人工智能技术, 以提升对低空湍流的智能感知与预警能力, 保障低空飞行安全。

#### 114 1.2.3 山地波湍流 MWT

115 在稳定层结条件下, 由地形强迫产生的大振幅重力波及其破碎过程 (其波动能量可以延伸至对流层顶  
 116 甚至更高层大气) 所引发的湍流通常称为山地波湍流。山地波, 也称为地形重力波, 是由稳定层结气流与  
 117 地形障碍物的动力相互作用引起的。这类波可以在不同的高度发生破碎, 并通过两种机制影响大气系统:  
 118 局地效应表现为产生航空尺度的湍流 (Lilly, 1978), 全球效应表现为对大气环流的减速作用 (Lilly and  
 119 Kennedy, 1973)。由气流在地形上产生的内部重力波运动可能会使得风速和风向突然变化, 并且可能在  
 120 波动破碎的区域中引起严重的湍流 (Vosper, 2003)。大气背风波属于山地波的一种, 是一种由浮力效应  
 121 驱动传播的扰动现象, 其形成机制源于局地孤立源, 通常是由流过山脊和山脉的气流引起的。当障碍物很大时,  
 122 所产生的扰动可能是异常剧烈并且具有破坏性的, 其能量可上传至中层大气 (30 ~ 100 km), 并通过波流相互作用激发湍流 (Wurtele et al, 1996)。有研究表明, 利用激光雷达和卫星传感器可以精确捕捉  
 123 重力波从平流层向中间层传播的完整过程, 包括其垂直波长、周期和传播方向, 这为理解山地波湍流在上  
 124 层大气的生成与演变机制提供了关键技术手段 (Gong et al, 2019)。

#### 126 1.2.4 晴空湍流 CAT

127 晴空湍流是指距地面高度 6000 m 以上高空出现的与对流云和雷暴无关 (或远离对流云和雷暴) 的大  
 128 气湍流 (Chambers, 1955)。其不包括与对流性不稳定边界层及深厚对流有关的湍流, 但可存在于非对流  
 129 云 (多指卷云) 中。晴空湍流通常发生在平流层下层和对流层上层, 它通常出现在急流、对流层顶和高层  
 130 锋面附近, 与风切变增强或稳定性降低有关 (王洪芳等, 1997)。理论研究和观测事实都表明, 在垂直切  
 131 变大的稳定气层的内界面上, 经常发生开尔文-赫姆霍兹波 (Kelvin-Helmholtz waves, K-H 波), 且当切变  
 132 强度超过临界值时, 波动变得不稳定, 并自发地增长, 直至“破碎”而形成湍流 (赵颂华, 1987)。晴空  
 133 湍流发生的主要机制应属 K-H 波不稳定性, 是天气尺度系统的动能通过 K-H 波不稳定产生能量耗散的一

134 种表现（王洪芳等，1997）。

135 山地波也会引起晴空湍流，山地波在对流层中上层的破碎过程会在飞机巡航高度产生湍流，这是晴空  
136 湍流已知的形成原因之一，其触发机制表现为：当大振幅重力波传播至临界层时，波动振幅的非线性增长  
137 将导致其能量累计超过稳定层结度的阈值，最终引发波动破碎和湍流动能爆发性释放（Guarino et al, 2018）。  
138 有研究表明，晴空湍流的形成机制与山地波垂直传播引发的局地风切变增强及理查森数降低密切相关，且  
139 湍流呈现显著间歇性与分层流动特征（EDR 值可达中度至严重颠簸水平），其动能谱特性显著偏离经典柯  
140 尔莫哥洛夫各向同性假设，凸显复杂地形下多尺度动力耦合对湍流触发的关键作用（Imazio et al, 2023）。  
141 而在强的急流轴附近，飞机颠簸通常发生在反气旋切变区域，由于重力波的惯性不稳定及其激发的热成风  
142 的作用，常在急流南侧的反气旋区域产生晴空湍流和飞机颠簸（李子良和黄仪方，2008）。

143 飞机在对流层顶褶皱附近飞行时也会经历 CAT，对流层顶褶皱是平流层空气向对流层的挤压，多发生  
144 在极地和副热带急流下方的上层锋区附近（Kim and Chun, 2010; Shapiro, 1980; 黄萌, 2025）。

#### 145 1.2.5 飞机尾涡引起的湍流

146 由飞机尾涡产生的飞机诱导湍流。主要发生在机场附近，当较轻的飞机尾随领先的较重的飞机时会出现  
147 的尾涡湍流现象（Gerz et al, 2002），但在高空也可能发生（Schumann and Sharman, 2015）。飞机在  
148 飞行中产生的尾涡湍流会威胁后机的飞行安全，后机进入尾涡湍流区域后，尾涡湍流将使机翼表面压力分布  
149 出现剧烈变化，使得飞机升力骤减和不可控地滚转（徐梓铭等，2023）。飞机尾涡通常会经历两个耗散  
150 阶段，分别是扩散阶段和快速衰减阶段（Xu et al, 2021; Holzäpfel, 2003）。在扩散阶段，尾涡的发展由  
151 黏性和湍流扩散主导，尾涡涡量（尾涡涡量是流体力学中描述飞机尾涡旋转强度与方向的核心物理量，具  
152 体指尾涡流场中流体微团的旋度矢量）沿径向扩散，此时尾涡衰减缓慢；而在快速衰减阶段，尾涡发生大  
153 尺度的变形，飞机尾涡强度会迅速下降至对后机无害的程度。其中，长短波失稳是飞机尾涡快速衰减的主要  
154 机制之一，其本质为：长波扰动（涡间相互诱导引发大尺度扭曲）与短波扰动（涡核内部剪切导致小尺度  
155 破碎）协同作用，通过多尺度能量耗散加速尾涡消散（林孟达等，2017）。并且尾涡的消散与环境温度  
156 也有关关系，当环境温度垂直递减率较低时，前机尾涡下沉速率减缓，导致尾涡湍流系统在后续航路上滞留  
157 时间延长，遭遇湍流的风险增大（姜沿强，2024）。

## 158 2 颠簸强度的表征——颠簸指数

159 为了研究颠簸的成因，更准确预报预警颠簸，学者和技术人员发展建立了多种颠簸指数来表征造成颠  
160 簸的湍流强弱和分布（Sharman and Lane, 2016），这些指数所适用的条件也各有差异（Roach, 1970; Ellrod  
161 and Knapp, 1992; Reap, 1996; Sharman et al, 2006; Gill, 2014; 翟菁等，2010; Colson and Panofsky,  
162 1965; Ellrod and Knox, 2010）。动力因素为主的指数主要有布朗指数（Brown index）、埃尔罗德指数 1  
163 （Ellrod index 1）和埃尔罗德指数 2（Ellrod index 2）、MOS-CAT 指数（MOS: model output statistics, 模

164 式输出统计预报; CAT: clear air turbulence, 晴空颠簸指数)、杜顿指数 (Dutton index)、湍能耗散率 (energy  
 165 dissipation rate, EDR)、等效垂直风 (derived equivalent vertical gust, DEVG) 指数和散度修正湍流指数  
 166 (divergence-modified turbulence index, DTI) 等; 热力因素为主的指数主要有理查森数 (Richardson number,  
 167 Ri) 和水平温度梯度指数 (horizontal temperature gradient, HTG); 包含动力热力因素的综合性指数主要  
 168 有 L-P 指数和科尔森-帕诺夫斯基指数 (Colson-Panofsky index) 等。表 1 对上述指数的公式、含义、优缺  
 169 点等进行了对比介绍。

表 1 颠簸指数

Table 1 Turbulence indices

序号	指数名称	公式	说明	优点	缺点
1	布朗指数 (Roach, 1970)	$Brown = \frac{1}{24} \phi \bar{V}_{ws}^2$	简化了 $Ri$ 倾向方程, 考虑了垂直风切变引起的 K-H 不稳定性对颠簸的影响。	简化了复杂的气象方程, 便于计算和应用。考虑了垂直风切变对颠簸的影响, 适用性较广。	对极端天气情况的预测能力有限。
2	埃尔罗德指数 1 (Ellrod and Knapp, 1992)	$TII = V_{ws} \bar{D}_{EF}$	考虑了风场的总形变和风垂直切变之间的联系。	综合考虑了风场的总形变和散度, 提供了更全面的颠簸评估。对晴空颠簸的预测能力较强。	依赖高精度的风场数据。对于小尺度湍流的敏感性不足。
3	埃尔罗德指数 2 (Ellrod and Knapp, 1992)	$TI2 = V_{ws} (\bar{D}_{EF} + C_{VG})$	在 TII 的基础上加上了散度项 $C_{VG}$ 。	提升了对流区颠簸的捕捉能力。	散度项计算误差可能放大空报风险。
4	MOS-CAT 概率预报因子 (Reap, 1996)	$MOS =  V  \bar{D}_{EF}$	在 NCEP 嵌套网格模型 (NGM) 的模型输出统计 (MOG) 中的概率预测效果很好。	基于统计模型, 能够提供概率预测, 适应性强。在实际应用中表现良好, 可靠性高。	依赖特定的数值模式, 适用范围受限。
5	杜顿指数 (Dutton, 1980)	$Dutton = 1.25S_H + 0.25S_V^2 + 10.5$	基于湍流报告与各种天气尺度的湍流指数的线性回归分析所得到的经验指数。	通过线性回归分析, 综合考虑多种因素, 适用性强。能够较好地反映水平和垂直风切变的影响。	作为经验指数, 表现不稳定, 区域适用性差异大。需要大量历史数据进行校正。
6	理查森数 (Sharman et al, 2006)	$Ri = \frac{N^2}{S_V^2}$	$Ri$ 小的区域是湍流的有利区域。	广泛应用于湍流研究。能够有效识别开尔文-亥姆霍兹	计算复杂, 且对输入数据的准确性要求高。

不稳定引起的湍流。

7 湍能耗散率

( MacCready ,  
1962a)

使用湍流动能转化为热量的速率提供了湍流强度的直接测量量，能够通过多种方法进行估计，灵活性强。

湍， $EDR \geq 0.3 \text{ m}^{2/3} \text{ s}^{-1}$  为重度颠簸。

簸。

通过飞机法向加速度、总质量和校

准空速计算。DEVG 在 2 ~ 4.5

$\text{m s}^{-1}$  之间为轻度颠簸， $DEVG \in$

4.5 ~ 9  $\text{m s}^{-1}$  之间为中度颠簸，

$DEVG \geq 9 \text{ m s}^{-1}$  为重度颠簸。

水平温度梯度是热风关系中风场

变形和垂直风切变的衡量标准。

直接反映飞机的颠簸感受，

实用性强。

依赖机载传感器或高分辨率探空，实时获取数据。估算方法精度不高。

8 等效垂直风指数

$$DEVG = \frac{Am |\Delta n|}{V}$$

(Gill, 2014)

计算需要飞机特定参数，适用范围有限。

简单易用，适合航空公司预报员。

忽略动力因素，复杂天

气适用性差。

9 水平温度梯度指数

$$HTG = |\nabla_H T| = \left[ \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2}$$

( Sharman et al ,  
2006)

通过概率分级，更容易区分

轻、中、重度颠簸。

计算范围偏大，定位精度低。

10 L-P 指数 (翟菁等,  
2010) (指数 L)

$$L = 7.268 \frac{\partial u}{\partial z} + 0.718 \frac{\partial T}{\partial n} + 0.318 \frac{\partial u}{\partial n} - 2.52$$

当  $L \geq 0$  时预报有颠簸； $L < 0$  时，

则预报没有颠簸。

当  $70\% > P \geq 50\%$ ，预报有轻度颠

簸；当  $85\% > P \geq 70\%$ ，预报有中

度颠簸；当  $P \geq 85\%$ ，预报有严重

颠簸。

起源于湍流动能 (TKE) 平衡方程。

基于湍流动能平衡方程，物理机制清晰。

计算复杂，对小尺度湍

11 L-P 指数 (翟菁等,  
2010) (指数 P)

$$P = \frac{1}{1 + e^{-0.59L}}$$

流的敏感性不足。

12 Colson-Panofsky 指数 ( Colson and Panofsky, 1965 )

$$CP = (\Delta z)^2 \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \left( 1 - \frac{Ri}{Ri_{crit}} \right)$$

提升了对快速变化流场的

反应。

对数据时空分辨率要

13 散度修正湍流指数

$$DTI = TI1 + D_{VT}$$

( Ellrod and Knox ,  
2010)

提升了对快速变化流场的

反应。

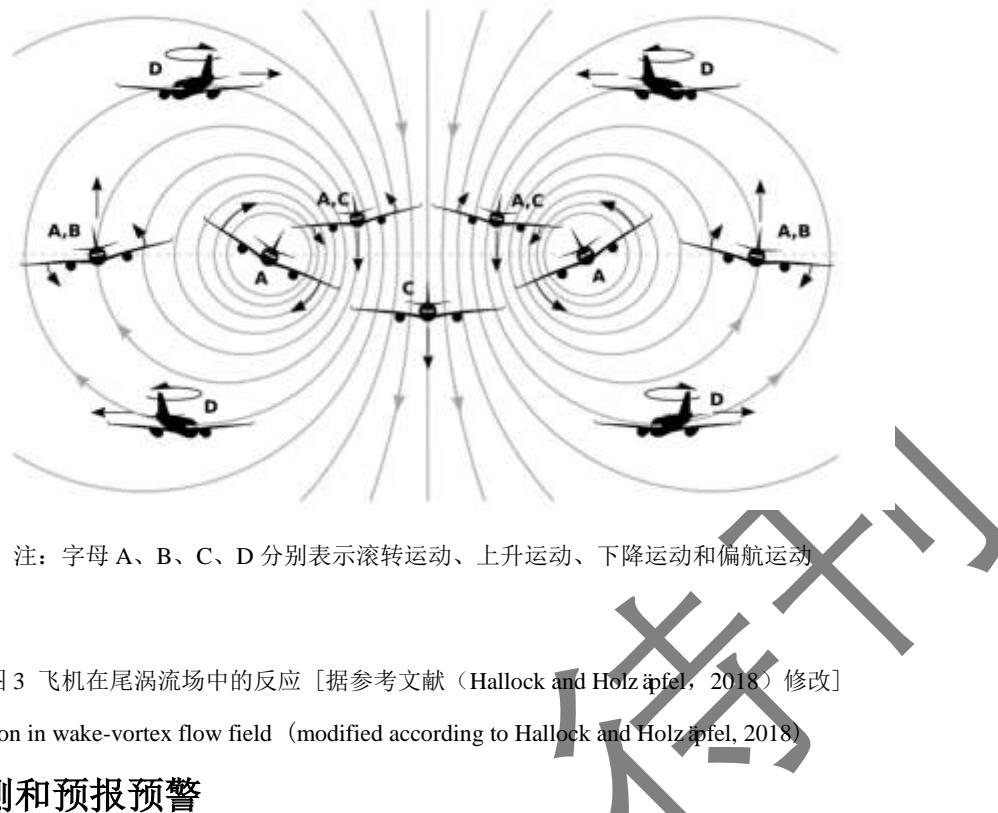
对数据时空分辨率要

173 这些指数在实际航路预报中已得到非常广泛的应用。例如蔡雪薇等（2023）设计出了一种基于 EDR  
 174 的航空颠簸集成预报算法，预报结果可实现与机载探测数据实况直接对比验证，验证结果显示该算法能大  
 175 致反应不同区域和类型的颠簸情况，降低了空报率。而陈春元等（2022）对比分析了 7 个颠簸指数在中南  
 176 地区的效果，发现 Ellrod1 和 Ellrod2 指数的空报率较低，并且计算得到的颠簸区能较好的对应空中报告的  
 177 结果，而 MOS-CAT 和 L-P 指数容易造成较高的空报，适用性较差。

### 178 3 颠簸对飞行安全的影响

179 飞机颠簸严重威胁着飞行安全，可导致飞行中人员伤亡、飞机结构损坏、航空器寿命缩短以及航班延  
 180 误和燃油损失（Kim et al, 2021）。轻度颠簸会使机身出现轻微抖动或抛掷，乘客会稍感不适，一般对飞  
 181 行影响不大。发生中度颠簸时，飞机的航向、高度、姿态等均会发生变化，出现急剧抛掷或冲击，机舱内  
 182 未固定的物品会发生移位，乘客出现身体不适，但飞机仍能操纵飞行。飞机遇到强颠簸时，机身会剧烈震  
 183 颤，飞行高度变化大，甚至在一分钟内飞机会上下抛掷十几次，当空速（即飞机相对于空气的速度）变化  
 184 大于  $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时，飞机将会暂时失去控制，若飞行员操作不当极易造成飞行事故。例如 2023 年 7 月 10  
 185 日，中国国际航空 CA1524 航班（上海至北京）在飞行途中遭遇强烈晴空颠簸，此次事件造成一名旅客和  
 186 一名乘务员受伤。当飞机遭遇极强颠簸时，由于受到较大的负荷变化，飞机各部件都可能产生变形或受损，  
 187 严重时会造成飞机解体，发生重大安全事故（王淑翠，2014）。

188 飞机在飞行中产生的尾涡湍流会威胁后机的飞行安全，后机进入尾涡湍流区域后，尾涡湍流将使机翼  
 189 表面压力分布剧烈变化，使得飞机升力骤减和不可控地滚转（徐梓铭等，2023）。在起降阶段遭遇前机产  
 190 生的尾涡湍流时，飞行员往往缺乏足够反应时间恢复飞行姿态（Xu et al, 2021）。典型案例表明：某型歼  
 191 击机双机执行夜间编队训练时，发生了空中相撞事故，根据机载黑匣子记录的飞机飞行参数，判明僚机进  
 192 入了长机尾涡湍流区域（安崇君和刘长卫，2000）。而在地面附近，当飞机尾涡湍流下沉至距离地面最近  
 193 点后，其高度会重新抬升，这种现象称为涡旋反弹，涡旋反弹会导致上风侧涡旋滞留在跑道上空，后续航  
 194 班若进入滞留区，可能会发生颠簸而出现事故（图 3）（Hallock and Holz äpfel, 2018）。



注：字母 A、B、C、D 分别表示滚转运动、上升运动、下降运动和偏航运动

图 3 飞机在尾涡流场中的反应 [据参考文献 (Hallock and Holzapfel, 2018) 修改]

## 4 颠簸的探测和预报预警

飞机颠簸的探测和预报预警一直是航空气象中的一项挑战。对于颠簸探测，机载探测设备和飞行数据监控系统也为湍流预警提供了重要支持。现代飞机装备了多种传感器，用于监测飞行中的湍流强度、垂直速度变化和风速变化等参数，这些数据可以帮助飞行员实时评估颠簸的强度，并根据情况调整飞行高度或航向。由于湍流的复杂性和不确定性，飞机颠簸的准确预报预警通常依赖于气象模型的输出产品和飞行数据的实时监测。随着数值天气预报 (numerical weather prediction, NWP) 模式的不断发展，湍流的预测精度有了较明显提高，这尤其体现在急流、锋面和对流云区等大尺度天气系统中。然而，由于湍流具有高度的局部性和瞬时变化特征，现有的天气预报系统仍然存在局限。

### 4.1 传统颠簸探测技术

传统的颠簸探测手段主要有以下四种：飞行员话音报 (PIREPs)、机载探测设备、AMDAR (aircraft meteorological data relay) 计划、飞行品质监控 (FOQA)。

#### 4.1.1 飞行员话音报

飞行员话音报 (PIREPs) 是指飞行员通过语音通信向地面报告飞机飞行中遭遇的颠簸情况，是最早的颠簸实况数据来源。它的优点是历史沿用久，在晴空湍流预报中，PIREPs 资料仍发挥重要作用，对中度及以上晴空湍流的研究仍具参考价值 (Tebaldi et al, 2002)，对于缺乏仪器探测的区域仍有补充价值，也可作为研究晴空颠簸气候特征的一个重要资料补充 (Wolff and Sharman, 2008)。其主要缺点在于数据量相对较少，且依赖于飞行员的主观感受进行报告，易受机型差异等因素影响，客观性不足 (蔡雪薇等, 2023; Trier et al, 2012)。

## 218 4.1.2 机载探测设备

219 机载探测设备可获取表征颠簸强度的客观物理量，主要探测量为等效垂直阵风速度（Gill, 2014）和  
220 湍能耗散率（Sharman et al, 2014）。

221 等效垂直阵风速度由固定时间长度内实测的飞机最大垂直加速度出发，考虑了飞机的质量、飞行速度  
222 以及机型参数等因素影响的导出量，表征造成颠簸的垂直阵风的峰值速度（周林和黄超凡, 2015）。它的  
223 物理意义明确，但是需要校准机型参数，数据依赖机载传感器精度。

224 湍能耗散率最初由 MacCready (1962a) 提出，使用湍流动能转化为热能的速率来度量湍流强度，并证  
225 明了湍能耗散率与飞机垂直过载（过载是指飞机在空中飞行时，作用在飞机上除重力之外的合力与飞机重  
226 力之比）的均方根呈线性关系，已被国际民航组织（ICAO）认定为衡量颠簸的标准（Kim et al, 2018）。  
227 湍能耗散率可以通过雷达波谱宽度、高分辨率探空数据或者商用飞机测风数据进行估算，然而，现有估算  
228 方法普遍存在精度不足、实时性欠缺或覆盖范围有限等问题，限制了其在常规湍流预报预警业务中的应用  
229 （Huang et al, 2019; MacCready, 1962b; Kopeć et al, 2016）。

## 230 4.1.3 AMDAR 计划

231 AMDAR 计划是世界气象组织（world meteorological organization, WMO）从 1991 年开始着力发展的  
232 全球航空器气象数据共享计划。AMDAR 资料沿飞机航线采集，又具有较高的时空密度，能提供探空资料  
233 稀缺的区域（如海洋上空）的资料，参与资料同化提高数值预报能力，具有重要的应用价值与广阔的应用  
234 前景（陶士伟等, 2009; 刘烈霜等, 2013; 廖捷和熊安元, 2010; 贾朋群等, 2004; 刘小魏等, 2007）。  
235 自 2005 年起，AMDAR 计划增加了对飞机颠簸的监测，通过湍流强度反映颠簸的剧烈程度。最新的 AMDAR  
236 资料中包含垂直阵风峰值和湍能耗散率两个表征湍流强度的物理量。

## 237 4.1.4 飞行品质监控

238 飞行品质监控（FOQA）是指通过分析飞行参数（如过载、姿态等）监测超限事件（当记录的飞行参  
239 数值达到或超过预设阈值时，即判定为超限事件），从而判定颠簸强度。过载超过一定的标准时，即被判  
240 定为出现过载事件，可用作飞机颠簸的间接表征（吴炎成等, 2014）。通过对飞机过载超限事件的统计，  
241 可以获得飞机低空颠簸的发生频率（刘岳峰等, 2019）。飞行品质监控数据由数百种飞行参数构成，这些  
242 参数包括飞行姿态位置、周围环境参数以及航空电子设备参数等（Mitchell et al, 2007）。其优势在于数据  
243 全面，支持安全风险量化评估；局限性在于数据处理复杂，需要航空公司与管理部门的紧密协作，且实时  
244 性较差。

## 245 4.2 现代颠簸探测技术

246 近年来，以激光雷达和多普勒雷达为代表的现代探测技术发展迅猛，显著提升了对颠簸成因和实际大  
247 气湍流现象的揭示能力。并且，现代探测技术获取的高精度、高分辨率湍流观测数据，是改进数值模式参

248 数化和训练人工智能预报模型的基石。例如, 地基激光雷达观测的湍流廓线可用于优化自适应光学系统的  
 249 校正策略, 其风廓线数据能为波前校正系统提供前瞻性补偿依据 (苏练等, 2025)。同时, 这些多源、高  
 250 质量的观测数据与 AMDAR、PIREPs 等传统数据融合, 构成了机器学习模型训练的关键数据集, 驱动了颠  
 251 簸预报技术的智能化变革 (朱玉祥等, 2023)。

252 4.2.1 多源遥感协同观测与重力波探测

253 重力波活动是导致晴空颠簸和山地波湍流的关键机制。现代探测技术通过协同观测, 能够精确捕捉重  
 254 力波的完整生命周期。例如, 利用激光雷达、流星雷达和卫星传感器的协同观测, 可以精确反演从平流层  
 255 到中间层传播的重力波的垂直波长、本征周期、传播方向及能量耗散过程, 能更好地理解高层大气颠簸的  
 256 触发机制 (Gong et al, 2019)。

257 4.2.2 从遥感信号到湍流强度的定量反演

258 传统雷达观测主要获取回波强度, 而现代多普勒雷达和激光雷达则能提供更丰富的湍流信息。研究证  
 259 实, 机载 W 波段多普勒云雷达的多普勒谱宽 (频谱宽度) 在特定条件下 (如信噪比足够高、水凝物下落  
 260 速度变化不主导信号) 可作为尺度依赖的湍流度量, 与飞机原位测量的湍流耗散率 (EDR) 和垂直速度方  
 261 差具有良好一致性, 实现了对数十米至千米尺度湍流空气运动的有效诊断 (Majewski et al, 2023)。同样,  
 262 对于脉冲多普勒激光雷达, 最新研究提出了一种从平均多普勒频谱中直接拟合提取径向风速均值和标准差  
 263 的频率域方法, 相比传统时域方法, 能更精确地估计湍流统计量, 尤其适用于风能等领域对机械载荷的评  
 264 估 (Manami et al, 2025)。针对扫描遥感仪器受重访时间限制的问题, 发展的空间湍流强度度量方法, 通  
 265 过分析空间风场变异性来量化湍流, 在不同大气稳定度下均表现出有效性, 为风电场等场景的湍流空间结  
 266 构研究提供了新工具 (Duncan et al, 2019)。

267 4.2.3 高分辨率湍流廓线与边界层探测

268 对低空颠簸而言, 边界层湍流的高时空分辨率探测至关重要。地基激光雷达技术在此方面取得显著进  
 269 展。差分像移、差分光柱、差分波前、光强闪烁及多普勒测风等多种地基激光雷达技术, 能够以高时空分  
 270 辨率反演大气湍流强度廓线、风场和湍流动能耗散率 (苏练等, 2025)。这些高分辨率廓线数据不仅是研  
 271 究低空颠簸机理的基础, 也可为数值模式验证和初始化提供关键输入。

272 4.3 颠簸预报预警

273 准确预报预警飞机颠簸仍是当前面临的重要挑战。飞机颠簸的预报预警主要通过数值天气预报、机器  
 274 学习以及图形湍流指导系统 (graphical turbulence guidance, GTG) 等方法实现。

275 4.3.1 颠簸数值预报

276 随着计算机的飞速发展, 数值模式分辨率不断提高, 运用数值模式产品来对湍流进行诊断分析和预报  
 277 已经成为主流 (周林和黄超凡, 2015)。数值天气模式预报颠簸需要颠簸特征的研究和高精度的观测数据

278 (方璘王昊, 2022)。对颠簸进行数值预报, 首先预报湍流, 利用数值模式输出资料, 计算相应的湍流指  
 279 数, 对湍流进行诊断预报, 再结合 PIREPs、AMDAR 等资料进行验证从而预报颠簸事件 (Venkatesh and  
 280 Mathew, 2013)。在数值天气预报中, 湍流预报指数算法是核心, 改进指数预报算法让其更适合不同条件  
 281 下的湍流预报, 提高预报技巧, 具有实际意义, 同时也是一个挑战 (刘雷, 2018)。但数值天气预报计算  
 282 资源消耗大, 对初始场精度敏感, 对颠簸预报的能力上和时效上有一定的局限性。当然, 这种局限随着高  
 283 性能计算能力的发展、数值模式核心算法的改进以及人工智能 (AI) 的应用, 将会有显著改进。特别地,  
 284 气象大模型 (如华为盘古、复旦伏羲等) 相比传统数值模式可极大节省计算时间, 为未来开展高分辨率、  
 285 高频次的全球湍流概率预报提供了新的机遇 (朱玉祥等, 2023)。

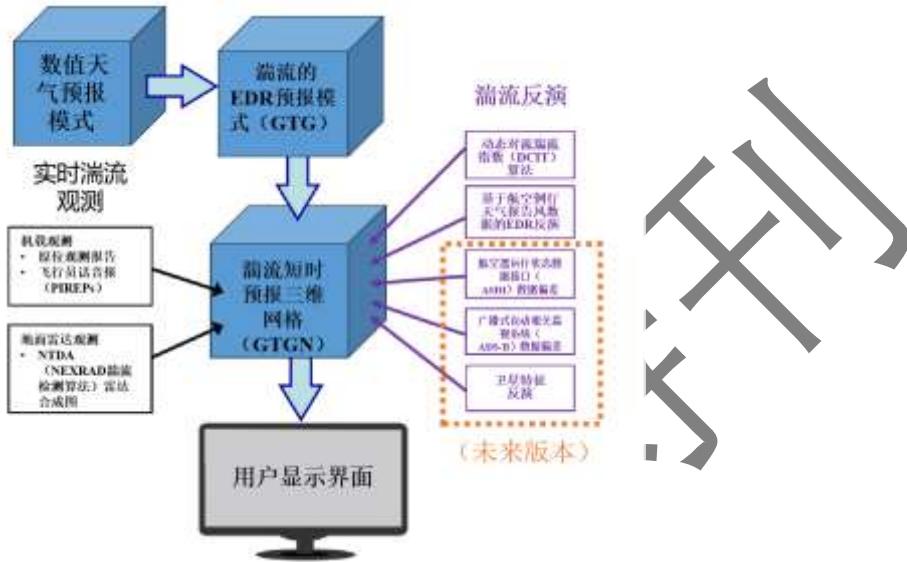
#### 286 4.3.2 机器学习

287 机器学习在飞机颠簸预报中也得到了应用, 例如 Muñoz-Esparza et al (2020) 发现使用随机森林模型  
 288 能降低无湍流或轻度湍流的预报误差, 同时提升湍流检测概率以及减少误报次数。Hon et al (2020) 使用  
 289 XGBoost 机器学习算法 (一种基于梯度提升框架的高效机器学习算法, 通过正则化与并行计算来优化决策  
 290 树集成, 适用于高维特征的非线性关系建模) 对多种湍流指数进行优化组合, 构建了高精度航空湍流预报  
 291 模型, 该模型显著优于单一湍流指数, 在复杂的气象条件下有很好的预报能力。针对晴空湍流的预报, Gu  
 292 and Wang (2024) 提出了一个基于 K 近邻 (K-nearest neighbor, KNN) 算法的湍流预报模型, 该算法将湍  
 293 能耗散率、理查森数等总共 8 个晴空湍流诊断特征的组合用作特征向量, 并引入诊断特征权重优化机制以  
 294 提高预报准确性, 该模型对中度及以上颠簸的捕捉能力优于传统方法。Zhuang et al (2024) 提出了一种融  
 295 合群体智能与 CatBoost (categorical boosting) 算法的优化模型 (WOA-CatBoost), 通过鲸鱼优化算法 (whale  
 296 optimization algorithm, WOA) 动态搜索 CatBoost 最优超参数, 并引入递归特征消除 (recursive feature  
 297 elimination, RFE) 筛选高权重气象与飞行数据特征, 使得湍流识别准确率较传统方法提升 11%, 其基于  
 298 QAR 数据的识别精度与湍能耗散率 (EDR) 方法相当, 且在复杂气象条件下显著优于单一机器学习模型,  
 299 为航空湍流实时监测提供了很好的解决方案。最新的研究表明, 随机森林 (RF)、XGBoost 和 LightGBM  
 300 等机器学习模型在全球低空湍流预报中均显著优于传统的图形湍流指导系统, 通过特征选择和模型调整  
 301 (如阈值优化、应用 SMOTE 处理类别不平衡、采用分位数回归量化不确定性) 可进一步提升性能, 能够  
 302 为城市空中交通等新兴低空领域应用提供安全保障 (Lee and Chun, 2025)。

#### 303 4.3.3 图形湍流指导系统 GTG

304 为了能够更好地进行自动湍流预报, Tebaldi et al (2002) 提出了一种综合湍流预报算法 ITFA (integrated  
 305 turbulence forecasting algorithm), 侧重于预报与高空急流和锋面相关的晴空湍流。该系统于 2003 年 3 月  
 306 发展为图形湍流指导系统 GTG。GTG 系统以多源湍流诊断融合为核心, 兼具高精度与低算力需求特性,  
 307 为航空湍流预报提供支持, 并且更适合于数据稀疏的区域 (Sharman et al, 2006)。由于接收 NWP 模式数

308 据的延迟以及计算预报所需时间, 其预报产品的有效发布时间通常滞后实际时间至少 2 小时。鉴于此, 图  
 309 形湍流临近指导预报 (graphical turbulence guidance nowcast, GTGN) 系统地开发满足了对湍流的更及时精  
 310 准预报的需求。它是一款快速更新的航空湍流临近预报产品, 覆盖了所有湍流源。GTGN 系统相比于 GTG  
 311 系统的核心优势在于整合了多种流湍流源数据, 实现全湍流类型覆盖, 通过 15 分钟快速更新以及多源数  
 312 据同化 (例如卫星数据、雷达数据等), 来缩短延时、提高预报时效 (图 4) (Pearson and Sharman, 2017)。



313  
 314 图 4 GTGN 系统输入流程图 [据参考文献 (Pearson and Sharman, 2017) 修改]  
 315

Fig.4 Flow diagram for various inputs into the GTGN system (modified according to Pearson and Sharman, 2017)

## 316 5 结语和主要科学挑战

317 综上所述, 颠簸对飞行安全的影响不可忽视, 其中又蕴含着诸多科学问题。实现高时空分辨率的颠簸  
 318 预报预警是关键, 而引起颠簸的湍流机理的深入探究是根本。随着航空业的快速发展, 特别是低空经济的  
 319 迅猛发展, 飞机 (包括中小型航空器、无人机等) 颠簸对航行安全、运营效率、乘客体验及经济成本等方  
 320 面影响也越来越受到重视。并且, 随着低空经济的兴起 (如城市空中交通, 无人机物流, 旅游、农业、救  
 321 灾等) 将颠簸研究的焦点部分延伸至更为复杂多变的低空边界层。该区域下垫面强迫 (建筑、地形) 更强,  
 322 湍流结构更不规则, 对轻型飞行器安全构成独特挑战。发展适配低空甚至超低空空域的高分辨率湍流监测  
 323 与快速更新预报技术, 成为了传统航空气象的重要拓展方向。尽管这些方面的研究已经逐步开展并取得了  
 324 一定进展, 但仍存在不少科学和技术方面的挑战有待进一步探索:

325 (1) **颠簸湍流成因机理研究的挑战。** 湍流是颠簸的主要原因, 颠簸湍流又涉及对流性湍流、山  
 326 地波湍流等多种类型。不同类型的湍流有其不同的物理机制, 如低空湍流与边界层密切相关, 也  
 327 受下垫面分布不均匀造成的影响; 山地波也即地形重力波, 可以传播至大气各个  
 328 高度层, 其破碎产生航空尺度的湍流, 对流层顶和平流层的颠簸多与它有关, 也是晴空颠簸的主  
 329 要因素, 等等。这些湍流类型之间也存在相互作用、互为影响, 其间的非线性相互作用与转化机

330 制尚不清晰。例如，对流活动如何激发或调制重力波，进而引发下游的晴空颠簸？不同尺度湍流  
 331 涡旋如何相互作用并最终形成影响航空器的“航空扰动尺度”？现代协同观测虽已能捕捉重力波  
 332 传播和湍流发生的关联，但对多尺度能量串级、波动破碎触发湍流的精细瞬变过程仍需更深入的  
 333 观测和理论阐释。所以说，颠簸湍流形成机理研究，在学术上具有明显挑战性。

334 **（2）颠簸湍流的不确定性对其预报预警的挑战。**颠簸具有突发性、短历时特征，这是由湍流的  
 335 瞬时变化和局部特性决定的。其中，在对流层高层的晴空湍流和由复杂地形引起的山地波湍流等  
 336 类型的颠簸，这种特征最为明显。关键科学问题在于：在给定初始场和边界条件下，颠簸事件的  
 337 可预报性时间与空间尺度极限何在？为此，颠簸数值预报中，如何在深入揭示湍流形成机理基础  
 338 上，对颠簸湍流进行准确描述，改进数值模式中的相应参数化方案，进而精准识别和预警颠簸的  
 339 发生、发展及其时空分布；如何发展基于湍流能量级串效应、并能兼容复杂地形与云物理过程的  
 340 新型动力参数化方案，不论对其常规预警技术、还是高分辨数值预报模式发展来说，都具有显著  
 341 挑战性。

342 **（3）探测感知和多源数据融合的挑战。**对颠簸湍流的直接观测和感知，尚缺乏比较有效的设备  
 343 和手段，精准观测难度依然很大，目前多利用卫星遥感、激光雷达等设备辅以机载传感器进行探  
 344 测。虽然多普勒天气雷达和高层激光雷达显著提升了探测能力，但仍存在诸多瓶颈：一是多普勒  
 345 雷达对高空湍流的探测能力有限，受雷达波束高度和衰减效应影响；二是激光雷达设备成本高、  
 346 覆盖范围窄，难以实现组网大面积观测；三是多源探测数据（雷达、激光雷达、卫星、机载传感  
 347 器）的融合算法尚不成熟，数据异构性和时空匹配问题突出。如何将这些不同来源的数据有效融  
 348 合，实时、准确探测湍流，感知飞行过程中可能遭遇的颠簸，仍是一个亟待解决的问题，具有挑  
 349 战性。尽管现代探测技术取得了进展，但如何将这些点、线、面的遥感观测与飞机原位报告、模  
 350 式预报场进行无缝融合，构建四维、高保真的湍流分析场，仍是巨大挑战。随着新兴技术发展，  
 351 利用 AI、数据挖掘和智能化等技术，颠簸预报预警将会取得重要突破，这也是未来发展的主要趋  
 352 势。

### 353 参考文献：

354 安崇君, 刘长卫, 2000. 飞机尾涡对飞行安全的影响[J]. 飞行力学, 18(4): 69-72. An C J, Liu C W, 2000. The influence of the trailing vortex on the flight  
 355 safety of wing plane[J]. Flight Dyn, 18(4): 69-72 (in Chinese).

356 蔡雪薇, 万子为, 吴文辉, 等, 2023. 基于湍能耗散率的航空颠簸集成预报方法[J]. 大气科学, 47(4): 1085-1098. Cai X W, Wan Z W, Wu W H, et al, 2023.  
 357 An ensemble prediction method of aviation turbulence based on the energy dissipation rate[J]. Chin J Atmos Sci, 47(4): 1085-1098 (in Chinese).

358 陈春元, 罗义, 王刚, 等, 2022. 中南地区航空器空中颠簸指数适用分析[J]. 气象科技, 50(3): 412-419. Chen C Y, Luo Y, Wang G, et al, 2022. Application  
 359 analysis of aircraft turbulence index in South-Central China[J]. Meteor Sci Technol, 50(3): 412-419 (in Chinese).

360 程志刚, 权建农, 李炬, 等, 2025. 测风激光雷达资料质量控制和湍流探测性能研究[J]. 气象学报, 83(5): 1313-1328. Cheng Z G, Quan J N, Li J, et al,  
 361 2025. Controlling data quality and assessing turbulence detection capability of a Doppler wind lidar[J]. Acta Meteor Sin, 83(5): 1313-1328 (in Chinese).

362 翟菁, 周后福, 申红喜, 等, 2010. 航空气象要素预报算法和个例研究[J]. 气象研究与应用, 31(1): 31-34. Zhai J, Zhou H F, Shen H X, et al, 2010.  
 363 Forecasting algorithm for aviation meteorological factors and case study[J]. J Meteor Res Appl, 31(1): 31-34 (in Chinese).

364 方璘王昊, 2022. 基于飞机探测数据的高原飞机颠簸特征及其成因研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院. Fang L W H, 2022. Research on  
 365 characteristics and causes of aircraft turbulence on plateau based on aircraft detection data[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China (in  
 366 Chinese).

367 郭建平, 张玮, 周博闻, 等, 2025. 低空经济气象前沿科技问题研究进展与展望[J]. 气象, 51(11): 1455-1476. Guo J P, Zhang W, Zhou B W, et al, 2025.  
 368 Progress and prospect of research on the key frontier scientific and technological issues in low-altitude economy meteorology[J]. Meteor Mon, 51(11):  
 369 1455-1476 (in Chinese).

370 胡伯彦, 陈迪, 顾雷, 2021. 中国地区近十年颠簸类航空器空中报告统计[J]. 中国民航飞行学院学报, 32(5): 63-68, 73. Hu B Y, Chen D, Gu L, 2021. A  
 371 statistical analysis of aircraft turbulence pilot reports in China in past decade[J]. J Civ Aviat Flight Univ China, 32(5): 63-68, 73 (in Chinese).

372 黄萌, 2025. 青藏高原地区对流层顶折叠分布特征及其与飞机颠簸关系研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院. Huang M, 2025. A study on the  
 373 distribution characteristics of tropopause folds in Tibetan Plateau and its relationship with aircraft turbulence[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight  
 374 University of China (in Chinese).

375 贾朋群, 胡英, 王金星, 2004. 民用航空气象观测综述[J]. 气象科技, 32(4): 213-218. Jia P Q, Hu Y, Wang J X, 2004. Reviews of meteorological  
 376 observations from commercial aircrafts[J]. Meteor Sci Technol, 32(4): 213-218 (in Chinese).

377 姜沿强, 2024. 基于温度场的飞机尾涡演化和遭遇仿真研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院. Jiang Y Q, 2024. Simulation study of aircraft wake vortex  
 378 evolution and encounter based on temperature field[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China (in Chinese).

379 李克南, 武凯军, 刘海文, 等, 2024. 中国主要高空航路飞机颠簸的时空分布特征[J]. 大气科学学报, 47(5): 789-797. Li K N, Wu K J, Liu H W, et al,  
 380 2024. Spatiotemporal distribution patterns of turbulence on major high-altitude aircraft routes in China[J]. Trans Atmos Sci, 47(5): 789-797 (in Chinese).

381 李子良, 黄仪方, 2008. 重力惯性波及其不稳定——急流附近飞机颠簸产生的可能机制[J]. 高原气象, 27(4): 859-865. Li Z L, Huang Y F, 2008. Gravity  
 382 wave and inertial instability——possible mechanism of atmospheric turbulence and airplane bumps[J]. Plateau Meteor, 27(4): 859-865 (in Chinese).

383 廖捷, 熊安元, 2010. 我国飞机观测气象资料概况及质量分析[J]. 应用气象学报, 21(2): 206-213. Liao J, Xiong A Y, 2010. Introduction and quality analysis  
 384 of Chinese aircraft meteorological data[J]. J Appl Meteor Sci, 21(2): 206-213 (in Chinese).

385 林孟达, 崔桂香, 张兆顺, 等, 2017. 飞机尾涡演变及快速预测的大涡模拟研究[J]. 力学学报, 49(6): 1185-1200. Lin M D, Cui G X, Zhang Z S, et al, 2017.  
 386 Large eddy simulation on the evolution and the fast-time prediction of aircraft wake vortices[J]. Chin J Theor Appl Mech, 49(6): 1185-1200 (in Chinese).

387 刘雷, 2018. 基于 NOAA 数据资料的晴空湍流预测方法研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院. Liu L, 2018. Study on the forecasting method of clear air  
 388 turbulence based on the NOAA data[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China (in Chinese).

389 刘烈霜, 金山, 刘开宇, 2013. 用 AMDAR 资料分析两次强飞机积冰过程[J]. 气象科技, 41(4): 764-770. Liu L S, Jin S, Liu K Y, 2013. Diagnostic analysis  
 390 of two severe aircraft icing events using AMDAR data[J]. Meteor Sci Technol, 41(4): 764-770 (in Chinese).

391 刘小魏, 曹之玉, 兰海波, 2007. AMDAR 资料特征及质量分析[J]. 气象科技, 35(4): 480-483. Liu X W, Cao Z Y, Lan H B, 2007. Analysis of characteristics  
 392 and quality of AMDAR data[J]. Meteor Sci Technol, 35(4): 480-483 (in Chinese).

393 刘岳峰, 张凯, 陈越, 等, 2019. 民航飞机低空颠簸与地理环境因子相关性研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 55(4): 683-691. Liu Y F, Zhang K, Chen  
 394 Y, et al, 2019. Correlation study of low-altitude turbulence in civil aircraft with geographical environmental factor[J]. Acta Sci Nat Univ Pekin, 55(4):  
 395 683-691 (in Chinese).

396 苏练, 罗曦, 黄林海, 等, 2025. 大气湍流廓线特性探测的地基激光雷达技术综述 [J/OL]. 中国激光.  
 397 <https://link.cnki.net/urlid/31.1339.tn.20251216.1241.032>. Su L, Luo X, Huang L H, et al, 2025. A review of ground-based LiDAR techniques in  
 398 atmospheric turbulence profiling[J/OL]. Chin J Lasers. <https://link.cnki.net/urlid/31.1339.tn.20251216.1241.032> (in Chinese). (查阅网上资料, 未找到  
 399 本条文献的引用日期, 请确认)

400 陶士伟, 郝民, 赵琳娜, 2009. AMDAR 观测资料分析及质量控制[J]. 气象, 35(12): 65-73. Tao S W, Hao M, Zhao L N, 2009. Quality control procedures and  
401 its application in AMDAR observation data[J]. Meteor Mon, 35(12): 65-73 (in Chinese).

402 涂朝勇, 赵中阔, 黎伟标, 等, 2022. 南海台风边界层湍流小波分析[J]. 热带气象学报, 38(4): 554-568. Tu C Y, Zhao Z K, Li W B, et al, 2022. Wavelet  
403 analysis of turbulence in boundary layer of typhoon in South China Sea[J]. J Trop Meteor, 38(4): 554-568 (in Chinese).

404 王洪芳, 金维明, 王炳仁, 等, 1997. 飞机颠簸及预报方法研究[J]. 气象科技, (1): 29-34. Wang H F, Jin W M, Wang B R, et al, 1997. Research on aircraft  
405 turbulence and its prediction methods[J]. Meteor Sci Technol, (1): 29-34 (in Chinese). (查阅网上资料, 未找到本条文献的英文信息, 请确认)

406 王淑翠, 2014. 飞机颠簸产生的可能机制及其在天气预测上的应用[D]. 青岛: 中国海洋大学. Wang S C, 2014. Possible mechanism of airplane bumps and  
407 its application in weather prediction[D]. Qingdao: Ocean University of China (in Chinese).

408 吴炎成, 周林, 刘科峰, 等, 2014. 基于 AMDAR 资料应用于中国周边海域飞机颠簸的统计分析[J]. 气象科学, 34(1): 17-24. Wu Y C, Zhou L, Liu K F, et  
409 al, 2014. AMDAR based statistical analysis on the features of cross-ocean airplane turbulence over China's surrounding sea areas[J]. J Meteor Sci, 34(1):  
410 17-24 (in Chinese).

411 徐梓铭, 李栋, 蔡金延, 等, 2023. 飞机尾涡对的三维失稳快速模拟方法[J]. 空气动力学学报, 43(1): 95-104. Xu Z M, Li D, Cai J Y, et al, 2023. Fast  
412 simulation method for three dimensional instability of an aircraft wake vortex pair[J]. Acta Aerodyn Sin, 43(1): 95-104 (in Chinese).

413 张笑妍, 姚昊昕, 沈新勇, 等, 2025. 一次华南飑线过程的边界层湍流通量输送及动能收支分析[J]. 暴雨灾害, 44(2): 186-196. Zhang X Y, Yao H X, Shen  
414 X Y, et al, 2025. Analyse of turbulent flow conveyance and kinetic energy budget in the boundary layer during the process of a South China squall line[J].  
415 Torr Rain Dis, 44(2): 186-196 (in Chinese).

416 赵颂华, 1987. 国外晴空湍流研究评述[J]. 南京气象学院学报, 10(3): 361-370. Zhao S H, 1987. A review of foreign research on clear-air turbulence[J]. J  
417 Nanjing Inst Meteor, 10(3): 361-370 (in Chinese). (查阅网上资料, 未找到本条文献的英文信息, 请确认)

418 周林, 黄超凡, 2015. 近 10 年晴空湍流的研究进展[J]. 气象科技, 43(1): 91-96. Zhou L, Huang C F, 2015. Advances in clear air turbulence researches in last  
419 ten years[J]. Meteor Sci Technol, 43(1): 91-96 (in Chinese).

420 朱玉祥, 刘海文, 万文龙, 等, 2023. 人工智能在飞机颠簸预报中的应用进展及未来趋势展望[J]. 大气科学学报, 46(6): 825-836. Zhu Y X, Liu H W, Wan  
421 W L, et al, 2023. Progress and future trend of artificial intelligence application in aircraft turbulence prediction[J]. Trans Atmos Sci, 46(6): 825-836 (in  
422 Chinese).

423 Atrill J, Sushama L, Teufel B, 2021. Clear-air turbulence in a changing climate and its impact on polar aviation[J]. Saf Extreme Environ, 3(2): 103-124.

424 Burns A, 1966. Turbulence in clear air near thunderstorms[M]. Washington: National Severe Storms Laboratory.

425 Chambers E, 1955. Clear air turbulence and civil jet operations[J]. Aeronaut J, 59(537): 613-628.

426 Colson D, Panofsky H A, 1965. An index of clear air turbulence[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 91(390): 507-513.

427 Duncan Jr J B, Hirth B D, Schroeder J L, 2019. Doppler radar measurements of spatial turbulence intensity in the atmospheric boundary layer[J]. J Appl Meteor  
428 Climatol, 58(7): 1535-1555.

429 Dutton J A, Panofsky H A, 1970. Clear air turbulence: a mystery may be unfolding[J]. Science, 167(3920): 937-944.

430 Dutton M J O, 1980. Probability forecasts of clear-air turbulence based on numerical model output[J]. Meteor Mag, 109(1299): 293-310.

431 Ellrod G P, Knapp D I, 1992. An objective clear-air turbulence forecasting technique: verification and operational use[J]. Wea Forecasting, 7(1): 150-165.

432 Ellrod G P, Knox J A, 2010. Improvements to an operational clear-air turbulence diagnostic index by addition of a divergence trend term[J]. Wea Forecasting,  
433 25(2): 789-798.

434 Endlich R M, 1964. The mesoscale structure of some regions of clear-air turbulence[J]. J Appl Meteor Climatol, 3(3): 261-276.

435 Frehlich R, Sharman R, 2004. Estimates of turbulence from numerical weather prediction model output with applications to turbulence diagnosis and data  
436 assimilation[J]. *Mon Wea Rev*, 132(10): 2308-2324.

437 Gerz T, Holz äpfel F, Darracq D, 2002. Commercial aircraft wake vortices[J]. *Prog Aerosp Sci*, 38(3): 181-208.

438 Gill P G, 2014. Objective verification of world area forecast centre clear air turbulence forecasts[J]. *Meteor Appl*, 21(1): 3-11.

439 Gong S H, Yang G T, Xu J Y, et al, 2019. Gravity wave propagation from the stratosphere into the mesosphere studied with Lidar, meteor radar, and  
440 TIMED/SABER[J]. *Atmosphere*, 10(2): 81.

441 Gu A Q, Wang Y, 2024. Optimizing clear air turbulence forecasts using the K-nearest neighbor algorithm[J]. *J Meteor Res*, 38(6): 1064-1077.

442 Guarino M V, Teixeira M A C, Keller T L, et al, 2018. Mountain-wave turbulence in the presence of directional wind shear over the rocky mountains[J]. *J  
443 Atmos Sci*, 75(4): 1285-1305.

444 Hallock J N, Holz äpfel F, 2018. A review of recent wake vortex research for increasing airport capacity[J]. *Prog Aerosp Sci*, 98: 27-36.

445 Holz äpfel F, 2003. Probabilistic two-phase wake vortex decay and transport model[J]. *J Aircraft*, 40(2): 323-331.

446 Hon K K, Chan P W, 2014. Application of LIDAR-derived eddy dissipation rate profiles in low-level wind shear and turbulence alerts at Hong Kong  
447 International Airport[J]. *Meteor Appl*, 21(1): 74-85.

448 Hon K K, Ng C W, Chan P W, 2020. Machine learning based multi-index prediction of aviation turbulence over the Asia-Pacific[J]. *Mach Learn Appl*, 2:  
449 100008.

450 Huang R S, Sun H B, Wu C, et al, 2019. Estimating eddy dissipation rate with QAR flight big data[J]. *Appl Sci*, 9(23): 5192.

451 ICAO, 2024. Safety report[R]. Montreal: International Civil Aviation Organization (ICAO).

452 Imazio P R, Mininni P D, Godoy A, et al, 2023. Not all clear air turbulence is Kolmogorov—the fine-scale nature of atmospheric turbulence[J]. *J Geophys Res:  
453 Atmos*, 128(2): e2022JD037491.

454 Keller T L, Wurtele M G, Eherenberger L J, 1983. Numerical simulation of the atmosphere during a CAT encounter[C]//Conference on Aerospace and  
455 Aeronautical Meteorology. Omaha, NE: NTRS.

456 Kim J H, Chun H Y, 2010. A numerical study of clear-air turbulence (CAT) encounters over South Korea on 2 April 2007[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 49(12):  
457 2381-2403.

458 Kim J H, Chun H Y, 2012. A numerical simulation of convectively induced turbulence above deep convection[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 51(6): 1180-1200.

459 Kim J H, Sharman R, Strahan M, et al, 2018. Improvements in nonconvective aviation turbulence prediction for the world area forecast system[J]. *Bull Am  
460 Meteor Soc*, 99(11): 2295-2311.

461 Kim J H, Park J R, Kim S H, et al, 2021. A detection of convectively induced turbulence using in situ aircraft and radar spectral width data[J]. *Remote Sens*,  
462 13(4): 726.

463 Kim S H, Kim J H, Chun H Y, et al, 2023. Global response of upper-level aviation turbulence from various sources to climate change[J]. *npj Climate Atmos Sci*,  
464 6(1): 92.

465 Kopeć J M, Kwiatkowski K, de Haan S, et al, 2016. Retrieving atmospheric turbulence information from regular commercial aircraft using Mode-S and  
466 ADS-B[J]. *Atmos Meas Tech*, 9(5): 2253-2265.

467 Kronebach G W, 1964. An automated procedure for forecasting clear-air turbulence[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 3(2): 119-125.

468 Lane T P, Sharman R D, Trier S B, et al, 2012. Recent advances in the understanding of near-cloud turbulence[J]. *Bull Am Meteor Soc*, 93(4): 499-515.

469 Lee Y S, Chun H Y, 2025. Machine learning application and operational strategy for global low-level aviation turbulence forecasting[J]. *npj Climate Atmos Sci*,  
470 8(1): 381.

471 Lester P F, 1994. Turbulence: A New Perspective for Pilots[M]. Jeppesen Sanderson, Englewood, CO. (查阅网上资料, 未找到本条文献的出版, 请确认)

472 Lilly D K, Kennedy P J, 1973. Observations of a stationary mountain wave and its associated momentum flux and energy dissipation[J]. *J Atmos Sci*, 30(6):  
473 1135-1152.

474 Lilly D K, 1978. A severe downslope windstorm and aircraft turbulence event induced by a mountain wave[J]. *J Atmos Sci*, 35(1): 59-77.

475 MacCready Jr P B, 1962a. The inertial subrange of atmospheric turbulence[J]. *J Geophys Res*, 67(3): 1051-1059.

476 MacCready Jr P B, 1962b. Turbulence measurements by sailplane[J]. *J Geophys Res*, 67(3): 1041-1050.

477 Majewski A, French J R, Haimov S, 2023. Airborne radar doppler spectrum width as a scale-dependent turbulence metric[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 40(12):  
478 1541-1555.

479 Manami M, Mann J, Sjöholm M, et al, 2025. Squeezing turbulence statistics out of a pulsed Doppler lidar[J]. *Atmos Meas Tech*, 18(23): 7513-7523.

480 Mann J, 1994. The spatial structure of neutral atmospheric surface-layer turbulence[J]. *J Fluid Mech*, 273: 141-168.

481 Mitchell K, Sholy B, Stolzer A J, 2007. General aviation aircraft flight operations quality assurance: overcoming the obstacles[J]. *IEEE Aerosp Electr Syst Mag*,  
482 22(6): 9-15.

483 Muñoz-Esparza D, Sharman R D, Deierling W, 2020. Aviation turbulence forecasting at upper levels with machine learning techniques based on regression  
484 trees[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 59(11): 1883-1899.

485 O'Connor A, Kearney D, 2019. Low level turbulence detection for airports[J]. *Int J Aviat Aeronaut Aerosp*, 6(1): 3.

486 Oncley S P, Friehe C A, Larue J C, et al, 1996. Surface-layer fluxes, profiles, and turbulence measurements over uniform terrain under near-neutral  
487 conditions[J]. *J Atmos Sci*, 53(7): 1029-1044.

488 Pantley K C, Lester P F, 1990. Observations of severe turbulence near thunderstorm tops[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 29(11): 1171-1179.

489 Pearson J M, Sharman R D, 2017. Prediction of energy dissipation rates for aviation turbulence. Part II: nowcasting convective and nonconvective turbulence[J].  
490 *J Appl Meteor Climatol*, 56(2): 339-351.

491 Prophet D T, 1970. Vertical extent of turbulence in clear air above the tops of thunderstorms[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 9(2): 320-321.

492 Reap R M, 1996. Probability forecasts of clear-air turbulence for the contiguous U.S. National Weather Service Office of Meteorology Tech[M]. Procedures  
493 Bulletin. (查阅网上资料, 未找到本条文献的出版社, 请确认)

494 Roach W T, 1970. On the influence of synoptic development on the production of high level turbulence[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 96(409): 413-429.

495 Schumann U, Sharman R, 2015. Aircraft wake-vortex encounter analysis for upper levels[J]. *J Aircraft*, 52(4): 1277-1285.

496 Shapiro M A, 1980. Turbulent mixing within tropopause folds as a mechanism for the exchange of chemical constituents between the stratosphere and  
497 troposphere[J]. *J Atmos Sci*, 37(5): 994-1004.

498 Sharman R, Tebaldi C, Wiener G, et al, 2006. An integrated approach to mid- and upper-level turbulence forecasting[J]. *Wea Forecasting*, 21(3): 268-287.

499 Sharman R, Lane T, 2016. Aviation Turbulence: Processes, Detection, Prediction[M]. Cham: Springer International Publishing.

500 Sharman R D, Cornman L B, Meymaris G, et al, 2014. Description and derived climatologies of automated in situ eddy-dissipation-rate reports of atmospheric  
501 turbulence[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 53(6): 1416-1432.

502 Sharman R D, Trier S B, 2019. Influences of gravity waves on convectively induced turbulence (CIT): a review[J]. *Pure Appl Geophys*, 176(5): 1923-1958.

503 Storer L N, Gill P G, Williams P D, 2020. Multi-diagnostic multi-model ensemble forecasts of aviation turbulence[J]. Meteor Appl, 27(1): e1885.

504 Strauss L, Serafin S, Haimov S, et al, 2015. Turbulence in breaking mountain waves and atmospheric rotors estimated from airborne *in situ* and Doppler radar  
505 measurements[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 141(693): 3207-3225.

506 Tebaldi C, Nychka D, Brown B G, et al, 2002. Flexible discriminant techniques for forecasting clear-air turbulence[J]. Environmetrics, 13(8): 859-878.

507 Trier S B, Sharman R D, Lane T P, 2012. Influences of moist convection on a cold-season outbreak of clear-air turbulence (CAT)[J]. Mon Wea Rev, 140(8):  
508 2477-2496.

509 Truscott B S, 2000. EUMETNET AMDAR AAA AMDAR Software Developments – Technical Specification[R]. Doc. Ref. E\_AMDAR/TSC/003. Met Office,  
510 Exeter, UK. (查阅网上资料, 未找到本条文献, 请确认)

511 Venkatesh T N, Mathew J, 2013. The problem of clear air turbulence: changing perspectives in the understanding of the phenomenon[J]. Sadhana, 38(4):  
512 707-722.

513 von Kármán T, 1948. Progress in the statistical theory of turbulence[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 34(11): 530-539.

514 Vosper S, 2003. Development and testing of a high resolution mountain-wave forecasting system[J]. Meteor Appl, 10(1): 75-86.

515 Williams P D, Storer L N, 2022. Can a climate model successfully diagnose clear-air turbulence and its response to climate change?[J]. Quart J Roy Meteor Soc,  
516 148(744): 1424-1438.

517 Wolff J K, Sharman R D, 2008. Climatology of upper-level turbulence over the contiguous united states[J]. J Appl Meteor Climatol, 47(8): 2198-2214.

518 Wurtele M G, Sharman R D, Datta A, 1996. Atmospheric lee waves[J]. Ann Rev Fluid Mech, 28: 429-476.

519 Wyngaard J C, Coté O R, 1971. The budgets of turbulent kinetic energy and temperature variance in the atmospheric surface layer[J]. J Atmos Sci, 28(2):  
520 190-201.

521 Xu Z M, Li D, An B, et al, 2021. Enhancement of wake vortex decay by air blowing from the ground[J]. Aerosp Sci Technol, 118: 107029.

522 Zhou Y, Wei M, Cheng Z J, et al, 2013. The wind and temperature information of AMDAR data applying to the analysis of severe weather nowcasting of  
523 airport[C]//2013 IEEE Third International Conference on Information Science and Technology (ICIST). Yangzhou, China: IEEE: 1005-1010.

524 Zhuang Z B, Li H S, Shao J Y, et al, 2024. Identification of airline turbulence using WOA-CatBoost algorithm in airborne quick access record (QAR) data[J].  
525 Appl Sci, 14(11): 4419.

## 附录

颠簸指数：

布朗指数 (Roach, 1970)：Brown 指数简化了  $Ri$  倾向方程，利用热成风关系，把梯度风作为水平风的近似，考虑了垂直风切变引起的 K-H 不稳定对颠簸的影响：

$$Brown = \frac{1}{24} \Phi \square V_{ws}^2 \quad (1)$$

式中:  $V_{ws} = \left( \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right|^2 + \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right|^2 \right)^{1/2}$

表示风垂直切变； $\Phi = (0.3\xi_a^2 + D_{sh}^2 + D_{st}^2)^{1/2}$ ， $D_{sh} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$  为切变形

变项， $D_{st} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$  为拉伸形变项， $\xi_a$  为绝对涡度项。

埃尔罗德指数 1 (TI1) 和埃尔罗德指数 2 (TI2) (Ellrod and Knapp, 1992)：埃尔罗德指数为动力相关颠簸诊断指数，是对锋生函数进行简化得到的，埃尔罗德指数 1 考虑了风场的总形变  $D_{ef}$  和风垂直切变  $V_{ws}$  之间的联系：

$$TI1 = V_{ws} \square D_{ef} \quad (2)$$

同时，Ellrod 发现散度虽然小于  $D_{ef}$ ，但对晴空颠簸的影响十分重要，因此在 TI1 的基础上加上了散度项  $C_{vg}$ ，得到湍流指数 TI2：

$$TI2 = V_{ws} (D_{ef} + C_{vg}) \quad (3)$$

式中:  $D_{ef}$  为大气风场总形变 (包括水平切变与拉伸形变)， $D_{ef} = (D_{sh}^2 + D_{st}^2)^{1/2}$ ； $C_{vg}$  为散度项， $C_{vg} = -(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y})$ 。

MOS-CAT 概率预报因子 (Reap, 1996)：在湍流诊断中，MOS-CAT 概率预报因子在 NCEP 嵌套网格模型 (NGM) 的模型输出统计 (MOG) 中的概率预测效果很好：

$$MOS = |V| D_{ef} \quad (4)$$

式中  $V$  是水平风速。

杜顿指数 (Dutton, 1980)：Dutton 指数是基于湍流报告与各种天气尺度的湍流指数的线性回归分析所得到的经验指数，同时考虑了水平风切变和垂直风切变。

$$Dutton = 1.25S_H + 0.25S_V^2 + 10.5 \quad (5)$$

式中,  $S_H = \left( \frac{u}{s} \frac{\partial s}{\partial x} - \left( \frac{v}{s} \frac{\partial s}{\partial y} \right) \right)$  表示水平风切变,  $S_V = \left( \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right|^2 + \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right|^2 \right)^{1/2}$  表示风垂直切变,  $s$  为合成风速

理查森数 (Sharman et al, 2006) : 理查森数及其组成部分是众所周知的湍流诊断 (Endlich, 1964; Kronebach, 1964; Dutton and Panofsky, 1970)。理论和观察表明, 至少在某些情况下, 晴空湍流是由开尔文-亥姆霍兹不稳定性产生的。当  $Ri$  变小时, 就会发生这种情况。因此, 理论上,  $Ri$  小的区域应该是湍流的有利区域:

$$Ri = \frac{N^2}{S_V^2} \quad (6)$$

式中,  $N^2 = \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z}$  或者  $\frac{g}{\theta_e} \frac{\partial \theta_e}{\partial z}$ ,  $\theta$  为位温,  $\theta_e$  为等效位温,  $g$  为重力加速度

湍能耗散率 (MacCready, 1962a) : EDR 表示扰动能量从较大尺度涡流向较小尺度涡流的传输速率。它表征惯性子区域湍流的扰动状态, 是描述大气湍流的关键参数。EDR 越大, 湍流越强 (Zhou et al, 2013)。在基于 IDM 的 EDR 估计中, 引用泰勒的冻结湍流假设来表达时域中的 EDR。值得注意的是, 飞机相对于速度扰动的高真实空速 ( $u' = u - \bar{V}_T$ , 其中  $\bar{V}_T$  是平均真实空速) 可以使该假设成立 ( $u'/\bar{V}_T \ll 1$ )。EDR 可以通过以下三种方法进行估计: (i) 二阶结构函数 (Frehlich and Sharman, 2004), (ii) 功率谱密度 (PSD), (iii) 使用 von Kármán 谱的最大似然估计模型 (Sharman et al, 2014)。

(i) 首先, 应用柯尔莫哥洛夫的第二个相似性假设和泰勒的假设, EDR 可以用风速的时间增量 ( $\tau$ ) 来表示, 为:

$$EDR = \left( \frac{1}{\bar{V}_T} \right)^{1/3} \left[ \frac{\bar{D}_i(\tau)}{\tau^{-2/3} C_K} \right]^{1/2} \quad (7)$$

式中:  $\bar{D}_i(\tau) = \left\langle [u_i(t + \tau) - u_i(t)]^2 \right\rangle$ ,  $\bar{V}_T$  是 2 分钟时间窗口的平均真实空速;  $D_i$  是风速分量的二阶结构函数, 窗口为 2 min;  $C_K$  是柯尔莫哥洛夫常数,  $U$  设置为 0.52,  $V$  和  $W$  设置为 0.707 (Wyngaard and Côté, 1971; Oncley et al, 1996; Strauss et al, 2015);  $\tau$  是预定义惯性范围 ( $2 \text{ s} \leq \tau \leq 5 \text{ s}$ ) 的算术平均值, 水平尺度约为 400 ~ 1000 m, 考虑到空速约为  $200 \text{ m/s}$ ; 尖括号表示整体平均值。

(ii) 可以通过将  $k^{-5/3}$  的柯尔莫哥洛夫斜率拟合到定义的惯性范围内观测到的风分量功率谱密度  $[S_i, (i = U, V, W)]$  并假设来估计 EDR 泰勒冻结假设:

$$EDR = \left( \frac{2\pi}{V_T} \right)^{1/3} \left[ \frac{\overline{S_i(f) f^{5/3}}}{C_K^{-1}} \right] \quad (8)$$

式中：频率  $f$  的范围 ( $f = \frac{V_T}{2\pi} k$ ，其中  $k$  是波数) 在  $0.2 \sim 0.5 \text{ s}^{-1}$ ，与式 (7) 中定义的惯性范围相符，上划线是定义的惯性范围内数据的算术平均值。由方程式得出的公式被称为 EDR2，并且 EDR2 的  $U$ 、 $V$  和  $W$  的值分别标记为 EDR2U、EDR2V 和 EDR2W。

(iii) EDR 可以使用最大似然估计方法<sup>[54]</sup>进行估计，该方法使用由下式给出的观测能谱 ( $S_{\text{obs}}$ ) 和模型能谱 ( $S_{\text{model}}$ )：

$$EDR = \left[ \frac{1}{p_2 - p_1 + 1} \sum_{f=f_1}^{f_2} \frac{S_{\text{obs}}(f)}{S_{\text{model}}(f)} \right]^{1/2} \quad (9)$$

式中： $f_1$  和  $f_2$  在  $0.2 \sim 0.5 \text{ s}^{-1}$ ， $p_1$  和  $p_2$  是相应的下限和上限频率指数，冯·卡曼能谱 (von Kármán, 1948; Mann, 1994) 用作模型光谱  $S_{\text{model}}$ 。值得注意的是，观测到的频谱  $S_{\text{obs}}$  和定义的惯性范围与式 (8) 中使用的相同。

对于纬向风 ( $U$ )，空间域中的冯·卡曼风模型可表示为

$$F_{\text{model}}(k) = \frac{9}{55} \alpha \varepsilon^{2/3} \frac{1}{(L^2 + k^2)^{5/6}} \quad (10)$$

式中： $\alpha$  的经验值设置为 1.6 (Sharman et al, 2014)； $L$  是长度尺度，根据 Sharman et al (2014) 的建议，将其设置为 669 m； $\varepsilon$  应该是统一的。

对于经向风 ( $V$ ) 和垂直风 ( $W$ )，冯·卡曼能谱公式为

$$F_{\text{model}}(k) = \frac{3}{110} \alpha \varepsilon^{2/3} \frac{3L^{-2} + 8k^2}{(L^2 + k^2)^{11/6}} \quad (11)$$

泰勒的湍流假设适用于方程。式 (10) 和式 (11) 将空间 ( $k$ ) 域频谱转换为基于频率 ( $f$ ) 域的频谱 ( $S_{\text{model}}$ )。由式 (9)-式 (11) 得出的 EDR 称为 EDR3，使用  $U$ 、 $V$  和  $W$  导出的 EDR3 值分别描述为 EDR3U、EDR3V 和 EDR3W。

等效垂直风指数 (Gill, 2014)：等效垂直阵风速度 (DEVG) 是公认的湍流测量方法，可以根据这些参数进行计算。该速度 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 由以下公式定义：

$$DEVG = \frac{Am |\Delta n|}{V} \quad (12)$$

式中： $|\Delta n|$  = 飞机法向加速度相对于  $1 \text{ g}$  的分数偏差的峰值模量值 (单位:  $\text{g}$ )， $m$  = 飞机总质量 (公吨)，

$V$  = 加速度峰值出现时的校准空速, 以节为单位,  $A$  = 随飞行条件而变化的飞机特定参数, 并可通过以下公式近似:

$$A = \bar{A} + c_4(\bar{A} - c_5)(\frac{m}{\bar{m}} - 1) \quad (13)$$

其中,

$$\bar{A} = c_1 + \left( \frac{c_2}{c_3 + H(\text{kft})} \right) \quad (14)$$

$H$  = 海拔,  $\bar{m}$  = 飞机的参考质量, 参数  $c_1, c_2, \dots, c_5$  取决于飞机, 并使用适合 B747-400 的值 (Truscott, 2000)。

水平温度梯度指数 (Sharman et al, 2006) : 水平温度梯度是热风关系中风场变形和垂直风切变的衡量标准, 通常被航空公司预报员使用。

$$HTG = |\nabla_H T| = \left[ \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (15)$$

L-P 指数 (翟菁等, 2010) : L-P 指数针对高空飞行时可能发生的颠簸:

指数  $L$ :

$$L = 7.268 \frac{\partial u}{\partial z} + 0.718 \frac{\partial T}{\partial n} + 0.318 \frac{\partial u}{\partial n} - 2.52 \quad (16)$$

式中:  $\frac{\partial u}{\partial z}$  为沿气流方向风速的垂直变化 [ $(\text{m s}^{-1})/100 \text{ m}$ ],  $\frac{\partial T}{\partial n}$  为等压面上的水平温度梯度 ( $^{\circ}\text{C}/100 \text{ km}$ ),  $\frac{\partial u}{\partial n}$  为等压面上沿气流方向风速梯度 [ $(\text{m s}^{-1})/100 \text{ km}$ ]。当  $L \geq 0$  时预报有颠簸;  $L < 0$  时, 则预报没有颠簸。

在此基础上根据  $L$  指数计算概率  $P$ :

$$P = \frac{1}{1 + e^{-0.59L}} \quad (17)$$

判据为: 当  $70\% > P \geq 50\%$ , 预报有轻度颠簸; 当  $85\% > P \geq 70\%$ , 预报有中度颠簸; 当  $P \geq 85\%$ , 预报有严重颠簸。

Colson-Panofsky 指数 (Colson and Panofsky, 1965) : Colson-Panofsky 指数起源于湍流动能 (TKE) 平衡方程, 定义如下:

$$CP = (\Delta z)^2 \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \left( 1 - \frac{Ri}{Ri_{\text{crit}}} \right) \quad (18)$$

式中:  $z$  是海拔,  $\Delta z$  是垂直网格间距,  $Ri_{crit}$  是一个临界理查森数, 其值  $Ri_{crit} = 0.5$ 。

散度修正湍流指数 (Ellrod and Knox, 2010) : DTI 是在 TI1 基础上考虑了快速变化的发散流, 加入了简化的散度趋势项 (divergence trend term, DVT) :

$$DTI = TI1 + D_{VT} \quad (19)$$

式中

$$D_{VT} = C \left[ (\Delta u / \Delta x + \Delta v / \Delta y)_{h_2} - (\Delta u / \Delta x + \Delta v / \Delta y)_{h_1} \right] \quad (20)$$

下标  $h_1$  和  $h_2$  代表用于确定 DVT 的两个预测区间。 $C$  是常数, 它的值被主观指定为 0.1。

