

Analysis of Influence of Clear Air Turbulence on Aircraft

Yuandan Fan

College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin
Email: 13920736311@163.com

Received: Dec. 9th, 2018; accepted: Dec. 21st, 2018; published: Dec. 28th, 2018

Abstract

It is very difficult for civil aviation aircraft to predict CAT (clear air turbulence), since the precipitation of CAT is lower than that of the convective turbulence. So CAT is a major hidden danger affecting aviation safety. In order to detect CAT as effectively as possible, firstly, the influence of CAT on the aircraft is analyzed in this paper, and a reactive CAT detection method is researched. This method is estimating the Eddy Dissipation Rate (EDR) based on the aircraft's vertical acceleration to quantify the CAT intensity. Then, the detection process is obtained. Secondly, The Radio Technical Commission for Aeronautics revised the specification of airborne weather radar detection turbulence, in which the vertical load factor is defined as the detection amount. The relationship between the EDR and the vertical load factor can be further analyzed in detail to conclude that the impact of the CAT on the aircraft can be quantified as the vertical load factor. Finally, the conclusion of the above theoretical analysis is verified to be correct, as the EDR is calculated using the real ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) data which come from a flight that has encountered CAT. Furthermore, it is proved that the CAT detection method based on the vertical load factor is reasonable, and airborne weather radars can predict CAT more accurately and reasonably by using this method. The analysis of the impact of clear-air turbulence on the aircraft has practical significance for the accurate prediction and detection of clear-air turbulence.

Keywords

Clear Air Turbulence Detection, Vertical Load Factor, Eddy Dissipation Rate, Automatic Dependent Surveillance-Broadcast

晴空湍流对飞机的影响分析

范源丹

中国民航大学电子信息与自动化学院, 天津
Email: 13920736311@163.com

收稿日期: 2018年12月9日; 录用日期: 2018年12月21日; 发布日期: 2018年12月28日

摘要

晴空湍流(Clear Air Turbulence, CAT)因其不可见性,民航飞机预报CAT十分困难,是影响航空安全的一重大隐患。为尽可能有效探测CAT,本文首先定量分析CAT对飞机的影响,研究了一种反应式的CAT检测方法,即基于飞机垂直加速度估计涡流耗散率(Eddy Dissipation Rate, EDR)来量化CAT强度,并给出检测流程。其次美国航空无线电技术委员会更新了机载气象雷达湍流检测的标准,其中将垂直载荷因子定义为检测依据,则可进一步具体分析EDR估计值和垂直载荷因子之间的关系,得出可将CAT对飞机的影响量化为垂直载荷因子。最后利用遭遇了CAT的某航班的真实ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, 广播式自动相关监视)数据求解EDR估计值,验证了以上理论分析的合理性,进而证明基于垂直载荷因子的CAT检测方法的合理性,可基于机载气象雷达实现更准确合理的CAT预报。晴空湍流对飞机的影响分析对晴空湍流的精确预报与检测有实际意义。

关键词

晴空湍流检测, 垂直载荷因子, 涡流耗散率, 广播式自动相关监视

Copyright © 2019 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

晴空湍流(clear air turbulence, CAT)定义为无云区域的大气湍流,这种湍流可能在机载气象雷达未检测到的情况下发生[1]。当飞机误入CAT区域时,会使飞机颠簸、乘客和机组人员受伤,在极端情况下,可能导致飞机结构损坏,若飞机长时间暴露于湍流中将会缩短飞机的疲劳寿命[2]。2018年10月18日,阿根廷一架空客A330客机在飞往阿根廷途中遇到严重晴空颠簸,导致飞机急速上抛和下降,造成机上15人受伤[3]。2017年6月6日,荷兰皇家航空一架由荷兰飞香港的波音747客机,降落前突遇强烈晴空湍流,引致飞机急坠,九人受伤[4]。并且,近年来随着二氧化碳浓度增加,CAT发生的频率大幅增加,CAT对航空安全产生了巨大威胁[5]。

目前,民航飞机预报和检测晴空湍流仍十分困难。根据常见的几种晴空湍流检测方式,可将晴空湍流检测方法分为反应式检测方法和探测式检测方法。反应式的检测方法根据飞机遭遇湍流时的即时响应数据来检测湍流,例如PIERP(S Pilot Reports)、AMDAR(Aircraft Meteorological Data Relay)等。PIERP指飞行过程中遭遇特殊情况时飞行员的例行报告[6],主要根据飞行员的报告飞机对湍流的反应以及天气情况等信息,常作为湍流预测的验证,但报告结果受飞行员的主观性、机型差异等因素影响较大。AMDAR资料中包含湍流耗散率(Eddy Dissipation Rate, EDR)和垂直阵风风速等信息[7],其中EDR可用于度量大气湍流危险性。2015年,有学者提出可从ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, 广播式自动相关监视)的导航报文中提取飞机高度、速度等信息计算EDR估计值来衡量湍流强度[8]。由于该方法中利用的ADS-B数据是飞机自身发送的机载数据,更新频率高,与PIERP数据相比具有更高的可靠性,但不能提前较长时间向飞行员告警。以上反应式的检测方法获取的湍流资料可提供即时可靠的湍流实际数据,有利于研究晴空湍流对飞机的影响,对研究晴空湍流预报与检测方法发挥着不可替代的重要作用。

为了向民航飞机尽可能有效的预报晴空湍流,常用探测式的湍流检测方法,可利用机载气象雷达、激光雷达等探测晴空湍流。目前,民航飞机通常利用机载气象雷达探测大气湍流,从而提前向机组告警。检测依据是雷达回波的多普勒速度谱宽,通常认为雷达回波多普勒速度谱宽大于 5 m/s 时存在大气湍流目标[9]。2016 年 3 月,最新的机载气象雷达的最低运行性能标准 DO-220A 中要求,机载气象雷达探测湍流时,检测量不仅考虑雷达回波谱宽,还需考虑飞机特性的影响,最终根据垂直荷载的均方根度量影响飞机的湍流的严重性[10],于是可得出基于垂直荷载因子的大气湍流检测方法。针对不同机型的飞机,在不同的飞行条件下,该方法考虑了飞机特性和湍流本身的性质,则能更准确的度量湍流对飞机影响。

因此,为了利用机载气象雷达更准确的预报晴空湍流,需验证基于垂直荷载因子检测晴空湍流的合理性。本文定量分析 CAT 对飞机的影响,首先研究了一种反应式的 CAT 检测方法,即基于飞机垂直加速度的 EDR 估计方法,得出检测 CAT 的基本流程。接着根据更新的机载气象雷达检测湍流的规范,分析 EDR 估计值和垂直荷载因子之间的关系,从而将 CAT 对飞机的影响量化为垂直荷载因子。最后利用实际的 ADS-B 数据,估计某次航班的 EDR,根据 EDR 估计值和垂直荷载因子之间的关系,验证了可将晴空湍流对飞机的影响量化为垂直荷载因子,同时证明了基于垂直荷载因子的晴空湍流检测方法的合理性,从而实现更准确合理的晴空湍流预报。

2. 基于飞机垂直加速度的 EDR 估计

2.1. 基本思想

飞机遭遇 CAT 时,常见的观测指标是飞机的垂直加速度大小。飞机在平稳飞行的过程中,通常其重力等于升力。当飞机遇到晴空湍流时,速度和方向随机变化的气流将改变飞机的升力,破坏其配平状态。湍流强度大时,将改变飞机的飞行高度,使飞机急坠或上抛,飞机的垂直加速度也将明显改变。

因此,为了定量量化 CAT 对飞机的影响,一种反应式的 CAT 检测方法是基于飞机垂直加速度的 EDR 估计,即将 CAT 对飞机的影响量化为 EDR。EDR 定义为湍流内部气流涡旋的动能转化为热能的速率[11],湍流强度越大,EDR 估计值就越大,因此 EDR 可用于度量湍流强度。以下细化基于飞机垂直加速度的 EDR 估计方法,实现晴空湍流检测,有利于进一步分析晴空湍流对飞机的影响。

文献[8]中提出,可根据飞机垂直加速度估计 EDR,EDR 等于 $\varepsilon^{1/3}$, ε 表示为

$$\varepsilon = B\sigma_T^3 V^{-1} \quad (1)$$

其中 V 是飞机的真空速, B 是飞机响应因子, σ_T 是在设定观测周期 T 内的飞机加速度的标准差,可以从不同的数据源获得,如机载加速度计、数字飞行数据记录器等,本文利用 ADS-B 高度数据估计飞机垂直加速度。

2.2. 飞机响应因子

B 是特定飞机的响应因子,取决于飞机特性(机翼面积,飞机质量等)和飞行条件(真空速,飞行高度等)[8]。

求解飞机的响应因子,将涉及分析飞机对 CAT 的响应。为便于计算,可将 CAT 简化为各向同性的垂直阵风,飞机模型简化为质量为 m ,机翼无后掠的刚性飞机。当飞机遇到 CAT 时,飞机只有沉浮运动。在准定常气动力假设下,飞机遇到湍流后其升力将立刻改变。依据飞机升力和重力的关系构建飞机沉浮运动方程[12],并将沉浮运动方程变换到频域分析,飞机垂直加速度 \ddot{z} 和垂直阵风速度 w_{g0} 之间的频响函数为[12]。

$$H_{rg}(\omega) = \frac{\ddot{z}}{w_{g0}} = -\omega^2 \frac{-\frac{1}{2}\rho V S_w a}{-\omega^2 m + i\omega \frac{1}{2}\rho V S_w a} \quad (2)$$

其中，表示空气密度，表示飞行真空速，表示机翼面积，是全机升力线斜率。

根据文献[7]可推导得出飞机响应因子表示为：

$$B = 1/\left[0.7^{3/2} I^{3/2}\right] \quad (3)$$

$$I = \int |H_{rg}(\omega)|^2 \omega^{-5/3} d\omega \quad (4)$$

即可得出某飞行条件下，特定飞机的响应因子。

2.3. 基于 ADS-B 数据估计 σ_T

ADS-B 本身不含加速度信息，但是含有高度、垂直速度信息，并且 ADS-B 数据的更新频率较高，在 0.5 到 1 Hz 之间，即可利用 ADS-B 高度数据计算飞机垂直加速度

$$\frac{dz}{dt} = v_z \quad (5)$$

$$\frac{dv_z}{dt} = a_z \quad (6)$$

Table 1. Categorization of turbulence intensity

表 1. 湍流强度的分类

EDR 的取值范围	湍流强度
$EDR \leq 0.15$	无湍流
$0.15 < EDR \leq 0.3$	轻度湍流
$0.3 < EDR \leq 0.55$	中度湍流
$0.55 < EDR \leq 0.8$	重度湍流

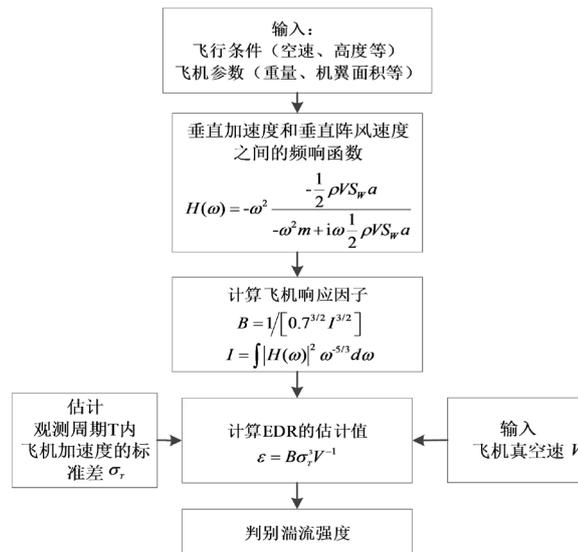


Figure 1. Calculation flowchart of EDR based on aircraft vertical acceleration
图 1. 基于飞机垂直加速度的 EDR 计算流程图

其中, z 是飞机高度, v_z 是飞机垂直速度, a_z 是飞机垂直加速度, 继而计算周期 T 内飞机垂直加速度的标准差 σ_T 。观测周期 T 的设定需要根据数据的更新频率进行相应调整, T 的取值过大会使 σ_T 太过近似, 取值过小则会使产生过多虚警现象。

根据上述内容, 假设已获得周期 T 内飞机的平均真空速和特定条件下的飞机响应因子, 根据式(1)即可求出 EDR 估计值, 则基于飞机垂直加速度的 EDR 计算流程如图 1 所示。表 1 给出不同 EDR 的取值范围对应的湍流强度, 可将周期 T 内 EDR 估计值与湍流强度分类表比对, 度量此时的湍流强度, 从而定量量化 CAT 对特定飞机的影响。

3. CAT 对飞机的影响量化

3.1. 基于垂直载荷因子的晴空湍流检测方法的基本思想

一架飞机在整个飞行过程中都承受着载荷, 飞机自身特性和大气环境决定飞机所承受载荷的大小。当飞机遭遇 CAT 时, 根据飞机对不稳定气流的气动力响应分析可知, 飞机的载荷会改变。飞机所受的载荷过大时, 将对飞机安全造成影响。

民航飞机能够利用机载气象雷达对湍流进行预报, 文献[13]中给出了一种探测式的大气湍流检测方法, 采用垂直载荷的均方根来度量湍流强度, 将它表示为 $\hat{\sigma}_{\Delta n}$ [13]。

$$\hat{\sigma}_{\Delta n} = \frac{\sigma_{\Delta n}}{\text{unit}\sigma_w} \frac{[\bar{M}_2(\mathbf{x})]^{0.5}}{\sqrt{\sigma_v^2(r)}} \quad (7)$$

其中, $\sigma_{\Delta n}/\text{unit}\sigma_w$ 主要取决于与飞机特性相关的量, $\bar{M}_2(\mathbf{x})/\sqrt{\sigma_v^2(r)}/\sigma$ 取决于雷达回波谱宽。为叙述方便, 将 $\hat{\sigma}_{\Delta n}$ 称为估计的垂直载荷因子, 可见 $\hat{\sigma}_{\Delta n}$ 是湍流回波谱宽和飞机因素的函数, 应用此估计值进行湍流检测能实现大气湍流的精确预警。

3.2. 垂直载荷因子与 EDR 的关系

根据文献[13], 垂直载荷因子其实际物理意义是观测周期 T 内飞机垂直加速度相对 $1g$ 的均方根。根据 2.1 节所述基于飞机垂直加速度的 EDR 估计方法中, σ_T 是在观测周期 T 内的飞机垂直加速度的标准差。则显然可得垂直载荷因子与 σ_T 意义相同, 都能表征一定观测时间内飞机垂直加速度的离散程度。根据式(1)可得, EDR 估计值与 σ_T 成正比关系, 从而可得出 EDR 估计值与垂直载荷因子成正比关系, 根据上述分析可将 CAT 对飞机的影响量化为垂直载荷因子。

因此, 根据式(7), 若可已估计得到 CAT 回波的谱宽和此时飞行条件下的飞机比例因子, 可估计垂直载荷因子, 从而根据垂直载荷因子探测 CAT。

4. 验证和分析

为了进一步验证 CAT 对飞机的影响可量化为垂直载荷因子, 并验证基于垂直载荷因子的 CAT 检测方法的合理性, 以下利用某次航班的实际 ADS-B 数据, 求解 EDR 估计值来量化湍流危险性, 从而根据垂直载荷因子与 EDR 的关系, 分析并验证理论分析的合理性。

据报道, 2018 年 10 月 18 日, 阿根廷一架空客 A330-200 在空中遇到严重晴空湍流, 造成机上 15 人受伤。则以此航班为例, 从 Flightradar24 中下载该航班的实际 ADS-B 数据, 计算 EDR 估计值, 分为以下步骤。

步骤 1: 计算观测周期 T 内飞机垂直加速度的标准差

如图 2、图 3 所示是从 ADS-B 中获取的该航班飞机的高度数据和地速信息。由图可见客机在飞行途中短时间内飞机高度大约在 -150 m 到 400 m 之间变化。

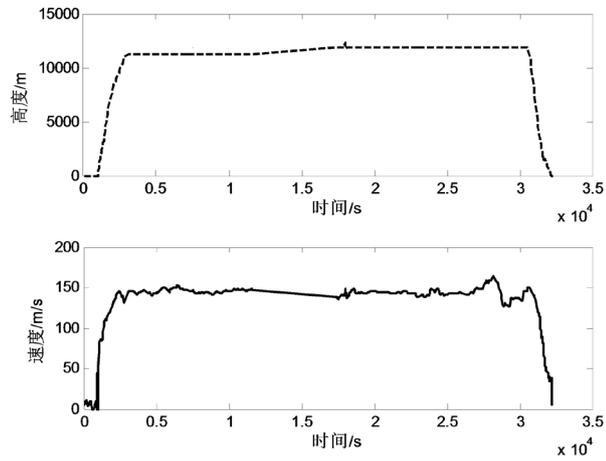


Figure 2. The actual flight altitude and ground speed of the aircraft
图 2. 飞机实际飞行高度和地速

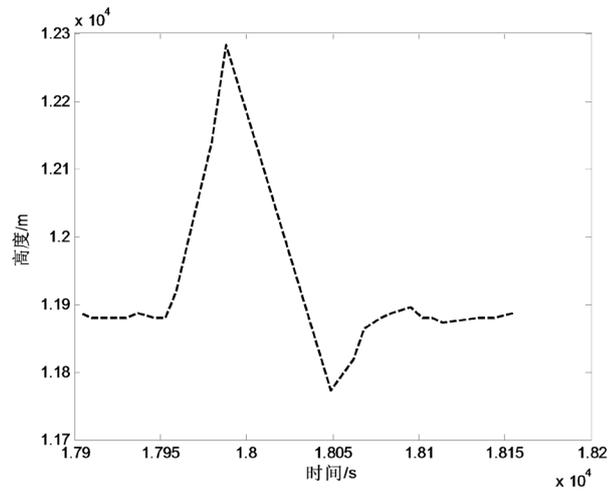


Figure 3. Partial enlarged view of the flight altitude of the aircraft
图 3. 飞机飞行高度局部放大图

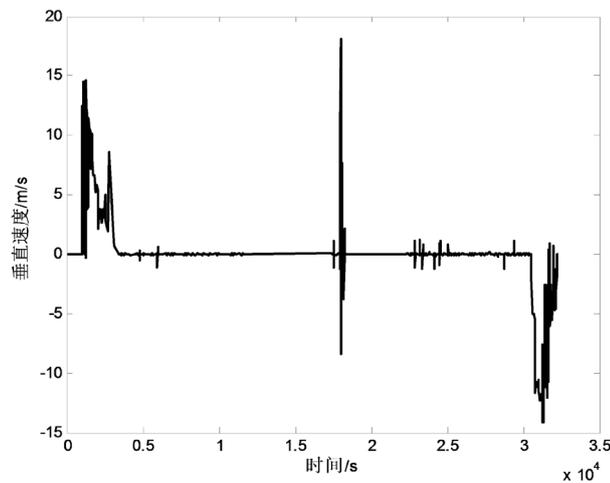


Figure 4. The vertical speed of the aircraft
图 4. 飞机垂直速度

根据式(5)、(6)计算飞机垂直速度和加速度,结果如图4和图5所示。由图可见客机在飞行途中 $t = 18,000$ s 附近,此飞机的垂直速率波动剧烈,上升垂直速率大约达到 18 m/s,下降速率大约达到 10 m/s,可见飞机遇到较严重的颠簸。新闻报道称飞机瞬时上升速率超过 12 ft/s,瞬时下降速率超过 15 ft/s,可见下载数据计算的结果和新闻报道数据近似。因所应用的 ADS-B 数据更新频率较低,此时忽略飞机起飞降落阶段的情况。

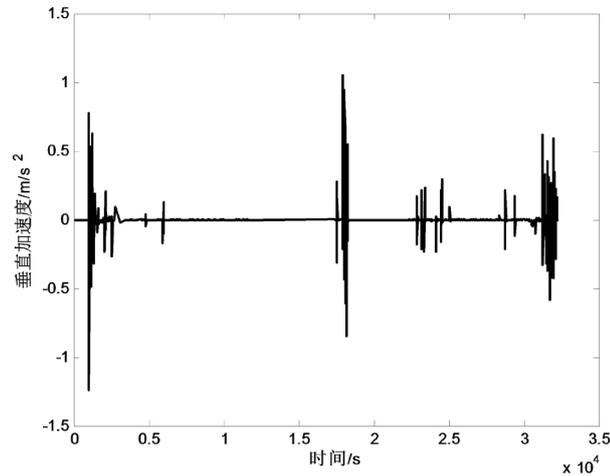


Figure 5. The vertical acceleration of the aircraft
图5. 飞机垂直加速度

当观测周期 T 取 10 s 时,可根据加速度信息计算飞机垂直加速度的标准差,如图6所示。

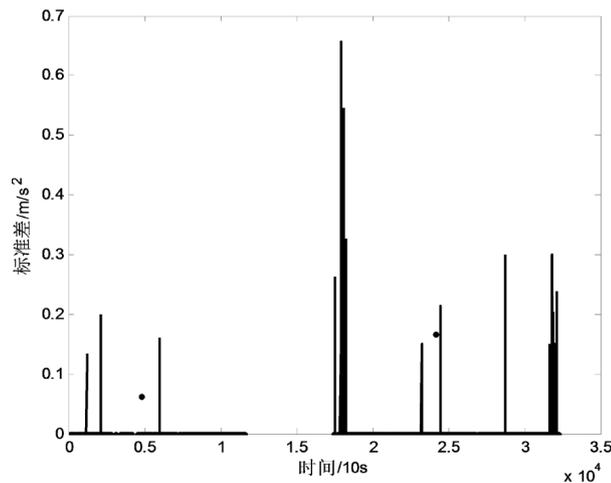


Figure 6. Standard deviation of vertical acceleration of the aircraft, $T = 10$
图6. 飞机垂直加速度的标准差 σ_T , $T = 10$

步骤2: 计算飞机的响应因子

因为飞机的响应因子取决于飞机特性和飞行条件,以时间在 $18,000$ s 左右时的情况为例,计算此时飞机响应因子。飞机此时巡航高度为 $11,900$ m 左右,真空速为 250 m/s 左右, A330-200 的机翼面积约为 361 m²,实时重量约为 $200,000$ kg,在单独浮沉一刚性飞机一准定常气动力模型下计算该飞机的响应因子 B ,首先计算得出 $|H(\omega)|^2$ 的和 $|H(\omega)|^2 \omega^{-5/3}$ 功率谱密度函数分别如图7和图8所示。

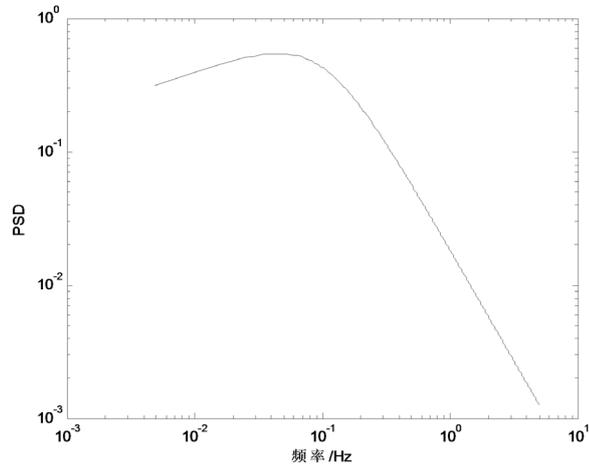


Figure 7. The power density function of $|H(\omega)|^2 \omega^{-5/3}$

图 7. $|H(\omega)|^2 \omega^{-5/3}$ 的功率密度函数

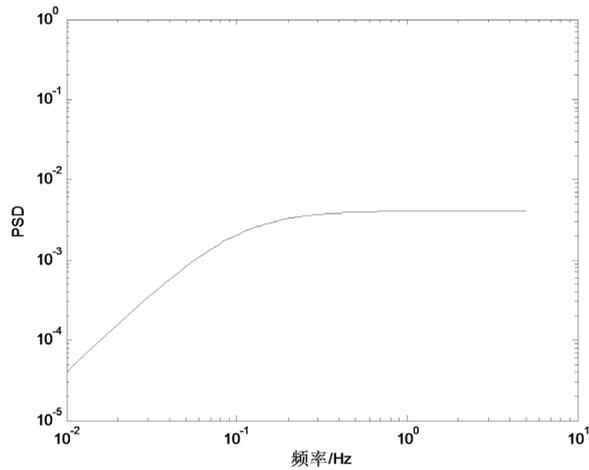


Figure 8. The power density function of $|H(\omega)|^2$

图 8. $|H(\omega)|^2$ 的功率密度函数

接着根据式(3)和式(4)估得此时飞机响应因子为 $B = 30.8518$ 。

步骤 3: EDR 估计

当观测周期 T 取 10 s 时, 则根据式(1)计算 EDR, 估计结果如图 9 所示。

从图 9 中可明显看出在 $t = 18,000$ s 附近, EDR 估计值明显增大, 与湍流强度分类表比对, 此时飞机遭遇晴空湍流的强度为中度湍流, 这和新闻报道中描述的情况基本相符。说明根据 ADS-B 实际数据估计得到的 EDR 估计值能够度量湍流强度, 因此说明此时 CAT 对飞机的影响可量化为 EDR。根据 EDR 估计值和垂直载荷因子之间的关联性, 也证明了 CAT 对飞机的影响可量化为垂直载荷因子, 从而验证基于垂直载荷因子的 CAT 探测方法有合理性。

5. 结论

本文分析了晴空湍流对飞机的影响, 首先为了定量分析晴空湍流对飞机的影响, 研究了一种反应式的 CAT 检测方法, 即基于飞机垂直加速度的 EDR 估计方法, 得出检测流程, 该方法获取的湍流资料可

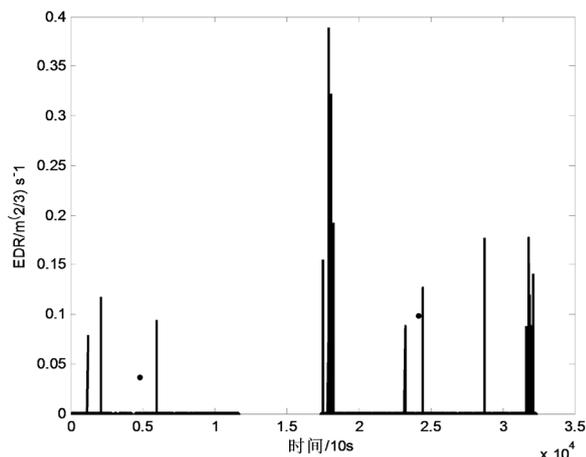


Figure 9. EDR estimate, $T = 10$ s

图 9. EDR 估计值, $T = 10$ s

提供可靠的湍流实际数据。其次根据 DO-220A 中更新的利用机载气象雷达的探测式湍流检测方法, 分析 EDR 估计值和垂直载荷因子之间的关系, 从而将晴空湍流对飞机的影响量化为垂直载荷因子。最后利用实际的 ADS-B 数据, 估计某次航班的 EDR, 根据 EDR 估计值和垂直载荷因子之间的关系, 验证了可将晴空湍流对飞机的影响量化为垂直载荷因子, 进而证明基于垂直载荷因子的晴空湍流检测方法的合理性。基于垂直载荷因子的晴空湍流检测方法同时考虑了飞机特性和湍流回波谱宽, 因此该检测方法更合理准确, 并且符合 DO-220A 提出的新要求, 因此可利用机载气象雷达实现更准确合理的晴空湍流预报。本文研究的晴空湍流对飞机的影响分析对晴空湍流的精确预报与检测有实际意义。

致 谢

感谢中央高校基本科研业务费资助项目(项目编号: ZYGX2018041)的资助。

基金项目

中央高校基本科研业务费资助项目, 项目编号: ZYGX2018041。

参考文献

- [1] Klimenko, V. and Krozel, J. (2011) Clear-Air Turbulence Impact Modeling Based on Flight Route Analysis. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, Portland, 8-11 August 2011, 6513. <https://doi.org/10.2514/6.2011-6513>
- [2] 周林, 黄超凡. 近 10 年晴空湍流的研究进展[J]. *气象科技*, 2015, 43(1): 91-96.
- [3] 云新网. A330 客机遭遇魔鬼湍流, 机舱秒变拆房现场, 15 人受伤[Z/OL]. <https://www.yn199.cn/112810-1.html>, 2018-10-22.
- [4] Ejinsight (2017) Nine Injured after KLM Flight Hits Turbulence En Route to HK. <http://www.ejinsight.com/20170605-nine-injured-after-klm-flight-hits-turbulence-en-route-to-hk/>
- [5] Williams, P.D. (2017) Increased Light, Moderate, and Severe Clear-Air Turbulence in Response to Climate Change. *Advances in Atmospheric Sciences*, **34**, 576-586. <https://doi.org/10.1007/s00376-017-6268-2>
- [6] Takacs, A., et al. (2006) Using *In Situ* Eddy Dissipation Rate (EDR) Observations for Turbulence Forecast Verification. *12th Conference on Aviation Range and Aerospace Meteorology*, Atlanta, 31 January 2006.
- [7] Painting, D.J. (2003) Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR) Reference Manual. World Meteorological Organization Doc WMO-958.
- [8] Kopeć, J.M., Kwiatkowski, K., de Haan, S., et al. (2015) Retrieving Clear-Air Turbulence Information from Regular Commercial Aircraft Using Mode-S and ADS-B Broadcast. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, **8**,

11817-11852. <https://doi.org/10.5194/amtd-8-11817-2015>

- [9] 卢晓光, 夏冬. 基于统计置信度的湍流检测门限确定方法[J]. 中国民航大学学报, 2011, 29(4): 27-30.
- [10] RTCA, Inc. (2016) RTCA/DO-220A Minimum Operational Performance Standards (MOPS) for Airborne Weather Radar System.
- [11] Li, Q., Rapp, M., Schrön, A., *et al.* (2016) Derivation of Turbulent Energy Dissipation Rate with the Middle Atmosphere Alomar Radar System (MAARSY) and Radiosondes at Andøya, Norway. *Annales Geophysicae*, **34**, 1209. <https://doi.org/10.5194/angeo-34-1209-2016>
- [12] Wright, J.R. and Cooper, J.E. (2008) Introduction to Aircraft Aeroelasticity and Loads. John Wiley & Sons, Hoboken.
- [13] Bowles, R.L. and Buck, B.K. (2009) A Methodology for Determining Statistical Performance Compliance for Airborne Doppler Radar with Forward-Looking Turbulence Detection Capability. NASA CR, 215769.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2161-8712, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: acm@hanspub.org