

高原航线飞机颠簸的时空分布特征研究

黄萌, 吴俊杰, 任佳莉, 庞毅

(中国民用航空飞行学院, 四川 广汉 618300)

摘要: 借助垂直过载增量法, 结合使用飞机颠簸数据统计分析 2014 年四条高原航线飞机颠簸的时空分布特征, 即高原航线的飞机颠簸频率在 55% 以上, 拉萨航线高达 78.8%。进离场阶段遭遇颠簸的频率高于巡航阶段。发生飞机颠簸频率表现夏秋季节低, 冬春季节高。巡航阶段发生飞机颠簸的高度集中在 6 900~8 700 m。进离场阶段发生飞机颠簸的频次随着高度的降低而增加。飞机颠簸空间分布呈长条形, 发生飞机颠簸高频区域是拉萨航线 91°E~93°E 和 97°E~99°E 区域以及九寨航线 31°N~33°N。

关键词: 垂直过载增量; 飞机颠簸; 时空分布

中图分类号: U8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)10-0206-06

飞机颠簸作为民航安全的一大威胁备受关注, 引起学术界对其深入研究的兴趣。飞机颠簸并非仅仅是飞机在飞行过程中轻微晃动的表面现象, 更是潜藏可能导致飞机结构性损伤以及对乘客和机组人员的心理健康产生重大负面影响的深层次问题。该现象不仅引发了航空旅客的强烈恐慌, 而且极端的湍流可能使飞机在空中频繁剧烈抖动, 从而增加飞机的不安全因素, 甚至可能引发严重的机械性损坏和乘客受伤事件。这种背景下, 深入分析飞机颠簸的时空分布特征及颠簸源头, 成为维护民航安全的当务之急。

在深入研究飞机颠簸成因时, 学术界着眼于开尔文-赫姆霍茨不稳定(K-H 不稳定)和重力波等多个关键因素^[1-2]。Sharman 等^[3]、Wolff 和 Sharman^[4]还发现由各种源头产生的重力波和惯性重力波的破碎或翻转同样可能引发飞机颠簸。重力波的激发源多样化, 可能包括对流、高空锋、急流以及山地波等多个因素^[5]。实验室测量数据和数值模拟的研究表明, 重力波的运动能导致局部理查森数的降低, 从而引发重力波的不稳定性^[6-7]。此外, Tjernström 和 Mauritsen^[8]还发现重力波可以通过破碎引发湍流和混合, 或者通过扰动接近局部不稳定性阈值的大气环境来产生飞机颠簸。尽管对于穿越地形产生的破碎山地波已经有许多相关的研究成果, 但对于山地波破碎的定量研究甚少。这一

领域的深入研究仍需要建立山地波破碎和山地波诱导湍流的预测模型, 以更全面地理解飞机颠簸的复杂机制。刘海文等^[9]归纳出高空急流一锋区耦合区域晴空湍流产生机制及飞机颠簸的数值模拟。陶昕宇等^[10]分析了江西省飞机颠簸的统计特征及气象条件以期为其预报提供参考。

青藏高原因其独特的地理特征, 如平均海拔高度在 4 000 m 以上、面积超过 250 万 km², 成为全球最高的高架热源之一^[11], 受到学术界的广泛研究。作为进出高原的主要交通工具, 高原航线在青藏高原地区整体发展中扮演着重要角色。然而, 受到动力抽取^[12]、副热带西风急流以及强烈深对流活动^[13]的共同影响, 该地区晴空颠簸事件频繁发生。近几年, 由于进出高原的航线拓展、航班增加以及高原机场的新建, 还有高原探测数据的获取途径变多, 结合多种数据对飞机颠簸的时空分布特征和成因的研究变成热点。

1 数据和方法

1.1 航班统计

本文使用了航空执飞高原公司 2014 年航线的飞机(quick access recorder, QAR)数据。2014 年成都—拉萨(简称拉萨航线, ZULS)航班架次为 878 次, 成都—九寨(简称九寨航线, ZUJZ)航班架次为 664 次, 成都—林芝(林芝航线, ZUNZ)航班架次为 226 次, 成都—稻城(简称为稻城航线, ZUDC)航班

收稿日期: 2024-01-19

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2601701); 民航飞行技术与飞行安全重点实验室项目(FZ2020ZZ03)

作者简介: 黄萌(1997—), 男, 辽宁阜新, 硕士研究生, 研究方向为航空气象; 通信作者吴俊杰(1981—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为航空气象; 任佳莉(1997—), 女, 山西朔州, 硕士研究生, 研究方向为航空气象; 庞毅(1999—), 男, 四川达州人, 硕士研究生, 研究方向为航空气象。

架次为 164 次,总计 1 932 架次。

如图 1 所示,九寨航线呈现南北走向,另外三条航线均沿东西走向 30°N 的航路飞行,临近机场时飞出主航路。

1.2 飞机探测数据

使用到的 QAR 数据包括飞行日期、时间(UTC)、飞行所处阶段、经度、纬度、高度(ft, 1 ft ≈ 0.304 8 m)、航向、空速(kt, 1 kt = 1.852 km/h)、垂直速度(ft/min)、风向、风速(m/s)、环境温度(°C)、垂直过载,时间分辨率为 1 Hz。

1.3 ERA-5 数据

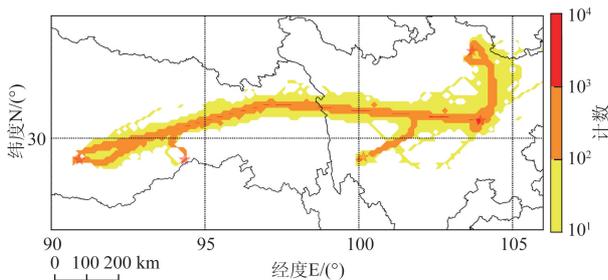
使用欧洲气象中心的 ERA-5 再分析数据,逐小时的气压数据是时间、经度、纬度、气压高度的四维 NC 格式数据,空间分辨率为 0.25° × 0.25°,选择的区域范围为 15°N~45°N 以及 85°E~120°E,垂直方向上包含从 1 000~1 125 hPa 的 26 个气压高度层。

1.4 飞机颠簸的识别方法

采用民航业中垂直过载增量^[12]的方法识别飞机颠簸,通过公式(1)将 QAR 数据中的飞机垂直过载计算得到垂直过载增量(Δn):

$$\Delta n = |\text{VRTG} - 1| \quad (1)$$

根据计算得到的 Δn 将颠簸的强弱等级分成三类,其中 0.2~0.5 为轻度颠簸、0.5~0.8 为中度颠簸、0.8~1 为重度颠簸。



基于审图号 GS(2023)2767 制作,底图无修改
图 1 2014 年四条航线全年飞行航迹热力

表 1 四条航线飞机颠簸频率统计

变量	ZULS		ZUJZ		ZUNZ		ZUDC	
	次数	占比/%	次数	占比/%	次数	占比/%	次数	占比/%
飞机颠簸	692	78.8	489	73.6	132	58.4	112	68.3
轻度颠簸	576	65.6	472	71.0	127	56.2	109	66.4
中度及中度以上颠簸	116	13.2	17	2.6	5	2.2	3	1.9
航班总次数	878	100.0	664	100.0	226	100.0	164	100.0

表 2 四条航线进离场阶段飞机颠簸频率统计

变量	ZULS		ZUJZ		ZUNZ		ZUDC	
	次数	占比/%	次数	占比/%	次数	占比/%	次数	占比/%
飞机颠簸	552	62.8	477	71.8	110	48.6	107	65.2
轻度颠簸	508	57.8	460	69.2	111	48.6	105	64.0
中度及中度以上颠簸	44	5.0	17	2.6	0	0.00	2	1.2
航班总次数	878	100.0	664	100.0	226	100.0	164	100.0

2 高原航线飞机颠簸时空分布特征

2.1 时间特征

将每次航班过程中最强烈的颠簸称为本次航班的颠簸强度。由于四条航线的航班数量相差较大,采用不同强度的飞机颠簸发生频率的方法,用颠簸架次与总飞行架次的比值比较四条航线飞机颠簸。

如表 1 所示,四条航线整个阶段的飞机颠簸频率林芝航线最低有 58.4%,拉萨航线最高有 78.8%,四条航路飞机颠簸发生频率均在 50% 以上。其中九寨航线位居第二频率达到 73.6%,稻城航线排名第三有 68.3%。

从发生影响飞行平稳的中度及中度以上颠簸频率角度分析,10 次执飞拉萨航班中有 1、2 次遭遇该种类型颠簸。另外三条航线该类颠簸发生频率比拉萨航线小很多,基本在 2% 左右。由于拉萨航线的距离较长,且全年的航班量比较平均,而另外三条航线的航班量跟季节有关,所以呈现频率较为接近的特点。

飞机在巡航阶段会受到大气环境的乱流影响,而在进离场阶段会受高原大风以及辐射产生的热力乱流。为了区分飞机在不同高度下所受到的不同因素影响发生的飞机颠簸,通过 QAR 数据中“STATUS”记录信息,对整个飞行阶段分成两类,即进离场阶段和巡航阶段。

如表 2 和表 3 所示,航班在进离场阶段遭遇颠簸的频率要远远高于巡航阶段。在进离场阶段,九寨、稻城、拉萨、林芝航线频率分别为 71.8%、65.2%、62.8%、48.6%。对于影响较大的中度及中度以上颠簸,林芝航线在 2014 年并未发生过,拉萨、九寨、稻城航线的频率分别为 5.0%、2.6%、1.2%。

如表 3 所示,通过统计结果来看,发生飞机颠簸频率最高的航线为拉萨航线 15.7%,最低的航线为九寨航线(1.8%)。四条航线不同强度的飞机颠簸发生频率排序基本一致。其中九寨航线没有记录中度及以上强度的飞机颠簸。可以发现飞机颠簸发生的概率与航线长度存在一定关联性,成都到林芝距离为 900 km 仅为成都到拉萨距离 1 300 的约三分之二,但林芝航线巡航阶段飞机颠簸发生频率仅为拉萨航线的约五分之一。不同月份的航班数量不同及实际航路上地形高低起伏的变化可能是造成如此悬殊差距的主要原因。在拉萨航线的巡航阶段飞机颠簸中,中度及以上颠簸占据主要部分,其他三条航线则是轻度颠簸占比比较多。

如图 2 所示,四条航线发生飞机颠簸频次的特征为夏秋季节多,春冬季节少,而在引入颠簸架次与总飞行架次的比值后,飞机颠簸频率表现截然相

反的结果,即夏秋季节低,冬春冬季高的特征。

稻城航线颠簸频率最低在秋季,冬季航班量几乎没有。九寨航线颠簸频率最高在春季、最低在秋季,相差不到 10%。拉萨航线颠簸频率最高在春季约为 85%,最低在秋季。林芝航线颠簸频率最高在冬季、最低在夏季,相差超过 15%。上述四条航线颠簸频率的季节规律与总体的特征基本一致。

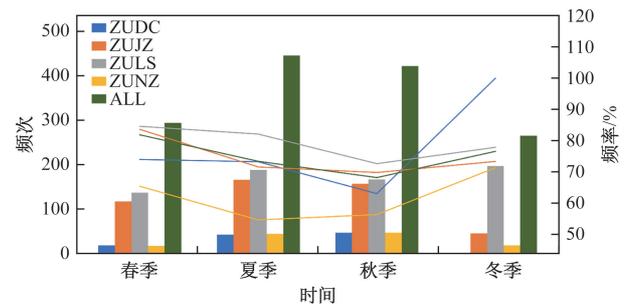


图 2 四条航线飞机颠簸频次(柱状图)和频率(折线)

表 3 四条航线巡航阶段飞机颠簸频率统计

变量	ZULS		ZUJZ		ZUNZ		ZUDC	
	架次	占比/%	架次	占比/%	架次	占比/%	架次	占比/%
飞机颠簸	138	15.7	12	1.8	5	3.0	22	9.7
轻度颠簸	67	7.6	12	1.8	4	2.4	17	7.5
中度及中度以上颠簸	71	8.1	0	0	1	0.6	5	2.2
航班总数	878	100	664	100	164	100	226	100

如图 3 和图 4 所示,稻城、九寨、拉萨、林芝航线在巡航阶段发生飞机颠簸频率的季节特征与整个阶段的特征基本相同,而稻城航线在进离场阶段的颠簸频率特征与其在整个阶段的特征完全相反,另外三条航线在进离场阶段的颠簸频率的时间特征并不明显。总体来说,稻城航线飞机颠簸频率在进离场阶段表现为夏秋季节低,春冬季节高,在巡航阶段相反。相较于稻城航线,另外三条航线在进离场阶段的飞机颠簸没有明显的时间特征,而在巡航阶段表现出夏秋季节低、春冬季节高的特点。

2.2 飞机颠簸空间分布特征

根据 QAR 数据,以间隔 300 m 对飞机进离场阶段的海压高度及巡航阶段的标准气压高度进行修正并建立高度层,其范围分别为 0~6 000 m 和 6 600~12 000 m,统计发生在不同高度层中的颠簸次数且相同高度层中同一航班至多记录一次。然后,将飞机发生颠簸时的经纬度坐标录入标准 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 经纬度网格中,且单个网格至多录入一次相同航班的颠簸数据,并以此对相应网格中的飞行航班总数进行统计。

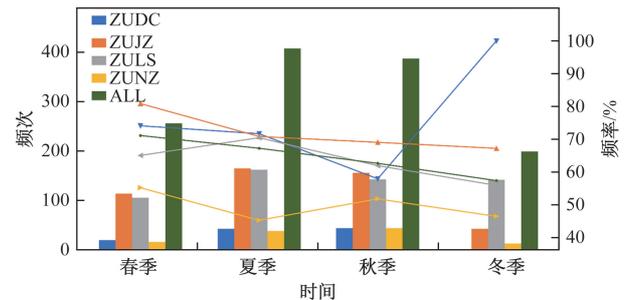


图 3 四条航线进离场阶段飞机颠簸频次(柱状图)和频率(折线)

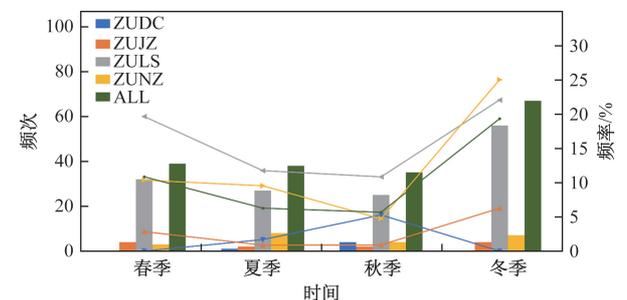


图 4 四条航线巡航阶段飞机颠簸频次(柱状图)和频率(折线)

如图5所示,稻城航线发生在巡航阶段的颠簸高度层为8 100~8 900 m,九寨和拉林芝航线发生颠簸的高度层略低,多数集中在6 900~8 400 m,相对而言,拉萨航线发生颠簸的范围更大,低至6 900 m高至10 500 m均产生多次颠簸。总体而言,6 900~8 700 m是四条航线发生颠簸的主要区间范围,而10 000 m高空以上产生的颠簸则相对较少。

如图6所示,在飞机的进离场阶段,在0~6 000 m的范围内四条航线都产生了飞机颠簸,且颠簸频次与飞机高度呈现明显负相关,并在1 800 m高度层以下达到极值,高原机场复杂的近地面天气背景及地形起伏可能是其诱因。

相对来说,每条航线的进离场顺序几乎固定,

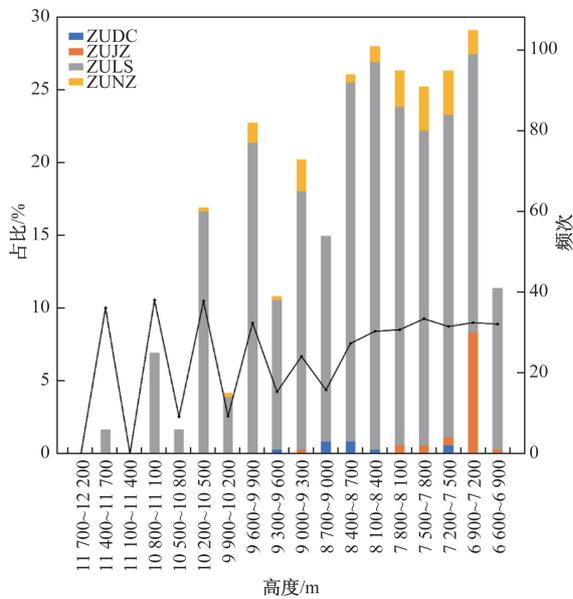


图5 巡航阶段飞机颠簸的飞行高度统计

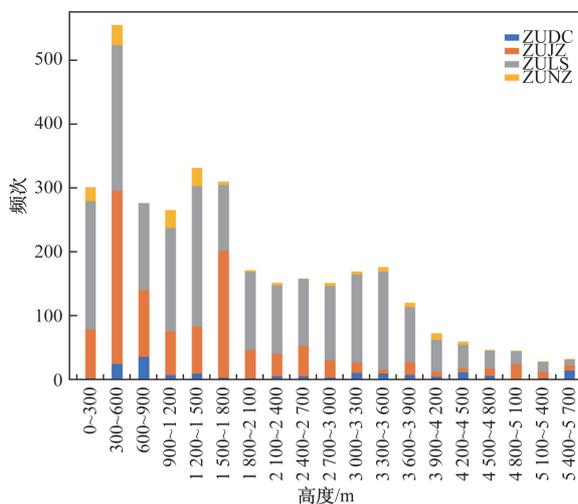


图6 进离场阶段飞机颠簸高度统计

于是发生颠簸时的飞机的空间位置便基本不变,因此只需对发生在巡航阶段的飞机颠簸的空间分布进行研究。如图7所示,四条航线在不同季节发生的飞机颠簸呈现出由东向西的条状空间分布趋势。

在97°E~99°E范围内,春季发生飞机颠簸的频率高达12%,夏季也有2%左右;拉萨航空在春冬季较之夏秋季更易发生飞机颠簸,且其91°E~93°E的航线范围是高原航线中发生颠簸次数最多的区域,在春季最高有42%。在南北方向的九寨航线上,31°N~33°N范围内,秋冬季节发生频率大于春夏季节,高达10%。总的来说,拉萨航线在春季受到飞机颠簸影响最大,冬季次之;九寨航线全年都受飞机颠簸影响,冬季最大,秋季紧随其后。

3 总结

(1) 高原航线在整个飞行阶段的飞机颠簸频率均在55%以上,其中拉萨航线最高为78.8%,林芝航线最低也有58.4%。高原航班在进离场阶段遭遇颠簸的频率要远远高于巡航阶段。在进离场阶段,九寨、稻城、拉萨、林芝航线发生飞机颠簸的频率分别为71.8%、65.2%、62.8%、48.6%。四条航线在巡航阶段发生飞机颠簸的频率分别为拉萨航线(15.7%)、稻城航线(9.7%)、林芝航线(3.0%)、九寨航线(1.8%)。

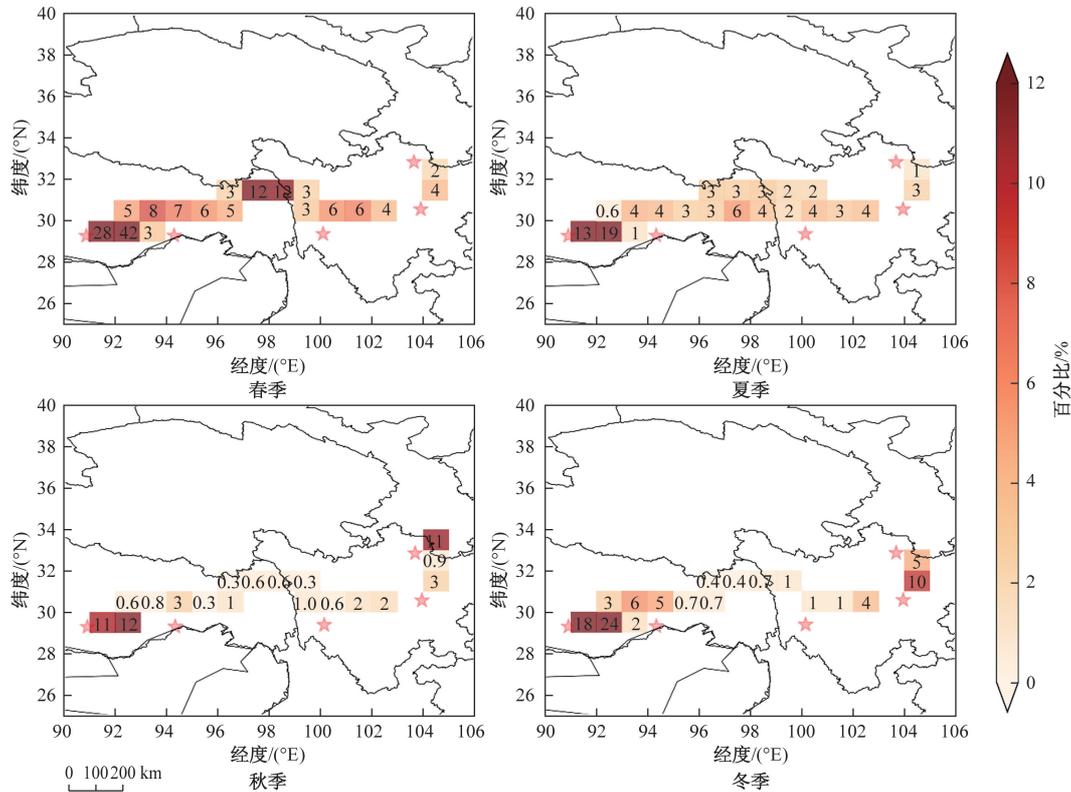
(2) 四条航线均表现出夏秋季节颠簸多发、春冬季节颠簸少发的特点,而一旦将颠簸架次与总飞行架次的占比引入便可得出截然相反的结果,即夏秋季节颠簸少发,春冬季节颠簸频发。

(3) 稻城航线在进离场阶段飞机颠簸频率表现为夏秋季节低,春冬季节高,在巡航阶段相反。另外三条航线在进离场阶段的飞机颠簸没有明显的时间特征,而在巡航阶段表现出夏秋季节低、春冬季节高的特点。

(4) 在巡航阶段,四条航线发生飞机颠簸的高度主要集中在6 900~8 700 m,10 000 m以上相对较少。在飞机进离场阶段,颠簸频次与飞机高度呈现明显负相关,并在1 800 m高度层以下达到极值,高原机场复杂的近地面天气背景及地形起伏可能是其诱因。

四条航线发生飞机颠簸的频次增加,尤其在1 800 m以下高度层发生颠簸次数最多,这可能是高原机场近地面复杂天气背景以及地形起伏变化导致的。

(5) 飞机颠簸的空间分布整体呈东西走向的



基于审图号 GS(2023)2767 制作,底图无修改

图 7 四条航线巡航阶段飞机颠簸的空间分布

长条形分布,而且在巡航阶段发生频率更高。其中,拉萨航线 $91^{\circ}\text{E}\sim 93^{\circ}\text{E}$ 和 $97^{\circ}\text{E}\sim 99^{\circ}\text{E}$ 区域以及九寨航线 $31^{\circ}\text{N}\sim 33^{\circ}\text{N}$ 区域都是发生飞机颠簸的高频区域。

参考文献

[1] DUTTON J A, PANOFKY H A. Clear air turbulence; a mystery may be unfolding[J]. Science, 1970, 167(20): 937-944.

[2] DUTTON J A. Clear-air turbulence, aviation, and atmospheric science[J]. Reviews of Geophysics Space Physics, 1971, 9(3): 613-657.

[3] SHARMAN R D, TRIER S B, LANE T P, et al. Sources and dynamics of turbulence in the upper troposphere and lower stratosphere: a review[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(12): 372-390.

[4] WOLFF J K, SHARMAN R D. Climatology of upper-level turbulence over the contiguous United States[J]. J Appl Meteorol Clim, 2008, 47(8): 2198-2214.

[5] 陈炜, 李跃清. 对流层重力波的主要研究进展[J]. 干旱气象, 2018, 36(5): 717-724.

[6] FRITTS D C, RASTOGI P K. Convective and dynamical instabilities due to gravity wave motions in the lower and

middle atmosphere: theory and observations[J]. Radio Science, 1985, 20(6): 1247-1277.

[7] DUNKERTON, TIMOTHY J. Shear instability of internal inertia-gravity waves[J]. J Atmos, 1997, 54(12): 1628-1641.

[8] TJERNSTRÖM M, MAURITSEN T. Mesoscale variability in the summer arctic boundary layer[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2009, 130(3): 383-406.

[9] 刘海文, 游景超, 武凯军, 等. 民用航空飞机晴空颠簸研究进展[J]. 中国民航大学学报, 2023, 41(6): 1-8.

[10] 陶昕宇, 吴凡, 谢克勇, 等. 江西省飞机颠簸统计特征及其气象条件分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2023, 40(4): 10-13.

[11] YE D, GAO Y. The meteorology of the Qinghai-Xizang (Tibet) plateau[M]. Beijing: Science Press, 1979.

[12] DUAN A M, WU G X. Role of the Tibetan Plateau thermal forcing in the summer climate patterns over subtropical Asia[J]. Climate Dynamics, 2005, 24: 793-807.

[13] YANG K, KOIKE T, FU J H, et al. The daytime evolution of the atmospheric boundary layer and convection over the Tibetan Plateau: observations and simulations [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 2004, 82(6): 1777-1792.

Spatial and Temporal Distribution Characteristics Study of Aircraft Turbulence on the Plateau Route

HUANG Meng, WU Junjie, REN Jiali, PANG Yi

(Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618300, Sichuan, China)

Abstract: Using the method of vertical load increment, combined with statistical analysis of aircraft turbulence data and reanalysis data, the spatiotemporal distribution characteristics of aircraft turbulence on four high-altitude routes in 2014 was investigated. The results indicate that the turbulence frequency on the high-altitude routes exceeded 55%, reaching as high as 78.8% on the Lhasa route. Turbulence encounters are more frequent during the departure and arrival phases compared to the cruising phase. The occurrence of aircraft turbulence shows a seasonal variation, with lower frequencies in the summer and fall seasons and higher frequencies in the winter and spring seasons. During the cruising phase, aircraft turbulence primarily occurs in the altitude range of 6 900~8 700 meters. In contrast, during the departure and arrival phases, the frequency of turbulence encounters increased as the altitude decreased. The spatial distribution of aircraft turbulence exhibits an elongated shape, with high-frequency turbulence areas observed in the 91°E~93°E and 97°E~99°E regions of the ZULS, as well as the 31°N~33°N region of ZUJZ.

Keywords: vertical overoad; aircraft turbulence; spatiotemporal distribution