

6-8-2020

Research and Implementation of Simulation for Aircraft Crossing the Low-Level Wind Shear Area

Zhigang Su

1. Sino-European Institute of Aviation Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;;2. Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

Chen Qi

1. Sino-European Institute of Aviation Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;;

Jingtang Hao

1. Sino-European Institute of Aviation Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Research and Implementation of Simulation for Aircraft Crossing the Low-Level Wind Shear Area

Abstract

Abstract: Low-level wind shear seriously affects the safety of approach and departure of flights, the flight simulation system is utilized for analyzing low-level wind shear influences on aircraft take-off and landing, which is of great significance for seeking the safety circumvention strategy of aircraft crossing the core of the storm. *With software, Fluent, the system simulated the regional wind field of low-level wind shear, and utilized the open source flight simulator, FlightGear, as the aircraft simulation platform. The system sent the wind speed data as the input of system via UDP(User Datagram Protocol) interface and the influences on aircraft flight state was analyzed under the wind shear region.* The simulation system can easily simulate the different aircrafts taking off and landing process through wind shear zone, and can also compare and analyze the influences of different intensity storms on the flight safety.

Keywords

navigation safety, wind shear, flight simulation, interface of user datagram protocol

Recommended Citation

Su Zhigang, Chen Qi, Hao Jingtang. Research and Implementation of Simulation for Aircraft Crossing the Low-Level Wind Shear Area[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(6): 1426-1431.

航空器穿越低空风切变区仿真研究与实现

苏志刚^{1,2}, 陈琦¹, 郝敬堂¹

(1. 中国民航大学中欧航空工程师学院, 天津 300300; 2. 中国民航大学智能信号与图像处理天津市重点实验室, 天津 300300)

摘要: 低空风切变严重影响航空器进离场安全, 采用模拟飞行系统方案可以分析低空风切变对航空器起飞与降落的影响, 对航空器穿越风暴区域的安全规避航策略制定具有重要意义。系统利用 *Fluent* 软件进行低空风切变区域的风速场模拟, 并以开源飞行模拟器 *FlightGear* 作为航空器仿真平台。系统利用 *FlightGear* 的 *UDP(User Datagram Protocol)* 接口引入风场数据, 研究风切变区域对航空器飞行状态的影响。模拟系统可以方便地模拟不同航空器在起飞与降落过程中穿越风切变区域的情况, 也可以进行比较、分析不同强度风暴核对飞行安全的影响。

关键词: 航行安全; 风切变; 飞行模拟; 用户数据报协议接口

中图分类号: V328.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 06-1426-06

Research and Implementation of Simulation for Aircraft Crossing the Low-Level Wind Shear Area

Su Zhigang^{1,2}, Chen Qi¹, Hao Jingtang¹

(1. Sino-European Institute of Aviation Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Low-level wind shear seriously affects the safety of approach and departure of flights, the flight simulation system is utilized for analyzing low-level wind shear influences on aircraft take-off and landing, which is of great significance for seeking the safety circumvention strategy of aircraft crossing the core of the storm. With software, *Fluent*, the system simulated the regional wind field of low-level wind shear, and utilized the open source flight simulator, *FlightGear*, as the aircraft simulation platform. The system sent the wind speed data as the input of system via *UDP(User Datagram Protocol)* interface and the influences on aircraft flight state was analyzed under the wind shear region. The simulation system can easily simulate the different aircrafts taking off and landing process through wind shear zone, and can also compare and analyze the influences of different intensity storms on the flight safety.

Keywords: navigation safety; wind shear; flight simulation; interface of user datagram protocol

引言

风切变是指大气中距离较短的两点之间风速或风向的剧烈变化。风切变的存在会引起航空器偏

离标准航迹, 甚至导致航空器失去平衡^[1-2]。据统计, 1950-2000 年间, 共有 39 起由风切变引起的航空事故, 造成 400 余人员伤亡^[3]。低空风切变又称微下击暴流(*Microburst*), 是指在 2 000 ft 以下空域出现的风切变, 具有时间短、尺度小、强度大等特点, 因此, 低空风切变面临探测难、预报难、穿越难等问题^[3-6]。结合飞行模拟器进行低空风切变下的地面飞行实验和数据分析对于研究应对方案具有重要意义。



收稿日期: 2015-01-16 修回日期: 2015-03-17;
基金项目: 国家科技支撑计划(2011BAH24B12), 中央高校科技基本科技业务费中国民航大学专项(3122016U006);
作者简介: 苏志刚(1972-), 男, 黑龙江, 博士, 教授, 研究方向为阵列信号处理, 信息融合, 空中交通管理技术, 机载仿真技术等。

<http://www.china-simulation.com>

• 1426 •

国内外学者针对航空器在低空风切变区域飞行模拟开展了一些有益的探索与研究^[7-12]。1983年, 联合机场天气研究(Joint Airport Weather Studies, JAWS)项目使用多普勒雷达观测记录了约 70 次微下击暴流事件, 对其中的典型气流数据进行分析整理, 用于飞行模拟器的研究^[7-8]。Michael Ivan 根据 JAWS 数据提出了一种基于涡环方法建立的实时微下击暴流数学模型, 为低空风切变下的飞行模拟提供了模型基础^[9]。文献[10]建立了微下击暴流的三维模型, 根据 Boeing 747-100B 建模数据搭建了高精度飞行动力学模型, 并利用 2 个模型对大型航空器穿越低空微下击暴流和大气紊流的动力学响应进行研究。文献[11]使用 Simulink 建立了低空风切变下大型航空器全包线六自由度非线性模型, 通过实时仿真探索反应式风切变探测技术与航空器穿越风切变逼近的控制律。目前航空器穿越风切变区域的模拟飞行研究大多基于 Simulink、Matlab 等仿真平台展开, 仿真精度高却局限于单一机型, 若需探究多种机型的响应则需重新进行飞行动力学建模, 工作繁琐耗时较长。

开源飞行模拟器 FlightGear 主要为学术研究提供一个高性能的飞行模拟器框架, 也可拓展到飞行训练, 虚拟仿真, 模拟飞行游戏等方面, 它支持全球三维实景, 20 000 多个跑道、400 多种飞行器、跨平台、多人联飞、多样的开放飞行数据模型等功能。FlightGear 具有多款高精度的飞行动力学模型, 并且具备强大的应用数据接口。同时, FlightGear 独特的属性管理机制—属性树—为风切变下的飞行模拟仿真数据分析提供了简单而完备的飞行数据获取渠道, 增加了平台的灵活性和实用性^[13-15]。

本文以 FlightGear 为基础, 构建 3 视景和飞行仪表显示, 使用计算流体力学软件 Fluent 产生微下击暴流风场数据, 并将该数据通过 UDP(User Datagram Protocol)接口输入 FlightGear 内部的飞行动力学模型, 对航空器穿越低空风切变区的仿真。该方案直接运用了 FlightGear 平台中发展较为成熟的 JSBSim 飞行动力学模型、3D 视景系统以及完

备的机型库, 可模拟 400 多种机型对目标风场的响应, 具有较高的灵活性和实用性。

1 模拟飞行系统架构

模拟飞行系统依托于 FlightGear 飞行模拟器, 可用于研究各类机型在风切变中所受的影响, 其侧重点不在于强调触觉、听觉和动感等人体感官方面接近真实飞行器, 而在于其高仿真精度和实时性, 可逼真地模拟低空风切变中飞行器动态和静态特性以及进行飞行品质评估, 系统结构如图 1 所示。

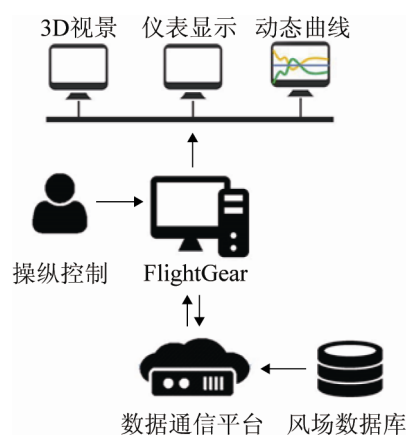


图 1 模拟飞行系统构架

系统平台以 FlightGear 飞行模拟器为核心, 它为系统平台提供 3D 视景显示、飞行仪表显示, 并可能通过对 FlightGear 的二次开发, 以 Nasal 脚本语言编制状态参数实时显示模块。运用 FlightGear 预留的 UDP 数据输入/输出接口可以搭建数据通信平台, 实现数据的传输、记录和发送。采用 Fluent 软件模拟微下击暴流并建立风场数据库, 通过数据通信模块向 FlightGear 实时传输风场数据, 形成低空风切变的飞行环境。另外, FlightGear 作为完整的飞行动力学仿真平台, 提供了高精度的飞行动力学模型用于飞行状态参数的解算, 保证了仿真系统的逼真性及准确性。

2 低空风切变场建模

为模拟飞行器在风切变扰动下的影响, 首先需要搭建逼真可靠的风切变模型。本文将基于 JAWS

发布的典型微下击暴流模型,利用 Fluent 计算流体力学软件进行低空风切变建模。

2.1 典型微下击暴流数据特征

日本气象学家藤田(Fujita)于 1981 年提出微下击暴流概念,是一种由对流引起的风速高于 34 节的下冲气流,其径向发散的外风场水平尺度不超过

4 000 m。根据实际微下击暴流风场强度和空间尺度的统计分析,微下击暴流通常发生在 500 m 以下,伴随 3 000 m 范围左右的水平径向发散气流。图 2 为 JAWS 于 1983-08 发布的理想化典型微下击暴流模型^[8-9]。

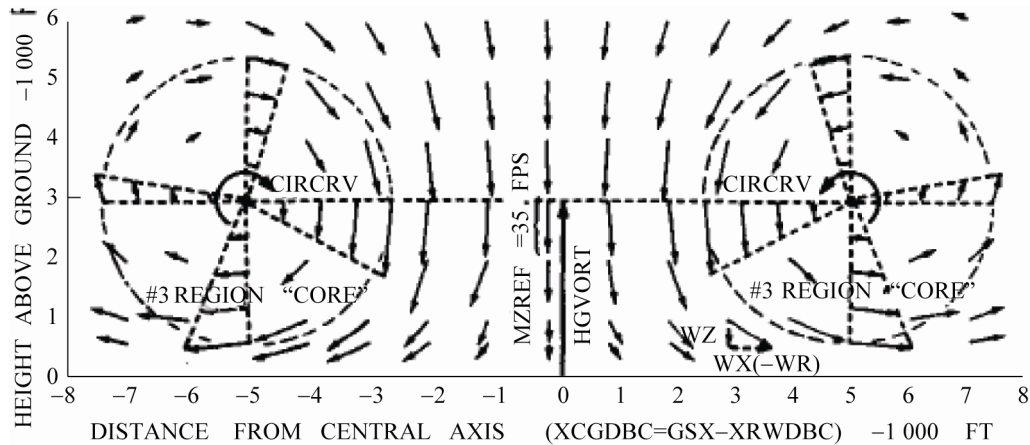


图 2 典型微下击暴流模型^[8-9]

2.2 仿真实验约束

2.2.1 模型搭建

根据文献^[8-9]的微下击暴流模型,设置风场仿真数据,风场上方入口设定高度为 9 000 ft,宽度为 4 000 ft;风场下方区域高度为 6 000 ft,宽度为 16 000 ft。分别考虑以 30 ft/s 及 50 ft/s 为初始速度气流下冲所形成风场的情况。

2.2.2 模型网格划分

采用结构化网格划分,即二维平面四边形网格。由于所搭建模型形状规则,结构化网格能提供高达 0.9 的网格划分质量。网格尺寸为 50 ft×50 ft,整个模型的网格总数为 43 858。

2.2.3 边界条件设定

在 Fluent 软件中选择速度入口边界条件用于定义流动入口边界的速度和标量,并将与边界条件相关信息做如下设置:

1. 速度大小与方向。分别仿真初始风速为 30 ft/s 和 50 ft/s 的垂直向下的情况;
2. 温度(用于能量计算)。按照每千米温度下降 6 K 计算,高度 9 000 ft 处入口流体的温度设置为 280 K;
3. 模型的容器壁设置为静态(stationary)非滑动(non-slide)壁面,热性能方面绝热且无辐射。

2.3 仿真结果及数据可用性分析

根据风场物理模型及仿真实验条件,由 Fluent 软件生成的风场仿真结果如图 3 所示。图 3 用灰度大小表示风速大小,由图 3 可见涡旋中心均出现两个仿真风场的 3 000 ft 左右高度区域,并清晰呈现出风场中央的下沉气流、呈对称分布的中央涡核、以及靠近容器底部无旋转流动的 3 个区域^[8-9]。与图 2 相比,各区域出现的位置以及范围都符合 JAWS 模型,仿真实验结果在整体分布上符合真实情况。

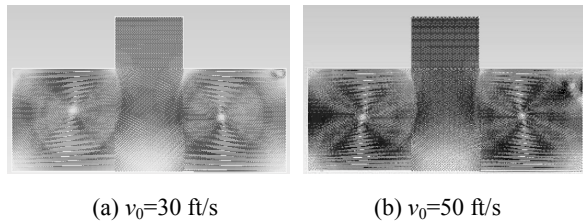


图 3 风场速度矢量分布图

对比图 3(a)与(b)可见, 初始风速 $v_0=50$ ft/s 的风场相对初始风速 $v_0=30$ ft/s 的风场各对应区域的流速都相对较高, 且出现了范围更广的近地无旋流区域。根据初始风速 $v_0=30$ ft/s 的仿真风场, 统计关键特征区域的平均风速, 与 JAWS 的典型微下击暴流的对比结果如表 1 所示。

表 1 仿真风场局部速度矢量统计对比

区域	风场	
	风场仿真结果 $v_0=30$ ft/s	1983 年 JAWS 数据
涡核区域	旋转增加	旋转增加
下沉气流区域 (涡核中心高度)	$v \approx 33$ ft/s	$v \approx 35$ ft/s
近地无旋流区域	$v \approx 40$ ft/s	$v \approx 42$ ft/s

由表 1 可见, 涡核区域的流体速度矢量呈现旋转增加的趋势, 符合文献[9]的描述。涡核中心高度上的中心轴下沉气流区域风速约为 33 ft/s, 近地无旋流区域平均风速约为 40 ft/s, 两者都与 JAWS 数据相吻合。

3 低空风切变仿真平台搭建

为精确研究低空风切变对无控固舵飞行的影响, 必须保证风场是标准飞行和风扰动飞行的单一变量, 普通的手动操控飞行(如外接操纵杆、鼠标、键盘等)无法保证两次飞行实验的控制量完全一致。因此需要使用控制数据代替手动操纵方式进行飞行实验, 实现稳定的数据驱动飞行和精确的飞行场景复现。微下击暴流风场数据需要通过通信平台实时输入 FlightGear 用于产生低空风切变环境。基于以上两方面考虑, 需要建立本地计算机与 FlightGear 间的数据通信。

3.1 平台工作原理

仿真平台实现风场为单一控制量的原理框图如图 4 所示。仿真平台将根据风场的施加与否完成标准飞行和风扰动飞行 2 种飞行状态的模拟。

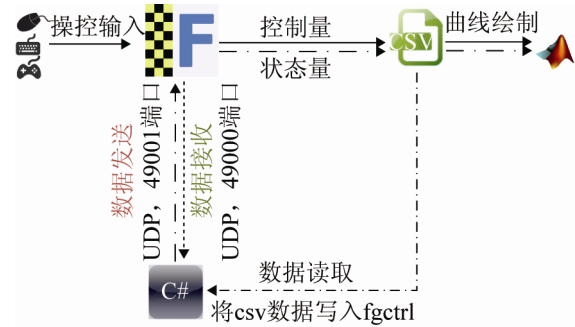


图 4 平台工作原理示意图

标准飞行是考虑无风场影响条件下的飞行。通过外部操控设备引导航空器平稳进近, 产生标准飞行下的航空器进近模拟数据。整个模拟飞行过程中的控制量与状态量都存贮于 csv 格式的飞行日志文件中。记录的控制量包括: 左、右发动机油门量, 升降舵、方向舵、副翼的偏转量和配平量, 起落架状态, 襟翼档位等。记录的状态量包括: 飞行空速、沿机体坐标轴的 3 个姿态角及表征航空器空间位置的经纬度和飞行高度等。微下击暴流对航空器的影响主要表现在航空器的纵向性能的变化上, 因此航空器的飞行空速、俯仰角和飞行高度变化是重点分析的参数^[12]。

风扰动飞行是将标准飞行记录的控制数据通过数据通信平台输入 FlightGear 中, 同时将微下击暴流风场数据作为外部环境数据输入到 FlightGear 中。FlightGear 内部的飞行动力学模型根据控制数据与环境数据进行解算, 将输出结果加载到 FlightGear 的属性树。属性树的相关数值动态变化过程通过 Canvas 以实时绘制的参数曲线呈现, 同时将相关控制量及状态量的数据记录在相应的飞行日志中。

3.2 飞行状态呈现

FlightGear 为各类机型提供了高逼真度的 2D,

3D 的驾驶舱，包含各类仪表显示器如主飞行显示屏、导航显示屏等。这类显示屏仅提供当前飞行参数显示及少数对未来数据的预测，无法提供直观的飞行数据变化状态^[16]。为了更直观地显示飞行操控及外部环境对飞行状态的影响，需要对 FlightGear 进行二次开发。采用 XML 语言、FlightGear 的脚本语言 Nasal 及 Canvas 图像渲染技术，本文开发了新的图形用户界面，在飞行操作界面即可实现不同飞行参数的实时曲线输出，如图 5 所示。

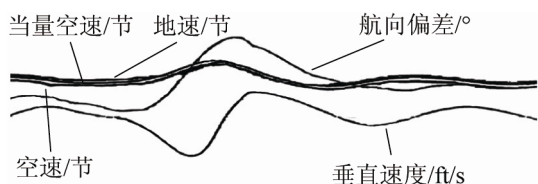


图 5 飞行状态实时监视界面

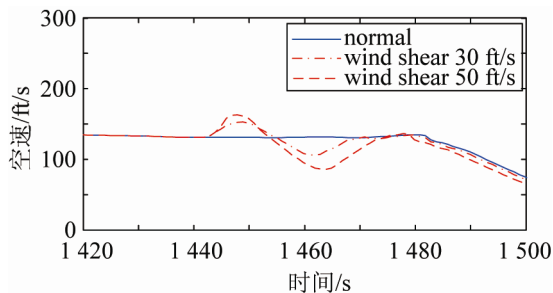
飞行状态所需呈现的内容可以通过 FlightGear 的属性树进行选择、设置，如图 5 中选择对空速、当量空速、地速、垂直速度及航向偏差进行绘制。通过合理选择显示的属性参数，可以直观地对航空器的飞行参数变化趋势进行分析，研究影响飞行状态及飞行安全的因素。

4 实验结果

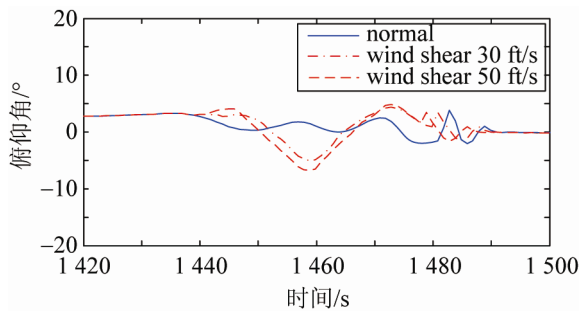
以 Boeing777-200ER 的进近过程为例，利用低空微下击暴流模型生成风场数据，并通过 FlightGear 进行标准飞行与风扰动飞行的数据采集实验。根据 Boeing777-200 飞行手册，将相应飞行参数设置如下：

1. 下滑角： $\gamma=3^\circ$ ；
2. 襟翼档位： $\text{flap}=30^\circ$ ；
3. 飞行速度：采用最小的安全降落速度。当前襟翼档位下，航空器的失速速度为 125 节。为保证一定的安全裕度，将降落速度设置为 132 节。

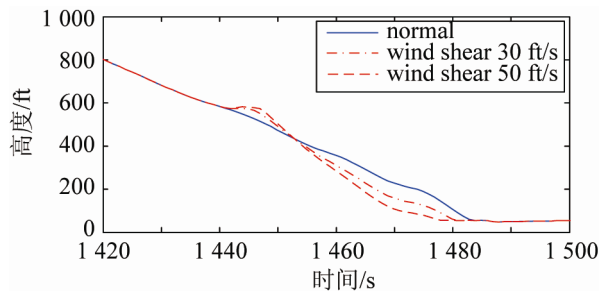
根据上述飞行参数，分析标准飞行、30 ft/s 及 50 ft/s 初始风速下的风扰动飞行时的航空器状态参数的变化情况，如图 6 所示。



(a) 空速变化



(b) 俯仰角变化



(c) 高度变化

图 6 风暴核对 B777-200ER 状态参数变化的影响

由图 6(a)可见，当航空器进入逆风区域时，由于风场的作用，空速增大；而后，航空器进入下沉气流区域和顺风区域时，受风场的影响，航空器的空速骤降。由图 6(a)可见，空速的变化幅度与微下击暴流的初始风速大小有关，初始风速越大，影响越显著。与图 6(a)相比，图 6(b)与(c)的俯仰角和高度参数的变化也表示现相似特点。航空器进入逆风区域时，由于空速的增加，使得航空器俯仰角抬升，高度向上偏离标准下滑航迹；当航空器进入下沉气流区域和顺风区域时，空速的降低，使航空器的升力骤降，俯仰角被压低，同时高度急剧下降，低于标准下滑航迹。微下击暴流的初始风速越大，影响越显著。

根据标准飞行与风扰动飞行的模拟飞行数据对比可见: 在中小规模的风切变下, 无控固舵飞行时航空器能够依靠自身的稳定性设计回归平稳的飞行状态。但随着风暴规模的增大和风速梯度的增加, 无控固舵飞行可能导致航空器在遭遇强烈顺风时高度下降过多而直接坠毁, 因此, 需要研究保障航空器安全穿越微下击暴流区有控操纵程序。

5 结论

采用低空风切变模拟飞行系统可以准确地模拟飞行器在穿越下击暴流中心的飞行状态变化, 并能精确地复现飞行场景。可以运用模拟飞行系统进行风切变扰动下的航空器操纵, 研究航空器的最佳改进方式及改进点。同时, FlightGear 机型库支持对不同机型的低空风切变模拟飞行, 其高精度的飞行动力学模型保证了飞行数据的有效性和平台的研究价值。

参考文献:

- [1] 肖亚伦, 金长江. 大气扰动中的飞行原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- [2] 岑飞, 孙海生, 刘志涛, 等. 基于 Matlab/FlightGear/Atlas 的过失速机动飞行控制律可视化仿真研究 [C]// 合肥: 第三十一届中国控制会议, 中国: 中国科学技术大学, 2012: 607-612.
- [3] Guan W L, Yong K. Review of Aviation Accidents Caused by Wind Shear and Identification Methods [J]. Journal of Chinese Society of Mechanical Engineers (S0257-9731), 2002, 23(1): 99-110.
- [4] Liu J N K, Kwong K M, Chan P W. Chaotic Oscillatory-Based Neural Network for Wind Shear and Turbulence Forecast With LiDAR Data [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part C: Applications and Reviews (S1094-6977), 2012, 42(6): 1412-1423.
- [5] Muhaimin B, Mehler R W. Wind Shear Detection for Small and Improvised Airfields [C]// USA: 2012 IEEE Aerospace Conference (S1095-323X). USA: IEEE, 2012: 1-8.
- [6] Fan Yi, Wu Renbiao, Meng Zhichao, et al. Wind shear signal simulation of the airborne weather radar [C]// Kansas, USA: 2011 IEEE Radar Conference (S1097-5659). USA: IEEE, 2011: 710-713.
- [7] Frost W, Chang H P, Elmore K L, et al. Simulated Flight through JAWS Wind Shear [J]. Journal of Aircraft (S0021-8669), 1984, 21(10): 797-802.
- [8] Campbell C W. A Spatial Model of Wind Shear and Turbulence for Flight Simulation [R]// NASA Technical Paper 2313. USA: NASA, 1984.
- [9] Ivan M. A Ring-Vortex Downburst Model for Flight Simulations [J]. Journal of Aircraft (S1533-3868), 1986, 23(3): 232-236.
- [10] 高振兴. 复杂大气扰动下大型飞机飞行实时仿真建模研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [11] 张冉. 低空风切变下大型飞机建模、危险探测与控制律研究 [D]. 上海: 上海交通大学航空航天学院, 2009.
- [12] Daniels T S, Schaffner P R, Evans E T, et al. Creating a Realistic Weather Environment for Motion-based Piloted Flight Simulation [C]// USA: 2012 IEEE/AIAA 31st Digital Avionics Systems Conference (S2155-9175). USA: IEEE, 2012, 2E5-1-2E5-14.
- [13] 齐振恒, 胡德文, 柳爱利, 等. 基于 Simulink 和 FlightGear 软件的机载惯性测量单元仿真 [J]. 中国惯性技术学报, 2008, 16(4): 400-404.
- [14] Zhang Jingsha, Geng Qingbo, Fei Qing. UAV Flight Control System Modeling and Simulation Based on FlightGear [C]// Xiamen, China: International Conference on Automatic Control and Artificial Intelligence (ACAI 2012). China: IET, 2012: 2231-2243.
- [15] Daniels T, Schaffner P, Evans E, et al. Motion-Based Piloted Flight Simulation Test Results for a Realistic Weather Environment [C]// USA: 2013 IEEE/AIAA 32nd Digital Avionics Systems Conference, USA: IEEE, 2013: 1-23.
- [16] Tian Feng, Feng Zhulei, Liu Yu, et al. Certain type of Aircraft Virtual Cockpit Research and Development Based on FlightGear [C]// Shenyang: 2013 3rd International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control China: IEEE, 2013: 452-455.