

流体动力学

International Journal of Fluid Dynamics

Liu Ti Dong Li Xue

2024年9月12卷3期



<https://www.hanspub.org/journal/ijfd>

Editorial Board

编委名单

ISSN 2328-0557 (Print) ISSN 2328-0549 (Online)

<https://www.hanspub.org/journal/ijfd>

主编

魏进家教授 西安交通大学

Editor-in-Chief

Prof. Jinjia Wei Xi'an Jiaotong University

副主编

林建忠教授 浙江大学

Associate Editor

Prof. Jianzhong Lin Zhejiang University

编委会（按字母排序）

David Yang Gao教授 澳大利亚国立大学
冯新龙教授 新疆大学
何银年教授 西安交通大学
黄思训教授 中国人民解放军理工大学
康秀英副教授 北京师范大学
李宏教授 内蒙古大学
李志鹏教授 长沙理工大学
梁儒全教授 东北大学
马富康副教授 中北大学
沙作良教授 天津科技大学
王兵副教授 清华大学
王文全教授 昆明理工大学
魏泳涛教授 四川大学
武晓松教授 南京理工大学
肖波齐教授 武汉工程大学
闫广武教授 吉林大学
宇波教授 中国石油大学
郁伯铭教授 华中科技大学
曾忠教授 重庆大学
朱庆勇教授 中山大学

Editorial Board (According to Alphabet)

Prof. David Yang Gao The Australian National University
Prof. Xinlong Feng Xinjiang University
Prof. Yinnian He Xi'an Jiaotong University
Prof. Sixun Huang PLA University of Science and Technology
Dr. Xiuying Kang Beijing Normal University
Prof. Hong Li Inner Mongolia University
Prof. Zhipeng Li Changsha University of Science and Technology
Prof. Ruquan Liang Northeastern University
Dr. Fukang Ma North University of China
Prof. Zuoliang Sha Tianjin University of Science and Technology
Dr. Bing Wang Tsinghua University
Prof. Wenquan Wang Kunming University of Science and Technology
Prof. Yongtao Wei Sichuan University
Prof. Xiaosong Wu Nanjing University of Science and Technology
Prof. Boqi Xiao Wuhan Institute of Technology
Prof. Guangwu Yan Jilin University
Prof. Bo Yu China University of Petroleum
Prof. Boming Yu Huazhong University of Science and Technology
Prof. Zhong Zeng Chongqing University
Prof. Qingyong Zhu Sun Yat-sen University

TABLE OF CONTENTS
目 录

基于 k_{sgs} 与 θ_{sgs}^2 输运的中性大气边界层大涡模拟
Large-Eddy Simulation of Neutral Atmospheric Boundary Layer Based on k_{sgs} and θ_{sgs}^2
Transports
黄雨欣, 鲁昊 23

基于多元回归分析的铁路智能安全标线设置的研究
Research on Railway Intelligent Safety Marking Setting Based on Multiple Regression Analysis
张庭赫, 刘丽梅, 叶维震, 赖炜..... 35

着舰路径对舰载直升机起降安全影响研究
Research on the Impact of Landing Path on the Safety of Takeoff and Landing for Shipborne Helicopter
薛敏, 赵鹏程, 徐东东, 李通, 温其穆..... 45

期刊信息

期刊中文名称:《流体动力学》

期刊英文名称: **International Journal of Fluid Dynamics**

期刊缩写: **IJFD**

出刊周期: 季刊

语 种: 中文

出版机构: 汉斯出版社(Hans Publishers, <https://www.hanspub.org/>)

编辑单位:《流体动力学》编辑部

主 编: 魏进家, 西安交通大学教授

网 址: <https://www.hanspub.org/journal/ijfd>

订阅信息

通过中国教育图书进出口有限公司订购

订阅邮箱: sub@hanspub.org

订阅价格: 160 美元每年

广告服务

联系邮箱: adv@hanspub.org

版权所有: 汉斯出版社(Hans Publishers)

Copyright©2024 Hans Publishers, Inc.

版权声明

文章版权和重复使用权说明

本期刊版权由汉斯出版社所有。

本期刊文章已获得知识共享署名国际组织(Creative Commons Attribution International License)的认证许可。

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

单篇文章版权说明

文章版权由文章作者与汉斯出版社所有。

单篇文章重复使用权说明

注: 著作权者准许任选 CC BY 或 CC BY-NC 作为文章的重复使用权, 请慎重考虑。

权责声明

期刊所刊载的评论、意见、观点等均出自文章作者个人立场, 不代表本出版社的观点或看法。对于文章任何部分及文内引用材料给任何个人、机构、及其财产所带来的任何损失及伤害, 本出版社均不承担任何责任。我们郑重声明, 本出版社的出版业务, 不构成对任何产品商业性能的保证, 也不表示本社业已承认本社出版物中所述内容适用于某特定用途。如有疑问, 请寻找专业人士协助。

基于 k_{sgs} 与 θ_{sgs}^2 运输的中性大气边界层大涡模拟

黄雨欣¹, 鲁 昊^{1,2}

¹华中科技大学中欧清洁与可再生能源学院, 湖北 武汉

²华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2024年6月12日; 录用日期: 2024年6月19日; 发布日期: 2024年9月3日

摘 要

大气边界层(ABL)中标量的仿真对于掌握大气中温度、湿度等的分布, 污染物的扩散规律及预测雨水的生成等均具有重要意义。大涡模拟(LES)是当前ABL湍流仿真的主要方法, 其关键是如何利用解析尺度的速度场和标量场信息构建亚网格(SGS)应力模型和通量模型。对于ABL湍流这一典型的高雷诺数条件下的非各向同性湍流, 以Boussinesq假设为出发点构建的粘性SGS模型存在先验误差较大、后验耗散过强等许多问题。本研究引入一种新的非线性SGS通量模型, 该模型不预先假设能量的传输方向, 基于速度和标量的梯度计算SGS通量的结构(矢量分量的相对大小), 且摒弃局部平衡假设, 采用动力学方程考虑能量反传, 预测SGS通量强度的动态演化过程。研究采用一个中性ABL基准工况, 通过与已有的理论预测和各种流动统计的对比进行系统的考察来对模型进行评估, 同时也与传统粘性SGS模型的表现进行比较。具体地, 当LES达到统计稳定后, 我们重点关注了在不同网格条件下模型对无量纲速度梯度、无量纲标量梯度、能谱及流场结构等的预测结果。结果表明, 除了可以获取可靠的流场结构, 相比传统粘性SGS模型, 新模型对无量纲梯度预测的准确度有明显提升, 且对湍流能谱的预测有显著改善。此外, 我们讨论了新模型预测效果提升的原因, 相较于传统粘性SGS模型存在耗散较强的问题, 新模型采用动态非线性的建模方法, 可以预测ABL湍流中能量的逆向输运, 并更好地捕捉小尺度的涡旋。

关键词

大涡模拟, 亚网格通量, 非线性, 局部平衡, 大气边界层

Large-Eddy Simulation of Neutral Atmospheric Boundary Layer Based on k_{sgs} and θ_{sgs}^2 Transports

Yuxin Huang¹, Hao Lu^{1,2}

¹China-EU Institute for Clean and Renewable Energy, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei

²School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei

文章引用: 黄雨欣, 鲁昊. 基于 k_{sgs} 与 θ_{sgs}^2 运输的中性大气边界层大涡模拟[J]. 流体力学, 2024, 12(3): 23-34.

DOI: 10.12677/ijfd.2024.123003

Abstract

The simulation of scalars in the atmospheric boundary layer (ABL) is of great significance for understanding the distribution of temperature, humidity, and other factors in the atmosphere, as well as the diffusion patterns of pollutants and the prediction of rain generation. Large-Eddy Simulation (LES) is currently the main method for ABL turbulence simulation, and the key is how to construct sub-grid-scale (SGS) stress model and flux model by using the velocity and scalar field information of analytic scale. For ABL turbulence, a typical non-isotropic turbulence under high Reynolds number conditions, the viscous SGS model based on the Boussinesq hypothesis has many problems, such as large prior errors and strong posterior dissipation. This study introduces a new nonlinear SGS flux model, which simulates the structure of SGS flux (relative magnitude of vector components) based on velocity and scalar gradients without assuming the direction of energy transfer. In addition, the local equilibrium hypothesis is discarded, and kinetic equations are adopted to consider the reverse energy transfer and predict the dynamic evolution of SGS flux intensity. The study used a neutral ABL benchmark operating condition and systematically evaluated the model by comparing it with existing theoretical predictions and various flow statistics, as well as comparing its performance with traditional viscous SGS models. Specifically, when LES reaches statistical stability, we focus on the prediction results of the model for dimensionless velocity gradient, dimensionless scalar gradient, energy spectrum, and flow field structure under different grid conditions. The results show that in addition to obtaining reliable flow field structure, compared with the traditional viscous SGS model, the new model significantly improves the accuracy of dimensionless gradient prediction and turbulence energy spectrum prediction. In addition, we discussed the reasons for the improved prediction performance of the new model. Compared with the traditional viscous SGS model, which has a strong dissipation problem, the new model adopts a dynamic nonlinear modeling method, which can predict the reverse energy transport in ABL turbulence and better capture small-scale vortices.

Keywords

Large-Eddy Simulation, Sub-Grid-Scale Flux, Nonlinearity, Local Equilibrium, Atmospheric Boundary Layer

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

大气边界层(Atmospheric Boundary Layer, ABL)是指靠近地球表面的大气分层, 其厚度通常情况下在 300 米到 3 公里之间, 动植物生存、人类活动以及风电场运行等等都处在 ABL 中, 因此对 ABL 的仿真对于掌握大气中温度、湿度等的分布, 雨水的生成, 污染物的扩散规律, 以及风能的利用等均具有重要意义。因为 ABL 湍流的雷诺数基本上都在 10^8 以上, 对其仿真求解仍依赖于湍流模型。大涡模拟(Large-Eddy Simulation, LES)是当前 ABL 仿真的主要方法之一, 其关键是如何利用解析尺度的速度场和标量场信息构建亚网格(Sub-Grid-Scale, SGS)应力模型和通量模型[1],

$$\tau_{ij} = \widetilde{u_i u_j} - \widetilde{u_i} \widetilde{u_j} \quad (1)$$

$$q_i = \widetilde{u_i \theta} - \widetilde{u_i} \widetilde{\theta} \quad (2)$$

其中, 三维空间过滤操作在文中表示为波浪线($\sim$), τ_{ij} 为 SGS 应力, q_i 为 SGS 通量。对于均匀各向同性湍流这种简单的理想化湍流来说, 不同 SGS 模型给出的差异有限, 但对于 ABL 这种典型的高雷诺数高剪切的非各向同性湍流来说, SGS 模型对结果的影响较大[2] [3]。已有的研究表明, 涡黏性 SGS 模型在 ABL 模拟中暴露出不少问题, 包括对小尺度能量耗散过快, 无量纲梯度过大等等[4] [5]。这都与 ABL 的特殊性质与涡黏性模型基本建模假设的局限有关, 包括 ABL 在内的边界层湍流作为非各向同性湍流的典例, 存在像发卡涡、大尺度低速条带等等大尺度的相干结构。而要在仿真中捕捉这些结构, 务必要要求湍流模型能够提供从小尺度到大尺度的逆向传输, 且不假设湍动能量的局部平衡。

Smagorinsky 模型[6]以及对应的通量模型是最早提出的 SGS 模型,

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = -2\nu_{sgs} \tilde{S}_{ij} \quad (3)$$

$$q_i = -\frac{\nu_{sgs}}{Pr_{sgs}} \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x_i} \quad (4)$$

其中, $\tilde{S}_{ij}$ 是应力张量, $\nu_{sgs} = (C_s \tilde{\Delta})^2 |\tilde{S}|$ 为各向同性的 SGS 黏性项, $|\tilde{S}| = 2\tilde{S}_{ij} \tilde{S}_{ij}$ 为应力强度, C_s 为常数, Pr_{sgs} 是 SGS 普朗特数(对应温度场, 或者 Sc_{sgs} 对应其他标量场)。以该模型为代表的黏性 SGS 模型在湍流建模理论上需要依赖的基础假设包括: 1) 亚网格尺度流动的影响主要表现在湍流能量上, 因此, 采用能量传递的平衡关系来描述尺度之间的相互作用; 2) 从解析大尺度到亚网格尺度的能量传递机制沿用扩散表示的分子黏性机制; 3) 尺度分离假设假设亚网格尺度与解析尺度完全分离, 因此它们之间的相互作用只能通过从较大的解析尺度到较小的亚网格尺度的能量传输来模拟; 4) 局部平衡假设假设湍流场中任何区域的湍动能耗散都与大尺度到小尺度的能量传输平衡, 这常常和尺度相似性假设一起, 被用于确定黏性模型的系数, 它与第二和第三个假设一起, 常常在被修正之后用于对黏性模型的改进研究; 5) 模型广泛采用各向同性假设, 在不同方向上, 采用同样大小的湍流黏性。务必要提及的是, 前两个假设继承了雷诺平均(Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS)方法的主要建模思想, 即 Boussinesq 假设, 用黏性项来建模。黏性假设使得模型项与精确项之间存在较大误差, 并且模型项与精确项的坐标变换不一致性[7], 再加上各向同性假设和对于能量传递机制的假设无法满足非各向同性湍流物理特性, 使得在包括 ABL 的许多湍流仿真中黏性模型给出的结果与实际测量有较大的偏差, 例如在 ABL 表层, 速度和温度的无量纲垂直梯度可能被高估 20%以上[8] [9]。

非线性模型(也称为结构型模型)是 SGS 建模的另外一个方向[1]。非线性模型对不同湍流尺度之间的相互作用不做人为预设的假设, 而主要关注如何精确地模拟 SGS 项。早期的非线性模型包括相似性模型[10]和梯度模型[11] [12]等都表现出较强的不稳定性, 主要是因为它们对湍动能大小的预测不够准确, 因此错估跨尺度的能量传输快慢强弱[13]。经过改进之后, 许多高级模型可以在许多复杂条件下的湍流模拟中给出高精度的大涡模拟[2], 尤其是在 ABL 研究当中, 结果表明它们能够给出比黏性 SGS 模型更好的预测[7] [14] [15]。

本研究将采用中性 ABL 基准工况, 考察 SGS 湍动能和 SGS 标量方差的输运方程耦合梯度型结构 SGS 模型在 ABL 仿真中的效果。采用中性 ABL 工况可以有效地解耦速度场与标量场之间的耦合关系, 标量场以被动标量的形式出现在 ABL 工况中, 因此也扩展了标量的通用性, 可以代表温度、湿度、污染扩散研究中的化学组分等等。虽然 SGS 湍动能输运方程与梯度型结构模型的耦合在各向同性湍流、旋转湍流[7] [16], 以及复杂的湍流燃烧、喷雾和喷雾燃烧模拟中已被证明能够给出低网格敏感且高精度的 LES 结果, 但在以 ABL 为代表的边界层湍流中还没有得到有效的论证, 这是本研究的首要任务。更重要的是,

本研究将通过引入 SGS 标量方差的输运方程这一方法来对大气边界层条件下的 SGS 通量模型进行建模, 并通过与经典的 SGS 黏性模型进行比较等方式对新模型进行考察。

2. 基于 k_{sgs} 与 θ_{sgs}^2 输运的梯度型结构模型

在 LES 中, 结果的准确性与选用的亚网格模型有很大关系。本研究提出采用非线性梯度型结构亚网格应力模型和亚网格通量模型来求解 ABL,

$$\tau_{ij} = 2k_{sgs} \left(\frac{\tilde{G}_{ij}}{\tilde{G}_{mm}} \right) + \nu_{sgs}^u \nabla^2 \tilde{S}_{ij} \quad (5)$$

$$q_i = |q| \left(\frac{\tilde{G}_{\theta,i}}{|\tilde{G}_\theta|} \right) + \frac{\nu_{sgs}^u}{Sc_{sgs}} \nabla^2 \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x_i} \quad (6)$$

其中, $k_{sgs} = \frac{1}{2}(\widetilde{u_i u_j} - \tilde{u}_i \tilde{u}_j)$ 为亚网格动能, $|q|$ 为亚网格通量的大小, $\tilde{\theta}$ 为滤波后的任意标量, $\tilde{G}_{ij} = \frac{\tilde{\Delta}^2}{12} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_m} \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_m}$ 和 $\tilde{G}_{\theta,i} = \frac{\tilde{\Delta}^2}{12} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_m} \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x_m}$ 为梯度项(考虑到网格的各向异性, 本研究中梯度张量和梯度向量由 $G_{ij} = \frac{\tilde{\Delta} x^2}{12} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x} \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x} + \frac{\tilde{\Delta} y^2}{12} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial y} \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial y} + \frac{\tilde{\Delta} z^2}{12} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial z} \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial z}$ 和 $\tilde{G}_{\theta,i} = \frac{\tilde{\Delta} x^2}{12} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x} \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x} + \frac{\tilde{\Delta} y^2}{12} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial y} \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial y} + \frac{\tilde{\Delta} z^2}{12} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial z} \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial z}$ 来进行计算), $|\tilde{G}_\theta| = \sqrt{\tilde{G}_{\theta,1}^2 + \tilde{G}_{\theta,2}^2 + \tilde{G}_{\theta,3}^2}$ 。同时, 研究采用亚网格高黏性 $\nu_{sgs}^u = C'_k \tilde{\Delta}^3 \sqrt{k_{sgs}}$, 替代了传统的亚网格黏性, 以减小对大尺度湍流的耗散。根据 Lu 等人[17]的研究, 选择经验常数 $C'_k = 0.008$ 。这一模型将建模分成两部分: 归一化梯度向量用于模拟亚网应力张量和通量矢量的结构(每个方向的相对量级); 并且需要一个单独的模型来计算亚网格应力和通量的大小。

进一步地, 本研究摒弃了 ABL 在解析尺度与亚网格尺度之间的局部平衡假设, 而采用输运方程来计算亚网格湍动能,

$$\frac{\partial k_{sgs}}{\partial t} + \tilde{u}_i \frac{\partial k_{sgs}}{\partial x_i} = -\frac{\tau_{ij}}{\bar{\rho}} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} - C_\varepsilon \frac{k_{sgs}^{3/2}}{\tilde{\Delta}} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu_{sgs} \frac{\partial k_{sgs}}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

上式从左到右分别表示的是亚格子湍动能的瞬态项、对流项、源项、耗散项和扩散项。其中, $\nu_{sgs} = C_k \sqrt{k_{sgs}} \tilde{\Delta}$, 根据 Menon 等人[18]的研究, 经验常数取 $C_k = 0.05$, $C_\varepsilon = 1.0$ 。亚网格通量的大小用下面的方程计算,

$$|q| = u_{sgs} \theta_{sgs} \quad (8)$$

其中, 亚网格速度标度与亚网格动能的平方根成正比, 即 $u_{sgs} = \sqrt{2k_{sgs}}$, 用于刻画标量脉动程度的标量标准差 θ_{sgs} 的计算, 依赖于亚网格标量方差 $\theta_{sgs}^2 = \widetilde{\theta\theta} - \tilde{\theta}\tilde{\theta}$ 求解。对于标量通量的模化, 本研究也摒弃局部平衡假设, 而是求解其动态的输运方程,

$$\frac{\partial \theta_{sgs}^2}{\partial t} + \tilde{u}_i \frac{\partial \theta_{sgs}^2}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_{sgs}}{Sc_{sgs}} \frac{\partial \theta_{sgs}^2}{\partial x_i} \right) - q_i \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x_i} - \sqrt{2} C_{\varepsilon\theta} \frac{\theta_{sgs}^2 \sqrt{k_{sgs}}}{\tilde{\Delta}} \quad (9)$$

本研究将这节展示的基于 k_{sgs} 与 θ_{sgs}^2 输运的梯度型结构模型用于 ABL 大涡模拟仿真, 该方法是一种求解 k_{sgs} 与 θ_{sgs}^2 动力学过程的湍流模化方法, 因此缩写为“GDSM (Gradient-type Dynamic Structure Modeling)”。

3. 数值模拟

本研究采用成熟应用于许多 ABL 数值模拟研究中的 LES 方法[5] [19]-[24]求解基本守恒方程, 包括

滤波后的连续性方程、动量守恒方程和标量输运方程。由于 ABL 的雷诺数基本上都在 108 以上, 湍流的黏性占据了绝对的主导(往往在数量级上大于分子黏性千万倍以上), 因此空气的分子黏性可以忽略不计。目前研究中常用的标准黏性亚网格模型(公式(3))及以此为基础的扩散型通量模型(公式(4)) [6]。最早的涡流黏性模型假设 C_s 为常数, 即 Smagorinsky 系数。该模型已被广泛应用, 但在高雷诺数大气边界层的大涡模拟中, 标准涡黏性模型很难预测表层的平均风速、温度和剪切力, 进而会产生相应错误的剖面, 其亚网格项与实际项的相关性较低, 且该模型在所有方向上使用相同的涡黏度/扩散率[25]。考虑到所提出的模型的新颖性主要来自于其没有使用常用的涡黏性/扩散模型, 为了进行比较, 本文还将使用具有相似复杂度(零方程、非动态)和计算成本的涡黏性/扩散模型获得的结果。然而, 由于流动的各向异性, 特别是高雷诺数大气边界层中表面附近存在强平均剪切, 使这些系数的最佳值与各向同性的系数不同[14] [26] [27]。一种常见的做法是以特定的方式指定系数。Mason and Thomson [4]提出的特设阻尼函数可以改写成:

$$C_s = \left(C_0^{-n} + \left(\kappa \left(\frac{z}{\Delta} + \frac{z_0}{\Delta} \right) \right)^{-n} \right)^{-1/n}, \text{ 其中 } n \text{ 为可调参数, 且研究已经表明, 与使用常系数的 Smagorinsky}$$

模型相比, 当 C_0 的值在 0.1 至 0.3 这一范围且 $n = 1, 2$ 或 3 时, 该公式可以在表层提供更真实的对数速度分布, 且研究还发现 Sc_{sgs} 值的范围在 0.33 到 0.7 之间[4] [5] [25]。根据 Porté-Agel 等人的研究[5], 本次研究中该模型采用的阻尼系数为 $C_0 = 0.17$ 及 $n = 1$ (修正的 Smagorinsky 模型缩写为 “SM”), 并在研究中采用 $Sc_{sgs} = 0.5$ 及 $Sc_{sgs} = 0.7$ 这两个常数值。

本次模拟的大气边界层水平均匀, 其水平方向采用伪谱离散, 垂直导数用二阶中心差分近似。计算域的高度为 $H = 1000$ [m], 模拟体积的水平尺寸为 $L_x = L_y = 2\pi H$ 。计算域被划分为 N_x, N_y 和 N_z 个均匀间隔的网格点, 本研究以 $N_x \times N_y \times N_z = 32 \times 32 \times 32, 48 \times 48 \times 48$ 和 $64 \times 64 \times 64$ 的网格分辨率进行模拟。网格平面在垂直方向上交错, 其中第一个垂直速度平面距离表面为 $z = \frac{H}{N_z - 1}$, 而第一个水平速度平面距

离表面为 $\frac{\Delta z}{2}$ 。在底部通过应用 Monin-Obukhov 相似理论计算瞬时壁应力[5] [19]:

$$\tau_{i3}|_w = -u_*^2 \frac{\tilde{u}_i}{U(z)} \varpi = - \left(\frac{U(z) \kappa}{\ln(z/z_0) - \Psi_M} \right)^2 \frac{\tilde{u}_i}{U(z)}, \text{ 其中 } \kappa \text{ 为 von Kármán 常数, } u_* \text{ 为摩擦速度, } z_0 \text{ 为粗糙长度, } \Psi_M \text{ 为动量的稳定性校正, 而 } U(z) \text{ 是平面平均分解水平速度。本文使用常见的公式 } \tilde{\Delta} = \sqrt[3]{\Delta_x \Delta_y \Delta_z} \text{ 来}$$

计算过滤器大小, 其中 $\Delta_x = \frac{L_x}{N_x}$, 且 $\Delta_y = \frac{L_y}{N_y}$ 。这一研究根据 3/2 规则在非线性项中校正相应的混叠误差, 且时间推进使用二阶精确的 Adams-Bashforth 方案来执行[28]。

本次模拟采用经典的数值设置[5] [19] [24]。模拟流动由 x 方向上的恒定压力梯度 $-u_*^2/H$ 进行驱动, 并参照之前的研究设置 $u_* = 0.45$ [m/s] 及 $z_0 = 0.1$ [m] [5] [24] [25]。上边界条件设置为 $\partial \tilde{u}/\partial z = 0, \partial \tilde{v}/\partial z = 0, \tilde{w} = 0$ 及 $\partial \tilde{\theta}/\partial z = 0$ 。在底部, 中性稳定性结果为 $\Psi_M = 0$ 。通过施加恒定的向下表面通量 $q_3|_w = -u_* \theta_*$, 将类似于先前研究的被动标量场引入模拟中[19] [25] [29], 并设置 $\theta_* = 0.9$ [K]。

4. 模拟结果

图 1 显示的是在高度为 $z/H = 0.1$ 的水平面上 LES 获得的瞬态流向速度云图, 可以看出相对较为狭长的低速条带, 高速带则较宽, 这一观测和其他模拟[24]的结果是一致的。在数值模拟达到统计学稳定状态后, 本研究对两种模型的湍流统计数据进行了收集。在本文中, 水平面和时间综合平均值表示为 $\langle \cdot \rangle$, 而相应的分解变量的波动则表示为 $\tilde{f}' = \tilde{f} - \langle \tilde{f} \rangle$; 本次研究以 32^3 、 48^3 和 64^3 这三种空间解析率下获得的模拟结果为基础来进行检验。

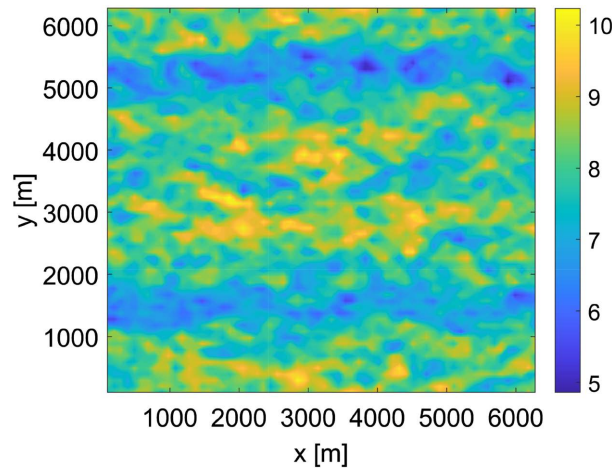


Figure 1. Transient flow velocity cloud map obtained from 64^3 LES on a horizontal plane with a height of $z/H = 0.1$

图 1. 高度 $z/H = 0.1$ 水平面上 64^3 LES 获得的瞬态流向速度云图

4.1. 速度与标量

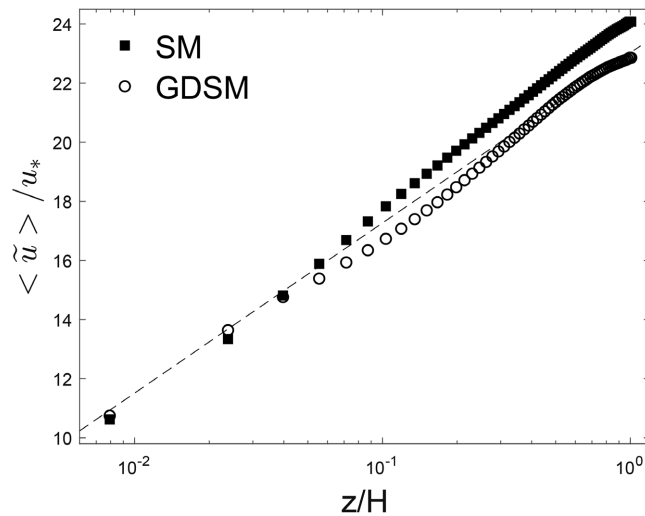


Figure 2. Non-dimensional velocity profile

图 2. 无量纲速度剖面

长期以来, 用 LES 方法求解 ABL 湍流存在平均风剖面 and 温度剖面不准确的问题。因此本小节主要将新方法的模拟预测结果与相似性理论结果进行比较, 以更好了解新模型的性能。冯卡门[30]于 1931 首次发表的对数律剖面是一种半经验关系, 用于描述湍流边界层表面上方水平风速的垂直分布。该研究指出, 湍流边界层中某一点的平均流向速度与该点到表面距离的对数成正比。后面建立的包括热效应的 Monin-Obukhov 相似理论[8][9]已经在很多测量中得到了证实, 因此新建立的亚网格模型应该与之进行比较。中性 ABL 条件下的风速剖面可以写成已知的对数定律公式: $\langle \tilde{u} \rangle = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$, 其中空气动力学粗糙度 z_0 必然非零。对数定律能较好近似 ABL 湍流在表层的速度分布, 其占据大气边界层中最低处 $z/H = 10\% \sim 15\%$ 以下的流动。图 2 比较了在 64^3 网格条件下使用 SM 和 GDSM 这两个模型获得的平均流向速度

剖面。可以看到, 使用 SM 获得的结果与之前的研究结果一致[5], 并且很明显使用 SM 获得的平均速度大于对数定律预测的平均速度; 而在表层, GDSM 能够更有效获得对数剖面, 并且随着模拟使用的网格分辨率的增加, 风速剖面与对数定律的偏离度随之减少。

为了更严格地评估模型性能, 可以检查作为垂直位置函数的解析流向速度的无量纲垂直梯度值。平均解析流向速度的无量纲垂直梯度定义为:

$$\Phi_M = \frac{\kappa z}{u_*} \frac{\partial \langle \tilde{u} \rangle}{\partial z} \quad (13)$$

根据测量结果和量纲分析[8][9][30], 在表层 $\Phi_M = 1$, 因此与对数层之间的未匹配可以清楚显示, 且有助于定量评估模型性能。图 3 显示了两种模型所得的无量纲垂直速度梯度值。与其他研究一致[4][5], SM 的模拟在 $z/H = 10\%$ 以下流动处产生的 Φ_M 明显大于理论值 1 (最大相对误差约为 30%), 说明这一模型仍然过于耗散, 在解析场去除了较多的动能, 这将导致表层中的过度剪切, 进而产生较大 Φ_M 值。可以注意到, 尽管 SM 在更高的水平高度($z/H > 0.15$)可以更好地预测梯度值, 但如图 2 所示, 其模拟所得速度的大小也随之增加。考虑到相似性曲线仅适用于大气边界层中最低处 $z/H = 10\% \sim 15\%$ 以下的流动。相比之下, 在表层 GDSM 这一新模型产生的 Φ_M 更接近于理论值(最大相对误差约 18%), 因而可以更好地表示预期的对数关系。

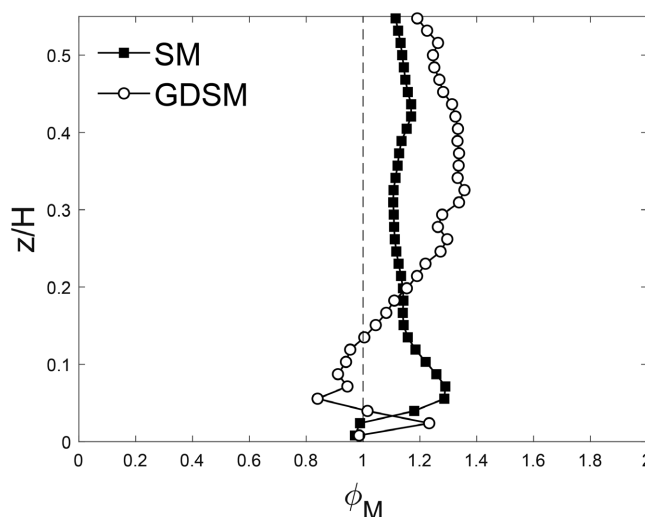


Figure 3. Non-dimensional vertical velocity gradient map
图 3. 无量纲垂直速度梯度图

对于标量, 本次研究主要通过作为垂直位置函数的平均分解标量浓度的无量纲垂直梯度值来进行检验。无量纲标量梯度的定义为:

$$\Phi_\theta = \frac{\kappa z}{\theta_*} \frac{\partial \langle \tilde{\theta} \rangle}{\partial z} \quad (14)$$

许多文献表明[8][9], 在中性大气边界层条件下, ABL 表层有 $\Phi_\theta = 0.74$ 。使用两个不同的 Sc_{sgs} 值进行 SM 模拟获得的无量纲标量梯度如图 4(a)所示, 可以看到, 标量梯度具有与速度场对应相同的一般特征。与其他研究一致[4], 当前研究还表明, 模拟中 Φ_θ 仍然存在与 0.74 这一值的偏差, 且采用其他涡流扩散模型时也会产生类似的 Φ_θ 过冲[19][31]。图 4 右显示了使用新模型在不同网格条件下进行模拟获得的无量纲标量梯度。由图可知, 新模型的模拟显然产生了更好的 Φ_θ 值, 并且结果显示新模型对网格分辨

率的敏感性较低, 且 32^3 网格条件下的模拟获得的 Φ_θ 值略接近于预期值, 这可能是由于在较粗糙的网格分辨率下数值扩散增加的影响。此外, 该模拟在低网格点处略低于标准 Φ_θ 值, 而在高网格点处将大于标准值。Porté-Agel [19] 之前的研究已经检验了动态涡流粘度模型和动态涡流扩散模型的组合, 得出的 Φ_θ 值在地面附近很小(约 0.6), 在表层急剧增加(至约 0.9) [32] [33]。

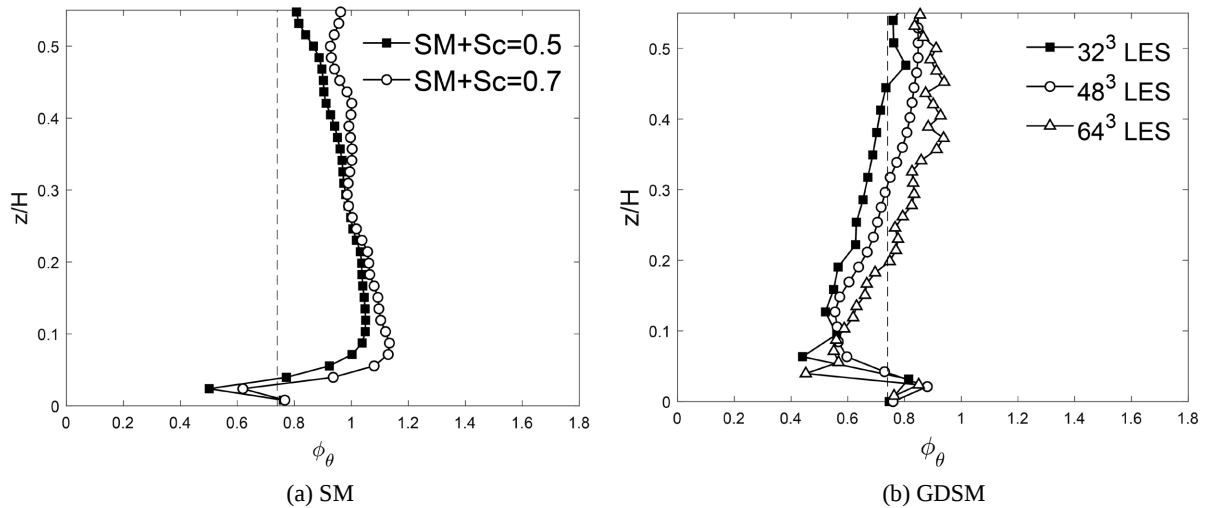


Figure 4. Non-dimensional scalar gradient simulated by two models: (a) SM; (b) GDSM

图 4. 两种模型所得的无量纲标量梯度图: (a) SM; (b) GDSM

4.2. 能量谱

标量场的功率谱具有惯性子区间和耗散区间。在惯性子区间内, 能量谱表现为遵循 $-5/3$ 幂律标度[13], 特别是在中性 ABL 流动中, 惯性子区间应扩展到相对较小的尺度范围, 即 $k_1 \geq z^{-1}$, 其中 z 为高度, k_1 为流向波数。需要注意的是, 耗散区间在高雷诺数湍流的大涡模拟中没有进行解析, 因此不需要考虑这个范围。

图 5、图 6 和图 7 分别是在 64^3 网格条件下使用 SM 和 GDSM 进行模拟获得的一维流向速度能谱图、垂直速度能谱图及标量能谱图。可以看到, 两种模型的所有模拟结果均遵循 $-5/3$ 幂律标度。图 5(a)、图 6(a)和图 7(a)分别为 64^3 网格条件下用 SM 进行数值模拟所获得的无量纲一维流向速度、垂直速度和标量能谱图。通过一维傅里叶变换计算频谱, 然后在展向方向和时间上对其进行平均。为了检查惯性子区域内曲线可能的下降, 需要将其通过 $\theta_z^2 z$ 来进行归一化, 并根据 $k_1 z$ 来对能量谱进行绘制。对于相对较小的标度($k_1 z \geq 1$), $-5/3$ 幂律标度关系预计会保持不变, 能量谱表现出良好的下降情况。在表层, 大多数网格分辨率尺度都在惯性子区间之外, 能量谱会迅速下降, 这表明这种湍流扩散方法会产生过度耗散。相关研究表明[19] [32] [33], 在表面附近, 标准动态闭合产生的能谱斜率太平, 且在最小解析尺度下具有不符合实际的标量方差堆积。此外也有研究表明[25], 测试的涡流粘度/扩散模型可以在小尺度上产生过度耗散或者明显的功率密度累积。使用涡流扩散模型获得的结果在很大程度上取决于模型系数的值, 尤其是在表层, 且目前的数值结果也支持这一说法。

图 5(b)、图 6(b)和图 7(b)分别为 64^3 网格条件下用 GDSM 进行数值模拟所获得的无量纲一维流向速度、垂直速度和标量能谱图。GDSM 的模拟显然能够在惯性子区间内实现 $-5/3$ 幂律标度。在表层, 将这些结果与 SM 的模拟结果进行比较, 揭示了新模型两个主要的改进特征: GDSM 在功率包含区间(低模式)中产生更大的值, 且在滤波器尺度上的耗散明显更小, 因此 GDSM 可以更好地再现速度和标量方差向亚网格尺度的传递速率。

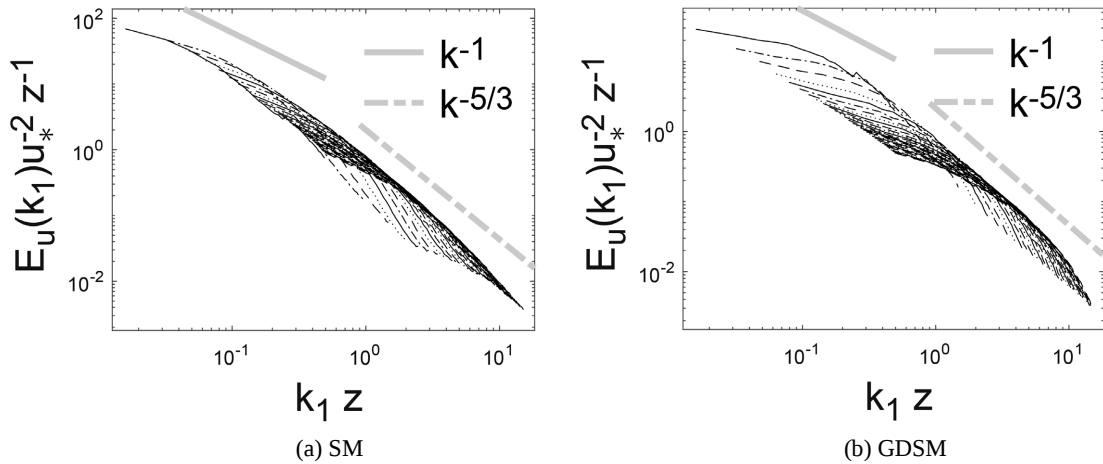


Figure 5. One-dimensional flow velocity energy spectrum simulated by two models: (a) SM; (b) GD SM

图 5. 两种模型所得的一维流向速度能谱图: (a) SM; (b) GD SM

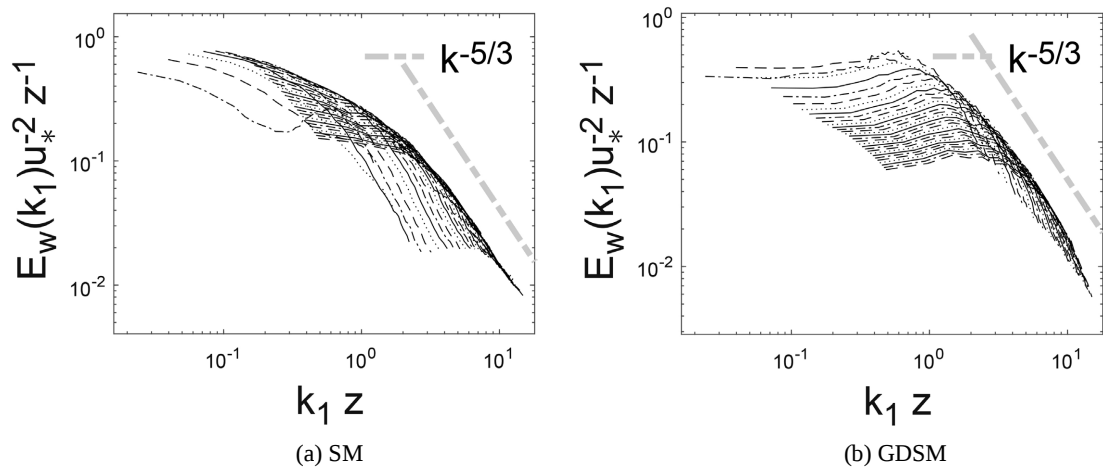


Figure 6. One-dimensional vertical velocity energy spectrum simulated by two models: (a) SM; (b) GD SM

图 6. 两种模型所得一维垂直速度能谱图: (a) SM; (b) GD SM

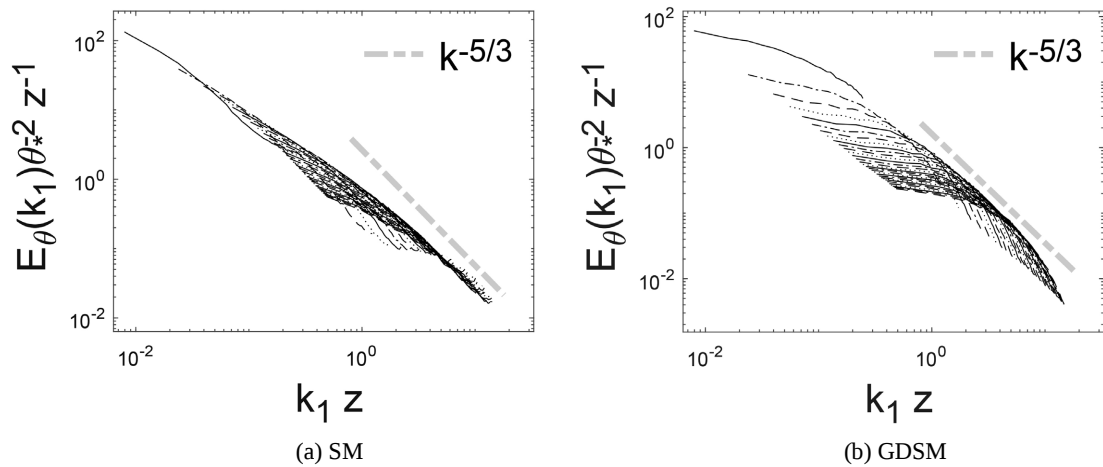


Figure 7. One-dimensional scalar energy spectrum simulated by two models: (a) SM; (b) GD SM

图 7. 两种模型所得一维标量能谱图: (a) SM; (b) GD SM

4.3. 二阶统计

图 8 显示了从 64^3 网格的模拟中获得的标准化总剪应力及已分部剪应力(包括已解析的剪应力和亚网格剪应力)的垂直分布, 标准化壁面总法向通量及已分部法向通量(包括已解析的法向通量和亚网格法向通量)的垂直分布, 以及从两个较粗糙的网格分辨率(32^3 网格及 48^3 网格)条件下获得的标准化亚网格剪应力和亚网格法向通量。正如预期的那样, 较低分辨率条件下模拟产生的亚网格应力和亚网格通量大于较高分辨率条件下对应的模拟结果。模拟的流动由恒定的压力梯度驱动, 并在流动中施加恒定的表面通量, 因此在没有粘性效应的情况下, 标准化总湍流应力和总湍流通量的大小分别从表面的 ± 1 近似线性下降到顶部的 0。直接数值模拟的研究说明了总湍流应力和总湍流通量特征之间的相似性[34], 表明标量波动也与速度波动一样间歇性产生。此外, 总湍流通量的近线性特征与对数区域的直接数值模拟结果和中性 ABL 流动的大涡模拟结果都能很好地吻合[19] [29] [34]。这些结果也证实了该模型方案的平稳性及动量守恒。

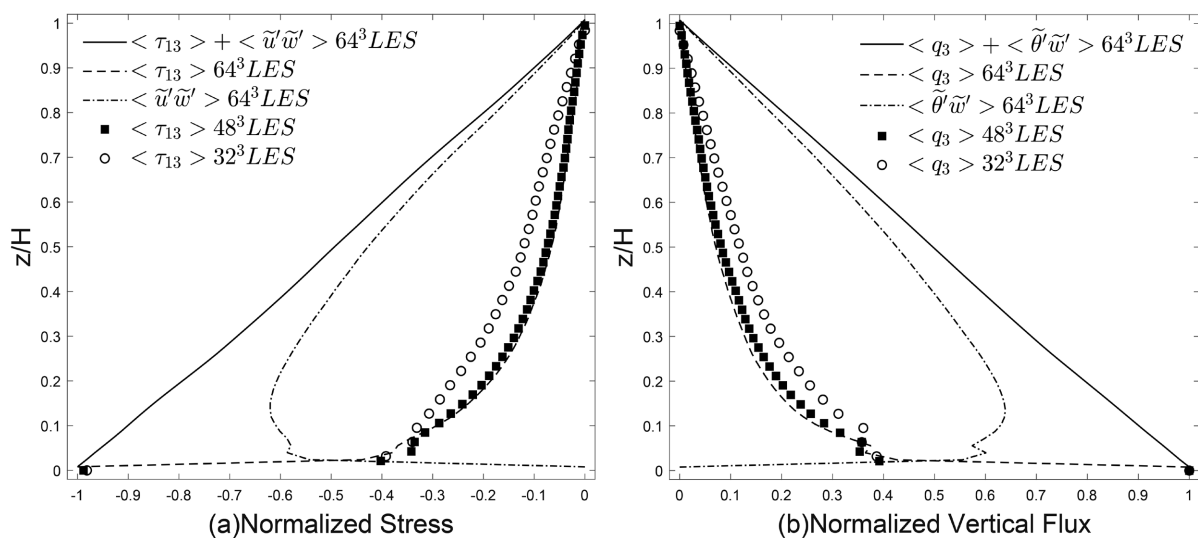


Figure 8. GDSM simulation results: (a) shear stress diagram; (b) wall-normal flux diagram

图 8. GDSM 模拟所得的: (a) 剪应力图; (b) 壁面法向通量图

5. 结论与展望

准确的 ABL 仿真对于精准掌握大气中温度、湿度等的分布, 污染物的扩散规律及预测雨水的生成等均具有重要意义。传统的基于 Smagorinsky 模型的涡黏性/扩散 SGS 模型需要通过假设 SGS 脉动的产生与消耗速率达成局部平衡来模化 SGS 应力和通量, 这一假设会给以高雷诺数高剪切为基本特征的 ABL 湍流的仿真带来较强的限制, 导致预测结果存在较大偏差。本研究提出不采用局部平衡这一假设, 通过引入输运方程这一方式来计算亚网格动能和标量方差, 并结合梯度方法计算亚网格应力和通量, 不需要额外的测试滤波, 使得该方法在计算上十分高效。

本文通过对中性大气边界层进行模拟来检验所提出的模型。众所周知, 在亚网格运动占总湍流很大一部分的 ABL 表层, ABL 的大涡模拟对亚网格模型相当敏感。传统的涡黏性模型与表层的 Monin-Obukhov 相似性形式存在偏差, 这种偏差很容易在速度和标量的廓线中观察到, 在更大程度上在其无量纲垂直导数中也可以观察到。通过比较可以看到, 新方法相对于简单的涡黏性模型有了显著的改善, 除了能够获取可靠的流场结构, 进一步的结果还表明, 该方法可以获得更符合对数定律的风速剖面, 新模型无量纲垂直速度梯度预测的相对误差提升了 12%, 而无量纲标量梯度预测的相对误差则提升了将近

20%, 且新模型可以更好地再现速度和标量方差向亚网格尺度的传递速率。此外, 我们讨论了新模型预测效果提升的原因, 相较于传统粘性 SGS 模型存在耗散较强的问题, 新模型采用动态非线性的建模方法, 可以预测 ABL 湍流中能量的逆向输运, 并更好地捕捉小尺度的涡旋。

致 谢

数值计算在合肥先进计算中心完成。

参考文献

- [1] Chumakov, S.G. and Rutland, C.J. (2005) Dynamic Structure Subgrid-Scale Models for Large-Eddy Simulation. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, **47**, 911-923. <https://doi.org/10.1002/flid.907>
- [2] Lu, H. and Porté-Agel, F. (2013) A Modulated Gradient Model for Scalar Transport in Large-Eddy Simulation of the Atmospheric Boundary Layer. *Physics of Fluids*, **25**, Article 015110. <https://doi.org/10.1063/1.4774342>
- [3] Chumakov, S. and Rutland, C.J. (2004) Dynamic Structure Models for Scalar Flux and Dissipation in Large-Eddy Simulation. *AIAA Journal*, **42**, 1132-1139. <https://doi.org/10.2514/1.10416>
- [4] Mason, P.J. and Thomson, D.J. (1992) Stochastic Backscatter in Large-Eddy Simulations of Boundary Layers. *Journal of Fluid Mechanics*, **242**, 51-78. <https://doi.org/10.1017/s0022112092002271>
- [5] Porté-AGEL, F., Meneveau, C. and Parlange, M.B. (2000) A Scale-Dependent Dynamic Model for Large-Eddy Simulation: Application to a Neutral Atmospheric Boundary Layer. *Journal of Fluid Mechanics*, **415**, 261-284. <https://doi.org/10.1017/s0022112000008776>
- [6] Smagorinsky, J. (1963) General Circulation Experiments with the Primitive Equations. *Monthly Weather Review*, **91**, 99-164. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1963\)091<0099:gcewtp>2.3.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091<0099:gcewtp>2.3.co;2)
- [7] Lu, H., Rutland, C.J. and Smith, L.M. (2007) A priori Tests of One-Equation LES Modeling of Rotating Turbulence. *Journal of Turbulence*, **8**, N37. <https://doi.org/10.1080/14685240701493947>
- [8] Businger, J.A., Wyngaard, J.C., Izumi, Y. and Bradley, E.F. (1971) Flux-Profile Relationships in the Atmospheric Surface Layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **28**, 181-189. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1971\)028<0181:fp Rita>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1971)028<0181:fp Rita>2.0.co;2)
- [9] Stull, R.B. (1988) *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Springer.
- [10] Liu, S., Meneveau, C. and Katz, J. (1994) On the Properties of Similarity Subgrid-Scale Models as Deduced from Measurements in a Turbulent Jet. *Journal of Fluid Mechanics*, **275**, 83-119. <https://doi.org/10.1017/s0022112094002296>
- [11] Clark, R.A., Ferziger, J.H. and Reynolds, W.C. (1979) Evaluation of Subgrid-Scale Models Using an Accurately Simulated Turbulent Flow. *Journal of Fluid Mechanics*, **91**, 1-16. <https://doi.org/10.1017/s002211207900001x>
- [12] Kobayashi, H. and Shimomura, Y. (2003) Inapplicability of the Dynamic Clark Model to the Large-Eddy Simulation of Incompressible Turbulent Channel Flows. *Physics of Fluids*, **15**, L29-L32. <https://doi.org/10.1063/1.1553756>
- [13] Sagaut, P. (2001) Large-Eddy Simulation for Incompressible Flows. An Introduction. *Measurement Science and Technology*, **12**, 1745-1746. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/12/10/707>
- [14] Porté-Agel, F., Parlange, M.B., Meneveau, C. and Eichinger, W.E. (2001) A Priori Field Study of the Subgrid-Scale Heat Fluxes and Dissipation in the Atmospheric Surface Layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **58**, 2673-2698. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2001\)058<2673:apfsot>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2001)058<2673:apfsot>2.0.co;2)
- [15] Okong'o, N. and Bellan, J. (2000) A priori Subgrid Analysis of Temporal Mixing Layers with Evaporating Droplets. *Physics of Fluids*, **12**, 1573-1591. <https://doi.org/10.1063/1.870405>
- [16] Lu, H., Rutland, C.J. and Smith, L.M. (2008) A posteriori Tests of One-Equation Les Modeling of Rotating Turbulence. *International Journal of Modern Physics C*, **19**, 1949-1964. <https://doi.org/10.1142/s0129183108013394>
- [17] Lu, H., Zou, C., Shao, S. and Yao, H. (2019) Large-Eddy Simulation of MILD Combustion Using Partially Stirred Reactor Approach. *Proceedings of the Combustion Institute*, **37**, 4507-4518. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.09.032>
- [18] Menon, S., Yeung, P.-K. and Kim, W.-W. (1996) Effect of Subgrid Models on the Computed Interscale Energy Transfer in Isotropic Turbulence. *Computers & Fluids*, **25**, 165-180. [https://doi.org/10.1016/0045-7930\(95\)00036-4](https://doi.org/10.1016/0045-7930(95)00036-4)
- [19] Porté-Agel, F. (2004) A Scale-Dependent Dynamic Model for Scalar Transport in Large-Eddy Simulations of the Atmospheric Boundary Layer. *Boundary-Layer Meteorology*, **112**, 81-105. <https://doi.org/10.1023/b:boun.0000020353.03398.20>
- [20] Albertson, J.D. and Parlange, M.B. (1999) Natural Integration of Scalar Fluxes from Complex Terrain. *Advances in Water Resources*, **23**, 239-252. [https://doi.org/10.1016/s0309-1708\(99\)00011-1](https://doi.org/10.1016/s0309-1708(99)00011-1)

-
- [21] Stoll, R. and Porté-Agel, F. (2006) Effect of Roughness on Surface Boundary Conditions for Large-Eddy Simulation. *Boundary-Layer Meteorology*, **118**, 169-187. <https://doi.org/10.1007/s10546-005-4735-2>
- [22] Stoll, R. and Porté-Agel, F. (2006) Dynamic Subgrid-Scale Models for Momentum and Scalar Fluxes in Large-Eddy Simulations of Neutrally Stratified Atmospheric Boundary Layers over Heterogeneous Terrain. *Water Resources Research*, **42**, W01409. <https://doi.org/10.1029/2005wr003989>
- [23] Stoll, R. and Porté-Agel, F. (2007) Large-Eddy Simulation of the Stable Atmospheric Boundary Layer Using Dynamic Models with Different Averaging Schemes. *Boundary-Layer Meteorology*, **126**, 1-28. <https://doi.org/10.1007/s10546-007-9207-4>
- [24] Lu, H. and Porté-Agel, F. (2010) A Modulated Gradient Model for Large-Eddy Simulation: Application to a Neutral Atmospheric Boundary Layer. *Physics of Fluids*, **22**, Article 015109. <https://doi.org/10.1063/1.3291073>
- [25] Andren, A., Brown, A.R., Mason, P.J., Graf, J., Schumann, U., Moeng, C.-H. and Nieuwstadt, F.T.M. (1994) Large-Eddy Simulation of a Neutrally Stratified Boundary Layer—A Comparison of 4 Computer Codes. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **120**, 1457-1484. <https://doi.org/10.1002/qj.49712052003>
- [26] Kleissl, J., Meneveau, C. and Parlange, M.B. (2003) On the Magnitude and Variability of Subgrid-Scale Eddy-Diffusion Coefficients in the Atmospheric Surface Layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **60**, 2372-2388. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2003\)060<2372:otmavo>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2003)060<2372:otmavo>2.0.co;2)
- [27] Bou-Zeid, E., Vercauteren, N., Parlange, M.B. and Meneveau, C. (2008) Scale Dependence of Subgrid-Scale Model Coefficients: An *a priori* Study. *Physics of Fluids*, **20**, Article 115106. <https://doi.org/10.1063/1.2992192>
- [28] Hussaini, M.Y. and Zang, T.A. (1987) Spectral Methods in Fluid Dynamics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, **19**, 339-367. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.19.010187.002011>
- [29] Kong, H., Choi, H. and Lee, J.S. (2000) Direct Numerical Simulation of Turbulent Thermal Boundary Layers. *Physics of Fluids*, **12**, 2555-2568. <https://doi.org/10.1063/1.1287912>
- [30] Von Karman, T. (1931) Mechanical Similitude and Turbulence. Technical Report Archive & Image Library.
- [31] Sullivan, P.P., McWilliams, J.C. and Moeng, C. (1994) A Subgrid-Scale Model for Large-Eddy Simulation of Planetary Boundary-Layer Flows. *Boundary-Layer Meteorology*, **71**, 247-276. <https://doi.org/10.1007/bf00713741>
- [32] Germano, M., Piomelli, U., Moin, P. and Cabot, W.H. (1991) A Dynamic Subgrid-Scale Eddy Viscosity Model. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, **3**, 1760-1765. <https://doi.org/10.1063/1.857955>
- [33] Moin, P., Squires, K., Cabot, W. and Lee, S. (1991) A Dynamic Subgrid-Scale Model for Compressible Turbulence and Scalar Transport. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, **3**, 2746-2757. <https://doi.org/10.1063/1.858164>
- [34] Kim, J. and Moin, P. (1989) Transport of Passive Scalars in a Turbulent Channel Flow. *Turbulent Shear Flows* 6, Toulouse, 7-9 September 1987, 85-96. https://doi.org/10.1007/978-3-642-73948-4_9

基于多元回归分析的铁路智能安全标线设置的研究

张庭赫¹, 刘丽梅^{2*}, 叶维震¹, 赖 炜¹

¹沈阳工程学院机械学院, 辽宁 沈阳

²沈阳工程学院基础教学部, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2024年7月2日; 录用日期: 2024年7月17日; 发布日期: 2024年9月4日

摘 要

随着城市化的进程和高速铁路网络的快速发展, 站台乘客的安全受到了广泛关注。本文通过数学建模方法探讨高速列车通过站台时对候车乘客的气流影响, 分析安全标线的设置依据, 并提出保障铁路站台安全的建议。本文分别从力的计算、安全线的设置及影响因素分析三个方面进行了深入研究, 提出了基于回归分析的改进的贝努利模型。本文通过对我国幼儿、成年人、老人的各个年龄段的平均体重、体积以及列车的车速三个自变量与乘客所受风力作为因变量进行多元线性回归性分析, 得到数据分类处理。再通过改进的贝努利模型计算出在列车任何速度以及人与车的任意距离下人所受的推力或拉力大小。确定了乘客能够安全承受的最大气流力, 并引入了安全系数来考虑不同体型和稳定性的乘客。进而本文提出了不同列车速度下安全标线的最佳位置, 以确保所有乘客的安全, 提出智能安全标线设置。

关键词

伯努利效应, 流体力学, 动态压力

Research on Railway Intelligent Safety Marking Setting Based on Multiple Regression Analysis

Tinghe Zhang¹, Limei Liu^{2*}, Weizhen Ye¹, Wei Lai¹

¹School of Mechanics, Shenyang Institute of Engineering (SIE), Shenyang Liaoning

²General Studies Teaching Department, Shenyang Institute of Engineering (SIE), Shenyang Liaoning

Received: Jul. 2nd, 2024; accepted: Jul. 17th, 2024; published: Sep. 4th, 2024

*通讯作者。

文章引用: 张庭赫, 刘丽梅, 叶维震, 赖炜. 基于多元回归分析的铁路智能安全标线设置的研究[J]. 流体动力学, 2024, 12(3): 35-44. DOI: 10.12677/ijfd.2024.123004

Abstract

With the process of urbanization and the rapid development of high-speed railway network, the safety of platform passengers has received wide attention. The purpose of this study is to explore the influence of the high-speed train passing through the platform through mathematical modeling method, analyze the basis of setting up the safety line, and put forward suggestions to ensure the safety of the railway platform. This paper studies deeply from three aspects of force calculation, safety line setting and influencing factor analysis and proposes an improved Bernoulli model based on regression analysis. In this paper, the average weight and volume of children, adults and the elderly at all ages in China, as well as the speed of the train, are analyzed with multiple linear regression as dependent variables, and the data are classified and processed. Then, the thrust or pull of people at any speed of the train and any distance between people and cars can be calculated according to the improved Bernoulli model. The maximum airflow force that passengers can safely bear is determined, and a safety factor is introduced to consider passengers with different sizes and stability. Furthermore, this paper puts forward the optimal position of safety marking under different train speeds to ensure the safety of all passengers, and proposes the intelligent safety marking setting.

Keywords

Bernoulli Effect, Fluid Mechanics, Dynamic Pressure

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

在现代城市交通系统中，高速铁路作为一种高效、便捷的交通方式，其安全运营对于乘客和铁路管理者而言具有至关重要的意义。随着高速列车速度的提升，车站站台安全问题日益凸显。尤其是在高速列车进站和通过站台时，由于高速移动的列车会产生强烈的气流，这些气流能够在站台上形成显著的压力差，对候车乘客造成潜在的危险[1]-[3]。国际上对于铁路站台安全的研究已经提出了多种理论和实践方案。安全标线的设置是其中的一项基本措施，其目的在于通过界定乘客候车的安全距离来减少风险[4]-[6]。然而，如何根据列车的速度和其他因素科学地确定这一安全距离，仍然是个需要深入探讨的问题。本研究旨在通过数学建模的方法，量化列车通过站台时产生的气流对乘客的影响，从而为安全标线的合理设置提供理论支持和指导建议。传统的道路标线在应对复杂多变的交通环境时显得力不从心。因此，智能安全标线的出现，以其智能化、动态化的特点，为提升交通管理水平和降低事故率提供了新思路，但其研究也面临着一些挑战，比如如何确保标线的可靠性等。本文通过数学建模的方法，量化列车通过站台时产生的气流对乘客的影响，从而为安全标线的合理设置提供理论支持和指导建议。

2. 伯努利模型

2.1. 模型的假设

本模板仅针对采用 A4 纸型的论文版式。请务必确保您的论文采用 A4 幅面(21 厘米 × 28.5 厘米)进行排版。针对该问题，本文进行如下模型假设：

假定列车的侧面为平滑的，忽略由于窗户、门和其他结构造成的气流细节变化，进而简化气流模型。

假设列车通过时产生的气流是均匀分布的，并且气流的速度分布在站台边缘具有对称性。

假设列车通过时产生的气流是稳定的，并且在短时间内气流特性不发生变化。

假设人的密度近似于水的密度，人按照简单的圆柱体进行计算。

假设乘客在站台上的分布是均匀的，忽略因乘客聚集或分布不均导致的局部气流变化。

假设车和人站在同一水平线上。

假设人与地面的摩擦力系数为 0.5。

2.2. 符号设定

本文引进了一些参数符号如表 1 所示。

Table 1. Parameter symbols and meanings

表 1. 参数符号和意义

符号	意义
p	风压
d	列车到人的距离
D	列车的宽
h	流体到水平线的距离
S	受力面积
V	人体体积
k	扩散系数
μ	摩擦系数
M	人体质量
ρ	空气密度
F_f	人与地面的摩擦力
$v_{\text{风}}$	风速
$v_{\text{车}}$	列车速度
F	作用在人体上的风压力

2.3. 模型的建立

伯努利方程是流体动力学中一个重要的原理，以及流体动力学相应原理，这是描述高速流体导致压力降低的现象因此本文使用伯努利方程计算站台边缘的气压差，如图 1 所示空气流动速度与压强大小的关系图[7]-[9]。

伯努利方程表现形式： $p_1 + 0.5\rho v_1^2 + \rho gh = p_2 + 0.5\rho v_{\text{风}}^2 + \rho gh$ 。

压强差方程： $\Delta p = p_1 - p_2 = 0.5\rho v_{\text{风}}^2 - 0.5\rho v_1^2$ 。

其中， p_1 ：人体所处位置的空气压强， p_2 ：列车所处位置的空气压强， $\rho = 1.224 \text{ kg/m}^3$ ：空气密度

h : 流体与地平线的距离。这个方程表明, 当高速列车经过站台的时候, 它会在车身周围推动空气形成快速的气流。根据伯努利方程, 当空气流速增大的时候, 气体的压强就会减小, 从而就会形成人身体前后的压强差。当人体前的流速越大的时候, 压强就会越小。这样人身体前后形成的压强差就会形成一个力, 这个力通过本文上述所说的伯努利方程就能够计算。然后, 可以由列车的速度所产生的风速($v_{风}$)来估算出动压差, 进而计算出力的大小(F)。

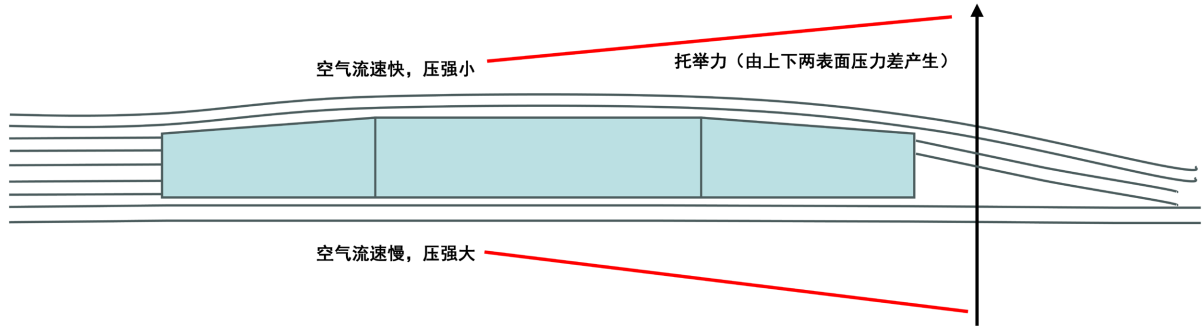


Figure 1. Air flow and pressure diagram

图 1. 空气流动与压强图

2.4. 风速计算

理论风速计算公式(1):

$$V_{风1} = \frac{V_{车}}{\sqrt{1 + \left(\frac{Kd}{D}\right)^2}} \quad (1)$$

其中, $v_{风1}$ 是估算的风速, $V_{车}$ 是列车的速度, d 是列车到人的距离, D 是列车的宽, K 是一个经验常数, 它取决于射流的扩散特性和列车的具体形状。由这个公式本文可以推出, 当距离 d 较小的时候, 风速 $v_{风1}$ 比较接近列车速度 $v_{车}$, 但是随着距离 d 的增加, 风速会因为空气流与周围静止空气的混合而降低。

实际风速计算公式(2):

$$V_{风1} = \frac{V_{车} \cdot D}{D + Kd} \quad (2)$$

其中, $V_{风1}$ 是站台上人所感受到的风速。这个公式考虑到空气流动由于射流扩散导致的风速减小。在风速计算当中, 随着距离 d 的增加, 导致风速 $v_{风1}$ 下降。

2.5. 受力计算

理论风速计算公式(1): 压强差产生的力(F)计算: $F = \Delta P \times S$ 。 S 表示人体正对列车方向的受力面积。假设人体按照简单的圆柱体, 可以按照体积和体重来估算其半径和面积。

3. 基于回归分析的改进的伯努利模型

3.1. 车速的设定

由于在现实生活中不论是列车还是高铁都存在各种不同的型号, 本文将主要阐述一下几种在生活中最为常见的车型来作为分析的依据。车型主要包括有 CRH380A、CRH380B (CRH380A 与 CRH380B 的行驶时速基本相同)、CRH3、CRH5、CRH2E。

3.2. 基于多元回归分析的数据处理

首先对我国幼儿、成年人、老人的各个年龄段的平均体重、体积以及列车的车速三个因变量作为自变量与乘客所受风力作为因变量进行回归性分析。首先，做出因变量 Y 与自变量 X 的样本散点图如图 2 所示。

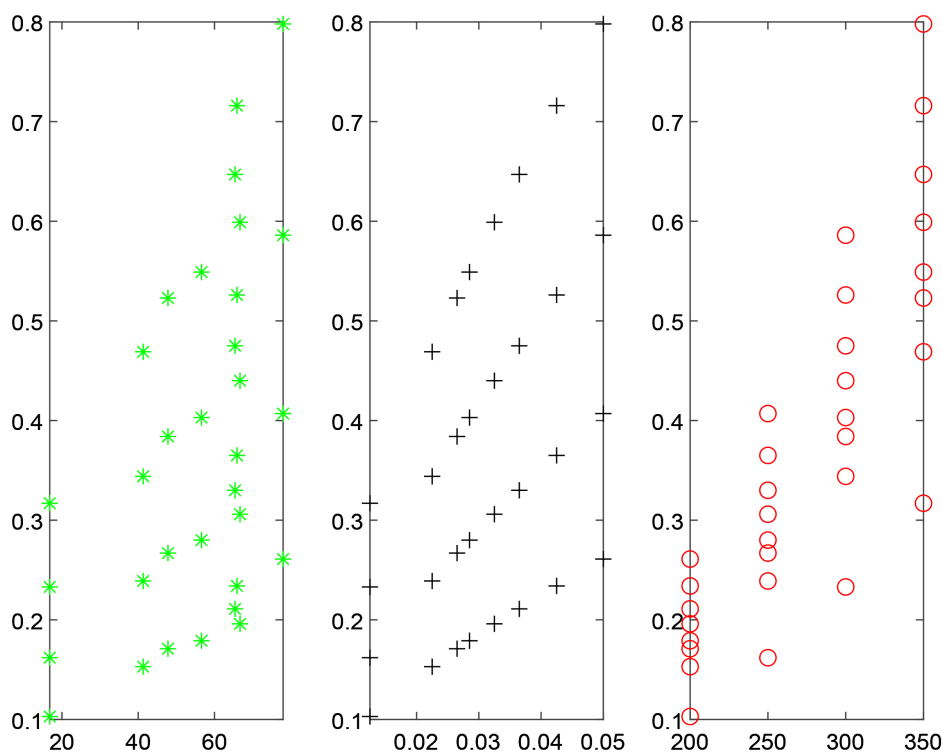


Figure 2. Sample scatter plot
图 2. 样本散点图

由样本散点图图 2 可以看出，在乘客的体重与列车的车速固定时，乘客的体积的越大，乘客所受的风力就越大；当乘客的体重与体积保持不变的情况下，列车车速越快，乘客所受的风力就越大；最后从这三幅图中可以看出这三个自变量与因变量都存在线性关系，所以本文决定采用线性回归分析方法来进行数据的处理，同时因为自变量存在多个，所以采用多元线性回归分析来进行处理。

设回归方程为：

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \hat{\beta}_3 x_3 \quad (3)$$

将上文中已经处理好的数据通过 MATLAB 进行多元线性回归分析，可得到的计算结果如表 2 所示。

因此可得线性回归方程为：

$$\hat{y} = -0.6041 + 0.0009x_1 + 6.7221x_2 + 0.0026x_3 \quad (4)$$

由表可知相关性系数 R 的绝对值为 0.9769，该值处于 0.8 到 1 之间，表明该模型的线性相关性强；同时因为 $P < 0.0001$ ，所以很容易便可看出 $P <$ 预定的显著水平，因此证明了因变量与自变量之间存在显著的线性关系。同时上述两种证明方法结果一致，进一步证明了因变量与自变量存在显著的线性关系。

通过上文中得出的线性回归方程，本文将进行数据处理，处理结果如表 3 所示。

Table 2. Multiple regression linear analysis
表 2. 多元回归线性分析

回归系数	回归系数的估计值	回归系数的置信区间
β_0	-0.6041	[-0.6889, -0.5194]
β_1	0.0009	[-0.0014, 0.0033]
β_2	6.7221	[2.8316, 10.6125]
β_3	0.0026	[0.0023, 0.0028]
$R^2 = 0.9543$	$F = 159.0702$	$P < 0.0001$
		$S^2 = 0.0016$

Table 3. Data processing of linear regression equation
表 3. 线性回归方程数据处理

体积/(m ³)	体重/(kg)	车速/(km/h)			
		200	250	300	350
0.0125	16.8	0.103	0.162	0.233	0.317
0.0225	41.3	0.153	0.239	0.344	0.469
0.0265	47.8	0.171	0.267	0.384	0.523
0.0285	56.6	0.179	0.28	0.403	0.549
0.0325	66.7	0.196	0.306	0.44	0.599
0.0365	65.4	0.211	0.33	0.475	0.647
0.0425	69.5	0.234	0.365	0.526	0.716
0.05	78	0.261	0.407	0.586	0.798

通过表 3 可知，本文将乘客所受到的风力的大小为判断依据进行数据的分类(风力为 0.3 KN 为分界点)，首先，经过多次数据统计可知幼儿所受到的风力通常小于 0.3 KN，所以本文将乘客分为成人与幼儿；其次因为男女之间存在差异，同时一部分女性所受风力大小小于 0.3 KN，因此又将乘客以性别差异进行分类；最后由线性回归方程可知，车速对风力的大小存在显著影响，因此将车速分为 200 km/h、250 km/h、300 km/h、350 km/h 这四种。

3.3. 改进的伯努利模型的应用

由于高站台的安全线的划分为固定值，所以这里不做考虑。同时对于非高站台本文决定通过修改代码来计算在不同列车速度下人与列车的安全距离。

首先对于列车速度，先详细阐述在 CRH380A 型号的列车行驶时，成年男性与女性应设立的安全标线的距离为多少；其次根据本文所查资料可知，成年男性的平均体重为 72.4 kg，女性的平均体重为 58.8 kg。

随后将数据代入 MATALB 之中，进行进一步的可视化分析。

首先以男性的平均体重为样例，设体重为 72.4 kg，将其输入代码产生相关的可视化图如图 3。

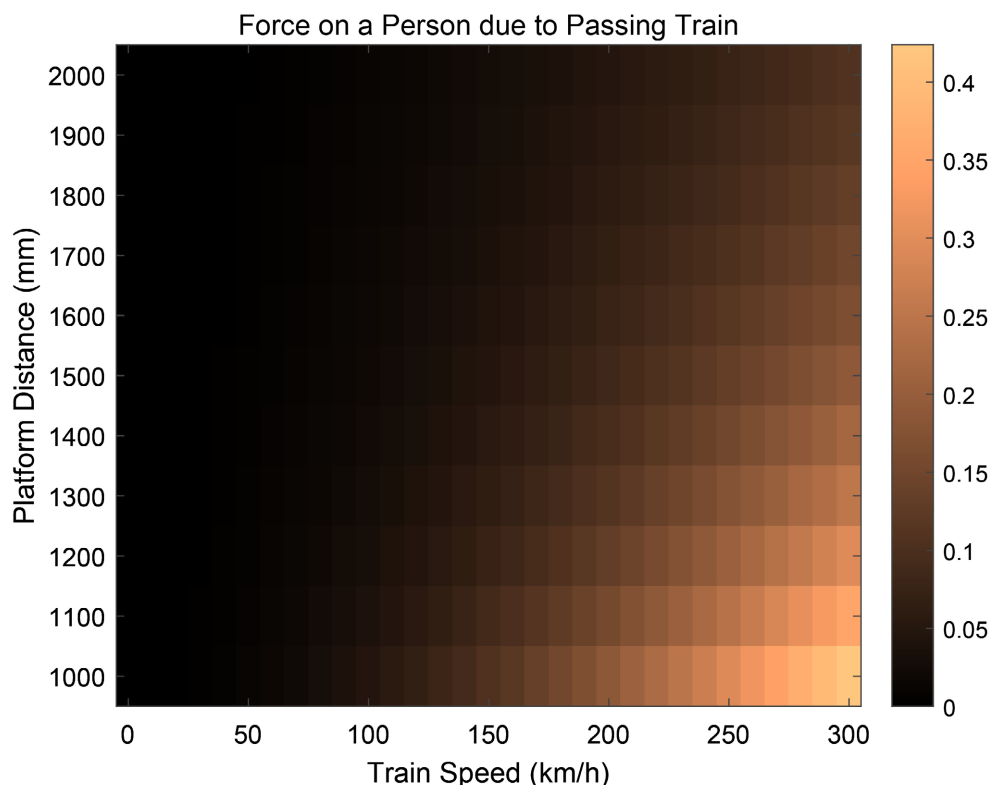


Figure 3. Thermal diagram of distance between people and trains and train speed

图 3. 人和列车距离与列车速度的热力图

从图 3 中可以看出, 当横轴速度(单位: 千米/小时)不变时, 纵轴平台距离(单位: 毫米)即安全警戒线与站台边缘的距离越小, 人所受到的力的作用越大。当安全警戒线与站台边缘的距离不变时, 列车的速度越大, 人所受到的力的作用越大。同时通过受力分析可知道, 人在站台上时收到两个力的作用。通过受力分析图可知, 人分别收到因气流产生变化而形成的风力与地面给人的摩擦力。

设摩擦系数为 μ , $\mu = 0.5$, 人的质量为 M , 重力加速度为 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, 摩擦力为 $F_f = \mu Mg$, 风力: $F = \Delta P \times S$ 。当风力与摩擦力进行矢量的相叠加之后, 所得出的力即为合力, 也就是“吸力”或“推力”。同时根据摩擦力的定义可以分析得出, 人在列车经过时是否会被“吸走”或“推开”是由于风力的大小能否超过摩擦力的大小决定的。所以可以将摩擦力的最大值看作一个阈值。

假设男性的平均体重为 72.4 kg , 平均体积为 0.05 m^3 , 则 $M = 70 \text{ kg}$, 从而产生最大摩擦力 $F_{f_{\max}} = \mu Mg = 354.76 \text{ N}$, 故对于男性而言, 阈值为 354.76 N 。

同时将计算出的阈值代入数学模型的代码中得到风速与铁路标线距离的可视化关系图如图 4 所示。

图 4 横轴为风速(单位: 千米/小时), 纵轴平台距离(单位: 毫米), 将图 4 与图 3 进行比较, 可以得到当列车型号分别为 CRH380A、CRH3、CRH5、CRH2E 即车速分别为 350 km/h 、 300 km/h 、 250 km/h 、 200 km/h , 时的铁路安全标线距离分别为 14 m 、 8.85 m 、 3.75 m 、 0 m 。

又假设女性的平均体重为 55.7 kg , 平均体积为 0.05 m^3 , $M = 55 \text{ kg}$, 产生的最大摩擦力 $F_{f_{\max}} = \mu Mg = 269.5 \text{ N}$, 故对于女性而言, 阈值为 269.5 N 。

将阈值代入数学模型的代码中并与上文的可视化图表进行对比也可得到相应的铁路安全标线距离。本文还对成年男性女性体重的最大值和最小值做了相应的拓展, 其铁路安全标线距离如表 4。

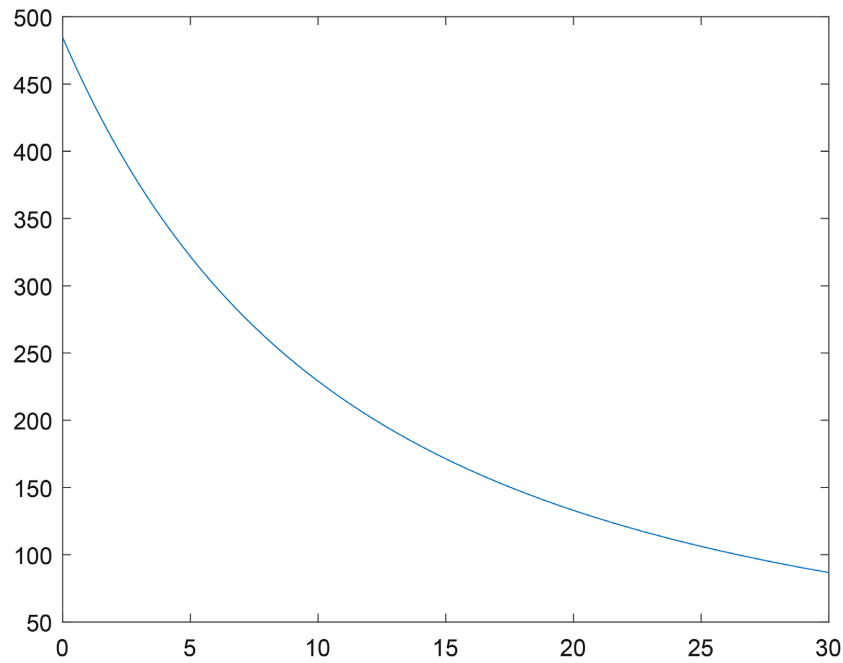


Figure 4. Wind speed and railway marking distance
图 4. 风速与铁路标线距离

Table 4. Adult male and female weight railway safety marking distance table
表 4. 成年男性女性体重铁路安全标线距离表

性别	体重/(kg)	车速/(km/h)				
		350	300	250	200	
男	最大值	74.3	13.5	8.4	3.35	0
	平均值	72.4	14	8.85	3.75	0
	最小值	70.4	14.5	9.3	4.1	0
女	最大值	60.8	17.35	11.7	6.1	0.45
	平均值	58.8	17.9	12.2	6.5	0.8
	最小值	55.7	19.1	13.2	7.35	1.45

由上表可知，当车速为 200 km/h 时，对于成人来说，安全标线应该以体重较轻的女性为标准，所以安全标线应设置为 1.5 m；以此类推，在车速为 250 km/h 时，标线的设定应为 7.35 m；当车速为 300 km/h 时，标线应在 13.2 m 处；当车速在 350 km/h 时，标线应在 19.1 m 处(注：在实际生活中列车进入站台时若车速达到 250 km/h，应在站台上加装护栏)。

本文还考虑到老人和婴幼儿的情况，通过上述方法得到的铁路安全标线距离表如表 5 所示。
同理可得，对于幼儿来说，在进站车速为 200 km/h 时，安全标线应设置为 5.7 m；以此类推，在车速为 250 km/h 时，标线的设定应为 12.7 m；当车速为 300 km/h 时，标线应在 19.7 m 处；当车速在 350 km/h 时，标线应在 26.6 m 处。

Table 5. Railway safety mar distance table introducing weight of old people and children
表 5. 引入老人小孩体重铁路安全标线距离表

性别	体重/(kg)	车速/(km/h)				
		350	300	250	200	
男	最大值	23.1	18.1	12.4	6.7	0.9
	平均值	19.8	21.2	15	8.9	2.75
	最小值	16.4	25.6	18.9	12.1	5.2
女	最大值	21.9	19.2	13.3	7.4	1.5
	平均值	18.9	22.4	16	9.8	3.4
	最小值	15.8	26.6	19.7	12.7	5.7

3.4. 智能安全标线

同时为了达到安全标线的设置的智能化，该技术利用传感器、高清摄像头等设备，实现对铁路安全标线的实时监测与预警功能。该技术具有以下几个特点：一是实时性，能够迅速感知列车进站时的车速并做出提醒；二是动态性，可根据乘客的重量、体积等因素自动调整标线状态；三是智能化，能够自动识别乘客是否已经超出安全标线的距离并发出预警。智能安全标线技术将广泛应用于铁路、城市道路、高铁道等交通场景。

智能安全标线作为现代交通管理的重要组成部分，对于提升交通管理水平和降低事故率具有重要意义。通过持续创新和技术突破，智能安全标线将在未来发挥更加重要的作用。

4. 结论

本文以回归数据处理为基础，建立改进的伯努利模型，通过输入数据即可判断出观察点所受的力和风速，就可以判断出是否安全，具有很好的应用性，准确性和实践性。文中所建立的数学模型，物理基础坚实，通过运用一些时间的物理公式，如动态压力和人体所受到的风压力，人体表面积的计算。在该模型中，可以对题中提供的数据进行合理分析，而且该模型可以非常容易地适应不同的参数，如列车的速度、列车与人之间的距离以及人体的参数等。同时通过 MATLAB 代码仿真的可视化更加清晰地看到不同条件对数据的影响，从而精确而有效地确定可能的地点位置是否安全，节省时间且判断准确。本文通过分类研究得出标线的安全设置距离，比如通过感应器，当不同体重的人踩上去的瞬间会获得相应的智能标线。但在进行数学建模的过程中，本文做了一些假设，比如假定列车的侧面为平滑的，忽略由于窗户、门和其他结构造成的气流细节变化，从而简化气流模型，这可能在一些实际场景当中是不够准确的，所提出的模型具有一定的局限性，因此今后可以进一步优化研究。

基金项目

本文由教育部产学合作协同育人项目 2023 年批次项目(项目编号: 230828424907023)、辽宁省教育厅 2024 高校基本科研项目(序号 25)和沈阳工程学院 2024 年大学生创新项目(项目编号: D202404171521260958)支持。

参考文献

[1] 国家体育总局. 国家国民体质监测中心发布《第五次国民体质监测公报》[EB/OL].

<https://www.sport.gov.cn/n315/n329/c24335066/content.html>, 2024-05-28.

- [2] 郗艳红. 横风作用下的高速列车气动特性及运行安全性研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [3] 吴礼斌, 李柏年. 数学实验与建模[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [4] 叶其孝, 姜启源. 数学建模[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [5] 卓金武. MATLAB 在数学建模中的应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
- [6] 刘来福. 数学建模方法与分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [7] 熊小慧, 汪欣然, 张洁, 等. 升力翼对高速列车列车风与尾流特性的影响[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(3): 148-161.
- [8] 郭晨. 风浪联合作用下车桥动力响应研究及概率安全评估[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- [9] 彭益华. 风雨/冰作用下高速列车与斜拉桥耦合振动研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2022.

着舰路径对舰载直升机起降安全影响研究

薛 敏¹, 赵鹏程², 徐东东², 李 通², 温其穆²

¹海军装备部项目管理中心, 北京

²中国船舶集团有限公司系统工程研究院, 北京

收稿日期: 2024年8月21日; 录用日期: 2024年8月30日; 发布日期: 2024年9月29日

摘 要

机舰耦合流场中存在着涡-涡干扰, 是一个复杂紊乱的非定常流场, 舰载直升机在不同着舰路径上必然会受到不同程度的影响, 进而限制舰载直升机的起降能力。现基于简化护卫舰和UH-60直升机的耦合模型, 结合计算流体力学和直升机飞行动力学, 对不同着舰路径(正后方进场、斜向进场、横向进场)下的直升机起降风限图特征进行分析研究。结果显示, 三种进场方式中, 正后方进场风限图包络最大、横向进场风限图包络最小; 斜向进场方式下, 当进场方向、机头朝向和甲板风方向一致时, 风速边界最大。建议直升机优先选择正后方进场, 若采用斜向进场时, 直升机进场方向、机头朝向尽量和甲板风方向保持一致。

关键词

计算流体力学, 飞行动力学, 舰载直升机, 风限图, 着舰路径

Research on the Impact of Landing Path on the Safety of Takeoff and Landing for Shipborne Helicopter

Min Xue¹, Pengcheng Zhao², Dongdong Xu², Tong Li², Qimu Wen²

¹Project Management Center of Naval Equipment Department, Beijing

²Systems Engineering Research Institute, CSSC, Beijing

Received: Aug. 21st, 2024; accepted: Aug. 30th, 2024; published: Sep. 29th, 2024

Abstract

There is vortex interference in the coupled flow field between helicopter and ship, which is a complex and turbulent unsteady flow field. Shipborne helicopter will inevitably be affected on different

文章引用: 薛敏, 赵鹏程, 徐东东, 李通, 温其穆. 着舰路径对舰载直升机起降安全影响研究[J]. 流体动力学, 2024, 12(3): 45-54. DOI: 10.12677/ijfd.2024.123005

landing paths, thereby limiting their takeoff and landing capabilities. Based on a simplified coupling model of frigate and UH-60 helicopter, combined with computational fluid dynamics and helicopter flight dynamics, the characteristics of helicopter's candidate flight envelope under different landing paths (stern approach, oblique approach, lateral approach) are analyzed and studied. The results showed that among the three approach methods, the candidate flight envelope for stern approach was the largest, and that for lateral approach was the smallest. For the oblique approach, the maximum wind speed boundary occurs when the directions of approach, heading and wind-over-deck are consistent. It is recommended that helicopters prioritize stern approach. If using oblique approach, the direction of approach and heading should be as consistent as possible with the direction of wind-over-deck.

Keywords

Computational Fluid Dynamics, Flight Dynamics, Shipborne Helicopter, Candidate Flight Envelope, Landing Path

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

舰船甲板是舰载直升机在海上作业的主要平台，而甲板上的流场比较复杂，当舰船运动时，上层建筑后方会产生不均匀的尾流场，常常出现流动分离、回流、旋涡等流动现象。特别是对于护卫舰/驱逐舰，其飞行甲板位于机库后方，流动受机库和上层建筑阻挡，在背风处形成涡流区，同时产生了不稳定的分离剪切层，如图 1 所示。如果直升机在起降过程中陷入回流区，旋翼气动力会受到涡流的扰动，可能会导致飞行事故。且舰船甲板区域较小，增加了舰载直升机起降的危险性，所以必须结合甲板上的空气流场特性，对舰载直升机起降过程中的飞行安全边界问题有一个清楚的认识。

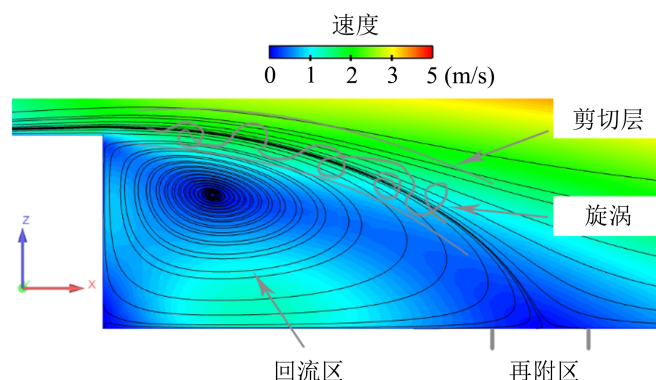


Figure 1. 2D flow structure after hangar
图 1. 机库后方二维流动结构

早期研究中，研究人员以通过计算直升机操纵余量得到的起降风限图作为舰载直升机起降安全边界的主要依据。起降风限图规定了该型舰载直升机在该型舰船上起降时允许的最大风况(风向、风速)、舰船运动幅值(横摇、纵摇)。Bogstad [1]和 Roper [2]等通过 CFD 方法获得舰船尾流场信息，将其作为输入开

展直升机动力学特性计算,得到了舰载直升机操纵余量的变化。Roper 等人[2]通过 CFD 方法得到了大量的不同风向角下的流场数据,以此数据为基础,结合到 FLIGHTLAB 飞行模拟环境,在利物浦大学的全运动飞行模拟器得到飞行试验数据,最后利用不同风向角下的飞行载荷和控制裕度来计算山猫直升机在 SFS2 上的风限图。Lee 等[3]以全尺寸的 UH-60A 直升机和 LHA 舰船,研究了直通甲板流场对舰载直升机飞行特性的影响,从结果可以看出尾流场对飞行员操作的干扰。

唐宏清等人[4]将关于直升机操纵量、姿态角和功率的判据引入直升机舰面起降飞行动力学模型,建立风限图计算模型;然后进行舰面悬停平衡仿真,获得了某型无人直升机的舰面悬停风限图。潭文渊等人[5]针对 CG-47 提康德罗加级巡洋舰搭载 UH-60“黑鹰”直升机的机舰组合进行了流场仿真,并结合飞行力学模型计算了直升机操纵量和姿态角,得到了理论风限图。结果表明:滚转角及周期变距操纵量均随来流速度增加,俯仰角则受到来流和舰上建筑的多重影响。贺少华等人[6]提出了舰载直升机理论风限图飞行模拟获取方法,认为通过起降飞行模拟试验获取理论风限图,结合少量的海上实装飞行验证试验是一种综合较优的方法。可以更加有效和安全地指导海上实装飞行验证试验,最终获得实用风限图。左清宇等人[7]以 UH-60A 直升机和 SFS2 舰船为研究对象,进行了单机的耦合 CFD 方法的全机配平分析,验证了配平方法的可行性。然后引入了直升机安全着舰判据,利用耦合 CFD 的配平方法和安全着舰判据,计算了该机/舰组合的理论着舰风限图。胡楚君等人[8]基于动量源方法,建立了舰载直升机着舰风限图计算的新模型,以旋翼操纵量、尾桨操纵量、直升机姿态角和全机需用功率为判断标准,给出了某型直升机的着舰风限图。

以上研究均为分析舰载直升机起降安全边界提供了良好的基础,但大都侧重于分析舰载直升机在典型位置处的飞行特性,而针对舰载直升机着舰路径的影响研究较少,使得以往研究成果对指导舰载直升机采用何种着舰方式时存在一定局限。因此,本文开展着舰路径对舰载直升机起降安全影响研究,结合直升机飞行力学模型和舰船 CFD 流场模型,形成舰机适配过程中起降安全边界的计算方法。然后基于该方法,研究分析着舰过程中不同着舰路径下直升机风限图的变化特征,以期望得出一些对直升机着舰路径有指导性的结论。

2. 计算方法

2.1. 流场数值计算方法

本文使用计算流体力学软件 Fluent 对流场进行非定常数值计算。由于舰船的速度较慢,其甲板上的流动为低速不可压流动,所以给出不可压流动的控制方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{D\mathbf{V}}{Dt} + \nabla P = \mathbf{F} \quad (2)$$

上述方程中(1)式为连续方程,其中 $\mathbf{V}$ 为速度矢量,(2)式为动量方程,其中 D/Dt 为物质导数,描述运动流体微团的某个量随时间的变化率, ρ 为流体的密度, P 为流体所受的压强大小, $\mathbf{F}$ 为粘性力矢量。采用雷诺平均方法中的 $k-e$ 湍流模型来封闭方程,选择基于压力的 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation)算法对上述方程展开计算。

2.2. 风限图计算方法

影响直升机舰面安全起降的因素有很多,复杂的舰船舰流场、严苛的起降甲板条件以及多变的海洋环境等。根据目前国内外的理论及试验研究表明,影响直升机舰面安全起降的主要因素包括直升机特性、舰船舰流场和驾驶员选择的舰面起降轨迹三个方面。通过 CFD 计算得到舰船舰流场数据作为不同着舰轨

迹的风限图计算的环境数据,以直升机特性作为直升机舰面起降风限图的客观判据。直升机特性主要受姿态角(滚转角、俯仰角)、操纵量(纵向向操纵、总距和尾桨变距)以及发动机功率限制。针对本文选择的UH-60直升机及简化护卫舰模型,选定以下约束条件作为直升机起降风限图的客观判据[9]:

判据一:在直升机着舰过程中,直升机俯仰角前倾不超过 4° ,后倒不超过 7° ;

判据二:在直升机着舰过程中,直升机滚转角不超过 8° ;

判据三:在直升机着舰过程中,直升机纵向周期变距、横向周期变距、总距和尾桨变距剩余操纵量不小于10%;

判据四:在直升机着舰过程中,发动机剩余功率不小于10%。

本文使用风限图计算软件建立舰船模型和直升机飞行动力学模型,将舰艏流场数据加载到直升机模型中进行气动配平计算,根据起降风限图判据最终得到该舰机组合下的起降风限图。其具体流程如图2,具体过程如下:

1) 从风向角 -90° (左舷来流为负,右舷来流为正),风速5节开始计算,通过配平计算得到直升机7个判据参量,与上述判据进行对比,判断7个参量是否超出。若未超出,进入下一步;若超出,则认为该风向并不适合直升机进行舰面起降。

2) 保持风向不变,风速增大5节,重新进行直升机舰面起降仿真计算并与判据进行对比,直至7个参量中出现超出判据范围,停止计算并进入下一步。

3) 判断风向角是否大于 90° (本文仅计算左舷 90° 至右舷 90° 甲板风范围)。若是,则停止终止计算;若否,将风向角增加 15° ,重复步骤1)、2)。

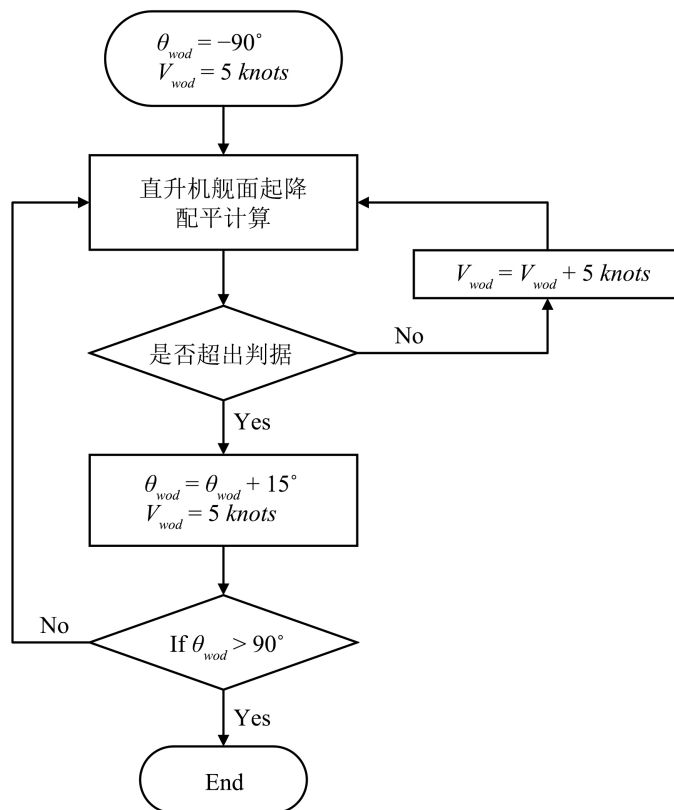


Figure 2. Procedure of calculation

图2. 风限图计算流程

3. 计算模型

3.1. 舰船模型

为了开发一个舰船尾流验证数据库，国外提供了高度简化的护卫舰(SFS/SFS2)几何模型[10]。本文的舰船几何模型采用 SFS2 外形，如图 3 所示，为了满足本文计算需要，在 SFS2 模型基础上，增加了舰船的总长度和甲板的宽度，是一种改进的 SFS2 模型，称为 MSFS2，其船长约 180 米，甲板长约 27 米，宽约 20 米。建模坐标系原点位于舰首，X 轴由舰尾指向舰首，Y 轴指向右舷，Z 轴指向海面。

流场计算域划分如图 4 所示，其中绿色区域为整个远场区域，红色区域为舰船附近的网格加密区域。计算网格如图 5 所示，使用非结构网格生成流场域，舰船附面层为棱柱网格，总的网格单元数大约 450 万，其中舰船周围和机库后方尾迹区进行了加密处理。

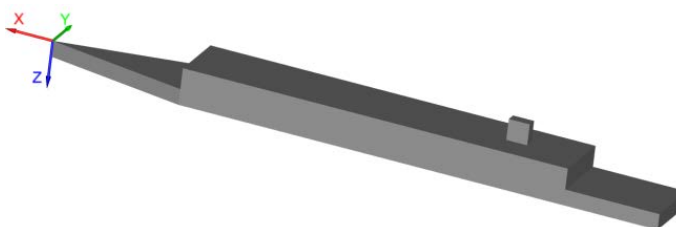


Figure 3. Schematic of MSFS2
图 3. 舰船模型示意图

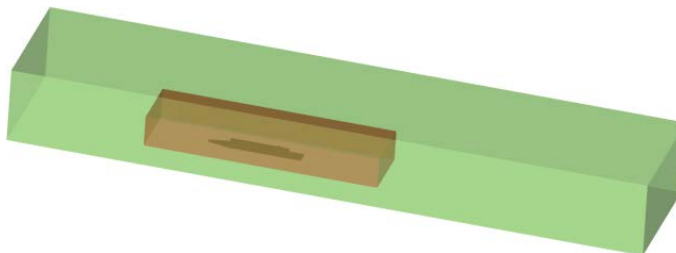


Figure 4. Schematic of flow field
图 4. 流场域划分示意图

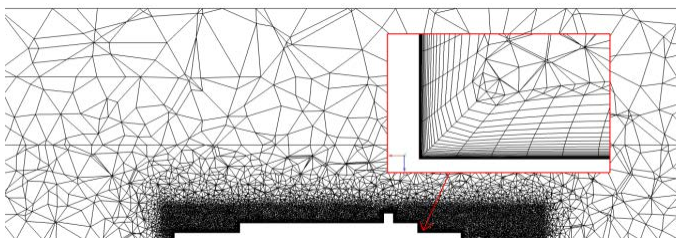


Figure 5. Schematic of mesh
图 5. 计算网格示意图

3.2. 直升机模型

建立 UH-60 直升机的模型主要包括：结构建模(旋翼、机身)、气动载荷建模(旋翼、气动面和机身)、诱导速度动力学、发动机模型、飞行控制系统模型等。本文采用 Peters-He 有限状态动态入流理论建立旋翼诱导速度模型，该模型是基于非定常动态尾迹计算旋翼的诱导速度分布情况：

$$v_i(\bar{x}, \psi, t) = \sum_{r=0}^N \sum_{j=r+1, r+3, \dots}^{2S_r+r-1} \psi_j^r(\bar{x}) [\alpha_j^r \cos(r\psi) + \beta_j^r \sin(r\psi)] \quad (3)$$

其中, N 为需要的谐波次数, S_r 表示对于每个谐波函数所需要的径向基函数的个数, $\psi_j^r(\bar{x})$ 则是径向基函数, α_j^r 和 β_j^r 是旋翼入流中的状态变量。

3.3. 着舰模型

由于舰面起降空间狭小, 舰艉流场环境复杂等因素, 不同直升机及舰船有各自的着舰路径。常见的直升机着舰方式包括: 舰尾正后方进场着舰、斜向进场着舰和横向进场着舰等, 如图 6 所示。本文针对以上三种进场方式进行风限图计算分析, 其中斜向进场着舰分为左舷 $30^\circ/60^\circ$ 和右舷 $30^\circ/60^\circ$ 四个进场路径, 横向进场着舰分为左舷横向着舰和右舷横向着舰。

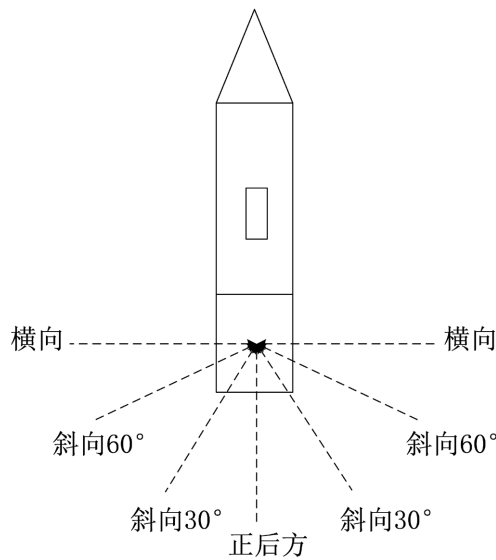


Figure 6. Schematic of different landing paths for helicopters
图 6. 直升机不同进场方式示意图

1) 正后方进场着舰

- 直升机前飞至舰尾正后方指定位置(甲板后方 60 米处);
- 直升机按照 3° 下滑角开始下滑接近起降点上方;
- 后方进场到达起降点指定悬停高度(3 米)后, 保持悬停。

2) 斜向进场着舰

- 直升机到达左舷(右舷)指定位置(横向距离起降点 18 米, 纵向距离起降点后方 $(18 \times \cot\theta)$ 米处, 其中 θ 是斜向着舰方向, 本文 $\theta = 30^\circ, 60^\circ$);
- 直升机机头方向与斜向进场着舰路径方向 θ 保持一致飞向起降点上方;
- 达到起降点上方指定悬停高度(3 米)后, 保持悬停。

3) 横向进场着舰

- 直升机到达左舷(右舷)指定位置(距离舰船中心线 18 米);
- 直升机机头方向与船艏保持一致;
- 横向进场达到起降点指定悬停高度(3 米)后, 保持悬停。

4. 结果分析

基于上述建立的直升机风限图计算模型,以 UH-60 直升机和 MSFS2 舰船组合模型为例,对于 7 种着舰路径进行计算,得到如图 7~13 的风限图。

4.1. 正后方进场

从图 7 可以看出,舰艇着舰风限图的左右不对称性说明 UH-60 针对左右舷甲板风的着舰能力是不同的。这是由于 UH-60 直升机是右旋旋翼,尾桨产生向右的拉力平衡反扭矩,对于小风向角(0° 至 30°),当左舷来风时,桨叶迎角相对增大,尾桨拉力增大,相当于增大尾桨总距,则剩余尾桨操纵余量更多;右舷来风则相反。因此,在小风向角下, UH-60 直升机抗左侧风的能力更加突出。对于大风向角(30° 至 90°),当左舷来风时,尾桨容易进入涡环状态,因此风限图的左边界小于右边界,抗右侧风的能力较强。

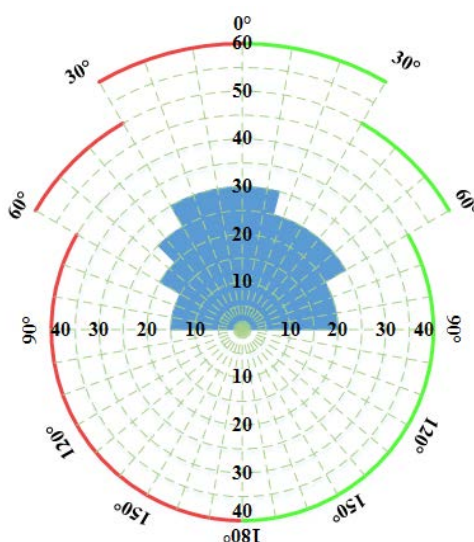


Figure 7. Candidate flight envelope of stern
图 7. 正后方进场着舰风限图

4.2. 斜向进场

与正后方进场相比,斜向进场着舰路径下整体的风限图包络面积进一步减小,说明 UH-60 直升机在该进场方式下的起降能力受到一定的限制,大部分工况不利于 UH-60 直升机在 MSFS2 舰船上起降。以左舷 60° 方向进场为例,虽然在 60° 风向下的风速边界达到 50 节,远超于正后方进场和横向进场下的风速边界,但是风向包络仅在右舷 30° 至 90° 之间,可起降的安全范围极其有限。

在斜向进场方式下,当直升机处于顶风状态时,即进场方向、机头朝向和甲板风方向一致,此时进场方向上基本不受机库等上层建筑的阻挡,相比正后方进场的顶风状态,该进场路径上未形成明显紊乱的涡流区,因此其风速边界最大。对于左舷进场,当甲板风从机身左侧吹来时,直升机处于机库等上层建筑的涡流区,因此在该甲板风状态下,直升机的着舰能力明显下降。同样地,对于右舷进场,当甲板风从机身右侧吹来时,直升机着舰能力明显下降。

通过对比图 8 和图 10 (图 9 和图 11),可以发现直升机在左舷 60° 进场、顶风状态下的风速边界大于左舷 30° 进场、顶风状态下的风速边界。这是由于左舷 60° 进场路径上相对干净,受机库等上层建筑带来的涡流区影响较小,因此直升机的操纵余量较为富裕,能够得到较大的风速边界。

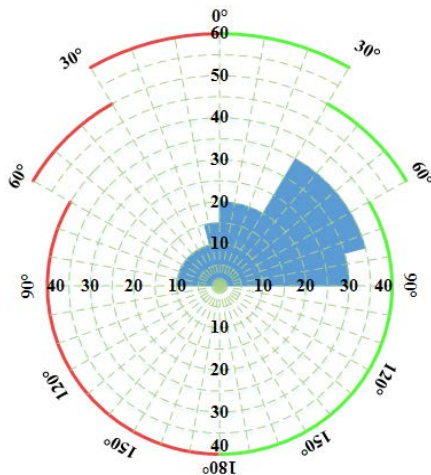


Figure 8. Candidate flight envelope of -30°
图 8. 左舷 30° 斜向着舰风限图

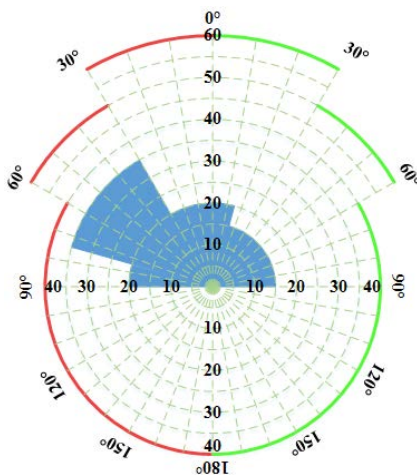


Figure 9. Candidate flight envelope of 30°
图 9. 右舷 30° 斜向着舰风限图

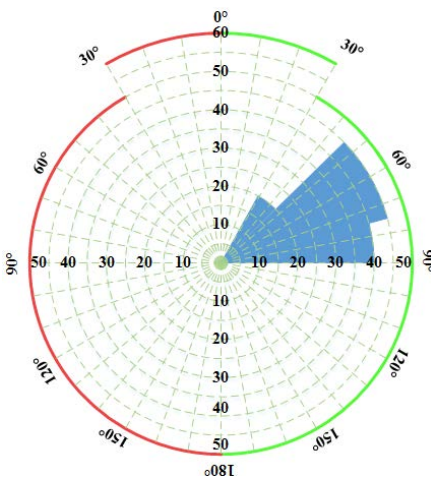


Figure 10. Candidate flight envelope of -60°
图 10. 左舷 60° 斜向着舰风限图

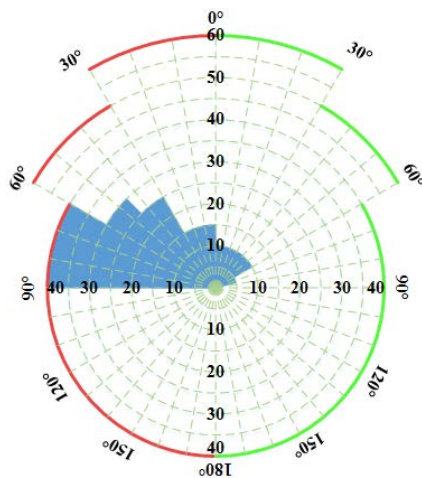


Figure 11. Candidate flight envelope of 60°
图 11. 右舷 60°斜向着舰风限图

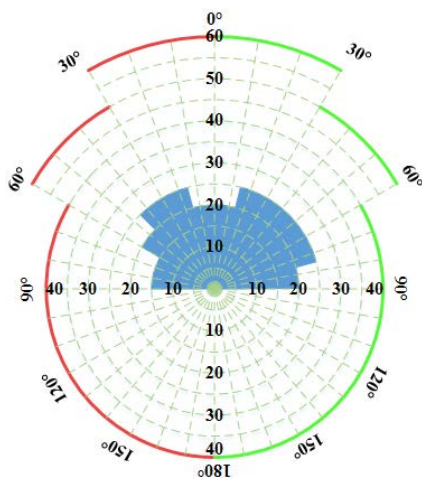


Figure 12. Candidate flight envelope of port
图 12. 左舷横向着舰风限图

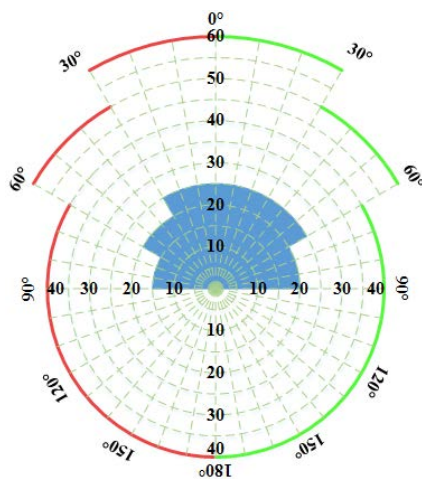


Figure 13. Candidate flight envelope of starboard
图 13. 右舷横向着舰风限图

4.3. 横向进场

对于 UH-60 直升机和 MSFS2 舰船组合, 采用横向进场着舰方式风限图的风速边界明显减小(最大风速为 25 节)。由于机头始终和舰船前行方向保持一致, 直升机为侧飞状态飞向起降点上方, 相比于正飞状态(机头方向和进场方向一致), 直升机的姿态角更加容易受到舰船尾流的影响, 相比于正后方进场和斜向进场, 该方式下进场着舰时直升机更容易超出姿态角限制。

5. 结论

本文基于计算流体力学和直升机飞行动力学开展舰载直升机 7 种不同着舰路径对其飞行特性的影响研究, 通过对比不同路径下的起降风限图, 得到结论如下:

- 1) 在正后方进场路径下, 小风向角时 UH-60 直升机抗左侧风的能力更加突出, 而大风向角时抗右侧风的能力较强。
- 2) 在斜向进场方式下, 建议直升机顶风进场, 即进场方向、机头朝向和甲板风方向一致, 此时风速边界较大; 进场方向角度越大, 风速边界越大, 但整体风限图包络较小。
- 3) 在横向进场方式下, 由于直升机为侧飞状态, 得到的风限图包络最小。

参考文献

- [1] Bogstad, M.C., Habashi, W.G., Akel, I., Ait-Ali-Yahia, D., Giannias, N. and Longo, V. (2002) Computational-Fluid-Dynamics Based Advanced Ship-Airwake Database for Helicopter Flight Simulators. *Journal of Aircraft*, **39**, 830-838. <https://doi.org/10.2514/2.3003>
- [2] Roper, D.M., Owen, I., Padfield, G.D. and Hodge, S.J. (2006) Integrating CFD and Piloted Simulation to Quantify Ship-Helicopter Operating Limits. *The Aeronautical Journal*, **110**, 419-428. <https://doi.org/10.1017/s0001924000001329>
- [3] Lee, D., Horn, J., Sezer-Uzol, N. and Long, L. (2003) Simulation of Pilot Control Activity during Helicopter Shipboard Operations. *AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit*, Austin, 11-14 August 2003, 1-11. <https://doi.org/10.2514/6.2003-5306>
- [4] 唐宏清, 肖升兴. 某型无人直升机舰面悬停风限图计算[J]. 科技创新与应用, 2020(36): 19-21.
- [5] 谭文渊, 曹义华. 基于嵌套网格的舰载直升机流场仿真及风限图计算[J]. 航空动力学报, 2020, 35(10): 2166-2175.
- [6] 贺少华, 谭大力, 颜世伟. 舰载直升机理论风限图飞行模拟获取方法[J]. 海军航空工程学院学报, 2020, 35(3): 271-276, 284.
- [7] 左清宇, 徐国华, 史勇杰. 基于 CFD 方法的舰载直升机着舰风限图计算[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(2): 227-233.
- [8] 胡楚君, 安强林, 王晓成. 舰载直升机着舰风限图计算[J]. 科技导报, 2019, 37(13): 70-75.
- [9] 吉洪蕾. 直升机舰面起降风限图与驾驶员操纵负荷研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2017: 85-87.
- [10] Forrest, J.S. and Owen, I. (2010) An Investigation of Ship Airwakes Using Detached-Eddy Simulation. *Computers & Fluids*, **39**, 656-673. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2009.11.002>



Call_for_Papers

International Journal of Fluid Dynamics

流体动力学

国际中文期刊征文启事

<https://www.hanspub.org/journal/ijfd>

ISSN 2328-0557 (Print) ISSN 2328-0549 (Online)

《流体动力学》是一本关注流体动力学领域最新进展的国际中文期刊，主要刊登流体动力学领域最新技术及成果展示的相关学术论文。支持思想创新、学术创新，倡导科学，繁荣学术，集学术性、思想性为一体，旨在给世界范围内的科学家、学者、科研人员提供一个传播、分享和讨论流体力学领域内不同方向问题与发展的交流平台。该期刊由汉斯出版社出版，全球发行，中国教育图书进出口公司负责引进及在中国内地的销售。现诚邀相关领域的学者投稿。

主编

魏进家

西安交通大学教授

Prof. Jinjia Wei

Xi'an Jiaotong University

投稿领域：

流体力学	Hydromechanics
理论流体力学	Theoretical Hydrodynamics
水动力学	Hydrodynamics
气体动力学	Gas Dynamics
空气动力学	Aerodynamics
悬浮体力学	Suspension Mechanics
湍流理论	Turbulence Theory
粘性流体力学	Viscous Fluid
多相流体力学	Multiphase Fluid Dynamics
渗流力学	Fluid Mechanics
物理-化学流体力学	Physical-Chemical Hydrodynamics
等离子体动力学	Plasma Dynamics
电磁流体力学	Electromagnetic Hydrodynamics
非牛顿流体力学	Non-Newtonian Fluid Mechanics
流体机械流体力学	Fluid Machinery Fluid Mechanics
旋转与分层流体力学	Rotation and Stratified Fluid Dynamics
辐射流体力学	Radiation Hydrodynamics
计算流体力学	Computational Fluid Dynamics
实验流体力学	Experiments in Fluid Mechanics
环境流体力学	Environmental Fluid Mechanics
微流体力学	Microfluidics
流体力学其他学科	Hydrodynamics Other Disciplines

论文检索：

本刊论文已被维普、万方、龙源期刊网、超星期刊、博看网、中国科学技术信息研究所--国家工程技术数字图书馆、长江文库、CALIS、Cornell University Library、Google Scholar、Journalseek、Open Access Library、Open J-Gate、PubScholar、Research Bible、Scilit、SHERPA/ROMEO、Worldcat等数据库收录。

征文要求及注意事项：

- 稿件务求主题新颖、论点明确、论据可靠、数字准确、文字精炼、逻辑严谨、文字通顺，具有科学性、先进性和实用性；
- 稿件必须为中文，且须加有英文标题、作者信息、摘要、关键词和规范的参考文献列表；
- 稿件请采用WORD排版，包括所有的文字、表格、图表、附注及参考文献；
- 从稿件成功投递之日起，在2个月内请勿重复投递至其他刊物。本刊不发表已公开发表过的论文。文章严禁抄袭，否则后果自负；
- 本刊采用同行评审的方式，审稿周期一般为5~14日。

欲了解更多信息请登录 <https://www.hanspub.org/journal/ijfd>

联系邮箱：ijfd@hanspub.org



流体动力学

主编：魏进家 西安交通大学教授

主办：汉斯出版社

编辑：《流体动力学》编委会

网址：<https://www.hanspub.org/journal/ijfd>

电子邮箱：ijfd@hanspub.org

出版：汉斯出版社