

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.272

引用格式:谢泽恩, 李嘉煜, 李加武, 等. 考虑风-浪耦合作用的近岸风参数分布特征[J]. 重庆大学学报, 2025, 48(6): 14-24.



考虑风-浪耦合作用的近岸风参数分布特征

谢泽恩¹, 李嘉煜², 李加武¹, 蔡松¹

(1. 长安大学公路学院, 西安 710064; 2. 中国铁路西安局集团有限公司, 西安 710054)

摘要:为研究近岸处风参数的分布特性, 基于 CFD (computational fluid dynamics) 技术, 建立了二维几何模型, 针对二维风作用在平静水面(初始状态)情况, 采用 SST $k-\omega$ 湍流模型以及多相流模型对其风参数的分布特性进行数值模拟, 开展了发展距离、水深、来流风速以及水底地形的坡度变化对风参数分布特征的变化特性分析。结果表明:当发展距离在 60 m 以内时, 风速在距离水面较近处大于入口风速, 呈现加速现象;当超过 60 m 后, 风速随着位置高度的增加而增加, 达到一定高度后, 速度大小保持不变;坡度变化对风参数的分布特征无影响;水深对风参数特征有着很强的相关性, 水深的增加会导致梯度风高度呈现非线性增加, 同时对风速有着较大的影响;入口风速大小对梯度风高度以及风结构形式无影响, 但会影响距离入口较近处的加速效果。

关键词:流体力学;数值模拟;波浪;风参数;气液二相流

中图分类号:O357.5

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2025)06-014-11

Distribution characteristics of near-shore wind parameters considering wind-wave coupling

XIE Zeen¹, LI Jiayu², LI Jiawu¹, CAI Song¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, P. R. China; 2. China Railway Xi'an Group Co., Ltd., Xi'an 710054, P. R. China)

Abstract: To investigate the distribution characteristics of wind parameters near shorelines, a two-dimensional geometric model is developed using computational fluid dynamics (CFD). The study employed the SST $k-\omega$ turbulence model and a multiphase flow model to simulate wind parameter distributions under the influence of two-dimensional wind over calm water. The effects of fetch distance, water depth, incoming wind speed, and underwater terrain slope on the distribution characteristics were analyzed. Results indicate that for fetch distances below 60 m, wind speed near the water surface exceeds the inlet wind speed, demonstrating an acceleration effect. Beyond 60 m, wind speed increases with height until stabilizing at a specific elevation. Terrain slope variations exhibit negligible effects on wind parameter distribution, while water depth shows strong correlations. Deeper water leads to a nonlinear increase in gradient wind height and significantly alters wind speed profiles. Although inlet wind speed does not affect gradient wind height or wind structure, it does impact the near-surface

收稿日期:2024-02-26 网络出版日期:2024-06-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51978077)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51978077).

作者简介:谢泽恩(1996—), 男, 博士研究生, 主要从事桥梁风工程方向的研究, (E-mail)xiezeen@chd.edu.cn。

通信作者:李加武(1971—), 男, 教授, 博士, (E-mail)ljw@gl.chd.edu.cn。

acceleration effect.

Keywords: fluid mechanics; simulation; waves; wind parameter; gas-liquid two-phase flow

跨海大桥广义是指在近岸、海湾、海岸线上的桥梁,该类桥梁所处的地形特点为通常有比较广阔的水域覆盖。现代跨海大桥具有主跨轻柔、阻尼小、刚度小等特点,这些特点会导致此类桥梁对所处的环境风荷载非常敏感。风浪荷载成为威胁跨海大桥安全的主要因素之一。如何精准描述近岸处风环境的风参数特征,并得到对应湍流风场对后续桥梁的动力响应研究具有重要意义。现阶段多数风浪模拟方法仍属于单相流范畴,并不能真正地体现出气液两相相互作用过程,也缺乏对桥梁所处位置处的气相流场描述。为了给后续跨海大桥的风荷载参数提供相应的设计依据,精准表述近岸处风环境参数的特性是非常必要的,也是研究海洋环境中风浪耦合效应以及进一步探究风浪耦合作用下跨海大桥动力响应特征影响规律的必要前提。在现场对风环境的实测方面,李加武等^[1]以喇叭口河谷地形为研究对象,发现与规范风剖面不同,该地区风剖面会出现加速现象。郝键铭等^[2]基于现场实测统计分析了沿海桥址区的风场平均风特性,发现紊流积分尺度呈现先迅速减小后趋于稳定的趋势。Cheynet等^[3]在挪威峡湾的风特性实测中发现测出风特性的湍流度远低于欧洲标准中的湍流度。Chen等^[4]采用激光雷达风廓仪对波动风场进行测量,发现台风经过前后的平均垂直风速和风攻角为负,但原因尚不完全清楚。曾庆国^[5]对沿海地区实测风速进行分析,发现风速大小不同时,平均风速剖面曲线也不相同。Jiang等^[6]认为在大跨度桥梁的抗风设计中应多考虑风特性在高速风下的变化特征。因此,对海洋风环境的特性研究还有待进一步研究。

在海洋工程领域已有不少学者针对风生流作了相关研究。陈邦杆等^[7]认为风海流指在风作用下而产生的风对海水的应力而形成的一种稳定海流。匡翠萍等^[8]将已验证模型与6,8级风耦合,发现随风力等级的提高,风生流对潮流场的影响加剧。但桥梁抗风的研究重点在于风荷载作用在桥梁上的结构动力响应,在这方面的研究还尚显不足。为了更精准地描述风荷载,在考虑风-浪耦合作用下的风环境特征方面急需开展研究。

在数值分析方法上,Sengupta等^[9]对微暴流进行了试验和数值模拟,表明CFD(computational fluid dynamics)可以用于这种复杂流动的计算。Song等^[10]基于CFD仿真模拟对比不同的湍流模型发现,SST $k-\omega$ 模型计算精准度高出其他模型20%。Zhu等^[11-12]提出一种近海桥梁附近风浪场的数值模拟方法,并提出了一个数值方案来模拟飓风事件期间沿海细长桥梁周围的非平稳风浪场。李永乐等^[13]建立了波浪-风-列车-桥梁动力模型,发现桥梁受波浪影响严重。同时计算了风浪作用下的车辆响应和桥梁响应。房忱等^[14]计算了大跨度跨海桥梁的车-桥体系在波浪作用下的动力响应,但并没有考虑波浪与风耦合后的风场对大跨度桥梁的影响。李国亮等^[15]基于工程经验,提出了适用于杭州湾大桥栈桥的风、浪、流荷载计算方法。为更加真实地模拟大跨度桥梁因风荷载产生的动力响应,对风浪场的研究应更加的细致化。综上所述,现阶段对风浪的研究更多的是关于波浪本身或风环境实测的简单统计分析,对于影响风浪耦合后的近岸处风环境的风参数特征的因素研究较少。鉴于此,笔者采用计算流体力学软件FLUENT中VOF模型,进行初步的二维风浪耦合模拟。在考虑静止水域的前提下模拟不同水深、不同入口风速以及不同坡度下的情况下近岸处的风参数分布特征,为工程应用提供参考。

1 数值模拟方法

1.1 VOF模型

VOF(volume of fluid model)方法是建立在欧拉网格下的界面追踪的方法,该方法主要用于互不相容的流体的模拟计算。在该方法中,2种或多种互不相容的流体组分共用一套动量方程,并通过引入体积分数这一变量来实现对计算域内的相间界面追踪。通过定义两相之间的表面张力,再使用求出体积分量急剧变化的点来确定界面的位置。VOF模型采用的是欧拉法来进行求解,对于分层或者自由表面流动有着精准的适用性。对于水域处的风环境,需要精准地对空气来流与水进行分层计算,所以VOF模型是适合用于计算水

域处的多相流模型。

1.2 湍流模型

SST $k-\omega$ 模型是湍流模型的一种,是对湍流动能 k 和特定耗散率 ω 两运输方程进行求解,即

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k + G_b, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega + G_{\omega b}, \quad (2)$$

式中: G_ω 表示特定耗散率的产生; G_b 表示 k 和 ω 扩散率; Y_k 、 Y_ω 分别表示由湍流引起的 k 和 ω 的耗散。

一般标准 $k-\omega$ 模型以及 BSL 模型都没有考虑到湍流剪切应力的传输问题,导致无法正确地预测壁面的分离问题,相对这 2 种模型, SST 模型考虑了在湍流黏度里湍流剪切应力的传输。因研究目的是模拟气液两相之间的相互耦合作用,对两相交界面传输流动的精度要求更高,故选用 SST $k-\omega$ 模型。

1.3 几何模型

与以往学者设置的 VOF 模型不同,本研究的目的在于探究水域处的影响因素,也为简化模型,不考虑水相自身的波高以及波长,采用静止水域作为模型的下部研究对象。波浪由空气与水的相互作用而形成,同时,也考虑了该波浪与来流风场耦合形成的特殊风环境。参考 Cao 等^[16]通过对简化水波上完全发展的湍流边界层进行大涡模拟,研究了水波上平均风速和脉动风速的垂直廓线。由于计算域中水平方向各向同性,取二维垂直面进行研究。模拟均匀流空气按一定速度从水域上方经过的过程,研究对象包含气相和液相两个部分,同时考虑到重力作用,在出口处设置坡度,可以使得液相在重力的作用下保持在计算域之内,而上方的气相可以随着压力出口溢出,通过此方法来提高计算结果的收敛速度。

参照尤韩炜等^[17]的模型设置,假定水域模型如图 1 所示。选取近水岸处长 200 m,水深 20 m,空气高度 30 m 的梯形作为简化研究对象。入口设置为速度入口,分别设置气相不同初始速度,液相采用统一的初始速度 0 m/s。上方设置为压力入口模拟上方气体提供的压力,右侧设置为压力出口,可以使得气相可以随着压力出口溢出。下侧斜坡以及底面设置为壁面用于简化模拟近岸处水域地形变化。

1.4 网格划分及参数设置

按照结构化网格进行划分,因重点是关注整体风环境以及水域波浪的产生,即整体环境都为重点关注对象,故暂不设置网格加密区,下垫层为陆地时所要考虑的近壁面边界层网格也暂不做考虑,划分最小网格尺寸为 0.5 m,网格划分如图 2 所示。



图 1 模型示意图

Fig. 1 Model diagram

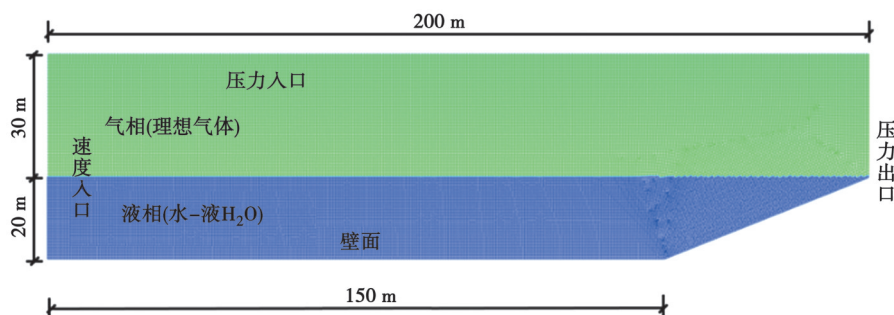


图 2 网格划分示意图

Fig. 2 Meshing diagram

该模拟采用 FLUENT 中 VOF 方法,黏性模型设置为 $k-\omega$ 模型。在材料中添加 FLUENT 数据库中的 water-liquid($\text{H}_2\text{O}<1$)作为液相,密度为 998.2 kg/m^3 ,黏度为 $1.003\times 10^{-3}\text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$;气相采用常规 air 材料,密度为 1.225 kg/m^3 ,黏度为 $1.789\times 10^{-5}\text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$;对气相与水相之间添加表面张力模型,表面张力系数为 0.072 N/m ;重力加速度设为 9.81 m/s^2 。

2 结果与分析

2.1 距离的影响

考虑水域对风剖面的发展距离的影响,风参数也会随着发展距离的增加而变化。为更好地控制变量,选取模型前 150 m 作为研究对象,即水深相同部分作为研究对象。为更加明晰地探究发展距离的影响,选取不同位置处相同高度的速度进行分析。来流风作用在水面上,不同发展距离的特征风剖面如图 3 所示。图 3 中纵轴坐标 y/H 为以水面为基准的相对高程与气相总高度的比值。

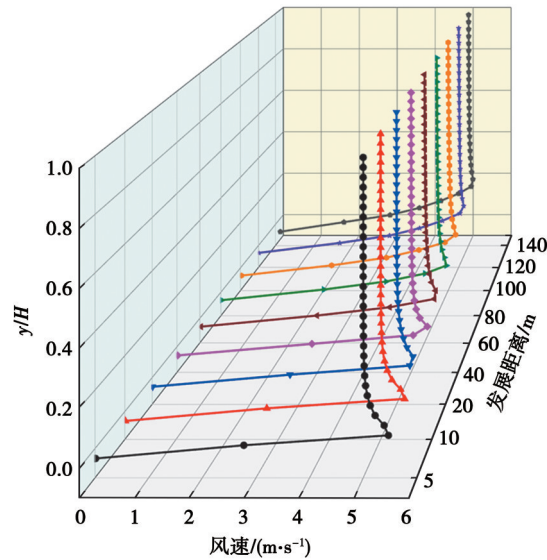


图 3 风剖面结构形式
Fig. 3 Profile structure form

由图 3 可知,随着发展距离的增加,风剖面的结构形式也在发生变化。当发展距离小于 60 m 时,风剖面结构形式表现为下部出现明显尖点,即在较低高度处的风速大于其他位置处的风速。当发展距离为 60~100 m 时,在较低处高度处的风速略大于入口风速。超过 100 m 后,风剖面结构形式与规范中风剖面形式相同,呈现为风速随高度增加而逐渐增加,当达到一定高度时,随高度的增加,风速大小不产生变化。

不同发展距离下风参数的分布特征也不相同,将模拟计算结果按照不同距离对比,结果如表 1 所示。

表 1 不同发展距离计算结果对比
Table 1 Comparison of calculation results under different fetch distances

发展距离/m	最大速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	加速系数(U/U_0)	梯度风高度/m
5	5.47	1.09	7.46
40	5.25	1.05	12.54
100	5.12	1.02	16.61
140	5.11	1.02	16.61

通过表 1 可以看出,在入口风速为 5 m/s 的情况下,风速最大达到 5.47 m/s,加速系数为 1.09,梯度风高度为 7.46 m。随着发展距离的增加,加速效果逐渐减弱。在发展距离达到 100 m 时,风速达到 5.12 m/s,加速系数为 1.02,梯度风高度 16.61 m。在 140 m 时,风速以及梯度风高度与 100 m 处的情况相同。由此可见,当发

展距离超过 100 m 时,风速变化小于 5%,梯度风高度稳定在 16.61 m。

参考《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T3360-01—2018)中 A 类风场的高度为 300 m,且桥梁的设计基本风速 U_{s10} 为桥址处距离水面 10 m 高度处的风速值,即相对高度与总高度的比值为 1/30。选取模型相同位置处,即模型中气相高度的 1/30 处为研究对象,分别提取该位置高度处的风攻角以及相对风速比随着发展距离的变化情况,结果如图 4 所示,图 4(b)纵轴 U/U_0 为当前位置处的风速与入口风速的比值。

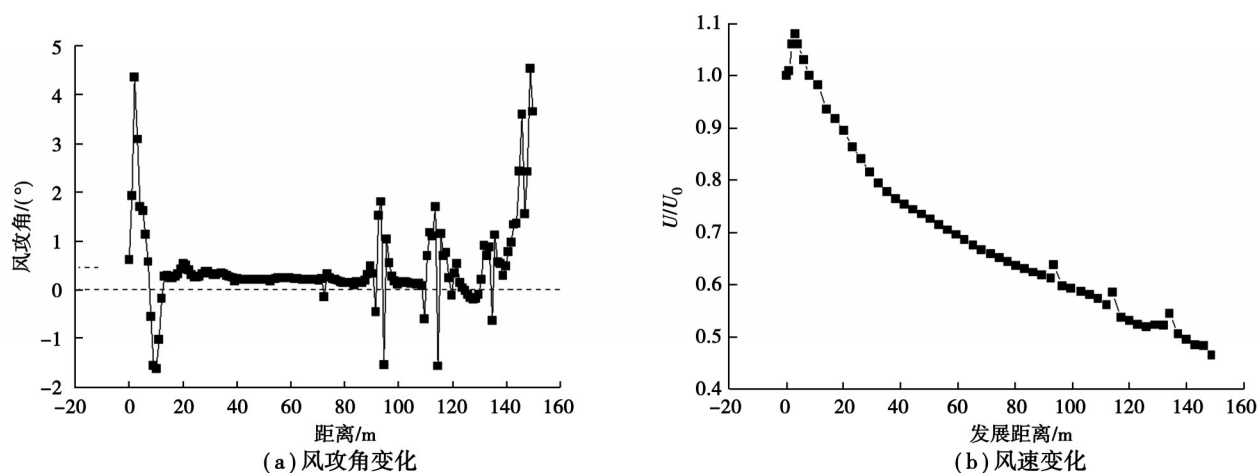


图 4 $H_{1/30}$ 处风参数变化图

Fig. 4 Change of wind parameters at $H_{1/30}$

由图 4 可知,当发展距离为 20 m 时,风攻角出现了 1 次大幅度波动;当发展距离为 20~90 m 时,风攻角无明显波动,稳定在 0.3° ;当发展距离超过 90 m 后,风攻角有明显大幅波动。相对风速比值随着发展距离的增加而减少,相对风速比值在发展距离为 5、90、110、130 m 处时,数值大小有较明显增加。当相对风速比值突然增大时,对应位置处的风攻角大小也出现较大的波动。

2.2 坡度的影响

针对水下地形坡度的变化,采取模型后 50 m 作为研究对象,即风环境通过 150 m 发育,再经过不同水下地形坡度变化的水面后,分析不同坡度对风剖面的影响。绘制不同位置处的风剖面(见图 5), i 为不同的坡度比,即坡面垂直高度和水平宽度的比。

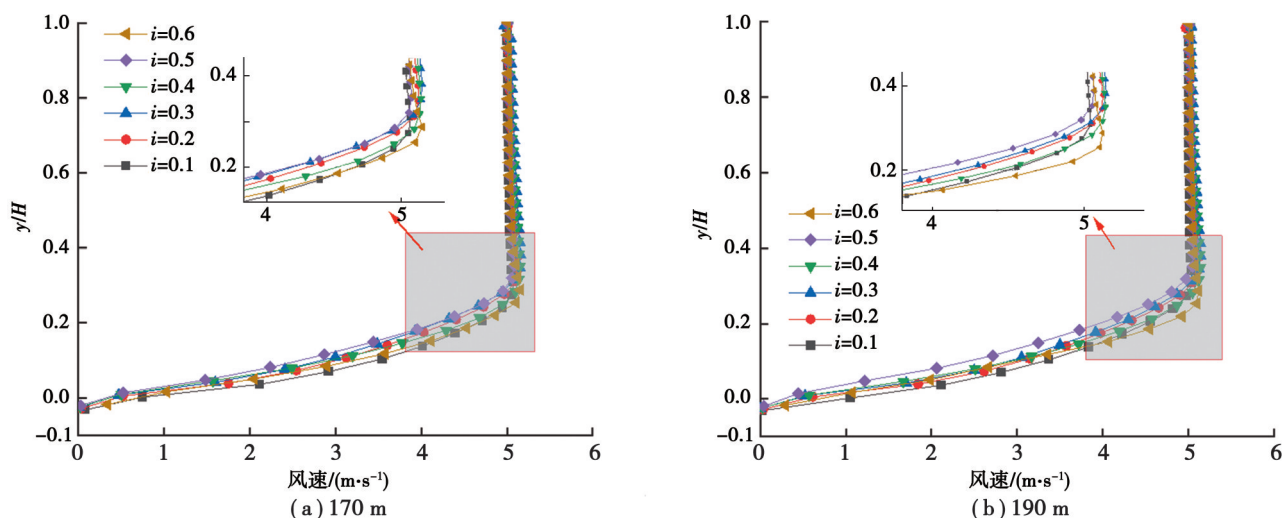


图 5 不同位置处风剖面结构形式

Fig. 5 Wind profile structure at different positions

由图5可以看出,在坡度的影响下,不同位置处的风剖面具有相同的趋势以及结构形式。坡度较低时,相对变化程度几乎一致。坡度比 i 对风剖面的结构形式几乎没有影响,对梯度风高度影响也较小。

由图6(a)可知,坡度对风攻角均有一定程度影响,其趋势呈现波浪式变化。风攻角在数值上均为正向,正向风攻角最大达到 8.73° ;由图6(b)可知,坡度对速度的影响呈下降趋势,随着坡度的增加其速度大小表现为波浪式减小。

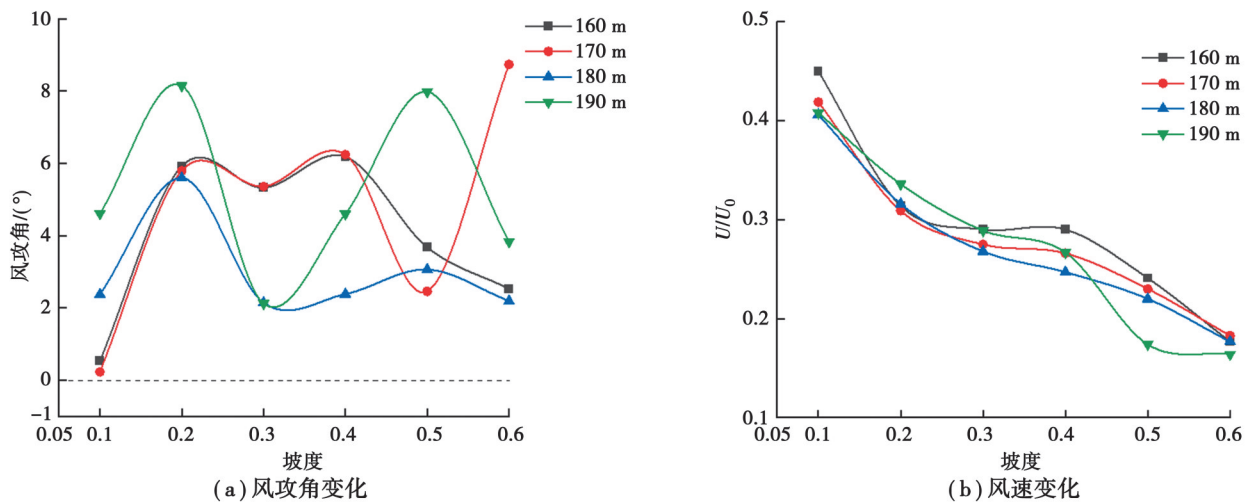


图6 $H_{1/30}$ 处风参数变化

Fig. 6 Change of wind parameters at $H_{1/30}$

2.3 水深的影响

考虑不同桥址所处水域的深度不同,针对水深对风环境特征参数的影响,通过只改变模型液相的高度,得到相应的风环境特征参数。因前文分析中发现距离对风剖面的影响有2种结构形式,故选取发展距离为5 m和140 m处的风剖面模拟结果来进行分析,结果如图7所示。

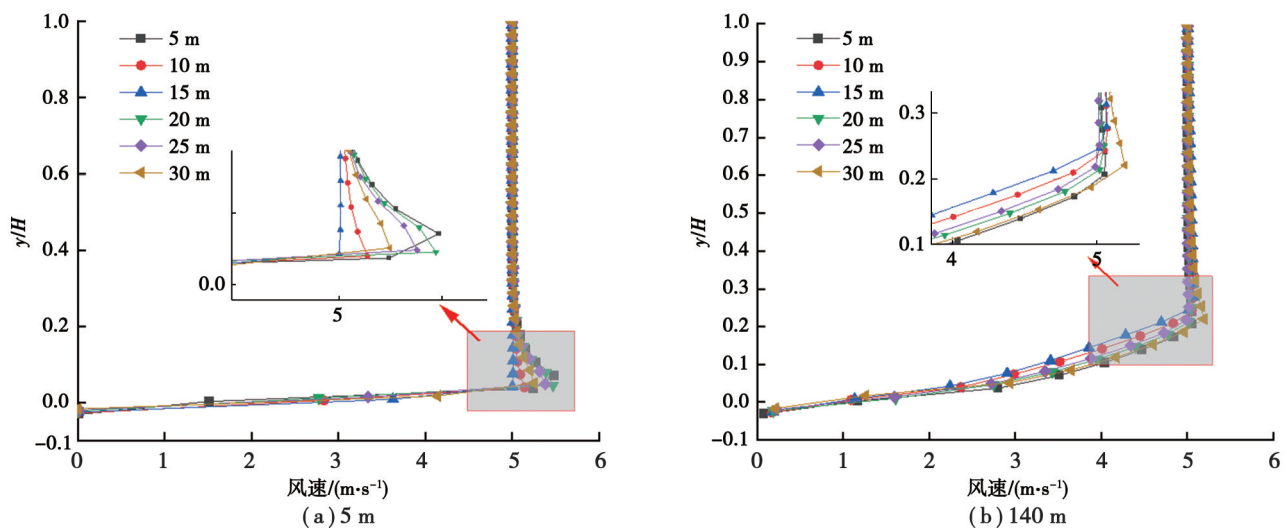


图7 不同位置处风剖面结构形式

Fig. 7 Wind profile structure at different positions

由图7(a)可知,在发展距离为5 m处时,风剖面结构形式相同,都呈现在一定高度处出现风速增加的情况,即风剖面结构形式下部出现尖点。通过细节放大图可以发现不同水深情况下,风速增加程度均不同,但没有明显的线性变化趋势。由图7(b)可知,当距离发展达到140 m时,风剖面结构形式下部没有出现尖点,

在一定高度内,风速随高度增加而逐步增加,最终趋于稳定。通过细节放大图可以发现,当水深为30 m时,下部的增长速率大于其他工况的增长速率。

由表2可以看出,随着水深增加,相同位置处的风速大小也逐渐增加,但没有明显的增幅。同时,梯度风高度在整体趋势上也随水深的增加而增加。当水深为30 m时,达到本次模拟的梯度风高度最大值。在20 m水深时,出现了速度以及梯度风高度的降低,故水深与加速度系数以及梯度风高度没有明显的线性变化趋势。

表2 140 m处不同水深计算结果对比

Table 2 Comparison of calculation results of different water depths at 140 m

水深/m	最大速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	加速系数(U/U_0)	梯度风高度/m
5	5.06	1.01	18.39
10	5.08	1.02	26.61
15	5.07	1.01	27.71
20	5.05	1.01	26.80
25	5.09	1.02	28.56
30	5.10	1.02	28.98

采用 $H_{1/30}$ 处的风速与风攻角作为研究对象,该高度处的风速与风攻角变化如图8所示。由图8(a)可知,在不同发展距离位置处,水深的变化会对风攻角的变化产生一定的影响。整体趋势上呈现为波浪式变化,且随着发展距离的增加,水深的变化对 $H_{1/30}$ 处的风攻角影响越大。由图8(b)可知,水深对风速的影响在发展距离40 m以内很小,当发展距离超过40 m后,水深对 $H_{1/30}$ 处的风速影响呈现为波浪式,且随着发展距离的增加,水深的变化对该处的速度影响越大。

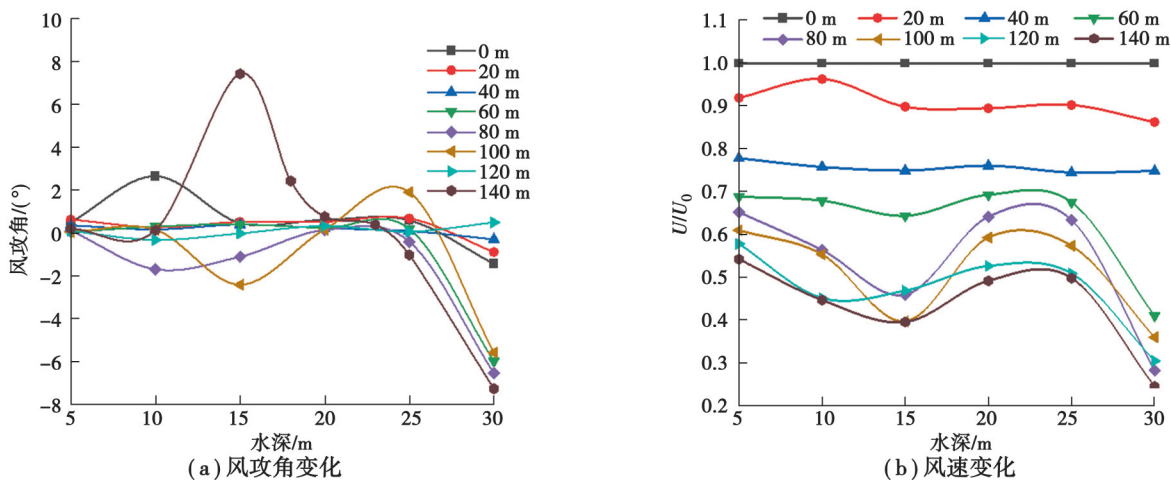


图8 $H_{1/30}$ 处风参数变化

Fig. 8 Change of wind parameters at $H_{1/30}$

分别提取了模型水深20 m以及30 m水深的速度云图,以确认该水域处的风环境速度以及梯度风高度变化情况。结果如图9所示。

由图9可知,在距离入口较近,液相受到了气流的作用,出现了下凹,同时使得上方空气出现了加速的现象,此现象与孙丽明等^[18]波浪形底面模型展现的情况相似。速度增大部分如图中放大处所示,在速度云图中呈现为扁平状。通过对比云图分布,可以看出随着水深的增加,梯度风高度呈现增加趋势。

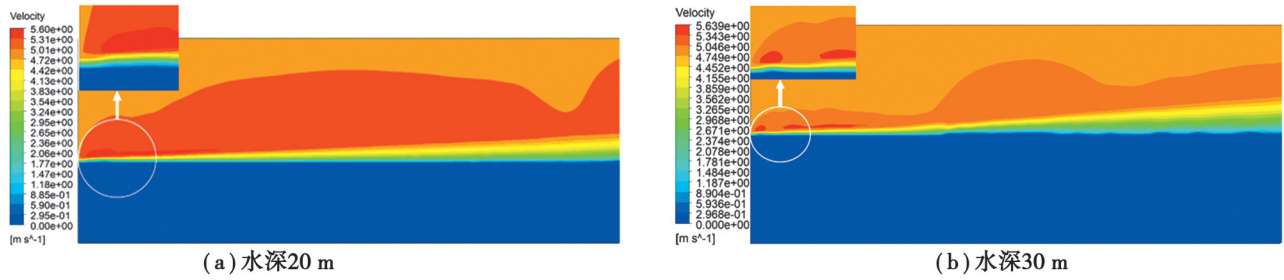


图9 不同水深下的速度云图

Fig. 9 Velocity cloud images at different water depths

2.4 入口风速的影响

为探究入口风速大小对近岸风参数的影响,通过改变模型入口风速,从而分析模型中风参数的分布特征。计算结果如图10所示。

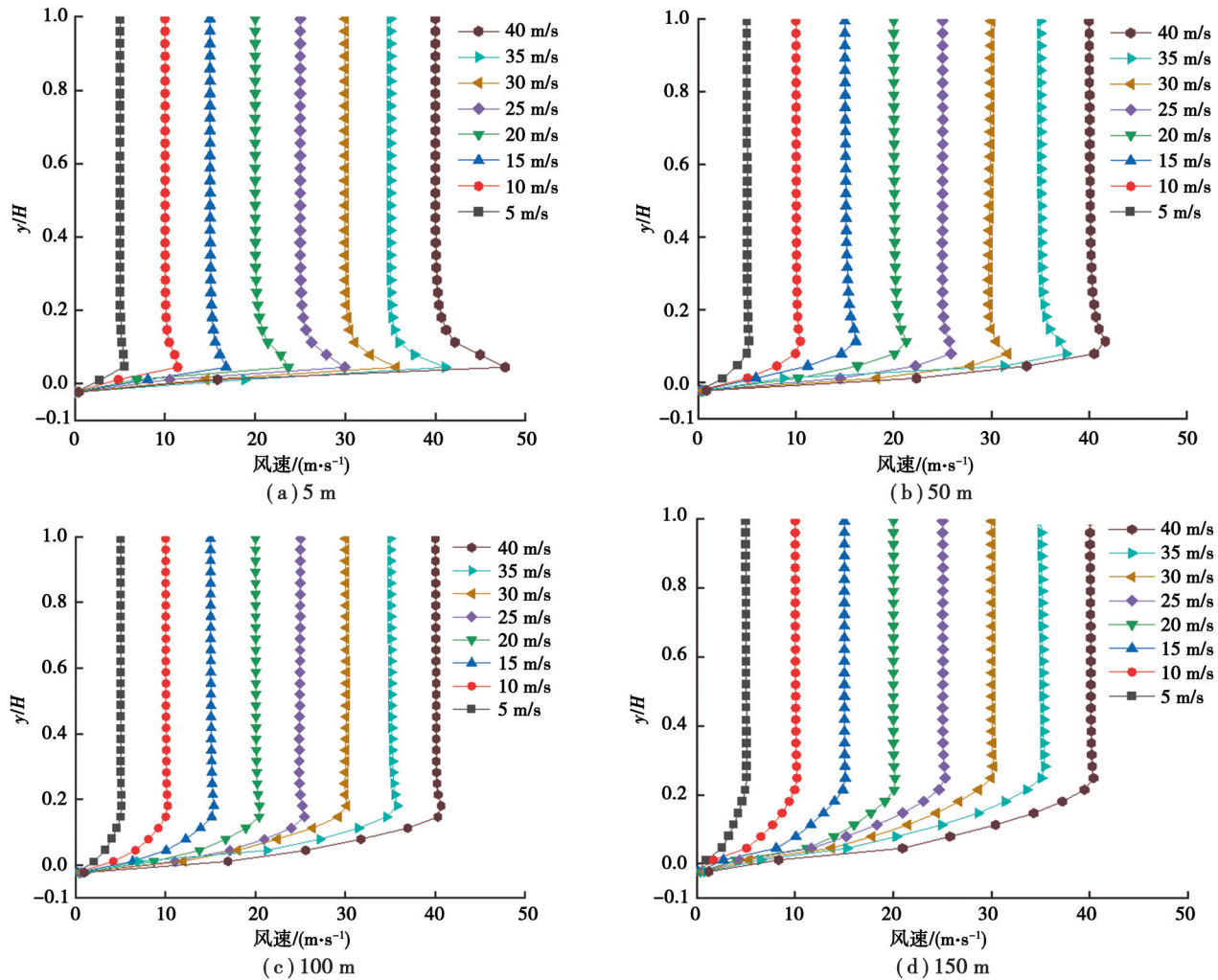


图10 不同位置处风剖面结构形式

Fig. 10 Wind profile structure at different positions

由图10(a)可知,在入口5 m处与之前其风剖面结构形式相同具有尖点,都呈现在相近高度处出现风速增加的情况,且随着入口风速越加大速度系数越大。最大加速度系数为1.2。由图10(b)可知,风剖面经过45 m的发育后,尖点逐渐回缩,加速度系数与5 m时相比,减少很多。此时,最大加速度系数为1.07。由图10(c)

可知,此时,风剖面的结构形式尖点已经消失。风速随着高度的增加逐渐增加,在到达某一高度后,风速大小趋于稳定。由图 10(d)可以知,当发展距离达到了 150 m 时,出风剖面结构形式与 100 m 时相似,也不出现加速的情况。梯度风高度相较于 100 m 时,数值有提高。

由表 3 可以看出随着风速的增加,梯度风高度的无明显变化。同时随着发展距离的增加,风剖面结构形式逐渐稳定,再无较大的增速情况出现。

表 3 150 m 处不同入口速度计算结果对比

Table 3 Comparison of calculation results of different inlet velocities at 150 m

入口速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	最大速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	加速系数(U/U_0)	梯度风高度/m
5	5.08	1.02	11.52
10	10.14	1.01	10.51
15	15.11	1.01	9.49
20	20.15	1.00	9.48
25	25.26	1.01	9.49
30	30.17	1.01	10.51
35	35.39	1.01	11.52
40	40.38	1.01	9.50

为考虑入口风速大小对风攻角和风速的影响,采取与之前相同的方式获取 $H_{1/30}$ 处风速与风攻角的变化图。结果如图 11 所示。

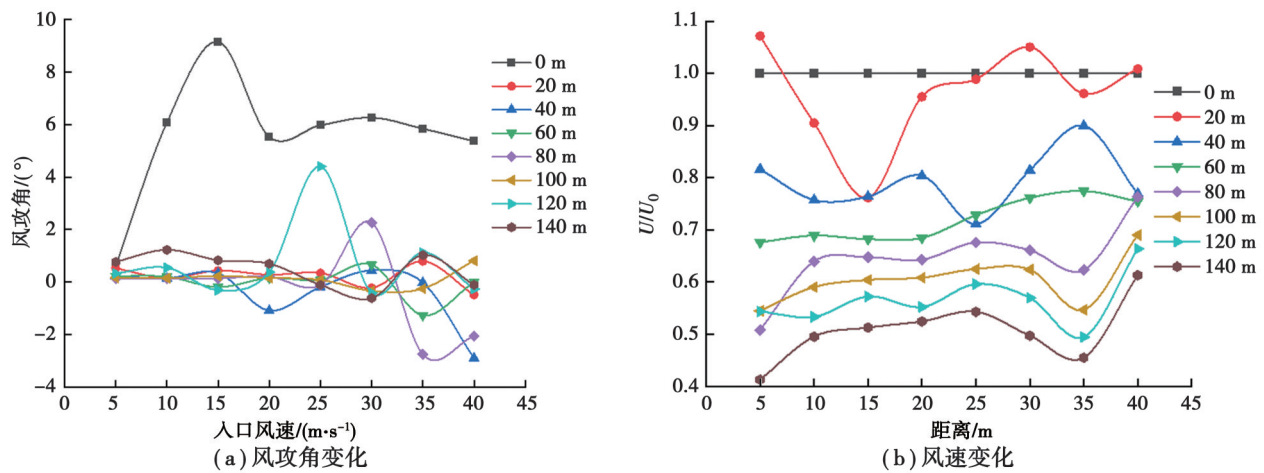


图 11 $H_{1/30}$ 处风参数变化

Fig. 11 Change of wind parameters at $H_{1/30}$

由图 11(a)可知,随着入口风速的增大,在入口处的风攻角先增大,后下降,最后趋于稳定在 6° 。当发展距离超过 40 m 后,入口风速的大小对风攻角的影响较小,此时,风攻角的波动范围在 $\pm 4^\circ$ 以内。由图 11(b)可知,随着入口风速的增大,在发展距离 40 m 以内呈先减小后小幅度增加的趋势;在发展距离 40 m 以后,呈现为小幅度增加趋势。

通过对比图 12(a)(b)可以看出入口风速在经过相同长度的发展距离后其影响的梯度风高度几乎没有变化。

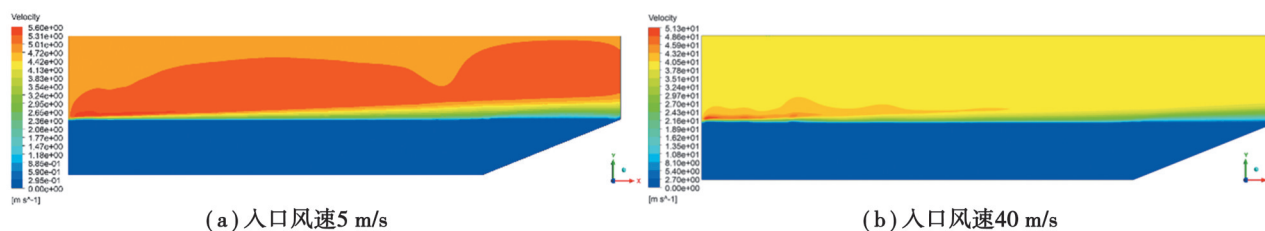


图12 不同入口速度下的速度云图

Fig. 12 Velocity cloud image at different inlet velocities

3 结 论

采用VOF模型可以较好地考虑水与气体之间的相互作用,因部分桥梁的所处地理环境的需求,考虑水域对风特性的影响是十分有必要的。通过VOF模拟不同情况下的近岸处的风参数分布特性,结果表明:

1)在发展距离较短时,风剖面结构形式会出现一个尖点,即风速会在距离水面较近处会产生一个较大的加速,此结构形式与规范中指数律风剖面完全不同。通过仿真模拟可以看出坡度比对风剖面结构形式没有明显的相关性;水深的变化对风速加速的影响较小;入口风速对入口处产生的加速度系数有着较大的影响;入口风速大小对成熟的风剖面结构形式没有影响,未来风洞试验中研究水域上方风剖面时,可以采用较低的入口风速。

2)在发展一定距离后,梯度风高度的主要影响因素为水深的变化,但水深的变化与梯度风高度呈现非线性关系。最高处可以影响到28.98 m处,占整个气相模型的96%。入口风速的大小对梯度风高度几乎没有影响。

3)风攻角变化与入口风速和水深有很强的相关性,随着风速的增大,风攻角的变化越明显。当发展距离达到60 m时,水深的变化对风攻角变化有明显作用。正风攻角最大达到 7.41° 。入口风速的大小对风攻角的影响范围在 $\pm 4^\circ$ 以内,随着风速的增加呈现为波浪式变化。

本次模拟考虑的因素不全,暂未考虑水域流速以及本身模型中就存在波浪的情况,也暂未考虑入口风不为均匀流的情况。希望可以考虑三维模型进行模拟VOF模型。未来仍需要考虑多种情况来模拟水域处的风参数的分布特征。

参考文献

- [1] 李加武,徐润泽,党嘉敏,等.喇叭口河谷地形基本风特性实测[J].长安大学学报(自然科学版),2020,40(6):47-56.
Li J W, Xu R Z, Dang J M, et al. Field measurement of basic wind characteristics of trumpet river valley[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2020, 40(6): 47-56. (in Chinese)
- [2] 郝键铭,赵朔沅,辛凌风,等.广东沿海地区桥址风场特性实测研究[J/OL].振动工程学报,2024.(2024-02-04)[2024-02-05]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1349.tb.20240202.0944.002>.
Hao J M, Zhao S H, Xin L F, et al. Study on wind characteristics of bridge sites in coastal areas of Guang-dong Province based on measured data. Journal of Vibration Engineering[J/OL]. Journal of Vibration Engineering, 2024. (2024-02-04)[2024-02-05]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1349.tb.20240202.0944.002>. (in Chinese)
- [3] Cheynet E, Jakobsen J B, Snæbjörnsson J, et al. Measurements of surface-layer turbulence in a wide Norwegian fjord using synchronized long-range Doppler wind lidars[J]. Remote Sensing, 2017, 9(10): 977.
- [4] Chen T, Fu J Y, Chan P W, et al. Wind characteristics in typhoon boundary layer at coastal areas observed via a Lidar profiler[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2023, 232: 105253.
- [5] 曾庆国.沿海地区台风风场特性实测分析[D].武汉:武汉理工大学,2019.
Zeng G Q. Field measurement of typhoon wind characteristics in coastal areas[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [6] Jiang F, Zhang M, Li Y, et al. Field measurement study of wind characteristics in mountain terrain: focusing on sudden intense winds[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2021, 218: 104781.

- [7] 陈邦杆, 洪广鹏, 胡宗敏. 码头设计流速探析[J]. 水运工程, 2016(2): 76-80.
Chen B G, Hong G P, Hu Z M. On designed flow velocity of wharf[J]. Port & Waterway Engineering, 2016(2): 76-80. (in Chinese)
- [8] 匡翠萍, 宋竑霖, 顾杰, 等. 黄骅港风生流及紊动的三维特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(1): 38-45, 67.
Kuang C P, Song H L, Gu J, et al. Three-dimensional characteristics of wind-induced current and turbulence at Huanghua Harbor[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(1): 38-45, 67. (in Chinese)
- [9] Sengupta A, Sarkar P P. Experimental measurement and numerical simulation of an impinging jet with application to thunderstorm microburst winds[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2007, 96(3): 345-365.
- [10] Song J L, Li J W, Flay R G J, et al. Validation and application of pressure-driven RANS approach for wind parameter predictions in mountainous terrain[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2023, 240: 105483.
- [11] Zhu J, Zhang W. Numerical simulation of wind and wave fields for coastal slender bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22: 04016125.
- [12] Zhu J, Zhang W. Probabilistic fatigue damage assessment of coastal slender bridges under coupled dynamic loads[J]. Engineering Structures, 2018, 166: 274-285.
- [13] 李永乐, 房忱, 向活跃. 风-浪联合作用下大跨度桥梁车-桥耦合振动分析[J]. 中国公路学报, 2018, 31(7): 119-125.
Li Y L, Fang C, Xiang H Y. Coupled vibration analysis of vehicle-bridge for long-span bridge under wind and wave[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(7): 119-125. (in Chinese)
- [14] 房忱, 李永乐, 向活跃. 波浪作用下跨海大桥列车走行性研究[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(6): 1068-1074.
Fang C, Li Y L, Xiang H Y. Study of train running performance under wave load for cross-sea bridge[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(6): 1068-1074. (in Chinese)
- [15] 李国亮, 刘钊, 李学民, 等. 杭州湾大桥南岸超长施工栈桥设计中风、浪、流荷载的确定[J]. 公路交通科技, 2007, 24(1): 100-103, 108.
Li G L, Liu Z, Li X M, et al. Determination of design loads of wind, wave and flow for the construction trestle of Hangzhou Bay bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(1): 100-103, 108. (in Chinese)
- [16] Cao S Y, Zhang E, Sun L, et al. Numerical study of wind profiles over simplified water waves[J]. Wind and Structures, 2015, 21(3): 289-309.
- [17] 尤韩炜, 陈昌萍. 海面上下击暴流风场特性模拟及分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2022, 61(4): 572-578.
You H W, Chen C P. Simulation and analyses of the wind-field characteristics of downburst above sea surface[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2022, 61(4): 572-578. (in Chinese)
- [18] 孙丽明, 曹曙阳, 李明, 等. 考虑波浪形底面影响的边界层风场大涡模拟[J]. 空气动力学学报, 2014, 32(4): 534-543.
Sun L M, Cao S Y, Li M, et al. Large-eddy simulation of fully developed turbulent flow over a wavy surface[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2014, 32(4): 534-543. (in Chinese)

(编辑 郑洁)