

基于K-epsilon模型的某大跨度渡槽桥梁风流数值模拟

石梓钰,张翔,章雯雯,孙文,邓颖

(安徽建筑大学 土木工程学院,安徽 合肥 230601)

摘要:采用流体力学计算软件 ANSYS Fluent,建立某大跨度渡槽桥梁的三维湍流模型。为提高大跨度渡槽桥梁风流模拟的精确度,将 Standard $k-\varepsilon$ 模型作为标准分析模型,验证另外两种修正后的两方程湍流模型(RNG $k-\varepsilon$ 模型、Realizable $k-\varepsilon$ 模型)的风流模拟效果。其中 RNG $k-\varepsilon$ 模型和 Realizable $k-\varepsilon$ 模型风流数值模拟均有良好的适用性,且对应不同分析工况选取不同的分析模型能够提高模拟的精确度。

关键词:CFD;湍流模型; $k-\varepsilon$;ANSYS Fluent;风压分布

中图分类号:U441

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2022)12-0100-05

0 引言

渡槽作为一种水利设施,在引江济淮这项引水工程中发挥重大作用。大跨度的渡槽桥梁多存在于高山峡谷之间,受到较大的风荷载,需要进行抗风分析^[1-14]。而目前,国内较为缺乏对大跨度渡槽桥梁的抗风的模拟以及分析。

计算流体力学^[8](CFD)技术,即通过计算机的数值计算以及相关图像处理,对流体运动等物理现象进行分析模拟。CFD 技术与传统的理论分析方法、实际测量方法(风洞试验)组成了流体流动分析的完整体系。李正农^[1]通过定义结构风振反应的峰值因子和峰值均方差因子,对渡槽的抗风可靠度进行了分析;李正农^[3]通过风洞试验对 U 形渡槽槽体的分析,得到了渡槽风压分布和风载体形系数与渡槽槽体的高宽比和流场状况有关;龙俊廷^[12]对大跨度悬索桥桥面局部风场实测和 CFD 技术模拟相对比作了研究。

为拓宽数值风洞模拟的模拟方式,现利用 ANSYS Fluent 流体力学计算软件进行桥梁风流模拟。通过使用 Launder 和 Spalding 等^[4-6]提出及修正的三种湍流方程进行数值风洞模拟,将大跨度桥梁最常用的湍流模型 Standard $k-\varepsilon$ 模型作为标准分析模型^[10],通过使用对其修正后的两种湍流模型,来验证这两种湍流模型针对大跨度渡槽风流模拟的适用性,并探究不同分析方式下更适用的湍流模型。

收稿日期:2022-02-19

作者简介:石梓钰(1999—),男,本科,从事桥梁专业教学与研究工作。

1 基本原理

1.1 湍流模型

湍流模型中的两方程模型是目前流体计算中常用到的模型,通过引入湍动能 k 和耗散率 ε 来形成相应的控制方程。三种湍流模型均是针对已经充分发展的湍流有效。

1.1.1 Standard k-epsilon 模型

Standard $k-\varepsilon$ 模型是桥梁风流计算模型较为常用的两方程模型,在科学研究以及工程实践中得到了广泛的应用,对于不可压流体计算有良好的适用性。其不可压流体的两方程模型如下^[4,8]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k U_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_1 + \frac{\rho \varepsilon^2 C_\mu}{k \sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon U_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_1 + \frac{\rho \varepsilon^2 C_\mu}{k \sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

$$G_k = \rho \frac{\varepsilon^2}{k} C_\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

式中: G_k 表示由平均速度梯度引起湍动能的产生项, $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 C_μ 为经验常数, σ_k 、 σ_ε 分别为湍动能和耗散率对应的 Prandtl 数,其数值如表 1 所列。

表 1 标准 k-epsilon 模型相关参数表

$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	C_μ	σ_k	σ_ε
1.44	1.92	0.09	1.0	1.3

1.1.2 RNG k-epsilon 模型

RNG $k-\varepsilon$ 模型在标准 $k-\varepsilon$ 模型的基础

基础上考虑了平均流动的旋转,以及旋转流动的情况,对于带有弯曲壁面的流动带有更好的适应性。其不可压流体的两方程模型如下^[5,8]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k U_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \left(\mu_1 + \frac{\rho k^2 C_\mu}{\varepsilon} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] G_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon U_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \left(\mu_1 + \frac{\rho \varepsilon^2 C_\mu}{\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon}^* \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

$$C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}$$

$$\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{\varepsilon}{k} \quad (6)$$

$$E_{ij} = \frac{k G_k}{2\rho C_\mu \varepsilon^2}$$

式中: E_{ij} 为时均应变率;其余参数如表 2 所列。

表 2 RNG k-epsilon 模型相关参数表

$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	C_μ	α_k	α_ε	η_0	β
1.42	1.68	0.08	1.39	1.39	4.37	0.01

1.1.3 Realizable k-epsilon 模型

Realizable k-epsilon 模型在标准 k-epsilon 模型的基础上对湍流黏度公式进行了改变,引入了曲率和旋转的相关内容,同时对耗散率方程进行了较大改变,能够更为合理的表示能量传输。其不可压流体的两方程模型如下^[6,8]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k U_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_1 + \frac{\rho k^2 C_\mu}{k \sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon U_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_1 + \frac{\rho \varepsilon^2 C_\mu}{k \sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\varepsilon} S_\varepsilon - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (8)$$

式中: $C_{1\varepsilon} = \max(0.43, \frac{\eta}{\eta+5})$, η 计算方式如公式(6)

所示。其余参数如表 3 所列。

表 3 Realizable k-epsilon 模型相关参数表

$C_{2\varepsilon}$	σ_k	σ_ε
1.9	1.0	1.3

利用以上三种湍流模型进行数值模拟与实际风洞试验结果存在一定误差^[13],需要继续对湍流模型的选择与修正做进一步的研究分析。

1.2 边界条件

边界条件是指求解流场边界所需进行求解的变

量,通过给定边界条件来驱动流场内流体的流动。为通过计算得到流场的解,必须给定合理的流场边界。

1.2.1 流动进口边界

定义流动进口处的流体流动速度,现设置流场进口类型为速度进口^[8](velocity-inlet),流体类型为不可压缩流体。

1.2.2 流动出口边界

现定义计算流场出口类型为压力出口^[8](pressure-outlet),且在出口边界设置相对压力,其余的流动属性由内部判断。

1.2.3 壁面边界

本文将桥梁内壁以及流场壁面设为光滑无滑移内壁^[8](wall),对后续近壁面区的计算处理也有良好效果。

1.3 近壁面处理方法

由本文 1.1 节所介绍的三种模型均适用于已发展完全的湍流模型,这些模型均为高 Re 数的湍流模型。然而在近壁面区,流体运动常常会受到壁面的影响,导致湍流发展并不充分,Re 数较低。尤其在黏性底层,流动几乎为层流。因此这个区域不能采用 k-epsilon 模型进行计算。

壁面函数法^[8](wall functions),是将壁面上的物理量与湍流核心区域待求解的物理量联系起来,直接采用半经验公式来求得近壁面区流体的流动状态。

ANSYS Fluent 软件^[8]建议使用壁面函数法处理湍流近壁面问题时,距离参数处于 $(30 \leq y^+ \leq 300)$ 。流体此时处于过渡层和对数率层,即此时速度呈对数率分布。

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(E y^+) \quad (9)$$

式中,对于光滑壁面, $\kappa=0.4$, $E=9.793$ 。直接对过渡层和对数率层采用半经验公式求解,在不改变计算模型的前提下对湍流问题进行求解。

现采用可缩放壁面函数^[7](Scalable Wall Functions),其适合于高 Re 数流动,且避免了标准壁面函数在 $y^+ < 11$ 时,结果恶化^[8]。该壁面函数在应对划分较粗的网格时,也能拥有良好的计算效果,以便于提高计算的准确性。

2 数值模拟

2.1 大跨度渡槽桥梁基本模型

某大跨度渡槽桥梁由斜拉结构和钢桁架拱组合

体系组成。主跨长度为 240 m,索塔高 52 m,通过中央分隔带将渡槽分为双向航道,单个航道宽 24 m。如图 1 于主跨钢桁架梁上布置 50 个顺桥向计算测点(A1~A50),每个测点间距 4.8 m。通过流体计算来测定测点瞬时风速、风压。

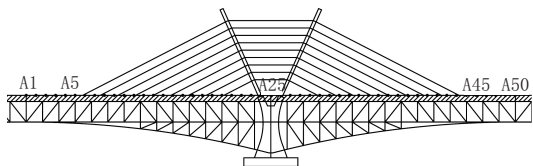


图 1 顺桥向测点分布图

横桥向计算测点布置于跨中截面处,数量为 50 个(B1~B50),布置方式与顺桥向布置方式类似,测点间距为 1.2 m(见图 2)。

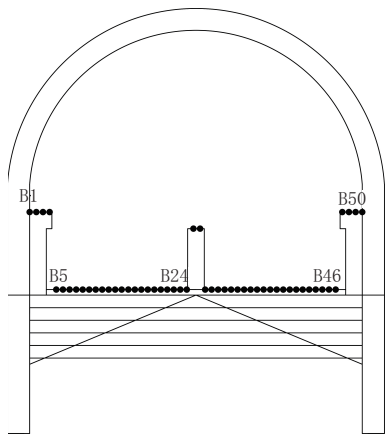


图 2 横桥向测点分布图

2.2 计算模拟工况

2.2.1 计算模型建立

现采用流体力学计算软件 ANSYS Fluent 建立大跨度桥梁计算模型。并生成相应的计算网格如图 3 所示。

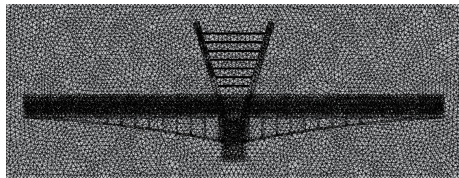


图 3 渡槽桥梁风场计算网格图

2.2.2 计算工况

现将 Standard k-epsilon 模型作为标准分析模型,通过测定各个测点的风压、流速来比较 RNG k-epsilon 模型、Realizable k-epsilon 模型与标准 k-epsilon 模型的吻合程度,并通过数据分析得到各个模型的适用性。

现共设置六个计算工况,各工况速度进口的速度量级(Velocity Magnitude)均设为 26 m/s,其余变量如表 4 所列。

表 4 各计算工况设置一览表

工况	风向角 / (°)	湍流模型
工况一	0	Standard $k-\epsilon$
工况二	0	RNG $k-\epsilon$
工况三	0	Realizable $k-\epsilon$
工况四	90	Standard $k-\epsilon$
工况五	90	RNG $k-\epsilon$
工况六	90	Realizable $k-\epsilon$

3 实验结果及对比分析

3.1 平均风压系数定义

为了研究需要和便于比较,通过对计算机数值模拟的风压进行处理,将无量纲的风压系数作为研究结构表面风压分布特性的基础参数,其定义为^[9-10]:

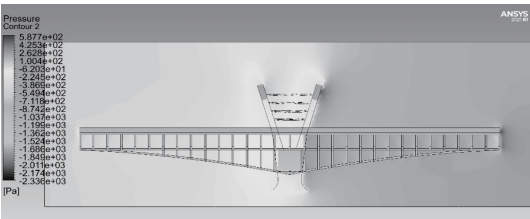
$$\xi_i = \frac{P_i - P_{rs}}{0.5 \rho V_r^2}$$
 (10)

式中: ξ_i 表示平均风压系数; P_i 表示观测点瞬时风压值; P_{rs} 表示静压力值; ρ 表示空气密度(取 1.225 kg/m³); V_r 表示参考点风速(现选取渡槽桥面上方 20 m 处风速为参考风速)。

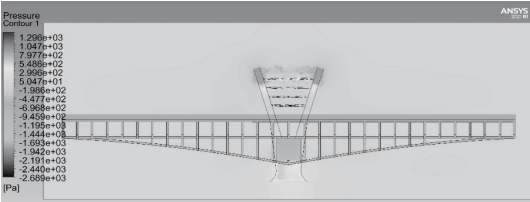
3.2 数值模拟结果及分析

3.2.1 数值结果

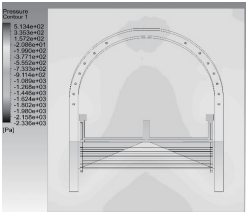
通过 ANSYS Fluent 软件对本文 2.2.2 节设置的六个工况进行分析,得到了如图 4 的风压分布图。由于各湍流模型风压分布图相似,仅列出 Standard $k-\epsilon$ 模型的风压分布图。



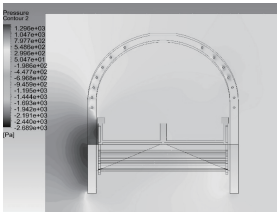
(a)Standard $k-\epsilon$ 模型 0°风向角顺桥风压分布图



(b)Standard $k-\epsilon$ 模型 90°风向角顺桥风压分布图



(c)Standard $k-\epsilon$ 模型 0°风向角横桥向风压分布图



(d)Standard $k-\epsilon$ 模型 90°风向角横桥向风压分布图

图 4 Standard $k-\epsilon$ 模型各工况风压分布图

在 0° 风向角的风流作用下,分别对工况一、二、三的顺桥向、横桥向测点的风压值进行提取,根据公式(9)得到不同湍流模型下各测点的平均风压系数如图5、图6所示。

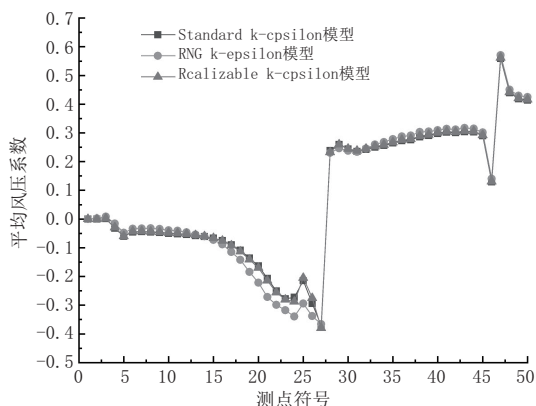


图5 0° 风向角顺桥向测点平均风压系数曲线图

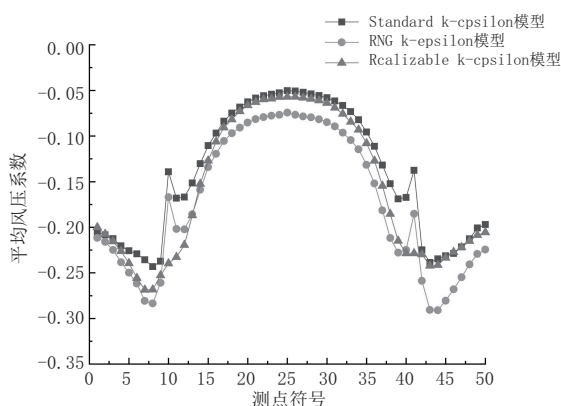


图6 0° 风向角横桥向测点平均风压系数曲线图

在 0° 风向角工况中,根据图5可知,两种湍流模型的模拟结果与 Standard k-epsilon 模型数值较为接近,Realizable k-epsilon 模型的模拟效果比 RNG k-epsilon 模型的模拟效果较为良好;根据图6可知,两种湍流模型的数值模拟结果与 Standard k-epsilon 模型均存在一定偏差,但 RNG k-epsilon 模型模拟的总体效果较为良好。

在 90° 风向角的风流作用下,分别对工况一、二、三的顺桥向、横桥向测点的风压值进行提取。根据公式(10)得到各测点的平均风压系数如图7、图8所示。

在 90° 风向角工况中,根据图8可知,两种湍流模型的数值模拟结果与 Standard k-epsilon 模型数值较为接近。根据图7可知,两种湍流模型的数值模拟结果与 Standard k-epsilon 模型均存在一定偏差,但 Realizable k-epsilon 模型模拟的总体效果较为良好。

3.2.2 结果分析

由本文 3.2.1 节的分析可知 RNG k-epsilon 模

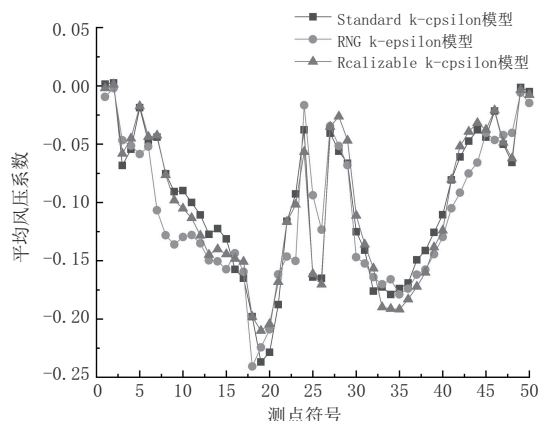


图7 90° 风向角顺桥向测点平均风压系数曲线图

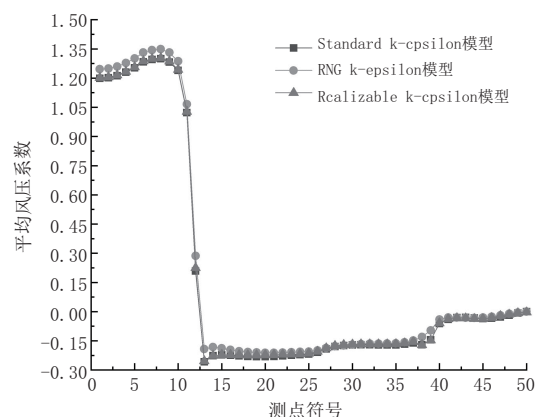


图8 90° 风向角横桥向测点平均风压系数曲线图

型、Realizable k-epsilon 模型对于模拟大跨度渡槽桥梁风流均具有一定的适用性。由于渡槽桥梁存在较多的弯曲壁面,且受到水流作用的影响,更适合采用 RNG k-epsilon 模型、Realizable k-epsilon 模型进行分析模拟。为更简便反应各工况下风流模拟的拟合程度,将所有工况的数值模拟结果整合分为两种情况:

当桥梁上的测点分布方向与风流的运动方向一致时,如图5和图8所示,RNG k-epsilon 模型与的数值计算效果与 Standard k-epsilon 模型的计算效果较为吻合,较为接近风洞试验的试验结果。两种模型均适用于大跨度渡槽桥梁的风流模拟。

当桥梁上的测点分布方向与风流的运动方向呈 90° 时,如图6和图7所示,RNG k-epsilon 模型与 Realizable k-epsilon 模型的数值计算效果与 Standard k-epsilon 模型的数值计算效果存在一些偏差。为显示两种模型针对各工况的适应性,继续定义了平均风压系数差值 ξ_j ,以及测点平均风压系数偏离率 χ_j ,如下所示:

$$\xi_{j1} = |\xi_{is} - \xi_{iRNG}| \quad (11)$$

$$\xi_{j2} = |\xi_{is} - \xi_{iRea}| \quad (12)$$

$$\chi_{j1} = \frac{|\xi_{Smax}|}{\xi_{j1}} \quad \chi_{j2} = \frac{|\xi_{Smax}|}{\xi_{j2}} \quad (13)$$

式中: ξ_{is} 表示 Standard k-epsilon 模型平均风压系数; ξ_{Smax} 表示 Standard k-epsilon 模型平均风压系数最大值; ξ_{iRNG} 表示 RNG k-epsilon 模型平均风压系数; ξ_{iRea} 表示平均风压系数。

由图 9 可知,在 0° 风向角工况下,为测定横桥向布置的测点,RNG k-epsilon 模型的平均风压系数差值较为稳定,偏差率 $\chi_{j2} < 25\%$,数值计算效果吻合程度优于 Realizable k-epsilon 模型的数值计算效果。由图 10 可知,在 90° 风向角工况下,为测定顺桥向布置的测点,Realizable k-epsilon 模型的平均风压系数差值较小,偏差率 $\chi_{j2} < 15\%$,数值计算效果优于 RNG k-epsilon 模型的数值计算效果。由此可见,在 0° 风向角工况下测定横桥向测点更适合选用 RNG k-epsilon 模型进行数值计算模拟;在 90° 风向角工况下测定顺桥向测点更适合选用 Realizable k-epsilon 模型进行数值计算模拟。

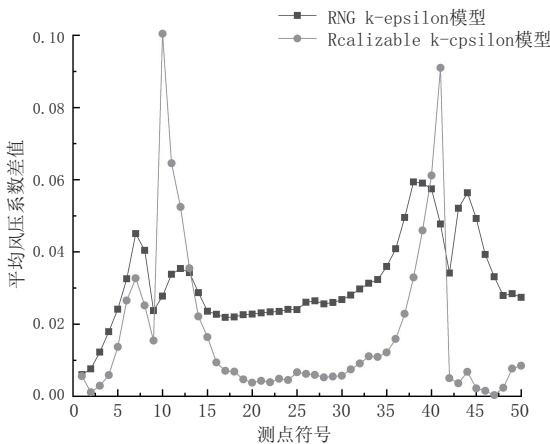


图 9 0° 风向角横桥向测点平均风压系数差值曲线图

4 结 语

(1) 采用 ANSYS Fluent 软件进行大跨度渡槽风流模拟具有良好的适用性,但相较于风洞试验存在测量精度的限制,可以通过对湍流模型的选取、修正,以及对壁面函数的选取进行进一步的精确处理。

(2) Standard k-epsilon 模型作为桥梁最常用的数值模拟模型,为 RNG k-epsilon 模型、Realizable k-epsilon 模型提供了良好的参考标准,且后两种模型在 Standard k-epsilon 模型基础上进行了一部分

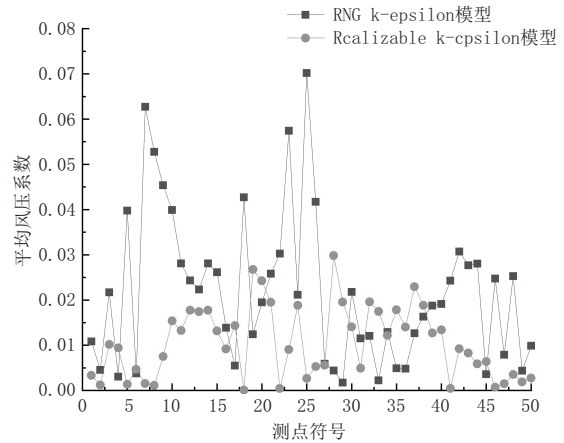


图 10 90° 风向角顺桥测点平均风压系数差值曲线图

改进,对于模拟大跨度渡槽桥梁风流有着更良好的适用性。且针对不同风向角以及不同的测量工况下选取不同的分析模型可以提高数值模拟的精确度。

参考文献:

- [1] 李正农,吴红华,楼梦麟.渡槽结构抗风可靠度分析方法[J].武汉理工大学学报,2002(9):48-51.
- [2] 廖海黎,李明水,马存明,王骑,孙延国,周强.桥梁风工程 2020 年度研究进展[J].土木与环境工程学报(中英文),2021,43(S1):23-30.
- [3] 李正农,楼梦麟,宋锦忠,梁枢果.U 形渡槽槽体结构风载体形系数的风洞试验研究[J].空气动力学学报,2002(2):233-238+245.
- [4] Launder B E, Spalding D B. Mathematical models of turbulence[M]. London: Academic Press, 1972: 90-110.
- [5] V. Yakhot, S.A. Orzag, Renormalization group analysis of turbulence [J]: basic theory. Scient Comput, 1986:3-11.
- [6] 代彬,陈章森,周维.基于 Realizable k-epsilon 模型的水闸下游水流数值模拟[J].水利与建筑工程学报,2018,16(4):176-180.
- [7] Bobby Minola Ginting. Central-upwind scheme for 2D turbulent shallow flows using high-resolution meshes with scalable wall functions[J]. Computers and Fluids, 2019, 1879.
- [8] 王福军.计算流体力学分析 -CFD 软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社.2006.
- [9] 郑德乾,柳阔,全涌,陈华,潘钧俊.杭州萧山国际机场 T4 航站楼主楼屋盖风荷载的风洞试验与数值模拟研究[J].建筑结构,2021,51(23):28-33.
- [10] 竹刺锋.大跨度斜拉桥风压分布特性的数值模拟研究[D].湖南科技大学,2015.
- [11] 姜鹏,张燎军.排架式渡槽风致响应的数值风洞模拟[J].水电能源科学,2014,32(1):100-103,99.
- [12] 龙俊廷.桥面局面风场实测及 CFD 对比研究[D].西南交通大学,2020.
- [13] 张志田,张显雄,陈政清.桥梁气动力 CFD 模拟中湍流模型的应用现状[J].工程力学,2016,33(6):1-8.
- [14] 李允.桥梁抗风设计[J].科学技术创新,2020(20):133-134.