

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2022.01.051

# 基于 CFD 模拟的钢管桁主梁气动特性研究

刘雪峰<sup>1</sup>, 马立秋<sup>2</sup>

(1.深圳市综合交通设计研究院有限公司, 广东 深圳 518003; 2.北京市轨道交通建设管理有限公司, 北京市 100000)

**摘要:** 基于计算流体力学方法,以深圳市拟建山谷沟壑处景观桥为研究对象,建立三维仿真节段模型进行气动性能研究。首先研究节段桁架模型在对称边界条件下的合理性,得出可以利用节段模型来代替三维整桥进行数值模拟。然后通过比较三维整桥模拟与国内现行规范中桁架桥气动参数选取方法,做出检验并提出改进建议。以桁架桥结构截面的外轮廓和实面积比作为控制条件建立二维等效模型,采用 4 种二维圆管桁主梁 CFD 计算简化模型,并计算了在  $-5^\circ$ 、 $-3^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $3^\circ$ 、 $5^\circ$  攻角情况下的桁架桥梁静力三分力系数。同时基于非定常时程曲线,对 4 种二维等效模型附近的空间流场结构、涡振性能差异进行了对比。

**关键词:** 圆钢管桁架桥;静力三分力系数;数值模拟;二维等效模型;涡激振动

中图分类号: U442.5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)01-0196-04

## 0 引言

圆管桁架桥有别于传统桁架桥,其部分构件为圆形构件,气流的分离点不是固定的,且受雷诺数影响。在现行的规范<sup>[1]</sup>中,对于圆管桁架桥阻力系数采取经验方法。由于实际工程项目具有其自身的特点,因此规范中的建议具有一定局限性。沈自力<sup>[2]</sup>以某桁架为对象,建立三维仿真模型进行气动研究并对比风洞试验结果,以外轮廓和实面积比作为控制条件建立二维等效模型。李永乐等<sup>[3-4]</sup>基于非定常计算所得气动力时程发展一种判断结构涡振性能的方法,并且将该方法应用在倒梯形板桁主梁上,对比分析了桥上车辆存在对板桁主梁气动特性的影响。本文基于 CFD 对圆管桁架桥梁气动特性进行研究,提出适用于该桥梁二维简化的数值模型,研究并分析其涡振特性。

## 1 数值模拟

### 1.1 研究背景

深圳市某健康步道工程景观桥,桥梁采用张弦桁架结构,并采用双索支撑桥面,桥面采用钢栅格形式。跨径为 120 m,桥主梁横断面高 1.2 m,桥面全宽 4.4 m,底面宽 2.2 m。桥梁主桁立面图如图 1 所示,上平联构造如图 2 所示。

### 1.2 三维仿真模型数值模拟

利用 Ansys 中 DesignModeler 建立三维仿真节段模型,如图 3(a)、图 3(b)所示。为较好捕捉流动特征,外部流域分为 3 个区域,如图 3(c)所示。最外层流域范围为  $50\text{ m} \times 50\text{ m} \times 150\text{ m}$ ,内流域为  $15\text{ m} \times 15\text{ m} \times 50\text{ m}$ 。近壁面区域设置贴体网格区,以实现将近壁面附近进行加密。远壁面区域网格较为稀疏,充分平衡了计算效率与计算精度问题,且满足阻塞率小于 5%,最终得到 2 600 万个网格单元。

数值模拟采用 Fluent 计算软件,其中湍流模型采用 SSTk- $\omega$  模型。该模型对流动分离具有较好捕捉<sup>[5]</sup>。湍流强度为 1%,湍流黏度比为 2,时间离散采用二阶隐式,对流项插值方法采用 QUICK,扩散通量采用默认 Least-Squares-Cell-Based,压力插值方法等其他空间离散均为二阶格式,以 SIMPLE 算法处理压强与速度的耦合。桥梁节段模型采用混合网格,贴体网格采用非结构网格,过渡区采用四面体网格,外流域采用六面体网格。

计算域入口风速,按深圳市百年一遇 10 m 高度处风速 39.7 m/s,换算至桥面相同高度处位置风速,考虑实际地理位置选用 B 类地貌,粗糙度指数为 0.16。压力出口,四周为对称边界条件。

### 1.3 二维仿真模型数值模拟

二维等效模型数值计算中,模型及边界条件见图 4。同样将流体域划分为 3 个部分,以核心区:尾流区:外流域区域按照 1:3:25 的比例划分网格<sup>[6]</sup>,近壁面第一层网格高度设置为 0.000 04 m,增长率为 1.1,

收稿日期: 2021-04-01

作者简介: 刘雪峰(1978—),本科,高级工程师,主要从事桥梁设计研究工作。

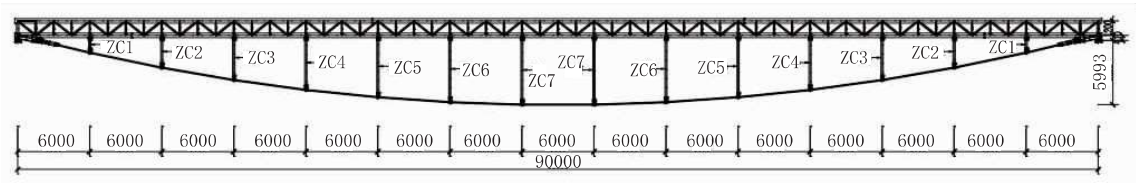


图1 主桁立面图

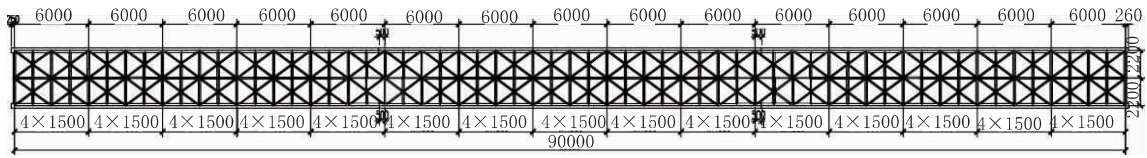
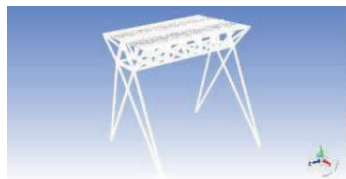
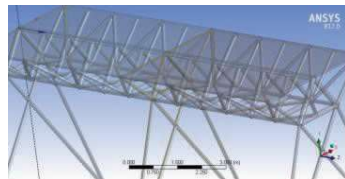


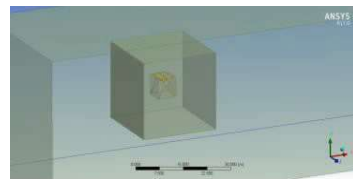
图2 上平联构造图



(a) 桥梁节段模型



(b) 桥梁两节段模型



(c) 三维空间流域

图3 模型及外流域

在黏性子层中布置 30 层。最终得到网格单元 58 万 ~ 60 万个,  $Y^+$  值约为 1 附近, 满足 SSTk- $\omega$  湍流模型对于网格精度的要求。

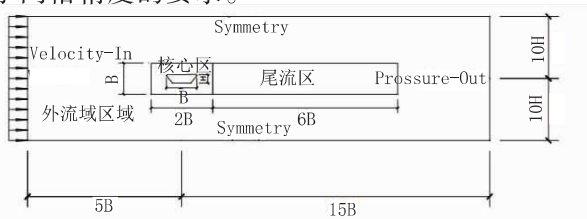


图4 二维模型及边界条件

### 1.4 涡振性能

气流绕过圆柱体时, 在一定雷诺数下会发生旋涡的脱落, 出现两侧交替变化的涡激力。当涡脱落频率与结构频率相近时, 可能会引发结构共振, 严重危害结构的安全性。

旋涡脱落频率可以用斯托哈罗数  $S_t=fD/U$  来描述<sup>[7]</sup>。其中:  $f$  表示旋涡脱落频率,  $D$  为物体垂直于来流方向上的特征长度,  $U$  为来流风速。通过非定常气动力时程变化曲线进行频谱分析, 即可提出旋涡脱落频率  $f$ , 再通过  $S_t=fD/U$  计算, 得到所需的斯托哈罗数。再根据实桥主梁截面的特征尺寸  $D_s$  和自振频率  $f_s$ , 由  $S_t$  = 涡振的临界速度。

## 2 模拟分析

### 2.1 节段模型气动力系数

斯托哈罗数  $f_s D_s / U_s$  得到可能发生全桥为圆管钢桁架桥, 长度为 120 m, 一个标准节段的长度为 6 m。在对称边界条件下, 对一个标准节段模型及两个标准节段模型进行三分力系数计算, 升力系数时程曲

线及升力系数功率谱如图 5 所示。

由图 5(a)、图 5(c)可以看出, 一节段模型升力系数近似为两阶段模型升力系数值的一半。由图 5(b)、图 5(d)可以看出, 二者具有相近的功率谱, 且高频段最高均为 25 Hz。可以近似利用一节段模型来代替整桥模型, 减少计算量。

### 2.2 建立二维等效模型

桁架桥断面最大实面积比约为 0.331, 最小实面积比为 0.213。以实面积比为控制条件, 建立 4 种等效模型, 如图 6 所示。其中, 等效模型 1 与等效模型 2 在下平联处有所差别, 等效模型 1 下平联处截面面积为相同位置处实面积的 1/5, 等效模型 2 下平联处截面面积为相同位置处实面积的 1/7。等效模型 1 与等效模型 3 在腹杆处有所差别, 等效模型 1 腹杆处截面面积为相同位置处实面积的 1/3, 而等效模型 3 为 1/5。等效模型 2 与等效模型 4 差别同样在于腹杆处, 模型 2 腹杆处面积为相同位置处面积 1/3, 而模型 4 为 1/5。

### 2.3 二维等效模型气动参数

对比比较 4 种等效模型在  $-5^\circ$ 、 $-3^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $3^\circ$ 、 $5^\circ$  静力三分力系数, 结果如图 7 所示。

由图 7 可以看出, 等效模型 1 与等效模型 2 表现出静力特性较为相似。同样, 等效模型 3 与等效模型 4 表现出静力特性较为相似。腹杆处实面积的大小对桁架桥梁三分力系数具有较大影响, 而下平联杆处实面积大小对桁架桥梁三分力系数影响较小。

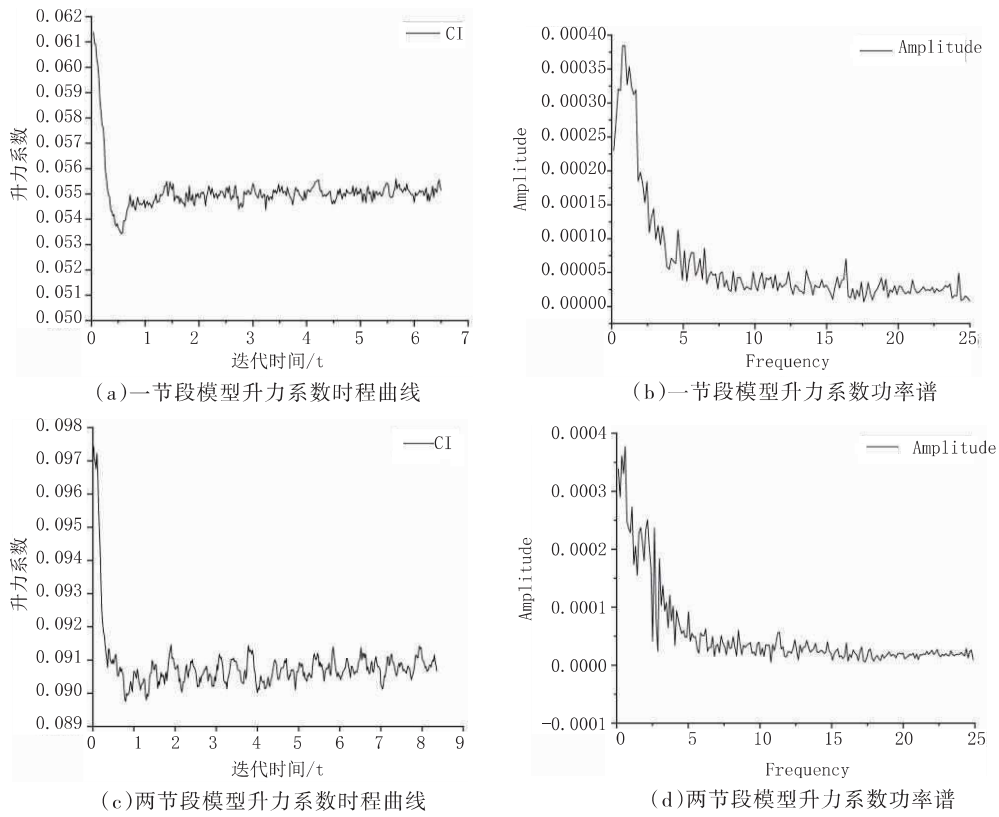


图 5 升力系数时程曲线及升力系数功率谱

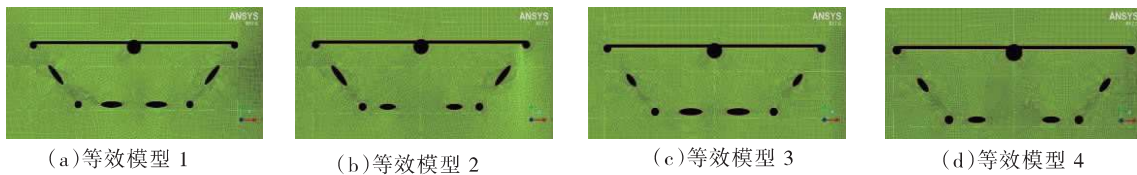


图 6 4 种等效模型

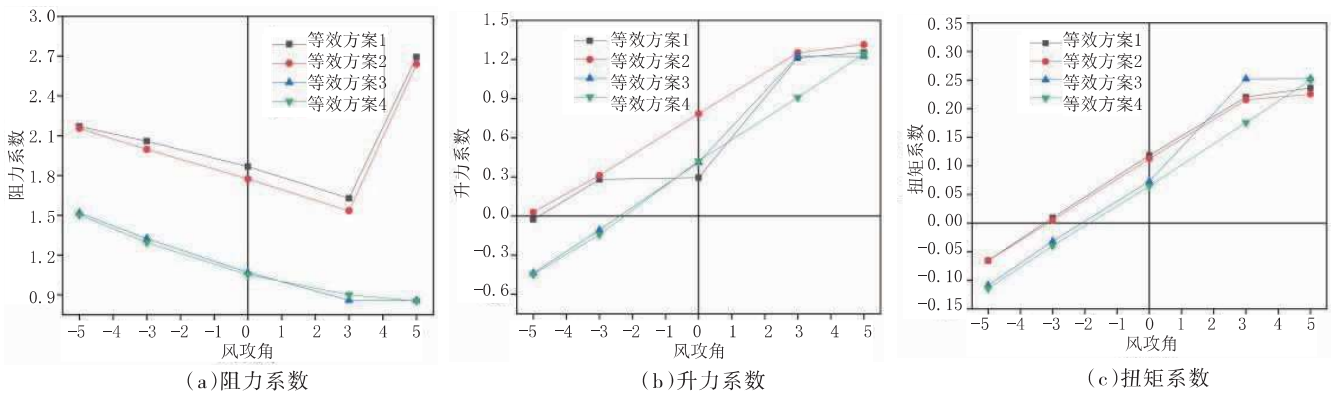


图 7 4 种等效模型静力三分力系数

2.4 涡振性能分析

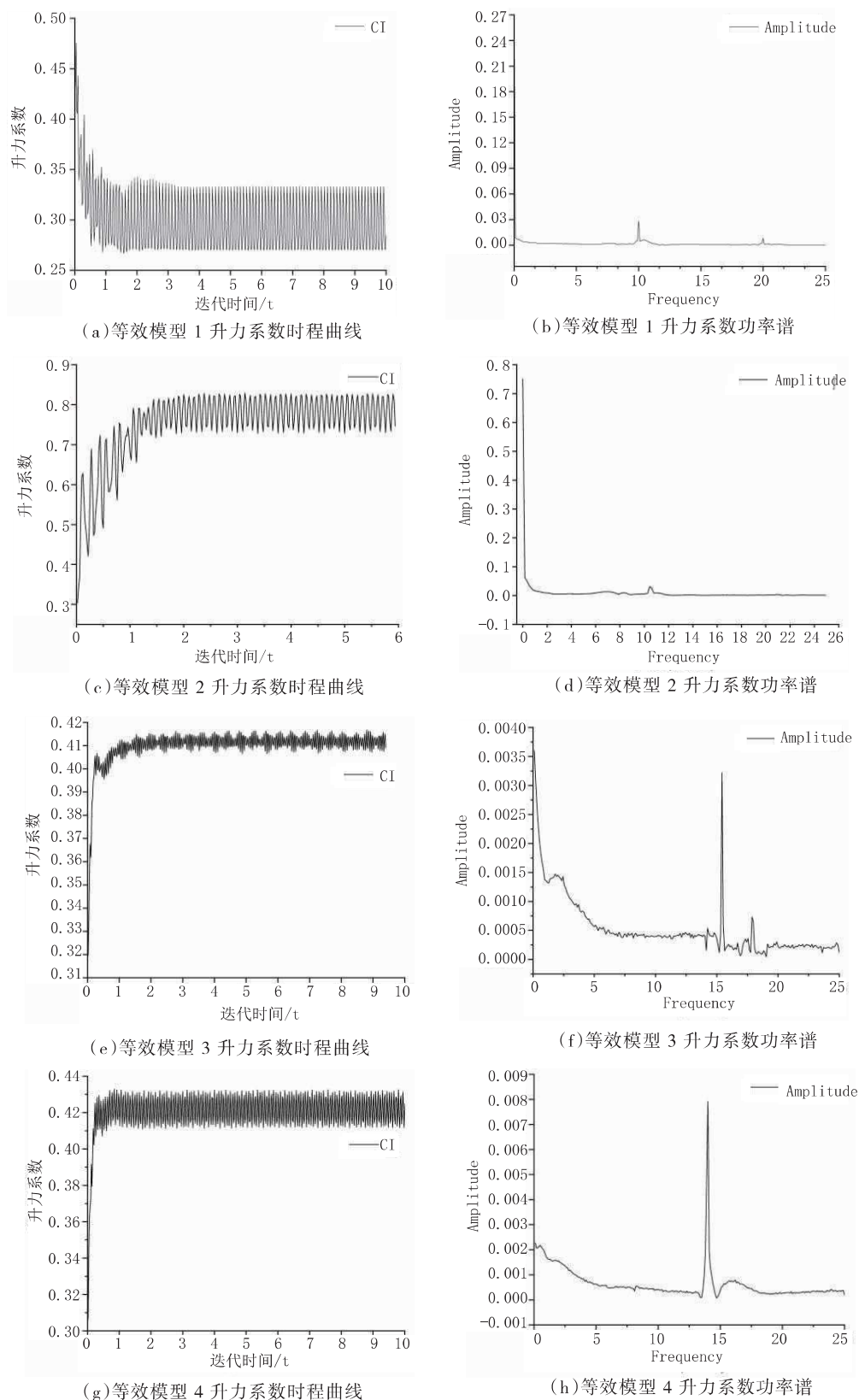
图 8 为  $0^\circ$  攻角下 4 种等效模型升力系数时程曲线及功率谱。主梁涡振性能见表 1。计算结构动力特性时,张弦桁架桥结构阻尼比取 0.02, E1 地震最大反应谱系数  $S_{max}=0.1514$ , X、Y、Z 三个方向同时输入反应谱,比例为 1 : 1 : 0.65。模态组合 CQC 法,方向组合 SRSS 法,得到一阶模态对应的自振频率为 0.892 9 Hz。

表 1 通过各截面涡振性能计算,反映了不同等效

模型的涡激振动规律。发振的风速最大为 14.528 m/s, 最小为 9.61 m/s。在实际气候条件下出现这种风速的概率较大,发生涡振的可能性较大。

3 主要结论与分析

(1)数值结果表明,桥梁节段模型在对称边界条件下可以很好地反映整桥风场变化规律,可以利用节段模型来替代整桥模型的建立,以此来减少计算机的计算量。

图 8 4 种等效模型  $0^\circ$  攻角下升力时程及频谱曲线

(2) 在以控制外轮廓与实面积比为前提的条件下, 二维桁架桥断面数值模拟结果比三维桥梁节段模型结果阻力值与升力值偏大, 扭矩较为接近。对比《公路桥梁抗风设计规范》中建议, 考虑实面积比与遮挡系数, 圆柱形构件阻力系数取值, 发现规范中的阻力

取值与数值模拟结果对比较小, 偏差基本保持在 30%~40%。这是因为规范中仅考虑桁架断面的轮廓形状, 并未考虑圆管桁架所具备的特殊绕流性质, 以及上下平联及左右桁架的通透情况。

(3) 二维等效模型中, 下平联杆迎风面积大小对

(下转第 207 页)



行固结分析,分析表明,隧道随着挖方卸载隆起,填方加载沉降,总体位移可以控制在1 mm以内,可以满足隧道安全运营的要求。

(2)路基填挖方施工在隧道周围产生的超静负孔隙水压力,超静孔压完全消散大约在路基施工完成后620 d左右完成,而95%消散完毕只需要约140 d,故随着超孔隙水水压力的减小,其消散速度快速减缓。

(3)隧道的变形主要发生在施工期,施工后的地层固结影响对隧道工后变形的影响较小。

(4)在运营隧道上方进行填筑路基等需要加荷施工时,首先挖方卸载再换填轻质材料的方案是可行的,对运营隧道的影响较小。

#### 参考文献:

- [1] 谢家冲,王金昌,黄伟明.地面堆载作用下盾构隧道管片开裂行为分析[J].铁道科学与工程学报,2021(18):162-171.
- [2] 徐玉锋.地铁隧道上方EPS轻质泡沫块桥坡填筑施工技术[J].城市道桥与防洪,2019(1):123-126.
- [3] 刘小丽,马悦,郭冠群,等.PLAXIS2D模拟计算基坑开挖工程的适用性分析[J].中国海洋大学学报,2012,42(4):20-24.

(上接第199页)

表1 主梁涡振性能

等效模型	1	2	3	4
卓越频率 $f/\text{Hz}$	10.0	10.438	15.426	14.0
斯特哈罗数 $S_r = fD/U$	0.256	0.277	0.409	0.371
发振风速 $V_s = f_s D_s / S_s$	14.825	14.202	9.610	10.589

静力三分力系数影响较小,空间斜腹杆迎风面积大小对静力三分力系数影响较大,升力系数与阻力系数对攻角变化较为敏感。

(4)4种等效模型中,升力系数功率谱存在较为明显的卓越频率。从时程曲线中也可以看出,4种等效模型升力系数功率谱存在低频段和高频段,结构在较低风速下可能发生涡振。

#### 参考文献:

- [1] 部门中交公路规划设计院.公路桥梁抗风设计规范[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [2] 沈自力.基于CFD的桁架桥气动参数研究[J].铁道科学与工程学报,2015(4),852-858.
- [3] 汪斌,李永乐,郝超,等.大跨度连续刚构桥钝化主梁气动特性数值分析[J].四川建筑科学研究,2008,34(5):19-22.
- [4] 李永乐,安伟胜,蔡宪棠,等.倒梯形板桁主梁CFD简化模型及气动特性研究[P].全国结构工程学术会议,2010.
- [5] Menter F R, M.Kuntz, R.Langtry. Ten years of experience with the SST turbulence model Turbulence Heat & Mass Transfer,2003,4.
- [6] 纪兵兵,陈金瓶. ANSYS ICEM CFD 网格划分技术实例详解[M].北京:中国水利水电出版社,2012.
- [7] 陈政清.桥梁风工程[M].北京:人民交通出版社,2005.