



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2402774

引用格式:杜小振,郭东兴,王文秀,等.基于重叠网格技术柔性旗帜与流体耦合运动数值模拟[J].科学与技术工程,2025,25(2):473-483.

Du Xiaozhen, Guo Dongxing, Wang Wenxiu, et al. Numerical simulation of flexible flag-fluid coupled motion based on overlapping grid technique[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(2): 473-483.

基于重叠网格技术柔性旗帜与流体耦合运动数值模拟

杜小振,郭东兴,王文秀,韩艺,刘晓彤,王淑珺

(山东科技大学机械电子工程学院,青岛 266590)

摘要 为研究分析自然界与风能采集领域中柔性旗帜与空气流固耦合运动特性,基于空气动力学原理和二维柔性板轴向不可拉伸假设推导旗帜颤振非线性理论模型,研究了旗帜与空气之间的耦合运动,分析长度、质量比和风速对其运动特性影响。利用双向流固耦合方法及重叠网格技术对旗帜随风摆动过程进行数值模拟,得出流场中旗帜运动行为及周围流场特性。结果表明:临界颤振风速随旗长增加而减小,摆动位移随风速增加先增大后减小;质量比越大,颤振频率越小,斯特劳哈尔数受其影响较小;旗帜尺寸一定时,风速较小,摆动位移、频率较小,风速超过临界颤振风速发生大幅度颤振现象;旗帜周围漩涡会经历产生、脱落和消失过程,周围压力及速度会随漩涡运动过程发生变化。可见采用基于重叠网格技术的数值模拟方法可有效解决柔性旗帜大变形问题,实现理论与数值仿真验证分析。

关键词 柔性旗帜;流固耦合;重叠网格;流场;数值模拟

中图分类号 O351.2; **文献标志码** A

Numerical Simulation of Flexible Flag-Fluid Coupled Motion Based on Overlapping Grid Technique

DU Xiao-zhen, GUO Dong-xing, WANG Wen-xiu, HAN Yi, LIU Xiao-tong, WANG Shu-jun

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

[Abstract] Aerodynamic principles and the assumption of axial inextensibility of a two-dimensional flexible plate were used to derive a nonlinear theoretical model of flag flutter, investigate and analyze the coupled motion characteristics of flexible flag and airflow in nature and wind energy collection fields, and examine the effects of length, mass ratio, and wind speed on its motion characteristics. The flag oscillation process in the wind was numerically simulated using the bidirectional fluid-structure coupling method and the overlapping mesh methodology, from which the features of the surrounding flow field and the motion behavior of the flag inside it were determined. The findings indicate that while swing displacement increases and subsequently declines with wind speed, the crucial flutter wind speed lowers as flag length increases. The chirp frequency decreases as the mass ratio increases, and the Strahl number is less affected. With the predefined dimensions of the flag, at low wind speeds, both the displacement and frequency of the swing are low. However, when the wind speed exceeds the critical vibration threshold, a significant vibration phenomenon occurs. Changes in surrounding pressure and velocity are caused by the flag-encircling vortex as it progresses through phases of formation, shedding, and disappearing. Numerical simulation techniques based on the overlapping mesh methodology successfully address the deformation problem of flexible flags. Theoretical and numerical simulations can be verified and analyzed with this method.

[Keywords] flexible flag; flow field; fluid-structure interaction; overlapping grid; numerical simulation

在自然界中,柔性旗帜与空气相互耦合现象存在已久。柔性旗帜随风摆动是一种典型的由流体激励产生振动的问题,近年来正逐渐成为一个热门课题,旗帜在能量采集领域应用广泛^[1-3]。目前柔性旗帜与空气进行双向耦合的研究方法主要有理

论方法、数值方法和实验方法。

理论方法通常基于线性或非线性结构模型与气动模型相结合,对均匀来流中柔性体提出不同物理模型,理论计算分析柔性体的稳定性。Michelin等^[4]提出二维涡脱落模型,分析旋涡尾迹,使欧拉-

收稿日期:2024-04-17; 修订日期:2024-11-12

基金项目:山东省自然科学基金(ZR2021ME111)

第一作者:杜小振(1978—),男,汉族,河南南阳人,博士,教授。研究方向:柔性摩擦发电传感器供能技术、压电、电磁发电微电源。E-mail: duxz@sdust.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

伯努利梁模型应用于固体, 势流模型应用于流体。Eloy 等^[5]分析了弱非线性稳定性并实验研究, 发现旗帜不稳定性中滞后的原因。Yu 等^[6]使用理论无黏模型对旗帜从拉伸模态转变为扑动模态时的临界弯曲刚度进行了有效预测。Alben^[7]使用无黏模型和线性化模型研究了旗帜质量和弯曲刚度对模态数、频率和振幅的影响。研究发现在旗帜质量较小时, 随着质量增加, 频率有小幅增加; 旗帜质量较大时, 主模态数较小, 扑动幅值接近饱和, 频率趋近于零。

近些年来, 在各行业中数值模拟方法由于其效率高、精度高以及成本低等优点, 得到较为广泛的推广与应用^[8-11]。数值方法方面通常利用计算流体力学模型加入黏性效应来求解 N-S 方程。Nawafleh 等^[12]数值模拟了标准旗帜在黏性均匀层流中的流固耦合现象, 研究在不同雷诺数下流场与旗帜之间响应, 将仿真与实验数据对比, 发现吻合较好, 同时对无黏理论模型和黏性模型比较, 对相同流动条件下无黏模型的准确性进行验证, 发现无黏模型较好计算了振动频率, 但对振动幅度、阻力系数和升力系数的计算有一定差异。Olivieri 等^[13]采用浸入边界法研究了旗帜在中等雷诺数湍流作用下的动力学, 研究了湍流强度对自持续扑动的影响, 发现随着湍流强度的增加, 扑动频率减小, 扑动幅值增大。众多研究者将理论、数值模拟和实验方法结合对旗帜运动特性进行了分析研究。Deng 等^[14]通过数值模拟与实验结合, 研究分析了在运动诱导激励、外诱导激励及两者耦合激励情况下旗帜 3 种不同的扑动行为, 研究发现旗帜一个扑动周期内出现 4 个连续尾涡脱落周期。Tavallaeinejad 等^[15]通过理论计算和实验研究的方法分析了倒旗长宽比及材料对稳定性和动力特性的影响, 研究发现旗帜长宽比逐渐增大时, 旗帜由稳定静态平衡状态转化为不稳定发散状态。Hiroaki 等^[16]采用非线性梁模型及涡点阵方法对均匀流中旗帜进行研究, 进行了数值模拟及实验测量, 研究发现涡元模型计算的模态与实验数据基本吻合, 但流速对颤振频率的影响表现出与实验相反的趋势。同时仿真结果与实验结果吻合性较好, 发现流动分离出现在旗帜侧面边缘, 在旗后产生环绕流。

由于柔性旗帜自身非线性问题的复杂性, 目前对三维旗帜与流体相互作用下旗帜运动特性及周围流场特性需进一步分析, 相关参数对其运动特性影响未得到充分研究。

因此, 现推导出旗帜颤振非线性理论模型, 研究旗长、质量比和风速对柔性旗帜运动特性影响。利用

双向流固耦合方法及重叠网格技术, 采用三维非定长可压缩 N-S 方程, 数值模拟流体作用下柔性旗帜摆动过程, 研究其运动特性及其周围流场演变过程。

1 数值模拟方法

1.1 计算域与边界条件

柔性旗帜在大自然中受到风的作用时会发生摆动现象, 如图 1(a) 所示。为探究自然界中旗帜随风运动以及流场特性问题, 基于 Ansys Workbench 平台, 利用双向流固耦合方法 (Fluent + Mechanical + System Coupling) 进行物理场耦合数值模拟分析。柔性旗帜受到速度为 U 的风激励发生摆动时, 旗帜表面压力及其周围产生的漩涡数值模拟结果如图 1(b) 所示。

计算域模型如图 2(a) 所示, 整个计算域尺寸设置为 $L_c \times W \times H = 1\ 000\ \text{mm} \times 60\ \text{mm} \times 200\ \text{mm}$ (L_c 为计算域长度, W 为旗帜宽度, H 为计算域高度) 的长方体, 流体为不可压缩流体, 自左向右运动, 流体密度为 $\rho_a = 1.0\ \text{kg/m}^3$, 左侧为恒速度入口边界, 右侧为压力出口边界, 上下边界为对称性边界条件。重叠网格区域尺寸 $L_a \times W \times H_a = 140\ \text{mm} \times 60\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$ (L_a 为重叠网格区域长度, W 为旗帜宽度, H_a 为重叠网格区域高度), 重叠网格区域与流体入口处距离 $4L$ (L 为旗帜长度), 与上下壁面距离 $2L$ 。重

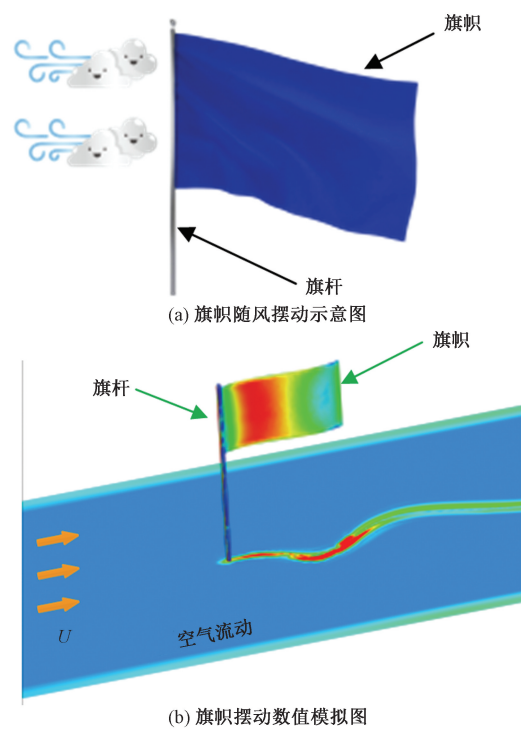


图 1 旗帜示意图及数值模拟结构图

Fig. 1 Diagram of flag structure and numerical simulation structure

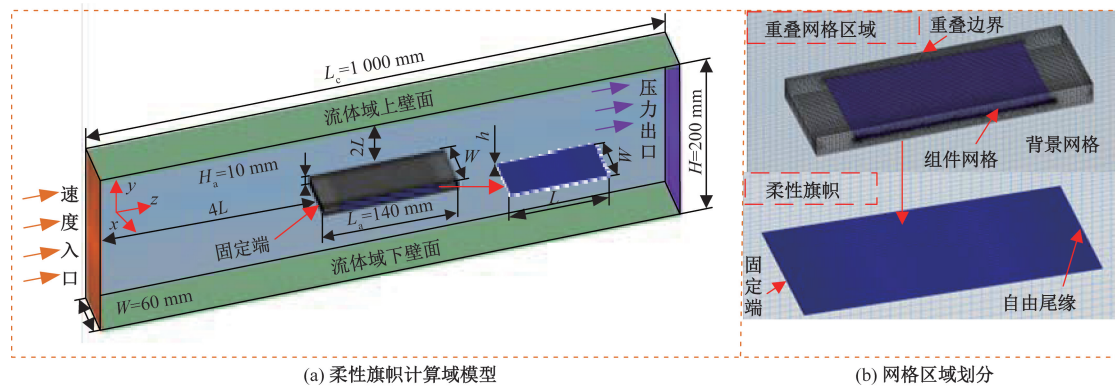


图2 流体域模型及网格划分

Fig. 2 Fluid domain model and meshing

叠网格中柔性旗帜尺寸 $L \times W \times h$ (L 为旗帜长度, h 为旗帜厚度), 旗帜密度 $\rho_v = 1\ 500\ \text{kg/m}^3$, 杨氏模量 $E = 3.2\ \text{GPa}$, 泊松比 $\nu = 0.3$ 。旗帜前缘固定, 尾缘可以自由摆动。

1.2 重叠网格划分

重叠网格技术是对每个部件单独划分网格, 网格之间有重叠部分, 不同区域之间的网格相互独立并行计算, 并通过插值的方式进行网格之间耦合^[17]。模拟部件运动仅需要定义子区域运动规律, 子区域运动不影响整体网格, 可较好地处理旗帜大幅度运动使得网格变形量大的问题。

采用重叠网格技术进行流固耦合数值模拟, 重叠网格由组件网格和背景网格两部分组成, 本文中流体域为静止背景网格, 旗帜及其计算域为运动组件区域, 通过重叠边界两个区域进行信息的传递^[18]。根据计算精度以及模型结构特点对网格进行划分, 网格计算域划分如图 2(b) 所示, 流体区域以及旗帜采用六面体结构网格, 重叠区域采用六面体非结构化网格, 同时使用合并网格节点方法改善重叠网格交界面处质量。背景网格为长方体流体域, 用于观察较远位置流场变化情况, 该区域设置有 $400 \times 20 \times 80$ 的均匀六面体结构化网格, 网格单元数量约为 66×10^4 , 该区域网格尺寸接近于部件网格外层网格尺寸, 确保两者数据传输准确性。部件网格为长方体区域, 内部有 $100 \times 20 \times 10$ 的六面体高质量非结构化网格, 网格单元数量约为 33×10^4 , 并在内层紧贴旗帜表面进行局部面网格加密。在瞬态结构物理场中设置旗帜为 $400 \times 200 \times 2$ 的六面体结构化网格, 网格单元数量约为 16×10^4 , 网格总计约 115×10^4 , 部件网格与背景网格通过在重叠区域进行数据插值获得该处流场信息。考虑到重叠网格对计算时间步长要求较为严格且时间步长过小会增大计算成本, 因此为平衡计算精度与计算成本, 本文算例时间步长设置为 $0.000\ 5\ \text{s}$ 。

1.3 计算流体力学控制方程

模拟迎风柔性旗帜流固耦合现象, 选择二阶迎风离散格式模拟流场, 重叠网格与结构网格采用稳定性较好、求解速度较快的 SIMPLE 耦合算法, 所研究介质为空气, 旗帜与空气之间双向耦合作用不存在传热等变化, 假设流场气体不可压缩。流体运动方程为不可压缩黏性流体连续方程和动量方程, 即 Navier-Stokes 方程^[19-21]为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式(1)中: u, v 和 w 分别为速度矢量在 x, y 和 z 方向的投影; ρ 为气体密度。

动量守恒方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = \\ - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} - \rho \overline{u_i u_j} \right) + F_i \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)中: p 为流场压力; t 为时间; u_i, u_j 为第 i 和 j 速度分量; x_i 和 x_j 均为空间坐标分量; F_i 为第 i 方向的受力; μ 为流体动力黏度系数; $-\rho \overline{u_i u_j}$ 为雷诺应力项。

对不可压缩的流体, 雷诺应力公式为

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (3)$$

式(3)中: μ_t 为湍动黏度; δ_{ij} 为“Kronecker Delta”符号, 当 $i = j$ 时 $\delta_{ij} = 1$, $i \neq j$ 时 $\delta_{ij} = 0$; k 为湍动能, $k = \frac{\overline{u_i u_i}}{2} = \frac{1}{2} (\overline{u_1^2} + \overline{u_2^2} + \overline{u_3^2})$ 。

计算使用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型方程封闭控制方程, 方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial t} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v\varepsilon}} \quad (5)$$

式中: G_k 为平均速度梯度而产生的湍流动能; $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$; $\sigma_k = 1.0$; $C_2 = 1.9$; $\rho\varepsilon = 1.2$; $A_s = \sqrt{6}\varphi$; $\varphi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W)$; $C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s U^* k/\varepsilon}$; $C_1 = \max\left(0.43, \frac{\eta}{\eta + 5}\right)$; $\eta = (2E_{ij}E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon}$

2 理论分析方法

2.1 旗帜颤振理论模型

流体作用于旗帜的两个表面, 并从固定端流向自由端, 在其作用下旗帜发生摆动行为, 旗帜摆动示意图如图 3(a) 所示。

旗帜进行结构分析时, 以平面内二维模型为研究对象构建二维柔性旗帜非线性颤振理论模型, 不考虑其三维性。单侧固定旗帜轴向流动示意图如图 3(b) 所示, 旗帜长度为 L , 厚度为 h , 宽度为 W , 在对旗帜进行二维分析时, 宽度 $W \square$, 旗帜左端为固定端, 右端为自由端, 分析二维旗帜结构, 取其上一小块微元, ds 为旗帜上一小块微元, ds 、 dy 为微元在 x 与 y 方向位移分量, θ 为微元与水平线之间夹角, ρ_r 为微元曲率半径, $d\theta$ 为微元角度。

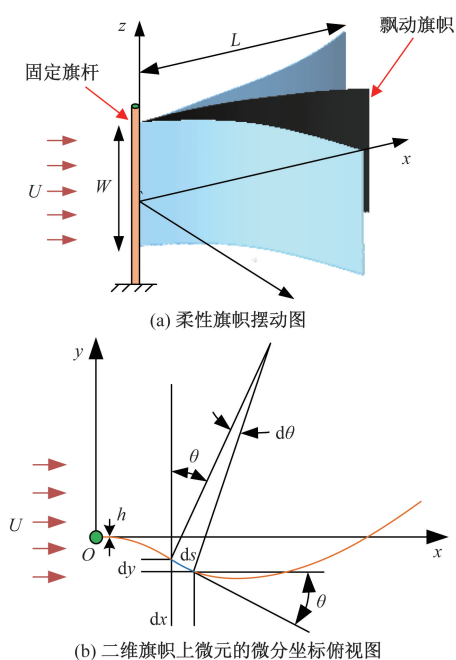


图 3 旗帜摆动结构分析

Fig. 3 Analysis of flag fluttering structure

作用在柔性旗帜上一点处的力矩与该点处的曲率之间关系^[22-24]为

$$\frac{M}{K_B} = \frac{d\theta}{ds} \quad (6)$$

式(6)中: K_B 为旗帜抗弯刚度; M 为该点的力矩。

由图 3(b) 可以得出关系式为

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{d}{ds} \left(\arcsin \frac{dy}{ds} \right) = \frac{\frac{d^2 y}{ds^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{dy}{ds} \right)^2}} \quad (7)$$

由式(6)与式(7)可得在坐标下的绕曲线微分方程为

$$\frac{M}{K_B} = \frac{\frac{d^2 y}{ds^2}}{\left[1 - \left(\frac{dy}{ds} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (8)$$

在理想二维模型中, 不考虑旗帜转动, 忽略其转动动能, 则其动能表示为

$$E_k(t) = \int_0^L \frac{m_s}{2} \left(\frac{\partial x}{\partial t} \right)^2 + \frac{m_s}{2} \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right)^2 ds \quad (9)$$

不考虑旗帜可拉伸性, 其摆动的弹性势能可以表示为

$$E_p(t) = \int_0^L \frac{M(s,t)^2}{2K_B} ds = \int_0^L \frac{K_B \left(\frac{\partial^2 y}{\partial s^2} \right)^2}{-2 \left(\frac{\partial y}{\partial s} \right)^2 + 2} ds \quad (10)$$

旗帜在流体作用下发生摆动行为过程中每个周期平均能量为

$$E = \int_{t_0}^{t_0+T} \frac{1}{2T} \left\{ \int_0^L \left[m_s \left(\frac{\partial x}{\partial t} \right)^2 + m_s \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right)^2 + \frac{K_B \left(\frac{\partial^2 y}{\partial s^2} \right)^2}{- \left(\frac{\partial y}{\partial s} \right)^2 + 1} ds \right] dt \right\} \quad (11)$$

式(11)中: T 为旗帜摆动周期。

柔性旗帜运动时会受到流固耦合及边界尾涡影响, 发生弯曲、扭转等现象。为简化旗帜运动分析过程, 做出以下假设: 首先来流气体为不可压缩理想型流体, 其次考虑旗帜运动始终为二维运动, 不考虑其三维性, 然后不考虑旗帜与空气的接触边界层, 最后旗帜总质量 $m = m_s + m_a$, 考虑其本身质量 $m_s = \rho_v hL$ 以及空气作用到旗帜表面附加质量 $m_a = \rho_a A$, A 为旗帜横截面积, 由于旗帜非常薄其横截面积 $A \rightarrow 0$, 故忽略附加质量 m_a 的影响, 此时 $m \sim m_s$ ^[25]。

柔性旗帜在流致振动下控制方程表示为

$$m_s \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} = W\Delta P + T_a \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} - K_B \frac{\partial^4 Y}{\partial x^4} \quad (12)$$

式(12)中: Y 为旗帜位置变化函数; K_B 为旗帜弯曲刚度; $m_s = \rho_v hL$ 为旗帜质量; W 为旗帜宽度; P 为旗帜两侧压力差值; T_a 为流体施加在柔性体上的张力。

柔性旗帜弯曲刚度 K_B 表示为

$$K_B = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)\rho_a U^2 L^3} \quad (13)$$

式(13)中: ρ_a 为空气密度; h 为旗帜厚度; L 为旗帜长度; E 为旗帜杨氏模量; ν 为泊松比; U 为风速。

结合式(12)与式(13), 柔性旗帜运动控制方程表示为

$$\rho_v hL \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} = W\Delta P + T_a \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} - \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)\rho_a U^2 L^3} \frac{\partial^4 Y}{\partial x^4} \quad (14)$$

旗帜前缘固定, 尾端自由的情况, 与式(14)相关的边界条件为

$$\begin{cases} Y(t, 0) = 0, \\ \frac{\partial Y}{\partial x}(t, 0) = 0 \\ \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2}(t, L) = 0 \\ \frac{\partial^3 Y}{\partial x^3}(t, L) = 0 \end{cases} \quad (15)$$

旗帜上各个点的运动均近似为简谐运动, 旗帜运动描述为

$$Y = A_a \sin\left(2\pi ft + \frac{2\pi x}{\lambda}\right) \quad (16)$$

式(16)中: x 为点到旗帜前缘距离; A_a 为旗帜摆动幅度; f 为旗帜摆动频率; λ 为扑动波长。

柔性旗帜气动力和惯性力达到平衡状态时, 有

$$\rho_a U^2 \theta = \rho_v \omega^2 hL\theta \quad (17)$$

由式(17)得到柔性旗帜颤振频率, 即

$$f_a \sim \sqrt{\frac{\rho_a U^2}{\rho_v hL}} \quad (18)$$

式(18)中: ρ_v 为旗帜密度。

柔性旗帜气动力和弯曲应力相平衡时, 有

$$\rho_a U^2 \theta = \frac{Eh^3 \theta}{L^3} \quad (19)$$

由式(19)得到柔性旗帜颤振临界风速, 即

$$U_a \sim \sqrt{\frac{Eh^3}{\rho_a L^3}} \quad (20)$$

在达到某一临界流速时, 旗帜会发生颤振现象并自我保持稳定, 影响颤振无量纲参数有质量比

(M^*)、斯特劳哈尔数(S_t), 即

$$M^* = \frac{\rho_v h}{\rho_a L} \quad (21)$$

$$S_t = \frac{fL}{U} \quad (22)$$

2.2 旗帜颤振动力学性能分析

运动诱发激励(motion-induced excitation, MIE)为颤振的起源之一, 当旗帜结构在流场中运动时, 结构与气流之间发生流固耦合作用会产生运动诱发激励。当气流流速增加时, 气流对旗帜施加的压力会导致其产生振动。这种振动可能是由于气流的周期性变化引起的共振效应, 或由于气流的不稳定性导致其本身发生非线性振动。当来流风速达到临界值时, 这些激励会导致颤振现象。采用旗帜颤振非线性理论模型, 改变旗帜相关无量纲参数, 研究分析柔性旗帜运动特性。由式(20)可知, 旗帜临界颤振速度与旗帜长度(L)有关。此外, 根据式(18)与式(21), 颤振频率取决于风速(U)以及质量比(M^*), 因此研究旗长、风速和质量比对柔性旗帜运动特性的影响。

图4(a)显示了旗帜临界风速(U)与旗帜长度(L)的关系, 随着旗帜长度的增加临界风速减小。这是因为在旗帜宽度一定时, 随旗帜长度增加, 重量增加, 临界速度下降, 这与 Shelly 等^[26]发现旗帜在惯性较高情况下, 临界速度较低的观点一致。从图4(b)可知, 在同一质量比下, 颤振频率与风速成正比, Shelly 等^[26]也得出相同结果。同时可以发现, 同一风速下, 随着质量比增加颤振频率减小。这是由于旗帜质量比越大, 惯性越大, 颤振频率就会降低。图4(c)所示的旗帜颤振频率及斯特劳哈尔数随质量比变化关系, 结果表明, 颤振频率对质量比变化较为敏感, 但斯特劳哈尔数随质量比变化幅度较小, 此结果与 Shoele 等^[27]研究结果一致。一般而言, 在相同流动条件下, 斯特劳哈尔数较小(流动频率相对于流速较小)时, 质量比对旗帜摆动影响较大; 斯特劳哈尔数较大(流动频率相对于流速较大)时, 流体作用力对摆动的影响会比质量比对摆动的影响更为显著。

旗帜摆动由其尾缘在 z 方向的偏转来描述, 即旗帜摆动的基本特征: 包络线内的行波从前缘的零值增长到后缘的最大振幅。旗帜在不同风速下摆动位移曲线近似为正弦曲线, 根据柔性旗帜末端摆动幅度研究旗帜摆动位移变化。图5为不同长度旗帜在不同风速下摆动位移曲线, 由图5可以看出, 随着风速的增加, 摆动位移呈现出先增加后下降的趋势, $L = 110$ mm 旗帜在 $U = 5, 6, 7, 8, 9$ m/s 时, 摆动

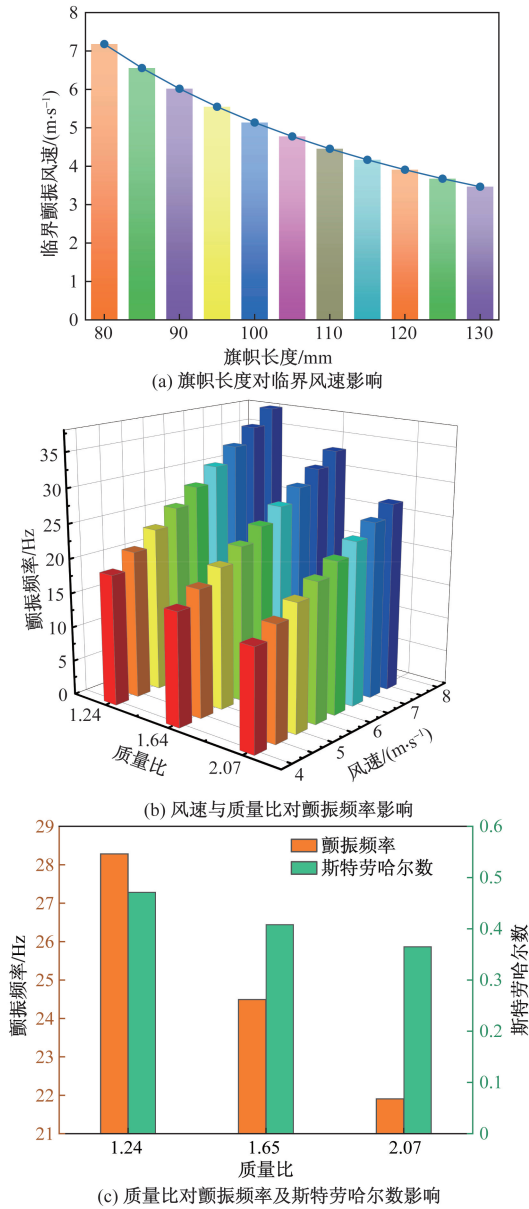


图4 旗帜颤振特性理论计算

Fig. 4 Theoretical calculation of flag flutter characteristics

位移为 45.51、52.31、59.7、61.2、57.57 mm,其他长度旗帜位移响应均表现出相同趋势。与此同时,在同一风速下,尾缘摆动位移均随着旗长的增加而下降,在 $U=9$ m/s 时, $L=105$ 、110、115 mm 旗帜对应尾缘位移为 61.5、57.57、56.23 mm。流速的增加会导致系统获得的能量和阻尼增加,流速一旦达到某个特定值时,阻尼耗散的能量就会与系统获得的能量相当,流速进一步提高会导致能量耗散程度超过系统所获得的能量。因此,当风速超过特定值时,旗帜振幅不会再增加,甚至会略有减小。

3 柔性旗帜运动特性数值分析

研究旗帜颤振过程中其附近流场发展趋势,自

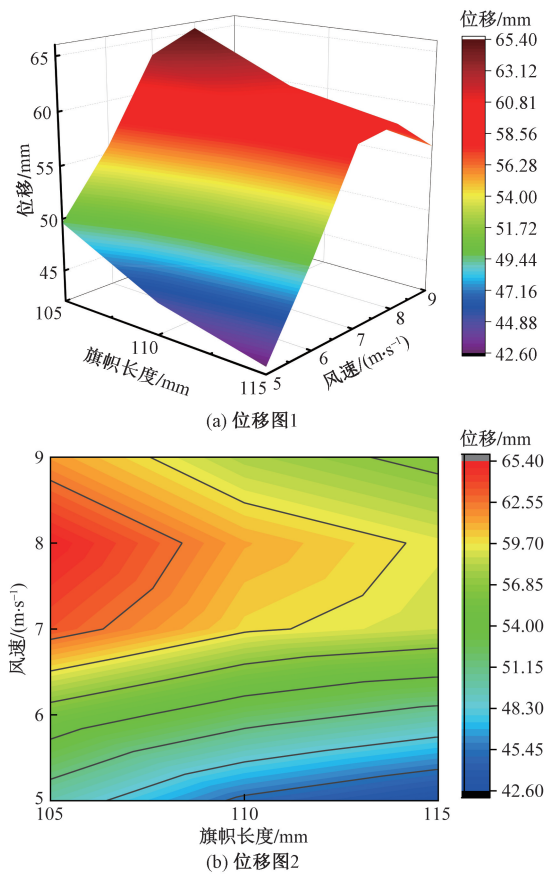


图5 不同风速下 105、110、115 mm 旗帜摆动位移曲线

Fig. 5 Oscillating displacement curves of 105、110 and 115 mm flags under different wind speeds

然界中微风较为常见,选取风速 $U=5$ m/s 进行分析研究,选取长度 $L=110$ mm,宽度 $W=50$ mm,厚度 $h=0.2$ mm 柔性旗帜分析其周围不同时刻涡量、压力以及速度变化及其位移响应。

3.1 流场涡量分析

柔性旗帜受到来流作用发生摆动时,来流对旗帜周围气流产生了较大扰动,易在旗帜上下表面形成漩涡,漩涡产生与脱落随旗帜颤振过程呈周期性变化,同时旗帜也受到漩涡产生与脱落引起的升力。在 $U=5$ m/s 速度下柔性旗帜周围涡量变化如图 6 所示,分析柔性旗帜在一个周期内摆动构型以及运动过程中漩涡变化情况。当 $t=0.03$ s 时,旗帜处在初始状态,有较小幅度摆动,上下两侧出现不稳定边界层,周围漩涡较小;在流体作用下,旗帜失去其自身稳定性,出现大幅度摆动现象,漩涡不断产生与脱落,当 $t=0.14$ s 时,旗帜开始向下弯曲,尾缘处产生两个方向相反的 A 和 B 漩涡,并逐渐后移;当 $t=0.16$ s 时,旗帜向下弯曲到最大幅度,尾缘摆动至 y 方向极小值,此时整体速度达到极小值,并受到两侧压力差所产生的 $+y$ 方向驱动力,使旗帜具有向 $+y$ 方向摆动趋势,此时 A 和 B 漩涡不断变

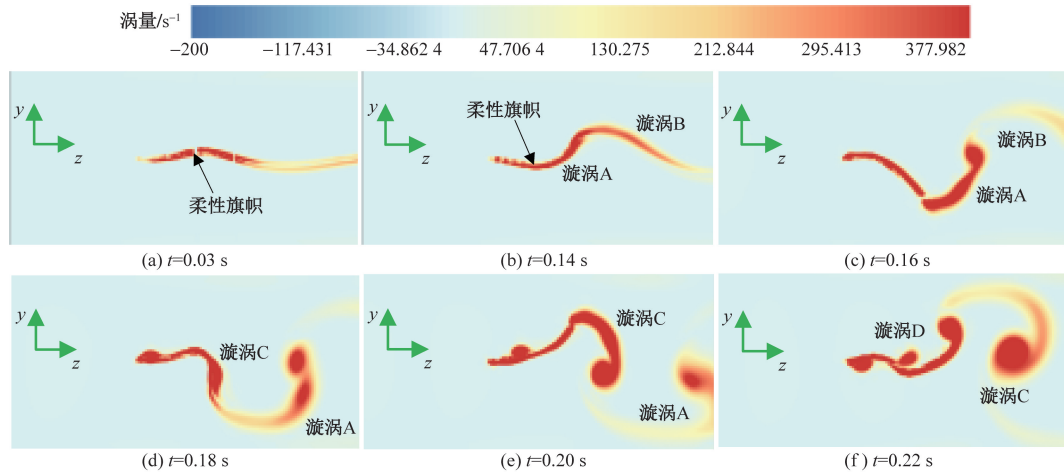


图6 旗帜周围流场涡量云图

Fig. 6 The vortex cloud diagram of the flow field around the flag

大,影响范围逐渐加大;当 $t = 0.18 \text{ s}$ 时,旗帜开始向上弯曲,整体处于 y 方向中间位置, $+y$ 方向速度达到最大值,旗帜受到 $-y$ 方向驱动力,尾缘出现与 A 漩涡方向相反的 C 漩涡;当 $t = 0.20 \text{ s}$ 时,旗帜向上弯曲到最大幅度,受 $-y$ 方向驱动力, $+y$ 方向速度趋近 0,此时 C 漩涡从尾缘脱落,影响区域逐渐增大;当 $t = 0.22 \text{ s}$ 时,旗帜开始重新向下弯曲,整体再次处于中间位置,具有 $-y$ 极大速度,继续运动完成一个完整运动周期,此时逆时针漩涡 D 在旗帜尾缘形成。观察得到的结果揭示了单个运动周期内,柔性旗帜颤振过程中其周围漩涡形成和消散过程及旗帜整体速度变化。

3.2 流场压力分析

柔性旗帜在 $U = 5 \text{ m/s}$ 下附近流场压力变化如图 7 所示。当 $t = 0.03 \text{ s}$ 时,旗帜处于初始状态,附近流场压力较小,旗帜上下两侧压力差较小;当 $t = 0.14 \text{ s}$ 时,旗帜上下两侧出现较大压力差,旗帜开始

向下弯曲,由图 6 涡量云图可知,上下两侧均出现漩涡,漩涡移动过程中改变了旗帜附近压力,使得上侧出现正压,下侧出现负压;当 $t = 0.16 \text{ s}$ 时,旗帜继续向下弯曲,弯曲程度达到最大,下侧压力逐渐增加,范围不断扩大,同时漩涡不断向下游移动,使得下游出现低压区;当 $t = 0.18 \text{ s}$ 时,旗帜开始向上弯曲,上侧压力增大,下侧压力减小;当 $t = 0.20 \text{ s}$ 时,旗帜向上弯曲到最大幅度,上侧压力为极大值,下侧压力为极小值,同时 C 漩涡从尾缘脱落;当 $t = 0.22 \text{ s}$ 时,旗帜重新向下弯曲,上侧出现负压,下侧出现正压,上下两侧压力差较大。综上,本研究解释了柔性旗帜与流场之间复杂的相互作用关系,表明了流场压力随时间及旗帜运动状态变化特性。

3.3 流场速度分析

图 8 为柔性旗帜在风速 $U = 5 \text{ m/s}$ 时,旗帜周围流场速度变化情况,当 $t = 0.03 \text{ s}$ 时,旗帜处于初始

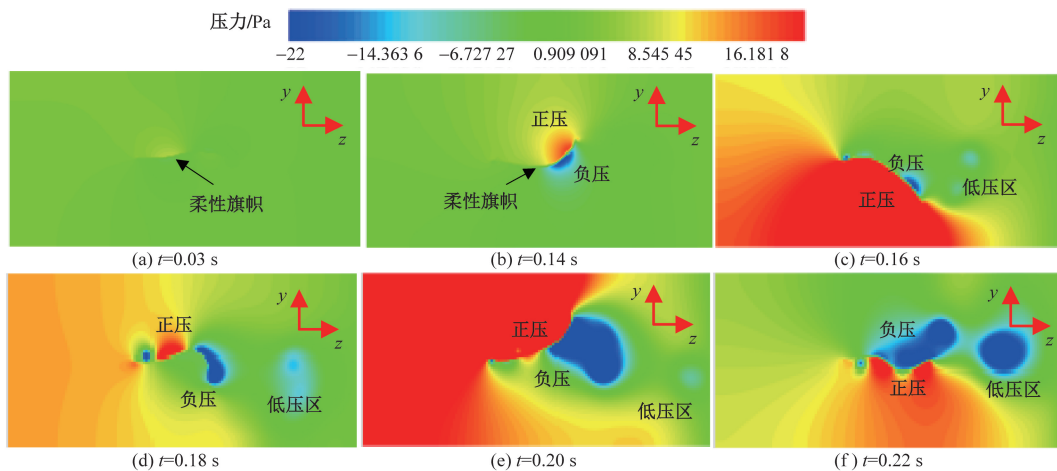


图7 旗帜周围流场压力云图

Fig. 7 The pressure cloud diagram of the flow field around the flag

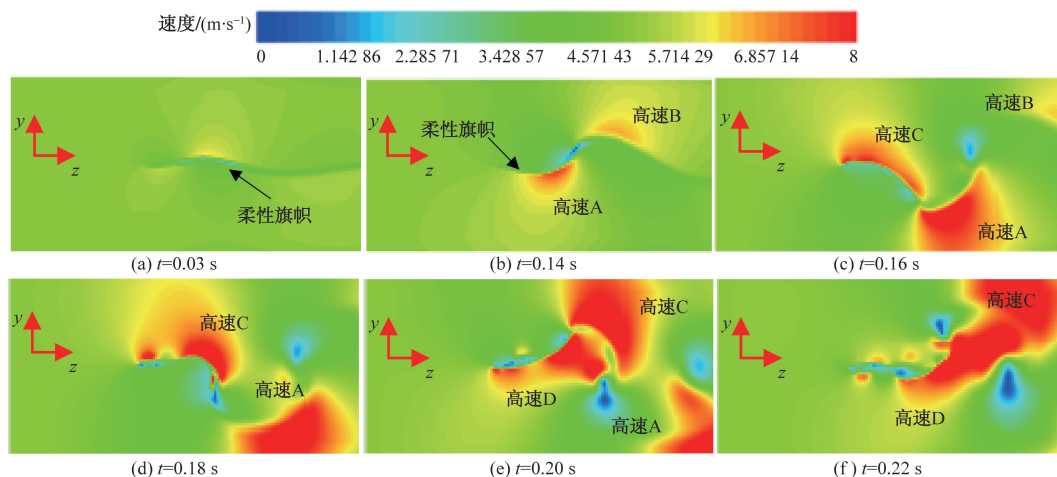


图8 旗帜周围流场速度云图

Fig. 8 Velocity cloud diagram of the flow field around the flag

状态,周围速度变化较小;当 $t = 0.14$ s时,旗帜开始向下弯曲,周围形成两个高速区域,高速区域A形成于旗帜下侧负压区,高速区域B形成于旗帜尾缘附近;当 $t = 0.16$ s时,旗帜向下弯曲到最大幅度,上侧低压处出现高速区域C,高速区域A移动至尾缘,高速区域A相比前一状态数值更大,范围更广,高速区域B脱离旗帜,向旗帜下游移动;当 $t = 0.18$ s时,旗帜开始向上弯曲,高速区域C范围与数值不断增大,高速区域A脱离旗帜,向下游移动;当 $t = 0.20$ s时,旗帜向上弯曲到最大幅度,高速区域D出现在下侧负压区域,高速区域C移动到尾缘,逐渐脱离旗帜,高速区域A脱离尾缘,与旗帜之间的距离不断增加;当 $t = 0.22$ s时,旗帜重新向下弯曲,高速区域D向尾缘移动,与不断向下游移动的高速区域C相遇。随着旗帜不断摆动,这种流动模式会在一个循环后重复,在此循环期间,高速区域会交替在旗帜两侧形成,且高速区域与低速区域会交替向下游脱落。研究结果揭示了旗帜颤振时其周围速度变化情况。

3.4 振动响应分析

为探究柔性旗帜运动特性,采用数值模拟方法分析柔性旗帜临界颤振风速、摆动位移响应及其频率。图9为数值模拟获得柔性旗帜的Hopf分岔曲线。由仿真结果可知,柔性旗帜颤振的临界风速为 $U = 4.5$ m/s,与图4(a)中理论计算结果差异性较小。当风速 $U < 4.5$ m/s时,柔性旗帜处于初始稳定状态,没有发生摆动行为;当风速 $U > 4.5$ m/s时,柔性旗帜平缓状态被打破,发生大幅度周期性摆动行为,并观察图9可知,风速超过临界颤振风速时,柔性旗帜摆动幅度随着风速的增加缓慢增加。

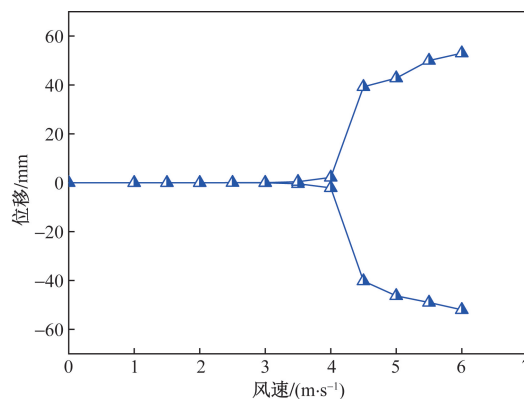


图9 柔性旗帜 Hopf 分岔曲线

Fig. 9 Hopf bifurcation curve of the flexible flag

图10为不同风速下柔性旗帜数值模拟获得的自由尾缘响应时程曲线图。图10(a)可知,当 $U = 1$ m/s时,柔性旗帜受到流体作用,初始状态时,旗帜由于其重力发生不规则摆动,接着由于柔性旗帜受到阻尼作用,摆动位移很快趋于平缓且系统保持稳定状态。从图10(b)可知,当 $U = 2$ m/s时,柔性旗帜失去其自身稳定性发生小幅度摆动。图10(c)可知,当 $U = 3$ m/s时,柔性旗帜摆动位移及频率进一步加大。图10(d)可知,在 $U = 5$ m/s恒定风速下,柔性旗帜从静止态受到流场作用下发生摆动达到稳定状态时间历程,到达稳定状态时,旗帜呈现出周期性大幅度摆动行为,摆动位移最大可达50.95 mm,此时来流速度大于旗帜临界颤振速度,旗帜处于颤振状态。由图10可知,当流速增大时,柔性旗帜失去其稳定性,出现周期性摆动现象,振幅及频率随风速增加而增加,当流速大于颤振临界风速时,柔性旗帜发生大幅度颤振现象。

为验证理论模型正确性,当 $U = 5$ m/s时,柔性旗帜尾缘摆动位移响应理论结果与仿真结果对比如

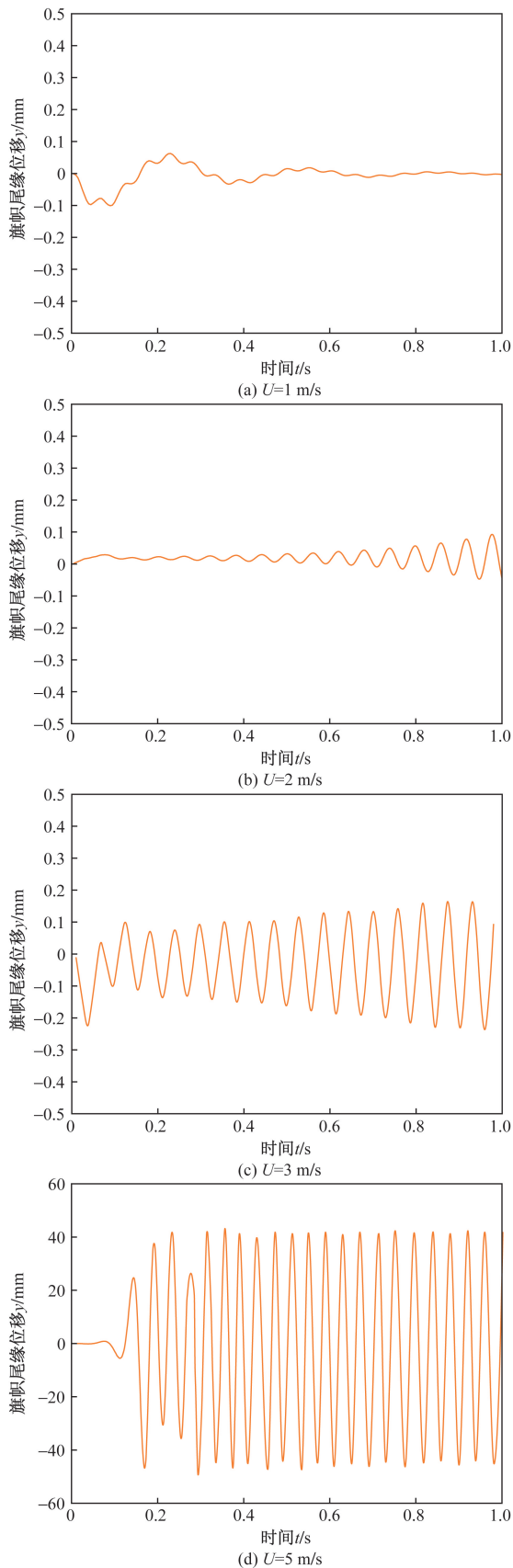


图 10 旗帜尾缘位移时程曲线

Fig. 10 Displacement time history curve of flag trailing edge displacement

图 11 所示,数值模拟曲线与理论计算曲线吻合性较好。摆动幅度-时间曲线进行频谱分析如图 12 所示,数值模拟摆动频率为 23.61 Hz,略小于理论计算频率 24.94 Hz,这可能是由于理论模型忽略了旗帜三维性,未考虑到旗帜宽度对结果的影响。以上结果表明,理论结果与实验结果较为接近,因此所提出的理论模型可以在一定程度上对柔性旗帜运动特性进行预测,验证了理论模型的准确性及有效性。

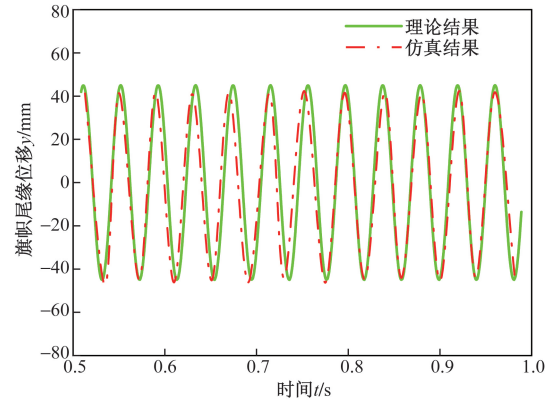


图 11 位移时程响应对比曲线

Fig. 11 Comparison curves of displacement time-history responses

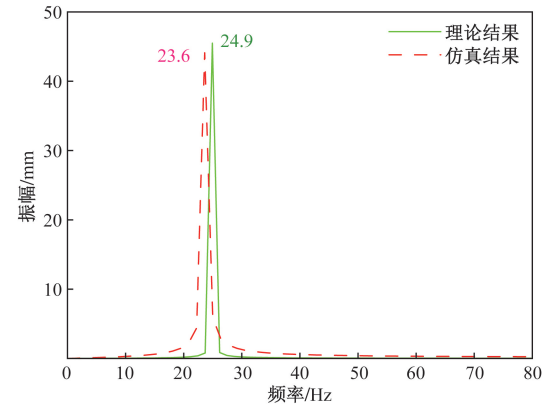


图 12 旗帜幅频特性曲线

Fig. 12 Flag amplitude-frequency characteristic curve

4 结论

针对柔性旗帜与空气流固耦合运动问题,采用双向流固耦合方法及重叠网格技术,进行旗帜随风摆动仿真研究,分析旗帜运动特性及其摆动过程中周围涡量、压力和速度变化。基于空气动力学原理和二维柔性板轴向不可拉伸假设推导旗帜颤振非线性理论模型,研究风速、旗长与质量比对其运动特性影响,得出以下结论。

(1) 推导旗帜颤振非线性理论模型,分析发现

临界颤振风速随旗长增加逐渐减小;同质量比时,颤振频率随风速增大而增大,同风速时,颤振频率随质量比增大而减小,摆动位移随风速增加先增大后减小;质量比的改变对颤振频率影响较大,斯特劳哈尔数受其影响较小;与数值分析结果对比,验证颤振理论模型正确性。

(2)数值模拟旗帜与流体双向耦合运动过程,研究发现随风速增大,旗帜由初始稳定状态逐渐失去其稳定性,发生大幅度摆动行为且摆动幅度随风速增大而缓慢增加,当 $U = 5 \text{ m/s}$ 时,旗帜发生颤振现象,最大摆动幅度为 50.59 mm 。

(3)柔性旗帜经历周期性摆动时,其上下表面形成的漩涡会经历形成、消失与脱落过程,漩涡运动过程中会改变旗帜周围流场压力与速度,使得其两侧出现压差,下游出现低压区,同时旗帜上下两侧出现高速区域,交替向下游移动。

参 考 文 献

- [1] Zhao Z, Wei B, Wang Y, et al. An array of flag-type triboelectric nanogenerators for harvesting wind energy [J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(4). DOI:10.3390/nano12040721.
- [2] Zou Y, Sun M, Yan F, et al. A high-performance flag-type triboelectric nanogenerator for scavenging wind energy toward self-powered IoTs [J]. *Materials*, 2022, 15(10). DOI:10.3390/ma15103696.
- [3] Wang Y, Liu X, Chen T, et al. An underwater flag-like triboelectric nanogenerator for harvesting ocean current energy under extremely low velocity condition [J]. *Nano Energy*, 2021, 90. DOI:10.1016/j.nanoen.2021.106503.
- [4] Michelin S, Llewellyn Smith S G L, Glover B J. Vortex shedding model of a flapping flag [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2008, 617: 1-10.
- [5] Eloy C, Kofman N, Schouveiler L. The origin of hysteresis in the flag instability [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2012, 691: 583-593.
- [6] Yu Y, Liu Y, Amandolese X. A review on fluid-induced flag vibrations [J]. *Applied Mechanics Reviews*, 2019, 71(1). DOI:10.1115/1.4042446.
- [7] Alben S. Dynamics of flags over wide ranges of mass and bending stiffness [J]. *Physical Review Fluids*, 2022, 7(1). DOI:10.1103/physrevfluids.7.013903.
- [8] 马德锡, 谭捍东, 张志勇, 等. 基于有限元数值模拟的直流电阻率激电找矿探测技术 [J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(5): 1808-1822.
Ma Dexi, Tan Handong, Zhang Zhiyong, et al. DC resistivity induced polarization method for prospecting and detection technology based on numerical simulation [J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(5): 1808-1822.
- [9] 徐裕民, 孙伟珂, 于哲, 等. 换热器螺旋管冷凝换热的数值模拟与实验研究 [J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(32): 13845-13853.
Xu Yumin, Sun Weike, Yu Zhe, et al. Numerical simulation and experimental study on spiral tube condensation heat transfer in heat exchanger [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(32): 13845-13853.
- [10] 孙刚友, 胡清珍, 康钦容, 等. 基于大井法和地下水模型系统数值模拟方法的某矿坑涌水量预测对比分析 [J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(21): 9024-9031.
Sun Gangyou, Hu Qingzhen, Kang Qinrong, et al. Comparative analysis of water inflow prediction of a mine based on large well method and GMS numerical simulation method [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(21): 9024-9031.
- [11] 苗宝栋, 王琛, 杜建明, 等. 高速列车行驶速度对隧道壁面气动压力影响的数值模拟 [J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(4): 1635-1644.
Miao Baodong, Wang Chen, Du Jianming, et al. Numerical simulation of influences of moving speed of high-speed train on aerodynamic pressure on tunnel wall [J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(4): 1635-1644.
- [12] Nawafleh A, Xing T, Durgesh V, et al. Fluid-structure interaction simulation of a flapping flag in a laminar jet [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2023, 119. DOI:10.1016/j.jfluidstructs.2023.103869.
- [13] Olivieri S, Viola F, Mazzino A, et al. Direct numerical simulation of flapping flags in grid-induced turbulence [J]. *Physics of Fluids*, 2021, 33(8). DOI:10.1063/5.0060181.
- [14] Deng Y, Tang Y, Wang P, et al. Fluid-structure interaction of a flexible membrane under movement-induced excitation (MIE), extraneously induced excitation (EIE), and coupled MIE-EIE [J]. *Physics of Fluids*, 2021, 33(6). DOI:10.1063/5.0051559.
- [15] Tavallaeinejad M, Salinas M F, Païdoussis M P, et al. Dynamics of inverted flags: experiments and comparison with theory [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2021, 101. DOI:10.1016/j.jfluidstructs.2020.103199.
- [16] Hiroaki K, Hayashi Y, Watanabe M. Numerical simulation on a limit cycle oscillation of a rectangular sheet in three-dimensional flow: influence of vortex element model on post-critical behavior [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2021, 106(4): 2893-2917.
- [17] 张团元, 夏润泽, 刘书岩, 等. 基于重叠网格的翼型动态失速数值模拟 [J]. *计算机仿真*, 2023, 40(8): 114-119.
Zhang Tuanyuan, Xia Runze, Liu Shuyan, et al. Numerical simulation of dynamic stall of airfoil based on overset grids [J]. *Computer Simulation*, 2023, 40(8): 114-119.
- [18] 张大朋, 严谨, 赵博文, 等. 基于重叠网格的潜艇旋臂试验数值模拟 [J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(1): 393-399.
Zhang Dapeng, Yan Jin, Zhao Bowen, et al. Numerical simulations of submarine rotating arms based on overset mesh [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(1): 393-399.
- [19] 黄在胜, 郭则庆. 基于重叠网格技术的超声速子弹分离研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2023, 44(7): 85-93.
Huang Zaisheng, Guo Zeqing. Research on separation of supersonic cluster munitions based on overlapping grid technology [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2023, 44(7): 85-93.
- [20] 张曼曼, 姜毅, 程李东, 等. 基于嵌套网格的超声速子弹分离数值分析 [J]. *兵工学报*, 2019, 40(1): 79-88.
Zhang Manman, Jiang Yi, Cheng Lidong, et al. Numerical analysis of separation of supersonic submunition based on nested grid

- [J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(1): 79-88.
- [21] 陈默, 张楠, 陈纪军, 等. 基于重叠网格的潜艇自航模操纵运动数值模拟研究[J]. *船舶力学*, 2024, 28(4): 485-500.
Chen Mo, Zhang Nan, Chen Jijun, et al. Numerical research on free running model maneuvering motion of a generic submarine based on overset mesh[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2024, 28(4): 485-500.
- [22] 贾来兵. 二维流场中板状柔性体与流体相互作用的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.
Jia Laibing. The interaction between flexible plates and fluid in two-dimensional flow[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009.
- [23] Argentina M, Mahadevan L. Fluid-flow-induced flutter of a flag [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2005, 102(6): 1829-1834.
- [24] Wang Y, Yang E, Chen T, et al. A novel humidity resisting and wind direction adapting flag-type triboelectric nanogenerator for wind energy harvesting and speed sensing [J]. *Nano Energy*, 2020, 78. DOI:10.1016/j.nanoen.2020.105279.
- [25] Shoele K, Mittal R. Energy harvesting by flow-induced flutter in a simple model of an inverted piezoelectric flag [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, 790: 582-606.
- [26] Shelley M, Vandenberghe N, Zhang J. Heavy flags undergo spontaneous oscillations in flowing water [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(9). DOI:10.1103/PhysRevLett.94.094302.
- [27] Shoele K, Mittal R. Energy harvesting by flow-induced flutter in a simple model of an inverted piezoelectric flag [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, 790: 582-606.