DOI: 10.7511/jslx201705006

# 基于浸入边界算法的振动钝体绕流模拟研究

杨 青\*1, 曹曙阳2, 齐永胜1

(1.常州工学院常州市建设工程结构与材料性能研究重点实验室,常州 213032;2.同济大学土木工程防灾国家重点实验室,上海 200092)

摘 要:传统 CFD 方法在振动钝体绕流计算中常借助动网格技术,网格再生任务繁重。针对于此,本文利用可在静止网格中计算动边界绕流问题的浸入边界算法(IBM),编写数值模拟程序,分别对竖向强迫正弦振动方柱 (Re=UD/v=10<sup>3</sup>、振幅恒定、振动频率变化)以及桥梁断面(Re=UB/v=7.5×10<sup>3</sup>、振幅、振动频率均变化)展开 气动特性和流场特征结构分析。初步研究结果表明,振幅恒定为方柱高度的14%时,其涡脱锁定区长度为0.06~ 0.2,锁定区后端(Stc>0.2)振动方柱涡脱频率回归静止涡脱频率;不同振幅下的桥梁断面阻力系数为在静止涡脱 频率处产生峰值,桥梁断面升力系数则在此处均出现归零效应,且振幅越大,归零效应愈明显。

**关键词:**浸入边界算法;振动方柱;桥梁断面;气动特性 **中图分类号:**O35 **文献标志码:**A **文章编号:**1007-4708(2017)05-0570-09

## 1 引 言

振动钝体绕流是计算流体动力学中较为重要的研究方向,广泛存在于超高层建筑和大跨度桥梁的抗风研究中。目前,此类研究主要依靠风洞试验和 CFD 数值模拟。其中,风洞试验开展较早,已积累出较为丰富的成果<sup>[1,2]</sup>。Govardhan<sup>[3]</sup>和 San-chis<sup>[4]</sup>在圆柱涡激振动试验中相继发现,质量比较小时,2T 尾涡模式是圆柱横向振动出现较大幅值的主要原因;呼和敖德等<sup>[5]</sup>则展开了雷诺数 Re=150~3600时,竖向强迫振动方柱的绕流研究,指出方柱锁定区范围随振幅比和雷诺数的升高而扩大。

随着计算理论和硬件设备的发展,越来越多的 学者将研究手段拓展至 CFD 领域。Matsumoto 等<sup>[6]</sup>开展了不同边长比柱体(B/D=0.6,2)振动绕 流的研究,以分析柱体尾流涡脱结构和气动力系数 随边长比的变化情况;Taylor 等<sup>[7]</sup>则根据折减速 度的大小顺序,将振动柱体绕流流场划分为三个特 征区间:低锁区(Below lock-in)、锁定区(Lock-in) 和超锁区(Above lock-in);Okajima 等<sup>[8]</sup>利用 DNS 方法研究了流场阻塞率对振动方柱气动力系数的 影响。

收稿日期:2016-06-30;修改稿收到日期:2016-07-26.

然而,传统 CFD 方法在振动物体绕流计算时, 需依据每一计算时刻物体运动边界的位置重新划 分网格,计算耗费过大。其研究内容受制于计算成 本和耗时,无法系统展开。相比之下,浸入边界算 法利用力源拟化边界的思想,可以在静止网格体系 中直接实现振动物体边界构造,略去了动网格的生 成,显著地减轻了计算负担,能够有效促进 CFD 在 工程应用领域中的发展。

在其具体应用上,Saiki 等<sup>[9]</sup>、Kim 等<sup>[10]</sup>和 Pinto 等<sup>[11]</sup>利用浸入边界算法成功模拟出了振动 圆柱绕流;Luo 等<sup>[12]</sup>和 Lee 等<sup>[13]</sup>则从算法理论基 础入手,致力于提高动态钝体数值求解的精度;钟 国华等<sup>[14]</sup>基于浸入边界算法研究了均匀流场中圆 柱的振动问题,发现最大振幅位置处,计算结果呈 现较大的数值振荡。

综上所述,对于振动物体绕流研究,前期风洞 试验虽已积累出相对较为丰富的研究成果,但多在 高雷诺数下开展;同时限制于数据采集设备,仅能 从振动物体涡脱锁定区和尾流特征等方面展开分 析,对于揭露流动本质的时程气动力系数则无法展 开更详尽的分析。CFD 技术的发展,使得上述问 题在理论上都不再是难以实现的障碍,但受限于数 值模拟中较高的计算设备要求,传统 CFD 方法还 无法较好地完成振动物体绕流的系统化研究。浸 入边界方法虽然能够很好地解决传统 CFD 在振动 绕流计算中负担过重的问题,但由于发展较晚,目 前其在振动物体绕流方面的研究多为不同算法框

基金项目:国家自然科学基金(51478358);常州工学院科研基 金(YN1614);常州市科技计划项目(CJ-20159031) 资助项目.

作者简介:杨 青\*(1985-),男,博士,讲师 (E-mail:yangqing@czu.cn).

架对单一基础问题(振动圆柱绕流)展开重复的验证<sup>[9-14]</sup>,并未在其他领域展开较为深入的探索研究。

本文基于浸入边界算法核心概念,编制出数值 计算模型,展开竖向强迫振动钝体的绕流研究,钝 体运动轨迹为 $y(t) = A \sin \varphi = A \sin(2\pi f_e t)$ ,其中 y(t)为物体轨迹,A为振幅, $f_e$ 为振动频率,t为时 间。首先,模拟雷诺数 Re=1×10<sup>3</sup>,振幅恒定为方 柱迎风面高度的14%,不同振动频率工况下的方 柱绕流,分析其气动力系数以及流场特征,并与同 类文献对比,以验证本文数值程序模拟振动物体绕 流的有效性。然后,进一步将其应用至实际桥梁断 面——大海带东桥的振动绕流模拟,分析其三分力 系数随竖向振动频率和振幅的变化趋势,以丰富浸 入边界方法在工程领域中的研究。

## 2 数值模型

本文数值模型以浸入边界算法为基础,结合便 于工程计算的边界插值和内部流体处理方法,以实 现在交错网格上的绕流模拟。

#### 2.1 浸入边界算法控制方程

浸入边界方法 IBM(Immersed Boundary Method)利用流体与物体边界相互作用的力学概念, 将物体边界简化为作用于边界点上的力源,并引入 至 Navier-Stokes 方程中参加流场迭代计算,进而 演化出边界的几何形状和物理特性

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} = -\nabla \mathbf{P} + \frac{1}{\mathrm{Re}} \nabla^2 \mathbf{U} + \mathbf{F}_{\mathrm{Boundary}} \quad (1)$$
$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (2)$$

式中 U 为流体速度, P 为压力, Re 为雷诺数, **F**<sub>Boundary</sub> 即为边界力源, 施加于图 1 边界点上。

对于边界力源 **F**<sub>Boundary</sub>,不同的构造理念区分 出不同的浸入边界算法类别。虚拟边界法 VBM (Virtual Boundary Method)相比于其他浸入边界 方法,力源构造概念更加清晰,反馈循环的应用也 使其能够实现较高的边界数值精度,不需借助过多



图 1 浸入边界示意图 Fig.1 Illustration of immersed boundary

的流场变量定义点去完成边界点与流场区域之间 的数值传递,计算耗费更少。因此,本文采用虚拟 边界法展开数值计算,其力源表达式为

$$\mathbf{F}_{\text{Boundary}}(X_s, t) = \alpha_f \int_0^{t} [\mathbf{U}(X_s, t') - \mathbf{V}(X_s, t')] dt' + \beta_f [\mathbf{U}(X_s, t) - \mathbf{V}(X_s, t)]$$
(3)

式中  $\alpha_f$  和  $\beta_f$  为反馈系数项,其取值直接关系到边 界拟化效率; V( $X_s$ ,t) 为物体边界设定速度,静止 状态时 V=0,若物体处于运动状态, V( $X_s$ ,t) 可由 V=d $X_s$ /dt计算得出; U( $X_s$ ,t) 为物体边界处流体 速度,由流体控制方程求得。U( $X_s$ ,t) - V( $X_s$ ,t) 为边界处流体速度与边界设定速度的差异,式(3) 正是基于此差异,通过反馈系数回馈出边界力源使 两者速度接近,以满足无滑移刚性边界条件。

## 2.2 内部流体处理及求解方法 💜

不同于传统 CFD 方法, 没入边界方法通过物体边界将整体计算区域划分为内部流体与外部流场,其中内部流体的流动变量求解与外部流场相同,可由控制方程计算求得。

目前,浸入边界方法中,内部流体的处理方法 主要分为两大类别,一类是以 Fadlun 等<sup>[15]</sup>为代表 所提出的自由发展法,认为实际模拟中内部流体可 以自由发展,不会影响到边界物理属性的体现;另 一类是以 Kim 等<sup>[16]</sup>为代表所提出的主动干涉法, 认为内部流动会使钝体物理状态描述失真,降低边 界处流体的数值解精度,因此对物体内部流体施加 各类约束,以消除所认定的结果数值偏差。

实践证明,对内部流体施加主动干涉,虽然能 够保证物体边界的计算精度,但可能会影响到整体 流场的质量守恒<sup>[17]</sup>。内部流场自由发展方法理论 上只要采用合适的边界插值方法仍能够保证较高 的边界精度。此前,虚拟边界法均采用主动干涉 法,通过对物体内部流场域全部施加力源以实现边 界再现,虽能较好地保证边界求解精度,但费时费 力。因此,本文在虚拟边界算法框架下采用内部流 体自由发展方法展开求解,以便于该数值模型在后 续工程应用中的扩展。

#### 2.3 振动边界实现技术

振动边界模拟是本文数值模型的计算核心,如 何提出合适的实现技术是本文程序涉及的重点。

浸入边界算法在固定网格中直接关注动边界 点周围插值网格点集合的转换。本文数值模型首 先设计出定位模块,根据物体振动轨迹计算出某一 瞬时边界点的运动坐标;其次,依据插值方法迅速 确定边界点周围的速度定义点,利用边界插值函数 获得边界点处流动参数以构造边界力源;最后,再 将边界力源分配到周围速度网格定义点上,以参与 该瞬时流场的整体计算,进而实现对运动边界的拟 化。图 2 为本文振动边界实现技术流程。

## 3 绕流计算域说明

本次振动钝体绕流均采用二维非均匀计算网格。流体从计算域左端施加,流动从左至右。边界条件统一为如下设定,入口边界条件u = 1.0, v = 0;出口边界条件采用对流边界条件为 $\partial u/\partial t + u_m \nabla u = 0$ ,即流动变量除压力项外其余的边界梯度值为0;上下边界条件设定为无摩擦边界 $\partial u/\partial v = 0, \partial P/\partial v = 0, v = 0$ 。

特征尺寸、阻塞率及计算域出入口距离则根据 模拟对象的不同(方柱、桥梁断面)略有差别。方柱 绕流计算域中,特征尺寸取为柱体迎风面高度 D, 计算区域中入口距方柱中心距离为 10D,出口边 界则设置为 31D。上下计算域边界长度为 H,D/H 设定为 1/28。考虑到方柱运动轨迹为竖向强迫振 动,为增强柱体表面流动细节的捕捉,在其宽度 B范 围内,沿 0 时刻柱体上下表面各设置尺寸为 D×B 的均匀网格区域,格子大小统一选为 0.01D。超出 此区域,则设置拉伸网格,网格总数为 412×242, 时间间隔  $\Delta t$  为 1.5×10<sup>-4</sup>,计算域布置如图 3 所 示。

桥梁断面计算域中考虑到其几何外形的复杂 性,将近壁面网格尺寸缩小为 Δh=0.005D,时间



图 2 振动边界实现技术流程 Fig. 2 Sketch of realization technique for moving boundary

步长对应调整至  $\Delta t = 5 \times 10^{-5}$ 。人口到断面迎风 面风嘴处距离为 20D,出口边界距离迎风面风嘴 处为 60D,上下计算域边界长度为 H,D/H 扩大 为 1/30。计算特征尺寸取为桥梁宽度 B。与方柱 相同,桥梁断面计算域沿振动方向在桥梁上下表面 各设置 1 倍桥梁高度的均匀网格区域,格子大小统 一选为 0.005D,以便于表面流动细节的捕捉,计 算域布置如图 4 所示。

#### 4 数值模拟

为更全面验证和应用该数值程序,本文将模拟 工作分为静止方柱绕流模拟、振动方柱以及桥梁断 面的绕流模拟三部分。其中,振动绕流计算中,关 键无量纲参数包含 Stc =  $f_c D/U$ , Stv =  $f_v D/U$ , Stn =  $f_v D/U$ ;其中,  $f_c$ 为振动频率,  $f_v$ 为振动柱体 涡脱频率,  $f_v m$ 则代表静止涡脱频率, D 为柱体高 度, U 为来流速度。

#### 4.1 静止方柱绕流模拟

考虑到本文浸入边界法模拟程序融入了动态 计算模块,为进一步验证本文程序的可靠性,首先 利用该动态程序模拟雷诺数 Re=10<sup>3</sup>时,静止方柱 的绕流(Stc=0,A=0)。

图 5 为雷诺数 Re=10<sup>3</sup>时方柱表面压力分布。 可以看出,柱体前缘表面压力分布与文献[18]数据 基本吻合,方柱其余表面压力分布特征亦吻合较 好,但其值略大。可能是因为本文模拟为二维模 拟,模拟维度的不同导致了流动分离时流场结构的



图 3 振动方柱计算域示意图 Fig. 3 Illustration of calculation domain for oscillating square cylinder



Fig. 4 Illustration of calculation domain for oscillating bridge section

差异性变化,进而影响到方柱表面压力分布。

表1为雷诺数 Re=10<sup>3</sup>时方柱气动力系数。 由表1可知,由于本文二维模拟不能完全真实反映 雷诺数 Re=10<sup>3</sup>时三维流场特征,阻力系数存在微 小差异,但整体仍与所列文献数据基本吻合;同样, 斯托罗哈数也体现了本模拟结果与文献数据较高 的吻合度。

#### 4.2 计算机制及振动方柱绕流模拟

静止钝体计算工况中,边界位置及速度目标值 均保持不变,反馈系数在常值情况下即可拟化出满 足合理速度分布的边界。而对于振动物体,其边界 位置及速度目标值均随时间而变化,恒定的力源项 反馈系数是否仍能较好地满足动态钝体计算要求, 需要展开深入探讨。

4.2.1 反馈系数调整机制

首先以方柱上侧边界为研究对象,选取四组反 馈系数用于计算雷诺数 Re=1×10<sup>3</sup>,振动频率 Stc =0.2,振幅 A=0.14D的某瞬时动边界速度分布, 以观察反馈系数值域大小对动边界构建精度的影 响,如图 6 所示。

图 6 纵坐标为方柱边界速度  $V_{\rm B}/U$ ,其中  $V_{\rm B}$ 为 边界运动计算速度,U 为来流风速;横坐标为 x/D, 其中 x为方柱边界坐标,D 为方柱特征尺寸。图 中虚线表示速度分布的目标值,当反馈系数值较小 时( $\alpha_f$ =-1.6×10<sup>3</sup>, $\beta_f$ =-60),边界处呈现波浪 状速度分布特征,表明此反馈系数在计算中产生了 较大的误差,边界在运动过程中出现了数值振荡。

coefficients	s of square cym	nu
$\langle C_D \rangle$	• St	
2.11	0. 129	
1.74	0.132	
1.93	0.133	
2.2	0.152	
	Present Ref.[18]	
¥	4 3	
2		
	$\frac{\langle C_{\rm D} \rangle}{2.11}$ 1.74 1.93 2.22	$\begin{array}{c c} \langle C_{D} \rangle & \text{St} \\ \hline 2, 11 & 0, 129 \\ 1, 74 & 0, 132 \\ 1, 93 & 0, 133 \\ 2, 2 & 0, 152 \end{array}$

表 1 方柱气动力系数(Re=10<sup>3</sup>) Tab. 1 Aerodynamic coeffcients of square cylinder

图 5 方柱在  $Re=10^3$  时均化表面压力分布曲线 Fig. 5 Distribution curve of mean pressure coefficient  $C_p$ for square cylinder at  $Re=10^3$ 

增大反馈系数至  $\alpha_f = -1.6 \times 10^4$ ,  $\beta_f = -300$ , 边界 速度误差虽然得到改善并降低至  $10^{-2}$ 左右, 但仍 呈现小幅数值振荡。当反馈系数取值提升至前文 静止边界模拟所采用的反馈系数组合时( $\alpha_f = -1.6 \times 10^5$ ,  $\beta_f = -60$ ), 动边界速度误差得到较好 的改善, 数值控制在  $10^{-4}$ 左右。继续增大边界反 馈系数取值( $\alpha_f = -1.6 \times 10^6$ ,  $\beta_f = -60$ ), 边界拟 合精度也不再有显著提高, 仍保持在  $10^{-4}$ 左右。

图 6 表明,此类浸入边界法应用于动边界计算时,反馈系数的取值能显著影响计算精度。当前工况中,反馈系数组合( $\alpha_f = -1.6 \times 10^5$ , $\beta_f = -60$ )已能使该时刻动边界速度计算值较好地吻合目标值。

统计此时振动方柱的气动力系数列入表 2,由 表 2 可知本次计算所得振动方柱阻力系数和升力 系数均方根值均同以往文献数据吻合较好,证明该 速度误差范围不影响振动方柱绕流计算结果的准 确性。

此后,继续扩大考察范围,调整振动频率 Stc, 研究该反馈系数组合在不同振动频率下的数值精 度,绘制出动边界速度误差随振动频率变化曲线, 如图 7 所示。可以看出,Stc=0.04~0.45 范围 内,边界速度误差基本保持较低水平;Stc=0.5 时,边界速度误差突然增大;此后随振动频率提高, 边界误差值逐渐升高。产生此类现象可能是由于 随着振动频率的提升,加剧了单位计算步长内速度

表 2 振动方柱气动力系数及相关文献结果 Tab. 2 Aerodynamic coeffcients of oscillating squares and the results of

related literature

计算结果	$\langle C_{\rm D} \rangle$	$C_{\rm Lrms}$
文献[21]	1.8314	0.6919
本文	1.8726	0.6955





变化的幅度,使得原有反馈系数在计算过程中不能 较好地追踪动边界速度目标值。为避免此类问题, 力源反馈系数需提出适用于动态钝体绕流计算的 选取机制,以保证较好的边界拟合精度。

反馈系数调整机制构建的核心是确定有效的 自检标准,并将其整合至每一步计算中。考虑到浸 入边界方法常以边界速度误差作为判断标准,本文 在振动钝体绕流计算中仍倾向于采用此标准,但侧 重于每一时刻点而非静止绕流模拟中的整体计算 时长。

参考图 6 和图 7 以及表 2,可知速度误差保持 在 10<sup>-4</sup>时,计算保持稳定,所得气动力系数也能较 好地吻合文献数据。因此,本文将 10<sup>-4</sup>作为动边 界速度误差的控制值。计算过程中,当动边界速度 误差 RMS 值连续三个时刻点大于 10<sup>-4</sup>时,反馈系 数自动调整,以使其速度误差回归到控制值。具体 判读细节如图 8 所示。

4.2.2 振动方柱绕流模拟

确定合理的反馈系数自检流程之后,本文着手 展开雷诺数 Re=1×10<sup>3</sup>,振动频率 Stc=0~0.5, 振幅 A=0.14D的强迫振动方柱绕流模拟,通过升 力以及柱后尾流场速度时程的频谱,分析柱后尾流 涡脱特征,并结合柱后近尾迹流场显示、气动力系 数以及气动稳定性三个方面,综合分析强迫振动方



图 8 速度分布反馈自检流程 Fig. 8 Sketch of self-checking on velocity distribution

柱的绕流特征,通过对比同类数据,验证本文模型 对振动物体绕流计算的可行性。

本次模拟参考 Nakamura 等<sup>[22]</sup>的试验设置, 亦在柱体后部 1.5D处设置速度观测点(D 为柱体 迎风面高度),用以收集尾流速度时程数据,通过对 其作频谱分析,绘制振动柱体尾流涡脱随振动频率 变化的曲线。

图 9 为方柱涡脱随振动频率变化曲线,可以看 出振动方柱绕流的三个特征区域。通过速度频谱 分析得出其锁定区长度(Lock-in region length)为 0.06~0.2。当外加强迫振动频率 Stc 超过 0.2 时,柱体尾流涡脱频率回归静止涡脱的现象十分突 出,并一直保持,使得振动频率与涡脱频率的比值 (Stc/Stv)呈线性分布特征。本次模拟结果与孟向 阳同类试验锁定区长度<sup>[23]</sup>大致相同,且主要特征 与 Singh 等<sup>[24]</sup>得出的现象吻合,验证了本次模拟 的可靠性。Taylor 等<sup>[9]</sup>定义锁定区中 Stc=Stv= Stn 的点为共振锁定点(Resonant point),此时外 加振动频率与静止涡脱频率完全保持一致,本次模 拟共振锁定点为0.133。

对于其气动力系数的研究,风洞试验受限于仪器设备,较难实现全区域的数据采集,只能将柱体某些特征点作为采集对象,通过借助气动力分布特性或压力相关矩阵<sup>[25]</sup>,估算出对应的气动力系数; 数值模拟则可以较为详尽地列出考察区域的表面压力分布曲线。

图 10 为本文振动方柱绕流计算中不同频率工 况下的压力分布曲线。可以看出,方柱前缘压力分 布在不同振动频率下均保持一致,柱后压强分布随 振动频率的改变而发生变化,符合之前风洞试验所 得出的现象。

图 10(a)中,振动频率 Stc=0.04 时,由于外界 强迫振动的施加,柱后涡脱加强,此时压强分布表 现为较强的吸力;Stc=0.1 时,由于柱后尾流流场



Fig. 9 Variation curve of vortex shedding for square cylinder with varying oscillating frequencies

的转换,柱后压强吸力效应减弱;当 Stc=0.15 时, 强迫振动频率靠近共振锁定点,柱后压强发生跃 变,柱后吸力效应突然增强;此后随着外界振动频 率逐渐增强,柱体背部表面压强发生较大的减弱, Taylor等<sup>[9]</sup>指出这是由于高频振动下,侧壁涡脱 和柱后涡脱相互干扰、共同作用的原因。

图 11 和图 12 分别为方柱平均阻力系数和升 力系数均方根值随振动频率变化曲线,两者均在共 振点附近(Stc=0.15)达到较大值;此后阻力系数 一直处于下降趋势,升力系数均方根值在较大幅度 的减小后,随着振动频率的升高而快速回升,并超 过共振锁定点处对应值,模拟所得数据与 Okajima 等<sup>[21]</sup>的数值计算结果吻合较好。

#### 4.3 振动桥梁断面绕流模拟

在振动方柱绕流的基础上,进一步开展桥梁断 面绕流的模拟。之前考虑到此类复杂边界振动物体 绕流的研究,数值模拟所需耗费较大,因此多采用风 洞试验<sup>[26]</sup>。随着计算设备和模拟算法的发展,逐渐 有部分学者借助 CFD 开展此项研究工作。

Huang 等<sup>[27]</sup>将整体计算区域划分为刚性边界 区域、动网格区域和静止网格区域三部分,在商业 软件 Fluent 中模拟出大海带桥绕流;Nieto 等<sup>[28]</sup> 则利用雷诺平均方程,开展了桥梁风致振动的数值 模拟。

浸入边界方法作为较为新颖的 CFD 方法,上 述桥梁振动绕流方面的研究从未开展,在实际桥梁 断面应用上,还仅仅止步于静止模型的研究<sup>[17]</sup>。 因此,本节仍将大海带东桥主桥断面作为振动桥梁 断面模拟对象,在雷诺数 Re≈7.5×10<sup>3</sup>时(计算长 度取桥梁断面宽度 B),设置不同强迫竖向振幅 (A/D=0.14,0.2,0.25)和不同振动频率(Stc= 0.2,0.25,0.1,0.15)作为工况划分的依据,研究振 动对桥梁断面气动力的影响,拓展浸入边界方法在 该领域中探索性的研究应用。

对振动桥梁断面的数值分析,首先从气动力系数 着手,各自定义形式为,阻力系数  $C_{\rm D}=2F_{\rm D}/(\rho U^2 B)$ , 升力系数  $C_{\rm L}=2F_{\rm L}/(\rho U^2 B)$ ,升力矩系数  $C_{\rm M}=$  $2F_{\rm M}/(\rho U^2 B^2)$ ,式中计算尺度仍取桥梁断面宽度 B。

统计气动力系数随振动要素(振动频率和振幅)的变化曲线,如图 13~图 15 所示。可以看出,振动状态下断面气动力系数变化范围也大致符合静止状态大海带东桥气动力文献数据<sup>[29]</sup>(〈 $C_D$ 〉: 0.05~0.1、〈 $C_L$ 〉) - 0.34~0.1、〈 $C_M$ 〉: 0.018~0.028)。图13中阻力系数变化曲线表明,不同竖



国 11 万代十万組万示数随振列频平支化曲线 Fig. 11 Variation curve of 〈C<sub>D</sub>〉 for square cylinder at different oscillating frequencies



向振幅下的桥梁断面均在对应静止涡脱频率处 (Stn=0.15)产生峰值,这同此前柱体阻力系数随 振动频率变化的特征相同,进一步明确了竖向强迫 振动物体在此类运动轨迹下的气动力特性。此后 随着振动频率的增大,阻力系数出现下降趋势,振 幅越大下降趋势越明显。

图 14 为大海带东桥断面升力系数随振动变化 曲线,升力系数在 Stc=0.1 工况之后呈现明显的 上升趋势,在振动频率为静止涡脱频率时(Stn= 0.15),时均升力系数位于0值附近,振幅越大其归



图 13 阻力系数变化曲线(Stc=0.1~0.25,A=0.14D~0.25D) Fig. 13 Variation curve of 〈C<sub>D</sub>〉 for bridge section at different oscillating frequencies



图 15 升力矩系数变化曲线(Stc=0.1 $\sim$ 0.25,A=0.14D $\sim$ 0.25D) Fig. 15 Variation curve of  $\langle C_M \rangle$  for bridge section at different oscillating frequencies

零效应越明显(A=0.25D),贴近于静止状态下升 力系数计算结果;随后在Stc=0.2又回归到原有 数值范围附近;当振动频率Stc=0.25时,其升力 系数出现明显的反向变化,振动幅值越高,其反向 变化幅度就越大,在振幅A=0.2,0.25D处,均出 现升力系数反向。

图 15 升力矩系数在振幅较小时(A=0.14D), 不随振动频率的改变而发生较大的变化,基本保持 恒定状态;此后当振幅升高时,升力钜系数会在静 止涡脱频率(Stn=0.15)之后迅速减小,振幅越大 其变化效应越加明显;当振动频率 Stc=0.25 时, 升力矩系数再次回归到原有范围内。

## 5 结 语



本文利用浸入边界方法,搭建出一套可在静止 网格中计算动边界绕流的数值程序,并设计出一套 反馈系数调整机制,以使计算过程始终能够保证合 理的边界速度精度。分别对振幅恒定和振动频率 变化的方柱以及振幅和振动频率均变化的桥梁断 面展开了绕流计算,分析振动方柱及桥梁断面的气 动特性。初步研究结果如下。

(1) 动边界计算中,恒定的反馈系数不能很好 地适应不同振动频率及振幅的绕流模拟,本文设计 出的反馈系数调整机制,能够较好地在计算过程中 保证合理的边界速度精度。

(2) 竖向振幅恒定为方柱高度的14%时,其涡 脱锁定区长度为0.06~0.2,锁定区后端(Stc> 0.2)振动柱体涡脱频率回归静止涡脱频率;方柱前 缘压力分布在不同振动频率下均保持一致,柱后压 强分布随振动频率的改变而发生变化;振动方柱阻 力系数在接近静止方柱涡脱频率处出现峰值。

(3)不同振幅下的桥梁断面阻力系数均在自然涡脱频率处产生峰值,桥梁断面升力系数则在此处均出现归零效应,且振幅越大,归零效应愈明显。

在此研究基础之上,后期将开展不同边长比柱体以及包含细部构件的桥梁断面的振动绕流数值模拟,利用浸入边界数值程序的便捷性,增加 CFD 对振动钝体绕流的空气动力特性研究。

## 参考文献(References):

- Sarpkaya T. A critical review of the intrinsic nature of vortex-induced vibrations [J]. Journal of Fluids & Structures, 2004, 19(4): 389-447.
- [2] Williamson C H K, Govardhan R. A brief review of recent results in vortex-induced vibrations[J]. Jour-

nal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, **96**(6): 713-735.

- [3] Govardhan R, Williamson C H K. Modes of vortex formation and frequency response of a freely vibrating cylinder[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2000, 420 (3):85-130.
- [4] Sanchis A, Sælevik G, Grue J. Two-degree-of-freedom vortex-induced vibrations of a spring-mounted rigid cylinder with low mass ratio[J]. Journal of Fluids & Structures, 2008, 24(6):907-919.
- [5] 呼和敖德,孟向阳.横向振动方柱锁定区近尾迹结构
  [J]. 气动实验与测量控制,1992.6(3):60-65.(HUHE Ao-de, MENG Xiang-yang. The near wake structure from oscillating square cylinder in the lock-in range
  [J]. Aerodynamic Experiment and Measurement & Control, 1992.6(3),60-65.(in Chinese))
- [6] Matsumoto M, Shirato H, Araki K, et al. Span-wise coherence characteristics of surface pressure field on 2D bluff bodies [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(1):155-163.
- [7] Taylor I, Vezza M. Calculation of the flow field around a square section cylinder undergoing forced transverse oscillations using a discrete vortex method
   [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 82(1):271-291.
- [8] Okajima A, Yi D, Sakuda A, et al. Numerical study of blockage effects on aerodynamic characteristics of an oscillating rectangular cylinder[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, 67: 91-102.
- [9] Saiki E M, Biringen S. Numerical simulation of a cylinder in uniform flow: application of a virtual boundary method[J]. Journal of Computational Physics, 1996, 123(2):450-465.
- [10] Kim D, Choi H. Immersed boundary method for flow around an arbitrarily moving body [J]. Journal of Computational Physics, 2006, 212(2):662-680.
- [11] Pinto L C, Schettini E B C, Silvestrini J H. Numerical analysis of the immersed boundary method applied to the flow around a forced oscillating cylinder [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2011, 296: 012011.
- [12] Luo H, Dai H, de Sousa P J S A F, et al. On the numerical oscillation of the direct-forcing immersed-boundary method for moving boundaries[J]. Computers & Fluids, 2012, 56:61-76.
- [13] Lee J, You D. An implicit ghost-cell immersed boundary method for simulations of moving body problems with control of spurious force oscillations[J]. Journal

of Computational Physics, 2013, 233: 295-314.

- [14] 钟国华,梁 岸,孙晓峰.基于浸入式边界的流固耦合的非定常数值模拟研究[J].工程热物理学报,2007, 28(3):399-402.(ZHONG Guo-hua, LIANG An, SUN Xiao-feng. Numerical simulations of fluid-structure interaction using immersed boundary method [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(3):399-402.(in Chinese))
- [15] Fadlun E A, Verzicco R, Orlandi P, et al. Combined immersed-boundary finite-difference methods for three-dimensional complex flow simulations [J]. Journal of Computational Physics, 2000, 161 (1): 35-60.
- [16] Kim J, Kim D, Choi H. An immersed-boundary finite-volume method for simulations of flow in complex geometries[J]. Journal of Computational Physics, 2001, 171(1):132-150.
- [17] Li C W, Wang L L. An immersed boundary finite difference method for LES of flow around bluff shapes [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2004, 46(1):85-107.
- [18] Cao S, Ge Y, Tamura Y. Shear effects on flow past a square cylinder at moderate Reynolds numbers [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2012, 138 (1): 116-123.
- 19] 刘天成,葛耀君,曹丰产.基于 Lattice Boltzmann 方法的方柱绕流[J].同济大学学报(自然科学版),2008, 36(8):1028-1033. (LIU Tian-cheng, GE Yao-jun, CAO Feng-chan. Simulation of flow around square cylinder based on Lattice Boltzmann method [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2008.36(8):1028-1033. (in Chinese))
- [20] Davis R W, Moore E F. A numerical study of vortex shedding from rectangles[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1982, 116(1): 475-506.
- [21] Okajima A, Kitajima K, Ueno H. Numerical study on wake patterns and aerodynamic forces of an oscillating cylinder with a circular and rectangular crosssection[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1993, 50: 39-48.
- [22] Nakamura Y, Ohya Y, Ozono S, et al. Experimental and numerical analysis of vortex shedding from elongated rectangular cylinders at low Reynolds numbers 200-103[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1996, 65(1):301-308.
- [23] 呼和教德,孟向阳. 横向振动方柱波动升力实验研究
   [J]. 力学学报,1991,23(5):525-532. (HUHE Ao-de, MENG Xiang-yang. An experimental study of fluctuating lift on a square-section cylinder oscillating

transversely in a uniform stream[J]. Acta Mechanica Sinica,1991,23(5):525-532. (in Chinese))

- [24] Singh A P, De A K, Carpenter V K, et al. Flow past a transversely oscillating square cylinder in free stream at low Reynolds numbers [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2009, 61(6):658-682.
- [25] Bearman P W, Obasaju E D. An experimental study of pressure fluctuations on fixed and oscillating squaresection cylinders [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1982,119(1):297-321.
- [26] Larsen A, Larose G L. Dynamic wind effects on suspension and cable-stayed bridges [J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 334:2-28.

- [27] Huang L, Liao H, Wang B, et al. Numerical simulation for aerodynamic derivatives of bridge deck[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2009, 17(4):719-729.
- [28] Nieto F, Owen J S, Hargreaves D M, et al. Bridge deck flutter derivatives: efficient numerical evaluation exploiting their interdependence[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 136:138-150.
- [29] Bruno L, Khris S. The validity of 2D numerical simulations of vertical structures around a bridge deck[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2003, 37 (7):795-828.

## Numerical simulation of flow around oscillating bluff bod based on immersed boundary method

YANG Qing<sup>\*1</sup>, CAO Shu-yang<sup>2</sup>, QI Yong-sheng<sup>1</sup>

(1. Changzhou Key Laboratory of Construction Engineering Structure and Material Properties,

Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213032, China;

2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 20092, China)

Abstract: In conventional CFD method, dynamic mesh technique is always used in numerical simulation of flow past vibrating bodies, which would inevitably create a huge task of grid regeneration. To deal with this situation, Immersed Boundary Method (IBM), which can compute the moving boundary on the stable gird, is adopted in this paper to promote the calculation efficiency. The computation of flows around a harmonically oscillating square cylinder ( $\text{Re} = \text{UD}/v = 10^3$ , constant oscillating amplitude, varying oscillation frequency) and a bridge section  $\text{IRe} = \text{UB}/v = 7.5 \times 10^3$ , varying oscillating frequency and amplitude ) in transverse mode is carried out respectively to analyze their aerodynamic characteristics. Preliminary research results indicate that the length of lock-in region is  $0.06 \sim 0.2$  when oscillating amplitude is fixed to 14% of the square cylinder's height. The vortex shedding of oscillating square cylinder moves back to stable condition beyond Stc=0.2. Mean drag coefficients of the oscillating bridge section under different oscillating amplitudes all reach maxmum values near the stable vortex shedding frequencies whereas mean lift coefficients of the oscillating bridge section all come back to zero at this point.

Key words: immersed boundary algorithm; oscillating square cylinder; bridge section; aerodynamic characteristic

引用本文/Cite this paper:

杨 青,曹曙阳,齐永胜.基于浸入边界算法的振动钝体绕流模拟研究[J].计算力学学报,2017,34(5):570-578.

YANG Qing, CAO Shu-yang, QI Yong-sheng. Numerical simulation of flow around oscillating bluff body based on immersed boundary method[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2017, **34**(5):570-578.