

海豹胡须柱杆件周围流场与气动噪声特性

朱剑月^{1,2}, 王亚正^{1,2}, 徐俊起³, 庞加斌²

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学 汽车学院, 上海 201804;

3. 同济大学 国家磁浮交通工程技术研究中心, 上海 201804)

摘要: 基于海豹胡须能有效抑制涡激振动的特殊结构, 数值分析了海豹胡须柱杆件周围流场与气动噪声特性。在声学风洞中进行了气动噪声测试, 并与具有相同特征长度的圆柱以及椭圆柱杆件进行对比。结果表明, 海豹胡须柱鞍面与节点面交错排列的几何结构引发流体三维分离, 剪切层之间的相互作用减弱, 导致尾迹中没有明显的拟序结构, 尾迹稳定性显著提升, 几何体表面升力脉动被抑制; 海豹胡须柱破坏了圆柱尾流规律性脱落的卡门涡街, 抑制了所产生气动噪声的谐频峰值, 多数频段内声压级幅值降低。气动噪声风洞测试结果验证了数值模拟的准确性。

关键词: 海豹胡须柱; 气动噪声; 流场特性; 涡脱落; 谱本征正交分解

中图分类号: O355

文献标志码: A

Behaviour of Flow and Aerodynamic Noise Around Seal-vibrissa-shaped Cylinder

ZHU Jianyue^{1,2}, WANG Yazheng^{1,2}, XU Junqi³, PANG Jiabin²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. National Maglev Transportation Engineering R&D Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Based on the special structure of seal vibrissa with its ability to effectively inhibit vortex-induced vibrations, the behaviour of flow and aerodynamic noise around a seal-vibrissa-shaped cylinder was numerically simulated. Aerodynamic noise was measured in an anechoic wind tunnel, and the seal-vibrissa-shaped cylinder case was compared with the cases of cylindrical and elliptical bars in same characteristic dimensions. Results show that the alternative arrangement of the

saddle and nodal planes of the seal-vibrissa-shaped cylinder leads to three-dimensional flow separations and suppresses the shear layer interactions, which improves the flow stability with no dominant coherent structures developed in the wake and thus suppresses the lift fluctuations on solid wall surfaces. The morphology of the seal-vibrissa-shaped cylinder inhibits the regular vortex shedding of Karman vortex street which occurs in a cylinder wake, and consequently eliminates the tonal peak of flow-induced noises. Thereby, the sound pressure level is reduced at main frequencies. The experimental results verify the accuracy of numerical simulations.

Keywords: seal-vibrissa-shaped cylinder; aerodynamic noise; flow behaviour; vortex shedding; spectral proper orthogonal decomposition

类圆柱体杆件在建筑物、高速列车受电弓与飞机起落架等工程领域中有着广泛应用。当流体流过时, 类圆柱体杆件两侧产生周期交替涡脱落, 诱发气动噪声产生。随着各类交通运输工具运行速度的提高, 类圆柱体杆件产生的气动噪声问题日益凸显。近年来, 学者们提出了较多类圆柱体杆件的气动噪声降噪方法。Jung 等^[1]设计了截面为椭圆柱的扭转柱, 证实了扭转柱对尾迹流动的控制作用, 三维涡结构的产生能降低层流和湍流的气动力受力效果。侍荣春等^[2]比较了不同凹坑尺寸密度对圆柱的影响, 凹坑的存在能降低圆柱气动噪声的产生, 降噪效果随凹坑密集程度增加而增大, 但高频区域噪声有所恶化。徐志龙等^[3]受贝壳与海螺等海洋生物外壳表面微结构启发, 将光滑圆柱表面设计成凹槽与凸槽的螺纹型表面结构, 350 km·h⁻¹来流速度下凹槽螺纹型结构的减阻降噪效果较好。

收稿日期: 2023-08-25

基金项目: 国家自然科学基金(51875411, 52232013); 新能源汽车及动力系统国家工程研究中心项目(JC20230118); 上海市地面交通工具空气动力学与热环境模拟重点实验室项目(23DZ2229029)

第一作者: 朱剑月, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为高速列车空气动力学与气动噪声。

E-mail: zhujiannyue@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

仿生学的发展为类圆柱体降噪的改型设计带来了新途径。海豹具有在黑暗、浑浊的海域中捕食和生存的能力,这主要依赖于它们的胡须能够对上游猎物游动时所形成的尾迹产生振动反应,而胡须本身并不诱发较强的尾迹流动^[4]。Hanke等^[5]对斑海豹胡须状结构的水动力特性进行了分析,斑海豹胡须除了通过直接接触探测和辨别物体外,还可感知和准确跟踪微弱的流体运动;斑海豹胡须具有独特的波浪形表面结构,能有效削弱流体流过晶须后形成的涡街并抑制晶须上涡脱落引起的振动(涡激振动)。Beem等^[6]由拖曳水池试验发现,海豹游动时能够通过足够敏感的胡须感知流场中形成的小尺度流动变化并消除自激流致噪声;当海豹胡须置身于尾迹中时,能够产生较大幅度振荡,并保持响应频率与尾流振荡频率一致,从而感知上游尾迹内流动并估算产生尾迹形体的大小和形状。Wang等^[7]采用动力学模态分解(DMD)分析了海豹胡须柱的二维测试数据,鞍面和节点面之间存在能量转换,破坏了规律性涡脱落形成,从而降低海豹胡须柱的升力脉动和平均阻力。

以往研究多数分析了海豹胡须柱的气动力性能和周围流场结构,结果表明海豹胡须柱能够有效抑制涡激振动与尾迹规律性涡脱落,因此理论上海豹胡须柱也能有效降低气动噪声的产生与辐射。因此,基于数值模拟和风洞测试,分析海豹胡须柱杆件的气动性能与流致噪声特性,并与圆柱以及椭圆柱杆件进行对比,以揭示海豹胡须柱气动噪声降噪机理,为海豹胡须柱应用于工程领域中类圆柱体杆件气动噪声控制提供参考。

1 气动噪声数值模拟方法

本文研究的类圆柱体杆件周围流动处于低马赫

数区域内,几何体结构表面压力脉动产生的偶极子噪声是气动噪声主要声源,可以根据不可压缩流体进行计算。因此,三维非定常不可压缩 Navier-Stokes 方程被用来模拟流场,连续性方程和动量方程分别为:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

式中: u_i 为流体速度; x_i 与 x_j 表示笛卡尔坐标系方向, $i, j=1, 2, 3$; t 为时间; f_i 为体积力; ρ 为密度; p 为压力; ν 为运动黏性系数。采用开源软件 OpenFOAM 求解控制方程,空间和时间离散采用二阶精度格式。

假设流场参数为广义函数, Ffowcs-Williams 等^[8]得出了基于广义波传播方程的 Ffowcs Williams-Hawkings (FW-H) 方程,以近场流场数据作为源项对远场辐射噪声进行预测。Farassat^[9]基于延迟时间积分方法的 Formulation 1A 可求解 FW-H 方程。

2 计算模型与试验验证

2.1 计算模型设置

类圆柱体杆件几何模型如图 1a 所示。圆柱直径 D 为 30 mm, 椭圆柱的半长轴与半短轴长度分别为 A 和 B , 椭圆柱长短轴之比会影响远场噪声辐射^[10]; 海豹胡须柱结构由成年海豹胡须尺寸获得^[5], 具有波浪形表面, 截面是倾斜的椭圆面, 位于波峰面和波谷面的椭圆截面尺寸以及倾斜角不同, 分别用 A_v 、 B_v 与 a_v 、 b_v 以及 α 与 β 表示, 鞍面与相邻节点面的主轴存在 180° 相位差, 间距为 M , 如图 1b 所示。3 种类圆柱体杆件的等效直径一致, 具有相同的特征长度 ($L=206$ mm), 其余参数如表 1 所示。

表 1 类圆柱体杆件几何参数

Tab.1 Geometrical parameters of cylinder-like bars

海豹胡须柱					椭圆柱		圆柱		
A_v/mm	B_v/mm	a_v/mm	b_v/mm	M/mm	$\alpha/(\circ)$	$\beta/(\circ)$	A/mm	B/mm	D/mm
27.6	11.2	22	13.6	42.6	15.27	17.6	24.8	12.4	30

数值模拟计算域尺寸为: $L_x \times L_y \times L_z = (8.5D + 23.8D) \times 21.0D \times 6.9D$, 如图 2a 所示。根据圆柱算例的网格无关性分析和基准网格划分方法^[11-12], 采用六面体结构网格划分计算域。边界层内第 1 层网格厚度为 5×10^{-6} m, 沿壁面法向量方向以 1.1 的增长率向外增长, 保证 y^+ (壁面网格量纲一距

离) 小于 1, 满足湍流模型计算精度要求, 确保边界层黏性底层内考虑低雷诺数效应。各工况最终生成的网格数均在 2 000 万左右, 图 2b 展示的圆柱杆件计算域内网格在 $x-y$ 平面上划分后沿 z 轴均匀延伸。计算域边界条件设置如下: 入口为均匀、恒定速度入口; 出口为压力出口, 压力与速度梯度为零; 柱体表

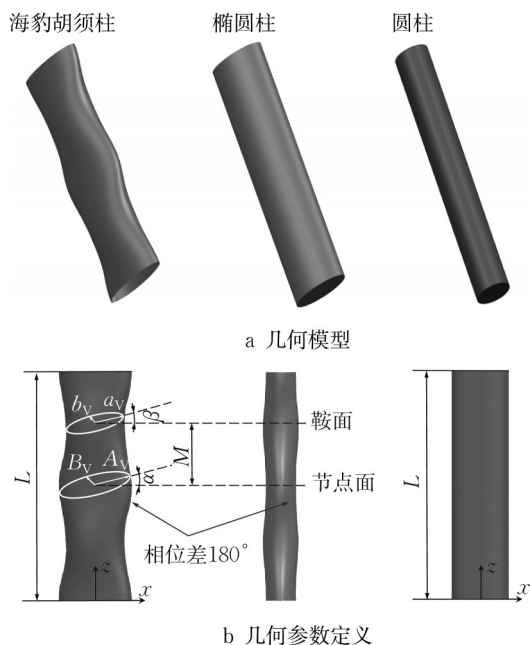


图1 类圆柱体杆件几何模型

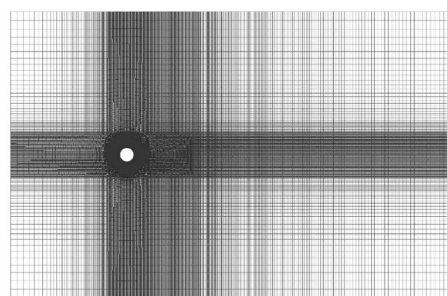
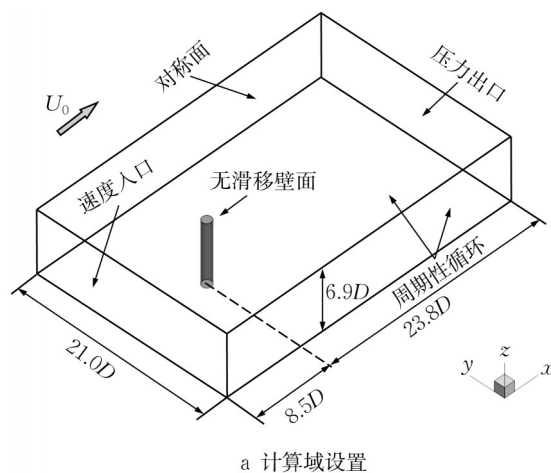
Fig.1 Geometrical model of cylinder-like bars

面为无滑移、无渗透边界条件;轴向两侧设置为周期性循环边界条件,模拟无限长柱体而无须考虑端部效应;侧面两侧采用对称边界条件,相当于剪切为零的无滑移表面。来流速度 $U_0=30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $Re=6\times 10^4$ 。各工况数值仿真时,采用的时间步长为 $5\times 10^{-6}\text{ s}$,确保 Courant-Friedrichs-Lewy 数在整个计算域内不超过1。数值仿真运行0.3 s后,瞬态流场达到统计意义上稳定;再运行0.5 s后进行声源数据采集,以使计算结果的频谱分析获得合理的频率分辨率。

2.2 风洞试验验证

风洞试验在北京航空航天大学D5气动声学风洞中完成。喷口面积为 1 m^2 ,试验段尺寸为 $2\text{ m}\times 1\text{ m}\times 1\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高)。风洞试验风速 U 为 $30, 45, 60\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,中心区域湍流度低于 0.08% ,类圆柱体杆件沿风洞喷口垂向中心线固定(见图3)。试验杆件在流场内高度为 1 m ,大于25倍圆柱直径 D ,在测试圆柱横向中轴面远场噪声时可将杆件视为无限长^[10]。远场传声器位置与数值模拟一致,位于类圆柱体杆件中截面、垂直于来流方向、距离杆件垂向中心线 1.5 m 处。

圆柱绕流运动产生的气动噪声为偶极子声源,其辐射声功率与来流速度的6次方成正比,且不同速度下的频率符合斯特劳哈尔数(St)相似准则^[13]。对不同来流风速下($30\sim 60\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)远场测点噪声按照 $d_{\text{PSD}} - 60\lg(U/U_0)$ 进行归一化处理(d_{PSD} 为功率谱密度),得到如图4所示的气动噪声归一化频谱。



b 网格划分

图2 计算域设置和网格划分

Fig.2 Computational domain and mesh topology



图3 声学风洞测试

Fig.3 Experimental measurements in the anechoic wind tunnel

可以发现,不同来流速度下全部频段内气动噪声的归一化频谱吻合良好,与来流速度的6次方(U^6)成正比,表明辐射的气动噪声为偶极子类型声源,符合圆柱绕流的气动噪声特性,即:在紧致声源条件下,声波的波长大于几何体特征尺寸,固体壁面压力脉动辐射的气动噪声与马赫数满足6次方关系。此外,测试结果中涡脱落频率对应的斯特劳哈尔数为0.188,符合亚临界雷诺数范围内圆柱绕流涡脱落频率值^[14]。因此,远场气动噪声的归一化频谱与涡脱落频率一致,验证了测试结果的合理性。

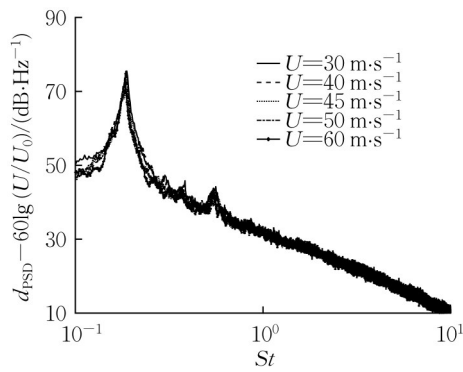


图4 气动噪声归一化频谱

Fig.4 Normalized spectra of aerodynamic noise

来流速度 $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 下远场气动噪声频谱数值计算与风洞测试结果比较如图5所示。可以看出,150 Hz 以下的差异主要来自于风洞背景噪声,150~1 000 Hz 主要频段内气动噪声计算值与声学风洞测试结果吻合得很好,无论是主频值还是声压级幅值均基本一致,特别是位于560 Hz左右谐频的小振幅峰值也在数值计算中被准确捕捉到。因此,风洞测试结果验证了数值模拟的准确性。

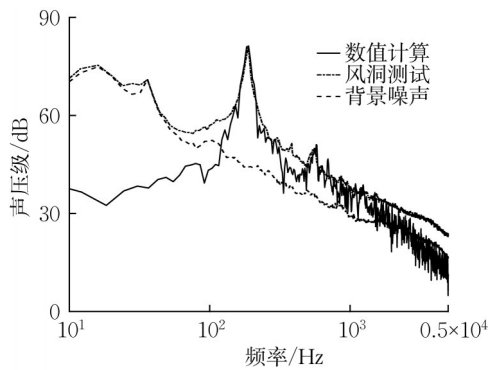


图5 远场气动噪声频谱数值计算与风洞测试结果比较

Fig.5 Comparison of far-field aerodynamic noise spectra between simulations and experiments

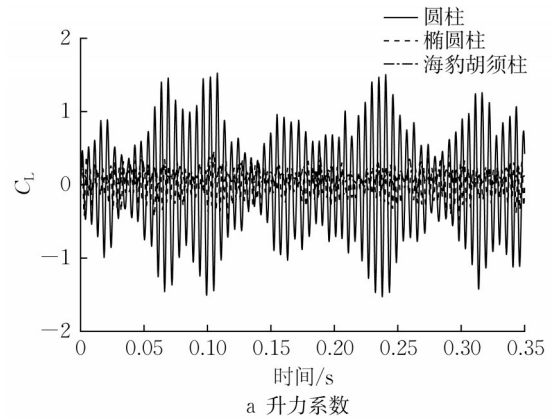
3 流场结果分析

为了理解类圆柱体杆件周围流场特性及其对气动噪声的影响,对上述3种类圆柱体杆件的气动力系数、物面附近流场的Q准则等值面与涡量场进行分析。普遍认为类圆柱体杆件涡脱落产生的非定常脉动力是产生气动噪声的主要原因,同时湍涡生成集中与发展剧烈部位会成为气动噪声源。

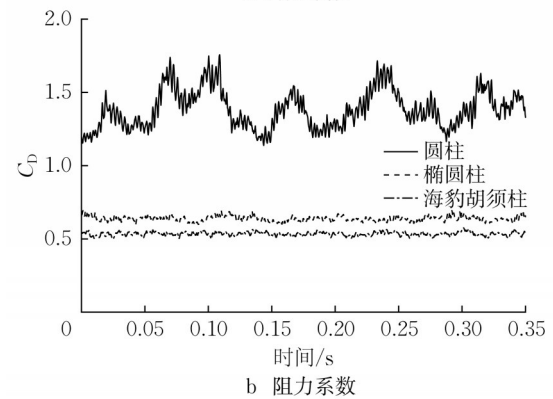
3.1 气动力系数

图6所示为3种杆件的升力系数 C_L 与阻力系数 C_D 的时域变化曲线、统计值和相图。图6a与6b表

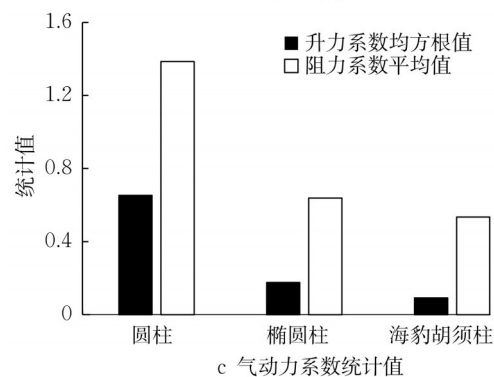
明,椭圆柱与海豹胡须柱的气动力系数波动幅度与圆柱工况相比均大幅降低,其中海豹胡须柱的气动力最小。与圆柱相比,椭圆柱的升力系数均方根值



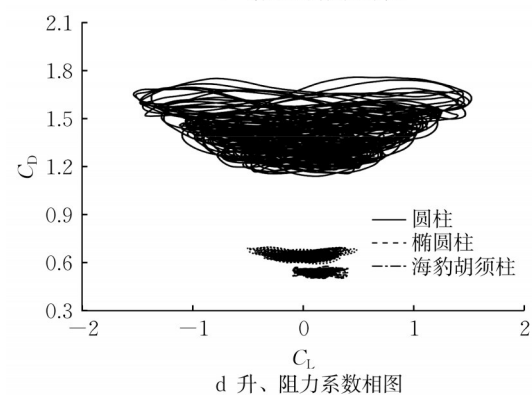
a 升力系数



b 阻力系数



c 气动力系数统计值



d 升、阻力系数相图

图6 不同类圆柱体杆件气动力系数

Fig.6 Aerodynamic force coefficients of different cylinder-like bars

和阻力系数平均值降低了 72.8% 和 53.8%，海豹胡须柱则降低了 86.2% 和 61.4%，如图 6c 所示。为了分析类圆柱体杆件气动力波动强度，图 6d 展示了 C_L 与 C_D 的空间相位曲线。可以发现，圆柱相图呈均匀场抛物面分布，由非定常解向稳态解过渡过程的包络线表明流动接近稳定，但涵盖区域较大，说明升力与阻力的波动均较剧烈；椭圆柱也呈现类似的抛物面分布，但空间相位曲线所处位置较低，涵盖区域较窄，说明瞬时力大小受限，所受气动力及波动均有较大程度减小；海豹胡须柱的空间相位曲线所处位置最低且涵盖区域最小，表明所受气动力及脉动量均大大降低。

为了获得涡脱落频率，对气动力系数时域数据进行快速傅里叶变换 (FFT)，得到频域下气动力系数的功率谱密度曲线，如图 7 所示。图 7a 显示了升力系数的功率谱密度。对于圆柱，一个明显的峰位于 $St=0.189$ 处，椭圆柱峰值在 $St=0.311$ 处，但幅值显著降低。对于海豹胡须柱，已无明显峰值，这是由于海豹胡须柱尾迹中形成了强度较弱的涡脱落，流动不稳定得到有效抑制。由图 7b 中阻力系数功率谱密度曲线可以发现，圆柱与椭圆柱峰值对应的 St 值分别为 0.360 和 0.623，约为升力系数中对应值的 2 倍，而海豹胡须柱结果中无明显峰值；椭圆柱和海豹胡须柱阻力系数幅值均有所降低，海豹胡须柱降幅较多，与圆柱相比，椭圆柱和海豹胡须柱均具有一定的减阻效果。

海豹胡须柱气动力系数的功率谱密度曲线无明显峰值，可能存在着随时间变化的多种特征频率，因此采用小波变换进一步分析海豹胡须柱升力系数波动，以获得时域上非平稳信号频率成分的变化趋势。小波函数使用 Matlab 中的同步压缩小波函数 W_{sst} ，计算结果如图 8 所示。圆柱与椭圆柱的特征频率几乎恒定，而海豹胡须柱的特征频率之间存在多个峰和复杂的相互转换，表明海豹胡须柱鞍面与节点面结构形成了不同相位的涡脱落，有效降低了升力脉动。

3.2 瞬时涡结构

类圆柱体杆件流场内涡运动及发展将影响气动噪声产生，为了分析各杆件周围流动特性，图 9 给出了流场中壁面附近的湍涡结构。采用 Q 准则显示 $\alpha=2$ 的等值面， $\alpha=Q/[(U_0/D)^2]$ ，其中 Q 为速度梯度张量第二不变量。由图 9a、b 可以发现，圆柱尾涡形成较强的卡门涡街结构，上下波动振幅较大，诱发较大的气动力脉动，如图 7 气动力系数功率谱密度曲线峰值所示。图 9c、d 表明，与圆柱相比，椭圆柱

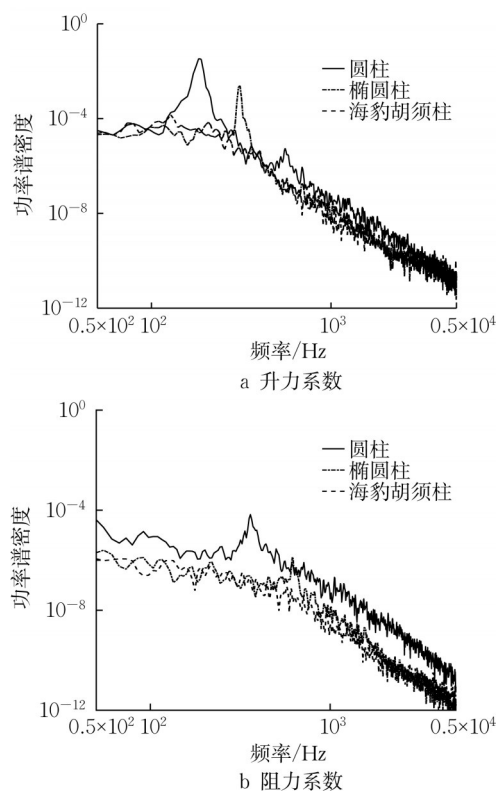


图 7 气动力系数功率谱密度曲线

Fig.7 Power spectral density curves of aerodynamic force coefficients

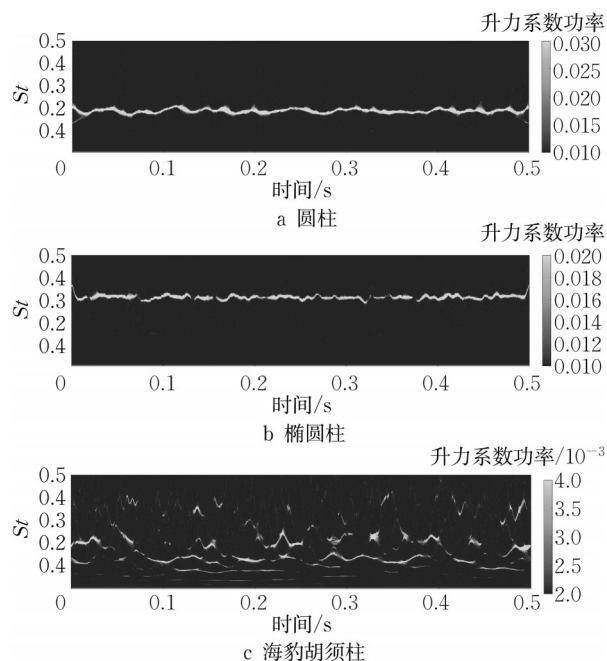


图 8 类圆柱体杆件升力系数小波分析结果

Fig.8 Wavelet transforms of lift coefficients of cylinder-like bars

尾迹内交替涡脱落结构的涡旋上下振荡幅度减小，强度降低，导致椭圆柱升力脉动低于圆柱，对应了图 7 中气动力系数功率谱密度曲线幅值降低。图 9e、f

显示,海豹胡须柱尾迹中没有明显的拟序结构,相邻两鞍面产生不同相位的涡脱落,消耗了分离边界层的能量,减弱了近壁面涡旋波动强度,尾涡展向相关性显著降低,与图7中气动力系数功率谱密度曲线无峰值相一致。因此,海豹胡须柱鞍面与节点面交错排列的几何结构引发了流体三维分离,剪切层之间的相互作用减弱,尾迹稳定性显著提升,几何体表面升力脉动被抑制。

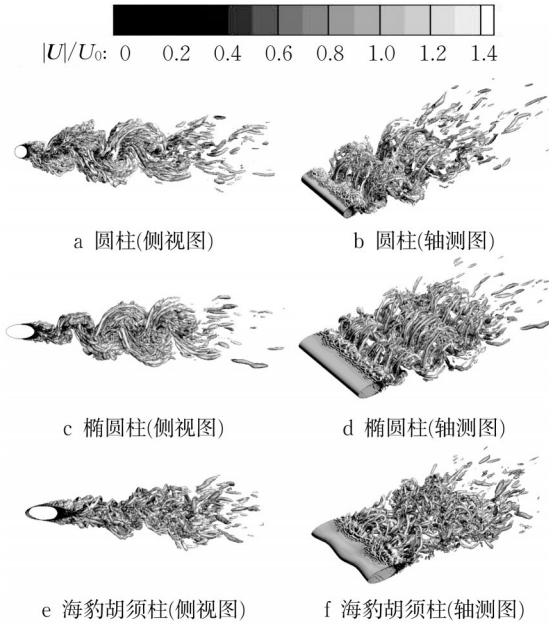


图9 类圆柱体杆件尾流涡结构

Fig.9 Vortex structure in the wake of cylinder-like bars

3.3 尾迹模态相干结构

为了进一步分辨流场中大尺度拟序结构,采用谱本征正交分解(SPOD)对3种类圆柱体杆件的尾迹结构进行模态分解。SPOD模态的特征值谱包含了整个流场的能量分布。图10展示了3种类圆柱体杆件在滤波器长度 $N_f=50$ 下的模态能量分布。图中每个特征值点表示频谱相干的1对模态,每对模态的匹配程度由圆点直径表示,直径最大的特征值点代表第1对模态,相关程度最高。可以发现,圆柱第1对模态能量占比较大,达到40%左右,对应的 $St=0.193$,表示卡门涡街模态;第2与第3对模态的特征频率分别为卡门涡街模态的2倍和3倍($St=0.383, St=0.572$),对应于2次和3次谐波;第2与第3对模态的能量占比显著降低,表明卡门涡街模态主导了流场的发展输运。椭圆柱第1对模态能量占比约26%,相比于圆柱工况有所降低,说明第1对模态的主导作用减弱;第1对模态对应的 $St=0.322$,与升力系数的 St 相同,表明该模态与流场中周期性涡脱

落运动相关;第3对模态特征频率为2倍基频, $St=0.645$ 。与圆柱和椭圆柱相比,海豹胡须柱第1对模态($St=0.216$)对流场总能量贡献降幅显著,占比小于5%,说明海豹胡须柱尾迹中不存在能量占主导地位的拟序结构;第2与第3对模态对应的 St 分别为0.154、0.306,海豹胡须柱特征频率主要分布在 $St=0.2\sim 0.4$ 之间;特征值点的直径差异较小,表明海豹胡须柱尾迹中各阶模态能量分布均匀,不存在能量集中于某一模态的现象。

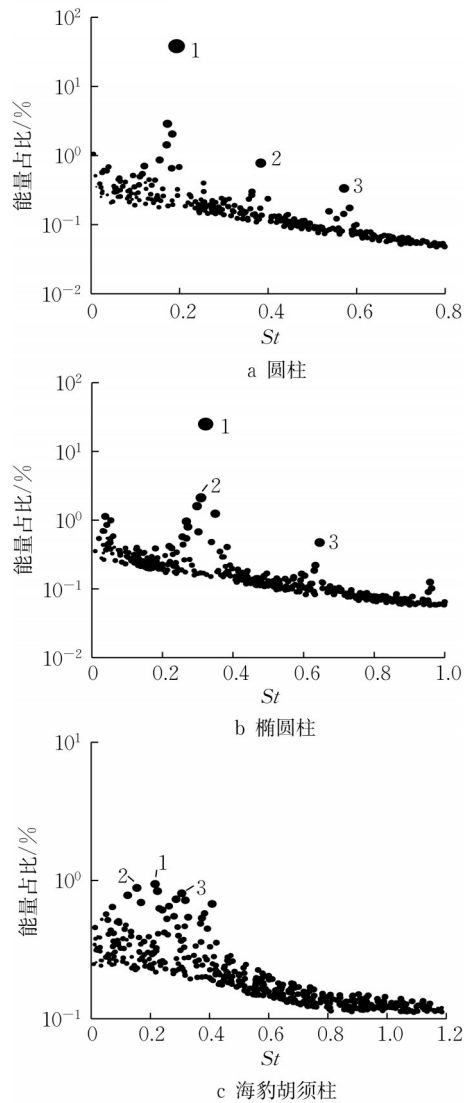


图10 类圆柱体杆件尾迹模态能量分布 ($N_f=50$)

Fig.10 Mode energy distribution in the wake of cylinder-like bars ($N_f=50$)

类圆柱体杆件尾部流动变化主要受尾迹形成与发展的影响。图11展示了类圆柱体杆件尾迹三维流场的SPOD分析结果(滤波器长度 $N_f=50$),以 y 方向横向速度(v)系数 $v/U_0(=\pm 0.02)$ 等值面表示。由于模态配对模式较相似,仅存在 $\pi/2$ 的相位差,因

此显示1对模态中的1个模态。由圆柱模态等值面结果(图11a)可见,1阶模态为卡门涡街的特征模态($St=0.193$),2阶与3阶模态为交替卡门涡街的2次与3次谐波,频率分别为1阶模态的2倍与3倍($St=0.383, St=0.572$),其中2次谐波与1阶卡门涡街的横向速度方向相反。观察椭圆柱模态等值面结果(图11b)可以发现,1阶模态为椭圆柱卡门涡街的特征模态($St=0.322$),2阶模态椭圆柱的中间区域与两端区域出现了反相涡脱落($St=0.309$),3阶模态为卡门涡街的2次谐波,频率为1阶模态的2倍($St=0.645$)。由海豹胡须柱模态等值面结果(图11c)可见,1阶与2阶模态分别展示了上、下鞍面区域的同相与反相涡脱落($St=0.216, St=0.154$),模态配对

不明显,流动结构较难识别;3阶模态为上鞍面与下鞍面区域的不同相涡脱落($St=0.306$),相干性较好,但下鞍面涡脱落较快破碎后消失,可能是流动发展处于过渡状态。类圆柱体杆件尾迹内基于频率的本征正交分解表明:圆柱尾迹中存在较强的卡门涡街拟序结构;椭圆柱尾迹中也形成了卡门涡街拟序结构,但涡脱落强度较弱,2阶模态时沿杆件方向涡脱落中断,且呈反相位分布;海豹胡须柱近几何体尾迹内的涡脱落规则性较差,相干性较弱,所含能量较低,易于破碎消失。显然,类圆柱体杆件尾迹内不同涡旋结构的形成与发展将影响几何体表面气动力的产生与分布,从而影响由几何体表面压力脉动诱发的偶极子气动噪声的产生与辐射。

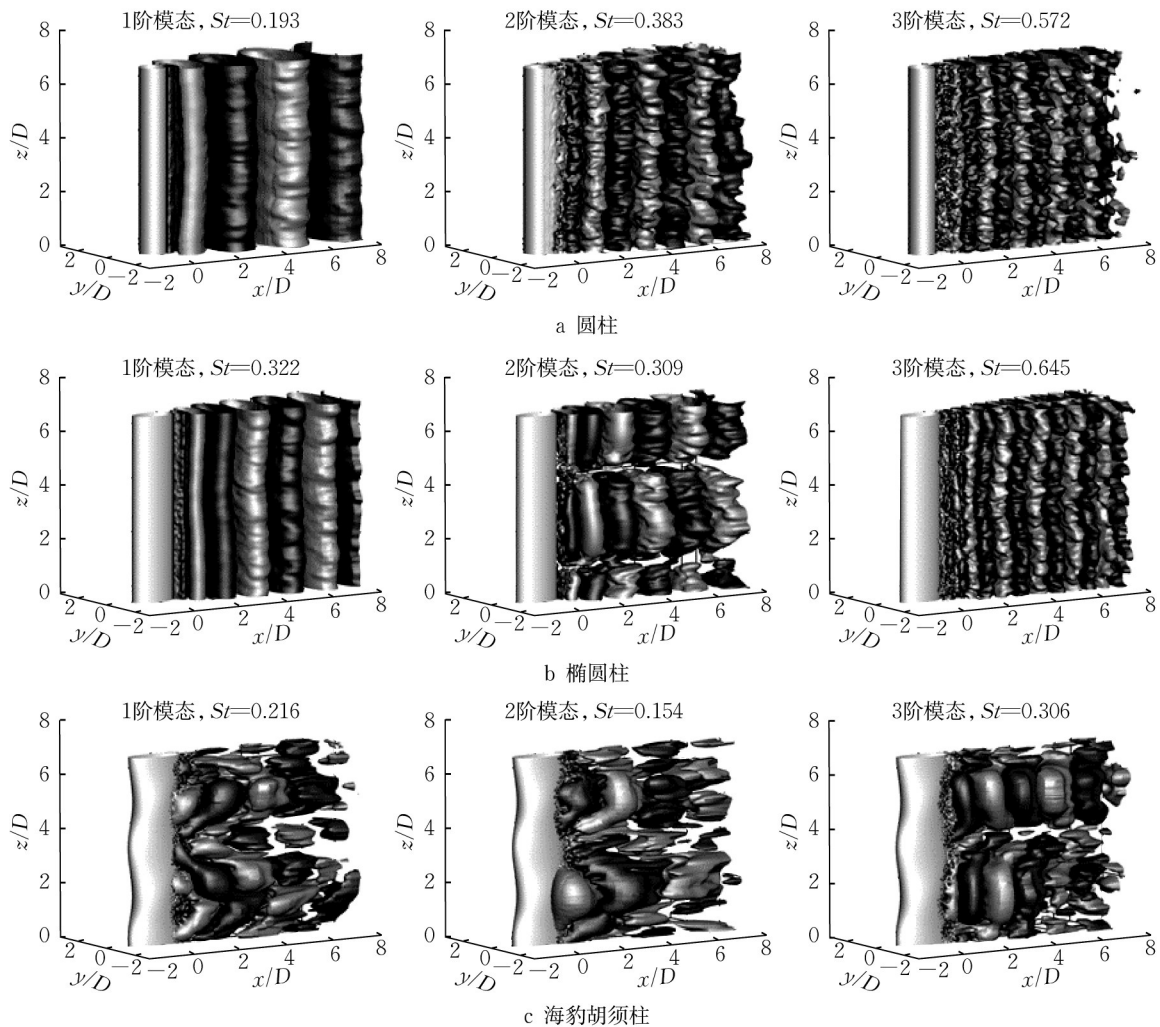


图11 类圆柱体杆件尾迹模态等值面 ($N_t=50$)

Fig.11 Iso-surface of modes in the wake of cylinder-like bars ($N_t=50$)

4 气动噪声预测结果分析

当瞬态流场达到统计意义上稳定后,采用FW-

H声类比方法,以近场流场数据作为源项对远场辐射噪声进行预测。根据Welch方法编制的程序对计算所得的远场噪声时间序列进行功率谱密度分

析^[12],然后再进行总声压级的计算($L_{OASPL} = 10\log(\sum 10^{L_{SPL,i}/10}$),其中 $L_{SPL} = 20\log(p_e/p_{ref})$, p_e 为实际声压, p_{ref} 为参考声压(20 μ Pa), i 为声源数)。远场声接收点布置如图12所示。在类圆柱体杆件中截面内以杆件中心为圆心,1.5 m为半径,每隔5°布置1个远场声接收点,共布置72个声接收点,其中90°和270°声接收点之间连线穿过杆件中心线并垂直于来流方向。

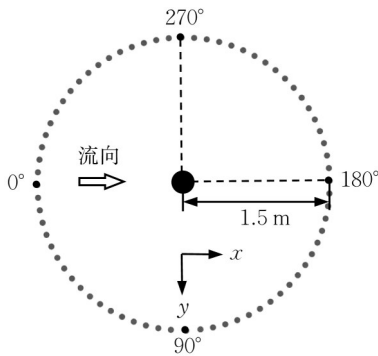


图12 远场声接收点布置示意

Fig.12 Schematic diagram of far-field receivers

来流速度为30 $m\cdot s^{-1}$ 时3种类圆柱体杆件在远场90°声接收点处气动噪声声压级数值计算结果如图13所示。可以发现,声压级曲线与升力系数功率谱密度曲线(见图7a)的形状基本一致。这是由于圆柱尾流交替涡脱落在圆柱表面形成较强的非定常脉动升力,诱发较大的峰值噪声,因此几何体表面非定常脉动力是圆柱杆件气动噪声产生的主要成因。椭圆柱尾迹内交替涡脱落强度降低,产生的气动噪声仍存在峰值噪声,但强度明显下降。海豹胡须柱尾流内不存在规则相干涡脱落结构,不产生由此形成的峰值噪声,全频域内为宽频噪声,且幅值低于圆柱绕流诱发的气动噪声。

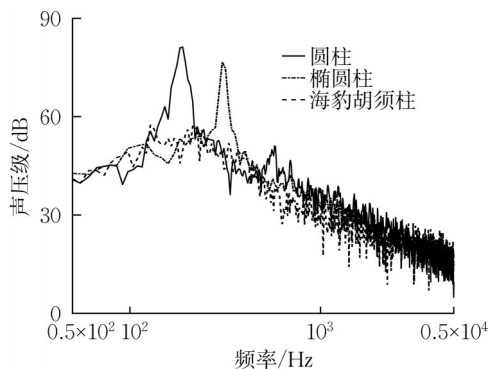


图13 远场声接收点声压级频谱(数值计算)

Fig.13 Noise spectra at far-field receivers (numerical simulations)

远场声接收点(见图12)的气动噪声总声压级($U_0=30 m\cdot s^{-1}$)计算结果表明,圆柱、椭圆柱与海豹胡须柱杆件的声辐射指向性(如图14所示)均呈偶极子声源分布。与圆柱相比,在360°径向范围内椭圆柱降噪7~11 dB,海豹胡须柱降噪14~17 dB,因此海豹胡须柱较明显地抑制了气动噪声产生。

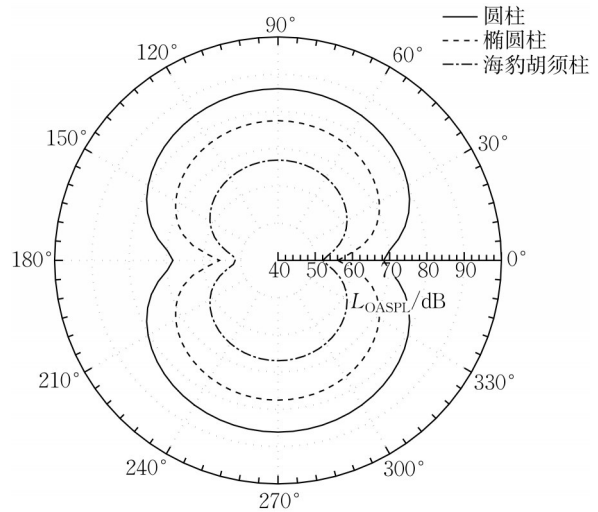


图14 远场气动噪声声辐射指向性

Fig.14 Sound directivities of far-field aerodynamic noise

5 结语

基于数值模拟和声学风洞测试,分析了海豹胡须柱杆件周围流场与气动噪声特性。结果表明:海豹胡须柱鞍面与节点面交错排列的几何结构引发了流体三维分离,相邻两鞍面部位分别产生了相位相反的涡脱落,减弱了近壁面涡旋上下波动强度,破坏了尾迹卡门涡街的拟序排列状态,降低了海豹胡须柱气动力脉动,从而有效抑制了尾迹规则涡脱落所产生的气动噪声谐频峰值。因此,海豹胡须柱能够抑制圆柱绕流规律涡脱落的形成并有效降低气动噪声,可以应用于工程领域类圆柱体杆件气动噪声控制。

作者贡献声明:

- 朱剑月:数值计算,论文撰写。
- 王亚正:风洞测试,数据分析。
- 徐俊起:研究思路设计。
- 庞加斌:测试方案构思。

参考文献:

[1] JUNG J H, YOON H S. Large eddy simulation of flow over a

- twisted cylinder at a subcritical Reynolds number [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2014, 759: 579.
- [2] 侍荣春, 李辉, 韩健, 等. 类高尔夫球表面处理对受电弓气动噪声的影响 [J]. *噪声与振动控制*, 2018, 38(4): 81. SHI Rongchun, LI Hui, HAN Jian, *et al.* Study on the effect of golf-like surface treatment on pantograph's noise [J]. *Noise and Vibration Control*, 2018, 38(4): 81.
- [3] 徐志龙, 刘海涛, 王超文, 等. 高速列车受电弓杆件减阻降噪研究分析 [J]. *华东交通大学学报*, 2020, 37(2): 1. XU Zhilong, LIU Haitao, WANG Chaowen, *et al.* Study on drag and noise reduction of pantograph rods in a high speed train [J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2020, 37(2): 1.
- [4] DEHNHARDT G, MAUCK B, HANKE W, *et al.* Hydrodynamic trail-following in harbor seals (*Phoca vitulina*) [J]. *Science*, 2001, 293(5527): 102.
- [5] HANKE W, WITTE M, MIERSCH L, *et al.* Harbor seal vibrissa morphology suppresses vortex-induced vibrations [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2010, 213: 2665.
- [6] BEEM H R, TRIANTAFYLLOU M S. Wake-induced 'slaloming' response explains exquisite sensitivity of seal whisker-like sensors [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2015, 783: 306.
- [7] WANG S, LIU Y. Wake dynamics behind a seal-vibrissa-shaped cylinder: a comparative study by time-resolved particle velocimetry measurements [J]. *Experiments in Fluids*, 2016, 57(3): 32.
- [8] FLOWCS-WILLIAMS J E, HAWKINGS D L. Sound radiation from turbulence and surfaces in arbitrary motion [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1969, 264: 321.
- [9] FARASSAT F. Derivation of Formulations 1 and 1A of Farassat [R]. Hampton: Langley Research Center, 2007.
- [10] KING W F, PFIZENMAIER E. An experimental study of sound generated by flows around cylinders of different cross-section [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, 328: 318.
- [11] ZHU J Y, HU Z W, THOMPSON D J. Flow behaviour and aeroacoustic characteristics of a simplified high-speed train bogie [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2016, 230(7): 1642.
- [12] ZHU J Y. Aerodynamic noise of high-speed train bogies [D]. Southampton: University of Southampton, 2015.
- [13] 李玲, 刘沛清, 邢宇, 等. 亚临界雷诺数圆柱绕流远场气动噪声实验研究 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2016, 42(5): 977. LI Ling, LIU Peiqing, XING Yu, *et al.* Far-field aeroacoustic experimental study of flow around a circular cylinder at subcritical Reynolds number [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, 42(5): 977.
- [14] NORBERG C. Fluctuating lift on a circular cylinder: review and new measurements [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2003, 17(1): 57.

(上接第 538 页)

- Materials, 2020, 238: 117677.
- [7] 徐港, 李运攀, 王谊敏, 等. 干湿交替环境下氯离子在承压混凝土内的传输特性 [J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(5): 727. XU Gang, LI Yunpan, WANG Yimin, *et al.* Transportation of chloride ion in sustained-load concrete under dry-wet cycle [J]. *Journal of Building Materials*, 2015, 18(5): 727.
- [8] BAŽANT Z P, NAJJAR L J. Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete [J]. *Materials and Structures*, 1972, 5: 3.
- [9] LI K, LI C, CHEN Z. Influential depth of moisture transport in concrete subject to drying-wetting cycles [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2009, 31(10): 693.
- [10] YODSUDJAI W, VANRAK P, SUWANVITAYA P, *et al.* Corrosion behavior of reinforcement in concrete with different compositions [J]. *Journal of Sustainable Cement-based Materials*, 2021, 10(3): 129.
- [11] NAKARAI K, ISHIDA T, MAEKAWA K. Multi scale physicochemical modeling of soil cementitious material interaction [J]. *Soils and Foundations*, 2006, 46(5): 65.
- [12] CHEN D, YANG K, HU D, *et al.* A meso-stochastic research on the chloride transport in unsaturated concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 273: 121986.
- [13] LI C Z, SONG X B, JIANG L H. A time-dependent chloride diffusion model for predicting initial corrosion time of reinforced concrete with slag addition [J]. *Cement and Concrete Research*, 2021, 145: 106455.
- [14] SUN C, YUAN L, ZHAI X, *et al.* Numerical and experimental study of moisture and chloride transport in unsaturated concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 189: 1067.
- [15] Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete: ASTM-C1218 [S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.
- [16] GAO Y H, ZHANG J Z, ZHANG S, *et al.* Probability distribution of convection zone depth of chloride in concrete in a marine tidal environment [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 140: 485.
- [17] 张俊芝, 庄华夏, 伍亚玲, 等. 临海既有混凝土氯离子侵蚀及钢筋初锈时间预测 [J]. *建筑材料学报*, 2014, 17(3): 454. ZHANG Junzhi, ZHUANG Huaxia, WU Yalin, *et al.* Chloride ion erosion and prediction of initial corrosion time of steel bar in the existing coastal concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2014, 17(3): 454.
- [18] SHI X, XIE N, FORTUNE K, *et al.* Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: an overview [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 30: 125.
- [19] LI C Z, JIANG L H, LI S S. Effect of limestone powder addition on threshold chloride concentration for steel corrosion in reinforced concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2020, 131: 106018.