

跨海铁路列车气动性和波浪力研究

鞠建强

(中铁上海设计院集团有限公司, 上海市 200070)

摘要: 头门港支线二期铁路跨越台州湾, 建设条件复杂, 软土地层较厚, 风大浪高。全年6级及以上大风天气多达246 d, 为确保列车的运营结构安全, 采用计算流体动力学的数值模拟方法对行驶状态列车的气动特性进行评价, 以及以不同风速下列车的运营状态判断是否设置风屏障。海域东向面临外海, 海域开阔, 波浪多为风浪和涌浪组合的混合浪, 在风暴潮、台风等极端恶劣海况下, 桥墩可能遭受较严重的波浪灾害, 影响大桥的整体稳定性, 为此开展极端海况下的波浪力分析研究, 对理论计算和数值模拟、模型试验数据进行对比, 确定理论计算的基础整体波浪力的相位系数。

关键词: 跨海铁路; 风大浪高; 气动性分析; 波浪力; 相位系数

中图分类号: U24

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)06-0292-05

Research on Aerodynamics and Wave Forces of Crossing-sea Railway Train

JU Jianqiang

(China Railway Shanghai Design Institute Group Co., Ltd., Shanghai 200070, China)

Abstract: The Toumen Port Branch Line Phase II Railway crosses Taizhou Bay. The construction condition is complicated, the soft soil layer is thick, and the wind is strong and the wave is high. There are 246 d with strong winds of 6 or above in the whole year. In order to ensure the safety of train operation structure, the numerical simulation method of computational fluid dynamics (CFD) is used to evaluate the aerodynamic characteristics of trains under running conditions, and to determine whether to set wind barriers and train operation conditions under different wind speeds. The sea faces the open sea to the east, the sea is open, and the waves are mostly mixed waves combined with wind waves and swell waves. Under extreme sea conditions such as storm surge and typhoon, the pier may suffer serious wave disasters, which will affect the overall stability of the bridge. Therefore, the wave force under extreme sea conditions are analyzed and studied. The theoretical calculation, numerical simulation and model test data are compared to determine the phase coefficient of the whole wave force based on theoretical calculation.

Keywords: crossing-sea railway; high wind and wave; aerodynamic analysis; wave force; phase coefficient

0 引言

新建头门港支线二期头门新区—头门港段位于台州市临海市, 场地位于东南沿海, 线路起自头门新区站, 经大竹山岛, 上头门岛, 跨越台州湾。全线设头门港跨海特大桥1座, 桥长12.1 km, 建设条件复杂, 风大浪高。据2018—2022年头门岛海域气象监测统计, 该区域多年平均风速为5.8 m/s, 最大风速为

32.0 m/s(11级), 极大风速为42.5 m/s(14级)(出现在2019年9号台风“利马奇”影响期间)。6级及以上风力年平均天数多达246 d, 为确保列车的运营结构安全, 对行驶状态列车的气动特性进行评价, 判断是否设置风屏障以及不同风速下列车的运营状态^[1]。该项目所在区域工程地质条件较差, 淤泥和淤泥质黏土层较厚, 两者平均厚度和约为25 m; 正规半日潮, 潮差约4 m; 总体流速较强, 最大约为1.5 m/s; 工程海域波高较大, 浅海滩涂区浪高为3~4 m, 海洋区波浪高约5 m, 从空间分布来看, 总体上由岸向岛波浪呈逐渐增大趋势, 波浪作用较强, 影响大桥的整体稳定性, 为此亟须开展极端海况下的波浪力分析研究。

收稿日期: 2024-12-29

基金项目: 中铁上海设计院集团有限公司2023年度科技研究开发计划课题(集23-07)

作者简介: 鞠建强(1990—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁设计工作。

1 列车气动性分析

1.1 计算原理

基于 Fluent 软件平台,利用 CFD 技术对桥梁-移动列车系统进行了全尺度数值模拟,得到移动列车在横风作用下的气动力矩平均值,然后为考虑脉动风压的影响,基于准定常假设对气动力矩平均值进行修正,进而分析了主要风向下移动列车的倾覆系数^[2-5]。

1.2 计算参数

选取了直线行驶、400 m 半径曲线行驶、800 m 半径曲线行驶三种行驶情况。列车曲线行驶时考虑了曲线外侧来风和曲线内侧来风两种来流方向(见图 1)。风力分别考虑 6~13 级,列车直线行驶速度选取 80 km/h,曲线行驶速度选取 80、45 km/h。

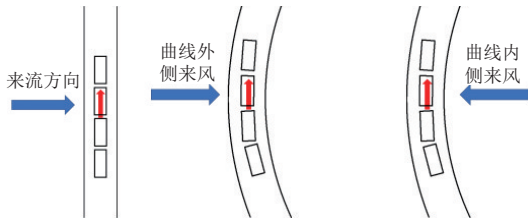


图 1 来流方向示意图

1.3 数值模拟

1.3.1 模型建立和网格划分

由于列车是一个长细比很大的几何体,其中间车辆几何外形相同。在数值模拟中采用一节头车、两节拖车和一节尾车的四节车模型,反映了典型列车在行驶过程的特点,同时能节约计算资源。利用 ICM 建立了几何模型,整个计算模型采用区域分块技术划分网格。在研究对象附近区域采用尺寸较小的网格,在其它区域则采用尺寸稍大的网格,整个计算区域的网格数划分约为 500 万^[6-7]。数值模拟计算域见图 2,列车网格划分见图 3。

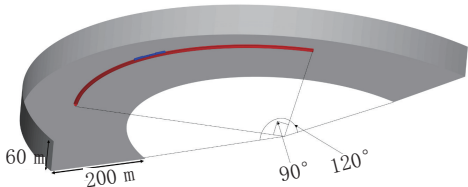


图 2 曲线线路计算域示意图

1.3.2 计算模型

风环境数值模拟采用大型通用计算流体动力学 (CFD) 软件 Fluent。湍流模型选用 standard $k-\varepsilon$, 壁面函数采用 Standard Wall Function, 该模型适用性强、计算精度较高,结果可靠^[8]。边界条件:计算域

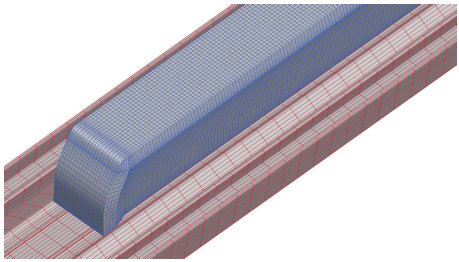


图 3 列车网格划分示意图

入口设置为速度边界条件,顶部设置为对称边界条件,底部设置为无滑移壁面边界条件,其余三个侧面均设置为压力出口;桥梁及列车表面设置为无滑移壁面边界条件^[9]。时间步长为 0.002 s,时间步为 3 000 步,离散方案为二阶迎风,收敛残差标准为 5×10^{-4} 。

1.3.3 参数定义

作用在列车上的外荷载主要有:侧风及因列车运动形成表面风压共同作用下的气动力矩 M ;列车转弯产生的离心力 F_c ,当列车直线行驶时则不需考虑离心力和轨道超高;列车横向振动产生惯性力 F_h 。列车受力示意图见图 4。

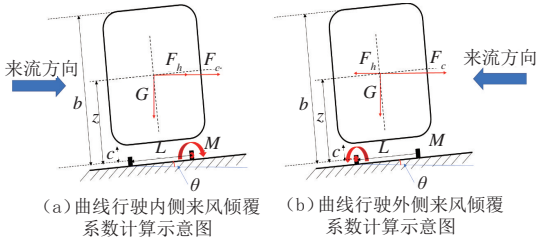


图 4 列车受力示意图

《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》(GB/T 5599—2019)中规定:倾覆系数用于鉴定试验车辆在侧向风力、离心力、横向振动惯性力的同时作用下是否会导致车辆倾覆^[10],其倾覆的临界条件见式(1):

$$D = \frac{P_d}{P_{st}} = 1 \tag{1}$$

式中: D 为倾覆系数; P_d 为车辆或转向架同一侧车轮的动载荷; P_{st} 为相应车轮的静载荷。根据《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》(GB/T 5599—2019)规定:车辆的倾覆系数应满足 $D < 0.8$ ^[11]。

规范中的倾覆系数是车轮上的动载荷与静载荷之比,该项目研究将倾覆力矩的表达形式转换为外荷载产生的倾覆力矩与自重产生的稳定力矩之比,其本质含义一致。

曲线行驶内侧来风时倾覆系数计算见式(2):

$$D = \frac{M + (F_h + F_c) \cos \theta \cdot z - (F_h + F_c) \sin \theta \cdot L/2}{G \cos \theta \cdot L/2 + G \sin \theta \cdot z} \tag{2}$$

曲线行驶外侧来风时倾覆系数计算见式(3):

$$D = \frac{M + (F_h - F_c)\cos\theta \cdot z + (F_h - F_c)\sin\theta \cdot L/2}{G\cos\theta \cdot L/2 - G\sin\theta \cdot z} \quad (3)$$

式中: $F_h=ma_h$, a_h 为列车的横向振动加速度; $F_c=mv^2/R$; v 为列车运动速度; R 为转弯半径; M 为移动列车对钢轨中心的气动力矩; L 为轨道间距; z 列车质心距轨面的高度, $z=(b-c)/2+c$ 。计算倾覆系数所需基本参数见表1。

表1 计算倾覆系数基本参数取值	
项目	参数
质量 m	头车和尾车均取为138 t;中间两节拖车空载时均取为23 t,满载时取为93 t
列车运行速度 v	22.22 m/s (80 km/h)
轨道间距 L	1.435 m
列车顶部距轨面高度 b	头车、尾车为4.04 m,中间两节拖车均取为3.14 m
列车底部距轨面高度 c	头车、拖车、尾车均取为0.9 m
横向振动加速度 a_h	0.1g
曲线行驶轨道超高	90 mm (倾角 $\theta=3.6^\circ$)

由于数值模拟未考虑脉动风压对气动力矩的影响,项目研究基于准定常假设对气动力矩模拟值进行修正,即假设脉动风压随着来流风速的变化而成比例同步变化。

1.3.4 移动列车模拟结果

分别对不同风力等级、不同来流方向、不同行驶速度、不同车身部位、列车空载、满载情况进行分析,考虑了轨道内外侧超高引起的不平衡力矩,结合列车所受离心力、横向振动惯性力,按照规范要求,求得了头车、拖车、尾车的倾覆系数。表2为各级风力在行驶速度为80 km/h情况下,最不利条件下的倾覆系数。

表2 列车倾覆系数					
风力	计算参数				
	来流方向	曲线半径/m	车厢位置	气动力矩 $M/(\text{kN}\cdot\text{m})$	倾覆系数 D
6	曲线内侧	400	头车	32.6	0.65
7	曲线内侧	400	头车	54.5	0.67
8	曲线内侧	400	中间车空载	33.2	0.69
9	曲线内侧	400	中间车空载	47.0	0.76
10	曲线内侧	400	中间车空载	77.5	0.92
11	曲线内侧	400	中间车空载	95.2	1.01
12	曲线外侧	800	中间车空载	141.5	1.18
13	曲线外侧	800	中间车空载	170.8	1.39

- (1)列车在6~9级风情况下可以正常通过,无需设置风屏障。
- (2)列车在10级风情况下存在倾覆风险,考虑到10级风发生天数少,存续时间短,同时铁路等级为三级铁路,建议列车在10级风时停运,即风速超

过25 m/s时停运。

2 波浪力分析

2.1 理论计算

结构波浪力按照《港口与航道水文规范》(JTS 145—2015)10.3款规定进行计算,波浪力一般对基础中的桩基、承台和桥墩分别计算其最大速度力和最大惯性力,分析不同部位所受的最大波浪力,根据力矩与力的关系,计算出最大力在不同部位的受力点^[12-13]。

2.2 数值模拟

主要采用流体力学软件Open Foam,通过模拟不同桥墩基础在波浪水槽中承受的波浪工况,计算出基础不同部位在100 a一遇高水位以及100 a一遇波浪条件下承受的波浪力作用。

2.2.1 数值模型布置

根据相关资料建立三维数值水槽,数值水槽主要包括直线段、斜坡段、工作区(见图5)。直线段长度为8 m,确保波浪能够发展充分;斜坡段长度为4 m、高度为0.2 m,将波浪变形,达到重现期波高;工作区顶部设置一个数值浪高仪,主要作用为数值率波,确保模拟波高和设计波高的相关参数相符^[14]。

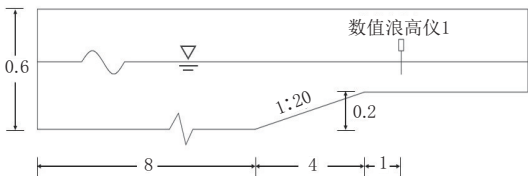


图5 数值水槽示意图

2.2.2 基础网格划分

基于桥墩结构,创建三维数值模型,进行结构化网格划分(见图6),波面及结构物附近网格进行加密处理,确保模拟基础在数值水槽中受力可靠^[15-17]。

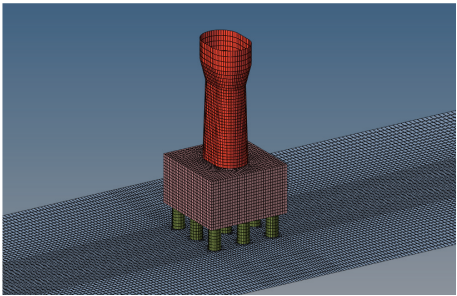


图6 基础网格划分示意图

2.3 模型试验

综合考虑试验场地、场区波浪条件及跨海大桥的支撑结构,建立缩尺比例实验模型,在波浪水槽中进行模拟试验,桥墩模型上固接一组六轴力传感器,

进行不同来波方向波浪力测量^[18-22]。

2.3.1 波浪水槽

本试验在上海河口海岸科学研究中心试验大厅的波浪水槽中进行,分别对低桩承台桥墩、高桩承台桥墩、通航孔桥墩进行试验分析^[23-25]。基础试验模型见图 7,基础试验中的照片见图 8。



图 7 基础试验模型示意图



图 8 基础试验过程图

2.4 波浪力结果分析

针对头门港跨海铁路桥梁低桩承台桥墩、通航孔桥墩和高桩承台桥墩的波浪荷载开展了理论计算、数值仿真研究和物理模型试验^[26],研究成果见表 3、表 4。

表 3 不同类型桥墩 100 a 重现期 3 种计算方法结果

桥墩类型	受力方向	波浪力		
		理论计算/kN	数值模拟结果/kN	模型试验结果/kN
低桩承台桥墩	顺桥向	1 049	703	678
	斜桥向	—	—	632
	横桥向	1 049	—	492
通航孔桥墩	顺桥向	17 478	7 705	7 216
	斜桥向	—	—	7 084
	横桥向	17 478	—	6 307
高桩承台桥墩	顺桥向	3 327	2 878	2 702
	斜桥向	—	—	2 507
	横桥向	3 327	—	2 326

根据模型试验和数值模拟结果可知,总波浪力一般较理论计算的数值偏小;桥墩部分和桩基部分

表 4 理论计算、数值模拟、模型试验结果的对比分析

类型	波浪力				
	理论计算/kN	数值模拟结果/kN	模型试验结果/kN	数值/理论	试验/理论
低桩承台桥墩	1 049	703	678	67%	65%
高桩承台桥墩	3 327	2 878	2 702	87%	81%

的波浪力由速度力控制,承台部分的波浪力由惯性力控制,其并不同时出现,其主要原因是桥墩、承台和桩基之间存在相互影响,作用在三部分上的波浪存在相位差,各部分结构到达最大值的时机不一,因此计算总体最大波浪力时,不能将三者的最大值直接相加^[27]。

该项目采用了模型试验、数值模拟和理论计算三种方法,数值模拟和模型试验波浪力数据是理论计算的 87% 左右,基础整体波浪力的相位系数 K 可取 0.9^[28]。

3 结 语

针对头门港支线二期铁路的特点,全年大风天气日较多,且台风频发,研究行驶状态列车的气动特性,同时结合项目进行波浪力分析,得到如下结论:

- (1)列车在 6~9 级风情况下可以正常通过,无需设置风屏障。
- (2)列车在 10 级风情况下存在倾覆风险,考虑到 10 级风发生天数少、存续时间短,同时铁路等级为三级铁路,建议 10 级风时列车停运,即风速超过 25 m/s 时列车应停运。
- (3)根据物理实验和数值模拟,总波浪力一般较理论计算数值偏小,在实际工程中可依据理论计算对基础整体波浪力进行折减,相位系数可取值 0.9。

参考文献:

[1] 胥红敏,张鹏,郭湛.大风作用下高速列车运行安全性研究综述[J].中国铁路,2019(5):17-26.

[2] 武月恒.基于气动效应的铁路桥梁风屏障设计与分析[J].铁路技术创新,2022(3):88-94.

[3] 田红旗.中国恶劣风环境下铁路安全行车研究进展[J].中南大学学报(自然科学版),2010,41(6):2435-2443.

[4] 毛军,郗艳红,高亮,等.横风作用下高速列车气动阻力[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(11):4059-4067.

[5] 张在中,周丹.不同头部外形高速列车气动性能风洞试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(6):2603-2608.

[6] 黄克成.横风下重载货运列车的气动特性与动力学分析研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2023.

[7] 刘品.横风环境中列车—桥梁系统的气动特性及耦合振动研究[D].成都:西南交通大学,2016.

[8] 夏烨,简旭东,孙利民,等.大跨桥梁主塔施工阶段塔吊风致振动

- 与安全性研究[J]. 中外公路, 2020, 40(5): 93-99.
- [9] 于梦阁, 张继业, 张卫华. 桥梁上高速列车的强横风运行安全性[J]. 机械工程学报, 2012, 48(18): 104-111.
- [10] 徐力, 倪纯双, 陈萌, 等. 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范的制定[J]. 机车电传动, 2020(5): 19-21.
- [11] GB/T 5599—2019, 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范[S].
- [12] JTS 145—2015, 港口与航道水文规范[S].
- [13] 何一宽, 韩冰, 季文玉, 等. 承台-群桩结构波浪力理论分析[J]. 中国公路学报, 2022, 35(11): 30-38.
- [14] 齐林. 跨海大桥不同类型下部结构波浪力特性[J]. 铁道建筑, 2024, 64(6): 9-16.
- [15] 黄雯. 波浪与海流作用下跨海大桥下部结构受力特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [16] 何海峰, 魏凯, 张明金. 波浪荷载作用下跨海桥梁群桩基础方案研究[J]. 铁道建筑, 2019, 59(4): 48-52.
- [17] 邹艳荣, 齐梅兰, 李金钊. 近海岸桥梁下部结构波浪力分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(12): 2356-2364.
- [18] 唐筱宁, 夏运强, 杨洪旗, 等. 波浪物理模型试验中风速比尺确定方法初探[J]. 海岸工程, 2006(1): 1-5.
- [19] 肖宇. 跨海大桥基础结构波流力计算方法[J]. 中国港湾建设, 2024, 44(2): 59-64; 91.
- [20] Longzai G, Hanbao C, Songgui C, *et al.* A Study on the Calculation Method of Wave Crest Height and Panel Wave Force of a New Barrel-Pile Foundation Composite Structure Wharf[J]. Applied Sciences, 2022, 12(3): 1060-1060.
- [21] 胡勇, 雷丽萍, 杨进先. 跨海桥梁基础波浪(流)力计算问题探讨[J]. 水道港口, 2012, 33(2): 101-105.
- [22] Junpu L, Lan Z, Shouyu C, *et al.* Regularized singular boundary method for calculating wave forces on three-dimensional large offshore structure[J]. Applied Mathematics Letters, 2024: 149.
- [23] 陈文兴, 余根祥, 林桂, 等. 规则波浪作用下桩基础波浪力试验分析[J]. 福建交通科技, 2023(1): 46-52.
- [24] 文望青, 毕昕宇, 韩嘉怡, 等. 跨海桥梁圆端形基础波流力缩尺效应研究[J]. 世界桥梁, 2023, 51(1): 78-84.
- [25] 肖海珠, 魏凯, 胡楷宇, 等. 西堠门公铁两用大桥高桩承台基础波流荷载特性研究[J]. 桥梁建设, 2023, 53(2): 27-35.
- [26] 杨兆哲. 波浪荷载作用下桥墩受力试验及数值研究[D]. 福州: 福州大学, 2020.
- [27] 孙冰, 张昊宸, 季新然, 等. 波浪作用下桩基承台结构的波浪力计算[J]. 水运工程, 2019(7): 49-53.
- [28] 中铁大桥勘测设计院集团有限公司. 一种跨海桥梁基础所受波浪力的计算方法: CN106202629B[P]. 2019-10-25

(上接第287页)

- [3] 宋许根. 广州南沙某深厚软土区综合管廊基坑变形破坏分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(增刊1): 3629-3642.
- [4] 白兰兰, 周俊杰, 赵余. 综合考虑沉降与基坑安全的综合管廊地基处理方案研究[J]. 城市道桥与防洪, 2020(12): 212-215.
- [5] 马小燕. 城市道路设置地下综合管廊的路基沉降处理方法[J]. 工程技术研究, 2018(18): 21-23.
- [6] 王大勃, 江晓峰. 软土地基综合管廊对路基沉降差影响与分析[J]. 城市道桥与防洪, 2019(10): 204-206.