

基于数值模拟的泵站进出水流道改造优化

潘 洋

(上海市闵行区水利管理事务中心, 上海市 201199)

摘 要: 为提升苏州河水质及弥补相关支流水动力不足问题, 结合苏州河环境综合整治四期项目, 闵行区陆续将12座单向泵闸改造为双向功能, 过程中存在原泵站进水空间尺度受限影响问题。为实现泵站进水流道形线最优, 与潜水泵配套后具有良好的水力性能, 确保泵站建设完成后能安全、稳定运行, 并高效地发挥效益, 需对进水流道进行改造。以苏州河沿线某泵闸为例, 对进水流道提出水泵吸水口设置导流墩、加装短隔板、加装长隔板、设置导流墩+加装短隔板等4种改造方案。采用CFD数值模拟方法, 对双向进出水流道潜水泵装置进行了三维湍流流动和水力性能研究, 分析评估不同方案内部流道的流场和水力性能。结果表明采用加装长隔板最优, 项目实施后经检验效果良好。

关键词: 双向进水流道; CFD优化; 数值模拟; 水力损失

中图分类号: TV85

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)03-0107-06

Reconstruction and Optimization of Inlet and Outlet Water Flow Channels of Pumping Stations Based on Numerical Simulation

PAN Yang

(Shanghai Minhang District Water Resources Management Affairs Center, Shanghai 201199, China)

Abstract: To improve the water quality of the Suzhou River and make up for the insufficient power of the related branch water flow, and combined with the Suzhou River Environmental Comprehensive Improvement Phase IV Project, 12 one-way pump gates in Minhang District are successively reconstructed into the two-way functions. There is a problem that the space scale of inflow into the original pumping station is restricted during the process. In order to achieve the optimal shape of the inflow channel of the pumping station, the hydraulic performance is good after supported with submersible pumps. The safe and stable operation of the pumping station after its completion is guaranteed, and the benefits are efficiently generated. It is necessary to reconstruct the inlet flow channel. Taking a pump gate along the Suzhou River as an example, four reconstruction schemes are proposed for the inlet flow channel, namely, setting up a diversion pier at the pump intakes, installing a short partition, installing a long partition, and setting up a diversion pier + installing a short partition. The three-dimensional turbulent flow and hydraulic performance of the two-way influent and effluent channel submersible pump devices are studied by using the CFD numerical simulation method. The flow fields and hydraulic performances of the internal flow channels under different schemes are analyzed and evaluated. The results show that installing long partitions is the best choice. The project after being implemented and tested has the good effects.

Keywords: two-way inflow channel; CFD optimization; numerical simulation; hydraulic loss

1 工程概况

该泵闸建于1983年, 原工程包括通航标准为60 t级的套闸一座, 内外闸首口门宽8 m, 闸室净宽12 m, 有效长度135 m。原采用2台56ZWB-100型水泵, 最大排涝流量11.2 m³/s。泵站为单向, 肘型进水, 开敞式出水。改造工程拟将泵站由原单向排涝功能改建为引排结合功能的双向泵站, 改造后的泵站选用潜

水泵, 进水为箱涵式双向进水流道, 出水为直管出水, 侧开式拍门断流(见图1)。

设计阶段, 为确保泵站进水流道型线最优, 在泵站建成后能安全可靠运行, 研究运用CFD软件对双向进出水流道潜水泵装置进行三维湍流流动和水力性能模拟, 分析不同方案流道内部的流场和水力性能, 确定最佳改造方式, 为项目设计方案的确定提供支撑。

2 泵站技改设计

为保证改造后的流道避免涡流现象, 防止水泵

收稿日期: 2025-10-03

作者简介: 潘洋(1973—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水利工程建设管理工作。

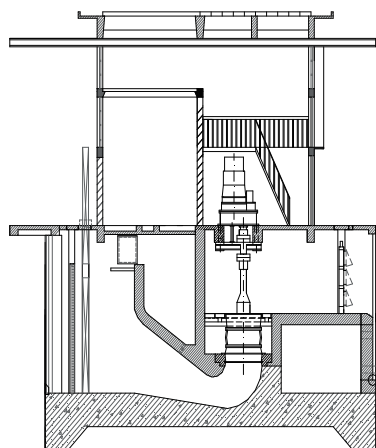


图1 泵站技改前站房纵剖面图

运行气蚀、振动等问题^[1-3],应用CFD技术对泵站进水流道进行三维紊流数值模拟,揭示其流动状况,从内部流态、流道水力性能、泵装置效率等方面进行综合评价,选择最优方案,以确定进水流道的型线和设计参数^[4-6]。参考泵站设计规范,综合考虑土建施工、水泵安装检修等,并结合类似项目工程实践经验^[7-8],拟定了4种进水流道改造技术方案:方案1为水泵吸水口设置导流墩;方案2为导流墩+进水流设置短隔板;方案3为进水流设置短隔板;方案4为仅设置长隔板。各改造方案分别如图2所示。

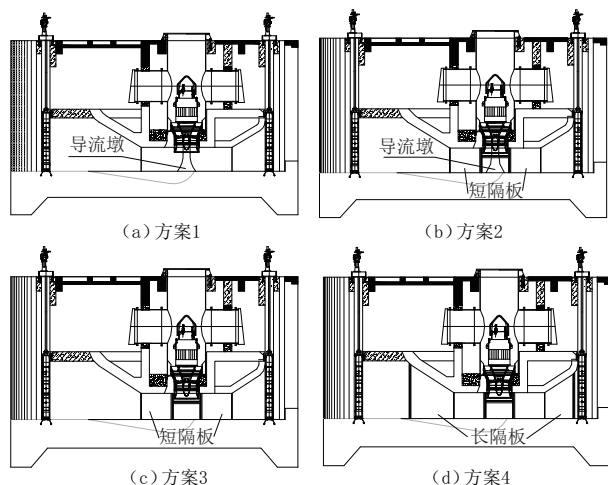


图2 泵站进水流道改造技术方案

3 双向进水流道三维紊流数值模拟

3.1 计算区域及三维建模

对进水流道内部流场进行分析,计算区域包括进水池、双向进水流道、导流墩或隔板、吸水喇叭口及出口延长段等。考虑排涝和引水两个工况,利用三维造型软件Creo 3.0为四种技术方案创建三维空间区域。双向进出水流道的结构相对简单,采用ICEM进行区域的网格剖分,各方案的网格单元数在

280万~300万,经过网格无关性检验,网格质量满足工程计算要求。

3.2 控制方程

开展进水流道数值模拟时,未纳入水泵装置的影响因素。本次模拟假定流道内流体为不可压缩牛顿流体,且流动状态维持定常。以 Boussinesq 涡团黏性假设为依据,将张量形式的雷诺时均 Navier-Stokes 方程与流体连续性方程设为控制方程,湍流模拟采用标准 $k-\varepsilon$ 模型。在数值模拟时,通过控制体积法实现控制方程的离散,扩散项采用中心差分格式,对流项选用二阶迎风格式,利用分离半隐式压力耦合 SIMPLEC (SIMPLE Consistent) 算法完成方程求解。

3.3 边界条件^[9-10]

(1)进口边界:计算区域的进口设定于进水池,在此处给定与进口面垂直的平均流速;进口湍动能与紊流耗散率通过下述公式进行计算:

$$k_{in} = 0.005u_{in}^2, \varepsilon_{in} = C_{\mu}k_{in}^{3/2}/L_{in} \quad (1)$$

式中: k_{in} 为进口处的湍流动能, m^2/s^2 ; u_{in} 为进口平均流速 m/s ; ε_{in} 为进口处的湍流耗散率, m^2/s^3 ; C_{μ} 为湍流经验系数,取 $C_{\mu} = 0.09$; L_{in} 为进口混合段长度, m 。

(2)出口边界:计算出口断面布置在水泵出口外侧延长 5 m 处,该断面的边界条件选用第二类。

(3)自由水面边界:当进、出水池断面的流速较低,且水面波动较小时,可将自由水面设定为对称边界面。

(4)固体壁面边界:设定壁面无滑移,近壁面区采用壁面函数;若假定距离壁面的距离为 y_p ,则 u_p , k_p , ε_p 的取值需依照公式(2)~(4)计算:

$$u_{\tau} = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (2)$$

$$y_p^+ = \frac{\rho u_{\tau} y_p}{\mu} \quad (3)$$

$$\frac{u_p}{u_{\tau}} = \frac{1}{k} \ln(Ey_p^+), k_p = \frac{u_{\tau}}{\sqrt{C_{\mu}}}, \varepsilon_p = \frac{u_{\tau}^3}{ky_p} \quad (4)$$

式中: u_{τ} 为壁面摩擦速度, m/s ; τ_w 为壁面剪切应力, N/m^2 ; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; y_p^+ 为壁面无量纲距离; y_p 为点 P 到壁面的实际距离, m ; μ 为流体动力黏度, $kg/(m \cdot s)$; u_p 为壁面附近点 P 处的流体速度(沿壁面切向), m/s ; k 为卡门常数; E 为壁面粗糙度常数; k_p 为壁面附近点 P 处的湍流动能, m^2/s^2 ; C_{μ} 为 $k-\varepsilon$ 模型中的经验系数,无量纲; ε_p 为壁面附近点 P 处的湍流耗散率, m^2/s^3 。

3.4 水力性能评价指标

进水流道的核心作用是将进水池内的水平稳、

顺畅地输送至水泵入口,为水泵吸水提供良好条件。评估其引流效果时,主要参考两大指标:一是水泵进口位置流速分布是否均匀,二是水泵进口速度矢量与进口断面的垂直程度^[11]。

为定量表达上述指标,引入两个水力优化目标函数:流速分布均匀度 V_u 和流速加权平均角度 $\bar{\theta}$,它们分别定义为^[12]:

$$V_u = \max \left[1 - \frac{1}{\bar{u}_a} \sqrt{\frac{\sum (u_{ai} - \bar{u}_a)^2}{m}} \right] \times 100\% \quad (5)$$

$$\bar{\theta} = \max \left\{ \frac{\sum u_{ai} \left[90^\circ - \arctan \left(\frac{u_{ti}}{u_{ai}} \right) \right]}{\sum u_{ai}} \right\} \quad (6)$$

表 1 水泵进口断面的流速分布均匀度 V_u 和流速加权平均角 $\bar{\theta}$

评价指标	流量 $Q/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	方案 1		方案 2		方案 3		方案 4	
		排涝	引水	排涝	引水	排涝	引水	排涝	引水
$V_u/\%$	3.0	87.34	86.86	85.24	86.95	86.50	86.75	86.83	86.58
	4.0	87.22	86.97	85.29	86.92	86.80	86.83	86.90	86.63
	5.0	87.26	87.00	85.35	87.09	86.88	86.89	86.97	86.80
$\bar{\theta}/(^{\circ})$	3.0	84.97	85.00	85.34	85.13	83.64	84.41	83.23	84.22
	4.0	84.84	85.20	85.45	85.03	84.23	84.22	83.44	83.96
	5.0	84.97	85.21	85.60	85.30	84.43	84.28	83.62	84.21

4 水泵装置数值模拟

4.1 计算区域及三维建模

泵装置数值模拟区域包括进水池、双向进水流道、水泵段、井筒、出水管和出水池。水泵采用 Turbogrid 造型和网格剖分^[13],其他部分是采用 Creo3.0 三维造型后,用 ICEM 网格剖分。在 CFX-Pre 中组装成整体水泵装置^[14]。

4.2 控制方程及边界条件

泵叶轮内部的流动属于三维非定常湍流,然而当水泵处于恒定转速的稳定运行状态时,叶轮中的流动在相对运动坐标系下可视为定常。因此水泵装置整体数值模拟的控制方程同前文 3.2 节,但在边界条件设置中增加动静交界面设置。在模拟设置中,吸水喇叭出口与叶轮进口的交界面、叶轮出口与导叶进口的交界面均采用通用连接,并选用冻结转子坐标系;导叶出口与出水井筒入口的交界面同样采用通用连接,其参考坐标系为静止坐标系。计算域中,水泵转轮区域被指定为旋转区域;叶轮轮毂和叶片相对于旋转区域固定,其余区域均为静止;除叶轮叶片与轮毂外,所有固体壁面均设置为静止无滑移壁面^[11]。

式中: V_u 为流速分布均匀度,无量纲; $\bar{u}_a$ 为区域平均速度, m/s ; u_{ai} 为第 i 个测点的轴向速度分量, m/s ; u_{ti} 为第 i 个测点的切向速度分量, m/s ; $\bar{\theta}$ 为流速加权平均角度, $^{\circ}$ 。

当 $V_u=100\%$ 且 $\bar{\theta}=90^{\circ}$ 时,目标函数取得最优值^[9]。

3.5 计算结果

采用 ANSYS CFX 计算软件对流量 Q 分别为 3.0、4.0、5.0 m^3/s 的 3 个工况进行数值模拟,进而揭示水泵装置内部流动特性。不同工况下的三维流动迹线、水泵进口断面流速分布均匀度 V_u 及流速加权平均角 $\bar{\theta}$ 等结果如表 1 和表 2 所示。

4.3 计算结果

利用 ANSYS CFX 软件,对流量 $Q=3.0、5.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 两种工况进行了数值模拟,以分析水泵装置内部的流动特性。不同方案对应的三维流动迹线、进口断面流速分布均匀度及流速加权平均角等结果如表 3 和表 4 所示。

5 进水流道水力损失

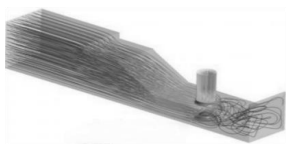
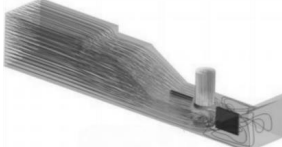
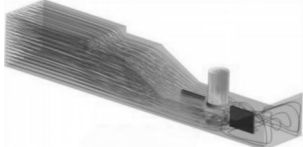
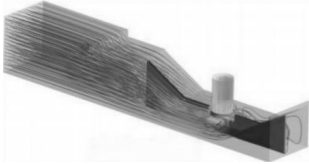
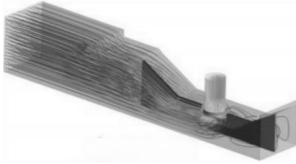
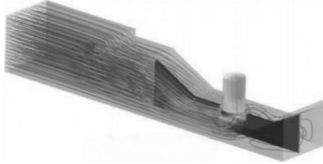
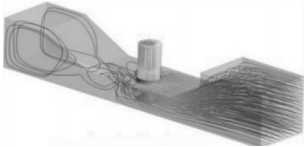
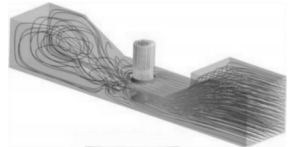
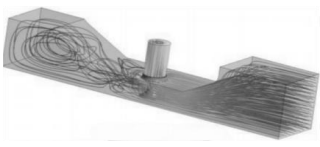
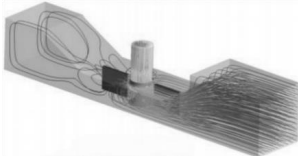
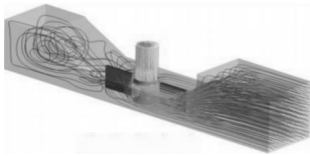
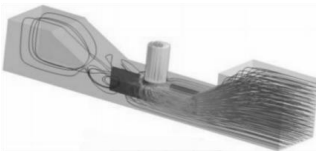
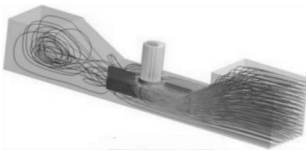
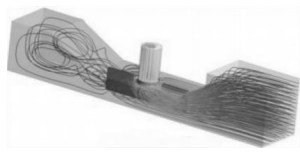
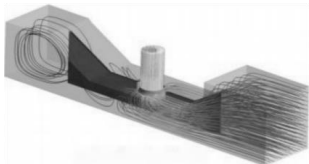
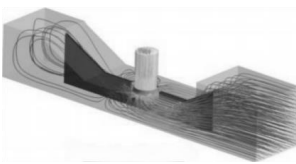
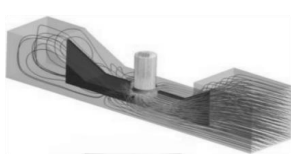
5.1 计算公式

采用质量流量加权平均法分别计算进水流道进口与出口断面的总能量,并依据公式(5)求得竖井进水流道的水力损失 Δh ^[15]。

$$\Delta h = \frac{\sum \left[\left(Z_{i2} + \frac{p_{i2}}{\rho g} + \frac{v_{i2}^2}{2g} \right) \cdot \rho v_{ai2} A_{i2} \right]}{\sum \rho v_{ai2} A_{i2}} - \frac{\sum \left[\left(Z_{i1} + \frac{p_{i1}}{\rho g} + \frac{v_{i1}^2}{2g} \right) \cdot \rho v_{ai1} A_{i1} \right]}{\sum \rho v_{ai1} A_{i1}} \quad (7)$$

式中: Δh 为水力损失, m ; Z_i 为第 i 股流的位置水头, m ; p_i 为第 i 股流的压强, Pa ; v_i 为第 i 股流的流速, m/s ; v_{ai} 为第 i 股流的轴向流速分量, m ; A_i 为第 i 股流的过流面积, m^2 。

表 2 双向流道内部流线

结果	$Q=3.0\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=4.0\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=5.0\text{ m}^3/\text{s}$
排涝工况			
			
			
			
引水工况			
			
			
			

5.2 计算结果

针对有泵装置和无泵装置,双向进水流道水力损失计算结果见表 5 和表 6。

6 结 论

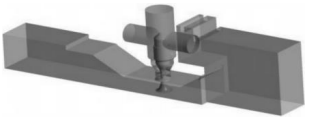
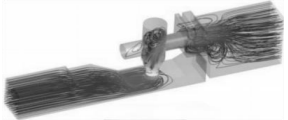
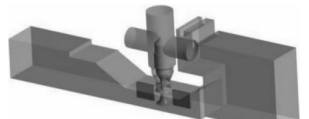
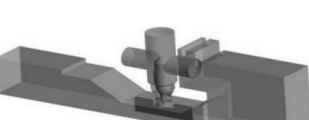
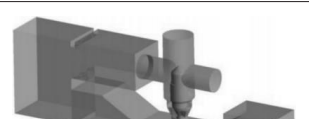
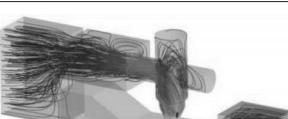
(1)计算结果表明:a.若仅设置导流墩(方案 1),双向流道死水区存在立面和平面涡旋,强度随流量

增大而增强。增设短隔板后(方案 2),喇叭口后壁处平面涡旋被隔断,但立面旋涡仍然存在;b.若仅加设短隔板(方案 3),可局部隔断大平面涡旋,但立面旋涡仍然存在;将隔板加长(方案 4),则可基本消除平面旋涡,死水区局部存在弱的立面旋涡;c.双向进水流道的水力损失随流量的增大而增大。综合比较可看出,仅加设隔板方案(方案 3 和方案 4)的水力

表 3 水泵进口断面的流速分布均匀度 V_u 和加权平均角 $\bar{\theta}$

评价指标	流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	方案 1		方案 2		方案 3		方案 4	
		排涝	引水	排涝	引水	排涝	引水	排涝	引水
$V_u/\%$	3.0	87.41	87.15	87.66	87.28	87.00	87.54	87.19	87.45
	5.0	87.73	87.46	87.27	87.76	87.76	87.83	87.82	87.84
$\bar{\theta}/(^{\circ})$	3.0	85.06	83.97	85.26	83.68	84.64	82.96	84.52	82.90
	5.0	85.52	85.56	85.91	85.76	84.79	84.60	84.50	84.50

表 4 泵装置内部流线

结果	计算区域	$Q=3.0 \text{ m}^3/\text{s}$		$Q=5.0 \text{ m}^3/\text{s}$
排涝工况	方案 1			
	方案 2			
	方案 3			
	方案 4			
引水工况	方案 1			
	方案 2			
	方案 3			
	方案 4			

损失较之设置导流墩方案(方案 1 和方案 2)明显小。
d. 加设隔板方案(方案 3 和方案 4)与设置导流墩方案(方案 1 和方案 2)的水泵入口速度均匀度接近,但在入流角方面,设置导流墩方案比加设隔板方案略高 $1.0^{\circ} \sim 1.5^{\circ}$ 。综上所述,方案 4 采用加装长隔板为最优方案。

表5 双向进水流道水力损失(无泵装置)

	流量 $Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	方案1		方案2		方案3		方案4	
		排涝	引水	排涝	引水	排涝	引水	排涝	引水
水力损失 $\Delta h/cm$	3.0	47.01	46.75	46.86	46.81	39.26	44.51	39.57	44.86
	4.0	84.05	82.38	83.69	83.59	70.24	80.00	70.74	80.94
	5.0	133.25	126.22	131.32	128.35	112.27	124.55	111.34	124.96

表6 双向进水流道水力损失(有泵装置)

	流量 $Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	方案1		方案2		方案3		方案4	
		排涝	引水	排涝	引水	排涝	引水	排涝	引水
水力损失 $\Delta h/cm$	3.0	43.21	46.58	43.31	46.29	35.97	39.9	36.15	39.97
	5.0	120.4	121.8	120.6	121	101.3	112.2	101.5	112.7

(2)运用CFD技术可有效模拟泵站双向进水流道内的水流运动,有助于分析泵装置内部流场与水力性能,并为改造工程的优化设计提供依据。后续实际建设后,流道加装长隔板保证了水泵双向运行平稳,无明显震动,无明显气蚀现象,尤其反向引水后在原先单一的防汛功能基础上叠加了参与活水畅流的调水服务,能够改善闵行地区淀北片部分区域的河道水质,达到消除劣Ⅴ类水的目标,可为类似工程优化设计提供一定的参考价值。

参考文献:

[1] 付强,袁寿其,朱荣生.大型给水泵站进、出水流道数值模拟及优化设计[J].中国给水排水,2012,28(1):48-51.
[2] 张李萍,彭常青,韦诚涛,等.大型泵站流道钢衬受力分析及优化设计[J].城市道桥与防洪,2024(10):170-173.
[3] 屈崑,李记超,蔡晋生.CFD数学模型的线性化方法及其应用[J].航空学报,2015,36(10):3218-3227.
[4] 熊永华,陈昆鹏,王少杰.某深邃泵房结构振动有限元数值分析[J].城市道桥与防洪,2021(9):209-211.
[5] 王东进,王玉心.平面S型轴伸贯流泵装置分析[J].水泵技术,2021

(5):7-12.
[6] 仲召伟,房伟,胡林生.大型泵站双向进水流道三维湍流数值分析[J].治淮,2023(12):25-27.
[7] 孙攀,李四海,韩鹏.泵站“S”型进、出水流道优化设计研究[J].水利水电技术(中英文),2022,53(3):84-90.
[8] 蒋涛,吕晓波,黄凯.沙集泵站水泵装置模型试验研究[J].水电站机电技术,2025,48(5):21-25.
[9] 何聪艺.CFD在排涝泵站进水流道设计中的应用[J].电力勘测设计,2020(12):42-45.
[10] 陈奕宇.竖井贯流泵装置宽高效区运行范围匹配设计研究[D].扬州:扬州大学,2025.
[11] 陈加琦,苏志敏,王梦成,等.竖井贯流泵装置水力特性的数模分析[J].中国农村水利水电,2018(7):152-157.
[12] 王玉心.轴流泵流道优化设计及其装置模型试验验证[J].水泵技术,2020(4):47-52.
[13] 仲召伟,房伟,胡林生,等.大型泵站双向进水流道三维湍流数值分析[J].治淮,2023(12):25-27.
[14] 李昂,沈伟,张宇坤.基于CFX-Pre的网格拼接技术研究[J].科技资讯,2018,16(22):82-86.
[15] 张驰,李彦军,蒋红樱,等.肘形进水流道水力优化仿真计算与试验[J].排灌机械工程学报,2016,34(10):860-866.

(上接第87页)

(5)混凝土浇筑后第46 h,S1截面左侧顶腹板芯部与外表层间出现最大温差,达23.6℃。施工现场环境对混凝土水化热温差有显著影响。

参考文献:

[1] 汪建群,方志,刘杰.大跨预应力混凝土箱梁水化热测试与分析[J].桥梁建设,2016,46(5):29-34.
[2] 方宇.大跨径箱梁混凝土的水化热温度监控分析及对策研究[J].湖南交通科技,2010,36(2):138-140;162.
[3] 刘芳平,周建庭,宋军,等.悬臂施工过程中箱梁水化热温度场研究[J].施工技术,2013,42(11):97-100.
[4] 汪建群,方志.大跨预应力混凝土箱梁桥施工期腹板开裂研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2012,39(5):1-7.
[5] 戴公连,岳喆.混凝土箱梁早期温度测试与分析[J].武汉大学学报(工学版),2019,52(2):139-144.
[6] 乔燕,孙传智,张卫华.预应力混凝土箱梁水化热温度测试和温度应力分析[J].中外公路,2009,29(5):142-146.
[7] 陈保国,丁锐,郑俊杰,等.预应力混凝土箱梁温度场及温度应力

现场测试研究[J].华中科技大学学报(城市科学版),2007(4):83-87.
[8] 李杰,王根会,张克华.厚壁混凝土箱梁施工过程中的温度应力分析研究[J].兰州交通大学学报,2006(3):33-36.
[9] 张文伟,杨植春,朱坤.某预应力混凝土箱梁桥水化热测试及分析[J].中外公路,2015,35(4):162-165.
[10] 陈肇元,崔京浩,朱金铨,等.钢筋混凝土裂缝机理与控制措施[J].工程力学,2006(增刊1):86-107.
[11] 陈黎阳.早龄期混凝土箱梁温度场分析[J].公路交通科技,2018(10):50-55.
[12] 王新联,徐爱敏.公路大吨位箱梁早期水化热温度场试验研究[J].公路,2022,67(8):206-211.
[13] 王小飞.PC箱梁水化热温度场试验研究[J].公路,2025(4):217-220.
[14] 蒋勇.长悬臂混凝土盖梁水化热监测与分析[J].城市道桥与防洪,2018(1):92-96;100.
[15] 杨建斌,方志,何俊荣,马智慧,江市特大桥箱梁混凝土水化热温度实测与分析[J].中南公路工程,2013(6):65-69.