

doi: 10.16104/j.issn.1673-1891.2023.04.013

# 基于传感器数据融合的高速公路框架桥顶进施工偏差控制

周海娟

(中铁十八局集团第五工程有限公司, 天津 300222)

**摘要:**与其他框架桥不同,高速公路框架桥在顶进施工中经常会产生偏差,为此提出一种基于传感器数据融合的高速公路框架桥顶进施工偏差控制方法。首先,利用框架桥结构的有限元模型,给出顶进施工的材料参数;其次,根据边墙土层的压力分布,确定框架桥顶进施工的土压力,结合顶进力的计算,分析了框架桥顶进施工过程的受力行为;再次,利用传感器监测框架桥顶进施工过程中的数据,根据传感器节点之间的兴趣关系度,构建框架桥顶进施工数据融合模型;最后,根据框架桥顶进施工偏差的产生机理,纠偏设备的施工数据,将其与实际顶进施工数据对比,实现框架桥顶进施工偏差的控制。实验结果表明:经过本文方法的控制之后,框架桥顶进施工偏差有所降低,并将控制精度提高到 90% 以上。

**关键词:**框架桥;偏差控制;顶进施工;高速公路;传感器数据融合;受力行为

中图分类号:U445.462 文献标志码:A 文章编号:1673-1891(2023)04-0076-06

## Deviation Control for Jacking Construction of Highway Frame Bridges Based on Sensor Data Fusion

ZHOU Haijuan

(Fifth Engineering Co., Ltd. of China Railway 18th Bureau Group, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** Unlike other frame bridges, highway frame bridges often produce deviations during jacking construction. Therefore, a deviation control method for highway frame bridge jacking construction based on sensor data fusion is proposed. Firstly, using the finite element model of the frame bridge structure, the material parameters for the top construction are given based on the pressure distribution of the soil layer on the side walls; secondly, the soil pressure for the top construction of the frame bridge is determined, and combined with the calculation of the top construction force, the stress behavior during the top construction process of the frame bridge is analyzed; then, using sensors to monitor the data during the construction process of the top of the frame bridge, a data fusion model for the top of the frame bridge construction is constructed based on the interest relationship between sensor nodes; finally, based on the mechanism of the deviation in the construction of the frame bridge top, the construction data of the correction equipment is compared with the actual top construction data to achieve the control of the deviation in the top construction of the frame bridge. The experimental results show that after the control of the method described in the article, the construction deviation of the top of the frame bridge is reduced, and the control accuracy is improved to over 90%.

**Keywords:** frame bridges; deviation control; jacking construction; highways; sensor data fusion; force-bearing behavior

### 0 引言

高速公路框架桥作为公路交通中承载车辆载荷的重要结构<sup>[1]</sup>,其特点包括横跨大距离、承受巨大荷载、对运营安全要求高等<sup>[2]</sup>。在施工过程中,特别是顶进施工中,由于施工材料的变化以及非均匀压力的作用,容易产生桥梁结构的偏差问题<sup>[3]</sup>。因此,

有效地对高速公路框架桥顶进施工应力与变形进行控制,是高速公路增建中的一个重要环节。

目前,已经有学者对框架桥的顶进施工偏差进行了一定程度的研究。陈卓等<sup>[4]</sup>通过将灰色预测理论和传统 GM(1,1) 预测模型进行优化,建立了一种非齐次一阶指数灰色模型(NCBC-GM(1,1)),用于预测隧道围岩变形的发展趋势。但该方法仅利用

收稿日期:2023-07-28

作者简介:周海娟(1988—),女,山东临沂人,助理工程师,本科,主要研究方向:道路工程、工程施工管理、工程技术、结构工程,e-mail: zifen4305357@163.com。

隧道围岩变形实测值作为原始数据进行预测,未充分利用其他相关信息,影响结果准确性。肖宏笛等<sup>[5]</sup>通过施加一对顶力来抵消塔墩纵向偏位产生的不利影响,以消除混凝土收缩徐变及温差效应对大跨径预应力混凝土矮塔斜拉桥的负面影响。但该方法采集到的数据准确性较低,且只分析了混凝土收缩徐变及温差效应因素,限制了偏差的全面性和有效性。

为了解决上述问题,本文采用传感器数据融合的方法控制高速公路框架桥顶进施工偏差。通过采用传感器数据融合技术,将多个传感器节点之间的兴趣关系度考虑在内,提高数据的准确性和可靠性。在建立桥梁的有限元模型的基础上,给出顶进施工的材料参数,并分析了框架桥顶进施工过程的受力行为,更全面地了解桥梁的受力情况,从而有针对性地控制施工偏差。通过对实际施工数据与纠偏设备数据的比较,进行偏差控制,提高了施工质量和效果。

## 1 高速公路框架桥顶进施工偏差控制方法设计

### 1.1 分析框架桥顶进施工过程的受力行为

利用通用的空间有限元分析软件 Midas Civil 对框架桥顶进施工进行数值模拟,首先构建桥梁的有限元模型,以底板、边墙为中心,建立框架桥的研究核心点,利用空间厚板单元建立桥梁的底板和边墙单元<sup>[6]</sup>,不考虑边洞顶板和底板的夹层,建立桥梁的整体结构。使用自动网格方法,对有限元模型的单元尺寸进行细化,选中的板单元尺寸为 0.5 m×0.5 m,为了对刃角网络进行精细化划分,将网格划分为“正方形+三角形”等类型<sup>[7]</sup>,构建细化后的有限元模型,其节点数目为 1 169 个,单元格数目为 14 529 个,框架桥结构的有限元模型如图 1 所示。

在对框架桥进行有限元分析过程中,最重要的

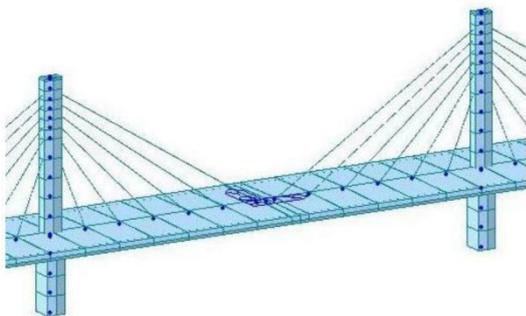


图1 框架桥结构的有限元模型

就是选取合适的计算参数。根据设计图纸、现场勘察及土工测试结果<sup>[8]</sup>,对高速公路框架桥的材料参数、土压力及顶进力进行了研究,得出了以下结论。

1)对于高速公路框架桥顶进的主体结构,主要由混凝土材料构成,弹性模量为  $3.25 \times 10^3$  MPa,泊松系数为 0.2。

2)框架桥的边墙外部受到的土体侧压力,根据库仑(cullen)主动土压力原理进行了分析<sup>[9]</sup>,在此基础上,填充物的容重为 24 kN/m<sup>3</sup>,土的内摩擦角为 18°,所得到的边墙上的最大土压力为 44.8 kN/m<sup>2</sup>,土压力的总合力为 196.4 kN,合理的受力点距离边墙底部为 3.17 m,边墙土侧压力分布图如图 2 所示。

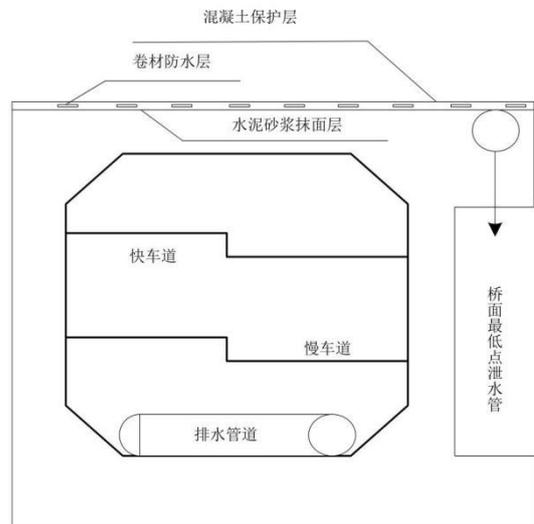


图2 边墙土侧压力分布图

3)在框架桥顶进作业中,必须承受主梁与土壤的摩擦以及末端刀刃角度的摩擦,按照《城镇地道桥顶进施工及验收规程》<sup>[10]</sup>中有关的有关要求,可以通过式(1)来确定高速公路框架桥顶进的最大推力  $F_{\max}$ :

$$F_{\max} = \frac{\phi(f_1 \times R_1)}{f_2(R_1 + R_2)} + \frac{2F_E \times f_3}{F_z \times S} \quad (1)$$

式中: $\phi$ 表示顶进施工的安全系数; $f_1$ 表示顶进摩擦角; $R_1$ 表示顶进的最大受应力; $f_2$ 表示框架桥与底部土壤的摩擦力; $R_2$ 表示框架桥自身的质量; $F_E$ 表示框架桥的土体压力; $f_3$ 表示土体底部的最大承受力; $F_z$ 表示顶进施工的正向阻力; $S$ 表示框架桥顶进面积。

根据高速公路框架桥的材料参数、土压力及顶进力,分析了框架桥顶进施工过程的受力行为。

### 1.2 构建框架桥顶进施工数据融合模型

在框架桥顶进施工过程中,采用传感器对框架桥的顶进过程进行实时监控,以提高顶进过程的准确性,并将传感器节点  $x$  采集到  $T$  时间区域内,对施工数据进行归一化处理<sup>[11]</sup>,构建传感器的支持度函数  $p_r$ ,如式(2)所示:

$$p_r = \exp \left\{ - \left( 1 - \frac{y'(t)}{y_r(t)} \right) \right\} \quad (2)$$

式中: $y_r(t)$ 表示节点  $i$  的数据采集信息; $y'(t)$ 表示第  $n$  个传感器节点的数据采集均值。

经过式(2)的处理求解,使获得的结果更为适中。假设  $k_i$  表示节点  $i$  与节点  $y_i$  之间的距离, $k_j$  表示节点  $i$  与节点  $y_j$  之间的距离,则节点之间的兴趣关系度如式(3)所示:

$$G \left( \frac{d \in k_i \cap k_j}{G \in k'_i \cap k'_j} \right) = \frac{y_i + y_j}{y'_i + y'_j} \quad (3)$$

式中: $k'_i$ 表示节点  $y_i$  与融合节点  $y'_i$  之间的距离相关度值; $k'_j$ 表示表示节点  $y_j$  与融合节点  $y'_j$  之间的距离相关度值; $d$ 表示距离系数; $G$ 表示距离相关度系数。

结合节点间兴趣相关度的特点,在数据融合的过程中,利用式(4)构建框架桥顶进施工数据融合模型  $Q(t)$ :

$$Q(t) = \frac{Y(t) + \beta_i(t)}{G \left( \frac{d \in k_i \cap k_j}{G \in k'_i \cap k'_j} \right)} \quad (4)$$

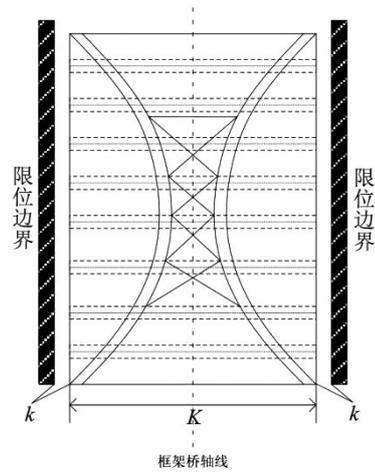
式中: $Y(t)$ 表示第  $t$  次测量传感器得到的数据; $\beta_i(t)$ 表示传感器数据融合过程中的噪声。

通过将传感器安装在框架桥中,监测框架桥顶进施工过程中的数据,根据传感器节点之间的兴趣关系度,构建框架桥顶进施工数据融合模型。

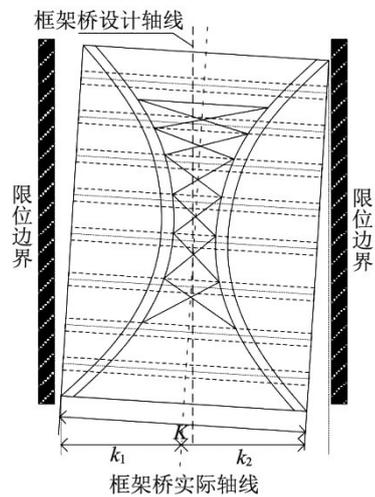
### 1.3 控制框架桥顶进施工偏差

当框架桥顶进施工的过程中,由于侧向位移过大,将导致支座上的反力发生很大的改变。当结构的局部应力较大时,其反力的改变可能导致结构的不稳定或破坏,还会造成某些支座出现脱空现象,使其不能顺利进行顶进施工,造成整体推力不够,滑动困难<sup>[12]</sup>。通过控制框架桥顶进施工偏差,可以避开这些问题,但是由于其倾斜角较大,可能导致桥体被限制在限位装置中间,从而影响了后续顶推工作。图3给出了框架桥轴线示意图。

假设该框架桥的整个宽度是  $K$ ,该主梁的外部极限边界到该结构之间的竖直距离是  $k$ (图3(a)),在顶进过程中,当结构整体出现如图3(b)中所示的桥梁轴线横向偏位的情况时,结构外侧边缘与限位



(a)不存在偏差的轴线示意图



(b)存在偏差的示意图

图3 框架桥轴线示意图

边界产生了碰撞,产生了极大的摩擦力,这将使得整个顶进过程不能进行下去,如果强行顶进,还会对梁体造成损伤<sup>[13]</sup>。因此,若要确保梁体顶推工作能够顺利进行,则在图形中的几何参数必须要符合  $k_1 + k_2 < K + 2$  这一约束。

由于每次框架桥推进都会产生一定程度的误差,因此需要通过连续观察2次推进的同步以及整个推进系统的轴向偏移,从而达到提升框架桥顶进的精度及安全性的目的。

在索引梁端部、系梁节段的跨距和系梁尾部的3个截面上,分别设置了3个位置的观测点,分别位于框架桥的桥梁轴线两端,如图4所示。

在框架桥正式顶进之前,将各观测点的三向坐标作为初值,在顶进过程中,以每30 min观测一次的频率对各测点三向坐标进行量测,那么在每一轮监测完成之后,根据此次观测值相对于初值和上次

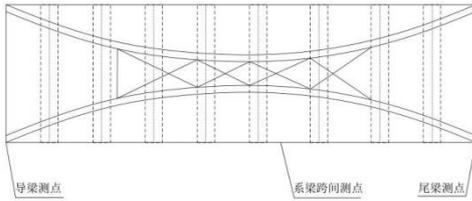


图4 传感器监测点示意图

观测值的变化量来得到测点的行程及偏位数据<sup>[14]</sup>。

在获得了施工偏移数据之后,将所有纠偏装置设置在框架桥上,使用传感器收集了该装置的施工信息,并将其与真实的施工信息进行比较,得到了该装置的偏移量,从而实现高速公路框架桥顶进施工过程中的偏差的控制,纠偏装置的工作原理如图5所示。

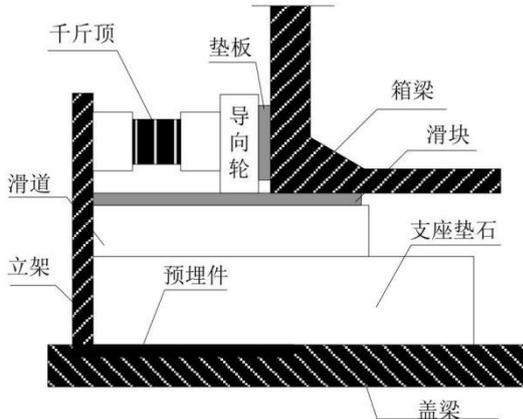


图5 纠偏装置的偏差控制原理

该纠偏装置由导向轮、千斤顶、钢板立架等部件构成,当偏差较小时,只需调节插入聚四氟乙烯片的厚度即可纠正偏差,使梁体在导向钢框架的限制下向前移动,在这种状态下,其实是一种被动式导向。在梁体横向位移比较大的情况下,对梁体进行了侧向施力处理,从而进行了纠正<sup>[15]</sup>。在框架桥顶进过程中,设有2套纠偏装置,并随顶进作业的推进而轮流向前移动,从而实现对桥梁结构的有效控制。由于其本身的结构比较复杂,因此,该系统更适用于大跨度和大重量的高难度项目。但是,在高速公路框架桥顶进施工中,可以大大地简化这个问题,可以使用一个水平放置的小千斤顶来进行侧向施力,同时,还可以利用当地的原材料,在地面上建立起一个千斤顶的反力架。

综上所述,根据框架桥顶进施工偏差的产生机理,利用传感器采集纠偏设备的施工数据,通过与实际顶进施工数据的对比,采用纠偏装置的偏差控制原理,实现框架桥顶进施工偏差的控制。

## 2 验证实验及结果分析

### 2.1 安装传感器

为了验证文中方法在框架桥顶进施工偏差控制中的效果,需要先将传感器布置在框架桥中,以便数据采集的实时性,从而提高顶进施工偏差控制精度。将传感器安装在系梁内部的顶底板和拱肋处,避免传感器受到恶劣环境影响而损坏,提高框架桥顶进施工数据的监测稳定性,传感器安装步骤如下。

第1步:根据框架桥中的预设位置,进入到箱梁内部,做好标记。

第2步:为了使传感器与框架桥有效固定,通过焊接的方式将传感器底座固定在框架桥中,焊接示意图如图6所示。

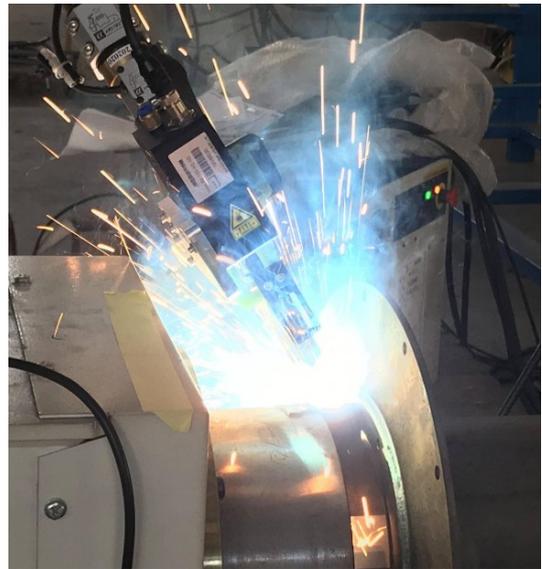


图6 传感器焊接示意图

第3步:均匀安装传感器,牵引顶进施工测量导线。

### 2.2 布置监测点

根据传感器所在位置,布置监测点S01~S10,如图7所示。

根据图7中各个监测点的布置情况,采集顶进

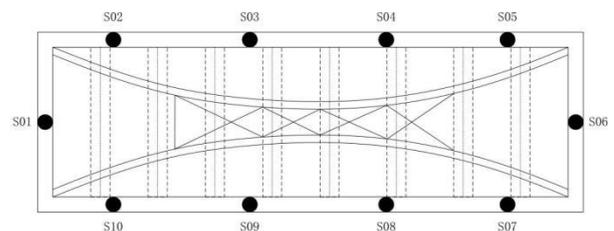


图7 监测点布置

施工的偏差数据,为施工偏差控制提供依据。

### 2.3 数据采集

将同一顶进起始施工的测试值作为初始施工数据,顶进施工中,根据传感器的响应情况,采集顶进施工偏差数据,包括应力偏差和变形量偏差,具体如表 1 所示。

表 1 顶进施工偏差数据

监测点	应力值/MPa		变形量/mm	
	标准值	监测值	标准值	监测值
S01	30	28.3	0.05	0.23
S02	28	26.4	0.08	0.36
S03	28	26.7	0.08	0.27
S04	28	26.9	0.08	0.32
S05	28	27.1	0.08	0.35
S06	30	28.8	0.05	0.22
S07	28	27.2	0.08	0.29
S08	28	26.9	0.08	0.34
S09	28	26.3	0.08	0.33
S10	28	26.6	0.08	0.34

表 1 中,高速公路框架桥顶进施工过程中,应力值的偏差均>0.5 MPa,变形量偏差>0.05 mm,无法满足框架桥顶进施工的稳定性要求,需要对顶进施工产生的偏差进行控制。

### 2.4 施工偏差控制测试

利用文中方法对表 1 中的偏差数据进行控制,得到如图 8 所示的结果。

由图 8 可知,经过文中方法的控制之后,框架桥顶进施工的应力值偏差和变形量偏差分别可以控制在 0.5 MPa 和 0.05 mm 以内,通过减小施工偏差提

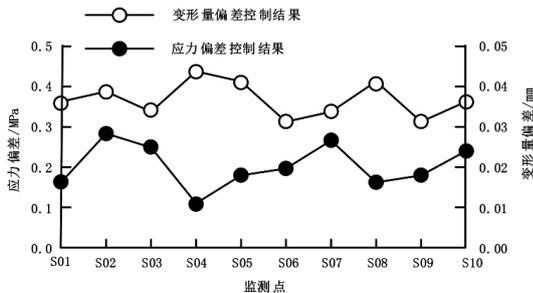


图 8 施工偏差控制结果

高顶进施工的稳定性。

### 2.5 对比分析

为了避免实验结果的单一性,引入基于可靠度理论的控制方法和基于 Sirovision 的控制方法作对比,在不同监测点,测试了框架桥顶进施工偏差控制精度,结果如图 9 所示。

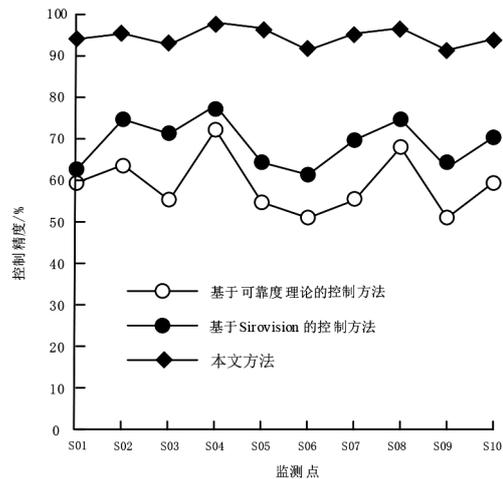


图 9 框架桥顶进施工偏差控制精度

从图 9 可以看出,采用基于可靠度理论的控制方法时,框架桥顶进施工偏差控制精度为 50%~75%,说明该方法对框架桥顶进施工偏差进行控制的时候,仅考虑到了可靠度指标,缺失施工安全方面的考虑,导致控制精度偏低。采用基于 Sirovision 的控制方法时,虽然施工偏差控制精度有所提高,但是仍然低于 80%。采用文中方法时,由于在框架桥上安装了传感器,能够实时采集施工过程中的各项数据,通过传感器数据的融合,将施工偏差控制精度提高到 90% 以上。

### 3 结束语

本文提出一种基于传感器数据融合的高速公路框架桥顶进施工偏差控制方法,经过实验测试发现,该方法能够控制顶进施工产生的偏差,并提高控制的精度,本文的研究虽然取得一定成果,但是还存在很多不足,如只研究了应力值和变形量 2 个施工数据的偏差,在今后的研究中,将对拱肋倾斜角度、跨径等施工数据偏差进行控制,提高框架桥的稳定性。

### 参考文献:

[1] 周广友,鲁立,龚虎,等.浅覆土下穿高速公路框架桥顶进施工技术[J].中外公路,2020,40(6):79-83.

- [2] 陈联盟,姜智超,高伟冯,等.基于可靠度理论的索杆预张力结构支座节点施工误差分析[J].空间结构,2020,26(1):3-9.
- [3] 马学辉,赵洪印,彭洋.下穿8股既有铁路大型框架桥顶拉施工技术[J].施工技术,2021,50(12):49-52.
- [4] 陈卓,张宏光,何俊,等.改进灰色理论模型在隧道施工控制中的应用[J].公路工程,2022,47(6):95-101,129.
- [5] 肖宏笛,史晓贞,黄精,等.大跨径预应力混凝土部分斜拉桥合龙对顶施工控制研究[J].建筑技术,2023,54(4):474-476.
- [6] 杜昊,陈武林,贺炜.基于有限元的框架桥顶进施工反力桩桩后地基加固效应研究[J].中外公路,2021,41(3):126-129.
- [7] 李洁勇.基于非线性规划的短线预制梁段误差优化[J].施工技术,2020,49(11):60-63.
- [8] 谢开仲,陆伊宁,梁亦登.双向外倾式拱塔斜拉桥施工方法优化设计研究[J].铁道标准设计,2022,66(3):99-104.
- [9] 朱强,艾华,张美玲.某宽幅矮塔斜拉桥Y形桥塔施工方案优化[J].世界桥梁,2023,51(2):47-52.
- [10] 中华人民共和国建设部.城镇地道桥顶进施工及验收规程:CJJ/T 74—2020[S].北京:中国建筑工业出版社,2020.
- [11] 褚卫松,魏周春.高速铁路大跨桥无砟轨道不平顺管理波长及施工误差研究[J].铁道标准设计,2020,64(6):37-41.
- [12] 孔令曦,程涛,苏春轩,等.基于滤波型线性自抗扰预估的倾斜镜控制方法[J].中国激光,2023,50(13):1-17.
- [13] 周广友,李聪,胡勇,等.箱涵顶进施工过程中路面沉降的数值模拟分析[J].公路工程,2020,45(3):29-37.
- [14] 王哲,朱忠义,王玮,等.国家速滑馆施工误差对索结构预应力偏差的影响研究[J].建筑结构,2021,51(19):111-115.
- [15] 何君佐,廖少明,陈立生,等.软土地层管幕群顶进的相互作用及闭合姿态的实测分析[J].岩土工程学报,2020,42(2):279-288.