

多拱面系杆拱桥顶推施工监控技术研究

姚川超, 杨善军

中交二航局第三工程有限公司, 江苏 镇江

收稿日期: 2026年1月10日; 录用日期: 2026年2月2日; 发布日期: 2026年2月13日

摘要

多拱面系杆拱桥是为适应我国交通流量不断增大而衍生出来的一种新型复杂桥梁结构, 实施全过程施工监控对于确保结构安全性与施工精度具有不可或缺的关键作用。本文以宜丰县工业园至火车站公路新建工程项目的跨武吉高速立交桥主跨三拱面钢箱系杆拱桥为背景, 对多拱面系杆拱桥跨高速公路整体顶推过程的施工监控技术开展研究。采用Midas/Civil有限元软件对拱桥整体顶推施工全过程进行精细化模拟计算, 基于计算分析结果提出相应施工监控方案, 同时在顶推施工过程对拱桥各工况结构状态进行实时监测, 对实测数据与理论数据之间的误差进行实时分析, 不断调整修正实际施工过程, 保障了拱桥在顶推施工全过程中关键构件的受力及变形均在规范允许范围之内, 顺利完成顶推施工。

关键词

多拱面系杆拱桥, 施工监控, 步履式顶推, Midas/Civil软件

Construction Monitoring Technology for Incremental Launching of Multi-Rib Tied-Arch Bridges

Chuanchao Yao, Shanjun Yang

Third Construction Company, CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Zhenjiang Jiangsu

Received: January 10, 2026; accepted: February 2, 2026; published: February 13, 2026

Abstract

The multi-rib tied-arch bridge is a novel and complex bridge structure developed to accommodate the continuously increasing traffic flow in China. Implementing full-process construction monitoring plays an indispensable and critical role in ensuring structural safety and construction accuracy. This paper takes the main span—a three-arch steel box tied-arch bridge of the overpass crossing

the Wuji Expressway in the Yifeng County Industrial Park to Railway Station Highway New Construction Project—as the engineering background. It focuses on the construction monitoring technology for the integral incremental launching process of a multi-rib tied-arch bridge across an expressway. By employing the finite element software Midas/Civil, refined simulation and calculation of the entire incremental launching construction process of the arch bridge were conducted. Based on the computational analysis results, a corresponding construction monitoring plan was proposed. Meanwhile, real-time monitoring of the structural states under various working conditions was carried out during the incremental launching process. The discrepancies between the measured data and theoretical data were analyzed in real-time, allowing for continuous adjustment and correction of the actual construction process. This ensured that the internal forces and deformations of key components remained within the allowable limits specified by the relevant codes throughout the entire incremental launching, leading to the successful completion of the launching construction.

Keywords

Multi-Rib Tied-Arch Bridge, Construction Monitoring, Incremental Launching, Midas/Civil Software

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国科学技术的不断发展, 桥梁施工工艺也在不断优化和改进。桥梁顶推施工工艺因其不影响桥下交通等优点, 被广泛应用于跨越高速公路等不中断交通的桥梁工程中[1]-[5]。多拱面系杆拱桥则是我国交通需求不断增大而衍生出来的新型复杂桥梁结构, 对于多拱面系杆拱桥独特的受力形式, 当采用顶推法施工时, 拱肋、纵梁和横梁的应力与线形均会随着顶推的进行产生相应变化, 影响结构安全状态。

因此, 需要在多拱面系杆拱桥的顶推施工过程中引入施工监控技术, 对桥梁结构的整个顶推施工过程全程进行监控, 实时监测顶推过程中多拱面系杆拱桥中拱肋、纵梁和横梁的应力和变形, 不仅可以避免出现局部应力过大导致结构断裂或屈曲的情况发生, 还可以控制结构变形处在安全范围内, 防止出现失稳现象。

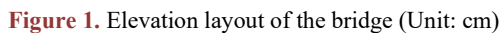
本文以宜丰公路项目跨径 60 m 的三拱肋下承式钢箱系杆拱桥为例, 通过 Midas/Civil 有限元软件模拟桥梁顶推施工过程, 分析桥梁各构件受力及变形, 确定最危险工况, 对多拱面系杆拱桥顶推施工监控技术进行研究。

2. 工程概况

跨武吉高速立交桥主跨跨径为 60 m 的多拱面下承式钢箱系杆拱桥, 桥宽 29 m, 桥面整体布置双向四车道。拱轴线采用抛物线, 矢跨比: 1/3.64, 预拱度按二次抛物线设置。中(边)拱肋拱轴线的抛物线方程为 $y = -0.018331622x^2 + 1.099949x$, 其中 y 为竖向高程, x 为横向坐标。结合现场条件及武吉高速的保通需求, 该桥施工方案采用顶推法, 拱肋、纵梁、横梁先在小桩号路基上进行安装完成, 整体顶推过武吉高速[2]。全桥包括拱肋、纵(横梁)、风撑等均采用钢结构, 如图 1 及图 2 所示。

3. 顶推施工监控计算

为了准确实施施工监控工作, 对多拱面系杆拱桥顶推施工进行前期结构分析, 通过 Midas/Civil 软件



Technical drawing of a bridge cross-section. The drawing shows a three-span bridge with a central pier and two side piers. The total width of the bridge deck is 1375 units. The central span is 1375 units wide, and the side spans are 1375 units wide. The bridge has a total height of 1650 units. The bridge deck is supported by three piers, each with a width of 150 units. The bridge deck is composed of 30cm steel-concrete composite bridge deck and 10cm asphalt concrete paving. The bridge deck has a 2.0% slope. The bridge deck is supported by three piers, each with a width of 150 units. The bridge deck is composed of 30cm steel-concrete composite bridge deck and 10cm asphalt concrete paving. The bridge deck has a 2.0% slope. The bridge deck is supported by three piers, each with a width of 150 units. The bridge deck is composed of 30cm steel-concrete composite bridge deck and 10cm asphalt concrete paving. The bridge deck has a 2.0% slope.

Figure 2. Cross-sectional layout of the bridge (Unit: cm)

DOI: 10.12677/hjce.2026.152033

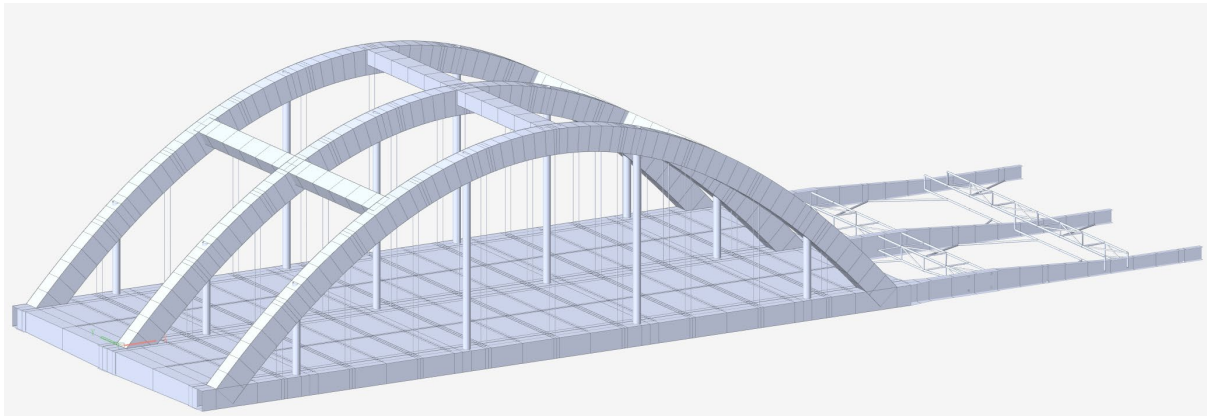


Figure 3. Finite element model
图 3. 有限元模型

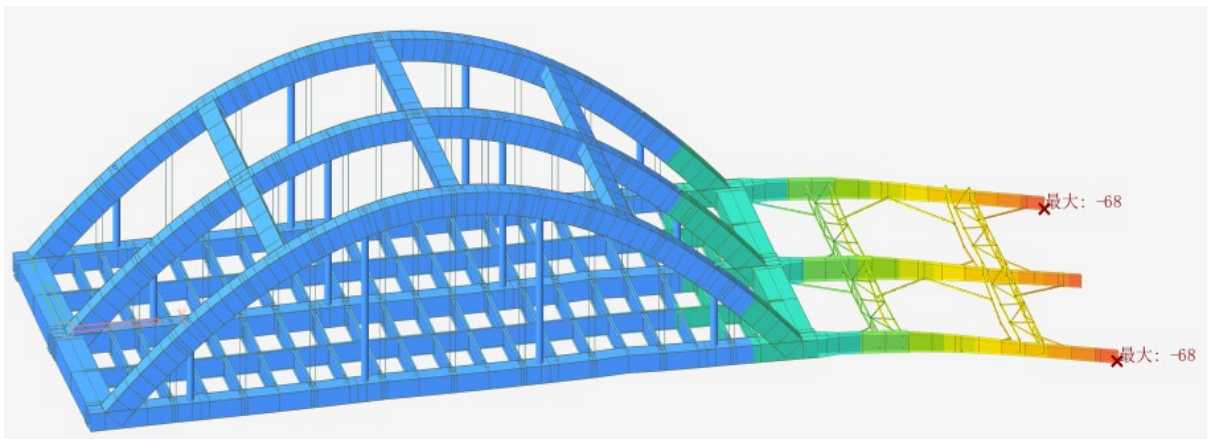


Figure 4. Deformation diagram of the main bridge under the most critical condition during incremental launching construction
图 4. 主桥顶推施工过程最危险工况变形图

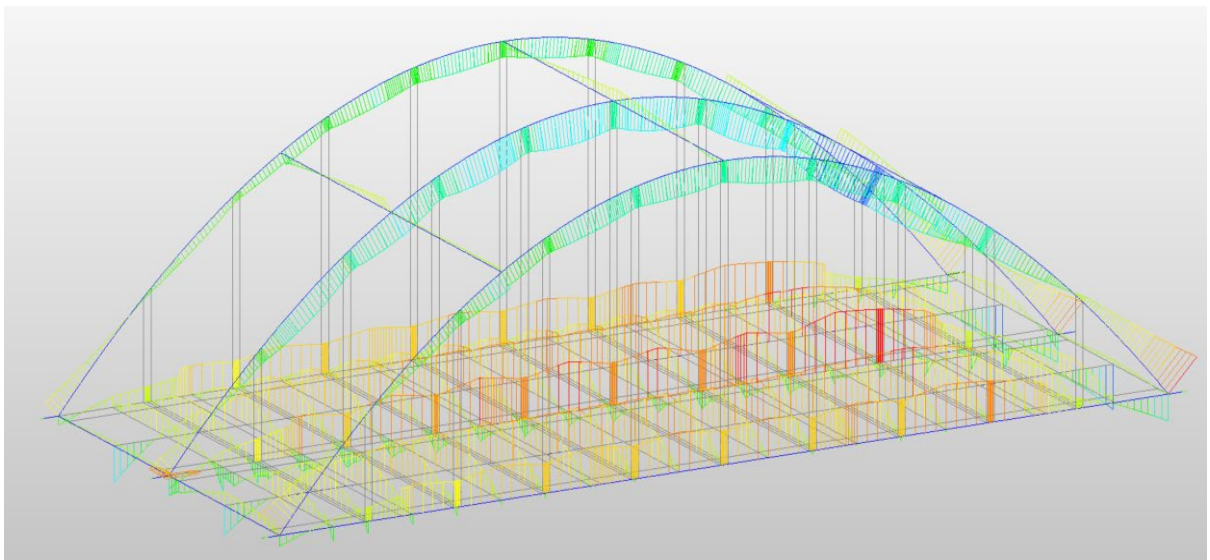


Figure 5. Stress diagram of the bridge structure
图 5. 桥梁结构应力图

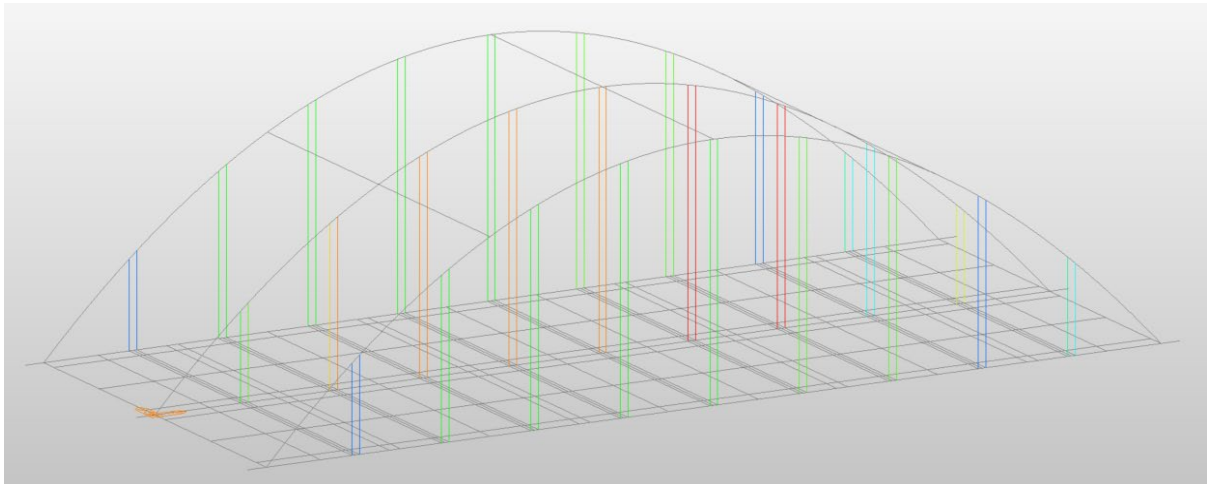


Figure 6. Cable force diagram of hangers in the completed bridge state
图 6. 吊杆成桥索力图

4. 顶推施工监控实施

4.1. 应力监控

结构各部位应力是最能反应结构状态正常与否的标准之一，通过实时地监测桥梁结构关键部位应力变化，将实测值与理论值进行比对，不仅可以对整桥的结构状态有个清晰的认知，还可以检验前期结构分析的准确性。

跨武吉高速立交桥拱肋、纵(横)梁、风撑等均为钢结构，拱肋、纵梁、横梁的应力监测选用表面型智能弦式应变计，通过焊接的方式固定在要监测部位钢结构的表面上，如图 7 所示。

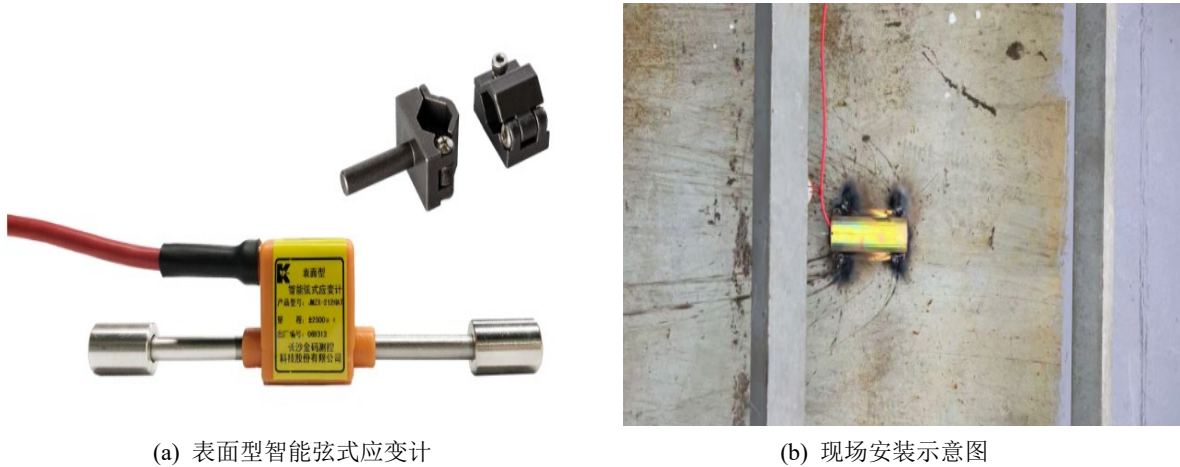


Figure 7. Stress monitoring equipment and installation
图 7. 应力监测设备及安装

跨武吉高速立交桥为多拱面系杆拱桥，每一片拱肋的应力监测都至关重要，考虑拱肋整体的受力特殊性，选取每片拱肋的两处拱脚和拱顶等 3 个断面作为拱肋的应力监测断面。同时选取每个系梁的两端和跨中等 3 个位置作为应力监测断面。在拱肋和系梁应力监测断面的上下游各布置一个应力测点，方向为桥纵向。

跨武吉高速立交桥拱桥的横梁分为两种形式,一种是箱型截面的端横梁,另一种为工字型截面的普通横梁。对于本项目的横梁应力监测,选取跨中最长吊杆间的三根普通钢横梁进行监测,在每根钢横梁的跨中位置布设一个监测断面,共计3个监测断面。由于普通横梁截面为工字型,故每个监测断面应变计布设的位置为工字钢的上缘和下缘,方向为横桥向。

为了实时监测顶推过程中各控制断面的应力情况,及时对危险状态进行预警,本项目采用自动化采集和传输系统进行应力监控,如图8所示,将应力的采集间隔设置为五分钟,可以自动存储应力数据,可以在移动端或PC端查看,并且还有温度采集通道接口,可以实现温度的收集,这样不仅节省了人力物力,更主要的是可以及时发现结构应力正常与否,更直观地看到各部位的安全状态。

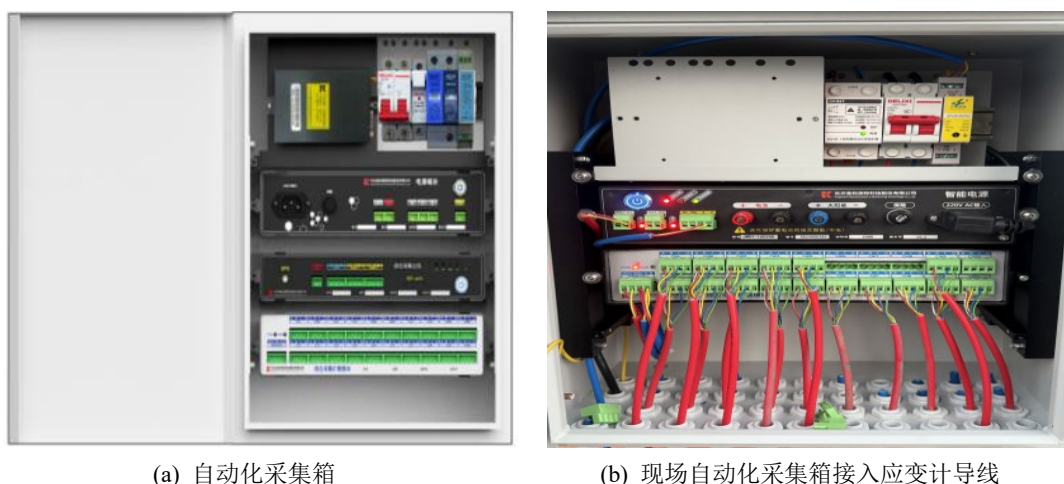


Figure 8. Automated acquisition and transmission system for stress monitoring

图8. 应力监测自动化采集和传输系统

4.2. 梁拱线形监控

拱肋和系梁的线形是否达到设计要求至关重要,不仅会影响整桥的线形,还会影响全桥的内力,准确的线形能够保障整个系杆拱桥的安全稳定。因此,要对拱肋和系梁的拼装线形,进行严密监测,为后续监控工作奠定坚实的基础。

拱桥的三片拱肋均布置线形测点,每片拱肋均在拱脚、四分点、拱顶等位置布设5个线形监测断面,每个断面布设1个监测点。每根系梁沿着纵桥向分别布设9个监测断面,分别位于每对吊杆的中间位置,且每个断面布置1个监测点位。

线形监测设备选用徕卡全站仪进行精密监测,在测量位置张贴反光贴和架设棱镜,分别观测并相互校对。

4.3. 轴向偏位监控

当桥梁采用顶推施工时,轴向偏位是监测顶推路径是否沿着设计路径前进的重要衡量指标,实时监测桥梁结构的轴向偏位,可以准确把握桥梁的顶推状态,防止出现整体失稳的现象,确保了结构整体受力安全和线形变化稳定,保障了顶推施工的正常进行[6][7]。

轴向偏位监测测点布置在系梁的首末两端及跨中和拱肋拱顶,监测方法同线形监控。

当顶推施工过程中主桥轴向偏位过大,超出合理范围之内后立即进行纠偏,确保主桥轴向位置的准确和顺利落梁。

4.4. 导梁挠度监控

导梁是桥梁顶推过程中的重要构件, 它不仅可以起到引导作用, 帮助桥梁沿着顶推既定路线前进, 更好跨越临时墩, 还可以承担和分散荷载, 减少桥梁顶推时悬臂端内力和挠度, 导梁挠度的变化是反映导梁稳定性的一个重要体现, 因此, 在顶推过程中要对导梁挠度进行严密监测。

导梁挠度测点布置在每片导梁最前端, 张贴反光贴, 采用全站仪进行测量。

4.5. 临时墩沉降监控

临时墩是为了桥梁顶推而搭建的临时辅助结构, 由于其性质, 它的稳定性远远不如永久墩, 但在顶推过程中, 临时墩有着不可或缺的作用, 不仅可以减少主梁的跨径, 减小悬臂长度从而降低结构内力, 还可以控制导梁和主梁的变形, 提高顶推施工过程的安全性, 因此, 要密切关注临时墩状态。

在桥梁顶推施工过程中对武吉高速两侧的 L5 和 L6 两组临时墩进行监测, 每组临时墩是由三个临时支架组成, 共计六个临时支架, 对每个支架上布设反光贴, 在顶推过程中通过全站仪进行沉降监测。

5. 顶推施工监控结果分析

5.1. 应力监控结果

因顶推过程中对系梁、拱肋、导梁等的应力状态进行自动化实时监测, 得到了大量实测数据, 限于篇幅, 仅列出一个拱肋的一个应力监测断面的时程曲线如图 9 所示。

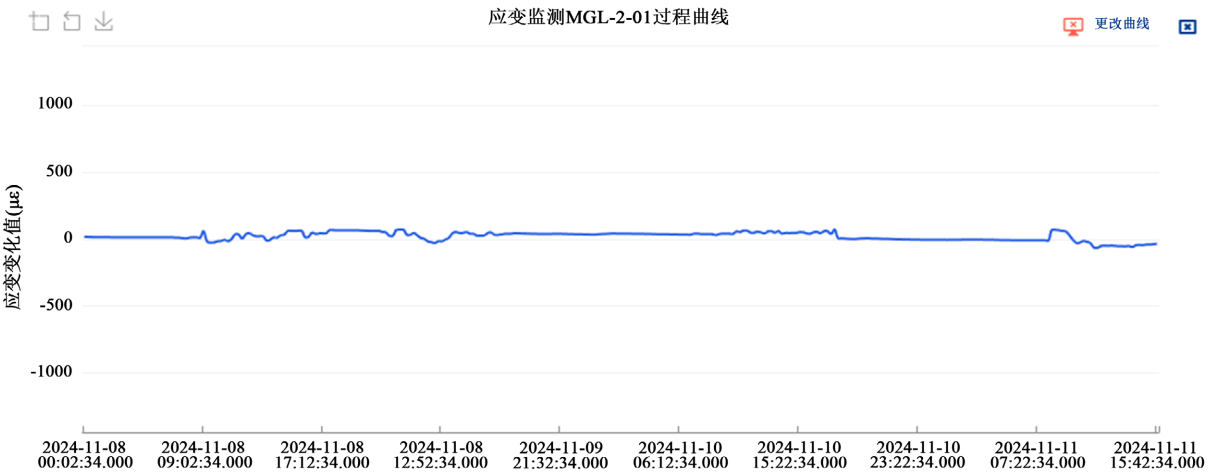


Figure 9. Time-history curves of arch rib stress during incremental launching

图 9. 顶推过程拱肋应力监测时程曲线

从顶推过程应力监测数据看, 各关键截面的应力状态是安全的。

5.2. 线形监控结果

系梁和拱肋拼装线形数据比较表如表 1 和表 2 所示。

规范允许拼装误差要求为: 系梁高程误差为 ± 20 mm, 拱肋拼装误差为 ± 20 mm。通过表 1 可知, 系梁最大拼装误差为 13 mm, 各系梁测点的误差大部分均在 10 mm 之内。由此可见, 在钢箱系杆拱桥系梁拼装阶段, 系梁的拼装线形满足监控要求。通过表 2 可知, 钢箱系杆拱桥已拼装的三片拱肋线形状态均正常, 误差范围均控制在 20 mm 之内, 其中拱肋线形最大误差为 20 mm, 最小误差为 3 mm, 各拱肋测点的误差大部分均在 10 mm 以内。由此可知, 在钢箱系杆拱桥拱肋拼装阶段, 拱肋的拼装线形满足规范要求。

Table 1. Measured data of tie beam alignment
表 1. 系梁线形实测数据表

测量位置	左系梁高程			中系梁高程			右系梁高程		
	理论	实测	误差	理论	实测	误差	理论	实测	误差
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
吊杆 1	78.196	78.195	-0.001	78.424	78.424	0	78.196	78.196	0
吊杆 2	78.301	78.304	0.003	78.530	78.537	0.007	78.301	78.300	-0.001
吊杆 3	78.391	78.378	-0.013	78.622	78.620	-0.002	78.391	78.386	-0.005
吊杆 4	78.468	78.460	-0.008	78.699	78.708	0.009	78.468	78.475	0.007
吊杆 5	78.531	78.535	0.004	78.762	78.757	-0.005	78.531	78.521	-0.010
吊杆 6	78.580	78.575	-0.005	78.811	78.821	0.010	78.580	78.571	-0.009
吊杆 7	78.616	78.610	-0.006	78.845	78.839	-0.006	78.616	78.620	0.004
吊杆 8	78.637	78.649	0.012	78.866	78.855	-0.011	78.637	78.630	-0.007
吊杆 9	78.644	78.644	0	78.871	78.870	-0.001	78.644	78.650	0.006

Table 2. Measured data of arch rib alignment
表 2. 拱肋线形实测数据表

测量位置	左拱肋高程			中拱肋高程			右拱肋高程		
	理论	实测	误差	理论	实测	误差	理论	实测	误差
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
小里程拱脚	85.216	85.202	-0.014	85.515	85.500	-0.015	85.180	85.173	-0.007
1/4 拱	93.072	93.082	0.010	93.187	93.177	-0.010	93.089	93.094	0.005
拱顶	95.666	95.662	-0.004	95.785	95.789	0.004	95.682	95.662	-0.020
3/4 拱	91.303	91.294	-0.009	91.579	91.574	-0.005	91.436	91.418	-0.018
大里程拱脚	86.675	86.686	0.011	86.017	85.999	-0.018	86.581	86.584	0.003

5.3. 导梁挠度监控结果

由于钢箱系杆拱桥顶推时间长,考虑到导梁的结构状态的重要性,因此,监测导梁挠度的频率较快,监测数据较多,但是,由于篇幅有限,因此选取最危险工况时导梁挠度实测记录表,即顶推第三天数据,如表 3 所示。

由前期结构分析中图 4 可知:最危险工况左、中、右导梁累计挠度分别为-68 mm、-65 mm 和-68 mm。因此,由表 3 中数据可以得到:最大危险工况时,左导梁、中导梁和右导梁的累计挠度变化分别为-66 mm、-63 mm 和-68 mm,均未超过计算值。通过实时监测导梁挠度变化,在顶推过程中导梁整体状态良好,挠度变化较为稳定。

Table 3. Measured deflection data of launching nose
表 3. 导梁挠度实测数据表

测点位置	测点时间	测点坐标(m)			挠度变化(mm)	
		X	Y	Z	与上次比	与初始值比
导梁 1 (北)	初始值	3135454.303	38581668.906	78.141	/	/
	顶推中 8	3135452.362	38581635.492	78.078	-12	-63
	顶推中 9	3135451.770	38581629.120	78.073	-5	-68
	顶推中 10	3135451.468	38581621.694	78.092	19	-49
	顶推中 11	3135451.293	38581614.254	78.100	8	-41
	顶推中 12	3135450.808	38581607.712	78.093	-7	-48
导梁 2 (中)	初始值	3135440.717	38581669.994	78.155	/	/
	顶推中 8	3135438.686	38581636.357	78.098	-9	-57
	顶推中 9	3135438.090	38581630.000	78.092	-6	-63
	顶推中 10	3135437.793	38581622.663	78.110	18	-45
	顶推中 11	3135437.613	38581615.307	78.118	8	-37
	顶推中 12	3135437.123	38581608.886	78.112	-6	-43
导梁 3 (南)	初始值	3135428.013	38581671.102	78.132	/	/
	顶推中 8	3135424.946	38581637.273	78.068	-9	-64
	顶推中 9	3135424.359	38581631.109	78.066	-2	-66
	顶推中 10	3135424.061	38581623.587	78.083	17	-49
	顶推中 11	3135423.880	38581616.422	78.093	10	-39
	顶推中 12	3135423.392	38581609.989	78.084	-9	-48

5.4. 临时墩沉降监控结果

顶推过程中临时墩沉降监测结果如表 4 所示。

Table 4. Measured settlement data of temporary piers
表 4. 临时墩沉降实测数据表

测点位置	测点时间	测点坐标(m)			沉降(mm)	
		X	Y	Z	与上次比	与初始值比
L5 (北)	初始值	3135456.622	38581668.440	71.762	/	/
	顶推中 1	3135456.617	38581668.443	71.758	-4	-4
	顶推中 2	3135456.615	38581668.442	71.757	-1	-5
	顶推中 3	3135456.618	38581668.444	71.759	2	-3

续表

	初始值	3135439.848	38581669.809	71.788	/	/
L5 (中)	顶推中 1	3135439.851	38581669.811	71.787	-1	-1
	顶推中 2	3135439.850	38581669.810	71.784	-3	-4
	顶推中 3	3135439.848	38581669.810	71.783	-1	-5
	初始值	3135426.180	38581670.924	71.829	/	/
L5 (南)	顶推中 1	3135426.178	38581670.920	71.827	-2	-2
	顶推中 2	3135426.177	38581670.922	71.825	-2	-4
	顶推中 3	3135426.178	38581670.923	71.825	0	-4
	初始值	3135453.615	38581626.884	71.963	/	/
L6 (北)	顶推中 1	3135423.618	38581626.883	71.967	4	4
	顶推中 2	3135426.619	38581626.882	71.964	-3	1
	顶推中 3	3135426.618	38581626.884	71.963	-1	0
	顶推中 4	3135426.616	3135426.885	71.961	-2	-2
L6 (中)	初始值	3135439.894	38581627.954	71.985	/	/
	顶推中 1	3135439.898	38581627.952	71.988	3	3
	顶推中 2	3135439.896	38581627.953	71.984	-4	-1
	顶推中 3	3135439.895	38581627.953	71.984	0	-1
L6 (南)	顶推中 4	3135439.892	38581627.955	71.982	-2	-3
	初始值	3135426.187	38581629.064	71.967	/	/
	顶推中 1	3135426.189	38581629.067	71.970	3	3
	顶推中 2	3135426.188	38581629.066	71.967	-3	0
	顶推中 3	3135426.186	38581629.064	71.964	-3	-3
	顶推中 4	3135426.190	38581629.066	71.962	-2	-5

由表 4 可以看出: 在主桥进行顶推施工过程中, 各临时墩沉降变化处于正常范围内, 最大值未超过 5 mm, 临时墩结构状态正常。

5.5. 轴向偏位监控结果

顶推施工完成后主桥轴向偏位实测数据见表 5 所示。

从表 5 的数据可以看出: 通过实时监测落梁时各点位的轴向偏位, 各点误差控制在 10mm 以内, 顺利完成了顶推施工工作。

Table 5. Measured axial deviation of main bridge after incremental launching
表 5. 顶推施工完成后主桥轴向偏位实测表

测点位置	测点坐标(m)			理论轴向偏位(m)	实际轴向偏位(m)	误差(mm)
	X	Y	Z			
左系梁小里程	3135427.843	38581672.046	77.981	-13.750	-13.745	-5
左系梁跨中	3135426.252	38581652.462	78.105	-13.750	-13.753	-3
左系梁大里程	3135424.485	38581630.470	78.237	-13.750	-13.742	8
中系梁小里程	3135441.495	38581670.386	78.201	0	-0.003	-3
中系梁跨中	3135439.902	38581650.578	78.336	0	0.005	5
中系梁大里程	3135437.850	38581625.297	78.461	0	-0.004	4
右系梁小里程	3135455.249	38581669.880	77.989	13.750	13.747	-3
右系梁跨中	3135453.553	38581648.716	78.122	13.750	13.757	7
右系梁大里程	3135451.477	38581626.029	78.249	13.750	13.752	2
左拱肋拱顶	3135426.245	38581652.277	94.630	-13.750	-13.745	-5
中拱肋拱顶	3135439.862	38581650.105	94.628	0	0.003	3
右拱肋拱顶	3135453.638	38581649.837	94.639	13.750	13.756	6

6. 结论

本文以跨武吉高速立交桥主跨钢箱系杆拱桥为工程背景，针对多拱面系杆拱桥这一新型复杂结构，系统研究了其顶推施工监控关键技术。通过精细化有限元分析，确定了顶推全过程的最不利工况，并基于自动化实时监测系统，对顶推施工期间拱桥关键部位的应力、变形等结构状态进行了全过程跟踪监测。通过实时对比理论计算与实测数据，实现了施工过程的动态反馈与调整。

监测结果表明，顶推过程中梁、拱应力、线形、导梁挠度、临时墩沉降及结构轴向偏位等各项指标均符合规范限值，落梁后结构线形平顺、内力分布合理，施工监控目标圆满完成。本研究形成的一套针对多拱面系杆拱桥顶推施工的监控方法与技术措施，可为同类桥型的施工控制提供参考。

参考文献

[1] 赵人达, 张双洋. 桥梁顶推法施工研究现状及发展趋势[J]. 中国公路学报, 2016, 29(2): 32-43.
[2] 赵哲. 简支钢箱系杆拱桥整体顶推施工过程分析[J]. 交通科技与管理, 2024, 5(11): 168-170.
[3] 贾海兰, 李志成. 钢箱梁桥顶推施工安全分析[J]. 科技与创新, 2025(1): 114-116, 120.
[4] 冯永航, 于传君. 钢混组合梁桥顶推施工监控技术研究[J]. 北方交通, 2025(1): 23-27.
[5] 周苍华, 程潜, 王杨, 等. 悬链形上加劲钢桁梁桥顶推施工监控技术研究[J]. 市政技术, 2023, 41(9): 199-206.
[6] 王国兴. 跨越城市繁忙道路钢箱拱桥顶推施工技术研究[J]. 中国高新科技, 2020(10): 86-87.
[7] 宋郁民, 郝晋新, 赵志明. 大跨度系杆拱桥顶推施工技术研究[J]. 施工技术, 2017, 46(6): 858-861.