

# 无人随动式步履式顶推设备研究

余龙飞<sup>1,2,3</sup> 李小秦<sup>1,2,3</sup> 周霞<sup>1,2,3</sup> 李志健<sup>1,2,3</sup> 胡琦<sup>1,2,3</sup>

1. 中交武汉港湾工程设计研究院有限公司, 武汉;
2. 海工结构新材料及维护加固技术湖北省重点实验室, 武汉;
3. 交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心, 武汉

**摘要** | 随着我国社会经济的高速发展, 基建交通资源日益紧缺, 为了适应高速发展的交通需求, 公路桥梁也随之需要加快建设。在桥梁的建设中, 如何提高桥梁施工的品质、效率、减少对周围交通的影响、保障施工人员的施工安全尤为重要。跨江跨海大桥能够大大地适应交通需求, 桥梁在施工中一般采用满堂支架和顶推施工这两种方式。其中, 顶推施工因其适应性强, 精度高, 工作效率快, 经济适宜受到广泛地应用。

**关键词** | 无人随动; 步履式; 临时支撑; 三维位置; 比例阀

Copyright © 2022 by author (s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



## 1 概述

在顶推施工中, 考虑施工过程中的质量安全风险, 避免永久墩承受水平力, 采用临时支墩结构, 结合梁体平曲线及竖曲线, 采用多点连续顶推。在多点连续顶推过程中, 因为梁体的结构变化, 临时支墩的高度和受力也需要随着梁体的结

作者简介: 余龙飞, 武汉理工大学, 硕士, 现就职于中交武汉港湾工程设计研究院有限公司, 中级电气工程师, 研究方向: 机电液一体化设备。

文章引用: 余龙飞, 李小秦, 周霞, 等. 无人随动式步履式顶推设备研究 [J]. 土木工程进展, 2022, 4 (3): 31-43.

<https://doi.org/10.35534/ace.0403004>

构进行变化,一种能够随动的支墩结构就能大大提高工作效率,结合位移及压力等传感器的数据反馈,辅助视频监控,减少临时支墩人员,提高施工安全等级。

## 2 无人随动步履式顶推设备使用的重难点

无人随动步履式顶推设备工作流程需按照项目需要提前规划配置支点工作要求及整体控制要求。不同项目需求支点反力不同,控制系统算法也不同,自适应控制系统要求难度大。不同规格设备混用,控制兼容性能不高,为了更安全地施工,经过内测,指定下列工作要求。

### 2.1 支点控制工作要求

第一,梁体吊装准备阶段,通过利用临时支墩平台实现不同的高度差,保证临时支墩系统水平高度比顶推系统高 80 mm(可调)。支墩系统与顶推系统上各执行单元处于初始位置,通过高度差保证钢梁能够单独接触支墩系统,让支墩设备油缸支撑钢箱梁。

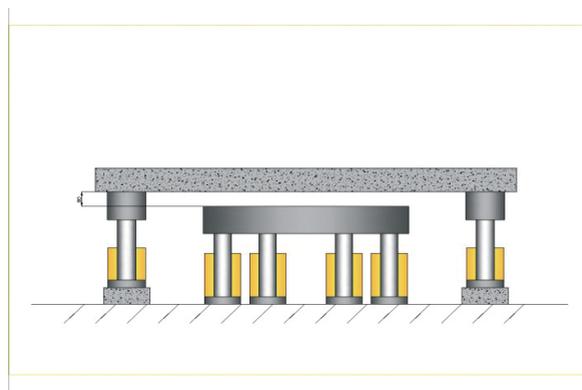


图 1 随动式顶推顺序图

Figure 1 Follow-up push sequence diagram

第二,当梁体吊装到位时,支墩系统主动顶升 80 mm(可调)。开始接触钢箱梁,通过人机界面观察压力传感器和位移传感器的反馈压力值。保持两缸压力均衡,如不均衡调整对应油缸比例溢流阀升高或降低压力设定值,同时压

力总值与设计要求值或前一次顶推系统压力总值接近，上下波动不超过  $\pm 5\%$ ，同时观察位移传感器位置显示，实现受力从吊机上面转移到临时支墩设备上。此时由支墩设备对钢箱梁单独支撑，可以通过压力传感器计算出此时钢箱梁的重量，为后续顶推设备参数设定提供依据。

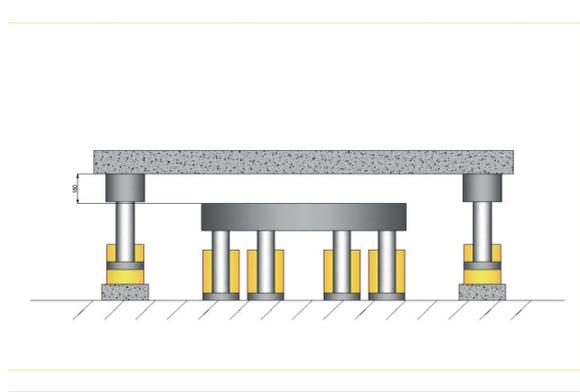


图 2 随动式顶推顺序图

Figure 2 Follow-up push sequence diagram

第三，此时钢箱梁面与顶推设备之间存在 160 mm 的高度差，顶推系统预计顶升 160 mm，此时开始接触钢箱梁的梁面进行预顶，注意传感器压力反馈压力值，预顶保持 5MPa 的顶升压力，此时顶推设备开始慢慢地支撑钢箱梁，同时支墩系统平稳下降与顶推设备进行配合，保持顶推设备压力的增加量与支墩设备的压力减少量保持一个动态平衡，保证梁体受力平稳转换，当支墩系统下降时，预计将钢箱梁与支墩设备脱离 80 mm，钢箱梁与两受力转换时最佳状态是顶升的压力缓慢上升，支撑的压力缓慢下降。同时压力总值与设计要求值或前一次顶推系统压力总值接近，上下波动不超过  $\pm 5\%$ ，且位移传感器变化频率保持一致。

第四，当顶推系统完全承载钢箱梁梁体后，通过视频监控系统观察，确定钢箱梁与临时支墩已经完全脱离，此时可以进行下一次的顶推施工。完成顶升动作后，下一个动作是进行顶推的施工，将钢箱梁向指定的方向进行顶推施工，在顶推过程中如果左右的受力不均匀会出现钢箱梁的偏位变化，此时要注意钢箱梁的左右偏位，如果偏位误差过大，可以在顶推的过程中进行偏位的微调，

实现钢箱梁在空间坐标中的姿态符合施工要求。

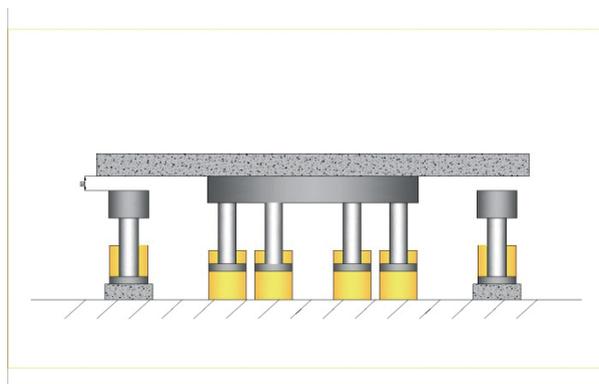


图3 随动式顶推顺序图

Figure 3 Follow-up push sequence diagram

第五，当一次顶推设备行程走完后，此时支墩系统开始向上顶升 80 mm。接触梁体，观察压力传感器反馈压力值。保持两缸压力均衡，如不均衡调整对应油缸比例溢流阀升高或降低压力设定值，同时压力总值与设计要求值或前一次顶推系统压力总值接近，上下波动不超过  $\pm 5\%$ ，同时观察位移传感器位置显示。通过视频监控系统观察，确定钢箱梁与顶推设备已经完全脱开。

第六，当支墩系统完全承载梁体后，顶推系统下降 80 mm。此时，让顶推油缸将滑移面重新拉回初始状态，纠偏油缸将滑移面上的面滑块调节到正中间，为下一次顶推做准备。

在顶推施工中，依次循环执行第三、第四、第五、第六条动作，通过无人机界面上面位移和压力传感器的参数变化，及视频监控画面的实时状态，实现无人随动步履式顶推和随动支墩系统的配合，实现全自动的顶推过程，减少人工的参与，减小钢箱梁的应力变化造成的梁体受损。

当一次完整的顶推施工完成后，进行整体的纠偏，实现钢箱梁位姿的正确。当完成顶推的施工后，因临时随动支撑设备无法长时间地承受钢箱梁的压力。此时，需要将钢箱梁放到永久支墩或者用钢材制造的支墩上，减少临时支墩设备长时间的受压状态，增加设备的使用寿命，且此时因为临时支墩有一定的高度，

可以提高钢箱梁在施工过程中的安全性。

表 1 无人随动步履式顶推设备千斤顶油缸主要参数

Table 1 Main parameters of jack cylinder of unaccompanied walking pushing equipment

	推力(T)	拉力(T)	缸径(mm)	杆径(mm)	行程(mm)	工作压力(MPa)
临时支撑顶油缸	2*300	自重	350	300	150	31.5
泵站设备	7.25L/min, 5.5kW					

## 2.2 整体控制系统要求

随动控制系统作为无人值守顶推控制系统中的子系统，通过压力传感器以及位移传感器采集负载及油缸动作信号，反馈至本套系统中，配合无人值守顶推控制系统综合调控，从而完成顶推施工，取代临时墩，避免人工垫块与调整标高，降低劳动强度、提高工作效率。本套系统的工艺流程参照下图所示。

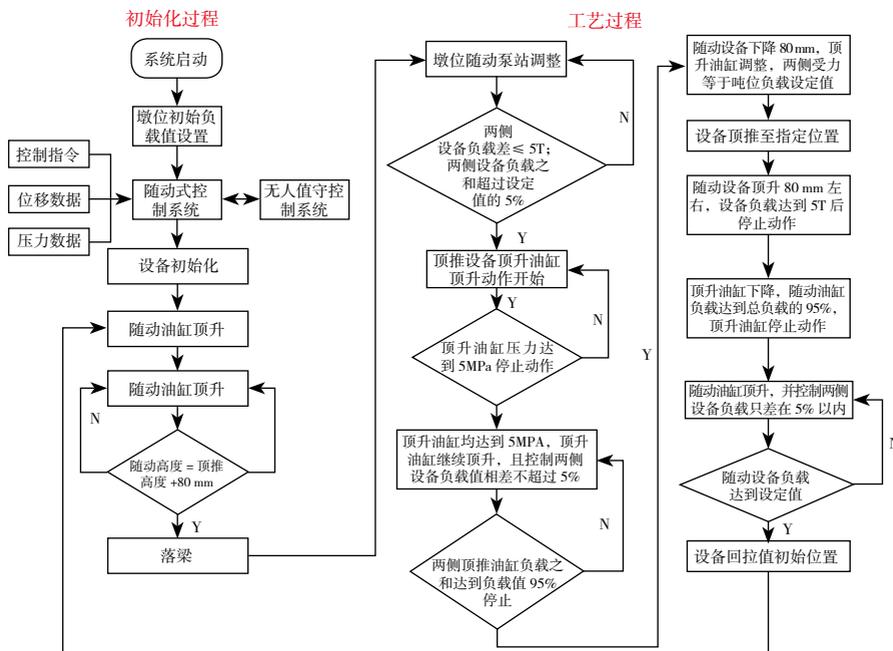


图 4 随动式顶推工艺流程

Figure 4 Follow-up push process

## 2.3 无人随动步履式顶推设备控制系统算法

随动式顶推控制系统的应用上需要和无人值守顶推控制系统配合完成顶推、支撑自动调整功能。在功能的实现上,用于控制的依据是设备所处临时墩的设计反力值,即设备顶推过程中临时墩所在设备负载之和,以此参数为依据,不同设备之间灵活调整,来保证随动设备和顶推设备之间可以有效完成负载切换,达到用于梁面支撑机构的自动调整,同时满足不同的线型,在控制算法的组成上,主要包含以下几大版块。

### 2.3.1 信号交互

信号交互程序用于实现随动式分控泵站和主控之间完成数据交互,确保控制指令、传感器参数以及设备运行状态等数据及时反馈主控以及分控能够响应主控指令完成相应动作。

### 2.3.2 随动顶升控制程序

顶升工艺过程包含了顶推设备及随动设备之间的力的切换过程,主要是在顶升之前,随动设备会处于一个初始位置,该位置和顶推设备之间高度差控制在 80 mm,在落梁以后,随动设备承载负荷,此时两侧随动设备会根据负载值进行调节,通过系统控制负载大的设备油缸缩缸,小的设备伸缸调整,确保两侧设备负载偏差不大。完成调整以后,系统随机控制顶推设备顶升,最先接触的顶推设备系统压力达到 5MPa 后,停止动作,直至 4 台设备压力均超过 5MPa,四台顶推设备开始同步顶升,随着动作的进行,顶推设备符合不断提升,并且同步程序会控制每台设备分配负荷均匀,在总负载达到设定值的 95% 后,顶推设备停止动作,由随动设备开始缩缸下落,最终将所有负荷转移至顶推设备上,完成此次换力过程。

### 2.3.3 随动式下降控制程序

随动式下降过程和顶升过程正好相反,此时顶升设备将梁托起,下降开始,主控控制随动分控设备开始顶升动作,在随动泵站顶升系统压力达到 5MPa,泵站停止动作,待所有设备压力均超过 5MPa 后,设备同步开始网上顶升,此过程动作同步,并且负载均衡,在总负载达到设定值的 95% 后,随动设备停止动作,由顶推设备顶升油缸下降,完成受力切换,顶升油缸在脱力以后下降

高度与随动设备此时高度保持在 80 mm。随后顶推设备回拉至初始位置，完成一个工作循环。

本套系统除了上述三种主要控制功能外，还有其他附属功能，包括报警模块、墩号计算模块、传感器采集参数转换模块等，通过不同子模块之间协调配合，在与主控、顶推分控有机结合的前提下，共同实现随动顶推工艺。

## 2.4 无人随动步履式顶推设备控制系统自适应

多设备同时运行时，设备响应时间对设备操作灵敏度要求越来越高。常规模式的操作精度高，但是反应慢，因此需要找到精度与速度平衡点，以适应各种不同项目。随动式顶推控制系统在系统设计上区别于顶推控制系统，并在顶推控制系统的基础上进一步升级优化，主要从 3 方面进行。

### 2.4.1 硬件优化

对随动式顶推控制系统的通讯方式进行优化，在为主控 CPU 配备以太网通讯模块后，利用本地 CPU 中自带以太网接口实现以太网通讯，从而取代传统 MPI 通讯，通过以太网能够同时具备信号传输、程序下载以及对现场设备在线诊断等功能，具有通讯效率高、通讯更加稳定以及通用性强的优势。

### 2.4.2 软件优化

优化 CPU 数据访问的模式，将数据进行重新排列，使数据在 PLC 中处于连续的内存地址。同时优化数据读写的频率，有效区分只读、只写和读写功能。优化上位机数据显示格式，精简上位机数据，将浮点式数据（32 字节）改点整型数据（16 字节），有效缩短通讯字长，提高通讯速度。

## 3 无人随动式步履式顶推的方案及设备选型

无人随动步履式顶推设备由步履式顶推设备（图 5）和随动式支墩设备（图 6）组成，两种设备即可单独使用，又可通过主控协同完成所有动作。单独使用随动式支墩设备可以完成单一的落梁施工，配合无人随动步履式顶推设备，可以实现线型变化桥梁的自动化智能顶推，提高顶推的速度，缩短顶推过程中顶升下降的时间，提高设备的周转周期。

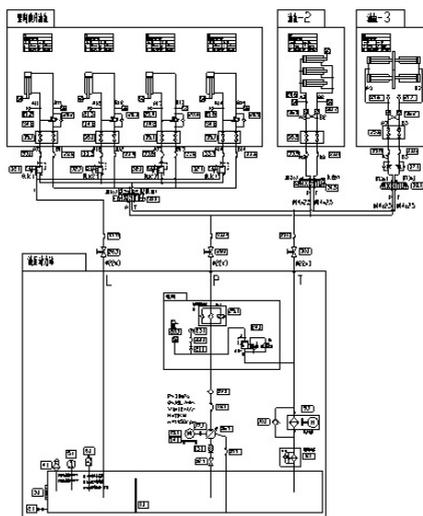


图 5 步履式顶推设备液压控制原理图

Figure 5 Hydraulic control schematic diagram of walking push equipment

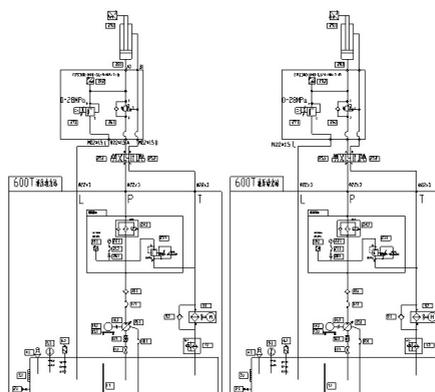


图 6 随动式支墩设备液压控制原理图

Figure 6 Hydraulic control schematic diagram of follow-up pier equipment

### 3.1 步履式顶推设备液压原理

顶推设备设置一套油泵电机组，空载运行 5 min 后，电磁溢流阀得电，系统建压，P 口管路压力油经比例换向阀 1 进入顶升油缸无杆腔，顶升油缸活塞杆伸出，承担梁体重量后，比例换向阀 1 关闭信号，比例换向阀 2 换向，压力油进入顶推油缸无杆腔，顶推油缸活塞杆伸出，带着梁体向前移动，在

向前移动过程中，通过位置传感器反馈信号，观测梁体线性发生偏差则将电磁换向阀换向，纠偏油缸进行左右方向的纠偏，保证梁体移动方向始终与设计要求一致。

### 3.2 随动式支墩设备液压原理

支墩设备布置在步履式顶推设顺桥方向前后，共两套，每套设备布置1套油泵电机组，分别控制两支临时支撑油缸，空载运行5 min后，电磁溢流阀得电，系统建压，P口管路压力油经电磁换向阀进入临时支撑油缸无杆腔，油缸活塞杆伸出，主动承担梁体重量，通过位置传感器及现场视频监控，保证梁体与顶推设备脱开。此设备油缸带机械锁定装置，完全取代以往的临时支撑结构，降低人员频繁抄送垫板的劳动强度，同时结合各监控程序，减少人员高空作业风险，提高人员安全保证。

每一次施工流程：主顶顶升—顶推—纠偏—支撑顶升—主顶下降—回拉—复位。七步为一个循环流程。完成一次流程顶推行程350 mm，用时约6 min。

### 3.3 无人随动步履式顶推设备整机选择

顶推设备是根据重型构件或大型设备的空间三维位置精确定位需要而研制的专业调整设备。该设备采用多支点位移控制，实现横向（X）纠偏，纵向（Y）推进，及竖直顶升（Z）的精确定位。顶升负载大，位置控制精度高，操作简便，自动化程度高。顶推设备的结构主要由下部支撑结构、上部滑移结构和滑动面结构组成。通过顶升油缸、顶推油缸和纠偏油缸实现三个方向轴的运动。液压油缸的参数如下表2所示。

表2 顶推设备油缸的液压参数

Table 2 Hydraulic parameters of push equipment cylinder

	推力 (T)	拉力 (T)	缸径 (mm)	杆径 (mm)	行程 (mm)	工作压力 (MPa)
X 顶推油缸	2*80	50	180	100	400	31.5
Y 纠偏油缸	2*55	17	150	125	50	31.5
Z 顶升油缸	4*300	自重	350	300	300	31.5
泵站设备	16L/min, 11kW					

支墩设备是两套顶升千斤顶通过控制阀组成。可实现临时支撑负载监测、受力转换等功能，是顶推设备的“歇脚处”。适应不同梁体高度偏差，减少抄送垫板人员工作量，结合视频监控控制设备达到少人甚至无人化自动连续顶推的目的。该设备主要由液压泵站、液压阀、液压油缸和管路接头组成。液压泵站为临时支持设备提供压力能，采用高低压切换的双联泵，额定的工作压力为31.5Mpa，能够满足大多数的施工条件。

液压系统包括电磁比例阀、安全阀、电磁溢流阀和液压锁组成。电磁比例阀可以通过 PLC 采集的模拟信号进行运算后调节比例阀的开度，实现运动过程中的流量和方向的控制，减少负载变化对液压系统的影响。安全阀是在系统超载或管路堵塞时起到安全泄压的作用，保护施工人员的安全，并减少液压系统损坏的液压阀。液压锁在此提供保压的作用，保证施工过程中的压力，提高设备的使用安全性。管路接头采用快速接头，可以实现快速的拆装，并减少液压油的泄露。液压油缸的参数如下表 2 所示。

表 3 支墩设备油缸的液压参数

Table 3 Hydraulic parameters of cylinder of supporting pier equipment

	推力 (T)	拉力 (T)	缸径 (mm)	杆径 (mm)	行程 (mm)	工作压力 (MPa)
临时支撑顶油缸	2*300	自重	350	300	150	31.5
泵站设备	7.25L/min, 5.5kW					

控制系统是通过 PLC 检测压力传感器提供的模拟量数据和钢箱梁的重量进行对比，判断随动临时支持设备与钢梁之间的空间状态。通过随动式的控制算法传感器采集数据进行分析，实现对临时支撑墩两个支撑油缸的控制，满足支撑墩随动的调整要求。实现力在顶推设备和临时支墩上面的转换，减少下降所需要的时间和应力的变化幅度。通过人机交互界面采集数据的变化，实现对顶推施工过程的实时监控。

## 4 案例

凤凰路黄河大桥实际施工后期进行无人随动式步履顶推设备的实测，每套

顶推设备共设1台液压泵站及1套电控系统,每个泵站包括2套电机油泵组、1套压力控制阀组、1套控制阀组和压力和/或回油滤器、油箱、电器控制元件及液压辅助元件等。根据试验要求设备之间顶升油缸同步动作、设备之间顶推油缸同步动作,同步精度能控制在5 mm以内。

所有液压设备具备局部顶升的要求,液压设备能任意开度稳定运行,同时顶升油缸能在任意位置锁定并具备带载平稳下降功能。

由于活塞和管路系统的泄漏,活塞杆下滑量48 h内不大于20 mm,满足设计规范要求。

自动顶推液压设备具有同步调节功能,调整过程中,多套设备顶升油缸行程的同步误差控制在5 mm以内,顶推油缸行程同步误差控制在5 mm以内。液压设备同步误差大于5 mm时开始纠偏、大于10 mm时报警、大于20 mm时停机。

顶推设备顶升无杆腔油压相差15%时报警、相差30%时自动停机。

临时支撑系统与顶推系统泵源独立,避免相互干扰,程序设计需要将两者设置成互锁关系,防止了误操作出现安全事故。

操作界面切换要有明显区分,实现顶推设备的动作与临时支撑动作可分步点动,也能一键连续自动操作,减少了看顶及抄送垫板的人员,节省了劳动强度。实现远程连续操作顶推动作。

顶升时,根据设计要求进行载荷的平稳受力转换。通过压力传感器显示临时支撑承载时,压力匀速升高直至达到前一次反力值,误差不超过 $\pm 5\%$ 。验证设备操作的可重复性及准确性。

## 5 总结

无人随动步履式顶推设备专为桥梁等重载大型构件而设计的精确定位设备,设备采用平推滑动摩擦的结构形式,使整体结构变得更为紧凑,同时确保了运行过程中整个结构的稳定性和安全性,组合四氟板采用巧妙的可更换式结构设计,确保运行过程中出现破损或表面烧结碳化等故障时的可维护性。运用多台液压泵站及千斤顶的组合,以及便携式电气操作控制装置来实现大跨度超重构件的多支点同步动作。采用先进的电液比例控制技术,控制精度

高动作全程实时位移及压力监控，位移同步精度为 5 mm 以内。电脑集中控制三个方向的位移，设置参数后可自动实现横向纠偏，纵向推进及竖直顶升等动作过程。集成主动式中轴线监控系统，彻底解决了以往顶推过程中无法进行人工测量中轴线偏移和被动式纠偏不及时的难题。触摸屏操作，具有良好的人机交互界面，简单培训即可操作。采用标准产品模块化连接及通讯总线连接方式，便于现场使用及管理。各种传感器、控制阀、电器插接件采用多重防水设计，能适应恶劣天气下的露天环境施工。单个液压泵站最多可配置四套步履顶推千斤顶，可根据需要采用多种配置灵活使用。该顶推系统不需要对桥梁底面做任何临时结构，其摩擦滑动全部是在顶推装置内部进行，支墩基本不承受水平荷载。

## 参考文献

- [1] 刘显晖, 张毅, 李海峰. 步履式顶推系统及施工关键技术研究 [J]. 装备制造技术, 2016 (5).
- [2] 张升茂. 钢箱梁顶推施工技术 [J]. 价值工程, 2010, 29 (34): 73-73.
- [3] 应惠清. 土木工程施工 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [4] 范立础. 桥梁工程 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1987.
- [5] 孔卫健. 大跨径肋板体系桥梁吊装稳定性研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2006.
- [6] 陈敏. 斜连续梁桥顶推施工过程力学特性研究与程序设计 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2008.

## Research on Unmanned Follow-up Walking Pushing Equipment

Yu Longfei<sup>1,2,3</sup> Li Xiaoqin<sup>1,2,3</sup> Zhou Xia<sup>1,2,3</sup> Li Zhijian<sup>1,2,3</sup> Hu Qi<sup>1,2,3</sup>

1. CCCC Wuhan Harbor Engineering Design and Research Institute Co., LTD, Wuhan;
2. Hubei Provincial Key Laboratory of New Materials and Maintenance and Reinforcement Technology for Marine Structures, Wuhan;
3. Transportation Infrastructure Intelligent Manufacturing Technology R&D Center, Wuhan

**Abstract:** With the rapid development of China's social economy, infrastructure and transportation resources are increasingly scarce. In order to meet the needs of high-speed development of transportation, highway and bridge construction also need to be accelerated. In the construction of Bridges, how to improve the quality and efficiency of bridge construction, reduce the impact on the surrounding traffic, to ensure the safety of construction personnel is particularly important. Bridge across river and sea can greatly adapt to the traffic demand, bridge construction generally adopts the full support and push construction of these two ways. Among them, the jacking construction is widely used because of its strong adaptability, high precision, fast working efficiency and economic suitability.

**Key words:** No one follows; Walking; Temporary support; Three-dimensional position; Proportional valves