

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.07.004

# 深水滑道井字梁自动化调位设备研究

郭 劲, 薛安青, 曾令平, 程茂林

(中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040)

**摘要:**针对现有的滑道井字梁安装调位施工方法存在的通用性低、自动化程度低、调位精度不足的问题,采用正交布置的三组液压油缸作为动力源,并基于工程塑料合金板(MGE板)与镜面不锈钢板水下平移试验的结果,提出了一种自主设计的水下三向调位设备。结合液压同步提升技术及计算机通信技术,对水下三向调位设备及其配套的施工方法进行了现场试验。试验结果表明,该设备及施工方法能够实现井字梁自动化精确调位,调位精度在 1 mm 以内,同时该设备也可应用于其他类似大型混凝土结构的安装调位。

**关键词:**井字梁调位;液压油缸;MGE板

中图分类号:TH122;TH39

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)07-0909-06

## Development and application of automatic positioning equipment for slide way well-shaped beam in deep water

GUO Jin, XUE An-qing, ZENG Ling-ping, CHENG Mao-lin

(CCCC. Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040, China)

**Abstract:** Aiming at drawbacks of generality, automation, precision of existing installation and positioning method of slide way well-shaped beam, three sets of orthogonal arranged hydraulic cylinders were adopted as power source. Based on results of MGE block and mirror-like stainless steel plate underwater sliding experimentation, a set of indigenous designed underwater three-direction positioning equipment was developed and applied. Combining hydraulic synchronizing lifting technique and computer communication technology, field experiments on the equipment and the matching construction method were implemented. The results indicate that precisely automatic positioning of well-shaped beam is achieved through this equipment and construction method, which can be used in positioning other similar large concrete structures as well.

**Key words:** well-shaped beam positioning; hydraulic cylinder; MGE blocks

## 0 引 言

用于大型船舶入水的滑道安装在井字梁上,因此工作人员需要事先将大量井字梁首位相接依次吊装至预先浇筑好的水下混凝土桩上<sup>[1]</sup>。通常会对滑道的安装精度有较高的要求,而滑道的安装螺栓必须预埋在井字梁上,井字梁吊装完成后,螺栓的位置就完全固定了,因此必须保证井字梁的安装精度。在青岛渔轮船厂六号滑道井字梁施工中,施工人员在工作人员在

待安装井字梁上加装定位架,通过潜水员观察放线垂球与已安装梁架上刻度的偏差确定井字梁的位置偏移并告知船吊操作员,操作员手工操作调整井字梁的位置。井字梁前后浇筑榫头和楔口,最终通过待安装井字梁的榫头与已安装井字梁的楔口相互契合来保证井字梁的安装精度<sup>[2]</sup>。在舟山中远1号和2号船台工程施工中,施工人员在待安装井字梁水下桩帽周围架设临时的钢格构立柱、预制平台和井字梁提升架,现场浇筑井字梁后通过多个手拉葫芦同步下放井字梁,根据

收稿日期:2014-12-16

作者简介:郭 劲(1964-),女,湖北武汉人,高级工程师,主要从事钢结构设计方面的研究。E-mail:529038555@qq.com

潜水员反馈的位置偏差调整葫芦的位置,最终使井字梁的位置偏差落在精度要求范围内<sup>[3]</sup>。在温州某船台滑道工程施工中,施工人员在桩帽预定位置沉设钢护筒,利用钢护筒形成局部围堰,干法施工现场浇筑水下桩帽,同时在浇筑桩帽时预埋导杆;在井字梁上加装导向机构,在吊装时通过导杆和导向机构保证井字梁的安装位置。井字梁安装精度通过桩帽和导杆的位置进行保证<sup>[4]</sup>。

上述方法均能保证井字梁吊装完毕后,相邻滑道钢轨接头误差在 4 mm 以内,但上述方法需要安装或架设多余的辅助结构,同时辅助结构与井字梁及附属结构不独立,因此仅适用于单个项目的施工;同时上述方法需要大量的人工操作,因此受河流水量、水下能见度等自然条件影响大,精度难以提升,无法实现井字梁的自动化安装。

在武汉双柳滑道工程项目中,井字梁安装批量大,最大水深达 28.73 m,同时钢轨接头顶面高差和侧错位差要求 <1 mm,现有的安装方法无法高效率地完成这一工程。为此,本研究提出一种自主设计的可用于井字梁或类似结构调位的三向千斤顶,并对工程塑料合金板(后称 MGE 板)的水下滑移性能进行研究,结合液压同步提升技术及计算机通信技术,可实现高精度(达  $\pm 1$  mm)、高效率、自动化调位过程,并能适用于其他类似大型梁架的调位工程。

## 1 调位设备概述

### 1.1 机械结构分析

为实现滑道井字梁水下自动化精确调位,本研究自主设计、研发并生产了一种三向千斤顶。

三向千斤顶是由正交放置的三组油缸提供推力(或拉力),使相应结构在某个方向上产生单向位移,三组油缸同步运动便能得到调位范围内任意的三维位移,最终结果是三向千斤顶相连接的被调结构在连接点处产生相同的三维位移。通过采用 3 台以上三向千斤顶进行同步调位,便能实现被调结构在空间六自由度上的位移调整。三向千斤顶结构示意图如图 1 所示。

为保证能够对被调对象进行空间内 3 个位移自由度调位,三向千斤顶选用了 3 组液压油缸作为顶推动力,其中两组水平正交放置的油缸对应两对滑移副,使得被调对象能进行水平面内各个方向的位移,一组垂直放置的油缸完成被调对象竖直方向的位移。同时纵向放置的油缸与同被调设备连接的连接板之间用球铰

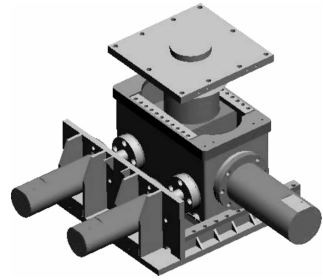


图 1 三向千斤顶结构示意图

连接,使得三向千斤顶能适应被调对象在一定范围内的偏转,具体结构如图 2 所示。

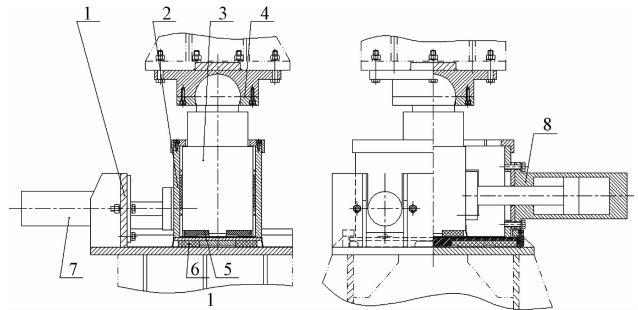


图 2 三向千斤顶结构图

1—底座;2—滑移箱;3—垂直油缸;4—连接板;5—水平纵向滑移块;6—水平纵向滑移块;7—水平纵向油缸;8—水平横向油缸

在正常使用条件下,设备的底座被固定在水平平面上,一组水平纵向油缸安装在底座上,活塞杆法兰盘与滑移箱固接,滑移箱底部的滑移块与底座上表面构成了一对滑移副,在水平纵向油缸的作用下除底座和水平纵向油缸外的结构通过这对滑移副产生水平纵向位移;水平横向油缸安装在滑移箱上,活塞杆法兰与垂直油缸外壁固接,垂直油缸底部的滑移块与滑移箱箱底构成了一对滑移副,在水平横向油缸的作用下垂直油缸及以上结构通过这对滑移副产生水平横向位移;垂直油缸产生竖直方向位移,其顶部采用球铰连接,并设计了与被调井字梁吊架相应位置匹配的连接板,在其他场合如使用,则连接板应根据具体要求重新设计。

油缸行程的确定取决于被调件安装时可能产生的最大位置偏差,位移的速度和精度由进入各油缸的液压油的流量决定,需要的推力(或拉力)由综合负载决定。

### 1.2 MGE 板-镜面不锈钢板水下滑移试验

#### 1.2.1 试验原理及装置

在实际应用场合,调位油缸单向运动所需的推力

(或拉力) $F$  通常遵循下式:

$$F = F_f + F_e \quad (1)$$

式中: $F_f$ —推动被调对象在该方向运动需要克服的滑动摩擦力, $F_e$ —环境载荷。

例如水下环境需要考虑水流作用在被调对象立面上所产生的载荷,普通工作环境下则要考虑风载荷。环境载荷可通过国家标准及设计经验进行预估,而滑动摩擦力则取决于被调对象作用在该套设备上的重力以及滑移副间的滑动摩擦系数,对于确定的被调对象和设备排布形式,每套设备承受的重力可以简单地确定,而滑移副的滑动摩擦系数则与滑移副的材质及工作环境有关,需要通过试验测定。

该设备选用的滑移副为 MGE 板-镜面不锈钢板,其中 MGE 板为滑移板,镜面不锈钢板为滑移面。

工程塑料合金-MGE 最大承受压力在 65 MPa 以上。同时,MGE 板具有耐磨、摩擦系数低、承载力大、抗剪抗冲击能力强、易于机加工等特点<sup>[5]</sup>。材料主要性能指标如表 1 所示。

表 1 MGE 板性能指标

性能指标	拉伸强度 /MPa	压缩强度 /MPa	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	线膨胀系数/(1/°C)
MGE 板	≥30	≥65	1.0~1.1	8.0×10 <sup>-5</sup> ~9.1×10 <sup>-5</sup>

为了测定水下不同环境中 MGE 板-镜面不锈钢板的摩擦系数,本研究进行了相应的试验。

试验台结构图如图 3 所示。

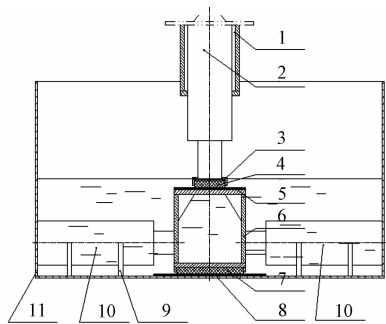


图 3 MGE 板-镜面不锈钢板水下摩擦试验台结构图

1—定位套;2—纵向负载油缸;3—定位块;4—上滑移板;5—上滑移面;6—滑移箱;7—下滑移板;8—下滑移面;9—支撑块;10—横向推力油缸;11—水箱

纵向负载油缸用于模拟负载,横向推力油缸用以推动滑移箱滑动<sup>[6-7]</sup>。同时上、下滑移板材料均为 MGE 板,上下滑移面材料均为镜面不锈钢板,一组滑移板-滑移面构成一对滑移副。在该试验中共有两对滑移副。

当右侧横向推力油缸推动滑移箱向左匀速滑动

时,滑移箱受力状况如图 4 所示。

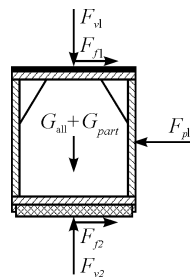


图 4 滑移箱受力简图

$F_{v1}$ —上滑移面所受垂直载荷; $F_{f1}$ —上滑移面的滑动摩擦力; $G_{all}$ —下滑移面以上部分重量总和; $G_{part}$ —上滑移面以上部分重量总和; $F_{pl}$ —横向推力油缸输出的推力; $F_{v2}$ —水箱底部提供的支撑反力; $F_{f2}$ —下滑移面的滑动摩擦力

对于上滑移面,垂直载荷  $F_{v1}$ :

$$F_{v1} = G_{part} + F_{pv} \quad (2)$$

式中: $F_{pv}$ —纵向负载油缸推力。

对于下滑移面,支撑反力  $F_{v2}$ :

$$F_{v2} = G_{all} + F_{pv} \quad (3)$$

式中: $F_{pv}$ —纵向负载油缸推力。

横向推力:

$$F_{pl} = F_{f1} + F_{f2} = \mu \cdot F_{v1} + \mu \cdot F_{v2} \quad (4)$$

式中: $\mu$ —MGE 板-镜面不锈钢板在本工况下的摩擦系数。

又有横向油缸推力  $F_{pl}$ :

$$F_{pl} = p \cdot S_h \quad (5)$$

式中: $p$ —油缸大腔压力, $S_h$ —油缸大腔面积。

该试验中,大腔压力通过调节泵站输出回路的溢流阀开启压力得到;选用相同型号的 3 个油缸,因此各油缸大腔面积相同。

因此将式(2~5)代入式(1)中得:

$$p_l = 2\mu p_v + \left[ \frac{\mu(G_{part} + G_{\Sigma})}{S} \right] \quad (6)$$

式中: $p_l$ —横向推力油缸大腔压力, $p_v$ —纵向负载油缸大腔压力。

通过公式推导可知  $p_l$  和  $p_v$  之间的关系为一次函数。本研究可以通过试验得到的数据,在  $XOY$  坐标系中绘制出纵向负载油缸大腔压力  $p_v$  和横向推力油缸大腔压力  $p_l$  的关系线图,根据图线的斜率得到 MGE 板对镜面不锈钢板的摩擦系数<sup>[8]</sup>。

### 1.2.2 实验结果及分析

实验开始后,本研究先调定泵站负载输出回路溢流阀的开启压力值,然后由 0 开始逐渐增加泵站推力输出回路溢流阀的开启压力值,直至滑移箱开始滑移,

记录数据。为了尽量还原实际工况,笔者进行了两组试验,第一组试验水箱内为清水,第二组试验水箱内混入了大量泥沙。试验数据如表 2 所示。

表 2 实验数据记录表

无泥沙		有泥沙	
纵向压力 $p_v/\text{MPa}$	横向压力 $p_l/\text{MPa}$	纵向压力 $p_v/\text{MPa}$	横向压力 $p_l/\text{MPa}$
5	0.35	5	1.70
6	0.65	6	2.10
7	0.65	7	2.10
8	0.85	8	2.35
9	1.00	9	2.50
10	1.05	10	2.70
11	1.15	11	3.30
12	1.20	12	3.50
13	1.30	13	3.55
14	1.40	14	3.85
15	1.55	15	4.15

本研究利用 Matlab 对数据进行一次函数拟合,以负载油缸压力为自变量,横向推力油缸负载为因变量,拟合式(6)可得:

在水下无泥沙环境下,拟合线图如图 5 所示。

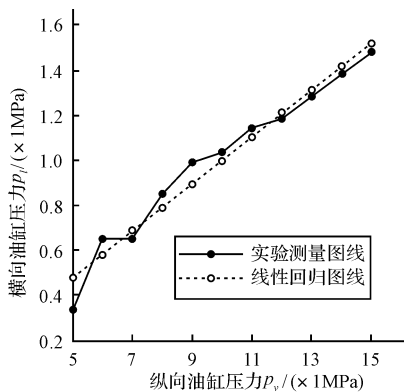


图 5 无泥沙水下环境摩擦系数线图

观察可知,试验所得的曲线能够用一次函数较为准确地拟合。根据拟合曲线的斜率求解滑动摩擦系数:

$$p_l = 0.105p_v + 0.041 \quad (7)$$

$$\mu = 0.105/2 \approx 0.053$$

在水下有泥沙环境下,拟合线图如图 6 所示。

对比图 5 可以发现,相同负载条件下,水下有泥沙环境下横向推力油缸压力大于水下无泥沙环境下的压力。根据曲线斜率求解滑动摩擦系数:

$$p_l = 0.243p_v + 0.046 \quad (8)$$

$$\mu = 0.243/2 \approx 0.122$$

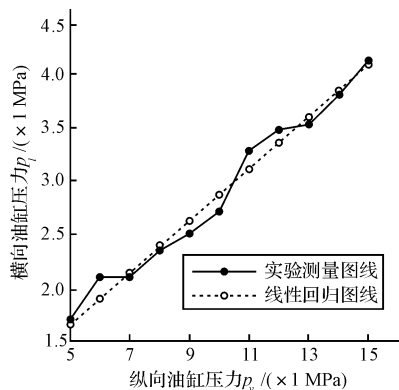


图 6 有泥沙水下环境摩擦系数线图

因此,根据实验所得的不同水下环境中的滑动摩擦系数如表 3 所示。

表 3 MGE 板-镜面不锈钢板水下摩擦系数

项目	无泥沙	有泥沙
滑动摩擦系数	0.053	0.122

根据试验结果可知,在水下有泥沙的环境下, MGE 板-镜面不锈钢板滑移副的滑动摩擦系数为 0.122,而水下无泥沙环境中摩擦系数仅为 0.053。因此在选用这对滑移副时,必须明确其工作环境,才能保证设备的正常工作。

## 2 液压系统分析

顶推油缸液压原理图如图 7 所示。

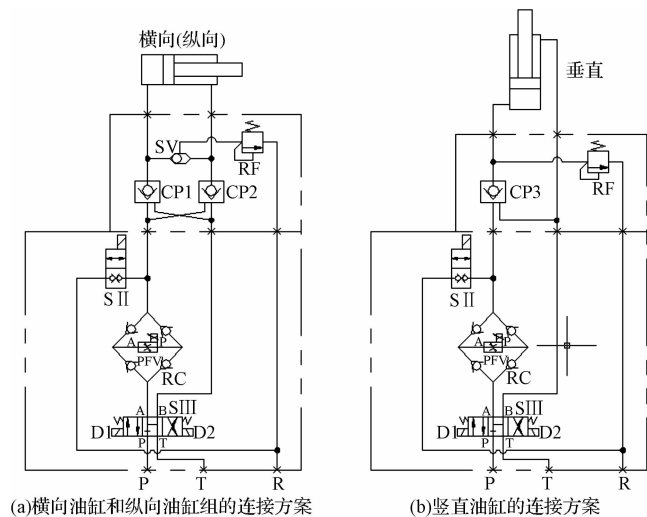


图 7 液压原理图

S III—三位四通电磁换向阀;RC—整流块;PFV—比例流量阀;S II—二位二通电磁换向阀;CP1 ~ CP3—液控单向阀;SV—梭阀;RF—溢流阀

液压原理图中, P 口为进油口接齿轮泵, T 口为回油口接油箱, R 口为泄油口接油箱;其中液控单向阀、

梭阀及溢流阀插装在油缸阀块上,随设备进入水下工作环境;其余组建插装在调速阀块上,调速阀块安装在提供动力的泵站中。

液压系统工作原理:首先,在系统测试过程中预先设定好溢流阀的开启压力。进入正式工作状态时,启动齿轮泵后,若需要横向(纵向)油缸产生推力,则 D1 得电,三位四通电磁换向阀工作在左位,液压油在整流块的作用下安由 P 至 A 的方向通过比例流量阀,随后通过液控单向阀 CP1 进入油缸大腔,大腔产生一定压力时,梭阀阀芯右移使得溢流阀与大腔油路接通起过载保护作用,大腔压力继续上升,液控单向阀 CP2 打开,活塞向右移动产生推力;若需要横向(纵向)油缸产生拉力,则使得 D2 得电,此时油缸小腔先产生压力,使得梭阀阀芯左移,溢流阀与小腔油路接通起过载保护作用,当大腔压力继续上升时,液控单向阀 CP1 打开,活塞左移产生拉力,此时调速方式由进油调速变为回油调速。无论比例调速阀位于进油侧还是回油侧,在整流块的作用下液压油均由 P 口流入 A 口流出。当设备结束工作后,D3 得电,二位二通电磁换向阀导通,系统可以快速卸荷。

由于垂直油缸活塞需要向下移动时以负载压力为动力,小腔没有高压油进入,垂直油缸的液压控制回路较为简单,各元件作用与在横向(纵向)油缸控制回路中的作用相同。通过比例流量阀的使用,可以使油缸活塞杆产生精确的位移(1 mm),从而保证了三向千斤顶的调位精度。

### 3 井字梁调位原理及实施效果

#### 3.1 井字梁水下调位原理

本研究利用三向千斤顶进行的井字梁水下调位方案如图 8 所示。

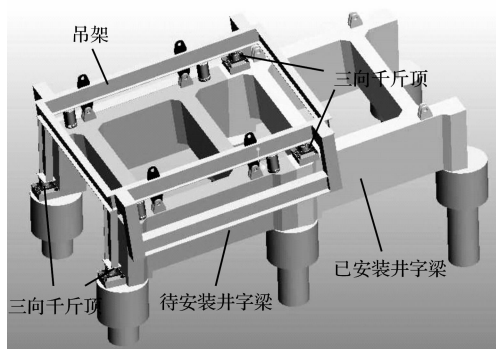


图 8 井字梁调位方案图

四套三向千斤顶与吊架四个支柱的底部固接,

整体吊装至预定位置,并将四套三向千斤顶底座与预设混凝土桩固接。吊装完毕后,根据测量设备测出的井字梁当前位置与目标位置之间的位移差和偏角差,通过泵站驱动四套三向千斤顶设备进行同步精调位。

在精调位过程中,滑道井字梁可能出现的运动方式主要有如下几种:升降,横移和进退,侧滚,俯仰和定点回转。井字梁位移模式如图 9 所示。

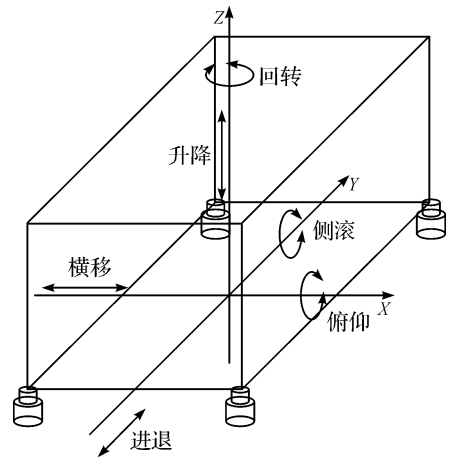


图 9 井字梁位移模式

其中:升降,横移,进退,侧滚,俯仰等均属于平移调位方式,分组同步控制相应油缸(水平横向、水平纵向和垂直油缸中只需要其中一组动作)运动即可实现;而定点回转属于偏转调位方式,需要控制三向千斤顶的水平纵向油缸组和水平横向油缸进行同步运动,通过水平纵向位移和水平横向位移的合成在千斤顶与吊架支座的连接位置产生水平斜线位移,四组三向千斤顶同步动作合成井字梁的水平偏转运动。

在现场施工中,为了保证位置测量的准确性,保证最终调位的精度,通常选择依次完成定点回转、侧滚、俯仰 3 种角度偏转的调位动作;完成角度偏转调位,测量仪器能够更加精确地测量出井字梁当前位置与目标位置的偏差,最后进行简单的升降、横移、进退这 3 种平移调整,完成整个调位过程。

#### 3.2 井字梁水下调位施工效果

滑道井字梁调位施工现场照片如图 10 所示。在实际施工过程中,测量仪器测出井字梁当前位置和目标位置的偏差并通过 CAN 总线将偏差信息告知中央控制器,中央控制器结合安装在油缸内部的安装 CAN 发送器的磁致伸缩传感器,闭环控制油缸的位移,整个过程可以实现大型预制构件水下高精度安装施工控制技术全自动化;当然也可以分步控制,即一次调整结束后,通过测量装置观察调整的精度是否满足过程,如不

满足,再次手动启动调整过程,测量装置与中央控制器之间通过 CAN 总线保持实时信息交换。



图 10 滑道井字梁调位施工现场照片

根据现场施工的实施效果可知,采用三向千斤顶配合液压同步提升技术及计算机通信技术,能够完成高精度的井字梁自动化调位过程,最终精度达  $\pm 1 \text{ mm}$ 。同时该套设备与吊架、井字梁及其附属结构均相互独立,装卸简单方便,无需架设钢格构柱或导杆等临时结构,因此该方案是一种高效率的自动化调位方案,只需要根据实际情况修改控制参数就能应用于其他类似大型梁架调位的场合。

## 4 结束语

滑道井字梁的安装与调位过程一直难以实现自动化,导致工程周期长,施工难度大。本研究提出并设计了一种三向千斤顶,利用液压油缸和 MGE 滑块实现了单点空间三自由度的位移,其结构紧凑简单。本研究通过采用四台三向千斤顶联动,并结合液压提升技术和通信技术,较好地实现了滑道井字梁的快速、准确、自动化安装。

现场施工证明,通过该方案能够保证井字梁安装

调位完毕后,相邻滑道钢轨接头偏差要求控制在  $1 \text{ mm}$  以内,平面位置及高程偏差要求控制在  $3 \text{ mm}$  以内,精度之高,在国内外尚无先例可循。

由于该套设备与吊架、井字梁及其附属结构均相互独立,装卸简单方便,无需架设钢格构柱或导杆等临时结构,属一种高效率的自动化调位方案,只需要根据实际情况修改控制参数就能应用于其他类似大型梁架调位的场合。

## 参考文献 (References):

- [1] 吴利,李发章,肖维,等.提升安装工艺在滑道井字梁安装中的应用[J].华南港工,2009(4):20-26.
- [2] 周光华.青岛渔轮船厂六号滑道井字梁的安装[J].水运工程,1997(3):41-43.
- [3] 吴利,肖维.舟山中远1号和2号船台工程施工综述[J].华南港工,2009(4):3-8.
- [4] 金毅,杨梅萍.大型预制构件水下高精度安装施工控制技术[J].大坝与安全,2011(6):29-36.
- [5] 李建新.浅谈 MGE 板在重载铁路钢梁拖拉中的应用[J].中国建筑金属结构,2013(10):183.
- [6] BIAN Yong-ming, JIANG Jia, JING Zhong, et al. Design and application of hydraulic-walking incremental launching equipment[J]. *Open Construction & Building Technology Journal*, 2012(6):1-7.
- [7] BIAN Yong-ming, LI An-hu, JIN Xiao-lin, et al. Coupling analysis method for a large-scale structure exposed to synchronous hoisting loads[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2009, 4(3):131-141
- [8] 徐从启,戴一帆,解旭辉,等.三维受限刚体的摩擦接触分析[J].高技术通讯,2009,19(10):1078-1084.

[编辑:李辉]

## 本文引用格式:

郭劲,薛安青,曾令平,等.深水滑道井字梁自动化调位设备研究[J].机电工程,2015,32(7):909-914.

GUO Jin, XUE An-qing, ZENG Ling-ping, et al. Development and application of automatic positioning equipment for slide way well-shaped beam in deep water [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(7):909-914.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>