

计算机自动控制液压技术在桥梁整体安装工法中的应用

杨冰¹ 卢九章² 杨文忠¹ 秦大航¹

(1 北京市市政工程设计研究总院 北京 100082 2 北京市政路桥管理养护集团有限公司 北京 100097)

摘要:本文通过北京昌平西关环岛桥梁改造这一国内首次桥梁上部结构整体置换工程案例的主要实施过程,详细介绍了自行式运梁车、均载系统、同步顶升千斤顶系统、提梁机、万向千斤顶等分别采用不同功能的计算机自动控制集成液压技术。基于计算机有限元软件对空间异形结构各工况施工过程受力状况的精确分析和验证,结合计算计算机自动控制液压顶升技术在旧梁使用过程中支护、旧梁移动运输、旧梁提降破碎、新梁整体称重、新梁整体运输、新梁精确整体就位等关键工序中应用,满足支顶系统在异形板各支点反力差异大情况下的自动调整适应、保持梁体变形在移动过程中路线纵横坡度变化下的有效控制,是新工法得以顺利实施的重要前提。

关键词:计算机自动控制 液压技术 桥梁整体安装 同步顶升 SPMT工法

1 引言

1.1 工程背景

目前我国各大城市交通拥堵成为普遍现象,当危桥需要更换上部结构时,常规施工方案导致长时间的局部交通中断给居民工作生活带来巨大困扰,因此快速施工方案需求迫切。随着液压技术的快速进步,各种新型设备大量研发,为桥梁改造工程提供了有利技术支持。

桥梁上部结构整体安装的SPMT工法(英文全称是Self-Propelled Module Transporters)的核心是一种“机-电-液”一体化的大型设备,采用液压驱动,能进行独立转向和高度调节,转向模式多样,整机运行非常灵活。以此设备为核心,辅以其他设备,能对新桥进行整体运输、安装,并对旧桥进行整体拆运,达到快速施工的目的,符合桥梁改造的发展趋势。该项技术最大限度的降低了施工占道时间,是解决施工与交通矛盾和提高施工速度的有效途径,有利于建立施工与环境的和谐关系,成为一种新兴的桥梁改造技术,应用前景广阔,符合我国社会发展的总趋势。

国外在2000年以后相继开展了桥梁快速施工技术的研究和应用,并在大型平板运输车的基础之上研制SPMT设备,以德国Scheuerle、荷兰mammoet、比利时sairns公司等为代表的世界著名大型机械制造商依托其强大的研发和生产能力,制造出规格不一的大型SPMT设备,专业承揽大型设备,物资的海、陆运输,并承接大型工

程项目,进行了多座桥梁的改造工程,逐渐形成了桥梁快速施工工法,经济和社会效益明显,欧美各国应用日广,尤以美国应用最多,该国自2004年组织专家组开展该技术的研究,2007年开始进行应用,至2011年底已完成100多座桥的施工(见图1)。



图1 国外SPMT设备

我国在大型平板运输车的制造能力上近年来取得了飞速发展,已有郑州新大方、武汉桥机、上海猛犸等多个厂家具备研发和生产能力。近年来在京石高专、京沪高速等铁路工程大量使用了600-900t的大型平板运输车运输铁路箱梁,东海大桥采用1600t液压平板运输车运输50米预制箱梁(见图2)。虽然国内已经初步具备了采用基于SPMT设备的桥梁整体安装技术的基本条件,但是以上设备并不能满足桥梁整体安装需求。

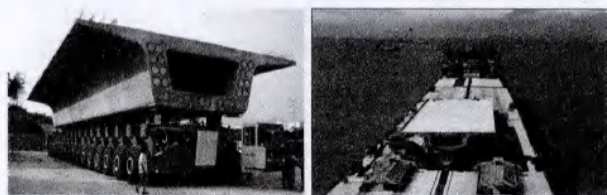


图2 国内大型平板运输车

1.2 项目基本情况

北京市昌平西关环岛立交地处京藏高速公路(G6、原八达岭高速、北京市重要特勤通道)、110国道、昌平区两条城市干道相交处(见图3),是延庆县、昌平区、八达岭景区、明十三陵景区等与北京城区联系的咽喉。原桥均为厚度1.0m的2孔普通钢筋混凝土实体连续板,桥梁处在环岛半径为100m的曲线段内,与八达岭高速公路斜交,上部结构斜、弯异形,受力复杂。



图3 北京市昌平西关环岛立交地形图

1.3 项目实施主要工序

1号立交和2号立交桥上不仅交通流量巨大,并且重型货车、大型旅游客车比重大,经过检测发现主梁底板、侧面存在大量超过规范容许值的裂缝,必须进行加固改造。经过方案比选和专家论证,最终确定采用SPMT工法,切割拆除原桥上部结构异形钢筋混凝土实体板,更换主梁为整体正交异性钢箱梁+环氧沥青混凝土铺装方案。

上部结构整体置换的施工步骤如下:

- (1) 旧桥应急临时支护;
- (2) 环岛施工场地改造(见图4);

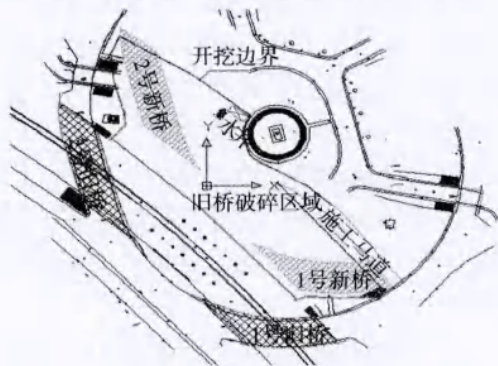


图4 环岛施工场地改造

(3) 新建钢梁工厂节段预制、临时施工场地整体拼装;

(4) 旧桥板梁分块切割,然后预顶升;

(5) SPMT工法将旧桥板梁分块运出桥位并在临时施工场地解体;

(6) SPMT工法将新建钢梁整体运输至桥位,并初步定位;

(7) 多向液压千斤顶微调钢梁使其精确就位。

临时支护包含支架立柱和同步千斤顶。支架立柱分别设置在桥台内侧和中墩两侧,立柱采用直径406mm的无缝钢管,立柱标准长度分别为150cm和200cm两种规格,立柱之间竖向通过螺栓连接,钢管之间水平、斜向通过角钢连接。支架立柱的设计具有通用性,便于回收再利用。立柱通过锚栓与桥台、桥墩连接,增强其稳定性。

立柱顶设置一套千斤顶系统与梁底密贴,该液压系统可实现整体同步顶升和同步下降的精确控制,并可实时监测各个千斤顶的支顶力及顶升位移(见图5)。

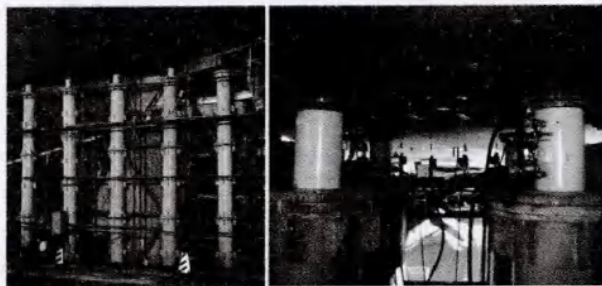


图5 实时监测千斤顶的支顶力及预升位移

临时支护的用途主要有:

(1) 改造工程实施前的应急支护,确保结构的安全。

(2) 旧板分块切割后的临时支撑。

(3) 作为旧板预顶升的支顶系统。

(4) 新梁就位时的临时支架。

旧桥切割后由设置在临时支撑上的液压同步顶升系统对各块梁板进行预顶升,有三个目的:

(1) 解除梁体可能的约束。

(2) 顶高梁体,以增加桥梁净空,满足运梁车最小工作净空要求。

(3) 作为运梁车在顶升旧梁时的应急储备。

旧桥的运输需要综合分析各梁板形状、尺寸、重量及运梁车结构,驮运旧桥时双车采用5个模块,两车之间用刚性架相连,每个模块车有五个模块和5个大行程顶升油缸,车顶设均载梁。上顶升油缸位置根据驮运梁板不同而位置不同,以满足运梁车各模块受力基本均衡,并满足梁板在驮运状态应力和变形不超限(见图6)。

驮运旧桥至临时场地后,由液压提梁机吊起

梁体并脱离运梁车,然后运梁车撤出,再由液压提梁机把梁体降至地面破碎(见图7、图8)。

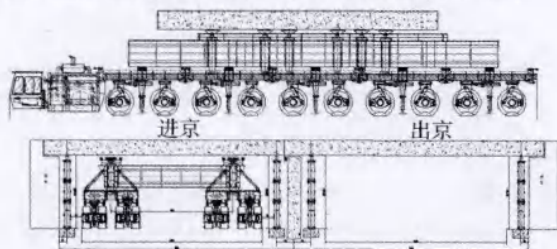


图6 运梁车结构图



图7 驮运旧桥至临时场地



图8 液压提梁机在工地作业

2 主要技术

2.1 国内首次提出并成功实施了桥梁整体安装工法进行桥梁改造,研制专用设备。

设计单位结合工程的特点和现场情况,对国内外最新桥梁施工方法、技术手段、发展趋势进行了大量调查和资料搜集,提出多种改造方案,其中桥梁整体安装技术能够最大程度满足工程需求脱颖而出成为最终方案。由于该方案在国内用于桥梁改造尚属首次,设计单位为此成立了项目组,吸收经验丰富的桥梁施工单位、专业的大型液压设备、车辆制造商,相关学科优秀的大学老师、科研院所,联合组成技术团队,最终确定采用特制专用大型自行式运梁车,结合液压千斤顶同步顶升技术,实现旧桥整体拆解分块、驮运、破碎,新桥在临时场地预制、一次性整体驮运至桥位并安装就位的施工方案。

此工法完善后,可以把断路时间缩短为7~8小时,夜间施工完毕,白天正常放行,对车辆通行的影响减低到最低,极大提高了工程的可实施性,探索了一种未来城市桥梁改造的可行解决方案。

但由于该项目旧桥为平面异形板,运梁车支撑位置支点反力差异大,且由于现场条件,道路曲线半径较小,道路纵横坡度大,运输过程中为保持梁体姿态,运梁车支撑位置支点反力需动态调整,以确保桥梁结构安全,项目实施难度大。

项目建设总承包单位,通过大量的研究论证、试验,在消化、吸收SPMT工法的核心技术的基础上,在新工法项目适用性方面做出了大量工作,主要有:(一)串联工法各个技术环节,结合车辆性能、异形梁体受力要求等就组拼场地、运输路线、操作细节等情况,通过精密组织、反复推演,形成一整套切实可行的工法操作流程和工作手册;(二)综合车辆制造、液压、自动控制技术,自行设计、制造两辆千吨级运梁车用来实施整体运、架桥梁;(三)就异形梁千斤顶同步顶升、移动过程中梁体姿态保持、调整系统开展专题研究,同时就梁体移动过程即时监测数据采集系统开展专题研究。

通过项目过程的摸索和最终成功实施,对SPMT工法有了全面直观的认识,对该工法的适用桥梁范围、设备要求、操控要求等均摸索出成功解决方案,积累了经验,项目组正在全面总结SPMT工法操作指南(操作规程),以便于该工法的普遍应用。全面推广后,该工法将极大缩短我国桥梁快速施工水平与世界先进国家的差距,取得社会效益的极大节约,减少施工对大众出行的影响,真正做到以人为本。

2.2 旧板、新梁的精确计算分析

旧桥异形板在施工过程不断发生体系转换,引起板体受力状态和支反力的调整。各受力状态特点如下:

(1)原桥状态,斜、弯异形板的空间受力效应导致按正交配置的受力钢筋强度不足,结构大量开裂,支座反例分布不均,锐角处有翘起趋势;

(2)临时应急支护状况,板体部分荷载转移到临时立柱上,通过同步液压千斤顶的控制支反力相对均匀,桥梁跨径略有降低;

(3)先横向后纵向切割板体状态,由连续

变成简支，支反力进行重分布，板体正弯矩增加，此工况为安全控制工况，特别需要核算板体正弯矩承载能力、分块后钝角处支撑强度和临时支架的稳定性；

(4) 运梁车支撑状况，分块后板体由简支变成中间简支两端悬臂状态，此工况为安全控制工况，特别需要核算板体负弯矩承载能力和由于异形导致的支反力不均，防止个别液压千斤顶超载失效导致整体失稳造成严重事故。

结合板体实际裂缝分布情况，针对以上各状态分别按照极限法进行包罗计算分析，确定各状态的合理相对变形、应变和支顶力，并给出施工控制容许值和预警值。

工程充分利用钢材的各向同性特征整体一次安装两孔连续钢梁，新梁架设过程发生两次体系转换，分别是：

(1) 两孔连续支撑状态（场地临时支撑）转化为中间简支两端悬臂状态（运梁车支撑）。

(2) 中间简支两端悬臂状态（运梁车支撑）转化为两孔连续支撑状态（桥位永久支撑）。

其中场地临时支撑状态与桥位永久支撑理论上相同。为了确保钢梁架设后的耐久性，不容许施工过程中梁体产生初始破坏，采用容许应力法确定各状态的合理相对变形、应变和支顶力，并给出施工控制容许值和预警值，尤其严格控制施工过程中每辆运梁车上液压千斤顶的相对位移，避免脱空；严格控制两辆运梁车的相对扭转，避免新梁扭曲变形。

为确保新梁的安全，对新梁在运梁车上结合液压同步顶升千斤顶进行预顶升，预顶升完全模拟运梁车驮梁状态，验证理论计算分析结果，同时也是检验施工和监控方案（见图9）。

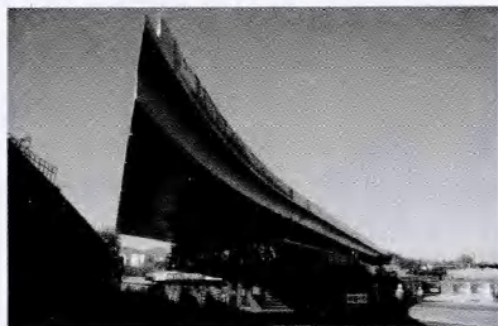


图9 对新梁进行预提升

2.3 桥梁整体安装技术核心设备—运梁车

运梁车为模块式桥梁施工运输装备，采用整

体搬运待更换桥梁驶离现场，整体搬运桥梁到达现场并整体安装施工工艺。全套设备由2台模块式自行液压动力运输车组成，多模式转向，可适应复杂的现场条件；承载能力大，拼装方便，可根据实际需要组合，适应不同重量的桥梁施工。该设备采用液压悬挂，具有平升平降功能，平台升降行程600mm，便于顶升桥梁脱离桥墩或将桥梁放置于桥墩。

桥梁整体安装技术的核心要求是必须根据桥梁的构造特点构建运输体系，整个施工过程中必须保持桥梁始终为一个平面。该项目对自行式运梁车在选型上提出以下具体要求：

(1) 需具备足够的承载力及变形协调功能，使受运结构在运输过程中不会产生过大内力以致损坏。

(2) 具备较大的升降能力，顶升油缸必须可以移动。以适应不同桥梁运输时重心位置要求，使车辆支撑中心与桥梁重心基本重合，否则运输时会造成桥梁扭曲变形，因为如此长度车辆和纵横向复合坡道现场条件，在重心失稳时必然发生车辆倾斜偏移，悬挂油缸行程满足不了调整要求，会造成车辆调节失效。

(3) 车辆必须具备重载条件下的多模式转向功能，并且这些功能的实现不能改变车辆的整体受力状态。

(4) 两辆车的并车同步控制技术，保障运输中桥梁结构安全。

(5) 具备精确定位能力，满足梁体按设计要求安装就位。

经大量调查研究，在吸收国内外SPMT运梁车的基础上，研制了两台六模块运梁车，双机由CAN总线连接为一体，可进行一体化同步操作，具备直行、横行、斜行、八字转向、中心回转等行使模式。每车设置六个大行程油缸，双机净载重达2000t以上，宽5.1m，中值高2.85m，整机长37.6m（见图10）。



图10 运梁车简况

2.3.1 运梁车的液压系统组成原理

该系统为开式系统。系统采用电液比例多路

阀控制油液方向，进而控制顶升油缸的上升和下降。使用平衡阀防止顶升缸意外超速下降，发生危险。带负载压力补偿的平衡阀安全可靠，重载下降时系统稳定性得到改善，且轻载下降时速度无明显变化。顶升缸无杆腔连接防爆阀，在液压管路突然爆裂时，迅速截断油路，防止事故发生。在液压缸的无杆腔安装压力传感器，活塞杆上安装位移传感器（见图11）。

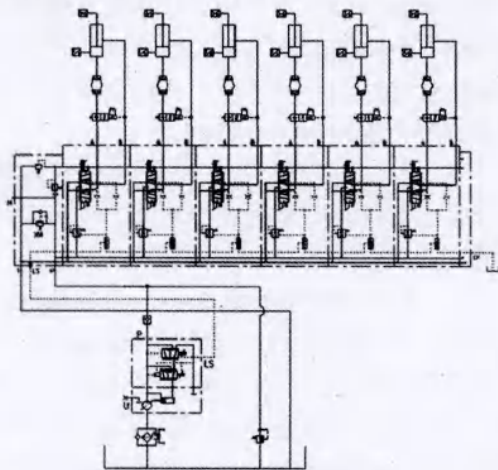


图11 液压系统原理图

该工程采用双车并联的工作方式。每个车身上安装有六个同步顶升油缸。根据桥梁结构进行精确计算后，合理的布置各个油缸的位置。控制方式主要有同等控制和主从控制，该系统采用主从控制。

2.3.2 运梁车的同步顶升原理

同步顶升系统是一个采用微处理器控制的智能化电子控制系统。本系统由一个控制器、一个显示器、六片多路阀、六个位移传感器和六个压力传感器等构成。桥梁同步顶升流程可以归结如下（见图12）：

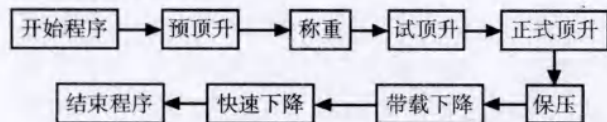


图12 桥梁同步顶升流程图

(1) 在顶升之前，由于顶升缸和桥面之间有相当的距离，为了节省施工时间，采用预顶升，使上顶升缸迅速地与桥面接触，并达到设定的压力值；

(2) 由于桥梁的不均匀性以及弹性变形，要进行称重。称重是为了找出所有顶升点的实际负载压力。缓慢向无杆腔供油，利用位移传感器

检测活塞杆位移，当产生2mm位移时随即停止供油。此时桥梁的重量完全由液压缸承载，桥梁处于悬浮状态，称重结束；

(3) 试顶升，输入一个较小的位移值，进行同步顶升；

(4) 观察各个缸的工作状态，确定无异常情况后即可进入正式顶升。利用压力和位移传感器组成的闭环控制系统，平稳的进行同步顶升；

(5) 顶升结束后进入保压阶段，利用平衡阀锁住液压油，进行桥梁的驮运与精确定位。

(6) 结束后带载下降，平稳的把桥梁落在支架上；

(7) 当桥梁的重量完全放在支架上时，就可以快速下降，把同步顶升缸快速的降到最低位置；

(8) 结束程序。

2.3.3 运梁车液压系统节能设计

节能研究充分应用在运梁车的设计制造上，运梁车的液压系统包括：动力、执行、控制、辅助等部分。工作过程中存在三次能量转换，分别是在液压泵中形成高压油时机械能转化为压力能、执行装置工作时将压力能转化为机械能及油液在系统中运行所产生的热量。能量的转换伴随着能量的损失。运梁车的节能设计研究应包括以下几方面的内容：

(1) 提高元件本身的效率和减少控制该元件的能量损耗。

(2) 改善泵和发动机的匹配关系，提高发动机的运转效率。

(3) 减少压力过剩，使系统供压尽量接近于负载压力，这是液压系统节能措施的核心内容之一。

(4) 减少流量过剩，这也是液压系统节能措施的另一核心内容。

根据液压系统的工作状态，进行控制、调整液压泵—液压执行器负载的匹配是提高系统能量利用和降低无功损耗的重要途径，这是液压系统调节控制节能的具体办法。在运梁车的设计过程中分别对其驱动和转向系统进行了节能设计，力求减少系统的流量和压力损失。

2.3.4 底支架平衡自适应液压系统

由于梁体不论是在临时场地的预制，还是移动过程中与运梁车的接触，各种不同的支撑状

况,都需要进行专门的支架方案设计,特别是梁体与运梁车之间的支架方案,不但要考虑能把梁体反力均匀分布到运梁车,不致使运梁车损坏,还要保证空间尺寸和举升能力能够实现需要的升、降高度,满足运输路线通过要求;更要考虑运输过程中,能对梁体提供可靠支撑,保证梁体受力状态,实现对被驮运梁体的姿态控制。

被驮运桥梁的姿态控制技术是运梁车的核心技术,它要求梁体在驮运过程中应始终保持每个单元间相对位移控制在一定范围内,以使其内应力不超过应力极限。

车辆液压悬挂调平是基础姿态控制,主要负责完成路面凹凸不平、存在纵横坡度的道路时进行自伺服悬挂升降,保持车桥始终处以一个平面之上,各模块车之间用比例阀连接,三点平衡。轮轴安装在悬挂上,可左右摆动,以适应路面的横向坡度。液压悬挂可以进行自伺服升降,升降幅度60cm(见图13)。

运梁车上支架,是实现精确姿态控制的保证。该支架设计应根据梁体容许的应力变化、外形变化条件,以及运输路线道路高程变化情况,进行专门的分析、设计。一般首先在运梁车上使用大刚度均载梁,以分散梁体重量,再通过垫块、支座、千斤顶系统,实现对梁体姿态的保持和控制。随着液压同步顶升千斤顶技术的完善和成熟,使用全电脑自动控制精密同步顶升千斤顶,实现对梁体姿态的精确动态调整成为可能,是实现SPMT工法的有利保证。



图13 车辆液压悬挂调平动态演示

2.3.5 运梁车的同步控制

两台模块式液压驱动车联合作业同步控制是工程施工顺利进行的保障,采用技术有:并行车辆采用CANBUS总线进行单车和联动组网控制;所有比例控制输出自带保护功能;增加系统的可靠性,车灯控制具有短路保护功能,有效保护输出线路;整车控制采用欧洲流行的车用

CANOPEN应用层协议软件包;通过多子网通讯,连接更加方便;CANBUS纠错,抗干扰性能好是目前车辆专用网络;通过CAN网双车进行同步控制,动态调整行进状态,由软件编写完成;系统设置线控子网、并车子网、单车主控,方便实现联合控制。

2.4 梁体姿态保持调整系统

切割后的旧板、新桥预制安装成为整体后,在驮运支撑工况及移动过程中的应力和变形有严格要求,在大量三维模拟计算分析的基础上,在运梁车上设置均载梁,均载梁上安装同步顶升液压千斤顶,动态调整异形板各支撑点顶力,以均载梁和同步顶升千斤顶为支架系统,实现各工况梁体姿态保持和调整。

根据纵横坡度的变化,依据计算得出的桥梁结构变形警戒值(见图14),计算出:

- 1) 各个油缸调整的位移。
- 2) 调整油缸所需的液压油的体积。
- 3) 系统调整所需时间。

根据计算结果,选定了液压系统元器件的型号,液压系统的调节时间可以保证支反力和位移不超限,车辆可以连续正常行驶。

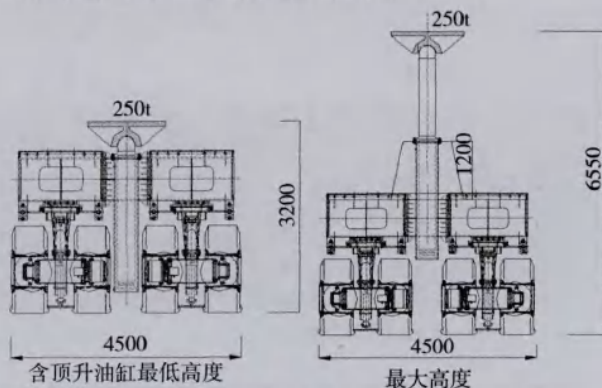


图14 实现工况梁体姿态保持与调整警戒值计算

2.5 高精度同步顶升千斤顶系统预顶升

如前所述旧板和新梁为实现不同目的,均采用了计算机自动控制高精度24点千斤顶同步预顶升系统,动态调整各支点反力大小,同步精度达到毫米级,满足桥梁结构容许变形要求。结果表明,系统操作安全、适用、可靠,通过操作过程数据对比,也验证了各工况理论分析结果的正确性。该系统既具以下特点:

- (1) 液压系统能够提供足够的承载能力,

并且加载控制精度满足需求;

(2) 具备能够协调多点运动关系的整体控制能力;

(3) 集成的控制系统能够智能集中操作分散布置在大范围内的液压缸执行机;

(4) 操作人员能够实时监控各液压缸的压力、位移,检测压力、位移的变化趋势、历史纪录等,而且对于泵站各阀件的工作状态也能够实时监控。

2.6 研制了国内首台900t升降梁机。

根据项目情况,专门研究、设计制造了提升能力为900t级的自行液压提、降梁机,能够将切割后的旧板提升、降低4m~5m行程,以便于旧板快速破碎拆除。实施过程中运梁车将旧板运至临时破碎场地,提梁机自行就位,由提梁机将旧板提起,运梁车退出临时场地,然后提梁机将旧板提至距地面1.2m左右的高度,下部用编织袋填土做支撑,最后用破碎炮集中解体旧梁。

2.7 三维微调液压千斤顶设备辅助梁体精确就位

新梁采用三维微调设备辅助梁体精确就位,设置4台三维微调仪布置于桥梁四角,6台微调从动仪布置微调仪之间(见图15)。调整仪外框焊接固定在均载梁上方。

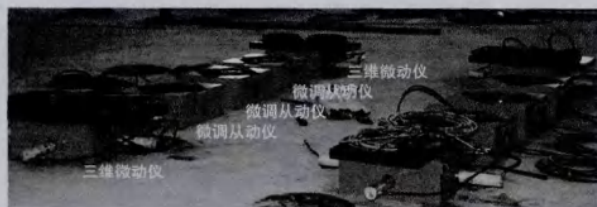


图15 三维微调仪与微调从动仪在桥梁布局情况

(上接第10页)

(6) 将次索网索穹顶的主次结构索网视为一个整体,共同在地面累积拼装,然后利用周边钢结构作为支座,同步牵引结构至高空张拉成型。该方法有利于减少高空作业,降低施工难度,同时大大节约了施工工期,降低了施工措施费,具有良好的经济效益和社会效益。

(7) 研究中发现:在张拉过程中主结构拉索索力监测值与全过程分析模拟值吻合得较好,而由于不锈钢拉索较大的应力松弛,屋面拉索内

三维微调仪垂直方向顶顶力100t行程50mm,水平方向顶顶力20t行程160mm。水平方向顶对称2个油顶油路联通,可完成顶推、锁死、随动三个动作。

新桥就位分两步:(1)由一体机行驶调整进行粗定位,粗定位精度可控制在5cm之内;

(2)由微调调整万向千斤顶精确定位,定位精度5mm。

3 结语

液压技术和设备的成功集成应用是桥梁整体安装工法的技术核心,该工法在国内首次成功应用于桥梁整体置换,可以最大程度减少现场施工时间,提高施工质量,提高工作区施工和交通通行安全,减少施工对环境的影响,提高施工能力,最大程度降低大量车辆绕行造成的资源消耗和人员时间浪费,社会效益、经济效益显著,具有极高的推广价值。

随着液压技术的进步,计算机自动控制水平的提高,桥梁整体安装工法应不断改进,逐步具备更强大、更稳定可靠的功能,以满足工程需求。

参考文献

- [1] 杨冰,杨文忠,宣鹏,秦大航. 自行式模块化运梁车桥梁整体安装技术的应用研究[J].
- [2] 杨文忠. 异形正交异性钢箱梁在旧桥改造工程中的应用[J].
- [3] 勘立军,徐丽杰,赵静一,卢九章,王昕煜. 基于SPMT技术的桥梁驮运架一体机[J].
- [4] 张毅,杨光值,王凤平. 金刚石无损钻切技术在桥梁改造中的应用[J].
- [5] 勘立军,卢九章,李建军. 桥梁整体置换技术在西关环岛桥梁改造工程的应用研究[J].
- [6] 许凯亮,王凤平,王昕煜,赵静一. 基于SPMT技术的驮运架一体机液压系统的节能研究[J].

力与全过程分析结果存在着一定的差距,需在结构张拉完成后,进一步对该部分拉索进行局部二次张拉,调整索力。

参考文献

- [1] 中国煤炭交易中心索穹顶结构施工监测报告[R]. 北京市建筑工程研究院有限责任公司. 2011.
- [2] 张曼生. 玻璃幕墙索网次结构与主结构共同工作性能研究[D]. 北京交通大学硕士学位论文. 2008.
- [3] 何孜孜,陈忠辉,胡正平. 中国(太原)煤炭交易中心索穹顶张拉成型与监测. 施工技术[J]. 2011.