

# 步履式顶推装置设计及应用

伍柳毅 韦富伦

(柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545005)

**摘要:**本文介绍了在桥梁多点同步连续顶推施工中,一种新的顶推装置步履式顶推装置的设计及在昆明跨铁路桥梁顶推工程中的应用。该装置采用三维仿真及有限元设计,是一套集顶推、平移、横向纠偏于一体的新一代桥梁顶推施工装置,具有模块化、体积小、重量轻、执行顶推循环动作准确可靠以及适应性广泛的特点。该装置最大优点是,装置内设滑动面,滑动面不在桥梁底部,在滑箱与滑道之间,这样在顶推过程中就改善了桥梁及桥墩结构的受力,对桥梁和桥墩几乎没有损伤。

**关键词:**跨铁路顶推步履式 多支点连续梁 超静定 有限元 SOLIDWORKS三维仿真

## 0 前言

顶推法施工是桥梁施工中重要的施工方法之一,国内外运用此方法已成功架设了许多桥梁,工艺成熟,历史悠久。传统的顶推法有步距式、连续拖拉式等,法国米约大桥采用了新的顶推方法叫楔进式顶推。我公司结合昆明南连接线高速公路跨铁路桥梁顶推工程研发的也是一种新的顶推方法,称为步履式顶推法,而步履式顶推装置的设计及应用则是这次研发的主要内容。

## 1 概述

### 1.1 桥梁概况

本桥为昆明南连接线高速公路工程,上跨南昆铁路65m+100m+65m钢混结合梁主桥,跨越南昆线铁路及拟建的2条铁路线(南昆增建二线、增建集装箱疏解线)。主桥按双向6车道设计,左右幅分离(间距0.5m),每幅桥宽16.5m,全桥总宽33.5m。跨南昆铁路线桥主桥位于直线上,全长230m,如图1。

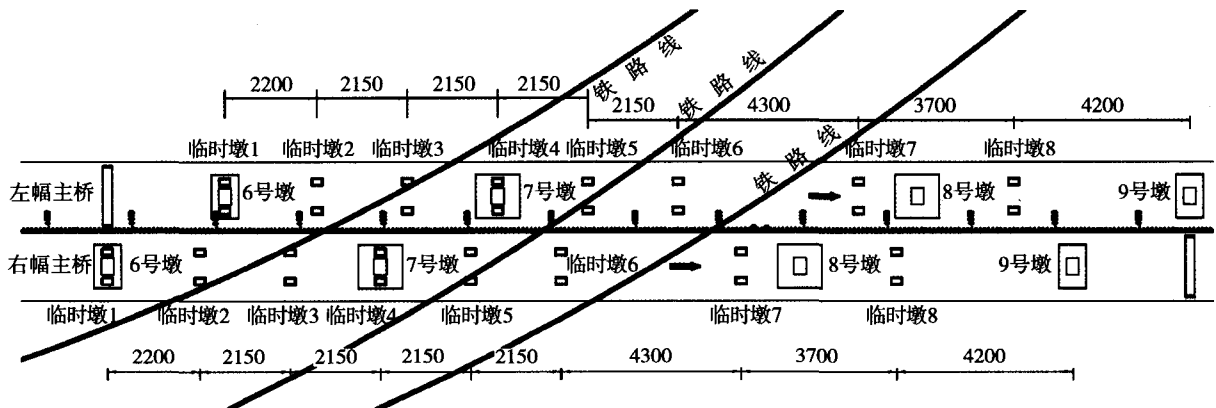


图1 跨南昆铁路线桥主桥

主桥全部位于 $R=16000m$ ,  $T=304.246m$ ,  $E=2.892m$ 的竖曲线上。主桥结合梁断面形式为:4.5m高槽形钢梁,+0.3m高钢砼桥面板,桥面单面横坡2.0%,如图2。

### 1.2 桥梁顶推施工步骤

因主桥主跨跨越铁路,根据铁路主管部门批复意见,中跨8号墩侧63m梁段及大里程侧65m边跨梁段,总共128m的架设采用顶推法施工。本桥

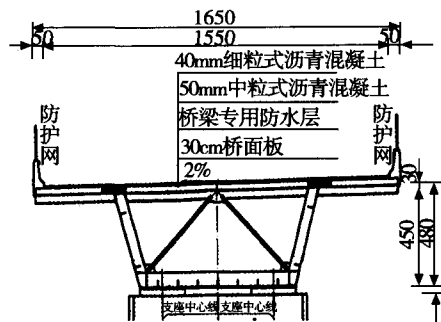


图2 主桥结合梁断面

主跨下方有铁路电气化主要干线,施工采用步履式平移顶推施工方法,无需拉设临时墩水平束,不影响铁路营运。具体施工步骤如下:

(1)如图3所示在满堂支架上开始拼装顶推段桥梁,拼装段钢梁线形必须满足设计线形要求,拼装段桥梁全长128m。

(2)如图4所示启动1~5号临时墩墩顶步履式顶推系统开始顶推,第一次顶推行走距离7m,使桥梁前端顺利行进至6号临时墩,并将桥梁临时搁置于垫梁上。

(3)如图5所示启动1~6号临时墩墩顶步履式顶推系统开始第二次顶推,第二次顶推行走距离43m,使桥梁前端顺利行进至7号临时墩,并将桥梁临时搁置于垫梁上。

(4)如图6所示启动2~7号临时墩墩顶步履

式顶推系统开始第三次顶推,第三次顶推行走距离36m,使桥梁前端顺利行进至8号临时墩,并将桥梁临时搁置于垫梁上。

(5)如图7所示启动4~8号临时墩墩顶步履式顶推系统开始第四次顶推,第四次顶推行走距离42m,使桥梁前端顺利行进至9号主墩,并将桥梁临时搁置于垫梁上,完成梁段的顶推过程。

(6)如图8所示各点临时墩顶竖向顶升机构同时顶升梁体,使各墩垫梁脱离梁底5cm,拆除各临时墩垫梁。

(7)如图9所示各点临时墩顶竖向顶升机构逐级回落,按照9号→7号的顺序每次下落10mm,依次循环,直至全桥支撑于永久墩支座上,各点临时墩顶竖向顶升机构继续回落,撤除顶推设备,拆除临时墩。

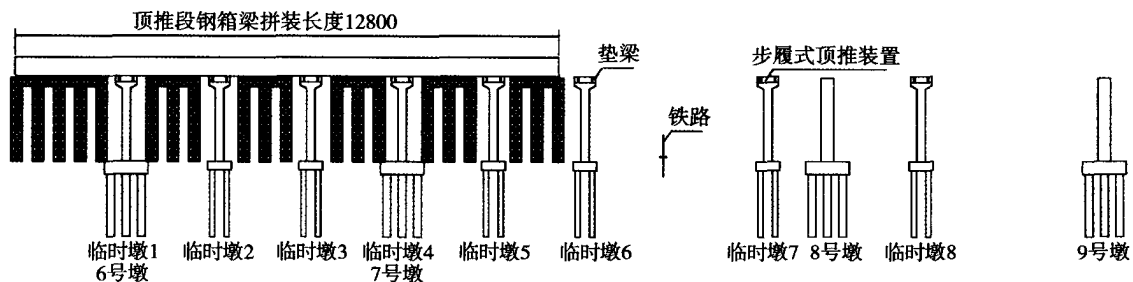


图3 桥梁顶推施工步骤1

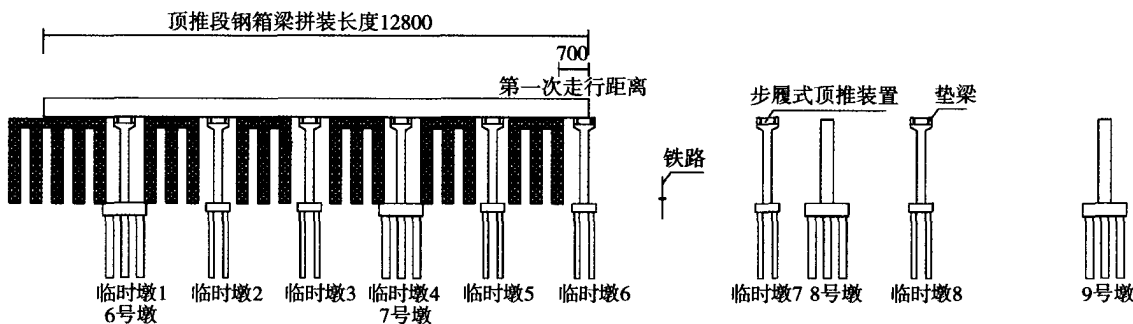


图4 桥梁顶推施工步骤2

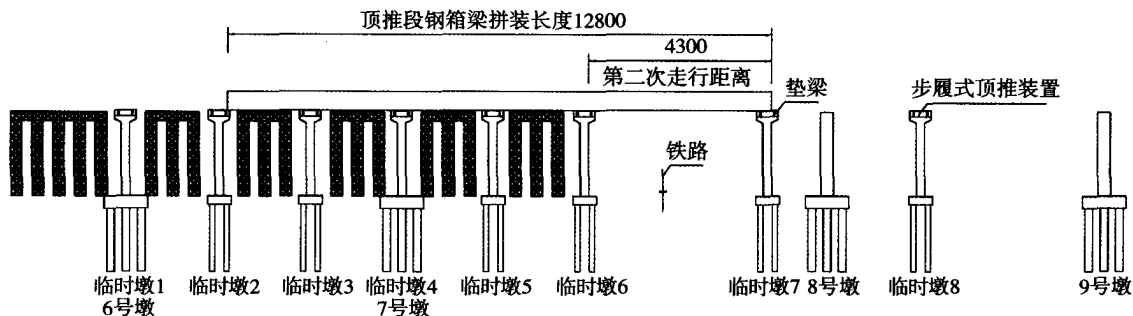


图5 桥梁顶推施工步骤3

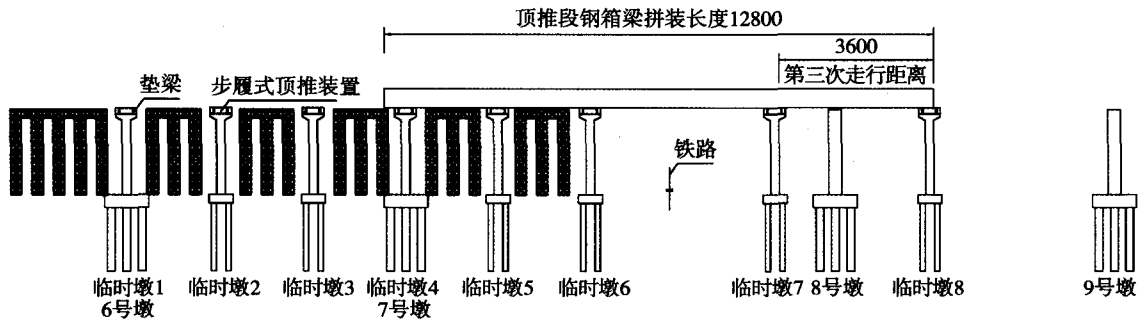


图6 桥梁顶推施工步骤4

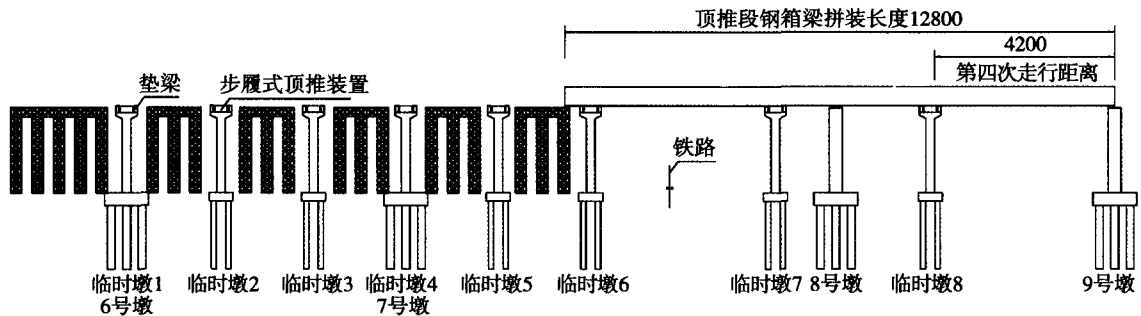


图7 桥梁顶推施工步骤5

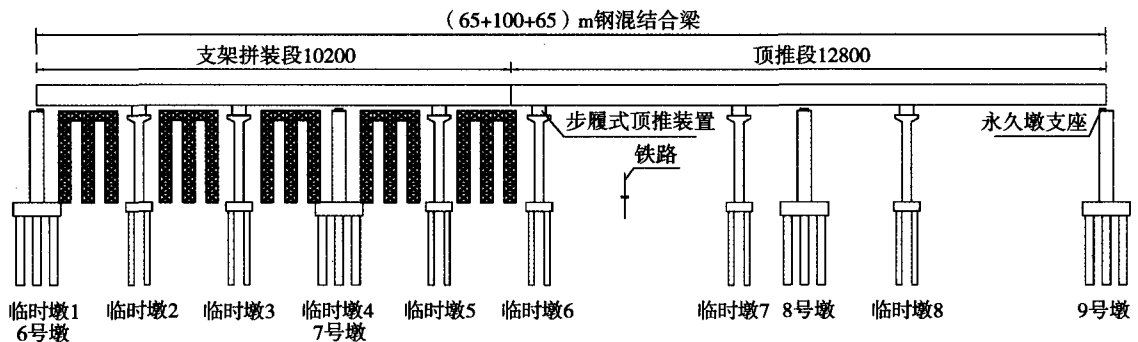


图8 桥梁顶推施工步骤6

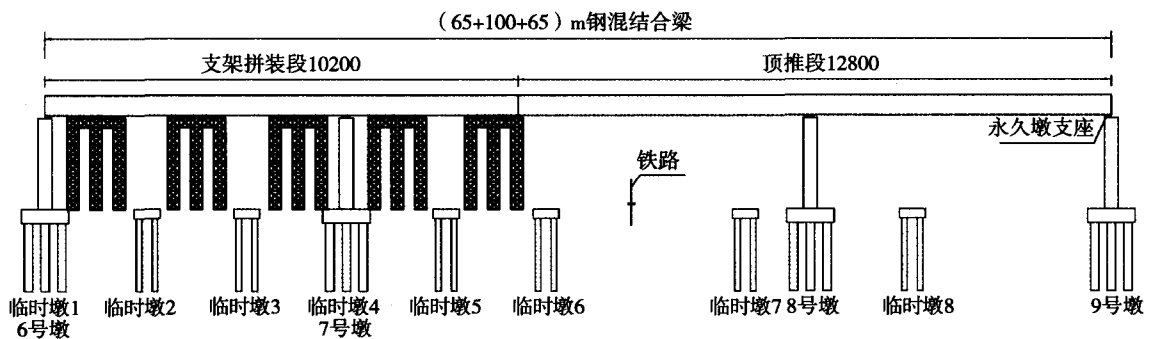


图9 桥梁顶推施工步骤7

## 2 步履式顶推装置的设计

### 2.1 步履式顶推装置设计要点

- (1) 同步性要求：顶升同步要求同墩两侧  $\leq 4\text{mm}$ ，各墩  $\leq 5\text{mm}$ ；同侧顶落同步要求  $\leq 4\text{mm}$ ；
- (2) 考虑最不利工况，每幅桥设8个临时墩，

8套顶推设备，最不利情况为3个墩受力，负载转换垫梁尺寸  $0.5\text{m} \times 1.6\text{m} \times 1.5\text{m}$ ，步履设备扩散长度  $1.0\text{m}$ ，垫梁有足够刚度、长度，以保证桥梁由腹板受力安全；

- (3) 要考虑平曲线与竖曲线上顶推对施工

的影响,垫梁高度需要用橡胶垫根据曲线的变化进行实时调整,顶推过程中必须实时监测桥梁中轴线偏位,实时横向纠偏。

## 2.2 步履式顶推装置顶推循环步骤

第一步:如图10所示,设备就位。

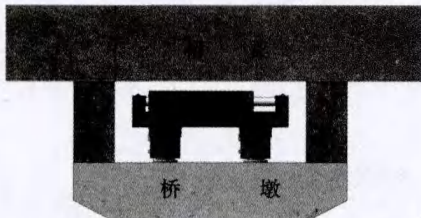


图10 步履式顶推装置顶推循环1

第二步:如图11所示,滑箱接触到桥梁底部。

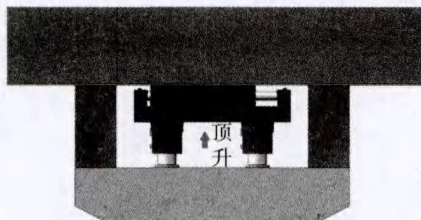


图11 步履式顶推装置顶推循环2

第三步:如图12所示,顶升千斤顶顶起桥梁,桥梁底部脱离垫梁。

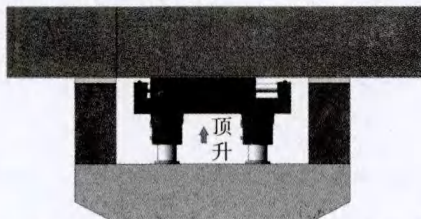


图12 步履式顶推装置顶推循环3

第四步:如图13所示,平移千斤顶顶推滑箱,滑箱带动桥梁向前平移1个顶推行程。

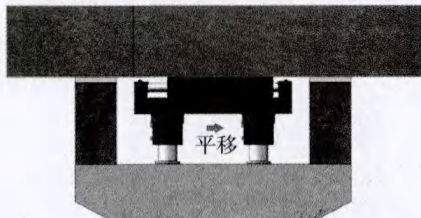


图13 步履式顶推装置顶推循环4

第五步:如图14所示,顶升千斤顶回程,桥梁落于垫梁上。

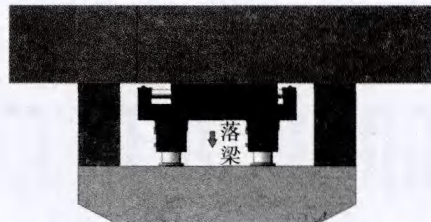


图14 步履式顶推装置顶推循环5

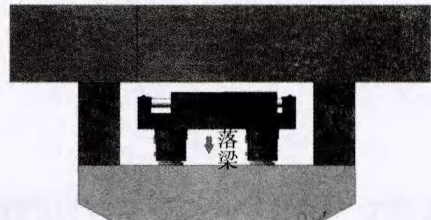


图15 步履式顶推装置顶推循环6

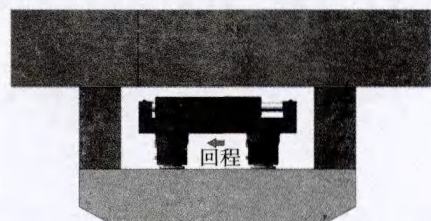


图16 步履式顶推装置顶推循环7

## 2.3 步履式顶推装置结构设计

BDT1200步履式顶推装置包括1个滑箱、1个滑道,4个四氟滑板、4台顶升千斤顶、4台平移千斤顶、4套纠偏装置,其结构如图17。本装置采用SOLIDWORKS三维建模,并进行动态仿真,来满足顶升、平移、纠偏动作在控制范围内,机构在执行动作时不会产生干涉现象,有力的保证了装置的可靠性。本步履式顶推装置与液压泵站(动力源)及PLC中央控制系统配套使用。

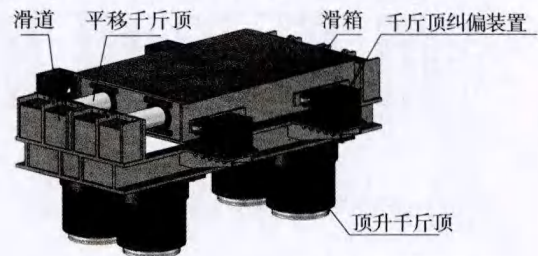


图17 步履式顶推装置

### 2.3.1 滑道设计

滑道如图18所示是由滑道主体、滑板、套筒组成,滑道主体上面放置滑箱和千斤顶纠偏装置,滑板与滑箱底面接触来减小滑箱在移动时的摩擦力,套筒用于安装和固定顶升千斤顶。套筒



是螺栓连接的，可更换不同直径的套筒来适应不同吨位的顶升千斤顶，从而适应不同吨位的桥梁顶推工程。滑道上的滑板分四块，固定滑板的固定条有一边是采用螺栓连接的，这样有利于更换滑板易损件。滑道可沿长度方向从中间一分为二，而不影响分开后两边的结构受力，这样用型钢把两边连起来可适用不同尺寸的桥梁顶推。

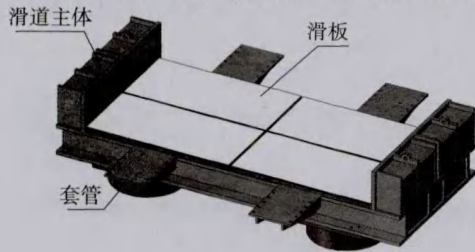


图18 滑道结构

### 2.3.2 滑箱设计

滑箱的圆筒内安装平移千斤顶，滑箱底面焊接有一块镜面不锈钢板与滑道上的四氟滑板接触，在移动时减小摩擦力，其结构如图19。采用套筒式安装平移千斤顶，安装方便快捷，只要在活塞端头设计一个防转装置就可以让平移千斤顶平稳工作。滑箱可沿长度方向从中间一分为二，而不影响分开后两边的结构受力，从而适应不同桥型的顶推施工。

### 2.3.3 平移千斤顶设计

平移千斤顶是用于步履式顶推设备平移顶推的执行机构，它推动滑箱移动，滑箱带动桥梁移动。其性能参数见表1，构造如图20。活塞端头开有槽，便于安装防转装置。

圆筒内放置平移千斤顶

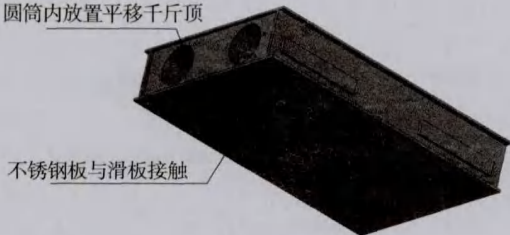
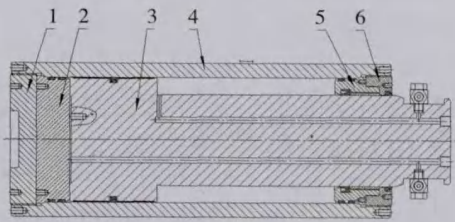


图19 滑箱结构

表1 平移千斤顶性能参数

公称油压MPa	20
顶推活塞面积 m <sup>2</sup>	3.801 × 10 <sup>-2</sup>
公称张拉力kN	600
回程活塞面积 m <sup>2</sup>	1.791 × 10 <sup>-2</sup>
行程 mm	300
质量 kg	266
外形尺寸 mm	φ 274 × 750



1.螺压板 2.堵头 3.活塞 4.油缸 5.前密封板 6.螺压环

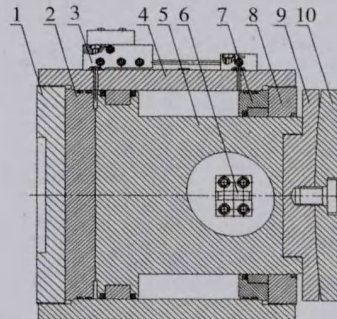
图20 平移千斤顶

### 2.3.4 顶升千斤顶设计

顶升千斤顶是顶起桥梁的执行机构，带有液压锁紧装置，可在顶升到行程后锁定行程，其性能参数见表2，构造如图21。

表2 顶升千斤顶性能参数

公称油压MPa	20
顶推活塞面积 m <sup>2</sup>	1.59 × 10 <sup>-1</sup>
公称张拉力kN	3000
回程活塞面积 m <sup>2</sup>	6.825 × 10 <sup>-2</sup>
行程 mm	200
质量 kg	950
外形尺寸 mm	650 × 680 × 616



1.定位螺母 2.大堵头 3.阀组 4.油缸 5.活塞 6.吊耳  
7.后密封板 8.后压紧环 9.球形垫板 10.球形压板

图21 顶升千斤顶

### 2.3.5 千斤顶纠偏装置

千斤顶纠偏装置用于顶推过程中，如果监测到桥梁在平移过程中中轴线偏位，千斤顶纠偏装置可进行实时横向纠偏，保证桥梁在整个顶推过程中沿着线型移动。其技术性能参数详见下表3，构造如图22。

表3 千斤顶纠偏装置技术性能参数

公称油压MPa	20
顶推活塞面积 m <sup>2</sup>	7.85 × 10 <sup>-3</sup>
公称张拉力kN	200
回程活塞面积 m <sup>2</sup>	4.54 × 10 <sup>-3</sup>
行程 mm	120
质量 kg	103
外形尺寸 mm	550 × 350 × 380



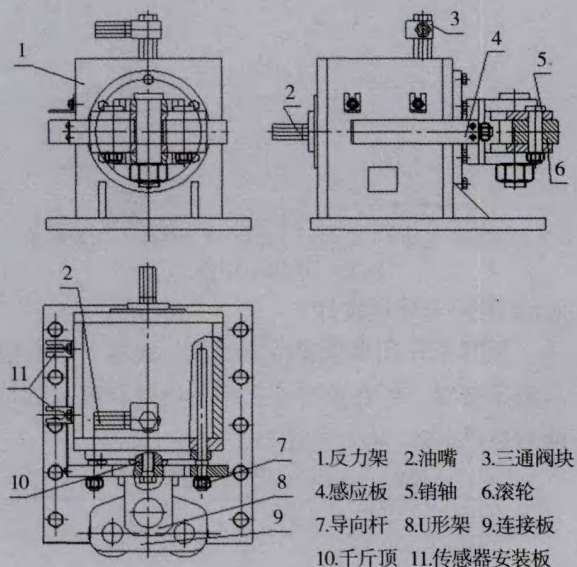


图22 千斤顶纠偏装置构造示意图

### 3 步履式顶推装置有限元分析

#### 3.1 顶推全过程支点反力及桥梁弯矩计算

顶推过程桥梁可看成简支连续梁结构，步履式顶推装置可看成支点，可将桥梁重简化成竖向力作用。桥梁全长128m，顶推总重量1800t，桥梁单位长度上的自重荷载为：

$$q = \frac{1800 \times 1000 \times 10}{128} = 140625 \text{ N/m} = 140.6 \text{ kN/m}$$

顶推过程桥梁是一个连续的平移过程，顶推装置所承受桥梁的压力以及桥梁的弯矩是不断变化的，选取顶推全过程几个关键点来计算桥梁的支点反力（即顶推装置承受的压力）以及桥梁的弯矩，求得整个过程中顶推装置的最不利工况，用最不利工况来设计步履式顶推装置，另外还可以看到桥梁在整个顶推过程中所承受的弯矩变化。

按照顶推顺序，当顶推走行距离7m，桥梁前端即将行进至6号临时墩时作为第一次计算点，计算简图见图23。

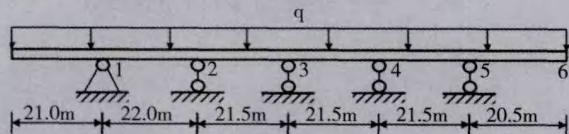


图23 昆明跨铁路桥顶推计算简图1

由于这是多支点连续梁超静定结构，可用有限元求解得各支点反力（见表4）：

表4 第1次顶推到位各支点反力

支点（步履式顶推装置）	支点反力FY (kN)
1	2994
2	537
3	2002
4	547
5	2919

用有限元求解得128m桥梁弯矩图（单位：kN·m），见图24。

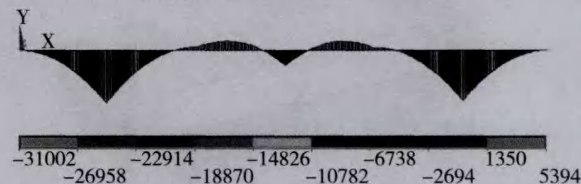


图24 昆明跨铁路桥顶推桥梁弯矩图1

当顶推走行距离43m，桥梁前端即将行进至7号临时墩时作为第二次计算点，计算简图见图25。

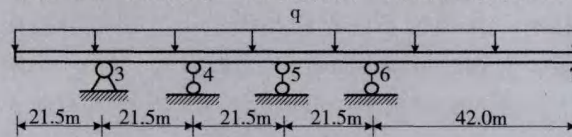


图25 昆明跨铁路桥顶推计算简图2

用有限元求解得各支点反力（见表5）：

表5 第2次顶推到位各支点反力

支点（步履式顶推装置）	支点反力FY (kN)
3	2881
4	1607
5	-2649
6	7161

用有限元求解得128m桥梁弯矩图（单位：kN·m），见图26。

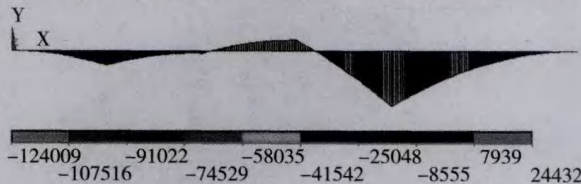


图26 昆明跨铁路桥顶推桥梁弯矩图2

当顶推走行距离36m，桥梁前端即将行进至8号临时墩时作为第三次计算点，计算简图见图27。

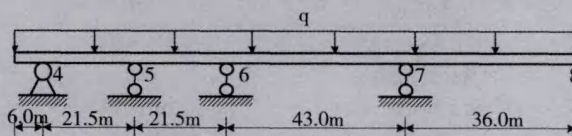


图27 昆明跨铁路桥顶推计算简图3

用有限元求解得各支点反力（见表6）：



表6 第3次顶推到位各支点反力

支点(步履式顶推装置)	支点反力FY(kN)
4	1018
5	2065
6	725
7	5190

用有限元求解得128m桥梁弯矩图(单位: kN·m), 见图28。

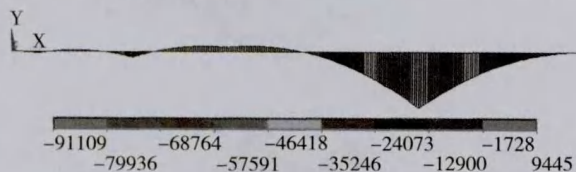


图28 昆明跨铁路桥顶推桥梁弯矩图3

当顶推走行距离42m, 桥梁前端即将行进至9号主墩时作为第四次计算点, 计算简图见图29。

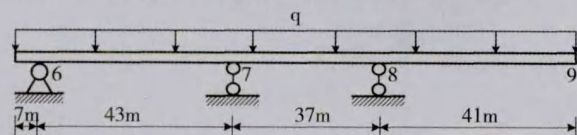


图29 昆明跨铁路桥顶推计算简图4

用有限元求得各支点反力(见表7):

表7 第4次顶推到位各支点反力

支点(步履式顶推装置)	支点反力FY(kN)
6	2040
7	1183
8	5776

用有限元求解得128m桥梁弯矩图(单位: kN·m), 见图30。

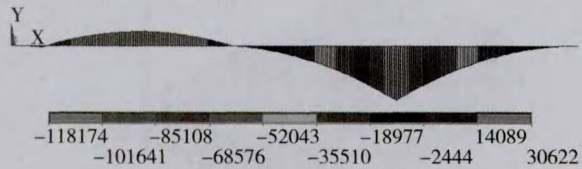


图30 昆明跨铁路桥顶推桥梁弯矩图4

### 3.2 步履式顶推装置主体结构有限元分析

#### 3.2.1 有限元模型的建立

步履式顶推装置主体结构包括滑道和滑箱, 用SOLIDWORKS三维软件建模, 模型如图31和图32所示。滑箱和滑道都采用Q345B钢板制造。在仿真过程中, 事先不知道结构是否会发生屈服, 所以有限元计算中需要考虑材料非线性。本次分析中选取双线性随动强化来进行仿真计算, 对于Q345钢板其材料参数见表8。

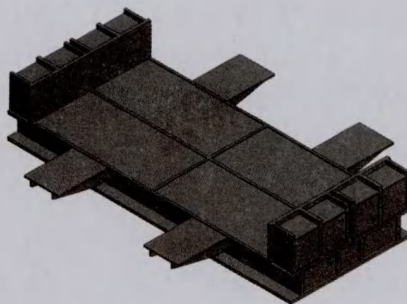


图31 滑道模型

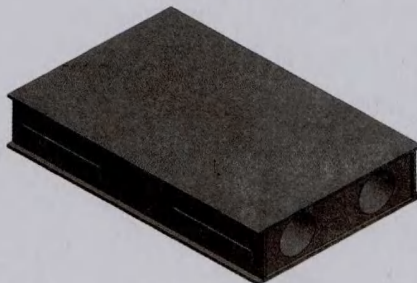


图32 滑箱模型

表8 Q345B 钢材参数表

密度	7850 kg/m <sup>3</sup>
弹性模量	200GPa
泊松比	0.3
屈服强度	345MPa
切线模量	1.45GPa

#### 3.2.2 施加载荷与约束

从图33可知桥梁通过2000mm×200mm×50mm的橡胶垫传力到滑箱, 滑箱传力到滑道, 滑道传力到4台顶升千斤顶, 在顶推过程中滑道和滑箱还受到2台平移千斤顶的力, 如果要纠偏滑箱和滑道还受到纠偏力。桥梁分配到支点的力前面已经计算出来了各个顶推步骤的情况, 其中最大支点反力是出现在顶推步骤2处为7161kN, 水平推力按7161×0.1=716kN计算, 纠偏力按纠偏顶的最大纠偏能力200kN计算, 把滑箱和滑道分离出来进行分别计算。

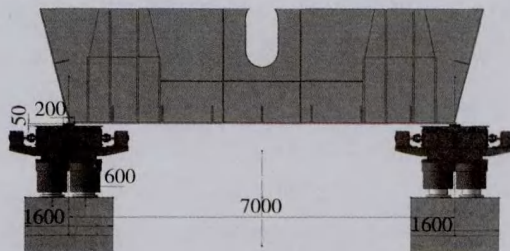


图33 步履式顶推装置顶推正视图

对于滑箱，在滑箱顶面中心2000mm×200mm×50mm区域内施加7161kN的竖向力，在滑箱安装平移千斤顶的套筒内施加716kN的水平推力，在滑箱与纠偏装置接触位置施加横向200kN推力，把滑箱与滑道接触的底面做固定约束。

对于滑道，在滑道与滑箱接触的面施加7160kN的竖向力，在滑道与平移千斤顶活塞接触位置施加716kN的水平推力，在滑道与纠偏装置底座接触位置施加横向200kN的推力，把滑道与4台顶升千斤顶接触位置做固定约束。

### 3.2.3 网格划分

滑箱和滑道单元尺寸均取为20mm；采用二阶四面体单元来划分网格。网格划分结果如图34和图35所示。

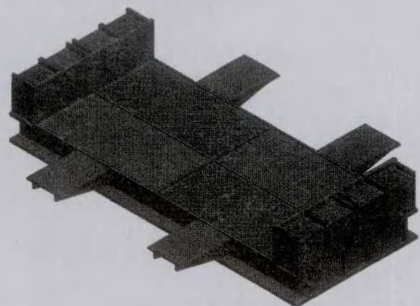


图34 滑道网格

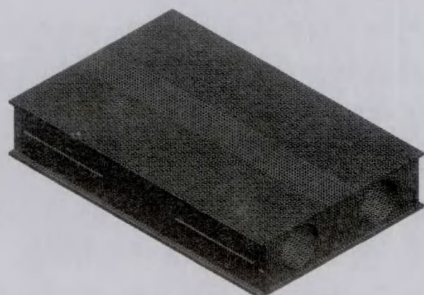


图35 滑箱网格

### 3.2.4 计算结果

从图38和图40变形云图可以看出，滑箱和滑道处在最大工作载荷时的变形都很小，滑箱是0.3mm，滑道是0.6mm，满足刚度设计规范要求。从图36、图37和图39应力云图看，滑道和滑箱大部分Von Miss应力都在100MPa以下，滑道应力较大区域主要发生在滑道与滑箱的接触面上以及各千斤顶与滑道的接触面上，最大Von Miss应力为220MPa，滑箱应力较大区域主要发生在桥梁与滑箱接触面，滑箱与滑道接触面上以及各千斤

顶与滑箱的接触面上，最大Von Miss应力为255MPa。可见滑道和滑箱的等效应力在安全范围内，满足强度设计规范要求。

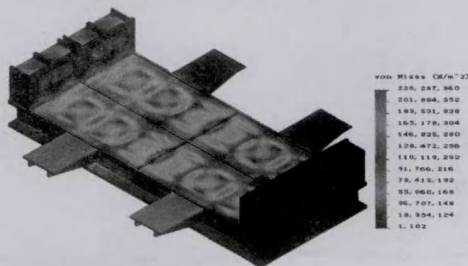


图36 滑道应力云图1

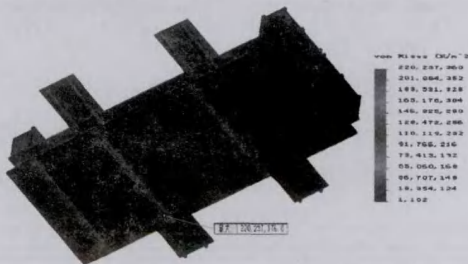


图37 滑道应力云图2

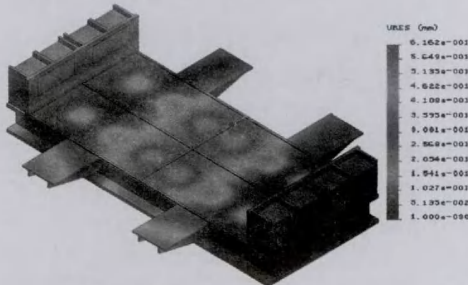


图38 滑道变形云图

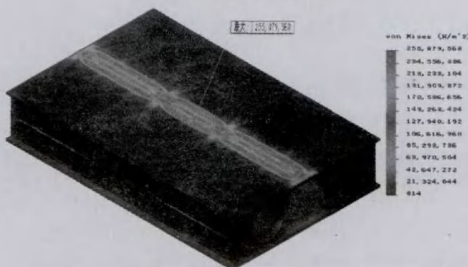


图39 滑箱应力云图

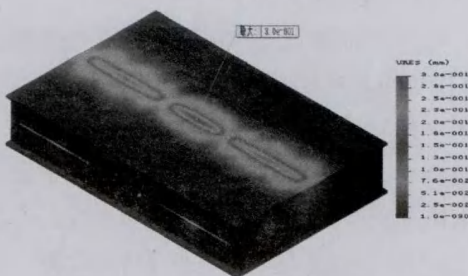


图40 滑箱变形云图 (下转第23页)



(2) 通过某一实际工程模型, 采用 etabs2013 软件中两种不同单元并联连接共同作用进行时程分析; 在罕遇地震作用下, Isolator1 单元在荷载组下拉应力的明显减小, 而 U2、U3 方向特征参数没有改变, 说明隔震橡胶支座的剪应力以及上部的结构加速不改变。本文对隔震橡胶支座力学性能的模拟是准确的, 该方法可以应用在实际工程隔震结构的时程分析中。

(上接第20页)

#### 4 工程应用

2013年12月初右幅桥梁开始进行正式顶推施工。顶推初始, 该装置就发挥其优越性, 在1小时内, 长128m桥梁推进2.35m。12月8日, 顺利顶推49m, 到达7号临时墩, 成功跨越铁路, 完成了此项目中最关键的施工。12月18日右幅128m桥梁顶推到位。2014年1月5日开始正式顶推左幅桥梁, 1月11日顺利将128m桥梁顶推到位。整个工程本装置的平均顶推速度达到2.5m/h, 达到了施工设计的顶推速度要求。下面图41、图42和图43是昆明跨铁路桥顶推现场施工照片。

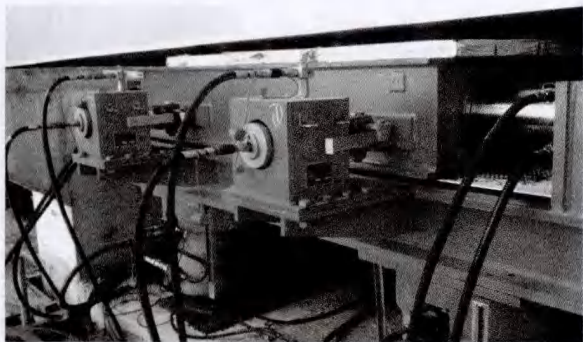


图41 施工中的步履式顶推装置



图42 顶推中的桥梁

- 参考文献
- [1] 周福霖. 结构减震控制[M]. 北京: 科学出版社, 1997
  - [2] 刘文光. 橡胶隔震支座力学性能及隔震结构地震反应分析研究[D]. 北京工业大学博士学位论文, 2003
  - [3] GB50011-2010, 建筑抗震设计规范[S]. 中国建筑工业出版社, 2010
  - [4] 北京金土木软件技术有限公司. ETABS中文版使用指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004
  - [5] 吴任鹏. 考虑橡胶支座拉压刚度不同取值对隔震效果的影响研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2008, 30(5): 24-28.



图43 顶推到位的右幅桥梁

#### 5 结论

在整个顶推过程中, 由于滑动面不在桥梁底部, 在滑箱与滑道之间, 这样就改善了桥梁及桥墩结构的受力, 对桥梁和桥墩几乎没有损伤, 本步履式顶推装置体积小重量轻, 整套装置重量在10吨左右, 采用电液比例控制, 实现同步控制, 及配有过载保护模块, 提高了装置的安全可靠性。由于主体结构采用模块化设计, 对于不同的桥型及线型变化的顶推施工只需很小改动就能满足要求, 提高了本装置的适应性。

本顶推施工的桥梁底存在多段预拱度曲线、变厚度底板和支点不断变化的情况, 如何落梁和顶推施工也是关键问题。我公司经过大量的模拟计算提供了落梁和顶推施工方案, 使得昆明步履顶推施工能够顺利完成, 不仅获得业主单位的肯定和专家的好评, 同时也标志着欧维姆公司的步履式顶推装置从研发阶段, 迈向了实际工程应用创造经济效益的阶段。

参考文献

- [1] 上官兴等. 连续梁桥顶推技术的新探索[C]. 湖南公路学会论文集, 1995.
- [2] 张军辉. 大吨位连续桥梁跨多条铁路线顶推施工技术[J]. 铁道建筑, 2006(8):14-17.
- [3] 中华人民共和国建设部. GB 50017-2003, 钢结构设计规范[S]. 中国计划出版社, 2003.