

# 多跨简支拱形钢桁梁桥拖拉施工及监控技术

刘国飞<sup>1,2</sup>

(1. 铁正检测科技有限公司, 山东 济南 250014; 2. 中铁十四局集团有限公司)

**摘要:**官厅水库特大桥主桥为 $8\times 110$  m简支拱形钢桁梁桥,根据现场实际情况选用“逐孔拼组、分段拖拉、整桥到位”的多点拖拉法架设施工,利用桥墩结构安全保护、多点拖拉同步控制、不同拖拉系统间的荷载分配及梁跨体系转换、高位落梁等关键技术,实现了钢桥架设施工难题。该文介绍拖拉施工的作业程序和优势特点,同时,对大桥施工进行全过程实时监控,提出适用于大跨度拱形钢桁梁的监控内容、监控方法和测点布置。通过综合运用以上技术,成功实现多跨简支拱形钢桁梁的架设施工。

**关键词:**铁路桥梁;钢桁梁;施工技术;施工监控;拖拉法;简支

## 1 工程概况

新建北京至张家口铁路工程官厅水库特大桥位于河北省怀来县东花园镇与狼山乡之间,主桥跨越官厅水库,其孔跨布置为 $8\times 110$  m简支拱形钢桁梁桥,对应墩号为227<sup>#</sup>~235<sup>#</sup>。各墩墩身高度为19.456~20.074 m,其中227<sup>#</sup>和235<sup>#</sup>边墩墩身截面尺寸为4 m $\times$ 4 m,墩顶水平力允许值为1 240 kN;228<sup>#</sup>~234<sup>#</sup>主墩墩身截面尺寸为5 m $\times$ 4 m,墩顶水平力允许值为1 700 kN。单跨简支拱桥梁长为109.7 m,共10个节间,节间长度为10.8 m,单孔计算跨度为108 m,最大梁高为19.0 m。钢桁梁制造时通过上弦杆加长形成预拱度。

该桥施工工期紧、质量要求高,无类似工程实例可以借鉴,且官厅水库为一级水源保护地,架设施工首先需要考虑最大程度降低对水库资源的影响。综合考虑施工周期、安全风险、经济效益、技术难度等因素,在多次方案论证的基础上,最终确定采用拖拉架设的方案予以实施。

## 2 工程难点与关键技术

根据拖拉对象的拼组状况,可分为整孔拖拉法和分段拖拉法,整孔拖拉法需将拖拉对象一次拼装成型,

整体拖拉到位,需要和钢桥长度匹配的拼装平台及较为繁杂的拖拉系统;分段拖拉法即根据施工现场情况,将钢桥分段拼组,然后逐步拖拉施工。

该桥为 $8\times 110$  m简支拱形钢桁梁桥,单孔钢梁重量约为1 865 t,基于桥墩墩顶的水平承载能力,提出了“逐孔拼组、分段拖拉、整桥到位”的单向拖拉施工方法,要保证该施工方法的有效实施,需解决以下技术难题。

### 2.1 桥墩结构安全保护技术

钢桥拖拉施工的前提是桥墩的结构安全,为确保拖拉过程中桥墩的结构安全,采取了双重保护措施:滑道梁的结构构造保护和拖拉系统拖拉力极值的安全控制保护。

(1) 结构构造保护技术。钢桥拖拉时的驱动装置为千斤顶,不同于单孔桥梁的拖拉施工,该钢桥拖拉过程中,桥墩既要支承钢梁,又需要固定千斤顶,即钢桥拖拉过程中的滑道梁需要兼顾竖向荷载和水平荷载的作用,为保证滑道梁承受水平拖拉荷载时桥墩的结构安全,提出采用门架滑道梁的结构构造保护技术,滑道梁横梁跨越墩帽,其立柱支承于桥墩承台上,横梁与墩帽间设置滑块。拖拉施工时,由于横梁可在墩帽滑移,故桥墩墩顶所承受的水平荷载仅为竖向荷载与摩擦系数的乘积,千斤顶的水平反力多数转化为门架立柱轴力,从而确保桥墩的结构安全。

(2) 拖拉力极值安全控制技术。拖拉施工过程中

收稿日期:2020-04-11(修改稿)

基金项目:山东省技术创新项目(编号:201720701021)

作者简介:刘国飞,男,硕士,高级工程师, E-mail:276503613@qq.com

中,对桥墩安全产生影响的直接因素是拖拉系统的水平拉力,其反作用于桥墩墩顶,为保证拖拉系统拉力极值不超过桥墩墩顶水平荷载容许值,拖拉系统的拖拉油缸安装了轴力传感器,同时在液压泵站设置溢流阀。拖拉作业时,通过监控轴力传感器数值可实时监控桥墩墩顶水平荷载大小,同时,通过在液压泵站溢流阀设定最大压力值,可确保拖拉油缸所输出的最大拖拉拉力,来实现对桥墩的结构安全保护。

2.2 多点拖拉作业的同步控制技术

拖拉施工时,须保证钢桁梁前进过程中的左右同步及不同梁跨纵向拖拉同步,左右两侧不同步将导致钢桁梁的位置偏差,不同梁跨拖拉作用不同步将引起梁跨间结构内力。为实现钢桁梁拖拉过程中的同步控制,项目实施工程中采用了4种技术手段:

(1) 拖拉系统的同步控制技术。通过电液比例控制系统,实现连续地控制钢桥左右两侧拖拉液压系统的压力、流量和方向,从设备上确保钢桥左右两侧的拖拉行程同步进行。

(2) 钢桥前移过程中的监控技术。千斤顶连接钢

绞线行程拖拉系统,鉴于钢绞线预紧力对其本身伸缩量的影响,拖拉过程中还可能导致左右两侧行程有所差异,为此,作业过程中实时对钢桁梁左右两侧的位移量进行测量反馈,发现两侧行程差超限则通过千斤顶单侧调整进行纠偏。

(3) 滑道梁纠偏限位技术。钢桁梁在拖拉前移过程中,不仅存在左右走行不同步的问题,还可能出现整体性的侧移,而在滑道梁上设置导向限位纠偏装置可有效防止侧移发生,保证拖拉行进过程中的平稳性。

(4) 钢桥轴线监测纠偏控制技术。钢桥拖拉过程中两侧主桁的不同步,将导致钢桥轴线偏位现象的发生,通过对钢桥轴线的监测实时掌握钢桥轴线偏差情况,当轴线偏差超出容许范围及时进行纠偏调整。

2.3 不同拖拉系统间的荷载分配技术

该工程采用“逐孔拼组、分段拖拉、整桥到位”的拖拉方案,施工时根据预拼钢梁跨数及桥墩墩顶水平荷载容许值,确定拖拉系统数量及油缸安装位置,图1为拖拉系统总体布置图示,钢梁不同架设阶段各拖拉系统间的荷载分配统计如表1所示。

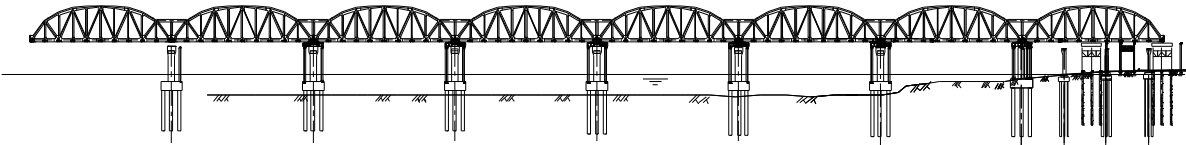


图 1 拖拉系统总体布置图

表 1 荷载分配

拖拉梁跨	拖拉系统/ 套	墩顶受力/kN	
		边墩	主墩
第 1 跨+导梁	1	1 092	0
第 1、2 跨+导梁	2	577	950
第 1~4 跨+导梁	3	860	674
第 1~6 跨+导梁	4	1 027	1 432
第 1~8 跨+导梁	5	1 112	1 522

2.4 梁跨体系转换技术

原桥设计为 8×110 m 跨简支拱形钢桁梁桥,而拖拉施工过程中的结构需为连续梁体系,故需通过“简支—连续—简支”的体系转换,实现该桥的“拼组—拖拉架设—落梁”作业,为此,设计了梁跨间的临时连接构件,将不同梁跨连为一体形成连续梁结构,待整桥拖

拉就位后,对临时连接构件进行拆除,恢复至原桥设计状态。鉴于拖拉过程中桥跨结构的体系转换,需要在拖拉架设过程及拆装作业工况对其进行受力分析以确保结构受力安全。

3 拖拉施工作业

钢桥拖拉架设作业是一个系统工程,主要涉及预拼场地处理、导梁设计与拼装、钢桥拼装与拖拉、落梁作业。

3.1 预拼场地处理

鉴于张家口侧地势平坦开阔,故将拼组场地设在 235<sup>#</sup>~245<sup>#</sup>墩之间,场地范围可同时满足导梁和两孔钢梁的拼组作业,为满足拼组和拖拉作业需要,预拼场地范围内布设有滑移支架和拼装支架。

3.2 导梁设计与拼装

为便于钢桥在拖拉前行中跨越前方桥墩及减小主梁悬臂长度和结构内力,钢桥拖拉施工时往往在钢桥前方设置临时性导梁。已有研究表明:导梁与主梁的跨度比、刚度比分别为 0.65 和 0.20 时,其结构较为经济合理,综合该桥结构特点,最终确定导梁采用变截面桁架结构,总长为 57.2 m。导梁尾部桁高为 11.0 m,导梁前段桁高为 7.0 m,按照“下弦杆—下平联—腹杆

—上弦杆—上平联—横联”的顺序进行拼装作业。

3.3 钢桥拼装与拖拉

该桥拼装拖拉采用“1+1+2+2+2”的模式进行,即首先在张家口侧拼装第 1 孔钢梁,拼装完成后向北京侧拖拉至设计位置;在拼装支架空出位置拼装第 2 孔钢梁,拼装完成后将第 1、2 孔钢梁拖拉至设计位置;在支架空出位置拼装第 3、4 孔钢梁并进行拖拉,后续循环进行直至拖拉架设完成,具体架设程序如图 2 所示。

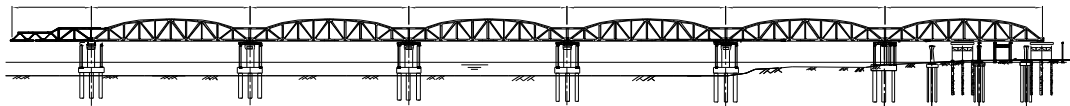


图 2 拖拉作业步骤(除标高为 m 外,其余单位:mm)

(1) 利用龙门吊机在滑移支架和拼装支架上拼装导梁和第 1 孔钢梁, 分别在第 1 孔钢梁尾端和 235<sup>#</sup>墩两侧滑道梁外设置后锚点和水平连续千斤顶, 安装钢绞线及液压泵站, 形成第 1 套拖拉系统[图 2(a)]。

(2) 利用第 1 套拖拉系统, 在竖向千斤顶配合下, 将第 1 孔钢梁和导梁分步拖拉至设计位置[图 2(b)]。

(3) 在拼装支架空余位置拼装第 2 孔钢梁及梁间临时连接构件, 将第 1、2 孔钢梁连为一体形成连续梁体系。分别在 234<sup>#</sup>墩顶和导梁 D0D1 节段设置反力座形成第 2 套拖拉系统, 同时将第 1 套拖拉系统后锚点移至第 2 孔尾端[图 2(c)]。

(4) 第 1、2 套拖拉系统同时启动, 将第 1、2 孔钢梁和导梁拖拉至设计位置[图 2(d)]。

(5) 拼装第 3 孔钢梁并利用梁间临时连接构件与第 2 孔钢梁连为一体, 再拼装第 4 孔钢梁并与第 3 孔钢梁连为一体。分别在 233<sup>#</sup>墩顶和导梁 D0D1 节段设置反力座形成第 3 套拖拉系统[图 2(e)]。

(6) 利用第 1~3 套拖拉系统将第 1~4 孔钢梁和导梁钢桥拖拉至设计位置, 分别拼装第 5、6 孔钢梁。分别在 232<sup>#</sup>墩顶和导梁 D0D1 节段设置反力座形成第 4 套拖拉系统。并利用第 1~4 套拖拉系统将钢桥向北京侧拖拉[图 2(f)]。

(7) 拼装第 7、8 孔钢梁, 并在 231<sup>#</sup>墩顶和导梁 D0D1 节段设置反力座形成第 5 套拖拉系统。利用第 1~5 套拖拉系统将整孔钢桥拖拉就位, 拆除导梁[图 2(g)]。

### 3.4 落梁就位

钢桁梁整体拖拉到位后, 拆除拖拉系统并设置落梁装置, 拆除临时杆件, 将钢梁下落至桥梁支座上。钢梁下落到正式支座前, 再进行全面测量。如有偏差, 可通过三维千斤顶对钢桁梁的纵横向位置进行调整。待钢梁平面及竖向偏差满足规范要求后, 再将钢梁下落至设计位置, 安装正式支座。

### 3.5 拖拉架设施工优势与特点

官厅水库大桥桥址处具有水深、风大、环保要求高等特点。为了降低施工对湖水水质的影响, 经过反复研究, 最终采取拖拉施工的架设方案, 其优势与特点主要体现在:

(1) 实现了岸边钢桁梁拼装工厂化作业, 杆件输送、拼装、焊接等可实现平行流水作业, 提高了施工进度和施工质量。

(2) 避免在水库中修建大量的临时支墩, 减小了后期水库清理工作量, 最大程度地避免了对水库资源

的影响。

(3) 钢桁梁拖拉作业时, 工作程序固定, 便于操作人员掌握实施, 拖拉系统部件易于检修、更换, 减少了不可控因素, 有利于施工组织安排。

(4) 钢桁梁拼组及导梁的拆装均在岸边完成, 有效规避了水中高空拼装作业, 减小了作业风险。

## 4 施工监控

因大桥结构复杂且施工过程中结构体系不断转换, 加之环境因素、材料性能和施工方法都对结构受力和变形造成影响, 需要对大桥施工进行全程监控, 以保障结构安全和施工安全。

### 4.1 监控内容

根据大桥施工顺序并参考相关规范和仿真分析结果, 制定了大桥施工监控内容, 即应力、变形和温度等附属参数监控。

(1) 桥梁拼装施工监控包括: 钢桁梁预拱度(线性)监控、钢桁梁的应力(温度)监控、临时墩沉降的监控、临时墩竖向应力的监控。

(2) 桥梁拖拉施工监控包括: 导梁、钢桁梁的挠度测量及监控; 钢桁梁及导梁的应力(温度)监控; 导梁及钢桁梁轴线偏位的监控; 滑移支架墩顶纵向水平位移的监控。

### 4.2 监控方法

#### (1) 应力(温度)监控

采用 JMZX-212HAT 弦式应变传感器进行应变和温度监控, 配套 JMZX-256 型自动化综合测试系统实现实时采集、实时处理和保存。

#### (2) 挠度(预拱度)监控

采用高精度全自动全站仪进行挠度实时监控, 用中间设站三角高程测量方法进行现场测试和数据分析。在钢桁梁拼装施工期间采用水准仪进行钢桁梁预拱度(线性)监控, 监控部位包括钢桁架各下弦整体节点处。采用全站仪进行大桥轴线监控。

#### (3) 临时墩沉降和竖向应力监控

采用 DSZ2 级水准仪配合塔尺进行临时墩沉降监控; 竖向应力监控采用 JMZX-212HAT 弦式应变传感器并配合综合测试仪进行。

### 4.3 测点布置

拱形钢桁梁在拖拉过程中的结构体系不断转换, 受力复杂, 因此测点布置需结合施工过程合理设置。结合仿真分析结果, 现场监控时挠度测点布置在钢桁



梁跨中位置、拖拉过程中悬臂端和滑块中间位置处;应力(温度)测点布置在钢桁梁跨中位置、 $L/4$  截面处上、下弦杆、腹杆、斜杆位置和导梁根部位置,同时在临时墩布置应力测点;中线测点布置在钢桁梁两端位置。图 3 为部分测点示意图。

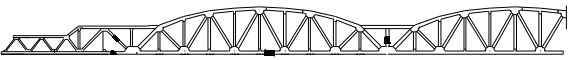


图 3 部分监控测点示意图

4.4 监控结果

施工中对大桥拼装、拖拉和落梁全过程进行了现场监控,限于篇幅,该文仅列举钢桁梁尾部  $E0'$  和导梁端部 D5 的挠度实测值和理论值进行对比(表 2),表中理论值为利用 Midas 建立空间有限元模型,进行施工过程模拟得到的仿真分析结果。

表 2 第 1~8 孔钢桁梁及导梁拖拉施工挠度监测结果

工况	钢桁梁尾部 $E0'$ /mm		导梁端部 D5/mm	
	实测值	理论值	实测值	理论值
1	-26.7	-27.9	-121.8	-124.5
2	-13.8	-15.6	-133.1	-146.3
3	—	-3.6	-190.1	-192.8
4	—	-1.3	-213.9	-240.7
5	-67.8	-69.9	—	0.4
6	-25.1	-26.3	21.7	20.5
7	-17.1	-15.6	22.2	29.3
8	—	-3.6	19.8	22.6
9	—	-1.1	-5.5	-8.5
10	-60.0	-62.3	-61.5	-67.5
11	-21.3	-22.6	-122.7	-124.5
12	-11.6	-10.1	-141.7	-146.3
13	—	2.3	-170.8	-182.9
14	—	1.2	-215.2	-240.7
15	-28.3	-33.7	—	0.4
16	-3.2	-6.6	18.2	20.5
17	—	-3.2	27.9	29.3
18	—	1.2	24.5	22.8
19	—	-0.1	-4.0	-8.5
20	—	0	-55.2	-67.4

由表 2 可知:拱形钢桁梁在拼装、拖拉及落梁施工过程中,主桥结构及导梁和临时墩应力、挠度实测结果

与理论分析结果变化规律基本一致,且均满足设计和规范要求,结构各项监控指标表现良好,结构最终实测受力状态在容许范围之内,结构状态良好,大桥施工过程中处于受控状态。

5 结论

(1) 根据桥梁结构特点和施工现场实际情况,提出了“逐孔拼组、分段拖拉、整桥到位”的单向拖拉施工方案,并通过桥墩结构安全保护、多点拖拉同步控制、不同拖拉系统间的荷载分配及梁跨体系转换等创新技术的综合运用,保障了项目的成功实施。

(2) 单向拖拉施工方案具有作业效率高、环境污染小、作业安全可靠的特点。

(3) 应力、挠度、温度等监控指标的实测结果与理论分析数据基本一致,进一步说明了施工方案、监控方案及数值模拟的科学性。

该桥于 2017 年 3 月开始拼装,2017 年 11 月拖拉到位,节约工期 7 个月。项目的成功实施可为中国大吨位、大跨度钢桁梁的架设施工提供借鉴和参考。

参考文献:

[1] 舒彬,杨超.超大跨度平行弦钢桁梁铁路桥顶推施工关键技术[J].施工技术,2017(17).

[2] 刘文武,张志才,范君.晋豫鲁铁路通道跨京广线钢桁梁拖拉法施工技术[J].铁道建筑,2014(9).

[3] 王琛,黄修平.连续拱桥施工方案比选研究[J].中外公路,2018(1).

[4] 高建学.多点同步拖拉技术在郑州黄河公铁两用桥上的应用[J].公路,2010(6).

[5] 郭明泉,姜海波,魏晓江.跨线铁路钢桁梁拖拉施工技术[J].铁道建筑,2014(7).

[6] 张建,王永光,孔祥韶,等.九堡大桥主桥顶推施工模型试验研究[J].中外公路,2017(5).

[7] 翁方文,田卿,田飞.大跨连续钢箱梁桥顶推施工控制技术[J].公路,2018(3).

[8] 王明慧,姚发海.新白沙沱长江特大桥跨既有线钢桁梁施工方案比选[J].桥梁建设,2014(6).

[9] 罗洪成,赵磊,王威,等.一种钢混结合梁的快速化施工方法[J].中外公路,2018(1).

[10] 卢向勇.厦深铁路榕江特大桥主桥施工技术方案研究[D].中南大学硕士学位论文,2014.

[11] 万家福.大跨径全焊接提篮拱主体钢结构施工技术研究[D].兰州交通大学硕士学位论文,2016.