

北盘江大桥拱圈单铰转体施工设计

何庭国 马庭林 徐勇 陈克坚 郭建勋

(铁道第二勘察设计院桥隧处 四川成都 610031)

摘要:水柏铁路北盘江大桥跨度236 m,是目前世界上跨度最大的单线铁路拱桥。该桥转体施工将单铰转体重量大幅度提升到一个新的高度。本文简要介绍北盘江大桥转体结构及转体施工的关键技术问题。

关键词:水柏铁路 北盘江大桥 钢管混凝土拱桥 球铰 转体施工

1 工程概况

北盘江大桥位于贵州省水柏铁路上,横跨北盘江“V”形峡谷,桥面距离河床280m。主桥为跨度236m的上承式钢管混凝土提篮拱。该桥是目前世界上跨度最大的单线铁路拱桥,也是钢管混凝土首次在国内铁路桥梁上应用。

主桥钢管桁架拱圈构件在工厂分单元制造,再运至现场组装、焊接。因桥位地处偏僻,交通运输不便,能运进现场的杆件最长仅能达到8.6m,故工地组装、焊接等工作量很大。为了保证安全生产,确保拼装线正确和焊接质量可靠,应尽量减少高空作业。为此,钢管桁架拱的架设采用转体法施工。

桁架杆件运至现场后,分别在两岸依地形搭建的支架上组拼焊接成半拱(扣除合龙段),然后以半拱为一转体单位,六盘水岸平转 135° ,柏果岸平转 180° ,单边转体质量达10400t。

2 转体体系及技术指标

2.1 转动体系

大吨位转体施工惯用大直径环道体系,以获得转动时较好的稳定性,丫髻沙大桥(转体质量13600余t)就采用了环道体系。但环道体系需要有宽阔、平整的施工场地,北盘江大桥桥位施工场地狭窄,拱座已靠近悬崖,不具备采用环道体系的条件。故采用了单点支撑的球铰转动体系。

转体系统由半跨拱圈、下盘、上转盘、交界墩、球铰,保险撑脚、扣锚体系等组成。转体结构示意图见图1。下盘作为整个系统的基础,埋置于基岩内。扣索由96根 $\phi 15.24$ mm钢绞线构成,

注:《水柏铁路北盘江大桥》项目获第二届欧维姆预应力技术奖三等奖。

一端固结于拱肋下弦,另一端锚固在交界墩顶。为了平衡扣索的水平张力,在交界墩顶向后斜拉背索,背索由42束 $19\phi 15.24$ mm钢绞线构成,并将其锚于上盘尾部。拱肋与上转盘设临时转动铰连接。

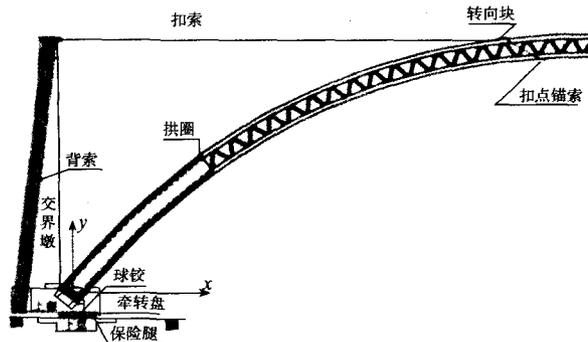


图1 转体结构示意图

2.2 主要技术指标

转体结构总长130.7m;转体结构总高67.95m;上盘尺寸长×宽×高=20.03m×26m×6m;拱肋伸臂长度117.64m;转体结构重心高度(距下盘顶面)17.8m;转体总质量10400t。

3 转体结构

3.1 转动球铰

在单铰转体结构中,转动铰既是转动中心,又承受结构的全部重力,是受力最集中的区域。对球铰必须作充分的考虑和研究,要求球铰要容易转动,还要有足够的强度和制作精度。

3.1.1 球铰类型的选择

对于单铰转体结构,预防结构倾覆是至关重要的。在相同倾覆力作用下,采用凸铰的转体结构的倾覆力臂总是大于采用凹铰的转体结构(图2)。另外,采用凹面铰还可防止铰面间填充的润滑剂在转体结构重压下流失。故北盘江大桥转

体结构一改过去桥梁转体施工惯用的凸铰（蘑菇头）而采用凹铰。

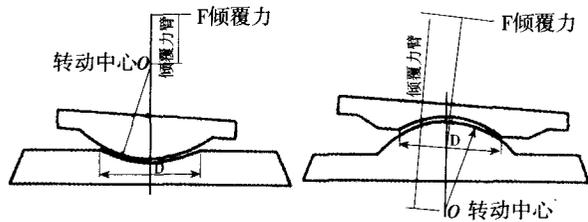


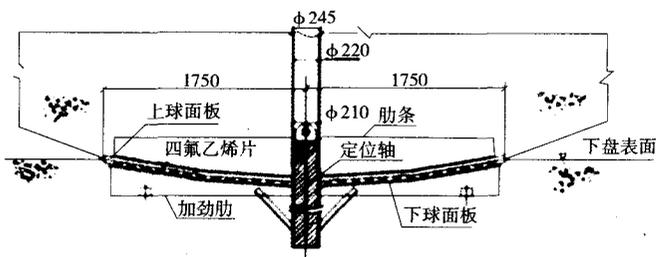
图2 凸铰和凹铰的比较

3.1.2 球铰构造及制作安装

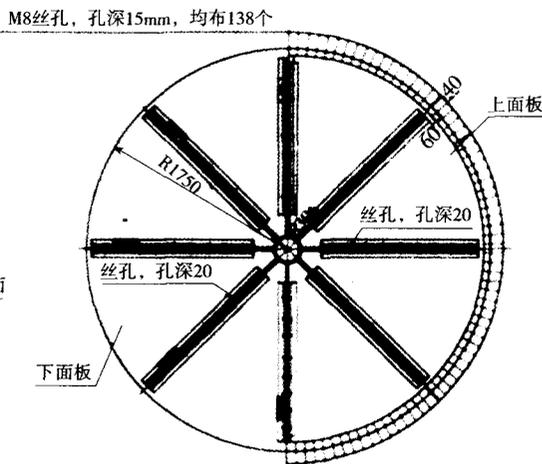
球铰由上下两块钢质球面板组成，上面板为凸面，通过圆锥台与上部的牵转盘连接，上盘就置于牵转盘上；下面板为凹面，嵌固于下盘顶

面。上、下面板均为40mm厚的钢板压制而成的球面，背部设置肋条，防止在加工、运输过程中变形，也加强与周围混凝土的连接。下面板上镶嵌四氟乙烯片，上、下面板间填充黄油四氟粉，以减小上下球面之间的摩擦因数。下面板周围灌注C40混凝土，上面板上方的过渡锥台和牵转盘为C60混凝土。该球铰按承受120000kN的压力设计，球铰球半径8m，球缺底面直径3.5m。

为保证上、下盘之间不发生偏心错，球铰中心设 $\phi 210\text{mm}$ 的定位轴，由定位轴承受因转体重心偏移和水平风力等引起的剪力。定位轴套筒穿透上盘，以便在必要时可以取出定位轴。球铰构造如图3所示。



(a) 装配立面



(b) 平面

图3 球铰内部结构 (单位: mm)

球铰面板的安装必须精确定位和调平，设计对球铰面板制造和安装验收技术标准作了较严格的规定。为了确保安装精度，往下盘内设计有球铰面板的定位骨架，骨架顶部设调节装置，可精确定位面板和调节面板水平；待面板安装验收后灌注混凝土。

3.2 扣锚体系

3.2.1 扣索

扣索联系着拱肋和交界墩，维系着转体结构的安全。拱圈脱架通过张拉扣索来完成，扣索起着维持拱圈线形的作用。扣索自身和其锚固必须非常可靠，同时它的布置要易于张拉。

设计比较了单扣点和多扣点方案，鉴于本桥拱肋刚度大，而且拱脚又设置转动铰，为便于施

工和控制，采用了单扣点方案。

为了施工的方便，扣索采用钢绞线。扣索前端用P锚锚固在拱肋下弦E3节点设的锚梁上，然后通过上弦A4节点处的转向块，拉锚在交界墩帽梁上（图1），在交界墩顶张拉端设双锚具，确保张拉过程中索力的稳定。在转向块处，扣索分散开成一排，避免了相互缠绞。由于拱脚为临时铰接，扣索拉力很容易确定和控制。设计扣索拉力9501kN，考虑到扣索张拉过程中的不均匀性及转体结构的安全，也为了降低扣索钢绞线的弹簧效应，扣索采用96根 $\phi 15.24$ 钢绞线，工作应力用得较低，平均工作应力为 $0.38f_{pk}$ 。

3.2.2 背索

背索用于平衡扣索水平力，以保证交界墩的

安全。背索上端锚固于交界墩顶帽两侧，向后斜拉并锚固于上盘底面。背索为42束19 ϕ 15.24mm钢绞线，设计总拉力96000kN。为抵抗因背索张拉引起的负弯矩，防止顶帽开裂，帽梁顶部在横桥向布置了32束12 ϕ 15.24mm钢绞线，施加预应力。

3.3 上转盘设计

上转盘是一个大体积的预应力混凝土块体，除承受巨大的自重外，还承受着拱圈结构及交界墩的重量。三向预应力分期分批按结构体系的变化及受力状态施加其上。无论在转体前的施工过程中，还是在转体过程中，其内部受力极为复杂。该结构的安全牵涉到转体施工的成败。

3.3.1 上盘构造

上盘结构和转体重量与球铰设置的位置有很大关系，球铰前移有利于减轻转体重量，但又受场地限制，并且球铰太靠前不利于上盘的受力。所以需考虑球铰的位置与上盘厚度的关系。为避免影响拱圈和交界墩的线形，上盘变形也不能太大。

按构造要求初拟几种上盘尺寸及球铰位置，建立有限元模型并与交界墩结合进行计算分析。并考虑上盘的变形要求，确定了上盘厚度为6m，球铰中心与交界墩中心水平距7.23m。然后，按拟定的上盘厚度及球铰位置，对上盘进行详细分析，并按需要配置平衡重，在满足构造要求的前提下将非主要受力部分逐步剔除，最终形成“+”字形的上盘结构。

按照上述上盘结构，需要在交界墩后设置7000多kN的平衡配重。考虑到上盘两翼后部在转

体后仍需封闭，故预先用低等级混凝土灌筑一部分作为配重块，以减少上盘上面的配重，上盘结构如图4所示。

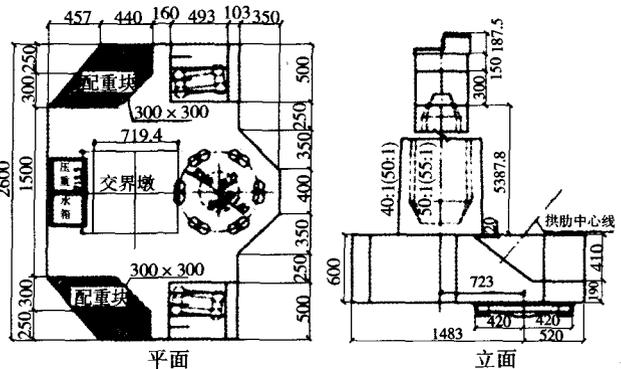


图4 上盘和交界墩一般构造(单位: cm)

3.3.2 上盘预应力

上盘支承交界墩和拱肋，并锚固背索，转体时单点支撑在转动球铰上。为确保上盘在施工中的安全，应将上盘拉应力控制在较小范围以内。为此，上盘设三向预应力，纵横竖向均采用 ϕ 15.24mm钢绞线。实际施工时，施工方为了方便，将竖向预应力改为 ϕ 32精轧螺纹钢。

3.4 牵转系统

牵转系统要提供足够的牵转动动力，确保转体顺利进行。设计在球铰上方直径为8.4m的牵转盘上缠绕牵引索进行牵转，牵引索采用2对12 ϕ 15.24mm钢绞线，如图5所示。牵转的动力依靠4台连续张拉千斤顶，形成2对力偶，牵引能力为4000 kN。在下盘上合适的位置设有4个牵引反力座来固定千斤顶。实施时，将4台千斤顶油泵并联，以保证千斤顶同时工作。

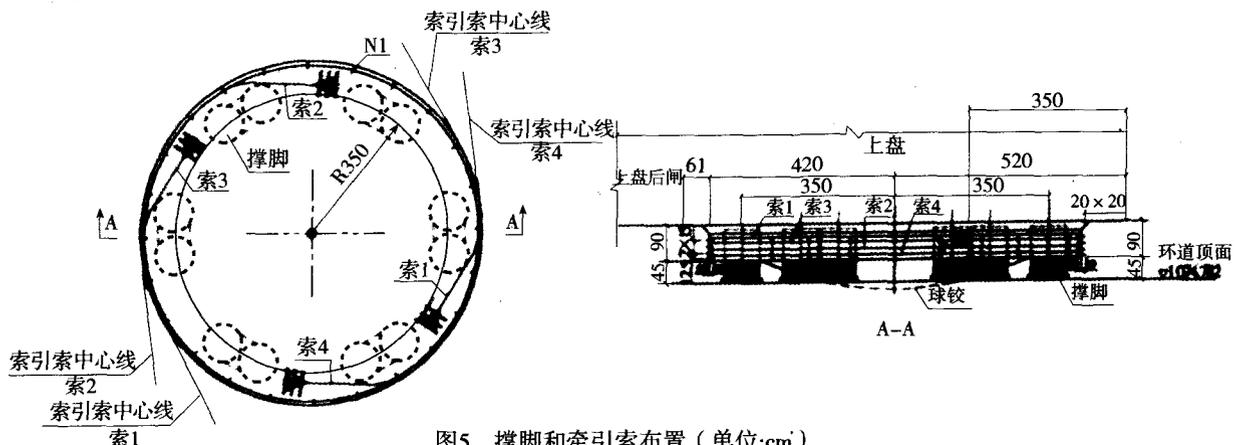


图5 撑脚和牵引索布置(单位:cm)

牵转力偶矩必须克服球铰上、下球面相对滑动的摩擦力矩。根据国内外许多转体桥梁测试结果,上、下球面之间滑动摩擦因数一般为:静摩擦因数 $\mu_{静}=0.07\sim 0.08$,动摩擦因数 $\mu_{动}=0.04\sim 0.05$ 。取静摩擦因数0.1,动摩擦因数0.06计算,启动时必要的牵转力 $T_1=1452\text{kN}$,启动后牵转力偶为 $T_2=871\text{kN}$ 。若考虑保险腿走板与滑道之间的摩擦,取摩擦因数为0.15,计算启动牵转力偶 $T_1=2009\text{kN}$,启动后牵转力偶为 $T_2=1242\text{kN}$ 。

3.5 保险腿

为了防止因球铰绕球心转动而使转体倾覆,保险腿是必不可少的装置。保险腿的位置由转体结构的倾覆稳定计算确定。本桥在距离球铰中心3.5m的圆周上,等距离设置6个保险腿撑脚,每个撑脚由2根 $\phi 1000\times 14$ 的钢管混凝土组成。撑脚上端埋于牵转盘内,下端悬挂走板,下盘表面设环形滑道与走板配合。走板底面与滑道表面留5mm间隙。实际施工中,因滑道上要铺设不锈钢板和四氟乙烯板,间隙量达10mm。保险腿构造如图6所示。

在大桥转体实施时,为了降低转体向前倾的危险,有意识地加大平衡配重量,让转体重心后移,转体时实际是球铰和后支腿共同支承。

4 转体结构的稳定分析

4.1 拱肋整体稳定性

扣索张拉,拱肋脱架呈悬臂,拱趾临时铰接状态时,计算稳定安全系数为19.6,失稳模态为面外失稳。

4.2 转体结构倾覆稳定性

转体状态下,转体结构由球铰单点支承。分析此状态下的倾覆稳定性,检验保险腿的位置是否恰当。计算时,考虑基本风压值 $W_0=800\text{Pa}$ 。计算得到:转体结构前倾稳定安全系数 $K=1.529$;转体结构后倾稳定安全系数 $K=2.068$ 。

目前,各类规范对转体结构的倾覆稳定尚未有明确的规定,参考《铁路桥涵地基和基础设计规范》(TB10002.5—99)对墩台基底的倾覆稳定的规定:其稳定安全系数不得小于1.5,施工荷载作用下不得小于1.2,转体结构的倾覆稳定性满足要求。

5 施工过程控制

5.1 主要施工步骤

转体施工工艺复杂,施工工序多。当钢管桁架拱在支架上拼装焊接完成后,要通过张拉扣索来使桁架脱离支架呈悬臂状态才能实施转体。但是,为了交界墩和上盘的安全,扣索不能一次张拉到位,必须分批、分级与背索和上盘预应力束交替张拉;当转体到位,拱肋合龙后,扣索、背索、上盘预应力等仍需分批、分级、交替释放。这更增加了施工的复杂和难度。施工步骤与结构安全紧密相关,设计主要的施工步骤如下。

(1) 浇筑下盘混凝土,安装下球铰,制作保险腿滑道。

(2) 安装上球铰,并作转动试验;浇筑球铰上方锥体及牵转盘,埋设牵引索。

(3) 在砂箱上立模施工上盘,在上盘尾部设硬支承,但在背索锚固区不能设硬支承。

(4) 张拉上盘全部横向预应力、竖向预应力束。张拉第一批纵向预应力束,此时上盘中央

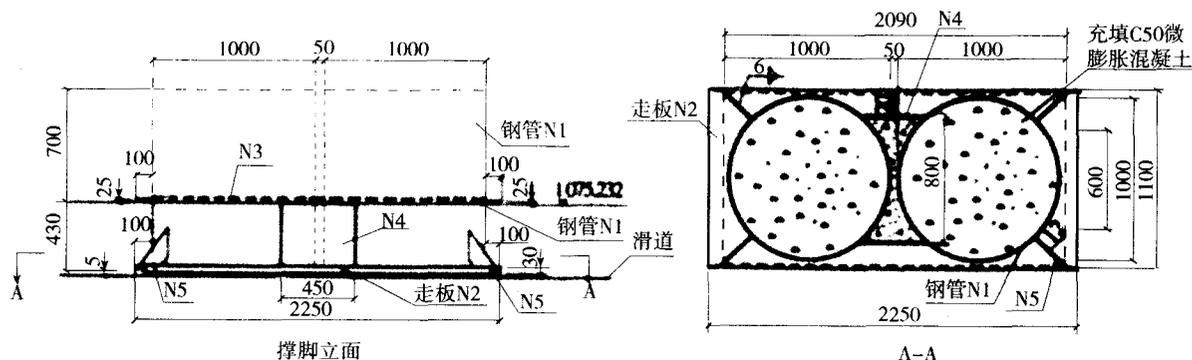


图6 保险腿一般构造(单位: mm)

向上微拱,上盘自重大部分转移到尾部的硬支承和球铰上面,上盘纵向呈简支状态;退砂箱,拆除上盘模板,为张拉背索、安装牵引反力座提供操作空间。

(5) 在上盘上修建交界墩,修建交界墩过程中上盘不再施加预应力。

(6) 张拉上盘第二批纵向预应力钢束。

(7) 根据平衡的需要,在上盘堆放平衡重;安装牵引反力座和连续张拉千斤顶,做好转动准备。

(8) 按设计步骤,分批、分级、交替张拉扣索、背索和上盘纵向预应力束,使拱圈脱架。此阶段须监测上盘、交界墩、球铰、扣索及背索等重要部位的应力状况,监测交界墩顶的位移及上盘的变形情况等。

(9) 再一次核实平衡重的质量和位置,拆除上盘尾部的硬支承。此时转体结构的重心已经转移到球铰上面。

(10) 清理球铰,清理场地,清除转体障碍物。

(11) 启动连续张拉千斤顶,实施转体。

(12) 调整拱肋线形,优先满足合龙口高程,合龙拱肋。

(13) 连接上下盘间的钢筋,混凝土封闭上下盘间的空隙,混凝土回填上盘周围的基坑。

(14) 混凝土封闭拱脚临时转动铰。

(15) 分批、分级,交替拆除扣索、背索和大部分上盘纵向预应力束。

5.2 扣索、背索、上盘预应力束交替张拉控制

分批、分级、交替张拉上盘纵向预应力束、背索、扣索使拱圈脱架是实施转体前的关键工序,也是施工中的难点之一。在实施之前必须制定严格的张拉次序,明确每次的张拉量。

5.2.1 交替循环张拉过程

为了得到合理的张拉批次,设计作了如下的设想。

在交界墩修建完成后,上盘张拉第二批纵向预应力束,使上盘内部有较大的压应力储备。接下来对交界墩施加竖向预应力即张拉第一批背

索,使交界墩各截面面向上盘尾端的一侧(称之为截面后缘)受较大压应力;而面向拱肋一侧(称为截面前缘)受较小的压应力(不容许出现拉应力,预先设定一个下限值,最小压应力不得低于此下限)。这样,交界墩就可以承受一定量的扣索拉力。然后张拉扣索,这时交界墩截面前缘压应力增加,截面后缘压应力减小。扣索拉力应控制在一定水平,使得交界墩墩身各截面最小压应力不得低于下限值。

以上完成一次交替循环,这时上盘下缘压应力储备减小,应对上盘施加下一批纵向预应力。

张拉扣索、背索时,应严格控制交界墩最大、最小应力比,对同一个截面,限制最大与最小应力比不得大于2。

5.2.2 计算确定张拉增量和循环次数

建立转体结构整体计算模型,应用上述的控制方法,通过多次的试算,将上盘预应力、背索张力、扣索张力逐渐施加到模型上,同时,制定出转体结构主要施工步骤和上盘预应力束,扣索、背索交替张拉次序表。为便于施工控制,设计还提供了墩顶计算位移,并给出了扣、背索张力的容许范围和相应的墩顶最大、最小位移。

6 结语

经大桥建设、设计、施工、监理及科研人员等的艰辛工作,大桥主拱肋于2001年1月20日顺利转体合龙。

北盘江大桥转体施工技术将桥梁单铰平转质量大幅度提升到一个新的高度。通过北盘江大桥的主拱肋转体施工设计,笔者有以下体会。

(1) 大吨位单铰转体法施工宜采用凹面铰,铰面应贴附硬质面板确保球铰的制作精度。

(2) 球铰中心轴轴保险腿是防止结构平移和倾覆的必要设施,应精心设计和制作。

(3) 牵转动要有足够的储备。

(4) 扣索和牵引索应尽量采用易于加工和安装的钢绞线,钢绞线工作应力最好不大于

(下转第38页)

第十四届全国混凝土及预应力混凝土 学术交流会在长沙召开

2007年12月3~6日,由中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土分会主办,中国建筑科学研究院、中南大学土木建筑学院、上海建科结构新技术工程有限公司长沙分公司协办的第十四届全国混凝土及预应力混凝土学术交流会在长沙市和一大酒店召开。

来自高校、科研院所及企业的近200名从事混凝土及预应力混凝土结构、材料、设计、施工、管理、教学及科研等领域的专家学者参加了会议。

本次大会的主题是“发展绿色技术,建设节约结构”,会议准备充分,内容丰富,是近年来我国混凝土及预应力混凝土技术领域的一次盛会。会议征集并编辑出版论文集一册,收录混凝土及预应力混凝土技术方面论文100篇。在大会上进行了近40场学术交流,举行了第二届欧维姆预应力技术奖的颁奖仪式。大会还设有材料、技术、设备展台,并组织与会人员参观了工程建设。

(编辑部)

《预应力筋用锚具、夹具和连接器》 国家标准修订宣贯会在柳州召开

2007年11月12日,中国建筑科学研究院在广西柳州市举办了GB/T 14370-××××《预应力筋用锚具、夹具和连接器》国家标准修订宣贯会,共有20余家企事业单位的100多名技术、标准、工艺和技术监督检查人员参加。柳州欧维姆公司做为该标准的起草单位之一,负责协办了该次宣贯会。标准主要起草人,中国建筑科学研究院裴骥研究员介绍了标准制定的背景,相关国外标准情况和预应力筋用锚具、夹具和连接器的国

内现状、标准制定过程,以及标准修订内容中的适用范围、变更产品分类代号与标记型式、试验方法等内容,并对国标与国外标准的差异作了分析说明。新国标将在11月完成送审稿,12月报批,替代原国家标准GB/T 14370-2000。相关预应力生产企业、检测机构需要掌握新标准,以便全面转向执行新标准。

(谭柳芳)

(上接第26页)

$0.4f_{pk}$,并且宜采用低松弛钢绞线,降低其弹簧效应,减小转体时结构振动。

(5) 转体结构倾覆稳定系数不宜取得太高,以免造成不必要的浪费。本桥以1.5控制,取得了成功。

本文所述研究成果被纳入施工图设计文件,有效控制和指导了施工组织设计和施工工艺设计文件的编制,保证了大桥施工的顺利进行。

参考文献

- [1] 范应心, 160m钢管混凝土拱桥施工. 桥梁建设, 1996(3)
- [2] 钟启宾, 中国连续顶推技术的最新发展概况. 桥梁建设, 1994(4)
- [3] 潘金华, 转体施工技术要素分析. 铁道标准设计, 1998(9)
- [4] 潘金华, 刘博. 球铰的预制及安装. 铁道标准设计, 1998(9)
- [5] 徐升桥, 任为东, 李艳明. 丫髻大桥主桥施工关键技术研究. 铁道标准设计, 2001(6)