

文章编号: 1002-0268 (2001) 02-0024-05

桥梁转体施工方法在我国的应用与发展

陈宝春, 孙 潮, 陈友杰
(福州大学, 福建 福州 350002)

摘要: 简要介绍桥梁转体施工方法的发展历史和该方法在我国的应用与发展概况, 阐述转体施工法关键技术问题, 并给出几座桥梁转体施工的实例。
关键词: 桥梁; 施工; 转体; 应用; 发展; 中国
中图分类号: U445.46 **文献标识码:** A

Application and Development of Swing Method of Bridge Construction in China

CHEN Bao-chun, SUN Chao, CHEN You-jie
(Fuzhou University, Fujian Fuzhou 350002, China)

Abstract: The development history of the swing method of bridge construction and its application in China is introduced. Its key technology and several examples are presented.
Key words: Bridge; Construction; Swing method; Application; Development; China

0 概述

桥梁是一种跨越障碍的构造物。桥梁转体施工是指将桥梁结构在非设计轴线位置制作(浇注或拼接)成形后, 通过转体就位的一种施工方法。它可以将障碍上空的作业转化为岸上或近地面的作业。根据桥梁结构的转动方向, 它可分为竖向转体施工法、水平转体施工法(简称竖转法和平转法)以及平转与竖转相结合的方法, 其中以平转法应用最多^[1, 2]。

转体施工法最先出现的是竖转法。50年代意大利曾用此法修建了多姆斯河桥, 跨径达70m。采用此法修建的桥梁跨径最大的是德国的 Argentobel 桥, 跨径达150m。它在竖向位置利用地形或搭支架浇筑混凝土拱肋, 然后再从两边将拱肋逐渐放倒, 搭接成拱。这种竖转法主要应用于钢筋混凝土肋拱桥中, 当跨径增大以后, 拱肋过长, 竖向搭架过高, 转动也不易控制, 因此一般只在中小跨径中应用。

平转法于1976年首次在奥地利维也纳的多瑙河运河桥上应用。该桥为斜拉桥, 跨径布置为55.7m+119m+55.7m, 转体重量达4000t。此后平转法在法

国、德国、日本、比利时、中国等国家得到应用。采用平转法施工的桥梁除斜拉桥外, 还有T构桥、钢桁梁桥、预应力连续梁桥和拱桥。迄今为止, 转体重量最大的是比利时的本·艾因桥。该桥为斜拉桥, 跨径布置为3×42m+168m, 转体重量达1.95万t, 于1991年建成。

1975年我国桥梁工作者开始进行拱桥转体施工工艺的研究, 并于1977年首次在四川省遂宁县采用平转法建成跨径为70m的钢筋混凝土箱肋拱。此后, 平转法在山区的钢筋混凝土拱桥中得到推广应用。我国桥梁转体施工方法的研究与应用处于特定的历史时期, 当时与外界交往很少, 虽然时间上晚于国外, 实际上是独立发展起来的, 而且一开始就应用于拱桥之中, 极具中国特色。

70年代末80年代初我国平转法施工的拱桥, 跨径均在100m以下, 且均为有平衡重转体施工。为解决大跨径拱桥转体重量大的问题, 四川省交通厅公路规划设计院从1979年开始了“拱桥双箱对称同步转体施工工艺”研究(又称为无平衡重转体施工), 并于1987年成功地进行了跨径为122m的四川巫山龙门桥

试验桥的施工。1988年四川涪陵乌江大桥采用该法转体成功,使我国拱桥的跨径首次跃上200m大关。

随着转体施工工艺的进步,主要是转动构造中摩擦系数的降低和牵引能力的提高,这一方法在我国的斜拉桥和刚构桥中也得到应用,并且使其从山区推广至平原,尤其是跨线桥的施工。例如,1980年四川金川县的曾达桥(独塔斜拉桥,转体重量1344t);1985年江西贵溪跨线桥(斜脚刚构桥,转体重量1100t);1990年四川绵阳桥(T构桥,转体重量2350t);1997年山东大里营立交桥(刚性索斜拉桥,转体重量3040t);1998年贵州都拉营桥(T构桥,转体重量7100t)。

钢管混凝土拱桥近10年来在我国的应用与发展迅猛,为拱桥的轻型化和向大跨度发展提供了可能,转体施工方法也被广泛应用于这种桥型之中^[3,4]。

在竖转方面,虽然我国在80年代初期就应用该法进行了钢筋混凝土桁架拱的施工,但其应用一直没有得到推广。1996年施工的三峡莲沱钢管混凝土拱桥(主跨114m)和1999年施工的广西鸳江钢管混凝土拱桥(主跨175m)采用竖转法,后者的竖转体系采用了液压同步提升技术,使竖转技术跃上了新的台阶,目前正在施工的徐州京杭运河钢管混凝土提篮拱桥(主跨235m)也将采用这一技术进行竖转施工。

在平转方面,1996年施工的三峡黄柏河和下牢溪两座钢管混凝土上承式拱桥采用该法施工,两桥主跨均为160m,转体重量达3500t。

更为重要的是,竖向转体与平面转体结合应用的方法在钢管混凝土拱桥中的应用,使桥梁转体施工法进入了一个新的发展时期。1995年安阳文峰路135m钢管混凝土拱桥首次采用这一方法转体成功。1999年10月广州丫髻沙大桥也采用此法顺利合拢,并于2000年6月建成通车。丫髻沙大桥主跨达360m(净跨344m),平转重量达13685t。它的建成使我国桥梁转体施工技术取得了重大突破,进入了世界领先水平。

1 转体施工法的关键技术

转体施工法的关键技术问题是转动设备与转动能力,施工过程中的结构稳定和强度保证,结构的合拢与体系的转换。

1.1 竖转法

竖转法主要用于肋拱桥。我国在应用竖转法时,拱肋是在低位浇筑或拼装,然后向上拉升达到设计位置,与国外将拱肋竖向拼装或浇筑然后放下合拢的方法不同。

竖转体系通常由牵引系统、索塔、拉索组成。竖转的拉索索力在脱架时最大,因为此时拉索的水平角最小,产生的竖向分力也最小,而且拱肋要实现从多跨支承于拱架上的连续曲梁转化为铰支承和扣点处索支承的曲梁,脱架时要完成结构自身的变形与受力的转化。为使竖转脱架顺利,有时需在提升索点安置助升千斤顶。

竖转施工方案设计时,要合理安排竖转体系。索塔高、支架高(拼装位置高),则水平交角也大,脱架提升力也相对小,但索塔、拼装支架受力(特别是受压稳定问题)也大,材料用量也多;反之亦然。

在竖转过程中,主要要考虑索塔的受力和拱肋的受力,尤其是风力的作用。

在施工工艺上,竖转铰的构造与安装精度,索鞍与牵动力装置,索塔和锚固系统是保证竖转质量、转动顺利和安全的关键所在。国内的拱桥基本上为无铰拱,竖转铰是施工临时构造,所以,竖转铰的结构与精度应综合考虑满足施工要求和降低造价。跨径较小时,可采用插销式,跨径较大时可采用滚轴。拉索的牵引系统当跨径较小时,可采用卷扬机牵引;跨径较大,要求牵引力较大,牵引索也较多时,则应采用千斤顶液压同步系统。

1.2 平转法

平转法的转动体系主要有转动支承、转动牵引系统和平衡系统。

转动支承是平转法施工的关键设备,由上转盘、下转盘构成。上转盘支承转动结构,下转盘与基础相联。通过上转盘相对于下转盘转动,达到转体目的。转动支承往往必须兼顾转体、承重及平衡等多种功能。按转动支承时的平衡条件,转动支承可分为磨心支承、撑脚支承和磨心与撑脚共同支承3种。

磨心支承即由中心撑压面承受全部转动重量,有时在磨心插有定位转轴。为了保证安全,通常在支承转盘周围设有支重轮或支撑脚。正常转动时,支重轮或承重脚不与滑道面接触,一旦有倾覆倾向则起支承作用。在已转体施工的桥梁中,一般要求此间隙从2~20mm,间隙越小对滑道面的高差要求也越严格。磨心支承有钢结构和钢筋混凝土结构。在我国以采用钢筋混凝土结构为主。上下转盘弧形接触面的混凝土均应打磨光滑,再涂以二硫化铜或黄油四氟粉等润滑剂,以减小摩擦系数(一般在0.03~0.06之间)。

第二种转动支承为撑脚支承形式。撑脚支撑形式下转盘为一环道,上转盘的撑脚有4个或4个以上,以保持平转时的稳定。这种形式,转动过程支撑范围大,

抗倾稳定性能好,但阻力力矩也随之增大,而且环道与撑脚的施工精度要求较高。撑脚形式有采用滚轮,也有采用柱脚的。滚轮平转时为滚动摩擦,摩阻力小,但加工困难,而且常因加工精度不够或变形使滚轮不滚。采用柱脚平转时为滑动摩擦,通常用不锈钢板加四氟板再涂黄油等润滑剂,其加工精度比滚轮容易保证,通过精心施工,已有较多成功的例子。当转体结构悬臂较大,抗倾覆稳定要求突出时,往往采用此种结构,广州丫髻沙大桥平转就采用了此体系。

第三类支承为磨心与撑脚共同支承。大里营立交桥采用一个撑脚与磨心共同作用的转动体系,在撑脚与磨心连线的垂直方向设有保护撑脚。如果撑脚多于一个,则支承点多于2个,上转盘类似于超静定结构,在施工工艺上保证各支撑点受力基本符合设计要求比较困难。广州丫髻沙大桥原采用多撑脚与磨心共同受力体系,后考虑到这种困难,减小了磨心受压的比例,使其蜕化为撑脚体系。

水平转体施工中,转得动转不动是一个很关键的技术问题。一般情况下可设启动摩擦系数为0.06~0.08之间,有时为保证有足够的启动动力,按0.1配置启动动力。因此,减小摩阻力,提高转动力矩是保证平转顺利实施的两个关键。转动动力通常安排在上转盘的外侧,以获得较大的力臂。转动动力可以是推力,也可以是拉力。推力由千斤顶施加,但千斤顶行程短,转动过程中千斤顶安装的工作量又很大,为保证平转过程的连续性,所以单独采用千斤顶顶推平转的较少。转动动力通常为拉力,转动重量小时,采用卷扬机,转体重量大时采用牵引千斤顶,有时还辅以助推千斤顶,用于克服启动时静摩阻力与动摩阻力之比的增量。

平转过程中的平衡问题是一个关键问题。对于斜拉桥、T构桥以及带悬臂的中承式拱等上部恒载在墩轴线方向基本对称的结构,一般以桥墩轴心为转动中心,为使重心降低,通常将转盘设于墩底。

对于单跨的拱桥、斜腿刚构等,可分为有平衡重与无平衡重转体两种。有平衡重时,上部结构与桥台一起作为转体结构,上部结构悬臂长,重量轻,桥台则相反,在设置转轴中心时,尽可能远离上部结构方向,以求得平衡,如果还不平衡,则需在台后加平衡重。无平衡重转体,只转动上部结构部分,利用背索平衡,使结构转体过程中被转体部分始终为索和转铰处两点支承的简支结构。对于双肋拱,此时,双肋分于两侧,然后向中间转。

1.3 转体施工受力

转体施工的受力分析主要有保证结构的平衡,以防倾覆;保证受力在容许值内,以防结构破坏;保证锚固体系的可靠性。转体过程历时较短,少则几十分钟,最多不超过一天,所以主要考虑施工荷载。在大风地区按常见的风力考虑,通常不考虑地震荷载和台风影响,这主要从工期选择来保证。此外,转体结构的变形控制、合拢构造与体系转换也是转体施工应考虑的重要问题。

2 桥例

2.1 三峡莲沱大桥(竖向转体施工)^[9]

莲沱大桥是三峡工程对外公路上的钢管混凝土拱桥,它为净跨48.3m+114m+48.3m的带悬臂中承式刚架系杆拱,其钢管拱肋的架设采用了竖向转体施工方法。施工总体布置见图1。

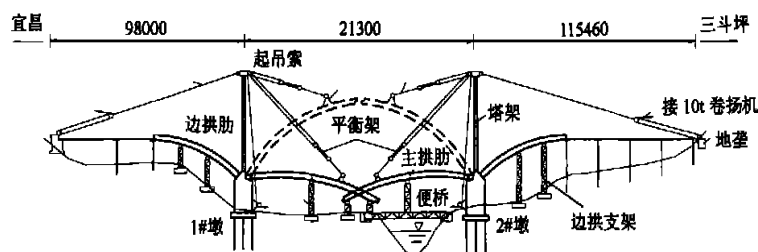


图1 莲沱大桥竖转施工总体布置图(单位: mm)

莲沱大桥的竖转施工时将拱肋放在水位较低的河中,在低矮的胎架上将工厂加工好的拱肋焊接拼装成两个半拱(包括横斜撑及附件安装),然后由竖在两个主墩顶部的两副扒杆分别将其拉起,在空中对接合拢。边拱拱肋则直接由吊车在胎架上就位拼接。

竖转用扒杆高35m,由两根 $\phi 800\text{mm}$ 钢管立柱、钢板横梁以及槽钢剪力撑组成。起吊系统选用2对

200t滑轮组和2台20t的卷扬机,起重索为 $\phi 39\text{mm}$ (6 $\times$ 37)的交互捻钢丝绳。吊攀为双吊耳型。轴销为45号铸钢切削而成。根据吊索长度计算出吊攀轴线与垂线之间的夹角为 34° 。

拱肋在竖转吊装过程中,拱脚处设计了旋转支座,由靠山角和旋转角组成。靠山角和旋转角均由厚36mm的16Mn钢板在工厂配对冲压而成。靠山角宽

120cm, 背部和下部焊有加劲板和钢筋, 根据设计位置预埋于墩顶混凝土内; 旋转角宽 80cm, 直接焊于拱端。

2.2 大里营刚性斜拉桥 (平面转体施工)^[6]

大里营立交桥为一铁路桥, 以 49° 斜交角跨线京秦铁路。该桥采用刚性索斜拉桥, 跨径布置为 $50\text{m}+40.75\text{m}$ 。斜拉索为两对平行索, 主梁为下承式双向预应力槽形梁, 塔墩梁固结。为减少施工对桥下京秦铁路运行的干扰, 采用了平转施工方案。转动系统设在墩底, 转体完成前, 墩底为铰支承, 转体完成后再形成固结支承。桥梁总体布置图见图 2。

该桥的上下转盘采用钢筋混凝土球形铰构造。平

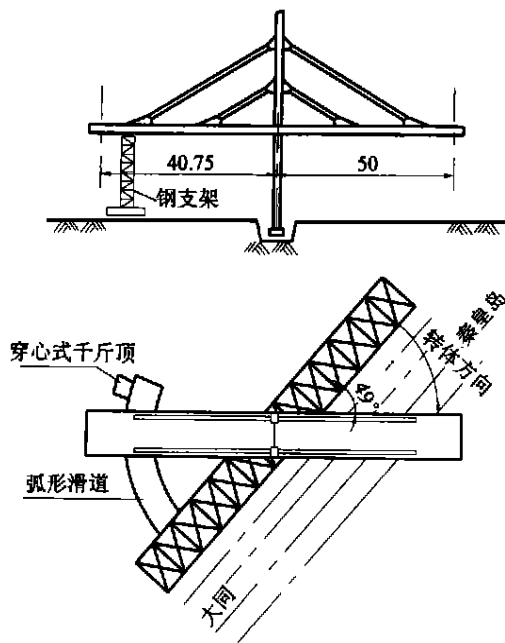


图 2 大里营立交桥平转总体布置图 (单位: m)

大里营桥的转动牵引系统首次改变了国内以往的电动或手动卷扬机系统, 采用了千斤顶带动钢绞线系统。它易于控制, 且能连续牵引。千斤顶 2 台, 各为 700kN, 牵引索为 $5 \sim 7\phi 5$ 的钢绞线, 转体速度为 20m/h 。该桥已于 1997 年 7 月实现转体, 同年 10 月建成通车。

2.3 广州丫髻沙大桥 (竖转加平转施工)^[7]

广州丫髻沙大桥主桥为带悬臂的中承式刚架系杆拱, 主跨 360m 。主跨为钢管砼桁式肋拱, 边跨为上承钢管砼劲性骨架箱肋悬臂半拱。为保证主拱的顺利合拢和最大限度地减小对珠江通航的影响, 采用了转体施工方案。

转体施工将半跨主跨和一个边跨作为一个转动单元, 沿河岸搭支架拼装边跨劲性骨架, 并在低支架上拼装半跨主跨钢管拱肋, 竖转主跨钢管拱肋就位, 然

转重量为 3 040t, 按承受竖向应力 10MPa 设计, 球铰直径为 1.8m , 砵为 C50 级。为保证转体时上下盘沿同心圆转动, 设置了 $\phi 164\text{mm}$, 壁厚 4mm 的钢管轴和钢管套。

在上转盘的外缘下伸平衡立柱。平衡立柱下缘有不锈钢板, 在下盘平衡柱位置设置用四氟板铺成的环形滑道。当平转过程中发生瞬间失稳时, 平衡立柱触及滑道, 提供平衡支承, 且仍能继续平转。为保证滑动的安全性, 在转体自重中使边跨略重于主跨。因此该桥实质上是以磨心和后平衡柱双支承的转动体系。它较之单独的磨心支承, 转盘面积减小, 施工安全保证加大。大里营桥平转球铰构造见图 3。

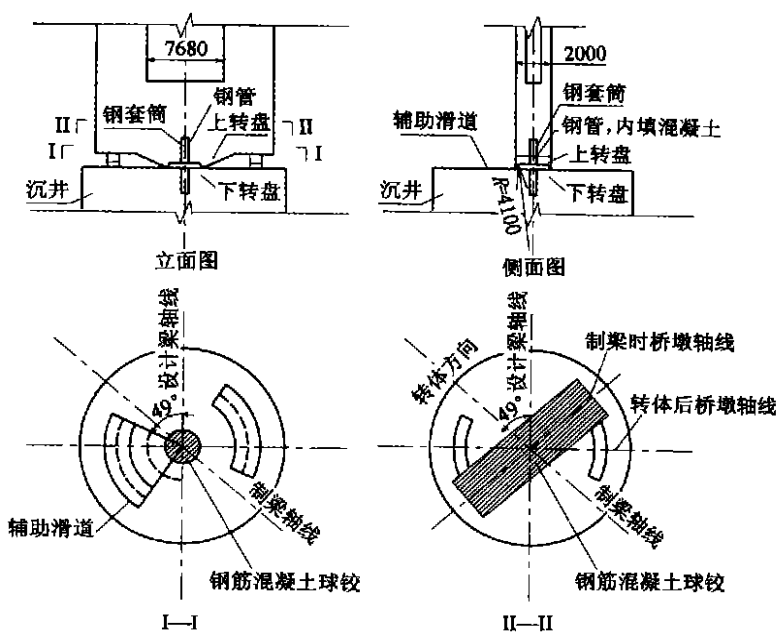


图 3 大里营立交桥转体球铰构造 (单位: mm)

后利用边跨为平衡重, 平转就位、合拢。

竖转体系由索塔, 拉索与扣索, 张拉千斤顶组成。索塔采用钢管砵桁式结构, 塔高 62.2m , 塔顶上安放有转向索鞍。为加强索塔的稳定, 还配置了锚于上转盘和边跨的平衡索。竖转示意图 4。

竖转动力系统采用液压同步提升技术, 张拉千斤顶布置于边跨端部。每肋使用 10 台千斤顶。拉索共有 2 组, 互相连通。1 号拉索前端锚于主拱肋转体结构端部, 2 号索前端锚于主拱肋 $L/4$ 处。在 2 号索处设置了一个撑架顶住 1 号索, 上面也有索鞍。 $L/4$ 处的撑架起两个作用, 一是增大 1 号索的水平角度, 二是平衡 2 号索在此向上拉力对结构的不利影响。

在张拉 (转动) 过程中, 保持各台千斤顶同步和 1、2 号拉索力以合理比例关系同步。脱架时将扣索张拉至设计起动张拉力的 100% , 如果此时主拱肋仍

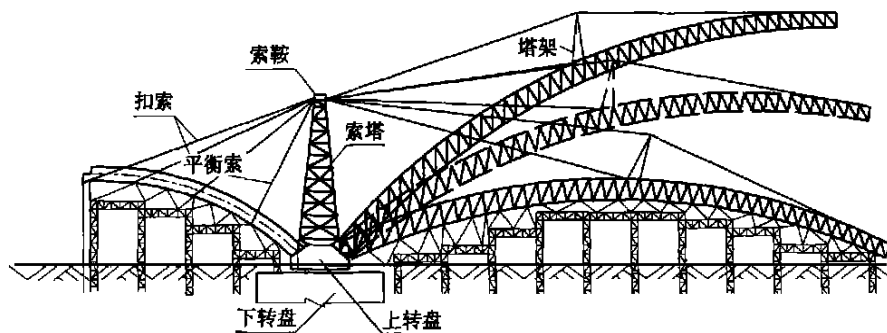


图 4 丫髻沙大桥竖转示意图

未完全脱架, 则起动主拱顶端助升千斤顶 (实际施工中未采用)。脱架后停置 12h 以上, 检查整个竖转系统各重要部位有无异常现象, 观测温度变化对整个体系的影响规律。

竖转时实行索力和标高双控。竖转角度为 24.7014° 。将整个竖转过程分为 11 个阶段计算 1、2 号扣索索力。竖转到位后测取边拱支架内力, 将内力值与计算值比较, 据此适当调整索力及边拱配重, 使结构处于前后平衡状态, 然后解除边跨支架的约束, 临时固结拱脚, 而后进行平转。

平转体系由上转盘、下转盘和牵引体系组成。整个上部结构的重量均作用在上转盘上。上转盘内设置劲性骨架, 以保证埋设精度和加强上转盘整体性。转体重量主要由撑脚传递至下转盘, 中心转轴主要起定位作用。每个拱座设置 7 个撑脚, 分两种, 位于两端的为加强型撑脚。撑脚上端埋于上转盘内, 下端支撑在下转盘环道上, 与环道接触部分设置千岛走板。

下转盘环道直径 33m, 宽 1.1m。环道面层为钢板, 表面粘一层 3mm 厚镜面不锈钢板, 钢板下面焊有加劲角钢。用螺栓将钢板与预埋于承台内劲性骨架相连, 调平后再浇注钢板下砼。环道高差控制在 $\pm 0.5\text{mm}$ 以内。

平转牵引体系由牵引索、牵引千斤顶、助推千斤顶、牵引索转向滑轮等组成。由于平转角度较大, 上转盘尺寸无法满足一次平转到位要求 (广氮岸平转 117.117° , 沙贝岸平转 92.2333°), 因此, 在下转盘上增设转向滑轮组满足一次平转到位, 平转过程不需更换千斤顶位置。

由千斤顶、泵站和主控台 3 部分组成的 ZTD 自动连续转体系统能够实现多台千斤顶同步不间断匀速

牵引结构转体到位。平转起动静摩擦系数按 10% 控制设计。平转角速度控制不大于 $0.57^\circ/\text{min}$, 主拱端水平线速度不大于 $1.2\text{m}/\text{min}$, 加速度不大于 $0.003\text{m}/\text{s}^2$ 。平转到位后进行轴线校正, 锚固边跨尾端竖向拉杆, 并依此恢复边拱支架, 收紧两组浪风。

丫髻沙大桥的合拢采用了瞬时合拢和永久合拢两个合拢阶段。设置瞬时合拢构造, 一方面满足瞬时合拢要求, 减小合拢段在焊接过程中温度影响, 另一方面以调整拱肋内力和轴线。合拢段长度 1000mm, 瞬时合拢构造放至弦管之间。采用花兰螺栓作永久合拢措施, 螺杆及螺母用厚壁钢管加工而成, 钢管上车细牙 T 型螺纹, 便于手工操作。拱肋合拢时的线型控制通过调整 1 号、2 号扣索索力和花兰螺栓, 使其符合一次成型标准两铰拱拱轴线。

丫髻沙大桥已于 1999 年 10 月转体成功, 2000 年 6 月建成通车。

参考文献:

- [1] 张联燕. 拱桥转体施工方法的发展. 北京: 国际公路运输技术交流会与展览会学术会议论文集, 1989-05
- [2] 张健峰, 钟启宾. 桥梁水平转体法施工的技术成就. 铁道标准设计, 1992 (6): 19-41.
- [3] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥设计与施工. 人民交通出版社, 1999-09.
- [4] 刘玉擎, 陈宝春, 彦坂熙. 中国における钢管コンクリート合成分アーチ橋および水平旋回架設工法の発展. 日本: 桥梁と基礎, 1999 (2).
- [5] 王道斌, 彭济南, 陈佑新等. 莲沱大桥钢管拱肋竖转吊装的方案设计与施工. 桥梁建设, 1997 (2).
- [6] 张健峰, 高景含. 平转法施工的刚性索铁路斜拉桥设计构思. 铁道标准设计, 1998 (2): 2-3
- [7] 庄卫林, 黄道全, 谢邦珠等. 丫髻沙大桥转体施工工艺设计. 桥梁建设, 2000 (1): 37-41.