

文章编号: 0451-0712(2006)03-0139-07

中图分类号: U445.465

文献标识码: B

佛山东平大桥竖转施工工艺的设计特色

彭立志, 李德钦, 刘 炜, 李友清, 宋满忠

(路桥华南工程有限公司 中山市 528403)

摘 要: 佛山东平大桥采用竖转结合平转的转体施工技术,其竖转总重量3 000 t,平转总重量14 000 t,是目前国内转体重量最大的一座拱桥。本文对其竖转施工工艺特色进行介绍和探讨。

关键词: 佛山东平大桥; 钢箱协作体系; 拱桥; 施工工艺; 转体施工

因桥梁转体施工具有节省吊装费用,减少高空作业,施工操作方便灵活,安全、可靠、整体性好,结构线形和内力易于调整控制,避免对桥下正常交通的干扰等特点,在国内外桥梁施工中得到了广泛应用,并不断向前发展。

佛山东平大桥采用竖转结合平转的转体施工技术,并对竖转工艺进行了创新和一些有益的探讨,本文着重介绍该桥的竖转施工工艺。

1 工程简介

1.1 桥位及结构形式

佛山东平大桥位于广东省佛山市禅城区南部,跨越东平河,是通往佛山市新城区的重要桥梁。该桥

全长1 427.2 m,由主桥和两岸引桥组成,其中主桥长578 m,宽48.6 m,跨径组合为43.5 m+95.5 m+300 m+95.5 m+43.5 m。主桥结构形式为连续梁—自锚式钢箱拱协作体系拱桥。主跨拱采用中承式三肋悬链线无铰拱,计算跨径为292.9 m,计算矢高64.37 m。每片拱肋由主、副拱组合而成,拱肋均采用箱形截面,主拱肋截面高3.0~7.2 m,宽1.2 m;副拱肋截面高为2.0 m,宽1.2 m。三片拱肋间每隔两个吊杆(立柱)间距设一道异型管式横撑,全桥共14道。边跨半拱为净跨径为49.1 m,净矢跨比为1/6的抛物线形,每片拱肋截面高3.0~4.0 m,宽1.2 m,箱内灌注C40混凝土。主桥结构总体布置如图1所示。

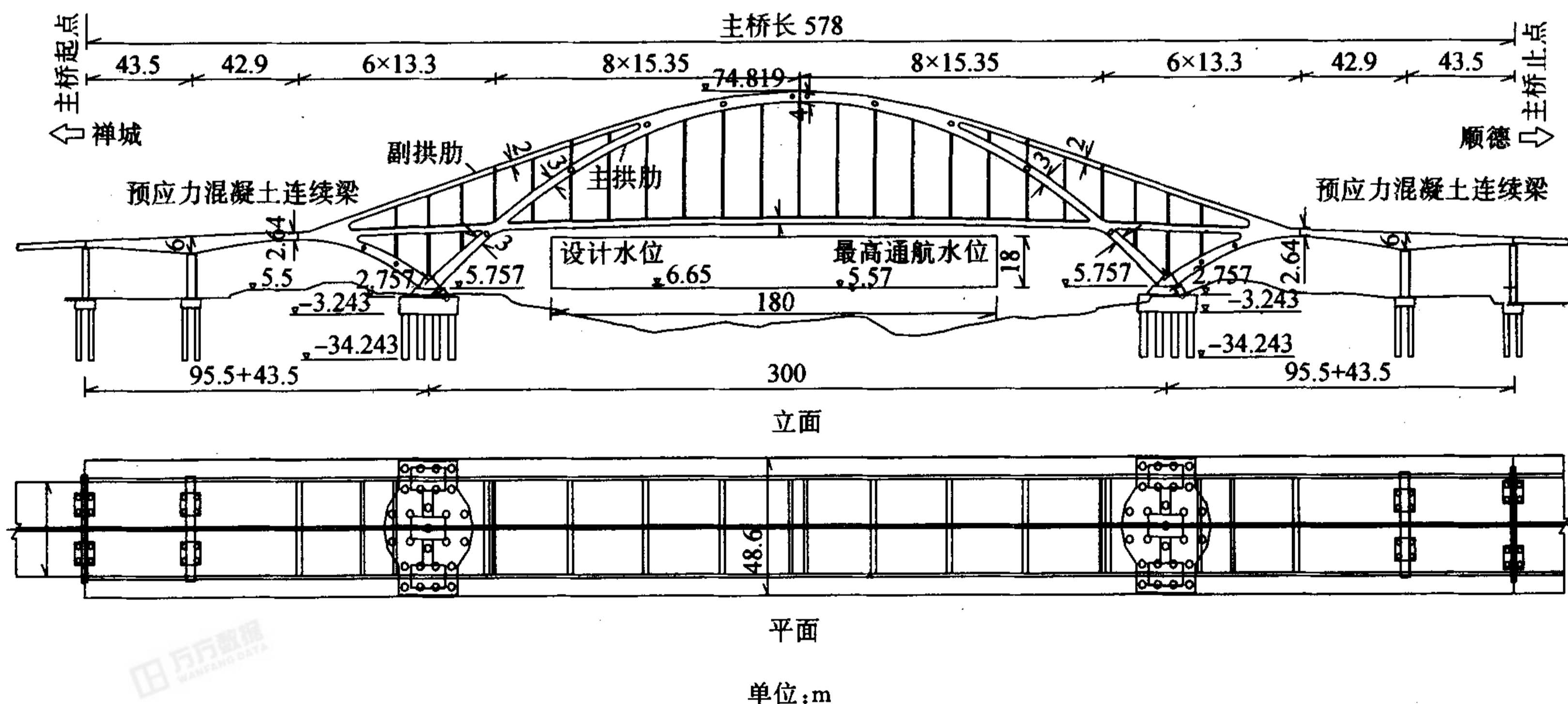


图1 主桥总体布置

1.2 转体施工有关技术指标

佛山东平大桥主拱肋的安装采用先竖转后平转的二次转体施工方案,是目前国内转体重量最大的一座拱桥。

转体结构几何尺寸:总长 201.1 m,宽 42.4 m,高 74.1 m;

平转角度:禅城岸 104.6° ,顺德岸 180° ;

平转总重量:14 000 t;

竖转角度: 25° ;

竖转总重量:3 000 t。

2 竖转施工工艺设计

2.1 竖转体系选择

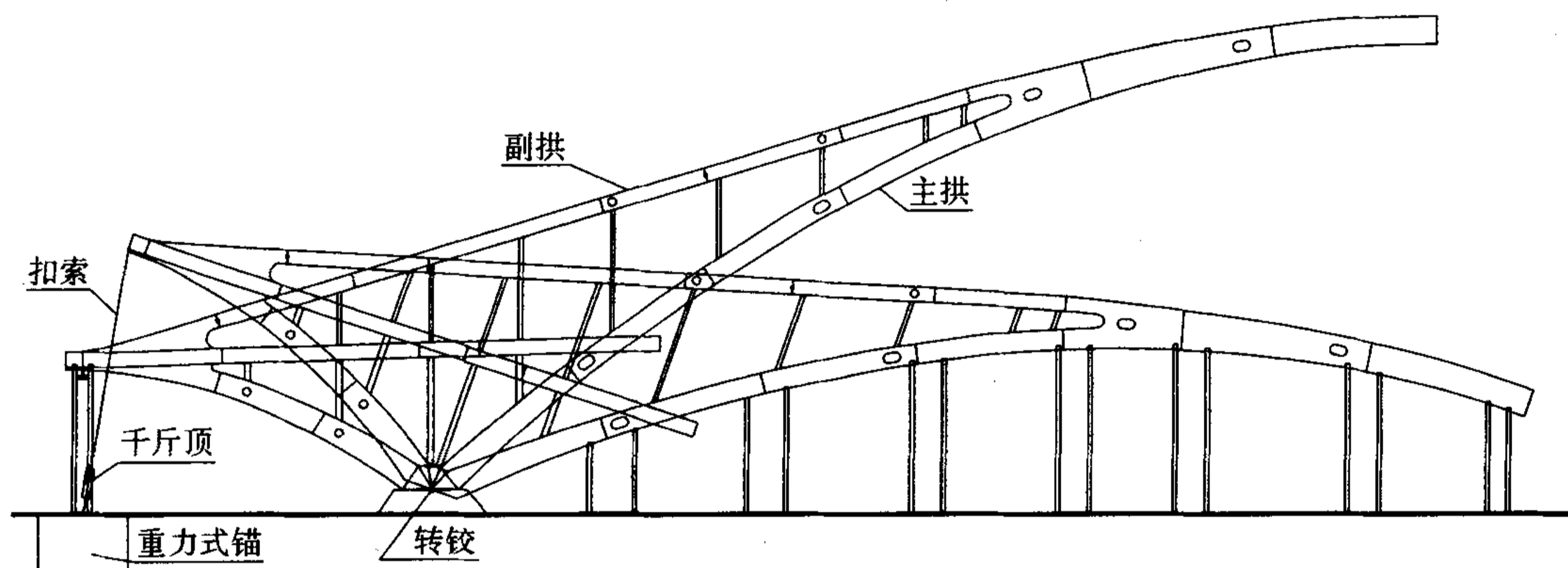


图2 竖转体系示意

(2)由索塔、扣索、索鞍、牵引系统、反力撑架等组成的竖转体系,该体系形式已经在广州丫髻沙大桥和徐州京杭运河大桥得到成功的运用,见图3所示。其特点是索塔设置在拱座上,仅对半跨主拱进行竖向转体,转动灵活,整体稳定性好,线形易于调整。但随着转动结构重量的增加,扣索索力和索塔的受力都比较大,相应需要的牵引设备和塔结构的材料都大大增加。扣索由于要经过索鞍,受其摩擦阻力的影响,索力不均匀,索鞍加工的材料和精度要求相对较高。同时扣索后锚设置在边拱端部,靠边拱的自重提供牵引反力,这样对边拱,特别是拱脚受力影响较大。此外还需在主拱设置反力撑架和前锚固块,转体合拢后其拆除比较困难。

(3)将第二种竖转体系的索塔移至主拱前端,成为提升塔,在主拱肋相应位置设置吊耳,同步提升千斤顶设置在塔顶,利用提升索和平衡索使主拱绕拱脚处的转铰竖向转体至设计标高,见图4所示。由于索塔移至主拱前端,提升索水平夹角很大,提供的

合理的转动体系是保证竖转施工成功的关键。结合本桥的特点,对3种竖转体系形式进行了比选。

(1)利用主拱、边拱和副拱形成的三角形稳定结构,通过在拱座位置处设置3组竖转铰,并在边拱端部设置竖向索由连续千斤顶提供向下的拉力,使结构整体竖向转动至设计标高,见图2所示。该转动体系不需要另外设置索塔和扣索等设施,具有施工工序简单、操作方便、稳定性好等特点,但单个竖转铰要承受约3 500 t的压力,而拱脚处应力比较集中,构造复杂,因而竖转铰的设计、制作和安装具有相当的难度。另外在边拱端部位置处需设置大型锚碇来承受竖向反力。

竖向力也就很大,因而索力相对较小,同时提升索直接锚固在塔顶不需要经过索鞍,各索索力比较均匀,有利于提升过程中的同步控制。虽然索塔高度有所增加,但由于索塔受力相对较小,因而结构比较简单,可节约施工用材。

经过多次专家会论证,认为采用第三种竖转体系,具有构造简单,转体结构受力明确合理,易于同步控制,更加安全可靠等优点,最终本桥采用了该竖转方案。

2.2 竖转体系构造

竖转体系总体布置见图4所示。

2.2.1 提升塔

提升塔采用等截面钢管桁架结构,承台以上塔高为78 m,见图5所示。对应每片拱肋设置一组桁架塔柱,每组桁架塔柱采用6根 $\phi 800 \times 14$ 钢管通过万能杆件平联桁片连接组成,塔顶部8 m段立柱钢管壁厚增加至16 mm,并通过 $\phi 450 \times 14$ 、 $\phi 351 \times 14$ 和 $\phi 273 \times 11$ 三种规格空钢管连接。每组塔柱钢管平面

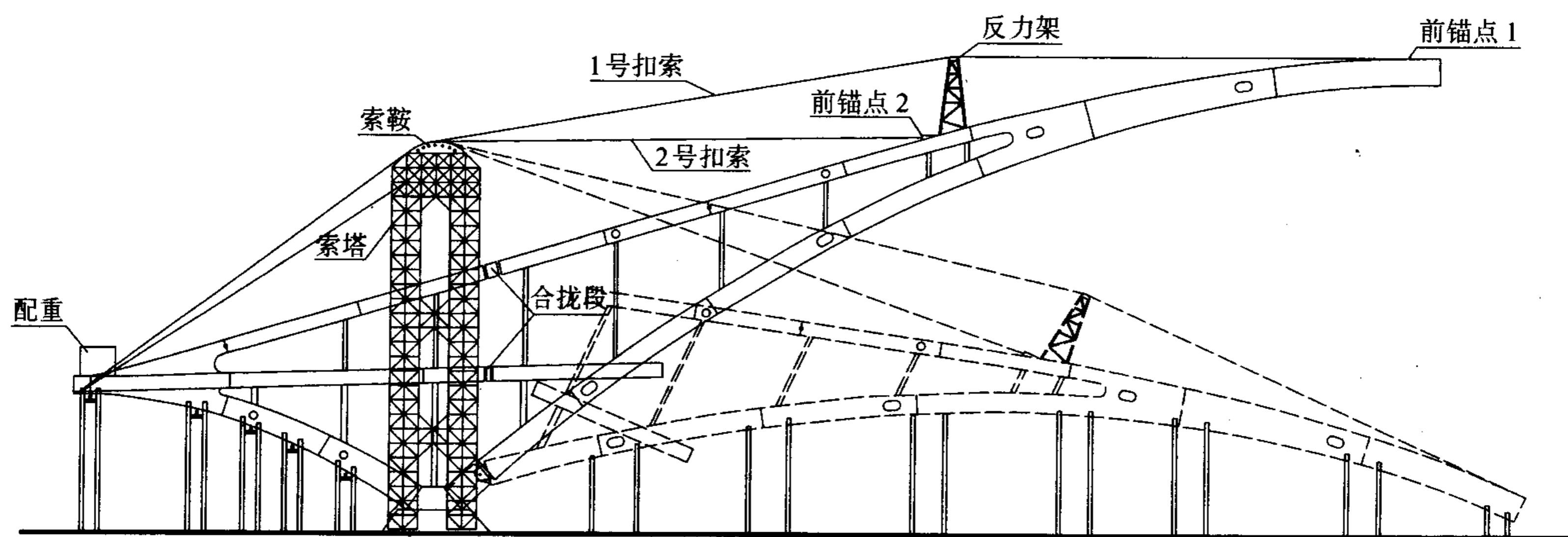


图3 丫髻沙大桥竖转体示意

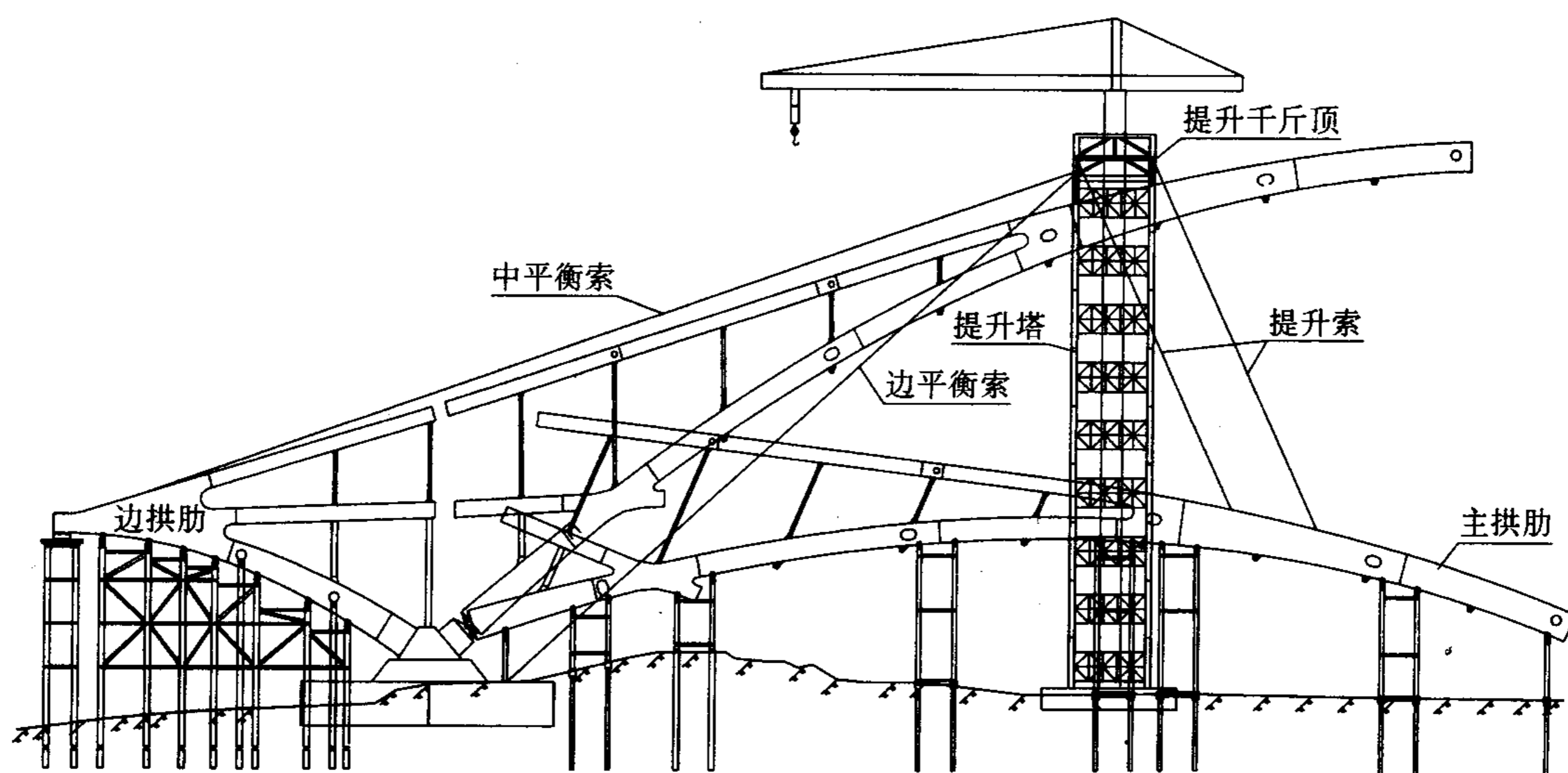


图4 改进后的第三种竖转体系

成六边形布置,纵向中心距离为10 850 mm,横向(与拱肋方向垂直)间距为6 850 mm。提升塔立柱钢管采用法兰及螺栓连接,考虑到塔吊的起吊能力,每根立柱分8段制作,节段长度为8 m和12 m两种(预埋段除外)。为增加提升塔的稳定安全度及横向刚度,3组桁架塔柱顶部通过由 $\phi 273 \times 11$ 组成的钢管桁架横梁连成整体,同时立柱钢管底节从承台顶面以上7.7 m范围内灌注C40混凝土。提升塔大部分钢管和平联均可回收再利用。

提升塔基础采用 $\phi 500 \times 125$ 的预应力混凝土管桩,打桩机打入,其顶部设置3 m厚的钢筋混凝土承台及系梁。

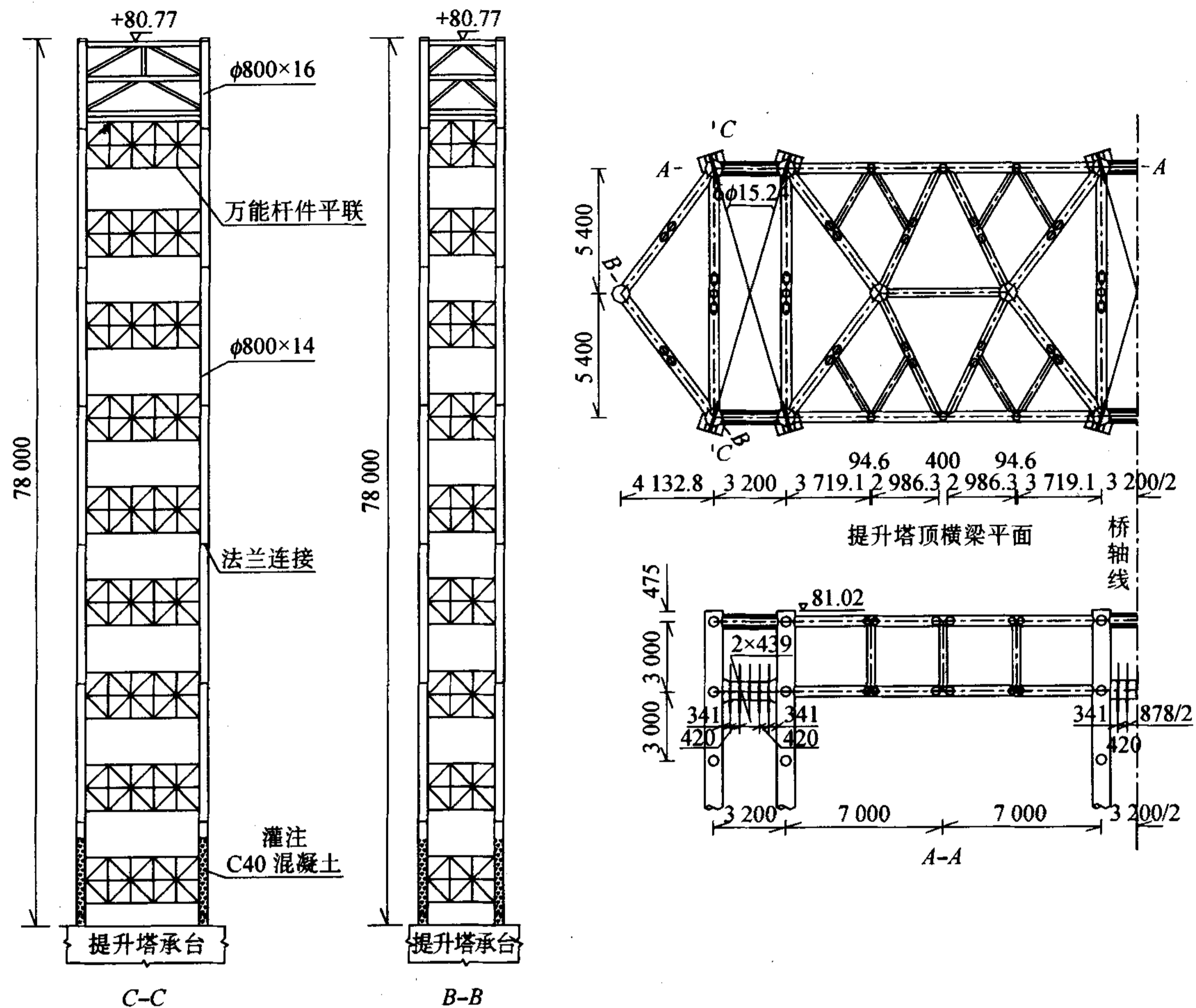
提升塔是竖转施工的主要承重结构,主要承受自重、索拉力、风载等荷载,其强度和稳定性是否满足施工设计要求,关系到竖转的施工安全。通过在各

种已知荷载作用下的计算结果表明,最不利管材最大组合应力为 -109 MPa(负号表示压应力),一阶总体稳定系数达27.7,结构稳定安全可靠。

2.2.2 提升索、平衡索

提升索主要是传递竖向力,克服拱肋的自重而使其转动,平衡索则是为平衡提升塔受到的水平力,改善其受力和保持转体过程的稳定而设置的。

提升索和平衡索均采用 $\phi 15.24$ 钢绞线。对应每片拱肋设置两组提升索,每组提升索由3束 $18 \times \phi 15.24$ 钢绞线组成,提升索上端穿过同步提升千斤顶并与悬挂系统连接,下端锚固于吊点横梁并与拱肋上的吊耳相连,其与竖直线的夹角最大为 18.46° 。平衡索共设置3组,分别对应提升塔3个桁架塔柱,其中两边塔柱平衡索采用 $31 \times \phi 15.24$ 钢绞线,布置于主拱肋外侧,上端锚固于塔顶部钢管立柱,下端锚



单位: mm

图5 提升塔构造

固于主墩承台上,其与水平线夹角约为 41.5° 。中塔柱平衡索采用 $2 \times 9 \times \phi 15.24$ 钢绞线,上端同样锚固在塔顶,下端则锚固于边跨拱肋组合段(副拱、系杆箱和边拱相交的节段),其与水平线夹角约为 20° 。提升索和平衡索锚固端均安装P型挤压头和夹片,确保钢绞线受力后不滑动。提升索计算最大索力为单束 107.5 t ,平衡索计算最大索力为单束 256.1 t ,单根钢绞线最大荷载为 111.1 kN ,最小安全系数达到 2.34 。提升索和平衡索在竖转过程中应随着竖转角度的变化进行索力调整,确保提升塔顶的纵横向偏位不超过设计要求(纵向 $\pm 3.8\text{ cm}$,横向 $\pm 3\text{ cm}$)。

2.2.3 同步液压提升控制系统

该系统由提升油缸、液压泵站和计算机控制系统等组成。整个竖转提升系统共使用 44 台油缸(千斤顶)、 8 台泵站、 2 台控制计算机和若干套传感器及其他相应的配套装置。其中提升索使用 18 台 200 t 千斤顶,平衡索分别使用 2 台 350 t 千斤顶和 2 台 100 t 千斤顶。

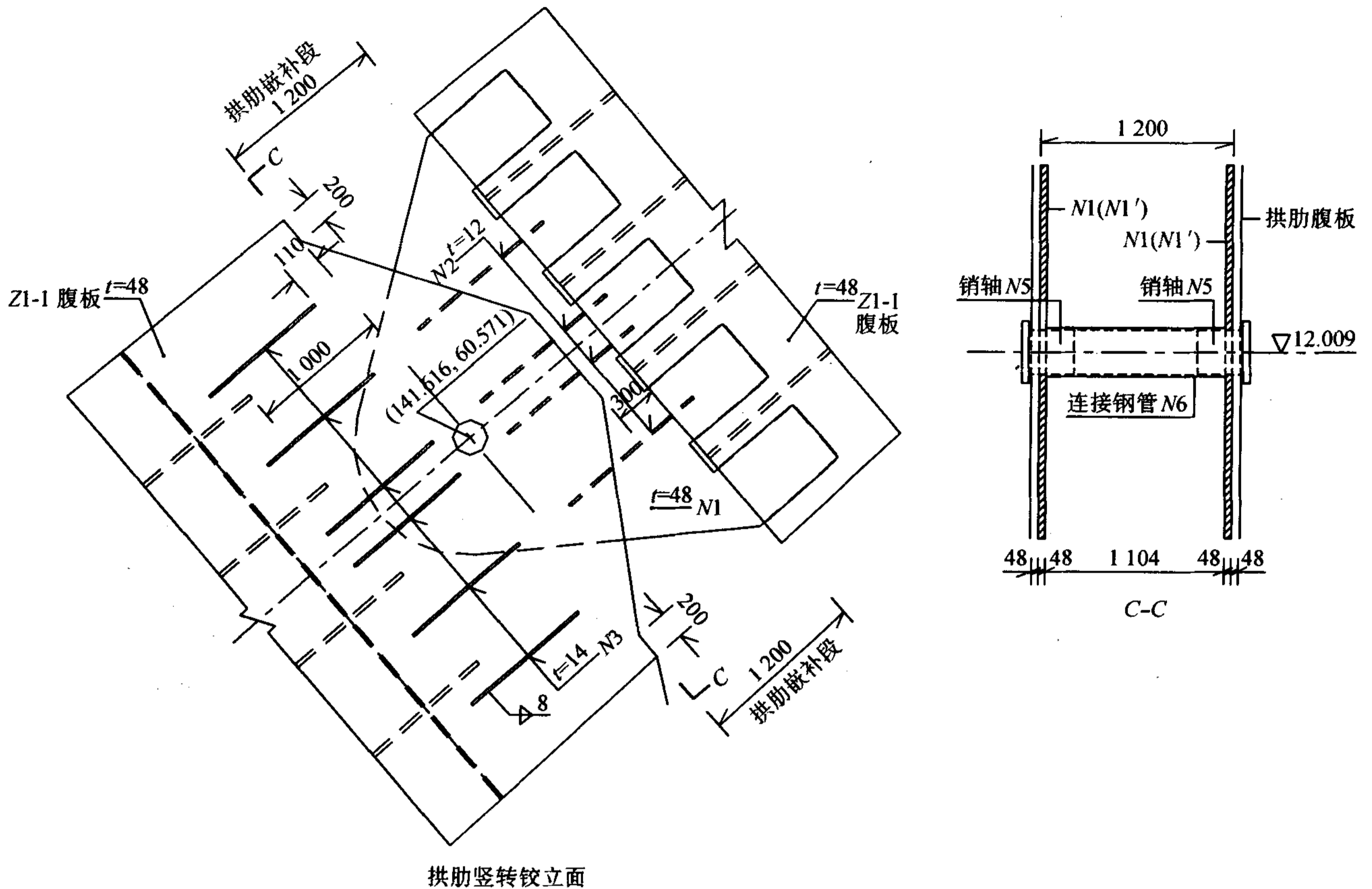
该同步提升系统已经过大量的工程实践检验,并不断地改进,可靠性高,国内领先。此次这套系统使用了更完备的多重保护措施,精度更高的距离和油缸行程传感器以及更加集成智能的计算机控制台。其先进的技术为确保大桥竖转的安全施工提供了保障。

2.2.4 竖转受力点

(1) 竖转铰。

竖转铰设置在主拱肋拱脚位置处,每片拱肋设置一组,采用销轴式。竖转铰轴直径为 250 mm ,材质为 45 号钢并经调质处理,穿过拱肋两侧腹板并通过连接钢管连接,具体结构见图6所示。为保证转动顺利,三片拱肋的竖转铰轴心必须在一条直线上,同心度允许偏差 $\leq 2\text{ mm}$ 。为消除拱肋节段加工及安装误差的影响,采用了现场镗孔法,即在拱肋节段拼装焊接完毕后,利用激光经纬仪在腹板上进行孔心放样,然后机械镗孔,从而保证了竖转铰的同心度。

(2) 千斤顶悬挂系统。



单位:mm

图6 竖转铰布置

在主拱提升竖转过程中,提升索与竖直线的夹角是随着竖转角度的变化而不断变化的,由脱架初期的 18.46° 变至拱肋到位状态时的 0° (即铅垂),为适应提升索角度的变化,专门设计了提升千斤顶悬挂系统。该系统主要由千斤顶油缸支架、连接吊耳及吊耳横梁组成,其中吊耳横梁采用两块哑铃形钢板穿过提升塔立柱钢管,并为之焊接成箱形梁,见图7所示。

该处是提升竖转系统的关键受力部位,受弯、扭、剪组合应力的影响,应力比较复杂,通过整体应力计算分析,最大组合应力为 -145 MPa ,局部分析最大应力达 255 MPa ,为保证受力安全,所有板材材质均采用Q345,焊缝等级为I级,并全部进行超声波和磁粉探伤检测。考虑到焊缝质量要求较高,该部位施工时采用地面组拼焊接,整体吊装就位。

(3) 拱肋吊耳

每片拱肋设置两组吊耳,与提升塔顶千斤顶悬挂系统对应,吊耳采用 38 mm 厚钢板制作,并与拱肋腹板焊接,吊耳通过销轴与提升索锚固横梁连接,销孔处贴 12 mm 厚钢板加强,以防止其产生局部变

形破坏。

2.3 竖转施工工艺

2.3.1 竖转施工组织机构

竖转施工是一项复杂的系统工程,竖转实施前成立专门的组织机构,包括指挥决策组、技术组、监控组、测量组、重点部位观察组、应急组、专家组、提升操作组等。

2.3.2 竖转前的准备和检查验收

竖转实施前应做好结构初始状态观测、障碍物的清除、通讯设备调试等准备工作,并对拱肋结构和提升竖转设施质量、监控监测点布设情况及缆风等应急措施准备情况进行检查验收,并制定相应的记录表格逐项签证。同时还应提前进行气象资料的预测预报。

2.3.3 脱架(试转)

按设计计算起动张拉力的 80% 、 90% 、 95% 、 100% 分级同步加载,每次加载按以下程序进行,并做好记录。

(1)操作:分级同步张拉提升索和平衡索,使索力达到预定值,每级加载持荷时间为 $10\sim 15\text{ min}$ 。

2.3.7 配重、边拱落架形成自平衡体系

合拢段焊接完成后,拆除顶升支架并按设计计算在边拱端部加平衡重,卸载部分提升索力后,沿边拱端部至拱座方向进行边拱落架,最后放松全部提升索,形成自平衡体系,准备平转。

3 几个探讨的问题

3.1 千斤顶悬挂系统布置

千斤顶悬挂的吊耳横梁受力比较复杂,而设计采用了钢板与钢管焊接的结构形式,导致该处应力相对集中,局部应力偏大,为此不得不进行局部加强,使结构变得复杂,制作安装、焊接难度增大,且受力不是很合理。如果将该横梁移至提升塔立柱钢管顶口,采用箱形截面梁并纵向连接成整体,则立柱钢管仅承受竖向轴力,力的传递也比较明确合理,既降低了局部应力,结构处理及施工相对也要简单方便很多。

3.2 平衡索的布置

最初设计时仅考虑在两边塔柱设置平衡索且平

衡索下端锚固于主墩承台上。这样布置可以避免平衡索对边跨拱肋受力的影响,但由于中塔柱未设平衡索,它受到的提升索传递的水平力必须通过塔顶横梁传递到边塔柱,由边塔柱的平衡索来承担,经计算,此时平衡索力达到每束 360 t,塔顶局部应力已超过其材料强度设计值。为此,在中塔柱又增设了两道平衡索,其下端锚固于边跨拱肋上(若锚固于主墩承台,则会与拱肋横撑干扰)。如果将两边塔柱平衡索也改成与中平衡索一样布置,后端锚固于边跨拱肋上,则可以减少其水平夹角,索力及塔的受力也随之减小,从而可以减少提升塔材料用量,节约资金,加快施工进度。

4 结语

佛山东平大桥竖转施工目前已顺利完成,拱肋实际线形与设计计算轴线非常吻合,这说明其独特的竖转体系是成功的,它不仅丰富了转体施工的内容,也为大跨径拱桥的施工提供了更多可靠的经验。

Design Features of Vertical Rotation Technology in Dongping Bridge at Foshan City

PENG Li-zhi, LI De-qin, LIU Wei, LI You-qing, SONG Man-zhong

(Road & Bridge Southern China Engineering Co., Ltd., Zhongshan 528403, China)

Abstract: Dongping Bridge at Foshan City adopts a vertical and horizontal rotation combination technology with 3 000 tonnes weight in vertical direction and 14 000 tonnes in horizontal direction and boasts the largest rotation weight up to date in China. The features of vertical rotation technology are introduced and explored in this paper.

Key words: Dongping Bridge at Foshan City; steel box girder collaboration system; arch bridge; construction technology; rotation construction

筑路机械制造、海上桥梁施工等领域的自主创新结出累累硕果

“产品可以模仿,但创新精神却无法复制。”2005年,通过坚持不懈的技术攻关和自主创新,路桥建设有4项科技成果通过省部级鉴定,达到国际先进或国内领先水平;8个科研项目在不同机构立项,累计获得各类研发资金及奖励567万元。

从四渡河特大悬索桥到佛山东平大桥,自主创新不仅为企业创造了良好的经济效益,而且有力地确保了路桥建设在市场高端领域的核心竞争力。海上桥梁施工系列技术产生直接经济效益约4 200万元,其中《承台与承台防撞结构一体化施工技术》目前已在国内逐步推广,创造了显著的社会效益。西筑公司生产的H系列强制间歇式沥青混合料搅拌设备,节能环保特征显著;MS9系列稀浆封层机获得五项国家专利,被用户誉为唯一能同国外高等级养护产品相抗衡的精品设备。