

文章编号:1006-2106(2007)05-0055-08

景德镇白鹭大桥钢塔竖向转体施工技术*

高兴泽 范大意 杨仁康**

(中铁大桥局股份有限公司, 武汉 430050)

摘要:研究目的:介绍景德镇白鹭大桥主桥钢塔竖向转体施工和计算机控制液压同步整体提升技术在竖转过程中的运用及其控制措施,为今后类似桥梁施工提供借鉴。

研究方法:总结以往的实践经验,采用扳起法竖向转体施工——即在被扳起的钢塔上安装人字扒杆,扒杆和钢塔本身形成一个稳定的三角结构,然后选取锚点、拉索,由计算机控制钢塔转体,确保钢塔竖向转体施工安全成功。

研究结果:历时9小时18分,钢塔成功竖转58°到位,合拢精度满足设计要求,偏差仅为2 mm,临时索力同计算相符。

研究结论:对于长达88 m的钢塔,整体采用扳起法竖向转体施工为国内首创,竖向转体全过程采用计算机控制,这也是目前国内最新颖最先进的大型构件提升安装技术。

关键词:钢箱塔;竖向转体;同步提升;技术创新

中图分类号:U44 **文献标识码:**A

Construction Technique for Vertical Swivel of Steel Tower of Jingdezhen Bailu Bridge

GAO Xing - ze, FAN Da - yi, YANG Ren - kang

(China Zhongtie Major Bridge Engineering Group Co. Ltd., Wuhan, Hubei 430050, China)

Abstract: Research purposes: The introductions are given to swinging vertical swivel of steel tower of Jingdezhen Bailu Bridge, application of hydraulically synchronous technique in hoisting entire vertical swivel and the control measures for it, for the purpose of providing experience for similar construction of bridge.

Research methods: We summarized the practice experiences and adopted the pulling method for swinging vertical swivel, namely one herringbone derrick mast was installed on the pulled steel towel to form a stable triangle structure, then choosing anchor point, and the swivel of steel towel was controlled by computer, to ensure the safety and success of construction for vertical swivel of steel tavel.

Research results: It took 9 hours and 18 minutes to swing the steel towel in place with 58° successfully. The closure accuracy met the design request with the error only of 2 mm and the cord force conformed to the calculated result.

Research conclusions: This was the first time in China to vertically swing a steel towel with total length of 88 m by adopting pulling method, and it was also the most advanced installation technology to hoist large - sized component with control of swinging cause by computer in China.

Key words: steel box towel; vertical swivel; synchronous hoisting; technical innovation

* 收稿日期:2007-04-16

** 作者简介:高兴泽,1959年出生,男,高级工程师,中铁大桥局股份有限公司副总经理。

缺点:整个体系受力较大,需布置较多油缸,钢塔本身亦需要适当加强,拉点部位的基础受力较大,所以该点最好借用桥梁本身结构,本桥也具备这个条件,可以利用钢梁上斜拉索锚箱作为拉点。

2.3 方案确定

经过比选,决定采用第二方案。系统的具体布置如图4所示。

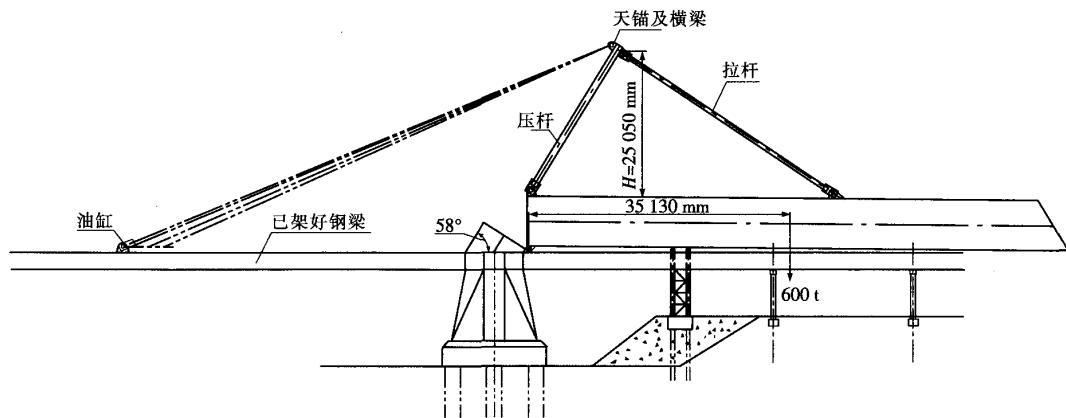


图4 景德镇白鹭大桥竖向转体施工方案总图

3 主要施工技术要点

3.1 钢塔制作及顶推

由于受施工场地和运输条件限制,钢塔采用工厂制作板单元,现场拼装焊接成节段,然后实施顶推的方案。

塔座同塔 1 在平台上匹配安装,同时匹配安装转

铰窝和铰轴,然后将塔座拖至理论位置按设计要求进行安装如图5所示,误差为0。钢塔顶推差3 m到位时进行纠偏,使钢塔轴线和理论轴线吻合,然后以塔座为基准在上下游各安装4 m长的导向,使钢塔沿导向顺利就位。实测钢塔前端偏位为0,尾端偏位为20 mm。

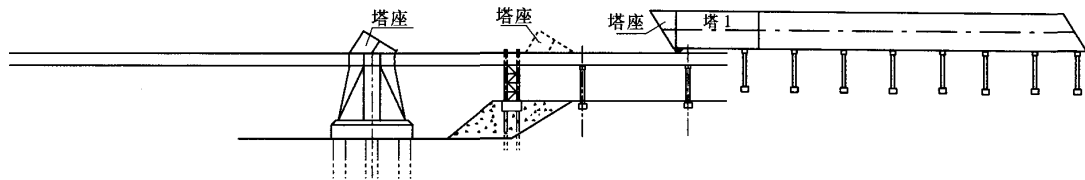


图5 钢塔顶推示意图

3.2 拉压杆安装

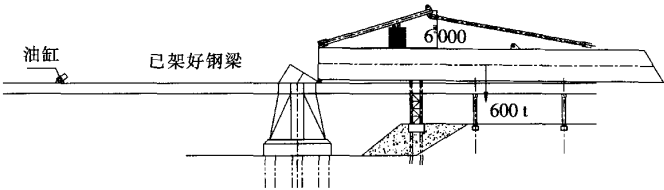
利用钢塔竖转临时索起升安装拉压杆,因其原始状态躺在钢塔上,这种情况下起升基本上处于自锁状态,是拉不动的,必须用千斤顶将拉压杆铰点顶高至6 m。拉压杆安装步骤如图6所示。

3.3 转铰窝和转轴的设计和安装精度

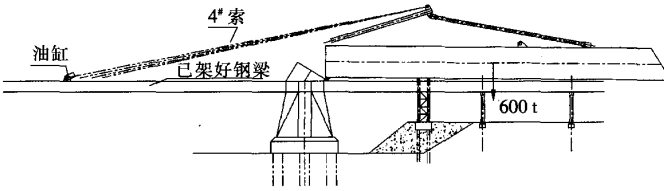
转铰窝和转轴均采用 35 锻钢制造,竖转过程中,钢绞线拉力的大小是否同计算相符、转动是否顺利取决于转铰窝和转轴的安裝精度及潤滑情况。在转铰窝安裝过程中,由于焊接变形影响使得转铰窝不同心度超过了 5 mm,采取的处理办法为:按照转轴的半径和长度制造了一个同心轴,将同心轴按设计要求安放在转铰窝上,在同心轴和转铰窝的间隙内填充巴氏合金,

然后在转铰窝周边焊上 6 mm 厚钢板将其封闭以提高其抗压强度。经过以上处理后的转铰窝安装精度结果如下:上下游转铰轴中心里程误差 1 mm;顶面标高误差下游为 1 mm,上游为 2.5 mm,上下游间最大误差 2.5 mm,铰轴外侧中心标高误差 1.5 mm;用长钢尺测量上下游塔座顶板到转铰轴距离为 7 040 mm,上下游塔 1#顶板到铰轴距离也为 7 040 mm(如图 7 所示),证明竖转到位后和塔座能够完全吻合,铰轴标高误差为其本身安装不完全同心引起。铰轴处的转动摩擦系数理论上不能给出较准确的数值,根据以往转动或滚动摩擦的经验,如果接触面不能完全耦合,转动过程中会发生爬坡现象或发出铿锵的声音。实际操作时保证转角窝和轴等机加工件的精度,同时保证其耦合面充分

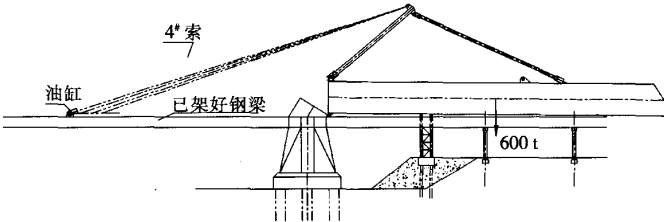
润滑,消除了由于接触及润滑不良引起的振动和异响, 起塔过程十分平稳。



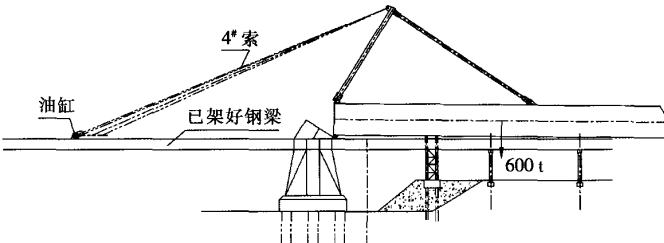
步骤 1: 钢塔在拼焊平台上组拼完成,利用起重龙门吊机吊装拉压杆和横梁并将其连接,将压杆用铰销同铰支座连接,然后拖拉钢塔到位,用液压千斤顶将压杆顶起超过水平高度 6 m



步骤 2: 穿好 4 台油缸和横梁间的 4 束钢绞线,利用钢绞线牵引拉压杆逐渐升起



步骤 3: 继续牵引拉压杆升高



步骤 4: 牵引拉压杆升起到位,利用倒链等辅助设施安装拉杆销,此时拉压杆全部安装完成,(可以继续驱动油缸进行钢塔竖向转体施工)

图 6 拉压杆安装步骤图(单位:mm)

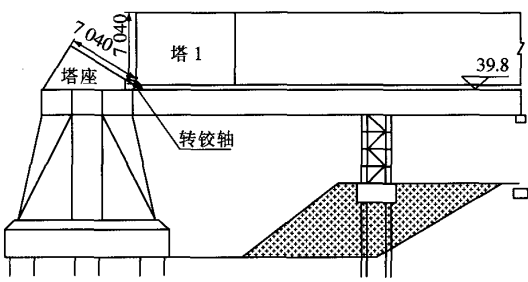


图 7 铰轴铰窝安装示意图(单位:mm)

3.4 横向抗风环套设计

为保证钢塔在竖转过程中的横向稳定,除在塔顶横向两侧布置了缆风绳外,在转铰轴处还设置了横向抗风环套,环套内径比转铰轴外径仅大 2 mm,使其只能在指定平面内转动,有效地加强了钢塔扳起过程中

的横向稳定,实际竖转过程中两侧缆风绳基本上没有带劲。其结构布置如图 8 所示。

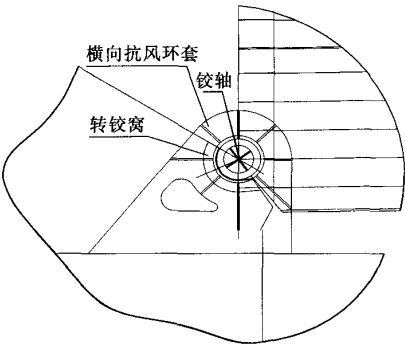


图 8 横向抗风环套安装示意图

4 竖向转体施工方案计算

4.1 主塔计算

主塔可以看成是一个箱型长梁,翼缘板和腹板设计厚度较小,因此在主塔的纵向加了2道纵隔板,钢塔内壁及纵隔板上加焊了若干道纵筋;主塔横向加了若干横隔板和横向加劲板。实际制造中,横隔板有3个孔,为加强其强度,在板上焊有加强筋,人孔四周又包了一块板。考虑到其对整个主塔的受力影响不大,所以为了建模方便,计算模型不挖人孔,其周围的板也不加。隔板的构造如图11所示。



图 11 横隔板构造图

使用 ANSYS9.0 有限元分析软件建立主塔的模型,计算立柱铰销和吊耳处的最大应力。主要使用了

4 种单元,其中,塔的四周、两道纵隔板、横隔板和横向加劲板使用板单元 shell63,纵筋及前拉杆、前压杆使用梁单元 beam188,后拉杆使用杆单元 link8,每组吊耳板之间的销使用梁单元 beam4。

主塔的有限元模型如图12,整个模型使用了103 576个节点,113 448个单元。考虑到主塔在安装过程中可能会出现大风,因此在建模和计算中考虑了两种工况:无风和有风(5级风,风速为10 m/s)。无风时结构的载荷即为其自重,有风时还要加上侧向风载荷。约束加在2个地方:立柱铰销处沿轴向和径向的位移及地锚处的所有自由度。

钢塔竖向转体施工在有风工况下各节点反力如表1所示。

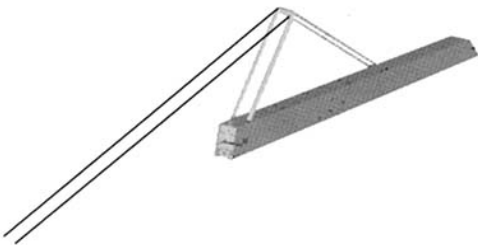


图 12 钢塔竖转计算模型图

表 1 钢塔竖向斜体在有风工况下各节点反力一览表

节点	F_x/N	F_y/N	F_z/N	$M_x/(N \cdot m)$	$M_y/(N \cdot m)$	$M_z/(N \cdot m)$
9402	-106 970	0.000 0	-828 840	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9503	41 571	0.000 0	-416 640	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9559	-114 640	0.000 0	-248 140	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9642	143 740	2 338 200	-0.880 13E-11	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9648	-80 976	1 020 400	0.495 82E-11	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9691	-57 641	17 037	-63 583	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9692	-29 781	43 024	-74 521	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9693	-17 321	43 624	-43 624	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9694	-12 598	114 350	-66 022	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9695	-27 246	-346 860	92 941	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9696	-41 509	23 441	-87 481	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9697	-12 440	131 560	-227 880	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9698	2 546.7	139 560	-139 560	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9699	19 144	290 730	-167 850	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9700	56 861	-492 890	132 070	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9716	177 150	779 910	-0.108 47E-10	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9720	26 424	-11 404	42 559	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9721	19 634	47 577	-82 405	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9722	20 018	45 532	-45 532	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9723	28 693	104 360	-60 252	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9724	68 778	-199 670	53 501	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9783	153 030	0.000 0	-1 179 900	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9789	-85 354	0.000 0	-2 650 500	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9817	81 363	2 103 600	-0.498 19E-11	0.000 0	0.000 0	0.000 0

续表 1 钢塔竖向斜体在有风工况下各节点反力一览表

节点	F_x/N	F_y/N	F_z/N	$M_x/(N \cdot m)$	$M_y/(N \cdot m)$	$M_z/(N \cdot m)$
9818	-41 924	-105 950	395 420	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9819	-21 930	233 750	-404 870	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9820	-10 972	212 990	-212 990	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9821	619.51	380 910	-219 920	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9822	25 328	-189 980	50 905	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9823	179 040	887 790	-0.109 63E-10	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9827	59 867	-80 770	301 440	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9828	26 862	93 798	-162 460	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9829	24 318	72 105	-72 105	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9830	35 116	146 910	-84 818	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9831	76 634	-150 650	40 366	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9907	-181 390	0.000 0	-881 170	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9935	-91 280	804 680	0.558 91E-11	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9936	-77 468	-47 014	175 460	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9937	-38 361	76 861	-133 130	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9938	-29 023	64 090	-64 090	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9939	-29 916	128 860	-74 396	0.000 0	0.000 0	0.000 0
9940	-46 996	-153 480	41 125	0.000 0	0.000 0	0.000 0
92258	-0.245 54E-08	-1 279 700	3 689 900	0.000 0	0.000 0	0.000 0
92259	0.000 0	-1 275 200	3 677 100	0.000 0	0.000 0	0.000 0
Σ	111 010	6 012 000	0.167 62E-01	0.000 0	0.000 0	0.000 0

ANSYS9.0 计算结果:无风工况下最大应力为 372 MPa,有风工况下(5 级风)最大应力为 486 MPa,均发生在转轴、钢塔底腹板和边腹板的焊接相交点处的微单元上。理论计算虽存在超应力情况,判断不会压溃。

钢塔计算重量为 601.2 t,作用在距转轴中心 35.13 m处,在钢塔平卧初始工况刚启动时为最不利,由此引起的钢绞线拉力和各部位反力最大。根据该结果钢绞线最大拉力为:

$$F_y = 128\text{ t} \quad F_z = 369\text{ t}$$

所以 $F = 2 \times \sqrt{128^2 + 369^2} = 781.14\text{ t}$,则钢绞线应力为:

$$\sigma = \frac{7\,811\,400}{4 \times 31 \times 140} = 450\text{ MPa} < 1\,860\text{ MPa}$$

此时压杆压力为 642.94 t,拉杆拉力为 458.7 t,转铰支座处反力为 1 131 t。实际提升时油缸反应的最大荷载为 786 t,同理论计算的 781.14 t 比较,误差仅为 0.6%,证明转铰窝、转轴和抗风环套安装非常精确,它们之间的转动摩擦面刨光涂满黄油后转动摩擦系数很小,为以后同类型工程施工提供了可以借鉴的依据。

4.2 拉压杆铰点高度 H 的选定

合适的 H 值会使拉压杆的制造、安装方便并使临时拉索的拉力控制在较小范围内。 H 过大索力较小但

拉压杆制造、安装困难,且结构用钢量较多,成本大; H 过小则索力较大,引起钢塔本身受力大,加固要求高。经过反复模拟计算、研究比较,本次竖转 H 值采用 25.05 m,实践证明是合理的。

5 计算机控制液压同步提升技术

本次钢塔竖转提升设备是上海同新机电控制技术有限公司提供和操作的,其技术特点、系统组成和控制原理如下。

5.1 计算机控制液压同步提升技术的特点

- (1) 通过提升设备扩展组合,提升重量、跨度、面积不受限制;
- (2) 采用柔性索具承重,只要有合理的承重吊点,提升高度与提升幅度不受限制;
- (3) 提升油缸锚具具有逆向运动自锁性,使提升过程十分安全,并且构件可在提升过程中的任意位置长期可靠锁定;
- (4) 提升系统具有毫米级的微调功能,能实现空中垂直精确定位;
- (5) 设备体积小,自重轻,承载能力大,特别适宜于在狭小空间或室内进行大吨位构件提升;
- (6) 设备自动化程度高,操作方便灵活,安全性好,可靠性高,适应面广,通用性强。

5.2 系统组成

计算机控制液压同步提升系统由钢绞线及提升油缸集群(承重部件)、液压泵站(驱动部件)、传感检测及计算机控制(控制部件)和远程监视系统等几个部分组成。

钢绞线及提升油缸是系统的承重部件,用来承受提升构件的重量。可以根据提升重量(提升载荷)的大小来配置提升油缸的数量,每个提升吊点中油缸可以并联使用。本工程采用 350 t 提升油缸,为穿芯式结构。钢绞线采用高强度低松弛预应力钢绞线,公称直径为 15.24 mm,抗拉强度为 1 860 N/mm,破断拉力为 260.7 kN,伸长率在 1% 时的最小载荷 221.5 kN,每米重量为 1.1 kg。钢绞线符合国际标准 ASTM A416 - 87a,其抗拉强度、几何尺寸和表面质量都得到严格保证;根据方案要求,需要钢绞线 18 t 左右,其中左旋 9 t,右旋 9 t。

液压泵站是提升系统的动力驱动部分,它的性能及可靠性对整个提升系统稳定可靠工作影响最大。在液压系统中,采用比例同步技术,可以有效地提高整个系统的同步调节性能。

传感检测主要用来获得提升油缸的位置信息、载荷信息和整个被提升构件空中姿态信息,并将这些信息通过现场实时网络传输给主控计算机。主控计算机可以根据当前网络传来的油缸位置信息决定提升油缸的下一步动作,同时,主控计算机也可以根据网络传来的提升载荷信息和构件姿态信息决定整个系统的同步调节量。

5.3 同步提升控制原理及动作过程

5.3.1 同步提升控制原理

主控计算机除了控制所有提升油缸的统一动作之外,还必须保证各个提升吊点的位置同步。在提升体系中,设定主令提升吊点,其它提升吊点均以主令吊点的位置作为参考来进行调节。主令提升吊点决定整个提升系统的提升速度,操作人员可以根据泵站的流量分配和其它因素来设定提升速度。主令提升速度的设定是通过液压系统中的比例阀来实现的。

在提升系统中,每个提升吊点下面均布置一台长距离传感器,在提升过程中这些长距离传感器可以随时测量当前的构件高度,并通过现场实时网络传送给主控计算机。每个跟随提升吊点与主令提升吊点的跟随情况可以用长距离传感器测量的高度差反映出来。

主控计算机可以根据跟随提升吊点当前的高度差,依照一定的控制算法,来决定相应比例阀的控制量大小,从而,实现每一跟随提升吊点与主令提升吊点的位置同步。

为了提高构件的安全性,在每个提升吊点都布置了油压传感器,主控计算机可以通过现场实时网络监测每个提升吊点的载荷变化情况。如果提升吊点的载荷有异常的突变,则计算机会自动停机,并报警示意。

5.3.2 提升动作原理

提升油缸数量确定之后,每台提升油缸上安装一套位置传感器,传感器可以反映主油缸的位置情况、上下锚具的松紧情况。通过现场实时网络,主控计算机可以获取所有提升油缸的当前状态。根据提升油缸的当前状态,主控计算机结合控制要求(例如,手动、顺控、自动)可以决定提升油缸的下一步动作。

6 结论

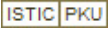
(1) 白鹭大桥主桥结构形式采用三跨连续单索面独塔无背索竖琴式斜拉桥,对于长达 88 m 的钢塔,整体采用扳起法竖向转体施工方案为国内首创。同其它方案相比,最少节约成本 150 万元,工期提前 30 天以上,体现了其创新性和先进型,并具有较明显的经济效益。

(2) 竖向转体施工全过程采用计算机控制液压同步整体提升技术,这是目前国内最新颖、最先进的大型构件提升安装施工工艺在桥梁建设中的应用。随着科技进步和技术创新的不断加快,先进的施工工艺会不断在桥梁施工中得到应用,并且在提高安全控制能力、降低施工成本等方面发挥越来越重要的作用。

(3) 竖向转体施工中,从节约成本的角度出发,后锚点如何考虑利用桥梁本身结构是值得探讨的一个问题,它可以利用桥梁墩台及其基础结构,也可以在上部结构上设置锚点。本次直接采用钢梁斜拉索锚箱作为锚点非常成功、非常合理,也是非常经济的,同时也为今后类似桥梁施工提供了借鉴。

(4) 计算机控制液压同步整体提升技术由专业化作业队伍实施。本案说明,依靠先进的技术和设备,进行专业化作业,在单项工程施工中具有明显的优势,既加强了安全质量控制,也促进了施工技术的创新和发展。

(编辑 慕成娟)

作者: 高兴泽, 范大意, 杨仁康, GAO Xing-ze, FAN Da-yi, YANG Ren-kang
作者单位: 中铁大桥局股份有限公司, 武汉, 430050
刊名: 铁道工程学报 
英文刊名: JOURNAL OF RAILWAY ENGINEERING SOCIETY
年, 卷(期): 2007, 24 (5)
被引用次数: 4次

本文读者也读过(10条)

1. 李文琪. 鄂黄长江公路大桥主梁施工技术[会议论文]-2001
2. 晁庚奇. Chao Gengqi. 苏州竹园自锚式悬索桥施工[期刊论文]-铁道建筑技术2005 (2)
3. 徐强. 杨威. 蒋敏杰. Xu Qiang. Yang Wei. Jiang Minjie. 绥芬河斜拉桥塔梁同步施工控制技术的研究[期刊论文]-城市道桥与防洪2007 (11)
4. 范大意. FAN Da-yi. 景德镇白鹭大桥施工控制计算[期刊论文]-南昌工程学院学报2008, 27 (4)
5. 侯显洪. 电气化接触网土建接口工程[期刊论文]-铁路技术创新2010 (1)
6. 张平. 蒋建. 董勤军. 蔡伟. 刘颖. 大跨径悬索桥钢塔塔底钢混连接处承压板后压浆施工技术[期刊论文]-中国工程科学2010, 12 (4)
7. 戴少雄. 谢斌. 曹景. Dai Shaoxiong. Xie Bin. Cao Jing. 西安市灞河2号桥拱形钢塔竖转施工方案[期刊论文]-城市道桥与防洪2009 (4)
8. 张强. 整体竖转技术在斜拉索桥倾斜索塔施工中的应用[会议论文]-2009
9. 李学俊. 李斌. Li Xuejun. Li Bin. 独塔无背索弯坡斜拉桥主梁施工技术[期刊论文]-现代交通技术2009, 6 (4)
10. 范大意. 陈征宇. FAN Da-yi. CHEN Zheng-yu. 计算机液压同步提升技术在某桥梁施工中的运用[期刊论文]-南昌工程学院学报2008, 27 (3)

引证文献(4条)

1. 张氢. 陈丹丹. 卞永明. 范大意. 大桥主塔起拔法竖转施工技术及其工艺的虚拟样机仿真[期刊论文]-建筑技术2010 (6)
2. 张氢. 关霄剑. 宋文杰. 卞永明. 秦仙蓉. 锦州小凌河大桥竖转施工关键技术[期刊论文]-建筑机械化 2011 (1)
3. 范大意. 陈征宇. 计算机液压同步提升技术在某桥梁施工中的运用[期刊论文]-南昌工程学院学报 2008 (3)
4. 胡广瑞. 锦州小凌河大桥钢拱塔架设技术[期刊论文]-桥梁建设 2012 (4)

引用本文格式: 高兴泽. 范大意. 杨仁康. GAO Xing-ze. FAN Da-yi. YANG Ren-kang. 景德镇白鹭大桥钢塔竖向转体施工技术[期刊论文]-铁道工程学报 2007 (5)