张靖皋长江大桥南航道桥南主塔塔底节段制造工艺研究

赵达斌

中铁山桥集团有限公司　河北秦皇岛　066205

摘要：张靖皋长江大桥南航道桥跨度2300m，为世界第一大跨度悬索桥，南主塔高350m，塔底节段设置120mm的超厚度承压板作为塔底锚固，塔底节段采用了钢箱-钢管混凝土组合结构，受力大、结构复杂、钢板厚度大、焊接量大，制造过程中存在焊接变形控制、尺寸控制、塔身轴线度控制等难题，通过对制造工艺、难点分析和控制项点的研究，实现了塔底节段的成功制造。

关键词：钢塔；制造；工艺研究；承压板；焊接变形

Study on south main tower base segment fabrication procedure of Zhang-Jing-Gao Yangtze River south channel bridge

Zhao Dabin

China Railway Shanhaiguan Bridge Group Co., Ltd., Qinhuangdao 066205, Hebei, China

Abstract: Zhang-Jing-Gao Yangtze River south channel bridge with span of 2300 meter is the longest suspension bridge in the world. South main tower of the Bridge is 350 meters high. In the base segment, 120mm super thick bearing plate is used for anchoring. Base segment is a combined structure of steel box, steel pipe and concrete with characteristics of bearing high force, complicated structure, super thick plates and huge quantity of welding. Many difficulties like weld deformation control, dimension control and tower axis control happened during fabrication. Studies are conducted on fabrication procedure, difficulties analysis and control points so that base segments are fabricated successfully.

Keywords: steel tower; fabrication; procedure study; bearing plate; weld deformation

1　序言

张靖皋长江大桥南航道桥采用主跨2300m整体箱钢箱梁悬索桥，梁跨布置为2300m＋717m＝3017m，主缆矢跨比为1∶9，主缆横向间距42.9m，标准索距16m。南索塔为门式框架主塔，群桩基础，塔顶标高＋354m，塔底标高＋4m，塔高350m。南索塔设三道钢横梁，分上塔柱、中塔柱、下塔柱，塔柱外轮廓采用矩形带凹槽结构型式，改善塔柱空气动力性能。南索塔塔柱划分T1～T30共计30个节段（含鞍罩），塔底T1节段高度3.6m。南索塔钢箱结构如图1所示，采用钢箱内设4根直径3.6m的钢管约束混凝土柱，通过腹板、横隔板与钢

作者简介：赵达斌，高级工程师，从事钢桥、钢结构制造及安装架设等工作，E-mail：ZDB1973@126.com。

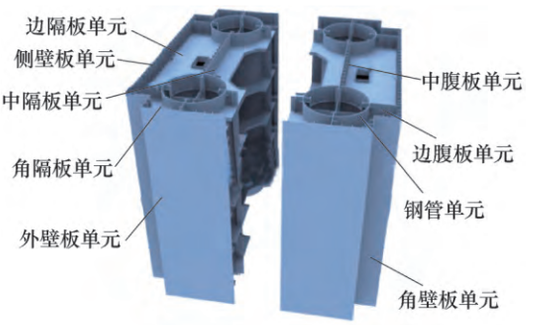


图1　南航道桥南索塔钢箱结构

箱形成整体[1]。

塔底节段为T1节段，结构如图2所示。节段底部设置120mm厚度承压板，T1节段作为塔底锚固，分钢箱锚固与钢管锚固两部分。采用承压板和锚固螺杆相结合的方式，钢箱及钢管截面周圈设置直径130mm 高强螺杆，对螺杆施加预拉力以保持塔柱截面与支承面之间紧密接触，承台内设有螺杆锚梁构造。

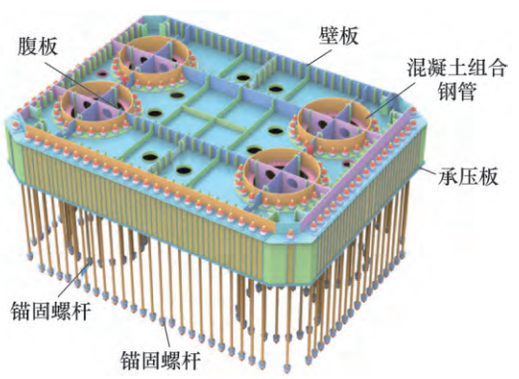


图2　南航道桥南索塔塔底节段结构

2　制造工艺

2.1　总体流程

张靖皋长江大桥底节段T1板单元及零部件制造完成后，按照“板单元→节段”的总体顺序进行，拼装总体按照从内到外、从下到上、从中间到两边，主要结构成形后组装细部结构的原则进行。

2.2　制造难点分析

（1）120mm厚度承压板接料　T1节段作为塔柱的基础，为重要受力构件，其底部承压板120mm厚，重约200t，受钢厂轧制能力限制，120mm×13700mm×18200mm承压板需分10块钢板轧制接料而成，接料过程存在大量的对接焊，且接成后无法进行再修整，承压板焊接质量及焊后平面度，是影响钢塔节段T1制造质量及后续整体线形的关键难点[2]。

（2）大断面结构焊接结构变形控制　塔底节段内部构造如图3所示。由图3可知，该结构复杂，纵向和横向密布钢筋，内部空间狭小，焊接量大，且多为密集的熔深焊缝，设定合理的组装焊接顺序、设置合适的工装对于控制塔底节段的尺寸尤为重要[3, 4]。

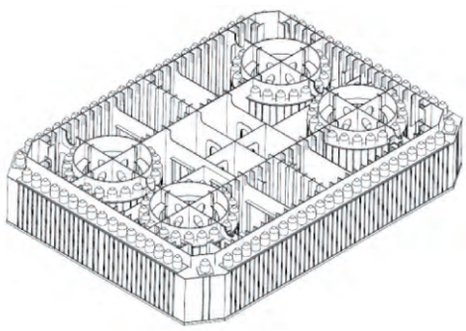


图3　塔底节段内部构造

2.3　制造工艺流程

（1）板单元两拼　组装前对板单元的件号、几何尺寸进行复核，重点检查每块板单元上的横、纵基线位置是否与图样一致。两拼一组装横向定位时，板单元宽度方向预留3mm焊接收缩量（可根据实际情况进行调整）。组装时要精确调整两板单元的相对位置，组装时基线（横基线）要求对齐，横基线对位允许偏差≤0.5mm，并打好样冲标记，作为整体拼装时板单元定位基准线。两块板单元纵基线间横向尺寸允许偏差≤1mm，且保证拼接后的对角线差不超过3mm。同时控制板单元基准端的直线度，且不得累计[5]。组装后，纵基线间的横向宽度组装尺寸允许偏差0～＋1mm。

（2）承压板接料

1）在120mm厚承压板零件正式焊接前，进行了焊接工艺评定试验，通过试验确定焊缝坡口、焊接预热温度、焊接参数及焊接变形数据，制定最佳的焊接工艺及变形控制措施；结合其他项目经验及试验结果，采用U形坡口以减小熔敷金属填充量（见图4）。

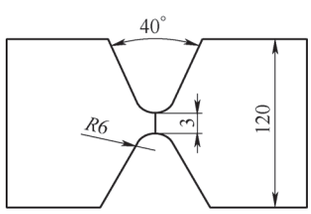
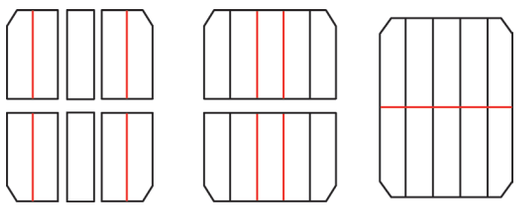


图4　承压板接料对接坡口

2）接料采用先“二拼一接宽”→“三拼一接

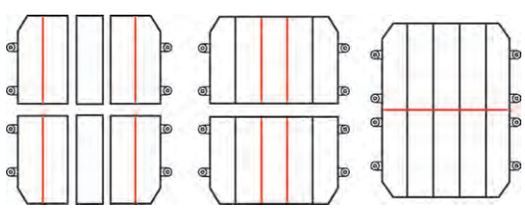
宽”→“二拼一接长”的工艺方案，接料顺序如图5所示。



a）二拼一接宽　b）三拼一接宽　c）二拼一接长

图5　承压板接料顺序

3）焊接前预加合适的反变形量及适当压重，在焊接过程中跟踪变形情况，结合试验数据，变形到达限值时实施钢板翻身，焊接另侧坡口，实现坡口两侧交替焊接，减小焊接变形，保证钢板焊后平面度。同时，为保证实现坡口两侧交替焊接，在钢板非焊接端头焊接吊耳，以实现钢板多次顺利翻身，吊耳安装位置如图6所示。



a）二拼一接宽　b）三拼一接宽　c）二拼一接长

图6　承压板吊耳安装位置

4）焊前采用电加热或感应加热的方式进行预热，预热温度120～150℃，使钢板均匀受热，焊接过程中控制道间温度在120～200℃，焊后采用石棉保温，减缓焊缝冷却速度。

（3）承压板定位　在承压板上标注方向、刻划系统线，采用划针划线，并打上样冲标记，系统线允许偏差≤0.5mm。在块体组焊胎架上，将承压板基线与定位线严格对齐，并用连接件将其与胎架焊接固定，防止组装、焊接过程中发生偏移，承压板组装定位如图7所示。

（4）组装中腹板单元、隔板单元　以承压板基线为基准组装内部的中间腹板单元及两侧隔板单元，焊接中腹板与承压板焊缝时做好支撑、防护，保证腹板、隔板的组装位置、垂直度，如图8所示。

（5）对称定位侧腹板单元、隔板单元　以承压板基线为基准对称组装侧腹板单元、隔板单元，焊接边腹板与承压板、两侧加劲的焊缝时做好支撑、防护，保证侧腹板单元、隔板单元的组装位置、垂直度，如图9所示。

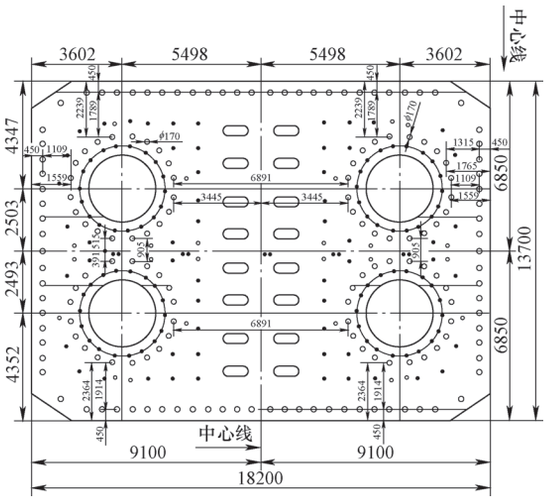


图7　承压板组装定位

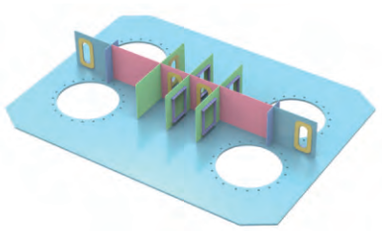


图8　中心腹板、隔板组装定位

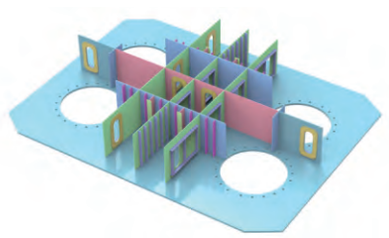


图9　腹板、隔板组装定位

（6）组装钢管单元　以承压板基线为基准组装圆管单元，焊接圆管与承压板、边腹板的焊缝时做好支撑、防护，保证圆管的组装位置、轴线角度，如图10所示。

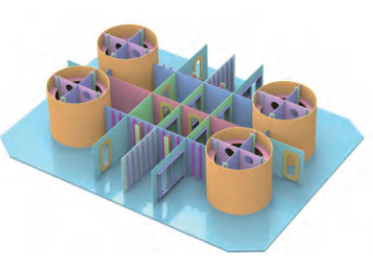


图10　钢管单元组装定位

（7）对称组装边隔板单元　组装圆管外围边腹板，焊接其连接焊缝时要保证边隔板与圆管及承压板密贴，保证边隔板的组装位置、垂直度，如图11

所示。

焊接腹板、隔板、钢管与承压板间熔透角焊缝。焊接时应对称施焊，若焊缝一端有自由端，应从非自由端向自由端焊接。

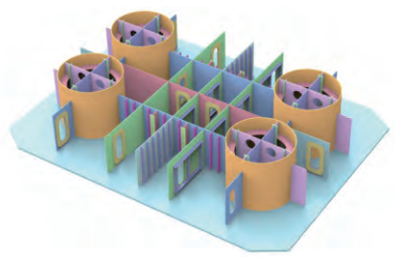


图11　边隔板组装焊

（8）钢管周圈锚固组装定位　以圆管为基准对称组装周圈加劲板，周圈加劲板逆时针组装焊接。周圈加劲板可以边组装边焊接，如图12所示。注意腹板两侧加劲板先放到位置附近，不进行定位，待腹板与钢管角焊缝焊接完成后再进行组焊。

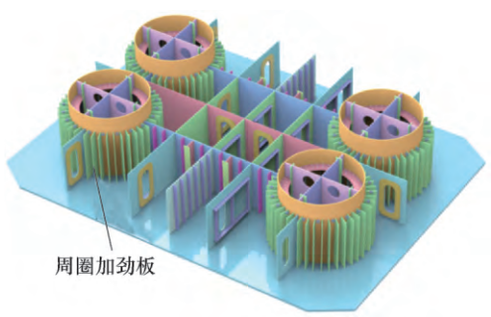


图12　钢管周圈加劲板组焊

（9）上承板组装定位　上承板吊装就位。先焊接腹板、下隔板与上隔板间的仰位角焊缝，从中间往四周对称施焊；然后焊接隔板与钢管的熔透角焊缝，焊接时同向对称施焊；再焊接中间的隔板对接焊缝，最后焊接两边的隔板对接焊缝。注意检测合格后再组装圆管周圈锚固板，如图13所示。

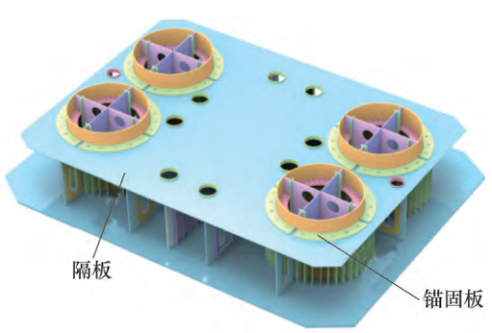


图13　上层承板组焊

（10）钢管周圈锚固封板组焊　定位组装腹板两侧圆管加劲板、周圈封闭加劲和角壁板两侧的大T肋。

焊接封闭加劲板与周圈加劲板间的立位角焊缝，焊接加劲板与承压板间平位角焊缝和顶部隔板间仰位角焊缝。焊接大T肋与承压板间角焊缝，如图14所示。

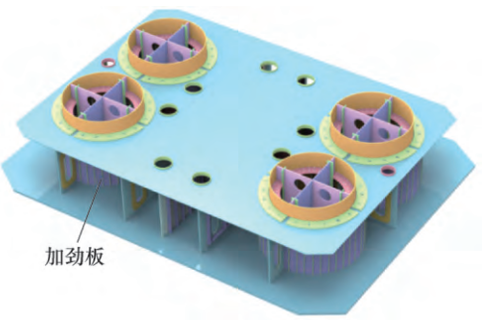


图14　锚固封板组焊

上隔板焊接完成后，再组焊腹板周圈的隔板、加劲板，具体顺序如图15所示。

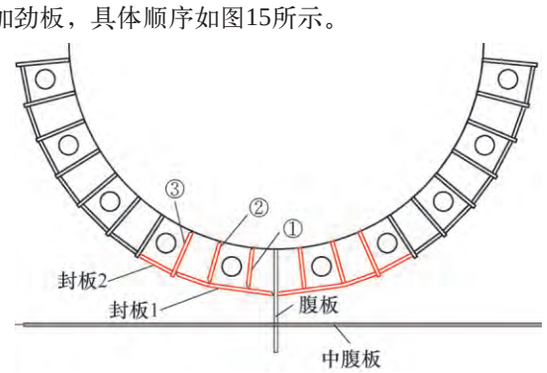


图15　锚固封板焊接顺序

注：①～③代表焊接顺序。

（11）对称组装壁板、角壁板　以承压板基线为基准组装外侧壁板和角壁板单元，保证壁板的组装位置、垂直度；并做好支撑、防护，如图16所示。对称焊接侧壁板、角壁板与承压板间熔透角焊缝，对称焊接隔板与壁板间熔透角焊缝。

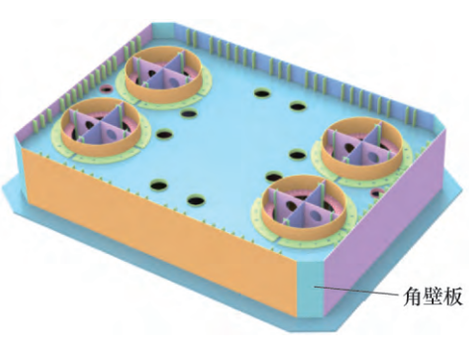


图16　外侧壁板组焊

（12）外侧锚固板组装　以锚固板孔心及承压板锚孔中心为基准组装外侧锚固板，保证锚固板的孔心位置。然后从中间往两端逐块安装、焊接锚固板加劲，如图17所示。

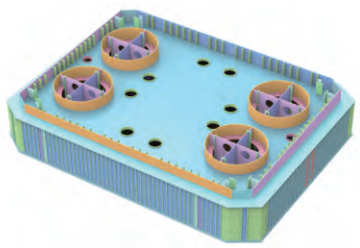


图17　外侧锚固板组焊

（13）上承板上部连接结构组装焊接　以节段系统线为基准组装隔板上的腹板及各类壁室加劲板，保证加劲板的组装位置、垂直度。焊接壁室加劲板与隔板的焊缝，如图18所示。

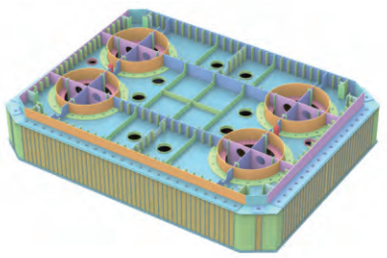


图18　上承板上部连接结构组焊

3　工艺控制关键项点

3.1　拼装胎架

塔底节段拼装在专用拼装胎架上完成，如图19所示。

在拼装过程中，T1节段拼装将腹板等结构按铅垂设置，胎架按斜面布置。T1节段拼装胎架设置前，在胎架外设置钢塔节段纵、横向定位基线，以便随时对胎架上的定位基准及钢塔柱组装时的尺寸及线形进行检测。胎架在水平面上固定，基础有足够的承载力，确保在使用过程中不发生沉降。胎架具有足够的刚度，避免在使用过程中变形。对拼装过程中的胎架沉降数据进行检查和分析，确认拼装开始到拼装结束胎架各点位、各个结构部位最大沉降为2mm，胎架整体处于稳固可靠的状态[6]。胎架各牙板高程经过检测满足±1mm的允许偏差。

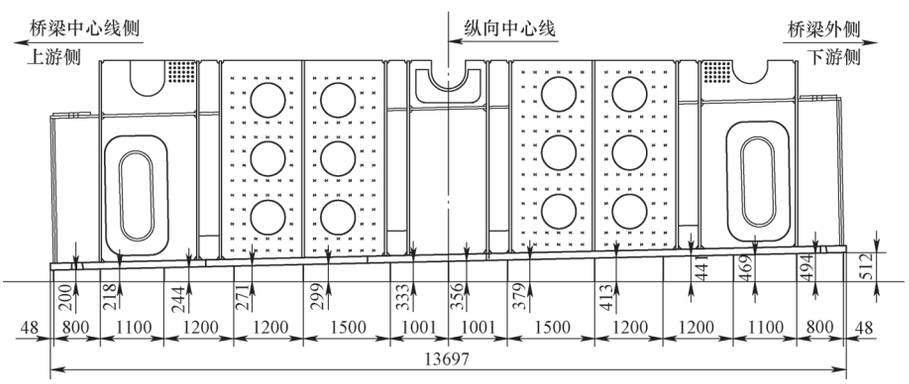


图19　胎架上拼装塔底节段

3.2　过程焊接变形控制

由于塔底节段的结构自身特性会带来单向的变形，因此需要对过程中的焊接变形进行提前控制。

1）钢管单元组装焊接会带来承压板的变形，两承压板的中心区域会有下凹趋势，由于结构尚未封闭成为整体箱形，因此需停止下一步结构组装，对承压板的背面区域进行了火焰配合千斤顶的方式进行局部矫正，即中心部位采用4套200t液压千斤顶辅助，在背面火焰矫正，矫正温度控制在750℃以下，焊后经过4～5天修整，将中心区域承压板变形校正至3mm以内[2]。

2）外部加劲板焊接过程中，承压板外缘处于无拘束约束状态，顶面密集的加劲板焊接后会产生上翘变形的趋势。且四角位置加劲板较少，较四边位置拘束小。过程中按照从中间向两边的顺序组装垂直壁板的锚固加劲，焊接锚固加劲板与壁板、承压板的焊缝。采用边组装边焊接的递进组焊方式，组装部分板肋后及时在承压板下方配合火焰矫正。

3.3　连接关系及尺寸控制

T1节段与T2节段间连接包括：壁板间对接焊接（带间隙的熔透对接焊缝）、钢管间对接（带间隙的熔透对接焊缝）、加劲板之间高强度螺栓联接、

横纵向隔板腹板等结构对接焊接、钢管内部钢筋对接焊接。

所有壁板、钢管、横纵向隔板、腹板在下料制造阶段在顶口部位预留了25mm的二次切割余量[7]，在节段下胎前根据焊后尺寸情况，采用轨道式半自动切割小车进行端部二次切割。

桥位采用4个角点固定支墩的方式进行T1节段定位[8]，为保证T1顶面环口高程精确、测控点位置精确，提前在厂内测量T1节段4个角点位置高程（桥位定位高程基准）与钢管中心高程（厂内高程基准）之间差值，对桥位4个角点固定支墩采用提前加垫的方式将节段4角垫高，确保节段高度准确[9]，如图20所示。

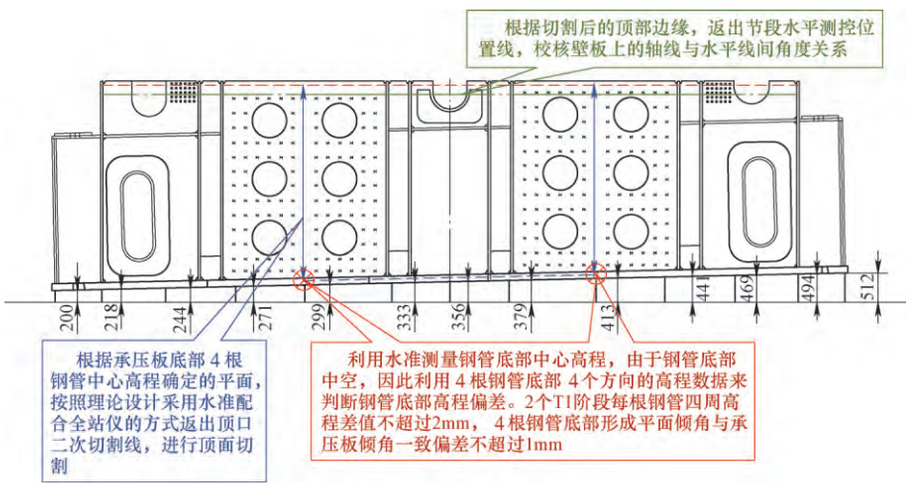


图20　塔底节段高程尺寸控制基准

4　结束语

1）通过对主塔塔底节段复杂结构分析确定了“板单元→节段”的总体组拼顺序，并按照从内到外、从下到上、从中间到两边，主要结构成形后组装细部结构的组焊流程，保证了塔底节段结构复杂的成功制造。

2）根据主塔塔底节段结构特点针对结构复杂、钢板厚度大、焊接量大和大断面结构焊接结构变形控制难点，通过采取拼装胎架设计、焊接变形控制、连接关系及尺寸控制等措施，保证了索塔塔底节段高品质制造。

3）通过实际生产证明了塔底节段制造方法、关键工艺要点和控制措施的合理性，为此后类似结构的制造提供了参考。

参考文献：

[1] 王仁贵. 张靖皋长江大桥南航道桥设计创新[J]. 东南大学学报（自然科学版），2023，53（6）：979-987.

[2] 李灿明，杨柯，刘俊权，等. 100mm超厚钢板Q460GJD-Z35焊接的控形、控性[J]. 建筑技术开发，2022，49（13）：8-10.

[3] 张剑峰，车平，孙立雄，等. 桥梁钢塔柱制造焊接技术[J]. 金属加工（热加工），2011（10）：29-32.

[4] 许颖强. 太原摄乐大桥异型钢-混混合塔柱施工技术[J]. 桥梁建设，2018，48（2）：99-104.

[5] 马立芬. 美国新海湾大桥上部钢结构的设计及制造[J]. 世界桥梁，2012，40（5）：1-6.

[6] 卢玉春，陆海. 公路桥钢塔制造技术研究[J]. 公路，2015，60（3）：75-78.

[7] 王建国. 张靖皋长江大桥南航道桥组合钢塔制造工艺研究[J]. 交通科技与管理，2023，4（15）：84-86.

[8] 吴义龙. 马鞍山长江公路大桥钢塔线形控制技术[J]. 世界桥梁，2014，42（6）：21-25.

[9] 张永利，吉敏廷. 南京长江三桥钢索塔制造精度管理系统研究[J]. 钢结构，2008（1）：56-60.

MW 20240207