DOI: 10.7672/sgjs2024180069

常泰长江大桥5号墩索塔下塔柱施工关键技术*

黄甘乐1,2,吕昕睿1,3,孙南昌1,3

(1.中交第二航务工程局有限公司,湖北 武汉 430040;
2.长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室,湖北 武汉 430040;
3.中交公路长大桥建设国家工程研究中心有限公司,北京 100088)

[摘要]常泰长江大桥主塔采用钢混混合空间钻石形构型,结构复杂,施工难度大。为了探究索塔下塔柱在施工过 程中的结构性能,采用 MIDAS/Civil 建立索塔有限元模型,对下塔柱施工进行了分析。结果表明:设置2道对拉杆 能有效改善施工过程中塔肢根部拉应力;横桥向支架断开有利于下横梁线形控制;纵桥向下横梁对顶的有效顶推 力、顶口相对位移与塔肢根部拉应力均呈线性关系;下横梁支架最大拉应力106MPa、最大压应力125MPa;现场实 测结果表明施工方案安全可靠。

[关键词]桥梁工程;斜拉桥;钻石形索塔;下塔柱;有限元分析;施工技术 [中图分类号]U445.4 [文献标识码]A [文章编号]2097-0897(2024)18-0069-07

Key Construction Technology of Lower Pylon of No. 5 Pier for Changtai Yangtze River Bridge

HUANG Ganle^{1,2}, LÜ Xinrui^{1,3}, SUN Nanchang^{1,3}

(1. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430040, China;

2. Key Laboratory of Large-span Bridge Construction Technology, Wuhan, Hubei 430040, China;

3. CCCC Highway Bridges National Engineering Research Centre Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: The main tower of Changtai Yangtze River Bridge adopts the steel-concrete mixed space diamond shape, the structure is complex and the construction is difficult. In order to explore the structural performance of the lower pylon during construction, the finite element model of the pylon was established by MIDAS/Civil software and the construction of the lower pylon was analyzed. The results show that setting two pull rod can improve the tensile stress at the root of the tower limb during construction. The disconnection of the transverse bridge support is beneficial for its linear control of the lower cross beam; The effective push force of the lower beam of the longitudinal bridge has a linear relationship with the relative displacement of the closing port and the tensile stress at the root of tower limb. The maximum tensile stress of the bracket is 106MPa, and the maximum compressive stress is 125MPa; The on-site measurement results are in good agreement with the theoretical calculation results.

Keywords: bridges; cable stayed bridges; diamond-shaped pylon; lower pylon; finite element analysis; construction

本文以常泰长江大桥下塔柱施工为例,对下塔 柱施工过程进行模拟,针对下塔柱施工过程中的结 构受力进行分析和优化。

1 工程概况

常泰长江大桥主航道桥(142+490+1 176+490+

142=2 440m)为双层钢桁梁斜拉桥。该桥采用钢混 混合空间钻石形桥塔,主塔设计总高 352m,分上、中、 下塔柱 3 个区段,中、下塔柱采用钢筋混凝土结构。 下塔柱高 48.5m,单个塔肢为正八边形,倾斜角度为 14.33°,外轮廓尺寸由下至上为 13m×13m 渐变至 11m×11m,壁厚由下至上为 2.3~1.9m。下横梁位于 下塔柱与中塔柱交界处,为单箱单室截面,其中横桥 向下横梁高 8m、宽 7m,梁底曲线半径为 126m,纵桥

^{*} 中交集团科技研发计划课题(2020-ZJKJ-03)

[[]作者简介] 黄甘乐,检测工程师,工程师,E-mail: 2535717787@ qq. com [收稿日期] 2023-09-07

向下横梁跨中高 6m、宽 6m,梁底曲线半径为 35.3m。 在纵桥向及横桥向下横梁跨中均设置 2m 后浇带。

主塔下横梁支架承重结构采用钢立柱+型钢形 式,如图1所示。纵、横向分别布置10根和16根钢 立柱(φ1200×14),钢立柱底部锚固在承台上,侧边 通过平联与塔肢连接,柱顶及牛腿上方设置卸荷 块。钢立柱间通过平联(φ600×8)及斜撑(φ600×8) 钢管连接。钢立柱顶部布置主横梁(2HN900×300 型钢),塔肢包边主横梁布置在牛腿上。主横梁上 布置 HN900×300 型钢作为纵梁,纵梁上铺设 125a 分配梁,分配梁上方布置拱形模板桁架。





图 1 下横梁支架及节段划分

Fig. 1 Lower cross beam bracket and segment division

2 下横梁总体施工方案

2.1 下塔柱对拉施工工艺

5 号墩索塔下塔柱划分为 8 个节段,其中1 号 节段(3m)与承台一起浇筑,其余各节段均高 6m,8 号节段与下横梁连接并一起浇筑。下塔柱 2 号节段 采用模板施工,第 3~7 号节段采用液压爬模施工。 由于下塔柱整体向外倾斜,在施工到一定高度后, 需设置对拉杆以避免塔肢根部拉应力超限。塔肢 在横桥向倾斜角度较大,因此在横桥向塔柱间分别 设置 2 道对拉杆,第 1 道设置在第 4 节间的 25.850m 处,第 2 道设置在第 6 节间的 38.000m 处。 2.2 下横梁与塔柱同步施工工艺

下橫梁为支架现浇方式,将下横梁分为4个L 形块,并预留4个合龙口,每个L形块竖向采用不分 层一次性施工。具体施工工艺如图2所示。



Fig. 2 Construction process flow

3 数值模拟方法

下塔柱施工过程采用 MIDAS Civil 进行建模计 算分析,索塔及支架结构均采用梁单元模拟,对拉 杆采用桁架单元模拟,其中索塔采用 C60 混凝土, 弹性模量取 *E*=3.65×10⁴MPa,泊松比为 0.2;支架 Q235 钢弹性模量为 2.1×10⁵MPa,泊松比为 0.3。 荷载考虑结构自重,爬模按单肢 300t 加载,对拉杆 拉力通过单元升降温控制。塔肢底部与支架底部 采用固结,下横梁与支架体系间采用弹性连接。混 凝土浇筑过程采用双单元法模拟,一层仅定义密度 不定义弹性模量,用于模拟混凝土浇筑后还未形成 强度时的结构受力状态;另一层仅定义弹性模量, 在混凝土形成强度后激活。施工步骤如表 1 所示, 下塔柱有限元模型如图 3 所示。

4 下塔柱施工分析

4.1 下塔柱对拉分析

下塔柱原对拉方案为在浇筑完 7 号节段后,在 38.000m处设置对拉力为 15 000kN 的对拉杆,由于 施加对拉力前塔肢底拉应力最大值为 1.18MPa,大 于控制值 1MPa。如调低对拉杆位置,则需施加更 大对拉力,此时对拉局部处的混凝土应力难以满足 要求,因此考虑在 25.850m 处再增设 1 道对拉杆。 2 道对拉杆的控制原则如下:①25.850m 处对拉杆 需保证施加对拉力后塔肢底部拉应力<1MPa;

71

表1 下塔柱施工步骤

Table 1 Construction steps of lower pylon						
编号	工况	编号	工况			
1~6	浇筑1~6号节段	16	横桥向横梁后浇带浇筑			
7	25.850m 对拉杆张拉	17	张拉第1批横梁预应力钢束			
8	浇筑7号节段	18	纵桥向横梁对顶			
9	38.000m 对拉杆张拉	19	纵桥向横梁后浇带浇筑			
10	支架及拱架架设	20	张拉第2批纵梁预应力钢束			
11	浇筑 8 号节段①号 L 横梁	21	浇筑9号节段			
12	浇筑 8 号节段②号 L 横梁	22	张拉第2批横梁预应力钢束			
13	浇筑 8 号节段③号 L 横梁	23	拆除支架			
14	浇筑 8 号节段④号 L 横梁	24	张拉第3批纵、横梁 预应力钢束			
15	张拉第1批纵梁预 应力钢束	25	拆除下塔柱对拉			



图 3 下塔柱有限元模型 Fig. 3 Finite element model of lower pylon

②38.000m 处对拉杆需与 25.850m 处对拉杆共同 作用,保证施加对拉力后塔肢底的受力状态与原方 案计算结果保持一致;③保持 2 道对拉杆拉力相近 以便预埋件设计。

由于塔肢间支架的存在,在考虑施工空间后, 通过弯矩等效方式确定2道对拉杆的布置位置及对 拉力大小,最终确定2道对拉杆在25.850m和 38.000m处布置,对拉力分别为9600,9800kN。以 1号塔肢应力变化为例,由图4可知,当不设置对拉 杆时,随着施工节段增加,塔肢内侧拉应力逐渐增 大,当施工完7号节段,塔肢内侧拉应力为 1.18MPa,在整个施工过程中塔肢根部应力最大 2.3MPa。当采用2道对拉杆时,在能降低浇筑完7 号节段塔肢根部应力的同时保证其他施工阶段的 受力状态与1道对拉杆方案相一致,且整个下塔柱 施工过程中,下塔柱根部拉应力均≤1MPa。

由图 5 可知,25.850m 处对拉杆对拉力在整个 下塔柱施工过程中变化不大,38.000m 处对拉杆仅 在下横梁浇筑过程中有一定变化,最大变化量 为40kN。



4.2 下横梁施工分析

4.2.1 方案比选

索塔、下横梁通常采用同步施工或异步施工, 采用不同施工方式会对结构的受力性能有不同影 响,对于空间4塔肢索塔,结构整体性能尤为重要, 以下对3种施工方案进行比较:①方案1,塔梁同 步,按4个L形块分别浇筑;②方案2,塔梁异步,先 浇筑塔柱,再按方案1顺序浇筑下横梁;③方案3, 塔梁异步,按边跨横梁→中跨横梁→下游横梁→上 游横梁的顺序浇筑,其中上、下游横梁预留后浇带。

由表2可知,下塔柱施工完成后,方案2塔肢 ②,③绕横桥向弯矩远大于方案1,3;方案3绕横桥 向弯矩远小于方案1,2。由表3可知,方案1与方 案3在拆除对拉杆后塔肢根部应力相差不大,方案 2塔肢②,③外侧压应力明显大于方案1,3。对于空 间4塔肢索塔,结构整体性尤为重要,当采用异步施 工时,塔柱与下横梁间存在新老接合面,会降低结 构整体性,而塔梁异步施工在结构受力上无显著优 势,因此方案1更合适。

4.2.2 支架形式

索塔下横梁有4道(见图3),体量较大,因此将

表 2 拆除对拉杆后塔肢根部弯矩

Table 2 Bending moment at the root of tower limb

after removing pull rod					(k	$(N \cdot m)$
编号	方案1		方案2		方案 3	
	M_x	My	M_{x}	My	M_x	M_y
1	78 177	203 626	58 953	190 546	26 987	210 577
2	79 014	204 695	78 087	481 027	18 485	203 582
3	43 736	208 148	37 709	226 976	18 891	202 515
4	44 385	208 095	33 236	447 744	10 327	203 673
		1 - 1 - 1 - 1				

注:M_x 为绕纵桥向弯矩,M_y 为绕横桥向弯矩

表 3 拆除对拉杆后塔肢根部应力

Table 3 Stress at the root of tower limb after removing

			pull re	od		MPa	
编号	方案 1		方题	方案 2		方案 3	
	内侧	外侧	内侧	外侧	内侧	外侧	
1	-1.0	-2.5	-1.1	-2.4	-1.2	-2.4	
2	-1.0	-2.5	-1.3	-3.4	-1.3	-2.4	
3	-1.1	-2.5	-1.1	-2.5	-1.4	-2.3	
4	-1.1	-2.5	-0.7	-3.5	-1.3	-2.4	

其划分为4个L形块分别浇筑。传统浇筑方式通常 采用分层浇筑或整体浇筑,荷载作用相对均匀。当 采用分块浇筑时,先浇筑的下横梁作用在支架上 后,支架内力增大,其几何刚度也随之增大,从而影 响后浇筑的下横梁竖向变形,最终对下横梁整体线 形造成影响。由于横桥向横梁跨度较大,分别对其 支架跨中断开与不断开2种情况进行分析。横桥向 下横梁支架如图6所示。



图 6 横桥向下横梁支架示意

Fig. 6 Bracket of the lower cross beam in the transverse direction

由表4和图7可知,当支架未断开时,纵桥向下 横梁合龙口在合龙前存在明显高差,先浇筑侧比后 浇筑侧低8.6mm,横桥向合龙口高差3.1mm。当横 桥向支架断开时,合龙口无高差。支架跨中断开较 不断开时的支架轴力最大值高100kN。下塔柱施工 完成后,支架未断开时的下横梁竖向位移最大 24.6mm,且关于跨中不对称;支架断开时的下横梁 竖向位移最大23.8mm,且两侧对称。由上可知,支 架是否断开对横桥向下横梁线形影响较大,对纵桥 向下横梁影响相对较小,因此横桥向支架应采取主 动断开,纵桥向支架可不断开,通过预拱修正。

表 4 下横梁合龙口位移

Table 4 Displacement of closing port of the lower

cross beam							
十加広		纵桥向支					
又栄巧 山冬姓	横桥向横梁		纵桥向横梁		架轴力最		
	先浇筑侧	后浇筑侧	先浇筑侧	后浇筑侧	大值/kN		
未断开	-13.4	-4.8	-4.3	-1.2	-5 610		
断开	-14.7	-14.6	_	_	-5 867		

 $\begin{array}{c} -38^{+}55^{+}\\ -38^{+}55^{+}\\ -15^{+}65^{+}\\ -15^{+}65^{+}\\ -15^{+}65^{+}\\ -202^{+}82^{+}\\ -202^{+}16^{+}\\ -222^{+}22^{+}\\ -222^{+}22^{+}\\ -222^{+}22^{+}\\ -222^{+}22^{+}\\ -222^{+}22^{+}\\ -222^{+}22^{+}\\ -222^{+}22^{+}\\ -222^{+}24^{+}2^{+}\\ -222^{+}24^{+}24^{+}24^{+}24^{+}\\ -222^{+}24^{+}24^{+}\\ -222^{+}24^{+}24^{+}\\ -222^$

$-2.5^{-1.6}$ $-5.5^{-1.6}$ $-5.5^{-1.6}$ $-5.5^{-1.6}$ $-5.5^{-1.6}$ -14.4 -11.9-18.7 -10.7-20.5 -20.5-20.5 -20.5-20.6 -20.5-20.4 -9.7-19.4 -19.7-19.4 -19.7-19.4 -19.7-19.4 -19.7-19.4 -10.7-22.1 -20.5-22.5 -22.0-22.5 -19.2-19.5 -19.2-19.4 -10.7-2.4 -3.7-2.4 -3.7-2.4 -3.7-2.4 -3.7

图 7 下塔柱施工完成后横桥向下横梁竖

向位移(单位:mm)

Fig. 7 Vertical displacement of the lower cross beam in the transverse direction after construction of the lower pylon (unit;mm)

4.2.3 浇筑顺序

由于下横梁划分为4个L形块,其浇筑顺序对 结构受力有一定影响,因此分别考虑2种浇筑顺序: ①先浇筑边跨侧再浇筑中跨侧(①→②→③→④); ②先浇筑上游侧再浇筑下游侧(①→③→②→④)。

由图 8 可知,在下横梁 L 形块浇筑过程中,对拉 杆对拉力呈现阶梯形变化,其中 38.000m 处对拉杆 对拉力变化量最大,为 40kN;25.850m 处对拉杆对 拉力最大变化量相对较小,最大 10kN。采用顺序① 的对拉杆对拉力在下横梁浇筑过程中大于采用顺 序②的对拉杆对拉力,而在浇筑完成后相差较小。 由表 5 可知,在下塔柱施工完成后,2 种浇筑顺序下 的塔肢根部弯矩差值较小。由以上分析可知,下横 梁 L 形块浇筑顺序仅对结构施工过程中内力有影 响,对施工完成后结构内力影响较小。

表 5 拆除对拉杆后塔肢根部弯矩

 Table 5
 Bending moment at the root of tower limb

after removing pull rod $(kN \cdot m)$

			I	()
编号	М	x	1	M _y
	顺序①	顺序②	顺序①	顺序②
1	78 177	78 490	203 626	203 545
2	79 014	78 932	204 695	204 701
3	43 736	43 445	208 148	208 162
4	44 385	44 384	208 095	208 105

4.3 下横梁纵向合龙口顶推分析

为了改善下横梁后浇带混凝土因收缩、徐变及 温度效应对塔肢根部产生的不利影响,需在合龙前 采用多点低温顶推施工法进行顶推。合龙口设置4



图 8 25.850,38.000m 处对拉杆对拉力 Fig. 8 Tension of the pull rods at 25.850m,38.000m

部顶推装置,如图9所示。顶推过程中影响因素多、 难度大,实际实施时需满足以下原则:①为了保证 有效对顶力,需采取顶推力与顶推位移双控;②需 进行一定量超顶;③满足边、中跨塔肢受力均衡, 上、下游对顶应保持同步;④应选择低温稳定时段 进行对顶施工,并进行低温锁定。



Fig. 9 Pushing structure at the closing port

由图 10 和图 11 可知,有效顶推力与顶口相对 位移和塔肢根部拉应力间基本呈线性关系,顶推力 每增加 3 000kN,顶口相对位移增加 0.7mm,塔肢根 部拉应力增加 0.03MPa。

4.4 支架系统应力分析

由图 12 可知,纵桥向支架的应力幅明显大于横桥向支架。在整个下横梁施工过程中,钢立柱全部受压,其中横桥向支架的直立柱压应力明显大于其他钢立柱,压应力最大为 126MPa,出现在后浇带混



图 10 有效顶推力-合龙口相对位移关系

Fig. 10 Relationship of the effective push force and relative displacement at the closing port



图 11 有效顶推力-塔肢根部拉应力关系

Fig. 11 Relationship of the effective push force and tensile stress at the root of tower limb

凝土浇筑完成后。平联在施工过程中主要表现为 受拉,且随着高度增加,平联拉应力也在逐步增大, 顶层拉应力最大为105MPa。

5 下横梁施工控制

5.1 下横梁浇筑施工

通过对 5 号墩支架立柱、斜撑、扶墙等关键结构 部位的应力进行监测,支架共计 36 个测点,监测浇 筑过程中支架应力变化。由表 6 可知,最大压应力 出现在支架中间钢立柱,为 146.7MPa;斜撑最大应 力为 102.4MPa,总体应力满足要求。

以③号塔肢浇筑施工为例,由图 13 可知,支架 应力在塔肢 3m 实心段时变化较小,浇筑到横梁底 板时支架应力逐步增大,浇筑到横梁腹板及顶板过 程中支架应力增幅显著;支架应力范围略大于理论 计算结果,变化较合理。

5.2 下横梁纵向合龙口顶推施工

合龙口顶推施工以位移控制为主、千斤顶顶推 力控制为辅,采用磁致位移计进行监测。测点设置 在纵向下横梁合龙口最前端,顶面中点位置和底面 中点位置各1只位移计,上、下游共4套纵向横梁。 其中,上游顶板和底板顶推最终锁定位移分别为 2.060,1.839mm,下游顶板和底板分别为1.873, 1.874mm,单侧顶推0.9mm(合龙口张开1.8mm), 对顶力为6850kN。



b 应力最小值

图 12 下横梁浇筑过程中应力最大、最小值(单位:MPa) Fig. 12 The maximum and minimum stress in pouring process of the lower cross beam(unit:MPa)

表 6 5 号墩下横梁浇筑期支架应力监测结果

 Table 6 Monitoring results of the bracket stress during pouring period of the lower cross beam of No. 5 pier

 MPa

					MIF a
位置	编号	1号塔肢	2 号塔肢	3号塔肢	4 号塔肢
下横梁支	HL7	-129.1	-116.3	-110.3	-99.0
架钢管立	HL8	-120.3	-113.8	-120.5	-146.7
柱(底部)	HL9	-116.9	-105.4	-79.2	-85.6
下横梁立	HL17	40.1	87.1	57.2	70.5
柱附墙	HL18	29.4	40.7	70.5	63.4
下横梁支架钢	HL25	-88.0	-99.2	-113_1	-50.5
管立柱(上部)	11120	00.0	<i>,,,</i> _	11011	2012
下横梁支架钢 管斜撑	HL26	-52.2	-102.4	-55.9	-45.9

根据塔肢根部断面布置应力传感器,纵向横梁 对顶施工完毕后,4 塔肢应力分别为-1.16,-1.06, -1.00,-0.82MPa,未出现拉应力,说明下塔柱采用 2 道对拉杆等效 1 道对拉杆,能较好地控制塔肢根 部应力。

6 结语

1)下塔柱设置 2 道对拉杆能较好地控制塔肢 根部拉应力。



图 13 ③号下横梁浇筑期支架应力(单位: MPa)

Fig. 13 Stress of the bracket during pouring period of No. (3) lower cross beam (unit; MPa)

2) 索塔与下横梁同步施工较异步施工更合适。

3)下横梁支架跨中是否断开对下横梁线形有 一定影响。

4)L形块浇筑顺序对结构内力影响较小。

5) 纵桥向下横梁对顶的有效顶推力、顶口相对 位移和塔肢根部拉应力均呈线性关系。

6)现场实测数据结果良好。

参考文献:

- [1] 秦顺全,张金涛,陆勤丰,等.常泰长江大桥主航道桥桥塔方 案研究[J].桥梁建设,2021,51(4):1-9.
 QIN S Q, ZHANG J T, LU Q F, et al. Research on pylon types for main navigational channel bridge of Changtai Changjiang River Bridge[J]. Bridge construction,2021, 51(4):1-9.
- [2] 秦顺全,徐伟,陆勤丰,等.常泰长江大桥主航道桥总体设计 与方案构思[J].桥梁建设,2020,50(3):1-10.
 QIN S Q, XU W, LU Q F, et al. Overall design and concept development for main navigational channel bridge of Changtai Changjiang River Bridge [J]. Bridge construction, 2020, 50(3):1-10.
- [3] 孙百锋.倒Y型索塔下塔柱施工过程模拟与预张拉方案设计
 [J].铁道建筑技术,2017(8):28-31.
 SUN B F. Simulation and pre-tensioning scheme design on the construction process of lower column of inverted Y-type tower

[J]. Railway construction technology, 2017(8):28-31.

- [4] 陈骑彪,刘孝辉,李琦.桥塔混凝土在施工期变形荷载作用下 开裂机理分析[J].公路交通技术,2008(6):75-80.
 CHEN Q B, LIU X H, LI Q. Analysis of cracking mechanism of bridge tower concrete under deformed load during construction
 [J]. Technology of highway and transport,2008(6):75-80.
- [5] 赵全成,刘晓波,左小明.武汉青山长江公路大桥北塔临时横 撑设计[J].桥梁建设,2020,50(S1):100-105.
 ZHAO Q C, LIU X B, ZUO X M. Design of temporary lateral bracings for north pylon of Qingshan Changjiang River Highway Bridge in Wuhan [J]. Bridge construction, 2020, 50(S1): 100-105.
- [6] 牛同辉,李怀剑,黄世长.斜拉桥 Y 型主塔上塔柱施工控制[J].四川建筑,2013,33(6):196-198,200.

NIU T H, LI H J, HUANG S C. Construction control of upper tower columns on Y-shaped main tower of cable-stayed bridge [J]. Sichuan architecture,2013,33(6):196-198,200.

[7] 刘经熠.大型斜拉桥水中索塔建造的关键控制技术[J].上海 公路,2020(2):22-25,29,127.

> LIU J Y. Key technologies of construction control of large cablestayed bridge tower in water[J]. Shanghai highways, 2020(2): 22-25,29,127.

- [8] 王汉章,曹振杰,兰晴朋. 宜昌伍家岗长江大桥下横梁施工过 程内力分配模式研究[J]. 中外公路,2021,41(3):135-140.
 WANG H Z, CAO Z J, LAN Q P. Study on internal force distribution mode of lower crossbeam of Yichang Wujiagang Yangtze River Bridge during construction stages[J]. Journal of China & foreign highway,2021,41(3):135-140.
- [9] 刘昀,颜东煌,涂光亚.大跨度斜拉桥桥塔下横梁安全施工方案研究[J].中外公路,2014,34(5):105-109.
 LIU Y,YAN D H,TU G Y. Research on the safety construction plan for the lower crossbeam of the tower of a long span cable-stayed bridge[J]. Journal of China & foreign highway, 2014,
- [10] 王文俊. 邹城市上跨京沪铁路转体斜拉桥桥塔下塔柱选型研究[J]. 铁道建筑技术,2017(1):62-65.
 WANG W J. Study on selection of lower pylon column for rotational cable-stayed bridge crossing over Beijing-Shanghai

rotational cable-stayed bridge crossing over Beijing-Shanghai Railway in Zoucheng [J]. Railway construction technology, 2017(1):62-65.

[11] 张金涛,傅战工,秦顺全,等.常泰长江大桥主航道桥桥塔设

(上接第64页)

34(5):105-109.

LI H J, XU T X, YING X Y. Missile state evaluation decision based on test data and extended TOPSIS grey correlation [J]. Aero weaponry, 2021, 28(6): 88-94.

[10] 章运超,王家生,朱孔贤,等.基于 TOPSIS 模型的河长制绩效 评价研究——以江苏省为例[J].人民长江,2020,51(1): 237-242.

> ZHANG Y C, WANG J S, ZHU K X, et al. Performance evaluation of river chief system based on TOPSIS model: a case study of Jiangsu Province [J]. Yangtze River, 2020, 51(1): 237-242.

[11] 柴乃杰,鲍学英,张天奇,等. TOPSIS-熵权决策法在绿色施工 节水措施综合效益评价中的应用[J].水资源与水工程学报, 2017,28(5):156-161.

CHAI N J, BAO X Y, ZHANG T Q, et al. Application of TOPSIS entropy weight decision method in comprehensive benefit evaluation of green construction water saving measures [J]. Journal of water resources and water engineering, 2017, 28(5): 156-161.

 [12] 杨展华,许成,胡继鹏,等. 基于熵值-TOPSIS 法的国有企业内部经济责任审计评价体系研究[J]. 中国内部审计,2021(2): 18-26. 计[J].桥梁建设,2022,52(5):1-7.

ZHANG J T, FU Z G, QIN S Q, et al. Pylon design for main navigational channel bridge of Changtai Changjiang River Bridge [J]. Bridge construction, 2022, 52(5):1-7.

- [12] 程东亚. 江鱼型超高索塔力学性能及施工控制研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2018.
 CHENG D Y. Study on mechanical performance and construction control of Jiangyu shaped super high pylon [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology,2018.
- [13] 周乐木,孙开武,殷源,等. 棋盘洲长江公路大桥南塔下横梁 施工关键技术[J]. 土木工程与管理学报, 2019, 36(6): 56-60.
 ZHOULM, SUNKW, YINY, et al. Lower cross beam

Construction technology of the south tower of Qipanzhou Yangtze River Highway Bridge [J]. Journal of civil engineering and management, 2019, 36(6):56-60.

- [14] 何善晶. 阆中嘉陵江四桥水滴形索塔空间应力分析[D]. 重庆:重庆交通大学,2014.
 HE S J. Spatial stress analysis of drop-shaped cable tower of Langzhong Jialing River Fourth Bridge [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University,2014.
- [15] 裴山,陈常松.嘉鱼长江公路大桥索塔应力及线形施工控制
 [J]. 中外公路,2020,40(3):146-150.
 PEI S, CHEN C S. Construction control of pylon stress and geometry control of Jiayu Yantze River Highway Bridge [J].
 Journal of China & foreign highway,2020,40(3):146-150.

YANG Z H, XU C, HU J P, et al. Research on the evaluation system of internal economic responsibility audit in state owned enterprises based on entropy TOPSIS method [J]. Internal auditing in China, 2021(2): 18-26.

[13] 魏丽,顾平.基于 BSC 思想的电子采购供应商的选择[J].中 国商贸,2012(34):179-181.

WEI L, GU P. Selection of electronic procurement suppliers based on BSC concept [J]. China journal of commerce, 2012(34): 179-181.

- [14] 李鹏. 论中承式空间 Y 型钢箱拱桥缆索吊主索承重安全性分析[J]. 四川水泥,2021(4):335-337.
 LI P. Safety analysis of the main cable load bearing capacity of the mid supported space Y-shaped steel box arch bridge [J]. Sichuan cement, 2021(4): 335-337.
- [15] 黄骞,邬晓光,胡科坚,等. V 形峡谷地区空间 Y 形钢箱拱桥 缆索吊装系统设计[C]//世界交通运输工程技术论坛 (WTC2021)论文集(上),2021.
 HUANG Q, WU X G, HU K J, et al. Design of cable hoisting system for Y-shaped steel box arch bridge in V-shaped canyon area [C]//Proceedings of World Transportation Engineering

Technology Forum (WTC2021) (Part 1), 2021.