

# 大吨位钢模块液压提升、滑移关键技术

窦勇芝<sup>1</sup> 吴志兵<sup>2</sup>

(1 柳州欧维姆工程有限公司 广西柳州 545005 2 中电建建筑集团有限公司 北京 100120)

**摘要:**介绍利用同步液压控制系统技术实现大吨位钢结构模块整体提升、滑移安装工艺,论述液压提升控制原理,并重点阐述安装工艺的关键设计方法、施工要点。工程实践表明:使用液压同步控制系统技术成功对大吨位钢结构模块整体提升、滑移一次到位,提高了施工进度和工程质量,取得了显著的技术经济效益。总结安装工艺在施工实践过程中需改进和注意的方面,为同类大吨位整体安装工程提供可借鉴的实例。

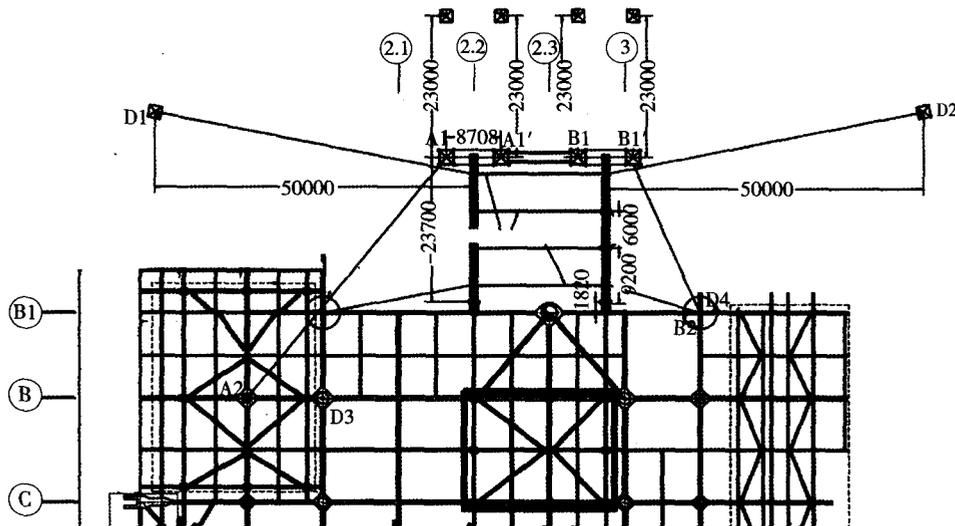
**关键词:**大吨位钢模块 液压控制 提升 滑移

**DOI:** 10.13211/j.cnki.pstech.2015.02.007

## 1 工程概况

MRU(乙二醇再生)模块为荔湾3-1项目组块上的一部分,项目位于青岛经济开发区海洋石油工程场地内。MRU模块就位于CEP的顶层甲板(高度场37.74m)上,MRU模块尺寸为(长)21.6m×(宽)19.9m×(高)23m,总质量850t。MRU模块

整体预制加工,通过驳船将MRU输送到青岛施工现场码头。采用SPMT小车将其从驳船上卸载后运送到荔湾3-1项目组块提升施工现场。在标高+41m层甲板上MRU模块平面布置见图1,安装采用液压同步提升<sup>[1-3]</sup>和滑移<sup>[4-6]</sup>方式就位。MRU模块在荔湾3-1项目组块上就位的位置,如图2所示。



注:黑色粗框表示MRU模块就位位置  
图1 标高+41m层甲板上MRU模块就位平面布置



a-准备, b-提升, c-滑移

图2 MRU模块现场准备、提升、滑移

## 2 安装方案

本工程采用塔架与组块牛腿相配合起吊的方法提升MRU模块。两副塔架(每副能提升1500t)

平面尺寸为2.4m×2.4m,两副塔架之间使用4排圆管横联支撑,塔架外侧使用4根桁架支撑。两副塔架分别竖立在MRU模块的外侧,MRU模块侧的吊点分别选用标高+41m层甲板上组块平台上位于轴线②轴、③轴线偏西侧3m处的各1根立柱,其中③轴线偏西侧3m处需增加1根立柱。分别在立柱端头焊接长牛腿,牛腿上放置液压千斤顶。利用顶升工艺将MRU模块就位托梁上;托梁内侧吊点与牛腿上的千斤顶连接,托梁外侧吊点与

塔架上的千斤顶连接。同步驱动千斤顶，提升托梁至与标高+41m层平面H型钢齐平；使用连接板铰链连接牛腿与托梁后，拆除牛腿上的千斤顶；再使用千斤顶拖拉滑梯模块至安装位置后顶落下放，完成MRU模块的安装。

### 3 LSD液压提升系统简介

LSD液压提升系统的工作原理<sup>[7-8]</sup>是将预应力锚具锚固技术与液压千斤顶技术进行融合，通过锚具锚固钢绞线，再利用计算机集中控制液压泵站输出的流量和油压，驱动提升千斤顶活塞伸、缩，带动钢绞线与构件升、降，实现大型构件的整体同步提升与下降，如图3所示。

LSD液压同步提升系统主要由液压提升千斤顶（含钢绞线）、液压控制系统（液压泵站）、电气控制系统（含传感检测系统）构成。

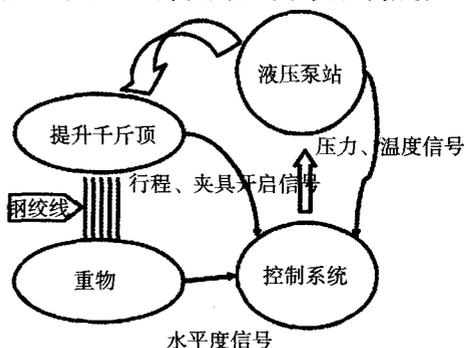


图3 LSD液压提升系统工作示意

### 4 关键设计要点

#### 4.1 组块侧牛腿与托梁连接设计

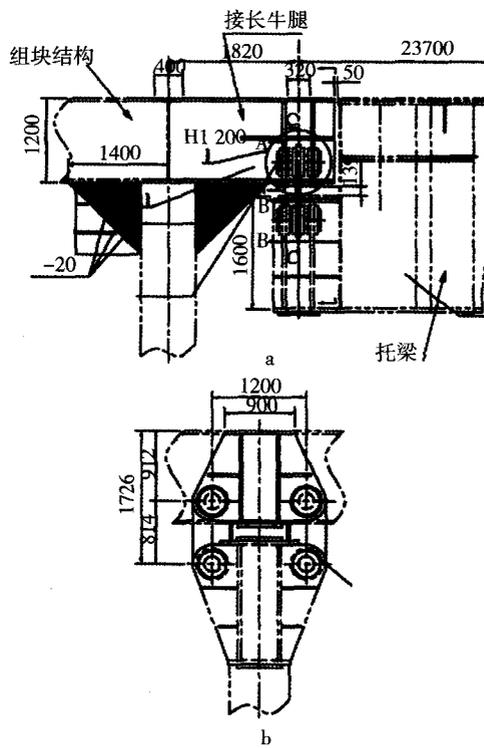
组块侧与托梁连接采用新增设接长牛腿，并设置连接板和承重销连接，见图4。

新增设牛腿为箱型截面，材质采用船用结构钢D36，高1.2m。上翼缘板宽0.9m，厚0.038m；腹板高1.128m，厚0.028m；下翼缘板宽1.0m，厚0.038m。箱型截面腹板两侧各设置2道承重耳板，承重耳板厚0.045m，耳板孔两侧均设置厚0.045m环形加强板。单个牛腿悬臂长1.820m，按450t设计验算，满足规范要求<sup>[9]</sup>。

#### 4.2 门式提升塔架设计

门式提升塔架的结构体系由两副门式支架和一批张拉于其顶上的缆风绳组成，见图5。提升塔架总高50m，采用节段拼装，柱身为四边形格构式缀条柱，柱脚中心距2.4m×2.4m，柱肢截面尺寸为300mm×300mm×12mm方钢管；4个柱肢

各自与地面路基箱焊接，通过设置“7”字形板对柱脚进行限位；塔架基础为路基箱承重，满足场地承载力要求；塔顶横梁为箱型截面，高2.4m；提升门架后方设置刚性斜支撑，斜支撑为四边形格构柱，柱脚中心距1.2m×1.2m，通过设置连接板和“7”字形板固定在压重钢板上，压重按500kN设置；两副塔架之间使用4排圆管横联支撑，塔架前、后方及两侧各设置风缆，缆风基础采用约4720kN压重块。单幅塔架按提升15000kN设计，由于塔架柱身高度较高、截面小、柔度大，且承受较大的轴向压力，具有明显的P-Δ效应，同时缆风绳也具有几何非线性效应，对柱身和缆风绳进行整体的非线性有限元分析。



a-立面 b-侧面

图4 组块牛腿与托梁连接



a-立面 b-侧面

图5 门式提升塔架照片

#### 4.3 托梁设计

提升托梁采用节段拼装，见图6，设置法兰

螺栓连接,划分为标准段、提升牛腿连接段。计算跨径为23.7m。标准段为箱型截面,高度为3m;上、下翼缘板宽1.2m,厚0.046m,腹板厚0.02m。牛腿端高度1.6m,宽度0.8m。计算工况分别为提升和滑移过程中不利荷载布置位置,见图7。计算验算截面分别为跨中、支座处、连接处关键截面。提升模块共6个供滑移用支撑腿,一侧3个,分别按8.5m间距作用在1道提升托梁上,支撑腿反力取最大值1713kN,考虑提升冲击系数1.1,设计值取1885kN。

#### 4.4 风缆设计

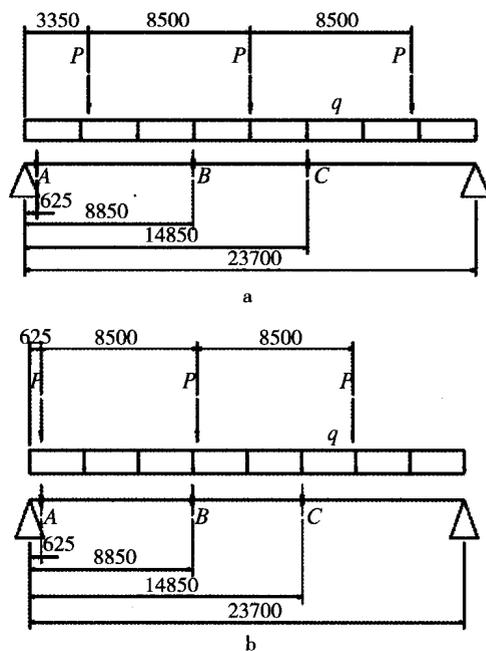
风缆设计主要包括提升塔架风缆和提升托梁风缆。提升塔架后方除设置刚性斜撑,同时设置4根缆风绳;组块侧塔架正前方,设置2根缆风绳固定在组块上;提升门架各侧面约40m或50m处设置缆风基础,便于从侧面拉设缆风绳;另外,在两副提升门架间拉设横向风撑。提升托梁风缆主要从侧面各拉设2根风缆,分别固定在组块和缆风基础上。由于提升施工周期较短,不超过5天,故计算的风荷载取值按照相关国家规范<sup>[10]</sup>吊装作业不得超过6级风的要求取值计算。

#### 4.5 组块滑道主梁加固设计

待提升工况完毕,MRU模块提升至设计高度,组块牛腿连接端完成力系转换,由承重钢绞线转换至承重销处。开始滑移工况,如图8所示,组块牛腿连接端为悬臂端,根部为主要负弯矩集中区域,在MRU模块3处支撑腿移动荷载作用下,随着移动至牛腿与托梁连接端,负弯矩出现最大值,随后逐渐减小。故需验算组块与牛腿连接端抗弯强度,经验算该连接端存在3m区域负弯矩过渡区,抗弯强度均不满足设计要求;需通过对局部上、下翼缘板加宽补强,且将原H型钢截面改造成三腹板的箱型截面,如图9所示,增强滑道主梁后,该区段截面的整体抗弯强度和刚度加强。



图6 提升托梁现场照片



a-提升工况, b-滑移不利工况

图7 计算简图

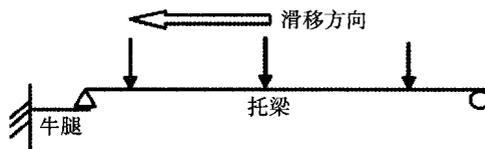


图8 滑移工况计算简图

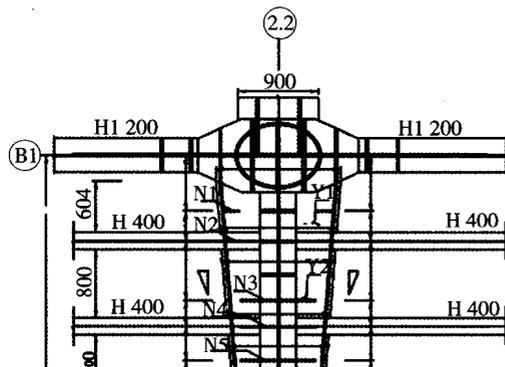


图9 组块②轴滑道主梁局部加固示意图

#### 4.6 滑道及滑块设计

导向滑道由槽钢(40a、厚3mm)不锈钢板构成,如图10所示,导向滑道两侧间距0.5m,焊接限位钢挡块,不锈钢板通过间隔0.5m点焊方式固定在滑道上,并涂抹专用润滑油。滑块采用厚0.02m高分子(MGE)板,摩擦系数为0.03~0.06,分别在滑道上6个MRU支撑腿下方设置1个滑块。滑块应力按8MPa容许值控制计算。

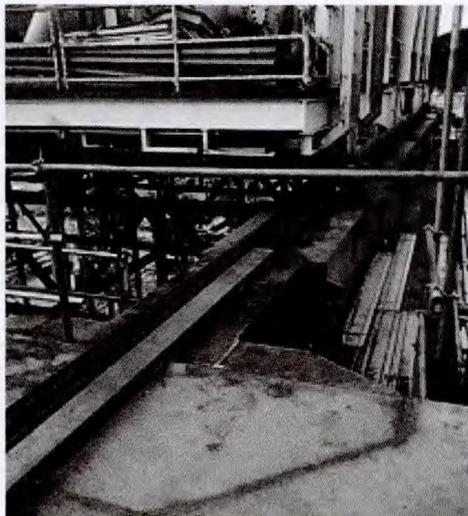


图10 导向滑道现场图片

#### 4.7 拖拉反力架及拉锚器设计

拖拉千斤顶反力架设置在组块滑道梁与其余主梁相连接的重要节点处,如图11所示。拖拉反力架按600kN设计,以贴角焊接方式固定在滑道梁方向的重要节点处。MRU模块侧固定端拉锚器以坡口熔透焊接方式与支撑腿连接,均在各滑道方向第1个支撑腿处设置1个拉锚器。如图12所示。

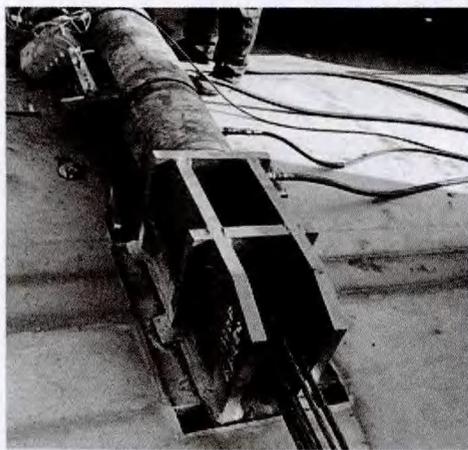


图11 千斤顶侧张拉端拖拉反力架

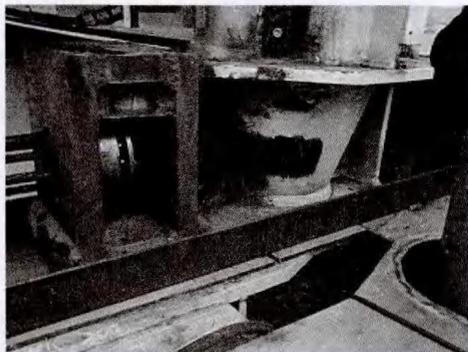


图12 MRU模块侧固定端拉锚器

#### 4.8 提升、滑移、顶落各工况千斤顶及钢绞线配置

(1) 提升工况千斤顶及钢绞线配置。提升工况采用4台LSD5000千斤顶,提升储备系数为1.91。相配套LSDB105A液压泵站2台, LSDKC-16控制系统(含传感器)1套。提升千斤顶每台配置22根钢绞线。直径 $\phi^{17.8}$ ,其安全系数为2.93。

(2) 拖拉滑移工况千斤顶及钢绞线配置。拖拉滑移工况采用2台100t级连续顶推千斤顶,MRU模块质量850t,顶推力按10%计算为850kN,顶推储备系数为2.35。相配套ZLDB自动连续顶推泵站1台,ZLDK控制系统1套。牵引拉索采用直径 $\phi^{15.24}$ 钢绞线,每台配置6根,其安全系数为3.6。

(3) 顶落工况千斤顶配置。顶落工况采用16台100t千斤顶,如图13所示,在MRU模块8个支撑腿各布置2台千斤顶,起顶储备系数为1.88。实行同步顶、落控制。

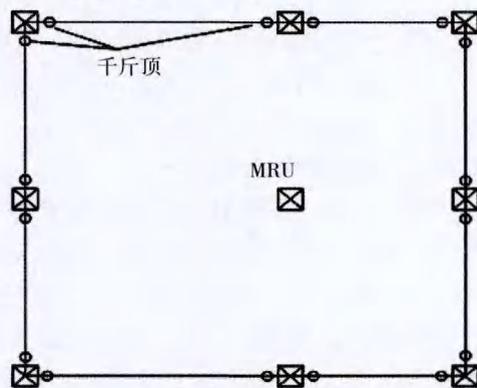


图13 顶落千斤顶平面布置示意图

### 5 关键施工技术

#### 5.1 施工步骤

(1) 施工场地平整,测量放样塔架基础、提升托梁、风缆基础等平面位置,对塔架基础的地基进行现场承载力检验,保证满足场地承载力要求,就位塔架路基箱基础;另外,布置托梁下的钢垫梁,用履带吊就位提升托架,在托梁上布置滑道及滑块,同时对托梁侧面增设斜撑加固。

(2) 用驳船将MRU模块运输至青岛现场码头。采用SPMT专用运输小车将模块从驳船上卸载后,运送到荔湾3-1项目组块提升施工现场。

(3) SPMT专用运输小车将MRU模块放置在托梁上并与托架进行临时固定。

(4) 安装提升塔架及缆风、钢绞线、液压提升设备。同时焊接就位拉锚器、拖拉滑移反力架、导向滑道及组块牛腿(牛腿安装前需试拼装),并对组块结构滑道梁进行局部补强。

(5) 对塔架基础、塔顶偏移量、组块结构牛腿布置观测点,并测量、记录,待MRU模块正式提升。

(6) MRU模块试提升、静置24h,检查组块结构及提升系统(锚固结构、塔架、缆风绳等)。

(7) 继续提升,待MRU模块提升到位,托梁与组块牛腿进行临时销接固定,完成提升系统与承重销的力系转换,并拉设托梁侧面缆风绳固定。拆除组块上的提升设备,清除滑移通道上的障碍。补强封闭提升用孔洞,连接导向滑道。

(8) 滑移系统安装调试,安装顶推用锚板、钢绞线并与MRU模块支撑腿进行连接,采用ZLD连续顶推系统进行滑移。

(9) 待MRU模块滑移就位后。用千斤顶将MRU模块整体顶升,取出滑道、滑块后就位固定。

(10) 拆除托梁、液压提升设备及塔架。完成MRU模块安装。

## 5.2 提升施工要点

(1) 密切收集未来7天气预报。选择气象条件相对较好,无风或风力等级在1~2级时段。并作好相关关键位置的测量、记录工作;并通过在托梁上焊接“7”字形板,卡紧固定MRU支撑腿,以防MRU支撑腿滑移;在托梁牛腿预安装连接板和下承重销。

(2) 提升前准备工作检查。

a. 提升前要再次对提升装置的液压系统、电路系统、锚固系统、控制与显示系统及钢绞线进行全面细致检查,并记录登记。

b. 重点检查提升区域边缘与组块结构间的安全距离,确保提升过程无障碍实施。

(3) 在正式提升前,需进行试提升,逐级加载试提升0.05m,并用倒链收紧固定托梁,静置24h。再次检查所有设备、吊索具及地锚等,待正式提升施工。

(4) 正式提升施工。

a. 启动同步液压控制提升系统。主控台进入主菜单启动“自动提升”功能模块,系统启动。

b. 整体平衡自动提升。操作主控台的自动按钮进行自动连续提升。在所有的自动提升中,如果各项吊点同步误差超过控制系统的设定误差,系统将自动调整;如果同步误差超过控制系统设定的最大误差,系统将自动进入紧急停机,等待调整;调整完毕,进入准提升状态,再次启动自动提升。

c. 提升过程中,观察提升过程中同步控制误差对构件的影响;注意记录提升过程中的油压最大、最小值,并时刻监测托梁状态偏移是否在规定范围内,在误差出现时应及时进行修正。

d. 考虑控制系统就位下落工况风险较大,提升位置应较就位位置稍低,就位时再进一步精确调整。

e. 提升过程应随时监控负荷、结构状态及提升通道是否畅通。

(5) 提升就位。

a. 通过提升千斤顶微调提升位置,保证预安装在提升牛腿上的连接板与组块牛腿耳板孔中心对中,插入上承重销,安装卡板限位固定。

b. 逐级将提升顶的荷载卸载至连接板和承重销上,完成力系转换。

c. 拆除提升钢绞线及提升顶,准备滑移施工。

## 5.3 滑移施工要点

(1) 滑移前准备工作。

a. 收紧托梁两侧的4根缆风绳,防止MRU模块滑移过程中托移横向晃动。

b. 先在组块牛腿与提升牛腿间的间隙间铺设过渡垫板,再铺设连接导向滑道。

c. 在组块牛腿上的穿钢绞线孔洞(孔径 $\phi 310$ )处,补焊圆形钢板,保证滑道平面的平整性。

d. 解除原固定MRU支撑腿的“7”字形卡板。

e. 安装锚板、穿钢绞线、顶推顶及调试同步液压拖拉滑移系统。

f. 在每条导向滑道侧面,标示刻度值,便于在滑移过程中检查实施同步性。

g. 在滑道不锈钢板上涂抹专用油脂润滑,待正式滑移施工。

(2) 正式滑移施工。

a. 在主控台启动同步液压拖拉滑移系统,

逐级加载至MRU模块开始滑动。

b. 利用同步控制系统误差调整原理, 保证两侧滑道上MRU支撑腿滑移的同步性, 并通过滑道侧面的标示刻度值复核检查。

c. 拖拉滑移过程应随时监控负荷、结构状态及滑移通道是否畅通。

(3) 待滑移就位、卸载, 拆除钢绞线和顶推顶, 待顶落施工。

#### 5.4 顶落就位施工要点

(1) 截断MRU支撑腿周边的滑道。

(2) 布置顶升顶位置, 并在顶升顶布置位置上、下平面均布置钢垫板, 增大受载面积, 保证顶升顶一个行程内的回落高度大于MRU支撑腿的落梁高度。

(3) 调试同步液压控制顶落系统, 待正式顶落施工。

(4) 待逐级同步控制16台千斤顶, 将MRU支撑腿整体顶升2mm~5mm时停止, 停放5min~10min进行观察, 无任何异常后方可继续整体顶升, 控制顶升速度在1mm/min左右; 同时观测起顶高度和千斤顶的起顶力, 实行双控。并派专人密切注意是否有异常情况, 一旦发现立即停止施工。在顶升过程中及时加垫千斤顶保护环作为临时支撑点, 确保顶升整体安全。当顶升就位后, 锁住千斤顶, 将截断滑道、滑块取出, 并清洁支撑腿支撑平面, 整体同步回落MRU模块至就位。

## 6 工程效果

如表1所示可知, 各主要检测指标均符合相关规范<sup>[11]</sup>要求。本工程通过同步液压控制系统技术将大吨位模块(长21.6m×宽19.9m×高23m, 总质量850t)整体提升38m, 滑移35m, 顶落就位, 用时共计5个施工日历天。

表1 主要检测项目 mm

序号	检测项目	实测最大值	允许值
1	基础沉降	-1.5	-3
2	塔架顶水平变位	+35.0	+50
3	提升牛腿端竖直变位	-15.0	-20
4	钢结构各提升点相对高差	±1.0	±2
5	相对滑移轨道中心偏差	±2.5	±5
6	钢结构各滑移侧同步性偏差	±1.5	±2
7	钢结构就位平面位置偏差	±1.0	±2

该安装技术保证了钢结构模块和主体结构能够平行施工, 且模块在工厂标准化加工, 降低了现场高空散件吊装、拼装的难度和风险, 很大程度上提高了施工进度和施工质量, 取得了显著的经济技术效果。

## 7 结语

(1) 大吨位模块液压整体提升、滑移工程为特种工程, 组块结构在设计阶段, 需结合具体施工方案模拟安装施工过程分析, 对于原主结构个别构件在最不利施工工况中承载力不足或应力过大的情况, 需加强原主结构施工仿真整体和局部模型分析, 并采取相应的加固补强措施。

(2) 提升托梁导向滑道面在设计时需考虑比组块侧滑道面垫高些, 保证提升托梁与组块牛腿销接后, 能够补偿组块牛腿的下挠量, 保证提升牛腿与组块牛腿间隙两侧能平顺过渡, 防止出现间隙处突变高差带来拖拉滑移的困难。

(3) 在滑移过程中, 要保证滑移轨道面的平整度, 若滑移轨道变形较大, 易造成一侧3个MRU支撑腿中1个支撑腿下脱空, 滑块易滑脱出支撑腿受压范围, 需采取设置“7”字形卡板对滑板起防滑脱的限位作用。

另外, 可考虑增设支撑腿的方式, 避免因个别支撑腿脱空造成其余个别支撑腿局部荷载过大的情况。

### 参考文献

- [1] 金振, 吴飞, 户万涛. 大型钢结构液压同步提升及高空滑移综合施工技术[J]. 建筑施工, 2009(2): 105-107.
- [2] 张长利, 雷文秀, 曹忠琦等. 东航西安维修基地新机库屋盖钢结构液压同步整体提升施工技术[J]. 钢结构, 2012, 27(S1): 264-267.
- [3] 鲍广鉴, 陈柏全, 曾强. 空间钢结构计算机控制液压整体提升技术[J]. 施工技术, 2005(10): 5-7.
- [4] 李建全, 熊中兰, 陈至诚等. 大跨度钢结构计算机控制高空整体滑移及卸载施工技术[J]. 钢结构, 2012, 27(S1): 222-227.
- [5] 高国敏, 杨李忠, 李雪良等. 天津滨海国际会展中心二期钢结构滑移施工安装技术[J]. 钢结构, 2008, 23(6): 64-69.
- [6] 马茂军, 孙贵柱. 钢结构滑移技术在青岛流亭国际机场工程中的应用[J]. 青岛理工大学学报, 2006, 27(6): 31-35.
- [7] 莫天玲, 吴志勇. LSD液压提升系统原理与应用[J]. 欧维姆通讯, 2000(2): 13-16, 33.
- [8] 梁或. LSD液压提升系统在桥梁加固中的应用[J]. 预应力技术, 2010(5): 21-25.
- [9] GB 50017-2003 钢结构设计规范[S].
- [10] AQ3021-2008 吊装作业安全规范[S].
- [11] GB 50755-2012 钢结构施工规范[S].