某高层外爬塔吊预应力钢结构支承架设计

尧金金　沈　斌　王　丰
（北京市建筑工程研究院有限责任公司　北京　100039）

摘　要:针对天津现代城结构的施工特点，钢结构塔吊支承架设计是保障施工安全的重要前提。在进行塔吊支承架设计时，埋件及节点的设计尤为重要。本文对埋件节点进行了有限元分析及混凝土抗冲切验算，由于核心筒墙体厚度较小，混凝土抗冲切不能满足要求，为使混凝土及埋件强度满足要求，采取预应力张拉进行加固，以保证钢结构支承架在施工过程中的安全。

关键词:塔吊　支承架　抗冲切　预应力张拉

1 工程概况

天津现代城（二期）A地块B区项目是集酒店公寓、办公、商业于一体的大型综合体，主要由办公、酒店公寓两幢超高层塔楼及商业裙房组成，设计外观气势恢宏，轮廓分明，总建筑面积253746m²，办公楼高339m，酒店公寓高209m，建成后将成为天津市地标性建筑（见图1）。

图1　现代城效果示意图

写字楼区域，按最新的施工图，地上结构施工采用工作能力能满足施工需要的动臂塔吊M760D，安装塔吊前需在核心筒剪力墙上安装塔吊支承架，作为塔吊基础。

由于塔吊支承架埋件连接节点处，混凝土抗冲切不能满足强度要求，需对结构进行加强。加强采用预应力张拉方案，将两部爬塔支撑架4个支承点处用15.2的钢绞线连接。通过对拉索进行张拉，使埋件处节点强度满足要求。爬塔预应力张拉三维示意图及塔吊塔吊支承架平面布置如图2、3所示。为了配合施工进度，M760D塔吊在施工过程中需要爬升19次，爬升规划示意图如图4所示。

图2　爬塔预应力张拉三维示意图

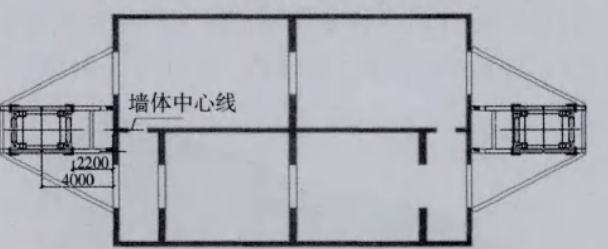


图3　塔吊支承架平面布置图

图4　塔吊爬升规划示意图

2 支承架结构设计

2.1 支承架结构形式

爬塔支承架主要由五部分组成，支撑塔吊C型框的主梁、主梁之间的次梁，水平方向的斜撑，高度方向的竖向斜撑，连接主梁、斜撑与核

心筒结构的预埋件及连接件，斜撑与主梁之间的连接件。各节点的连接类型：（1）主梁、竖向斜撑、水平撑杆与核心筒墙体预埋件铰接；（2）水平小梁与主梁及水平撑杆铰接；（3）次梁与主梁铰接；（4）竖向斜撑及竖向撑杆与主梁刚接。爬塔的平面及三维模型图如图5、图6所示。

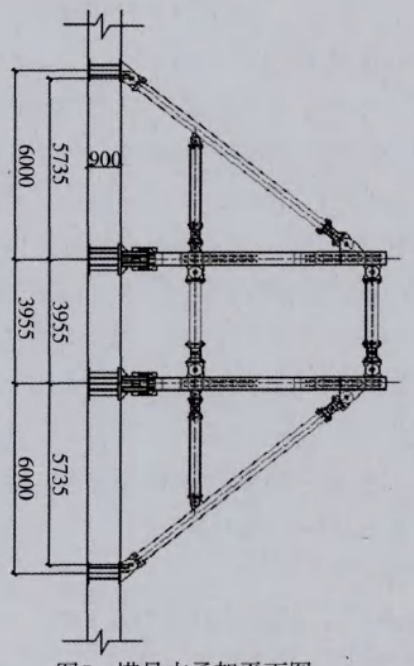


图5　塔吊支承架平面图

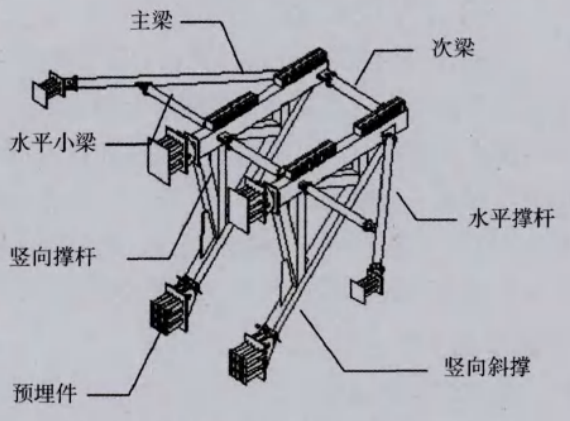


图6　塔吊支承架三维模型图

为减小塔吊对爬塔支承架与埋件连接节点的作用力，对塔吊支承架结构进行预应力张拉。上下两部塔吊支承架4个支点处采用ϕ15.2钢绞线连接起来，然后对拉索施加预应力进行张拉，从而减小埋件节点处的作用力，使埋件结构承受的荷载满足强度要求。钢绞线采用群锚进行预应力张拉，塔吊支承架预应力钢绞线连接示意图及钢绞线端部节点示意图如图7、图8所示。

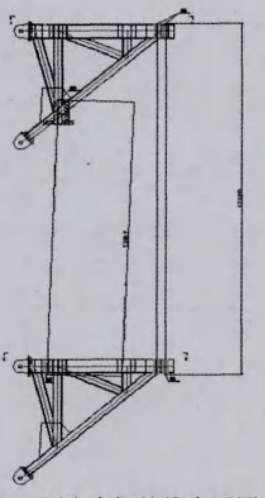


图7　预应力钢绞线布置图

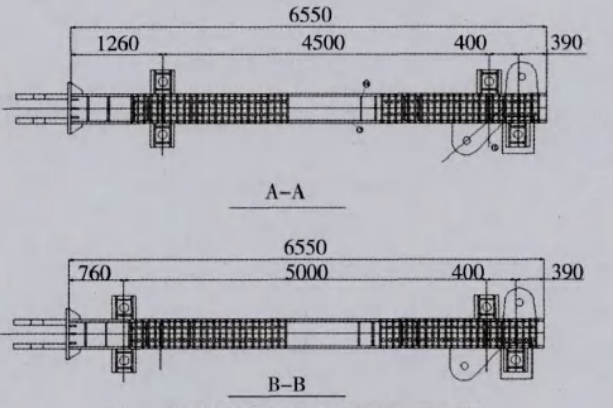


图8　钢绞线端头节点布置及示意图

2.2 支承架结构构件截面（见表1 ）

表1　杆件位置说明

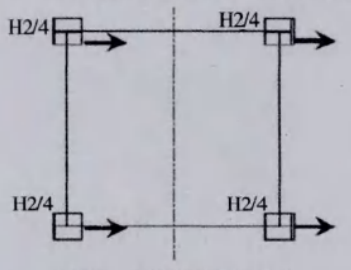
位置	类型
主梁	B700×400×30×30
次梁	P325×16
竖向斜撑	B400×30
竖向撑杆	B400×30
水平撑杆	P325×16
水平小梁	P273×12
钢绞线	ϕ15.2

2.3 荷载说明

（1）自重：由计算软件（Midas）自动生成。

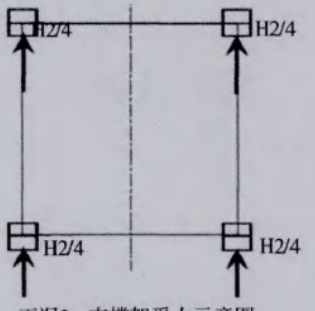
（2）活荷载：由竖向和水平向的集中荷载根据塔吊的不同方位按不同的比例系数分摊到四个连接点处，然后再由竖向荷载产生的弯矩确定水平向荷载，水平荷载有三种不同方向，分别为背离墙面、平行于墙面、指向墙面（如图9所示）。

工况1（H2+V）——工作状态，水平力H2垂直于墙面（背离墙面）



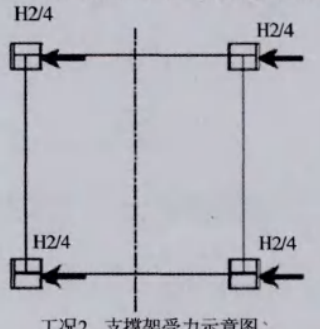
工况1 支撑架受力示意图

工况2（H2+V）——工作状态，水平力H2平行于墙面



工况2 支撑架受力示意图

工况3（H2+V）——工作状态，水平力H2垂直于墙面（指向墙面）



工况2 支撑架受力示意图

图9 支撑架受力示意图

（3）根据厂家提供的荷载，选择工作状态和停工状态下最不利条件，并结合塔吊工作时吊臂的不同方位，考虑将竖向集中荷载按不同比例分配到4个支撑节点上。将竖向集中荷载均匀分到4个连接点上时，该荷载放大1.5倍，不均匀分配时，考虑放大1.2倍。结构采用midas进行受力分析，塔架支撑要安装在主梁上。吊臂工作方位示意图及塔吊荷载值（如图10所示）。

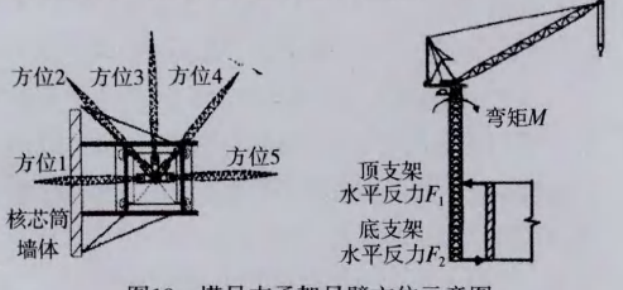


图10 塔吊支承架吊臂方位示意图

表2 厂家提供塔吊最大荷载值

	水平力（H1/H2）t	水平力（H1/H2）t	竖向力（V）t	竖向力（V）t
厂家提供的合力	72	72	290	290
计算取值	108/93	74.4	435	348

当吊臂位于图10中方位1时，竖向集中荷载按照45%、45%、5%、5%的比例分配到1，2，3，4四个节点上；当吊臂位于图10中方位2时，竖向集中荷载按照1/2、1/6、1/6、1/6的比例分配到1，2，3，4四个节点上；当吊臂位于图10中方位3时，竖向集中荷载按照45%、5%、45%、5%的比例分配到1，2，3，4四个节点上；当吊臂位于图10中方位4时，竖向集中荷载按照1/6、1/6、1/2、1/6的比例分配到1，2，3，4四个节点上；当吊臂位于图10中方位5时，竖向集中荷载按照5%、5%、45%、45%的比例分配到1，2，3，4四个节点上。考虑上述竖向荷载的均匀分配和不均匀分配及水平荷载与墙面关系的三种不同工况，可分为10种荷载工况。

2.4 荷载组合

组合1：$1.35D+1.4(0.7)L+PS$

组合2：$1.2D+1.4L+PS$

组合3：$1.0D+1.0L+PS$

midas进行有限元分析计算时，下部塔吊支承架需考虑竖向荷载及水平荷载，上部塔吊支承架只需考虑水平荷载。考虑上述竖向荷载的不均匀分配和水平荷载的三种不同工况，可分为10种荷载工况，结合以上三种荷载组合，每一种工况有三种组合形式，共30种荷载组合形式。

3 验算结果

3.1 支撑塔架验算结果

塔吊支承架通过midas进行有限元计算分析，计算结果（如图11～图14所示）：

从以上结果可看出，塔吊支承架在最不利工况下的位移不超过4mm，各荷载组合下应力比最大为0.40不超过1，钢绞线最大张拉力为1437kN，位移和应力均满足强度要求。

通过midas进行有限元分析得到以下端点处的最大反力值（表3、表4）：

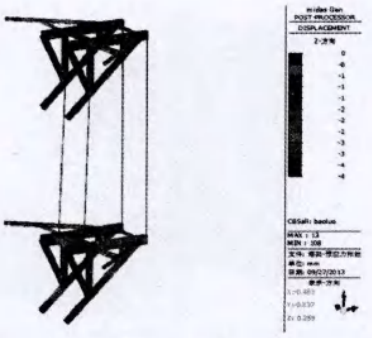


图11　包络位移（mm）

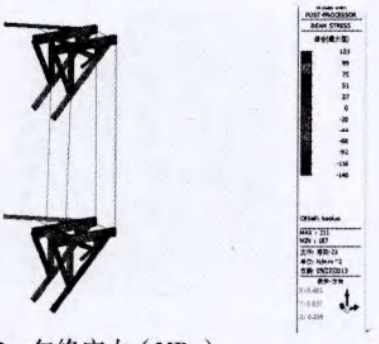


图12　包络应力（MPa）

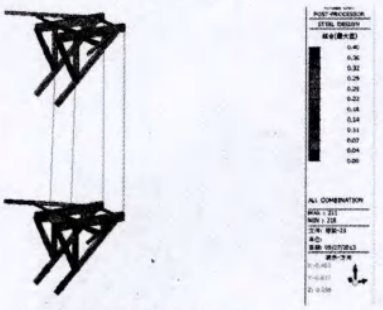


图13　各荷载组合下应力比

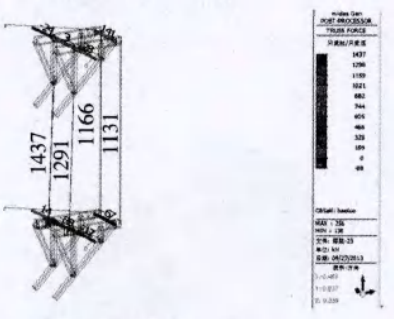


图14　钢绞线最大张拉力（kN）

表3　各端点反力值

		主梁/kN	竖向斜撑/kN	水平斜撑/kN
上部支承架	轴向力N	2375	-2026	561
	剪力V	909	1810	516
		250	0	9
下部支承架	轴向力N	1200	1201	-383
	剪力V	818	1176	346
		425	29	9

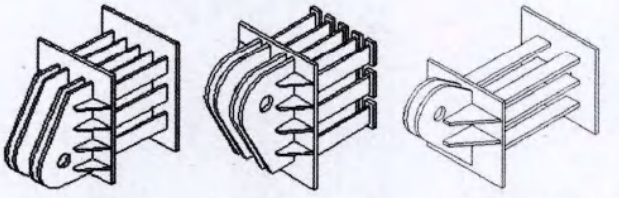
表4　单根钢绞线索力表

墙近端拉索索力/kN		墙远端拉索索力/kN	
拉索1	1437	拉索3	1166
拉索2	1291	拉索4	1131

进行预应力张拉时需考虑索头锚具处预应力损失。

3.2 预埋件设计计算

根据计算得到的最大反力来设计验算主梁、竖向斜撑和水平撑杆与核心筒墙体连接的预埋件（如图15所示）。



1）主梁埋件　　2）竖向斜撑埋件　　3）水平撑杆埋件

图15　预埋件

按照《混凝土结构设计规范》，当有剪力、法向拉力和弯矩共同作用时，应按下列两个公式计算，并取其中的较大值：

$$A_S \geqslant \frac{V}{\alpha_r \alpha_v f_y} + \frac{N}{0.8\alpha_b f_y} + \frac{M}{1.3\alpha_r \alpha_b f_y z} \quad (1)$$

$$A_S \geqslant \frac{N}{0.8\alpha_b f_y} + \frac{M}{0.4\alpha_r \alpha_b f_y z} \quad (2)$$

按照《混凝土结构设计规范》，当有剪力、法向压力和弯矩共同作用时，应按下列两个公式计算，并取其中的较大值：

$$A_s \geqslant \frac{V-0.3N}{\alpha_r \alpha_v f_y} + \frac{M-0.4Nz}{1.3\alpha_r \alpha_b f_y z} \quad (3)$$

$$A_s \geqslant \frac{M-0.4Nz}{0.4\alpha_r \alpha_b f_y z} \quad (4)$$

当$M<0.4Nz$时，取$M=0.4Nz$。

根据midas计算结果得出的反力，主梁和水平撑杆埋件受剪力和法向拉力按照公式（1）、（2）进行计算；竖向斜撑埋件受剪力和法向压力按照公式（3）、（4）进行计算。按照上述公式设计计算的埋件用有限元分析软件ansys进行了有限元分析。主梁及水平撑杆埋件的有限元分析验算结果（如图16、图17所示）：

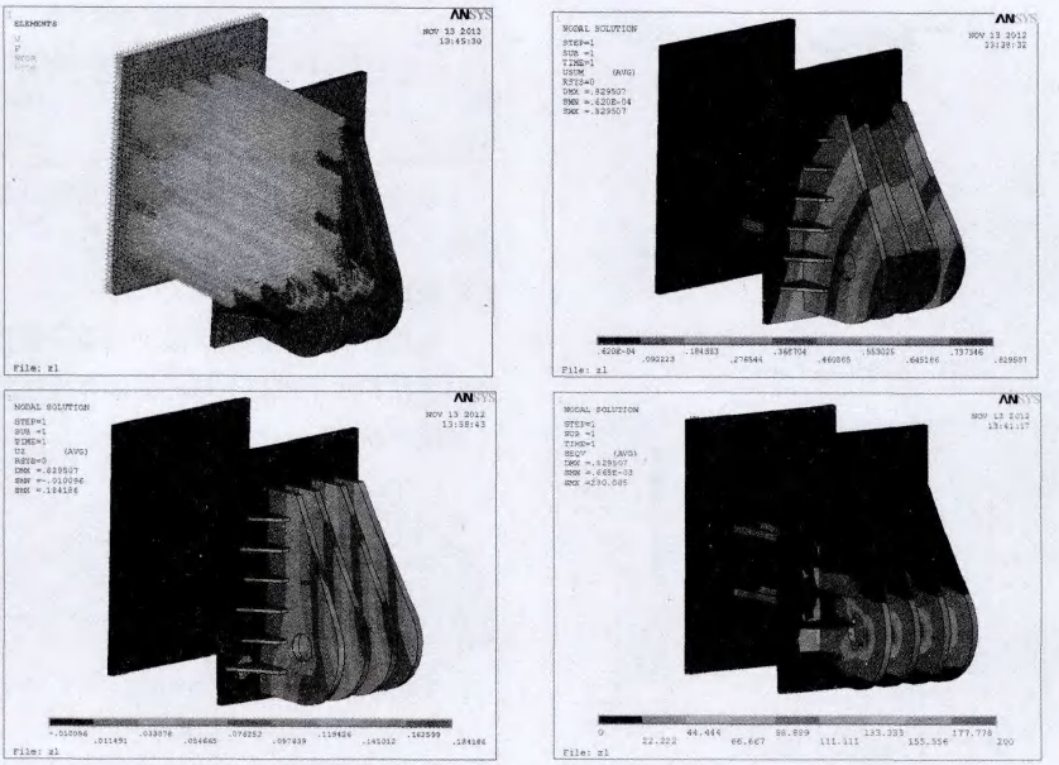


图16　主梁埋件有限元分析位移（mm）和应力（MPa）

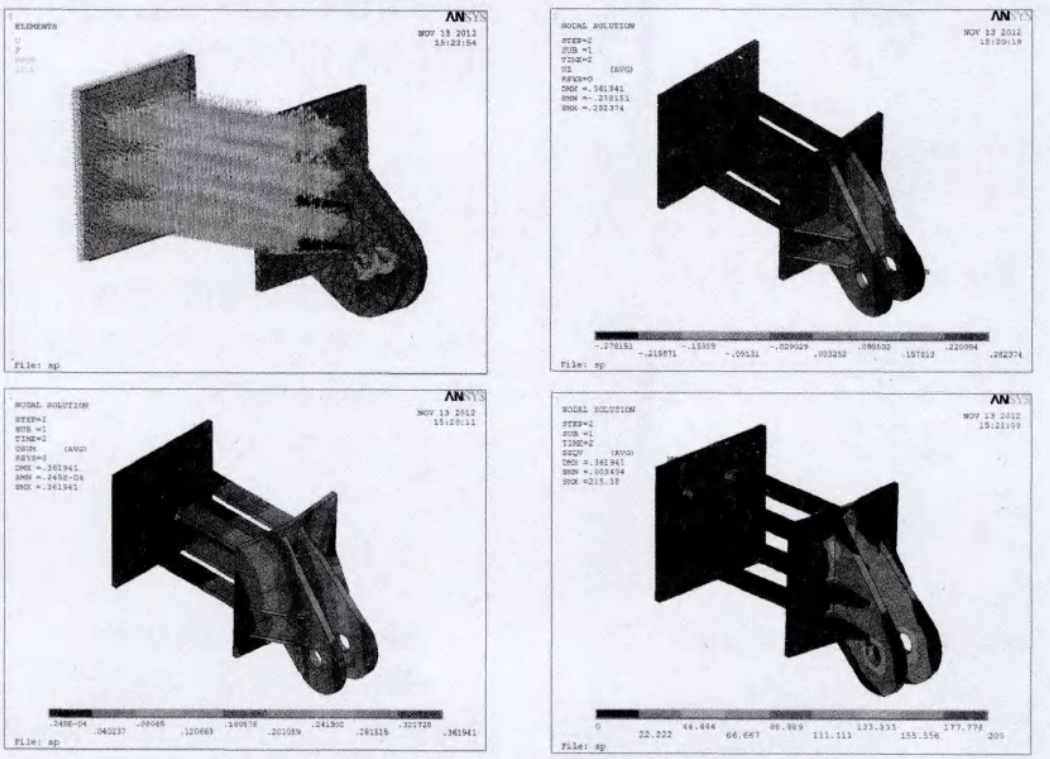


图17　水平撑杆埋件有限元分析位移（mm）和应力（MPa）

从以上结果可看出，主梁及水平撑杆埋件在荷载作用下，位移最大不超过2mm，应力除销轴开孔处有局部应力集中，大部分不超过200MPa。

3.3 混凝土抗冲切验算

根据《混凝土结构设计规范》GB50010-2010规定，在局部荷载或集中反力作用下，不配置箍筋或弯起钢筋的板的受冲切承载力应符合下列规定：

$$F_l \leqslant (0.7\beta_h f_t + 0.25\sigma_{pc,m})\eta u_m h_0 \quad (5)$$

公式中的系数η按下列两个公式计算，并取其中较小值：

$$\eta_1 = 0.4 + \frac{1.2}{\beta_s} \quad (6)$$

$$\eta_2 = 0.5 + \frac{\alpha_s h_0}{4u_m} \quad (7)$$

墙厚900mm时，按照公式（5）、（6）、（7）对主梁、竖向斜撑及水平撑杆埋件进行抗冲切验算。验算结果如下：

主梁、斜撑处埋件抗冲切验算：

$$U_m = (750+500)\times 2 + (900+500)\times 2 = 5300mm$$

$$\eta_1 = 0.4 + \frac{1.2}{\beta_s} = 0.4 + \frac{1.2}{2} = 1$$

$$\eta_2 = 0.5 + \frac{\alpha_s h_0}{4u_m} = 0.5 + \frac{20\times 500}{4\times 5300} = 0.97$$

$F = (0.7\times 1.71 + 0)\times 0.97\times 5300\times 500 = 3077kN > F_l = 2375kN$，满足要求。

水平撑处埋件抗冲切验算：

$$U_m = (390+500)\times 2 + (390+500)\times 2 = 2390mm$$

$$\eta_1 = 0.4 + \frac{1.2}{\beta_s} = 0.4 + \frac{1.2}{2} = 1$$

$$\eta_2 = 0.5 + \frac{\alpha_s h_0}{4u_m} = 0.5 + \frac{20\times 500}{4\times 2390} = 1.55$$

$F = (0.7\times 1.71 + 0)\times 1\times 2390\times 500 = 1430kN > F_l = 561kN$，满足要求。

通过以上抗冲切验算结果可看出，主梁、竖向斜撑及水平撑杆埋件在荷载作用下均满足强度要求。

4 结语

（1）本文以现代城外爬塔吊支承架为研究对象，考虑支承架结构竖向荷载的不均匀分配及塔吊吊臂方位对支承架结构受力的影响进行支承架结构的设计计算。

（2）通过支承架结构的设计发现，节点的设计非常关键，严格按照“强节点，弱构件”进行节点设计，节点的强度是否满足要求，是保证支撑结构安全的关键。

（3）对支承架进行预应力张拉，使埋件节点设计更为合理，强度满足要求。避免附着混凝土墙体的开裂，以免造成不必要的损失。

参考文献

[1] 周明，郭彦林，王小安. 广州珠江新城西塔塔吊支承架结构承载力研究[J]. 施工技术，2008，37，（5）.
[2] 郭彦林，董全利. 倾斜高层建筑施工关键问题及实施[J]. 施工技术，2006，35（12）.
[3] GB50010-2010，混凝土结构设计规范[S].

（上接第13页）

后斜杆整体提升、滑移前，先在前塔柱顶设置钢绞线计算机液压提升系统，然后进行后斜杆尾端平移小车安装。在提升过程中，通过调整前塔柱前拉索、后背索索力实现塔顶位置控制。后斜杆正式提升时，同步控制前端两提升吊点索力及位移、尾端滑移牵引系统与前端提升吊点的配合，保证提升钢束始终处于垂直提升状态（见图5）。

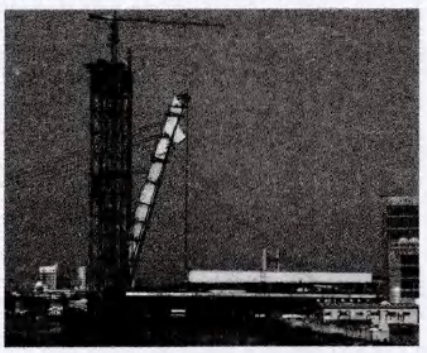


图5 前塔柱竖转和后斜杆整体提升施工

3 结语

外滩大桥采用独塔四索面的异型斜拉桥结构，在构造关键节点成功运用预应力技术，经济合理地实现了其作为宁波中心城核心区景观桥梁的建筑造型。该工程预应力的应用形式多样，各具特色。塔墩钢混固结点以及后锚点采用预应力锚固于承台的吊杆等构造简洁，耐久可靠，后期养护均在外表面，十分方便。引桥预应力砼大箱梁采用与主梁外形一致的截面形式，结构轻盈美观，整座大桥风格一致，与周边环境协调。集中锚固的斜拉索凸显张力，很好地表达了大桥的寓意。三角型索塔采用预应力计算机液压同步张拉控制技术，成功实现了主塔竖转、后斜杆提升等关键工序。外滩大桥建设总工期两年半，于2010年年底竣工通车，为改善宁波中心城区的交通发挥了重大作用。

参考文献

[1] 马骉，葛竞辉，张俊杰. 宁波市外滩大桥设计《2011年全国桥梁学术会议论文集》2011年10月.
[2] 张俊杰，马□. 宁波市外滩大桥后锚点设计与研究《城市道桥与防洪》2012年10月.
[3] 全军，廖德川，鄢伟. 宁波市外滩大桥前塔柱“竖拼竖转”施工技术《2011年全国桥梁学术会议论文集》2011年10月.