

某体育项目一场两馆钢罩棚屋盖吊装及胎架布置方案设计

周钟荣 曹磊 刘红振 魏巍 唐旭锋

中国建筑第三工程局有限公司 湖北武汉 430000

摘要: 结合项目特点,从场内吊装、场外吊装两个维度分别分析屋面钢罩棚吊装方案,通过工期分析、起吊设备工况分析、单元件拆分、胎架布置、工期等多个角度全面开展技术经济方案比选,从而确定项目一场两馆屋面钢罩棚吊装方案。

关键词: 钢结构吊装; 单元件拆分; 工况分析; 高空拼装; 滑移; 胎架; 受力计算

1. 工程概况

本项目总建筑面积 116613 m²。其中主体育场设置 30040 个坐席、体育馆设置 6039 个坐席、游泳馆设置 1504 个坐席。场馆等级均为乙级,可举办地区性和全国性单项赛事。一场两馆效果图如图 1 所示。



图 1: 一场两馆效果图

2. 钢罩棚结构形式

主体育场屋盖采用空间钢格网+树状支撑的悬挑结构,最大悬挑尺寸约为 30m,平面投影呈开口椭圆形,长轴尺寸约为 229m,短轴尺寸约为 235m,看台上空的最大标高约为 36.7m。杆件为圆管,连接方式为相贯焊接,合计 11691 件,约 2500 吨。屋盖模型如图 2。

体育馆钢结构屋盖采用平面张悬梁+平面桁架结构形式,最大跨度为 74.6m。屋盖平面投影呈椭圆形,长轴尺寸约为 137.5m,短轴尺寸约为 100.9m,结构最低点高度为 11.5m,屋盖最大结构标高约为 21.50m。杆件为圆管、连接方式为焊接,约 3500 件,共 858 吨。屋盖模型如图 3。

游泳馆钢结构屋盖采用平面张悬梁+平面桁架结构形式,最大跨度为 61.2m。屋盖平面投影呈椭圆形,长轴尺寸约为 115.4m,短轴尺寸约为 87.4m,结构最低点高度为 11.5m,屋盖最大结构标高约为 18.35m。杆件为圆管、连接方式为焊接,合计 2810 件,约 650 吨。屋盖模型如图 4。

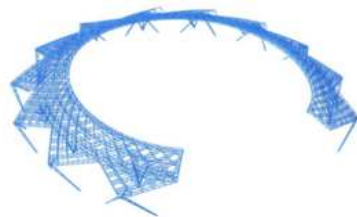


图 2 体育场屋盖钢结构效果图

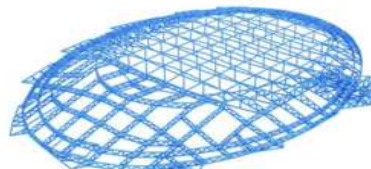


图 3 体育馆屋盖钢结构效果图

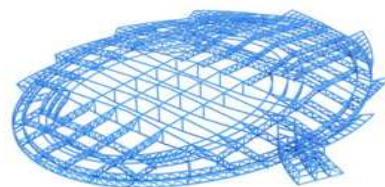


图 4 游泳馆屋盖钢结构效果图

3. 吊装方案为保证项目工期，不影响体育馆及游泳馆内部其他作业正常施工，同时为避免起吊机械设备对地下室顶板造成损伤造成后期渗漏风险，项目一场两馆吊装方案原则上吊车设备不上地下室顶板，体育场采用内外对称吊装，体育馆及游泳馆采用场外吊装场内滑移平整的方案进行，具体吊装方案如下：

3.1 体育场吊装方案

体育场拟采用两台 400T 和 260T 吨履带吊进行安装，体育场东半部分在内侧吊装，西半部分内外侧对称吊装。单元构件共 483 件，主构件 119 件、次构件 364 件；吊装工况模拟如图 5：

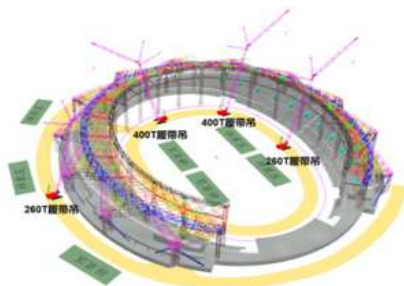


图 5 体育场吊装方案图

分段原则：以 Y 轴为中线，分 I、II 两个区，每个区分六小区，各小区包括内环、内环单元、中环、外环单元、外环支撑、屋面造型及嵌补单元件，依次由北向南编号，如图 6 所示：

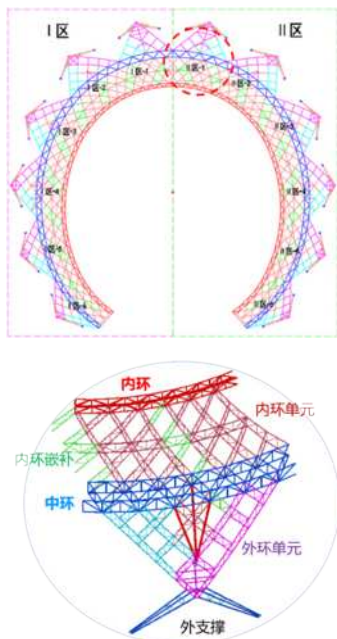




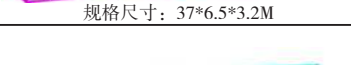
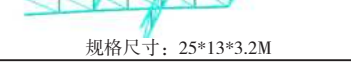


图 6 体育场钢结构分段图

体育场典型单元构件规格如下表所示：

内环	 规格尺寸：18.6*2.6*2.0M
中环	 规格尺寸：20*5*3.5M
内环单元	 规格尺寸：36*16*3.0M
外环单元 1	 规格尺寸：37*6.5*3.2M
外环单元 2	 规格尺寸：25*13*3.2M
外环支撑	 规格尺寸：23*3*2.8M

构件拆分数量：根据以上原则对钢屋盖进行拆分，根据 tekla 模型拆分后构件数量如下表所示：

类型	构件	数量	单件最大重量 (T)	吊装作业范围 (M)
重构件	内环	19	31	12 ~ 26
	内环单元	21	21	24 ~ 36
	中环	21	45	38 ~ 44
	外环单元	34	22.7	27 ~ 33
	外环支撑	24	14	40 ~ 55
	小计	119		
轻构件	屋面造型	60	8.5	轻构件不考虑
	内环支撑	42	7.3	
	嵌补件	262	1.69	
	小计	364		
合计	483			

吊车选用：体育场 I 区拟采用内侧 400 吨、外侧 260 吨履带吊对称吊装；II 区拟采 400 吨和 260 吨在内侧吊装。最不利吊装构件主要分布于中环单元件，最重约 45 吨 (12 件)，400 吨履带吊塔臂 (超起) 工况：主臂 60 米、副臂 48 米、工作角 75°，工作幅度 46 米范围内，最大起重量 50.4 吨，能满足要求。400 吨安装重型构件，260 吨安装嵌补、屋面

等轻构件。工况分析如图 7 所示

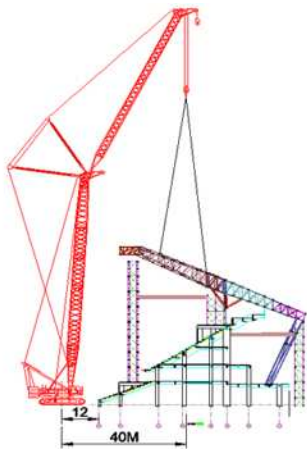


图 7.1 工况分析 – 最重内单元构件安装

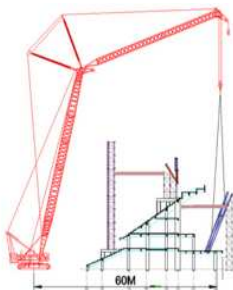


图 7.2 工况分析 – 最外侧支撑安装

设备工况分析：260T 塔臂工况：塔式主臂 53 米、副臂 42 米、主臂工作角(85°)75°，工作幅度 26 ~ 56 米范围内，最大起重量 22.2 ~ 11 吨。

400 吨塔臂（标准）工况：400T 履带吊变幅副臂（塔臂）工况，主臂 60 米、副臂 48 米、主臂工作角（85°）75°，工作幅度 44 ~ 58 米范围内，最大起重量 29.4 ~ 16.8 吨。

400 吨塔臂（超起）工况：400T 履带吊变幅副臂（塔臂）工况，主臂 60 米、副臂 48 米、主臂工作角（85°）75°，超起配重 80 吨，工作幅度 46 ~ 58 米范围内，最大起重量 50.4 ~ 37.1 吨。

经验算，所有起吊设备工况均满足吊装方案要求。

工期分析：体育场东西两侧各 6 个单元小区，两侧同时开始对称施工，起始单元从拼装到安装完成时间为 30 天，同时拼装 2 个单元件，其中安装时间为 16 天，在上一个单元安装 2/3 时，下一个单元开始拼装，在安装起始单元构件时，考虑同步施工其它单元内环支撑、外环支撑，可将剩余 4 个单元安装周期控制在 14 天左右（需相应增加拼装胎架

及吊车数量），体育场总工期为 $16 \times 2 + 4 \times 14 = 88$ 天。

3.2 体育馆及游泳馆吊装方案

体育馆及游泳馆是考虑两馆西侧及北侧地下室顶板先施工，同时吊车不进入馆内，采用场外吊装及场内滑移拼装的方式，吊装平面布置图如图 8 所示：

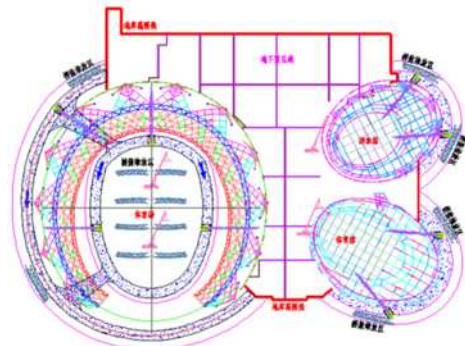


图 8：两馆吊装平面布置图

此方案是考虑体育馆西侧地下室先施工，所有吊车不进入场馆内部，吊车站位于东侧场地进行吊装作业，地库顶板只上 50t 汽车吊进行馆周边重量较轻构件拼装、吊装。馆内钢结构最重、距离最远处构件为张弦梁，经综合分析，采用 200t 履带吊安装 50t 汽车吊安装 + 张弦梁滑移方法进行吊装，游泳馆方案与体育馆一致。如图 9 所示：

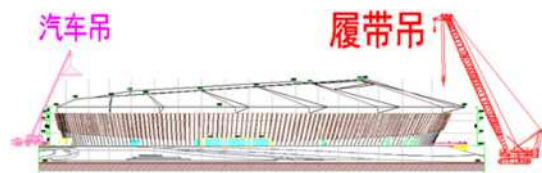


图 9：体育馆吊装图

分段分节方案：体育馆、游泳馆按照单元构件地面拼装后吊装的原则进行分段分节，次桁架在主桁架或张弦梁处断开，单元构件的分段分节除满足吊装要求外，尽量保持类似构件的分段相一致，便于设置拼装标准胎架、布置安装胎架，节省胎架费用，如图 10 所示：

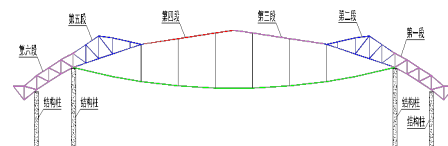


图 10：体育馆分段分节示意图

张弦梁滑移体育馆共 9 榀、游泳馆 5 榀，需布设三道滑移支撑胎架及轨道。所有张弦梁均在高空拼装焊接完成后进行滑移，滑移到位置固定后再进行其他相连杆件安装及索张拉。滑移拼装如下图 11 所示：

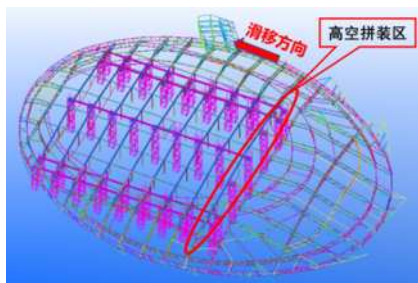


图 11 滑移拼装示意图

拆分构件数量：体育馆、游泳馆分段拆分构件如下表所示：

类型	构件	数量	单件最大重量	吊装作业范围
体育馆重构件	张弦梁	9	12	34 ~ 44
	东侧柱桁架	10	10	25 ~ 35
	西侧主桁架	6	2.5	10 ~ 15
游泳馆重构件	南、北侧主桁架	18	7.8	10 ~ 15
	张弦梁	5	9	34 ~ 44
	东侧柱桁架	10	8.5	25 ~ 35
	西侧主桁架	6	4.8	10 ~ 15
轻构件	次桁架	/	2.8	

吊车选用：200 吨履带吊在场馆东侧地面安装，50 吨汽车吊在场馆外侧地下室底板上面进行吊装。从场馆东侧竖向桁架开始由东向西对称安装，南北两侧可同时开始对称施工，场馆内部张弦梁在外环桁架安装完成之前可同步进行拼装。

设备工况分析：体育馆、游泳馆分段后单个单元构件最重处构件为张弦梁。分段后体育馆、游泳馆最重张弦梁待吊装构件重量分别为 12t、4.5t，吊点距离场馆边距离为 34 米。200 吨履带吊塔臂工况：主臂 49 米，工作幅度 44 米范围内，最大起重量 13.6t，可以满足要求。两馆西北角处距离吊车较远处构件可根据实际情况增加分段，减少吊装构件重量，直至满足吊装要求为止。

工期分析：体育馆及游泳馆构件均从东侧竖向桁架开始由东向西对称安装，南北两侧可同时开始对称施工，场馆内部张弦梁在外环桁架安装完成之前可同步进行拼装，每个场馆安装总工期为 90 天。可实现流水施工作业。

4. 胎架布置

体育场胎架布置：在综合构件分段、荷载传递、支撑胎架及构件安装稳定性，减少与前后工序冲突等因素，胎架位置均布置在柱梁结构处。胎架暂选截面内环为单截面（2 米 * 2 米），中环为双截面（4 米 * 2 米），外环为两点单截

面 2*（2 米 * 2 米）。胎架布置如图 12 所示：

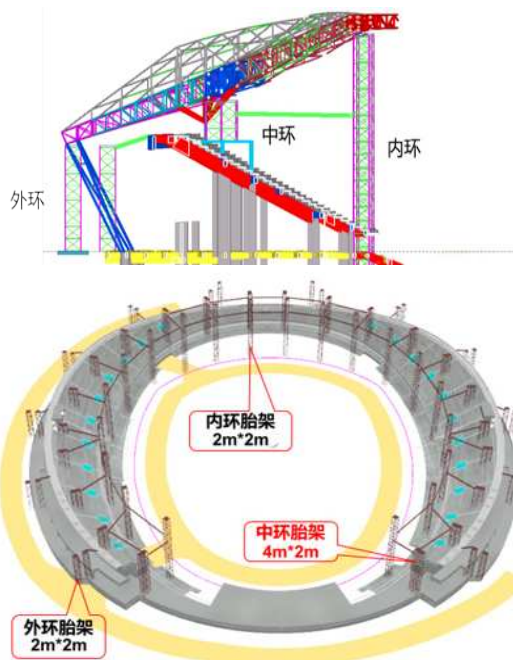


图 12：体育场胎架布置

体育馆及游泳馆胎架布置：根据单元板块划分情况，拟采用标准节（2M*2M）+ 连系桁架 + 顶部分配梁为支撑措施，满足安装、卸载要求。体育馆、游泳馆胎架点位分别为 29 个、17 个。胎架布置如图 13 所示：

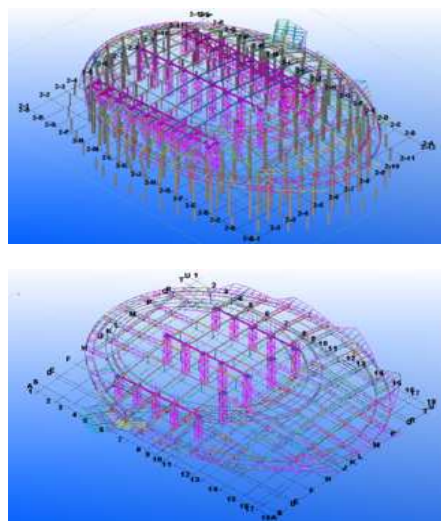


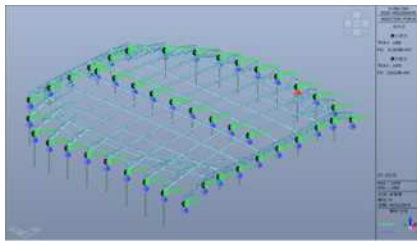
图 13：体育馆、游泳馆胎架布置

5. 胎架计算

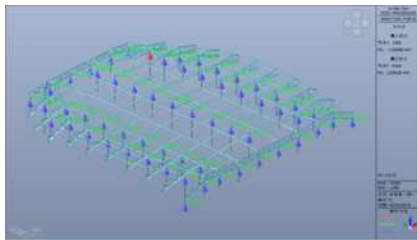
以体育馆最高处 18.6m 高中柱胎架进行为例进行荷载及稳定性验算。

5.1 荷载统计

恒荷载：根据 tekla 模型据实导入拼装部件恒载，依据统计荷载，软件自重系数取 1.2，如图 14 所示：



14.1: 最不利工况 (3 榀胎架受力) 位置反力



14.2: 调整胎架 (5 榀胎架全部受力) 位置反力

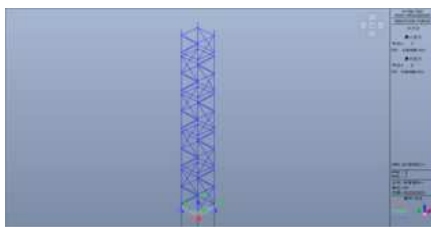
综合以上两种不利情况，单榀边双柱最大受荷 15t/根，双柱合计最大受荷 28t；中柱最大受载 19.1t。胎架统一按照边柱 15t 荷载（双柱），中柱 19.1t 荷载进行设计。

风荷载：取恩施 10 年一遇基本风压 $\omega_0 = 0.20 \text{ kN/m}^2$ ， $\beta_z = 1.0$ ， $\mu_z = 1.23$ ， $\mu_s = 1.3$ ， $\Phi = 0.8$ 。 $\omega_k = 0.26 \text{ kN/m}^2$ 。

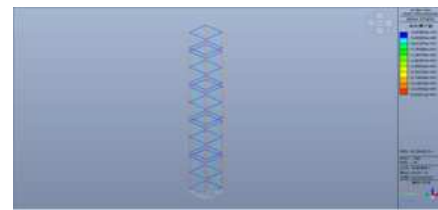
活荷载：考虑顶部平台 3 kN/m^2 的均布荷载，均匀作用于立柱。

5.2 计算结果

经 tekla 软件计算处理输出结果如下图 15 所示：



15.1 标准组合下支座反力



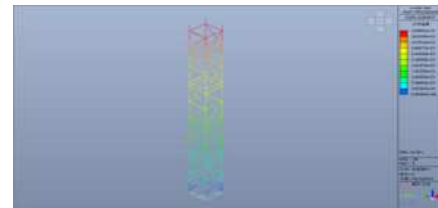
15.2 基本组合下强度



15.3 基本组合稳定 -Y



15.4 基本组合稳定 -Z



15.5 位移等值线

验算结果：根据软件计算，验算结果如下图 15 所示，满足规范要求

格构柱稳定性验算：

胎架截面特性：四肢圆管 2x2 布置，截面为 $\Phi 102 \times 5.0$ ，单肢圆管面积 $A_1 = 15.24 \text{ cm}^2$ ，惯性矩 $I_1 = 179.67 \text{ cm}^4$ ，回转半径 $i_1 = 3.43 \text{ cm}$ ，计算长度：。横梁截面为 $\Phi 89 \times 4.0$ ，截面面积为 10.68 cm^2 。

整个截面对 x 轴的惯性矩：

截面名称	材料名称	Len	Ly	Ky	强度		稳定-y		稳定-z		抗剪		长细比		高厚比和宽厚比				挠度						
					截面号	材料号	Lb	Lz	Kz	组合	值	限值	组合	比率	组合	比率	组合	值	限值	值	限值	翼缘宽厚	限值	腹板宽厚	限值
立柱-P 102x5	Q355	18.600	1.800	2.000	组合	97324.51	305000.00	sLCB25	0.527	-	-	-	-	-	104.845	150.000	20.400	33.099	-	-	-	-	L/2287	L/300	
1	2	1.800	1.800	2.000	sLCB25	3	0	sLCB25	0.527	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
横梁-P 76x4	Q235	2.000	2.000	1.000	组合	7191.157	215000.00	sLCB24	0.037	-	-	sLCB24	390.280	125000.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	L/34273	L/250
2	1	2.000	2.000	1.000	sLCB24	7191.157	0	sLCB24	0.037	-	-	sLCB24	390.280	125000.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
斜杆-P 89x4	Q235	2.691	2.691	1.000	组合	15858.96	215000.00	sLCB22	0.066	-	-	-	-	-	89.431	200.000	22.250	388.664	-	-	-	-	-	-	
3	1	2.691	2.691	1.000	sLCB22	15858.96	0	sLCB22	0.066	-	-	-	-	-	89.431	200.000	22.250	388.664	-	-	-	-	-	-	

15.6 验算结果

$$I_x = 4(I_1 + A_1 * d^2) = 610318.68cm^4$$

$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{4A_1}} = 100cm$$

$$\lambda_x = \frac{l_{0x}}{i_x} = 37.2$$

$$W_{1x} = \frac{I_x}{y_1} = 6103.2cm^3$$

四肢组合构件换算长细比:

$$\lambda_{ox} = \sqrt{\lambda_x^2 + 40 \frac{4A_1}{A_{1x}}} = 39$$

$$N_{Ex} = \frac{\pi^2 EA}{1.1\lambda_{ox}^2} = 7400.3kN$$

考虑竖向荷载 10mm 偏心作用, 中柱承担最大支座反力为 150kN, 考虑 1.1 的动力系数和 1.3 的不均匀系数。

$$N = 1.3 * 1.1 * 1.3 * 191 = 355.1kN$$

$$M_x1 = 355.1 * 0.01 = 3.6kN \cdot m$$

风荷载产生的弯矩:

$$M_x2 = 1.5 * 0.26 * 18.6 * 2 * 9.3 = 134.92 kN \cdot m$$

$$M_x = 138.52 kN \cdot m$$

弯矩作用平面内的整体稳定验算:

$$\frac{N}{\varphi_x f A} + \frac{\beta_{mx} M_x}{W_{1x} \left(1 - \frac{N}{N_{Ex}}\right) f} = 0.299 < 1.0$$

格构柱弯矩作用平面内整体稳定满足规范要求。

6. 结语

本文介绍了某体育中心项目一场两馆的吊装方案, 结合项目整体施工部署, 确定主体育场可以场内吊装, 体育馆及游泳馆不能场内吊装只能场外吊装, 场内滑移的吊装方案, 然后对罩棚结构进行拆分, 拆分成各类单元构件, 各分段单元件在地面拼装完成后, 再根据拆分原则进行空中拼装, 依

次进行。结合各单元构件的数量、最大起吊重量以及吊装距离、高度进行起吊设备工况分析及胎架布置, 选择最优的起吊设备并合理布置胎架。得出结论如下:

(1) 体育馆及游泳馆内部结构复杂, 特别是游泳馆, 场馆中间有下沉式比赛池及热身池, 不利于吊装胎架布置, 场馆内部柱网较多, 不适合进行场内吊装, 采用场外吊装更利于项目整体施工部署。

(2) 对于张弦梁结构, 在场内搭设高空拼装平台, 采用逐榀滑移拼装的方式, 可大大减少胎架费用, 加快吊装工期, 同时可在场馆内部主体结构施工完成后再进行滑移作业, 主体结构施工可连续。

(3) 钢结构安装施工高峰期, 因大部分均在场内进行构件卸车、导运、拼装、吊装作业。建议先完成高区预制看台板安装, 待钢结构施工完再安装低区预制看台板。合理规划各专业衔接, 以确保场区内应有足够拼装场区和吊装作业区。

(4) 胎架可采用基础底座 + 标准节 + 连系桁架为支撑措施, 具体截面选用以最终计算为主, 以满足安装、卸载要求。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构工程施工规范: GB50755-2012 中国建筑工业出版社.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 《钢结构设计标准》(GB 50017-2017) 中国建筑工业出版社.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构可靠性设计统一标准: GB50068-2018 中国建筑工业出版社.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑施工起重吊装工程安全技术规范: JGJ 276-2012 中国建筑工业出版社.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》(JGJ 130-2011) 中国建筑工业出版社.