

# 大跨度悬挑悬挂钢结构施工控制要点研究

李钰

上海建科工程咨询有限公司

**摘要：**大跨度悬挑悬挂钢结构的安装及其临时支撑的卸载历来是施工领域的重大难题。本文以实际工程为例，对刚性筒体悬挂结构施工工艺进行阐述，包括主楼屋顶双向上翻桁架、悬挂结构安装及临时支撑卸载等关键技术，旨在为同类工程建造技术及施工管理水平提升带来更多参考和启迪。

**关键词：**大跨度悬挑钢结构；刚性筒体悬挂结构；临时支撑体系卸载；施工关键技术

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.03.022

## 引言

1938年，Williams提出将悬挂结构体系运用于超高层建筑的理念。20世纪中叶起悬挂结构逐渐在建筑领域得到工程实践运用，较为著名的建筑有1972年德国慕尼黑BMW公司办公楼以及南非约翰内斯堡标准银行等。我国于1985年建成香港汇丰银行，2004年开始动工的广东省博物馆新馆是内地第一座采用悬挂结构体系的大型建筑物。

悬挂结构体系主要由承重结构、吊杆以及悬挂结构三部分组成。根据结构性能不同可分为刚性筒体悬挂结构、拉索桅杆悬挂结构、张拉集成悬挂结构及单层大空间悬挂结构四类结构体系。其中刚性筒体结构优点颇多，包括：1) 筒体部分为刚性受压部分，吊杆为柔性受拉部分，刚柔结合完美发挥材料力学性能；2) 筒体与悬挂结构振动特性截然不同，能起到良好的减振效果；3) 吊杆仅考虑拉力、不考虑压力，因此可以减小截面、节约钢材；4) 结构自重轻，荷载主要集中在筒体部分，对不均匀沉降影响小，且基础不均匀沉降不影响悬挂结构的内力变化；5) 占地面积小，底层可

实现全敞开空间；6) 空间使用灵活多变，能够满足体型独特、造型新颖、具有艺术表现力的建筑设计要求。因此，刚性筒体悬挂结构是目前世界上建成数量最多、运用最广的一种悬挂结构形式。

上海图书馆东馆（简称上图东馆）项目即应用筒体悬挂结构体系，具有大空间、大跨度、大悬挂的结构特点，新颖的建筑结构形式给人耳目一新的同时也给施工带来许多难题。由于其结构受力形式复杂，施工技术含量高，尤其卸载过程中复杂的结构受力转换，因此对施工过程控制提出了更高的要求。

## 一、工程概况

上图东馆项目属于上海市重大工程，规划用地约3.96公顷，总建筑面积约11.5万平方米，建筑高度50m，地上建筑共7层，约7.8万平方米，钢结构总重约为2.55万吨。建筑造型总体呈现上大下小、逐层扭转倾斜的视觉效果，上图东馆项目效果图见图1。



图1 上海图书馆东馆工程

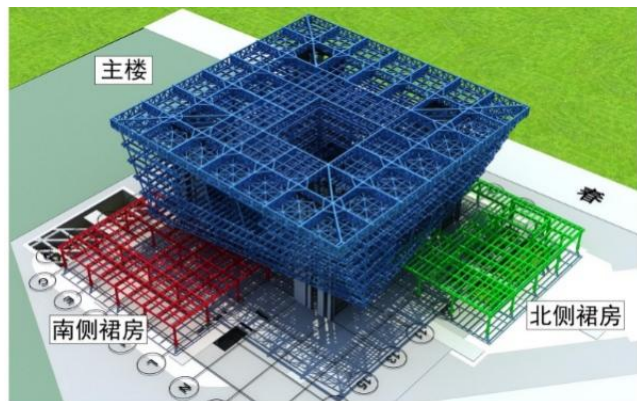


图2 上海图书馆结构模型示意图

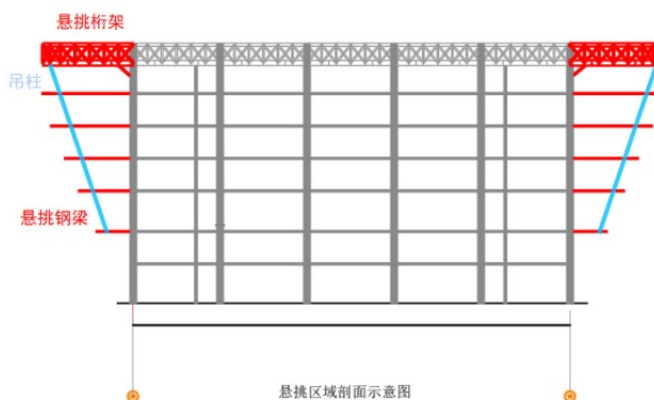


图3 悬挑区域剖面示意图

上图东馆项目核心筒区域采用钢-混筒体结构，悬挑区域采用悬挂全钢结构，位于主楼3层至屋顶层的四周，钢构件重量大，如屋顶层双向上翻桁架总重约80t，最大跨度为24m，最大悬挑尺寸为16.8m，总体采用大空间、大跨度、大悬挑的结构形式。在屋顶层双向上翻桁架结构端部布置Q460高强度钢拉杆吊柱，通过每层28根吊柱层层下挂悬挑悬挂结构，为了满足建筑造型需要，吊柱倾斜角度各异，最大安装角度达30°。悬挑悬挂结构从7层至3层逐层向主楼核心筒区域收缩，尺寸从上至下逐层递减。临时支撑系统采用斜拉杆形式设置在屋顶层悬挑桁架及其他层悬挂结构上，既要满足临时支撑系统稳定，还要防止混凝土结构出现损坏。钢结构模型示意图及悬挑区域剖面示意图见图2、图3。

### 二、大跨度悬挑悬挂结构施工关键技术

根据工程特点及现场实际工况，悬挑悬挂结构施工顺序为：主楼核心筒区域钢结构封顶后，先进行非悬挑区域施工，再进行悬挑区域钢结构施工，悬挑结构采用“自下而上逐层施工，自上而下逐层拆除临时斜拉杆”的施工技术路线。需要注意的是，悬挂结构及悬挑的桁架均需在安装过程中考虑预起拱，施工过程中吊柱不允许出现压应力。

#### （一）主楼屋面桁架（非悬挑悬挂区域）施工关键技术

主楼区域屋顶钢结构总重约80t，超过塔吊起重重量，故需要针对屋顶层桁架进行分段。桁架下弦杆最重约30t，不需分段；上弦杆连着腹杆整体分段，分段后重量不超过30t。主楼屋面桁架施工流程为：首先安装桁架下弦杆，接着逐次安装分段后的上弦杆以及相关连腹杆。

#### （二）悬挑悬挂结构施工关键技术

悬挑区域钢结构施工可分为三部分：1) 从3层起自下往上施工，3层至7层逐层设置临时支撑系统斜拉下层悬挂结构，临时支撑系统斜拉杆利用上一层主楼结构设置。2) 顶层悬挑桁架施工时，利用下层主楼结构设置斜撑作为临时支撑系统，桁架分段由内向外安装：首先安装悬挑桁架下弦杆及隅撑；接着安装悬挑桁架的第一个节间，形成一个桁架牛腿；之后安装7层悬挑主梁及临时支撑；继续安装悬挑桁架的第二、三个节间；最终完成顶层悬挑桁架安装。3) 悬挂结构下拉杆，即吊柱，待悬挑桁架施工完成，且下层悬挂结构楼板施工完成后自上而下逐层安装。

临时斜拉杆和所有连接板材质均为Q345B，临时拉杆与连接板之间采用双面角焊缝连接，单条焊缝长度不小于550mm。

#### （三）卸载施工关键技术

卸载施工是伴随着结构体系与临时支撑体系受力相互作用转化的复杂过程，在临时支撑体系卸载过程中，结构体系逐渐由安装状态转换为设计受力状态，此过程影响结构安全质量的因素很多，选择合理的卸载方案以及卸载过程的有效控制非常关键。实现卸载过程中结构体系受力状态平稳有序的转换是结构安全卸载施工控制的关键技术。

卸载前工况为屋顶层悬挑桁架与7F悬挑钢梁组成桁架支撑体系，支撑钢结构自重，斜拉杆承载7F以下钢梁荷载及撑杆荷载，撑杆承载悬挑桁架部分荷载。支撑体系见图4。

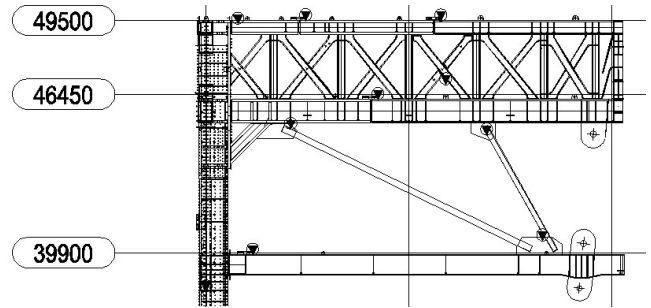


图4 屋顶层与7层形成的桁架支撑体系

卸载前需将屋面桁架层及其对应的吊杆处的健康监测系统布置完毕，并读出首次监测数据，为将来卸载后工况的数据做对比准备。在屋面悬挑桁架吊装焊接完成、悬挑桁架之间联系的边桁架以及钢次梁安装焊接完成，上述构件所有对接节点探伤验收合格后，开始卸载工作。具体卸载步骤分解如下：

##### （1）吊杆连接板临时搁置板割除

前置条件：1) 需拆除临时支撑的屋面悬挑桁架以及相邻的屋面悬挑桁架安装并焊接完成；2) 悬挑桁架之间联系的边桁架以及钢次梁安装并焊接完成；3) 上述构件所有对接节点探伤验收合格。具体步骤：吊杆连接板临时搁置板割除。拆除悬挑桁架下方对应的吊杆连接板与楼层钢梁临时搁置板，使得吊杆从顶至底贯通。

##### （2）屋顶悬挑桁架临时支撑拆除

前置条件：1) 吊耳连接板临时搁置板全部拆除完毕，并从顶至底贯通；2) 悬挑桁架上杂物清理，防止悬挑桁架卸载过程中杂物掉落。具体步骤：拆除屋顶悬挑桁架下方临时支撑。

##### （3）7F吊杆连接板临时节点焊接

前置条件：1) 屋面悬挑桁架变形稳定；2) 悬挑桁架对应吊杆连接节点没有卡死现象。具体步骤：7F钢梁与吊杆连接板临时连接节点焊接，转换成永久连接节点。

##### （4）7F钢梁斜拉杆拆除

前置条件：1) 7F所有吊杆连接板节点焊接完成并探伤合格；2) 7F悬挑结构上杂物清理，防止卸载过程中杂物掉落。具体步骤：拆除7F临时斜拉杆。

##### （5）6F钢梁斜拉杆拆除

前置条件：1) 6F~3F所有吊杆连接板节点焊接完成、探伤合格；2) 6F~3F悬挑结构上杂物清理，防止卸载过程中杂物掉落。具体步骤：拆除6F临时斜拉杆。

（6）其余各层钢梁斜拉杆拆除条件与步骤同6、7层。

#### （四）测量施工关键技术

由于本工程测量观测点最高高度约为50m，因此在室外地坪上加设全站仪即可以满足水平及垂直坐标的观测，先在本工程现场设立4个坐标基准点，满足全站仪

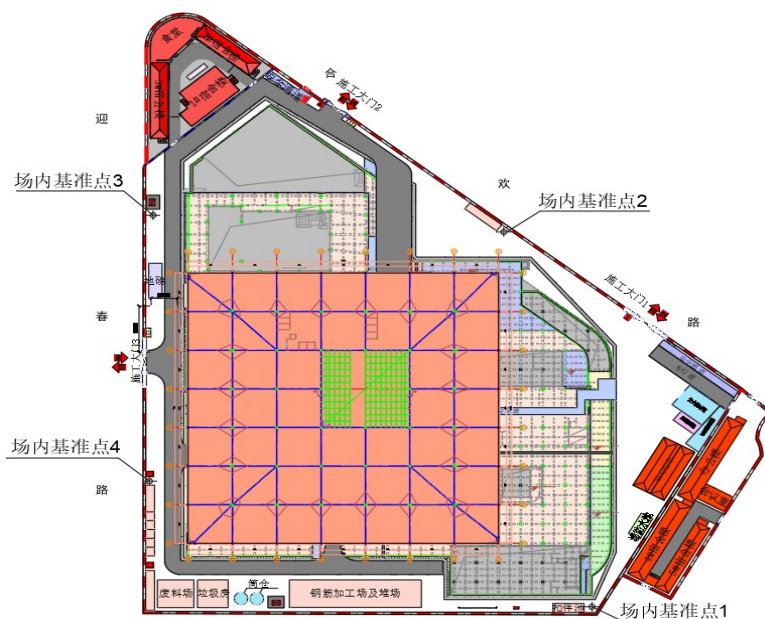


图5 现场基准点示意图

架设点后方交汇条件，现场布设点示意图见图5。

施工期间对本工程对悬挑区域每根主梁、每榀屋面悬挑重型桁架进行监测。按悬挂钢结构施工阶段来对监测工作进行划分，主要分为三个阶段：

阶段1)：安装阶段，即从悬挑区域钢结构开始施工起至悬挑区域钢结构施工完成、临时支撑拆卸前，为监测第一阶段工作；

阶段2)：卸载阶段，从临时支撑开始拆卸起至临时支撑完成拆卸，即临时支撑卸载过程的实时监控，为监测第二阶段工作，在这个阶段中，每完成一层悬挑悬挂区域临时支撑卸载后，均需进行一次变形记录；

阶段3)：楼板施工阶段，从临时支撑卸载完成后开始至屋面、楼层混凝土楼板施工期间，再至结构主体结构验收，为监测第三阶段工作。

### 三、结语

上海图书馆东馆主楼四周悬挑悬挂钢结构施工阶段结构内力分布的复杂性和最终成型过程中结构受力的可变性，对现场施工工艺和施工控制提出了更高的要求，尤其是吊柱的安装、临时支撑系统的安装与卸载部分与常规施工工艺不同，施工难度大。为确保施工质量、安全与经济，在施工过程中必须按照客观条件确定合理的施工顺序。本文结合实际工程经验，阐述了高空大跨度悬挑悬挂结构施工工艺及关键技术，形成了一套完整的技术资料，可为类似工程施工提供一定的借鉴。

### 参考文献

[1] 杨晓敏, 曹喜. 高层悬挂建筑的特点及形式[J]. 内蒙古科技与经济, 2006(03): 104-106.  
 [2] 吴岳. 悬挂系统减震效果分析[D]. 河北联合大学, 2014.  
 [3] 张力. 悬挂式结构体系在高层建筑中的应用初探[D]. 东南大学, 2010.

[4] 王海龙. 同钢种预应力大悬挑钢桁架结构的施工控制[D]. 燕山大学.

[5] 彭文海, 黄东阳, 丁昌银, 等. 广州海心沙体育场大跨度悬挑钢顶篷斜拉索施工技术[J]. 施工技术: 下半月, 2011(1): 5.

[6] 杨晓敏. 核筒悬挂结构的动力特性研究[D]. 内蒙古工业大学, 2006.

[7] 刘娜. 高层建筑核筒悬挂结构体系的减震性能研究[D]. 北京建筑工程学院, 2003.

[8] 雷霆. 建筑的悬挂结构施工技术[J]. 中华建设, 2013(07): 142-143.

[9] Sexsmith R G. Reliability during temporary erection phases[J]. Engineering structures, 1998, 20(11): 999-1003.

[10] 肖魁, 贾水钟, 贾君玉, 郭小农. 上海图书馆东馆悬挂结构方案设计与研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(01): 1-6.

[11] 徐驰. 大跨度钢结构场馆悬挂结构施工技术研究[J]. 绿色建筑, 2021, 13(05): 75-76+92.

[12] 史洪泉. 大跨度空间钢结构施工全过程力学分析及考虑施工影响的若干要素研究[D]. 东南大学, 2005.

[13] 方胜利. 大型悬挑钢结构施工关键技术研究[D]. 武汉理工大学, 2011.

[14] 叶芳芳. 大悬挑悬挂混合结构的施工控制[D]. 中南大学, 2009.

[15] 王肇民, 邓洪洲, 董军. 高层巨型框架悬挂结构体系抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 1999(01): 23-30.

[16] 蔡朝霞. 巨型钢框架悬挂结构体系的竖向振动控制[D]. 广西大学, 2006.