

# 基于施工控制理论的指环型摩天轮成型方法

段凯元, 郭正兴, 郑剑辉

(东南大学 土木工程学院, 210096 南京)

**摘要:** 为使特殊的指环型摩天轮——常州紫荆公园景观塔顺利建造成型, 基于施工控制理论, 对景观塔的建设及施工控制方法进行研究. 确定了两侧对称竖立悬臂安装方法, 并借助辅助桅杆及拉索等措施, 对结构施加临时预应力, 实施安装过程的施工控制. 施工控制以成型后结构整体形态控制为主, 同时保证施工及成型后结构内力满足承载力要求, 并兼顾调控效率最大的原则. 设计调控程序, 利用 ANSYS 程序二次开发, 迭代计算拉索的张力. 对结构成型过程进行时变模拟分析, 成型后结构的变形满足控制要求, 施工中及成型后钢结构应力满足承载力要求.

**关键词:** 施工控制; 指环型摩天轮; 成型; 预应力; 模拟分析

中图分类号: TU391.9

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)08-0143-06

## Construction method of ring-shape ferris wheel structure based on process control theory

DUAN Kai-yuan, GUO Zheng-xing, ZHENG Jian-hui

(School of Civil Engineering, Southeast University, 210096 Nanjing, China)

**Abstract:** To make the Bauhinia Park View Tower in Changzhou—the special ring-shape Ferris wheel construct successfully, the paper researched the installation and process control method which was based on the theory of process control. The cantilevered symmetrical installation method was adopted and the process control scheme was implemented by prestressing the structure, with the help of masts and cables and other auxiliary facilities. The main principle of the process control was to control the whole shape after construction. Besides, the structure internal force was controlled. In addition, the efficiency of process control must be higher. The process control scheme was devised, and then the secondary development technology based on ANSYS was applied to iterative calculate the cables tension. By time-varying simulating and analysis, it indicated that the deformation after construction met the controlled demand. The internal force during installation and after construction met the demand of bearing capacity.

**Key words:** process control; ring-shape ferris wheel; construction; prestressing; simulation

摩天轮结构作为一种游乐设施, 近年在国内外掀起了一场建造高潮. 世界范围内有记载的资料中, 已建成的摩天轮结构除莫斯科麻雀山摩天轮外均为轮辐式结构(见图1).

轮辐式摩天轮建造过程通常利用轮盘两侧塔架及径向索杆采用竖立旋转安装法或中心旋转安

装法. 其中竖立旋转安装法又分为单向旋转安装和双向对称旋转安装<sup>[1-3]</sup>. 英国的“伦敦眼”摩天轮, 在安装过程充分利用了开阔的河面空间, 采用了地面拼装, 整体旋转起扳的建造方法<sup>[4]</sup>.

江苏常州紫荆公园景观塔为亚洲首个落地式指环型摩天轮结构(见图2). 不同于轮辐式摩天轮, 指环型结构圆形轮盘中心不设轮轴及径向索杆, 直接坐落于地面上, 故不宜采用竖立旋转安装法或中心旋转安装法. 且受施工场地及结构平面外刚度的限制, 地面拼装整体起扳的安装方法也

收稿日期: 2011-08-19.

作者简介: 段凯元(1982—), 男, 博士研究生;

郭正兴(1956—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 段凯元, kaiser0215@163.com.

不是合理的建造方法<sup>[5-6]</sup>.

为保证安装过程顺利安全,特别是结构成型后整体形态良好,需要依据施工控制理论选择合理的建造及控制方法. 目前对以施工控制理论进行的结构成型过程研究多集中于空间索网体系及大跨桥梁中<sup>[7-9]</sup>. 落地式指环型摩天轮结构基于施工控制理论的成型方法研究尚属空白.



图1 轮辐式摩天轮



图2 指环式摩天轮

### 1 施工控制理论

大型结构从施工状态直至最后成型经历了受力状态、边界条件的反复改变. 结构成型状态的变形、内力等方面会与设计状态产生差异. 不同的施工方法造成的差值各异. 因此,应在建造过程中采取措施控制结构的变形与内力等.

目前在大型空间钢结构安装过程中,主要应用预应力技术,通过改变外部荷载与结构内部抗力的关系,改善钢结构的静、动力性能,提高结构的局部刚度,达到对结构进行施工控制的目的<sup>[10]</sup>.

变形调控是预应力技术在钢结构安装中应用最普遍的一种施工控制方式. 通过施加临时预应力改变结构刚度与内力,最终使成型后的结构位

形满足设计要求. 为了确定结构的最终成型态,需要对每个施工阶段进行跟踪模拟计算. 借助有限元理论,应用拉格朗日列式(Lagrangian Formulation),并根据虚功原理可求出考虑几何非线性的结构单元的切线刚度矩阵,从而追踪到整个加载过程中结构各点的变形历史<sup>[11-15]</sup>.

$$[K]^e = [K]_e^e + [K]_i^e + [K]_o^e.$$

式中:  $[K]_e^e$  为弹性刚度矩阵;  $[K]_i^e$  为几何刚度矩阵;  $[K]_o^e$  为非线性刚度矩阵.

将连续的施工过程划分成 1, 2, ..., n 个施工状态,则结构在施工过程中每个施工态的有限元基本方程为:

施工第 n 状态

$$[K_n(U_n)]\{U_n\} = \{F_n\},$$

预应力施工控制

$$[K_p(U_p)]\{U_p\} = \{F_p\},$$

结构成型 m 状态

$$[K_m(U_m)]\{U_m\} = \{F_m\},$$

预应力卸载

$$[K_m(U'_m)]\{U'_m\} = \{F'_m\},$$

最终位移

$$\{U'_m\} = \{F'_m\} / K_m(U'_m),$$

最终内力

$$[N'_m] = [K'_m][A_m]\{U'_m\}.$$

式中:  $[K]_i^e$ 、 $\{U_i\}$ 、 $\{F_i\}$  分别为第 i 施工状态已安装结构的刚度矩阵、位移向量、单元节点力向量;  $\{F_p\}$ 、 $\{U_p\}$  分别为施加临时预应力后结构的单元节点力向量、位移向量;  $[A_i]$  为第 i 施工状态已安装结构的几何矩阵;  $[N_i]$  为第 i 施工状态已安装结构中杆件的内力向量;  $[K'_m]$ 、 $\{U'_m\}$ 、 $\{F'_m\}$  分别为结构成型预应力卸载后结构的刚度矩阵、位移向量、单元节点力向量.

### 2 确定施工控制方法

#### 2.1 辅助拉索桅杆的施工控制

结构地坪以上两侧各节段箱梁采用对称竖立吊装,空中焊接的安装方法. 当两侧结构分别形成悬臂状态时,结构在自重作用下,上部产生竖向向下挠,两侧产生结构外侧的水平变形,如图 3 所示. 随着安装过程的进行,这种变形趋势如不加以控制必将导致结构无法顺利合拢,或成型后形态异常. 为避免结构在安装及成型后位形失控,以形控为首要原则确定施工控制方法.

借助临时预应力拉索对结构的施工过程进行调控主要是尽量减小建造过程中结构产生的过大变形及内力,保证施工顺利进行. 经分析拟在结构

中下部设置若干连接左右两侧悬臂结构的水平拉索, 调控结构在安装过程中的水平向变形. 在结构中上部两侧对称设置若干预应力拉索, 调控在安装过程中的竖直向变形(见图 4). 上部拉索借助桅杆与结构连接, 通过桅杆的架设高度调整拉索与结构间的相互角度.

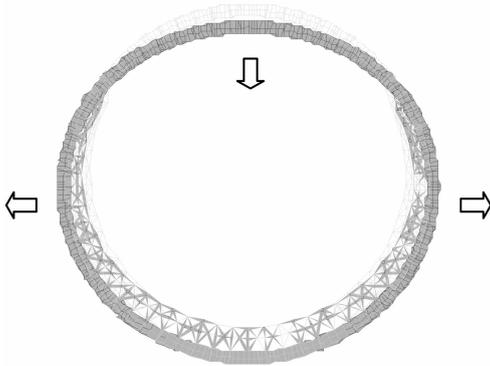


图 3 施工中结构变形趋势

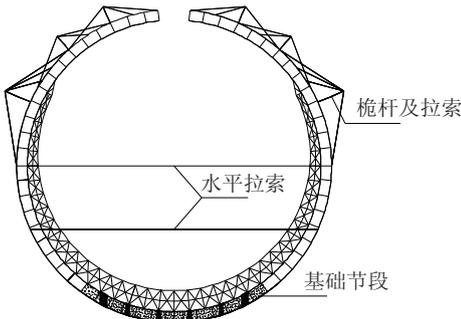


图 4 施工控制过程辅助拉索布置图

该调控方法借鉴了钢拱桥竖向转体的施工经验<sup>[16]</sup>, 通过设置水平拉索控制悬臂结构的水平变形, 设置桅杆及拉索控制其竖向变形, 达到对结构变形、内力和稳定性的调控, 最终使悬臂段安装合拢. 尽量缩小建造成型后结构形态与设计形态间的差异, 突出结构的建筑美感. 目前在国内相类似的空间结构施工控制中该方法尚属首创.

## 2.2 迭代法计算张拉力

在具体实施过程中, 采用借助桅杆和拉索对安装过程进行调控还存在着一些技术难题, 需要在施工前对控制方案做进一步的优化分析. 优化分析范围包含辅助桅杆的位置和高度、拉索的数量、张拉力的大小等. 其中, 确定各拉索的张拉力是优化分析的关键.

可先从力学概念上分析确定水平拉索及桅杆的布设位置, 各拉索张拉力作为目标变量. 各拉索依据现场实际情况在一定张拉力范围内采取迭代算法确定. 结构成型卸载后的整体形态, 即各节点的空间位置作为首要控制条件. 在施工过程及成型后结构的内力作为次要控制条件. 在分析过程中, 还要满足预应力调控结构效率最高的原则.

在达到调控目标的前提下, 尽量简化调控过程与调控的次数.

依靠大型有限元软件 ANSYS 的强大数据运算能力, 编制 APDL 语言确定各拉索最优的张拉力, 实施合理的施工控制. 程序计算的具体流程见图 5.

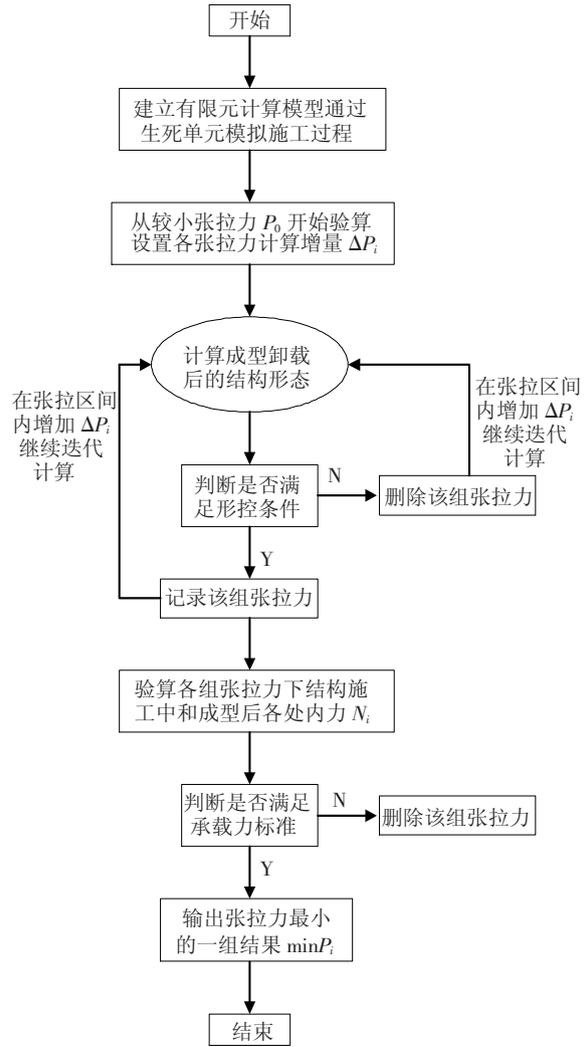


图 5 迭代法计算张拉力流程

## 3 工程应用

### 3.1 工程概况

常州紫荆公园景观塔位于规划中的东经 120 主题公园内, 建设基地面积为 201 470 m<sup>2</sup>. 景观塔为“指环型”落地式摩天轮结构, 最大跨度 89 m, 高度约 80 m, 厚度 7 m. 主体结构采用组合钢箱结构, 钢管桁架位于钢箱内侧. 钢箱外侧为玻璃幕墙封闭的游艺舱体部分. 两层地下室采用型钢混凝土框架结构, 主要用于设备上下及观光功能.

景观塔按结构类型大体分为 3 个区段(见图 6). 下部第一区段为钢箱混凝土与钢管桁架组合结构, 剖面如图 7 所示. 标高 0 m 以下的钢箱混凝土截面尺寸为 7.0 m × 3.0 m, 外侧钢板厚度为

40 mm. 地坪0 m 以上的钢箱混凝土截面尺寸为 2.0 m × 3.0 m, 外侧钢板厚度为 25 mm. 中部第二区段为钢箱与钢管桁架组合结构. 地坪0 m 以下钢箱建造在桁架上, 与基础连接. 上部第三区段为钢箱梁结构型式. 结构第一区段下部各钢箱通过混凝土钢梁连接(图中填充区域), 其余各钢箱由 H 型钢连接. 钢桁架及钢箱为 Q345 钢材, 箱梁中的混凝土为 C40.

### 3.2 设计调控程序及张拉力计算

地坪以下各节段在桁架上直接总拼安装. 地坪以上各节段采取对称悬臂安装(图 8). 在建造过程中, 上部第一至第九(结构水平向最外端)节段在重力作用下发生显著水平变形, 通过在第五和九节段设置两排水平拉索, 控制结构水平向变形.

上部两侧的桅杆考虑到稳定性, 不宜设置过高, 桅杆上拉索与结构间夹角偏小, 拉索的张拉力损失较大. 经分析在第十三节段设置第一道桅杆, 桅杆前索锚固在第九节段位置, 三道后索分别锚固在第十五至十七节段位置. 第十七节段设置第二道桅杆, 前索锚固在十四节段, 两道后索锚固在十九和二十节段. 第三道桅杆设置在二十节段. 前索锚固在十七节段, 两道后索锚固在二十二和二十三节段处. 第一道桅杆高度为 8 m, 后两道高度为 5 m. 为了保证三道桅杆上的拉索调控变形具有连续性, 前一道桅杆最后一道后索锚固位置布设后一道桅杆. 且后面桅杆的前索介于前一道桅杆及其第一道后索之间. 三道桅杆拉索的布设层次分明, 可较精确的调控结构上部的竖向变形. 具体布置形式见图 8.

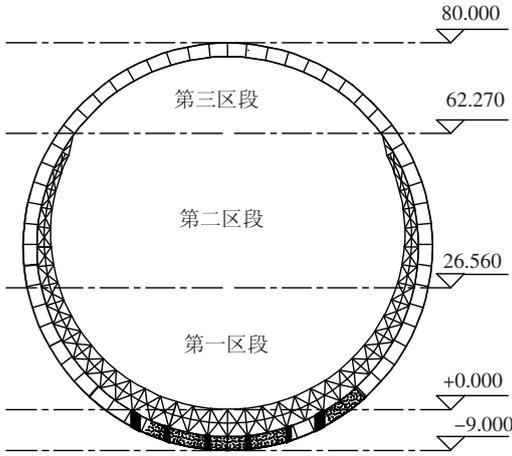


图 6 景观塔平面结构

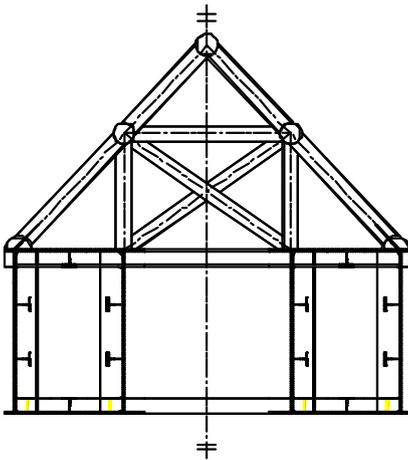


图 7 钢箱混凝土管桁架结构剖面

结合结构特点分析后, 确定景观塔主体结构的方法为结构下部(地坪标高 0 m 以下)13 节段支撑在桁架的钢箱梁直接总拼焊接安装. 两侧的相邻悬臂结构(地坪标高 0 m 以上)逐节段对称高空吊装焊接拼接. 在安装过程中, 按照先施工外侧钢箱梁, 后安装内侧对应位置的钢管桁架进行施工, 第一区段各箱梁中的混凝土在现场自下而上分两次浇筑完成.

为保证结构最终能顺利合拢, 成型后具有良好的形态, 施工控制以形控为主. 通过设置辅助拉索及桅杆对结构进行安装过程的变形调控. 两侧悬臂段合拢前通过千斤顶控制合拢段两侧结构的相对位置.

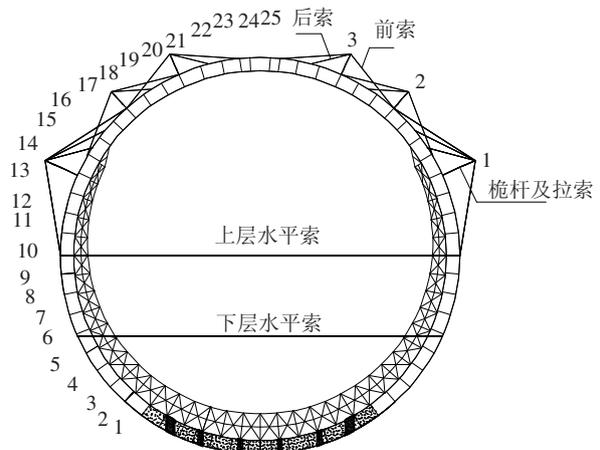


图 8 各节段施工控制示意

悬臂安装过程的施工控制主要程序为: 吊装上部第五节段后安装并张拉下层水平索. 浇筑第一区段部分箱梁中的混凝土. 作为结构的下层水平拉索, 对成型后的水平向位移起较大的调控作用, 张拉力范围控制在 5 000 ~ 10 000 kN. 第九节段吊装完成安装并张拉上层水平索. 张拉力范围控制在 2 000 ~ 5 000 kN. 吊装第十二节段后再次浇筑上部结构混凝土. 第十四节段吊装后安装桅杆一及前索. 三道后索待相连接的各段箱梁安装就位后分别安装锚固. 考虑桅杆一作为上部结构最大的桅杆拉索体系, 对上部结构竖向位移起控制作用, 张拉力控制在 3 000 ~ 7 000 kN. 吊装十七节段, 安装桅杆二及前索, 后索逐段安装锚固. 前

索张拉力控制在 1 000 ~ 3 000 kN. 吊装二十节段安装桅杆三及前索,后索逐段安装锚固. 前索张拉力介于 500 ~ 1 000 kN.

各拉索张拉力计算增量为 100 kN,通过计算程序进行迭代. 作为索力迭代计算中的关键控制条件,参考相关规范并结合工程经验,将成型卸载后结构形态与设计态之间水平和竖向的坐标差控制在结构各位置的  $l/600(h/600)$  范围内,

表 1 各拉索数目、张拉力及钢绞线数量一览

拉索名称	拉索根数	拉索中钢绞线根数	张拉力/kN	张拉阶段
下层水平拉索	4	19	1 900	上部 5
上部水平拉索	2	12	2 000	上部 9
桅杆一前索	4	7	1 400	上部 15
桅杆二前索	2	7	1 200	上部 19
桅杆三前索	2	3	300	上部 22

### 3.3 结构变形与内力分析

按照确定的施工及控制方法对结构成型过程进行时变模拟分析. 分析的重点为成型后结构的变形以及施工和成型后的结构内力.

#### 3.3.1 变形

地坪零点以下结构在桁架上完成总拼,其变形与应力均很小,不予考虑. 地坪零点以上各节段在水平及竖向各位置的计算变形与控制变形值如图 9、10 所示. 成型卸载后,上部第一至二十五各节段水平向的最大变形为 91.8 mm,竖向向最大变形为 97.1 mm,各节段变形值均满足施工控制要求,整体形态良好.

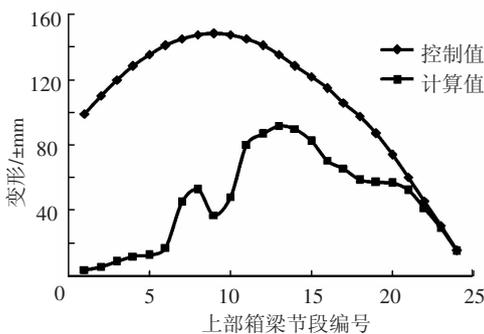


图 9 成型后水平向控制变形与计算变形

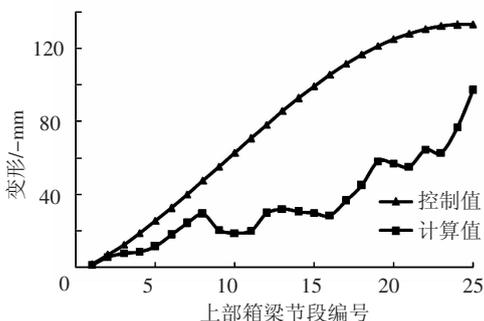


图 10 成型后竖向控制变形与计算变形

$l/600(h/600)$  即为各位置的控制变形.  $l$  和  $h$  分别为结构计算位置的水平跨度和竖向高度.

通过计算求得上、下两层水平拉索及桅杆一、二、三前索的张拉力. 调控拉索选用  $\Phi 15.24$ ,  $f_{pk}^s = 1\ 860$  的低松弛预应力钢绞线. 在混凝土结构设计规范中单根预应力钢绞线张拉限值在 105 ~ 195 kN,通过以上张拉力确定各拉索数目及钢绞线根数,见表 1.

结果表明上下层水平拉索有效地控制了结构的水平向位移,上部桅杆及拉索有效地控制了结构的竖向位移. 两者共同作用,达到了调控结构整体形态的作用.

#### 3.3.2 内力

建造过程的施工控制也引起结构在建造中及成型后的内力变化. 其中,以钢结构的应力变化最为明显. 图 11 为结构成型卸载后地坪上部各节段钢结构计算应力值. 结果表明,结构成型后最大应力为 165 MPa,各节段应力均满足承载力要求. 应力比较小,建造过程采用的施工控制方法不会影响使用阶段的结构性能.

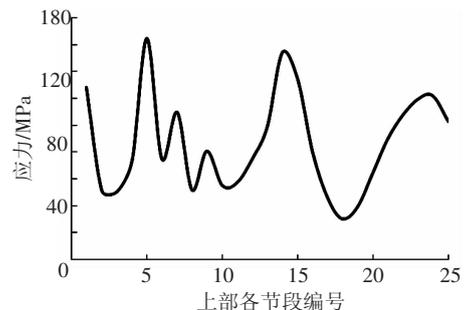


图 11 结构成型后各节段应力

图 12 反映了计算所得建造过程上部各节段钢结构最大应力变化趋势. 由图可知,施工中钢结构的最大应力约为 200 MPa,满足承载力要求. 安装过程中箱梁混凝土采用两次浇筑施工,引起施工过程中最大应力的两次突变. 由于首次浇筑下部基础节段的钢箱梁,且结构刚完成了底层水平索的张拉,浇筑过程对结构内力影响较小. 在施工控制下结构局部内力略有增加. 成型后,临时设施卸载,结构内力有所降低.

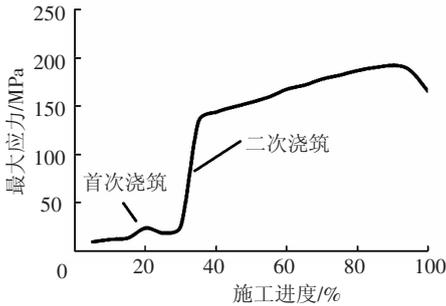


图 12 施工中各阶段最大应力变化

## 4 结 论

1) 对于特殊的落地式指环型摩天轮结构, 目前尚缺乏合适的建造方法. 本文基于施工控制理论, 对该结构的建造及施工控制方法展开研究. 确定采用两侧对称竖立悬臂安装法, 并以形控为主, 以力控为辅的原则, 通过辅助桅杆和拉索, 施加临时预应力对结构进行施工控制.

2) 设计调控程序, 应用有限元理论, 通过对 ANSYS 程序二次开发迭代计算, 确定合理的张拉力.

3) 按照确定的施工及控制方法对结构成型过程进行时变模拟分析, 结果表明结构成型后的变形, 施工中及成型后的钢结构应力均满足控制要求. 证明了该施工及控制方法合理且可行.

## 参考文献:

[1] 河野隆史. HEP FIVE 大観覧車の構造設計[J]. JSSC 特集:大観覧卓④晴代, 1999, 34(3):2-8.

[2] 細澤治, 水谷太朗, 森本武彦など. パレットタウンの大観覧車の設計と周辺施設計画[J]. JSSC 特集:大観覧卓④晴代, 1999, 34(3):9-13.

[3] 宗钟凌, 郭正兴. 摩天轮结构体系施工技术问题的探讨[J]. 建筑技术, 2008, 39(12):932-935.

[4] BERENBAK J, LANSER A, MANN A P. The british airways London eye. part 2: structure[J]. The Structural Engineer, 2001, 79(2):19-28.

[5] 郭彦林, 兰涛, 赵思远, 等. 巨型落地圆环钢结构安装方案研究与分析[J]. 施工技术, 2010, 39(8):17-23.

[6] 严时汾, 夏凉风. 世界最高摩天轮——北京朝天轮钢结构安装方案设计优化[J]. 建筑施工, 2008, 30(5):333-336.

[7] KOUO H, KATO S, NNKAZAWA S. A study of decision method of initial tension force in structure with cables[C]//Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2000:1021-1022.

[8] 袁行飞, 董石麟. 索穹顶结构施工控制反分析[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(2):75-79.

[9] 张冶成, 叶贵如, 陈衡冶, 等. 大跨度桥梁施工控制结构分析计算方法[J]. 浙江大学学报:工学版, 2004, 38(2):210-214.

[10] 周臻, 孟少平, 吴京. 预应力空间网格结构的预应力施工控制理论研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(12):46-51.

[11] KRISHNAMURTHY K, CHAO M C. Active vibration control during deployment of space structures[J]. Journal of Sound and Vibration, 1992, 152(2):205-218.

[12] LI Q L. Formulation of time-dependent structural serviceability[J]. Computers&Structures, 1994, 52(2):219-226.

[13] MAIID K I. Forces and deflexions in changing structures[J]. The Structural Engineer, 1972, 51(3):108-115.

[14] ARULYUNYAN N K. Mathematical model of a dynamically accreted deformable body[J]. Mechanics of Solids, 1990, 25(6):80-89.

[15] BATHE K J. Finite element procedures [M]. Englewood Cliffs: New Jersey, Prentice-Hall Inc, 1996:695-740.

[16] 朱世峰, 周志祥. 混凝土组合拱桥竖转施工体系研究[J]. 建筑施工, 2009 38(7):64-68.

(编辑 赵丽莹)