

# 123米直径双层球面网壳小拼单元 悬挑安装法与施工内力分析

卓新 董石麟

TU758.15 TU 745.1

**【摘要】** 本文介绍了我国目前跨度最大的球面网壳工程——漳州后石电厂123米直径双层球面网壳的施工技术。该工程采用小拼单元悬挑施工方案，用简易的施工机具安装巨型球面网壳工程，该施工方法技术可行，安装方便、经济合理。本文还对施工方法进行了施工内力变化的全过程跟踪分析，指出了在确定网壳施工方案时应注意的一些问题。

**【关键词】** 双层球面网壳 小拼单元悬挑法 施工内力分析

## 一、工程概况

后石电厂位于福建省漳州市，该工程项目由华阳电业有限公司（台资）投资。项目中五个123米直径的圆形煤场网壳工程由徐州飞虹集团负责生产和安装。该工程总高度68.437米，其中柱顶标高17.70米，网壳为双层球面网格结构，矢高45.25米，网壳投影面积11310平方米，展开面积22000平方米，网格高度3米左右。网壳为点支承，均匀搁置在36个斜柱顶上。该网壳用钢量约每平方米23公斤，其中网壳结构部分重473.495吨，檩条重约164吨；网壳采用螺栓球节点型式；杆件以 $\Phi 76 \times 3.5$ 、 $\Phi 89 \times 3.8$ 、 $\Phi 114 \times 4.0$ 、 $\Phi 140 \times 4.0$ 为主，个别区域采用 $\Phi 159 \times 6.0$ 、 $\Phi 219 \times 8.0$ ；高强螺栓以M24、M30为主，个别区域用M39。

## 二、施工过程

该工程跨度、高度、覆盖面积大，网壳结构若采用传统的全支架安装法，那么一个网壳仅钢管脚手架材料费就需600万人民币左右，脚手架安装和拆卸人工费约需200万人民币。显然这种方法安装费用太高，而且仅脚手架的装、拆时间将需两个多月，施工工期长。经过反复研究论证，最后决定采用地面预先小拼单元，然后用汽车式起重机和自行设计的独脚把杆及卷扬机进行吊装

的施工方案。

### 1、施工准备

在网壳安装前，36根钢筋混凝土独立斜柱和煤场的剪力墙均施工完成且混凝土已达设计强度。安装前先进行三通一平，复核柱中心轴线、预埋件平面位置和标高。杆件和球节点按照施工顺序分批进场，在指定地点堆放。施工机具：1吨的卷扬机6台，地面组装用手拉葫芦6个，电焊机10台，电缆线300米，水准仪和经纬仪各2台，钢缆绳及其他小型工具。

### 2、施工顺序

该网壳结构安装确定的施工方案是小拼单元悬挑安装法，即自下而上递进，由外向内合拢的安装顺序，属于内扩法施工。安装顺序如下：

(1) 网格结构第一圈安装采用首先在地面进行分块预拼装，每块构件包括三根柱子之间的第一圈下弦和第一、二圈上弦所包括的所有构件。然后用汽车式起重机进行吊装就位，就位后用缆风绳临时固定。这样依此类推把18块构件安装合拢，形成稳定的闭合开口壳后，拆除缆风绳。

(2) 由于起重高度增加，从第二圈下弦开始的安装方法采用小拼单元的吊装方法。每个单元包括一个球和四根杆件，其中单元1为一个下弦球节点带经纬两根下弦杆和两根腹杆，由汽车式起重机负责吊装，工人在第一圈网格结构上配

卓新 浙江大学土木系施工技术研究室主任、副教授  
董石麟 中国工程院院士、浙江大学建工学院院长

## 建筑结构

合就位和固定。单元2为一个上弦球带经纬两根上弦杆和两根腹杆，由于汽车式起重机臂长的原因影响单元2的吊装对位，所以单元2由自行设计的独脚把杆及卷扬机进行吊装。

(3) 第三~第八圈的安装方法与第二圈相同。

(4) 第九~第二十圈，由于安装高度超过了汽车式起重机的允许工作高度，所以单元1和单元2的吊装均采用独脚把杆及卷扬机进行吊装。

(5) 网壳的顶盖部分为一圆形平板网架，安装方法采用高空散装法。先在已安装好的开口壳上拉上钢缆绳，铺设脚手板形成工作面，然后把顶盖部分的所有构件用卷扬机吊运至工作面，由工人在高空进行拼装。

(6) 网壳结构安装完毕形成了一个闭合完整的球面网壳，为采用高空散装法进行檩条焊接和屋面板安装提供了工作面，檩条和屋面板散件运输到位后，工人在高空进行焊接、安装。

### 3、施工特点

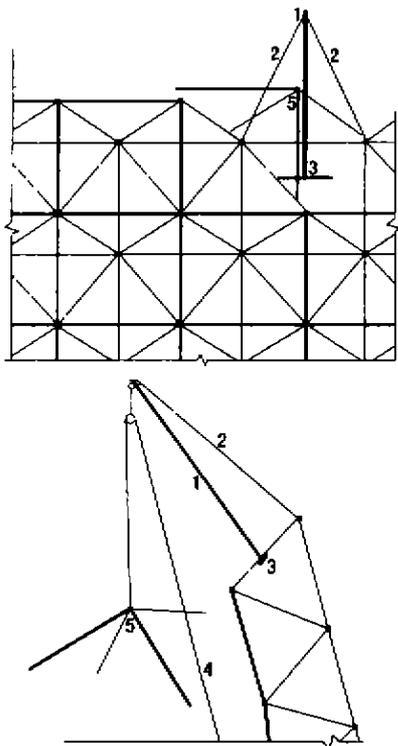
本工程把独脚把杆巧妙地运用在网格结构施工上，该独脚把杆包括4.5米长钢管把杆、支撑把杆的型钢横梁和固定把杆的钢缆绳。见图1。

### 三、施工内力分析

#### 1、施工内力分析说明

阶段施工内力由正在安装的构件自重荷载引起，并会对前面已安装好的结构构件的施工内力产生影响。施工内力的分析计算应考虑正在安装的这一圈结构的空作用，这一圈的构件内也存在阶段施工内力。如果不考虑非线性因素影响，构件施工内力的变化过程是一个阶段施工内力的叠加过程。

2、以下通过一个类似于后石电厂123米直径的圆形煤场网壳工程为例，来进一步深入说明施工内力的特性。本球面网壳直径123米，矢高45.25米，为双层球面网格结构，网壳投影面积11310平方米，网壳36个支座，下弦节点支承。见图2、图3。



1、把杆；2、钢缆绳；3、型钢横梁；4、与地面卷扬机相连的钢缆绳；5、被吊装的单元2

图1 独脚把杆立面、剖面示意图

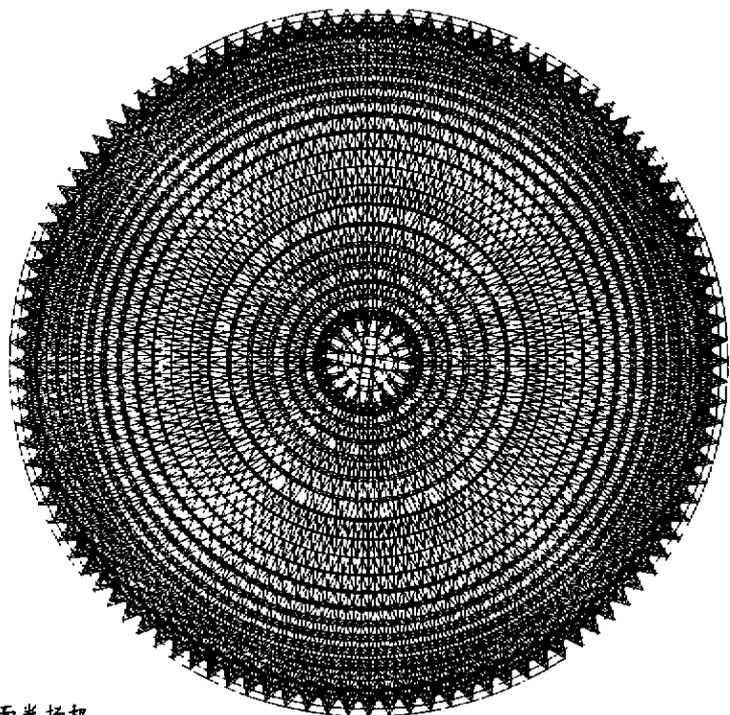


图2 123米直径双层球面网壳结构平面图

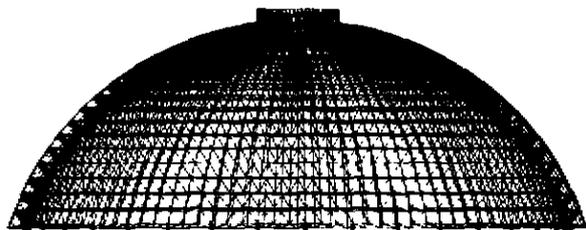


图3 123米直径双层球面网壳结构立面图

为了便于对比分析,计算荷载时仅考虑结构自重。安装上弦单元2的计算荷载分配如图4所示。作用在节点上的荷载值分别为:

$$P_1 = q_{1,1}^G + q_{1,2}^G/2 + q_{1,3}^G/2 + q_{1,4}^G/2 + q_{1,5}^G/2 + q_{1,6}^G/2$$

$$P_2 = q_{1,2}^G/2 + q_{2,2}^G/2$$

$$P_3 = q_{1,3}^G/2$$

$$P_4 = q_{1,4}^G/2 + q_{4,4}^G/2$$

其中  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ ——作用在球节点1、2、3、4上的等效集中荷载

$q_{i,j}^G$ 、 $q_{i,j}^G$ ——球、杆的自重

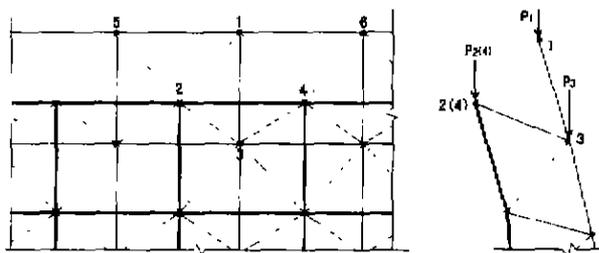


图4 计算荷分配图

安装下弦单元1的计算荷载分配情况与单元2相似。

### 3、施工内力计算

网壳山开口壳与顶盖组成,其中开口壳共有20圈,即上弦经向杆20根、下弦经向杆19根,上弦纬向杆情况:1~14圈108根,15~17圈72根,18~19圈48根,第20圈32根。顶盖部分为一圆形网架,共5圈,纬向杆分别为32根、32根、16根、8根、4根。把网壳按

照如本文第2节所叙述的用小拼单元悬挑法的施工顺序,分别计算各阶段各个杆件的阶段施工内力。

表1为支座上第一圈~第二十圈19根下弦经向杆的阶段施工内力、施工内力变化情况及使用阶段的设计内力值;表2为支座上第圈~第二十圈20根下弦纬向杆的阶段施工内力、施工内力变化情况及使用阶段的设计内力值。图5、图6为杆件施工内力终值与使用阶段的设计内力值比较图。施工内力等于前面各过程阶段施工内力的叠加值,图7为下弦第一圈经向杆xjg1安装过程的施工内力变化曲线,其他杆件施工内力的计算依此类推。构件的实际内力等于施工内力终值。

杆件在安装完毕时的实际内力等于施工内力终值。从以上内力可以看出,施工内力终值与按使用状态进行的设计计算值不相同。这是因为按使用状态进行的设计是以整体结构形成,各构件全部参与工作为前提。而施工内力的计算考虑了实际的施工方法及其结构形成过程,其计算结果更接近工程的实际情况。

### 四、结束语

1、用小拼单元悬挑法进行双层球面网壳的安装技术可行、经济合理。为保证施工安全,应事先进行结构施工内力的设计验算。

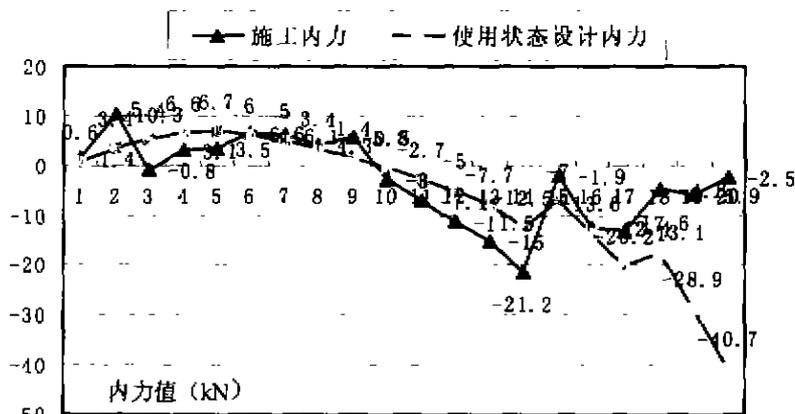


图5 支座上20根纬向杆施工内力与使用状态设计内力比较图

2、施工内力的计算模型随施工实际过程而变化。双层球面网壳结构部分用小拼悬挑安装法施工内力的变化是随阶段施工内力的不断叠加而变化,不同杆件的变化规律不同。对于同样一根构件,该结构若用两种不同的安装方法进行施工,则此构件的两个施工内力值是不同的。

3、结构自重部分产生的实际内力应等于其施工内力的终值,施工内力的终值不一定是施工内力在其变化过程中的最大值。按施工状态的杆件实际内力计算值与按使用状态进行的设计计算值不同,有些差别很大。施工内力的计算考虑了实际的施工方法及其结构形成过程,其计算结果更接近工程的实际情况。

4、结构安装完毕,檩条与屋面板自重及其他荷载产生的施工内力的计算模型和计算方法,与按使用状态进行设计的计算模型和计算方法完全相同,即按所有构件参与共同工作来进行分析,计算一次完成,不需要用叠加阶段施工内力的方法进行分析。网壳工程的杆件最终内力等于由结构自重产生的杆件施工内力终值加上檩条和屋面板自重及其他荷载的施工内力终值。

5、对在安装到某个阶段其施工内力超出内力设计允许值的杆件,应采取适当的加固措施,以确保结构在施工和使用期间的安全。

6、小拼单元悬挑安装法的使用应验算吊装内力,即验算吊具和附加在结构上的内力,以确

保施工安全。吊装内力是过程性、临时性的,吊装完毕,吊装内力即行消失。这是吊装内力与施工内力的本质区别所在。

7、对自重占计算荷载较大比重的网壳,应进行细致的施工内力分析。

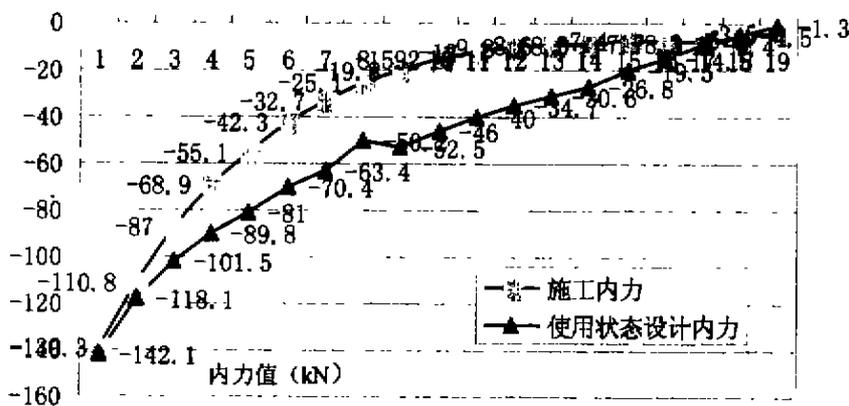


图6 支座上19根径向杆施工内力与使用状态设计内力比较图

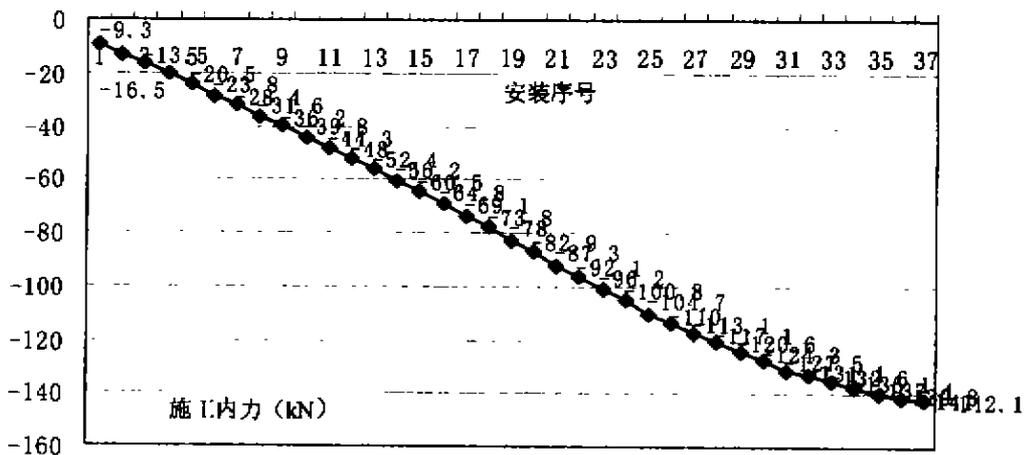


图7 第一圈下弦径向杆x121施工内力变化曲线

建筑结构
------

表1 支座下弦径向杆阶段施工内力、施工内力、使用状态设计内力值(kN)

序号	安装 圈数	xjg1	xjg2	xjg3	xjg4	xjg5	xjg6	xjg7	xjg8	xjg9	xjg10	xjg11	xjg12	xjg13	xjg14	xjg15	xjg16	xjg17	xjg18	xjg19
1	1:2 F1	-9.3																		
2	F2	-4.2	-1.7																	
3	1:3	-2.8	-1.5																	
4	F3	-4.2	-3.1	-1.3																
5	1:4	-3.3	-2.4	-1.3																
6	F4	-4.6	-3.9	-2.9	-1.3															
7	1:5	-3.2	-2.7	-1.9	-1.1															
8	F5	-4.6	-4.2	-3.6	-2.7	-1.3														
9	1:6	-3.6	-3.2	-2.6	-2.0	-1.1														
10	F6	-4.5	-4.3	-3.8	-3.2	-2.4	-1.0													
11	1:7	-3.7	-3.4	-3.0	-2.6	-2.0	-1.1													
12	F7	-4.4	-4.3	-4.0	-3.7	-3.2	-2.3	-1.0												
13	1:8	-3.8	-3.6	-3.3	-3.0	-2.6	-1.9	-1.1												
14	F8	-4.3	-4.3	-4.1	-3.9	-3.6	-3.0	-2.2	-1.0											
15	1:9	-4.3	-4.1	-3.9	-3.6	-3.3	-2.8	-2.1	-1.1											
16	F9	-4.3	-4.2	-4.1	-4.0	-3.8	-3.4	-2.9	-2.1	-1.0										
17	1:10	-4.7	-4.5	-4.2	-4.1	-3.9	-3.5	-2.9	-2.2	-1.2										
18	F10	-4.2	-4.1	-4.0	-3.9	-3.9	-3.6	-3.3	-2.9	-2.2	-1.1									
19	1:11	-4.9	-4.7	-4.4	-4.3	-4.2	-3.9	-3.6	-3.1	-2.4	-1.3									
20	F11	-4.4	-4.3	-4.1	-4.1	-4.1	-3.9	-3.8	-3.5	-3.2	-2.4	-1.2								
21	1:12	-4.8	-4.5	-4.3	-4.2	-4.1	-3.9	-3.8	-3.5	-3.2	-2.4	-1.3								
22	F12	-4.1	-3.9	-3.7	-3.6	-3.7	-3.6	-3.6	-3.5	-3.4	-2.9	-2.2	-1.1							
23	1:13	-4.6	-4.3	-4.1	-3.9	-3.9	-3.8	-3.7	-3.6	-3.5	-3.1	-2.4	-1.3							
24	F13	-3.9	-3.7	-3.4	-3.4	-3.4	-3.3	-3.4	-3.4	-3.5	-3.3	-2.9	-2.2	-1.1						
25	1:14	-5.3	-4.9	-4.5	-4.4	-4.4	-4.3	-4.3	-4.3	-4.4	-4.1	-3.7	-2.9	-1.6						
26	F14	-3.1	-2.9	-2.6	-2.5	-2.5	-2.5	-2.6	-2.6	-2.8	-2.8	-2.6	-2.4	-2.0	-1.1					
27	1:15	-4.0	-3.6	-3.3	-3.1	-3.0	-2.9	-3.0	-3.0	-3.2	-3.1	-3.0	-2.8	-2.4	-1.6					
28	F15	-3.5	-3.1	-2.8	-2.6	-2.6	-2.5	-2.6	-2.7	-3.0	-3.1	-3.2	-3.2	-3.2	-2.8	-1.5				
29	1:16	-3.7	-3.3	-2.9	-2.7	-2.6	-2.5	-2.6	-2.7	-2.9	-3.0	3.1	-3.1	-3.1	-2.7	-1.4				
30	F16	-3.2	-2.8	-2.5	-2.3	-2.3	-2.2	-2.3	-2.4	-2.7	-2.8	-3.0	-3.2	-3.4	-3.4	-2.6	-1.4			
31	1:17	-3.6	-3.2	-2.8	-2.5	-2.4	-2.3	-2.3	-2.4	-2.7	-2.8	-3.0	-3.2	-3.3	-3.3	-2.6	-1.5			
32	F17	-1.5	-1.3	-1.2	-1.0	-1.0	-0.9	-1.0	-1.0	-1.1	-1.2	-1.3	-1.4	-1.6	-1.8	-1.6	-1.5	-0.9		
33	1:18	-2.5	-2.2	-1.9	-1.7	-1.6	-1.5	-1.5	-1.5	-1.7	-1.8	-1.9	-2.1	-2.3	-2.5	-2.3	-2.1	-1.4		
34	F18	-2.3	-2.0	-1.7	-1.5	-1.4	-1.3	-1.3	-1.4	-1.6	-1.7	-1.9	-2.1	-2.4	-2.7	-2.7	-2.8	-2.4	-1.3	
35	1:19	-2.4	-2.0	-1.7	-1.5	-1.4	-1.3	-1.3	-1.3	-1.5	-1.6	-1.7	-1.9	-2.2	-2.5	-2.4	-2.5	-2.1	-1.1	
36	F19	-1.2	-1.0	-0.8	-0.7	-0.7	-0.6	-0.6	-0.6	-0.7	-0.8	-0.9	-1.0	-1.1	-1.3	-1.3	-1.5	-1.4	-1.1	-0.6
37	1:20	-1.1	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.7	-0.7	-0.8	-0.9	-1.1	-1.1	-1.2	-1.2	-1.0	-0.7
合计	施工 内力	-142.1	-118.1	-101.5	-89.8	-81.0	-70.4	-63.4	-50.2	-52.5	-46.0	-40.0	-34.7	-30.6	-26.8	-19.5	-14.5	-9.4	-4.5	-1.3
	使用状态 设计内力	-139.3	-110.8	-87.0	-68.9	-55.1	-42.3	-32.7	-25.1	-19.8	-15.2	-12.0	-9.8	-8.6	-8.5	-7.4	-7.7	-8.3	-6.0	-3.5

表2 支座下弦纬向杆阶段施工内力、施工内力、使用状态设计内力值 (kN)

序号	安装 圈数	xwg 1	xwg 2	xwg 3	xwg 4	xwg 5	xwg 6	xwg 7	xwg 8	xwg 9	xwg 10	xwg 11	xwg 12	xwgl 3	xwgl 4	xwg 15	xwg 16	xwg 17	xwgl 8	xwgl 9	xwj 20	
1	E12 F1	-0.7	5.7																			
2	F2	0.0	-1.9	-3.8																		
3	F3	0.0	-0.5	-1.0																		
4	F3	0.1	1.0	-2.2	-3.4																	
5	F4	0.0	-0.5	-1.0	-1.5																	
6	F4	0.1	-0.6	-1.4	-2.3	-3.3																
7	F5	0.0	-0.3	-0.7	-1.1	-3.3																
8	F5	0.1	-0.4	-0.9	-1.5	-2.3	-3.1															
9	F6	0.1	-0.2	-0.5	-0.8	-1.3	-1.8															
10	F6	0.1	-0.2	-0.5	-0.9	-1.4	-2.2	-3.0														
11	F7	0.1	-0.1	-0.3	-0.5	-0.9	-1.3	-1.9														
12	F7	0.1	0.0	-0.1	-0.4	-0.8	-1.4	-2.1	-3.0													
13	F8	0.1	0.0	-0.1	-0.2	-0.5	-0.9	-1.4	-2.0													
14	F8	0.1	0.1	0.1	0.0	-0.3	-0.7	-1.4	-2.2	-3.2												
15	F9	0.1	0.1	0.1	0.1	-0.1	-0.5	-1.0	-1.7	-2.5												
16	F9	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1	-0.2	-0.7	-1.4	-2.4	-3.5											
17	F10	0.1	0.2	0.3	-0.4	0.3	0.0	-0.5	-1.1	-2.0	-3.0											
18	F10	0.1	0.3	0.5	0.5	0.5	0.3	-0.1	-0.7	-1.5	-2.6	-3.9										
19	F11	0.1	0.3	0.5	0.7	0.6	0.5	0.1	-0.5	-1.2	-2.3	-3.5										
20	F11	0.1	0.4	0.6	0.8	0.9	0.8	0.5	0.0	-0.7	-1.7	-3.0	-4.6									
21	F12	0.1	0.4	0.7	0.9	0.9	0.9	0.6	0.2	-0.4	-1.3	-2.5	-3.9									
22	F12	0.1	0.4	0.7	0.9	1.0	1.0	0.9	0.5	0.0	-0.7	-1.8	-3.1	-4.8								
23	F13	0.1	0.4	0.7	1.0	1.1	1.2	1.1	0.8	0.3	-0.4	-1.4	-2.7	-4.3								
24	F13	0.1	0.4	0.7	1.0	1.1	1.2	1.2	1.0	0.7	0.1	-0.7	-1.9	-3.3	-5.2							
25	F14	0.1	0.5	0.9	1.3	1.5	1.7	1.7	1.5	1.1	0.5	-0.4	-1.7	-3.3	-5.5							
26	F14	0.0	0.3	0.6	0.8	1.0	1.1	1.1	1.0	0.9	0.5	0.0	-0.7	-1.7	-3.0	-4.1						
27	F15	0.1	0.4	0.7	1.0	1.2	1.3	1.4	1.4	1.2	0.9	0.5	-0.3	-1.2	-2.5	-3.5						
28	F15	0.0	0.3	0.6	0.9	1.1	1.2	1.3	1.4	1.3	1.1	0.7	0.1	-0.7	-2.2	-1.9	-5.0					
29	F16	0.0	0.3	0.6	0.9	1.1	1.3	1.4	1.4	1.4	1.3	1.0	0.5	-0.2	-1.8	-1.1	-4.0					
30	F16	0.0	0.3	0.6	0.8	1.0	1.2	1.3	1.4	1.4	1.4	1.2	0.8	0.1	-1.3	0.0	-2.7	-5.5				
31	F17	0.0	0.3	0.6	0.9	1.1	1.3	1.4	1.5	1.6	1.6	1.4	1.1	0.6	-0.7	0.8	-1.7	-3.9				
32	F17	0.0	0.1	0.3	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.4	-0.3	0.7	-0.5	-1.3	-2.7			
33	F18	0.0	2.0	0.4	0.6	0.7	0.8	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	0.7	-0.1	1.4	-0.1	-1.2	-2.5			
34	F18	0.0	0.2	0.4	0.5	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.1	1.1	1.0	0.8	0.9	1.8	0.2	-1.0	-0.8	-3.8		
35	F19	0.0	0.2	0.4	0.5	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.1	1.2	1.1	0.9	0.2	1.9	0.5	-0.4	0.0	-2.1		
36	F19	0.0	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.5	0.1	1.1	0.4	-0.2	0.5	-0.3	-1.9	
37	F20	0.0	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.5	0.2	1.0	0.5	0.1	0.7	0.3	-0.6	
合计	施工 内力	1.4	10.3	-0.8	3.1	3.5	6.6	6.1	4.3	5.8	-3.0	-7.1	-11.5	-15.0	-21.2	-1.9	-12.4	-13.4	-4.8	-5.9	-2.5	
	使用状态 设计内力	0.6	3.4	5.4	6.6	3.7	6.0	5.0	3.4	1.4	-0.5	-2.7	-5.0	-7.7	-12.5	-7.0	-13.6	-20.2	-17.6	-28.9	-40.7	