

# 多阶段预应力空间网架结构一次张拉计算法

董石麟 袁行飞

(浙江大学空间结构研究中心 杭州 310027)

**摘要:**该文提出多阶段预应力空间网架结构一次张拉计算法,将某一阶段第 $i$ 次对 $i$ 预应力杆增加的预应力值作为未知数,通过结构力学方法建立该阶段预应力准则方程式并求解之。然后可计算该阶段 $i$ 次预应力各预应力杆的控制值(包括各预应力杆原有的内力值),后张预应力对先张预应力的影响值,以及网架结构杆件内力和节点变位,直至该阶段最后一次预应力时得到该阶段各预应力杆的设计内力值及网架结构内力和变位。重复这样的分析计算可得到多阶段预应力网架结构预应力杆的最终内力控制值及网架杆件内力和节点变位。采用该方法,预应力杆的内力值在预应力张拉过程中无需调整,可一次性完成预应力施加操作过程。该文中附有算例说明,计算结果表明:提出的多阶段预应力空间网架结构一次张拉计算法是正确、可靠和有效的。

**关键词:**预应力 网架结构 一次张拉计算法 多阶段张拉 准则方程式

预应力网架结构是把现代预应力技术应用到网架结构中形成的一种具有代表性的、实用性的新型大跨度空间钢结构体系。这类结构体系受力合理、刚度大、重量轻、制作安装也比较方便、具有明显的技术经济效果。20世纪90年代以来,预应力网架结构得到了较大发展,并广泛应用在大跨度、大柱网的公共建筑和工业建筑中,被认为是一种有广阔应用和发展前景的现代大跨度空间结构体系<sup>[1]</sup>。

预应力技术的广泛应用引起了各国学者的关注,有关预应力结构的研究也被广泛开展。如Kirsch、Levy<sup>[2-3]</sup>等对预应力桁架的预应力进行了优化设计;Sener等<sup>[4]</sup>对预应力自适应结构的几何控制进行了研究;Kwan和Pellegrino<sup>[5]</sup>从预应力引入装置位置、装置类型以及不合理预应力状态调整等三方面入手对一预应力桁架结构进行了研究;Kawaguchi等<sup>[6]</sup>基于线性力法提出了一种简化分析法用于控制预应力桁架结构的形状和应力。由于预应力水平对结构性能影响较大,而结构的预应力形成又与施工张拉紧密相关,因此有关预应力结构的施工张拉过程分析是一值得研究的课题。考虑到不同的张拉方案对结构性能的影响,Kitaori、Kouno等<sup>[7-8]</sup>研究了引入预应力的合理次序问题,并针对结构中各索初内力均为0的情况提出施工初始张力计算方法。卓新等<sup>[9]</sup>针对逐根

张拉施工过程提出了一种用于计算索钢组合结构中拉索施工控制张力的方法。董石麟等<sup>[10]</sup>采用初内力法对预应力结构施工张拉全过程进行了分析。这些研究为解决预应力网架结构的施工张拉全过程问题提供了有益经验。

从预应力网架结构的实际施工张拉过程来看,预应力网架结构通常是分阶段加荷和施加预应力的,如五阶段预应力网架结构的施工张拉过程可用加荷-预应力-加荷-预应力-加荷来表示。其中第1阶段、第3阶段、第5阶段是加荷,第2阶段、第4阶段是施加预应力,这样可利用钢材反复受荷的能力,不致在预应力施加全过程中使网架内力达到最大,从而节省材料和成本。选择合理的预应力施加方案并对其各阶段进行计算分析是预应力网架结构急需解决的问题。

本文提出多阶段预应力空间网架结构一次张拉计算法,将某一阶段第 $i$ 次对 $i$ 预应力杆增加的预应力值作为未知数,通过结构力学方法建立该阶段预应力准则方程式并求解之。然后计算该阶段 $i$ 次预应力各预应力杆的控制值(包括各预应力杆原有的内力值),后张预应力对先张预应力的影响值,以及网架结构杆件内力和节点变位,直至该阶段最后一次预应力时得到该阶段各预应力杆的最终设计内力值及网架结构内力和变位。重复这样的分析计算可得到多阶段预应力网架结构预应力杆的内力控制值及网架杆件内力和节点变位。采用本文方法,预应力杆的内力值在

本文荣获第四届欧维姆优秀预应力论文奖二等奖(原载《工程力学》2009.No.2)

预应力张拉过程中无需调整，可一次性完成预应力施加操作过程。文中附有算例说明，计算结果表明本文提出的多阶段预应力网架结构一次张拉计算方法是正确、可靠、方便和有效的。

### 1 多阶段预应力网架准则方程式建立和求解

设第*i* 预应力杆施加单位预应力 $X_i=1$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ) 时，可组成下列平衡方程式和物理方程式：

$$K_i U = P_i \quad (1)$$

$$N = kD = kAU \quad (2)$$

式中： $U$ 为网架节点变位向量； $K_i$ 为该次预应力状态根据边界条件修正后的网架总刚度矩阵； $P_i$ 为单位初内力组成的节点力向量； $k$ 为杆单元刚度矩阵； $D$ 为杆件伸长量向量； $A$ 为几何矩阵。求解式(1)、式(2)可得单位预应力 $X_i=1$ 作用下网架杆件（包括各预应力杆）内力 $n_i$ 和各节点变位 $U_i$ 。

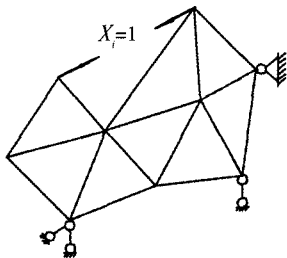


图1 单位预应力示意图

$$\left. \begin{aligned} X_1 + n_{12}X_2 + n_{13}X_3 + \dots + n_{1i}X_i + \dots + n_{1m}X_m + N_{10} &= N_1 \\ n_{21}X_1 + X_2 + n_{23}X_3 + \dots + n_{2i}X_i + \dots + n_{2m}X_m + N_{20} &= N_2 \\ n_{31}X_1 + n_{32}X_2 + X_3 + \dots + n_{3i}X_i + \dots + n_{3m}X_m + N_{30} &= N_3 \\ &\dots\dots\dots \\ n_{i1}X_1 + n_{i2}X_2 + n_{i3}X_3 + \dots + X_i + \dots + n_{im}X_m + N_{i0} &= N_i \\ &\dots\dots\dots \\ n_{m1}X_1 + n_{m2}X_2 + n_{m3}X_3 + \dots + n_{mi}X_i + \dots + X_m + N_{m0} &= N_m \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式(6)即为预应力准则方程式，可简化为：

$$n_i X = N - N_0 \quad (7)$$

式中： $n_i$ 为*m* × *m*阶内力系数矩阵； $X$ 为*m*阶未知预应力向量； $N_0$ 为*m*阶原有杆内力向量。

由式(7)可解得：

$$X = n_i^{-1} (N - N_0) \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} n_1 &= \{ 1 \quad n_{21} \quad n_{31} \quad \dots \quad n_{i1} \quad \dots \quad n_{j1} \}^T \\ n_2 &= \{ n_{12} \quad 1 \quad n_{32} \quad \dots \quad n_{i2} \quad \dots \quad n_{j2} \}^T \\ n_3 &= \{ n_{13} \quad n_{23} \quad 1 \quad \dots \quad n_{i3} \quad \dots \quad n_{j3} \}^T \\ &\dots\dots\dots \\ n_i &= \{ n_{1i} \quad n_{2i} \quad n_{3i} \quad \dots \quad 1 \quad \dots \quad n_{ji} \}^T \\ &\dots\dots\dots \\ n_m &= \{ n_{1m} \quad n_{2m} \quad n_{3m} \quad \dots \quad n_{im} \quad \dots \quad n_{jm} \}^T \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= \{ U_{11} \quad U_{21} \quad U_{31} \quad \dots \quad U_{n1} \}^T \\ U_2 &= \{ U_{12} \quad U_{22} \quad U_{32} \quad \dots \quad U_{n2} \}^T \\ U_3 &= \{ U_{13} \quad U_{23} \quad U_{33} \quad \dots \quad U_{n3} \}^T \\ &\dots\dots\dots \\ U_i &= \{ U_{1i} \quad U_{2i} \quad U_{3i} \quad \dots \quad U_{ni} \}^T \\ &\dots\dots\dots \\ U_m &= \{ U_{1m} \quad U_{2m} \quad U_{3m} \quad \dots \quad U_{nm} \}^T \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

因各次预应力状态的  $K_i$  是不同的（不包括*i*杆，而其他预应力杆和非预应力杆都包括在内），因此：

$$\left. \begin{aligned} n_{si} &\neq n_{is} (i=1, 2, \dots, m), (s=1, 2, \dots, m) \\ n_{si} &= 1 (s=i) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

当*i*杆由原来内力值 $N_{i0}$ 最终达到该阶段设计预应力值 $N_i$ 时，则必须满足以下条件：

### 2 多阶段预应力网架全过程内力变位计算

求得某阶段预应力网架各次预应力值 $X_i$ 后，则该阶段网架施工张拉全过程中第*i*次预应力时网架杆件内力可由下式求得：

预应力杆：

$$N_{si} = \sum_{l=1,2}^i n_{sl} X_l + N_{s0} \quad s=1, 2, \dots, m; i=1, 2, \dots, m \quad (9)$$

非预应力杆:

$$N_{ji} = \sum_{1,2}^i n_{ji} X_i + N_{j0} \quad (10)$$

$j = m+1, m+2, \dots; i = 1, 2, \dots, m$

式(9)、式(10)的 $N_{si}$ 、 $N_{ji}$ 中第一个脚标应理解为杆号,第二个脚标为预应力次序号,亦即预应力杆号; $N_{s0}$ 、 $N_{j0}$ 为该阶段预应力前预应力杆及非预应力杆已有的内力值。

该阶段网架施工张拉全过程中第*i*次预应力时节点变位可由下式求得:

$$U_{ni} = \sum_{1,2}^i u_{ni} X_i + U_{n0} \quad (11)$$

$n = 1, 2, \dots; i = 1, 2, \dots, m$

式(11)中 $U_{n0}$ 为该阶段预应力前网架节点的变位。

如此重复按式(9)~式(11)计算可得下一阶段预应力网架全过程的内力和变位。最后可完成各阶段预应力网架全过程内力变位计算。

### 3 算例

设图2所示网格数为5×5的正放四角锥网架,网格边长4m,网架高1.4m,下弦节点①、节点②、节点③、节点④降低20cm,以便于敷设四根预应力杆及施加预应力,周边上弦竖向支承(施加预应力时均为两向可动支座,不使预应力传至支座,但为了整个网架结构不致成为几何可变体系而无法求解,每个角支座均设有 $k_x = k_y \approx 0$ 的水平弹簧,这对分析计算结构无影响,预应力施加完后,可采用相关措施,使网架结构与下部支承结构连成整体,成为四角弹性支承,以便承受结构的水平荷载)。所有杆件均采用钢管 $\phi 140 \times 4$ ,弹性模量 $E = 210 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ 。网架作用竖向均布荷载 $q_0 = 1.0 \text{ kN/m}^2$ ,即上弦角节点荷载 $p_0 = 4 \text{ kN}$ ,周边上弦节点荷载 $p_0 = 8 \text{ kN}$ ,其余内部上弦节点荷载 $p_0 = 16 \text{ kN}$ 。兹采用30%荷载-30%预应力-30%荷载-70%预应力-40%荷载五阶段设计施工张拉时对1杆、2杆、3杆、4杆逐次施加预应力,且达到设计预应力值为 $N_i = 50 \text{ kN}$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ )。试对图2中所示各杆内力和节点变位作五阶段设计预应力全过程分析计算。

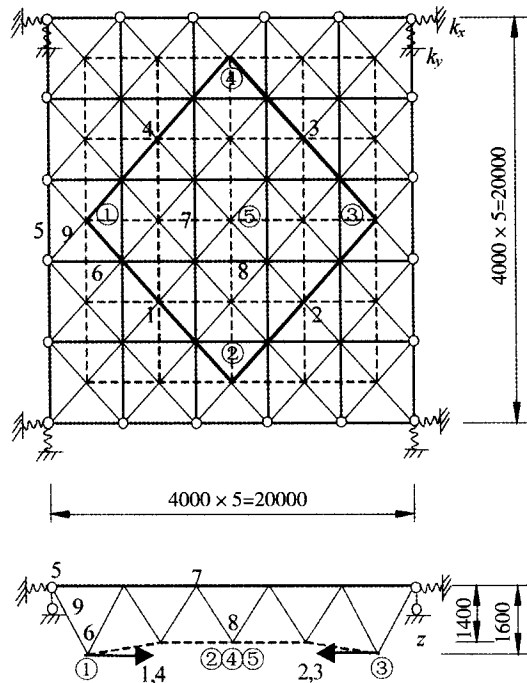


图2 四点支承正放四角锥网架

根据题意,可先计算 $n_{si}$ 、 $n_{ji}$ (见表1),并由预应力准则方程(6)求得各阶段预应力值如下:第一次施加30%预应力时,因结构的对称性有 $X_1 = X_2 = X_3 = X_4 = 1.55 \text{ kN}$ 。第二次施加70%预应力时, $X_1 = X_2 = X_3 = X_4 = 3.61 \text{ kN}$ 。本例题的五阶段预应力网架的设计计算和施工操作可剖分为11个步骤进行。网架杆件内力和节点挠度在预应力加载全过程的计算结果详见表1、表2。表1、表2中一次荷载表示网架第一次作用30%荷载时结构各杆内力和节点位移,表1、表2中一次预应力表示网架在一次荷载基础上对各预应力杆逐次施加30%预应力时的各杆内力和节点挠度,此时1杆应施加到控制内力15.19kN,2杆应施加到控制内力15.12kN,3杆应施加到控制内力15.07kN,4杆施加到控制内力15.00kN。表1中方括号内数值为控制内力。同理,表1中二次荷载表示在施加30%预应力基础上再对结构作用30%荷载时结构各杆内力和节点变位。表1中二次预应力表示在二次荷载基础上对各预应力杆施加70%预应力时的杆件内力和节点位移。此时各预应力杆的控制内力分别为32.25kN、32.09kN、31.97kN、

31.81kN。表1中三次荷载表示网架再作用40%荷载时杆件的最终内力和节点位移，此时各预应力杆内力自动增加到设计值50.0kN。以上分析计算可知表1、表2中第*t*步设计计算和施工操作的内力和变位全过程计算结果为：

第*t*步计算结果等于：

$$(1)+(2)+\dots+(t-1)+(t)=\sum_1^t(t) \quad (12)$$

表1、表2中最后一行数值为未施加预应力的

网架在相同荷载作用下的杆件内力和节点变位，通过比较可得出施加预应力后网架跨中杆件（7号、8号杆件）内力高峰降低及跨中节点（5号节点）挠度减小的变化规律。

由此可见，采用本文方法，不仅可把预应力网架结构的计算大为简化，而且可以正确无误的按各个预应力杆的控制内力一次性完成全部预应力的施加操作工作。

表1 网架预应力加载全过程内力计算结果

杆件 <i>s</i> ( <i>j</i> )	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
<i>i</i> =1 <i>n</i> <sub>s1</sub> ( <i>n</i> <sub>j1</sub> )	1.0	-0.045	-0.033	-0.045	-0.180	-0.294	0.054	-0.205	0.063		
<i>i</i> =2 <i>n</i> <sub>s2</sub> ( <i>n</i> <sub>j2</sub> )	-0.045	1.0	-0.045	-0.033	0.066	0.001	0.033	-0.205	-0.021		
<i>i</i> =3 <i>n</i> <sub>s3</sub> ( <i>n</i> <sub>j3</sub> )	-0.033	-0.045	1.0	-0.045	0.066	0.001	0.033	-0.089	-0.029		
<i>i</i> =4 <i>n</i> <sub>s4</sub> ( <i>n</i> <sub>j4</sub> )	-0.045	-0.033	-0.045	1.0	-0.180	0.133	0.054	-0.089	0.207		
(1) 30%荷载 <i>N</i> <sub>s0</sub> ( <i>N</i> <sub>j0</sub> )/kN	13.64	13.64	13.64	13.64	-4.34	4.94	-20.51	14.95	9.26		
30%预应力/kN	(2) <i>n</i> <sub>s1</sub> <i>X</i> <sub>1</sub> ( <i>n</i> <sub>j1</sub> <i>X</i> <sub>1</sub> )	1.55	-0.07	-0.05	-0.07	-0.28	-0.46	0.08	-0.32	0.10	
	(3) <i>n</i> <sub>s2</sub> <i>X</i> <sub>2</sub> ( <i>n</i> <sub>j2</sub> <i>X</i> <sub>2</sub> )	-0.07	1.55	-0.07	-0.05	0.10	0.002	0.05	-0.32	-0.03	
	(4) <i>n</i> <sub>s3</sub> <i>X</i> <sub>3</sub> ( <i>n</i> <sub>j3</sub> <i>X</i> <sub>3</sub> )	-0.05	-0.07	1.55	-0.07	0.10	0.002	0.05	-0.14	-0.05	
	(5) <i>n</i> <sub>s4</sub> <i>X</i> <sub>4</sub> ( <i>n</i> <sub>j4</sub> <i>X</i> <sub>4</sub> )	-0.07	-0.05	-0.07	1.55	-0.28	0.21	0.08	-0.14	0.32	
一次荷载/kN	第1步	13.64	13.64	13.64	13.64	-4.34	4.94	-20.51	14.95	9.26	
	第2步	[15.19]	13.57	13.59	13.57	-4.62	4.48	-20.43	14.63	9.36	
	第3步	15.12	[15.12]	13.52	13.52	-4.52	4.48	-20.38	14.41	9.33	
	第4步	15.07	15.05	[15.07]	13.45	-4.42	4.48	-20.33	14.27	9.28	
	第5步	15.00	15.00	15.00	[15.00]	-4.70	4.69	-20.25	14.03	9.60	
(6) 30%荷载 <i>N</i> <sub>s0</sub> ( <i>N</i> <sub>j0</sub> )/kN	13.64	13.64	13.64	13.64	-4.34	4.94	-20.51	14.95	9.26		
二次荷载/kN	第6步	28.64	28.64	28.64	28.64	-9.04	9.63	-40.76	28.98	18.86	
	70%预应力/kN	(7) <i>n</i> <sub>s1</sub> <i>X</i> <sub>1</sub> ( <i>n</i> <sub>j1</sub> <i>X</i> <sub>1</sub> )	3.61	-0.16	-0.12	-0.16	-0.65	-1.06	0.19	-0.74	0.23
		(8) <i>n</i> <sub>s2</sub> <i>X</i> <sub>2</sub> ( <i>n</i> <sub>j2</sub> <i>X</i> <sub>2</sub> )	-0.16	3.61	-0.16	-0.12	0.24	0.004	0.12	-0.74	-0.07
		(9) <i>n</i> <sub>s3</sub> <i>X</i> <sub>3</sub> ( <i>n</i> <sub>j3</sub> <i>X</i> <sub>3</sub> )	-0.12	-0.16	3.61	-0.16	0.24	0.004	0.12	-0.32	-0.11
		(10) <i>n</i> <sub>s4</sub> <i>X</i> <sub>4</sub> ( <i>n</i> <sub>j4</sub> <i>X</i> <sub>4</sub> )	-0.16	-0.12	-0.16	3.61	-0.65	0.48	0.19	-0.32	0.75
二次预应力/kN	第7步	[32.25]	28.48	28.52	28.48	-9.69	8.57	-40.57	28.24	19.09	
	第8步	32.09	[32.09]	28.36	28.36	-9.45	8.57	-40.45	27.50	19.02	
	第9步	31.97	31.93	[31.97]	28.20	-9.21	8.58	-40.33	27.18	18.91	
	第10步	31.81	31.81	31.81	[31.81]	-9.86	9.06	-40.14	26.86	19.66	
(11) 40%荷载 <i>N</i> <sub>s0</sub> ( <i>N</i> <sub>j0</sub> )/kN	18.19	18.19	18.19	18.19	-5.78	6.57	-27.32	19.94	12.35		
三次荷载/kN	第11步	50.00	50.00	50.00	50.00	-15.64	15.63	-67.46	46.80	32.01	
	非预应力网架/kN					-2.65	24.71	-77.34	80.26	19.45	

注：一次荷载：第1步=(1)

一次预应力：第2步=(1)+(2)；第3步=(1)+(2)+(3)；第4步=(1)+(2)+(3)+(4)；第5步=(1)+(2)+(3)+(4)+(5)

二次荷载：第6步=(1)+(2)+(3)+(4)+(5)+(6)

二次预应力：第7步=(1)+(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)；第8步=(0)+(1)+(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)+(8)；

第9步=(1)+(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)+(8)+(9)；第10步=(0)+(1)+(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)+(8)+(9)+(10)

三次荷载：第11步=(1)+(2)+(3)+(4)+(5)+(6)+(7)+(8)+(9)+(10)+(11)

∴ 第*t*步计算结果=(1)+(2)+...+(*t*-1)+(*t*)= $\sum_1^t(t)$

表2 网架预应力加载全过程挠度计算结果

节点 <i>n</i>	1	2	3	4	5
<i>i</i> =1 $w_{n1}$	-0.005	-0.005	-0.004	-0.004	-0.015
<i>i</i> =2 $w_{n2}$	-0.004	-0.005	-0.005	-0.004	-0.015
<i>i</i> =3 $w_{n3}$	-0.004	-0.004	-0.005	-0.005	-0.015
<i>i</i> =4 $w_{n4}$	-0.005	-0.004	-0.004	-0.005	-0.015
(1) 30%荷载 $w_{n0}/\text{mm}$	1.116	1.116	1.116	1.116	3.571
30%预应力/mm					
(2) $w_{n1}X_1$	-0.007	-0.007	-0.006	-0.006	-0.023
(3) $w_{n2}X_2$	-0.006	-0.007	-0.007	-0.006	-0.023
(4) $w_{n3}X_3$	-0.006	-0.006	-0.007	-0.007	-0.023
(5) $w_{n4}X_4$	-0.007	-0.006	-0.006	-0.007	-0.023
一次荷载/mm 第1步	1.116	1.116	1.116	1.116	3.571
一次预应力/mm					
第2步	1.109	1.109	1.110	1.110	3.548
第3步	1.103	1.102	1.093	1.094	3.525
第4步	1.097	1.096	1.086	1.086	3.502
第5步	1.090	1.090	1.090	1.090	3.479
(6) 30%荷载 $w_{n0}/\text{mm}$	1.116	1.116	1.116	1.116	3.571
二次荷载/mm 第6步	2.206	2.206	2.206	2.206	7.050
70%预应力/mm					
(7) $w_{n1}X_1$	-0.017	-0.017	-0.014	-0.014	-0.053
(8) $w_{n2}X_2$	-0.014	-0.017	-0.017	-0.014	-0.053
(9) $w_{n3}X_3$	-0.014	-0.014	-0.017	-0.017	-0.053
(10) $w_{n4}X_4$	-0.017	-0.014	-0.014	-0.017	-0.053
二次预应力/mm					
第7步	2.189	2.189	2.192	2.192	6.997
第8步	2.175	2.172	2.175	2.178	6.944
第9步	2.161	2.158	2.158	2.161	6.891
第10步	2.144	2.144	2.144	2.144	6.838
(11) 40%荷载 $w_{n0}/\text{mm}$	1.487	1.487	1.487	1.487	4.760
三次荷载/mm 第11步	3.631	3.631	3.631	3.631	11.598
非预应力网架/mm	4.609	4.609	4.609	4.609	14.950

#### 4 结论

通过本文的研究分析,可得到如下结论:

(1) 文提出的多阶段预应力空间网架结构一次张拉算法,将某一阶段第*i*次对*i*预应力杆增加的预应力值作为未知数,通过结构力学方法建立该阶段预应力准则方程式并求解,应注意在一般情况下准则方程式的系数矩阵呈非对称性。然后可计算该阶段*i*次预应力各预应力杆的控制值(包括各预应力杆原有的内力值),后张预应力对先张预应力的影响值,以及网架结构杆件内力和节点变位,直至该阶段最后一次预应力时得到该阶段各预应力杆的设计内力值及网架结构内力和变位。

(2) 用本文方法可进行预应力网架结构多阶段施工张拉全过程分析,可计算确定各阶段预应力施加过程中各预应力杆的控制值,可以正确无误的一次性完成预应力施加工作,并可方便的计算和显示预应力全过程网架杆件内力和节点变位的变化规律。

(3) 本文对一网架结构根据荷载-预应力-荷载-预应力-荷载五阶段施工方案进行了计算,得出了各阶段预应力张拉控制内力。根据该控制内力进行施工张拉,在给定的设计荷载下可自动得到设计的预应力值。该五阶段设计的预应力网架算例可剖分为11步进行预应力计算和施工操作。这表明本文提出的一次张力算法是可靠、

正确、方便和有效的。

(4) 本文方法可推广应用到预应力网壳结构, 以及可简化为线性分析的预应力索桁、索拱等多种预应力结构体系。

#### 参考文献

- [1] 董石麟. 我国预应力大跨度空间钢结构的应用与发展. 空间结构, 2001, 7(4): 3□14.  
Dong Shilin. The application and prospect of prestressed long-span steel space structures [J]. Spatial structures, 2001, 7(3): 3-4. (in Chinese)
- [2] Kirsch U. Two-level optimization of prestressed structures [J]. Engineering Structures, 1997, 19(4): 309-317.
- [3] Levy R. Optimal design of prestressed trusses [J]. Computers and Structures, 1992, 43(4): 741-744.
- [4] Sener M, Utku S, Wada Ben K. Geometry control in prestressed adaptive space trusses [J]. Smart Materials and Structures, 1994, 3(2): 219□225.
- [5] Kwan A S K, Pellegrino S. Prestressing a space structure [J]. AIAA Journal, 1993, 31(10): 1961□1963.
- [6] Kawaguchi, Ken-Ichi, Hangai, Yasuhiko, Pellegrino, Sergio, Furuya, Hiroshi. Shape and stress control analysis of prestressed truss structures [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1996, 15(12): 1226□1236.
- [7] Kitaori T, Ohsaki M, Fujiwara J, Mizutani T, Hosozawa O. Prestress optimization of a cable-supported frame: determination of prestress order [R]. Summaries of technical papers of annual meeting of Architectural Institute of Japan, 2000: 1017□1020.
- [8] Kouno H, Kato S, Nakazawa S. A study of decision method of initial tension force in structure with cables [R]. Summaries of technical papers of annual meeting architectural institute of Japan, 2000: 1021□1022.
- [9] 卓新, 袁行飞. 预应力索分批张拉过程中张力的仿真分析 [J]. 土木工程学报, 2004, 37(9): 27-30.  
Zhuo Xin, Yuan Xingfei. Emulational analysis of the tensile forces of prestressed cables during multistage tensioning construction [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(9): 27-30. (in chinese)
- [10] Dong S L, Yuan X F. Prestension process analysis of prestressed space grid structures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(3): 406-411.

(上接第7页)

表4 各种传感器读数比较

智能系杆编号	未锚固油表值 (kN)	锚固后光纤光栅监测值 (kN)	设计值 (kN)	张拉误差 (%)
1	2908.79	2686.81	2893.54	7.69
2	3058.35	2844.27	2978.79	4.73
3	2922.39	2648.87	2893.54	9.24
4	3003.97	2663.02	2978.79	11.86

## 8 结论

本文利用玻璃纤维材料封装光纤光栅传感器, 研制出了光纤光栅智能筋复合传感器, 对光纤光栅智能筋复合传感器和智能吊杆的传感特性进行了详细的研究, 并在实际工程中得到了具体实施。其主要结论如下:

(1) 裸光纤光栅传感器采用玻璃纤维封装之后, 它的应变传感特性不变, 其应变灵敏系数为  $0.00121 \text{ nm}/\mu\epsilon$ ; 它的温度传感系数为  $17.24 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ , 约为裸光纤光栅的 ( $10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ) 1.7倍。

(2) 对不同直径的GFRP-OFBG智能筋的极限应变进行了比较, 得出随着直径的增大, 智能

筋的极限应变也增大。直径为7mm的GFRP-FBG传感器的极限应变达到了  $8000 \mu\epsilon$ , 为裸光栅的1.8倍, 建议选用  $\phi 7 \text{ mm}$  的智能筋来监测吊杆应力变化。

(3) 提出了将GFRP-OFBG传感器布设到拱桥吊杆当中, 并形成了自监测智能吊杆。对它们各自的布设方法进行了详细和传感特性进行了详细的研究, 其实验结果表明, 这两种智能吊杆都能很好地表征吊杆张拉全过程和张拉力的大小。

(4) 提出了GFRP-OFBG智能筋传感器在系杆中的布设工艺, 发现智能筋能够很好地跟踪整个张拉过程, 其测试值与实际情况非常吻合。