

# 复合式索穹顶施工误差影响及控制技术研究<sup>\*</sup>

陈志华<sup>1</sup>, 马青<sup>1</sup>, 闫翔宇<sup>2†</sup>, 楼舒阳<sup>1</sup>, 陈荣华<sup>3</sup>, 司波<sup>4</sup>

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 天津大学 建筑设计规划研究总院, 天津 300072;

3. 广东坚朗五金制品股份有限公司, 广东 东莞 523722; 4. 北京市建筑工程研究院有限责任公司, 北京 100039)

**摘要:**以国内首个百米级复合式索穹顶结构为研究对象,分为环梁及拉索的尺寸误差控制、结构安装成型先后顺序、预应力施加方法及张拉批次、施工过程控制与模拟4个方面研究了该工程的施工技术,重点分析了环梁和拉索不同大小的误差量对索穹顶内力的影响程度,并提出相应处理措施.研究结果表明:通过将外脊索和外斜索做成可调索的方式可以消除外环梁施工误差的影响;通过调整拉索现场摆放位置可以减小下料随机误差对索穹顶内力的改变.采用分部提升整体张拉法,避免了构件产生较大位移;分级分批的预应力张拉方式,可以保证施工成型后索力值与设计值的一致性.

**关键词:**复合式索穹顶;施工技术;误差控制;分部提升;整体张拉

**中图分类号:**TU393.3

**文献标志码:**A

## Research on Influence of Construction Error and Controlling Techniques of Compound Cable Dome

CHEN Zhihua<sup>1</sup>, MA Qing<sup>1</sup>, YAN Xiangyu<sup>2†</sup>, LOU Shuyang<sup>1</sup>, CHEN Ronghua<sup>3</sup>, SI Bo<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Research Institute of Architectural Design & Urban Planning, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. Guangdong Kinlong Hardware Products Co Ltd, Dongguan 523722, China;

4. Beijing Building Construction Research Institute Co Ltd, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Taking a cable dome with new compound form whose span longer than 100 m in China as a study subject, the construction technology of this project was analyzed in 4 aspects: controlling of dimensional error of ring beam and cable; sequence of structure installation; sequence and method of tensioning; and controlling and simulation of construction process. This paper focused on analyzing the influence degree of different error level of ring beam and cables on the internal force of cable dome, and put forward the corresponding treatment measures. The research shows that adjustable cables used for outmost ridge cables and outmost diagonal cables can eliminate the construction error of ring beam, while cable random error can be reduced through optimizing field placement. Step-by-step hoisting and synchronous tensioning method can avoid large displacement of members, and prestress level is proposed to ensure the coincidence of the actual cable force and the design value.

<sup>\*</sup> 收稿日期:2017-06-18

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51478310), National Natural Science Foundation of China(51478310);住房和城乡建设部科学技术项目(2016-k5-062), Housing Urban and Rural Construction Science and Technology Project(2016-k5-062)

**作者简介:**陈志华(1966-),男,河北井陘人,天津大学教授,博士

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: mail: xy\_yan2005@163.com

**Key words:** compound form cable dome; construction technique; error control; step-by-step hoisting; synchronous tensioning

目前全世界已有多个国家建造了具有索穹顶结构的大型场馆,跨度最大的是  $240\text{ m} \times 193\text{ m}$  的佐治亚穹顶<sup>[1]</sup>. 我国大陆地区在天津理工大学体育馆索穹顶建成之前,一直没有跨度大于  $100\text{ m}$  的索穹顶,主要原因之一是对索穹顶的关键施工技术缺少研究和经验. 由于技术保密原因,国外文献中仅对索穹顶的张拉顺序做了简单介绍<sup>[2-4]</sup>;国内学者从施工成形理论<sup>[5-8]</sup>、数值模拟方法<sup>[9-13]</sup>及模型试验<sup>[14-15]</sup>等方面进行了研究,但对实际施工过程中的关键技术研究较少. 建造索穹顶结构施工技术复杂,体现在以下4个方面:环梁及拉索的尺寸误差控制、结构安装成型先后顺序、预应力施加方法及批次和施工过程控制与模拟.

环梁及拉索的尺寸误差控制. 不同形式的索穹顶具有特定的几何与拓扑关系,在忽略对构件整体内力影响较小的自重时,各自的设计预应力水平下各构件与内力是唯一对应的,与采用的拉索规格、构件截面尺寸的选用无关,也与拉索的张拉顺序无关<sup>[16]</sup>. 但是当结构中构件的尺寸加工精度存在误差时,则会改变拓扑关系造成内力重分布. 目前撑杆和中心拉力环作为刚性构件,加工长度可以在加工车间做到精确下料、精确测量并及时纠正,所以外环梁和拉索尺寸的控制最为关键. 因此需要将外环梁和拉索精度控制在满足工程要求的范围内,同时在关键部位增加必要的调节装置,抵消过大的误差<sup>[17-18]</sup>.

结构安装成型先后顺序. 目前国内外实际运用的两种施工方法为分部提升整体张拉法和整体成型分布张拉法<sup>[19]</sup>. 分部提升整体张拉法仅通过工装索连接外脊索和外斜索与环梁,施工中由工装索牵引在地面拼装好的整体结构就位,会产生较大位移,且需要较多数量张拉设备,这种方法是否适合于本工程值得讨论.

预应力施加方法及批次. 索穹顶结构规模大,张拉过程中由机构变成结构,在施工阶段可能出现比使用阶段更为不利的受力状态<sup>[20]</sup>,合理的张拉部位及批次能使各构件在施工过程中不致发生过大的位移和超过材料屈服应力.

施工过程控制与模拟. 索穹顶结构相比于传统的预应力钢结构,存在明显的几何非线性,施工中构

件将产生大位移,因此需要建立结构整体模型进行施工仿真模拟计算;验证张拉施工方案的可行性,确保张拉成形过程的安全可靠;给出每张拉步张拉力的大小,为实际张拉时的张拉力值的确定提供理论依据;给出每张拉步结构的变形及应力分布,指导张拉过程中的变形监测及索力监测;根据有限元模拟的张拉力大小,选择合适的张拉机具,并设计合理的张拉工装.

## 1 工程概况

天津理工大学体育馆位于天津市西青区,体育馆屋盖为索穹顶形式,平面呈椭圆形,长轴  $102\text{ m}$ ,短轴  $82\text{ m}$ ,柱顶不等高,环梁呈马鞍形,是我国第1个百米级索穹顶工程. 该索穹顶为复合式,共设3道环索以及内外环梁,最外环脊索和斜索按 Levy 式布置,内部脊索和斜索按 Geiger 式布置. 结构外圈混凝土环梁与下部结构之间采取刚接. 其中拉索采用高钒索,内圈受拉环采用箱型钢梁,撑杆材质为 Q345B. 结构示意图及构件名称如图 1 所示,图中标出了具有代表性的轴线编号. 构件规格及数量见表 1.

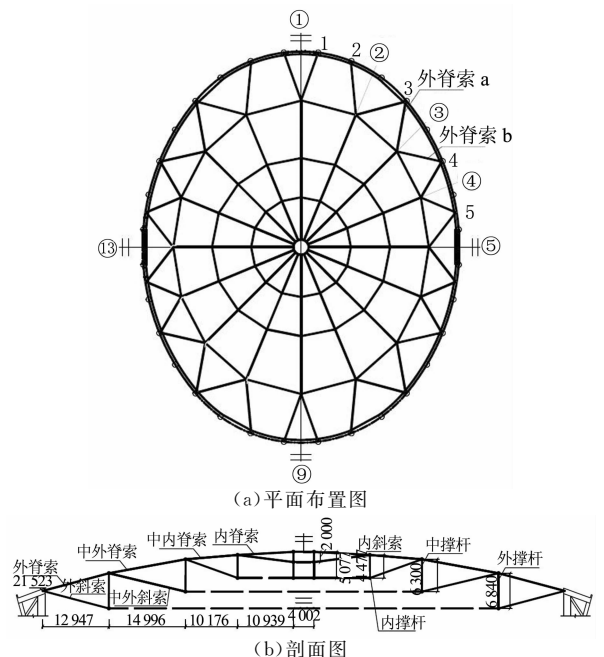


图 1 索穹顶结构图

Fig. 1 Structure of the cable dome

表 1 构件列表  
Tab. 1 Component list

构件	规格	数量/根	类型
内脊索	Φ60、Φ116	16	
中内脊索	Φ60、Φ116、Φ133	16	
中外脊索	Φ71、Φ133	16	
外脊索	Φ71、Φ116、Φ133	32	
内斜索	Φ60	16	
中内斜索	Φ60、Φ71	16	高钒索,
中外斜索	Φ60、Φ71	16	抗拉强度
外斜索	Φ71、Φ80	32	1 670 MPa
内环索	Φ60	2	
中环索	Φ99×2	4	
外环索	Φ99×2	8	
<hr/>			
内撑杆	P159×5	16	
中撑杆	P245×10	16	Q345B
外撑杆	P299×10	16	

## 2 环梁及拉索的尺寸误差控制

环梁尺寸误差是指混凝土环梁浇筑成型后,预埋在环梁中的拉索耳边上安装拉索销轴的孔洞的三维坐标与设计位置的尺寸偏差.拉索尺寸误差主要是拉索下料时产生的服从正态分布的随机误差<sup>[21]</sup>.

采用 ANSYS 有限元软件对该索穹顶进行建模,拉索均采用 LINK10 单元,撑杆采用 LINK8 单元,中心拉力环采用 BEAM188 单元,边界条件为三向铰接.拉索的弹性模量取出厂报告中的  $1.6 \times 10^5$  MPa,线膨胀系数  $1.2 \times 10^{-5}$ .结构初始预应力通过对索单元设置初应变实现.环梁耳板施工三维坐标差值通过对边界设置节点强制位移来模拟,拉索的下料长度随机误差通过单元升温或降温模拟,温度可通过误差值和线膨胀系数的比值求得.

### 2.1 环梁施工误差对索穹顶内力影响与调节方法

尤德清等<sup>[22]</sup>研究表明:混凝土环梁上预埋件耳板存在的与外圈拉索长度方向一致的径向误差对索穹顶初始预应力分布的影响最大,预埋件耳板垂直于拉索长度方向的环向和竖向误差对索穹顶初始预应力分布的影响较小,可以忽略.下面作者将重点分析从长轴到短轴不同位置的单个拉索耳板径向施工偏差对索穹顶整体预应力分布的影响,以及当整个环梁大小存在误差时的影响,并提出相应调节装置的布置方式,最终解决环梁施工误差所带来的不利影响.

#### 2.1.1 单个耳板施工误差的影响

由于结构关于长轴、短轴存在对称关系,因此取结构 1/4 的 5 个边节点(图 1 右上方)进行分析.以结构张拉成形后的初始态为准建立模型,每次仅考虑单个边节点存在施工偏差,分别对每个边节点与边拉索相对应的径向设置 -50 mm、-40 mm、-30 mm、-20 mm、-10 mm、10 mm、20 mm、30 mm、40 mm、50 mm 的偏差值.下面仅列举对内力变化规律具有代表性的①、③轴对应节点,其相应内力变化如图 2~图 4 所示.分析图 2~图 4 可以看出,耳板施工误差对外斜索内力值影响最大,但中外、中内、内斜索误差均小于 5%,几乎不受影响.耳板误差对脊索的影响从外到内依次增大,内脊索偏差最为明显.对于③轴而言,当边节点 3 的耳板偏差为外斜索 a 的径向误差时,引起外斜索 b 的内力变化最大;边节点 4 偏差方向为外斜索 b 时,外斜索 a 影响最大,且内力变化正好相反,相邻轴线上各拉索内力均有不同程度影响,且影响随间隔距离增加依次递减.其余节点处的内力变化规律均同以上规律.

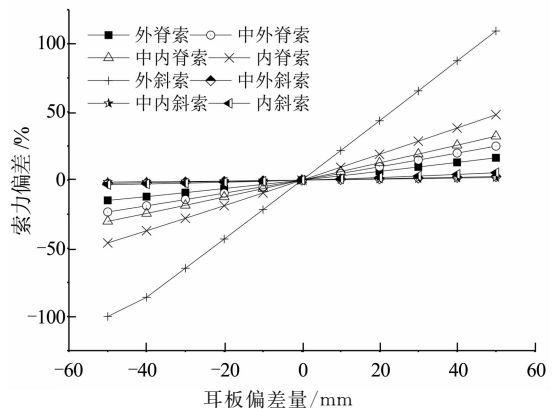


图 2 1 号节点施工误差对索力影响  
Fig. 2 Influence of construction error of node 1 on internal force

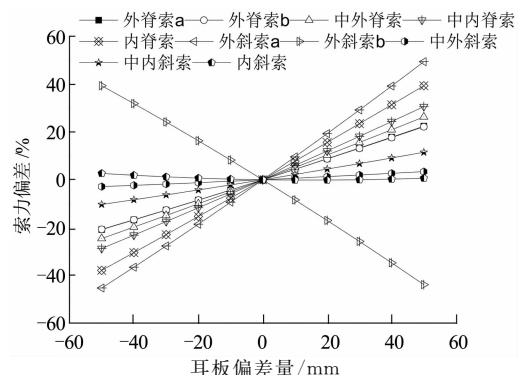


图 3 3 号节点施工误差对索力影响  
Fig. 3 Influence of construction error of node 3 on internal force

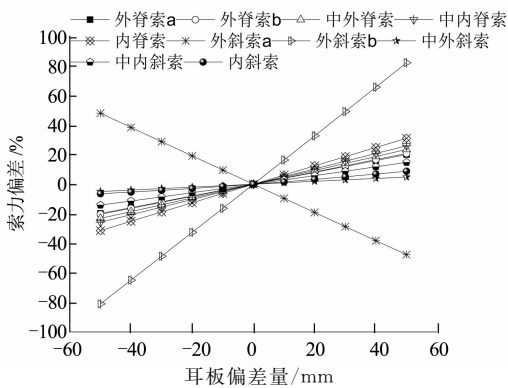


图4 4号节点施工误差对索力影响

Fig. 4 Influence of construction error of node 4 on internal force

### 2.1.2 环梁尺寸施工误差对整体结构的内力影响分析

进一步研究环梁施工偏差对索穹顶整体内力的影响,假设混凝土环梁在放样过程中存在跨度的 $-5/10\ 000$ 、 $-4/10\ 000$ 、 $-3/10\ 000$ 、 $-2/10\ 000$ 、 $-1/10\ 000$ 、 $1/10\ 000$ 、 $2/10\ 000$ 、 $3/10\ 000$ 、 $4/10\ 000$ 、 $5/10\ 000$ 的偏差,即整体偏大或偏小时,索穹顶索力变化如图5所示。可以看出,当耳板三维坐标整体存在偏差时,对索力影响显著。对本工程而言,当环梁存在 $1/10\ 000$ 的整体偏差时,即存在长轴 $10.1\ \text{mm}$ ,短轴 $8.2\ \text{mm}$ 的误差时,内脊索内力改变达到 $20\%$ ,其余拉索也均存在 $5\%$ 左右的变化量。若将成型后拉索内力偏差控制在 $\pm 10\%$ 以内,则需将环梁大小误差控制在 $0.5/10\ 000$ 以内,这对于工程现场来说难度较大,因此需要相应的拉索调节装置来抵消环梁误差。

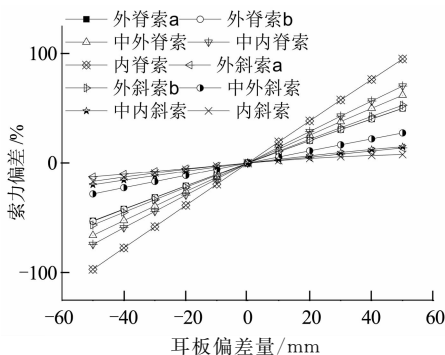


图5 环梁施工误差对索力影响

Fig. 5 Influence of construction error of ring beam on internal force

### 2.1.3 环梁误差补偿措施

由于索穹顶施工成型后内力对耳板三维坐标偏差特别是径向误差非常敏感,当偏差值为 $10\ \text{mm}$ 时,拉索误差会达到 $5\% \sim 20\%$ ,所以需要给予与耳

板相连的外脊索和外斜索一定的调节量,来消除环梁耳板带来的不利影响。

根据以上方法,可将除外脊索和外斜索的其余拉索制作成定长索,以节约拉索制作成本。在外脊索和外斜索靠近耳板的一端增加调节装置,通过拉索长度变化补偿环梁耳板偏差,使中圈、内圈的脊索和斜索的拓扑关系保持不变,如图6所示。

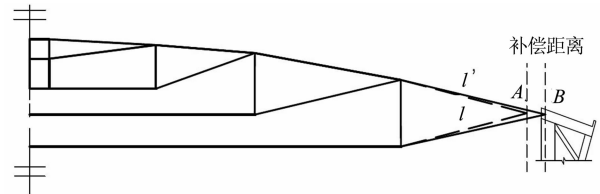


图6 环梁施工误差补偿

Fig. 6 Ring beam construction error compensation

通过拉索产生 $\Delta l = l - l'$ 的伸长量,可使外脊索和外斜索同时伸长或缩短,从设计坐标A延径向伸长到误差坐标B,对三角形几何关系影响较小,经拉索长度调节后拉索内力与设计值能保证基本一致。

在体育馆的整个施工过程中,除采用外圈拉索调节装置补偿环梁偏差的被动补偿方式外,更应该对外环梁和耳板预埋件的设计与施工提出较高要求。在索穹顶施工之前,用全站仪对所有耳板预埋件安装位置进行多次测量,四周环梁及埋件和耳板在安装时达到以下精度:耳板孔中心的三维坐标偏差与设计值偏差小于 $15\ \text{mm}$ ;耳板的中心线与成型后的索轴线夹角偏差小于 $0.5^\circ$ 。进行预埋件的强度与变形量仿真模拟,满足耳板自身刚度要求,耳板含贴板的总厚度、孔径、孔边距严格符合设计要求。耳板安装完成后,再通过全站仪精确测量三维坐标,最终确定外圈拉索调节量。

## 2.2 拉索误差对索穹顶内力影响与控制方法

### 2.2.1 拉索下料误差及控制方法

相对于撑杆、中心拉力环等钢构件,拉索在未施加预应力时偏柔,在下料制索过程中会产生一定的随机误差。因此,本文假设所有定长索存在各自索长的 $l/2\ 200$ 、 $l/2\ 000$ 、 $l/1\ 800$ 、 $l/1\ 600$ 、 $l/1\ 400$ 、 $l/1\ 200$ 、 $l/1\ 000$ 、 $l/800$ 、 $l/600$ 的误差,研究该加工误差对内力的影响。

图7、图8为所有定长索均存较设计长度偏长或偏短时,对结构内力的影响,其中正值表示拉索下料长度大于设计长度。从图中可以看出,当下料误差小于 $l/1\ 000$ 时,索力变化较小;超过 $l/1\ 000$ 后,索力变化明显。本工程索长均在 $9.7 \sim 15.4\ \text{m}$ 之间,

且根据目前制索厂家工艺水平,综合考虑后将制索精度控制在±15 mm( $l/1\ 000$ )的误差范围内。

对于索穹顶结构,为了达到足够的刚度和满足设计标高要求,拉索将承受巨大的预应力,而形成形态索穹顶的拉索长度与预应力值直接相关,所以在拉索下料时必须考虑预应力成形态下的伸长量.为了满足±15 mm的制索精度,需要对制索过程严格要求.首先通过拉索破断力 50%~55%的预应力预张拉,消除拉索受力伸长时的非线性因素,减小工地张拉时的松弛量,使索体结合紧密,受力均匀.以索穹顶设计内力对拉索在张拉台上进行应力下料,并用测距仪和拉尺相互校核,以保证现场施工中施加预应力后拉索长度与设计长度一致。

通过以上措施,天津理工大学体育馆索穹顶结构所有定长索的制索精度均控制在±15 mm以内,具体拉索误差如表 2 所示。

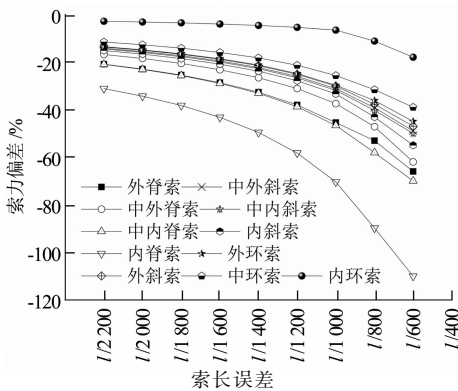


图 7 误差为正时对拉索内力影响

Fig. 7 Influence of positive error on cable internal force

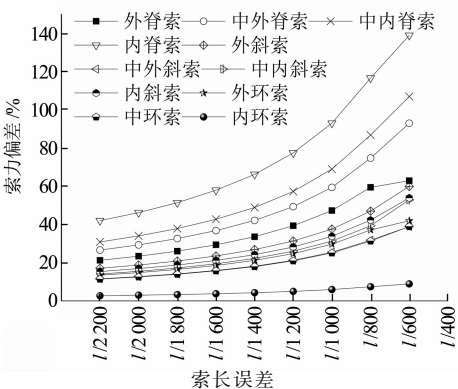


图 8 误差为负时对拉索内力影响

Fig. 8 Influence of negative error on cable internal force

### 2.2.2 拉索下料误差及现场处理方法

拉索运送至现场后,若拼装位置未经规划,随意安装,则会对整体受力产生不利影响.仍假设定长索存在各自索长的  $l/2\ 200$ 、 $l/2\ 000$ 、 $l/1\ 800$ 、 $l/1\ 600$ 、 $l/1\ 400$ 、 $l/1\ 200$ 、 $l/1\ 000$ 、 $l/800$ 、 $l/600$  的误差,图

9、图 10 分别为以短轴和长轴对称分布的各定长索中,一半存在相同正值加工误差,另一半存在相同负值加工误差时对内力分布的影响.提取两种情况下内力变化最大的短轴和长轴各索索力变化值。

分析图 9、图 10 可以看出,若存在正误差的拉索集中在轴线一侧,负误差拉索在轴线另一侧,则会带来较大的内力偏差,特别是拉索正负误差关于长轴对称,存在索长  $l/1\ 000$  下料误差时,内脊索索力偏差将达到 61%。

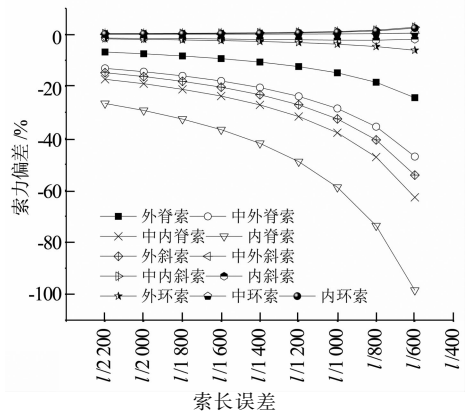


图 9 拉索误差以长轴对称时拉索内力变化  
Fig. 9 Change of internal force when error is set as the symmetry on the long axial

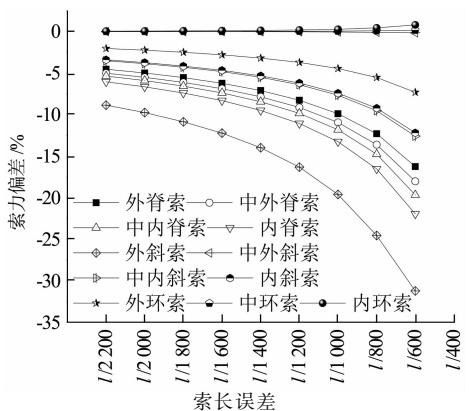


图 10 拉索误差以短轴对称时拉索内力变化  
Fig. 10 Change of internal force when error is set as the symmetry on the short axial

为了减小由于拉索下料产生的随机误差对内力分布的不利影响,本工程在拉索现场布放前对其放置位置进行了优化调整.例如①、⑨轴线关于短轴对称,轴线上的中外脊索、内脊索误差分别为-1 mm、5 mm 和-9 mm、-2 mm,中内脊索无误差,则将存在 5 mm 和-9 mm 误差的脊索放在同一轴线上,-1 mm和-2 mm 误差的脊索放在另一轴线上,所有轴线脊索及斜索调整位置如表 2 所示。

通过调整拉索放置位置,减小了拉索随机误差

对结构内力影响,使撑杆基本达到竖直状态,与设计成形态拓扑关系尽量保持了一致.根据表2中拉索排列位置,将定长索下料误差施加于模型中,计算得

到所有轴线拉索内力偏差值如图11所示.可以看出,除内脊索内力误差达到20%之外,其余拉索内力偏差基本控制在10%以内.

表2 定长索下料误差及放置轴线  
Tab.2 Error and location of fixed length cable

位置	编号	索型号	理论长度/mm	偏差/mm	放置轴线	位置	编号	索型号	理论长度/mm	偏差/mm	放置轴线	位置	编号	索型号	理论长度/mm	偏差/mm	放置轴线
	1	φ71	14 144	1	9		1	φ60	9 310	0	1		1	φ60	9 751	-1	1
	2	φ71	14 144	-2	1		2	φ60	9 310	0	9		2	φ60	9 751	5	9
	3	φ133	13 000	-10	16		3	φ116	9 099	9	2		3	φ116	9 646	0	2
	4	φ133	13 000	-14	2		4	φ116	9 099	12	8		4	φ116	9 646	0	8
	5	φ133	13 000	-14	8		5	φ116	9 099	-7	16		5	φ116	9 646	6	10
中外脊索	6	φ133	13 000	15	10	中脊索	6	φ116	9 099	0	10	内脊索	6	φ116	9 646	9	16
	7	φ133	10 887	-10	11		7	φ116	9 126	12	3		7	φ116	9 637	-12	3
	8	φ133	10 887	6	7		8	φ116	9 126	3	7		8	φ116	9 637	1	7
	9	φ133	10 887	-10	15		9	φ116	9 126	-4	11		9	φ116	9 637	14	11
	10	φ133	10 887	8	3		10	φ116	9 126	2	15		10	φ116	9 637	14	15
	11	φ133	9 521	12	4		11	φ116	9 095	2	4		11	φ116	9 641	-6	4
	12	φ133	9 521	-6	14		12	φ116	9 095	-1	12		12	φ116	9 641	1	6
	13	φ133	9 521	-4	6		13	φ116	9 095	0	6		13	φ116	9 641	6	12
	14	φ133	9 521	-14	12		14	φ116	9 095	2	14		14	φ116	9 641	-5	14
	15	φ133	9 010	-12	13		15	φ133	8 989	14	13		15	φ116	9 640	-15	5
	16	φ133	9 010	14	5		16	φ133	8 989	-5	5		16	φ116	9 640	-8	13
	-----																
	1	φ71	14 163	2	9		1	φ60	9 670	-4	1		1	φ60	9 814	-4	1
	2	φ71	14 163	-3	1		2	φ60	9 670	-5	9		2	φ60	9 814	-4	9
	3	φ60	13 309	1	2		3	φ60	9 635	1	10		3	φ60	9 688	-1	2
	4	φ60	13 309	-6	10		4	φ60	9 635	0	2		4	φ60	9 688	1	8
	5	φ60	13 309	1	8		5	φ60	9 635	-5	8		5	φ60	9 688	6	10
中外斜索	6	φ60	13 309	1	16	中内斜索	6	φ60	9 635	0	16	内斜索	6	φ60	9 688	0	16
	7	φ71	11 735	5	7		7	φ71	9 591	-11	7		7	φ60	9 775	-5	3
	8	φ71	11 735	3	15		8	φ71	9 591	11	3		8	φ60	9 775	7	7
	9	φ71	11 735	1	3		9	φ71	9 591	4	11		9	φ60	9 775	-2	11
	10	φ71	11 735	5	11		10	φ71	9 591	4	15		10	φ60	9 775	0	15
	11	φ71	10 872	-2	6		11	φ71	9 734	1	12		11	φ60	9 789	-9	4
	12	φ71	10 872	8	4		12	φ71	9 734	6	4		12	φ60	9 789	-9	6
	13	φ71	10 872	3	14		13	φ71	9 734	6	6		13	φ60	9 789	4	12
	14	φ71	10 872	-3	12		14	φ71	9 734	1	14		14	φ60	9 789	-6	14
	15	φ71	10 568	-2	5		15	φ60	9 743	-5	5		15	φ60	9 793	-3	5
	16	φ71	10 568	3	13		16	φ60	9 743	-8	13		16	φ60	9 793	-3	13

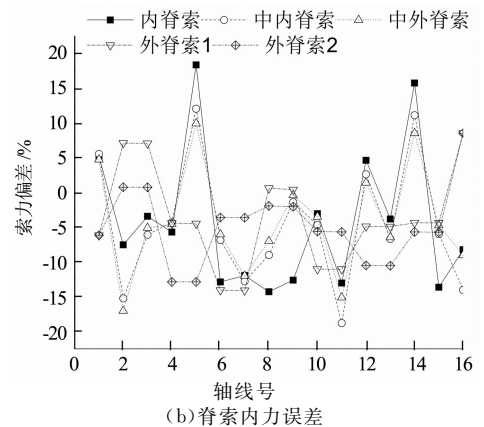
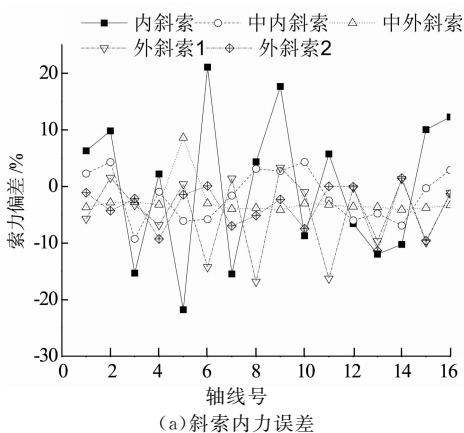


图11 实际下料误差对内力分布影响

Fig. 11 Influence of actual cutting error on internal force distribution

### 3 索穹顶分部提升施工技术

受体育馆先期施工的土建结构影响,东西两侧的山墙较高,长轴向撑杆无法穿越山墙.采用整体提升工艺进行索穹顶的安装,则土建结构对提升工艺有很大的影响.综合考虑后本工程采用场地中央搭设临时塔架,空中散装构件,分批张拉斜索的整体成型分布张拉法.

首先利用中央胎架拼装内拉环,然后高空依次分批安装脊索、撑杆、环索和斜索,最后张拉外斜索使结构成型,分为8个施工步.

#### 3.1 场地中央搭设拼装塔架并用缆风绳加固

为了实现高空散拼的施工方案,需要将内拉环抬高以减小脊索安装时的内力.最有效的措施是将内拉环的顶部高度抬高至和短轴的外环梁等高,使得短轴上的外脊索耳板和内脊索耳板在同一高度上.塔架拼装完成后,在长轴和短轴方向共加设4道缆风绳.

#### 3.2 拼装中心拉力环

中心拉力环质量为16 t,不能采用整体吊装,需要在塔架顶部的操作平台上散拼.在安装时将中心拉力环上耳板与索穹顶设计轴线相对应,图12为现场塔架和中心拉力环现场施工图.



图12 中央塔架和中心拉力环

Fig. 12 The center tower and inner ring

#### 3.3 安装脊索体系,撑杆一同吊装

由塔架至地面依次连接内脊索、中内脊索、中外脊索和外脊索,并利用牵引工装与外环梁相连.索穹顶一共16个轴线,根据轴线的位置对称安装,一次同时对称安装2榀,分8批次安装完成.脊索体系安装完成后如图13所示.

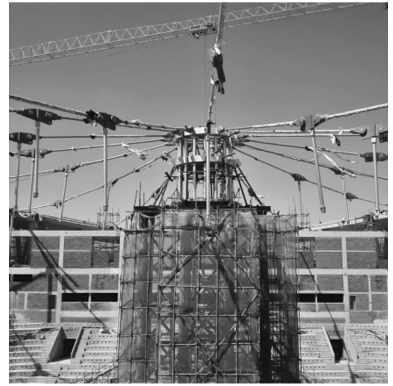


图13 拼装脊索体系

Fig. 13 Assembling ridge cables

#### 3.4 安装环索

根据环索和看台以及3层楼面的位置关系确定3圈环索的各自铺放位置.将索夹按照索体上的标记点进行安装.环索闭合以后利用每圈16个撑杆,采用电动倒链整体同时提升各圈环索和撑杆下端连接,完成安装,如图14所示.此时环索均处于松弛状态.

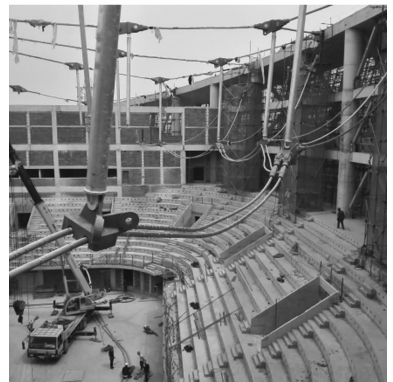


图14 完成环索拼装

Fig. 14 Ring cable assemble complete

#### 3.5 安装内、中内、中外斜索

利用倒链进行安装,安装时通过塔吊在内斜索耳板和中内斜索耳板处搭设脚手架操作平台.每圈斜索有16根,分8批进行安装,如图15所示.

#### 3.6 安装外斜索

外脊索的安装采用牵引工装进行安装,牵引安装的工艺同脊索.为了便于安装,将外斜索100 mm可调量全部调出以减小牵引力.分2批安装就位,长轴方向放在第1批进行牵引安装.根据仿真模拟,将④⑥⑩⑭轴对应的8根外斜索放在第二批安装时,使工装牵引力最优化.所有斜索安装完成后均处于绷紧状态,而脊索仍松弛.



图 15 中斜索安装完毕

Fig. 15 Completion of middle diagonal

#### 4 索穹顶整体张拉施工技术

当所有构件分部提升连接成整体后,内力均由构件自重产生,该结构严格意义上处于机构状态.当外斜索分级分批张拉完成后,预应力将提供索穹顶的刚度承受屋面结构和抵御外荷载.

由于成型后短轴外脊索最大内力将达到 5 975 kN,因此在张拉外斜索之前需先对外脊索进行张拉.外脊索可调节量 150 mm,第 1 级张拉所有外脊索至可调节量剩余 80 mm,第 2 级张拉所有外脊索至可调节量剩余 40 mm,第 3 级完成张拉.之后进行外斜索张拉,外斜索可调节量 100 mm,分 3 次张拉至所调节量分别剩余 60 mm、20 mm、0 mm.斜索张拉过程如图 16 所示.

每级张拉时,均分批隔轴进行.第 1 批张拉对象

为奇数轴对应的 16 根拉索,第二批张拉偶数轴对应的 16 根拉索,第 2、3 级张拉顺序同第 1 级.外斜索每批次张拉控制力如表 3 所示,由于索力对称,仅列出 1~5 轴索力.张拉完成后,拆除塔架,如图 17 所示.



图 16 张拉外斜索

Fig. 16 Tensioning outer diagonal cable



图 17 张拉完成

Fig. 17 Tensioning complete

表 3 斜索张拉控制力

Tab. 3 Control force of diagonal cable

张拉顺序	张拉轴线	剩余调整长度	1~5 轴外斜索内力/kN
1	奇数轴	奇数轴 60 mm, 偶数轴 100 mm	443.687, 313.526, 503.602, 318.591
2	偶数轴	奇数轴 60 mm, 偶数轴 60 mm	497.711, 430.593, 508.653, 382.631
3	奇数轴	奇数轴 20 mm, 偶数轴 60 mm	557.788, 464.647, 598.710, 399.713
4	偶数轴	奇数轴 20 mm, 偶数轴 20 mm	623.812, 609.718, 608.769, 471.758
5	奇数轴	奇数轴 0 mm, 偶数轴 20 mm	656.853, 630.748, 656.798, 482.802
6	偶数轴	奇数轴 0 mm, 偶数轴 0 mm	691.866, 708.785, 663.830, 520.825

#### 5 张拉完成后实测数据分析

在张拉成型后,运用固定在拉索上的光纤光栅传感器和全站仪对部分拉索内力和撑杆及中心拉力

环三维坐标进行了测量,并将监测数据与 ANSYS 有限元仿真模拟结果进行对比.索力及构件高度测量值与理论值对比如表 4、表 5 所示.分析表 4、表 5 可知,索力误差控制在 5% 以内,构件下端竖向标高误差在 2.5% 以内,撑杆垂直度(见表 6)基本满足撑



杆高度  $h/150$  的要求. 通过以上对比, 说明本文中所研究的施工技术能够较好地指导索穹顶的施工, 满足工程质量要求, 确保施工过程规范安全.

表4 构件标高对比

Tab. 4 Component elevation comparison

测量位置	理论值 /m	测量值 /m	偏差 /m	误差 /%
3轴外撑杆	-2.823	-2.852	-0.029	-1.0
5轴外撑杆	-2.026	-2.031	-0.005	-0.2
11轴外撑杆	-2.823	-2.838	-0.015	-0.5
13轴外撑杆	-2.026	-1.980	0.046	2.3
1轴拉力环	2.595	2.649	0.054	2.1
9轴拉力环	2.595	2.636	0.041	1.6

注: 标高相对于长轴外环梁处.

表5 索力对比

Tab. 5 Cable force comparison

测量位置	理论值 /kN	测量值 /kN	偏差 /kN	误差 /%
1轴中外脊索	702	732	30	4.2
1轴中外斜索	638	642	4	0.6
5轴中外脊索	5 666	5 842	176	3.1
5轴中外斜索	735	721	14	-2

表6 撑杆垂直度

Tab. 6 Verticality of struts

测量轴线	位置	坐标/m	偏差	$h/150$
1轴	外撑杆上	40.718, -38.091, 3.507	—	0.046
	外撑杆下	—		
	中撑杆上	40.678, -23.253, 6.050		
	中撑杆下	40.683, -23.294, 0.554		
	内撑杆上	40.725, -13.001, 6.728		
5轴	内撑杆下	40.723, -13.019, 3.015	0.118	0.030
	外撑杆上	7.678, 0.038, 5.209	0.052	0.055
	外撑杆下	7.662, -0.012, -2.031		
	中撑杆上	17.715, 0.057, 5.797		
	中撑杆下	17.716, 0.102, -0.332		
内撑杆上	27.914, 0.071, 6.220			
9轴	内撑杆下	27.882, 0.082, 2.177	0.034	0.032
	外撑杆上	—	—	0.046
	外撑杆下	—		
	中撑杆上	40.842, 23.012, 5.980		
	中撑杆下	40.815, 23.042, 0.537		
内撑杆上	40.826, 12.815, 6.758			
13轴	内撑杆下	40.829, 12.836, 3.044	0.021	0.030
	外撑杆上	73.846, 0.139, 5.265	0.050	0.055
	外撑杆下	73.895, 0.129, -1.980		
	中撑杆上	63.848, 0.120, 5.916		
	中撑杆下	63.803, 0.129, -0.213		
内撑杆上	53.685, 0.056, 6.280			
13轴	内撑杆下	53.714, 0.072, 2.246	0.033	0.032

注: 长轴外撑杆部分节点被土建结构遮挡; 标高相对于长轴外环梁处.

## 6 结论

本文对天津理工大学体育馆索穹顶相关施工技术进行了研究, 得出以下结论:

1) 环梁施工质量会显著影响索穹顶成型后的内力分布, 单个耳板预埋件 10 mm 的径向尺寸偏差或环梁跨度 1/10 000 大小误差会导致部分拉索内力偏差达 20%. 因此需要把外脊索和外斜索制成可调节索来抵消环梁施工误差的影响.

2) 拉索是索穹顶结构中的柔性构件, 且成型后在所有构件中所受应力最大. 因此需要通过应力下料、预张拉等措施严格控制拉索的下料随机误差, 并根据实际工程情况对拉索摆放进行优化.

3) 目前常用的构件安装有分部提升整体张拉法和整体成型分布张拉法. 具体选择时应根据索穹顶形式、前期土建施工影响、张拉设备供给数量等条件综合考虑.

4) 合理的张拉方式和批次选择能够使索穹顶达到设计的几何形态和内力分布, 成型后的索穹顶满足施工质量要求.

5) 施工过程中通过光纤光栅传感器、振弦式应变仪、全站仪等设备能够及时监测索力、杆件应力和构件坐标位置变化, 为施工过程提供指导和质量保证.

## 参考文献

- [1] LEVY M P. The georgia dome and beyond: achieving light-weight-long span structures[C]//Spatial, Lattice and Tension Structures, IASS-ASCE International Symposium. Atlanta: ASCE, 1994: 560-562.
- [2] GEIGER D H. Roof structure[P]. US: 4736553, 1988-04-12.
- [3] LEVY M P, JING T F. Floating saddle connections for the georgia dome, USA[J]. Structural Engineering International, 1994, 4(3): 148-150.
- [4] HAN S E, LEE K S. A study of the stabilizing process of unstable structures by dynamic relaxation method[J]. Computers & Structures, 2003, 81(17): 1677-1688.
- [5] 张建华, 张毅刚, 高波涛, 等. 索穹顶结构施工过程时变力学分析[J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(1): 48-52.  
ZHANG J H, ZHANG Y G, GAO B T, et al. Time-varying analysis of construction process for cable dome[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008, 34(1): 48-52. (In Chinese)

- [6] 罗斌, 郭正兴, 高峰. 索穹顶无支架提升牵引施工技术及其全过程分析[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(5):16-22.  
LUO B, GUO Z X, GAO F. Research on non-bracket tow-lifting construction technology and complete process analysis of cable dome[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(5):16-22. (In Chinese)
- [7] 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.  
YUAN X F, DONG S L. Inverse analysis of construction process of cable dome[J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(2):75-79. (In Chinese)
- [8] 朱明亮, 郭正兴. 基于向量式有限元的大跨度钢结构施工力学分析方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(3):48-54.  
ZHU M L, GUO Z X. Construction mechanics analysis of long-span steel structure based on vector form intrinsic finite element method[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2016, 43(3):48-54. (In Chinese)
- [9] DING M M, LUO B, GUO Z X, *et al.* Integral tow-lifting construction technology of a tensile beam-cable dome[J]. Journal of Zhejiang University(Science A), 2015, 16(12):935-950.
- [10] 赵平, 孙善星, 周文胜. 基于 ANSYS 的索穹顶施工过程逆向模拟分析[J]. 工业建筑, 2013, 43(4):127-130.  
ZHAO P, SUN S X, ZHOU W S. Construction process inverse simulation analysis of cable dome based on ANSYS[J]. Industrial Construction, 2013, 43(4):127-130. (In Chinese)
- [11] 黄呈伟, 陶燕, 罗小青, 等. 索穹顶的施工张拉及其模拟计算[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2000, 25(1):15-19.  
HUANG C W, TAO Y, LUO X Q, *et al.* Simulating of construction process for cable dome[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2000, 25(1):15-19. (In Chinese)
- [12] 余玉洁, 陈志华, 王霄翔. 拉索半精细化有限元模型及其敏感性分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2015, 48(S1):96-101.  
YU Y J, CHEN Z H, WANG X X. Refined simplified finite element model of cable and its sensitivity analysis[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2015, 48(S1):96-101. (In Chinese)
- [13] 张慎伟, 罗晓群, 张其林. 双曲索网结构施工张拉成形数值模拟分析与试验验证[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2009, 36(1):8-13.  
ZHANG S W, LUO X Q, ZHANG Q L. Numerical simulation analysis and model test for the tension process of hyperbolic cable net structure[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2009, 36(1):8-13. (In Chinese)
- [14] 黄呈伟, 邓宜, 宋万明, 等. 索穹顶结构模型试验研究[J]. 空间结构, 1999, 5(3):40-46.  
HUANG C W, DENG Y, SONG W M, *et al.* Experiment analysis of cable dome structure[J]. Spatial Structures, 1999, 5(3):40-46. (In Chinese)
- [15] 陈联盟, 董石麟, 袁行飞. Kiewitt 型索穹顶结构模型试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(2):364-368.  
CHEN L M, DONG S L, YUAN X F. Experimental study of Kiewitt dome model[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2008, 42(2):364-368. (In Chinese)
- [16] 葛家琪, 张爱林, 刘鑫刚, 等. 索穹顶结构张拉找形与承载全过程仿真分析[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(4):1-11.  
GE J Q, ZHANG A L, LIU X G, *et al.* Analysis of tension form-finding and whole loading process simulation of cable dome structure [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(4):1-11. (In Chinese)
- [17] 孙善星. 大跨度索穹顶结构施工过程模拟分析[D]. 西安:西安建筑科技大学土木工程学院, 2013:55-61.  
SUN S X. Simulation on whole construction process for large span cable dome structure[D]. Xi'an: Civil Engineering College, Xi'an University of Architecture and Technology, 2013:55-61. (In Chinese)
- [18] 王泽强, 程书华, 尤德清, 等. 索穹顶结构施工技术研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(4):67-76.  
WANG Z Q, CHENG S H, YOU D Q, *et al.* Research on construction techniques of cable dome roof [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(4):67-76. (In Chinese)
- [19] 葛家琪, 徐瑞龙, 李国立, 等. 索穹顶结构整体张拉成形模型试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(4):23-30.  
GE J Q, XU R L, LI G L, *et al.* Experimental study on forming process of cable dome structure [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(4):23-30. (In Chinese)
- [20] 张建华, 张毅刚. 索穹顶结构施工全过程分析[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(4):101-104.  
ZHANG J H, ZHANG Y G. Construction process analysis of cable dome [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008, 30(4):101-104. (In Chinese)
- [21] 张丽梅, 陈务军, 董石麟. 正态分布钢索误差对索穹顶体系初始预应力的影响[J]. 空间结构, 2008, 14(1):43-45.  
ZHANG L M, CHEN W J, DONG S L. Normal distribution manufacture errors and its effect on the initial pre-stress of the cable dome[J]. Spatial Structures, 2008, 14(1):43-45. (In Chinese)
- [22] 尤德清, 张建华, 张毅刚, 等. 支座施工误差对索穹顶结构初始预应力的影响[J]. 工业建筑, 2007, 37(S1):1123-1127.  
YOU D Q, ZHANG J H, ZHANG Y G, *et al.* Influence to initial prestress of cable dome by bearing construction error[J]. Industrial Construction, 2007, 37(S1):1123-1127. (In Chinese)