

# 索网穹顶静动力分析及施工模拟

胡正平 李 婷 陈彬磊 甘 明 苗启松

(北京市建筑设计研究院 北京 100045)

**摘 要:**索网穹顶系国内首次采用新型结构形式,体系较为复杂,静动力分析及施工过程动态模拟显得特别重要。基于非线性有限元分析方法,本文对结构主次索网的协同工作性能进行了分析,并对动力性能做了深入探讨。鉴于索网穹顶结构施工成型的难点,运用ANSYS软件跟踪模拟分析施工过程中结构的响应,对类似结构的工程施工设计具有一定的参考价值。

**关键词:**索网穹顶结构 静力分析 动力分析 施工动态模拟 张拉成型技术

## 1 工程概况

### 1.1 结构概况

中国(太原)煤炭交易中心钢结构屋盖中心采光区域采用索网穹顶结构,其平面为圆形,直径36.000m,矢高1.636m,结构中心点标高25.848m。建筑设计为北京市建筑设计研究院,预应力施工为东南大学预应力所。点支式索网穹顶玻璃幕墙系国内首次采用(见图1)。



a) 索网穹顶安装  
初具规模照片

b) 安装完成照片

图1 索网穹顶结构图

### 1.2 结构几何参数

索网穹顶结构主要特点为在索穹顶主结构的基础上,增加了上层幕墙次索网,屋面冠以采用点支式玻璃。索网穹顶主结构(见图2)由脊索、斜索、环索、压杆、外环受压环及内圈刚性拉力环构成,分为16个径向轴和3环,拉索选用Galfan涂层拉索,索间连接索夹采用铸钢件。屋面次索网由屋面环索和屋面径向索组成,主要选用不锈钢索。圆形的结构平面带来径向索的“外宽内窄”,结构设计时采用“Y”型节点转换(主要构件的参数见表1)。

### 1.3 设计关键点

索网穹顶包括索穹顶主体结构、屋面次索网、连接件和玻璃屋面系统四个部分。荷载传递路径为:屋面荷载→玻璃屋面→连接部件→屋面

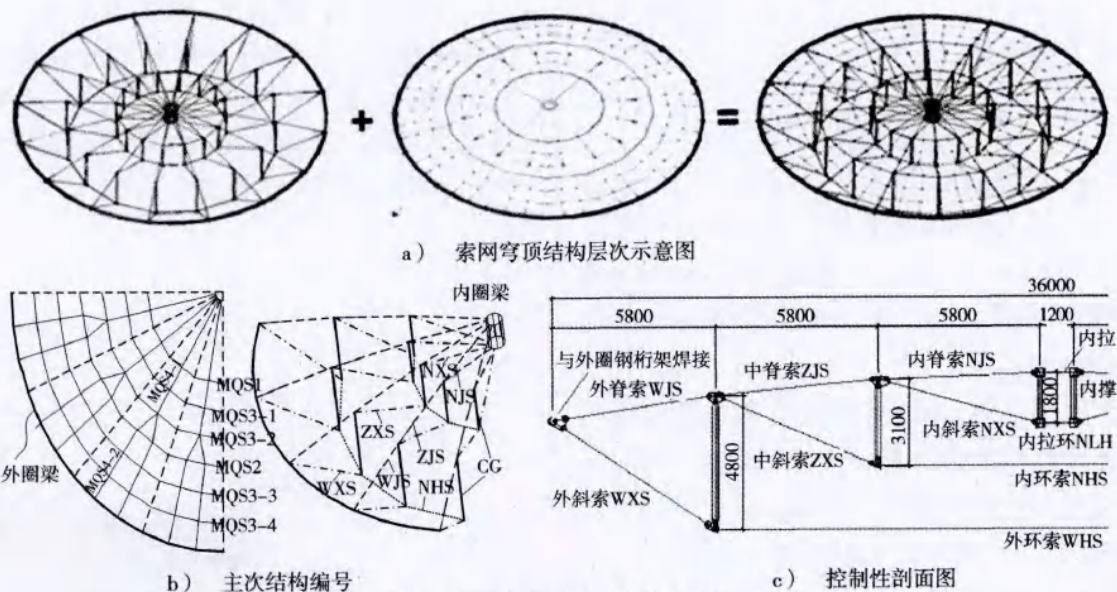


图2 索网穹顶结构几何位置图



表1 索网穹顶结构参数表

部位	脊索			斜索			环索			幕墙索			
编号	NJS	ZJS	WJS	NXS	ZXS	WXS	NHS	WHS	MQS1	MQS2	MQS3	MQS4	
直径/mm	28	32	48	28	32	48	40	60	32	32	22	22	

次索网→主体结构→周边钢结构。

接近不动结构刚体上附着索网设计时,分别由两家不同的单位进行设计。但作为柔性结构索网穹顶上附着索网,依靠索网的预应力效应对主体结构内力、刚度、稳定性影响很大,一般需要整体分析。

## 2 索网穹顶静动力分析

### 2.1 静动力分析模型基本参数

建立如下两个模型,模型1:次索网与主体结构共同工作;模型2:不考虑次索网的共同作用。两个计算模型的几何拓扑完全相同且在分析中主体结构上施加相同的等效预张力,以使得模型1中,在未增加次索网前,其预应力水平及结构位形与模型2相同,而后期主结构索力及位形的相异也是次索网预应力的引入带来的影响之一,确保两个结构的可比性。

通过两个计算模型以对比次结构索网对索穹顶主结构带来的力学性能影响,在变形前,两个模型的初始形态均与实际工程设计值相同,但由于自重的不同,在施加预应力结构发生变形后,两个模型的节点标高、拉索内力有所不同。分析模型中索穹顶主体结构的几何尺寸详见图3所示。

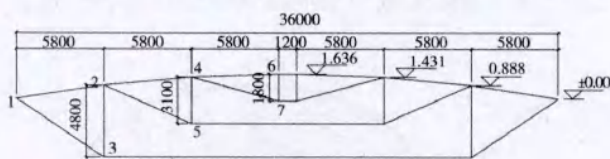


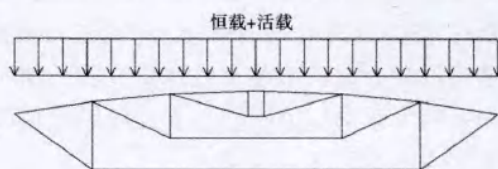
图3 计算模型几何尺寸图

Ansys分析中,拉索中撑杆和外撑杆选用LINK8单元,而内拉环采用BEAM188来模拟。在两个模型中,在模型上层利用SURF154建立厚度极小的虚面,来实现结构恒载和活载的施加。

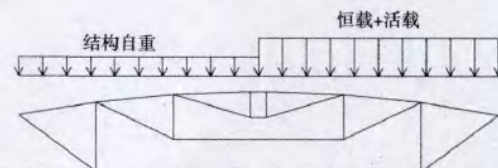
作用在结构上的主要竖向荷载包括结构自重、屋面恒荷载和屋面活荷载三部分,结构自重由构件具体规格确定,屋面玻璃、吊灯、遮阳板等为:  $1.10 \text{ kN/m}^2$ ,活载按不上人屋面活荷载为  $0.50 \text{ kN/m}^2$ 。

### 2.2 索网穹顶静力分析

静力分析针对满跨荷载和非对称荷载(见图4),即采用两种分析工况:a)恒荷载+满跨活荷载;b)恒荷载+半跨活荷载。为了描述和跟踪构件内力及节点位移的变化过程,竖向位移和索杆内力的计算中,竖向均布荷载的最大值均取为  $2.0 \text{ kN/m}^2$ ,且分为5级加到结构上,每级增加  $0.4 \text{ kN/m}^2$ 。对于半跨均布荷载,仅在右半跨上施加结构上屋面玻璃、吊灯、遮阳板等荷载及屋面活载,荷载的最大值取为  $2.0 \text{ kN/m}^2$ ,分5级加到结构上,每级增加  $0.4 \text{ kN/m}^2$ 。



a) 满跨均布荷载作用示意图



b) 半跨均布荷载作用示意图

图4 索网穹顶结构几何位置图

#### (1) 满跨均布荷载静力分析

在满跨荷载作用下,各级荷载作用下主结构各关键节点的位移及拉索的荷载响应如图5、6所示。由于结构左右两侧杆件、节点荷载均完全相同,故图5、6中仅列出左侧杆件内力变化及节点的竖向位移变化。

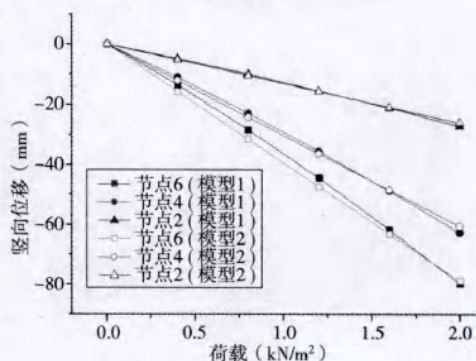
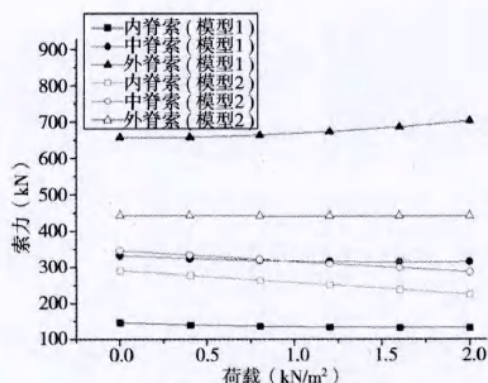
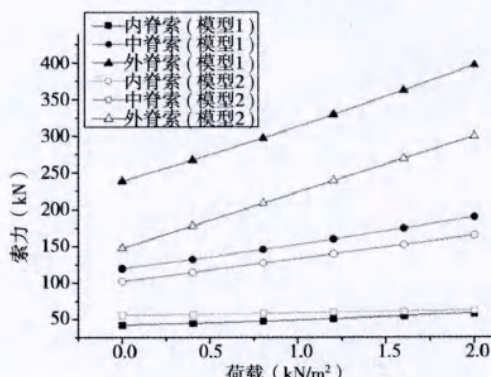


图5 主结构节点竖向位移

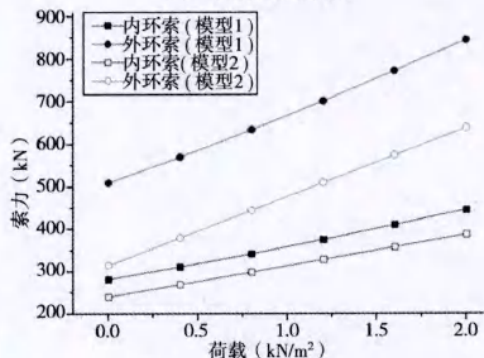




a) 脊索索力变化图



b) 斜索索力变化图



c) 环索索力变化图

图6 主体结构拉索索力变化图

## (2) 半跨均布荷载静力分析

相对其它结构, 索网穹顶对非对称荷载作用更为敏感, 且在实际环境下经常会出现活荷载、雪荷载等非对称荷载作用的情况。由于非对称荷载作用下, 结构的形态及受力较为复杂, 为方便描述, 将左半跨非施加外荷载区域和右半跨施加恒载+活载区域分别定义为A、B区域。分别列出关键节点位移及各主结构拉索的荷载响应、如图7、图8所示。

## 2.3 索网穹顶动力分析

在对柔性结构体系进行模态分析的时候, 考虑初始预应力的影响。首先通过静力分析把预应力和几何形状加到结构上去, 得到体系的静力平

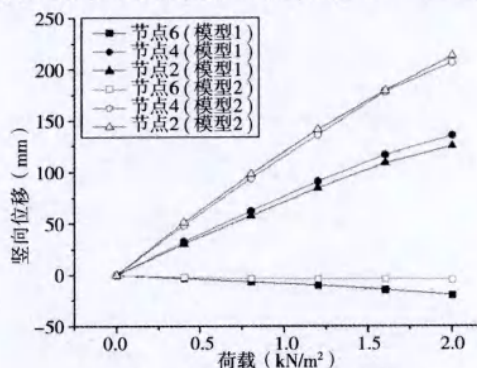
衡位置, 即体系的静力终态。动力分析时, 取体系静力终态的内力和几何坐标作为动力初态、分析软件采用ANSYS。计算结果如图9、10所示。

分析发现, 肋环型索穹顶自振振型的特征为: 低阶振型以扭转振型、水平振型与竖向振型的混合振型为主, 两者交替出现。第1、2阶振型为扭转振型, 第3、4阶振型为平动、竖向混合振型, 第5、6阶振型为竖向振型, 第7、8阶振型为混合振型。第1阶振型为扭转振型, 表明肋环型索穹顶结构的扭转刚度要弱于水平刚度和竖向刚度, 即其平面内刚度较差。这是因为在肋环型索穹顶结构中, 各榀平面索桁架之间的侧向联系较少。

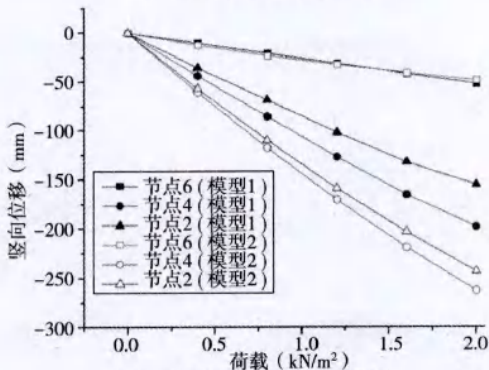
肋环型索穹顶自振频率的特征为: 自振频率比较密集, 且集中地落在几个不连贯的区间, 出现多个相等频率组。进一步研究, 进行前18阶模态分析, 得到类似的结论。且8阶以后, 以竖向振型为主, 也出现多个相等频率组。频率相等是因为索穹顶是中心对称结构, 有多个对称轴。使得其无阻尼自由振动方程:

$$([K_E] + [K_G])\{\phi\} = \omega^2 [M]\{\phi\}$$

存在重根。观察各阶振型图, 相应于相同频率的振型形式也大致相同, 只是变换了一个角度。



a) A区域1号轴线节点位移图



b) B区域9号轴线节点位移图

图7 半跨荷载作用下主结构节点竖向位移



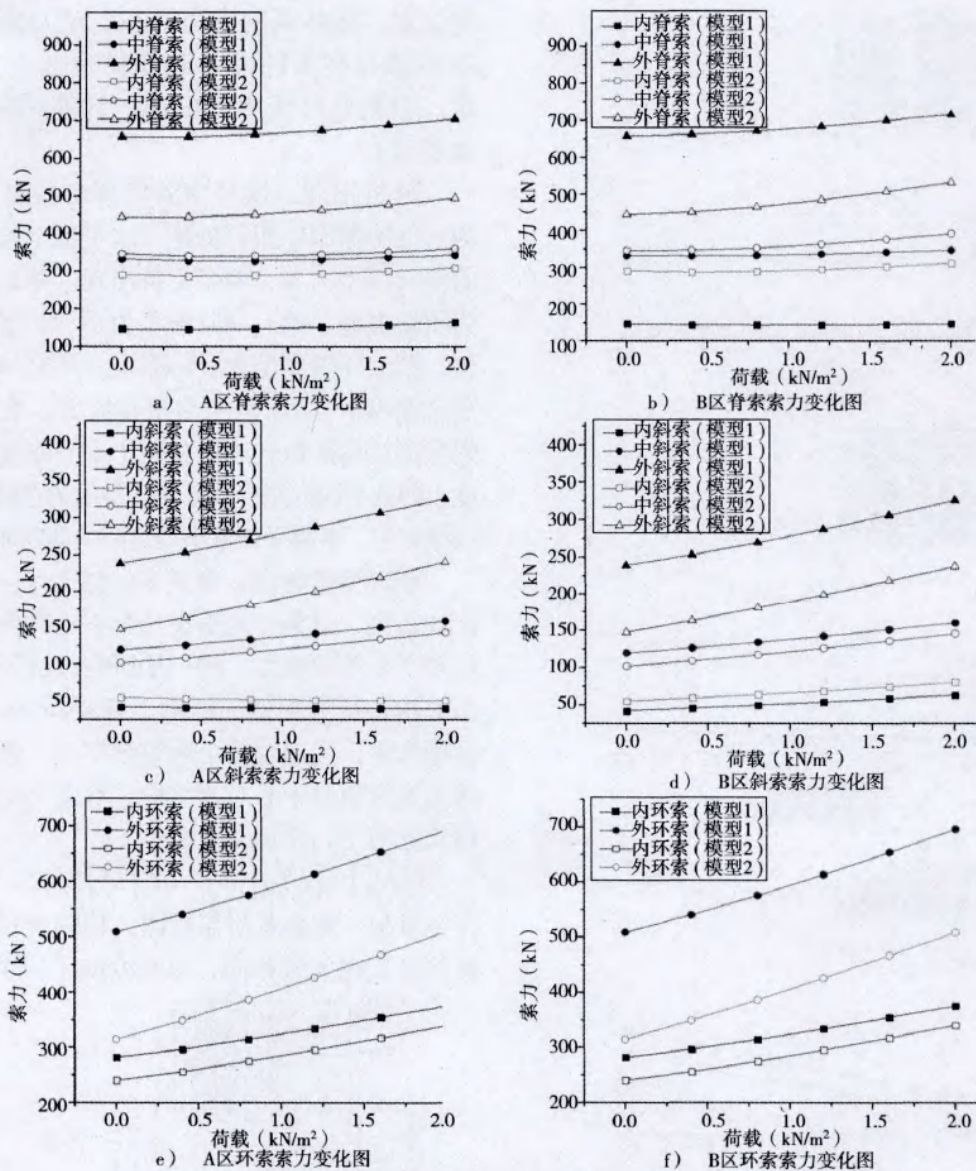


图8 半跨荷载作用下主体结构拉索索力变化图

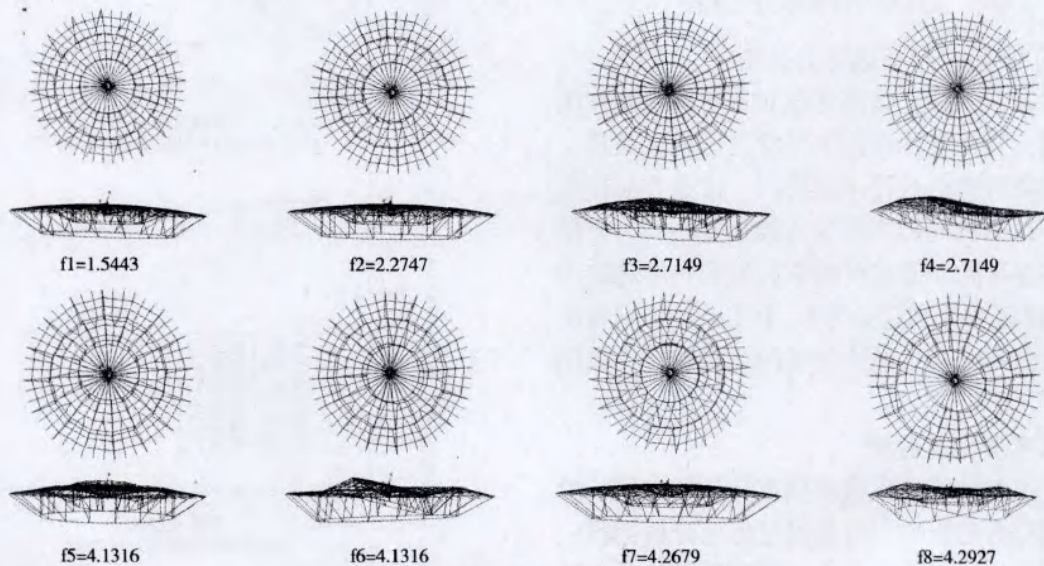


图9 模型1前8阶振型、自振频率



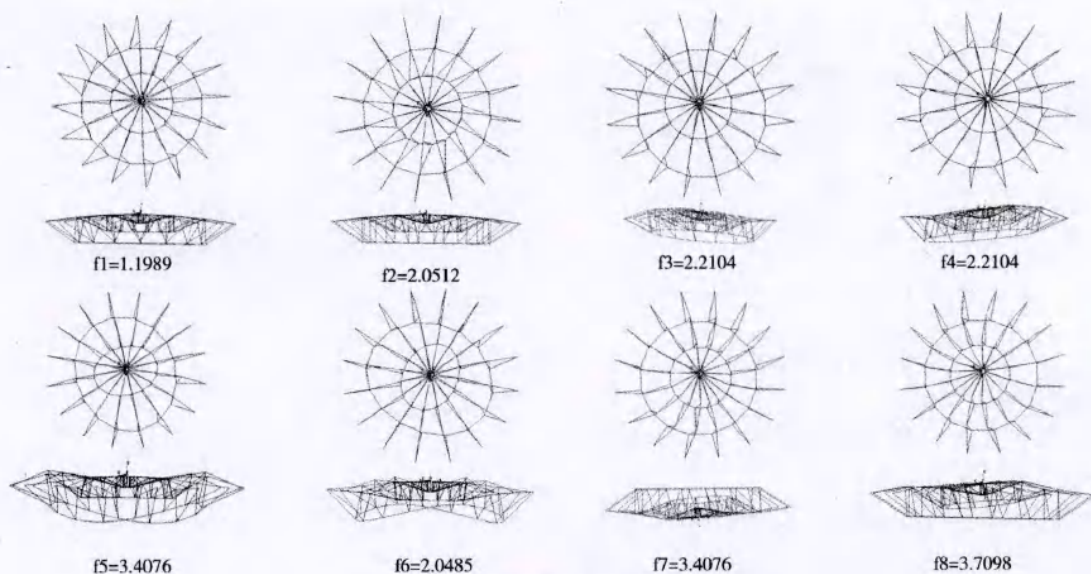


图10 模型2前8阶振型、自振频率

### 3 静动力分析结论

(1) 满跨荷载作用下, 分级加载时, 两结构的荷载—位移曲线基本保持线性规律, 整个加载过程中结构未出现刚度突变等情况, 结构在该荷载下具有较好的刚度和承载力。

(2) 满跨荷载在每级荷载中, 模型1中的斜索和环索索力均较模型2大, 在次索网预应力作用下, 相当于对主体结构施加了一定竖向荷载, 而在这种外力的作用下, 主结构的矢跨比有减小的趋势。而中、外脊索由于还存在屋面环索的“环箍”作用, 模型1中的对应索力有所上升。

(3) 半跨荷载作用下, 两个对比模型的位移变化具有相同的趋势: A区域的节点产生向上的位移, B区域的节点产生向下的位移, 位移曲线呈现出一定的非线性。

(4) 半跨荷载作用下, 模型间关键节点的位移变化值相差较大, 模型1的位移变化速率要远小于模型2。由此可见, 随着次索网的引入, 在主、次结构协同工作, 可以提升整体结构在非对称荷载下的刚度, 对索穹顶结构在非对称荷载下刚度较弱的情况有一定的改善, 一定程度上降低结构对非对称荷载的敏感性。

(5) 在肋环型索穹顶结构中, 各榀平面索桁架之间的侧向联系较少。索穹顶是中心对称结构, 有多个对称轴, 出现多个相等频率组。

### 4 索网穹顶施工动态分析

#### 4.1 结构施工分析参数

索网穹顶施工中创新的将索穹顶主结构及屋面次结构索网视为一个整体, 采用无支架提升索杆累积安装张拉方法, 首先在地面同时拼装主、次结构索杆体系, 然后将两者共同提升至高空张拉成型。施工中共用到三种辅助工装索(见图11): 外斜索接长索(GZS1), 外脊索牵引索(GZS2)和内拉环提升索(GZS3)。

施工过程分析采用软件为ANSYS软件, 在分析模型中各节点处(见图12), 利用Mass 21单元模拟实际索夹节点的重量, 同时考虑几何大变形和应力刚化效应。有限元分析数据, 可以更精确地得出结构在整个施工过程中各个工况下的受力状态和位形。

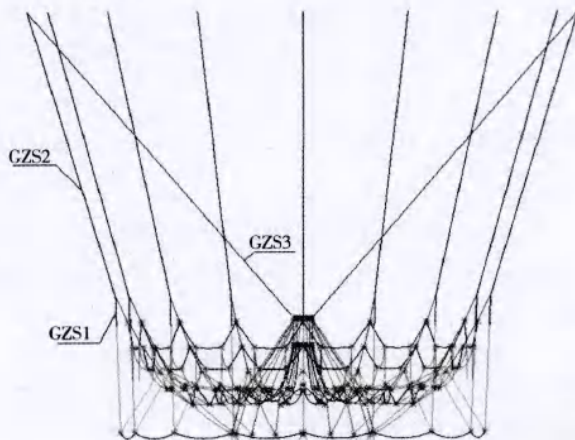


图11 施工示意图



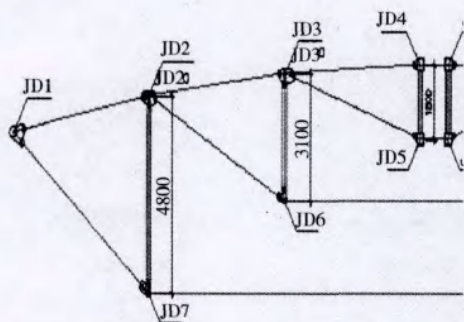


图12 主要节点编号图

#### 4.2 施工荷载步划分

按照施工方案，将索网穹顶施工分为以下4大步，26小步来完成，

第1大步：提升牵引阶段，包含6小步。牵引内环提升索GZS3和最外脊索提升索GZS2，缓慢提升整个索杆结构，直到提升索GZS3到位，此时GZS3索长为17.5m，GZS2索长为3.0m，如表2。

表2 提升牵引阶段工装索长参数

	小步1	小步2	小步3	小步4	小步5	小步6
牵引GZS2索长	20.0m	16.5m	13.0m	9.5m	6.0m	3.0m
GZS3索长	27.0m	25.0m	23.0m	21.0m	19.0	17.5m

第2大步：安装外脊索阶段，包含6小步。保持GZS3索长不变，分级牵引GZS2，至其索长为0；安装外脊索，拆除GZS2，如表3。

表3 安装外脊索阶段工装索长参数

	小步7	小步8	小步9	小步10	小步11	小步12
牵引GZS2索长	2.5m	2.0m	1.5m	1.0m	0.5m	0.0m
GZS3索长	17.5m	17.5m	17.5m	17.5m	17.5m	17.5m

第3大步：安装外斜索及次径向索阶段，包含9小步。拆除GZS3，牵引GZS1，至其索长为0，安装主结构外斜索，拆除GZS1，然后安装屋面次结构最外环径向索，如表4。

表4 安装外斜索及玻璃屋面径向索阶段工装索长参数

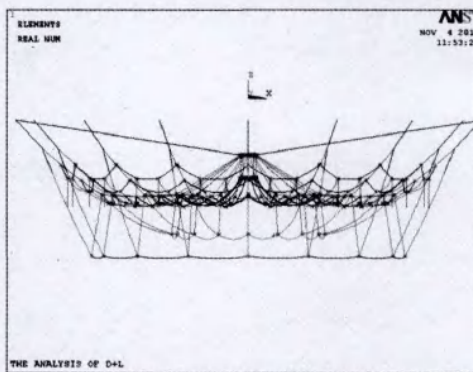
	小步13	小步14	小步15	小步16	小步17	小步18	小步19	小步20	小步21
牵引GZS1索长	1.75m	1.50m	1.25m	1.00m	0.75m	0.50m	0.25m	0.00m	
GZS3索长	0								

第4大步：结构张拉阶段，包含5小步。张拉主结构外斜索，调节外斜索调节套筒，至结构成型，如表5。

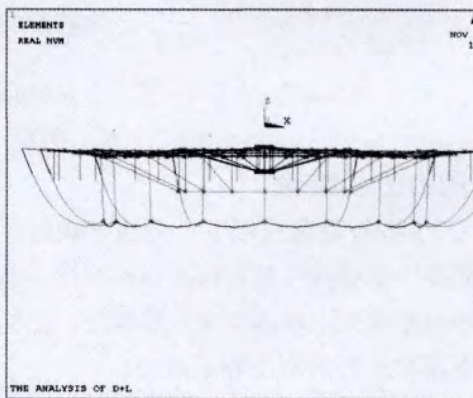
表5 张拉外斜索阶段工装索长参数

	小步22	小步23	小步24	小步25	小步26
张拉外斜索					
距张拉到位	160mm	120mm	80mm	40mm	0mm

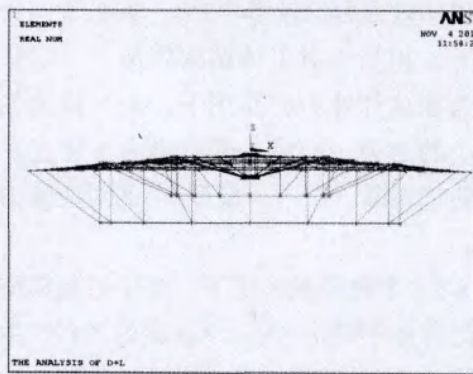
施工中各大步结构ANSYS分析模型见图13。



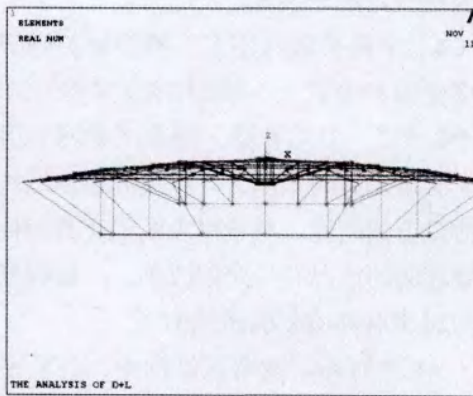
a) 提升牵引分析模型



b) 牵引外斜索分析模型



c) 外斜索安装完毕分析模型



d) 张拉过程分析模型

图13 施工中各主要阶段结构ansys分析模型



### 4.3 计算分析情况

#### (1) 施工中节点位移变化情况

施工过程中,主要节点在各工况下相对支座位移变化如图14所示。

#### (2) 施工过程中拉索索力变化情况

##### (a) 施工中,外斜索接长工装索(GZS1)

只是作为将外斜索索头顺带至高空的临时拉索,只承受外斜索自重传给其的力,受力较小,不予赘述。中心受拉环提升索(GZS3)和外脊索牵引索(GZS2)是整个施工过程中的关键,关系着整个施工过程的安全。根据分析,其在施工过程中的内力变化如图15所示。

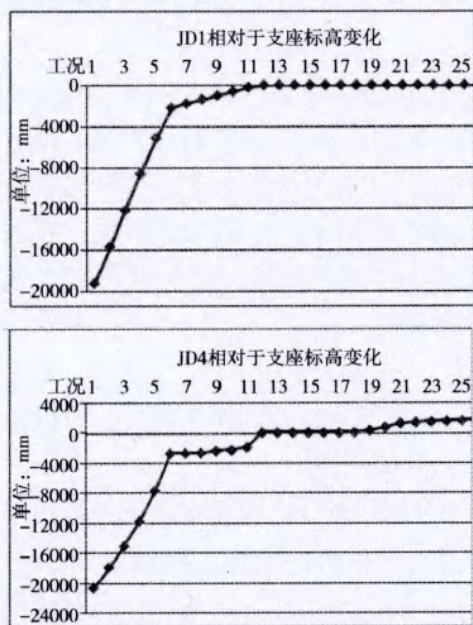


图14 典型节点相对变形动态变化图

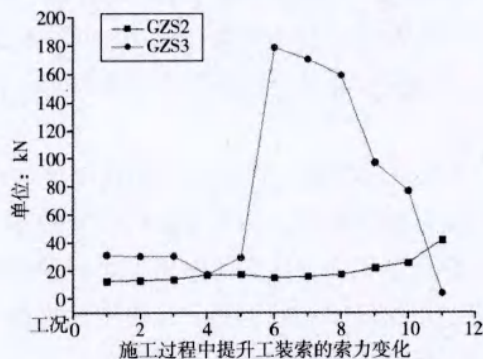


图15 典型工装索索力动态变化图

##### (b) 根据主结构索网及上层屋面次结构索网

的内力分析结果,施工过程中各拉索的内力变化见图16(其中“大步3”为提升阶段,“大步4”为张拉阶段)。

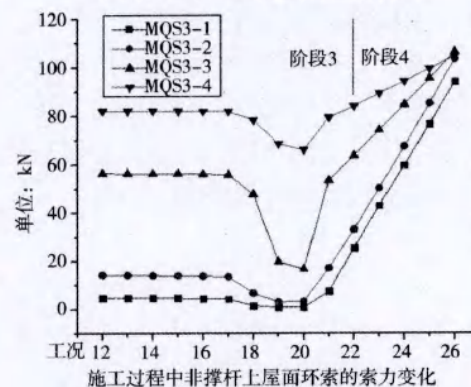
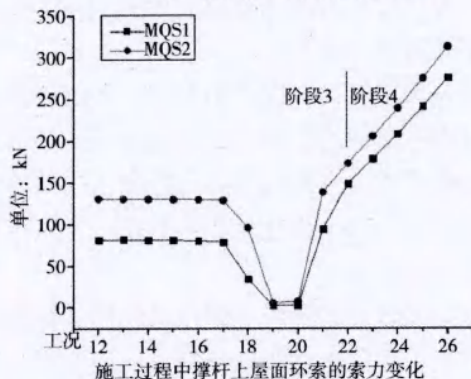
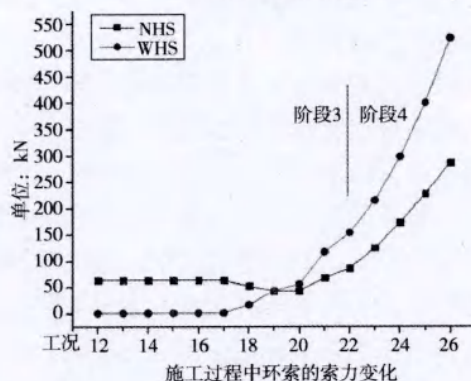
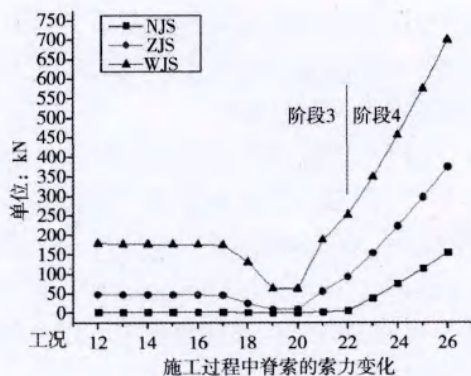


图16 典型拉索索力动态变化图

### 4.4 施工模拟结论

从上面的分析结果曲线可见:

(1) 施工过程中,随着提升牵引的不断进行,中心内拉环提升索(GZS3)和外脊索牵引索(GZS2)的索力不断变化,且彼此变化的趋势相



反。由于内拉环提升索相对外脊索牵引索角度要水平的多,因此在提升施工中,GZS2的索力变化速率相对GZS3要平缓的多。

(2) 整个索穹顶提升施工过程中,始终保持结构呈“ω”形,分析中发现,该状态下中撑杆和外撑杆绝大部分时间处于悬挂状态,后期出现的轴向压力也较小,压杆不会出现翻转,因此整个施工过程中,结构整体是稳定、安全的。

## 5 索网穹顶张拉成型技术

### 5.1 索杆的地面拼装

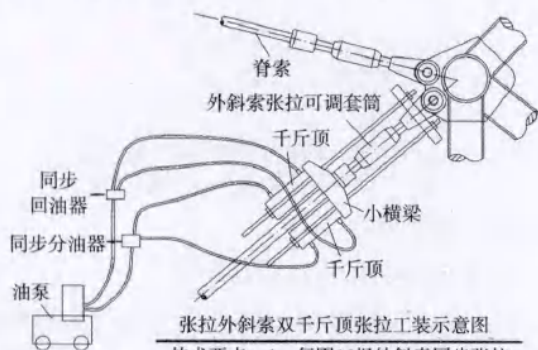
为减少高空作业,拼装时先组装索穹顶主结构,再组装玻璃支承索网次结构。除最外环的脊索、斜索以及玻璃支承次结构的最外环径向索之外,其它拉索的调节装置应调节至拉索制作时的无应力索长位置,然后组装就位。地面组装时应严格控制拉索长度和索夹位置,索夹安装应严格按照索体表面的索夹标记位置进行安装,并用扭力扳手按照计算拧紧力矩进行螺栓的拧紧。

### 5.2 结构的提升牵引

索穹顶提升中,应严格控制提升的同步性及提升过程中结构的形态,以避免施工中结构构件和工装索产生过大内力或者压杆和内拉环出现平面外刚体大位移,发生翻转等情况。

### 5.3 结构的张拉

太原索穹顶的预应力张拉采用同步张拉外斜索的方案,即仅主动张拉外斜索,而脊索、环索和撑杆以及玻璃支承次索网均为被动张拉。现场张拉施工时,每根外斜索上设置张拉横梁和反力装置,由两个千斤顶张拉。为保证同步性,又同一个供油泵通过“同步进、回油分油器”控制这两个千斤顶共同工作(见图17)。



张拉外斜索双千斤顶张拉工装示意图

技术要点: 1、每圈16根外斜索同步张拉  
2、拉时每台油泵控制2台千斤顶

图17 张拉工装示意图

拉索张拉控制采用双控原则:控制结构内力和变形,其中以控制张拉点的索力为主;控制索力和位形,其中以控制索力为主。索力控制,即控制外斜索的张拉力;位形控制,即控制结构中心点标高。直接与拉索相连的节点,其空间坐标精度需严格控制。

考虑到该工程为冬季施工,为防止夏季升温后结构内力下降过大,同时考虑到拉索应力松弛的影响及玻璃屋面对变形的敏感性,与设计单位进行沟通后,施工现场对索穹顶结构进行了10%的超张拉。为控制结构的整体形状,保证同步张拉均匀性,张拉时采用分级同步对称张拉,细分为5级:

初紧状态→20%→40%→70%→90%→110%。其中前4级以张拉行程控制,最后一级以索力控制。由于拉索众多,张拉完成后,可能会出现次索网索力不均匀的情况,需进一步对这些部分利用张拉装置进行局部二次张拉,调整索力。

## 6 结论

(1) 索网穹顶作为中小跨度,可以很好的应用于点式采光顶中;

(2) 结构设计时要重视次索网的作用,分析时简化比较困难,尽量采用整理有限元分析;

(3) 静力分析时,不对称荷载对变形起控制作用,可以提升整体结构在非对称荷载下的刚度,一定程度上降低结构对非对称荷载的敏感性;均布荷载时,整个加载过程中结构未出现刚度突变等情况,结构在该荷载下具有较好的刚度和承载力。

(4) 肋环型索穹顶结构的扭转刚度要弱于水平刚度和竖向刚度,即其平面内刚度较差。肋环型索穹顶结构,各榀平面索桁架之间的侧向联系较少。自振频率比较密集,且集中地落在几个不连贯的区间,出现多个相等频率组。

(5) 针对次索网索穹顶结构特点,利用Ansys程序对上层次索网与主结构的协同工作机理进行了模拟分析。

(下转第20页)



并且加载控制精度满足需求;

(2) 具备能够协调多点运动关系的整体控制能力;

(3) 集成的控制系统能够智能集中操作分散布置在大范围内的液压缸执行机;

(4) 操作人员能够实时监控各液压缸的压力、位移,检测压力、位移的变化趋势、历史纪录等,而且对于泵站各阀件的工作状态也能够实时监控。

## 2.6 研制了国内首台900t提降梁机。

根据项目情况,专门研究、设计制造了提升能力为900t级的自行液压提、降梁机,能够将切割后的旧板提升、降低4m~5m行程,以便于旧板快速破碎拆除。实施过程中运梁车将旧板运至临时破碎场地,提梁机自行就位,由提梁机将旧板提起,运梁车退出临时场地,然后提梁机将旧板提至距地面1.2m左右的高度,下部用编织袋填土做支撑,最后用破碎炮集中解体旧梁。

## 2.7 三维微调液压千斤顶设备辅助梁体精确就位

新梁采用三维微调设备辅助梁体精确就位,设置4台三维微调仪布置于桥梁四角,6台微调从动仪布置微调仪之间(见图15)。调整仪外框焊接固定在均载梁上方。

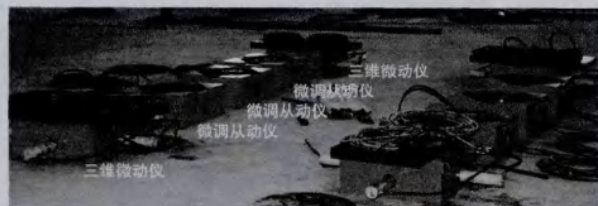


图15 三维微调仪与微调从动仪在桥梁布局情况

(上接第10页)

(6) 将次索网索穹顶的主次结构索网视为一个整体,共同在地面累积拼装,然后利用周边钢结构作为支座,同步牵引结构至高空张拉成型。该方法有利于减少高空作业,降低施工难度,同时大大节约了施工工期,降低了施工措施费,具有良好的经济效益和社会效益。

(7) 研究中发现:在张拉过程中主结构拉索索力监测值与全过程分析模拟值吻合得较好,而由于不锈钢拉索较大的应力松弛,屋面拉索内

三维微调仪垂直方向顶顶力100t行程50mm,水平方向顶顶力20t行程160mm。水平方向顶对称2个油顶油路联通,可完成顶推、锁死、随动三个动作。

新桥就位分两步:(1)由一体机行驶调整进行粗定位,粗定位精度可控制在5cm之内;

(2)由微调整万向千斤顶精确定位,定位精度5mm。

## 3 结语

液压技术和设备的成功集成应用是桥梁整体安装工法的技术核心,该工法在国内首次成功应用于桥梁整体置换,可以最大程度减少现场施工时间,提高施工质量,提高工作区施工和交通通行安全,减少施工对环境的影响,提高施工能力,最大程度降低大量车辆绕行造成的资源消耗和人员时间浪费,社会效益、经济效益显著,具有极高的推广价值。

随着液压技术的进步,计算机自动控制水平的提高,桥梁整体安装工法应不断改进,逐步具备更强大、更稳定可靠的功能,以满足工程需求。

## 参考文献

- [1] 杨冰,杨文忠,宣鹏,秦大航.自行式模块化运梁车桥梁整体安装技术的应用研究[J].
- [2] 杨文忠.异形正交异性钢箱梁在旧桥改造工程中的应用[J].
- [3] 勘立军,徐丽杰,赵静一,卢九章,王昕煜.基于SPMT技术的桥梁驮运架一体机[J].
- [4] 张毅,杨光值,王凤平.金刚石无损钻切技术在桥梁改造中的应用[J].
- [5] 勘立军,卢九章,李建军.桥梁整体置换技术在西关环岛桥梁改造工程的应用研究[J].
- [6] 许凯亮,王凤平,王昕煜,赵静一.基于SPMT技术的驮运架一体机液压系统的节能研究[J].

力与全过程分析结果存在着一定的差距,需在结构张拉完成后,进一步对该部分拉索进行局部二次张拉,调整索力。

## 参考文献

- [1] 中国煤炭交易中心索穹顶结构施工监测报告[R].北京市建筑工程研究院有限责任公司.2011.
- [2] 张曼生.玻璃幕墙索网次结构与主结构共同工作性能研究[D].北京交通大学硕士学位论文.2008.
- [3] 何孜孜,陈忠辉,胡正平.中国(太原)煤炭交易中心索穹顶张拉成型与监测.施工技术[J].2011.