

# 张力结构的预应力分析

钱若军 杨联萍 夏绍华

## 一、概述

与传统的空间结构中的格构式体系相比,张力结构有其显著的结构性状。无论是其工作机理还是结构准则都有它的特点,即张力结构主要是由预应力提供刚度。而通常的格构结构主要是从材料中获得刚度。所以,索系的布置以及预应力的施加是张力结构得以工作的关键。索系的布置应根据结构准则而定。但是,结构确定之后,预应力的分析和控制同样是实现张力结构的重要方面。

张力结构的类型很多,象传统的索网结构、索桁架结构、横向加劲体系以及近年来得到极大发展的张力集成体系。尽管结构的类型很多,形式各异。但是,从结构性状来分析,这些形式各异的结构可以分为二种情况,一种是柔性的索系结构,另一种是张力集成体系结构。前者的结构特点是非常明确的,典型的柔性索系结构如预应力索网。而后者却因集成体系的具体构成而不同,通常的集成体系是由柔性索系和刚性杆件集成。如索桁架结构和横向加劲体系以及近年来发展起来的索穹顶或索网架等全张力体系。

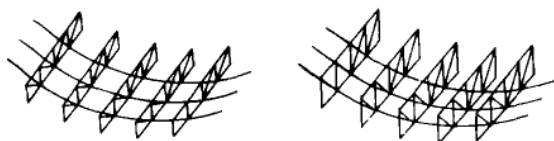


图1 横向加劲索系

图1所示为横向加劲索系,当起稳定作用的横向桁架的刚度很小时,体系更接近于单向索系。与之相反,如果横向桁架的刚度很大时,体系是呈平面桁架的性状。索系与桁架的协同状况取决于索系和桁架的刚度比例。类似地,任意格构结构和索系的集成均可呈现不同的性状。同样,张力集成

体系中的索系预应力产生方式也不同;对于不同类型的结构应有合适的方法施加预应力。

张力结构中预应力的分析不仅是个理论分析问题,它必然与预应力施加方式紧密相关。因此,预应力的施加方式、过程必须经过分析和设计。反之,应注意的预应力的数值分析必然基于施加预应力的可行性之上。这种状况适于所有张力结构,无论是传统的索网结构、索桁架还是索穹顶或索网架体系。因此,预应力的数值分析过程即是施工模拟的过程,至少是其中预应力技术的模拟过程。

张力结构的预应力分析是包括体系结构的预应力分布和相应预应力值的分析。这是从数值分析的意义理解。但是对张力体系结构而言,预应力的分析过程更宜作为体系结构的刚度设计和调整的过程。结构设计的核心是结构的刚度设计,即体系内力流的设计。一个刚度设计得当的结构可能是既安全又经济的结构。

事实上,张力结构的预应力分析应该分别存在于两个状态的分析过程当中。预应力分布和相应预应力值的分析存在于初始几何态和预应力态。在初始几何态分析中,预应力的分布和预应力值是维持结构几何形状的因素。预应力分布和相应预应力值的分析决定了张力结构且主要是柔性索系结构的几何外形。而在预应力态的分析中,预应力则提供刚度。预应力态中预应力分布和相应预应力值的分析决定了张力结构的刚度。在初始几何态分析中,预应力分析是基于 Force Finding 的过程,即寻找与体系结构的几何形状相协调的内力分布的过程。

## 二、张力结构的工作机理和预应力产生过程

钱若军 同济大学建筑工程系

杨联萍 上海现代建筑设计集团

夏绍华 澳大利亚新南威尔士大学

任何能够承受外部荷载的结构必须具有一定的刚度。传统的结构主要从材料中获取刚度,而张力体系结构尤其是柔性的索系结构则是由预应力提供刚度。但是,无论传统的结构还是张力体系结构,其结构刚度与材料特性、结构的拓扑、几何、截面特性和结构边界条件都有关系。结构的拓扑、几何和结构边界条件是决定结构性状的主要因素。即结构呈梁的性状或是拱的性状。另一方面,预应力的产生又与结构的拓扑、几何、截面特性和结构边界条件有关。特别是柔性的索系结构几何外形极大地决定了预应力分布和预应力值。预应力分析中必须考虑这些情况。

确定预应力的分析方法,必须首先确定结构类型及其形式、索系的布置和构造,预应力产生和过程。然后,在此基础上才能建立合理的分析模型和合适的算法。预应力产生的机理和过程却因结构类型而异。张力体系结构能产生预应力的前提是结构应构造形成一个应力回路使之能处于自平衡状态。由于应力回路而使应力不致流失,这样预应力才能提供刚度。当然,这个应力回路可由体系结构和支承结构构成,如传统的预应力索网结构。

习惯上,很容易把对张力结构施加预应力的过程与混凝土结构相联系。在混凝土梁中,采用的张拉方式是可以用于张力结构中的。但是,这绝不是唯一的方法,也不是很好的方法。在张力结构中宜采用改变单元的长度的预应力技术。现以图2所示结构为例说明几种产生预应力的过程。

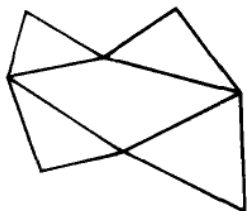


图2 张力结构单元

(一)两节点之间予以相对位移

对自平衡结构的两节点之间给予一作用使该两节点之间产生一相对的移动值  $S$ ,一般使得这两个节点之间的距离减小了  $S$ ,然后在这两个节点之间挂索。释放使这两个节点产生移动的外部作用,挂上的索段即处于张力状态,其它构件也处

于应力状态,图3。

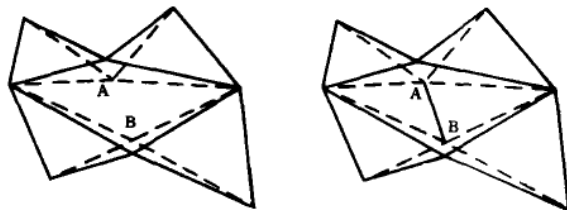


图3 两节点之间予以相对位移

由于产生相对移动的二个节点在相对方向上的刚度通常是不相等的。因此,在相同的外部作用下,两个节点的相对移动总量为  $S$ ,对其中每个节点而言,其相对移动与其刚度成反比。必须注意的是,这种预应力施加方式是使其产生相对移动的任意外部作用。外部作用下,二节点之间没有任意连接,当外部作用撤消后,挂上的索段才起结构的作用。

(二)张拉两节点之间索段

张拉自平衡结构两节点之间索段,以索段的预应力值作为控制参数。张拉索段的方法常用于一般的张力集成体系。两节点之间索段的应力达互控制值时释放外部作用,索段即处于张力状态,其它构件也处于应力状态,如图4所示。

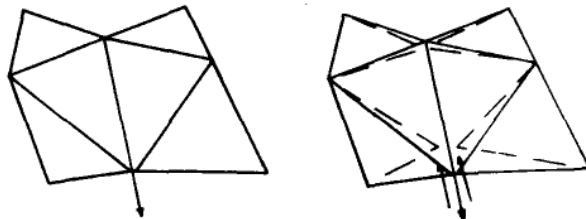


图4 张拉两节点之间索段

(三)张拉两节点之间索段使两节点相对变位

与上述预应力施加方法不同之处在于产生二节点相对位移的原因是这二节点之间的索段的长度的改变。二节点相对变位过程中,索段始终起结构的作用。相类似的是这二个节点的相对变位是节点之间索段长度的改变量。但是,对于其中任意节点的改变是与该节点在相对方向的刚度成反比。这种方法常用于一般的张力体系。如图5所示。

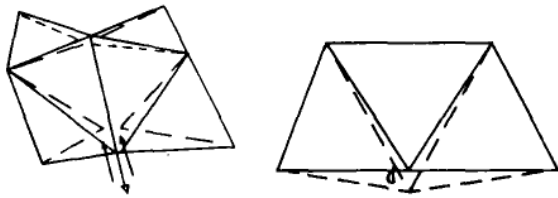


图5 两节点之间二节点相对变位

(四)张拉支座边索

张拉支座边索索段的方法类似于预应力混凝土梁的张拉技术。张拉支座边索的方法常用于单层索网结构。由承重索(主索)和稳定索(副索)组成的单层双曲面索网结构,无论是初始几何态还是预应力态,预应力都是通过张拉支座锚固端处的边索而产生的。索网结构中,通常以边缘构件或支撑结构作为其自平衡体系的一部分。在张拉边索时,也以边缘构件或支撑结构作为平衡构件。在张拉边索时,边缘构件或支撑结构的刚度很大,保证其不变形。这样,将边索按设计量拔出时,整个索网便产生了预应力,如图6所示。

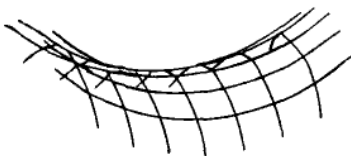


图6 张拉支座边索

对索网结构可张拉其承重索,也可张拉其稳定索,或二者同时张拉。张拉需分批对称进行。边索的拔出量决定了预应力值。

在由刚性的杆系结构或梁系结构和张力集成体系中,如有边缘构件或支撑结构作为其平衡体系,那么,张拉的方式与索网是一样的。但是,张力集成体系是自平衡的,则无论拔出量还是张拉控制值均有所不同。

三、自平衡分析

由于在预应力分析中一般难以做到与施工过程绝对一致。对于预应力索网、张力集成体系结构:如索穹顶结构、索网架结构等形式的集成体系结构,又如横向加劲索系、索桁架等体系结构,预

应力的产生方法和过程是不同的。在预应力的分批施加阶段间,预应力态也有所不同。在实际的预应力过程中,体系结构是在适应,结构在改变形状以和预应力分布协调。这一过程在理论上通过自平衡分析才能解决。事实上问题非常简单,当结构中不论以什么方式产生内力结构均有反应,预应力只是利用外部作用产生内力的一种方式。但是,反应因结构,主要是结构的刚度和刚度分布而异。刚度非常小的柔性索系通过变形来和预应力分布协调,形成一个满足平衡条件的几何。刚度大的结构则无法通过变形协调,但是,预应力必须重分布才能达到满足几何条件的平衡。

理论分析只能针对其某种状态分析,但在实际结构中,不论进入哪个状态,不管哪类结构,在预应力施加过程中,结构是始终维持平衡的或是进行自平衡的。这是因为每一次施加预应力后,结构的几何态就发生改变,内力态也发生相应改变,结构的刚度也发生变化。但是,从理论上讲,算法的组织能否确切的描述这一过程的变化不能绝对肯定。因此,在预应力分析过程中,或分析结束后引入自平衡分析是非常必要的,尤其对于索系结构。事实上,对于柔性结构,它会产生较大的形状改变,而对于刚性结构,形状改变不大,但是可能产生比较大的不平衡内力。

四、预应力分析模型

预应力分析必须是一个非线性分析过程,不能够简单地把预应力作为外荷载加到结构上,因为,一般施加预应力的过程是一个力和变形共同作用的过程。预应力索参与结构工作,所以对于预应力分析应该首先建立合理的分析模型,组织合理的算法。预应力分析模型与荷载态分析模型相同。非线性分析的基本方程

$$(K_E + K_G) \cdot \Delta U = \Delta R \quad (4.0.1)$$

式中,  $K_E + K_G$  为结构的整体弹性刚度和非线性刚度矩阵;

$\Delta U$  为体系的节点位移增量;

$\Delta R$  为体系结构在外部作用下产生的不平衡力,或由索的预应力产生的不平衡力,或二者的综合。

对于体系的自平衡过程,应当参考当前应力与假定应力的比值作为一个迭代条件。对体系初

始几何态的分析中,应参考当前几何和设计几何的比值作为一个迭代条件。由此分析可以得出初始几何的期望几何态或预应力设计值。与此同时,尚应根据上述不同的预应力过程确定外部或内部边界条件。

五、分析算法

预应力分析涉及到分析的算法。通过算法来模拟实际的预应力施加过程,由于张力结构类型和性状各异,预应力的分析算法也不尽相同。但是,对于柔性张力结构预应力的分析算法分为初始几何态和预应力态两部分。初始几何态的部分主要是找形(Form Finding)的过程,而预应力态的分析通常是非线性分析,也需要一个找形的过程。对于索穹顶和索网架完全不同,索穹顶的预应力分析应该与其造型同步。而索网架的分析则只能是对单元进行分析,然后再对整体结构进行分析。

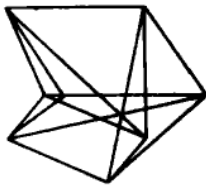


图7 上弦正放、下弦斜放截角四角锥体集成单元

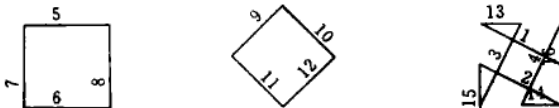


图8 上弦正放、下弦斜放集成单元的单元编号

六、算例

现以图7所示上弦正放、下弦斜放截角四角锥体集成单元为例说明上述三种预应力过程。在这三种预应力过程中,均对斜索施加作用。第一种预应力过程,两节点之间相对移动1.0cm,第二种预应力过程,张拉两节点之间斜索40.0kN,第三种预应力过程,张拉两节点之间斜索使两节点相对移动1.0cm。表1为计算结果。

预 应 力

杆号	第一种预应力过程产生的预应力	第二种预应力过程产生的预应力	第三种预应力过程产生的预应力
1	-224.2342	-18.0483	-134.3792
2	-224.2342	-18.0483	-134.3792
3	-224.2342	-18.0483	-134.3792
5	-224.2342	-18.0483	-134.3792
5	64.8158	19.9062	51.5842
6	64.8158	19.9062	51.5842
7	64.8158	19.9062	51.5842
8	64.8158	19.9062	51.5842
9	122.1937	9.8067	72.9968
10	122.1937	9.8067	72.9968
11	122.1937	9.8067	72.9968
12	122.1937	9.8067	72.9968
13	143.1086	11.5469	86.0275
14	143.1086	11.5469	86.0275
15	143.1086	11.5469	86.0275
16	143.1086	11.5469	86.0275

HVM 信息

国际会议信息

国际桥梁及结构工程协会(IABSE)学术讨论会

时 间:2002年9月11—13日

地 点:澳大利亚墨尔本

主 办:IABSE 澳大利亚小组

议 题:走向更好的建筑环境、创新、持续性、信息技术。包括以下问题:运输结构、文化中心、体育场馆、资源工业结构、能源生产结构、新材料、灵巧材料与结构等。

联系地址:IABSE 2002 Symposium, Melbourne, ETH Honggerberg, C-8093 Zurich, Switzerland

传 真:0041-1-6331241

电子信箱:secretariat@iabse.ethz.ch

网 址:http://www.iabse.ethz.ch/conferences/melbourne