

张力膜结构的全过程集成分析及其策略研究^{*}

胥传喜

(河海大学 南京210098)

摘 要 本文从全过程分析的角度探讨、分析了张力膜结构的形状判定、荷载态分析及裁剪分析三方面的内容及其相互关系,提出了全过程、一体化集成分析的思想,并就全过程分析中各个技术关键的实施策略进行了研究。

关键词 张力膜结构 形状判定 荷载态分析 裁剪分析 全过程分析 策略

一、引 言

张力膜结构(Tensioned Membrane Structure)是以建筑织物——膜材为张拉主体,并与支承杆件及拉索共同组成的结构体系。结构的刚度由几何外形及张拉预应力提供,是一种典型的“由形状产生强度”的结构型式。尽管这种结构俗称为帐篷结构,但现代意义上的张力膜结构已远远超出人们传统观念中的“帐篷”,这一方面是缘自于材料本身性能的改善,现代膜材具有防水、透光、阻燃以及性能稳定等一系列特点,使得“帐篷”成为永久性 or 半永久性建筑;另一方面,来自于造型的新颖性和巨大的覆盖面积。美国丹佛新国际机场的航站楼可以算是张力膜结构的典型代表,巨大的屋盖由2排17根支柱支承的“帐篷”组成,总宽为55m、总长274.3m,外加宽12m长274.3m两侧廊篷,远远望去,造型独特的航站楼既象是丹佛外缘白雪皑皑的落矶山的延续,又宛若印第安人居住的帐篷。国内1997年上海八运会最引人注目的建筑是八万人主体育场,其屋盖平面投影为288.4m×274.4m的椭圆形,中间一有150m×213m的椭圆孔。屋盖平面覆盖面积达36100m²,由59个架立在马鞍型大悬挑钢管结构上的张力膜单体组成,每个单体均由膜材与8根拉索和1根支承立柱构成。该结构由国内与美国Weidlinger公司共同设计,膜材亦由美国进口。随着我国材料科学和计算技术的发展,张力膜结构以其独特的优点和强大的生命力,也必将在国内得以重视和发展。

本文在文献[1]、[2]的基础上,从全过程分析的角度对张力膜结构分析设计的主要方面进行研究,并提出相应的实施策略。

^{*} 文稿收到日期:1998.1.15。

二、张力膜结构的全过程分析

张力膜结构的分析主要包括三大方面: 形状判定 (Form Finding)、荷载态分析和裁剪分析 (Cutting)。以往的工作都将这三方面割立开来分别进行, 即首先求得一个所需的几何外形, 在此基础上进行荷载态的分析。在分析过程中, 对出现压应力的单元采取暂时剔除其对刚度矩阵的贡献, 直至其重新受拉的处理方法。最后再通过裁剪分析, 求出裁剪线。笔者认为, 张力膜结构的形状判定、荷载态分析和裁剪分析是相互联系、互为制约的, 必须从全过程、一体化的角度加以考虑。

1. 形状判定

张力膜结构是一种柔性张力结构, 其刚度由结构的初始几何曲面及初始预应力来提供。传统的分析方法是基于既定的几何外形上进行的。为确定张拉结构的初始几何, 从早期的结构模型的量测开始, 到后来发展成以计算技术为基础的许多找形方法^[3]。为了使结构具备足够的刚度, 以确保结构在荷载态时的种种荷载作用及边界条件约束下, 结构中的任一部分都满足强度要求, 且保证不出现压应力发生皱折退出工作, 除使结构的初始曲面具备一定的刚度外, 还需施加预应力以进一步获得刚度。而张力膜结构的几何外形与其预应力分布及其数值有着密切的依赖和制约关系, 不同的预应力分布、预应力值可以导致不同的几何外形; 反过来, 确定的一种几何形状必然有唯一一组相应的预应力分布。

与此同时, 张力膜结构对几何外形又非常敏感, 几何外形的微小改变可能引起内力的较大改变。因此, 如果在既定的几何外形基础上施加某组给定的预应力以进一步获得刚度的话, 结构的几何形状与所施加的预应力将是不平衡的。为取得平衡, 结构的几何外形及其预应力都将改变, 以取得新的几何及相应的预应力分布和预应力数值。这样, 荷载态计算分析的基点将不再是原来既定的几何, 初始预应力也不是原来所给定的预应力。基于上述分析, 张力膜结构的全过程分析的第一步就是形状判定。在这里, 形状判定不光是寻求一个几何外形, 同时还要求出基于该几何外形的预应力分布值。在形状判定中, 还要包括初始几何曲面的病态判别及其修改。

2. 荷载态分析

在经过形状判定, 确定了结构几何及其相应的预应力分布及预应力数值之后, 就可以进行张力膜结构的荷载态分析。荷载态的分析包括静力分析和动力分析两方面。

张力膜结构静力分析的主要荷载是风载、雪载及膜材的自重, 由于结构是以大位移方式工作的, 故分析要采用非线性的方法。为保证结构始终处于张拉状态, 在每一迭代步中, 均需对单元的受力状态进行判别。国内外有些文献采用了类似于支座移动法中的方法, 即将受压单元退出工作, 剔除其对刚度矩阵的贡献, 直至其重新受拉。本文认为, 在迭代过程中, 若出现受压单元, 说明结构的初始刚度不够, 呈现病态, 应重新回到 Form Finding 中, 对结构进行修改。同时, 由于膜材不是各向同性的, 故还要考虑材料主轴与单元局部坐标之间的欧拉角。而材料的主轴方向又与裁剪式样有关。因此静力分析与形状及裁剪有着密切的关系。

在动力分析方面, 由于张力膜结构的自身重量很轻, 结构本身对水平地震力与风力具有良好的适应性 (前述丹佛机场之所以采用张力膜结构在很大程度上正是由于地处地震区和强风

区, 而张力膜结构具有吸收地震力和风力的机理), 因而动力分析并不显得十分重要。但正是由于结构自重轻、覆盖面积大、外形复杂多变且大多呈扁平状、刚度较小、自振频率较低、在风荷载作用下易产生较大的变形等特点, 笔者认为, 与传统结构相比, 张力膜结构的风激振动问题或者说风振控制的研究就显得更为重要。

3. 裁剪分析

张力膜结构的全过程分析还应包括裁剪分析。张力膜结构由于其几何外形的复杂性及膜材本身宽度的限制, 结构的表面要由不同几何形状的单片膜材通过高频焊接或缝合而成, 即由二维的膜材通过拼接、张拉来构成三维空间曲面。由于单片膜材的裁剪和连接是在无应力状态下进行的, 而结构张成后膜材必须处于全张拉状态。为保证结构表面不出现皱折而退出工作, 必须选定合适的裁剪式样并确定精确的连接坐标, 这就需要进行裁剪分析。现有的研究裁剪的工作是基于形状判定和荷载态分析之后的特定几何外形上进行的, 即在此特定几何上考虑膜材的幅宽并控制裁剪线最短来寻求一个适宜的裁剪式样, 事实上就是一个施工下料的过程。由于裁剪分析与整个张力膜结构的形状、大小、曲率以及材料性质(幅宽、松弛情况)等诸多因素有关, 同时, 一个既定的形状未必就有合适的裁剪式样, 而裁剪式样及裁剪线的改变又将导致曲面的几何外形、材料的主轴方向及单元划分的相应改变(膜材并非各同性, 材料的弹性主轴方向应与主拉应力方向尽量一致; 裁剪线应作为单元划分的公共边), 而直接影响到形状判定和荷载态的分析。因此, 张力膜结构的裁剪分析不能视同于一般的施工下料, 而应作为全过程分析的一部分。

由上述分析可知, 张力膜结构的分析是一个非常复杂的过程。而现有的研究将这三方面割立开来, 即先找形、再受荷分析、最后施工下料, 稍进一步的将找形与受荷分析部分地结合起来(往往只限于数据传递), 而裁剪则完全另外进行。这就无法处理这样一个现实问题: 在找形及受荷分析时材料的弹性主轴对刚度矩阵及应力的影响无法考虑。即使用力密度法, 也有个弹性主轴(经纬向)的问题, 而弹性主轴恰恰是由裁剪所决定的。因此本文认为应将形状判定、荷载态分析和裁剪分析三大方面作为一个整体, 采用一体化、集成的方法来进行。有限单元法是一种被广泛应用的结构分析方法, 本文以有限单元法为核心, 将初始几何状态的寻找、初始几何对应预应力的求取、曲面修改、荷载态分析、裁剪分析等主要技术关键作为一个整体, 均通过平衡迭代的方法来实现。

三、张力膜结构全过程分析的技术关键及其实施策略

1. 曲面拟合及其策略

曲面拟合的目的是根据建筑师给出的有限的几个控制点或支承边界来拟合一个最初始的几何曲面, 并以此作为形状判定的原始曲面(此时可称为零状态)。在此曲面基础上可通过平衡迭代求取对应的预应力分布及其数值, 或者由给定的预应力值通过迭代求取相应的精确几何(平衡后的状态称为初始态)。曲面的病态判别及其修改也在该原始曲面基础上进行。

曲面拟合的方法有很多^[4]。本文采用双三次Bezier 曲面。

2. 单元剖分策略

三角形单元是一种简单而又十分有效的单元, 可以采用任意多边形域的Delaunay 三角剖

分算法。对于不可展曲面,先进行分割,以曲面的平面度(曲面高度与曲面面积之比值)为控制参数,将曲面分割成近似的平面后再行剖分^[5]。这样剖分出的单元,曲面的曲率越大,单元越密。

在经裁剪分析确定了膜材的裁剪线后,应将裁剪线定义为公共边,重新剖分单元并结合膜材的弹性主轴方向,对结构进行重分析。

3. 弹性主轴的考虑

单元的局部坐标与膜材的弹性主轴方向的夹角与诸多因素有关。初始分析时可根据曲面的外形、膜材幅宽、单元的划分及编号规划等分区赋予给定值,待裁剪式样确定后再以实际情况进行重分析。

4. 由给定几何求对应预应力的策略

根据曲面几何与预应力分布及数值唯一对应的原则及膜结构大变形的特征,采用非线性的平衡模型(Nonlinear Equilibrium Modelling)^[6],给曲面施加一组假想的预应力,控制其几何不变,迭代平衡后的预应力值即为所求。

5. 由给定预应力求对应几何的策略

在曲面找形及病态曲面修改时,有时需要由给定预应力分布及其数值求对应几何,此问题是上一问题的逆问题。将给定预应力施加于假想的初始几何上,经迭代,平衡后的几何即为所求。假想几何与真实几何越接近,迭代的效率及精度也就越高。

6. 曲面的病态判别及其修改策略

曲面病态判别的准则可以是几何、预应力及刚度。几何准则主要是看曲面外形是否符合建筑师的设计意图。预应力准则主要考虑膜材的性能、张拉及支承边界条件能否实施。刚度准则主要看其刚度是否足够满足设计的要求。

曲面的修改仍采用上述NEM,可采用几何控制或预应力控制。

7. 预应力的施加策略

一个设计理想的膜结构应使膜材的弹性主轴方向与主应力方向一致,并尽量使整个膜面处于等张力状态。分析程序中,预应力的施加将综合考虑曲面形状、张拉及支承边界、裁剪式样(主轴方向)等,分区施加。

8. 皱折的防止和处理策略

荷载态的分析仍采用NEM。为保证膜元始终处于张拉状态,防止出现皱折,每一迭代步中均逐一计算膜元的主应力,一旦出现压应力,说明曲面的刚度不足,给出受压单元号(或用图形显示皱折出现区域),返回至曲面修改。

9. 裁剪分析的策略

膜结构的裁剪分析乃是当前的研究热点。基于全过程一体化分析思想的裁剪分析是在充分顾及预应力的施加分区、单元剖分策略及薄膜材料性能的基础上,寻求合适的裁剪式样,并且,一旦确定了裁剪线,需将裁剪线定义为公共边重新进行单元剖分,并以实际的欧拉角重新回到形状判定及荷载态分析程序中,对结构进行重分析。

10. 可视化技术

基于实用化的考虑,本文试图将初始几何曲面的寻找、曲面的修改、结构的预应力分布、裁剪式样及裁剪线等借助于计算机图形技术显示出来,即根据给定的几个控制点,可以生成一个

初始几何图形;借助于策略4,得到相应的预应力分布,预应力的大小以颜色的深浅及数值来表示;若以几何为控制参数修改曲面,可直接在图形上进行。荷载态分析中,若局部出现皱折,亦在图形上显示出来;借助图形技术,还可直接给出裁剪线,并给出相应的裁剪平面图。

四 结 语

本文就张力膜结构形状判定、荷载态分析和裁剪分析三方面的内容及相互关系进行了分析,指出了现有研究工作存在的误区,提出了全过程、一体化集成分析的思想,并就各个技术关键的实施策略进行了研究。其中有些策略如形状判定与荷载态分析的一体化,作者已经实施;有些如图形可视化,尚在进行之中。文中提出的一些思想和策略也可用于其它张力结构如索穹顶结构的分析。

参 考 文 献

- [1] 胥传喜、钱若军. 大跨膜结构及其在国内的研究进展. 河海科技进展, 1992(2).
- [2] 胥传喜、钱若军. 张力膜结构的非线性有限元分析. 新型空间结构论文集, 浙江大学出版社, 1994.
- [3] 钱若军. 张力结构形状判定述评. 新型空间结构论文集, 浙江大学出版社, 1994.
- [4] 苏步青、华宣积编著. 应用几何教程. 复旦大学出版社, 1990.
- [5] 陈永府等. 任意曲面的三角形网格划分. 计算机辅助设计与图形学学报, 1997(5).
- [6] 胥传喜. 张力膜结构的理论模型及其非线性有限元分析研究: [学位论文]南京: 河海大学, 1995. 9.

THE WHOLE-PROCESS INTEGRATED ANALYSIS OF TENSIONED MEMBRANE STRUCTURE

Xu Chuanxi

(Hehai University)

Abstract In this paper, the form finding, load state analysis, cutting analysis and the relationship among them of the tensioned membrane structure are studied; the idea of the whole-process integrated analysis is proposed; and the implementing tactics of the key techniques in the whole-process integrated analysis are discussed.