

ANSYS的索膜结构找形系统研究

阎春平, 李志军, 刘飞

(重庆大学 制造工程研究所, 重庆 400030)

摘要:索膜结构找形在 ANSYS 上实现时, 由于找形过程步骤复杂以及 ANSYS 软件本身的特点, 存在学习周期长, 对用户分析能力要求高的问题。通过分析索膜结构有限元法找形的原理, 总结提炼索膜结构找形的步骤, 给出了其在 ANSYS 上实现的方法, 并且应用 APDL 参数化有限元分析及 UIDL 用户接口定制技术对 ANSYS 进行二次开发完成了找形系统。实例验证了找形系统的实用性和可靠性。为工程设计人员进行找形计算节约了时间, 为以后找形系统的研究和开发提供了思路和参考价值。

关键词:索膜结构; ANSYS; 找形; APDL; UIDL

中图分类号: TU393.3 文献标志码: A 文章编号: 1006-7329(2008)06-0086-04

Form-finding System for Cable-membrane Structures Based on ANSYS

YAN Chun-ping, LI Zhi-jun, LIU Fei

(Institute of Manufacturing Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Form-finding of a cable-membrane simulated by ANSYS is a time-consuming process and requires high user analytical ability. This is due to the complexity of the steps and the characteristics of ANSYS. We analyzed the theory of the finite element method for form-finding, summarized the form-finding steps, and put forward how to conduct it in ANSYS. A system using APDL and User Luterface Design Language (UIDL) based on ANSYS was derived. An example was taken to check the accuracy and practicability of the system. This new system can save the engineering designer time and energy and also provide references for the future work.

Key words: Cable-membrane Structure; ANSYS; Form-finding; APDL; UIDL

索膜结构是 20 世纪 70 年代发展起来的一种新型建筑体系, 是空间结构的重要组成部分, 这种结构形式柔和、轻盈, 已成为现代城市的一道亮丽风景, 广泛应用于各种大型公用建筑, 也常用于各种公园小品、小区景观, 具有很大的发展空间。柔性的膜结构本身没有受压性能, 只有通过施加预应力, 才能使之获得必要的张力刚度, 从而承受外部荷载^[1]。为了使索膜结构具有一定的刚度, 对索膜结构施加预应力, 以使其具有一定的刚度, 确定其初始平衡状态, 便成了索膜结构设计分析中非常关键的一步——即找形分析。找形分析直接影响到后面索膜结构的载荷态分析和裁减, 因此正确的找形是荷载分析与裁剪分析的前提和基础。

目前常采用的找形分析方法主要有力密度法、动力松弛法、非线性有限元法^[2]。非线性有限元法具有

比较好的计算精度, 是目前比较常用的找形方法。ANSYS 是目前在有限元界应用最为广泛的大型通用软件之一, 具有强大的非线性处理能力, 因此研究索膜结构找形在 ANSYS 上的实现具有一定的意义。然而, 正是由于 ANSYS 的通用性特点, 使其对不同行业的专业性模块的分析不具有针对性, 复杂的英文界面和繁琐的分析步骤都给从事有限元分析的技术人员造成了不小的麻烦, 另外, 虽然 ANSYS 具有较强大的前、后处理功能, 但使用者要求具有比较高的相关力学知识和丰富的分析经验, 在几何建模简化等前处理方面需要花费较多的精力, 因此, ANSYS 的学习是一个周期比较长的过程^[3]。基于以上原因, 针对索膜结构的特点, 利用 ANSYS 内部提供的二次开发工具, 开发出一套针对索膜结构找形的参数化设计系统, 必能

* 收稿日期: 2008-05-15

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAF02A03)

作者简介: 阎春平(1973-), 副教授, 土木工程学院博士后, 主要从事 CAD/CAE、企业信息化研究。(E-mail): ycp@cqu.edu.cn
欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

大大方便索膜结构的设计人员,有效地提高设计的效率和质量。

1 索膜结构的找形分析及有限元法的步骤

基于非线性有限元的初始形态设计方法,是将膜面的初始预张力的分布状态作为已知,而来求解与之对应的平衡的形状。在应用中,为了保证最终得到的预张力分布即为初始假定的初始预张力分布,通常设定等应力分布并取很小的弹性模量或者干脆取弹性模量为零,以让软化的膜布在不平衡的预张力作用下能够自由变形,通过迭代计算逐步收敛,最后得到平衡的初始形态,这样得到的膜面就是最小曲面^[4]。对于不存在最小曲面的情况,弹性模量取零会导致迭代计算不收敛。为了既保证迭代计算收敛,又保证最终膜面内的预张力分布比较均匀,弹性模量一般取一个较小值求解,从而得到平衡曲面。

目前,以非线性有限元方法为理论基础的膜结构初始形态设计方法,有支座位移法和节点平衡法两种^[5]。

两种方法各有利弊,在实际操作中,可以综合应用支座位移提升法和节点平衡法,进行找形。操作步骤大致如下:采用小弹性模量技术,用支座位移提升法得到结构的最小曲面,在此结构的几何位形上更新节点坐标释放预应力,然后重新设定结构真实的材料常数和预应力分布,在此基础上进行自平衡迭代求解,当前后迭代的求解结果精度在设定容差内便终止求解,得到的形态便是结构的真实形态。索膜结构找形的程序流程图如图1所示。

利用 ANSYS 对索膜结构进行找形分析时,索单元用 Link10 来模拟,设置单元属性,使杆单元只能承受拉力,当承受压力时,退出计算,由于索内预张力引起的内力远大于重力引起的内力,所以这种单元是可以较好模拟索的。膜单元用 Shell41 (Membrane Shell)来模拟,划分时采用三节点平面单元^[6]。三角形平面单元是目前普遍使用的膜单元有限元力学模型,它比较简单、实用,能够满足一般的计算精度要求,每个节点有 x 、 y 、 z 三个方向位移。杆单元预应力通过设定预应变来实现,膜单元预应力用降温法来实现。

2 ANSYS 的二次开发技术

APDL,即 ANSYS 参数化设计语言,是一种在 ANSYS 环境中使用的解释性高级语言,不仅具有一般计算机语言中的数据读取、操作、判断、循环等命令,而且还具有建模、网格划分、与 ANSYS 数据库交互、宏语言编制及工具条创建等功能^[7]。利用 APDL 的

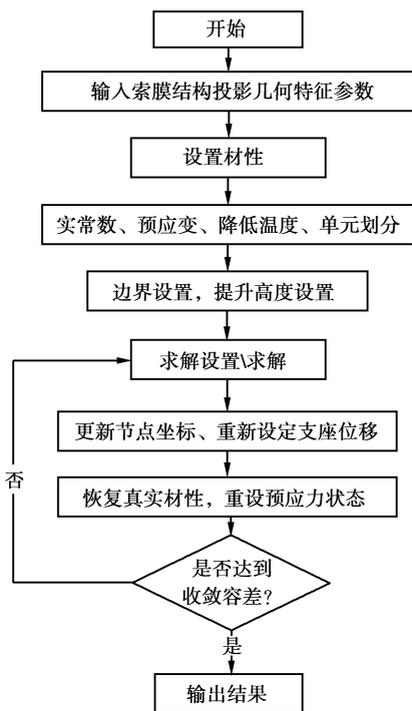


图1 索膜结构找形流程图

程序语言与宏技术组织管理 ANSYS 的有限元分析命令,就可以实现参数化建模、参数化的网格划分与控制,参数化的材料定义、参数化载荷和边界条件定义、参数化的分析控制和求解以及参数化的后处理结果显示,从而实现参数化有限元分析的全过程。在参数化的分析过程中,可以通过简单修改其中的参数达到反复分析不同尺寸、不同预应力比、不同材性、不同单元划分的多种方案,极大地提高分析效率,减少分析成本。

UIDL,即 ANSYS 用户界面设计语言 (ANSYS User Interface Design Language),可以使用户自由地定制富有个性的人机交互界面、编辑对话框,还可以扩展 ANSYS 把自己开发的程序与之联系起来,从而建立有专业背景和发展方向的有限元模块^[8]。UIDL 主要用来完成三种图形界面的设计:主菜单系统及菜单选项,对话框和拾取对话框以及在线帮助系统。

3 系统的设计与实现

3.1 找形程序的设计思路

索膜结构的基本组成元素是索和膜。由于材料的柔性特点,在不同的预应力分布、不同的索和膜应力比组合下便可以创造出不同的建筑形态,因此,索膜结构的初始形态包含两方面的含义:一是结构的建筑几何外形,二是合理的预应力分布态。基于以上原因,在进行二次开发的时候,建筑几何外形和预应力分布设置的模块开发就尤为重要。针对常见的几种张拉索膜结

构形态,提取建立几何投影模型所需要的参数,应提取尽量少的参数,来确定这些结构的形态,这样可以更简洁的创建模型。创建模型所需要的参数采用对话框的方式与用户进行交互,用户输入数值为这些参数赋值。

预应力分布态的设置,索采用设置初应变的方式,用户在赋值时,需要将初始拉力转变为初始应变;膜采用降温法来实现施加预应力的效果。由于边界约束的存在,在给出膜材热膨胀系数的条件下,只要计算出需要降低的温度,就可以等效成需要施加的预应力,计算公式为 $\epsilon = \alpha \Delta t$ 。材料热膨胀系数 α 的取值,由于材料热膨胀系数的作用仅仅是为了从数学上传递温度应力,因此实际的做法没必要取用真实的热膨胀系数,可以根据需要进行设置。求解设置模块需要根据找形过程中的需要,采用对话框进行设定载荷步数。应力刚化、大变形效应、线形搜索等开关则直接打开。对于找形过程中,不需要经常改变的参数,比如根据力的收敛准则,设定的收敛容差,可以直接用常数代替。

3.2 找形程序的具体实现

以 APDL 为基础,可以开发出专用有限元分析系统以实现不同领域的应用。根据索膜结构在 ANSYS 上找形的步骤,本找形系统利用 APDL 语言编写了建立几何模型宏、定义单元特性宏、加载宏、求解设置宏、结果宏等。把这些宏文件和分析程序都编好后放在一个文本文件中,形成宏库,可以利用缩写功能在工具条上建立按钮进行找形分析程序的驱动和调用,实现找形分析流程的过程控制。在宏文件中,当需要给某些参数赋值时,本文使用 Multipro 命令制定了各类参数赋值的对话框,实现人机交互,进行找形分析时根据对话框中的提示输入找形过程中的各种控制参数。利用按钮_BUTTON 参数的值可以编写选择不同按钮时程序应当做出的不同操作,可以实现不同的流程,保证宏文件具有完整的分析处理流程。流程控制方面,使用 APDL 提供的 * IF, * ELSE, * ELSE IF, * END IF 分支判断命令来控制调用宏库中的宏块,实现了整个系统的参数化建模和找形分析,索膜结构找形的程序流程图如图 1 所示。为了方便使用,还可以应用缩写功能,在 Toolbar 上定制操作菜单按钮。用户可以点击 Toolbar 按钮调用宏,驱动和调用分析程序,如图 2。

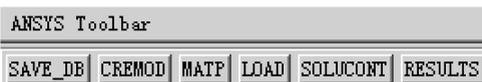


图 2 索膜结构找形程序工具条

本找形系统主要包括的宏文件有:

(1)CREMOD(Create Model)建立索膜结构的几

何模型。需要输入索膜结构的主要的几何控制参数。以鞍形索膜结构为例,需要输入的控制参数有横向跨长、纵向跨长,如图 3。其他形式的索膜结构根据需要提炼出建立模型所需要的参数。

(2)MATP(Material Parameter)定义索、膜的截面和材料特性。需要输入索的实常数(截面、初始虚拟应变)以及材料的弹性模量 E_{x1} 、 E_{x2} 、模材的热膨胀系数 α 、单元划分的尺寸。

(3)LOAD 引入边界条件、支座提升高度以及等效温度载荷。应用 multipro 多参数输入命令及 UIDL 支持的 * cset 命令来完成交互式对话框,提示用户输入支座提升高度以及等效温度载荷的大小。

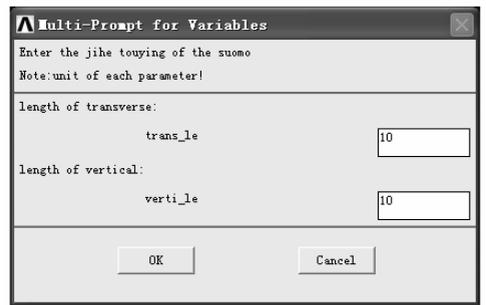


图 3 建造模型对话框

(4)SOLUCONTRL(Solution control)进行求解设置。这一步既可以自己定制对话框给参数赋值,也可以直接调用 ANSYS 已有的对话框,然后设置大变形效应、载荷步数控制、应力刚化效应设置等。

(5)RESULTS 控制输出计算结果。找形的主要结果包括节点的位移、结构的变形图、结构的应力图,用户根据需要选择输出的结果。

4 实例分析

例子:某鞍形索膜结构,其形状如图 4 所示,鞍形膜的两对角线长用参数来表示分别为 Trans_Length, Verti_Length,提升高度用参数 h 来表示,索的弹性模量用 E_{x1} 表示,膜的弹性模量用 E_{x2} 表示,膜材料的热膨胀系数用 α 表示,迭代次数用 n 来表示,支点提升高度用 h 来表示,膜面初始预张力 $\sigma_1 = 20 \text{ N/cm}$,边索初始预拉力 $\sigma_2 = 30 \text{ kN}$ 。其初值见表 1。

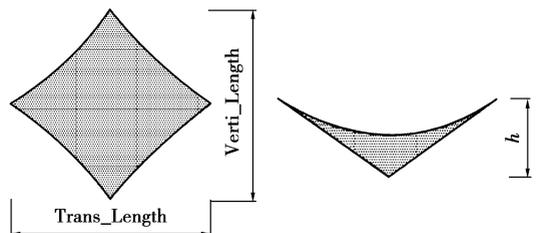
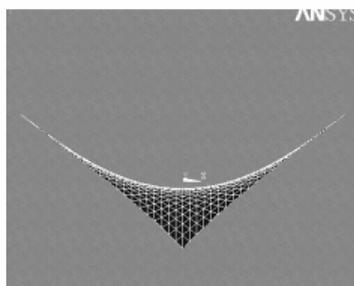


图 4 鞍形索膜结构示意图

表1 鞍形索膜的参数

索膜参数	值
Trans_Length/m	12
Verti_Length/m	10
h	5
$Ex1/N \cdot m^{-2}$	2×10^{11}
σ_1/kN	30
$Ex2/(N \cdot m^{-2})$	3×10^8
$\sigma_2(N \cdot cm^{-1})$	20
α	10
n	20

利用上述开发的找形程序,对该鞍形索膜结构进行找形,找形结果如图5所示



找形后的形态图

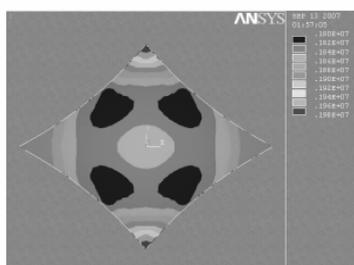


图5 VonMise 应力分布图

最终的应力分布看,膜面的最小应力 1.8 kN/m,最大应力为 1.98 kN/m,约为膜片强度的 5%—10%,是膜材理想的使用应力状态,两者相差 9%,小于工程实践要求的 20%。这也证明了利用该系统进行索膜结构的找形是正确可靠的。

5 结 语

总结了索膜结构有限元法找形分析的步骤,提出了索膜结构找形在 ANSYS 上实现的方法,并且应用

ANSYS 的 APDL 参数化有限元分析及 UIDL 用户界面定制及交互技术,开发了鞍形索膜结构找形分析系统。通过一个具体的鞍形索膜实例验证了该系统的实用性和可靠性。通过该系统的找形分析,可以得到索膜结构初始形态的变形图、应力图及节点坐标。采用该系统对索膜结构进行找形,可以减少设计工作量,提高设计效率。

参考文献:

- [1] 王月. 索膜结构找形分析的有限元法及 ANSYS 实现[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2005, 24(4): 104-107.
WANG Yue. Finite element method of form-finding analysis of cable-membrane structure and realization by Ansys [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2005, 24(4): 107-107.
- [2] 罗辉, 李沐钢. 索膜结构的实用找形方法[J]. 河北冶金, 2002, 130(4): 21-23.
LUO Hui, LI Mu-gang. One useful shape determination method for cable-membrane structure [J]. Hebei Metallurgy, 2002, 130(4): 21-23.
- [3] 王志军, 朱建本. APDL 语言实现钢筋混凝土错层节点非线性分析[J]. 重庆建筑大学学报, 2006, 28(1): 74-79
WANG Zhi-jun, ZHU Jian-ben. Nonlinear FEM analysis of RC staggered joint by using APDL language [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006, 28(1): 74-79
- [4] 董石麟, 钱若军. 空间网格结构分析理论与计算方法[M]. 中国建筑工业出版社, 2000.
- [5] 何志军, 丁浩民. 基于非线性有限元的膜结构初始形态设计[J]. 四川建筑科学研究, 2004, 30(3): 14-16.
HE Zhi-jun, DING Hao-min. Initial shape-stress design of membrane structures based on nonlinear finite element method [J]. Sichuan Building Science, 2004, 30(3): 14-16.
- [6] 魏德敏, 戴维炎. 张拉膜结构的有限元分析[J]. 力学与实践, 2005, 27(1): 46-49.
WEI De-min, DAI Wei-ying. Theoretical analyses of tension membrane structures [J]. Mechanics in Engineering, 2005, 27(1): 46-49.
- [7] 博学弈创作室. APDL 参数化有限元分析技术及其应用实例 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [8] 郭士雄, 李国强. 钢结构设计中对 ANSYS 的二次开发 [J]. 四川建筑科学研究, 2005, 31(4): 4-7
GUO Shi-xiong, LI Guo-qiang. The secondary development of ANSYS in steel structure design [J]. Sichuan Building Science, 2005, 31(4): 4-7

(编辑 胡 玲)