

京内资准字2005—Ly0053号

第14届
全国结构工程学术会议
论文集

第Ⅲ册

**PROCEEDINGS OF THE FOURTEENTH NATIONAL
CONFERENCE ON STRUCTURAL ENGINEERING**

No. Ⅲ

主编：崔京浩

《工程力学》杂志社

第 14 届全国结构工程学术会议论文集目录

4140195113

本次会议论文集收录论文 338 篇, 共计 1698 页, 分装成三册, 每册独立编页。第 I 册载入全套论文集的总目录, 第 II、III 册则只载本册目录。

第 I 册论文 95 篇 (共 570 页), 包括: 特邀报告; 1. 力学分析与计算;

第 II 册论文 117 篇 (共 548 页), 包括: 2. 钢与钢筋混凝土、材料、构件与结构; 3. 岩土、地基基础与地下工程; 4. 设计、施工、优化与可靠度;

第 III 册论文 126 篇 (共 580 页), 包括: 5. 特种结构、车辆、飞行器与船舶结构; 6. 抗震、爆炸、冲击、动力与稳定; 7. 路桥、水工、港工; 8. 试验、监控、鉴定、事故分析与加固; 9. 交叉学科与其他研究成果。

第 III 册目录

5. 特种结构、车辆、飞行器与船舶结构

支承式膜结构整体荷载分析	白玉星 干 珊 高建岭 (001)
索穹顶结构优化设计研究	曹 申 董 聪 (006)
应用 wash-out 滤波器技术控制飞机结构的颤振	丁 千 黄 毅 王冬立 (012)
用耐久性分析确定飞机结构的检修周期	李 仲 陈 莉 聂掌州 薛景川 (016)
开敞式索膜结构自振特性分析	鲁 睿 吴 涛 邵向谦 汤红军 (019)
超长厂房预应力楼盖设计及检测	秦士洪 龙贤能 李唐宁 皮大祥 (027)
基于振型数据的塔架结构损伤数值模拟分析	苏冀志 杜守军 (035)
考虑连接刚度筒壳稳定性分析	王提敏 何国军 竺润祥 吴善幸 (039)
轻质材料制作的实心桥脚舟的静力分析	韦忠煊 沈 庆 李 跃 孙 鹰 丁世海 (043)
浅析膜结构的找形与设计	熊 维 (046)
现代军用飞机结构耐久性/损伤容限规范要求之理解	薛景川 李 仲 (050)

6. 抗震、爆炸、冲击、动力与稳定

圆板的振动分析及其在工程中的应用	包忠有 (055)
隔震技术在广州大学行政办公楼 A 栋的应用	蔡北海 张季超 郭曼丽 (058)
轻质加气砼的实验研究	蔡汝铭 陈 铭 张海波 孙金坤 (062)
大跨度砖混建筑物的抗震加固	陈 婧 王卫东 唐立新 (066)
基于土与结构动相互作用的隧道抗震研究	邓 芃 刘 艳 (069)
楼板厚度对设置加强层的超高层结构抗震性能的影响分析	邓志恒 万云芳 向 平 李云峰 (074)
周边双层中部单层球面网壳非平稳随机地震响应	杜元增 魏德敏 (079)

基础隔震层软碰撞对结构反应的影响.....	韩 淼 王秀梅 伍大维 (085)
复合隔震技术在大开间住宅方案中的应用.....	何明胜 申继红 汤建平 石 磊 (089)
高墩桥梁地震反应分析.....	李 茜 王克海 韦 韩 (093)
金属圆筒轴向耐撞性研究.....	刘 怡 (097)
弹体侵彻素混凝土靶破坏效应的理论分析.....	秦志海 黄 伟 (100)
跨海钢拱桥的地震反应分析.....	宋 波 李 悦 (104)
采用粘弹性消能支撑进行海洋平台的振动控制研究.....	隋杰英 孟 珣 (108)
带转换层高层建筑结构的弹塑性地震反应分析.....	唐兴荣 姚江峰 (112)
近断层竖向地震动作用下桥梁支座受力分析.....	王必军 窦慧娟 李新乐 (118)
非均匀偏心配筋砌体结构地震反应影响参数分析.....	王焕定 白秀芳 于德湖 (122)
强动载对工程结构的影响问题综述.....	王 岩 周继凯 吴胜兴 (127)
渡槽结构模型动力特性试验.....	王瑜波 袁文阳 (133)
建筑结构基于性能的抗震设计.....	吴平川 魏翠玲 (137)
带缝钢板剪力墙抗侧刚度和承载力的计算.....	温沛刚 魏德敏 (141)
不同湿度条件下混凝土动态拉伸特性研究.....	闫东明 林 皋 (147)
平面钢架失稳过程分析及增强方法.....	杨 刚 张爱锋 熊保林 (151)
浮山县广播电视中心消能减震分析.....	姚幸海 隋杰英 厉 伟 (156)
固体导弹发动机药柱表面裂纹稳定性分析.....	袁端才 唐国金 蒙上阳 李海阳 (160)
矩形板边混合支承时的固有频率.....	包忠有 (167)
带裙楼阻尼控制体系地震反应分析.....	邓志恒 向 平 万云芳 李云峰 (171)
输电塔—导线体系中导线的地震反应分析.....	岳茂光 王东升 李宏男 翟 桐 (175)
CNG 气瓶铝胆跌落仿真分析.....	张 振 高建岭 王晓纯 (181)
基于神经网络的结构地震反应仿真研究综述.....	赵 轩 姬淑艳 李英民 董银峰 (185)
H 型截面梁局部屈曲分析.....	张爱锋 吴 强 杨 刚 (190)
结构在强动载下的研究热点综述.....	张顺祥 周继凯 吴胜兴 (194)
预压装配式预应力混凝土框架抗震性能试验分析.....	张瑜中 徐远征 柳炳康 (201)
阳逻长江公路大桥抗震性能分析研究.....	郑史雄 (205)
复式提篮拱桥体系振动特性分析与比较.....	钟轶峰 殷学纲 陈 准 (210)
北京老山自行车馆屋盖风振系数分析.....	周 颖 刘锡良 (214)
设置 FPS 隔震支座的巨型框架减振结构抗震性能的研究.....	邹宏德 蓝宗建 (220)
钢筋混凝土桥墩抗震性能的试验研究.....	左晓明 叶献国 汪日光 王海波 孙利民 闫兴非 (224)
基础隔震结构地震反应分析的 PUSH-OVER 方法.....	桂国庆 吕 憬 (228)

7. 路桥、水工、港工

基于神经网络方法的钢桁梁桥损伤定位研究.....	淳 庆 邱洪兴 (233)
基于交通安全的道路线形分析.....	邓洪亮 尹金宽 谢向文 郭玉松 (239)
某连续箱形梁桥体外预应力的加固分析.....	季金文 王克海 叶英华 李 茜 (244)
采用定向钻机穿越高速公路路基铺设拱桥拉索套管施工技术.....	金国海 (249)
超重车辆作用下钢筋砼双柱式桥墩受力分析.....	江祥林 刘玉华 李娟燕 (254)
机场道面随机振动响应研究.....	李伟民 许金余 (257)
缆风对钢管混凝土拱桥稳定性影响初探.....	李元兵 李亚东 (261)
钢桁梁桥动力特性试验与分析研究.....	王根会 (266)

一种基于频率测量的渡槽结构损伤识别方法	王 鹏 杜守军 (271)
赣江西支特大桥桥梁结构地震分析	刘玉华 魏建华 (276)
墩梁固节点结构的有限元分析及模型试验研究	阮江涛 丁淑蓉 李鸿琦 张振宇 佟景伟 (280)
利用横波地震检查检测路基施工质量的研究	宋顺德 孙国钧 (284)
波形钢板预应混凝土连续箱梁桥设计与建造	万 水 卢炳灿 张恒平 蒋正国 (289)
斜拉索单根张拉施工控制技术研究	王 鹏 王根会 (294)
万家寨取消发电引水管道伸缩节分析研究	王春涛 (299)
高等级公路中通道结构分析及选型的探讨	王砚桐 (304)
西安市朱雀路-含光路立交工程施工技术	赵建平 (309)
神经网络参数对结构损伤诊断影响的研究	朱尚清 王根会 (313)
空间有限元法在桥墩顶部防裂设计中的应用	刘玉华 (318)

8. 试验、监控、鉴定、事故分析与加固

河口黄河特大桥施工控制	陈兴冲 王常峰 赵船辉 徐 聪 (322)
表面硬度法检测建筑钢材强度的研究	崔士起 杜 涛 车光临 (326)
某框架结构厂房的加层扩建与加固	杜 婷 刘 捷 帅小根 汪志香 (332)
利用神经网络进行框架结构损伤识别的研究	范进胜 杜守军 (336)
预应力钢板箍加固 RC 短柱 ANSYS 数值模拟	郭子雄 张 杰 杨 勇 (341)
山区高速公路的病害原因和应对措施	贺玉辉 (346)
磷酸盐材料在机场道面修补中的应用	来 源 桑宝岩 胡功笠 孙 伟 (351)
军队营房工程外墙外保温节能体系材料性能分析与检验	李尔青 来克明 叶树文 魏 兰 易风华 (355)
建筑结构自适应控制实验研究	李瑞瑞 钟 昕 刘栋栋 (359)
新型节能混凝土夹芯板 (CS 板) 内埋置膨胀螺栓的抗拔与抗剪承载力的试验研究	李砚波 夏宝阳 李志国 戴自强 (365)
某七层框架切除一二层内柱改造简介	刘金铃 丰安生 (369)
长和大厦的加层加固设计	刘晶波 杜义欣 费毕刚 李 彬 谷 音 (372)
飞机结构多处损伤检测技术研究	刘秀丽 王俊安 陈 莉 (376)
考虑二次受力碳纤维布加固钢筋混凝土梁抗弯试验研究	鲁采凤 刘 颖 袁广林 刘玉洋 (380)
混凝土应力松弛量测试装置及方法研究	马 龙 吴胜兴 (384)
中小跨径预应力空心板桥铰缝加固处理方案的比选	彭彦忠 王宏义 (389)
结构在机械和热荷载下热应力测试技术及其应用	沈观林 (393)
面向健康诊断的悬索桥试验模型设计	石 健 孙宗光 栗燕娜 (397)
模糊聚类方法在单机掩蔽库主体结构检测中的应用	宋洪斌 许金余 于 萍 余伟民 (402)
基于统计的结构损伤报警方法研究	宋岩升 孙宗光 (408)
高温 (火灾) 下压弯构件的动力特性研究	孙 强 陆守香 (412)
ALC 板材抗剪性能系列试验研究	田 海 陈以一 (417)
斜腿刚构桥应力监测技术研究	王常峰 陈兴冲 朱东生 夏修身 (424)
摩擦型钢承套承载力与抗滑移的试验研究	王常焕 袁国清 (428)
早期含氯盐钢筋混凝土桥梁现状特征分析	王春芬 刘想胜 (431)
墙体结构裂缝分析研究	王棣生 弓俊青 (434)
高强混凝土简支梁高温 (火灾) 损伤研究	王亚军 滕桃居 余 玲 李赞成 (439)
杭州大剧院钻孔桩静载试验研究	王艳萍 马 林 黄祥海 昭燕军 (444)

混凝土结构受压区钢筋锈蚀损伤动力鉴定	韦树英 张喜德 (449)
预应力混凝土连续箱梁桥裂缝成因分析及防治措施	张亮亮 李新勇 (453)
砌块墙体裂缝原因分析及控制	胥晓军 (458)
应变计扭力补偿技术的精密扭力扳手	薛家麟 薛宗群 (461)
灰色系统理论在混凝土构件耐久性评定中的应用初探	余伟民 宋洪斌 许金余 (464)
混凝土刚架拱桥顶推加固	赵士永 李占文 边智慧 (469)
某钢筋混凝土箱形拱桥病害检测及分析	郑家树 (473)
基于频率改变的桁架结构损伤诊断方法	朱 子 董 聪 曹 申 (477)
单机掩蔽库工程质量模糊综合评定方法研究	杨 俊 许金余 周龙飞 (482)

9. 交叉学科与其他研究成果

建筑结构分析软件 PMSAP 在工程中的应用探讨	崔钦淑 聂洪达 (486)
Auto CAD 的 View 视图在建筑日照分析中的应用	郝淑虹 (490)
浅谈施工企业的信息管理	贾爱景 郑显春 (493)
灌芯混凝土石膏板计算模型与试验工程动力测试	姜忻良 许 岩 张 宇 (496)
粘弹性阻尼材料的物理机械性能及动态特性模拟	李 刚 刘文锋 (500)
世界已建成的最高 100 栋建筑最新排名	李 娟 曾 琿 沈 宇 沈蒲生 (506)
低应变反射波法在桩基工程中的应用	李新华 (511)
导向随钻测量仪在扭一压荷载下的强度校核	任瑞瑞 蔡正敏 杨菊生 (515)
波浪作用下海床的自由场响应和管土相互作用的研究进展	任艳荣 唐晓雯 石 萍 (519)
大射电望远镜反射面结构分析	沈黎元 李国强 罗永峰 (525)
精确武器打击下大型桥梁毁伤仿真研究	王 翔 沈 庆 李聚轩 宁小倩 (529)
海洋平台冰激振动响应的研究	王世圣 冯 玮 时钟民 (533)
考虑混凝土耐久性的建设项目全寿命经济分析	王增忠 施建刚 (537)
多裂纹剩余强度判据在 XX 飞机上的应用	王志智 陈 莉 聂学州 (543)
现代广义预应力结构的理论及应用研究	吴开成 沈佩蓓 庄一舟 邱 凌 (546)
单纤维增强基体增强机理研究	吴平安 卫 东 陶洪明 (555)
我国内地已经建成最高的 100 栋建筑最新排名	徐风波 魏 青 谭光宇 沈蒲生 (563)
英国轻钢住宅的发展近况	赵贞欣 童乐为 (568)
军事工程 Partnering 管理模式及设计方法探讨	周献祥 徐俊广 (572)
小波神经网络在剪切型结构损伤监测中的应用	杜永峰 李 慧 陈文元 (577)

支承式膜结构整体荷载分析

白玉星^{*1}, 王 珊², 高建岭³

(1. 北方工业大学建筑学院 北京 100041; 2. 北方工业大学建筑学院 北京 100041; 3. 北方工业大学建筑学院 北京 100041;)

摘 要: 文中利用非线性有限元方法分别对骨架支承式膜结构进行了整体分析和膜结构独立分析, 并对两种结果进行分析比较, 对支承式膜结构荷载分析提出建议。

关键词: 支承式膜结构 整体分析 非线性有限元 刚度

Whole Loading Analysis of Supporting-Membrane Structure

Bai Yuxing^{*1} Wang Shan² Gao Jianling³

(1. Department of Architecture, North China University of Technology, Beijing 100041; 2. Department of Architecture, North China University of Technology, Beijing 100041; 3. Department of Architecture, North China University of Technology, Beijing 100041;)

Abstract: By Nonlinear Finite Element, accomplish whole loading analysis of supporting-membrane structure and alone loading analysis of membrane structure. By comparing the two analysis result, bring forward some advice about loading analysis of supporting-membrane structure.

Key words: supporting-membrane structure whole analysis nonlinear finite element stiffness

1. 前言

当今膜结构形式有: 整体张拉式膜结构、骨架支承式膜结构、索系膜结构、索系支承式膜结构和空气支承式膜结构, 或由以上形式组成的膜结构。其中骨架支承式膜结构由钢构件或其他刚性结构起承重作用, 膜材主要起维护作用。就膜结构分析方法而言, 其中初始状态分析可采用非线性有限元法、动力松弛法和力密度法等, 荷载效应分析可采用非线性有限元法和动力松弛法。当为支承式膜结构时, 由于支承结构变形对膜结构内力影响较大, 因此应考虑膜与支承结构协同工作, 只有当支承结构为变形小的刚性体系如钢桁架、拱或网架时, 才可将膜与刚性骨架连接处近似视为固定支承边界, 膜结构部分可以独立刚架部分分析, 文中所提到结构刚性骨架相对弱些, 因此进行了整体分析。

2. 工程概况

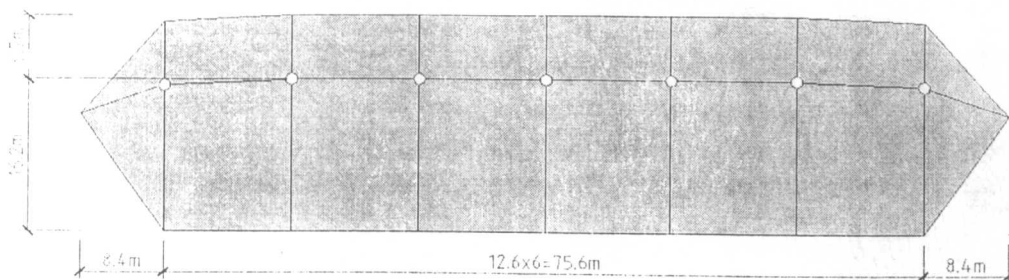


图 2.1 膜结构平面

作者简介: 白玉星(1973), 男, 山西人, 讲师, 学士, 主要从事钢结构工程研究(E-mail:byx@ncut.edu.cn);
王 珊(1946), 男, 北京人, 教授, 主要从事钢结构工程研究
高建岭(1963), 男, 山东人, 教授, 博士, 主要从事建筑结力学研究

该工程为某高校看台，看台台阶下部结构为混凝土框架，看台顶部为钢骨架支承伞状膜结构组成，伞状膜结构跨度 12.6 米，其布置平面如图 2.1，钢骨架部分结构模型如图 2.2，其结构为预应力拉索桁架。

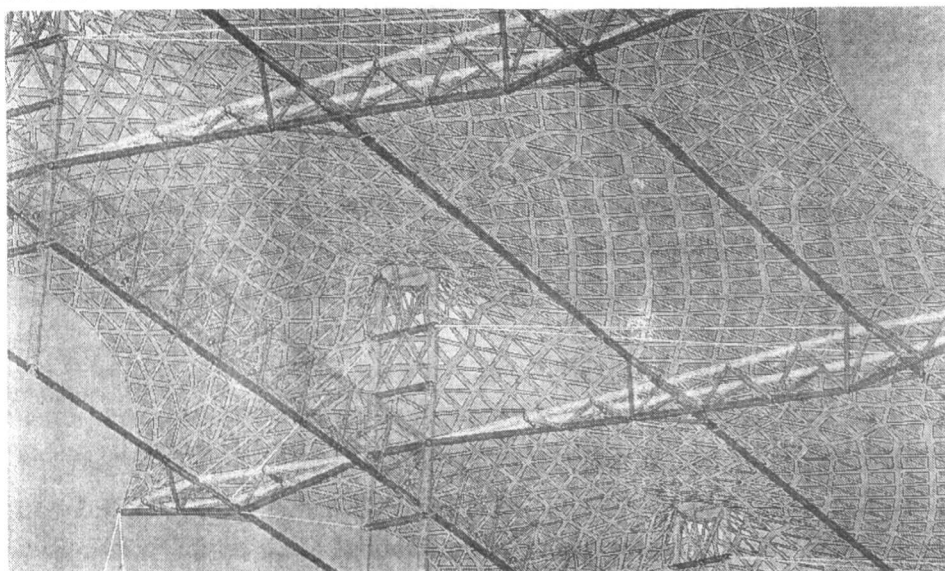


图 2.2 部分结构模型

3. 有限元模型

膜采用考虑小应变大位移的平面三角形单元，索采用考虑大变形几何条件的二节点直线杆单元，钢骨架杆件采用梁单元，分析采用了通用有限元软件 ANSYS，分别对应单元是：Shell41、Link8 和 Beam188 三种单元类型。

4. 分析过程

本结构接近支承式膜结构，但由于伞状膜结构跨度比较大，担心支承结构边缘即使发生微小变形，也会对膜结构内应力分布有较大影响，因此分别对膜结构及支承结构整体协同工作做了分析。

4.1 膜结构找形

先对膜结构进行找形分析，分析方法采用非线性有限元法，把膜结构部分和骨架部分分离开，并把对应结合点位置进行固结，考虑几何非线性，利用支座位移法结合小杨氏模量理论，利用通用有限元软件 ANSYS，其最终找形结果结果如图 4.1。

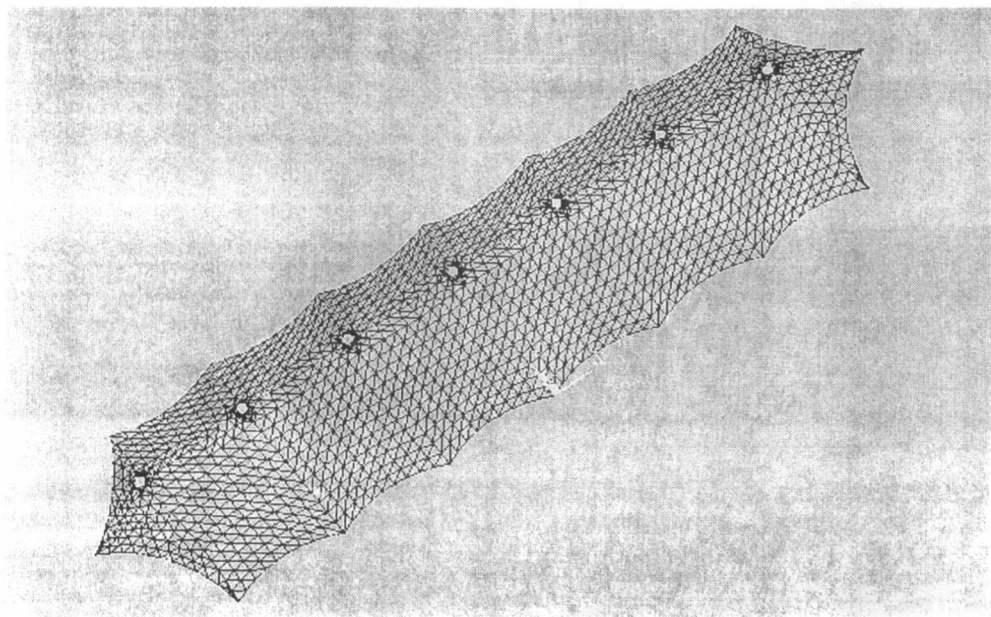


图 4.1 膜结构找形结果

4.2 模型合并

找形后膜结构和钢骨架模型合并, 去掉膜结构原有约束, 形成总体结构模型如图 4.2, 考虑到计算工作量大, 参照膜结构技术规程, 选两种最不利工况进行分析, 第一类组合: 恒荷载+活荷载+预张力; 第二类组合: 恒荷载+风荷载+预张力。

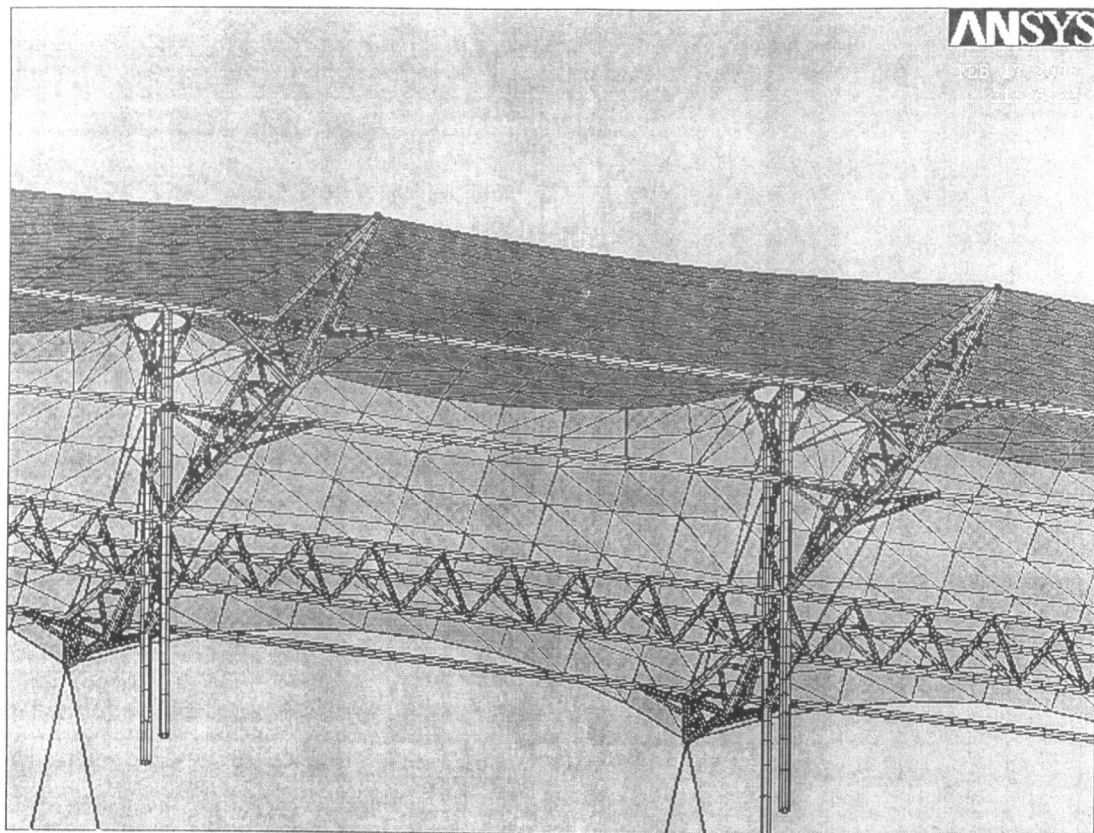


图 4.2 整体结构模型图

4.3 整体荷载分析结果

用通用有限元软件 ANSYS, 考虑几何非线性大变形, 输出结构中膜的位移及第一应力如图 4.3、图 4.4。其中左为第一应力云图, 右边为竖向位移云图。

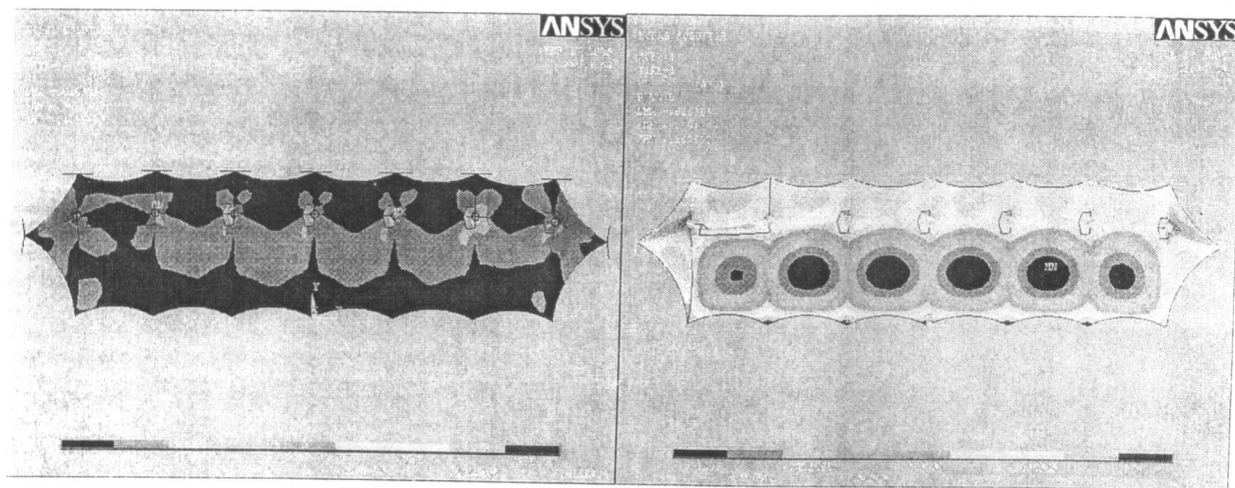


图 4.3 第一类组合: 恒荷载+活荷载+预张力

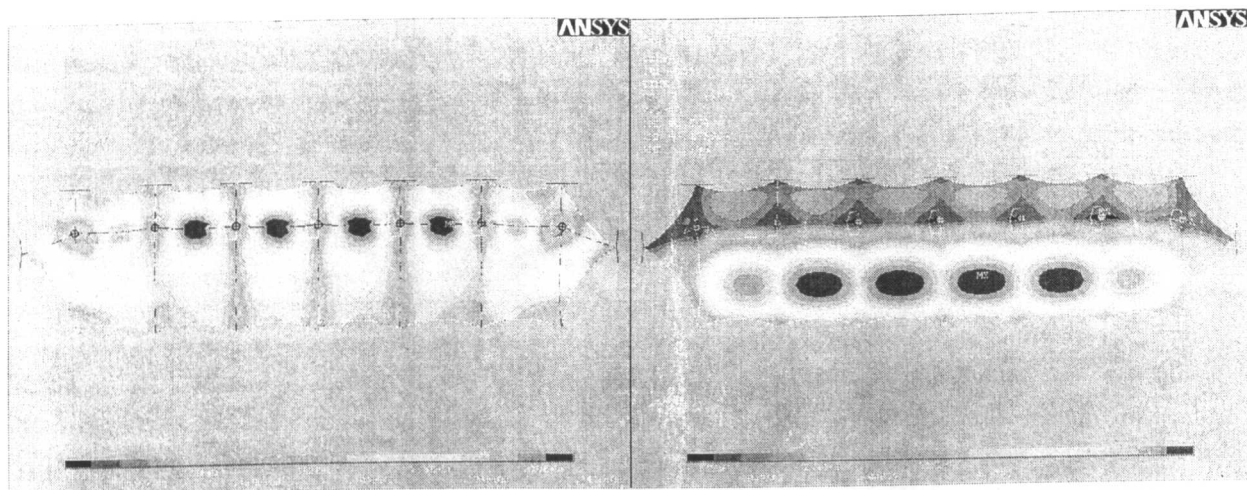


图 4.4 第二类组合：恒荷载+风荷载+预张力

4.4 膜结构单独荷载分析结果

将膜结构与支承结构分开，即膜与支承结构接触之处处理为刚接，考虑大变形，输出结果如图 4.5、图 4.6，图中分别为第一应力云图和竖向位移云图。

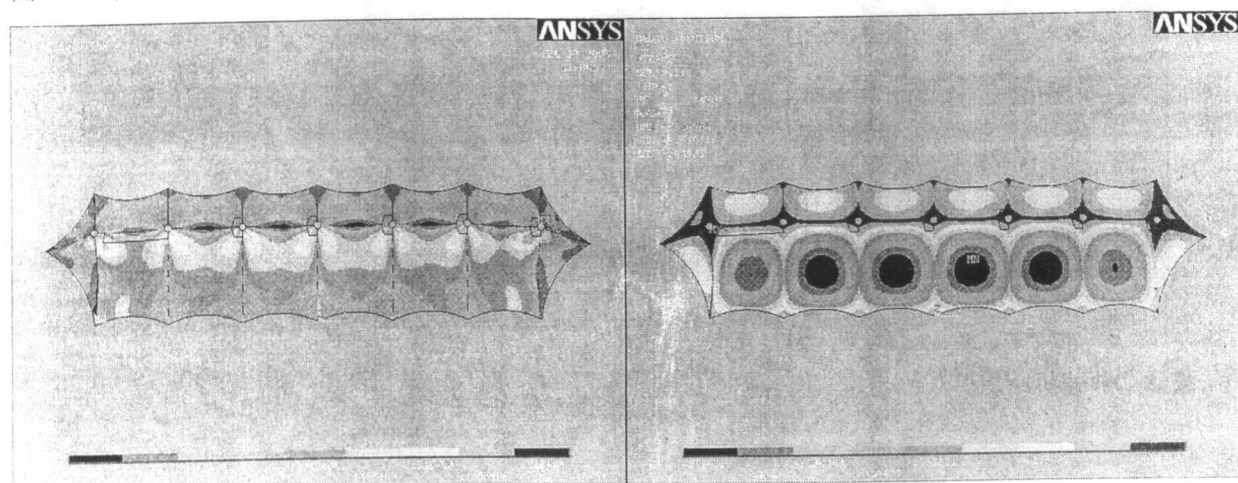


图 4.5 第一类组合：恒荷载+活荷载+预张力

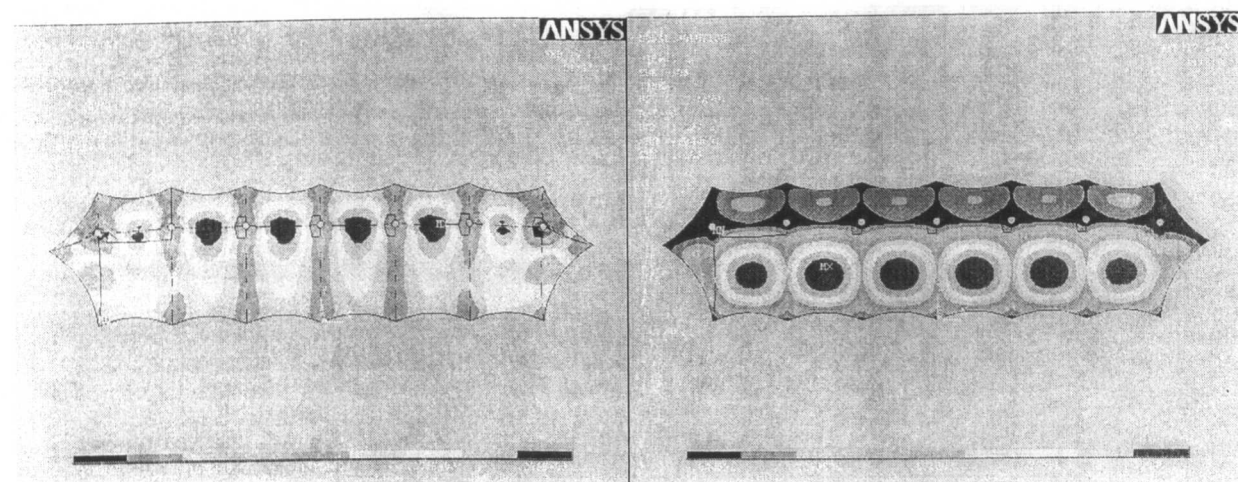


图 4.6 第二类组合：恒荷载+风荷载+预张力

4.5 分析结果比较

将两种分析结果比较见表 5-1 如下, 总体变化不大, 整体分析在、应力和位移方面都高于独立分析结果, 由于独立分析模型对应膜结构支承点为固定, 相对于整体分析来说, 对于点支撑在由拉索桁架提供的点上, 前者相对于后者支撑刚度较大, 因此约束强的相对位移和应力小些, 但由于膜结构相对于骨架支承结构刚度比较小, 对于膜的內力和位移来讲, 相差不大, 但是对于骨架结构受力分析, 把膜结构放入模型中进行整体分析更合理些, 否则支承骨架部分容易过于保守。

表 5-1 支承式膜结构整体分析和独立膜结构分析膜应力和位移结果比较

编号		组合项次	$\sigma_{l,max}$ (MPa)	$\sigma_{l,min}$ (MPa)	$D_{z,max}$ (m)
1	整体分析	恒+活+预应力	19.6	8.61	-0.59
2		恒+右风+预应力	34.7	4.51	1.84
3	膜独立分析	恒+活+预应力	18.1	10.1	-0.51
4		恒+右风+预应力	32.6	4.71	1.18

5. 结论

支承式膜结构荷载分析, 将膜结构与支承结构分开计算, 即支承结构作为膜结构的支承点, 假设它与膜接触之处是刚接, 计算出反力后, 将反力反作用在支承结构上, 进行支承结构分析。这种计算方法对于膜结构来说, 分析结果其应力和位移相比实际情况偏小, 对于支承结构想比实际情况会偏大, 具体分析误差由支承结构的支承刚度决定, 其支承刚度越大, 此种误差越小。在作分析中可以针对其中一种典型工况做比较, 如果误差不是很大, 可以采用分开计算的方法, 这样会提高计算效率。但当膜结构中拉索参与支承结构主要受力体系时, 分开计算的方法会使得支承结构计算误差较大, 建议全部采用整体分析。

参考文献:

- 1 余志祥, 索网结构非线性全过程分析与研究[D], 西南交通大学, 2003
- 2 张其林, 索和膜结构[M], 同济大学出版社, 2002
- 3 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. 8
- 4 刁梦群, 徐崇宝, 孙迪辉, 威海体育中心体育膜结构方案的成形及静力性能分析[J], 哈尔滨建筑大学学报, VOL 34, NO. 4, 2001. 8.
- 5 卫东, 王臣, 向阳, 沈世钊, 建筑膜材的材性试验研究[J], 空间结构, VOL 8, NO. 1, 2002. 3
- 6 向阳, 薄膜结构的初始形态设计、风振响应分析及风洞实验研究[D], 哈尔滨建筑大学, 1998
- 7 膜结构技术规程 CECS 158: 2004[S], 中国计划出版社

索穹顶结构优化设计研究

曹 申*, 董 聪

(清华大学土木工程系, 北京 100084)

摘 要: 本文研究了索穹顶结构优化设计问题, 得到的主要结论可归纳为: 1. 针对比较复杂的 Levy 型索穹顶, 得到了初始内力分布解析公式; 2. 研究了索穹顶结构拓扑优化问题, 在保证建筑造型的基础上得到了合理的初始内力分布; 3. 研究了多因素条件下的关联优化问题, 给出了优化设计策略, 应用于索穹顶结构设计。算例结果证明, 经过优化后的索穹顶结构受力性能良好。

关键词: 索穹顶结构; 初始内力分布; 拓扑优化; 关联优化

RESEARCH ON OPTIMUM DESIGN OF CABLE DOME STRUCTURE

CAO Shen, DONG Cong

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The present paper reports a study on optimization of cable dome structure. For Levy cable dome, which is more complicated, the formulations of initial force distribution are presented. By a study on the topology optimization of cable dome structure, a reasonable distribution of initial force is obtained with a view of architecture. A strategy of optimization is given to solve the relevancy of design variables. It is approved that the load-bearing property of the structure in the case is improved after optimization.

Key Words: cable dome structure; initial force distribution; topology optimization; relevancy optimization

1 引 言

20 世纪 50 年代, 美国建筑师 R. B. Fuller 提出的张拉整体结构体系概念; 设计师 D. Geiger 将这一思想加以发展, 开发出了以幅向索分布为特征的索穹顶结构体系, 并应用于 1986 年为汉城奥运会设计的体操馆和击剑馆工程中; 1992 年在设计亚特兰大奥运会比赛主场馆之一的 Georgia Dome, 设计师 M. Levy 和 T. F. Jing 进一步发展了 Geiger 索穹顶体系, 将侧向刚度较弱的幅向索分布形式改为侧向刚度较强的三角网格单元分布形式, 改善了索穹顶结构的稳定性。

索穹顶结构是一种轻质柔性结构, 对结构施加初始内力, 可使其获得一定的结构形状和刚度。结构构件中只有少数既能抗拉又能抗压的撑杆, 多数构件为只能承受拉力的钢索。结构的设计变量之间存在关联, 修改一个设计变量, 常会引起其他设计变量的变化。如果仅靠多次调整求解, 设计效率低, 且不容易得到较优的结果。因此, 索穹顶结构设计是一个优化设计过程。

* 基金项目: 北京市自然科学基金重点项目 (8021002), 教育部跨世纪人才基金项目和清华大学基础研究基金项目 (JC2001004)
作者简介: 曹 申(1981), 男, 河南人, 硕士研究生, 从事结构优化设计研究 (E-mail: caos03@mails.tsinghua.edu.cn);
董 聪(1964), 男, 陕西人, 研究员, 博士, 从事结构优化设计研究

国内外对索穹顶结构的受力性能、稳定性分析、预应力分布、初始形状确定等方面都有比较系统的研究^[1],而在结构优化设计方面研究相对较少,且大多以 Geiger 型索穹顶为例。袁行飞等^[2]在索穹顶结构设计中考虑了预应力和构件截面同时优化的情况;曹喜等^{[3][4]}在优化设计中提出了对形状、预应力和截面三种设计层次分别采用不同方法进行优化的三步优化策略。M.Kawaguchi 等^[5]提出以结构刚度最大作为索穹顶结构优化设计目标,并进行了索穹顶结构形状优化设计,对各个形状优化变量对结构受力性能和优化结果的影响进行分析。

本文研究了索穹顶结构的优化设计问题,对于比较复杂的 Levy 型索穹顶,给出了结构中的预应力分布解析公式;研究了索穹顶结构拓扑优化问题,在保证建筑造型的基础上得到了合理的应力分布;针对优化过程中各部分优化结果相互关联的特点,研究了多因素条件下的关联优化问题,给出了优化设计策略,应用于索穹顶结构设计。算例结果证明,此优化策略简便易行,经过优化后的索穹顶结构受力性能良好。

2 索穹顶结构的预应力分布

索穹顶结构的预应力分布取决于两个因素:即初始内力分布和构件截面分布。在构件截面分布不变的前提下,初始内力水平决定其承载能力,初始内力水平越高,结构的承载能力通常越大。无论对于 Geiger 型索穹顶还是 Levy 型索穹顶,当其拓扑关系确定之后,内部构件的初始内力分布关系可由几何参数唯一确定。也就是说,给定任意一个构件的初始内力值,其余构件的初始内力也随之确定^[6]。

Geiger 型索穹顶结构的预应力分布可由剖面几何参数(图 1(b))确定,对于更为复杂的 Levy 型索穹顶结构,还需要考虑平面几何参数(图 1(c))。

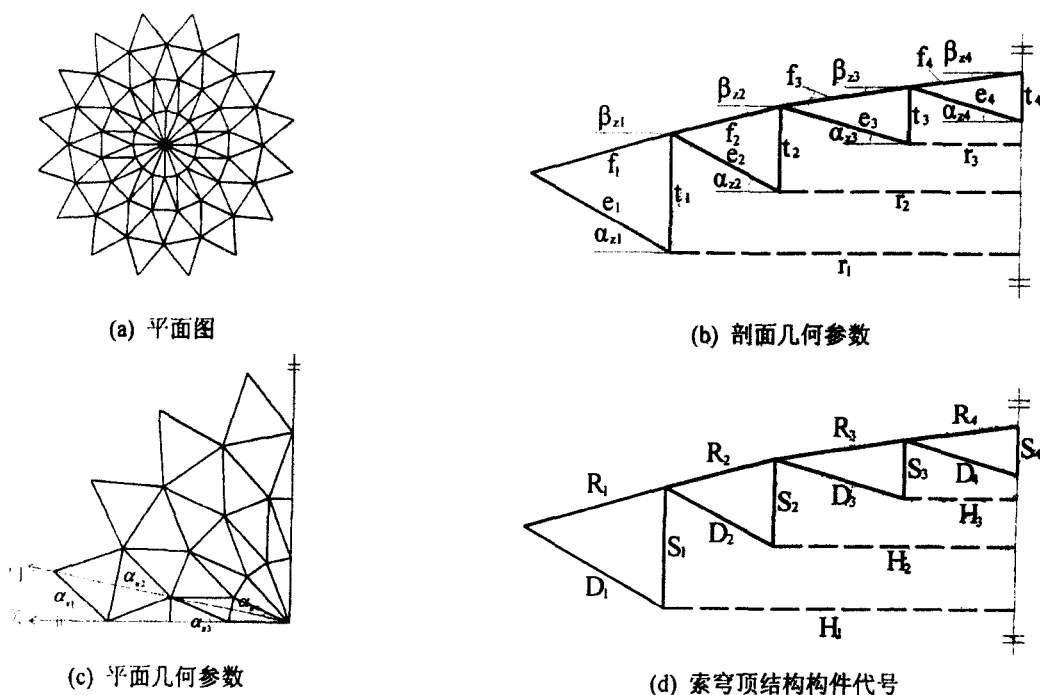


图 1 有中心撑杆的 Levy 型索穹顶

Fig.1 Levy dome with central strut

公式(1)~(4)为有中心撑杆的 Levy 型索穹顶结构初始内力分布解析公式:

$$\text{环索: } \begin{cases} r_i = e_i \frac{\cos \alpha_{xi} \cos \alpha_{xi}}{\sin(\pi/n)} & (i = w, w-2, \dots) \\ r_i = e_i \frac{\cos \alpha_{wi} \cos \alpha_{xi}}{\sin(\pi/n)} & (i = w-1, w-3, \dots) \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{脊索: } \begin{cases} f_{w+1} = e_{w+1} \frac{\sin \alpha_{z,w+1}}{\sin \beta_{z,w+1}} \\ f_w = \frac{f_{w+1} \cos \beta_{z,w+1} + e_{w+1} \cos \alpha_{z,w+1}}{2 \cos \beta_{zw} \cos \alpha_{zw}} \\ f_i = \frac{f_{i+1} \cos \beta_{z,i+1} + e_{i+1} \cos \alpha_{z,i+1}}{\cos \beta_{zi} \cos \alpha_{zi}} \cos(\alpha_{z,i+1} - \alpha_{z,w+1}) & (i = w-2, w-4, \dots) \\ f_i = \frac{f_{i+1} \cos \beta_{z,i+1} + e_{i+1} \cos \alpha_{z,i+1}}{\cos \beta_{zi} \cos \alpha_{zi}} \cos(\alpha_{z,i+1} - \alpha_{z,w+1}) & (i = w-1, w-3, \dots) \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{斜索: } e_i = f_i \frac{\sin \beta_{zi}}{\sin \alpha_{zi}} \quad (i = 1, 2, \dots, w) \quad (3)$$

$$\text{撑杆: } \begin{cases} t_i = 2e_i \sin \alpha_{zi} & (i = 1, 2, \dots, w) \\ t_{w+1} = n \cdot e_{w+1} \sin \alpha_{z,w+1} \end{cases} \quad (4)$$

图 1 所示的结构中 $w=4$ 。

3 索穹顶结构的拓扑优化问题

通常, 结构优化设计的目标是获得最小重量, 但索穹顶是一种轻质结构, 重量本身就比较轻, 再进行优化设计的效果不会很明显。同时, 索穹顶是一种柔性结构, 在一定的预应力水平下, 通过对其进行拓扑优化, 使结构获得合理的预应力分布, 从而获得足够刚度, 具有较高的承载能力。撑杆是受压构件, 应进行长度控制, 最外圈撑杆如果比较长, 有可能对观众造成影响。最后, 结构设计也应照顾到建筑造型需要。

在实际受荷过程中, 随着结构竖向变形的不断增大, 脊索斜度减小, 内力也不断减小, 如果结构不发生强度破坏, 则在脊索内力减小到零值附近时, 结构将发生失稳而失去承载能力, 因此, 预应力设计的下限为使处于完全受荷状态下的结构能够保持张紧并使结构变形处于可接受的范围之内。同时, 斜索和环索内力随着外荷载的不断增大而增大, 如果预应力水平过高, 需要增大截面, 使结构效率降低, 并可能造成撑杆失稳。因此, 预应力设计的上下限都被确定, 如果不能得到满足, 需要对索穹顶结构的构件截面或整体形状进行重新设计。

索穹顶结构的受力状态可分为受荷和非受荷两种状态。在非受荷状态下, 结构内力主要由初始内力和构件重力产生。在受荷状态下, 还要加上荷载引起的结构内力。结构设计应对这两种状态下的结构受力情况都加以考虑。在非受荷状态下, 形状确定之后, 预应力分布即已确定。在承受荷载状态下, 如果结构形状不发生较大变化, 构件内力分布依赖于荷载的分布。因此, 在实际设计中要经过结合实际进行荷载取值并经等效处理后再做受力分析, 不应简单地设定荷载, 使设计变量结果失真。

对索穹顶结构进行拓扑优化需要定义 4 组变量:

1. 环索圈数;
2. 相邻各圈之间距离;
3. 各圈脊索斜度;
4. 各圈撑杆长度;

确定这 4 组变量的过程, 也是确定索穹顶结构几何外形的过程。选取合适数值, 索穹顶结构造型会比较美观。这些变量也决定着结构的预应力分布关系, 因此, 需要同时考虑造型和保证合适的预应力水平两方面的要求。其中, 第 1~3 组变量决定结构外部造型, 应考虑建筑造型要求首先确定; 而后通过考察初始内力分布, 同时考虑设计要求来调整撑杆长度。

4 索穹顶结构在多因素条件下的关联优化问题

索穹顶结构的设计变量有:

1. 撑杆长度;
2. 初始内力值;
3. 截面形状和尺寸。

它们之间存在一定的关联关系,为了能够有效且迅速地进行优化,需要分步骤进行优化。本文选取一个有中心撑杆的 Levy 索穹顶结构(图 1),结构直径 120m,脊索斜度从外圈到内圈分别为,0.24,0.20,0.16,0.12,其余尺寸见表 1。优化设计步骤如下:

1. 考虑设计要求,选定初始设计参数。撑杆长度 $\{S_i\}$ 和初始内力值均取可选域内最大值。截面面积 $\{A_i\}$ 可以根据初始内力分布(见表 2)的大小关系乘以一定系数来确定。由于没有设定强度破坏准则,截面面积可以在后期进行调整,截面调整对重量影响较小,基本不影响优化计算。
2. 进行预应力优化设计。最内圈斜索(D_4 ,见图 1(d))初始内力选取为 500kN,此时结构预应力为 500Mpa。拉索设计强度取为 $\sigma=9.3\times 10^5\text{ kN/m}^2$ (钢索的屈服强度 $\sigma_y=18.6\times 10^5\text{ kN/m}^2$,设计强度取屈服强度的 50%左右)。最大索力 $\sigma_{i,\max}$ 如超过设计强度值,应减小预应力系数,预应力系数 $\lambda_0=\text{初始内力值}/\text{截面面积}$ 。减小后的预应力系数 $\lambda_i=\lambda_{i-1}\cdot(\sigma_i-\sigma)/\sigma$, $i=1,2,3\cdots$;如果减小后结构变形超限,则预应力系数应为 $\lambda_i=\lambda_{i-1}\cdot(f_i-f)/f$,其中 f 为结构位移限值,本文中为 $120/250=0.48\text{m}$; $\sigma_{\min}$ 为最小拉索预应力,受荷状态下最小拉索应力 $\sigma_{i,\min}$ 如果超过设计强度值的 10%,说明预应力水平偏高,也应减小预应力系数, $\lambda_i=\lambda_{i-1}\cdot(\sigma_{\min}-\sigma_{i,\min})/\sigma_{\min}$ 。当脊索内力最小值接近零值或结构竖向变形接近位移限值时,预应力优化设计到达下限,预应力水平不再减小。由此确定预应力取值范围。
3. 如果要优化撑杆长度,应在预应力水平较高时开始。
4. 按照设计强度为屈服强度 30%,应用满应力方法进行截面优化设计。在应用满应力方法时,需要特别注意要考虑构件需要在非受荷状态和受荷状态下都能够满足强度要求。脊索等构件虽然在受荷状态下内力很小,但是在预应力状态下受荷并不小。如果只按照受荷状态下的应力进行满应力优化,得到的结果是严重偏小的。
5. 在进行撑杆长度优化和截面优化时,应当同时注意结构位移是否符合限制要求。如果位移超限,应按照位移作为参考值进行优化。

表 1 索穹顶的结构尺寸 (单位/m)

Tab.1 Dimension of cable dome structure (Unit / m)							
相邻各圈之间距离				撑杆长度			
最内圈	次内圈	次外圈	最外圈	S_1	S_2	S_3	S_4
15	15	15	15	15	13	11	9

表 2 索穹顶的初始内力分布 (单位/kN)

Tab.2 Initial force distribution of cable dome structure (Unit / kN)

构件	斜 索				脊 索				环 索		
	D_1	D_2	D_3	D_4	R_1	R_2	R_3	R_4	H_1	H_2	H_3
初始内力	1419	724	406	500	3080	1854	1232	1816	4791	2723	1691

注:最内圈斜索(D_4)初始内力取为 500kN

5 算 例

优化前后结构参数及计算结果见表 3~5:

表 3 结构处于完全受荷状态下优化前后的应力分布 (单位/kN)

Tab.3 Stress of cable dome structure under load (Unit / kN)

构 件	斜 索				脊 索				环 索		
	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	H ₁	H ₂	H ₃
预应力状态下	1800	844	399	383	2666	1414	860	1238	6073	3173	1660
预应力优化后	1072	471	187	117	1048	433	206	273	3617	1770	777
形状优化后 (调整预应力水平)	1511	557	183	76	1027	302	88	92	5545	2249	801
形状优化后 (不调整预应力水平)	1222	459	148	57	791	214	48	34	4403	1814	634
截面优化后	1269	479	157	67	855	247	68	63	4574	1891	672

表 4 索穹顶结构的撑杆长度 (单位/m)

Tab.4 Length of struts in cable dome structure (Unit / m)

构 件	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
优化前	15	13	11	9
优化后 (调整预应力水平)	11	11	10	8
优化后 (不调整预应力水平)	12	11	10	8

表 5 D₄ 的初始内力变化 (单位/×500kN)Tab.5 Change of initial force in D₄ (Unit / ×500kN)

优化前	优化后	
1	不进行形状优化	进行形状优化
	0.477	0.651

6 结 论

根据本文分析,可以得到以下结论:

1. 无论是 Geiger 型索穹顶结构还是 Levy 型索穹顶结构,当其结构拓扑确定之后,初始内力分布关系即完全确定。只需定义结构中任何一个构件的初始内力值,其余构件初始内力值即全部确定。
2. 索穹顶结构的承载能力取决于预应力水平,预应力水平由初始内力分布决定,而结构的拓扑形状决定其初始内力分布。为了获得较大的承载力,需要通过拓扑优化使结构初始内力分布合理。
3. 索穹顶结构拓扑优化需要定义 4 组变量。其中大多需要根据建筑造型确定,拓扑优化的主要变量为撑杆长度。
4. 索穹顶结构的优化变量相互关联,按照本文给出的优化步骤进行索穹顶结构优化,能够较好地解决多因素条件下的关联优化问题。算例结果证明,此优化策略简便易行,经过优化后的索穹顶结构受力性能良好。

参考文献:

- [1]. 卫东,陈昕,沈世钊. Levy 体系索穹顶结构的受力性能研究[J]. 哈尔滨:哈尔滨建筑大学学报,2001.34(4):11~15.(Wei Dong, Chen Xin, Shen Shizhao. Load-bearing property of cable dome [J]. Harbin: *Journal of Harbin University of C.E. & Architecture*, 2001.34(4):11~15. (in Chinese))
- [2]. 袁行飞. 索穹顶结构截面与预应力优化设计[J]. 杭州:空间结构.2002.8(3):51~56. (Yuan Xingfei. Optimum design of cable domes[J]. Hangzhou: *Space Structures*, 2002.8(3):51~56. (in Chinese))
- [3]. 赵宝成,曹喜,顾强. 索穹顶结构的优化设计[J]. 北京:工业建筑. 2002.32(10):60~62. (Zhao Baocheng, Cao Xi, Gu Qiang.

Cable dome structure optimization design [J]. Beijing: *Industrial Construction*, 2002.32(10):60~62 .(in Chinese))

- [4]. 曹喜, 刘锡良. 张拉整体结构的预应力优化设计[J]. 杭州:空间结构,1998.4(1):32~36 (Cao Xi, Liu Xiliang. Optimum design of prestress for tensegrity structures[J]. Hangzhou: *Space Structures*,1998.4(1):32~36. (in Chinese))
- [5]. M. Kawaguchi, I. Tatemichi, P. Chen, Optimum shapes of a cable dome structure, *Engineering Structure* 21 (1999) 719-725.
- [6]. 李绂, 董聪. 索穹顶结构分析研究[C]. 第十二届全国结构工程学术会议, 重庆, 2003: 381~387(Li Fu, Dong Cong. Research on cable dome structure[C]. Proceedings of the 12th national conference on structural engineering, Chongqing, 2003: 381~387 .(in Chinese))

应用 wash-out 滤波器技术控制飞机结构的颤振¹

丁 千, 黄 毅, 王冬立

(天津大学力学系, 天津 300072)

摘 要: 气动载荷结构产生亚临界 Hopf 分岔类型的颤振, 具有较大危害性。本文研究应用 wash-out 滤波器技术, 将非线性机翼的亚临界 Hopf 分岔控制为危害性相对较小的超临界 Hopf 分岔。首先确定在 Hopf 分岔之前实施控制的点; 然后对于引入的 wash-out 滤波控制器, 先按 Hopf 分岔条件确定线性控制增益, 再用规范型直接法得到受控系统的规范型, 由分岔类型与规范型系数的关系确定非线性控制增益; 最后通过数值模拟验证了控制的有效性, 受控系统的颤振幅值大大降低。

关键词: 非线性机翼; 颤振控制; wash-out 滤波器技术; Hopf 分岔; 规范型直接法

FLUTTER CONTROL OF AIRFOIL USING WASH-OUT FILTER TECHNIQUE

DING Qian, HUANG Yi, WANG Dongli

(Tianjin University, Tianjin, 300072, China)

Abstract: The sub-critical Hopf bifurcation, a catastrophic type of flutter, can be induced for structures with aerodynamic force. In this paper, the wash-out filter technique is used to control the flutter of a two dimensional non-linear airfoil, to transfer the sub-critical Hopf bifurcation to be super-critical one of benign type. Firstly, the point at which the Hopf bifurcation to be introduced is determined. Then for the introduced wash-out filter controller, the linear control gain is determined according to the condition of Hopf bifurcation. The non-linear control gain of the controller can be determined based on the relationship of the flutter type and the parameters of normal form of the controlled system, which can be obtained by the normal form direct method. Lastly, numerical simulations are used to certify the validity of theoretical analysis, which shows that the amplitude of flutter of the controlled system is greatly reduced comparing the original system.

Keywords: Non-linear airfoil; control of flutter; wash-out filter; Hopf bifurcation; normal form direct method

1 前 言

飞机结构颤振是在气动载荷作用下, 由于刚度不匹配造成的气动弹性现象, 一般在飞机达到一定飞行速度时产生^[1]。已做的研究工作包括, 应用等效线性化法研究机翼颤振的混沌问题并找出混沌带^[1]; 用 KBM 法、后继函数法和描述函数法研究机翼颤振的时、频域特点^[2-4]; 用胞映射法分析双线结构刚度机翼颤振的全局特点^[5], 等等。作者分析了线性刚度系数对于二元机翼颤振响应拓扑结构即颤振类型的影响, 发现颤振表现为超临界或是亚临界的 Hopf 分岔^[5]。超临界 Hopf 分岔引起的颤振响应是渐变的, 颤振幅值逐渐增大, 对飞行的安全性危害相对较小; 亚临界的 Hopf 分岔引起的颤振响应是突发的, 幅值跳跃到较大的值上, 对于飞行的安全性非常危险, 应予避免。

系统分岔现象非常复杂, 但可以通过一定控制手段来进行调控, 以便推迟、消除或引入某种分岔来改善系统的动力学特性。有目的地引入控制器来改变系统振动特性的分岔控制已广泛应用于生物医药、航空航天、电力系统工程等, 目前常用的控制手段有: wash-out filter 法, 线性和非线性反馈法, 频域分析和逼近方法, 以及标准型理论等。其中 wash-out 滤波器法是一种扩充的线性或非线性状态反馈法, 它

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10272078)

作者简介: 丁 千(1963), 男, 安徽人, 博士, 教授, 主要从事非线性振动和动力学控制研究(Email: qding@tju.edu.cn)

黄 毅(1978), 男, 江西人, 硕士研究生

王冬立(1978), 男, 河北人, 硕士研究生