

异形温室结构的有限元分析

李成志 梁宗敏 剧锦三

(中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要 为了给空间索杆单元杂交结构的温室提供设计依据,以异形结构温室为例,利用大型有限元分析软件 ANSYS10.0 对该温室结构进行了静力线性有限元分析。计算得到 3 种荷载工况下结构主要构件的应力和最大挠度值:上弦杆 $\sigma_{\max} = 170 \text{ MPa}$, $\delta_{\max} = 26 \text{ mm}$;下弦杆 $\sigma_{\max} = 42.5 \text{ MPa}$, $\delta_{\max} = 20 \text{ mm}$;立柱 $\sigma_{\max} = 29.3 \text{ MPa}$, $\delta_{\max} = 20 \text{ mm}$;环梁 $\sigma_{\max} = 55.3 \text{ MPa}$, $\delta_{\max} = 20 \text{ mm}$;檩条 $\sigma_{\max} = 72.6 \text{ MPa}$, $\delta_{\max} = 26 \text{ mm}$ 。应力和变形结果均满足结构强度要求。该有限元分析方法可以推广到类似的温室结构的有限元分析。

关键词 索杆单元; 异形温室; ANSYS 静力线性分析; 有限元分析; 空间钢结构

中图分类号 TU 312.2

文章编号 1007-4333(2007)02-0084-04

文献标识码 A

Spatial finite element analysis of heteromorphous greenhouse

Li Chengzhi, Liang Zongmin, Ju Jinsan

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract In order to provide the basis for designing a greenhouses of cable-truss, an example of the heteromorphous structural greenhouses is given in this paper. The static linear analysis was carried out for the structure by the finite element software ANSYS10.0. The results of the main components' stress and deformation are 170 Mpa and 26 mm, respectively, for the upper pole; 42.5 Mpa and 20 mm for the nether pole; 29.3 Mpa and 20 mm for the pillar; 55.3 Mpa and 20 mm for the circum-girder; and 72.6 Mpa and 26 mm for the purline. The results show that the deformation and stress meet the demand of the structural strength. This method can be popularized to a greenhouses of cable-truss and is feasible and effective.

Key words cable-truss; heteromorphous structural greenhouses; ANSYS static linear analysis; analysis of the finite element; special steel structure

温室作为一种特殊的建筑,在满足强度和刚度要求的前提下,其构件截面越小越好,以降低遮光率。从这一角度来讲,张紧的柔性支撑在温室结构中应有很好的应用^[1]。现代温室大都以大型连栋温室为主,其单栋形状多为立方体,屋顶部为圆弧形或三角形,其结构形式多为桁架结构。索杆结构以张力索和压杆为基本构成单元,通过施加预应力形成结构刚度,是一种具有自平衡内力分布的现代空间结构体系。20 世纪 60 年代 Fuller 张拉整体结构概念首次提出,80 年代 Geiger 索穹顶结构实际工程诞生,近年来大型空间索桁张力结构多次应用于国

内外大型空间结构建筑中^[2]。与传统桁架结构相比,索杆张力结构具有跨度大、自重小、结构轻盈、节省钢材、易维护等优点,是一种很好的结构形式。基于此,笔者设计了一个圆锥形屋顶、八根桁架将屋顶投影圆八等分的伞型空间索桁结构模型。

我国对温室的研究多从光照、温度、气体等环境角度出发,对温室结构的研究较少^[1]。目前对于温室结构的研究常采用平面结构的方法,将温室空间整体结构简化为由柱梁(忽略桁架的横向轴向变形)组成的平面排架结构,这种简化分析简单,但实际上温室主体结构与支撑、连接杆件的刚度接近,若不考

收稿日期: 2006-12-29

基金项目: 国家重大科技项目(2002BA906A17-3)

作者简介: 李成志,硕士研究生;梁宗敏,副教授,博士,通讯作者,主要从事结构工程方向的研究,sea9282@126.com

虑其空间协调作用,将大大降低结构的整体刚度,无论是结构的强度、刚度,还是稳定性都过于保守^[3-4]。ANSYS 软件是集结构、热、流体、电磁、声学于一体的大型通用有限元分析软件,在土木工程中有广泛的应用。ANSYS 软件具有优秀的前处理模块、求解模块及后处理模块,利用人机操作界面可方便地建立结构的三维空间有限元模型,以求解外荷载引起的结构位移、应力和力。本研究利用 ANSYS 软件,采用三维空间钢结构协同作用下的静力分析方法对温室结构进行模拟分析,与实际情况较为接近,旨在得到更为精确的计算结果,并推广类似本索杆结构温室的设计形式。

1 结构整体设计

温室外形为圆柱形,直径 20 m,檐部高度 3.5 m,屋顶部为圆锥,坡度约 18°。四周和顶部均采用 PC 板采光,室内光照分布均匀。经过优化设计的屋

顶结构采用空间索杆杂交结构,形成伞状造型,内部不设柱,用索减小顶部对周边柱产生的水平推力,使受力更为均匀。

温室顶部由八榀桁架组成,每榀桁架夹角 45°,将圆 8 等分。桁架上弦杆坡度约 18°,桁架顶部汇交于 $\varnothing 200 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 的钢管上,钢管长 3.5 m,桁架下端部支撑于立柱顶端,钢管下端通过 8 根拉索连接于立柱顶端,拉索采用 $\varnothing 24 \text{ mm}$ 光圆钢筋。各桁架之间双向交叉支撑采用 $\varnothing 12 \text{ mm}$ 钢筋拉索,以增加屋顶的整体稳定性。桁架上下弦均采用矩形钢管,上弦 $80 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$,下弦 $80 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$,腹杆采用 $\varnothing 30 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ 的圆钢管,桁架立面见图 1。周边 8 根立柱高 2.94 m,采用格构式,截面尺寸、格构缀件尺寸及布置方式见图 2,柱顶端设环梁,对柱顶形成环箍。檩条从顶向下 1~6 选用 Z 形截面(图 3)。檩条 7 采用 $120 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 3.0 \text{ mm}$ 的方钢管。所有钢材均为 Q235F 钢材。

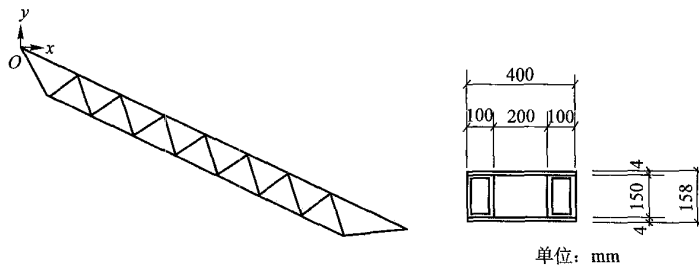


图 1 桁架立面

Fig. 1 Profile of truss bar

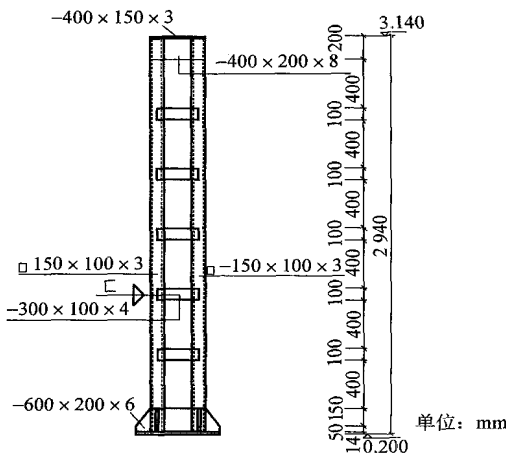


图 2 立柱截面及柱详图

Fig. 2 Section of pillar and pillar

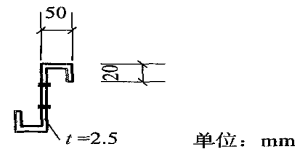


图 3 檩条 1~6 截面

Fig. 3 Section of purlines 1 - 6

2 结构空间有限元分析

2.1 基本荷载

荷载包括恒荷载和活荷载,设计标准值参考民用建筑荷载规范。

- 1) 恒荷载,包括结构骨架自重及 PC 板重,综合考虑取恒载 $q_1 = 0.2 \text{ kN/m}^2$;
- 2) 屋面雪荷载或活荷载 $q_2 = 0.4 \text{ kN/m}^2$;
- 3) 侧墙和屋面上的风荷载,查《手册》^[5]得到垂

直于建筑物表面的风荷载 $W_k = \mu_s \mu_z W_0$;

4) 基本风压 $W_0 = 0.35 \text{ kN/m}^2$, 地面粗糙度为 B 类, 风压高度变化系数 $\mu_z = 0.8$ 。

查《手册》^[5]得风荷载体型系数分别为 0.8(迎风面立柱)、-0.48(迎风面屋顶)、-0.5(背风面立柱)和 -0.5(背风面屋顶)。

由于本温室结构属轻钢结构,且属丁类建筑,本文中未进行竖向和水平地震作用验算^[6],采用设置支撑抗震措施加强结构的整体性和抗震性能。

考虑 3 种荷载工作状况^[7]: 工况 1 为恒载 + 活荷载; 工况 2 为恒载 + 风荷载; 工况 3 为恒载 + 0.85(活荷载 + 风荷载)。

2.2 分析方法

采用 ANSYS 软件中的结构模块和线性单元进行温室结构分析。本研究温室结构是由索单元和杆单元组成的空间杂交结构,所承受的荷载基本为静荷载,风荷载引起的动力响应较小,故采用静力分析方法;同时,结构的变形和应变属于小变形和小应变,故不考虑结构非线性,采用线弹性分析方法。

2.3 计算模型

该温室结构梁、柱、桁架及檩条选用 Beam188 单元。Beam188 单元是一个 2 节点的三维线性梁,每个节点上有 6 或 7 个自由度。前 6 个自由度分别是沿 x 、 y 、 z 方向的平动及绕其轴向的转动,第 7 个自由度是扭(翘)曲量。Beam188 单元是三维线性有限应变梁单元,其基于铁木辛柯(Timoshenko)梁理论,能考虑截面剪切变形,可用于模拟细长梁和粗梁。

屋顶 8 根钢索采用空间铰接 2 节点杆单元 Link10。Link10 单元是一个轴向仅受拉或仅受压的杆单元,使用只受拉选项时,如果单元受压,刚度就消失,以此模拟缆索或链条的松弛。这一特性对于将整个钢缆用 1 个单元来模拟的钢缆静力问题非

常有用。当只需要松弛单元的性能,而不关心松弛单元的运动时,它也可以用于动力分析。Link10 单元在每个节点上有 3 个自由度:沿节点坐标系 x 、 y 、 z 方向的平动,不管是仅受拉选项,还是仅受压选项,本单元都不包括弯曲刚度。本单元具有应力刚化、大变形功能。本文中不涉及找形。

按照实际结构尺寸在 ANSYS 中建模,模型见图 4。

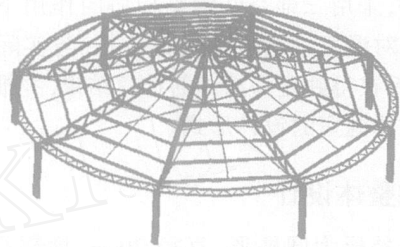


图 4 温室整体结构模型

Fig. 4 Model of the whole structure

所有材料均考虑为线弹性,各向同性,钢材密度 7800 kg/m^3 ,弹性模量 $E = 2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$,泊松比 0.3。手动划分网格,应力集中处,如檩条和柱顶交接处,网格划分较密。在 8 根柱子底部施加边界条件,将各方向自由度约束,在实际情况中即为将温室立柱底部固接于基础顶面。其他部分杆件为节点板螺栓连接,可视为刚结,与实际情况相差不大。雪荷载等效为线荷载加在屋面檩条及桁架上弦上,风荷载考虑风荷载体型系数等效为线荷载加在 8 根立柱、屋面檩条及桁架上弦上。建模后利用 ANSYS 进行静力线弹性分析,计算完毕后,通过 ANSYS 的 GUI 命令,查出各杆件的弯矩和轴力。通过薄壁型钢结构偏心受力构件的计算公式计算应力,验算杆件强度和弯矩作用平面内的强度和稳定性。

2.4 结果分析

由表 1 可以看出,温室结构各部位的最大应力

表 1 温室结构静力分析结果

Table 1 Results of static analysis for structure

构件	最大应力/MPa			允许应力 ^[7] /MPa	最大挠度/mm			允许挠度 ^[8] /mm
	工况 1	工况 2	工况 3		工况 1	工况 2	工况 3	
上弦	170.06	36.71	125.31	215.00	15.31	3.02	9.62	26.05
下弦	42.56	8.32	31.45	215.00	13.12	3.36	9.73	20.12
立柱	29.34	9.53	24.43	215.00	3.36	1.21	2.64	20.32
环梁	55.33	18.35	38.74	215.00	17.12	5.33	12.52	20.25
檩条	72.63	13.21	55.41	215.00	21.25	4.53	16.62	26.22

注:最大应力已考虑杆件稳定系数。

和最大挠度都在允许范围内,满足强度和刚度要求,说明结构体型设计合理。其中工况 1 应力最大,工况 3 次之,工况 2 应力最小。由于 μ_s 为负值,计算得到屋面风荷载为垂直于屋面的吸力,因而工况 2 所得应力值最小。应力最大值发生在上弦杆上,这是由于跨度大,刚度小造成的,可以增大其截面面积以提高承载能力。柱挠度较小可以适当减小其截面面积,或者采用型钢,以节省材料。图 5 示出结构整体变形,图 6 为结构应力图。

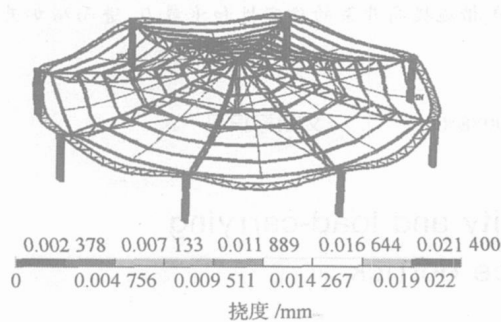


图 5 温室整体结构变形图

Fig. 5 Whole structural deformation

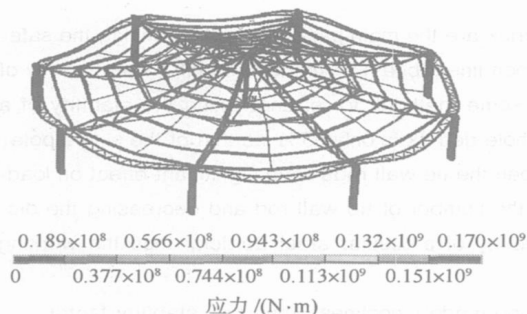


图 6 Von Mises 应力图

Fig. 6 Stress of Von Mises

3 结 论

ANSYS 软件计算结果表明,本温室结构设计方案合理有效,该有限元分析方法可以推广到类似于本温室结构的索杆单元杂交结构,是此类结构分析的一种实用有效的方法。通过 ANSYS 对结构的三维空间有限元分析,可以直接了解结构在各种工况下的应力和变形分布,可提高结构的计算精度和计算效率,并能较好地反映出结构的变形、应力及应变的实际情况,可作为温室结构设计的一种重要辅助手段。

参 考 文 献

- [1] 方瑞纲,陆桦. 玻璃温室结构设计探讨[J]. 温室结构与设备,2005(9):32-33
- [2] 蔺军,冯庆兴,董石麟,等. 大跨度空间索桁张力结构的模型试验研究[J]. 建筑结构学报,2006(4):41-47
- [3] 蒋秀根,雷隽卿. 温室结构刚度及空间作用的简化计算方法[J]. 烟台大学学报:自然科学与工程版,2002,10(4):286
- [4] 李效光,谢小妍,闫健,等. 隔离温室钢结构设计及 ANSYS 静力分析[J]. 农村实用工程技术—温室园艺,2005(10):24-26
- [5] 张相庭. 工程抗风设计计算手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997
- [6] GBJ-89 建筑抗震设计规范. 现行建筑结构规范大全[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002
- [7] 《轻型钢结构设计手册》编辑委员会. 轻型钢结构设计手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1998:132-133
- [8] 《轻型钢结构设计指南(实例与图集)》编辑委员会. 轻型钢结构设计指南:实例与图集[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2000