

连栋塑料温室 GL P 2728 结构的力学分析和优化设计初探

郑金土 李 扬

(浙江大学农业工程和食品科学学院)

摘 要: 连栋塑料温室结构安装安全方便, 投资相对节省, 在我国得到广泛地应用。该文从结构力学的角度, 对杭州地区典型的连栋塑料温室 GL P 2728 结构进行理论分析, 并采用优化设计理论, 借助结构有限元分析软件, 在原结构的基础上优化设计出一种安全、经济的连栋塑料温室结构。优化设计后的连栋塑料温室, 其横边柱、拱架和中柱的强度利用率分别提高了 18%、3% 和 25%, 纵边柱由非安全失稳利用转向稳定安全性合理利用, 主体结构节省钢材 3.7%。

关键词: 塑料温室; 连栋结构; 结构优化

连栋塑料温室是现代化大型温室的一种类型, 适合于现代化农业的规模化生产经营, 因其结构安装安全方便, 投资相对节省, 并且能够提供类似于大型玻璃温室提供的植物栽培气候环境, 所以 90 年代以后连栋塑料温室在我国得到广泛地应用。

目前上海、杭州等地区的温室生产和研究单位在原 P 系列单拱大棚的基础上研制出一系列连栋塑料温室, 并开始试用^[1]。和国外引进的同类连栋塑料温室产品相比, 在建筑结构优化设计方面尚有一定的距离。在 1998 年 2 月下旬的降雪中, 杭州地区极大降雪量达到 27 cm, 由于温室结构布置和构件选用的不合理, 造成了大面积连栋塑料温室倒塌。因此有启发地消化吸收国外连栋塑料温室结构研究成果, 并结合地区实际, 改进研制有我国特色的连栋塑料温室, 这是一项有重要意义的研究工作。本文从结构力学的角度, 根据东南沿海地区的安全设计荷载(含雪载, 风载和作物吊挂荷载), 借助结构分析专用的计算机软件 SUPER 2SA P, 分析杭州地区典型连栋塑料温室 GL P 2728 结构的内力分布状态, 对结构受力薄弱杆件加以改进, 对结构受力富余杆件进行优化设计, 最后确定合理的杆件截面尺寸, 保证连栋塑料温室结构安全可靠。

1 结构初始模型的选取

以 1998 年 8 月浙江省农科院无土栽培中心建

造的 6 连栋塑料温室结构作为温室结构优化设计的初始模型, 该模型的名称定为 GL P 2728 结构, 其中 G、L、P 三字母是钢管、连接、棚三个词的开头第一个字母, 7 表示单跨度为 7 m, 28 表示拱架钢管的外径规格为 $\phi 28$ 。

1.1 结构初始模型的几何参数

平面布置成 $30\text{ m} \times 42\text{ m}$, 跨度 $L = 7\text{ m}$, 纵向柱间距 $l_c = 3\text{ m}$, 纵向拱间距 $l_g = 0.175\text{ m}$, 顶高 $H_d = 4.16\text{ m}$, 肩高 $H_j = 2.15\text{ m}$, 横梁高 $H_h = 2.13\text{ m}$ 。

1.2 结构初始模型的材料参数

塑料温室骨架采用 A₃ 钢, 密度为 $Q = 78\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 弹性模量 $E = 211 \times 10^{10}\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 容许拉伸和弯曲应力 $[R] = 1\,700\text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ ^[2]。拱架、横梁和竖向拉杆的钢管规格分别为 $\phi 28 \times 215$ 、 $\phi 32 \times 215$ 、 $\phi 32 \times 215$; 立柱采用方钢管, 其尺寸为 $60 \times 80 \times 3$; 温室及天沟规格尺寸见图 1~ 2。

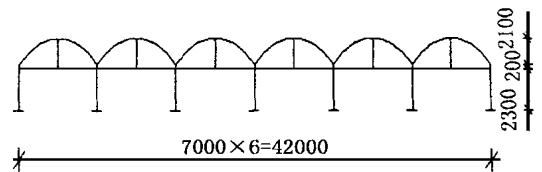


图 1 连栋塑料温室结构简图

Fig. 1 Structure diagram of multi-span plastic greenhouse

2 结构初始模型的力学分析

2.1 结构力学分析的软件工具

采用 SUPER 2SA P (Super Structural Analysis Program) 结构分析计算软件^[3]作为连栋塑料温室

收稿日期: 199821225

郑金土, 副教授, 杭州市华家池 浙江大学农业工程和食品科学学院城镇建设研究所, 310029

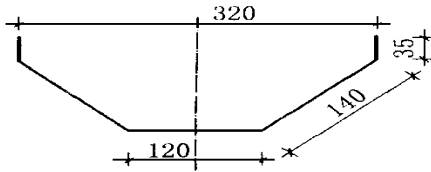


图 2 连栋塑料温室天沟剖面图

Fig 2 Section plane diagram of cullis of multi-span plastic greenhouse

结构分析工具

2.1.2 初始模型的结构力学分析结果

设计中荷载设计值: 雪荷载 $S = 27 \text{ kg}\ddot{\text{a}}\text{m}^2$, 作物吊挂荷载 $V = 6 \text{ kg}\ddot{\text{a}}\text{m}^2$, 风荷载基本风压 $W = 50 \text{ kg}\ddot{\text{a}}\text{m}^2$; 荷载组合类型: $G + S, G + S + V, G + W, G + W + V, G$ 表示结构自重^[4,5]。

连栋塑料温室结构借助 SUPER 2SAP 的分析, 其各杆件的最大受力状况统计如下:

1) 主结构拱架钢管在 $G + S$ 作用下达到最不利内力值 $1\ 353 \text{ kg}\ddot{\text{a}}\text{m}^2$, 达到拱强度容许值的 80%; 主结构间的单拱架钢管也在 $G + S$ 作用下达到最不利内力, 其值为 $1\ 635 \text{ kg}\ddot{\text{a}}\text{m}^2$, 达到拱强度容许值的 96%; 设计拱架钢管时应以单拱架钢管的最不利内力为准。

2) 横向边柱在 $G + W$ 作用下达到最不利内力, 其值为 $782 \text{ kg}\ddot{\text{a}}\text{m}^2$, 达到柱稳定容许值的 74%; 纵向边柱在 $G + W + V$ 作用下达到最不利内力, 其值为 $1\ 416 \text{ kg}\ddot{\text{a}}\text{m}^2$, 超过柱稳定容许值 34%。

3) 主结构横梁在 $G + W + V$ 作用下达到最不利内力, 其值为 $1\ 447 \text{ kg}\ddot{\text{a}}\text{m}^2$, 达到梁强度容许值的 85%; 横梁与拱架的竖向联系拉杆在 $G + W + V$ 作用下达到最不利内力, 其值为 $75 \text{ kg}\ddot{\text{a}}\text{m}^2$, 拉伸强度较小, 但其支撑作用不可忽视。

从以上的分析看, 该连栋塑料温室结构构件或截面不足, 或截面富余, 材料的力学性能没有被充分利用, 不仅形成材料浪费, 而且结构安全性欠佳, 所以应对该结构进行优化设计。

3 结构模型的优化设计

3.1.1 结构优化设计法

结构优化设计的准则, 即从结构力学的原理出发, 建立一些可以处理应力、位移、频率和压杆失稳临界应力等约束的最优准则, 然后通过直观的迭代运算决定各杆件单元截面的参数, 使得材料比较合理地分布到结构各杆件单元上, 避免了个别杆件单

元的材料浪费^[6]。

在结构优化设计中, 可选用的准则方法有比例满应力法、齿行法和修改的齿行法^[6]。笔者在该结构模型的优化设计中, 采用的是齿行法, 具体步骤操作如下:

1) 记结构各杆件单元截面面积为 A_i^k , 记各杆件的应力为 R_i^k , k 表示迭代的次数, i 表示结构中第 i 根杆件; j 表示结构承载的第 j 种工况; R_{ij}^k 表示第 k 次迭代时第 i 根杆件在第 j 种工况下的计算应力, $[R]$ 表示受拉杆件的容许应力或受压杆件的失稳临界应力。迭代关系式为:

$$B_{ij}^k = R_{ij}^k / [R] \quad (1)$$

$$B_i^k = \max\{B_{ij}^k\} \quad (2)$$

$$A_i^{k+1} = B_i^k A_i^k \quad (3)$$

2) 进行具体迭代时, 先走一步比例满应力步 (奇数步), 紧接着换一步射线步 (偶数步), 两种步骤间隔地进行; 奇数步得到各杆件的最大应力比:

$$B^{2k-1} = \max\{B_{ij}^{2k-1}\} \quad (4)$$

偶数步则得到各杆件的截面积和结构重量:

$$A_i^{2k} = B^{2k-1} A_i^{2k-1}$$

$$W^{2k} = B^{2k-1} W^{2k-2}$$

当出现

$$W^{2k+2} > W^{2k}$$

则取第 $2k$ 步的设计值作为最优设计值。

3) 在设计中要注意杆件截面的规格化要求, 以保证所选最小截面积能够满足强度和刚度条件; 对于压杆则应考虑其稳定系数 U 的影响。

4) 在设计中 B_i^k 的取值, 要考虑到风、雪、作物的吊挂荷载和结构及覆盖材料的自重的荷载组合。

结构优化设计分析迭代流程见图 3。

3.1.2 结构模型优化设计分析结果

根据优化设计分析迭代流程, 对原结构模型的力学分析结果进行二次处理, 得到各杆件的应力比, 然后按部就班地进行迭代, 直到出现最优结果。连栋塑料温室结构各杆件截面在优化调整中的变化具体见表 1。

在优化设计中, 我们对连栋塑料温室结构各杆件的内应力在优化初始和优化结束时分别作了记录。优化初始时, 连栋塑料温室结构的纵边柱、横边柱、中柱、横梁、拱架的内应力分别达到构件失稳临界应力值或强度容许值的 - 34% (“-”表示超过临界应力值)、74%、36%、85%、79%, 优化结束后, 则分别为 97%、92%、61%、84.17%、82%。

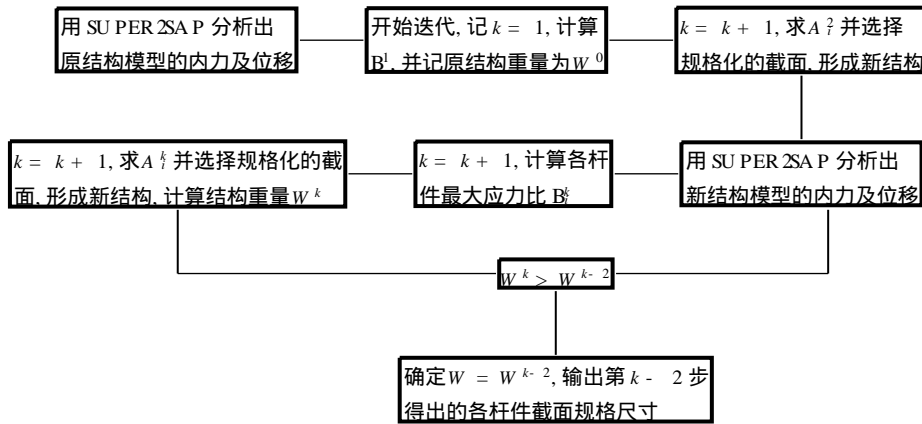


图 3 结构优化设计分析迭代流程图

Fig 3 Flow chart of structure optimizing design and analyse

表 1 连栋塑料温室结构杆件截面优化调整变化

Tab 1 Poles' section adjusting and changing of multi-span plastic greenhouse

杆件截面调整		横边柱	纵边柱	中柱	横梁	拱架	拉杆	天沟梁	结构重量
初始	杆件规格	60 × 80 × 3	60 × 80 × 3	60 × 80 × 3	32 × 215	28 × 2	32 × 215	槽形定制	418967
	截面面积	8104	8104	8104	2 3169	116340	2 3169	7. 05	
一次迭代	杆件规格	80 × 90 × 215	100 × 150 × 215	60 × 80 × 3	32 × 215	30 × 2	32 × 215	槽形定制	511029
	截面面积	8125	12125	8104	2 3169	117593	116340	7. 05	
二次迭代	杆件规格	60 × 90 × 215	90 × 120 × 215	60 × 80 × 215	32 × 215	30 × 2	28 × 2	槽形定制	419000
	截面面积	7125	10125	6175	2 3169	117593	116340	7. 05	
三次迭代	杆件规格	60 × 75 × 215	80 × 110 × 215	50 × 60 × 215	32 × 215	30 × 2	28 × 2	槽形定制	417147
	截面面积	615	9125	5125	2 3169	117593	116340	7. 05	

注: 面积单位: cm²; 重量单位: t; 表示圆管; 表示方柱。

在优化设计中, 结构的荷载组合时的各类荷载的设计值分别为: 雪载取 27 kg/m², 风载 50 kg/m², 作物悬挂荷载 6 kg/m², 覆盖材料 114 kg/m², 结构钢管比重 718 × 10³ kg/m³。

4 结 论

1) 通过结构优化设计, 连栋塑料温室结构的纵边柱改变了初始的不安全失稳状态, 而变成材料强度利用率较高的构件; 横梁仍然保持着良好的材料强度利用率; 横边柱、中柱和拱架的材料强度利用率则分别提高了 18%、25% 和 3%。这样不仅保证了主体结构在强度和稳定性方面的安全, 相应提高了部分杆件(特别是中柱)力学性能的利用率, 而且调整减小绝大部分构件的截面面积, 经计算, 温室主体结构节省钢材 317%, 有利于促进连栋塑料温室结构设施的更新换代。

2) 借助 SUPER SAP 的分析, 对于连栋数为 3、4、5 的塑料温室, 本文优化设计的杆件截面参数值仍然是安全的, 而且塑料温室结构的稳定性和相应的安全性随着连栋数的增加而有所提高, 所以塑料温室结构杆件的截面优化值, 对于任意栋数的塑料

温室结构具有通用性, 可以作为温室制造单位规模生产结构杆件的设计依据。

3) 虽然本文的连栋塑料温室结构原模型取自杭州地区, 但是在优化设计中, 风、雪荷载设计值的取值范围覆盖我国整个东南沿海地区, 结果适合在东南沿海地区推广应用。

【参 考 文 献】

[1] 郑金土等 塑料大棚骨架静载强度试验初探 浙江农业大学学报, 1993, 19(2): 155~ 158

[2] 孙训方等 材料力学 高等教育出版社, 1989 121~ 157

[3] 卢炎麟 PCSA P5 使用手册 镇江船舶学院, 1991

[4] 师惠芬等 现代化蔬菜温室 上海: 上海科学技术出版社, 1986 60~ 64

[5] 吴德让 农业建筑学 北京: 农业出版社, 1994 195~ 201

[6] 李炳威 结构优化设计 北京: 人民交通出版社, 1989

Mechanics Analysis and Optimum Design of Structure of Plastic Greenhouse GLP-728

Zhen Jintu Li Yang

(College of Agricultural Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029)

Abstract Multi-span plastic greenhouse is expedient and safe to install, economical to invest. It is popular in China. This paper analyzed existing typical structure of multi-span plastic greenhouse (GLP-728 in Hangzhou area) by means of structural mechanics, and worked out a kind of safe and economical structure by use of optimum structural design theory and software of finite element analysis. After the structure was optimized, the intensity utilization coefficient of horizontally side-post, arch steel tube and mid-post increased 18%, 3% and 25% respectively, the vertically side-post which was utilized insecurely and insatiably utilized securely, stably, and reasonably, and steel of main body was saved about 317%.

Key words: plastic greenhouse; multi-span structure; structural optimization

2 篇全国优秀博士学位论文及评选简介

——东北农业大学指导教师蒋亦元, 作者蒋恩臣完成的《吸气式割前摘脱装置机理研究》, 及中国农业大学指导教师曹崇文, 作者朱文学完成的《干燥过程中谷物应力裂纹和发芽率的模拟与实验研究》均获第一届全国优秀博士学位论文奖。

——全国优秀博士学位论文评选简介

全国优秀博士学位论文评选工作是由教育部和国务院学位委员会批准并组织进行的, 旨在逐步建立有效的质量监督和激励机制, 推动研究生教育工作重点切实转移到提高培养质量上来, 培养和激励在学博士生的创新精神, 促进高层次创造性人才脱颖而出。该项评选工作已列入《面向二十一世纪教育振兴行动计划》。根据该计划今后将每年评选 100 篇优秀博士学位论文。

评选标准: 选题为本学科前沿, 有较大的理

论意义或现实意义; 在理论或方法上有创新; 取得突破性成果, 达到国际同类学科先进水平, 具有较大的社会效益或较好的应用前景; 材料详实, 推理严密, 文字表达准确。

首届优秀博士学位论文评选工作从 1998 年 5 月启动。评选的对象是全国所有博士学位授予单位在 1995~ 1997 年间的博士学位获得者的博士学位论文, 共计 16 700 余篇。整个评选工作分为学位授予单位推荐、省级学位或研究生教育主管部门初选、全国范围内同行专家通讯评议和专家会审定四个阶段。

对初选出的 559 篇博士学位论文, 评选办公室聘请了 692 名专家, 按学科分组, 进行通讯评议。每篇论文聘请 5 名专家独立评阅, 共发出评价意见表 2 795 份, 回收 2 698 份, 回收率为 96.15%。最后通过专家会审, 确定 100 篇获奖论文。 (本刊辑)