

## 满应力优化在连栋温室设计中的应用

梁宗敏 吴德让 李保明

(中国农业大学水利与土木工程学院)

**摘要** 造价是衡量温室结构设计优劣的一个重要因素,降低造价最有效的途径是降低用钢量。利用满应力优化设计的原理,建立了基于最合理受力的温室结构优化数学模型,并把满应力优化应用于温室结构的优化设计中,编制了优化设计程序。经过典型例题的检验,证明程序可靠,可以作为优化设计的辅助工具。利用程序对实际工程进行了优化设计,取得了较好的效果。

**关键词** 满应力; 温室结构; 优化设计

**中图分类号** TU 261; TU 318

## Applications of Full-stress Optimization on Multi-span Greenhouse Design

Liang Zongmin, Wu Derang, Li Baoming

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

**Abstract** Cost is an important factor must being calculated in design of greenhouse structure. Reducing the quantity of steel used in structure is the most efficient way to cut down the cost of greenhouse. The principle of full-stress optimization design was introduced. Based on mechanical analysis, the mathematical model of greenhouse structural optimization design was built. Full-stress optimization was applied to multi-span greenhouse design. As the aid of greenhouse design, software of optimization was developed. The software was tested in typical case and used to multi-spans greenhouse.

**Key words** full-stress; greenhouse frame; optimum design

在我国,连栋温室的推广很大程度上受到造价的制约,国产连栋温室的结构造价占总造价的20%~30%,降低结构造价可很大程度上降低温室总造价,因此结构优化设计是促进连栋温室推广的一个重要手段。目前日光温室的结构优化已经较多地考虑荷载和受力分析<sup>[1,2]</sup>,而连栋温室的结构优化实际上仍局限于结构设计阶段<sup>[3]</sup>。从环境的角度出发,温室结构的优化设计首先应把最佳的室内环境(光照、温度、湿度、气体成分等)作为优化目标,因此,国内外对连栋温室的研究多集中在对其结构形状(包括几何形状和截面形状)的优选;而从经济的角度出发,则应把最低成本作为优化目标。笔者采用满应力优化方法,以期求得受力最合理的温室结构设计。

收稿日期: 2001-10-13

梁宗敏,北京清华东路17号中国农业大学(东校区)59信箱,100083

## 1 基于最少用钢量的温室结构优化模型

温室结构形状经优选(主要考虑环境、耕作要求等因素)确定后,结构优化的目标是寻求最低造价的结构。而结构造价主要取决于用钢量,因此结构优化的过程就是寻求最小结构质量的设计<sup>[4]</sup>的过程,这个设计必须满足在使用过程中各种状态下的可靠度和耐久性。其中结构质量函数:

$$m = \rho \sum A_i \cdot l_i$$

式中:  $m$  为温室结构(各杆件)的总用钢量;  $\rho$  为钢材密度;  $A_i$  为杆件截面积,  $l_i$  为杆件长度; 下标  $i$  表示第  $i$  根杆,  $i = 1, 2, \dots, n$ 。其中设计变量  $A_i$  和  $l_i$  应满足以下约束条件,即杆件应力

$$\sigma_i \in [\sigma_{si}, \sigma_{ti}]$$

式中:  $\sigma_{si}$  表示材料的允许应力下限;  $\sigma_{ti}$  表示材料的允许应力上限;  $A_i \in \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ 。

温室的结构形状选定后,设计变量  $l_i$  是固定的,故本文中仅对截面积  $A_i$  进行优化。轻型钢结构常用型钢截面属于离散变量,本文中先将其作为连续变量处理,优化后再采用“向上靠”的方法将其转换成常用型钢的截面<sup>[5]</sup>。

## 2 满应力优化方法

满应力优化准则认为最优的结构是:在多种工作状况下,结构中每个单元所受应力至少在一种工作状况下达到其允许应力。以桁架优化设计为例,最优的桁架杆件截面积  $A_i$ ,应使桁架质量  $m$  最小,而且桁架各杆的应力至少在一种荷载效应组合时达到允许应力<sup>[4]</sup>。显然,满应力设计可使材料的力学性能得到最大限度的发挥。

本文中满应力的设计方法是从一个比较合理设计出发,利用结构分析算法,求出在各工况下各杆的应力比,并从中找出最大应力比  $\xi_j$ ,即

$$\xi_j = \max \left\{ \frac{\sigma_{ij}}{\sigma_{si}}, \frac{\sigma_{ij}}{\sigma_{ti}} \right\}$$

式中下标  $j$  表示第  $j$  种工况。如果最大应力比  $\xi_j$  不等于 1,则调整该杆的截面积,将其放大或缩小  $\xi_j$  倍,从而得出新的改进设计,再把新设计作为初始设计重复以上步骤,直到前后 2 次的截面积改变很小( $< 5\%$ ),就可结束迭代计算,得到近似的满应力设计。杆件截面的变化会影响该杆的允许应力值,因此每调整一次设计就应重新计算一次各杆件的允许应力。另外,在超静定结构中,一个杆件的截面改变,往往会使几乎所有杆件的内力发生变化,因此每调整一次设计就应重新计算一次各杆件的内力。

在迭代过程中,为防止从局部最优解跃过而引起迭代的发散或振荡,引入松弛因子  $\alpha$  ( $0 < \alpha < 1$ ) 控制每次调整截面积的幅度<sup>[4]</sup>:

$$A_i^{k+1} = [1 - \alpha(1 - \xi_j)] A_i^k \quad (1)$$

式中上标  $k, k+1$  分别表示第  $k, k+1$  次迭代。

## 3 满应力优化在温室结构优化设计中的应用

考虑到温室结构是刚桁架结构,有些杆件不仅承受轴力,还承受弯矩,各杆应力(承载力极限状态)表示为:

$$\sigma_{ij} = N_{ij}/A_i \pm M_{xij}/W_{xi} \pm M_{yij}/W_{yi}$$

式中:  $M_{xij}$  表示杆件所受的桁架平面内的弯矩;  $M_{yij}$  表示杆件所受的桁架平面外的弯矩;  $W_{xi}$  表示杆件桁架平面内的截面抵抗矩;  $W_{yi}$  表示杆件桁架平面外的截面抵抗矩。

这样, 对于一个杆件来说, 截面位置不同就会有不同的应力, 为此把每根杆分成几个单元, 分别做满应力优化。由此得出的刚桁架的同一杆件可以是变截面的, 也可以是等截面的(把临界截面作为该杆的截面)。

当采用式(1)的方法调整截面积后, 不仅截面积  $A$  放大或缩小了  $1 - \alpha(1 - \xi_i)$  倍, 截面抵抗矩  $W$  也随之改变, 这样会导致各杆件的内力变化幅度较大, 易出现迭代振荡, 故对截面调整区别对待: 当杆件应力组成以轴力作用为主时, 应以调整截面积为主(式(1)); 当杆件应力组成以弯矩作用为主时, 应以调整截面抵抗矩为主

$$A_i^{k+1} = [1 - \alpha(1 - \xi_i)]^{0.75} A_i^k$$

式中指数 0.75 是根据温室常用型钢(圆、方钢管)的面积和截面抵抗矩都近似存在  $A = dW^{0.75}$  的回归关系而确定的<sup>[4]</sup>。

当考虑构件整体稳定时, 偏心受力(拉或压)构件的强度稳定计算应满足:

$$\frac{N_{ii}}{A_i} \varphi \pm \frac{1}{\varphi} \left( \frac{M_{xii}}{W_{xi}} + \frac{M_{yii}}{W_{yi}} \right) \leq f \quad (2)$$

式中:  $\varphi$  表示轴心受压构件的稳定系数;  $\varphi$  表示受弯构件的整体稳定系数。在求解各杆(各截面)的内力时, 利用式(2)可以直接求出杆件在整体稳定下的应力。在计算各杆的应力比时, 采用整体稳定下的应力, 无论受拉弯还是受压弯的构件, 其允许应力均可以取钢材的强度设计值, 而无须在每次迭代时都重新计算。

经过有限次迭代后可使所有杆件应力都较为接近满应力, 或前后 2 次迭代的结构总质量已经变化很微小( $< 5\%$ ), 这时, 就可以认为已经得到局部最优解。因为初始方案是经过人工优选的, 所以即可认为这个局部最优解就是满足工程要求的最优解, 这时就可以停止迭代。

笔者考虑了连栋温室的各种连接情况和各种荷载情况, 利用成熟的杆系有限元内力(应力)分析子模块, 编制了满应力迭代优化程序, 并利用典型算例对程序进行了验证, 结果证明程序是可靠的。

#### 4 实例及建议

利用程序对华北型连栋塑料温室(图 1)进行了结构优化设计, 考虑 4 种荷载组合情况(表 1), 杆件均采用焊接薄壁圆钢管, 各杆件取相同的初始截面  $d60\text{mm} \times 2\text{mm}$ 。经过满应力优化设计后的各杆件截面如下: 柱  $d70\text{mm} \times 2\text{mm}$ ; 拱杆  $d40\text{mm} \times 2\text{mm}$ ; 下弦杆  $d40\text{mm} \times 2\text{mm}$ ;

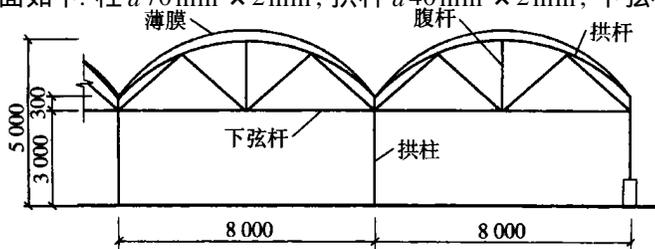


图 1 华北型连栋塑料温室结构示意图

腹杆  $d25\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$ 。

表1 荷载组合情况

序号	荷载组合
1	$1.2 \times \text{自重} + 1.2 \times \text{作物荷载} + 1.2 \times \text{开窗机重} + 1.4 \times \text{附加风压力}$
2	$1.2 \times \text{自重} + 0.85 \times \text{作物荷载} + 1.2 \times \text{开窗机重} + 1.4 \times \text{雪荷载}$
3	$0.85 \times \text{自重} + 0.85 \times \text{作物荷载} + 0.85 \times \text{开窗机重} + 1.4 \times \text{横向风荷载}$
4	$0.85 \times \text{自重} + 0.85 \times \text{作物荷载} + 0.85 \times \text{开窗机重} + 1.4 \times \text{纵向风荷载}$

优化后的应力分布情况如下: 1) 组合1作用下, 下弦杆应力接近于允许应力, 下弦杆承受作物荷载, 1/4跨处挠度较大(47mm); 2) 组合2作用下, 拱杆的应力接近于允许应力, 拱杆主要承受压力, 所以变形较小(2mm); 3) 组合3作用下, 拱柱承受的应力接近于允许应力, 这是因为拱架承受较大的水平荷载, 而边柱和中柱的应力较为接近, 说明拱架各跨之间有良好的协同工作能力, 柱顶的位移都小于15mm; 4) 组合4作用下, 拱柱的应力比接近于满应力; 5) 腹杆受力较小, 所需截面也小, 考虑制作和安装等方面的因素截面不宜过小, 腹杆截面选为 $d25\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$ , 满足应力要求, 但未接近允许应力。其余各类杆件的应力都在某一种荷载组合情况下, 达到或接近允许应力, 变形也都满足使用要求。

经过满应力优化设计后的结构, 在满足结构可靠度和耐久性的前提下, 减少了温室结构的用钢量, 降低了温室造价, 为连栋温室的推广创造了有利条件。

由于温室防雾滴的要求, 目前有些温室部分杆件已经采用“几”字形截面或其他形式的截面, 有必要做进一步的研究, 对这种截面形式进行满应力优化。

### 参 考 文 献

- 1 周长吉 日光温室的结构优化 农业工程学报, 1996, 12(增刊)
- 2 周长吉 日光温室的结构优化设计及综合配套技术(III): 无立柱钢结构日光温室的结构优化 农村实用工程技术, 1999, (3)
- 3 宋占军 五连拱温室的结构计算 农业工程学报, 1998, 14(1): 164~ 168
- 4 王光远 结构优化设计 北京: 高等教育出版社, 1987. 37
- 5 孙焕纯 离散变量结构优化设计的(0, 1)规划组合算法 计算结构力学及其应用, 1989, 6(1): 134~ 146