

文章编号: 1005-0523(2002)04-0037-04

# 论门式刚架截面优化设计在我国的发展

张和平, 程海琴, 罗威年

(华东交通大学 土木建筑工程学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:**通过大量调研和文献阅读,对门式刚架截面优化设计在我国的发展现状作了一个较为全面的阐述,列举了目前国内几种较盛行的优化设计方法,并分析了不同方法的优化原理、优化过程及其优缺点。

**关键词:**门式刚架;轻型钢结构;优化设计

**分类号:**TU392.5

**文献标识码:**A

## 0 引言

门式刚架轻型房屋是指以门式刚架为受力体系,外墙采用冷弯薄壁型钢檩条和压型钢板的轻型钢结构。门式刚架轻钢结构能有效利用材料,构件尺寸小,重量轻,而且可以在工厂批量生产,保证质量,工地连接简便迅速,施工周期短。正由于这些特点,广泛地应用在一般工业与民用建筑中,其优越性和经济效益是不言而喻的。

传统的结构设计实际指的是结构的分析校核,即首先凭经验和判断作出一个设计方案,然后按照传统的理论和方法对其进行强度、刚度及稳定性的分析和计算,看是否满足设计约束条件。通过这样的几次反复运算,往往可以得到一个可行的设计,但要得到最合理的设计是很困难的。结构的优化设计则指的是结构的综合、选优,即把设计追求的目标与应满足的约束条件有机地结合起来,用优化的理论和方法,在满足设计的约束条件的可行区域内进行搜索选优,直至达到最优目标,从而得到最优的设计方案。优化设计的出现使工程结构设计由以往被动地安全校核转变为积极主动地选优设计,为实现设计的最终目标——安全和经济提供了有效途径。

## 1 门式刚架设计在我国的发展现状

由于门式刚架轻钢结构具有许多其他结构所不具备的优点,而且经济效益十分显著。因此这种结构形式在国外一经推出就得到了广泛应用,国外轻钢结构发展较早,由于汽车工业的发展,最初用于建造私人汽车库等简易房屋。二次世界大战时期,由于战争的需要,一些拆装方便的轻钢结构建筑用于营房和库房。60年代以来,国外建筑钢材的发展有了很大突破,色彩丰富而耐久的彩色压型钢板出现,以及H型钢和冷弯型钢的问世,极大地推动了轻钢结构的发展,至今已成为一种特殊的商品。业主不是带着图纸委托加工,而是向承包商订购某种轻钢结构房屋,承包商在短时间内按业主要求按质建成,并交付使用。这种高质量的快速供货方式,使业主感到十分满意,轻钢结构得以迅速发展。目前,欧美各国由轻钢结构体系建造的非居住单层建筑物占50%以上,日本新建的1~4层建筑大多采用轻钢结构<sup>[1]</sup>。许多国家如英、美、日、澳大利亚等国家已作为一种经济快捷的建筑结构体系,以商品的形式出售。近几年以来,随着我国钢材产量的增加和焊接H型钢的出现,特别是随着《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》(CECS102:

收稿日期: 2002-06-20

中国知网 <https://www.cnki.net> 张和平, 讲师。

98)的颁布实施,门式刚架轻型房屋钢结构在我国大量涌现.据有关资料统计显示<sup>[2]</sup>,到2000年我国已建成的此类结构已达800多万平方米,而且以每年100多万平方米以上的速度增加.但由于我国在该方面起步较晚,正式的设计规范《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》直到1998年才出版.在此之前,都是参照《钢结构设计规范》(GBJ17-88)和《冷弯薄壁型钢结构技术规程》(GBJ18-87)以及国外相关规范进行设计.因此,无论在设计水平、设计经验和合理设计等方面都与西方发达国家相比有着较大的差距.近年来,我国的学者对门式刚架的设计进行了不少的探索和研究,取得了不小的成果,并开发出了相应的实用设计软件,如门式刚架轻型房屋设计系统PFCAD、刚架轻型房屋设计CAD系统PS2000、PKPM及同济大学开发的3D3S等软件均可对门式刚架轻型房屋钢结构进行设计.但按我国钢结构设计规范,采用国产材料,设计同样的门式刚架厂房,我们的造价要比国外的高20%左右.由于设计规范与国外不尽相同,使得我们设计时又不能照搬国外的设计软件.因此,尽快研究出符合我国的门式刚架截面优化设计方法,降低我国门式刚架轻型房屋钢结构的生产成本就显得格外有意义.

## 2 目前国内常用的几种门式刚架优化设计方法

### 2.1 遗传算法<sup>[3]</sup> (Genetic Algorithm)

#### 2.1.1 遗传算法的基本原理

遗传算法是基于 Darwin 进化论和 Mendal 的遗传学说的一种优化搜索方法,它模仿物竞天择、优胜劣汰,适者生存的自然选择和遗传机理,把优化问题的解的搜索空间转化为遗传空间,把每一可能的解编码为一个称为人工染色体的二进制串,这个二进制串的每一位即是基因,每个二进制串(对应一个个体)就代表一个解.一定数量的个体组成群体. GA 首先随机地产生一定数量个体组成的初始群体(即问题的一群候选解),按预先根据目标函数确定的适应值函数计算各个体的对问题环境的适应值.再根据个体的适应值对个体对应的染色体进行选择,使适应性好的染色体比适应性差的染色体有更多的繁殖机会.然后进行交叉、变异等遗传操作产生新一代群体.如此循环,各代群体的优良成分逐渐积累,最优个体的适应值和平均适应值不断上升,直至满足规定的收敛条件,求得所需的最

优解.

#### 2.1.2 遗传算法的优化过程

1) 任选一定数目  $n$  (通常为 70 或 100) 的初始解,称为一个群体(Population),令为  $P(t)$ .根据一定的遗传编码原则,将设计变量映射成一个二进制串,即所谓染色体.对每个个体进行评估,得到个体适应度(Fitness).

2) 如果群体收敛即终止条件满足,转第 7 步.否则继续.

3) 从繁殖池中随机选择个体进行交叉运算(crossover)和变异运算(mutation),产生后代,令为  $C(t)$ .通常交叉运算的概率远大于变异运算.

4) 评估  $C(t)$  的适应度.

5) 根据适应度优劣从  $P(t)$  和  $C(t)$  中选出  $n$  个个体,令为  $P(t+1)$ .

6) 令  $t=t+1$ ,转第 2 步.

7) 输出最优个体和群体平均值等,结束.

#### 2.1.3 遗传算法的优点

1) 不需要问题领域知识,只需要一个个体评估函数以给出每个个体(解)的适应度(Fitness).不需要导数,因而可以用于非凸的、不可微的、非连续问题的优化.在优化过程中不需要作敏度分析,对线性非线性问题、离散变量与连续变量混合问题均可按同样方式处理.

2) 遗传算法是一个群体在解空间共同搜索,因而是一种全局优化算法.

#### 2.1.4 遗传算法的不足

上述传统遗传算法的设计变量采用二进制串表示,比较适合于离散优化问题,而对于连续变量,或离散、连续混合问题,二进制表示要使用巨大的串长,而且需要事先知道变量的范围和精度要求,效率很低且很不方便.全局搜索能力强而局部搜索能力不足;出现早熟收敛和随机漫游现象;结构计算的工作量过大而导致搜索速度较慢.

### 2.2 一般梯度法 GRG<sup>[4]</sup> (General Reduced Gradient)

#### 2.2.1 一般梯度法的基本原理

梯度法是一种下降算法,希望每次迭代后,函数值是下降的,而且下降得越快越好,为了确定下降方向,假定目标函数  $f(X)$  在  $X(k)$  处按台劳级数展开:

$$f(X) = f(X^{(k)}) + (X - X^{(k)})^T \nabla f(X^{(k)}) + O(H) \quad (1)$$

其中:

$$\nabla f(X^{(k)}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f(X^{(k)})}{\partial x_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial f(X^{(k)})}{\partial x_n} \end{pmatrix}$$

当第  $k+1$  次迭代时

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} + \lambda_k P^{(k)} \quad k=0, 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$\lambda_k$  表示步长,是常数,  $P^{(k)}$  表示每一步所遵循的方向,把式(2)代入(1)得

$$f(X^{(k)} + \lambda_k P^{(k)}) = f(X^{(k)}) + \lambda_k (P^{(k)})^T \nabla f(X^{(k)})$$

欲使  $f(X^{(k+1)}) < f(X^{(k)})$

则必须使  $\lambda_k (P^{(k)})^T \nabla f(X^{(k)}) < 0$

$\lambda_k$  是常数,可以去掉,于是

$$(P^{(k)})^T \nabla f(X^{(k)}) = \cos(P^{(k)}, \nabla f(X^{(k)}))$$

显然地,当  $\cos(P^{(k)}, \nabla f(X^{(k)})) = -1$  时,函数  $(P^{(k)})^T \nabla f(X^{(k)})$  最小.即函数沿负梯度方向下降最快.所以迭代公式可以写成

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} - \lambda_k \nabla f(X^{(k)})$$

至于步长  $\lambda_k$  的选取应保证使  $f(X^{(k)} - \lambda_k P^{(k)}) = \min_{\lambda \geq 0} f(X^{(k)} - \lambda P^{(k)})$  这是一维搜索问题.

### 2.2.2 一般梯度法的迭代步骤

1) 确定初始点  $X^{(0)}$

2) 计算在初始点处的目标函数的梯度  $\nabla f(X^{(0)})$ ,若梯度为零,  $X^{(0)}$  就是最优点或局部最优点,终止迭代或从另一初始点出发再行迭代.若梯度  $\nabla f(X^{(0)}) \neq 0$ ,则移动到下一个点:  $X^{(1)} = X^{(0)} + \lambda_0 P^{(0)}$

式中:  $P^{(0)} = -\frac{\nabla f(X^{(0)})}{|\nabla f(X^{(0)})|}$

而步长  $\lambda_0$  由沿方向  $P^{(0)}$  作一维搜索来决定,即选择  $\lambda_0$ ,使

$$f(X^{(0)} - \lambda_0 P^{(0)}) = \min_{\lambda \geq 0} f(X^{(0)} - \lambda P^{(0)})$$

3)  $X^{(1)}$  作为第二循环的初始点,重复以上步骤,直至第  $r$  循环,使求得的  $|\nabla f(X^{(r)})|^2$  小于预先指定的允许误差为止,即以  $X^{(r)}$  作为  $X^{(*)}$  的最优解.

### 2.2.3 一般梯度法的优点

1) 一般梯度法程序简单,一次迭代工作量小.

2) 开始迭代时收敛快,即使选择一个不好的初始点也能很快收敛到一个较好的迭代点.

### 2.2.4 一般梯度法的不足

1) 一般梯度法在相邻两次迭代中,梯度方向是

正交的,越靠近极小点,步长越小,越走越慢,以至在实际问题中,在可行区域内常常得不到需要的结果.

2) 收敛的快慢与变量的尺度关系很大.

## 2.3 离散复合形优化方法<sup>[5]</sup>

### 2.3.1 离散复合形优化方法的基本原理

离散复合形算法可直接求解离散变量约束优化设计问题,它不要求目标函数的导数,对目标与约束函数的性态无特殊的要求,适用范围较广.其基本原理是首先在设计变量的离散可行域内,选取  $k$  个顶点作为初始复合形的顶点,比较这些顶点的对应目标函数值,去掉目标函数值中的最大点,而代之以最坏点的反射(以复合形中最坏点之外的各点的中心为映射中心所得到的映射点)构成新的复合形.不断重复上述过程,使复合形的位置越来越靠近最优点.

### 2.3.2 离散复合形优化方法的优化步骤

针对门式刚架形式多样、约束复杂、设计变量较多的特点,采取化整为零的方法,把门式刚架结构分成许多的柱、梁,在结构分析给出这些构件的受力情况后,分别对它们按优化目标进行优化,然后再组合起来进行重分析,重复这种整体分析和分部优化的交替过程,直至收敛.具体优化过程如下:

- 1) 初选各截面的尺寸;
- 2) 用有限元法计算门式刚架结构内力;
- 3) 分别建立梁、柱截面尺寸的优化模型,逐跨梁、逐根柱分别优化,其间假设刚架内力不因截面尺寸的变化而变化;
- 4) 重复步骤 2, 3, 直至刚架结构内力基本不变,且满足结构刚度要求;
- 5) 输出优化结果.

### 2.3.3 离散复合形优化方法的优点

采用离散复合形法稳定可靠,可直接用于离散变量优化.它不要求目标函数的导数,对目标与约束函数的性态无特殊的要求,适用范围较广.

### 2.3.4 离散复合形优化方法的不足

由于在设计变量中即有离散变量,也有连续变量(如分段长度为连续变量,钢板的厚度是离散变量),采用离散复合形的优化方法将导致较大的偏差.因此一个实际的门式刚架优化算法应该能综合处理离散连续变量.

## 3 结束语

以上介绍了目前国内常用的门式刚架的优化

设计方法,但是传统的结构优化设计至少存在以下两个问题:

1) 在一般情况下,有些复杂的结构并不需要满足所有约束条件方能工作.例如,超静定结构某些构件的强度不足,甚至破坏,并不导致结构整体的失效.

2) 在传统结构优化的数学模型中,目标和约束函数等都是确定性的量,没有较全面和确切地考虑结构未来表现的随机性,因而优化结果不能保证均匀的安全水平.

以结构系统的可靠度作为结构优化设计的控制参数.用改进的分枝限界法判认主要失效模式,用PENT法计算结构系统的可靠度.结构可靠性分析考虑轴力效应.可有效地求解了门式刚架结构在系统可靠度约束下的最小重量设计问题.而基于可靠性的结

构优化设计把结构作为一个整体考虑,并全面研究结构在未来工作期间表现的随机性,从而克服了上述两个缺点,是较为合理的结构优化设计理论.

### 参考文献:

- [1] 邱国桦.国内外轻型钢结构应用发展概况[J].施工技术,1999,28(8).
- [2] 任兴平.门式刚架轻型房屋结构的优化设计[J].钢结构,2000,15(4):7.
- [3] 刘鹏.门式刚架的优化设计[J].工业建筑,2001,31(7):58.
- [4] 高利河,牟在根,于亚伦.门式刚架在荷载作用下的优化设计[J].北京科技大学学报,2001,23(6).
- [5] 吴剑国,龚铭,孙苏洵,张其林,等.门式刚架轻型房屋钢结构离散变量优化设计[J].建筑结构,31(8):54.

## The Development of the Optimization Design of Portal Frames in Our Country

ZHANG He-ping, CHENG Hai-qin, LUO Wei-nian

(School of Eng. and Arc., East China Jiaotong Uni., Nanchang 330013, China)

**Abstract:** Based on a mass of surveys and reading literature, a complete expatiation about the development of the optimization design of portal frames in our country is made, and the principle, the optimizing process and the respective deficiency of some optimization methods which are popular in our country at present are specialized in the paper.

**Key words:** portal frame; steel structure of light weight; optimization design

(上接第36页)

## Method of Analogy Beam for Calculation of Slope and Deflection of Laterally Loaded Symmetrical Beams

YU Xiao-jin

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** Mechanics of materials generally introduces the integration method and the superposition method for computation of the slope and deflection of beams. A new theorem to do the same job is advanced in this paper. Its advantages lie in as follows: it doesn't depend on the table showing the known deflections and slopes of various beams; it is easier than the integration method especially under complicated loads action. The new method is able to spread use to the beams of variable cross section according to the principle of superposition.

**Key words:** beam deformation; analogy beam; deflection curve; deflection; slope