

桅杆式起重机主体金属塔架的结构优化

⑦
49-55

蔡珍红

(重庆建筑大学建筑安装工程系 630045)

TH213.203

摘要 以桅杆式起重机主体金属结构的结构优化问题为例,利用动态规划法讨论了中、大柔度格构金属塔架的结构优化问题。对动态规划法在结构优化工作中的应用,以及塔架最小重量设计等工作进行了详细的推导和大胆的尝试。并一改传统的交互式选材方法,结合具体实例,改查表为公式计算、改全面试选材型为直接筛选计算、改人工布置腹杆为主体最大扭矩惯性矩目标法自动布置,因此有效地加快了寻优速度,也为人工结构分析、结构计算提供了捷径。

关键词 金属塔架, 结构优化, 动态规划, 桅杆式起重机, 结构稳定, 最小重量设计

起重机

中图分类号 TH231.2

桅杆^[1]的主体金属结构部分系空间塔架,其结构设计工作^[2]与塔式起重机的塔身及吊臂、履带吊的臂架、电力输送塔架、石油钻井塔架、化工废气排放火炬塔架类似,对这类塔架进行结构分析,研究其结构优化设计,具有极大的经济价值和学术价值。笔者从近年实际设计工作中尝试的结构优化及计算机辅助设计中,利用动态规划方法,对减轻结构的重量、优化主体金属结构等取得了较为满意的效果。

1 动态规划法^[3]

动态规划方法是把问题分成若干阶段,利用一种递推关系式一个接一个依次求出问题的最优解的方法。因此,如一个问题可分为 n 个阶段且具有如此性质,即无论其初始状态和初始决策如何,其今后诸决策对以第一决策所形成的状态作为初始状态的过程而言,必须构成最优策略。

该递推关系的一般数学表达形式为:

$$f_n(S) = \min_{X_n(S)} \{ W_n[S, X_n(S)] + f_{n-1}[X_n(S)] \} \quad (1)$$

式中 S —— 初始状态

$X_n(S)$ 第一决策

$W[S, X_n(S)] + f_{n-1}[X_n(S)]$ 为以第一决策 $X_n(S)$ 所形成的状态作为初始状态以后各个阶段诸决策所组成的整体集合(策略)。

收稿日期:1995-12-19

蔡珍红,男,1964年生,讲师

当选择第一个决策 $X_n(S)$ 时, 它将产生两方面的影响, 其一是它直接影响第一阶段的结果, 其二由于它又是后面 $n-1$ 个阶段的初始状态, 因而它必将影响到后面 $n-1$ 个阶段的最优值。最优策略的选择就是根据上面两者统一考虑的结果而决定的。这一原则便是动态规划的理论基础。

2 桅杆主体结构优化

2.1 结构分析

桅杆主体金属结构系单向偏心格构式压弯构件^[1], 系中、大柔度压杆。对弦杆、腹杆(主肢和缀条)的受力分析可按一般静定塔架结构处理, 也可利用有限元的办法, 将其分解为普通平面塔架来分析。其构造和简化力学模型见图 1、图 2。从图 1 可见, 每个杆件的轴向力取决于整体塔架的具体布置——几何关系。若每个节点的纵坐标 Y_i 为已知, 则塔架的最优布置可以由合理地选择弦杆各节点的坐标 X_1, X_2, \dots, X_n 来确定, 也就是合理选择塔架的断面宽度 B_{max}, B_{min} 来实现最优决策。

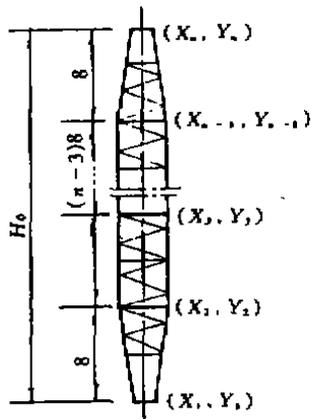


图 1 桅杆主体构造

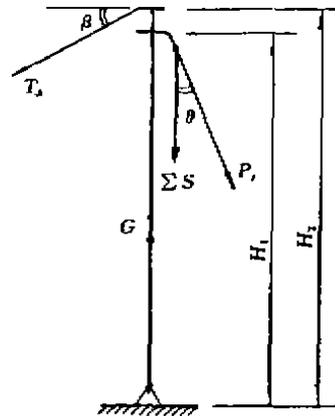


图 2 桅杆简化力学模型^[2]

2.2 初始状态和第一决策的确定

明确了坐标 X_i 与 B_{max}, B_{min} 的作用, 再从桅杆主体结构本身几何特性分析, 不难看出, 第一决策的确定依赖于 X_i 的初始值。而 X_i 的初始值又以压杆的长细比 λ 的边界值为依据确定, 通常桅杆主体结构的长细比控制在 $120 \sim 80$ ^[2] 之间, 故第一决策:

$$X_n(S) = X_n = B_{min}/2 = 0.7L_0 / (0.43 \times \lambda_r) / 2 \quad (2)$$

式中: L_0 为计算长度

$$L_0 = u_1 u_2 H_0$$

H_0 为结构基本高度(长度) (3)

为了方便, 这里讨论的 X_i 为一维变量, 该一维变量的边界值 X_n 设计时, 通常需为已知, 即优化的第一决策, 如设 $X_n = B_{min}/2$, 寻优时方可实现往回递推的求解。另一方面, B_{min} 又随长细比 λ_r 的变化而变化, 故编程时, X_i 应按二维变量处理, 即 $X(i, j)$, 其中 i 为问题的阶段

数且随节点位置 Y_j 变化, j 随长细比 λ_r 变化, 它们的变化分别是:

$$i = 1, 2, 3, \dots, n \quad n = Y_n / (Y_2 - Y_1)$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, m \quad m = [X_n(\lambda_r = 80) - X_n(\lambda_r = 120)] / 5 \text{ 取整}$$

2.3 优化模型的建立

对某一节间 i , 假设 X_i 和 X_{i-1} 为已知, 则通过塔架内力分析, 可以作出这个节间局部的最小重量设计, 因此, 这个节间的最轻重量及其内部构造是 X_i 和 X_{i-1} 的函数。

设各个节间的最轻重量为 $W_1(X_1, X_1)$, $W_2(X_1, X_2)$, \dots , $W_i(X_{i-1}, X_i)$, X_i 为设计变量。

第一节间的最轻重量为:

$$f_1(X_1) = W_1(X_1, X_1) = W_a(\text{弦杆总重}) + W_b(\text{腹杆总重}) \quad (4)$$

第一、二节间合在一起的最小重量在 $W_1(X_1, X_1)$ 与 $W_2(X_1, X_2)$ 之和中, 即在已知 X_2 的情况下, 以 X_1 为变量的如下最小值:

$$f_2(X_2) = \min[W_2(X_1, X_2) + f_1(X_1)] \quad (5)$$

利用动态规划法的术语来说, 就是要作出状态 X_1 的最优决策, 即合理地选择 X_1 , 使塔架的第一节间到第二节间共两段的重量最小。这是一个单变量 X_1 的最小值问题, 可以选用 0.618 法或穷举法^[2]。对于每一个给定的 X_2 , 都有一相应的 X_1 值和最小重量 $f_2(X_2)$, 因此 X_1 和 $f_2(X_2)$ 都是 X_1 的函数。

以此类推, 对于包括第 i 个节间在内的前面共 i 个节间的塔架重量为:

$$f_{i-1}(X_{i-1}) + W_i(X_{i-1}, X_i) \quad (6)$$

其中:

$$f_{i-1}(X_{i-1}) = W_1(0.5B_{\max}, X_1) + W_2(X_1, X_2) + \dots + W_{i-1}(X_{i-2}, X_{i-1}) \quad (7)$$

从第一节间到第 i 节间塔架共 i 段的最小重量为: 假设已知 X_i 的情况下, 以 X_{i-1} 为变量的最小值, 即

$$f_i(X_i) = \min_{X_{i-1}} [W_i(X_{i-1}, X_i) + f_{i-1}(X_{i-1})] \quad (8)$$

这仍是单变 X_{i-1} 的最小值问题, 而且对每一个给定的 X_i 值, 就有一个对应的 X_{i-1} 和最小重量 f_i , 因此 X_{i-1} 和 f_i 都是 X_i 的函数。

式 (8) 就是动态规划方法所依赖的递推关系, 当已求得某阶段的最优函数 $f_{i-1}(X_{i-1})$ 之后, 就可利用此式递推下一个阶段的最优函数 $f_i(X_i)$ 。

对于图 1 的桅杆塔架, 从节间 1 开始, 求得函数 $f_1(X_1)$, 然后逐步递推, 求得 $f_2(X_2)$, $f_3(X_3)$, \dots , $f_i(X_i)$ 。

因 $X_n = B_{\max} / 2$ 为给定的值, 故有:

$$f_n(X_n) = \min[W_n(X_{n-1}, B_{\max}/2) + f_{n-1}(X_{n-1})] \quad (9)$$

求解这个单变量 X_{n-1} 最小值问题, 使得塔架的重量最小, 并得出最优的 X_{n-1} 。

对于桅杆主体结构的局部优化目标函数为(见 2.4 最小重量设计)^[2]:

$$W_n \approx 4 \times 7.8(8A_1 + 3A_2 \times 2X_{n-1} + nA_2L_1) \quad (10)$$

其中: A_1 —— 弦杆截面面积, 详见 2.4 中 3)

A_2 —— 腹杆截面面积, 详见 2.4 中 3)

n —— 斜腹杆最佳数目, $n = 8 / (2B_{\max} \text{tg}35^\circ16')$ 四舍五入取整, 详见 2.4 中 4)

X_{n-1} ——设计变量。

在桅杆主体结构设计中,这里的 X_{n-1} 和 X_n 还可进一步简化,从结构构造需要以及受力具体情况,通常设中部为等截面柱体且上下对称,即:

$$X_{n-1} = X_{n-2}, \dots, = X_2, \quad X_n = X_1$$

故一旦优化出 X_{n-1} ,便可进入下一轮循环($j=1, 2, 3, \dots, m$)。

对于变截面结构,利用 X_1 是 X_2 的函数, X_2 是 X_3 的函数……这个递推关系,往回递推,即由 X_n 求得 X_{n-1} ,再由 X_{n-1} 求得 X_{n-2} ,……依次求各个最优值 X_3, X_2 和 X_1 。

2.4 最小重量设计

由于利用了动态规划方法,整体的优化简化为局部优化。而局部优化的目标函数,即通过单个节间的最小重量设计建立,即式(10)所述,寻优参见本例穷举法进行最小重量设计子程序调试框图,即图 5。编制程序时并作了如下处理:

1) 将型材的断面面积按大小依次排列,建立简单的数据库供选材时比较。排列时还可按结构设计规范对型材进行一次筛选,如壁厚 t 不小于 5 mm,翼缘尺寸应保证局部刚度不小于整体刚度,从而加快优化的速度,如弦杆(单肢)的刚度 λ_1 和腹杆(缀条)的刚度 λ_2 不大于整体的 λ_n ;再利用有关回转半径的近似计算公式,计算出弦杆和腹杆的外轮廓尺寸,再求解壁厚 t ;

2) 利用解析公式代替查表^[3]

(1) 等边角钢的几何特性近似计算公式 如图 3 示:

最小回转半径 $r_x = 0.1955 b$

翼缘尺寸 $b \geq l_1 / 0.1955 \lambda_1$

l_1 —— 弦杆或腹杆的计算长度

断面面积 $A_1 = (2b - t)t + 0.1699 r^2$

$$r \approx 0.1 b$$

圆形钢管的几何特性近似计算公式(图 4)

最小回转半径 $r_x = 0.3 (D - t)$

钢管外径 $D \geq l_1 / 0.3 \lambda_1 + 6 \text{ mm}$ (初选)

l_1 —— 弦杆或腹杆的计算长度

断面面积 $A_1 = \pi D t - \pi t^2$

(2) 用公式计算受压构件的稳定系数 Φ , 代替查表^[4]

四肢格构压杆系 b 类截面, 稳定系数 Φ 按下式计算可得:

$$\text{当 } \lambda_0 = \frac{\lambda_{0x}}{\pi} \cdot \sqrt{f_y/E} \leq 0.215 \text{ 时,} \quad (11)$$

上式中换算长细比 $\lambda_{0x} = 1.15 \lambda_x$ (简化经验公式)

$$\Phi = 1 - 0.65 \lambda_0^2 \quad (12)$$

当 $\lambda_0 > 0.215$ 时

$$\Phi = [0.965 + 0.3 \lambda_0 + \lambda_0^2 - \sqrt{(0.965 + 0.3 \lambda_0 + \lambda_0^2)^2 - 4 \lambda_0^2}] \quad (13)$$

3) 改试选型材为直接选型材的断面面积^[2]

对于钢结构单向偏心格构式压杆,一般的选材办法是试选,经多次选材,验算合格后,人工查表定型。这一传统办法有两个缺点,一是不能自动选材,需设计人员多次介入,通过人机对话完成,从而降低了计算速度。其二是传统的办法不能同时选出材料的壁厚和外轮廓尺寸,

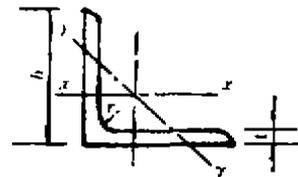


图 3 等边角钢截面

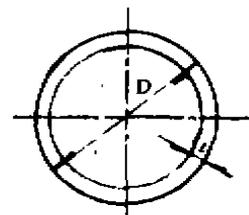


图 4 圆形管材截面

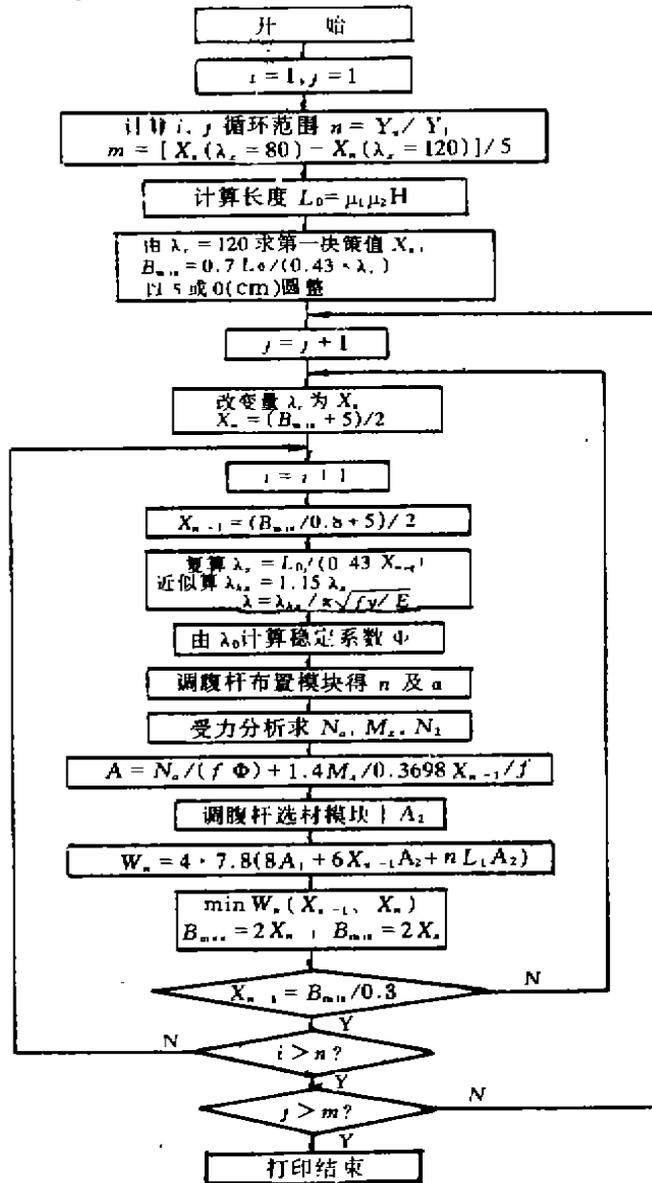


图 5 最小重量设计子程序调试框图

需设计人员过程处理。

为此,除采取(1)的办法近似处理外轮廓尺寸关系外,对结构整稳定性计算式再进一步简化,以解决上述问题。

已知单向偏心格构压杆稳定性计算式:^[6]

$$\sigma = \frac{N_d}{\Phi A} + \frac{\beta_m M_{max}}{\gamma_x W_x (1 - \Phi N_d / N_{EX})} \leq f \quad (14)$$

式中: N_d —— 轴向压力;

β_m —— 等效弯矩系数 本例中取为 1;

M_{max} —— 最大弯矩;

W_x —— 抗弯模量; $W_x = I_x / B_{max} / 2 \approx 0.3698 B_{max} \cdot A$

γ_x —— 塑性发展系数,本例中取为 1;

N_{EX} —— 欧拉临界力; $N_{EX} = \pi^2 E \cdot A / \lambda^2$

E —— 钢材的弹性模量; $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$

上式中断面面积未知时,有的参数不能计算,故需作简化。

即令式(14)中: $\beta_m / (1 - \Phi N_d / N_{EX}) = 1.4$ (按统计分析结果)

将抗弯模量 $W_x \approx 0.3698 B_{max} \cdot A$ 代入式(14)可得^[2]:

$$A_1 \geq \frac{N_d}{\Phi f} + \frac{1.4 M_{max}}{0.3698 B_{max} f} \quad (15)$$

式中: A —— 弦杆截面面积总和;

f —— 设计强度值;

B_{max} 即设计变量 X_{n-1} ;

式(15)中的 N_d 和 M_{max} 均为 X_{n-1} 的函数;

腹杆的设计公式也可按此思路推出,这里不再详述。

4) 节间局部构造的合理布置

节间的腹杆布置合理与否,直接影响到节间内部杆件的轴力大小。按钢结构设计规范可知,斜腹杆轴线与水平腹杆轴线夹角 α 应控制在 $20^\circ \sim 50^\circ$ 的范围内,同时为了增加塔架的扭转惯性矩 $I_t = 2.6 B_{max} \cdot \sin \alpha \cdot \cos^2 \alpha \cdot A$,^[7]求 I_t 的极大值:

即: $dI_t / d\alpha = 0$

可得 $\alpha_0 = 35^\circ 16'$ 为斜腹杆的最佳倾角。显然 α_0 也在容许范围内。

所以,当坐标 X_i 已知时,合理布置斜腹杆的要求是保证 α 角接近 α_0 为好,同时还不得超出容许范围,即 $20^\circ \sim 50^\circ$ 。

设一个标准节间长度为 8 m, n 为斜腹杆数目,要 α_0 最佳,则:

$$n = 8 / (2 B_{max} \text{tg} 35^\circ 16') \quad (16)$$

并作四舍五入取整,保证实际的 α 与 α_0 差值最小。

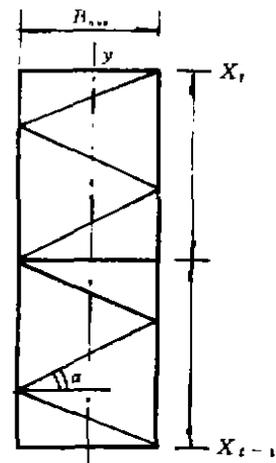


图 6 节间布置

4 结束语

结构优化从理论上已比较成熟,随着微机硬件性能的提高,应用微机从事大型结构分析与计算也相当广泛,尤其是建筑结构领域已有相当数量优秀的计算机辅助设计、辅助分析软件发表,这给工程机械结构设计以很大的触动和启发。笔者通过上述方法应用于 38 个型号的桅杆式起重机结构优化设计中,有效地降低了结构的重量近 15% 左右,深深体会到结构优化的重要,在一些大批量生产的如电网塔架、电信塔架等装置中,经济效益和社会效益更是不可估量。

参 考 文 献

- 1 杨文柱. 重型设备吊装工艺与计算. 北京: 中国建筑工业出版社, 第三版, 1990
- 2 蔡珍红, 杨文柱. 桅杆式起重机设计与计算. 重庆建筑大学自编讲义, 1995. 10
- 3 李炳威. 结构优化设计. 北京: 科学出版社, 1979
- 4 罗邦富等. 钢结构设计规范. 第二版. 北京: 中国建筑出版社, 1988
- 5 刘惟信, 孟嗣宗. 机械最优化设计. 北京: 清华大学出版社, 1986
- 6 欧阳可庆. 钢结构. 上海: 同济大学出版社, 1986
- 7 顾迪民. 工程起重机. 第二版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988

(编辑: 刘家凯)

Structural Optimum of Main Tower - Frame of Mast Crane

Cai Zhenhong

(Department of Construction Installation Engineering, CJU)

Abstract Taking the Structural optimum of main metal frame of mast - crane as a sample, this paper discussed the method of Structural optimization of common middle & high flexibility metal tower - frame by dynamic programming. The method of dynamic programming applied to the structural optimum was deducted and the minimum weight design method of tower - frame was practiced. The paper gave up the traditional interactive way of choosing type of material, combining with the concrete example, changed the data - table looking up into formula solution, shifting with one by one into directly sieving within selected types, artificially fixing up composed rods into automatically arranging them through the way of maximum twist moment of inertia, thus, accelerate optimization and offered a short way for artificial structural analysis and calculation.

Key Words metal tower - frame, structural optimization, dynamic programme, mast crane, stability of structure, minimum weight design