

文章编号:1006-7329(2003)03-0106-04

基于协作优化的塔机金属结构一体化设计*

周宁波, 陈进, 王进

(重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要:将多学科设计优化中的协作优化算法应用于塔式起重机金属结构的整体优化设计, 针对协作优化算法系统级优化问题存在的计算困难, 将其转化为无约束问题处理。通过对塔机金属结构的吊臂、塔帽、平衡臂的一体化优化设计, 验证了方法的有效性。

关键词:多学科设计优化; 协作优化算法; 塔机; 一体化设计

中图分类号:TH213.3

文献标识码:A

On Fully Integrated Design of Tower Crane Metal Structure Using Collaborative Optimization

ZHOU Ning-bo, CHEN Jin, WANG Jin

(State Key Laboratory of Mechanic Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Collaborative optimization algorithm of multi-disciplinary design optimization strategy was applied to the integrated preliminary design of a tower crane's metal structures. As for the computational difficulties appeared during solving the system-level optimization in collaborative optimization, an unconstrained optimization problem was formed. Through its application to an integrated metal structures optimization of tower crane, including jib, head and counter-jib, its effectiveness has been proved.

Keywords: multi-disciplinary design optimization; collaborative optimization; tower crane; fully integrated design

复杂机械系统的设计往往涉及多个学科(子系统), 各个学科之间是相互依赖又相互制约(即耦合)的, 为了实现设计的整体最优, 需要在设计中充分发挥各学科之间的协同机制。传统串行的设计优化模式切断了各个学科之间的相互作用, 只能求得局部最优解, 且周期较长。多学科设计优化(Multidisciplinary Design Optimization, 简称 MDO)是一种从系统角度出发、可并行化的优化设计方法论^[1], 本文采用其中的协作优化算法^[2](Collaborative Optimization, 简称 CO)对塔机的金属结构进行一体化方案设计。

1 多学科设计优化(MDO)

MDO 是一种通过充分探索和利用系统中相互作用的协同机制来设计复杂系统和子系统的方

* 收稿日期:2003-04-08

作者简介:周宁波(1974-),男,云南禄丰人,硕士生,主要从事机械优化设计研究。

法论^[3]。其本质是:从系统的角度出发,通过充分考虑系统内部各个子系统之间的耦合机制,来实现工程设计的系统级最优化。

多学科设计优化问题的数学表达如下:

$$\begin{aligned} &\text{Minimize} && f = f(x, y_1, \dots, y_k) \\ &x && h_i(x, y_1, \dots, y_k) = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \\ &\text{s.t.} && g_j(x, y_1, \dots, y_k) \leq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (1)$$

其中: x 是设计变量, y_1, \dots, y_k 是状态变量,由学科分析方程组

$$\begin{cases} y_1 = A_1(x, y_2, \dots, y_k) \\ \dots \\ y_m = A_m(x, y_1, \dots, y_{m-1}, y_{m+1}, y_k) \end{cases} \quad (m = 1, \dots, k)$$

给出, A_1, \dots, A_k 是 k 个耦合学科。

2 协作优化算法(CO)

协作优化算法是 MDO 方法体系中一种典型的基于分解和协调的双层(Bi-Level)优化算法。其基本思想是将原优化问题的设计变量空间和约束空间进行分解,得到若干个约束相互独立、设计变量允许相交(交集即为共享设计变量)的子系统。在子系统优化中暂时切断与其它子系统的相互作用,实现各子系统优化的并行化。各子系统的设计冲突,由系统级一致性约束条件来协调一致。具有 2 子系统的 CO 算法构架如图 1。

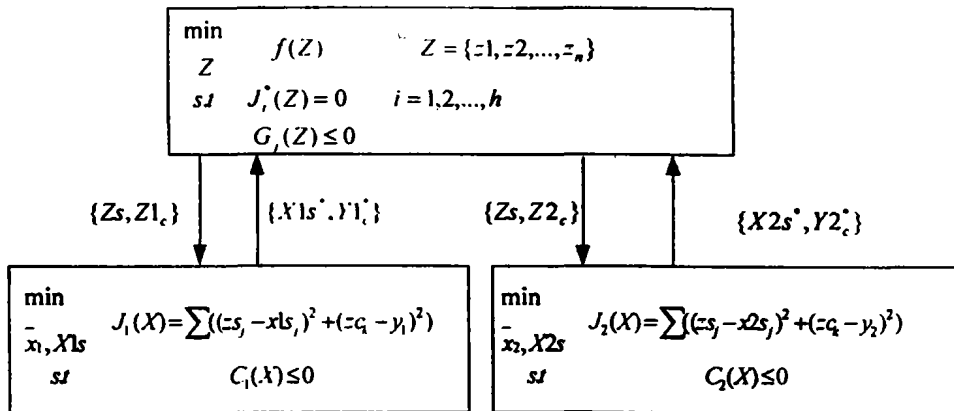


图 1 协作优化算法的整体构架

图中: Z 是系统级设计变量, $Z = \{Z_s, \{Z1_c, Z2_c\}\}$, Z_s 是共享设计变量; $Z1_c, Z2_c$ 分别是子系统 1、2 输入状态变量, y_1, y_2 是子系统 1、2 输出状态变量; \bar{x}_i 是子系统 i 的局部设计变量。 J^* (Z)是系统级的一致性约束, $G_j(Z), G_i(X)$ 系统级和子系统级的约束。

在程序开始时,由系统优化器产生一组设计变量,作为指标分配给各子系统,子系统在其局部变量 \bar{x}_i 和共享变量 Xis 构成的设计空间内寻优,力求减小子系统输出状态变量、共享变量与对应指标间的差值,并将所得最优值返回系统优化器,构成一致性约束条件,系统优化器在一致性约束条件下寻优,将所得最优解作为指标再传给子系统,该过程迭代直至收敛。

3 塔机金属结构一体化设计计算模型

3.1 力学模型

3.1.1 系统模型

系统级模型如图 2 所示,图中: B, L_0 是塔帽底部宽度、吊臂长度,属系统级参数; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 和 H 分别是吊臂内、外拉杆、平衡臂拉杆与塔身中心线夹角和塔帽高度,属系统设计变量,也是子系统共享设计变量, W_{phzh} 是平衡重重量。

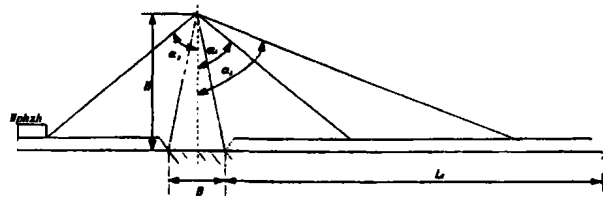


图 2 塔机金属结构一体化设计计算模型

3.1.2 子系统模型

将系统的设计问题分解成吊臂、塔帽和平衡臂三个子系统。塔帽采用正置式,主肢采用实心圆棒;吊臂采用正置等腰三角形形式,平衡臂采用格构式,吊臂和平衡臂的主肢分别采用等边角钢拼方。起升平面内三个子系统的计算模型分别如图 3,图中 $L_{phzh}, L_{dd}, L_{qsh}, L_{jg}$ 分别平衡重作用点、吊点、起升机构自重作用点、机柜自重作用点到平衡臂铰接点的距离, W_{qsh} 和 W_{jg} 分别是起升机构和机柜自重。

在回转平面内,吊臂和平衡臂分别作为悬臂梁处理,吊臂、平衡臂的风载和回转惯性力作为均布载荷处理,固定部件和吊载的风载、回转惯性力作为集中载荷处理。

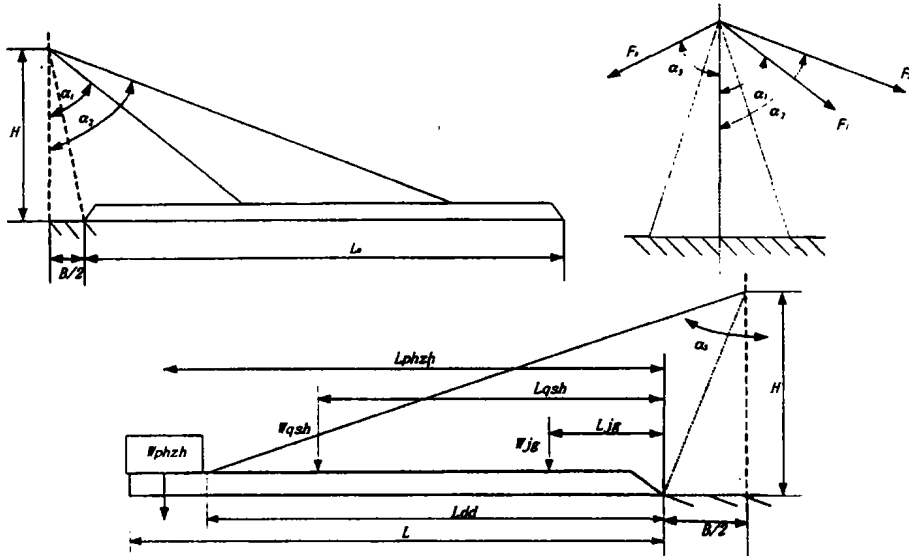


图 3 起升平面内吊臂、塔帽和平衡臂的计算模型

3.2 数学模型

3.2.1 系统级优化的数学模型

Minimize

$$z \quad F(z) = z(1) + z(2) + z(3)$$

$$S. t. \quad J_i(z) = 0 \quad (2)$$

$$Z = (W_1, W_2, W_3, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, H, M_1, M_3, M_4, F_1, F_2, F_3)$$

其中: W_1, W_2, W_3 是系统为塔帽、吊臂和平衡臂子系统设定的预期自重;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 是吊臂内、外拉杆和平衡臂拉杆与竖直方向的夹角;

H 是塔帽的设计高度;

M_1, M_3, M_4 是确定平衡重所需的侧倾力矩,属于耦合变量;

F_1, F_2 是吊臂内、外拉杆在工况 I 下的最大轴力,属于耦合变量;

F_3 是平衡臂拉杆的轴力,属于耦合变量;

$J_i(z) (i = 1, 2, 3)$ 是对应与每个子系统的一致性约束条件。

3.2.2 子系统优化数学模型

由于各个并行子系统结构上的相似性,现仅给出塔帽子系统的数学模型:

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & f_1(x_1) = [\bar{z}(1) - W_1(x_1)]^2 + [\bar{z}(4) - x_1(3)]^2 + [\bar{z}(5) - x_1(4)]^2 + [\bar{z}(6) - x_1(5)]^2 \\ & + [\bar{z}(7) - x_1(2)]^2 + [\bar{z}(11) - x_1(6)]^2 + [\bar{z}(12) - x_1(7)]^2 + [\bar{z}(13) - x_1(8)]^2 \\ \text{S. t.} \quad & \sigma_{\max} \leq [\sigma] \end{aligned} \quad (3)$$

其中: x_1 是子系统设计变量, $x_1 = (d, H, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, F_1, F_2, F_3)$;

d 是塔帽主肢的直径,是子系统的局部设计变量;

$W_1(x_1)$ 是塔帽子系统自重的计算表达式;

\bar{z} 是系统给出的塔帽子系统中相应变量的设计指标;

σ_{\max} 是塔帽主肢在压弯组合变形下所承受的最大应力。

3.3 系统级等式约束的处理

在标准 CO 算法中,一致性约束条件取等式形式,使系统级优化问题的求解存在计算困难^[4]。为此,本文通过将系统优化问题的一致性约束分别乘上适当的权因子,与原目标函数一起构成一个无约束优化问题,进而采用无约束优化器求解,以避免系统级优化问题的计算困难。

4 计算结果及结论

采用协作优化算法对某 QTZ7030 型塔机的金属结构进行一体化设计,得到优化结果 $W = 12.845$ t,原方案 $W_0 = 13.667$ t(仅考虑主肢重量),减轻了 6.4%。共享设计变量在系统和子系统优化器中的优化结果见表 1,可见系统优化器可以在保证各个子系统优化器设计结果协调一致的基础上,使整体设计重量有明显的减轻,显然这是设计过程中考虑了子系统间耦合机制的结果。

表 1 共享变量在系统级和各子系统级的优化结果

共享设计变量	$H(\text{m})$	$\alpha_1(^{\circ})$	$\alpha_2(^{\circ})$	$\alpha_3(^{\circ})$
系统级优化器	8.746	72.010	81.549	65.827
塔帽子系统优化器	8.701	70.279	81.657	66.061
吊臂子系统优化器	8.800	71.096	81.808	-
平衡臂子系统优化器	8.800	-	-	66.091

协作优化算法具有保证子系统设计自主性、优化并行性;子系统与系统之间通讯的信息量小;子系统设计模块化以及可扩展性等优点,因而协作优化算法比较适合于大规模的、耦合工程系统优化设计。

参考文献:

- [1] Joseph P. Giesing, Jean - Francois M. Barthelemy . A Summary of Industry MDO Application and Needs[C] AIAA Technical Report 1998.
- [2] Mark R. Rawlings, Richard J. Balling. "Collaborative Optimizaiton with Disciplinary Conceptual Design" [A], Proceedings of the AIAA/USAF/NASA/ISSMO 7th Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization[C], AIAA, Atlanta, April 1998. AIAA Paper Number: AIAA - 98 - 4919.
- [3] 余雄庆.多学科设计优化算法及其在飞机设计中的应用研究[D]. 南京:南京航空航天大学,1999.
- [4] Natalia M. Alexandrov, Robert Michel Lewis. Analytical and Computational Aspects of Collaborative Optimizaiton[M]. AIAA - 2000 - 4718.