

工程与实践

塔式起重机金属结构计算机 辅助设计软件系统

喻志刚 王炳乐 宋立权 周首光

(机电系)

摘要 本文就塔式起重机金属结构计算机辅助设计软件系统QT-SCAD的主要结构与功能、理论基础与主要特点作了介绍。该系统适合于上回转水平臂、单吊点、双吊点、行走式、附着式多种结构形式的塔式起重机金属结构的强度、刚度和稳定性分析、机构、金属结构的振动和动力计算,以及整机或任一结构总成的优化设计。

关键词 塔式起重机, 金属结构, 计算机辅助设计

0 引言

计算机辅助设计(Computer Aided Design),简称CAD,至今已有二十多年的发展历史。我国“七五”计划期间,将此列为重点开发项目之一。CAD技术,近几年出现了突飞猛进的发展,尤其是计算机硬件、图形技术、智能模拟等方面的巨大成就,促使它已成为工程设计和科学研究不可缺少的重要组成部分。为适应这种形势,近几年,我们建筑机械现代设计方法研究小组投入了相当的力量,先后开发了包括钢结构、机构、机械零件、部件等适合于建筑机械行业的计算机辅助设计软件系统。塔式起重机金属结构计算机辅助设计系统(QT-SCAD系统)是其中的部分成果。QT-SCAD系统适合于上回转水平臂,单吊点、双吊点、行走、附着式多种结构形式的塔式起重机金属结构的强度、刚度和稳定性分析,机构金属结构的振动及动力学分析,以及整机或任一结构总成的优化设计。QT-SCAD系统以刚度法为基本的分析方法,将吊臂、平衡臂、塔帽、塔身结构的强度、刚度和稳定性计算有机地合为一体;机构结构振动及动力学分析采用具有离散集中质量的多自由度弹性振动系统,由模态分析法求解,可得各种工况下起升机构及金属结构的各动态响应;优化设计时应用混合离散变量优化设计方法,使设计结果无须圆整,即可直接给出型材型号和符合工程要求的数

据方案。我们曾用QT-SCAD系统对现有若干塔机作了分析和数值模拟，探索了塔式起重机若干设计规律和设计机理；我们还用该系统成功地为某厂QT-80塔式起重机“井”型行走式底架结构总成和QT-80A塔式起重机整机作了优化设计，所提参数合理、可靠，取得了满意的结果。QT-SCAD系统具有较大的实用价值和推广意义。

1 QT-SCAD系统的主要结构与功能

QT-SCAD系统分为上部结构和下部结构（以塔机回转支承为分界面）两个子结构系统和一个起升机构—金属结构振动、动态分析子系统。每一子系统由若干结构总成模块或专业模

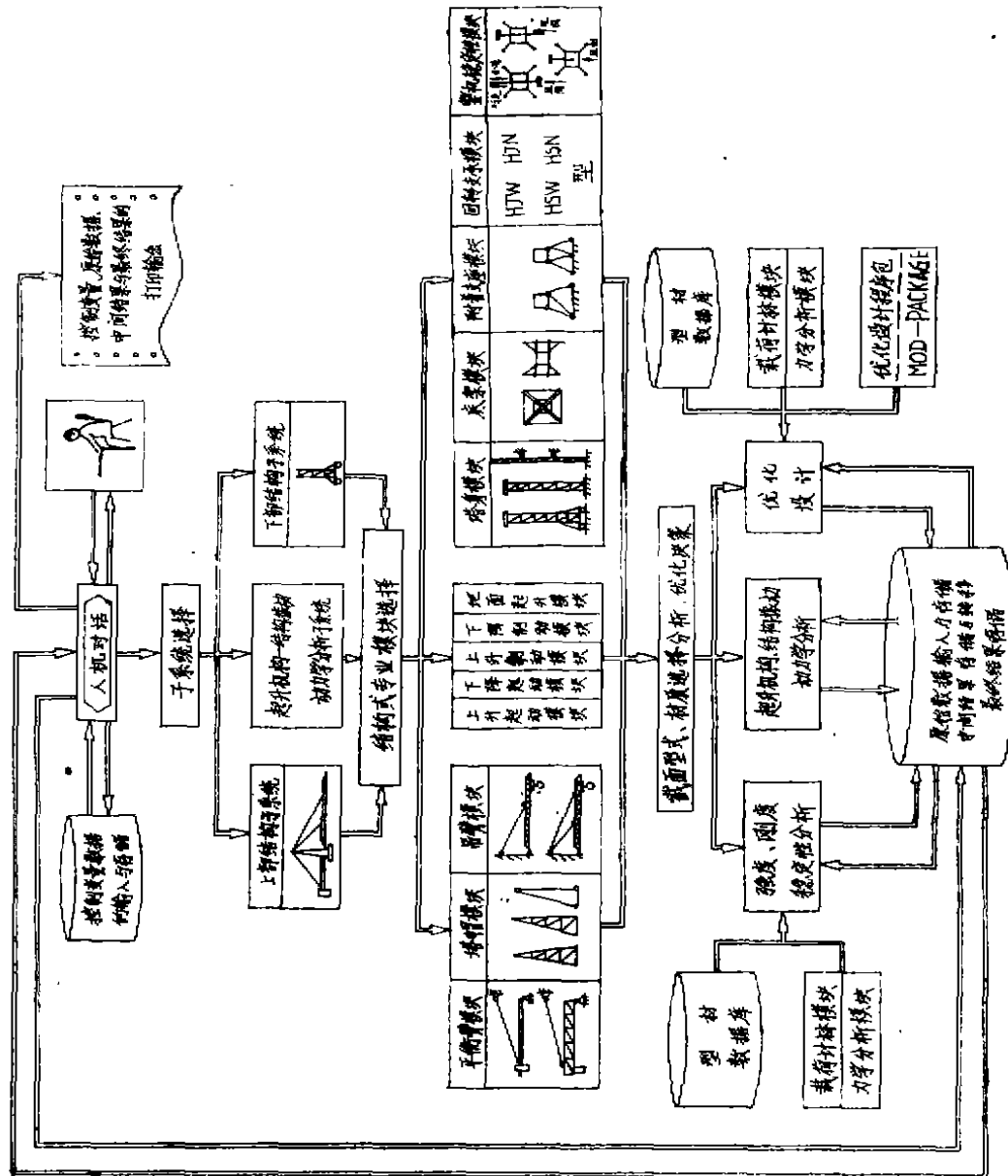


图 1 QT-SCAD 系统总体结构

块组成,而每一结构总成模块又与载荷计算模块、力学分析模块、型材数据库,以及混合离散变量优化设计方法程序包MOD-PACKAGE相联。各子系统或各模块之间,可以实现必要的数据传递。QT-SCAD系统,其整体结构如图1所示。该系统的主要功能有:

1) 上部结构,包括吊臂,平衡臂,塔帽的强度、刚度和稳定性校核计算,以及它们的优化设计。优化设计时,上述三模块可单独进行,由数据库传递中间数据,也可以作为一个整体,实现局部整体设计。

2) 下部结构,包括塔身,底架、附着支座的强度、刚度和稳定性校核计算,以及它们的优化设计。无论是分析,还是优化设计,都是逐级进行的,即首先对塔身分析或优化设计,然后再底架、附着支座的设计计算。在塔身模块中,可通过人机对话指令,或者输出各工况及非工况时的轮压,或者作车轮疲劳校核计算,或者提供车轮的设计参数。另外,还可给出塔机顶风行走时的最大阻力,以供行走机构设计时参考。在附着支座模块中,还可以给出任一支座的反力及它们的最大值,以供支座基础设计使用。

3) 塔机各个工况,包括上升起动、制动,下降起动、制动,以及重物离地时起升机构及金属结构,包括吊臂和塔身结构的振动及动力学分析。起升机构—金属结构振动及动力学分析子系统可方便地向用户提供塔式起重机起升机构—金属结构系统各种动态响应和较为符实的动载系数。

4) 回转支承的校核计算,或者计算机辅助选型。

5) 塔式起重机工作、安装,及非工作情况时的整机稳定性校核计算。

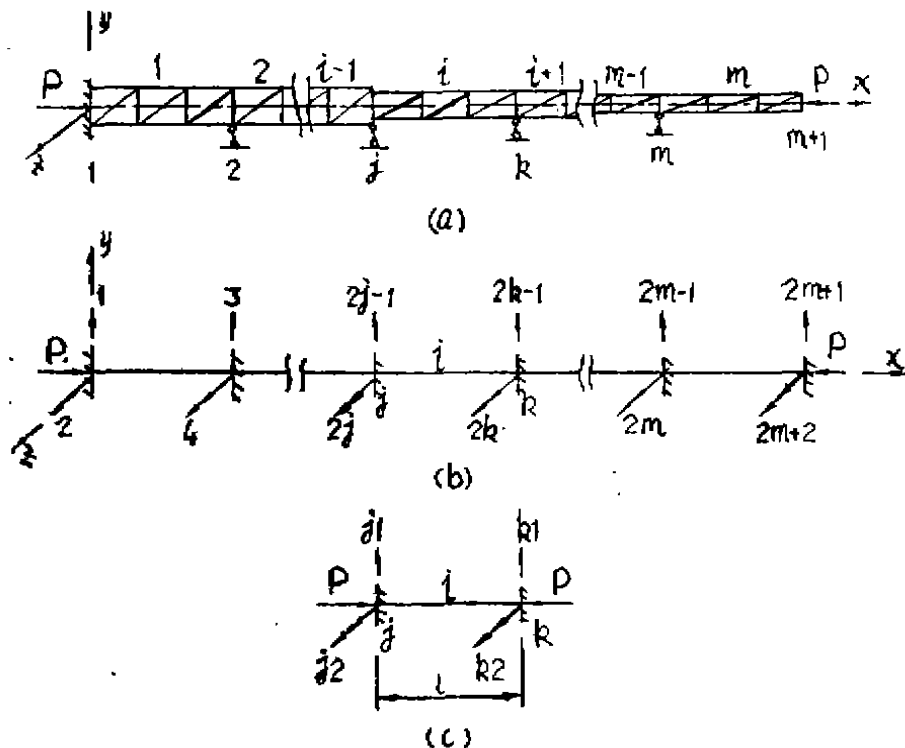


图2 塔身、吊臂结构力学模型

a) 原结构 b) 约束结构 c) 约束梁单元

另外，QT-SCAD系统的每一模块均包含有多种结构型式，每一种结构型式所采用的型材、材质、截面型式、组合方式又可随程序执行者的指令作多种变化。例如吊臂的上弦可以是管材，也可以是角钢或槽钢对焊；塔身主弦可以是管材、单角钢（腹杆也适合），或者双角钢对焊；塔身撑杆及附着支座的肢件可以是钢管，或者其他型材的组合，或者是焊接件；底架主梁可以是焊接工字梁，或者焊接箱形梁。

2 QT-SCAD系统的理论基础

2.1 吊臂、平衡臂、塔帽、塔身结构

参照起重机设计新规范^[1,2]对吊臂、平衡臂、塔帽、塔身等结构总成作强度、刚度、稳定性计算时，其关键是要求出吊臂、平衡臂、塔帽、塔身的计算长度系数 μ 值，或者它们的临界载荷 N_E ，杆端弯矩 M_0 ，杆端反力 R 和杆端位移 D 。为将上述四部分的计算统一于一体，并便于考虑塔身和吊臂的不同情况（行走式，附着式；单吊点，双吊点），以及支座弹性、支座位移等因素的影响，QT-SCAD系统采用承受轴向压力的连续梁力学模型（图2），用刚度法（位移法）求解，其单元刚度矩阵由下式给出：

$$S_i = EI_z \begin{bmatrix} \frac{12}{l^3} S_1 + \frac{S_{R1}}{EI_z} & & & & & \\ & \frac{6}{l^2} S_2 & & & & \\ & & \frac{4}{l} S_3 + \frac{S_{R2}}{EI_z} & & & \\ & -\frac{12}{l^3} S_1 & & -\frac{6}{l^2} S_2 & & \frac{12}{l^3} S_1 + \frac{S_{R3}}{EI_z} \\ & & & & \frac{2}{l} S_4 & \\ & \frac{6}{l^2} S_2 & & & -\frac{6}{l^2} S_2 & \frac{4}{l} S_3 + \frac{S_{R4}}{EI_z} \end{bmatrix} \quad \text{对称}$$

其中：

$$S_1 = [12 - (2u)^2(2\psi - \phi)] / [12(2\psi - \phi)]$$

$$S_2 = 1 / (2\psi - \phi)$$

$$S_3 = 3\psi / [(2\psi + \phi)(2\psi - \phi)]$$

$$S_4 = 3\phi / [(2\psi + \phi)(2\psi - \phi)]$$

$$\psi = \frac{3}{2u} \left(\frac{1}{2u} - \frac{1}{\operatorname{tg} 2u} \right)$$

$$\phi = \frac{3}{u} \left(\frac{1}{\sin 2u} - \frac{1}{2u} \right)$$

$$2u = k \cdot l = \sqrt{\frac{P}{EI_z}} \cdot l$$

$S_{R1}, S_{R2}, S_{R3}, S_{R4}$ ——支承刚度系数

I_z ——梁元截面惯性矩

l ——梁元长

分块形式的整体刚度矩阵和载荷向量由下述两式给出：

$$S_j = \begin{pmatrix} S & S_{DR} \\ S_{RD} & S_{RR} \end{pmatrix}$$

$$A_C = A + A_E = \begin{pmatrix} A_{DL} \\ -A_{RL} \end{pmatrix}$$

则未知位移向量:

$$D = S^{-1}(A_D - S_{DR} \cdot D_R)$$

杆端力向量:

$$A_M = A_{ML} = A_{MD} \cdot D$$

支座反力向量为:

$$A_R = A_{RL} + S_{RD} \cdot D + S_{RR} \cdot D_R \quad \text{和} \quad A_R = -S_R \cdot D$$

前式用于刚性支座, 后式用于弹性支座。以上诸式中, 其余符号意义请参阅文献[3]。

临界载荷 P_E (或 N_E) 之值可如下求得, 令轴力以外的全部载荷为零, 则 $S \cdot D = 0$, 屈曲时, D 有非零解, 其条件是 $D \cdot S = 0$, 即 $|S| = 0$, 求解该临界方程得 P_E (或 N_E) 值。

上述计算完成后, 代入文献[1]中的有关公式, 即可完成上述结构总成的强度、刚度、稳定性计算, 优化设计数学模型中的约束条件也随之形成。

2.2 底架结构

底架结构总成系空间桁梁混合结构, 其内力的精确计算十分困难。QT-SCAD系统采用柔度法(力法)求解。为了充分利用结构的对称性, 以便最大限度地简化计算, 首先将外载分组, 分别计算出各组外载对应的内力, 然后叠加, 得总内力。

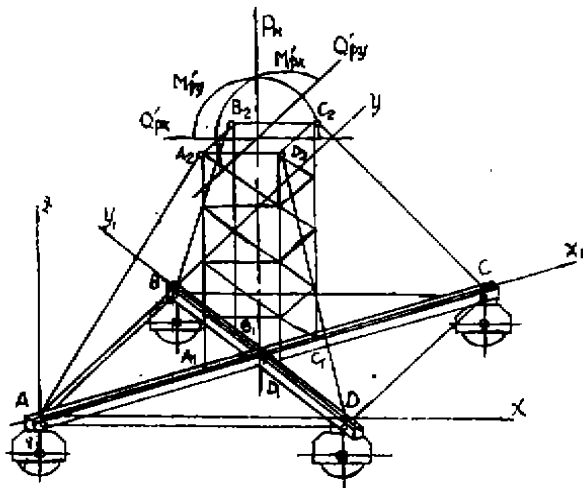


图3 “十”字形底架结构的构造示意图

如图3所示为“十”字形底架结构的构造示意图, 根据该结构的构造和受力特点, 在内力计算时, 采用垂直平面和水平面分别计算然后叠加的做法。在垂直平面内又分为两单片平面桁架混合结构(图4)处理。至于两单片平面桁架结构的相互作用, 可通过十字主梁中点位移必须协调(相等)的原则来考虑。

“十”字形底架总成在水平面内的力学模型如图5所示。依据图4、图5, 易于建立相应的力法基本方程:

$$F \chi = -D$$

求解后可得未知力向量 χ , 进而可得结构有关部位的反力、内力向量:

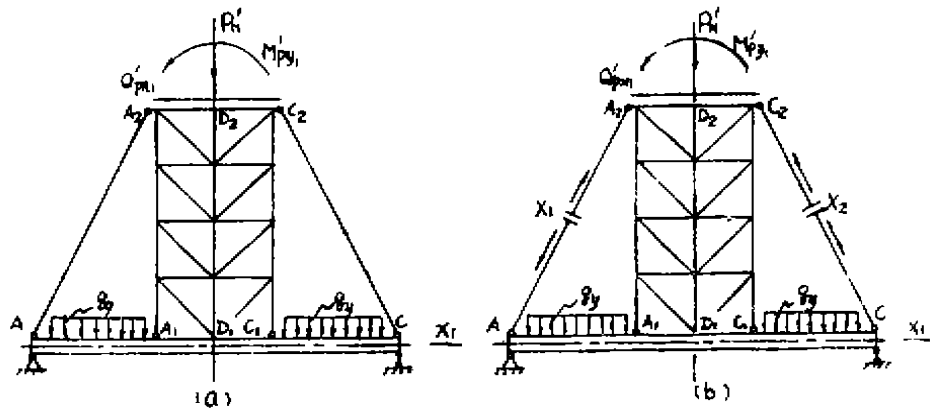


图4 “十”字形底架垂直平面内的力学模型

a) 原结构 b) 基本结构

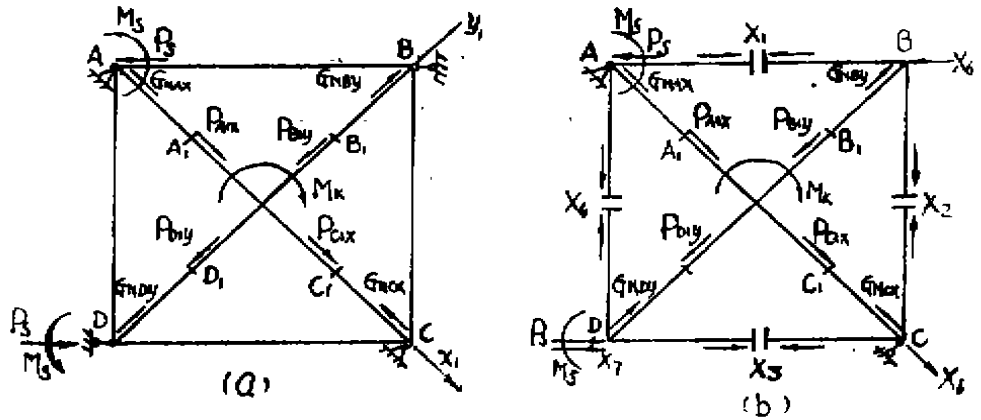


图5 “十”字形底架水平面内的力学模型

a) 原结构 b) 基本结构

$$A = A_p + T \cdot x$$

和2.1 相同，上述计算完成后，即可十分方便地完成底架结构强度、刚度、稳定性计算，进而完成优化设计。

2.3 结构振动及动力学分析

塔式起重机是一个多自由度的弹性系统，工作时频繁的起动、制动使其经常处于冲击和振动的动态过程中。过渡过程中吊重的上升、下降使结构系统既作水平方向的振动，又作垂直方向的振动。QT-SCAD系统将整个塔机简化为图6所示的质量弹簧系统。求解该系统的基本方法大体如下：

1) 建立系统振动微分方程组：

$$[M] \{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\}$$

式中：

$[M]$ ， $[K]$ ——分别为系统的质量矩阵和刚度矩阵，

$\{F(t)\}$ ——输入激励的时间函数列阵。

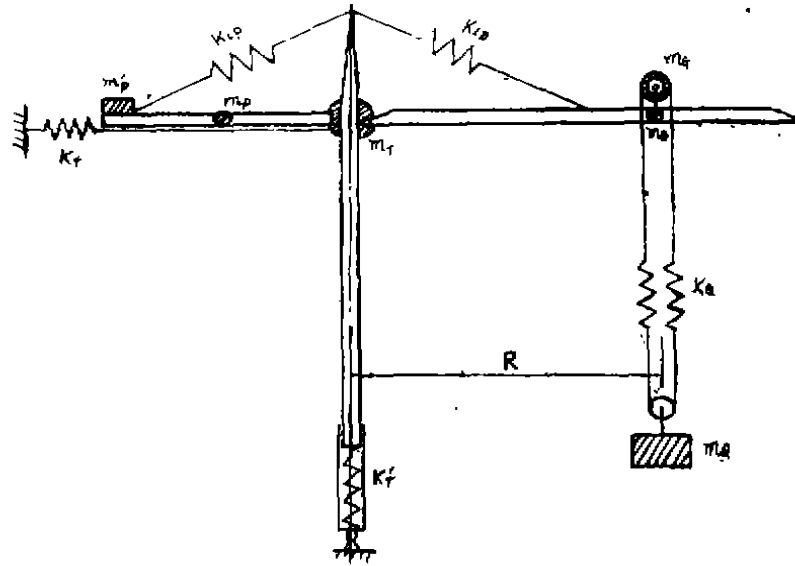


图6 塔式起重机质量弹性系统力学模型

应用模态分析法，求得系统振型矩阵（模态矩阵） $[X_M]$ 后，则：

$$\text{主质量矩阵} \quad [M_2] = [X_M]^T [M] [X_M];$$

$$\text{主刚度矩阵} \quad [K_2] = [X_M]^T [K] [X_M];$$

$$\text{主坐标激励} \quad [F(t)_2] = [X_M]^T [F(t)].$$

方程组解耦，求得系统以模态（主）坐标表达的位移响应 $[S_2]$ ，并由 $[X_M]$ 得原物理坐标下响应 $[X] = [X_M][S_2]$ ， $[\dot{X}]$ 及 $[\ddot{X}]$ ，最后根据位移、变形与刚度、质量与加速度的物理关系可求得塔身、吊臂、起升机构、钢丝绳、吊钩等各动载荷响应 $[P(t)]$ 。

2) $[M]$ 、 $[K]$ 的确定：

$[M]$ 中元素（代换质量）由能量法求得。

$[K]$ 中元素（代换刚度）由势能相等原理求得。

吊臂的代换质量 m_D 及刚度 K_D （图中未标出）随幅度 R 不同而变化。

将起升钢丝绳视为弹性振动“杆”，将其代换至吊重质量。故 m_G 随幅度、起升高度及起重量而改变。

起升机构各传动件的代换刚度考虑了机构传动比、上升下降效率的不同对代换刚度的影响，考虑了升、降及起、制动时刚度表达式的不同，并与起吊钢丝绳一起综合成综合代换刚度，故 K_G 还随幅度、起升高度而改变。

对不同工况，其它某些代换参数也作相应变化。

3) 输入激励 $[K(t)]$ ：

$F(t)$ 由传动系统机器运动方程式求得。 $F(t)$ 与传动系统的转动惯量、吊重及不同工况的机械特性曲线有关。

在振动方程组中考虑了滑轮组的倍率和效率。值得指出的是，不同工况起升机构—金属结构系统振动方程组的表达是不同的，同一工况的不同过程，其方程组形式也不同，这种情况，应分别建立方程组，然后联立求解。

2.4 优化设计方法

QT-SCAD系统对各结构总成优化设计时，其各分目标函数取其理论重量，整体优化时，总目标函数为各分目标函数的加权和。

设计变量主要考虑结构参数，包括截面型式和截面尺寸（或型材型号）。

设计约束条件有两类：性能约束和边界约束。性能约束由结构强度、刚度、稳定性条件提出；边界约束由工艺、材料供应情况提出。

优化方法采用文献[7]提供的约束非线性混合离散变量优化设计程序包MOD-PACKAGE。MOD-PACKAGE的总体结构如图7所示。该程序包各方法的数学模型一般表示为

$$\begin{aligned} \min F(\mathbf{X}) \\ \& = \{ \mathbf{X} \mid g_j(\mathbf{X}) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m \} \\ \mathbf{X} = \begin{cases} \mathbf{X}^D \\ \mathbf{X}^C \end{cases} \\ \mathbf{X}^D = [x_1, x_2, \dots, x_p]^T \in \mathbf{R}^D \\ \mathbf{X}^C = [x_{p+1}, x_{p+2}, \dots, x_n]^T \in \mathbf{R}^C \\ \mathbf{R}^* = \mathbf{R}^D \times \mathbf{R}^C = \mathbf{R} \{ (\mathbf{X}^D, \mathbf{X}^C); \mathbf{X}^D \in \mathbf{R}^D, \mathbf{X}^C \in \mathbf{R}^C \} \end{aligned}$$

式中：

p ——离散变量的个数；

n ——设计变量的个数；

m ——约束条件的个数。

当 \mathbf{X}^D 为空集时， $\mathbf{X} = \mathbf{X}^C$ ，为全连续问题；当 \mathbf{X}^C 为空集时， $\mathbf{X} = \mathbf{X}^D$ ，为全离散问题；若两者均非空集，则为混合型问题。

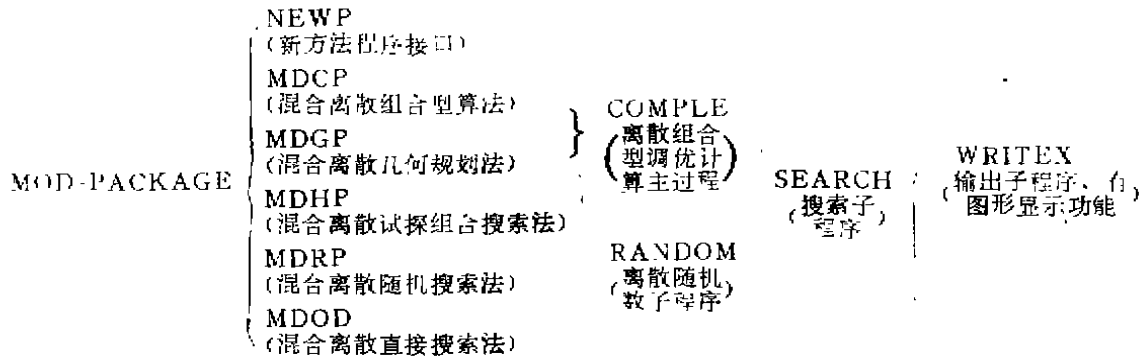


图7 MOD-PACKAGE 总体结构

用MOD-PACKAGE各方法求解混合离散最优解的基本步骤如下：

- S1 输入有效离散集（离散值域矩阵Q）的各个元素；
- S2 选择初始离散可行点 $\mathbf{X} \in \&$ ，令 $K \leftarrow C$ ；
- S3 对 \mathbf{X} 点确定离散搜索方向 \mathbf{P} ，置 $K \leftarrow K + 1$ ；
- S4 对 \mathbf{P} 进行一维搜索，

$$\mathbf{X}_i \leftarrow \mathbf{X} + T_0 \cdot \mathbf{P},$$

T_0 为最合适搜索步长;

S5 若 $X_T = X$, 转S3, 否则在 X_T 点所生成的 T 域(T 域定义见文献[7])内查点;

S6 若 $T \neq \phi$ (ϕ 定义见文献[7]), 转S3, 否则停机, 取当前 $X_T = X^*$ (最优解)。

3 QT-SCAD系统的主要特点

3.1 适应范围广

由于QT-SCAD系统几乎包含了塔式起重机金属结构全部结构总成及有关的专业模块, 每一种模块中又包含有多种结构型式, 而每一种结构型式所采用的型材、材质、截面型式、组合方式又可作多种变化; 又由于该系统连有功能很强的混合离散变量优化设计程序包MOD-PACKAGE, 以及型号、规格齐全的型材数据库; 还由于该系统包含有起升机构—金属结构振动、动力学分析子系统, 故QT-SCAD系统应用范围极其广泛。

3.2 实用性强

由于QT-SCAD系统各结构总成模块的强度、刚度、稳定性分析, 以及优化设计相应的数学模型, 均采用文献[1]提供的公式; 又由于起升机构—金属结构振动、动力学分析子系统可方便地提供各种动态响应和较为符实的动载系数, 故该系统工程界易于接受采纳, 实用性强、有推广意义。

3.3 使用方便

由于QT-SCAD系统的输入、输出系统, 各分系统或各模块的调用, 完成采用人机交互通讯, 并具有数据存储功能; 程序可按照设计者意志自动运行, 又可以作指定运行, 故该系统操作简单易学, 使用方便。

3.4 便于扩充和拆零

QT-SCAD系统采用全模块结构, 用户若需增加系统功能, 只要按格式增加相应模块即可, 又由于该系统各模块相对独立, 故缩微和拆零极其方便。

3.5 运算速度快, 结果可靠

由于QT-SCAD系统采用混合离散变量优化设计方法, 不仅可直接给出符合工程要求的设计结果, 而且由于离散优化算法只在有限的离散点上计算函数值, 并便于结合设计人员的经验和智慧(体现在离散值的选取上), 故该系统运算速度快, 计算结果可靠程度高。

3.6 移植性好

QT-SCAD系统建立在微型计算机上, 用FORTRAN 77语言写成。根据使用者要求, 它可方便地移植至各种大、中、小型计算机上使用, 该系统特别适合于本行业有微机系统的企业厂矿。

4 应用实例和简单结语

随着QT-SCAD系统的研制、调试和完善, 我们用该系统对现有若干塔机作了数值模拟, 探索了其设计规律和设计机理。在此基础上, 我们又用该系统为有关厂矿作了若干实际设计和分析。

实例1 某厂QT-80行走式塔机, 上梁为单箱形、下梁为双箱形, 搁置式无斜撑、压重

支点设在上梁上,下梁和轨道平行的“井”型底架总成的优化设计。优化结果和原方案相比,理论重量下降了15.03%。

实例2 某厂QT-80行走式塔机,上梁为工字形,下梁为单箱形,搁置式有斜撑加固,压重点设在上梁上,下梁和轨道垂直的“井”型底架总成的优化设计。优化方案理论重量较原设计下降了19.42%。

实例3 某厂QT-80A行走式塔机“十”字型底架总成的计算机辅助设计。与相应的“井”型底架总成相比,理论重量下降了约50%。

实例4 某厂QT-80A塔机金属结构的整机计算机辅助设计。与它的原型QT-80塔机相比,在基本臂由35米提高为45米,最大幅度由48米提高为50米,最小起重量由1.3吨提高为1.4吨,最大起升高度,行走式由48米提高为50米,附着式由105米提高为120米,以及在起升、回转、行走等速度均有所提高的前提下,整机重量还下降了约10%。

以上实例均已投入实际生产,其中实例4为建设部1988年新产品开发项目。

实例5 某厂QT-80塔机起升机构——金属结构系统动态响应的研究。该机各工况吊钩、吊臂最大动载系数如下表1。

表1 动载系数 Φ_{max}

工况	部位	吊点内, $V_0 = 28\text{m/分}$, $Q_0 = 4\text{T}$						吊点外, $V_0 = 50\text{m/分}$ $Q_0 = 2.5\text{T}$
		幅度R(m)						
		5	10	15	20	25	30	
上升启动	吊钩	1.148	1.164	1.176	1.173	1.476	1.485	
	吊臂	1.245	1.186	1.175	1.173	1.468	1.481	
下降启动	吊钩	1.135	1.133	1.132	1.131	1.446	1.447	
	吊臂	1.175	1.142	1.142	1.141	1.471	1.470	
上升制动	吊钩	1.142	1.143	1.135	1.130	1.345	1.335	
	吊臂	1.175	1.165	1.155	1.162	1.365	1.355	
高位上升	吊钩	$1+0.9e$	$1+0.8e$	$1+0.75e$	$1+0.98e$	$1+1.1e$	$1+1.3e$	
	吊臂	$1+0.6e$	$1+0.1e$	$1+0.05e$	$1+0.25e$	$1+0.1e$	$1+0.05e$	

• $e = C_1^2$, C_1 、 C_2 分别为与操作情况、地基弹性有关的两个系数。

据有关专家鉴定,上表所示动载系数附实性较好。

QT-SCAD系统是我组近年来开发的一个成果,它为提高我国塔式起重机的设计水平和塔机更新换代、扩展塔机类型规格,类似专用机具金属结构的设计,缩短设计周期,增强企业应变能力,提供了有效的方法和手段。该系统目前有待于在推广使用中作进一步改进、补充和完善。

参 考 文 献

- 1 GB 3811-83 起重机设计规范
- 2 起重机设计规范编写说明,《规范》编写组,1982
- 3 美国J·M盖尔,杆系结构分析,水利电力出版社,1983

- 4 同济大学主编, 钢结构, 中国建筑工业出版社, 1985
- 5 阎以诵、靳晓雄编, 工程机械动力学, 同济大学出版社, 1986
- 6 Mechanical Vibrations, Theory and Applications, Second edition, Francis, Tes, Ivan E Morse, Rolland, T Hinkle
- 7 陈立周, 关于约束非线性混合离散变量优化设计方法及软件包MOD的研究, 科学技术研究报告, 北京科学技术大学, 1987
- 8 QT-80塔式起重机底架结构优化设计的研究报告, 重庆建筑工程学院、广西建筑机械厂, 1987~1988
- 9 QT-80A塔式起重机整机优化设计研究报告, 重庆建筑工程学院、广西建筑机械厂, 1989
- 10 宋立权, 塔式起重机起升机构—金属结构系统动态响应的研究, 重庆建筑工程学院 硕士论文, 1988

(编辑: 刘家凯)

THE COMPUTER AIDED DESIGN SOFTWARE SYSTEM FOR THE STEEL STRUCTURE OF TOWER CRANE

Yu Zhigang Wang Bingle Song Liquan Zhou Shouguang

(Department of Mechanical and Electronical Engineering)

ABSTRACT This paper introduces the main structure and function, the theoretical basis and the main features of the computer aided design software system QT-SCAD for the steel structure of tower crane. The QT-SCAD is suitable for all kinds of movable or fixable tower crane with level arm which rotates above the crane body, and has single or double hanging points. It can be used for the strength, stiffness and stability analyses of the structure, the vibrative and dynamic calculation of mechanisms and structure, and the optimal design of the structure of tower crane or its components.

KEY WORDS tower crane, steel structure, computer aided design