

文章编号:1005-9865(2001)01-0007-07

## 海洋平台结构动力响应优化设计与灵敏度分析

顾元宪, 马红艳, 姜 成, 亢 战, 张洪武

(大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘 要:**研究了海洋平台结构动力响应优化设计以及结构动力响应的灵敏度计算方法。给出了结构稳态频率响应和瞬态时程响应的灵敏度分析算法,并通过数值试验讨论了瞬态响应灵敏度分析算法的精度和差分法中变量摄动量的影响。在JIFEX软件中实现了结构动力响应灵敏度计算,建立海洋平台结构优化模型和求解方法。数值算例表明了本文方法和程序的有效性。

**关键词:**海洋平台;结构优化;动力响应;灵敏度分析

**中图分类号:**TU311.3

**文献标识码:**A

Design optimization and sensitivity analysis of dynamic response  
of offshore platform structures

GU Yuan-xian, MA Hong-yan, JIANG Cheng, KANG Zhan, ZHANG Hong-wu

(State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** The problems in sensitivity analysis and design optimization of dynamic response of platforms are studied. The methods for the sensitivity analysis of structural frequency response and transient response are presented respectively. The accuracy of the algorithm for the sensitivity analysis of dynamic transient problems and the influence of variable perturbation on the finite difference method are analysed through a numerical test. The algorithm presented here is implemented in the software system JIFEX, with which the solution way for dynamic design optimization of platforms is established. Numerical examples are shown to demonstrate the efficiency of the method and the computer program developed in the paper.

**Key words:** offshore platform; structural optimization; dynamic response; sensitivity analysis

控制结构振动水平是海洋平台设计中的主要问题之一,因此在海洋平台结构系统的优化设计问题中,结构动态响应特性是主要的设计约束条件。结构动力优化研究比较多的是频率约束问题<sup>[1]</sup>,但是海洋平台在波浪、海流和风等激励荷载下工作,不仅需要考虑结构自振频率,还要考虑结构的稳态频率响应和瞬态动力响应,这使得优化设计问题的难度增加。与结构静态强度问题不同,结构动态响应与设计变量的关系更为复杂,是高度非线性的。结构动态响应,特别是瞬态响应的分析计算量很大,优化设计所需要的灵敏度分析的计算效率和计算精度问题都应仔细研究<sup>[2]</sup>。另外,在结构动态响应优化设计问题中,可行区域的性态不良,即这类问题的可行域可能是多连通的,这对优化设计算法的收敛性提出了更高的要求。

本文建立了海洋平台及一般工程结构动态特性优化设计的数学模型,给出基于序列线性规划和序列二次规划的求解算法。针对动态响应优化问题的困难,提出可行域调整、近似一维搜索、自适应运动极限等改进

**收稿日期:**2000-03-06

**基金项目:**国家杰出青年科学基金资助项目(19525206);国家自然科学基金重大项目资助(59895410);国家重点基础研究专项经费资助(G1999032805)

**作者简介:**顾元宪(1954—),男,四川新津人,教授,博导,主要从事结构与多学科优化、工程科学计算方面的研究。

方法,形成鲁棒性很强的优化求解算法。研究了结构动力响应灵敏度分析的数值计算方法,对稳态频率响应采用在振型空间直接求解敏度方程的算法,对瞬态动力响应采用基于 Newmark 积分的直接求导方法。通过数值算例验证这两种灵敏度分析算法的精度,并指出瞬态动力响应灵敏度对差分步长很敏感,在半解析方法中应当注意。上述方法在大型有限元分析与优化设计软件系统 JIFEX<sup>[3,4]</sup>中实现,能够实际应用于海洋平台以及其它复杂工程结构。最后,给出以渤海石油公司 JZ20-1MUQ 平台为模型的海洋平台结构动力响应优化设计算例。

## 1 结构动态响应优化问题的数学模型和求解算法

结构优化设计的任务,就是寻求工程结构的一组设计变量的最优值,使之既满足约束条件又使目标函数极小。优化设计问题的数学模型可以一般性地表示如下:

$$\begin{aligned} & \text{To find } X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \\ & \min f(X) \\ & \text{s. t. } \begin{cases} g_j(X) \leq 0 & j = 1, 2, \dots, m \\ X^L \leq X \leq X^U \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $m$  和  $n$  分别是约束条件和设计变量的个数,  $X$  为设计变量组成的向量,  $f(X)$  为目标函数,  $g_j(X)$  为约束函数,  $X^L$  和  $X^U$  分别为设计变量  $X$  的下界和上界。

在海洋平台结构动态特性优化问题中,目标函数和约束函数包括结构重量、固有振动频率、稳态频率响应、瞬态时程响应等结构响应量(也称为结构的性能函数)。在结构优化中考虑的其它响应量通常还有应力、位移、屈曲荷载、温度场及热应力等。结构响应一般是设计变量的隐式非线性函数,需要有限元等数值分析方法来计算。

在海洋平台结构动态特性优化中,对瞬态动力响应约束条件的处理是需要特别考虑的。瞬态响应约束条件的表达式为:

$$g(u, X, t) \leq 0, \quad 0 \leq t \leq t_f \quad (2)$$

该形式的约束条件要求结构瞬态响应在时域上逐点满足给定条件。为便于求解,常将瞬态响应约束转化为其它形式,如式(3)积分形式的等效约束和式(4)所表示的临界点约束。前者将约束条件转化为在给定时间段上以积分形式满足的条件,后者则要求结构瞬态响应在若干个临界时刻满足约束条件,都可以满足设计要求。

$$\bar{g}(u, X) = \int_0^{t_f} g(u, X, t) dt \leq 0 \quad (3)$$

$$\bar{g}(u, X) = \int_0^{t_f} q(u, X, t) dt \leq 0 \quad (4)$$

$$q(u, X, t) = g(u, X, t) \delta(t - t_m) \quad i = 1, 2, \dots$$

本文采用序列线性规划和序列二次规划方法对优化设计问题进行求解,即在当前设计点利用目标函数和约束函数的导数信息,把原问题近似为线性规划或二次规划问题,求解之后得到新的设计变量值。重复这一过程直至迭代收敛,得到优化设计。

由于结构优化问题的复杂性,如动态响应的高度非线性和优化可行区域性能不良、约束条件苛刻以及初始设计的任意性等,为保证优化迭代算法的收敛性,本文优化算法中分别引入了可行域调整、自适应运动极限、近似一维搜索等改进技术,分别说明如下。

### 1.1 基于目标规划的可行域调整

动态特性优化设计问题中,经常遇到初始设计不满足约束条件的困难,在本文算法中,按式(5)将严重违反的约束条件经过加权后放入目标函数,经最初几轮迭代找到可行设计,使得序列规划算法能够顺利进行。

$$\begin{aligned} & \min. F(f(X), g_j(X), j \in J) = f(X) + \sum_{j \in J} \kappa_j g_j(X) \\ & \text{s. t. } g_j(X) \leq 0, j \notin J; g_j(X) \leq \kappa_j, \kappa_j > 0, j \in J \end{aligned} \quad (5)$$

### 1.2 自适应的运动极限

由于序列线性规划或序列二次规划算法都是对约束函数进行线性近似,其误差是难免的,所以在算法迭代过程中应当对设计变量的改变量加以适当限制,即运动极限。本文方法根据约束函数的近似精度动态地确定运动极限,并且在近似一维搜索中调整运动极限,从而既保证了目标函数和约束函数的近似精度,又保持

了比较快的收敛速度,因此,这是一种自适应的运动极限方法。

### 1.3 近似的一维搜索

一维搜索是数学规划算法的收敛基础,但在结构优化问题中,精确一维搜索需要大量的结构分析,其计算量难以承受。为保证每一步迭代都能得到改进的设计而又不过多增加计算工作量,本文算法在求解线性规划或二次规划之后,在新旧两组设计变量之间,利用如式(6)所示的 Goldstein 准则<sup>[5]</sup>进行近似的一维搜索。

$$\begin{aligned} \beta(1-\eta)\nabla^T F(X_0)d &\leq F(X_0+\beta d) - F(X_0) \leq \eta\beta\nabla^T F(X_0)d \\ d &= X - X_0; \quad 0 < \eta < 0.5 \end{aligned} \quad (6)$$

执行近似的一维搜索的具体方法如下:

(a) 如果 Goldstein 准则式(6)满足,则接受  $X_{\text{new}} = X_0 + \beta d$  作为新的设计点并停止一维搜索;  
(b) 如果  $F(X_0 + \beta d) - F(X_0) > \eta\beta\nabla^T F(X_0)d$ , 则减小步长  $\beta$ , 继续执行一维搜索,同时在下一轮迭代中减小运动极限;

(c) 如果  $\beta(1-\eta)\nabla^T F(X_0)d > F(X_0 + \beta d) - F(X_0)$ , 则以  $X_{\text{new}} = X_0 + \beta d$  为新的设计点并停止一维搜索,同时下轮迭代中的运动极限可以适当放大。

近似一维搜索是在序列线性/二次规划一次迭代中的内部迭代,其步长  $\beta$  的初值取 1.0,减小步长的简单方法是将  $\beta$  值折半。这样一般只需要很少几次一维搜索就能够得到改进的设计。而且,近似一维搜索同运动极限联系起来,进一步提高其自适应能力。实践表明,采用以上策略后优化求解算法的效率和收敛性得到了显著改善。

以上算法均已在有限元结构分析和优化设计程序系统 JIFEX 中实现。在 JIFEX 系统中,可以考虑包括结构动态响应的多种约束条件,实现减轻结构重量、改变结构刚度、调整结构自振频率、降低结构动力响应以及降低应力集中和提高临界屈曲荷载等多种优化设计目标。并且可以选取梁截面尺寸、板壳厚度、结构边界形状和节点坐标以及复合材料板多种类型的设计变量,满足通用性的结构优化设计要求。

## 2 结构动力响应的灵敏度分析方法

结构优化通常采用的是基于灵敏度(即结构性态函数对设计变量的导数)的求解算法,具有较高的求解效率。因而,灵敏度分析的计算效率和精度对结构优化算法的效率和收敛性至关重要,本节讨论结构动力响应的灵敏度分析方法。

### 2.1 稳态响应的灵敏度分析

结构振动问题的控制方程为:  $M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = p(t)$  (7)

当结构作用有简谐形式的外力激励或基础加速度,并且结构阻尼阵在振型空间解耦时,可采用振型叠加法求解结构稳态响应。以  $p = p_n \cos \theta t$  形式的激励为例,结构稳态响应可表示为如下形式

$$u = s \sin \theta t + c \cos \theta t \quad (8)$$

其中,  $s$  和  $c$  是振型向量的线性组合。

将式(8)对设计变量求偏导数可以得到稳态响应的灵敏度,但这种方法需要计算振型的导数,其计算量较大,尤其是当结构存在重特征值时。本文采用在振型空间求解敏度方程的方法,计算稳态响应灵敏度。设结构具有比例阻尼,  $\alpha, \beta$  是阻尼系数,直接对振动方程式(7)求导数得到敏度方程如下:

$$M\ddot{u}' + C\dot{u}' + Ku' = F_s \sin \theta t + F_c \cos \theta t \quad (9)$$

$$\begin{aligned} F_s &= M'(\theta^2 s + \alpha \theta c) - K'(s - \beta \theta c) \\ F_c &= M'(\theta^2 c - \alpha \theta s) - K'(c + \beta \theta s) \end{aligned} \quad (10)$$

注意到方程式(9)在形式上与振动方程式(7)完全一致,只是右端项同时包含正弦和余弦两个分量,以及结构质量阵和刚度阵的导数。因此,同样可以用振型叠加法求解,分别得到对应两个右端项的两组解  $s_s, c_s$  和  $s_c, c_c$ , 叠加后得到稳态位移响应的灵敏度

$$u' = (s_s + c_s) \sin \theta t + (s_c + c_c) \cos \theta t \quad (11)$$

计算结构稳态响应灵敏度的振型空间求解敏度方程方法,可以直接利用动力响应分析的程序模块,并且避免了求振型导数的困难,具有较高的计算精度和计算效率。式(10)中质量阵和刚度阵的导数可用解析法计算,也可用差分法计算,即半解析方法。

## 2.2 瞬态响应的灵敏度分析

结构瞬态动力响应方程及其初始条件为:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = p(t), u(0) = u_0, \dot{u}(0) = \dot{u}_0 \quad (12)$$

采用 Newmark 时间差分法求解瞬态动力响应方程式(12),  $t + \Delta t$  时刻的结构位移、加速度和速度响应分别由式(13)、(14)、(15)计算。

$$(K + a_0 M + a_1 C)^{t+\Delta t} u = {}^{t+\Delta t} R \quad (13)$$

$${}^{t+\Delta t} R = {}^{t+\Delta t} p + M(a_0 {}^t u + a_2 {}^t \ddot{u} + a_3 {}^t \ddot{\ddot{u}}) + C(a_1 {}^t u + a_4 {}^t \dot{u} + a_5 {}^t \ddot{u})$$

$${}^{t-\Delta t} \ddot{u} = a_0 ({}^{t+\Delta t} u - {}^t u) - a_2 {}^t \dot{u} - a_3 {}^t \ddot{u} \quad (14)$$

$${}^{t+\Delta t} \dot{u} = {}^t \dot{u} + a_6 {}^t \ddot{u} + a_7 {}^{t+\Delta t} \ddot{u} \quad (15)$$

其中:  $a_0 = \frac{1}{\alpha(\Delta t)^2}, a_1 = \frac{\delta}{\alpha\Delta t}, a_2 = \frac{1}{\alpha\Delta t}, a_3 = \frac{1}{2\alpha} - 1, a_4 = \frac{\delta}{\alpha} - 1$

$$a_5 = \frac{\Delta t}{2}(\frac{\delta}{\alpha} - 2), a_6 = \Delta t(1 - \delta), a_7 = \delta\Delta t, \alpha \geq \frac{1}{4}(\delta + \frac{1}{2})^2, \delta \geq \frac{1}{2}$$

瞬态响应约束灵敏度分析有直接法和伴随法两种,这里考虑式(3)形式的瞬态响应约束,分别说明两种方法计算过程。对式(3)求导可得到瞬态响应约束的灵敏度为

$$\frac{d\bar{g}}{dx} = \int_0^T \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x} + \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial u} u' \right) dt \quad (16)$$

主要问题是计算响应量  $u$  对设计变量  $x$  的导数。对式(12)求导可得到  $u$  的灵敏度方程

$$M\ddot{u}' + C\dot{u}' + Ku' = J + p' - M'\ddot{u} - C'\dot{u} - K'u \quad (17)$$

$$J_{i,j} = \frac{\partial p_i}{\partial x_j}, u'(0) = 0, \dot{u}'(0) = 0$$

在直接法中,注意到式(17)与式(12)的相似性,同样可以采用 Newmark 差分法求解。在  $t + \Delta t$  时刻结构的位移、加速度和速度响应灵敏度,分别由式(18)、(19)、(20)计算。

$$(K + a_0 M + a_1 C)^{t+\Delta t} u' = {}^{t+\Delta t} R' - (K' + a_0 M' + a_1 C')^{t+\Delta t} u \quad (18)$$

$${}^{t+\Delta t} \ddot{u}' = a_0 ({}^{t+\Delta t} u' - {}^t u') - a_2 {}^t \dot{u}' - a_3 {}^t \ddot{u}' \quad (19)$$

$${}^{t+\Delta t} u' = {}^t u' + a_6 {}^t \ddot{u}' + a_7 {}^{t+\Delta t} \ddot{u}' \quad (20)$$

$${}^{t+\Delta t} R' = {}^{t+\Delta t} p' + M'(a_0 {}^t u + a_2 {}^t \ddot{u} + a_3 {}^t \ddot{\ddot{u}}) + C'(a_1 {}^t u + a_4 {}^t \dot{u} + a_5 {}^t \ddot{u}) +$$

$$M(a_0 {}^t u' + a_2 {}^t \ddot{u}' + a_3 {}^t \ddot{\ddot{u}}') + C(a_1 {}^t u' + a_4 {}^t \dot{u}' + a_5 {}^t \ddot{u}')$$

在伴随法中,将方程式(17)左乘一个伴随向量  $\lambda$  并积分得到

$$\int_0^T \lambda^T (M\ddot{u}' + C\dot{u}' + Ku' - Ju') dt = \int_0^T \lambda^T (p' - M'\ddot{u} - C'\dot{u} - K'u) dt \quad (21)$$

将式(21)左端分部积分,可得

$$\lambda^T M \dot{u}'|_0^T + \lambda^T C u'|_0^T + \lambda^T M u'|_0^T + \lambda^T M u'|_0^T -$$

$$\int_0^T (\lambda^T M + \lambda^T (2\dot{M} + C) + \lambda^T (\ddot{M} + \dot{C} - K + J)) u' dt = \int_0^T \lambda^T (p' - M'\ddot{u} - C'\dot{u} - K'u) dt \quad (22)$$

令伴随向量  $\lambda$  满足下列伴随方程

$$M^T \dot{\lambda} + (2\dot{M}^T + C^T) \lambda + (\ddot{M}^T + \dot{C}^T - K^T + J^T) \lambda = \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial u} \right)^T \quad (23)$$

$$\lambda(t_f) = 0, \dot{\lambda}(t_f) = 0$$

则瞬态响应约束灵敏度式(16)可按式计算:

$$\frac{d\bar{g}}{dx} = \int_0^T \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x} - \lambda^T (p' - M'\ddot{u} - C'\dot{u} - K'u) \right) dt \quad (24)$$

如果不考虑结构质量阵和阻尼阵随时间变化的特殊情况,伴随方程式(23)可简化为

$$M^T \dot{\lambda} + C^T \lambda + (J^T - K^T) \lambda = \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial u} \right)^T, \lambda(t_f) = 0, \dot{\lambda}(t_f) = 0 \quad (25)$$

伴随方程式(25)是一组关于伴随向量  $\lambda$  的常微分方程,而且与结构动力响应方程式(12)形成相同,同样可以

采用 Newmark 差分法从  $t_f$  到 0 向后积分求解得到  $\lambda$ :

$$(\mathbf{J}^T - \mathbf{K}^T + a_n \mathbf{M}^T + a_1 \mathbf{C}^T) \lambda = \mathbf{Q} \quad (26)$$

$$\mathbf{Q} = \left( \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial \mathbf{u}} \right)^T + \mathbf{M}^T (a_0 \mathbf{u}^{t-\Delta t} \lambda + a_2 \mathbf{u}^{t-\Delta t} \lambda + a_3 \mathbf{u}^{t-\Delta t} \lambda) + \mathbf{C}^T (a_1 \mathbf{u}^{t-\Delta t} \lambda + a_4 \mathbf{u}^{t-\Delta t} \lambda + a_5 \mathbf{u}^{t-\Delta t} \lambda)$$

不论直接法还是伴随法,灵敏度分析都是采用与瞬态动力响应分析相同的时间差分格式求解,在程序实现上比较方便,这是瞬态问题灵敏度计算的特点。在直接法中,对每个设计变量求解式(18),结构响应及其导数是同时在每个时间步上计算的,而且式(13)(18)左端矩阵相同。在伴随法中,对每个约束求解式(26),以向后差分计算伴随向量,式(13)(26)左端矩阵不同。显然,对于约束条件较多而设计变量较少的问题,直接法计算效率高;反之对于设计变量多于约束条件的问题,伴随法计算效率高。

### 3 数值算例

**算例1 稳态频率响应灵敏度计算。**一悬臂板及有限元模型如图1所示。材料杨氏模量  $E=210\text{GPa}$ ,泊松比  $\nu=0.3$ ,质量密度  $\rho=7\,800\text{kg/m}^3$ ,阻尼比为 0.03,板厚度为 0.254 cm。在板的自由端角点(55号节点)处作用有幅值为 1.0 的简谐激励力。以悬臂板左右半边的厚度  $t_1$  和  $t_2$  作为设计变量,当荷载频率在 20~1 000Hz 范围内取不同值时,加力点处的稳态位移响应幅值的灵敏度随荷载频率变化情况如图2所示。灵敏度计算结果与差分法校核结果吻合很好,位移响应灵敏度的峰值出现在共振频率处。

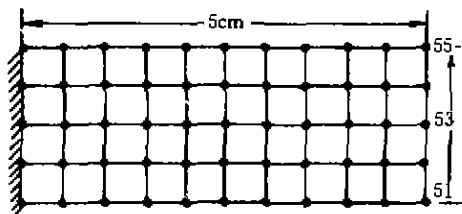


图1 悬臂板有限元模型

Fig.1 Finite element model of a cantilever plate

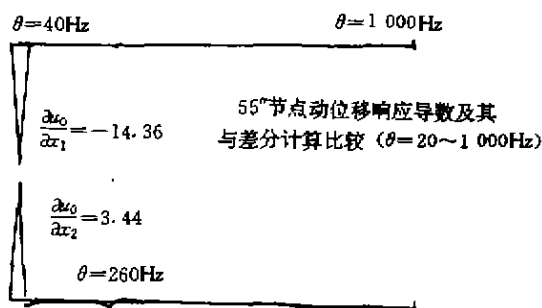


图2 稳态频率响应灵敏度计算结果

Fig.2 Results of sensitivity analysis of frequency response in stable state

**算例2 瞬态时程响应灵敏度计算。**72杆桁架如图3所示。材料常数为  $E=2 \times 10^5 \text{MPa}$ ,  $\nu=0.28$ ,  $\rho=7\,800\text{kg/m}^3$ 。每层高度为 150 cm,  $X$  和  $Y$  方向宽度为 300 cm。按层数由上到下选取 16 个设计变量:竖向杆、水平面边杆、垂直面斜杆、水平面斜杆的截面面积各 4 个,均为  $0.0015\text{m}^2$ 。计算最大节点动位移响应的灵敏度,并用有限差分法校核。考虑 2~5 号节点  $X$  方向的两种动荷载:(1)  $P(t)=10^5 \times \sin(314.15t)\text{N}$  ( $0 \leq t \leq 0.2$ ), 2 号节点的最大动位移响应  $u_2=-0.1539$  ( $t=0.1052\text{s}$ ), 时间积分步长  $\Delta t=0.0002$ , 计算结果见表 1。(2) 荷载变化如图 4, 2 号节点最大动位移响应  $u_2=-0.1564$  ( $t=9.72\text{s}$ ), 积分步长  $\Delta t=0.02$ , 计算结果见表 2。表中差分法的误差为相对百分比,摄动是差分步长与设计变量之比,分别用两种差分步长计算校核。

计算表明:瞬态动力响应灵敏度分析算法有较高精度,表 2 中误差较大的都是灵敏度值本身很小。结构的瞬态动力响应对设计变量比较敏感,差分法计算灵敏度时摄动步长过大会影响精度,但有时太小了也会丧失精度。

**算例3 导管架海洋平台结构动力优化设计。**渤海石油公司 JZ20-1MUQ 平台计算模型如图 5 所示,在冰荷载的周期作用下,对平台结构进行动态响应分析和优化设计。

导管架平台是由钢管焊接的空间梁系结构,共 84 个圆管截面的梁单元。钢材弹性模量  $E=210\text{GPa}$ ,泊松比  $\nu=0.3$ ,质量密度  $\rho=7\,800\text{kg/m}^3$ ,瑞雷阻尼系数  $\alpha=0.015$ ,  $\beta=0.0003$ 。平台上全部设备的质量平均加在顶层横梁的四个节点上,每个集中质量为 400t。

表 1 动位移  $u_2$  的灵敏度(工况 1)Tab. 1 Sensitivity of dynamic displacement  $u_2$ (loadcase 1)

| 变<br>量 | 灵敏度<br>计算值 | 差分法计算结果  |       |          |      |
|--------|------------|----------|-------|----------|------|
|        |            | 扰动 1%    |       | 扰动 1.33% |      |
|        |            | 计算值      | 误差    | 计算值      | 误差   |
| 1      | 3.596 8    | 3.698 7  | 2.83  | 3.600 0  | 0.09 |
| 2      | -3.364 4   | -3.317 3 | -1.40 | -3.395 0 | 0.91 |
| 3      | 2.558 9    | 3.158 7  | 23.44 | 2.635 0  | 2.97 |
| 4      | 9.245 8    | 13.140 7 | 42.13 | 9.810 0  | 6.10 |
| 5      | 14.965 1   | 15.564 0 | 4.00  | 15.050   | 0.57 |
| 6      | 10.981 3   | 11.168 0 | 1.70  | 11.010   | 0.26 |
| 7      | 11.136 9   | 11.208 7 | 0.64  | 11.150   | 0.12 |
| 8      | 5.737 2    | 5.758 0  | 0.36  | 5.745 0  | 0.14 |
| 9      | 20.396 2   | 22.510 7 | 12.15 | 20.645   | 1.22 |
| 10     | 27.072 0   | 27.001 3 | -0.26 | 27.075   | 0.00 |
| 11     | 5.894 3    | 6.288 7  | 6.69  | 5.895 0  | 0.01 |
| 12     | -35.116    | -34.088  | -2.93 | -35.160  | 0.13 |
| 13     | 10.450 5   | 10.762 7 | 2.99  | 10.495   | 0.43 |
| 14     | 7.555 9    | 7.651 3  | 1.26  | 7.570 0  | 0.19 |
| 15     | 8.026 3    | 8.063 3  | 0.46  | 8.035 0  | 0.11 |
| 16     | 3.800 6    | 3.816 7  | 0.42  | 3.805 0  | 0.12 |

表 2 动位移  $u_2$  的灵敏度(工况 2)Tab. 2 Sensitivity of dynamic displacement  $u_2$ (loadcase 2)

| 变<br>量 | 灵敏度<br>计算值 | 差分法计算结果  |       |          |      |
|--------|------------|----------|-------|----------|------|
|        |            | 扰动 1%    |       | 扰动 1.33% |      |
|        |            | 计算值      | 误差    | 计算值      | 误差   |
| 1      | -1.071 1   | -1.1807  | 10.23 | -1.090 0 | 1.76 |
| 2      | -6.878 8   | -6.835 3 | -0.63 | -6.905 0 | 0.38 |
| 3      | -18.788    | -18.275  | -2.73 | -18.635  | 0.82 |
| 4      | -34.276    | -33.349  | -2.70 | -33.215  | 3.10 |
| 5      | -0.767 4   | -1.193 3 | 55.50 | -0.885 0 | 15.3 |
| 6      | -0.489 7   | -0.712 7 | 45.54 | -0.5250  | 7.21 |
| 7      | -0.379 5   | -0.415 3 | 9.43  | -0.385 0 | 1.45 |
| 8      | -0.957 0   | -0.956 7 | -0.03 | -0.965 0 | 0.84 |
| 9      | -10.540    | -11.265  | 6.88  | -10.870  | 3.31 |
| 10     | -9.675 6   | -9.736 7 | 0.63  | -9.725 0 | 0.51 |
| 11     | -9.040 3   | -8.706 0 | -3.68 | -9.060 0 | 0.22 |
| 12     | -9.942 3   | -9.446 7 | -4.99 | -9.695 0 | 2.49 |
| 13     | -0.541 2   | -0.863 3 | 59.52 | -0.600 0 | 10.8 |
| 14     | -0.300 6   | -0.428 7 | 42.61 | -0.320 0 | 6.45 |
| 15     | -0.113 7   | -0.134 0 | 17.85 | -0.120 0 | 5.54 |
| 16     | -0.020 2   | -0.021 3 | 5.45  | -0.020 0 | 0.99 |

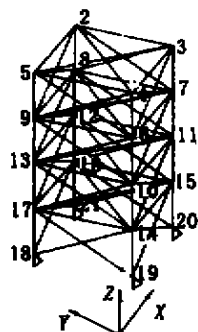


图 3 72 杆桁架结构

Fig. 3 Frame with 72bars

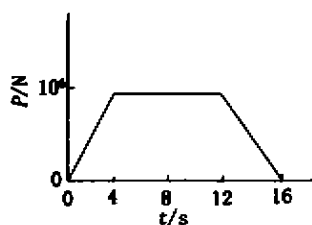


图 4 荷载变化图

Fig. 4 Loading process with variation of time

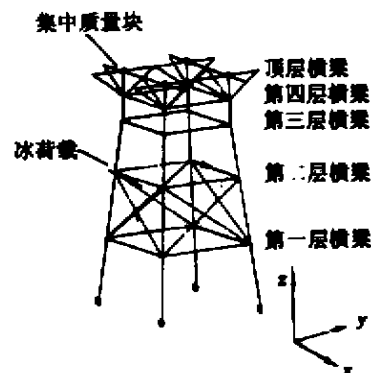


图 5 JZ20-1 MUQ 平台的有限元模型

Fig. 5 Finite element model of JZ20-1 MUQ platform

首先计算结构的一阶和二阶自振频率为 0.88Hz, 与文[6]给出的实测值 0.87Hz 吻合。然后计算冰荷载作用下的结构动力响应, 冰荷载资料取自文[6]。平台迎面的两条桩腿上同时受到沿  $x$  轴方向冰荷载的周期作用, 图 6 是简化的冰力模型, 冰力函数表示为:

$$F(t) = \begin{cases} F_0(1 - \frac{t}{\tau}) & (0 \leq t < \tau) \\ 0 & (\tau \leq t < T) \end{cases} \quad F_0 = 3.2\sigma_f c^2 \left(\frac{D}{L_b}\right)^{0.34} \quad T = \frac{L_b}{v} \quad (27)$$

其中,  $F_0$  为周期冰力的峰值;  $T$  为冰力循环周期;  $\tau \approx T/3$ ;  $L_b$  为冰的断裂长度, 取 7 倍冰厚;  $c$  为冰厚;  $\sigma_f$  为冰的抗弯强度取 0.7MPa;  $D$  为冰作用点柱体直径;  $v$  是冰速。计算中冰力函数曲线如图 7 所示, 峰值为 15t。冰速为 60cm/s, 冰力周期与结构的自振周期相同, 结构最大的节点动位移响应计算结果如图 8 所示, 峰值为 0.42cm。

导管架平台结构优化设计模型。优化目标是使结构重量最轻, 约束条件分别为一阶、二阶自振频率和最大动位移响应。单元圆管截面的内径不变, 外径作为设计变量。根据截面性质, 将梁单元分为下列四组: (1) 四条腿柱, 共 20 个单元, 内径 1.445 7m; (2) 第一、三、四横梁, 第一、二层横梁间的斜梁, 共 28 个单元, 内径

0.709 7m;(3)第二层横梁,第四层与顶层横梁间的斜梁为第三组,共 20 个单元,内径为 0.659 2m;(4)顶层横梁,共 16 单元,内径 1.445 67m。共四个设计变量。

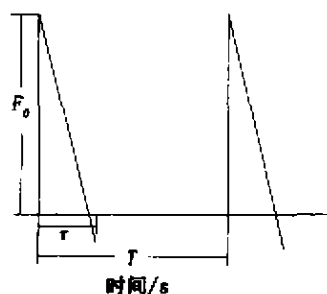


图6 简化的冰力模型

Fig. 6 A simple ice-load model

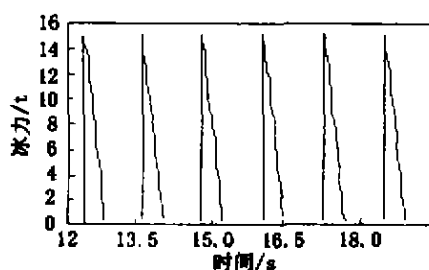


图7 冰力函数

Fig. 7 Ice-load function

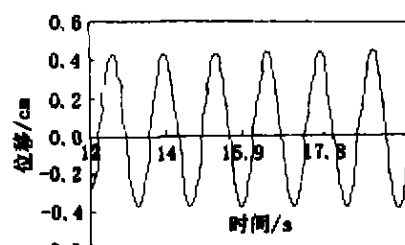


图8 结构最大位移响应

Fig. 8 Maximum displacement response of the structure

优化设计按两种方案计算,动位移响应约束分别取 0.5cm 和 0.4cm,其他约束条件相同。两种方案的优化设计结果,结构重量分别降低 40%和 27%,所有约束满足要求,动位移响应成为主动约束。优化计算分别在 8 次和 7 次迭代后收敛。表 3 是目标和约束函数的初值、约束值和优化值,表 4 是设计变量的初值、上下限值和优化值。

表3 导管架平台优化的目标和约束函数

Tab. 3 Object and constrain functions of optimization of jacket platform

| 约束函数    | 重量/t  | 一阶振频/Hz | 二阶振频/Hz | 位移/cm |
|---------|-------|---------|---------|-------|
| 初始设计    | 47.80 | 0.88    | 0.88    | 0.42  |
| 方案1 约束值 |       | 0.85    | 0.85    | 0.50  |
| 方案1 优化值 | 34.16 | 0.855 4 | 0.855 4 | 0.50  |
| 方案2 约束值 |       | 0.88    | 0.88    | 0.40  |
| 方案2 优化值 | 37.52 | 0.903 7 | 0.903 7 | 0.40  |

表4 导管架平台优化的设计变量

Tab. 4 Variables of optimization

| 变量序号      | 1       | 2       | 3       | 4       |
|-----------|---------|---------|---------|---------|
| 初始值/m     | 1.496 5 | 0.760 6 | 0.710 0 | 1.496 5 |
| 上限值/m     | 1.52    | 0.80    | 0.75    | 1.50    |
| 下限值/m     | 1.48    | 0.74    | 0.68    | 1.47    |
| 方案1 优化值/m | 1.503 6 | 0.74    | 0.68    | 1.47    |
| 方案2 优化值/m | 1.514 4 | 0.74    | 0.68    | 1.47    |

## 4 结 语

本文建立了海洋平台结构动力优化模型,提出了改进的序列线性/二次规划求解算法。给出了结构稳态和瞬态动力响应的灵敏度计算方法,对瞬态动力响应约束,在时程积分基础上给出直接法和伴随法两种灵敏度算法。数值算例验证灵敏度算法的精度,并指出了瞬态动力响应灵敏度对差分步长的敏感性。在 JIFEX 软件中实现了上述结构动力响应优化和灵敏度分析方法,导管架平台优化算例表明本文方法及软件在海洋平台结构优化设计中是可行和有效的。

## 参考文献:

- [1] Grady R. Structural optimization with frequency constraints—a review [J]. AIAA J, 1993, 31(12):2296-2303.
- [2] Haftka R T, Adelman H M. Recent developments in structural sensitivity analysis [J]. Structural Optimization, 1989, 1:137-151.
- [3] Gu Y X, Zhang H W, Guan Z Q, et al. New generation software of structural analysis and design optimization—JIFEX [J]. Int. J. Struct. Eng. Mech, 1999, 7(6):589-599.
- [4] Gu Y X, Kang Z, Guan Z Q, et al. Dynamic sensitivity analysis and optimum design of aerospace structures[J]. Int. J. Strut. Eng. and Mech., 1998, 6(1):31-40.
- [5] Fletcher R. Practical methods of optimization [M]. John Wiley & Sons, 1980.
- [6] 岳前进,等.基于原型结构测量的锥体冰荷载研究[R].大连理工大学与中海石油公司渤海公司合作科研报告,1999.