

文章编号: 1001-4500(2008)01-039-06

# 基于统一设计变量方法的 导管架海洋平台动力优化设计

石金磊, 赵德有  
(大连理工大学, 大连 116023)

**摘要:** 基于统一设计变量方法, 实现了导管架海洋平台在动冰载荷作用下的截面和形状动力优化设计。以 JZ20-1MUQ 平台为例进行了计算。计算结果表明, 应用统一设计变量方法同时进行截面和形状的优化设计结果明显好于截面优化设计结果。

**关键词:** 优化设计; 统一设计变量; 导管架平台; 动冰载荷

**中图分类号:** P75      **文献标识码:** A

## STRUCTURAL DYNAMIC OPTIMIZATION DESIGN OF OFFSHORE JACKET PLATFORM BASED ON UNIFIED DESIGN VARIABLE METHOD

SHI Jin-lei, ZHAO De-you  
(Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

**Abstract:** Based on the unified design variable method, the shape and sizing optimization design of jacket platform with dynamic ice-load is investigated. As an example, the jacket platform of JZ20-1MUQ is numerated. It is indicated that the optimization result with shape and sizing design variable is obviously better.

**Key words:** optimization design; unified design variable; jacket platform; dynamic ice-load

导管架海洋平台作为一种大型的空间刚架结构, 是海上石油作业的主体结构。其构造复杂, 造价昂贵, 需要耗费大量的钢材。因此, 在满足各种工作条件的前提下, 寻求对其结构的优化, 以减少重量, 降低成本, 具有重要的工程应用价值。

导管架海洋平台在其生命周期中必须抵抗各种载荷的作用。计算载荷除考虑风、浪、流等载荷外, 对于冰区使用的平台(如渤海湾海域)更主要的是考虑冰载荷。事实上, 在冰区使用的导管架海洋平台, 冰载荷的作用会直接影响到海洋平台的结构安全<sup>[1]</sup>。因此, 海洋导管架平台实际上是个动力优化问题。

以往的海洋平台优化设计一般以截面尺寸作为设计变量<sup>[2,3]</sup>, 很少以平台的形状变量, 即节点坐标作为设计变量, 以截面变量和形状变量同时作为设计变量的海洋平台动力优化设计则更为少见。截面变量与形状变量由于量纲的不同, 两类变量之间的耦合导致优化算法收敛困难。目前解决此问题最常用的办法是分层优化方法<sup>[4]</sup>。它将两类变量分为截面变量和形状变量两个设计子空间, 分别优化, 交替进行, 直至算法收敛。此种方法使用有效且易于操作, 但人为的对两类设计变量的分割, 不能充分考虑到两类变量之间的耦合, 可能使解空间的可行域缩小, 丢失真正的最优解。另一种方法称为统一设计变量方法。它将两类不同

收稿日期: 2007-07-04

作者简介: 石金磊(1981-), 男, 硕士生, 从事船舶与海洋建筑物设计与制造。

性质的变量通过变量转换,统一为一组无量纲的设计变量。文献[5]中利用这种方法对 18 杆桁架结构进行了优化设计,取得了良好的效果。

本文试图采用统一变量方法,以动冰载荷作为主要环境载荷,同时考虑截面和形状设计变量,基于 ANSYS 软件平台,建立了参数化有限元模型,对 JZ20-1MUQ 导管架海洋平台进行了动力优化设计,并与文献[6]中的优化结果作了比较,探讨了此种方法在海洋平台结构优化设计中的工程应用价值。

## 1 优化问题的数学表述

以结构质量为目标函数,本文所讨论的目标函数为:

$$\min W = \sum_{i=1}^n \rho_i A_i L_i \quad (1)$$

式中:  $W$  为结构质量;  $\rho_i$ 、 $A_i$  和  $L_i$  分别为结构第  $i$  个单元的材料密度、截面面积和杆件长度;  $n$  表示结构中的单元数目。

结构优化的一般约束条件如下:

1) 应力约束条件:

$$\sigma_{ic} < \sigma_i(x) \leq \sigma_{it} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

其中  $\sigma_i(x)$  为第  $i$  杆的应力;  $\sigma_{ic}$  是第  $i$  杆件许用压应力;  $\sigma_{it}$  是第  $i$  杆件许用拉应力。

2) 位移约束条件:

通常,结构上的某点位移受到一定限制:

$$u_i \leq u_i^* \quad (3)$$

$u_i$  和  $u_i^*$  分别代表结构上某点位移和相应的约束值。

3) 局部稳定条件:

$$\sigma_i \leq \sigma_{ib} \quad (4)$$

$\sigma_{ib}$  是第  $i$  个单元的临界失稳应力,对于圆截面杆件:

$$\sigma_{ib} = \frac{\pi E A_i}{4 L_i^2} \quad (5)$$

4) 频率约束条件:

$$\omega_i < \omega_i \leq \bar{\omega}_i \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (6)$$

其中,  $\omega_i$  为第  $i$  阶固有频率;  $\omega_i$  和  $\bar{\omega}_i$  分别是  $\omega_i$  的下限值和上限值。

5) 变量的上下限约束条件:

$$\underline{X}_i < X_i \leq \bar{X}_i \quad (i = 1, 2, \dots, k) \quad (7)$$

其中,  $X_i$  为设计变量(包括截面尺寸变量和坐标位置变量),  $\underline{X}_i$  和  $\bar{X}_i$  分别是  $X_i$  的下限值和上限值。

## 2 统一设计变量定义

截面尺寸变量和坐标位置变量是两类不同量纲的设计变量,如果不对它们作以处理,直接作为同一性质的变量进入优化算法器,两类变量之间的耦合会因量纲的不同导致算法收敛困难,甚至发散。统一设计变量方法旨在把两类变量进行合理的数学变换,将两类不同量纲的设计变量转换为无量纲的设计变量。具体方法如下:

(1) 设计变量  $\underline{X}_i < X_i \leq \bar{X}_i$  的内涵

1) 截面尺寸变量:  $A_i (\underline{A}_i < A_i \leq \bar{A}_i)$ , 其中  $\underline{A}_i$  和  $\bar{A}_i$  分别是  $A_i$  的下限值和上限值。

2) 坐标位置变量:  $x_i$  和  $y_i (\underline{x}_i < x_i \leq \bar{x}_i, \underline{y}_i < y_i \leq \bar{y}_i)$ , 其中,  $x_i$  为节点横坐标,  $\underline{x}_i$  和  $\bar{x}_i$  分别为  $x_i$  的下限值和上限值。  $y_i$  为节点纵坐标,  $\underline{y}_i$  和  $\bar{y}_i$  分别为  $y_i$  的下限值和上限值。

(2) 设计变量的数学转换

为了统一两类变量的量纲,均匀展缩其变化量级,取如下的统一设计变量  $Y_i$ :

$$\sin^2 Y_i = \frac{X_i - \underline{X}_i}{\overline{X}_i - \underline{X}_i} \quad (8)$$

即可满足要求。事实上,式(8)不仅实现了设计变量的无量纲化,且参加实际运算的  $\sin^2 Y_i$  优化范围不论量级如何,均展缩在  $0 \sim +1$  域中。

同样,由式(8)可得到原设计变量  $X_i$ :

$$X_i = \underline{X}_i + (\overline{X}_i - \underline{X}_i) \sin^2 Y_i \quad (9)$$

这样以  $Y_i$  作为统一设计变量时,优化过程其步长可均匀变化,易于控制,解决了优化过程收敛差与解的可行域缩小的疑难。

### 3 优化算法

本文采用大型结构分析软件 ANSYS 中所带的优化算法器中的随机搜索法、扫描法和一阶法进行结构优化。先用随机搜索法和扫描法获得一组较好的初始设计变量,然后用一阶法求出优化问题的最优解。下面对这 3 种方法作简要介绍。

#### 3.1 随机搜索法(rand)

随机搜索法可完成指定次数的分析循环,并在每次循环中使用随机搜索变量值。用户可以指定最大迭代次数和最大合理设计数。如果给出了最大合理设计数,在达到这个数值时循环就终止。随机搜索法往往作为其他方法的先期处理。

#### 3.2 扫描法(DV Sweep)

扫描法用于在设计空间内完成扫描分析。将生成  $n \times NSPS$  个设计序列, $n$  是设计变量的个数, $NSPS$  是每个扫描中评估点的数目。对于每个设计变量,变量范围将划分为  $NSPS-1$  个相等的步长,进行  $NSPS$  次循环。问题的设计变量在每次循环中以步长递增,其他的设计变量保持其参考值不变。

#### 3.3 一阶法(first order)

一阶法首先通过对目标函数添加罚函数,将约束优化问题转换为无约束优化问题。然后使用因变量对设计变量的偏导数(ANSYS 中采用差分法),在每次迭代中,进行梯度计算(用最大斜度法或共轭方向法)确定搜索方向,并用线搜索法对无约束问题进行最小化。因此,每次迭代都有一系列的子迭代(其中包括搜索方向和梯度计算)组成,这就使得一次优化迭代有多次分析循环。当当前的设计序列相对于前面的和最佳序列满足下面任意一种情况时,优化过程收敛。

$$|f^{(j)} - f^{(j-1)}| \leq \epsilon \quad (10)$$

或者

$$|f^{(j)} - f^{(b)}| \leq \epsilon \quad (11)$$

这里  $f^{(j)}$  代表第  $j$  次迭代的目标函数值; $f^{(b)}$  代表先前最优的目标函数值; $\epsilon$  为收敛容差。

可以通过给定收敛容差直接改善一阶法的收敛程度,也可以指定梯度计算的设计变量的变化程度和指定线搜索步长的范围来防止优化过程的过早收敛。

综上所述,基于统一设计变量方法的优化迭代步骤为:

- (1) 用有限元法进行结构分析,得到节点位移、单元应力、结构模态等结构分析结果;
- (2) 用统一设计变量方法实现对截面变量和形状变量的无量纲化;
- (3) 设定设计变量、约束条件和目标函数;
- (4) 进入优化算法器,进行结构优化;
- (5) 将无量纲化的设计变量再次转换成原来的设计变量;
- (6) 应用式(10)和(11)检验收敛准则,如果满足收敛准则,转到(7),否则,重复(1)~(5);
- (7) 优化过程终止,输出最佳设计序列。

## 4 算 例

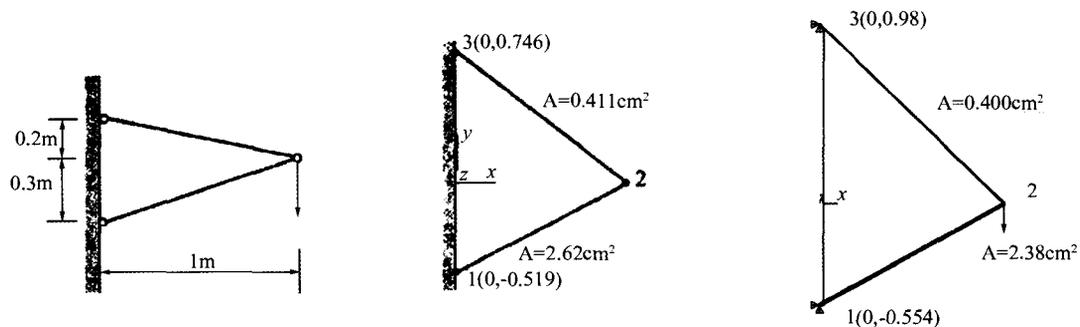
为了验证本文编制的程序,并证明统一设计变量方法的效果,先对一个 2 杆桁架做了优化计算,并与文献[4]的结果做比较。然后对 JZ20-1MUQ 导管架海洋平台进行结构动力优化。

### 4.1 两杆桁架

平面 2 杆静定桁架,各杆拉压容许应力均为 240MPa,弹性模量  $E=210\text{GPa}$ ,密度  $\rho=7800\text{kg/m}^3$ ,泊松比  $\nu=0.3$ ,考虑压杆稳定性,当柔度  $\lambda \geq 100$  时,采用式(5)计算临界应力;当  $61 \leq \lambda < 100$  时,柔度公式系数  $a=304\text{MPa}$ , $b=1.12\text{MPa}$ ,稳定安全系数  $n$  取 1。各杆均为圆形截面,面积初值均为  $2\text{cm}^2$ ,面积下限为  $2\text{mm}^2$ ,收敛精度  $\epsilon=0.01$ 。结构受到一垂直向下的载荷  $P=10\text{kN}$ 。优化设计过程中,两个铰支座可沿垂直方向移动。目标函数要求结构质量最小,并且节点 2 的垂直位移  $v_2 \leq 1.57\text{mm}$ 。整个结构如图 1. a) 所示。

文献[4]中采用分层优化方法,构造了两种变量子空间,截面变量用满应力法确定截面的最小尺寸,并满足约束条件;坐标变量通过灵敏度分析确定节点的移动方向,根据优化准则,移动高效的节点以优化结构的形状。优化结果如图 1. b) 所示,质量减小 15.6%。

采用本文方法的优化结果如图 1. c) 所示,结构质量减小 20%。通过对比,可看到,统一变量方法比分层优化方法取得了更好的优化效果。



a) 初始设计 WT=3.2kg b) 文献[4]的优化设计 WT=2.70kg c) 本文的优化设计 WT=2.56kg

图 1 两杆桁架结构组合优化

### 4.2 导管架海洋平台结构动力优化设计

JZ20-1MUQ 平台计算模型如图 2 所示,在冰荷载作用下,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  $\rho=7800\text{kg/m}^3$ ,瑞雷阻尼系数  $\alpha=0.015$ , $\beta=0.003$ 。平台上全部设备的质量平均加在顶层横梁的 4 个节点上,每个集中质量为 400t。首先计算得到结构的一阶 X 向和 Y 向固有频率皆为 0.87Hz,文献[6]中计算得为 0.88,实测值 0.87Hz。然后计算冰荷载作用下的结构动力响应,冰荷载资料取自文献[1]。平台迎面的两条桩腿上同时受到沿 X 轴方向冰荷载的作用,简化的冰力模型如图 3 所示。可得峰值为 15t。结构最大的节点动位移响应在文献[6]中峰值为 0.42cm,本文计算得为 0.41cm,基本吻合。

首先进行截面优化设计。导管架平台结构的优化目标是使结构质量最小,约束条件分别为一阶固有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。为了与文献[6]的结果比较,设计变量取法与其一致,如下:(1)四条腿柱,共 20 个单元,内径 1.4457m;(2)第一、三、四横梁,第一、二层横梁间的斜撑,共 28 个单元,内径 0.7097m;(3)第二层横梁,第四层与顶层横梁间的斜撑,共 20 个单元,内径为 0.6592m;(4)顶层横梁,共 16 单元,内径 1.4456m。表 1 中的变量序号分别对应为如上的设计变量。

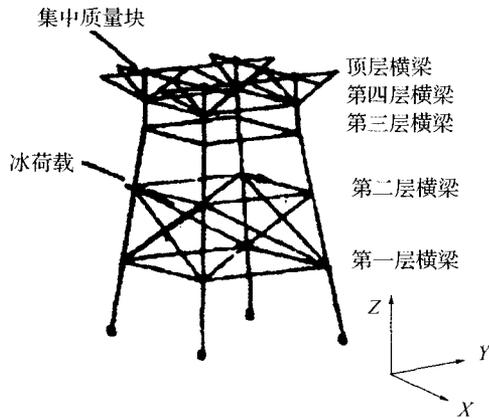


图 2 JZ20-1MUQ 平台的有限元模型

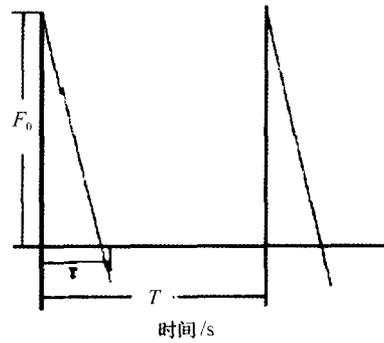


图 3 简化的冰力模型

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。表 1 是本文与文献[6]的目标和约束函数的初值、约束值和优化值的比较,表 2 是两者设计变量的初值、上下限值和优化值的比较。文献[6]中的截面优化采用了改进的序列线性/二次规划求解算法。

表 1 导管架平台优化的设计变量比较 /m

变量序号	1	2	3	4	
初始值	1.4965	0.7606	0.7100	1.4965	
上限值	1.5200	0.8000	0.7500	1.5000	
下限值	1.4800	0.7400	0.6800	1.4700	
方案 1	文献	1.5036	0.7400	0.6800	1.4700
	本文	1.5033	0.7400	0.6820	1.4700
方案 2	文献	1.5144	0.7400	0.6800	1.4700
	本文	1.5059	0.7400	0.6990	1.4700

表 2 导管架平台优化的目标和约束函数比较

约束函数	重量 /t	一阶振频 /Hz	位移 /cm	
初始设计	478.20	0.88	0.410	
约束值		0.85	0.500	
方案 1 优化值	文献	341.60	0.86	0.500
	本文	343.87	0.85	0.500
约束值		0.85	0.400	
方案 2 优化值	文献	375.20	0.90	0.400
	本文	377.18	0.89	0.395

通过对比,可以看到,由于文献[6]中采用了针对桁架结构动力优化的鲁棒性较强的算法,其优化效果要略好于本文采用的算法。尽管如此,两者的优化效果差别仍在 0.5% 以内,是可以接受的。

表 3 导管架平台截面及形状优化结果 /m

变量序号	1	2	3	4	5	6	7	8	
初始值	1.50	0.76	0.71	1.50	10.00	-3.50	5.85	10.38	
上限值	1.52	0.80	0.75	1.50	10.00	-1.75	8.12	12.58	
下限值	1.48	0.74	0.68	1.47	7.00	-6.50	2.95	9.00	
优化值	方案 1	1.48	0.74	0.68	1.47	8.56	-1.76	2.95	9.00
	方案 2	1.48	0.74	0.68	1.47	7.05	-1.75	3.38	9.00

然后采用统一变量方法,对截面和形状变量同时进行优化。截面变量与上述相同,形状变量分别取为主腿的斜率、各层水平拉杆的垂向位置,如图 4 所示。设计变量的初始值、上下限约束和优化值如表 3 所示。

通过优化,发现平台的截面变量和形状变量同时发生了改变,优化前后结构形状对比如图 5 所示。如表 4 所示,通过对两类优化结果的比较发现:只进行截面优化时,在两种方案下分别使导管架的质量减小 28.1%和 21.1%;而采用统一设计变量方法进行优化时,平台的质量分别减小 42%和 40.1%。显然,再次证实了统一变量方法在海洋平台结构动力优化中的结果明显优于截面优化设计。

表 4 两类优化方法的结果比较

约束函数			重量/t	一阶振频/Hz	位移/cm
初始设计			478.20	0.88	0.41
方案 1	优化值	截面	343.87	0.850	0.50
		截面与形状	277.40	0.851	0.47
方案 2	优化值	截面	377.18	0.891	0.395
		截面与形状	281.70	0.896	0.396

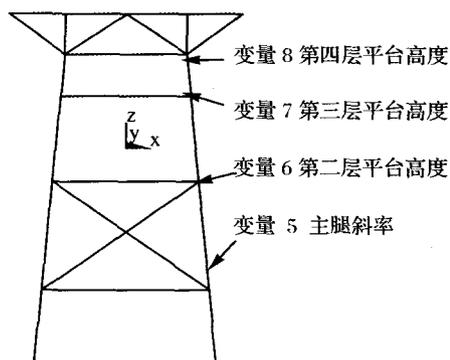
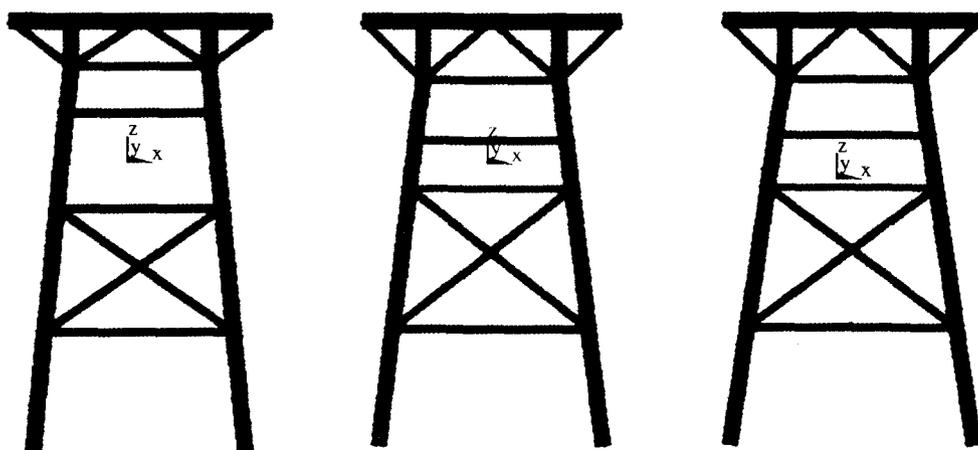


图 4 形状优化变量示意图



a) 平台原结构 WT=478.20t    b) 方案 1 WT=277.40t    c) 方案 2 WT=281.70t

图 5 JZ20-1MUQ 平台形状优化前后的结构模型比较

## 5 结 语

本文基于统一设计变量方法,对 JZ20-1MUQ 导管架海洋平台进行了结构动力优化设计。结果表明:基于统一设计变量方法同时考虑截面和形状变量的海洋平台优化设计比单独的截面优化设计能取得更好的优化效果。下一步工作是引入包括风、浪、流等多载荷工况并考虑应力、稳定性等其他约束的海洋平台优化设计。

## 参考文献

- [1] 岳前进,季顺迎,于学兵.局地海冰数值预测的冰激结构响应计算[J].海洋工程,2003,21.
- [2] 王兴国,贾默伊,周晶.地震作用下的导管架海洋平台结构动力优化设计研究[J].海洋工程,2003,21.
- [3] 王世圣,刘立名,高德利等.海洋导管架平台结构动力优化研究[J].中国海上油气,2004,16.
- [4] 王栋,张卫红,姜节胜.桁架结构形状与尺寸组合优化[J].应用力学学报,2002,19.
- [5] 刘军伟,姜节胜.桁架动力学形状优化的统一设计变量方法[J].振动工程学报,2000,13.
- [6] 顾元宪,马红艳,姜成等.海洋平台结构动力响应优化设计与灵敏度分析[J].海洋工程,2001,19.