

# 空间机器人碳纤维机械臂动态 设计的初步优化法\*

曾凡才

李庚田

(郑州工学院)

(北京控制工程研究所)

**摘 要:** 为适应空间机器人特殊的工作环境, 本文依据优化设计理论, 采用结构有限元分析方法, 并与结构优化设计理论结合, 对空间机器人碳纤维机械臂有限元数值分析的结果, 进行结构优化分析和设计, 获得了优化结构; 随后, 对碳纤维臂的不同铺层厚度以及同一厚度的纤维不同铺层角度的结构受力情况进行了详细的数值计算分析, 得到较理想的机械臂的纤维铺层方法和铺层厚度。

**关键词:** 机器人, 优化, 有限元

## 1 优化设计的基本方法以及空间机器人优化分析模型

最优化设计是在现代计算机广泛应用的基础之上发展起来的一项新技术。它根据最优化原理和方法、综合各方面的因素, 以人机配合的方式或用自动探索的方式, 在计算机上进行半自动或全自动设计, 以选出现有工程条件下最好设计方案的一种现代设计方法。

通常, 在数学上是通过选取设计变量, 列出目标函数, 综合约束条件, 便可构造优化设计的数学模型。这里可以进一步描述为: 在满足给定约束条件 (决定  $n$  维空间  $E^n$  中的可行域  $D$ ) 下, 选取适当的设计变量  $X$ , 使其目标函数  $f(X)$  达到最优值。其数学表达式为:

设计变量:

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad X \in D \subset E^n$$

在满足约束方程:

$$h_v(X) = 0 \quad v = 1, 2, \dots, p$$

$$h_u(X) \leq 0 \quad u = 1, 2, \dots, m$$

的条件下, 求目标函数:  $f(X) = \sum_{j=1}^q w_j f_j(X)$  的最优值。通常, 目标函数的最优值可用最小

\* 收稿日期: 1990.03.08

值表示, 则优化问题可记为:

$$\begin{aligned} \min f(X) \quad & X \in D \subset E^n \\ \text{s.t. (Subject to)} \quad & h_v(X) = 0 \quad v = 1, 2, \dots, p \\ & h_u(X) \leq 0 \quad u = 1, 2, \dots, m \end{aligned}$$

在空间机械人机械臂动态设计的优化分析过程中, 考虑到在空间机器人的工作过程中, 外部的激振频率较低, 为避免机械臂结构产生共振, 希望能尽可能的提高结构的第一阶固有频率。因此, 选取结构振动的第一阶固有频率为目标函数; 分布在大小臂上的五个电机位置, 装配孔的大小和位置以及结构形状作为设计变量; 选取空间机器人的工作容积, 各自由度的工作范围以及大小臂的长度等为约束条件, 于是就构成了空间机器人动态设计的优化分析模型。可简述为: 在保证工作容积等设计要求的前提下, 通过调整电机位置、装配孔的大小和位置以及改变臂的形状, 从而提高整体结构振动的第一阶固有频率。

## 2 结构初步优化法

在结构优化模型确定以后, 由于工程问题的复杂性, 无法按现有的优化分析理论提供的算法对结构进行优化分析。但是, 通过分析该优化问题的特殊性, 可以看出: 其目标函数为结构动态特征参数——结构振动的第一阶固有频率; 而设计变量和约束条件均可由结构几何参数表述。即对于最优设计变量  $X^*$ , 可以确定最优结构, 而目标函数的最优值  $\omega_1^*$  则为最优结构的第一阶固有频率。然而, 从结构动力学的角度来看, 对于最优设计变量  $X^*$  所确定的最优结构, 可以通过有限元动力学分析方法, 求得结构振动的第一阶固有频率值  $\omega_1$ , 而此值正是目标函数的最优值。于是, 可以通过反复调整结构来修正  $X$  使其接近  $X^*$ , 从而保证结构的调整逐步接近最优结构; 对调整后的结构进行动力学分析使  $\omega_1$  逐步接近  $\omega_1^*$ 。这样, 将这一特殊的工程优化问题转变为多个结构动力学分析的特征值问题。本文将这一利用较成熟的理论来解决工程优化问题的方法称为初步优化法。

在实际工程问题中, 对于一般的动力学问题可以描述为:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{P\}$$

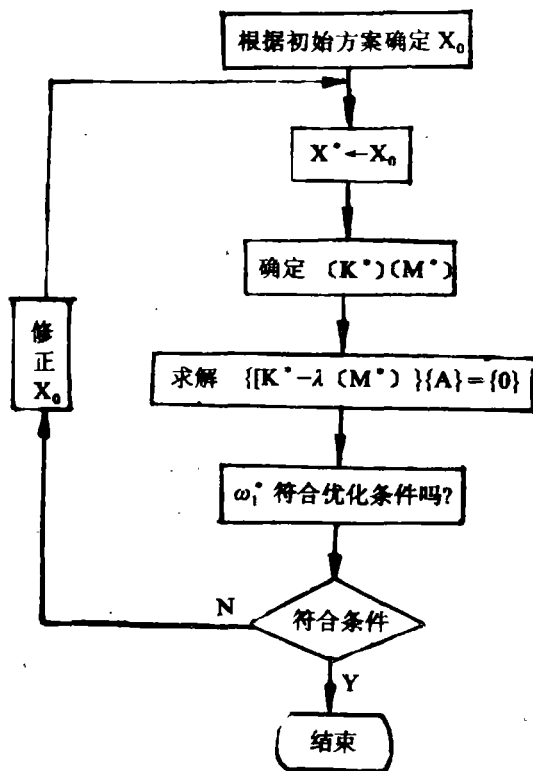


图1 初步优化方法框图

式中:  $[M] = [m_{ij}]$

$$[K] = [k_{ij}] \quad i, j = 1, 2, \dots, n$$

$$[C] = [c_{ij}]$$

其对应的特征值问题为:

$$\{[K] - \lambda[M]\}\{A\} = 0$$

目前结构动力学理论发展比较完善, 因此, 在质量矩阵 $[M]$ 和刚度矩阵 $[K]$ 的形成以及特征值问题的求解中, 均可以直接利用现有的结构有限元分析方法和程序。

### 3 优化计算结果

在现有的结构有限元程序中, 选用 SAP5 程序对空间机器人机械臂结构进行数值分析, 通过三次调整结构四次有限元分析计算, 获得了符合工程要求的初步优化结果。

经充分调研, 在总结现有工业机器人结构特点的基础上, 结合空间机器人特殊工作要求, 给出了初始设计方案见图 2; 利用本文提出的初步优化法获得的优化设计方案见图 3。有关数值结果参阅表 1。

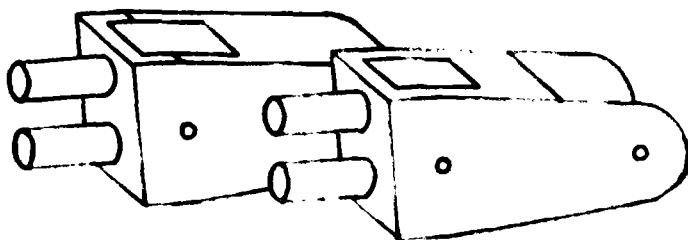


图2 初步设计方案

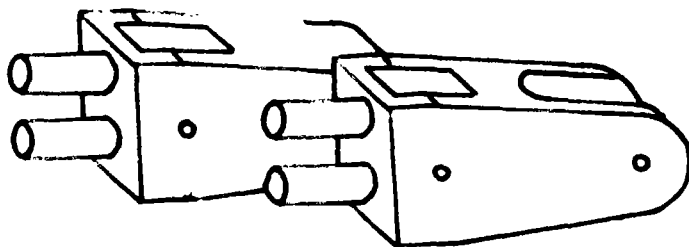


图3 优化设计方案

表 1 优化前后前三阶模态比较

	模 态 数	圆 频 率	频 率	周 期
优 化 前	1	4.040	0.643	1.555
	2	23.681	3.769	0.265
	3	58.088	9.245	0.108
优 化 后	1	11.27	1.793	0.558
	2	33.46	5.325	0.188
	3	83.28	13.25	0.075

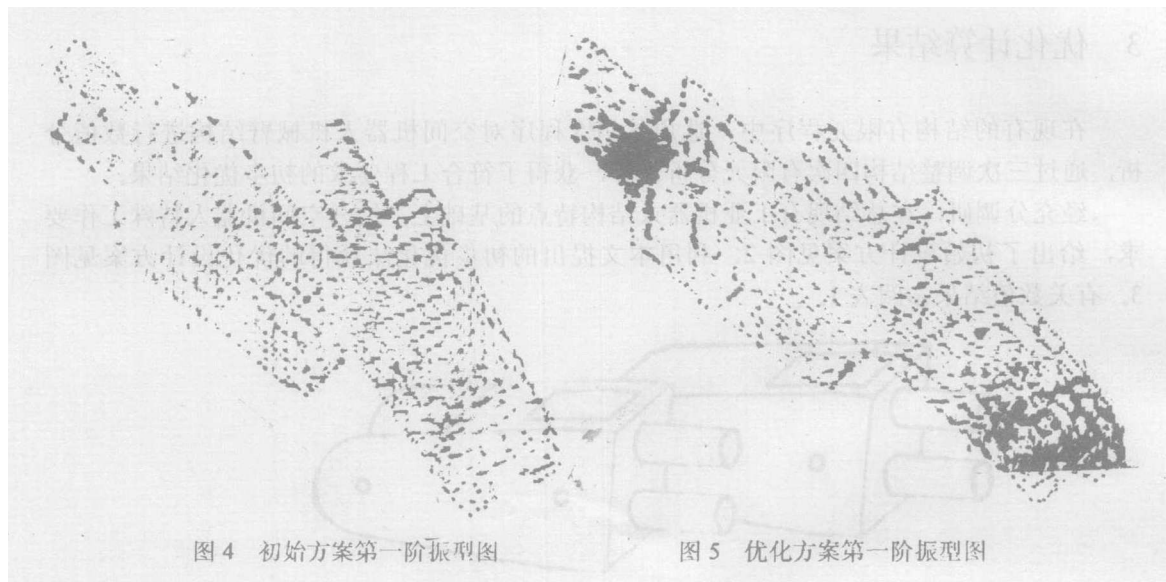


图 4 初始方案第一阶振型图

图 5 优化方案第一阶振型图

#### 4 碳纤维臂纤维铺层的计算结果

对于上述的优化结构,利用 DASS 飞行器结构分析程序,分别对采用相同纤维铺层方式不同铺层厚度的结构和采用相同铺层厚度不同纤维铺层方式的结构进行了详细的数值计算。其结果如表 2、表 3 和表 4 所示。

表 2 相同铺层方式不同铺层厚度的结构的计算结果

铺层数	铺层方式	板的厚度	y 轴 2g 过载加速度时最大位移	z 轴 3g 过载加速度时最大位移
9 层	0° / 90° 正交方式	1.125mm	0.15mm	0.23mm
11 层	0° / 90° 正交方式	1.375mm	0.093mm	0.199mm
15 层	0° / 90° 正交方式	1.875mm	0.06mm	0.1mm

表 3 铺层数为 11 的结构所选用的五种铺层方式

方式	第一层	第二层	第三层	第四层	第五层	第六层	第七层	第八层	第九层	第十层	第十一层
1	0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°
2	0°	-45°	45°	0°	90°	0°	90°	0°	45°	-45°	0°
3	0°	90°	-45°	45°	0°	90°	0°	45°	-45°	90°	0°
4	0°	90°	0°	-45°	45°	0°	45°	-45°	0°	90°	0°
5	0°	-45°	45°	-45°	45°	0°	45°	-45°	45°	-45°	0°

表 4 相同铺层厚度不同纤维铺层方式的结构的计算结果

方 式	y 轴 2g 过载加速度		z 轴 3g 过载加速度	
	最大位移	最大 T-H 值	最大位移	最大 T-H 值
1	0.093mm		0.199mm	
2	0.091mm		0.154mm	
3	0.076mm	0.07	0.133mm	0.21
4	0.078mm		0.137mm	
5	0.087mm		0.145mm	

T-H 值是复合材料力学中 Tsai-Hill 强度条件:

$$\frac{\sigma_1^2}{\sigma_L^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{\sigma_T^2} + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_T^2} + \frac{\tau_{12}^2}{\tau_L^2} = 1$$
 的左端项, 即:

$$T-H = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_L^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{\sigma_T^2} + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_T^2} + \frac{\tau_{12}^2}{\tau_L^2}$$

式中:  $\sigma_L$ -纤维方向的强度;  
 $\sigma_T$ -垂直于纤维方向的强度;  
 $\tau_L$ -剪切强度。

当 T-H 值等于 1 时, 应力状态达到材料破坏临界条件, 当 T-H 值大于 1 时, 则超过材料临界极限, 从而引起破坏。

通过上述计算结果可见, 具有斜铺层的 11 层层合板, 其刚度结果十分理想。同时, 对第 3 方式 T-H 值的计算, 可见结构的强度也有较大余量。因此, 空间机器人机械结构臂最后采用具有斜铺层的 11 层层合板。

5 结果讨论

5.1 目前, 工程结构的优化分析理论和方法还有很大的局限性, 本文提出了优化初步法并用于空间机器人机械臂的动态设计的优化分析, 为工程上利用较成熟的理论和方法来解决工程结构的优化问题进行了有益的尝试。

5.2 初始设计方案的臂前端为外伸板状结构见图 2, 在优化分析过程中, 可以看出低频产生于此见图 4; 优化分析后, 此处改为有轮幅结构见图 3, 低频率消失见图 5。

5.3 初始方案控制手爪的电机安装在臂前端, 计算结果表明易引起低频, 优化分

析后, 该电机移置于小臂内部, 从而减轻了臂前端的质量, 低频消失。

### 参 考 文 献

- (1) 航空航天部五〇二所. 空间机器人. 空间站系列文集第九集
- (2) K.Machida, Y.Toda. A Japanese Effort in Space Robotics. Rendezvous and Proximity Operation Workshop at NASA/JSC, Feb.1985
- (3) Y.Toda. A Master-Slave Manipulator System for Space Use, 15-th International Symposium on Space Technology and Science, May, 1986

## A Tentative Optimizing Method in Dynamic Design of Carbom Fibre Mechanical Arms of Space Robot

Zeng Fancai

(ZhengZhou Institute of Technology)

Li Gengtian

(Beijing Institute of Control Engineering)

**Abstract:** The finite element analysis and the optimizing design theory of structures are introduced into the dynamic design of CFMASR. The optimum Structure of CFMASR is obtained by the structural optimization and design which are based on the results of detailed finite element numerical analysis. In accordance with the requirements of the physical design.CFMASR with different laminates thickness and orientation of fibre layers are computed and compared to obtain the desired physical properties.

**Keywords:** robot, optimum, finite element