

# 挠性膜片联轴器优化设计

王心丰 方鸿慧 (南京航空航天大学)

**[摘要]** 本文改进了 Powell 的无约束优化方法,提出了有效的约束函数法。用此法研究了膜片联轴器在满足强度、刚度、振动等条件下,以重量最轻,刚度最小为目标的优化设计计算。基于膜片的强度、刚度是在有限元分析基础上进行,必须要解决有限元前置处理(自动分单元、自动分载荷)和后置处理(绘等值线)等一系列的问题,开发了一套比较完善的膜片外形优化设计的软件系统(简称 ODFC 系统)。

**关键词** 优化 膜片 联轴器

**分类号** TH133

挠性膜片联轴器是一种比较新型的联轴器,在工业发达的国家(如英国、德国、意大利、日本)都有产品出口。但能看到的设计资料比较少,其中用有限元分析的更少,在有限元分析的基础上作外形优化的还未见到。

## 1 Powell 有约束函数优化方法

### 1.1 Powell 优化方法

Powell 优化法是属于无约束优化方法的一种。这种方法不需要对目标函数作求导计算,具有收敛速度快可靠性好等特点,一般认为是不求导的无约束优化方法中最有效的方法之一。

对于有约束的问题常采用内、外点罚函数优化方法,把有约束的问题通过重新构造目标函数和重新定义变量的定义域化归为无约束的优化问题求解。但本问题用罚函数法求解时其收敛速度较慢,精度不高,其可靠性受罚因子  $r(k)$  的影响较大。如果  $r(k)$  初始惩

罚因子选择不当,其收敛速度缓慢,甚至不收敛。为提高其收敛速度及其收敛精度,作者将 Powell 方法进行了改进,提出了有约束的 Powell 直接优化法,通过多次运算其收敛速度和精度均有较大的提高。

### 1.2 Powell 有约束函数优化法

约束函数优化法是在一维优化问题时,即在抛物线拟合子程序中作进一步改进,其计算过程如下:

首先确定极小点所在的区域,然后用二次抛物线进行内插,计算步骤如下:

步①:选初始步长  $\Delta t$ ;

步②:令  $t^{(0)} = 0, g(t^0) = f(t^0), k = 0$ ,

如果  $g(t^{(0)} + \Delta t) \leq g(t^0)$  转步③;

如果  $g(t^{(0)} + \Delta t) > g(t^0)$  则

令:  $t^{(1)} = t^{(0)} + \Delta t$

$\Delta t = -\Delta t$  并转步③;

步③:计算  $t^{(k+1)} = t^{(k)} + \Delta t, g(t^{(k+1)})$ ;

步④:判断  $t^{(k+1)}$  是否在可行域内,若是,转步⑤,否则转步⑥;

收稿日期 1993 05 20 修改定稿 1993 10 05

本文联系人 王心丰 男 58 教授 210016 南京航空航天大学 501 教研室

步⑤:如果  $g(t^{(K+1)}) \leq g(t^{(K)})$ , 令  $\Delta t = 2\Delta t$ ,  $K = K + 1$ , 转步③;

步⑥:如果  $g(t^{(K+1)}) > g(t^{(K)})$ , 令  $t^{(m)} = t^{(K+1)}$ ,  $t^{(m-1)} = t^{(K)}$ ,  $t^{(m+2)} = t^{(K-1)}$ ,  $\Delta t = \frac{1}{2}\Delta t$ ;

步⑦:计算  $t^{(m+1)} = t^{(K)} + \Delta t$ ,  $g(t^{(m+1)})$ ;

步⑧:判断  $t^{(m+1)}$  是否在可行域内。若是, 转步⑨; 若不是, 转步⑥;

步⑨:将四个值:  $t^{(m+1)}$ ,  $t^{(m)}$ ,  $t^{(m-1)}$ ,  $t^{(m-2)}$  中离对应极小点的最远点  $t^{(m)}$  或  $t^{(m-2)}$  去掉, 得到三个点, 并令它们为  $t^{(1)}$ ,  $t^{(2)}$ ,  $t^{(3)}$ 。

步⑩:计算

$$t^* = \frac{1}{2} \{ [(t^{(2)})^2 - (t^{(3)})^2] \cdot g(t^{(1)}) + [(t^{(3)})^2 - (t^{(1)})^2] \cdot g(t^{(2)}) + [(t^{(1)})^2 - (t^{(2)})^2] \cdot g(t^{(3)}) \} / [(t^{(2)} - t^{(3)}) \cdot g(t^{(1)}) + (t^{(3)} - t^{(1)}) \cdot g(t^{(2)}) + (t^{(1)} - t^{(2)}) \cdot g(t^{(3)})]$$

步⑪:如果  $t^*$  与  $\{t^{(1)}, t^{(2)}, t^{(3)}\}$  中对应的  $g(t)$  的最小值的  $t$  的差小于预定的计算精度时, 则寻优终止。否则计算  $g(t^*)$ , 并用  $t^*$  代替对应  $\{t^{(1)}, t^{(2)}, t^{(3)}\}$  中的最大函数的点, 得到新的  $\{t^{(1)}, t^{(2)}, t^{(3)}\}$ , 并转步⑩。

根据以上方法编制的计算程序详见 ODFC 软件包。用上述思想作优化从实践中得知有以下优点:

- 1) 得到的最优解精度比较高。
- 2) 初始值(内点)对寻求的影响不大, 在优化过程中不会出现 Real By Zero 等错误, 致使计算中断。
- 3) 对此类优化效果较好。

## 2 膜片联轴器的优化

膜片联轴器的关键零件是膜片, 它的受力情况比较复杂。首先, 它的形状尺寸决定了其它部分的尺寸, 因此对膜片进行优化设计

时, 其它尺寸也就随之确定了。

膜片是承受多种载荷的, 如扭转载荷, 离心载荷, 轴向位移引起的载荷, 角不对中引起的载荷等。在用有限元分析其强度时要涉及到平面应力、薄板的弯曲及角不对中的问题。角不对中要把它化为薄板的弯曲问题, 然后还要区分静应力和交变应力, 再列出强度条件。限于篇幅, 在此不详细赘述, 详见文献[3]。还有振动频率约束, 在此用传递矩阵来分析该系统的轴向、横向固有频率。在优化过程中经常要进行大量有限元分析, 振动特性分析, 因此要很好地解决有限元的前置处理、自动分单元、自动分节点、自动分载荷等问题和完全自动化, 否则是不能进行的。

### 2.1 单元划分、节点编排和载荷移置的自动化

将膜片根据其特征分成若干子块, 而各子块的节点又表示成膜片内径、外径, 螺栓所在位置圆直径和螺栓的直径的函数关系, 每个子块的节点随变量的改变而变化。然后再将各子块自动分成  $K$  个单元,  $K$  值越大, 单元划分越多、越密; 反之单元划分越少。根据需要取  $K$  值或节点编号, 在编写计算机软件时, 节点号的编排是根据各个单元节点号最大差值最小, 使刚度矩阵带宽最小为原则, 自动优化编排单元节点号。各单元载荷的移置, 每个单元所承受的载荷种类和大小是不相同的, 有线载荷, 体积载荷, 集中载荷等, 各种载荷将分别等效到各单元相应的节点上。

膜片的有限元自动划分, 自动分节点, 自动分载荷, 节省了有限元分析的时间, 提高了分析的速度和计算效率, 为进行外形优化设计, 奠定了可靠的基础。

### 2.2 设计变量

考虑到实际情况和理论分析的价值, 取膜片的外径  $D_{os}$ , 膜片内孔的直径  $D_{is}$ , 螺栓所在位置圆的直径  $D_m$ , 膜片的层数  $Z$  为设计变量。

因此设:

$$\bar{X} = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T = [D_{os}, D_{is}, D_m, Z]^T$$

### 2.3 约束函数

#### 2.3.1. 设计空间的限制

$$\text{设 } D_{os} < D_{oso}, \text{ 则 } \frac{x_1}{D_{oso}} < 1,$$

$D_{oso}$ —场地外径限制。

#### 2.3.2 几何尺寸约束

$$x_1 - x_3 - d_1 > 0$$

( $d_1$  为螺栓垫圈直径)

$$x_2 > 0$$

$$x_3 - x_2 - d > 0$$

$$x_4 > 0$$

$$x_3 \sin \alpha - x_2 > 0$$

( $\alpha$  为两螺栓之间夹角)

#### 2.3.3 强度约束条件

$n_{min} > [n]$   $n_{min}$  为最小安全系数,  $[n]$  为许用安全系数。

#### 2.3.4 频率约束

$$\omega_1/\omega < 0.7 \text{ 或 } \omega_1/\omega > 1.3$$

$\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$  分别为轴向一、二阶, 横向一、二阶固有频率,  $\omega$ —工作频率

$$\omega_2/\omega < 0.7 \text{ 或 } \omega_2/\omega > 1.3$$

$$\omega_3/\omega < 0.7 \text{ 或 } \omega_3/\omega > 1.3$$

$$\omega_4/\omega < 0.7 \text{ 或 } \omega_4/\omega > 1.3$$

综合上述情况可写成约束函数为:

$$g_1(x) = D_{oso} - x_1 > 0$$

$$g_2(x) = x_2 > 0$$

$$g_3(x) = x_1 - x_3 - d_1 > 0$$

$$g_4(x) = x_3 - x_2 - d_1 > 0$$

$$g_5(x) = x_4 - Z_0 > 0$$

$$g_6(x) = x_3 \sin \alpha - x_2 > 0$$

$$g_7(x) = n_{min} - [n] > 0$$

$$g_8(x) = 0.7\omega - \omega_1 > 0$$

或  $g_9(x) = \omega_1 - 1.3\omega > 0$

$$g_{10}(x) = 0.7\omega - \omega_2 > 0$$

或  $g_{11}(x) = \omega_2 - 1.3\omega > 0$

$$g_{12}(x) = 0.7\omega - \omega_3 > 0$$

或  $g_{13}(x) = \omega_3 - 1.3\omega > 0$

$$g_{14}(x) = 0.7\omega - \omega_4 > 0$$

或  $g_{15}(x) = \omega_4 - 1.3\omega > 0$

### 2.4 目标函数

#### 2.4.1 以膜片轴向刚度最小为目标的优化

这种联轴器最大的结构特点是:在扭转方向具有很大的刚度,以传递很大的扭矩;而在轴向具有很大的柔度,以适应大的轴向变形和角向变形,减少所引起的支反力。因此优化的目标是轴向刚度最小,在保证膜片的强度刚度条件下,其它几何尺寸约束情况下,发挥出这类联轴器的最佳性能,也就是性能最好。

膜片的轴向刚度,根据文献[3]可表征为:

$$C = 2.15Ebt^3ZKF(u)/(\varphi_0R)^3$$

式中  $C$ —为轴向刚度, (N/mm)

$E$ —为材料的弹性模量, (N/mm)

$b$ —膜片的宽度, (mm)

$t$ —膜片的厚度, (mm)

$Z$ —为膜片的层数

$K$ —半联轴器上的螺栓数

$F(u)$ —是随  $u = 1.9 \sqrt{\left(\frac{W}{t}\right)^2}$  而变化的系数

$W$ —轴向不对中量, (mm)

$\varphi_0 = \pi/K - 0.8d_1/R$ , 取决于两相邻螺栓间的夹角, (弧度)

$d_1$ —紧固件垫片直径, (mm)

$R$ —螺栓所在圆半径, (mm)

#### 2.4.2 以膜片重量最轻为目标的优化

在航空上要求重量最轻有其特殊的重要意义。要求膜片组的重量最小,即膜片组件体积最小,所以

$$F(x) = V = AZt$$

$A$ —一片膜片的面积, (mm<sup>2</sup>)

$Z$ —片数,

$t$ —膜片厚度,(mm)

### 2.5 优化的数学模型

根据前面所述,优化的数学模型为:

$$\min F(\bar{x})$$

$$x \in R^n$$

满足于  $g_u(\bar{x}) > 0, (u = 1, 2, \dots, 15)$

### 2.6 优化方法的选择

本问题是有约束的优化问题,而且是在有限元分析的基础上的外形优化问题,有限元分析要解决自动分单元、自动分节点、自动分节点载荷等问题。考虑到各方面的情况,选用了经过改进了的 Powell 优化方法,缩短了重分析的次数,加速了收敛速度。

### 2.7 优化结果

一种挠性膜片联轴器转速  $n = 16\ 000$  r/min,其膜片的形状和尺寸如图(1)所示。联轴器  $T = 3\ 655$  N,轴向位移  $\Delta x = \pm 2.5$

mm,角不对中  $\varphi = \frac{1}{2}^\circ$ 。要求满足强度约束条件,满足几何约束条件,避开联轴器的轴向振动、

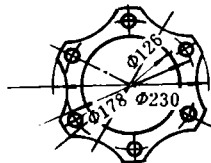


图 1

横向振动固有频率要求,以膜片重量最轻为目标,进行优化。本题选用 ODFC 系统进行计算,优化结果见表 1 所示。以刚度最小为目标的优化,仍采用 ODFC 系统计算,优化结果见表(2)所示。

表 1 以重量最轻为目标函数的优化结果

设计变量	膜片外径 ( $D_{OUT}$ )	膜片内径 ( $D_{INIST}$ )	螺栓位置直径 ( $D_{BOLTP}$ )	膜片层数 ( $N_{LAYER}$ )	膜片组重量 (kg)
初始变量值	310.00	204.00	278.00	20	0.891 124
优化结果	341.1625	255.4313	306.500 0	13	0.476 520 12
备注	场地直径限制 350.0 mm,重量减小 46.5%				

表 2 在刚度最小目标函数下,膜片的初始值和优化结果比较

设计变量	膜片外径 ( $D_{OUT}$ )	膜片内径 ( $D_{INIST}$ )	螺栓位置直径 ( $D_{BOLTP}$ )	膜片层数 ( $N_{LAYER}$ )	膜片组刚度
初始变量值	310.00	204.00	278.00	20	6 010.908
优化结果	325.090 2	242.790 9	291.90	10	4 139.67
备注	场地约束 350.0 mm,刚度目标减小 31.1%				

### 参 考 文 献

1 方鸿慧. 挠性叠片联轴器研究. 南京航空学院硕士研究生论文, 1990年3月

2 王心丰. 组合层板在横向位移时的特性研究. 热能动力工程, 1994(2)

3 В. С. Подиков, и др. Барбаш. Справочник по муфтам. ИРЛ; Машиностроение. 1979. 2

(孙显辉 编辑)

( ) Through a series of experimental study and analysis of four types of connecting modes of headers in a horizontal parallel tube system the authors have come up with a method for calculating the pressure distribution of in-header gas-liquid two-phase flows in the said tube system. The calculation results are in good agreement with those obtained by tests. Thus is provided an essential formula for calculating the flow distribution of gas-liquid two-phase flows in a horizontal parallel tube system, **Key words:** *gas-liquid two-phase flow, header, pressure distribution*

(176) **Optimized Design of Flexible Membrane Couplings** ····· Wang Xingfeng, Fang Honghuai (*Mechanical Engineering Department of Nanjing Aeronautical Institute*)

By introducing an improvement on Powell's unconstrained optimization method, the authors propose an efficient constrained function method. With the use of this method a study has been conducted of the optimized design and calculation aimed at the attainment of coupling minimum weight and rigidity under the condition of meeting strength, rigidity and vibration requirements. The membrane strength and rigidity calculation being based on a finite element analysis, it is essential to solve a series of issues concerning finite element pre-processing (automatic division of elements, automatic division of loads) and post-processing (the drawing of isolines). The authors have also developed a set of relatively refined software system for the optimized design of membrane configurations (designated ODFC for short). **Key words:** *optimization, membrane, coupling*

(180) **Development of a Microcomputer-based Multi-channel Intelligent Flowmeter** ····· Zhu Deshu, et al. (*East China Shipbuilding Institute*)

This paper deals with the hardware and system software of a microcomputer-based multi-channel intelligent flowmeter with a detailed description of the creation of a flow measurement compensation model for the said flowmeter. Practical operation has shown that the above-cited model plays a key role in enhancing the measurement precision during operations under off-design conditions. **Key words:** *steam flow, compensation measurement, orifice plate, multi-channel intelligent flowmeter*

(186) **An Improved PI Controller of Thermotechnical Processes with Substantial Time Delay Characteristics** ····· Yang Yongbin (*Harbin Institute of Technology*)

The author has proposed an improved PI controller of thermotechnical processes with substantial time delay characteristics. The controller virtually constitutes a specific example of Smith forecast control. However, prior to the design of such a controller, it is not necessary to have a precise understanding of the mathematical model of the processes. The control parameters can also be adjusted on the basis of on-site operation results just like those of the PI controller. The said controller has significant potential for widespread applications in process control. **Key words:** *PI control, Smith forecast control, control of thermotechnical processes*