

# 高精度大型框架构件的设计和制造

高云国

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

**摘要** 阐述了高精度设备大型框架构件的优化设计及焊接成形方法并对铸造成形和焊接成形进行了比较, 给出了各种检测数据和说明。

**关键词:** 框架结构; 优化设计; 焊接; 结构

## 1 绪 言

以往的高精度大型框架构件多采用铸造成形, 铸件结构的稳定性好, 容易保持大型框架构件的精度, 由于当前铸造工艺水平的限制, 较大的框架构件一般壁厚最小在10 mm - 12 mm左右, 铸造出的框架一般都较重, 使得相应的支承、轴承等部件的承载能力要增加很多, 电机或液压马达的驱动力也要大大的增加, 最终导致整机体积庞大, 加工困难, 制造费用增多。

通过对框架截面进行力学分析发现, 有时增加壁厚对增加刚度的影响不大, 但对增加重量的影响很大, 同样的刚度, 由于截面形状不同其重量会相差很大。这样, 就提出了一个如何找到一种即能满足刚度要求, 又能使重量最轻, 且适合于当前的加工制造工艺方法的问题。

在“三轴精密机械转台”的研制过程中, 对外框架的截面形状进行了计算机优化设计, 找出在满足刚度条件及使用要求情况下的最佳截面形状, 采用焊接成形代替铸造成形, 选用合理的热处理工艺和自然时效以消除焊接应力, 保证了三轴精密机械转台的高精度的稳定性和布局合理性。

## 2 外框架的主要设计指标

有效负载: 1000 kg

水平面内安装尺寸: 1440 mm × 860 mm

回转范围: ± 360°

不垂直度(中、外轴): < 5

三轴不交度: < 0.1 mm

定位精度: < ± 2

实时测角位置精度: 15 / s 时, 4 ; 0.5 ʹ s  
时, 6 ; 5 ʹ s 时, 10

角速度: 0.001 ʹ s - 100 ʹ s

最大角加速度: 100 ʹ s<sup>2</sup>

角速度平稳度: 1% - 2%

大框架在低速伺服跟踪时要求有较高的位置精度,高转速,大加速度时只需构件有足够的强度即可。

### 3 外框架的结构尺寸及截面形状优化设计

#### 3.1 外框架的结构尺寸

根据转台的使用和精度要求,外框架的设计尺寸如图1所示。

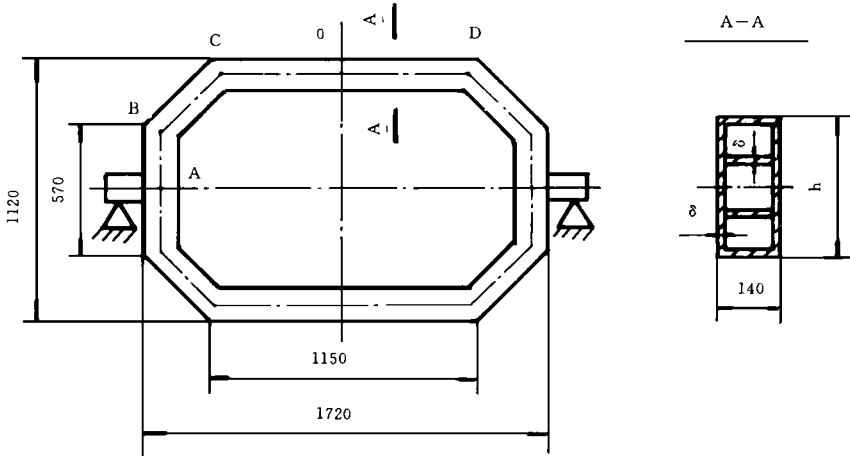


Fig. 1 Dimension figure of the outer frame structure

#### 3.2 框架的受力分析

三轴精密机械转台工作时,台上仪器指向为天空,大框架在水平位置  $\pm 30^\circ$  范围内工作,因而,按水平位置计算框架的受力。

因框架为对称受力结构,取框架的 A、B、C、D 段进行受力分析。

转台工作时引起外框架变形主要有两个力,一是中框以内构件及台上仪器的重力,另一个是外框架自身的重力。在 AB、BC、CD 段的受力变形情况如图2所示。

由于外框架为封闭式结构,且变形量很微小,所以在 BC 和 AB 段内的扭转变形忽略不计。

据材料力学公式有:

$$f_1 = \frac{P_1 L_{CD}^3}{48EJ} \quad f_2 = \frac{5q_1 L_{CD}^4}{284EJ} \quad f_3 = \frac{P_2 L_{BC}^3}{3EJ}$$

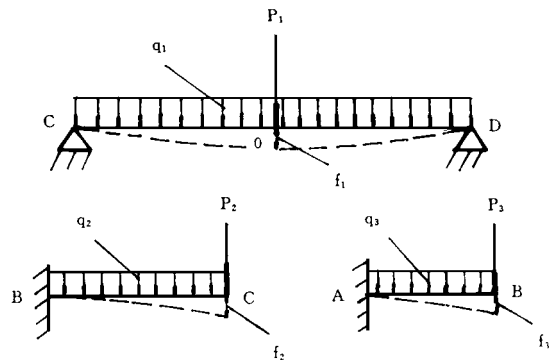


Fig. 2 Stressed deformation figure of each one section outer frame, where  $f_1$ ,  $f_2$  and  $f_3$  are the deformation quantity of CD, BC and AB sections bearing force;  $f_i$  is the deformation quantity of the outside force;  $f_i$  is the deformation quantity of each one section weight;  $p_i$  is the outside force in each one section;  $q_i$  is the weight of a unit of length at each one section.

$$f_2 = \frac{q_2 L_{BC}^4}{3EJ} \quad f_3 = \frac{P_3 L_{AB}^3}{3EJ} \quad f_3 = \frac{q_3 L_{AB}^4}{3EJ}$$

由于外框架变形引起的台上测试仪器的位移为:

$$\begin{aligned} f &= f_1 + f_2 + f_3 = f_1 + f_1 + f_2 + f_2 + f_3 + f_3 \\ &= \frac{1}{3EJ} \left( \frac{P_1 L_{CD}^3}{16} + \frac{5q_1 L_{CD}^4}{126} + P_2 L_{BC}^3 + q_2 L_{BC}^4 + P_3 L_{AB}^3 + q_3 L_{AB}^4 \right) \end{aligned}$$

框架各段采用相同的截面形状, 因而  $q = q_1 = q_2 = q_3$

$$q = \rho(0.56\delta + 2\delta \cdot h - 8\delta^2)$$

$$J = \frac{0.14 \times h^3}{12} - \frac{(0.14 - 2\delta)(h - 2\delta)^3}{12} - \frac{(0.14 - 2\delta) \cdot \delta^3}{6} -$$

$$2 \times \delta \times (0.14 - 2\delta) \times h / 6$$

材料选用 A 3 钢,  $E = 2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ 。

O 点允许最大变形量取三轴不交度 0.1 mm 的五分之一, 为 0.02 mm。

经计算:  $L = 1092 \text{ mm}$ ;  $L = 358 \text{ mm}$ ;  $L = 256 \text{ mm}$

$$P_1 = 5000 \text{ N}; P_2 = (P_1 + 109.2 \times q) / 2$$

$$P_3 = P_2 + 35.8 \times q$$

### 3.3 数学模型

根据设计要求建立数学模型如下:

$$\text{设计变量} \quad X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta \\ h \end{bmatrix}$$

$$\text{目标函数} \quad F(X) = \rho(0.56x_1 + 2x_1 \cdot x_2 - 8x_1^2)$$

式中比重  $\rho$  可以省略, 因它对目标函数的极小化没有影响。

设计约束:

$$g_1(x) = x_1 \quad 0$$

$$g_2(x) = x_2 \quad 0$$

$$g_3(x) = \{[f]/f\} - 1 = \frac{6 \times 10^{-5} EJ}{\frac{P_1 L_{CD}^3}{16} + \frac{5qL_{CD}^4}{126} + P_2 L_{BC}^3 + qL_{BC}^4 + P_3 L_{AB}^3 + qL_{AB}^4} - 1 \quad 0$$

因该框架变形量控制在 0.02 mm 以内, 刚度很高, 所以拉压强度的剪切强度足够, 为了节省计算机计算时间, 在此不作为约束条件提出。

### 3.4 求解方法

采用内点惩罚函数, 惩罚函数为:

$$\Phi(X, r^{(k)}) = F(x) + r^{(k)} \sum_{u=1}^3 \frac{1}{g_u(x)}$$

程序框图如图3

初始点取  $X^{(0)} = [1, 1]^T$  是一个可行点。取惩罚因子初始值  $r^{(0)} = 5$ , 降低系数  $C = 0.6$ , 收敛精度  $\epsilon = 10^{-5}$ ,  $R = 0.3$ 。用鲍威尔的共轭方向法求函数  $\Phi(X, r^{(k)})$  的极值。

因结构问题, 将  $h$  值最大限定在300 mm 以内, 求解结果  $\delta = 1.8558$  mm;  $h = 299.9997$  mm。考虑到要有一定的安全裕度和焊接工艺要求选用  $\delta = 2$  mm;  $h = 300$  mm。

下面把满足刚度要求经优化设计的铸造外框结构和焊接外框结构进行一下比较, 各项数值如表1, 从表中可见, 在相同刚度情况下, 焊接结构比铸造结构重量减轻53.6%。

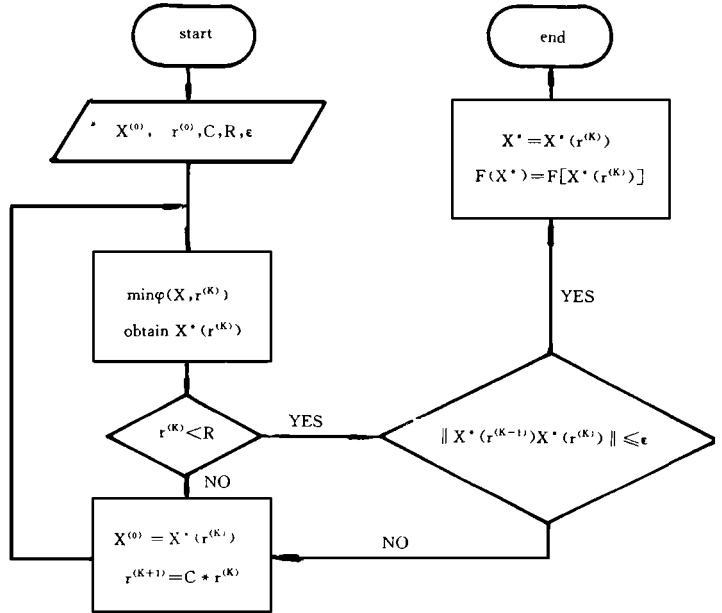


Fig. 3 Program flow chart of inner point penalty function

Table. 1

method of made structure	h	$\delta$	length unit: mm	wight unit: kg	
			weight of unit length	wight frame	deformation magnitude at o point
casting structured	97.5734	10.00	52.66	459	1.9999E-2
welding structured	299.999	1.856	16.58	213	1.9999E-2

## 4 焊接应力及结构稳定性

### 4.1 焊接注意事项及应力消除方法

焊接结构的设计要考虑整体对外力的平衡, 尽可能采用对称结构, 避免形状、刚度、强度的不连续性, 合理的简化结构单元, 以减少应力集中。要尽可能的选用焊接性能好的材料, 采用轧制等成形手段, 尽量减少焊缝数量和长度。要对称的布置焊缝, 避免焊缝交汇, 让主要焊缝连续, 次要焊缝中断。采用热影响较小的焊接方法, 尽量选用自动焊接和半自动

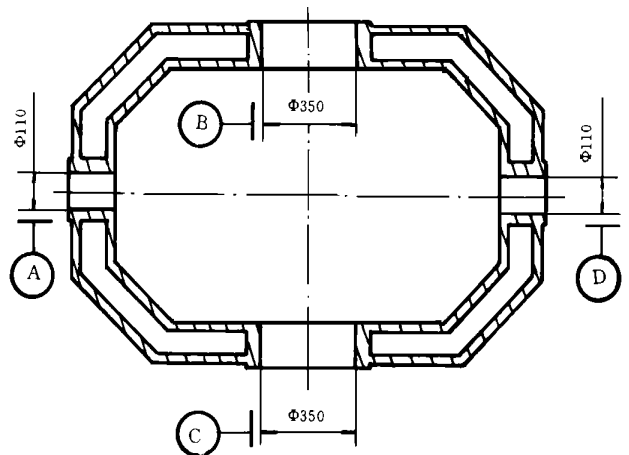


Fig. 4 Abridged general view of large frame machining

焊接。

焊接后的外框架进行了两次消除应力热处理。首先将焊接后的外框架加热到  $A_c$  线以上,保温后缓冷下来。等粗加工后再将框架加热到550 保温,缓冷至250 左右,出炉,又经过半年的自然时效后进行精加工。

#### 4.2 结构稳定性

加工后的框架构件其尺寸精度是否稳定,直接影响到三轴转台的使用性能,大框架精加工后一年左右再测量各项精度指标如表2所示。大框架加工部位示意如图4所示。

Table. 2

unit: mm

error names	precision prescription	measured datas
concentricity of A axis to B axis	0.03	0.01
concentricity of C axis to D axis	0.03	0.01
asymmetry of A-D axis to two $\varnothing 350$ end faces	$\pm 0.1$	0.04
asymmetry of C-B axis to two $\varnothing 110$ end faces	$\pm 0.1$	0.1
verticality of $\varnothing 350$ hole to the end face	0.012	0.01
verticality of $\varnothing 110$ hole to the end face	0.012	0.005
disjoint degree of A-D axis to C- B axis	0.03	0.03
verticality of A-D axis to C- B axis	10	1

## 5 结 束 语

三轴转台外框架构件采用钢板焊接成型方法使框架重量减轻了50%以上,其整机重量,电机功率也都相应的大大减小,经过将近10年的试验运转和存储,其精度处理方法及加工方法较为合理。这种焊接成形方法对于大型精密设备的框架构件是完全可用的,对于减轻设备重量,提高设备性能具有明显的现实意义。

### 参 考 文 献

- [1] 陈立周. 机械优化设计. 上海: 上海科学技术出版社, 1982
- [2] 刘鸿文. 材料力学. 北京: 人民教育出版社, 1979
- [3] 徐 灏. 机械设计手册. 北京: 机械工业出版社, 1992

## Design and Manufacture of Large-Size Precise Frame structure

Gao Yunguo

(*Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,*  
*Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022*)

### Abstract

A method of optimum design and welding form for the large-size precision frame structure is described, the welding form is compared with cast form, and all kinds of detection datas and the explanation is given in this paper.

**Key words:** Frame structure, Optimum design, Welding, Structure

高云国 男, 40岁, 长春光学精密机械研究所, 从事精密机械与传动的研究。