

# 大型光电跟踪架采用焊接结构的工程分析与研究

郭 劲 张景旭

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

**摘要** 介绍了精密焊接结构在大型光电跟踪瞄准设备中的应用。使仪器的总重量较传统的铸造结构减轻了12%~14%,同时保证了跟踪架具有较高的机械谐振频率和优于1"的轴系精度。以水平轴中间体为例,详细说明了跟踪架精密大件采用焊接结构的可行性、设计方法以及减小焊接变形,消除焊接应力保证尺寸稳定性的途径。并对水平轴中间体的刚度进行了分析与计算。

**关键词:** 焊接结构; 光电跟踪瞄准; 跟踪架

## 1 引 言

光电跟踪瞄准设备广泛应用于靶场、航空、航天测量以及常规武器火控、激光武器跟踪发射、再入飞行器跟踪测量等。设备的光机结构基础——伺服控制跟踪架(gimbal)的设计和制造水平,一般已能满足跟踪瞄准系统性能要求。但对某些光学口径较大(如主镜口径在 $\phi 600$  mm以上),跟踪加速度要求高(如在 $100^\circ/\text{s}^2$ 以上),伺服控制系统带宽较宽因而相应要求跟踪架机械谐振频率较高,同时对设备重量有严格限制(如车载或舰载系统)的情况下,刚度好、机械精度高、结构轻巧低惯量的跟踪架设计仍是整台设备的关键技术之一。因为随着光学口径的增加,跟踪架的重量一般是按光学主镜直径的2.7次方成正比增加,其重量和转动惯量均相当可观。根据相似原理,结构的谐振频率与主镜的口径成反比,口径越大,跟踪架结构谐振频率越低。另一方面当惯量大同时加速度要求高时,跟踪架驱动力矩也越大,需达数百公斤·米,相匹配的驱动电路功率要在万瓦以上,设计和制造都相当困难,可靠性也难以保证。因此大幅度降低跟踪架的重量、转动惯量具有非常重要的意义。根据对多台跟踪瞄准设备质量分布分析,跟踪架三个精密大件——水平轴中间体(也称为“四通”)、竖直轴系转盘和底座的重量一般要占整台设备总重

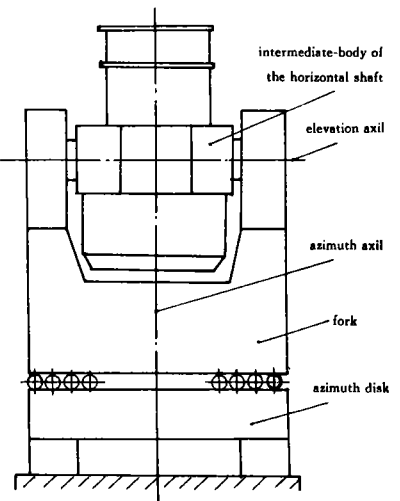


图1 光电跟踪架  
Fig. 1 OE tracking gimbal configuration

量的 35%~40%,并且基本上都采用铸造结构。本文介绍了用钢板焊接结构代替铸造结构,使这三个精密大件的重量减轻 30%以上,设备总重量减轻 12%~14%。在某台设备的应用中,使其总重量较以往的铸造结构减轻了 900 kg 左右。实现了高刚度、低惯量的跟踪架结构设计。

## 2 钢板焊接结构减重分析

和铸造结构相比较,焊接结构具有以下几个特点。第一,钢板材料的拉伸、剪切弹性模量分别是铸铁的 1.7 倍和 1.8 倍,因而在保证等刚度的前提下,焊接结构可比铸造结构减轻重量 40%以上。第二,铸件壁厚不能太薄,相邻壁厚差别不能悬殊,对 1 m 以上的复杂结构,内部筋板的壁厚一般要在 10 mm 以上,而焊接结构则不受此限制,在设计中我们一般取为 5 mm~6 mm,减少了大量不必要的重量。第三,焊接结构设计的灵活性大,可以设计出铸造结构无法制造的封闭箱形结构,刚性大,固有频率比单层壁可提高 2~5 倍。因此焊接结构从材料和结构两方面较铸造结构使零件具有重量轻、刚性大的特点。

## 3 采用焊接结构的可行性分析

焊接结构存在着一些特殊问题。由于焊接是采用局部高温加热,因而不可避免地会产生内应力和变形。焊接过程中过大的变形,会影响结构成形及焊后机械加工,如壁厚均匀性等;焊后由于焊接内应力而产生的微观变形会破坏焊件已有的尺寸稳定性,影响设备的精度,需认真对待采取相应的措施来解决。可行性分析的结论是,拟定的四通、转盘、底座均采用了封闭、对称结构,焊接变形小,再通过采用一定的焊接工装夹具及合理的焊接工艺,可使焊接过程中的变形控制在 1 mm/1 m~2 mm/1 m,对于我们的具体结构,各方向的变形均可控制在 3 mm 以内。至于尺寸稳定性,关键也是使零件结构形状的布局尽可能对称。焊接件的残余应力水平虽然比铸件要高,但只要结构对称,再结合以合理的时效处理,使应力分布均匀,就有可能保证焊件的稳定性。我们制定了焊后高温热处理降低焊接应力峰值,然后振动时效均化应力的工艺方案,预计可使零件的尺寸精度稳定在  $1 \times 10^{-5}$  以内,满足轴系精度保持在 1" 以内的要求。

## 4 焊接结构的构造

### 4.1 焊接结构的刚度设计

参照图 1,三件的主要作用是构成轴系的回转部并承载。其刚度设计一方面是保证在重力静载荷作用下,零件在给定方向的变形小于轴系精度分配的指标,另一方面是保证跟踪架在全惯量负载的条件下,扭转谐振频率满足伺服控制系统的要求。两者的关键是选择抗弯、扭性能较好的截面。限于篇幅,仅以四通为例具体说明其设计与计算。

#### 4.1.1 截面选择与刚度比较

四通采用了双层壁的结构形式,见图 2。内层是一  $\varphi 630$  mm 的圆筒(直径由光学主镜确定),外层设计成八边形,内外两壁之间通过筋板和上下两块盖板连接起来,构成封闭对称的箱形结构。其抗弯、扭截面是空心封闭矩形断面,较铸造的单层结构对应的“I”字型抗弯、扭断面刚度明显增加。单、双层两种结构取相同截面积对应的抗弯、扭截面,见图 3。单、双层对应的截

面抗弯、扭惯性矩  $J_b, J_b', J_i, J_i'$  分别为:

$$J_b = \frac{1}{12} [l_2 l_1^3 - (l_2 - 2b)(l_1 - 2b)^3]$$

$$J_b' = \frac{1}{12} d c^3 + 2 \left\{ \frac{1}{12} l_2 b^3 + l_2 b \left[ \frac{1}{2} (b+c) \right]^2 \right\}$$

$$J_i = 2b^2 (l_1 - b)^2 (l_2 - b)^2 / [b(l_1 + l_2) - 2b^2]$$

$$J_i' = 2J_{i1} + J_{i2} + 2\alpha D^4$$

式中  $J_{i1} = l_2 b^3 \left[ \frac{1}{3} - (0.21b/l_2)(1 - b^4/12l_2^4) \right]$

$$J_{i2} = \frac{1}{3} c d^3, \alpha = b(0.15 + 0.1r/b)/d$$

计算得, 双层结构的抗弯惯性矩是单层的 1.15 倍, 抗扭惯性矩是单层的 23.3 倍, 若考虑到双、单层结构相应的材料分别是低碳钢和铸铁, 则双层截面的抗弯、扭刚度是单层的 2 倍和 42 倍。因此三件的抗弯、扭截面均根据具体结构, 设计成封闭双层箱形结构。

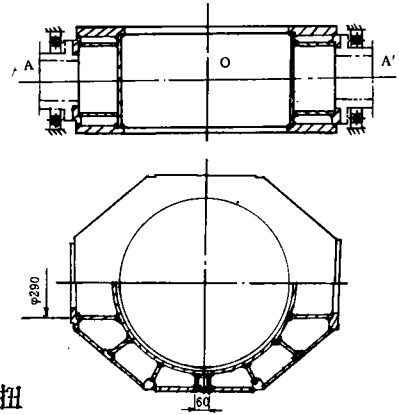


图 2 水平轴中间体及其左、右轴端  
Fig. 2 Intermediate-body and its left right shaft end

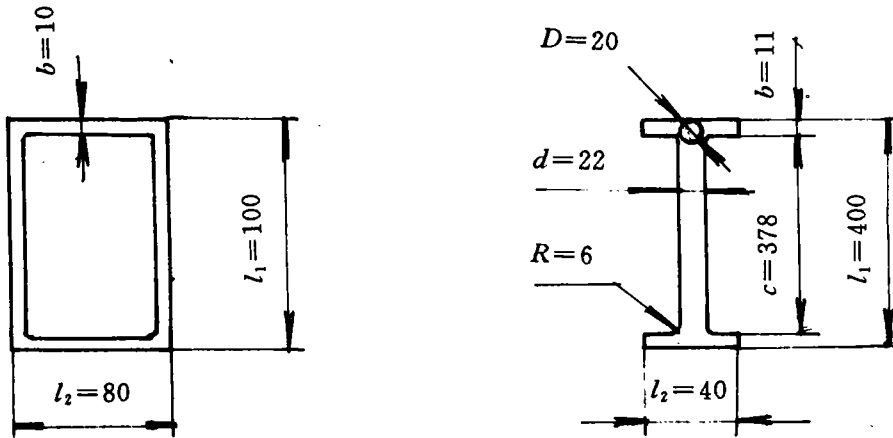


图 3 截面惯性矩比较  
Fig. 3 Compare of the moment of inertia

#### 4.1.2 筋板的布置

如图 2 所示, 四通筋板按几何中心辐射布置, 可以连结内外壁作为一个整体起作用, 受重力载荷时可使构件均衡承载, 受扭转时, 可减少断面畸变。其厚度我们一般取为主体壁厚的 60%, 即 5 mm~6 mm。筋板的另一个作用是减少了自由面积(非支承长度), 可达到提高零件固有频率的作用。在左右法兰处两  $\Phi 290$  mm 的圆筒形筋和中部两组宽 60 mm 的立筋, 加强了直接传递扭矩和自重变形最大处的局部刚度。

#### 4.1.3 自重变形计算<sup>[2,3]</sup>

利用两个近似公式, 对四通在两个不同位置的变形(自重变形)进行了近似计算。

首先将四通简化成两端简支梁, 并分别考虑四通处于图 2 示位置和绕 AA' 轴旋转 90° 后位置两种情况。两种工况四通受自重力作用均近似于均布载荷。AA' 轴中心 O 处自重变形量最大。四通质量  $m$  近似均布在半径为  $R$  的圆周上,  $R=46$  cm, 均布载荷  $q=m/2\pi R, m=270$  kg,

代入得  $q=0.934 \text{ kg/cm}$ 。两种工况四通中心最大变形量分别由以下两公式计算。

(1)四通处于图 2 所示位置。

中心处弯沉  $\delta=(0.4483/EJ_b+0.1121/GJ_t)$  式中  $E$ 、 $G$  分别为材料的弹性模量和剪切弹性模量,  $J_b$ 、 $J_t$  为最小截面处的抗弯、扭惯性矩, 这些值是:  $E=2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ ,  $G=8.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ ,  $J_b=12116 \text{ cm}^4$ ,  $J_t=3848 \text{ cm}^2$ , 代入上式得  $\delta=2.1 \mu\text{m}$ 。

(2)四通绕 AA' 轴旋转  $90^\circ$  位置。

中心处弯沉  $\delta=0.046qR^4/EJ_b$

此工况下  $J_b=1287 \text{ cm}^4$ , 代入上式  $\delta=0.7 \mu\text{m}$ 。

两种工况下,四通自重变形引起的水平轴系晃动量的估算值分别是  $0.7''$  和  $0.24''$ , 满足轴系精度要求。

#### 4.1.4 谐振频率计算<sup>[9]</sup>

对由左、右轴端和水平轴中间体构成的跟踪架水平轴的谐振频率进行了简化计算。水平轴由力矩电机直接驱动,电机轴与水平轴(负载轴)为一体,可认为电机与负载之间是由一根刚度系数为  $k_p$  的轴联接起来的弹性系统,其谐振特性用  $\omega=\sqrt{k_p/J}$  表示,式中  $J$  为负载和力矩电机轴的惯量和。左、右轴端和四通构成的是一根具有变刚度系数的轴,其等效刚度系数  $k_p$  可由轴上各段刚度系数倒数之和计算。将水平轴分成具有 6 个刚度系数的变刚度轴,各段的刚度系数分别为  $k_1=50.8 \times 10^6$ ,  $k_2=15.3 \times 10^6$ ,  $k_3=472 \times 10^6$ ,  $k_4=31.1 \times 10^6$ ,  $k_5=19.7 \times 10^6$ ,  $k_6=6.8 \times 10^6$  量纲均为  $\text{kg} \cdot \text{m}/\text{rad}$ , 则水平轴等效刚度  $k_p$  的倒数  $\frac{1}{k_p}=\frac{1}{k_1}+\dots+\frac{1}{k_6}=3.17 \times 10^{-7}$ ,  $k_p=3.15 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{rad}$  转动惯量按两种情况取值。一是由左、右轴端、四通构成的水平轴转动惯量,计算值为  $J=3.0 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$ ;二是水平轴加上全负载后,跟踪架俯仰部的转动惯量,计算值为  $J=25 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$ , 代入谐振频率公式,可得出水平轴谐振频率  $f=168 \text{ Hz}$ , 它基本代表了四通的谐振频率,跟踪架俯仰部机械谐振频率  $f=56.5 \text{ Hz}$ , 这一计算值与实测值  $f_{\text{实}}=68 \text{ Hz}$  非常接近,计算值小于实测值是由于计算俯仰部谐振频率时,只计入了全负载时转动惯量的增加,而没有考虑四通与其它零部件组合后等效刚度系数的增大。

#### 4.2 考虑焊接特点的结构设计

1)对称性。尽可能采用对称结构,包括整体和局部,筋板也以构件几何中心辐射状布置。

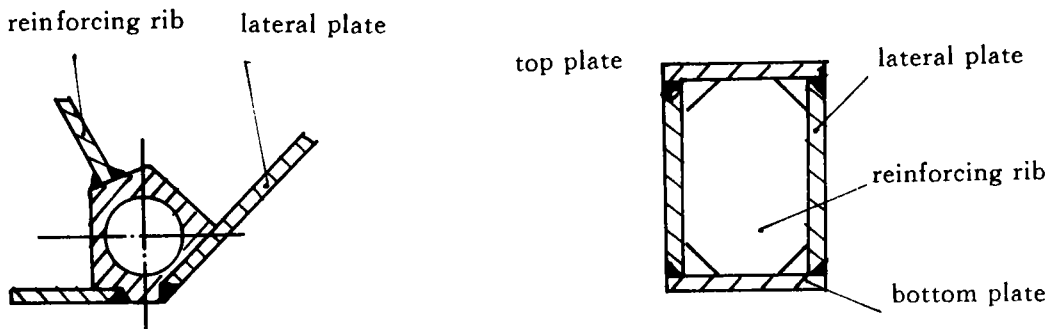


图 4 (a)过渡连接座结构

Fig. 4 (a) Transitional connecting mount structure

(b)避免三轴应力结构

(b) Avoiding triaxle stress structure

2)可焊达性和可检查性。包括使全部的焊缝都处于施焊方便的位置,重要焊缝能用磁力探伤法检查到。

3)避免三轴应力。筋板和壁板焊接处,为避免焊缝交叉处应力集中,保证焊缝有足够的收缩量,将筋板切去四角,使三轴焊缝不能相交,切角边长取为筋板板厚的3~5倍,即20 mm~30 mm,如图4(b)所示。

4)注意拐角处焊缝应力集中。图4(a)为四通和转盘外侧板与筋板连接结构,通过过渡连接座,使焊缝分散,避免了在拐角处产生高应力区。

## 5 精密焊接件的工艺保证途径

### 5.1 焊接工艺简述

1)弱材和焊接方法选择。焊接母材选用了强度高、可焊性好的16Mn钢板。采用CO<sub>2</sub>气体保护焊施焊,其焊条细、电流小、焊弧短可减小单位线能量输入,较手工电弧焊可显著减少焊接变形。

2)拼装和施焊顺序。采用自下而上,由内到外,局部构件分别组焊后再总拼装的施焊顺序。大部分构件先拼装,在检查拼装精度后,先点焊后施焊,逐步增加构件的刚性。为控制变形,尽可能采用对称位置焊接,断续式退焊的方法,同时注意先全面完成第一道焊之后,再施多道焊。对传递载荷的主要焊缝施连续焊,而对筋板与壁板连接等次要焊缝施断续焊,一方面可减小变形和应力,另一方面可提高构件的阻尼特性<sup>[6]</sup>。以上这些方法,保证了四通焊接成形后,各方向的尺寸误差和形位误差均小于1.5 mm,高于铸造成型精度。

### 5.2 时效处理工艺

制定了高温热时效和振动时效相结合的时效处理方案。

1)焊后热处理。采用整体高温退火方式,退火温度控制在600℃~650℃,一次高温退火可消除焊接应力80%左右。若假设未退火前最大焊接应力达到材料的屈服极限 $\sigma$  ( $\sigma_s = 320$  MPa),则退火后应力值大约为 $\sigma_{\text{残}} = 20\% \sigma_s = 48$  MPa,与铸件退火后残余应力值相接近。但考虑残余应力的分布可能不均匀,其重新分布会引起焊件的变形,影响尺寸稳定性,因此进行振动时效以均化应力。

2)焊件的振动时效。大量文献指出,振动时效对降低焊接应力,特别是稳定焊件的尺寸大有益处。我们把振动时效的频率控制在亚共振区, $f_{\text{亚}}$ 的范围是: $f_1 < f_{\text{亚}} < f_0$ ,其中 $f_0$ 为共振峰频率, $f_1$ 为最小共振频率, $f_{\text{亚}} = f_0 - (0.1 \sim 0.5 \text{ Hz})$ 。在亚共振区时效时,消除残余应力效果最好。振动时效的动应力根据焊件材料而定,对16Mn可选择 $\sigma_{\text{动}} = 290$  MPa的动应力,与高温热处理后零件的残余应力叠加,超过材料的屈服极限 $\sigma_s$ ,使这部分残余应力进一步消除和均化。

### 5.3 残余应力检测

1)检测方法。对三个焊接件时效后残余应力的测试选用了盲孔法,方法简单、准确。

2)测试点选择。焊接件上高的残余应力一般分布在焊缝区和构件形状突变区附近,应在这些区域选取测试点。测试分三种情况进行:原点测试,时效后附近点测试及对称点测试。

3)残余应力测试数据分析。时效处理的效果,可通过时效处理前后应力降低幅值及处理后残余应力的绝对值判断。残余应力计算公式的推导可参考文献[4],这里只给出计算结果。最后一次时效处理后残余应力的最大值为3.83 kg/mm<sup>2</sup>,最大、最小应力点应力值差不超过10%,说明应力分布均匀,综合时效处理的效果很好。

## 6 结 论

分析和研制的结果表明,大型光电跟踪架采用焊接结构是完全可行的,实现了以下几个较为先进的技术指标。

- 1)较铸造结构减轻设备总重量 10%~14%,约 900 kg。
- 2)保证了跟踪架的结构刚度和精度。高低、方位全负载谐振频率实测值分别为 68 Hz 和 32 Hz。两轴系回转精度优于 1"。
- 3)焊接过程中的变形控制在 1 mm/1 m~2 mm/1 m 以内。
- 4)焊后高温热时效结合振动时效处理技术,使焊件的尺寸稳定性得到了保证。经两年多时间内的多次复检,轴系精度均保持在 1"以内。
- 5)焊接结构焊前准备简单,制造周期短、成本低,特别适合在大口径、单件研制的跟踪架中应用。

本文介绍的研制结果为同类更大口径跟踪架的制造打下了技术基础,可在大型光电跟踪设备结构设计中广泛应用。

### 参 考 文 献

- [1]焦馥杰,焊接结构分析基础. 上海:上海科学技术文献出版社,1991
- [2]姜文汉,封闭圆环在对称垂直载荷下的变形. 光学工程,1981,8(3):20~26
- [3]高 瑛,四翼梁式十字形中心支撑的力学特性. 天文仪器与技术,1988,(1):5~10
- [4]房任馨,金属的残余应力与振动处理技术. 大连:大连理工大学出版社,1987
- [5]上海科技大学无线电结构专业编,天线座的结构谐振. 内部资料,1976
- [6]中国机械工程学会焊接学会编,焊接手册. 北京:机械工业出版社,1992

## Engineering Analysis and Research of Large-size OE Tracking Gimbals Adopting Welding Structure

Guo Jin Zhang Jingxu

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

### Abstract

The application of precise welding structure in the gimbals of large-size OE pointing and tracking instrument is described in this paper. Compared with the traditional castiron structure, the total weight of the instrument is decreased by 12%~14%. Meanwhile, the high mechanical mode and the axil precision less than 1"(arc second) of the gimbals are achieved. The intermediate-body of the horizontal shaft, as an example, the practicability of welding structure applying in large-size precise components of the gimbals, the design method and the approach that decrease the welding distortion, clear up the welding stress to insure the dimension stability is described in detail. The stiffness of the intermediate-body of the horizontal shaft in static and dynamic state is analysed and computered.

**Key words:** Welding structures, EO tracking and pointing, Gimbals

郭 劲 男,1964年12月生,1989年毕业于中国科学院长春光学精密机械研究所机械制造专业(硕士)。助理研究员,从事光电跟踪瞄准设备光机结构设计与研究。