

大型跟瞄架方位轴系的研制

张景旭

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 详细地叙述了大型跟瞄架方位轴系的研制过程, 对轴系及关键大件的设计给出了定性及定量分析。

关键词: 跟踪瞄准系统; 轴系

1 概 述

在靶场光电测量设备、天文观测设备、武器控制系统以及激光通讯系统中, 都需要有光电捕获、跟踪与瞄准装置, 以便迅速发现并精确跟踪目标。由于测量精度等技术指标逐渐提高, 因此对捕获与跟踪的要求也越来越高, 跟瞄精度为几角秒。要满足这样高的跟瞄精度, 对跟瞄架的轴系精度的要求也大大提高^[1]。众所周知, 随着光电经纬仪作用距离的增大及跟瞄精度的提高, 经纬仪主镜的口径也越来越大, 这就要求跟瞄架的结构尺寸也是很大的。由于所研制的是车载系统, 这也就使得跟瞄架的结构设计难度更大了, 同时也更复杂了, 直接研制这样大的结构系统, 在我所尚属首次, 这其中要克服许多技术难点。这一系统的研制为今后我国大型光电经纬仪的研制将探索一条新路。

2 结构的确定

2.1 跟瞄架技术要求

方位轴系晃动小于 $2''$, 跟踪范围 $0^\circ \sim 360^\circ$

最大角速度 16.7 转/分, 最大角加速度 2.1 弧度/秒²

跟瞄架重量小于 6000kg, 跟瞄架高度小于 3.2m

2.3 系统的组成

对跟瞄架总体而言, 整个机构是一个二轴系统即方位和俯仰。对方位轴系来讲, 只要实现 $0^\circ \sim 360^\circ$ 连续转动即可。在整个结构设计过程中, 首要考虑的是围绕光学系统即 coude 光路来安排结构, 其次要考虑车载的特点。要实现上述技术指标, 跟瞄架底部结构应包括: 方位轴系、转盘、底座调平机构、顶起机构、编码器、导电环、方位力矩电机、测速机等部分, 其中方位轴系由中轴滚柱轴承及水平散装密排端面轴承构成。

2.2 结构方案的确定

由于是车载系统,在结构设计上要考虑调平、顶起、防翻、减振、抗扭、卸载等机构,以适应运输过程及运输后的恢复洞平等过程。由于车辆的承载能力以及桥梁、涵调的限高等因素,在结构安排上还要考虑结构高度及重量的限制。整个结构形成的安排是由转盘、底座、方位力矩电机、大轴承环测速机、导电环及编码器等几部分的相对位置来确定的,如导电环与编码器套装,导电环在外,结构尺寸较大也相应地增加了电刷的线速度,磨损增加;另外,主要是导电环与编码器将同轴安装,这不利于码盘装调,同时在工作状态也将产生互相影响。所以导电环与编码器套装方案将被否定。力矩电机外移,将使转盘外径增大 0.2m 以上,同时也使转盘惯量相应增大;另外,电机的安装、制作、密封等也有较大困难,这样电机外移方案也不能采用。通过比较,我们选定唯一可行方案是:导电环、编码器串行安装、力矩电机、测速机在转盘内。结构示意图如图 1 所示。整个结构形式一经确定,跟瞄架的外形尺寸就由主镜口径大小来排定。过去经纬仪关键大件一直采用铸造结构而且制作工艺也较成熟,所以工程中关键大件的最初结构也采用铸件,经核算,转盘铸件重 1760kg;底座铸件 950kg,跟瞄架总重达 6700kg 以上,超出总体指标对重量的要求,因而必须降重。在未加座椅情况下,核算出方位力矩电机功率在 6.5kW 以上,这样大的功率在打系数之后要达 7kW 以上,功率机不好做。由于结构尺寸已排定,所以只能从关键大件上减重。经过广泛调研,了解到采用焊接结构可降重 1/3 以上,最后选定焊接结构重新设计关键大件。转盘焊件重 1200kg,底座焊件重 650kg,跟瞄架总重 5960kg,达到总体对重量的要求,总惯量 142kgms^2 力矩电机功率 5.34kW,功率机可以做。

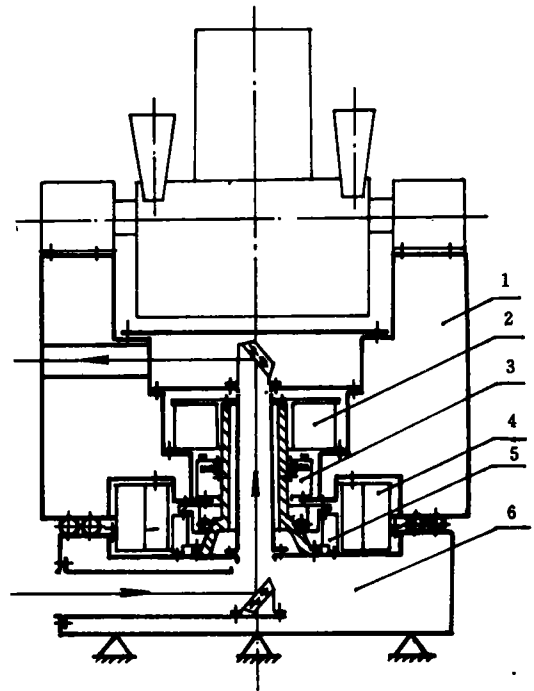


图 1 方位轴系结构示意图

1. 转盘 2. 导电环 3. 编码器
4. 力矩电机 5. 测速机 6. 底座

Fig. 1 Vertical axial system structure diagram

1. rotor disc 2. conducting ring 3. encoder
4. torque motor 5. tachometer 6. base frame

3 分析及计算

3.1 方位力矩电机参数的确定

方位力矩电机在跟瞄架中属于驱动源。由方位最大角速度 $n=16.7$ 转/分,及最大角加速度 $\epsilon=2.1$ 弧度/秒² 出发来核算电机功率及输出力矩。

$$\text{加速力矩 } M_1 = I_z \cdot \epsilon = 142 \times 2.1 \text{ kg} \cdot \text{m} = 297 \text{ kgm}$$

$$\text{阻力矩 } M_2 = 15 \text{ kgm} (\text{其中包括摩擦力矩及风阻力矩})$$

$$\text{所以 } M = M_1 + M_2 = 312 \text{ kgm}$$

$$\text{功率 } P = \frac{M \cdot n}{0.975} = 5.34 \text{ kW}$$

这样大的功率及输出力矩的力矩电机在国内也是首次使用。

3.2 关键大件结构特点及性能分析

工程中关键大件转盘和底座采用焊接结构,在设计过程中首先要考虑的是结构刚度问题,在由铸改焊过程中,要遵守等刚度、强度原则。钢的弹性模量 E 是铸铁的 2 倍,在同样外形尺寸下,焊件壁厚大致可以比铸件减小 1 倍。为了有效地提高结构刚度防止施焊过程中焊接变形,设计中尽量采用对称封闭箱型结构。

3.2.1 转盘分析

我们可以先简化一个模型来加以分析。方位力矩电机转子和转盘之间通过 12-M12 螺栓预紧连接,因而可以认为是刚性连接,这样电机转子和转盘可简化成一个转动惯量 J_1 ,水平轴部分绕方位轴的转动惯量简化为 J_2 ,左右立柱高 l 其间部分可简化成刚度为 $G \cdot J_r$ 的杆件,如图 2 所示。该模型求固有频率的公式为^[2]:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{G \cdot J_r (J_1 + J_2)}{J_1 J_2}}$$

对钢材 $G = (8.0 \sim 8.5) \times 10^4 \text{ MPa}$ 。

从公式分析知,减小转动惯量 J_1, J_2 可以提高系统的谐振频率,因而在结构上,尽可能紧凑,电器箱外挂的改为内藏,重心尽量向里移。随着 l 的减小, f 增大,因而应尽量使左右立柱高度降低。 $G \cdot J_r$ 为距水平轴为 l 处立柱截面的刚度,提高 J_r 值可提高 f 。 J_r 为截面的极惯性矩,该截面可简化为图 3 形式。由公式 $J_r = \frac{4A^2}{\Phi} \frac{ds}{\delta}$ 来

计算。其中 A 为截面积, δ 为壁厚, S 为封闭周边的长度。因而提高 l 处的截面面积有利于 f 的提高。在结构上,左右立柱根部采用加斜筋,立柱两侧斜板过渡,内部加立筋等办法。根据图纸尺寸 $l = 950 \text{ mm}$, $J_1 = 740 \text{ kgm}^2$, $J_2 = 650 \text{ kgm}^2$, $J_r = 1.997 \times 10^{-2} \text{ m}^4$, $G = 8.2 \times 10^9 \text{ kg/m}^2$, 可算得 $f = 112 \text{ Hz}$, 因简化后模型与实际系统相距很大,这一数据只能代表一种趋向。从结果看,该设计的结构刚度是让人乐观的。

3.2.2 底座分析

底座是整个仪器的主要受力部件,全部扭矩通过方位力矩电机定子作用在底座上,因而底座同时承受压扭作用。设计时在主要受压,受扭部位都适当加强,整体采用对称布筋,全封闭结构,内、中、外共三环。底座下面采用调平机构三点支撑。

下面分析在连续载荷作用下,底座上端面挠曲变形情况。底座截面简化为图 4 形式。

$$\text{总承压载荷 } Q = 5500 \text{ kg}$$

$$\text{单位线载荷 } q = \frac{Q}{2\pi R} = 14.6 \text{ kg/cm}$$

截面最大挠曲由下式来计算^[3]:

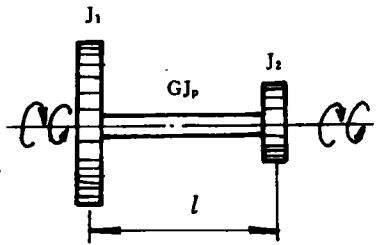


图 2 简化模型
Fig. 2 Simplify model

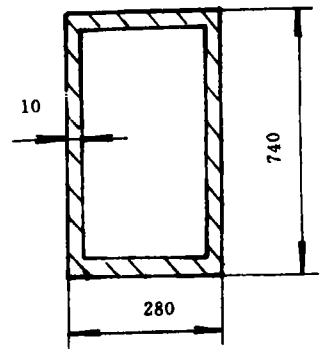


图 3 截面图
Fig. 3 Sectional view

$$\delta = qR^4 \left[\frac{A}{E \cdot J_b} + \frac{B}{G \cdot J_T} \right]$$

其中截面抗弯惯性矩 $J_b = 2.1 \times 10^4 \text{cm}^4$

截面抗扭惯性矩 $J_T = 2.65 \times 10^4 \text{cm}^4$

若取三点支撑 $A = 0.06324$ $B = 0.006954$

可算得 $\delta = 3.49 \mu\text{m}$

若取六点支撑 $A = 0.003311$ $B = 0.0009082$ 可算得 $\delta = 0.2297 \mu\text{m}$

从计算结果看,对 $\Phi 1300$ 大小的圆环面,三点支撑挠度小于 $5 \mu\text{m}$ 是可以接受的,可以满足设计要求。

3.3 轴系特点及性能分析

方位轴系采用两组散装轴承来构成。中轴采用 $\Phi 22$ 滚柱散装轴承;转盘与底座中间采用 600 个 $\Phi 18$ 钢球密排散装轴承。这两组轴承的轴承环采用 GC_r15SiMn 材料。中轴轴承起到定位与导向作用,转盘与底座中间的轴承起到对重量载荷的支撑作用。因而需要校核钢球对大轴承环滚道面的压变形情况。GC_r15 许用压应力 $\delta_{bc} = 3.8 \times 10^4 \text{kg/cm}^2$, $E = 2.16 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$ 转盘以上转动部分载荷 $P = 4000 \text{kg}$, 每个钢球承重 $P' = \frac{P}{600} = 6.7 \text{kg}$, 根据公式^[4], $\sigma = 0.388 \sqrt{\frac{P'E^2}{r^2}}$ 有 $\sigma = 1.31 \times 10^4 \text{kg/cm}^2 < \sigma_{bc}$, 根据公式 $\sigma = 1.22 \sqrt{\frac{P^2}{E^2 r}}$ 可以得压变形 $\sigma = 2.68 \mu\text{m}$

通过计算可知轴承完全可以满足使用要求。

根据总体要求,方位轴系的晃动要小于 $1''$, 如图 5 所示。若 $\alpha = 1''$ 根据 1 半长 5 微米高所对应角度约为 $1''$ 则底座的变形量为 $\sigma = \frac{5}{1000} \times 1230 \mu\text{m} = 6.15 \mu\text{m}$ 因而底座的挠曲变形量小于 $5 \mu\text{m}$ 可以满足指标要求。

4 装配工艺

做为设计者,除了考虑上面诸多因素来满足要求以外,最重要一点是要考虑整机的装配次序及单元部套的装配问题。对轴系而言,轴承环要与中轴、转盘及底座组合加工,中轴轴承的装配过盈量要控制在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$, 滚柱在装配前要放在液氮中冷却。对转盘与底座之间的散装轴承,大轴承环滚道面的平面度要修研到 $2 \mu\text{m}$ 。对力矩机及测速机的装配要与轴系装配同时进行,因力矩机、测速机为永磁式的,因而在装配时要考虑导向装置。对力矩机,定子上电刷在装

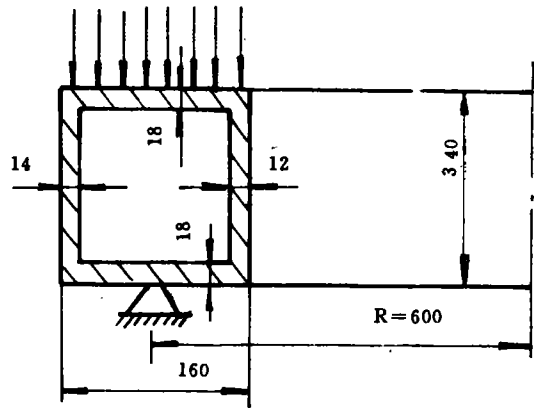


图 4 底座受力分析图

Fig. 4 Base frame force analysis diagram

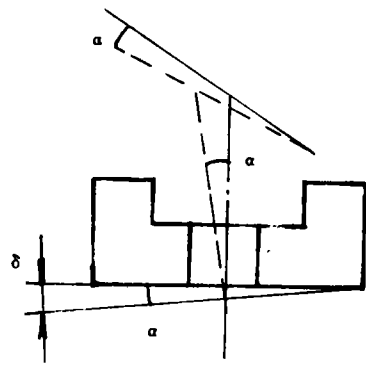


图 5 轴系精度分析图

Fig. 5 Axial system accuracy analysis diagram

配前要用胶带粘好,装配后取下;对测速机,转子、定子组装后,要取下短路环。轴系装好后,依次可装光学编码器及导电环等大件。

5 实测结果及分析

通过电学测得方位轴系谐振频率最低值为 32Hz ,这一频率可以满足电控带宽要求,同时也说明跟踪架中大件的结构刚度是较好的。

对方位轴系晃动进行实测及计算,转盘顺时针转动轴系晃动值为 $0.4275''$;转盘反时针转动轴系晃动值为 $0.5''$ 。取最大值,方位轴系晃动为 $0.5''$,这一轴系精度满足总体要求,也优于国内同类产品。

6 结 论

大型跟踪架方位轴系的研制成功为今后同类产品的研制探索出一条新路。关键大件焊接结构的采用也为今后设计提供了可借鉴经验。

(1)焊接结构是可行的,其结构和工艺安排是科学的、合理的,在国内同类产品中首次使用。

(2)方位轴系精度达到国内同类产品的最高水平。

(3)系统中所用力矩电机是目前国内最大的,力矩可达 300kgm 。

参 考 文 献

- [1]马佳光,捕获跟踪与瞄准系统的基本技术问题. 光学工程,成都:1989,3(1-42)
- [2]黄 钟,程 源编,机械强度与刚度计算. 呼和浩特:内蒙古人民出版社,1981
- [3]姜文汉,封闭圆环在对称垂直载荷下的变形. 光学工程,1981,3(20-26)
- [4]《机械设计手册》联合编写组编,机械设计手册,上册. 北京:化学工业出版社,1987

Development of Vertical Axial System for Large Tracking and Pointing Mount

Zhang Jingxu

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

Abstract

The development process of vertical axial system for large tracking and pointing mount are presented detailed in the paper. The design of axial system and large key parts is analyzed by determined or undetermined.

Key words: Tracking and pointing system, Axial system

张景旭 男,1964年9月生,1990年毕业于北京邮电大学电子精密机械专业(硕士)。助理研究员,从事经纬仪精密轴系的研制工作。