

桁架式反射镜筒的变形控制

包可人

(中国科学院南京天文仪器厂)

摘要: 介绍用于澳大利亚2.3m 新技术望远镜(ATT)的桁架式镜筒的变形控制。旨在使镜筒光轴指向任意位置时,主镜和副镜的轴向与侧向的相对位移都等于零。用精度足够的经典材料力学方法对镜筒处在光轴指向天顶和水平两个位置时,列出了镜筒各组成部分——中间块、主桁架、副桁架、副镜圈和内桁架的变形计算公式。最后确定了主桁架的优化结构。

一、序 言

反射望远镜镜筒必须满足苛刻的光学准直和稳定的支承这两个基本要求。为了使大型反射望远镜镜筒在不同天顶距位置时,主、副镜失准直效应减至最小,最好的补偿结构是不发生转角的Serrurier桁架。文^[1]曾对一台60cm 试验天文反射望远镜镜筒的主、副桁架的变形作过分析计算。本文介绍刚投入使用的澳大利亚2.3m 新技术望远镜(ATT)镜筒的变形控制。它具备新的、典型的大型反射镜筒的基本结构(图1)。中间块通过纬轴与镜身相连接,并通过主桁架连接主镜室,通过副桁架连接副镜圈。副镜圈经内桁架与副镜筒体连接。副镜筒体则包括副镜室与副镜调焦机构。主、副桁架承载端杆件交点分别落在主、副镜端的重心。主桁架与中间块连接处的跨距较小以减小夹角。主、副桁架杆件中心线交接于中间块的上端面。认为主镜室、副镜圈和副镜筒体与桁架相比是刚体,镜室重量作用在桁架的端点。用经典材料力学方法不难证明桁架杆端的连接方式是铰接还是刚性连接,两者的反力相同。故杆中受力可以用简单的静力学方法求出。对桁架自重的考虑按材料力学中常用的近似方法处理,即把杆件上自重的均布载荷化为杆两端的集中力。则桁架自重有一半作用在负载端的端面,等于增加了载荷,另一半作用在连接处,对挠度无明显影响。既考虑主、副桁架,也考虑中间块、副镜圈和内桁架的变形,对光轴指向天顶时的轴向和指向水平时的侧向变形都列出了相应的计算公式。由此,对桁架式反射镜筒变形控制的实用方法,给出完整的概念。

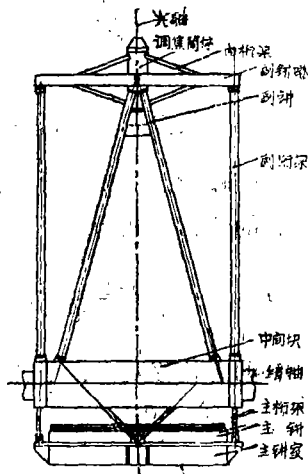


图1 ATT 反射镜筒

二、光轴指天顶位置时的轴向位移

(1) 副镜圈内桁架的轴向位移 δ_{a1}

8 根杆件组成的桁架连接于副镜圈，承受载荷 P_1 ——副镜筒体重量加上内桁架自重之半（图 2）。

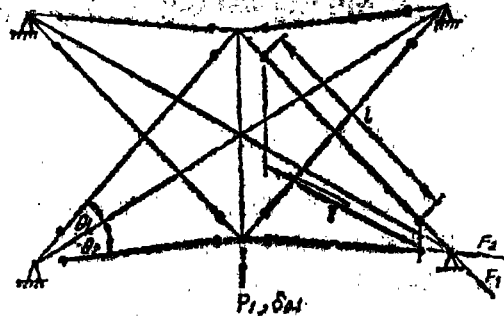


图 2 内桁架轴向变形

$$\text{杆中受力 } F_1 = \frac{P_{11}}{4} \frac{1}{\sin\theta_1}, \text{ (上杆)} \quad F_2 = \frac{P_{12}}{4} \frac{1}{\sin\theta_2} \text{ (下杆)}$$

$$\text{杆长 } l_1 = \frac{r}{\cos\theta_1}, \quad l_2 = \frac{r}{\cos\theta_2}$$

$$\begin{aligned} \text{变形 } \delta_1 &= \frac{F_1 l_1}{EA \sin\theta_1} & \delta_2 &= \frac{F_2 l_2}{EA \sin\theta_2} \\ &= \frac{P_{11} r}{4EA \sin^2\theta_1 \cos\theta_1}, & &= \frac{P_{12} r}{4EA \sin^2\theta_2 \cos\theta_2} \end{aligned}$$

其中 E 为弹性模数， A 为杆件的横截面积。

而上、下杆的载荷分配为

$$P_{11} = \frac{P_1 \operatorname{tg}\theta_1}{\operatorname{tg}\theta_1 + \operatorname{tg}\theta_2}, \quad P_{12} = \frac{P_1 \operatorname{tg}\theta_2}{\operatorname{tg}\theta_1 + \operatorname{tg}\theta_2}$$

认为内桁架的总位移是上、下杆变形的平均值

$$\begin{aligned} \delta_{01} &= (\delta_1 + \delta_2) / 2 \\ &= \frac{r}{8EA} \left[\frac{P_{11}}{\sin^2\theta_1 \cos\theta_1} + \frac{P_{12}}{\sin^2\theta_2 \cos\theta_2} \right] \\ &= \frac{r}{8EA (\operatorname{tg}\theta_1 + \operatorname{tg}\theta_2)} \left[\frac{P_1 \operatorname{tg}\theta_1}{\sin^2\theta_1 \cos\theta_1} + \frac{P_1 \operatorname{tg}\theta_2}{\sin^2\theta_2 \cos\theta_2} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

如 $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ ，则

$$\delta_{01} = \frac{P_1 r}{8EA \sin^2\theta \cos\theta} \quad (2)$$

(2) 副桁架的轴向位移 δ_{02}

8 根杆件组成的副桁架与中间块连接，承受载荷 P_2 ——副桁架以上重量加上副桁架自重之半（图 3）。

杆中受力 $F = \frac{P_2}{8\cos\theta}$

杆长 $l = \frac{h}{\cos\theta}$

变形 $\delta_{a2} = \frac{Fl}{EA\cos\theta}$
 $= \frac{P_2 h}{8EA} \frac{1}{\cos^3\theta}$ (3)

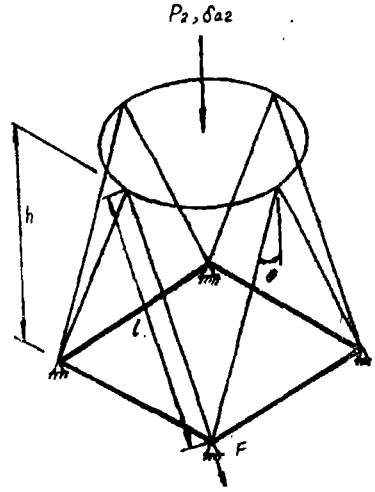


图3 副桁架轴向变形

(3) 中间块的轴向位移 δ'_{a2} 和 δ_{a3}

自重为 P_3 的中间块由纬轴作双支点支承, 需考虑它与桁架连接处的局部变形。在上端面四角 A 、 B 、 C 、 D 处承受载荷 P_2' ——中间块以上重量, 产生变形 δ'_{a2} 使副镜下沉。在下端面与主桁架连接处 E 、 F 、 G 、 H 处承受载荷 P_4 ——主镜室重量加上主桁架自重之半, 产生变形 δ_{a3} 使主镜下沉 (图4)。

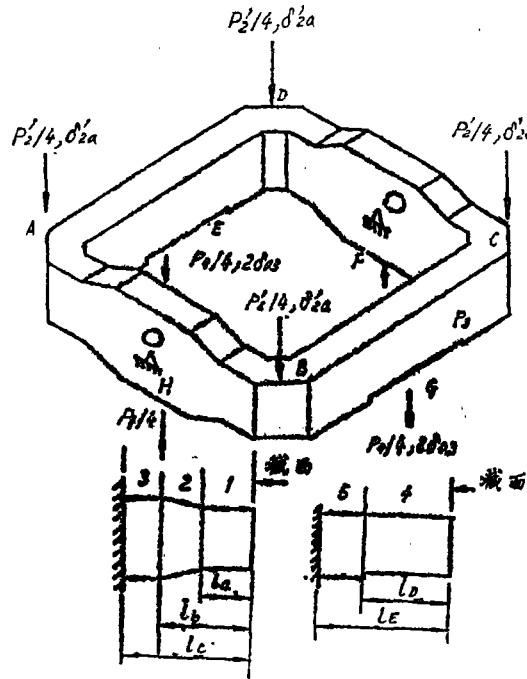


图4 中间块轴向局部变形

角 D 点相对于纬轴支承点 O 的变形按悬臂梁简化计算为

$$\delta'_{2a} = \frac{1}{E} \left(\frac{P_4}{24} + \frac{P_2'}{12} + \frac{P_3}{24} + \frac{P_3}{64} \right) \left(\frac{l_a^3}{I_1} + \frac{l_b^3 - l_a^3}{I_2} + \frac{l_c^3 - l_b^3}{I_3} \right) \quad (4)$$

式中 I 为各截面惯矩。

认为中间块发生鞍形翘曲, A 点的位移 δ_{a3} 是 A 点相对于 D 点的变形和 D 点相对于 O 点的变形的平均值

$$\delta_{a3} = \frac{1}{2} \left[\delta'_{a2} + \frac{1}{E} \left(\frac{P_4}{24} + \frac{P_3}{64} \right) \left(\frac{l_D^3}{I_4} + \frac{l_E^3 - l_D^3}{I_5} \right) \right] \quad (5)$$

(4) 包括中间块在内的中间块以上部件的轴向总变形 δ_a

$$\delta_a = \delta_{a1} + \delta_{a2} + \delta'_{a2} - \delta_{a3} \quad (6)$$

三、光轴指水平位置时的侧向位移

(1) 副镜圈内桁架的侧向位移 δ_{L1}

如图 5

杆中受力 $F_1 = \frac{P_{11}}{4\cos\theta_1}$ (左杆) $F_2 = \frac{P_{12}}{4\cos\theta_2}$ (右杆)

杆长 $l_1 = \frac{r}{\cos\theta_1}$, $l_2 = \frac{r}{\cos\theta_2}$

则变形为 $\delta_1 = \frac{F_1 l_1}{E A \cos\theta_1}$, $\delta_2 = \frac{F_2 l_2}{E A \cos\theta_2}$

$$= \frac{P_{11} r}{4 E A \cos^3\theta_1} \quad = \frac{P_{12} r}{4 E A \cos^3\theta_2}$$

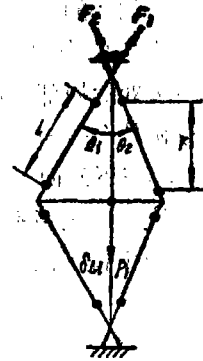


图 5 内桁架侧向变形

左、右杆中的载荷分配为

$$P_{11} = \frac{P_1 \text{ctg}\theta_1}{\text{ctg}\theta_1 + \text{ctg}\theta_2}, \quad P_{12} = \frac{P_1 \text{ctg}\theta_2}{\text{ctg}\theta_1 + \text{ctg}\theta_2}$$

认为内桁架的总位移是左、右杆变形的平均值

$$\begin{aligned} \delta_{L1} &= (\delta_1 + \delta_2) / 2 \\ &= \frac{r}{8EA} \left[\frac{P_{11}}{\cos^3\theta_1} + \frac{P_{12}}{\cos^3\theta_2} \right] \\ &= \frac{r}{8EA(\text{ctg}\theta_1 + \text{ctg}\theta_2)} \left[\frac{P_1 \text{ctg}\theta_1}{\cos^3\theta_1} + \frac{P_1 \text{ctg}\theta_2}{\cos^3\theta_2} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

如 $\theta_1 = \theta_2 = \theta$, 则

$$\delta_{L1} = \frac{P_1 r}{8EA \cos^3\theta} \quad (8)$$

(2) 副镜圈的侧向位移 δ'_{L1}

副镜圈连接于副桁架(图6),在A点的两杆1—1与C点的两杆3—3在纵向的刚度好,而在横向的刚度很差(参阅图7)。相反,B点的两杆2—2与D点的两杆4—4在纵向的刚度很差,而在横向的刚度好。承受自重均布载荷 P_1' 和集中载荷 P_1 ,其变形可用材料力学方法推导出(从略):

$$\delta_{L1}' = (0.00947P_1 + 0.00733P_1') \frac{R^3}{EI} \quad (9)$$

$$I = \frac{1}{12} (a^3 b_1 - a^3 b_2)$$

(3) 副桁架侧向位移 δ_{L2}

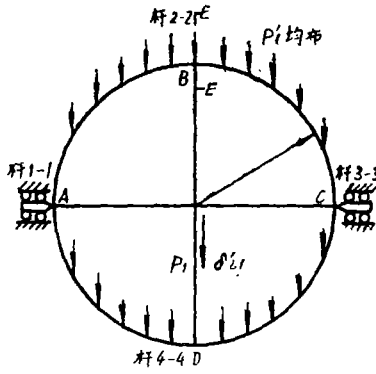


图6 副镜圈侧向变形

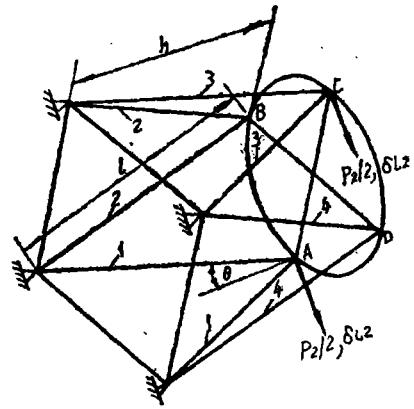


图7 副桁架侧向变形

如图7，可只考虑杆1—1和3—3的变形情况。

杆中受力 $F = \frac{P_2}{4\sin\theta}$

杆长 $l = \frac{h}{\cos\theta}$

杆变形 $\delta_{L2} = \frac{Fl}{EA\sin\theta}$
 $= \frac{P_2 h}{4EA\sin^2\theta\cos\theta}$ (10)

因杆的截面积 $A = \frac{\pi}{4}(d_1^2 - d_2^2)$

则 $\delta_{L2} = \frac{\pi P_2 h}{16(d_1^2 - d_2^2)} \frac{1}{\sin^2\theta\cos\theta}$ (11)

其中 d_1 为杆外径， d_2 为杆内径。

(4) 中间块的侧向位移 δ_{L3}

因为主桁架受力杆1—1与3—3与中间块连接处的跨距很小，可以忽略这一侧的力矩作用(图8)。把中间块看作悬臂梁，外力作用在端点，则端点的挠度为

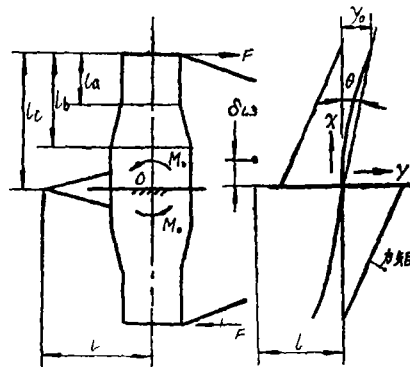


图8 中间块侧向变形

$$y_0 = \frac{1}{3} \frac{F}{E} \left(\frac{l_0^3}{I_1} + \frac{l_0^3 - l_0^3}{I_2} + \frac{l_0^3 - l_0^3}{I_3} \right) \quad (12)$$

其中 $F \times 2l_0$ 为中间块右方质量对于 O 点的总力矩。
而位移为

$$\begin{aligned} \delta_{L3} &= l\theta \\ &= \frac{l y_0}{l_0} \end{aligned} \quad (13)$$

它使主镜上移或使副镜相对下沉。

(5) 包括自身在内的中间块以上部件总的侧向位移 δ_L

$$\delta_L = \delta_{L1} + \delta'_{L1} + \delta_{L3} + \delta_{L3} \quad (14)$$

四、主桁架结构的确定

(1) 把主、副镜之间的相对轴向位移和侧向位移都消除

如图 9

主镜的轴向位移为

$$\delta_{a4} = \frac{1}{8} \frac{P_4 h}{EA} \frac{1}{\cos^3 \theta} \quad (15)$$

主镜的侧向位移为

$$\delta_{L4} = \frac{1}{4} \frac{P_4 h}{EA} \frac{1}{\sin^2 \theta \cos \theta} \quad (16)$$

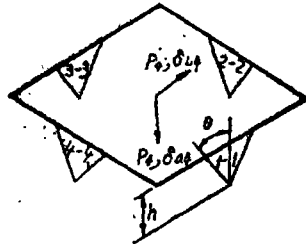


图 9 主桁架变形

式中 P_4 为主镜室重量加上主桁架重量之半与第二节 (4) 采用符号一致。由式 (15)、(16) 得到

$$\frac{\delta_{a4}}{\delta_{L4}} = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^2 \theta$$

如把副镜端的总轴向变形 δ_a 代替 δ_{a4} 值，把总侧向变形 δ_L 代替 δ_{L4} ，解出 θ 值：

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1} \left[\left(\frac{2\delta_a}{\delta_L} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (17)$$

该 θ 值满足使主、副镜相对位置保持不变的条件。

(2) 以消除主、副镜之间的相对侧向位移为主

把式 (16) 重新组合，解出 A 并把式 (14) 的 δ_L 值代替 δ_{L4} 可得

$$A = \frac{1}{4} \frac{P_4 l}{E \delta_L} \frac{1}{\sin^2 \theta \cos \theta} \quad (18)$$

则，如把 P_4 、 l 、 E 、 δ_L 值代入式 (18)，变化 θ 可得到相应的 A 值，例如可画出 $A = f(\theta)$ 曲线如图 10。根据合适的

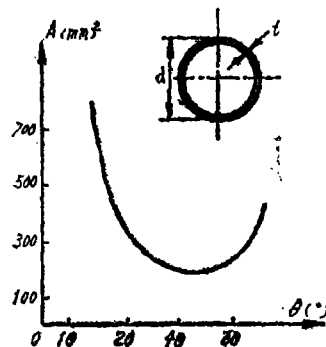


图 10 $A = f(\theta)$ 曲线

θ 值可确定 A 值。选取 d 值后可确定 t 值。

感谢 MSSSO 总工程师 JOHN HART 的指导与支持。

参 考 文 献

- [1] 龚祖同主编, 60cm 试验天文反射望远镜专集, 科学出版社, 1980, P56

Deflection Control for Reflector Tube of Tubular Struts

Bao Keren

Abstract

The deflection control of the tube used for the New 2.3m Australian Technologies Telescope is introduced. It is the purpose to keep the relative correct position between primary and secondary mirrors when the optical axis is pointed to any object. All the deflection calculations for the component parts of tube-center ring, primary truss, secondary truss, top-end ring, and struts are given by the classical mechanics of materials when the optical axis points to the two positions of zenith and horizon. Then the optimum configuration of the primary truss is given to simultaneously annul both the axial and lateral deflection of the primary mirror with respect to the secondary mirror.