

地平式天文望远镜的有关问题

程景全 徐欣圻

(中国科学院南京天文仪器厂)

提 要

本文对传统的赤道式望远镜的各部件成本以及其尺寸极限作了简单的讨论,着重介绍了地平式望远镜的力学优越性,同时对地平式望远镜中的有关问题,如速度控制,盲区大小的决定,计算机控制系统的实现以及星像消转装置作了比较全面的讨论。最后作者对影响地平式望远镜的实际成本的一些因素也进行了讨论。

一、引 言

天文学是以观测作为其唯一实验手段的学科。所有天体的信息均是天文学家通过天文望远镜的观察来获得的。天文学的不断发展要求天文学家对更为遥远、更为暗淡的天体进行观察与分析,为了达到这一目的,就要求不断增大天文望远镜的口径。在考虑这一问题时,尽管在权衡对单位面积所花成本与其增加的观察效果时,确实存在某一口径范围为最佳口径尺寸,但是对于天文学发展的终结目标来说,天文望远镜的口径总是愈大愈好。在传统上,光学天文望远镜有如下几个特点:

- (1) 赤道式的传动系统;
- (2) 相对保守的主镜厚度,厚度与镜面直径之比约为1:6—8;
- (3) 较小的主焦距, $f/3—f/5$;
- (4) 高大的天文圆顶式的建筑; 以及
- (5) 相对简单的控制驱动系统。

目前,为了实现更大的望远镜口径,望远镜设计中的所有这些方面均遭遇到强烈的挑战,要求望远镜的主焦距大于 $f/2$; 同时,薄镜面技术以及与之相关的特殊镜面设计以及拼合主镜的技术已经得到了很大的应用; 高大的封闭式的圆顶也为开敞式的无热源建筑结构所代替。在本文中,作者仅仅就其余几个问题进行一些讨论,对地平式望远镜设计中的有关问题进行一次较全面的讨论,以此作为对我国发展新的天文望远镜的参考意见。

二、赤道式光学望远镜的尺寸极限

传统望远镜的成本与其口径的关系, Meinel^{[1], [2]} 已经进行了详细的讨论。如果包括圆

1985年7月26日收到。

1986年7月14日收到修改稿。

顶室以及台址的建设, 可以表示为:

$$S = 0.42 D^{2.63} \quad (1)$$

式中 S 和 D 的单位分别为百万美元和米。

在表达式(1)中, Meinel 包括了非传统的多镜面望远镜, 同时在实际拟合中也有误差。Humphries^[3]排除了这两点因素, 得到:

$$S = 0.37 D^{2.58} \quad (2)$$

式(2)反映了传统式望远镜总成本增加的规律。为了反映望远镜中各个部件成本增加的情况, 成本图中的各个点亦可以用特定的多项式函数来拟合。一般说来, 任一较大的望远镜工程均可以分解为以下各项主要部件项目(见表1)。如果认真分析各部件成本与口径的关系, 可以看出各部件成本的增加是其口径的不同的指数函数。如望远镜的服务设施及工程管理几乎与望远镜的口径没有关系, 它们的费用或许可以表示为口径的零次方的函数, 而望远镜的控制系系统似乎可以表示为口径的一次方的函数; 光学加工和望远镜的安装调试则与口径的二次方成正比; 望远镜的圆顶室、镜筒以及镜面材料的费用一般被认为是三次方的函数, 余下的就是望远镜的支承及传动系统。如何认识望远镜中这些重要部件的成本与口径尺寸的关系呢? 为此我们必须对赤道式望远镜支承部份的受力情况进行分析。在望远镜中, 最主要的设计考虑是镜筒的支承叉臂的角变形量, 图1表示了望远镜叉臂在 0^h 及 6^h 位置时的受力和变形情况。为了减少赤道轴轴向的间隙, 叉臂上一般施加一定的预应力。在 0^h 位置时, 叉臂的变形相对于子午平面对称的, 而指向 6^h 位置时, 原平行于子午平面的弯矩为垂直于叉臂对称面的弯矩所代替, 这时叉臂的变形已不再是对称的了。这种不对称的变形状态的主要影响是使望远镜中两轴承不再正交, 引起望远镜的指向误差和跟踪误差。根据力学分析, 叉臂的角变形量的大小是叉臂长度的四次方的函数。为了保证一定的叉臂角变形量, 叉臂的重量必须随口径的四次方而增加。传动系统的成本与支承系统的重量密切相关, 因此, 支承及传动的成本可以看作口径四次方的函数。应用四次多项式去拟合传统式望远镜成本图中的各点, 可得下列表达式(3):

$$S = 0.015D^4 + 0.109D^3 + 0.145D^2 + 0.032D + 0.119 \quad (3)$$

在(3)式中, 各项的系数均为正值, 因此表达式是有效的。但是式中各项的意义不能作绝对的解释。式(3)表示, 当望远镜口径增加时, 成本中三次方和四次方项的比例将急剧增加。反映在望远镜的结构中, 大型望远镜不得不采用十分庞大的叉臂或者巨大的马蹄形轴承, 并且为赤道式望远镜的口径大小给定了尺寸界限。这一尺寸极限对非对称的结构来说大约为2.5米左右, 对于对称式的结构而言也很难建造口径大于5米的仪器。为了降低望远镜的造价, 设计制造口径更大的望远镜, 就必须大力降低望远镜成本多项式中高次方项, 尤其是四次方项的比重。这就必须改变赤道式的支承形式, 采用地平式的支承装置。

地平式望远镜可以看作极轴为竖直方向的赤道式装置。由于望远镜叉臂只承受竖直方向的重力, 所以望远镜支承中的变形主要为压缩和剪切, 同时这种类型的剪切仅仅产生镜筒光学轴线的平行移动, 对望远镜的指向精度不产生任何影响。而且由于任何构件其拉伸压缩刚度远大于其抗弯刚度, 因此应用地平式结构可以改变望远镜成本表达式中的四次方项。对于地平式望远镜, 其支承及传动部件的成本的增加将不大于口径的二次函数。另外在地平式望远

镜中, 由于受力状况的改善, 镜筒回转空间的减小, 在成本表达式中, 三次方项的权重也将降低, 因此大大改变了 Meinel 成本表达式中的指数值。以澳大利亚 2.4 米望远镜, 4.4 米多镜面望远镜及加州 10 米拼镜面望远镜等三台地平式仪器为例, 其成本表达式可以近似表示为:

$$S = 0.40D^{2.0} \quad (4)$$

当然, 表达式(4)中还包括了焦比及镜面厚度比等方面因素的改进。

三、地平式望远镜的坐标转换及天顶盲区

由于地平式望远镜中各运动轴系与地球旋转轴系成一定的角度, 因此天体的赤道坐标必须转化为地平坐标。应用公式可表示如下:

$$\tan A = \frac{\sin t}{-\sin \phi \cos t + \cos \phi \tan \delta}$$

$$\cos z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos t \quad (5)$$

在表达式(5)中, A 和 z 分别为方位角及天顶距, ϕ 为地理纬度, δ 和 t 分别为赤纬和时角。正由于方位角和天顶距的这种关系, 所以在望远镜跟踪天体时, 方位轴及高度轴均同时作匀速运动。由(5)式导出速度及加速度转换表达式, 可以实施对方位、天顶距及星位的精确控制。但是由于望远镜的转动速度与加速度的限制, 地平式望远镜在天顶附近的小区域内无法对天体进行跟踪观测, 这一小区域就是望远镜的盲区。

望远镜的盲区是由多种因素决定的, 但主要是等方位速度曲线, 等方位加速度曲线及最高快动速度曲线图的包络线所围成的天区。等方位速度曲线图由下式给出^[5]:

$$\tan z = \frac{\cos \phi}{\frac{\dot{A}}{\omega} + \sin \phi} \cdot \cos A \quad (6)$$

曲线如图2所示, 式中 ω 为恒星周日视运动角速度。从图2中可以看出曲线族东西对称; 但南北方向并不完全对称。当 A 和 \dot{A} 一定时, 地理纬度不同, 天顶距也不相同。如 $\phi = 0$ 时, $z = \tan^{-1} \left(\frac{\cos A \cdot \omega}{\dot{A}} \right)$, 而在地球南北极时, $z = 0$ 。等方位加速度曲线图由公式

$$\sin(2A) \cos^2 \phi \cos^2 z - \frac{1}{2} \sin A \sin(2\phi) \cot z + \frac{1}{2} \sin(2A) \cos^2 \phi + \frac{\ddot{A}}{\omega^2} = 0 \quad (7)$$

给出, 如图3所示。曲线为四叶玫瑰线族。图2和图3的叠加, 就可以大致确定盲区的大小。但是实际盲区还要考虑最高快动速度的盲区范围。快动盲区是这样确定的: 当望远镜跟踪天体穿越盲区时, 望远镜首先从最大快动加速度加速至最高快动速度, 然后穿越盲区, 尔后在子午面的另一侧迅速减速并与天体重新会合。假设在脱离跟踪时间内, 天体的时角度化为 H , 由运动速度曲线(见图4)有公式:

$$\frac{H}{\omega} = \frac{A}{\dot{A}_{\max}} + 2 \frac{\dot{A}_{\max} - \dot{A}}{\ddot{A}_{\max}} - \frac{\dot{A}_{\max}^2 - \dot{A}^2}{\ddot{A}_{\max} \dot{A}_{\max}} \quad (8)$$

由上式, 忽略最后两项(该两项影响很小)并根据有关天文三角形有:

$$\cot z = \cos A \tan \phi + \sin A \sec A \sec \phi \cot \left(\frac{A\omega}{\dot{A}_{\max}} \right) \quad (9)$$

由(9)式, 可画出最高快动速度曲线图(图5)。

上述三组曲线叠加起来, 就可以决定望远镜的天顶盲区, 同时也可以从上述各曲线族的关系中合理决定望远镜的最大快动速度、最大跟踪速度及最大加速度的值, 为望远镜的设计提供依据。图6是望远镜的盲区图, 图中的包络线含最大跟踪速度盲区、最大加速度盲区及最大快动速度盲区。该望远镜的地理纬度为 $28^{\circ}.75$, 并有:

$$\dot{A}_T = \dot{A}_{\max} = 1^{\circ}/s, \ddot{A}_T = \pm 0^{\circ}.03/s^2$$

及 $\ddot{A}_{\max} = \pm 0^{\circ}.3/s^2$ (这里下标 T 表示跟踪时), 实际的盲区直径得为 $0^{\circ}.32$ 。在上述分析中, 我们没有考虑因高度及星位方向的限制所形成的盲区, 事实上这些盲区比方位盲区小得多, 所以显得不十分重要。

四、赤道式与地平式控制系统的讨论

在赤道式望远镜中, 极轴平行于地球自转轴的轴线, 因此天体的周日运动可以用该轴的匀速转动来补偿。对于没有计算机控制的望远镜来说, 这种结构有极大的优越性。但是在传动链中, 末级齿轮或蜗轮的精度会直接影响望远镜的指向跟踪误差, 当然齿轮或蜗轮可以加工得非常精密, 但是没有电子控制系统的赤道式望远镜只能达到分级的指向精度以及略高于 $1''/2\text{min}$ 的跟踪精度(某些精心设计的赤道式望远镜的跟踪精度可以延长到半小时)。这样精度的望远镜已经远远不能适应当代天文精密观测的要求, 为此必须对赤道式望远镜实行闭环控制。最简单的闭环控制系统是应用光电导星, 应用光电导星可以极大地提高望远镜的跟踪精度, 但是无法对望远镜的定位误差进行校正。同时, 在望远镜的结构中, 由于轴系结构以及变形的原因, 存在大量的重复性误差, 而且大气折射也对望远镜的指向产生规律性的影响。为了消除这些误差, 极大地提高望远镜的指向精度, 进而充分发挥昂贵的天文望远镜的效率, 必须对赤道式望远镜进行改造, 实施计算机闭环控制。目前世界上重要的赤道式望远镜均已完成了这一改造, 从而使望远镜的指向精度提高到角秒级。图7是夏威夷大学天文研究所2.2米赤道式望远镜的控制系统框图。其计算机系统容量较大, 可以精确地对重复性误差进行校正。其增量编码器精度为 $0''.06$, 其绝对编码器精度为 $6''$ 左右。

应用地平式装置, 计算机控制系统是必不可少的, 这是因为单纯应用硬件难以实现对地平式坐标、速度的控制。图8是美国4.4米多镜面望远镜的控制系统框图^[7]。该控制系统采用NOVA800小型计算机, 字长16位, 内存32k。计算机系统主要进行坐标转换、控制显示及监督等功能。应该指出, 在该系统中仍有不少环节, 如位置、速度补偿仍用硬件执行, 而很多现代化系统已经采用软件来代替这些执行部件的功能。图9是多镜面望远镜控制系统的传递函数图。 θ 、 ω 、 T 分别表示位置、速度和转矩, 下标 C 、 D 、 E 、 T 、 M 分别表示给定命令、干扰、误差、望远镜和电机, K_A 是加速度常数, Z 和 z 分别是位置和速度反馈零频率, P 和 p 分别为位置和速度反馈极频率, N 是齿轮减速比, J 为转动惯量, G_V 是速度增益, B 为阻尼系

数, k 为驱动链弹性系数。当然在计算机控制系统中, 一般还应该包括守时、误差修正参数的计算, 自动导星系统信号转换, 环境参数的测定和校正, 甚至于部份星表的贮存等等, 因此使用较大容量的计算机是有利的。地平式望远镜的控制系统可以同时实现对星位角转动的控制, 也可以操纵圆顶和窗帘的运动。应用地平式控制系统的另一个显著优点是可以实现对其他天体如行星、彗星及卫星等的跟踪观测。在地平式望远镜中, 由于使用了绝对和增量编码器, 因而对传动齿轮的精度要求较低。根据多镜面望远镜及其他地平式望远镜的经验, 其指向精度与使用同级编码器的赤道式望远镜相似或略高, 一般均在几角秒左右。

五、地平式望远镜的像场消转装置

地平式望远镜的另一个优点是: 它提供了两个相对于望远镜支架固定不动的耐施密斯(Nasmyth)焦点。耐施密斯焦点具有焦距适中、有一定的视场角、星像质量好等优点。同时该位置可以支承重量较大的仪器, 有极好的位置稳定性。这些, 对于精密测光、光谱以及其他天文观测工作都具有重要的意义。但是正如在地平式机构中, 卡塞格林(Cassegrain)焦点必须配备星位角补偿装置一样, 在耐施密斯焦点也必须考虑像场消转装置, 以获得一静止、稳定的星像。应用几何光学的理论, 这一问题不难解决。

最简单的方法是采用一个道威棱镜(如图10), 设 \bar{A} 表示入射向量, \bar{A}' 表示出射向量, S 和 S^{-1} 为坐标转换矩阵, R^* 为棱镜的作用矩阵。由公式^[9]

$$\bar{A}' = S^{-1} R^* S \bar{A} \quad (10)$$

当 \bar{A} 的转角为 θ 时, 只要棱镜相应转动 $\frac{\theta}{2}$, 则由:

$$S^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \frac{\theta}{2} & -\sin \frac{\theta}{2} \\ 0 & \sin \frac{\theta}{2} & \cos \frac{\theta}{2} \end{pmatrix} \quad S = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \frac{\theta}{2} & \sin \frac{\theta}{2} \\ 0 & -\sin \frac{\theta}{2} & \cos \frac{\theta}{2} \end{pmatrix}$$

$$R^* = R^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad \bar{A} = \begin{bmatrix} 0 \\ \sin \theta \\ -\cos \theta \end{bmatrix}$$

有

$$\bar{A}' = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$$

即出射星像不发生任何旋转, 保持稳定不变。因此只要对道威棱镜的旋转角度实施控制使其值为星位角之半, 则出射星像就会维持稳定不动。然而棱镜系统仅仅可应用于一定波段。对于实际的地平式望远镜, 可以用如图11的反射镜组来代替道威棱镜, 在反射镜系统中, 作用矩阵 R^* 与 R^1 相等, 因此实际效果是一致的。

六、实际地平式望远镜的成本估计

从图12和图13可以看出,传统式的望远镜(图12为2.16米的结构)与新的地平式望远镜(图13为 $f/2.5$,口径3.5米望远镜)在结构上的差别。与传统式望远镜相比,地平式的结构简单、轻巧。一般来说,二米级的地平式望远镜的成本仅为同口径传统望远镜成本的 $2/3$ 。如果一架二米赤道式望远镜的成本为600万元,则二米地平式望远镜的成本将不高于400万元。然而在实际考虑望远镜成本的时候,我们必须考虑一些影响成本的重要因素,这些因素包括:望远镜焦点的数目,望远镜主焦比的大小,望远镜圆顶室的尺寸和结构以及望远镜的实际精度和自动化程度。焦点的数目影响望远镜的使用效率及观察范围,一般讲,单焦点望远镜比多焦点望远镜的成本可节约15%—20%左右,这一点对于小型望远镜的设计影响较大。当然,对于不更换副镜的多焦点系统,成本增加的幅度要小一些。焦比的选择也是影响成本的因素,小的主焦比会大大缩短望远镜筒的长度,从而降低望远镜的造价。同时,镜筒的长度直接影响圆顶室的尺寸,对整个工程的造价关系极大。另外望远镜实际精度和自动化程度对望远镜成本也有很大的关系。指向精度为角分级的天文望远镜显然成本低于角秒级精度的现代望远镜。高度自动化的望远镜将较普通的望远镜成本要高。然而在望远镜结构中,仍有很多可以改进的领域,如薄镜面技术,镜筒副镜结构的改造,应用滚动轴承作为主要轴承的可能性。因此,即使对于口径较小的望远镜设计,如1米口径的仪器,其生产成本仍然可以低于同口径赤道式望远镜的成本。种种迹象表明,地平式结构的优越性已经正在为我国的天文界、工程界所认识,研究、设计和生产新的地平式望远镜的条件已经具备。可以预见,我国新的有特色的望远镜将会出现于不久的将来。

表 1 光学望远镜主要成本项目

-
- | | |
|-----|--------------------|
| 1 | 望远镜本体 |
| (1) | 光学部份 |
| | 镜坯 |
| | 光学加工 |
| (2) | 机械部份 |
| | 镜筒(包括镜室) |
| | 支承系统 |
| (3) | 传动部份 |
| (4) | 控制部份 |
| | 计算机 |
| | 控制系统 |
| (5) | 安装与运输 |
| | 车间装配 |
| | 运输及现场装配 |
| 2 | 圆顶及建筑物 |
| (1) | 圆顶, 控制室 |
| (2) | 镀膜机, 吊车 |
| 3 | 仪器 |
| 4 | 台址建设(包括水、电、电讯、交通等) |
| 5 | 工程管理 |
-

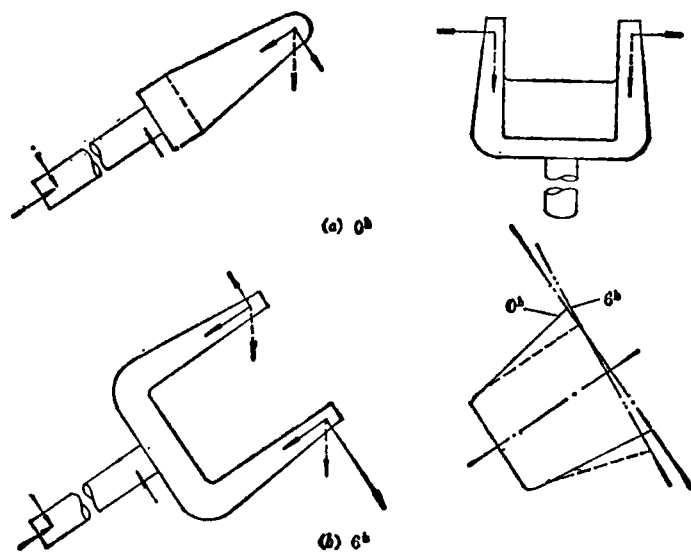


图 1. 赤道式望远镜支承叉臂的受力情况。

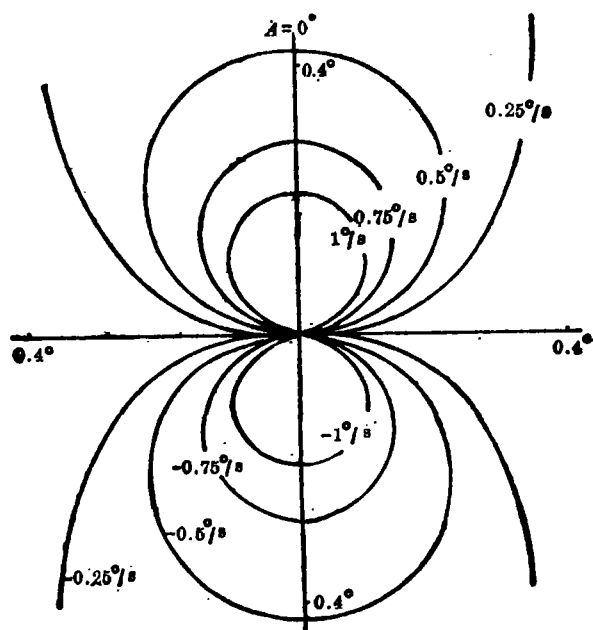


图 2. 某望远镜的等方位速度曲线图(纬度 $28^{\circ}.75$)。

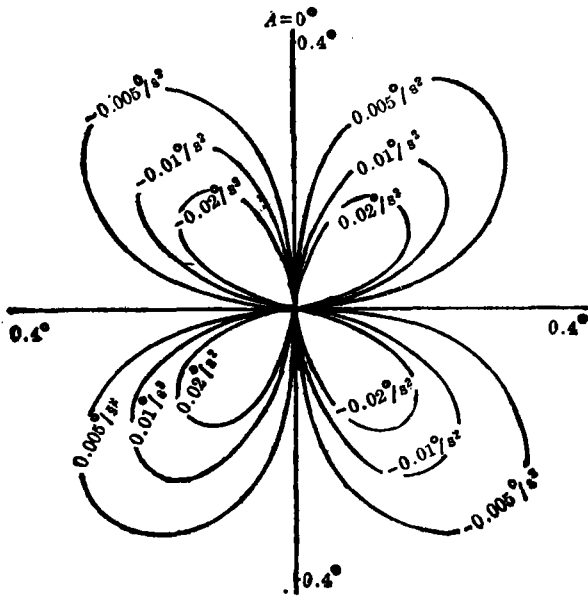


图 3. 某望远镜的等方位加速度曲线图(纬度 $28^{\circ}.75$)。

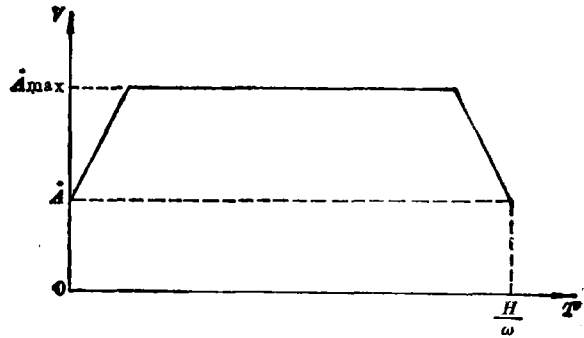


图 4. 望远镜穿越盲区时的速度变化曲线。

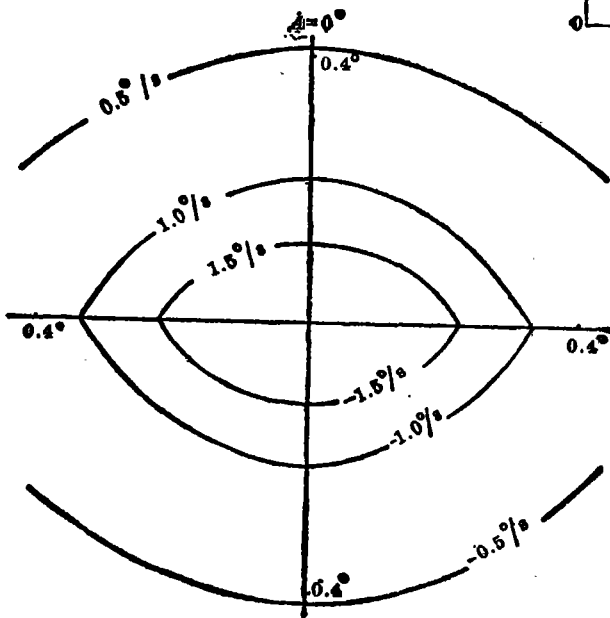


图 5. 某望远镜的最高快动速度曲线图(纬度 $28^{\circ}.75$)。

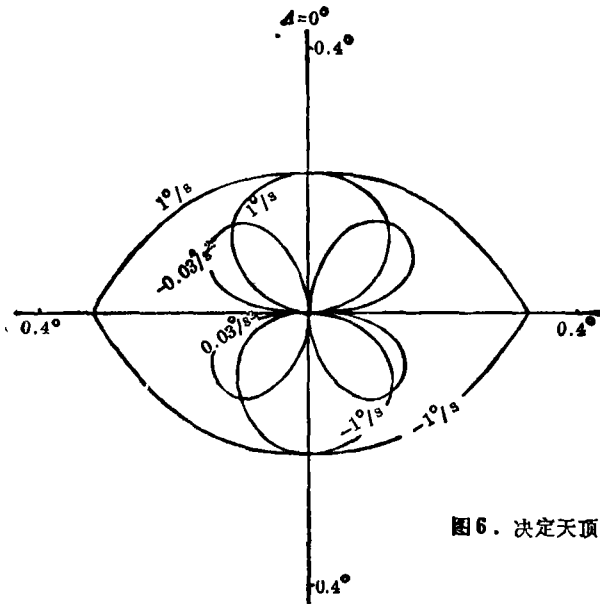


图 6. 决定天顶盲区的曲线族包络线(纬度 28°.75)。

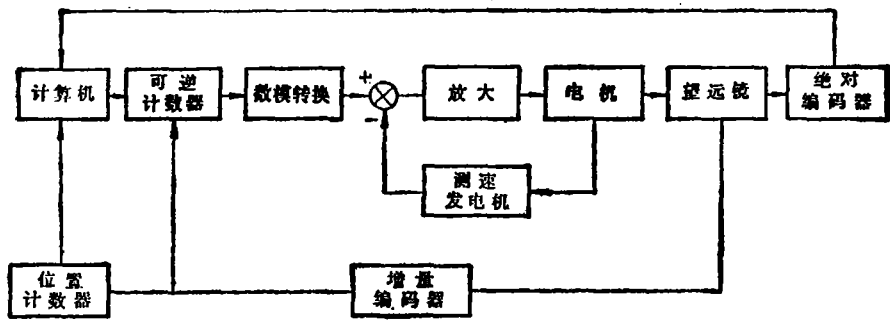


图 7. 某赤道式望远镜计算机控制系统图。

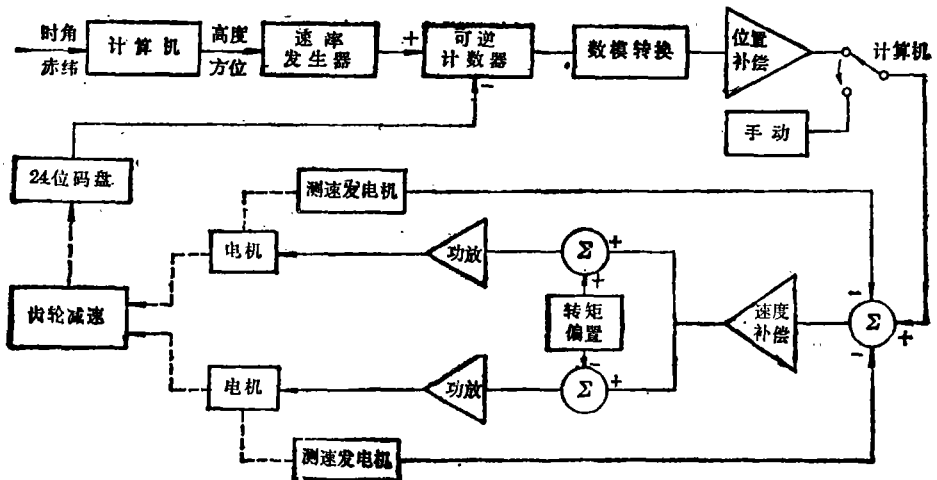


图 8. 多镜面望远镜计算机控制系统图。

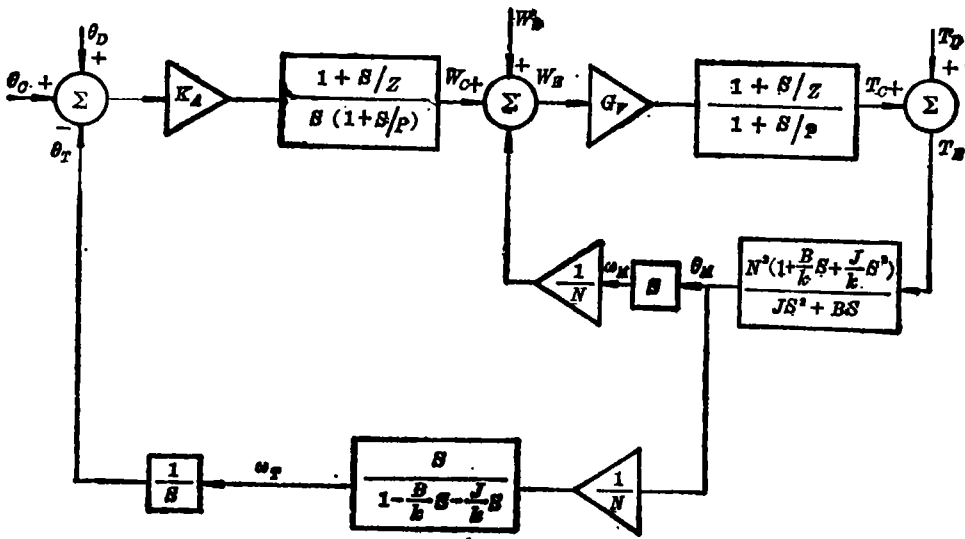


图 9. 多镜面望远镜控制系统传递函数图。



图 10. 道威棱镜系统的星像消转装置。

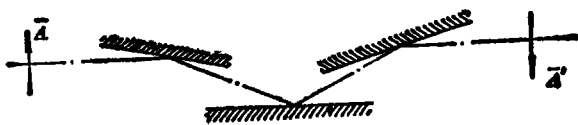


图 11. 反射镜系统的星像消转装置。

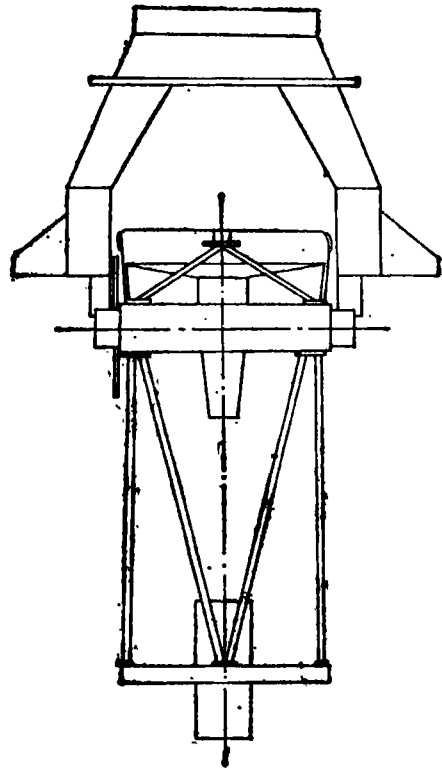


图 12. 某一地平式 3.5 米望远镜结构图。

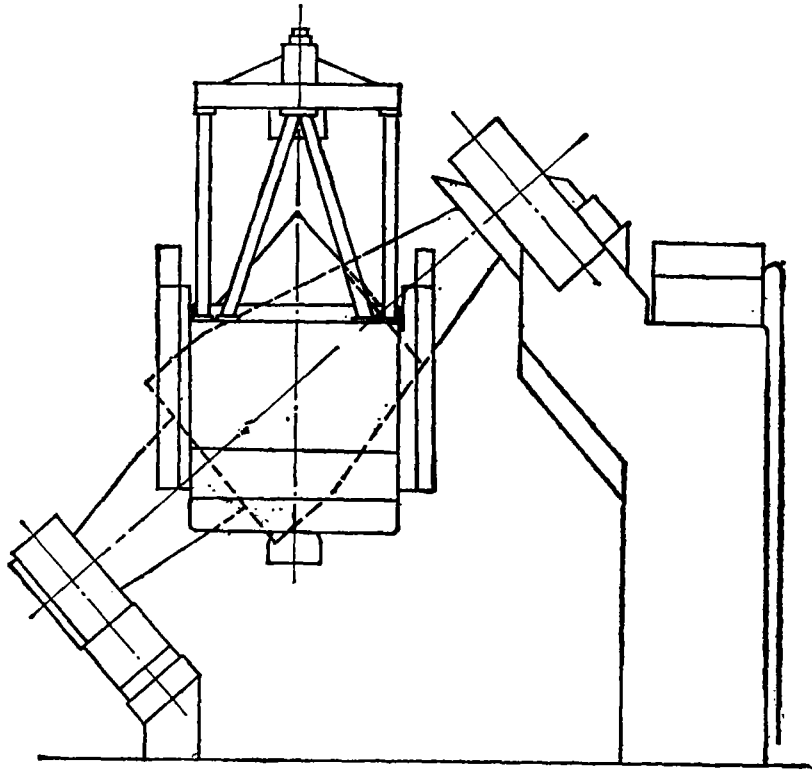


图 13. 赤道式 2.16 米望远镜结构图。

参 考 文 献

- [1] Meinel, A. B., *Optical Telescope of the Future*, ESO Conference(Geneva, 1977), ed. by F. Pacini, W. Richter and R. N. Wilson, (1978).
- [2] Meinel, A. B. and Meinel, M., *Optical and IR Telescopes for the 1990's*, KPNO Conference (Tucson, 1980), ed. by A. Hewitt, (1980).
- [3] Humphries, C. M., Reddish, V. C., Walshaw, D. J. and Greenaway, A. H., *Optical Telescope Array*, Internal Report, Edinburgh Royal Observatory, (1984).
- [4] 黄铁琴, 有关地平式望远镜驱动问题初探, 中国科学院南京天文仪器厂, (1980).
- [5] Watson, F. G., *The Zenithal Blind Spot of a Computer-controlled Altazimuth Telescope*, MNRAS, 183 (1978).
- [6] 程景全, 大型天文光学望远镜方案, 中国科学院南京天文仪器厂, (1981).
- [7] Ulich, B. L. and Riley, J. T., *MMT Control system*, Multiple Mirror Telescope Observatory, Technical Report, No. 4, (1980).
- [8] 连铜淑, 棱镜调整, 国防工业出版社, (1978).

(责任编辑 刘金铭)

Some Problems of Altazimuth Mounting Telescopes

Cheng Jingquan, Xu Xinqi

(Nanjing Astronmical Instruments Factory, Academia Sinica)

Abstract

In this paper, a brief discussion is given on the component cost and the aperture limit of an equatorial telescope. The mechanical advantage of the altazimuth mounting telescope is also introduced. Detailed discussions are given on the related problems of the altazimuth mounting telescope, eg. the velocity control, the blind area determination, the computer control system and the anti-rotation mechanism of the field. In the end the discussion is given on the factors which influences the practical altazimuth mounting telescope cost.