维普资讯 http://www.cqvip.com

第 45 卷 第 1 期
2004 年 2 月

天 文 学 报
ACTA ASTRONOMICA SINICA

Vol.45 No.1
Feb., 2004

# 一个巨型望远镜方案

苏定强 王亚男 崔向群

(中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所 南京 210042)

**摘要** 提出一个有特色的巨型望远镜 (FGT) 方案. 其主镜口径为 30 米, 主焦比为 1.2, 由 1095 块圆环形子镜构成. 采用地平式装置. 光学系统包括 Nasmyth 系统、折轴 (Coude ) 系统和一个大视场系统. 提出一个由 4 个镜面组成的新的 Nasmyth 系统, 在约 10′ 的视场范围内像斑小于爱里斑, 达到衍射极限. 比传统的 Nasmyth 系统的衍射极限视场大得多. 可在这样的大视场内同时作好几个小区域的衍射极限的观测. 当由 Nasmyth 系统转换到折轴系统和大视场系统时, 采用主动光学技术改变子镜的面形、倾斜和平移, 产生一个新的主镜面形, 使折轴系统和大视场系统都能得到很好的像质. 大视场系统的视场直径 25′, 场曲轻微, 并有可能校正大气色散. 给出了子镜面形和位置的公差, 并讨论了望远镜的装置和结构. 方案中的特色和创新对未来大望远镜的研制有普遍意义.

**关键词** 望远镜, 仪器: 主动光学, 仪器: 高角分辨率, 未来的大望远镜, 极大望远镜
**中图分类号**: P 111; **文献标识码**: A

## 1 引言

当今, 由于 8—10 米级望远镜和哈勃空间望远镜的问世, 已观测到一些早期的宇宙事件, 用这些望远镜和其他望远镜还观测到一些类木星行星. 这对天文学家和广大民众是一个很大的鼓舞, 他们希望能观测更多的早期宇宙事件, 包括第一代恒星和星系, 观测银河系和其他星系近核的区域, 探索邻近恒星中的类地球行星. 这些工作都需要集光能力更强、分辨率更高、口径更大的空间和地面望远镜. 拼镜面望远镜 Keck I 和 Keck II 的成功为建造更大的望远镜提供了技术上的可能性. 自适应光学的成功, 为地面望远镜得到衍射极限像质提供了可能性, 至少在红外波段可以达到衍射极限. 由于地面大望远镜不但集光能力更强, 而且分辨率更高, 于是极大望远镜 (Extremely Large Telescope, 简称 ELT) 或者后来也称为未来巨型望远镜 (Future Giant Telescope, 简称 FGT) 已成为观测天文学和天文技术科学领域中最活跃的热点之一. 如 CELT[1] 、 OWL[2] 、 GSMT[3] 等课题的研究已开始进行, 我们在这方面也进行了研究 [4,5]. 在本文中, 我们给出了一个新型的 FGT 方案.

我们认为 FGT 应满足以下要求:

(1) 望远镜的基本焦点应落在没有重力变化的平台上. 焦面后面的复杂的再成像系

2003-06-02 收到原稿, 2003-08-21 收到修改稿

维普资讯 http://www.cqvip.com



统、自适应光学系统和各种仪器可放在此平台上. 在我们的方案中有两个 Nasmyth 焦点，落在两个没有重力变化的 Nasmyth 平台上.

(2) 望远镜应具有与其他望远镜形成干涉阵的可能性，以获得比单个望远镜更高的分辨率. 本方案中有一个折轴系统可用于此目的.

(3) 望远镜应没有制造上的困难.

(4) 主、副镜之间的距离应尽量短，副镜口径应尽量小.

(5) 望远镜中应有一个视场直径不小于 20′, 具有视宁度极限像质的大视场系统 [1,3], 其用途之一是多目标光纤光谱观测.

(6) 每个光学系统中都应有一个镜面可做 tip-tilt 镜.

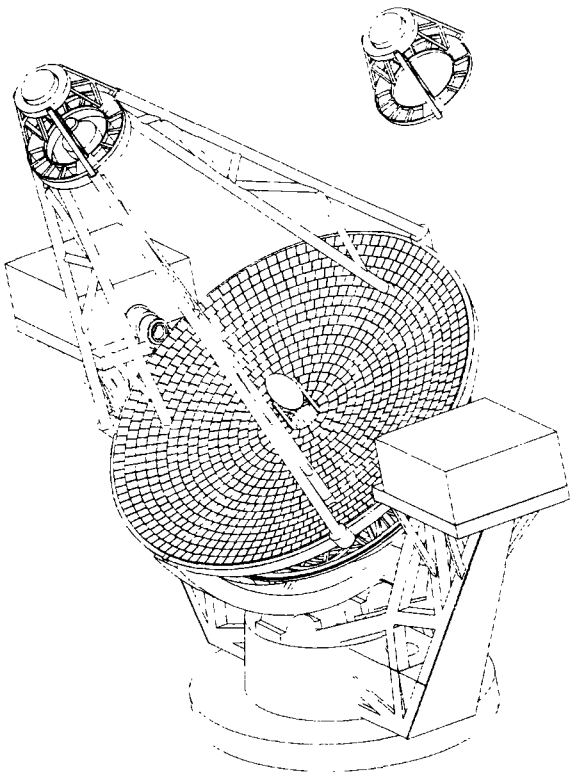

图 1 望远镜总体图

Fig. 1 General view of the FGT

本文提出的 FGT 方案是一个主镜口径 30 米的地平装置望远镜，见图 1. 主镜是非球面，焦比 f/1.2, 由 1095 块圆环形子镜拼接而成. 由于焦比是 1.2, 子镜的非球面度很小，子镜沿径向的位移和自转的公差要求都不严. 望远镜有 3 个光学系统，即特殊的 Nasmyth 系统、折轴系统和大视场系统，图 2 是这些光学系统的示意图. 3 个系统中的副镜都不相同. Nasmyth 系统是基本的光学系统. 在 9.8′ 视场内最大的像斑为 0.0084″, 即 0.5 微米波长的爱里斑直径. 此方案中还应用了一个特殊的方法 [5−9], 即通过采用主动光学技术

维普资讯 http://www.cqvip.com



改变子镜的面形、倾斜和平移，使得同一个主镜能满足不同光学系统中消像差的要求，使折轴系统和大视场系统都有很好的像质．折轴系统在直径 1′ 的视场范围内的最大像斑远小于 0.0084″．大视场系统是由一个类似 Pual - Baker 系统的系统加上一对大透镜构成．在直径 25′ 视场内最大像斑为 0.48″．将来这两块透镜要变成两个透棱镜 (lensm 即 lens-prism) 以校正大气色散 [10-12]．

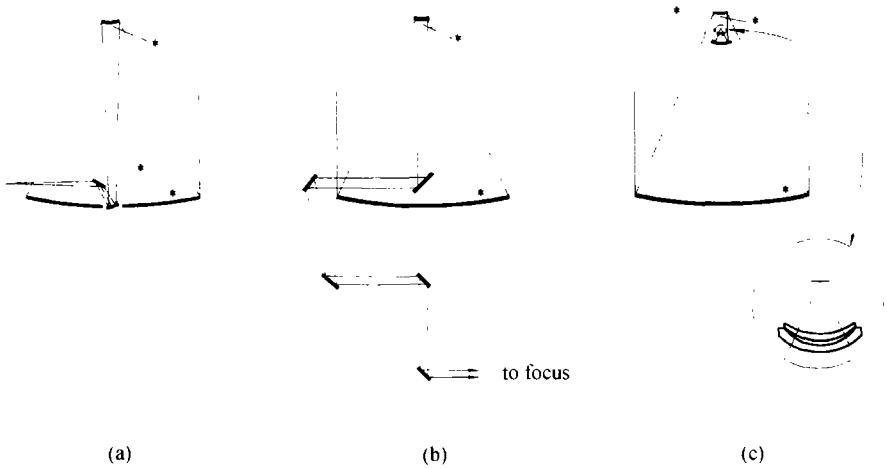


图 2　非球面镜光学系统图 (a)Nasmyth 系统 (b) 折轴系统 (c) 大视场系统

Fig. 2　Optical systems of the FGT of aspherical surface：　(a) Nasmyth system (b) coude system (c) Wide FOV system

望远镜为地平式装置，除 Nasmyth 平台外，如果需要，也可用垂直轴上方的平台．

## 2　光学系统

此 FGT 包括 Nasmyth 系统、折轴系统和大视场系统 3 个光学系统，其中 Nasmyth 系统为基本的光学系统．主镜口径为 30 米，焦比 1.2．

### 2.1　Nasmyth 系统

在本方案中，我们提出了一个新型的 Nasmyth 系统，它由主镜、副镜、一个稍微倾斜的非球面第 3 镜和一个倾斜的平面第 4 镜组成．图 2(a) 是其光学系统图．下面我们称它为 4 镜 Nasmyth 系统．这个光学系统最主要的优点是像质特别好，在 9.8′ 视场内所有的像斑均小于 0.0084″, 即波长为 0.5 微米光的爱里斑直径．图 3 是其点图 (图中 OBJ 为视场，后面的两个数字是该视场点以度为单位的坐标．　IMA 是像高，后面的两个数字是以毫米为单位的坐标．图下方框内的 RMS RADIUS 是像斑半径的均方根值，　GEO RADIUS 是整个几何像斑的半径，即最大像斑半径，均以微米为单位．以下各点图均与此相同)．主镜和副镜都是旋转对称的高次非球面，其截面是圆锥曲线加幂级数多项式．第 3 镜也是高次非球面，但不是旋转对称的，其最大非球面度 (与平面的最大偏离) 仅为 7 微米，这样的镜面是不难加工的．为了使副镜不太大，以便用来作 tip-tilt, Nasmyth 系统的焦比取为 18．由于第 3 镜的口径比副镜更小，约 2 米，可作为 tip-tilt 镜面，因此副

维普资讯 http://www.cqvip.com



镜也可以取得更大些，采用更强的 Nasmyth 焦比.

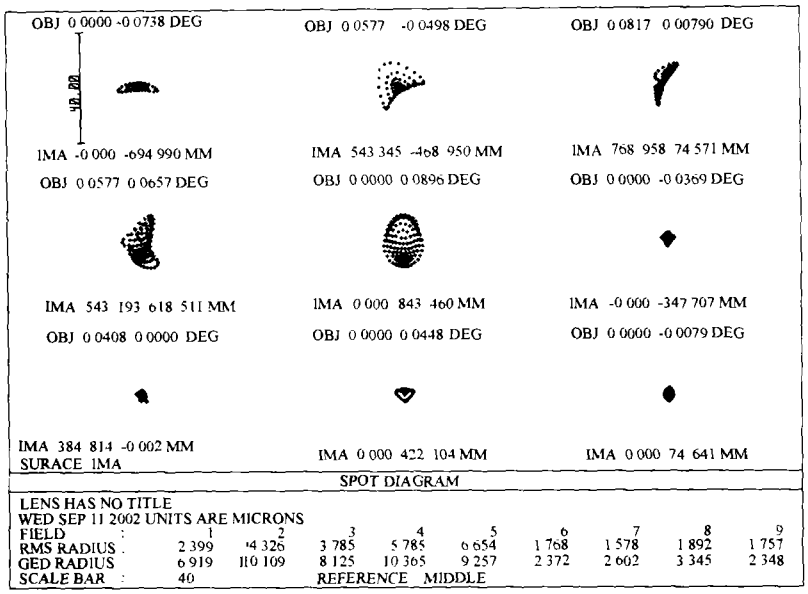


图 3 4 镜 (3 个非球面)Nasmyth 系统的点图

Fig. 3 The spot diagram of the 4-mirror (3 aspheric) Nasmyth system

作为对比，我们也设计了一个传统的 Nasmyth 系统，即由 R - C 系统加上一块转向平面镜构成的 Nasmyth 系统. 主镜焦比 1.2, 系统焦比 18. 在直径 8′ 的视场内，最大像斑为 0.09″, 像斑小于 0.0084″ 的视场为 2.4′. 显然， 4 镜 Nasmyth 系统的像质比传统的要好得多.

对于衍射极限的观测工作，视场直径 0.5′—1′ 就足够了， 4 镜 Nasmyth 系统达到衍射极限的视场有 9.8′, 可以在此大视场中，同时作若干个衍射极限的观测工作，因此在大视场范围内有好的像质，是有意义的. 可将 Nasmyth 焦面分成若干个小区，对每个小区加上场镜和再成像子光学系统 [6], 将焦距增加或缩短、校正像差、校正大气色散作成像或多目标光纤光谱观测或加上自适应光学系统做衍射极限的观测. 所有这些子光学系统、自适应光学系统和各种复杂的仪器都可以安装在没有重力变化的 Nasmyth 平台上. 并且可以在相对于光轴对称的位置上放两块第 4 镜，第 3 镜作 180° 旋转，即可获得两个 Nasmyth 焦点.

本文也研究了另一种 Nasmyth 系统，即在传统 Nasmyth 系统的基础上，将转向平面镜的面形作为变数与主镜和副镜一起优化，得到一个新系统，我们称它为 3 镜 Nasmyth 系统. 与 4 镜 Nasmyth 系统类似，主镜和副镜都是旋转对称的高次非球面，第 3 镜是非旋转对称的高次非球面. 在直径 8′ 视场内，最大像斑为 0.024″, 在长轴和短轴分别为 6.4′ 和 4.9′ 的椭圆视场内达到衍射极限. 图 4 是这个系统的点图，其像质也比传统的 Nasmyth

维普资讯 http://www.cqvip.com



系统好. 但像质和对称性都不如 4 镜 Nasmyth 系统.

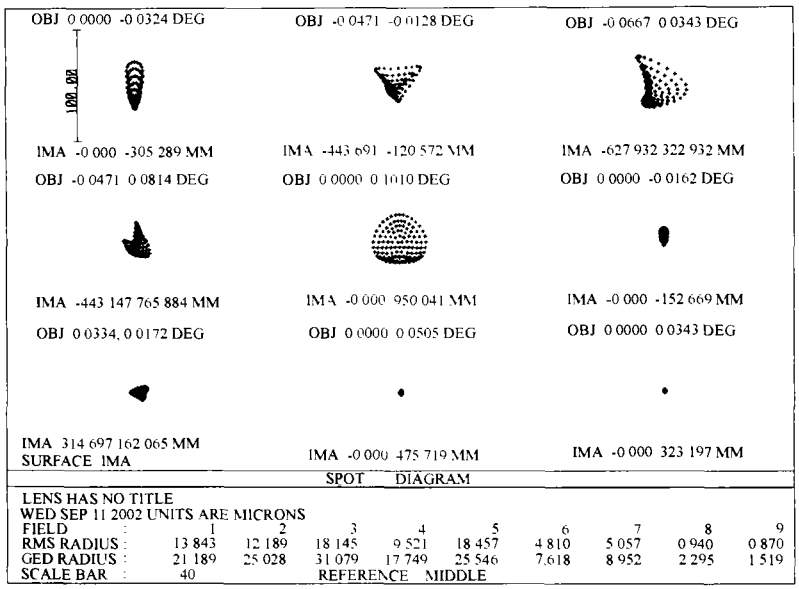


图 4　3 镜 (3 个非球面)Nasmyth 系统的点图

Fig. 4　The spot diagram of the 3-mirror ( 3 aspheric ) Nasmyth system

## 2.2　折轴系统

为了能与其他望远镜形成干涉阵得到更高的分辨率，在 FGT 中有一个折轴系统是非常必要的. 本文研究了两种折轴系统，基本参数相同，视场直径为 1′, 系统焦比 200, 主镜顶点至焦面的距离为 500 米.

(1) 和传统的作法一样，保持 Nasmyth 系统的主镜不变，换一个新的副镜，构成折轴系统. 由于只有副镜作变数，只能消球差. 在直径 1′ 视场内，最大像斑为 0.043″, 达到衍射极限的视场只有 10.8″. 这样的折轴系统是不能令人满意的.

(2) 不仅副镜面形是变数，将主镜的面形也作为变数. 相当于设计一个新的 R–C 系统，可以同时消除球差和彗差. 光学系统见图 2(b). 根据 Chretien 的定义， R–C 系统应该是消球差并使所有平行于光轴的光线都满足正弦条件. 1984 年，我们发展了 Chretien 的概念 [13], 并编制了一个程序，可以计算光学系统中任意两个镜面 (相邻和不相邻均可) 的形状，使光学系统消球差并使所有平行于光轴的光线都满足正弦条件. 可以用这个程序来设计 R–C 系统. 这样的系统也可以将主镜和副镜取为圆锥曲面，由解消三级球差和三级彗差的联立方程组，即 $S_I = 0, S_{II} = 0$ 得到，这样得到的是 R–C 系统的近似解. 用以上两种方法得到的系统，像质极为相近，为简单起见，在本文中用了第 2 种方法的结果. 这个系统的像质很好，在 1′ 视场内最大像斑直径只有 0.00013″, 像斑直径小于 0.0084″ 的视场直径为 7.9′, 图 5 是其点图.

维普资讯 http://www.cqvip.com



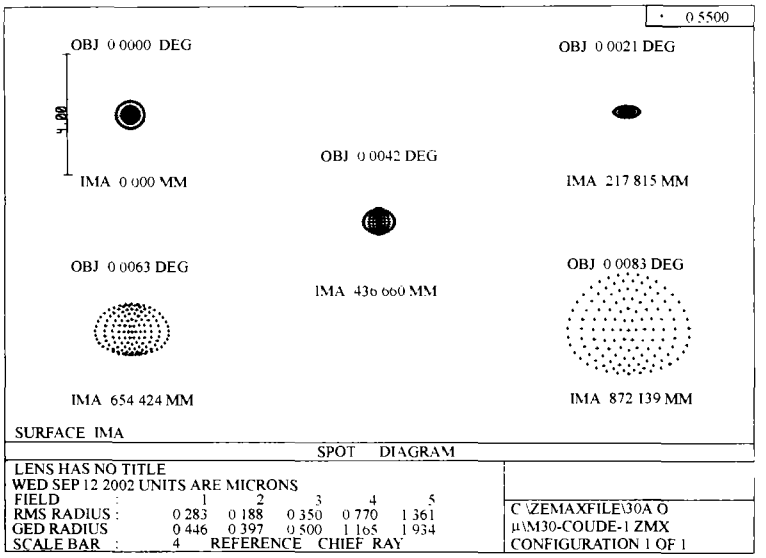


图 5 折轴系统的点图

Fig. 5 The spot diagram of the coude system

苏定强等[6] 在 1986 年曾提出: (1) 在大望远镜中应用形状可变的镜面, 使望远镜中不同的系统都能得到很好的像质; (2) 应用可变形镜面来实现用传统方法不可能实现的光学系统; (3) 在光学检验中应用机械 (力) 方法. 并对以上 3 点给出了实例. 后来我们知道, 在我们之前, Lemaitre[7] 已用了与上述第 (1) 点类似的概念.

在 LAMOST 和 ELT 方案中[5,8,9], 我们采用了上述 (2) 即应用可变形镜面来实现用传统方法不可能实现的光学系统.

采用上述 (1) 的方法即可获得 R-C 折轴系统: 当由 Nasmyth 系统转换到折轴系统时, 用主动光学技术改变子镜的面形、倾斜和平移, 使主镜变成 R-C 折轴系统所要求的主镜. 主镜最外圈的子镜需要的平移量为 0.034 毫米, 若采用 0.8 米 ×0.8 米的圆环形子镜 (见下节) 则最大的子镜变形量 (这里给的是子午截面的值, 对角方向要更大一些) 为 P-V 值 153 礼貌纳米, RMS 值 46 纳米, 是很小的. 本文采用这样的折轴系统. 在转换时, 将 Nasmyth 系统中的第 4 镜转出光路而把折轴系统的转向平面镜转入光路. 由折轴系统转换到 Nasmyth 系统时, 两平面镜作相反的转换.

### 2.3 大视场系统

大视场系统的视场直径为 25′, 系统焦比为 f/1.2, 由主镜、副镜、第 3 镜和两块透镜组成, 相当于在 Pual-Baker 系统中加入了两个大透镜 (最大直径 1.2 米), 图 2(c) 是光学系统图. Pual-Baker 系统的主镜是抛物面, 本方案折轴系统主镜的圆锥常数为 −1.000007, 非常接近抛物面, 所以在大视场系统中, 用折轴系统的主镜作为主镜, 优化时保持不变. 设计结果, 副镜是非球面, 与 Nasmyth 系统和折轴系统的副镜都不相同. 第 3 镜也是非

维普资讯 http://www.cqvip.com



球面. 副镜和第 3 镜的非球面度都很小，分别为 0.118 毫米和 0.011 毫米. 两个透镜都是球面镜，厚度均为 100 毫米. 在 25′ 视场、360 纳米 —1400 纳米波段范围，各色光叠加在一起的最大像斑为 0.48″. 图 6 是点图. 将来，这两个透镜要做成一对透棱镜 (lens-prism)，用于校正大气色散. 由于分裂后变数增加，每个透棱镜又用了两种材料，像质可进一步提高 [10-12]，并有可能用平像面，因为场曲很小. 副镜直径为 2.4 米，可用作 tip-tilt. 也可考虑将大视场中的第 3 镜和两个透镜放在靠近主镜的位置，这样第 3 镜将增大，但系统转换时可不需移出光路.

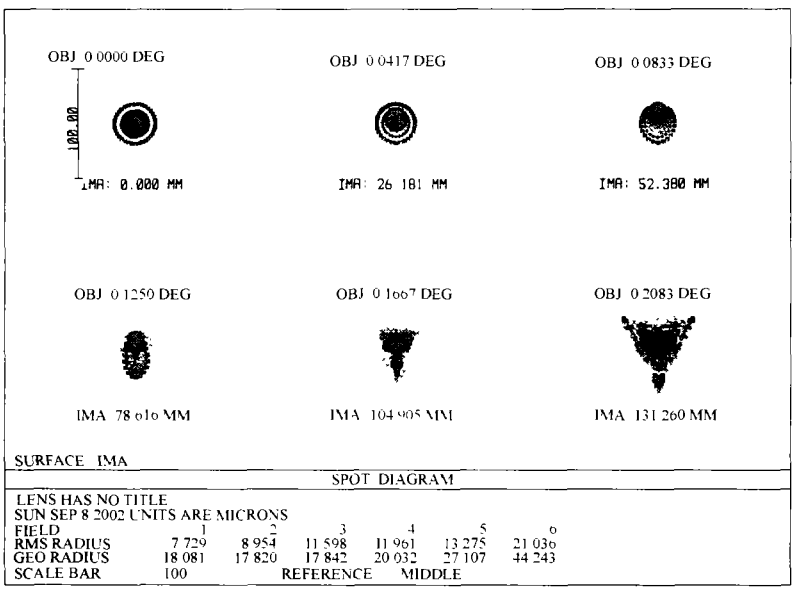


图 6　大视场系统的点图

Fig.6　The spot diagram of Wide FOV system

## 3　子镜

制造子镜的理想方法是：首先对每种不同面形的子镜，用应力变形法和离子束抛光法制造凸模子. 然后用复制法制造大量子镜. 如果 30 米的主镜是由对角线长度为 1 米的六角形子镜拼接成，所有子镜约有 100 种不同的面形，制造 100 种凸模子，不但麻烦而且昂贵. 我们在本方案中用了如图 7 所示的圆环形子镜，沿径向和圆周方向的长度均为 0.8 米 (对角线长度约为 1.13 米). 这样的圆环形子镜的面积与对角线长度为 1 米的六角形子镜差不多相等. 主镜中心有一个直径 2.8 米的中心孔 (或放一块圆形镜). 主镜共有 17 圈，1095 块子镜. 显然，位于同一圈的子镜面形相同，也就是只有 17 种不同的面形，只需做 17 种模子，与六角形子镜的情况相比，工作量和费用都将大大减少，而且用应力方法制造这样的模子和使子镜主动变形都比六角形子镜容易.

维普资讯 http://www.cqvip.com



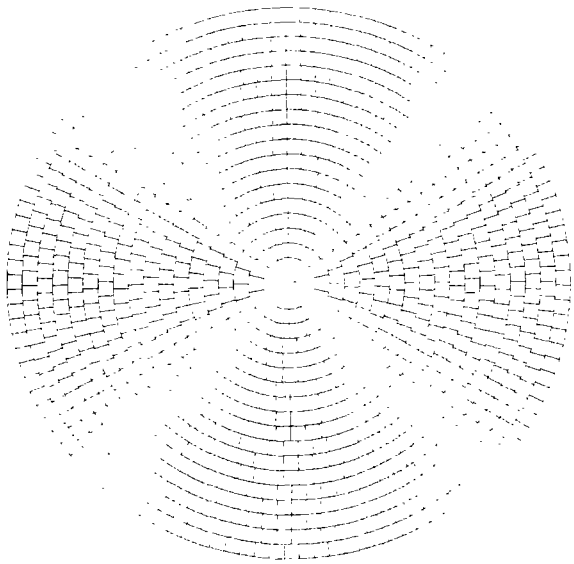

图 7 拼镜面主镜

Fig.7 Segmented primary mirror

## 4 准直公差

直径 30 米，焦比 f/1.2, 由圆环形子镜构成的主镜，最外圈子镜的最大非球面度是 18 微米，这样的镜面不难加工. 子镜沿圆周方向的位移，显然对主镜面形没有影响. 计算表明，位于最外圈的子镜沿径向位移 5.8 毫米时，主镜面形产生 50 纳米的误差，子镜自身旋转 2.4′ 时，也使主镜产生 50 纳米的误差. 子镜在两个方向的倾斜和上下位移应精确控制. 应当指出，对圆环形拼接主镜，在每两块子镜的边缘都安装了位移传感器，不能控制每一圈子镜的花瓣式的张开和关闭的误差. 我们认为有两种方法可解决这个问题. 一是在每块子镜背面安装一些零膨胀的玻璃棒，棒的另一端伸到另外一圈子镜处，并安装一些位移传感器，这样可控制这两圈子镜之间的角度. 另一方法是在观测过程中，用 Shack-Hartmann 装置实时检测并控制这种误差. 但这两种方法仍有些问题需要进一步考虑. 我们用文 [14] 中的公式 (17) 计算得到 Nasmyth 副镜偏心 0.011 毫米或倾斜 0.73″ 时，将产生 0.0084″ 彗差， 0.0084″ 是 0.5 微米波长的爱里斑直径. 折轴系统和大视场系统副镜的偏心和倾斜公差与 Nasmyth 副镜差不多. 对这些副镜作主动光学校正是必要的.

## 5 望远镜的装置和结构

与现有大望远镜一样，本方案中采用地平式装置，如图 1 所示. 有两个没有重力变化的 Nasmyth 平台，可以安装焦面后面的子光学系统、自适应光学系统和焦面仪器. 也

维普资讯 http://www.cqvip.com



可在主镜结构下面，方位旋转盘上设置重力不变的焦面平台，但必须避免与主镜的支撑桁架产生干涉．折轴焦点在地面以下．

高度轴在主镜顶点上方 4 米，副镜顶点以下约 29 米．望远镜镜筒长度为 33 米，不是很长，副镜很小，副镜室可以像射电望远镜那样用一个三角架式的结构支撑．第三镜和透棱镜以及光纤定位装置装在一个小三角架上，Nasmyth 系统、折轴系统与大视场系统转换时，采取换上端笼的办法．

由于副镜较小，镜筒不是很重，主镜后面的结构也可以比较轻，但必须有足够的刚度以保持主镜的面形．高度轴以下的部分显然比其上的部分重得多．可以像 LAMOST 中 Schmidt 改正板的地平装置那样用一个特殊的机械装置来平衡高度轴上的负载．高度轴和方位轴都用油垫来支持望远镜转动部分的巨大负载，和精确地确定两个轴的位置．像射电望远镜那样，高度轴的驱动系统装在一个大的弓形结构上，好像是主镜的脊骨一样．高度轴和方位轴都采用直接驱动系统，由均匀分布的若干马达来实现．

为了得到精确的镜面面形，除了需要主动地、精确地控制 3 个位移促动器来校正每个子镜的倾斜和位移以外，主镜框架上还需要有补偿机构将每块子镜的另外两个自由度：沿径向的位移和子镜自身的旋转保持在公差范围以内．这些问题在近期的研究中将很快得到解决．

## 6　结论

本文中的 FGT 方案有以下特点：

(1) 望远镜的基本焦点是位于没有重力变化的平台上的 Nasmyth 焦点．

(2) 望远镜有一个折轴系统，可与其他望远镜形成干涉阵．

(3) 有一个特殊的大视场系统，视场为 25′．其中有两个透镜，将来要分成一对透棱镜用于校正大气色散．

(4) 采用圆环形子镜．

(5) 在这个 FGT 方案中，每个光学系统中都有一个镜面可做 tip–tilt 镜．

(6) 采用地平式装置．像射电望远镜那样，副镜室用三角架式结构支撑．

本方案中有两个创新：

(1) 提出了一个新型的由 4 个镜面组成的 Nasmyth 系统．在约 10′ 的视场内，像斑直径小于爱里斑直径 (0.0084″)，比传统的 Nasmyth 系统的衍射极限视场大得多，可在这样的大视场内同时作好几个小区域的衍射极限的观测．

(2) 采用主动光学技术改变子镜的面形、倾斜和平移，产生一个新的主镜面形，使折轴系统和大视场系统都能得到很好的像质．

在本方案中有 Nasmyth 系统、折轴系统和大视场系统 3 个光学系统，它们之间的转换比较复杂，但如果这种转换不需要经常进行，用换笼的办法也能很好地解决．

**致谢**　感谢周放先生的帮助．

维普资讯 http://www.cqvip.com



## 参 考 文 献


1 Nelson J E. Proc of SPIE, 2000, 4004: 282
2 Dierickx P, Gilmozzi R. Proc of SPIE, 2000, 4004: 290
3 Strom S E, Stepp L M, Gregroy B. Proc. of SPIE, 2002, 4840: 116
4 Cui Xiang-qun, Su Ding-Qiang, Wang Shou-Guang. AcASn, 2000, 41: 219 (崔向群, 苏定强, 王绶琯. 天文学报, 2000, 41: 219)
5 Su Ding-qiang, Cui Xiangqun, Wang Ya-nan. Proc of SPIE, 2000, 4004: 340
6 Su Ding-qiang, Cao Changxin, Liang Ming. Proc of SPIE, 1986, 628: 498
7 Lemaitre G R, Wang M. A&AS, 1995, 114: 373
8 Wang Shou-guan, Su Ding-qiang, Chu Yao-quan, et al. Appl Opt, 1996, 35: 5155
9 Cui Xiangqun, Su Ding-qiang, Wang Ya-nan. Proc of SPIE, 2000, 4003: 347
10 Su Ding-qiang. A&A, 1986, 156: 381
11 Su Ding-qiang, Liang Ming. Proc of SPIE, 1986, 628: 479
12 Wang Ya-nan, Su Ding-qiang, A&A, 1990, 232: 589
13 Su Ding-Qiang, Wang Ya-Nan, Wang Lan-Juan. AcASn, 1984, 25: 86 (苏定强, 王亚男, 王兰娟. 天文学报, 1984, 25: 86)
14 SU Ding-Qiang. AcASn, 1989, 30: 106 (苏定强. 天文学报, 1989, 30: 106)


# A Special Configuration for Future Giant Telescope


SU Ding-Qiang WANG Ya-Nan CUI Xiang-Qun

(*National Astronomical Observatories Nanjing Institute of Astronomical Optics and Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210042 )



**ABSTRACT** A special configuration of Future Giant Telescope is proposed. It is a 30 m telescope with segmented primary mirror and alt-azimuth mounting. The aspherical primary mirror with f-ratio 1.2 consists of 1095 partial annular submirrors. The optical system includes Nasmyth system, coude system and a wide field of view FOV system. A new type of Nasmyth system which consists of four mirrors is put forward. In such a Nasmyth system the diffraction-limited image can be obtained in about 10 arcmin field of view which is much larger than that obtained by traditional Nasmyth system. Several diffraction-limited observations with narrow FOV can be operated simultaneously in such a large FOV. By using active optics method to change the surface shape. tip, tilt and piston of submirrors to get a new aspherical surface of the primary , the excellent image qualities can be obtained for coude system and wide field of view system. In the wide field of view system, the diameter of FOV is 25′, the focal surface is only slightly curved and the atmospheric dispersion could be corrected. The tolerances of the surface shape and position for submirrors, the telescope mounting and structure are also discussed. The creations in this configuration have general meaning for future giant telescopes.



**Key words** telescope, instrumentation: adaptive optics, instrumentation: high angular resolution, future giant telescope. extremely large telescope