

文章编号 1004-924X(2003)02-0151-06

# 空间太阳望远镜镜筒桁架的优化

胡企千, 刘 梅

(中国科学院国家天文台, 江苏 南京 210042)

**摘要:**空间望远镜的镜筒桁架结构优化以构件总质量等于常数为约束条件,以横向摆振频率最高为优化目标。优化分两步进行:首先以瑞雷方法和简化模型为基础,在较大范围内对可能的模型进行筛选,得出桁架分层数和每层斜杆数的最优解;然后用 ANSYS 软件对桁架杆、梁截面参数进行优化,得到比较满意的结果。此方法也适用对其他类似的筒状桁架的优化。

**关键词:**空间望远镜;镜筒桁架;结构优化

**中图分类号:**TH751 **文献标识码:**A

## Optimization of tube truss for space solar telescope

HU Qi-qian, LIU Mei

(National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** In order to make the first order natural frequency of a Space Solar Telescope the highest under the restriction of a constant total mass, the optimization of the tube truss is accomplished in two steps: 1) the tier number of the truss and the web-member number in each tier are established using a series of simplified structural models; 2) the cross sections of all the members of the truss are optimized using ANSYS software.

**Key words:** Space telescope; tube truss; structural optimization

## 1 问题的提出

### 1.1 镜筒桁架

空间望远镜的镜筒是支撑主镜、副镜等光学部件以及其它“有效载荷”的重要结构件;由于其中间要让光线通过,故而必须是由内腔没有挡光构件的中空筒状体;由于有重量有限制,故而多制成桁架结构而非薄壁筒结构。

哈勃空间望远镜的镜筒桁架是一个典型的例子,它通光口径为 2.4m,用碳纤维材料制作,有 4 个环梁,分 3 层,每层 16 根斜杆,见图 1。

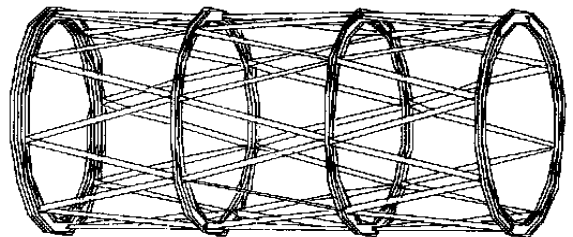


图 1 哈勃空间望远镜镜筒桁架

Fig. 1 Tube truss of Hubble space telescope

收稿日期:2002-10-16;修订日期:2002-12-19

基金项目:空间太阳望远镜关键技术攻关 863 计划重点资助项目(No. 863 - 2.5.1.25)

中国科学院国家天文台正在预演“空间太阳望远镜”,其镜筒桁架通光口径为 1 m,由钛合金材料制作。经初步设计,基本情况已经明确<sup>[1-2]</sup>,以下几点可作为结构优化的基本条件:

(1)同“哈勃”一样,采用多层环梁——斜杆结构;

(2)环梁平均直径为  $\Phi 1\ 300$  mm;镜筒桁架总长度为 3 800 mm;

(3)本身质量为 230 kg,其中环梁质量为 65 kg,斜杆总质量为 165 kg;

(4)所携带的有效载荷质量为 1 315 kg,被分配到各环梁上;

(5)底环梁(结点)为固定面(与火箭连接的面),其上自由度全部约束。

另外,从结构力学上考虑,以下两点也要作为本文分析问题的要点:

(1)环梁为“曲线”构件,它必须具有足够的抗弯刚度才能使得结构稳固。它在结构分析中,可划分为若干直线单元,但必须是梁元;因为若用杆元,则在某些无斜杆支撑的结点上,就会造成“刚度空缺”而使方程无解。另一方面,环梁是有效载荷的安装基础,也必须有较好的抗弯曲刚度。

(2)斜杆以受拉压为主,可处理为杆元。为了获得稳固结构,斜杆两两相交,构成一系列的三角形,因此每层斜杆数应为不少于 6 的偶数。(6 根斜杆两两相交可提供 3 个支撑点,这是决定环梁刚体位置的必要条件)。斜杆的交点都落在环梁(平均直径)上。

## 1.2 优化问题提出

镜筒桁架优化的目的是获得最高的横向刚度。空间望远镜是大型精密设备,而火箭发射力学环境(包括加速度、振动和冲击等)却十分恶劣。为了适应这一环境,作为其主结构的镜筒桁架必须具有足够的刚度和强度。有关火箭发射环境对“有效载荷”的要求在文献[3]中已有详细的规定,其中最主要的是两点:(1)结构强度,在最大加速度条件下,结构最大应力应小于允许值;(2)动态刚度,横向摆振(弯曲)频率应高于 15 Hz,扭转频率应高于 20 Hz,纵向(拉压)频率应高于 35 Hz。

经初步结构分析,发现其中动态刚度条件比结构强度条件较难满足;而在动态刚度中,弯曲频率(最低自振频率)又是最难满足的。因此在实际优化中,优化目标就限定为“弯曲频率最高”。

## 2 斜杆夹角对横向刚度的影响、剪切作用和弯曲作用

一般而言,在保持构件总质量不变的条件下,静态刚度较好的结构自振频率也较高。本节讨论斜杆角度对镜筒桁架的横向静态刚度的影响,这对于深刻认识镜筒桁架的力学性质是必要的。同时也将引出以斜杆角度作为重点考虑的优化设计变量这一观点。

结构力学的基本知识告诉我们,当斜杆总质量保持不变的条件下,其夹角对镜筒桁架的横向刚度是至关重要的。作为一个特例,设想所有斜杆都平行于桁架轴线(即相互夹角为零)则桁架的横向刚度就等于零。那么是否斜杆夹角越大越好呢?以下的分析可以证明不是这样的。

受横向载荷作用(如自重或某一集中力作用)时,镜筒桁架从宏观上可以看作一根“梁”,它同时存在弯曲和剪切两种变形。这两种变形都与斜杆夹角有关。

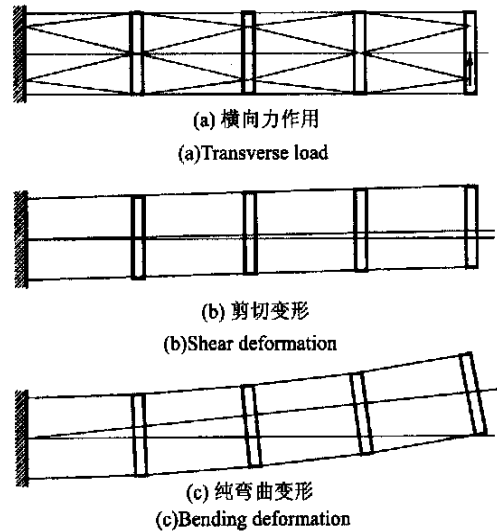


图 2 多层镜筒桁架受横向载荷变形示意图  
Fig. 2 Deformation of multi-tier tube truss under transverse load

图 2(a)表示一具有多层结构的镜筒桁架,其左端固定,右端作用一个横向力  $P$ 。这时,桁架变形可分解为剪切变形(图 2b)和纯弯曲变形(图 2c)。现取出左边第一层来分析,为方便说明起见,我们不妨将其描述为由 8 根斜杆所构成的 4 个三角形的桁架,其端部的作用力为剪力  $P$  和弯矩  $M = 3 SP$ (见图 3a,并参考图 4)。

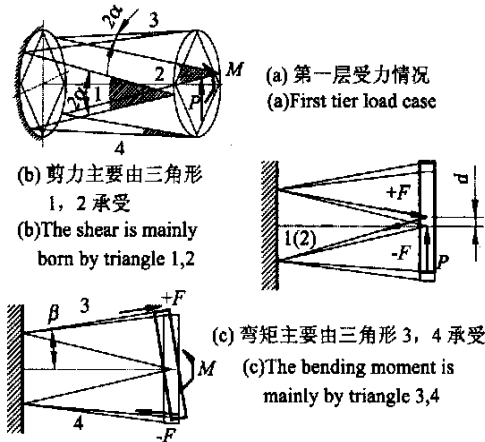


图 3 斜杆夹角对两种变形的影响

Fig. 3 Influence of angle between web-members on different cases of deformation

图 3(b)为受剪切的情况。在此情况,变形以环梁横向位移为主,其刚度主要来自左右两三角形(1,2),易于由二杆结构推出变形公式为:

$$\delta = \frac{s}{4EA \sin^2 \alpha \cos \alpha} \quad (1)$$

式中:  $E$  为弹性模量,  $A$  为杆截面积,  $P$  为剪力,  $s$  为环梁间距,  $\alpha$  为斜杆夹角。由上式可知,在一般条件下(此条件包括  $\alpha$  值不能太大),  $\alpha$  越大,剪切变形越小,刚度越好。

图 3(c)为纯弯曲情况。在此情况,变形以环梁转角为主,位移为小量,忽略之。这时力矩  $M$  应由上下两三角形(3,4)的“面内作用力” $F$ (由于问题的对称性,上下三角形的  $F$  相等,但方向不同)来平衡。同样可推出右端环梁的转角公式为(推导从略):

$$\theta = \frac{s}{D^2 EA \cos^3 \alpha \cos \beta} M \quad (2)$$

式中:  $D$  为环梁直径,  $\beta$  为三角形 1(或 2)与轴线的夹角。由上式可知,  $\alpha$  越小,转角越小。作为整个桁架弯曲变形,其右端环梁的横向位移将主要由各环梁转角累积效应引起(在此情况下,忽略剪切变形,环梁转角与侧面两三角形 1,2 无关)。因此可以说,  $\alpha$  越大,桁架的弯曲变形就越大。

通过以上分析得到如下结论:

(1) 单层镜筒桁架主要是剪切变形,为了提高其横向刚度应增大斜杆夹角;

(2) 多层镜筒桁架的横向变形由剪切和弯曲联合作用引起,为减小剪切变形应增大斜杆夹角,而为减小弯曲变形应减小斜杆夹角。两者是相互矛盾的,因此,存在一个对斜杆夹角优化的问题。

对于镜筒桁架的长度比直径大的情况,若采

用一层形式,不可能获得较大的斜杆夹角。因为上面已讲,每层斜杆数不能少于 6,这就决定了斜杆的最大角度。为了加大斜杆夹角,必须增加层数,这样问题又归结为上面第二种情况。

因此,首先将已规定直径和长度的镜筒桁架的优化归结为对其层数和每层杆数的优化。

### 3 用瑞雷方法对简化模型进行有关基频的初步优化

#### 3.1 基于瑞雷方法的单位力法

瑞雷方法对于求简单结构的基频(最低自振频率)是一种较快捷而有效的方法<sup>[4]</sup>。因为它所需要的最低阶的近似振型比较容易猜想。其表达式为:

$$\omega^2 = \frac{\{x\}^T [K] \{x\}}{\{x\}^T [M] \{x\}} \quad (3)$$

式中:  $[K]$  为结构刚度矩阵,  $[M]$  为质量矩阵,  $\{x\}$  为“预示振型”。实际经验证明,用瑞雷方法求频率对“预示振型”的要求并不十分苛刻。

作者曾基于瑞雷方法给出了一种更简化和实用的方法——“求结构基频的单位力方法”。其要点如下:

(1) 用“主对角线矩阵”(集中质量)取代式(3)中的  $[M]$ 。这虽然会带来一定的误差,但作为方案阶段的近似计算仍是很有效的。于是式(3)分母简化为:

$$\begin{aligned} \{x\}^T [M] \{x\} &= [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n] \\ \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & & \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & & m_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_m \end{Bmatrix} &= \sum m x^2 \end{aligned} \quad (4)$$

(2) 在结构某一特定结点自由度上作用一单位力  $p_i = 1$ , 将其所产生的静态变形  $\{x\}$  作为“预示振型”, 由于静力平衡:

$$[K] \{x\} = \{p\} \quad (5)$$

所以

$$\{x\}^T [K] \{x\} = \{x\}^T \{p\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{Bmatrix} = x_i$$

于是得到

$$\omega^2 = \frac{x_i}{\sum m x^2} \quad (6)$$

这就是“求结构基频的单位力方法”。作者已经用

它处理过某些简单结构的基频问题,据统计计算误差在 10% 上下,这对于方案阶段的估算来说应该够了。该方法的优点是避免建立复杂的结构刚度矩阵。

### 3.2 初步优化及其数学模型

首先对桁架的分层数和每层斜杆数进行优化。为此,先在较大范围内对符合基本条件的多种方案进行筛选。用筛选出的最好结果作为第二步数学优化的初始解从而避免出现“局部最优”的情况。为了快速地对大量模型进行分析,采用合理简化模型和近似计算方法是非常有效的。

#### 3.2.1 简化模型

本阶段采用的结构如图 4 所示,除符合前面已讲的基本条件外,还作了如下简化假设:

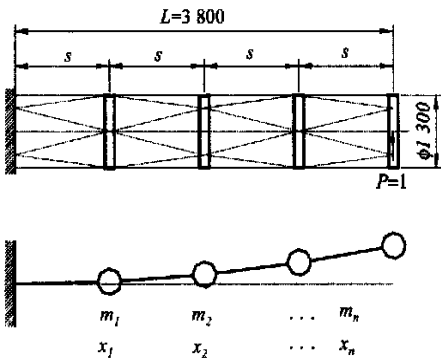


图 4 结构简化模型和瑞雷计算等效模型  
Fig.4 Simplified structural model and equivalent Rayleigh method model

(1)所有环梁都相同且为绝对刚体。此假设对于仅求桁架一阶弯曲振型影响不大;

(2)在求频率时忽略环梁转角而只计其横向位移。理由同上。但在下面要讲的用递推法求环梁横向位移时仍要用到其转角量;

(3)有效载荷的质量(1 315 kg)以及预先给定的环梁总质量(65 kg)被均匀地分配到各环梁上,再加上每一环梁相邻的部分斜杆质量将最后构成计算模型的质量矩阵;

(4)每层斜杆截面尺寸和数量都相同,斜杆的总质量为 165 kg。

#### 3.2.2 优化设计变量

本阶段优化中设计变量为桁架的层数  $n$  和每层斜杆数  $m$ 。考虑到实际工艺合理性,限定其范围为:

$$n \leq 10, m \leq 12.$$

由于上面讲到的原因,  $m$  的取值范围为 6、8、10 和 12。

#### 3.2.3 优化约束条件

优化约束条件是:斜杆总质量为 165 kg。

#### 3.2.4 用递推法求环梁横向位移

为了进一步减少计算工作量,对每一种斜杆数的情况都只取其第一层进行分析,如图 5(a)所示。这样只要对每一种斜杆数建立一个模型,而

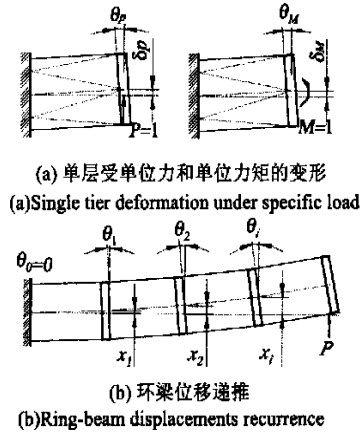


图 5 用逐层递推方法计算各环梁横向位移  
Fig.5 Transverse deformations of ring-beams calculated by recurrence

不同的分层数只是改变其长度而已 ( $s = L/n$ )。对此模型在其环梁上作用一横向单位力  $P = 1$ ,由静力分析求得横向位移  $x_P$  和转角  $\theta_P$ ;再作用一单位力矩  $M = 1$ ,由静力分析求得横向位移  $x_M$  和转角  $\theta_M$ 。

在此基础上就可以用递推方法逐一求出当桁架右端作用单位力  $f = 1$  时(图 4)各环梁的横向位移<sup>[5]</sup>。如图 5(b)所示:

$$\left. \begin{aligned} (1) \text{ 环梁转角} \\ \theta_0 = 0, \\ \theta_i = i \cdot [\theta_P + \theta_M(n-1)s] \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

$$(i = 1, 2, \dots, n-1)$$

$$\left. \begin{aligned} (2) \text{ 环梁横向位移} \\ x_1 = \delta_P + \delta_M(n-1)s, \\ x_2 = x_1 + \delta_P + \delta_M(n-2)s + s \cdot \theta_1 \\ \dots \\ x_i = x_{i-1} + \delta_P + \delta_M(n-i)s + s \cdot \theta_{i-1} \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

$$(i = 1, 2, \dots, n)$$

#### 3.2.5 等效模型和求基频

图 4 为上述结构模型用“求结构基频的单位力方法”时的等效模型。图中每一个节点代表一个环梁所分担的“集中质量”,它们将构成一主对角线质量矩阵。由此质量矩阵以及上面求得的横向位移按公式(6)即可求得其基频。

### 3.3 计算结果及初步最优解

对所有筛选范围内的模型计算结果见图 6。

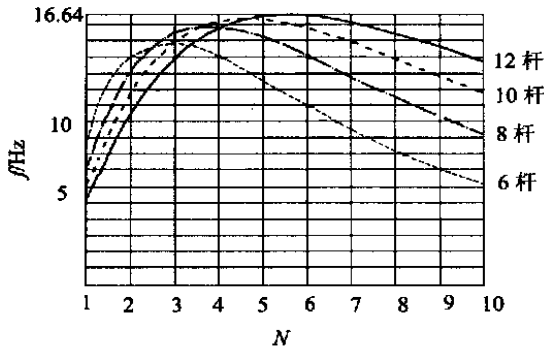


图 6 分层数和每层斜杆数对频率的影响

Fig. 6 Influence of tier number and web-member number per tier on frequency

图中每一条曲线代表一种斜杆数的情况。其共同的特点是:当分层数太小时结构频率都太低。这是因为斜杆角度过小,剪切变形很大的缘故;随着桁架层数的增加,斜杆角度不断增大,基频逐渐增高。当层数达到某一值时,基频达到最大值,说明这时斜杆角度最好;此后,再增加层数频率反而会往下跌,其原因在于斜杆角度过大会引起弯曲变形变大。由图可以选出初步最优解:分 6 层 ( $n = 6$ ),每层 12 根斜杆 ( $m = 12$ )。

### 4 ANSYS 结构优化

#### 4.1 优化结构模型及优化问题<sup>[6]</sup>

优化结构模型为实际镜筒桁架结构(图 7),

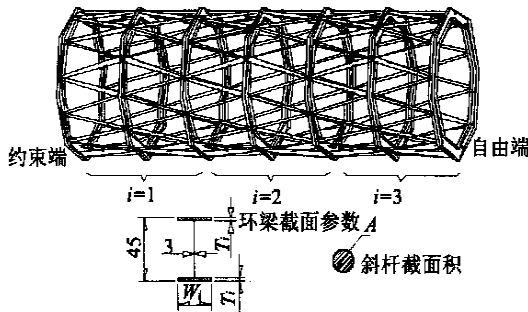


图 7 ANSYS 优化的初始模型和设计变量

Fig. 7 Initial model and design variables for optimization by ANSYS

经初步优化已定为 6 层,每层 12 杆;主要结构参数前面已经说明。

优化问题:

极小化 ( $C-f$ ),  $C = 20$ ;  $f = 1/2$  为最低阶频率(计算结果表明就是弯曲振型频率)。

约束条件:1)环梁总质量为 65 kg,从左到右两两相同,分 3 组。

2)斜杆总质量为 165 kg,从左到右每两层相同,分 3 组。

设计变量:单元截面几何参数(图 7)  $W_i$ 、 $T_i$ 、 $A_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ (组号)

#### 4.2 优化结果

最后阶段优化用 ANSYS 软件做。输入初始结构后经多次迭代,目标函数 ( $C-f$ ) 从 3.563 4 降到 1.927 5,相当于频率从 16.436 6 提高到 18.072 5。相应振型如图 8 所示。

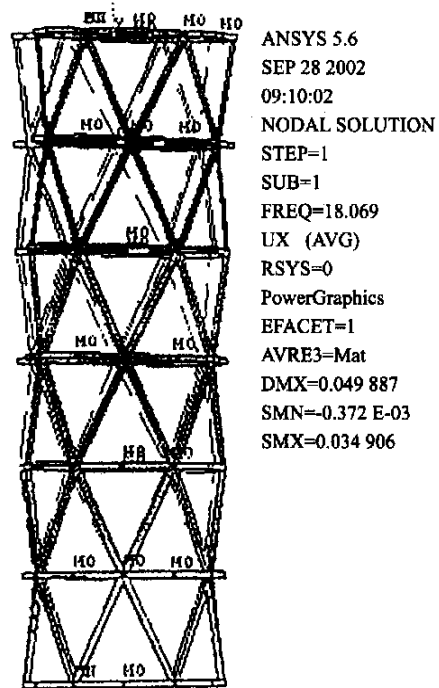


图 8 ANSYS 优化后的最低阶振型和频率

Fig. 8 First order vibrational mode and frequency after optimization by ANSYS

**参考文献:**

- [1] HU Q Q. *Subsystem design, phase-B study report on space solar telescope* [R]. Beijing: Beijing Astronomical Observatory, 1996.
- [2] AI G X. Scientific objective and instruments, phase-a study report on space, solar telescope [R], Beijing: Astronomical Observatory, 1996.
- [3] Shanghai Academy of Space Technology (SAST). *LM-4 User's manual* [M]. Chapter, 1994.
- [4] Wartuton G B. 结构的动力性态 [M]. 北京:地震出版社, 1983. 129-135.  
WARBUTON G B. *The dynamical behavior of structures* [M]. Earthquake Press, 1983. 129-135. (in Chinese)
- [5] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 1997. 1-34.  
ZHU B F. *The finite element method theory and applications* [M]. Beijing: China Waterpower Press, the Second Edition, 1997. 1-34. (in Chinese)
- [6] 李炳威. 结构的优化设计 [M]. 北京:科学出版社, 1979.  
LIB W. *The optimization design of structure* [M]. Beijing: Science Press, 1979. (in Chinese)

**作者简介:**胡企千(1943-),男,江苏苏州人,1966 武汉测绘学院仪器制造专业本科毕业,现在中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所任研究员,专业特长:天文仪器结构总体、结构分析,近年来负责多通道太阳望远镜结构、近地天体探测望远镜、智能桁架镜筒以及空间太阳望远镜结构等课题的研制、研究工作,曾获科学院科技进步三等、二等、一等奖各一次,国家科技进步二等奖一次(排名第二);

刘梅(1977-),女,江苏南京人,2000 年南京理工大学机械专业本科毕业,在读硕士研究生。