空间可展开望远镜结构动力优化设计。

杨东武 段宝岩 仇原鹰 西安电子科技大学,西安,710071

摘要:介绍了某口径为4m的空间可展开望远镜的结构形式,建立了其有限元参数化模型。以系统结构总质量最小为目标函数,以部分待定的结构尺寸为设计变量,以可展开望远镜 在收拢和展开两种状态下的动力性能要求为约束函数,建立了空间可展开望远镜的动力优化 数学模型。利用遗传算法对该模型进行了优化计算,取得了比较满意的结果,为可展开望远镜 的结构设计提供了一组较好的理论参考值。

关键词:空间望远镜;可展开;动力优化;遗传算法 中图分类号:TP24 文章编号:1004—132X(2006)S1—0241—04

Dynamics Optimization Design of a Deployable Space Telescope Structure

Yang Dongwu Duan Baoyan Qiu Yuanying

Xidian University, Xi'an, 710071

Abstract: A deployable space telescope structure with an aperture of 4 meters was introduced and its finite element model was parametrically developed. An optimum design model searching for minimum mass of the whole structure, with some structure parameters to be decided as variables was studied. The optimum model was subjected to the lowest normal frequency requested both at open and closed state. The result provides a reference for engineering feasible design of the structure.

Key words: space telescope; deployable; dynamics optimization; GA

0 引言

发展大口径空间望远镜在对地观察、太空探

收稿日期;2005---11---15 基金项目;总装部 973 预研项目(51329010302)

4 结论

在优化前由静力分析可知,整体在 X向、Z向 的最大位移基本集中在支承平台部分,大小分别 为 3. 323mm 和 1. 466mm,杆内最大应力出现在 支架最下一层的斜杆上,大小为 40. 2MPa。相对 来说,支架部分较支承平台有较大的设计余量;由 表 1 可知,优化后在 X向、Z向的最大位移分别为 4. 108mm、2. 657mm,杆内最大应力为 52. 1MPa, 支架主弦杆、斜杆的型号均减小许多,只有横杆的 截面积有所增大但均满足强度和变形及稳定性要 求,支架总用材重量减轻了 204. 0683kg,且杆受 压应力作用,总体、局部均满足设计规范的要求。 表中数据说明优化后的支架在满足结构安全的条 件下最大限度地发挥了结构各构件的承载能力。

本文所选的有限元优化分析目标是以节约抽 油机支架材料,即满足强度、变形位移等要求的约 束条件下,以支架重量为最小的优化目标。还可 以对支架固有频率、阻尼比等有关支架系统的动 测等领域的应用具有重要的科学意义和军事意 义。由于受到火箭整流罩容积的限制,空间望远 镜主镜(口径为4m,由若干子镜组成)发射时将各 子镜折叠起来,并将整个系统存放于火箭的整流 罩中,入轨后再将其展开成工作状态。

态特性参数进行目标有限元优化分析。

参考文献:

- [1] 陈宪侃,陈万薇,孙建华. 游梁式抽油机与直线电机 抽油机. 石油钻采工艺,2003,25(1):68~70
- [2] 孙昭瑞.国内抽油机的发展方向.石油机械,2000, 28(2):49~54
- [3] 张连山. 我国有杆抽油技术发展前景. 石油机械, 1998,26(8):46~49
- [4] 孙庆红,温泽民,王善政,等.电机换向智能抽油机 应用与分析.石油机械,2002,30(5):31~33
- [5] 彭勇,史足民,徐建宁,异形抽油机支架静强度及刚 度分析,石油机械,2002,30(6),44~47
- [6] 吴忠泽. 机械设计师手册. 北京: 机械工业出版社. 2002 (编辑 马尧发)

作者简介: 单 动,男,1957 年生。扬州大学机械工程学院教授。 主要研究方向为机电一体化技术、磁悬浮技术、机电系统控制技术。出版专著1部,发表论文 50 余篇。 呈 新星,女,1984 年生。 无锡商业职业技术学院机电工程系讲师。

• 241 •

火箭发射过程中,望远镜系统必然会承受巨 大的冲击荷载,因此必须保证收拢后的望远镜固 有频率远离火箭发射时卫星结构系统的固有频 率,以免发生共振,导致望远镜破坏。望远镜展开 进入工作状态后,由于受到卫星姿态调整及热辐 射等外界干扰,必须对其进行相应的在轨控制,为 保证望远镜在轨控制系统有足够的伺服带宽,对 望远镜在轨(工作)状态下的系统最低固有频率也 必须有一定的要求。特别值得注意的是^[1],卫星 质量每减轻 1kg,运载它的火箭质量就可以减轻 50kg。因此,尽可能地减轻望远镜系统结构的总 质量成为望远镜系统结构优化设计的目标。

借助 ANSYS 参数化建模的强大功能,建立 了某口径为 4m 的空间可展开望远镜在展开和收 拢两种状态下的参数化模型以及动力优化数学模 型,利用遗传算法对优化模型进行了计算,取得了 比较满意的结果,为可展开望远镜的结构设计提 供了理论参考依据。

1 空间可展开望远镜结构及其两态模型

某空间大口径可展开望远镜的整体结构如图 1 所示。它与文献[2]中望远镜主体结构较为类 似,望远镜的主镜由9面子镜组成,中央子镜是一 个正八边形,环周为8面旁瓣子镜,各旁瓣子镜与 中央子镜之间分别通过两个铰链相连接,在装载 发射前,8个旁瓣子镜交替折叠在中央子镜的上 方和下方;发射升空后,再分别展开到中央子镜平 面,组装后形成望远镜主镜面。可展开望远镜次 镜通过4个支杆组成的支架和固结于中央子镜上 的遮光筒支撑,支架与遮光筒之间通过可伸缩轴 套(滑动副)进行连接,在主镜展开到位、拼接完成 后再伸出以实现次镜的展开。



合理地建立空间可展开望远镜结构中的单元 模型,是研究空间可展开望远镜系统动力学特性的基础。因此,下面首先对空间可展开望远镜的 • 242 •

系统结构设计及其有限元参数化模型作简要的介 绍与分析。

1.1 望远镜主镜结构及其有限元模型建立

如上所述,空间可展开望远镜的主镜由中央 子镜及八面旁瓣子镜拼接而成。各子镜镜面为铍 材料板面,与子镜背面直接相结的蜂窝层结构与 子镜镜面做成一体[3]。蜂窝层结构主要是为了减 轻镜面的总质量,但同时又确保了镜面具有足够 的刚度,以便于各旁瓣子镜展开后的高精度微调。 中央子镜与仪器舱及其骨架结构固结,具有相对 较强的刚度。各旁瓣子镜与中央子镜之间通过平 面铰连接。旁瓣子镜结构如图 2 所示。旁瓣子镜 主要由其背架结构支撑,同时受三个作动器控制 以便于镜面高精度微调。相对镜面总面积而言, 光学镜面为超薄结构,因此,在用 ANSYS 建立单 元模型过程中镜面作为壳单元(shell63)处理,而 将镜面蜂窝层结构简化为由梁单元(beam4)所构 成的网格结构处理。子镜背架结构设计一般应保 证镜面底部支撑均匀,同时在望远镜系统收拢或 展开后为了尽可能地提高系统刚度,应该将已收 拢或已展开的镜面进行相互锁定,因此,子镜背架 设计中应设置相应的锁定装置。在有限元参数化 建模过程中子镜背架结构单元采用梁单元 (beam4)来简化,背架中的锁定装置以及展开铰 链仅作为集中质量单元(mass21)来考虑。



1.2 望远镜次镜结构及其有限元简化模型的 建立

由于望远镜次镜结构尺寸相对较小,次镜的 整体刚度相对较好,也就是说,在研究系统动力学 特性时,次镜本身的动力学特性(固有频率和模态)对系统动力学特性的影响并不是很大。但是, 次镜结构比较复杂(图 3),导致其质量相对较大, 特别是在望远镜展开后处于工作状态时,次镜主 要由刚度相对较弱的次镜支架支撑,系统的结构 尺寸此时较大,次镜的质量对系统的最低阶固有 频率影响较大,因此,在有限元建模过程中,可以 通过较厚的板单元(保证其足够的刚度)与集中质 量单元(保证其实际的质量)综合起来建立其有限 元模型。



图 3 望远镜次镜结构

1.3 望远镜其他结构部件及其有限元简化模型 的建立

望远镜遮光筒与次镜之间通过滑动副及滑轮 装置驱动(图 4)。遮光筒为薄壁锥形筒状,可以 用壳单元(shell63)简化建模。驱动装置可以作为 集中质量考虑,并附加于遮光筒顶端。望远镜仪 器舱骨架结构作为整个系统的主要支撑结构,其 有限元模型的建立可通过由梁单元(beam4)构成 的桁架结构处理。



图 4 望远镜次镜驱动装置 经过以上分析和简化,最终得到的系统有限 元模型如图5所示。



望远镜参数化模型及动力优化模型 2

空间可展开望远镜的研究正处于初始设计阶 段,结合一定的工程经验,先初步设定了部分系统

参数(如锁定装置质量、次镜总质量、子镜展开铰 链质量、主镜镜面厚度等),而将其他系统构件参 数作为优化设计变量,利用通用有限元分析软件 ANSYS 对空间可展开望远镜建立了相应的参数 化模型。其中,除了用于等效蜂窝层的梁单元网 格中梁单元横截面采用圆截面而外,其他所有用 于支撑的梁单元横截面都采用圆环形截面。模型 中作为系统优化变量的模型参数如下:用于等效 蜂窝层的梁单元截面半径 r1,遮光筒壁厚 t1,子镜 面背架周边框架单元内半径 r2;子镜面背架周边 框架单元壁厚 to,子镜面背架肋骨单元内半径 r_i, 子镜面背架肋骨单元壁厚 43,仪器舱主框架单元 内半径 r.,仪器舱主框架单元壁厚 t.,次镜支架单 元内半径 rs,次镜支架单元壁厚 ts,中央子镜背架 单元内半径 r₆,中央子镜背架单元壁厚 t₆。系统 边界条件根据系统状态和实际情况确定,当火箭 进入轨道,望远镜从整流罩中取出并展开直到最 终处于工作状态时,望远镜与卫星之间通常通过 可伸展机械臂连接,因此,望远镜底端采用单点约 束(图 5a);当望远镜完全收拢后存放于火箭整流 罩中,望远镜可以进行较强的约束,即系统在仪器 舱的底端(5点)采用全约束(图 5b)。

一方面,航天技术对结构质量要求十分严格, 另一方面,空间望远镜在收拢及展开两种状态下 都有相应的频率要求。结合可展开望远镜的有限 元参数化模型,建立了以下优化设计模型:

Find $t_1, t_2, \dots, t_6; r_1, r_2, \dots, r_6$ min $W = W_{\text{beam}} + W_{\text{whell}} + W_{\text{mass}}$ s.t. $-\omega_{\min}^{\circ} + \omega^{\circ} \leq 0$ $-\omega_{\min}^{\epsilon}+\omega^{\epsilon}\leqslant 0$ $\iota_i \in [\iota^{\mathsf{L}}, \iota^{\mathsf{U}}]$ $i = 1, 2, \cdots, 6$ $r_i \in [r^{\perp}, r^{\cup}]$

其中,W_{bram} 为系统模型中所有梁单元的总质量; Wshell 为系统模型中所有壳单元的总质量;Wmass为 系统模型中所有集中质量单元的总质量;W 为整 个系统的总质量;w°、w'分别为系统在展开和收拢 两种状态下的最低固有频率要求; u[°]_{min}、u[°]_{min}分别 为在展开和收拢两种状态下实际计算得到的系统 最低固有频率值;t^L、t^U分别为壳单元及薄壁圆管 厚度的下限值和上限值,r¹,r⁰ 分别为薄壁圆管 内半径及圆截面单元截面半径的下限值和上 限值。

3 算例分析

某空间可展开望远镜结构设计基本参数如 下:望远镜主镜的中央子镜对称边之间的距离为 • 243 •

2m,各旁瓣子镜沿径向尺寸为 1.11m,各子镜拼 接后形成总体口径为 4m 的大口径望远镜主光 镜。望远镜次镜结构径向尺寸为 0.5m,展开后的 次镜与主镜之间的距离为 3.8m,其中遮光筒高度 为 2.0m,次镜支架高度为 1.8m,遮光筒底端圆面 半径为 0.5m。仪器舱的主体尺寸[4]为 0.75m× 0.75m×1.2m,望远镜子镜从收拢到展开旋转角 总度数为 105°。当前模型中没有考虑仪器舱中 光学仪器的质量,其他一些预先设定的系统参数 如表1所示。最终得到的有限元参数化模型中节 点总数为1195个,单元总数为2824个。由于系 统设计与优化都处于起始阶段,相应于各构件的 材料都未完全确定,因此,此处将系统的材料统一 选作为金属铍,仅研究当前结构设计中系统的基 本性能特点。所选材料铍的弹性模量为 0.3 TPa, 密度为 1.84×103 kg/m3。参照文献[5],将望远 镜收拢态的最低固有频率要求设定为 $f_e = 25$ Hz, 展开态的最低固有频率要求设定为 f。=0.7Hz。

镜面	镇定装置	子镜展开	子镜微调	次镜	次镜展 开
厚度	总质量	铰链总质量	装置总质量	质量	装置总质量
(mm)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
2	0.75×16 = 12.0	$1.5 \times 8 =$ 12.0	$0.4 \times 3 \times 8$ = 9.6	8.68	2. 44

表 1 初步设定的系统参数

采用较为通用的优化算法(遗传算法)对以上 优化问题进行了相应的计算,计算过程中,交叉概 率取值为 0.98,变异概率取值为 0.05,每一代中 的个体数目为 30 个。计算结果如图 6 所示。可 以看出,经过 15 代的遗传优化,系统的总质量由 初始设计的 159.6738kg 降至 139.1902kg,共减 少了 20.4836kg。考虑到系统镜面的总面积约为 13.5m²,也就是说,望远镜系统的平均面密度由 原来的 11.83kg/m²降至 10.31kg/m²。因此,优 化结果是比较满意的。



• 244 •

圆截面半径 r₁,遮光筒壁厚 t₁,子镜面背架周边框 架单元内半径 r2,子镜面背架周边框架单元壁厚 t2 以及子镜面背架肋骨单元壁厚t3 都大幅度地减 小,从而使系统质量明显降低。虽然仪器舱主框架 单元内半径 r. 以及中央子镜背架单元内半径 r。 也都有明显的下降趋势,但其相应的单元壁厚都 有所增加。以上优化结果不仅为空间可展开望远 镜系统结构设计提供了一组较好的理论参考值, 而且表明,将蜂窝层与镜面做成一体的方案是可 行的(用于等效蜂窝层的梁截面半径仅为 5mm)。 其次,通过优化过程可以看出,与中央子镜相固结 的仪器舱骨架结构,由于其作为整个系统的基础 结构,所受荷载的情况较为复杂,因此其单元截面 形状参数的变化对系统性能的影响较为显著,因 此,在望远镜系统结构设计过程中应该作为一个 重点结构来考虑。

表 2 系统优化变量变化情况

mm

优化变量	初始设计	优化结果	优化变量	初始设计	优化结果
71	5.190	5.00	<i>t</i> 1	1.64	0.57
<i>r</i> ₂	37.49	28.68	t2	0.50	0.27
<i>r</i> ₃	16.00	16.01	t3	0.83	0.56
r4	29.13	7.11	L4	0.66	1.74
r5	25.25	25.25	t5	0.22	0.22
r ₆	4.25	1.69	t ₆	1. 37	1.43

4 结论

(1)利用 ANSYS 软件建立了某空间可展开 望远镜的有限元参数化模型。

(2)通过设定部分结构参数,用遗传算法计算 得到了一组较为满意的系统设计参数,为实际工 程设计提供了一定的理论参考。

(3)指出望远镜基架(仪器舱骨架结构)的设 计是望远镜总体结构刚度设计的关键。

(4)望远镜有限元参数化模型的建立,为随时 检测任意一组系统结构设计参数的理论优劣性提供了方便。

参考文献:

- [1] 罗鹰.大型星载可展开天线的动力优化设计与工程 结构的系统优化设计:[博士学位论文]. 西安:西安 电子科技大学, 2004
- [2] Wasfy T M, Noor A K. Multibody Dynamic Simulation of the Next Generation Space Telescope Using Finite Elements and Fuzzy Sets. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2000, 190:1 ~14
- [3] John N, Charles A, Allen B, et al. James Webb Space Telescope (JWST) (Observatory Architecture and Performance, AIAA - 2004 - 5986. San Diego, USA:CA.2004

散乱数据点的快速三角剖分算法

孙肖霞 孙殿柱 李延瑞 范志先

山东理工大学,淄博,255049

摘要:提出了一种改进的波前扩展算法,该算法给出的候选点判断准则,可对数据点的 K 近邻进行快速过滤,并有效避免了单元自相交;建立的匹配点查找和优化准则,可生成局部优 化的三角形网格单元;依据四种不同的查询结果,制定了相应的波前环更新和数据点标记方 法。将波前扩展算法应用于具有复杂特征的散乱数据点的三角剖分中,结果表明,该算法可快 速生成高质量的三角网格模型。

关键词:散乱数据;匹配点;波前扩展法;三角剖分 中图分类号:TP391 文章编号:1004-132X(2006)S1-0245--03

A Fast Mesh Generation Algorithm for Unorganized Points

Sun Xiaoxia Sun Dianzhu Li Yanrui Fan Zhixian Shandong University of Technology, Zibo, Shandong, 255049

Abstract: An improved advancing front method was proposed, in which a novel criterion of choosing candidate points was given to filter the K-neighbors quickly and avoid surface self-intersection efficiently, the finding and optimizing criterions of match points were proposed to generate the local optimized triangular meshes, and the methods of updating fronts and marking points were established according to four different finding results. Numerical examples of complex characteristics obtained indicate that the proposed method can effectively improve the quality of the triangular meshes produced and increase the speed of the mesh generation.

Key words: unorganized points; match point; advancing front method; triangulation

0 引言

散乱数据点的三角网格曲面构建是计算机视 觉、逆向工程等领域的重要分支。现有散乱点的 三角剖分算法可大体分为基于中轴的三角剖分算 法和局部增量算法。第一类方法^[1~3]的优点是可 以避免网格曲面自交,不足之处是需要进行薄元 处理和非凸域的边界恢复,算法复杂且计算量偏 大。基于区域增长算法^[4~8]是在已生成网格曲面

收稿日期:2006---01---05

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(Y2004G10);山东理工 大学科技基金重点资助项目(2005KJZ03)

- [4] Mauricio M. Majdedin M. Helen R B. Design, Simulation & Control of a Segmented Reflector Testbed. //Proceedings of the 7th Mediterranean Conference on Control and Automation. Haifa, Israel: MED, 1999
- [5] 罗鹰·段宝岩、杨东武、等、大型星载展开天线动力 优化设计.空间科学学报,2004,24(3):203~210

的边界上,根据相同法则向外扩展网格曲面。文 献[4]采用滚动球策略引入新的节点,文献[5]和 文献[6]分别应用二维和三维 Delaunay 三角剖分 完成数据点的局部拓扑重建,文献[7,8]均属于波 前扩展法,在网格曲面的边界上不断的循环插入 节点、生成新单元及更新前沿的过程。区域增长 算法的优点是在生成新单元时,可以控制其尺寸 和质量,缺点是在网格增长的过程中存在新单元 与已有单元之间的自交现象,需要大量的几何相 交检测,计算耗时巨大。本文从提高算法效率和 网格质量的角度出发,提出了一种改进的波前扩 展算法。

(编辑 马尧发)

作者简介: 44 点, 9, 1978 年生。西安电子科技大学机电工程 学院助教、博士研究生。主要研究方向为可展开机构动力学、结 构优化。发表论文4篇。良含增, 9, 1955 年生。西安电子科技 大学校长、教授、博士研究生导师。优康信, 9, 1958 年生。西安 电子科技大学机电工程学院教授、博士研究生导师。