# LAMOST 焦面机构的有限元分析与优化设计

王国民[1,2],李国平[1],崔向群[1],姚正秋[1]
(1. 中国科学院 国家天文台南京天文光学技术研究所,江苏 南京　210042)
(2. 中国科学院 研究生院,北京　100039)

摘要:利用 ANSYS 参数化设计语言建立了 LAMOST 焦面机构的有限元模型,并根据设计指标采用子问题近似法对机构静力学特性和动力学特性进行了优化,得出满足设计指标的最佳设计方案,为天文望远镜的设计提供了新的设计模式。

关键词:天文望远镜;有限元;ANSYS;APDL;优化设计
中图分类号:TH751　　文献标识码:A　　文章编号:1672-1616(2004)07-0091-03

大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜(LAMOST)是我国目前在建的重大科学工程项目,口径 4m,视场 5°[1]。由 Schmidt 改正板、焦面机构和球面主镜 3 部分组成。焦面板上安装有光纤,通过光纤把天体的信息引导到光谱仪进行分析研究。因此,焦面板的位置精度很重要。焦面板中心相对光轴的偏离量小于 0.2mm,焦面板相对光轴的倾斜角小于 10″,焦面机构的基频要大于 10Hz[2]。针对这些技术要求,如果用传统的设计方法,费时、费力,而且会有较大的偏差。用商用有限元优化设计软件进行优化设计就能克服以上的不足,ANSYS 软件就是其中的一种,它能实现前后处理、求解及多场分析,能够实现多物理场优化功能及强大的非线性分析功能[3]。本文以 LAMOST 焦面机构的设计为例,阐述如何利用 ANSYS 软件对机构进行优化设计,包括参数化语言建模、不同单元类型的耦合问题等。为大型天文望远镜的设计提供参考。

## 1　焦面机构简介

焦面机构如图 1 所示,主要由焦面板支撑旋转机构、支架 6 和底座 7 3 大块组成。其中,焦面板支撑旋转机构由焦面板 4、桁架 3、旋转轴 2、轴承及轴承座 1、驱动轮 5 组成。焦面板直径 1.75m,上面有 4 000 根光纤,可同时对 4 000 个目标进行观测。焦面板通过桁架与旋转轴相联。旋转轴是中空的筒体结构。在跟踪过程中,为了补偿地球的自转,旋转轴要带着焦面板作相反方向的旋转。旋转轴由球轴承、推力轴承和驱动轮支撑于支架上,并由驱动轮通过摩擦力驱动。支架由钢板焊接而成。整个机构由 3 个可调垫支撑。与水平面成 25°倾角。

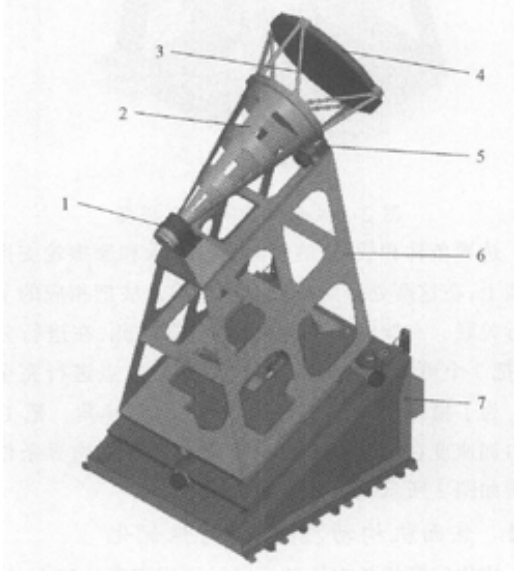


图 1　焦面机构图

## 2　分析和优化

### 2.1　有限元模型

本文利用 ANSYS 参数化设计语言(APDL)建立了焦面机构的有限元模型。用 solid45 单元模拟焦面板、摩擦盘、轴承座、底座等体结构,用 pipe16 模拟桁架杆,用 shell63 模拟旋转轴筒体、支架板。模型共有 4 486 个节点,5433个单元。有限元模型如图2所示。有限元

收稿日期:2004-02-02
作者简介:王国民(1967-),男,江苏海安人,南京天文光学技术研究所高级工程师、在职博士,主要研究方向为大型天文望远镜结构分析和优化设计、超低速高精度传动系统。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

模型中用了 solid45 和 shell63 两种不同自由度的单元，为了解决这个问题，在参数化建模时让相邻边界的单元取相同的 esize，在一定的允差内将它们耦合起来。因为此处不需要考虑板和实体之间的边缘效应，所以这样处理对结果没有太大的影响。

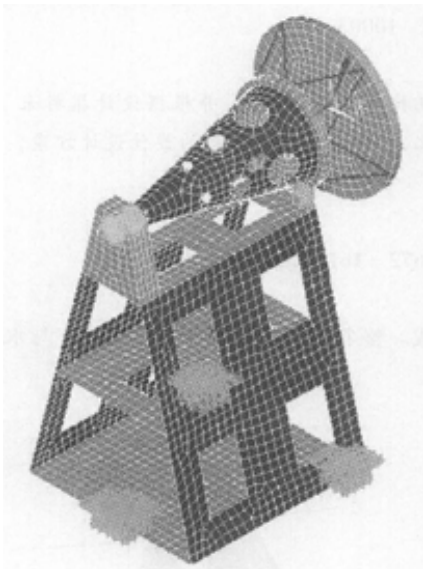

图 2　焦面机构有限元模型

边界条件和载荷 旋转轴通过轴承和摩擦轮支撑于支架上，在这两处分别用节点耦合的方法把相应的节点进行关联。支架由 3 个可调垫支撑，因此，在进行分析时，把 3 个可调垫看成固定支撑，相应节点进行完全约束。为了模拟焦面机构与水平面成 25°倾角。把 1.0g 重力加速度在 $y$ 方向和 $z$ 方向进行分解。边界条件和载荷如图 2 所示。

## 2.2　焦面机构动、静力学特性优化

优化问题的基本原理是通过优化模型的建立，运用各种优化方法，通过在满足设计要求的条件下的迭代计算，求得目标函数的极值，得到最优设计方案。优化问题的数学模型可表示为[4]：

$$\min F(x) = F(x_1, x_2, \cdots, x_n)$$

$$g_i(x) = g_i(x_1, x_2, \cdots, x_n) \leqslant 0 \quad (i = 1, 2, \cdots, m)$$

$$h_i(x) = g_i(x_1, x_2, \cdots, x_n) = 0 \quad (j = 1, 2, \cdots, p)$$

$$\boldsymbol{X} = [x_1, x_2, \cdots, x_n]^{\mathrm{T}}$$

其中：$F(x)$ 为目标函数，是设计变量的函数，用来评价设计方案的优劣，优化问题即为求目标函数的极值；$g_i(x)$，$h_j(x)$ 为约束条件，是设计变量取值范围及状态变量空间范围的限制条件，是设计变量的函数；$\boldsymbol{X}$ 是设计向量，由设计变量形成，是设计中需优选的设计参数，每一个设计向量即为一个设计方案，设计向量的集合为设计空间。

焦面机构的设计变量见表 1。设计变量的具体含义如图 3 所示。状态变量见表 2。把整个机构的体积作为目标函数，与用重量作为目标函数相比，可省去计算质量矩阵而节省时间。用参数化语言编写程序，偏离量、倾斜角、最大应力和基频 4 个约束变量同时进行优化。先用随机搜索法进行 60 次迭代，产生合理的设计方案。然后再用子问题近似方法进行优化。子问题近似方法只用到因变量而不用它的偏导数。用曲线拟合来建立目标函数和设计变量之间的关系。优化结果见表 3。

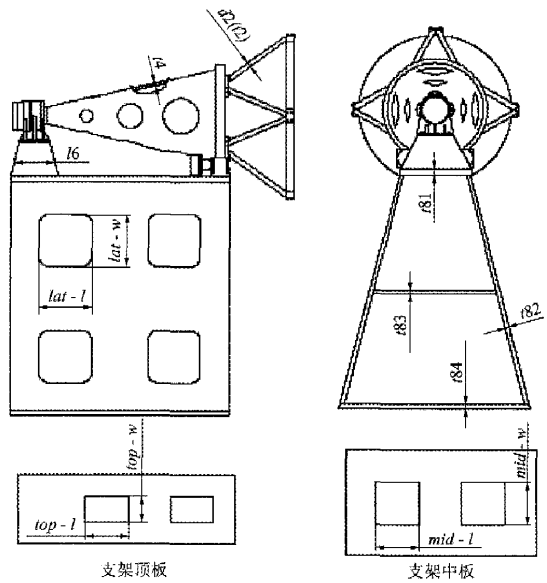


图 3　设计变量示意图

表 1　优化设计参数

| 设计变量 | 变量上下限/mm | 注释 |
|---|---|---|
| $t2$ | 10 ～ 30 | 桁架杆壁厚 |
| $d2$ | 80 ～ 120 | 桁架杆外经 |
| $t4$ | 10 ～ 30 | 旋转轴壁厚 |
| $l6$ | 100 ～ 400 | 轴承座长度 |
| $t81$ | 10 ～ 120 | 支架顶板厚度 |
| $t82$ | 40 ～ 120 | 支架侧板厚度 |
| $t83$ | 20 ～ 120 | 支架中板厚度 |
| $t84$ | 40 ～ 120 | 支架底板厚度 |
| $top - l$ | 100 ～ 800 | 支架顶板孔长 |
| $top - w$ | 100 ～ 600 | 支架顶板孔宽 |
| $mid - l$ | 100 ～ 800 | 支架中板孔长 |
| $mid - w$ | 100 ～ 1 000 | 支架中板孔宽 |
| $lat - l$ | 100 ～ 800 | 支架侧板孔长 |
| $lat - w$ | 100～1 000 | 支架侧板孔宽 |

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2　状态变量

| 状态变量 | 变量上下限 | 注释 |
|---|---|---|
| $\rho_{max}$ | ≤0.02mm | 最大偏离量 |
| $\theta_{max}$ | ≤10″ | 最大倾斜角 |
| $\sigma_{r4}$ | ≤240MPa | 最大应力 |
| $fre1$ | ≥10Hz | 基频 |

通过优化大大提高了焦面机构的力学性能，尤其是系统的频率特性。初值计算的基频为 5Hz，优化后基频提高到 11Hz，满足了大于 10Hz 的设计要求。

## 3　机构模态分析

利用上面优化的参数对机构进行模态分析。前 10 阶固有频率见表 4，相应振型如图 4 所示。

LAMOST 望远镜与传统望远镜的结构不同。传统望远镜的主镜、副镜和焦面安装在同一个镜筒里形成一体，而 LAMOST 的主镜、副镜和焦面分别安装在 3 个独立的基墩上。安装有 4 000 根光纤的焦面板是最终的成像部分。如果焦面发生相对于主镜或副镜的平移、扭转都会使得焦面板上的光纤偏离光路而影响成像质量。因此，对焦面机构的模态分析显得非常重要。

## 4　结　论

利用 ANSYS 软件，通过合理建模，选择适当的求解方法，能够对机构进行全面的分析和计算。包括静力学计算和动力学计算。能够获得比传统设计更为精确的

表 3　优化结果

| 参数 | 初值 | 优化值 |
|---|---|---|
| $t2$/mm | 20 | 14.77 |
| $d2$/mm | 100 | 114.14 |
| $t4$/mm | 10 | 11.95 |
| $l6$/mm | 300 | 111.4 |
| $t81$/mm | 40 | 86.05 |
| $t82$/mm | 50 | 49.32 |
| $t83$/mm | 20 | 58.01 |
| $t84$/mm | 80 | 96.91 |
| $top-l$/mm | 500 | 372.82 |
| $top-w$/mm | 300 | 516.56 |
| $mid-l$/mm | 500 | 421.34 |
| $mid-w$/mm | 400 | 825.80 |
| $lat-l$/mm | 500 | 508.46 |
| $lat-w$/mm | 700 | 884.86 |
| $\rho_{max}$/μm | 38.5 | 11.65 |
| $\theta_{max}$/(″) | 13.48 | 6.86 |
| $\sigma_{r4}$/MPa | 14.72 | 10.48 |
| $fre1$/Hz | 5.09 | 11.07 |
| $volume$/$m^3$ | 1.476 8 | 1.683 6 |
| $weight$/t | 11.59 | 13.216 3 |

表 4　1～10 阶固有频率

| 阶次 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 频率/Hz | 11.07 | 16.47 | 22.48 | 32.16 | 36.64 | 44.78 | 55.68 | 76.74 | 76.93 | 95.21 |

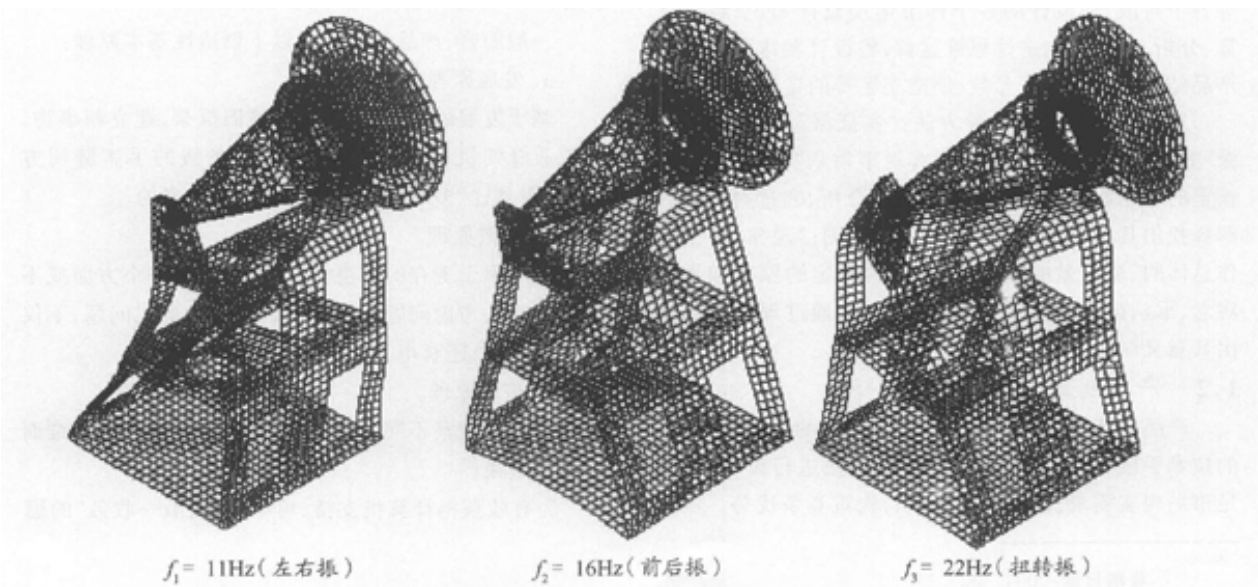


图 4　前 3 阶振型图

（下转第 96 页）

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

## 3　实现产品创新的关键技术

本文所提出的基于知识的产品创新设计制造体系结构，涉及到以下关键技术：

a. 产品创新设计知识的获取、表示和实现。研究设计领域知识的基本结构，建立符合设计过程特点的知识表示模型，确立合理的知识库结构和知识获取策略。

b. 产品信息建模。产品信息建模是计算机辅助设计的关键。在产品创新设计系统中，包含两种产品模型：(1)集成的产品信息模型，它为产品生命周期的各个环节提供产品的全局相关信息。(2)局部信息模型，用于处理内部的信息。通过 STEP 标准可以将全局的产品信息模型与各内部的局部产品信息模型联系起来。国外主流三维 CAD 软件，如 Pro/E、UG、CATIA 都已提供 STEP 数据输出接口。

c. 支持产品创新设计过程的数字化建模、仿真和评估。以计算机仿真技术为前提，对设计、制造等生产过程进行统一建模，包括制造系统的开放式结构、拟人化结构和分布式智能体系结构的数学描述和建模；新一代产品零件性能预测模型和缺陷预测判据；人机工程仿真、评价模型。

d. 智能化设计。智能化设计的目的是利用计算机模拟人的创造性思维的设计能力，从而尽可能地实现设计的自动化。

参考文献：

[1]　孙林夫．现代产品设计技术及其发展[J]．中国制造业信息化，2003，32(1)：37－40．

[2]　路甬祥．创新与未来[M]．北京：科学出版社，1998．

[3]　刘助柏．论知识创新能力[J]．机械工程学报，1999，35(1)：6－10．

## Research of the Product Creative Design Based on Knowledge

LI Li－min，WU Dong－qing，TANG Wen－xian

(Shanghai University，Shanghai，200072，China)

**Abstract**：Ground on the idea of product creative design，it expatiates the technique measure of the product creative design，develops system of the product creative design on the theory of the knowledge driving，analyzes the key technique for this system.

**Key words**：Creative Design；Knowledge Driving；Digital Modeling

(上接第 93 页)

设计方案。尤其是采用参数化语言设计，使得分析、优化更加方便灵活。在大型天文望远镜的设计过程中，利用 ANSYS 优化设计模块编制程序来求解优化问题方法是一种很好的设计模式。

参考文献：

[1]　Wang Shou－guan，Su Ding－qiang，Chu Yao－quan，*et al*．Special configuration of a very large Schmidt telescope for extensive astronomical spectroscopic observation[J]．Applied Optics，1996，35(25)：5 155－5 161．

[2]　苏定强，王亚男．大天区面积多目标光纤光谱望远镜(LAMOST)的跟踪运动[J]．天体物理学报，1997，17(3)：315－322．

[3]　王国强．实用工程数值分析模拟技术及其在 ANSYS 上的实践[M]．西安：西北工业大学出版社，1999．

[4]　许尚贤．机械零部件的现代设计方法[M]．北京：高等教育出版社，1994．

## Finite Element Analysis and Optimization of LAMOST Focal Mechanism

WANG Guo－min，LI Guo－ping，GUI Xiang－qun，YAO Zheng－qiu

(Chinese Academy of Sciences，Jiangsu Nanjing，210042，China)

**Abstract**：It sets up the FEM model of LAMOST focal mechanism based on ANSYS APDL. With the help of sub-problem approximation method and the static and dynamic characteristics，it obtains the optimization of the focal mechanism that satisfies all specified constraints. This gives a new way to design astronomic telescopes.

**Key words**：Astronomical Telescope；Finite Element Method(FEM)；ANSYS；APDL；Optimization Design

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net