

光学机械系统设计的数值方法

唐家鹏 赵虹

(中国大恒公司)

摘要: 本文以光、机总体设计为问题背景, 利用已有的热分析和结构分析程序及所编制的光学设计程序进行模拟设计, 并开发了体现一体化思想的工程软件包, 可预测光学机械系统在热、机械载荷作用下的性能。

一、引 言

计算机辅助光学机械系统设计 (CAOMD) 是在计算机辅助光学设计 (CAOD) 和机械系统有限元分析基础上发展起来的, 同时也充分利用了计算机图形交互技术、数据库技术, 从而形成了一体化的设计思想^{[1],[4]}。目前 CAOD 的发展已开始把人工智能 (AI) 技术应用到其中^{[3],[4]}, 从而使 CAOMD 走向智能化。

1959年, C.G. Wynne 发表了阻尼最小二乘法光学自动设计论文, 从而第一次实现了光学自动设计。这也就是 CAOD 的雏形。

有限元方法 (FEM) 是 Clough^[5] 1960 年首次提出的概念, 它是数值计算的一种近似方法。其基本思想就是用离散的方法解决物理世界中的许多连续问题。此外还有与 FEM 相似的 BEM 一边界元法。

为了实现模拟设计时机械和热载荷对光学系统影响的统筹考虑, 将用 FEM 编制的结构分析程序 SAP6 及用 BEM 编制的热分析程序, 加上光学设计程序及必要的接口程序有机地组装在一起, 便可以完成光机系统在机械和热载荷作用下的设计及性能分析。从而在计算机上初步实现一体化的工况模拟及优化设计。所强调的一点是, 一体化设计的真正实现必须把整个系统置于同一工程数据库 (EDB) 的环境下。

二、问题提出背景

任何一个以传递信息为主的系统若要完成其预定功能, 都需要一个信息流的载体。高精度、高性能的光电仪器正是这种信息流的载体。

1. 仪器工作环境的考虑

在某些领域中用的光电仪器, 其所处的工作环境是极为复杂的。我们以本文模拟设计时用的光电仪器为例。

此仪器光学部分结构是 Cassegrain 结构, 如图 1 所示。此仪器在工作时受机械和热载荷的作用, 这样使得本来完好的光学系统结构发生变化, 导致光学元件的表面变形 (Deformation)、元件的倾斜 (Tilt) 和偏心 (Decentration), 从而使系统的像差发生了变化。

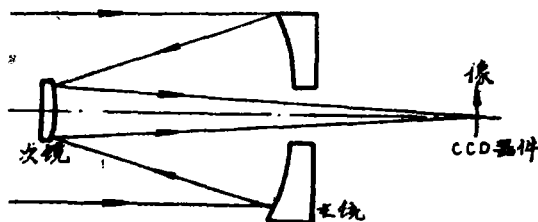


图1 Cassegrain 光学结构

2. 工况模拟时的载荷考虑

对于我们所研制的软件包, 在进行一般模拟设计时, 可包括如下载荷:

- (1) 热梯度对材料所形成的热冲击;
- (2) 恒定温度场;
- (3) 与时间有关的机械冲击;
- (4) 正弦振动及随机振动。本文模拟设计时的工况为热载荷 $\Delta T_1 = 90^\circ\text{C}$ 和 $\Delta T_2 = 130^\circ\text{C}$ 的恒定温度场。

三、理论依据及解决方法

1. 一体化设计思想的实现依据^[6]

为了预测光学机械系统在热和机械载荷作用下的结构变化及对光学像差的影响, 必须进行一体化 (Integrated) 的模拟设计。其理论依据就是系统结构的几何尺寸相关。

几何尺寸相关的物理意义, 简言之就是系统结构在热和机械载荷作用下几何关系和拓扑关系 (此处通称为几何尺寸) 发生变化, 从而导致光学系统像差的变化。几何关系即结构各部分元件本身的形状; 拓扑关系是结构各部分元件之间的空间相对位置。

(1) 结构受机械载荷作用

结构受机械载荷作用时, 用 FEM 进行力学分析时, 离不开刚度矩阵 k 、质量矩阵 m 及阻尼矩阵 $c^{[7]}$ 。且有:

$$k = \int_V B^T D B dV \quad m = \int_V N^T \rho N dV \quad c = \int_V N^T \mu N dV$$

其中: B 、 N 与结构几何尺寸有关, D 、 ρ 、 μ 与材料性质有关。因此有:

$$\left. \begin{aligned} k &= f(\text{材料, 几何尺寸}) \\ m &= f(\text{材料, 几何尺寸}) \\ c &= f(\text{材料, 几何尺寸}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

(2) 结构受热载荷作用, 以热传导定律为例

$q = \lambda \text{ grad } T$, 其中 λ 为导热系数; T 为温度。显然结构几何尺寸不同, $\text{grad } T$ 值不同因此有:

$$q = f(\text{材料, 几何尺寸}) \quad (2)$$

(3) 光学系统像差 OB

OB 是曲面半径 r 、间隔 α 和折射率 n 的函数, 因此有:

$$OB = f(r, d, n) = f(\text{材料, 几何尺寸}) \quad (3)$$

由 (1)(2)(3) 式可知, 光学机械结构受机械和热载荷的作用, 使得结构的几何尺寸发

生变化，而几何尺寸的改变最终体现在光学系统像差的变化上。这就是一体化的思想，即一体化设计的依据所在。

2. 一体化设计的实现方法

根据一体化的实现步骤^{[2][6]}，我们可编制一体化的设计程序，其逻辑过程如图 2 所示。

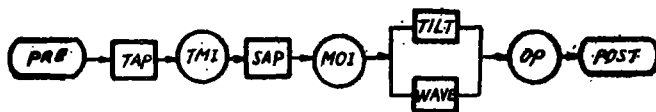


图 2 一体化设计逻辑流程图

PRE: 预处理模块, 包括有限元网格划分, 节点和单元的生成以及原始数据的准备。
 TAP: 热分析模块, 用BEM求解温度场的分布。TMI: 热分析和结构分析接口程序, 它把系统所受热效应转变为机械效应。SAP: 结构分析程序, 得出光学元件在机械或热载荷作用下的结构变化。MDI: 结构分析与光学接口程序。可判定元件是倾斜、偏心还是表面变形。
 TILT: 光学元件倾斜和偏心计算。WAVE: 光学元件表面变形计算。OP: 光学设计程序, 可完成光线追迹和像差计算。POST: 后处理程序。有关各模块的分析及编程的实现请参阅文献^[6~12], 此处不作详述。

四、实例程序设计及结果分析

1. 模拟题目的数据准备

如前所述, 结构为图 1 的 Cassegrain 结构。(1)结构所受载荷。如前所述为热载荷, $T_1 = -40^\circ\text{C}$, $T_2 = 50^\circ\text{C}$ 及 $T_3 = 90^\circ\text{C}$, 即 $\Delta T_1 = 90^\circ\text{C}$ 、 $\Delta T_2 = 130^\circ\text{C}$ 。(2)数据准备及有限元网格划分。根据题目的结构, 将单元取为三维实体单元, 划分节点总数为 1336 个, 单元总数为 792 个, 选取的坐标系为柱坐标, 有限元网格划分如图 3 所示。

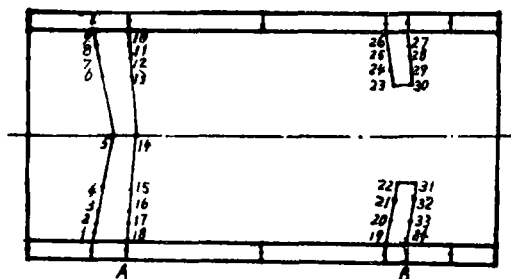


图 3 有限元网格的划分

有关光学结构原始数据、结构材料的有关特性等参阅文献^[6]。

2. 程序计算结果

(1) 结构分析计算。利用结构分析程序 SAP6, 计算出所有 1336 个节点位移量^[6], 利用节点位移量得出光学结构的变化值, 从而计算出光学系统像差的变化。图 3 中的编号与节点编号关系参阅文献^[6]。

(2) 像差的计算。首先根据光学结构的初始数据计算出无热载荷作用下的像差, 尔后分别计算出 $\Delta T_1 = 90^\circ\text{C}$ 、 $\Delta T_2 = 130^\circ\text{C}$ 时的像差值。其结果参阅文献^[6]。

3. 程序计算结果的分析

以轴上球差 $\delta L'$ 为例, 取 $HR = 1.0$ ^[6] 的一组值。 $\delta L_1' \sim \delta L_3'$ 与 $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ 、 $\Delta T = 90^\circ\text{C}$ 、 $\Delta T = 130^\circ\text{C}$ 对应:

$$\delta L_1' = 5.3986, \delta L_2' = 5.4121, \delta L_3' = 5.4258$$

由此我们可以给出 $\delta L'$ 随 ΔT 变化的曲线, 如图 4 所示。根据图 4, 可以进行如下讨论。

(1) 光学机械系统工作环境的限制。根据图 4 的曲线, 可以得出某一 ΔT 值下的像差 $\delta L'$, 如果 $\delta L'$ 超出允许像差, 则系统不能工作在此工况条件下, 从而可以知道光机系统在满足像差要求条件下可工作的环境。

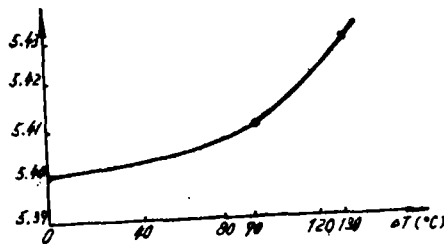


图 4 $\delta L'$ 随 ΔT 变化曲线

(2) 为系统优化设计提供依据。当光机系统在某一载荷 (ΔT) 下的像差值超出系统允许值, 由图 4 便可得知, 从而可以通过改变结构, 完成像差平衡的优化设计, 以使光机系统满足此载荷作用下的像差要求。

五、结 束 语

光机系统的一体化设计在国外近期才引起人们的关注, 主要是 J.M. Miller 作了不少开拓性的工作^{[1][18~15]}。这里所做的工作只是在光机一体化的实现思想、理论依据及实现方法上进行了初步探索, 许多方面还待进一步的完善。

参 考 文 献

- [1] J. Miller, et al, Opt. Eng., 1981, 20, 3/4, 166—174
- [2] Paul R. Yoder, Jr., Opto-mechanical Systems Designs, Marcel Dekker, Inc., 1986
- [3] I. O. Bohachevsky, et al., Proc. SPIE 485, 104—112 (1984)

- [4] Donald C. Dilworth, Proc. SPIE 766, 91—99 (1987)
- [5] R.W.Clough, Proc. 2nd A.S.C.E. Conf. on Electronic Computation, Pittsburgh Pa., Sept. 1960
- [6] 唐家鹏, 理学硕士学位论文, 长春光机所 1988年.
- [7] O.C. Zienkiewicz, The Finite Element Method (3rd edition), McGraw-Hill, 1977
- [8] SAP6 使用说明书, 兵器工业部, 1985
- [9] Nicolas A. Roy, et al, Proc. SPIE 450, 168—175 (1983)
- [10] 徐萃薇, 计算方法引论, 高等教育出版社, 1985
- [11] 袁旭沧等, 光学设计, 科学出版社, 1982
- [12] 王永仲, 光学设计与微型计算机, 国防科技大学出版社, 1985
- [13] J.Miller, et al, Proc. SPIE 121, 146 (1977)
- [14] J.Miller, Proc. SPIE 147, 117 (1978)
- [15] J.Miller, Proc. SPIE 216, 186 (1980)

Numerical Method for Opto-Mechanical System Design

Tang Jiapeng Zhao Hong

(China Da Heng Corporation)

Abstract

This paper describes a simulation design method which is based on the background of overall opto-mechanical design and uses available Thermal Analysis Program (TAP), Structural Analysis Program (SAP) and Optical Design Program (ODP).

A software package based on the integraty principle is developed, by which the performance of opto-mechanical systems with the effects of thermal and mechanical load can be predicted.