

# 光学仪器结构动态分析设计方法探讨

卢 镔

(中国科学院长春光学精密机械研究所 长春 130022)

焦 岩

(吉林职业师范学院 长春 130000)

**摘要** 阐述了动态分析设计作为一种现代设计方法在光学仪器研制开发中的必要性、目标及任务,探讨了动态分析设计的基本方法,列举了应用实例说明动态分析设计方法给人们带来的益处。

**关键词** 动态分析 设计 模态分析 随机振动

## 1 引言

以往,光仪结构的设计方法多半是凭经验、靠类比与仿制,至多针对个别构件运用静力学与运动学分析进行计算,以寻求保证仪器刚度及强度等技术要求的设计参数。今天,随着科学技术迅速发展,市场竞争的加剧,对光仪产品的要求越来越高,这不仅仅体现在多功能、高精度要求上,而且要求产品具有对各种恶劣应用环境的适应性,为此仪器必须设计成具有:

- 高精度,光学元件的尺寸与形状精度达纳米级;
- 高刚度,在外界机械扰动作用下仪器不抖动,确保视轴稳定;
- 高强度,仪器在运载过程中构件不破坏,不产生残余变形;
- 重量轻,体积小,低成本。

等品质。面对实际存在的复杂载荷工况,传统的设计方法已远远不能解决问题,诸如,仪器受到有环境的冲击、过载及随机机械干扰等载荷工况时,仅靠静态分析设计是不行的。为此,要使仪器设计成满足上述要求,就必须站在系统的高度,从动态的观点出发,借助CAD/CAE 手段进行动态分析设计。

## 2 动态分析设计目标与任务

光学仪器动态分析设计的目标是通过对外界环境扰动引起的系统响应求解, 确定在规定输出响应下光仪结构的最佳设计参数。我们所关心的系统响应主要是指将光学仪器整机作为研究对象, 探求其关键光学元器件相对位移或光学元件面形变化、应力或应变能分布以及输出功率谱密度响应等; 所要确定的设计参数主要是指光学仪器结构中那些影响整机刚度、质量及阻尼分布的结构布局、尺寸及材料属性等参数。

动态分析的任务主要有如下几项:

- 建立光学仪器动态分析模型, 确定环境扰动形式及函数表达, 响应的限定指标;
- 模态分析: 求解光学仪器自然频率  $F_n$ 、振型  $\varphi$ , 分析薄弱环节;
- 响应求解: 求光学仪器在环境扰动下(冲击、过载、低频振动及随机振动等视具体应用环境工况定)应力、位移及功率谱密度响应;
- 灵敏度分析, 探求影响光学仪器输出响应不满足技术指标或要进一步改善性能的关键环节;
- 优化设计: 根据产品要求确定目标函数、设计变量及状态变量, 进行优化设计迭代。

## 3 动态分析设计依据

动态分析设计的过程实质是探求在外界环境扰动下, 通过响应求解, 找到满足光学仪器机械性能指标的系统动态特征, 亦即传递函数(或称之为复频响应函数)的过程。如式(1)<sup>[1]</sup>所示,

$$S_{yy}(\omega) = |H(\omega)|^2 S_{xx}(\omega) \quad (1)$$

式中  $S_{xx}(\omega)$  为扰动谱密度函数;

$S_{yy}(\omega)$  为系统响应谱密度函数;

$|H(\omega)|^2$  为系统传递函数(复频响应函数)

由输入的环境扰动载荷函数, 如随机振动载荷功率谱密度, 求出系统的位移、应力及 PSD 等响应, 通过多次分析设计迭代, 不断改进设计参数直至使系统输出响应达到指标要求止。实际上由于光学仪器结构十分复杂, 很难写出机械结构系统传递函数的显示表达式, 因此, 目前主要采用有限元法。有限元方法通过对结构进行网格划分(物理离散成通过节点相连的有限个单元)、单元内分片插值(数学离散)及按力系平衡或能量守恒准则综合等处理, 建立系统的矩阵表达式。由于有限元法可以十分方便地描述几乎任意结构, 数学表达是建立在泛函变分求极值得到控制方程的基础上, 有着坚实的理论基础, 工程中已为大量实践证明是行之有效的手段, 目前已将有限元法作为工业标准化的分析计算工具。国际上流行的有限元程序主要有 NA STRAN、ANSYS、PA TRAN 等。

## 4 动态分析设计方法

光学仪器结构动态分析设计主要采用如下步骤:

#### 4 1 虚拟产品模型构造

首先利用 CAD 手段建立待动态分析设计的虚拟产品, 亦即构造数字化的 3 维实体模型, 赋予与组成模型各构件的材料属性。

#### 4 2 动力学有限元模型构造

确定整机为研究对象。根据动态分析设计要求精度、问题的类型考虑动力学模型简化的原则并基此建立有限元模型。一般说来, 动力学模型简化主要是遵循能量守恒的原则, 作到分析模型与原虚拟产品保持刚度等效, 质量等效及阻尼等效。单元的选取与网格划分则要根据问题的性质、计算精度等要求定。与静力学模型相比, 动力学模型除注意系统刚度的分配, 还十分注重系统质量分配。阻尼矩阵的建立是比较困难的, 往往通过类比的办法赋予阻尼系数, 一般取  $\zeta = 0.4 \sim 0.8$ 。

#### 4 3 模态分析: 自然频率及振型求解

对于光学仪器动态分析设计来说, 主要是刚度设计, 尤其是要求仪器具有良好的动态刚度。衡量结构动态刚度的主要指标是结构的自然频率及相关的振型。模态分析的主要任务是求解结构的特征方程(2)<sup>[2]</sup>的特征根及特征向量, 即结构的自然频率与振型。

$$H \varphi = \lambda \varphi \quad (2)$$

式中  $H$  为微分算子;

$\lambda$  为方程的一组递增特征根(自然频率,  $F_n$ );

$\varphi$  为方程的相应于  $\lambda$  的一组正交特征向量(振型)。

只要光学仪器结构及边界条件一定,  $\lambda$  与  $\varphi$  就确定了。自然频率与振型是结构固有的品质, 与外界载荷无关, 我们所关心的是光学仪器结构前几阶自然频率及相应振型。仪器结构的自然频率与结构刚度及质量近似有如下关系, 见式(3)<sup>[3]</sup>。

$$F_n = \sqrt{K/M} / 2\pi \quad (3)$$

式中  $F_n$  为光仪整机结构自然频率

$K$  为结构刚度;

$M$  为光仪结构质量

由上式可知,  $F_n$  值高其结构的动态刚度就高。相对于  $F_n$  的振型(模态), 尤其是那些与光学元件相对位移有关的振型, 对于动态分析设计来说是非常重要的。通过观察振型的动态仿真, 可以直观地了解结构动态刚度的薄弱环节。对影响结构动态刚度的薄弱构件可以通过改进材料、结构形式或尺寸等方法实现, 经反复分析计算/改进设计参数的迭代, 直至光仪结构的  $F_n$  达到技术指标要求止。一般来说, 与光学元件有关振型(如镜头及支架振动)相应的低阶频率  $F_n$  值, 应至少大于外界干扰频率 3 倍以上<sup>[4]</sup>。此外, 光仪结构的  $F_n$  值还可说明仪器结构比刚度的大小,  $F_n$  越大, 整机比刚度越高, 这正是大多数光学仪器结构优化设计所追求的目标函数。为了进行以  $F_n$  为目标的优化设计, 先要进行灵敏度分析, 求出影响  $F_n$  的薄弱环节, 然后再用这些薄弱环节有关尺寸或材料属性作为设计变量, 求  $(F_n)^{-1}$  的极小值, 实现动态刚度优化设计。

#### 4 4 响应求解

模态分析过程实际上只是求了动态方程的通解, 它既未考虑阻尼, 也未考虑外载荷作用。经过模态分析动态刚度设计的结构是否能满足刚度(变形)技术指标要求, 以及对强度有特别

要求的结构,都必须按未来实际应用环境载荷工况进行响应求解加以检验。目前多半以求解频谱响应为主,如环境扰动分别为冲击载荷或输入为随机振动功率谱密度(PSD)时的位移、应力及 PSD 响应。由于大多数环境扰动为随机振动,故以输入随机振动 PSD 载荷为例,进行光仪结构的动态分析设计。随机振动的特点是作用到光仪上的载荷为随机的,几乎“所有”频率载荷同时作用。随机振动是以各频谱的功率密度(PSD)进行描述,其单位为  $G^2/Hz$ ,如某卫星发射时 PSD 为表 1 及图 1(log-log 坐标)所示:

**Table 1** Acceleration PSD vs frequency for a satellite at launch state

A	$F_n$ (Hz)	PSD
A <sub>1-2</sub>	5~ 150	+ 6db/octave
A <sub>2-3</sub>	150~ 700	0.04G <sup>2</sup> /Hz
A <sub>3-4</sub>	700~ 2000	- 3db/octave

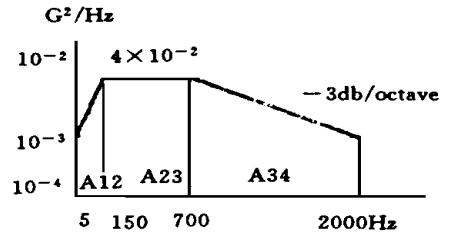


Fig. 1 A satellite random vibration spectrum

衡量一个随机振动谱剧烈的程度主要通过计算其统计均方根值  $G_{RMS}$  进行评价,该值不仅体现输入随机振动载荷(或输出 PSD 响应)的能量幅值,而且显示其出现频次最多的振动峰值的大小。随机振动的  $G_{RMS}$  可以通过计算图 1 中 PSD 频谱曲线包围的总面积开方求得。表中 A<sub>1-2</sub>、A<sub>2-3</sub>、A<sub>3-4</sub> 分别代表对数 PSD 数值曲线下各频段所包围的子面积,总面积为下式所示:

$$A = A_{1-2} + A_{2-3} + A_{3-4}$$

$$G_{RMS} = \sqrt{A}$$

对于上述卫星发射时所受到的随机振动载荷计算求得  $G_{RMS} = 7.22$ ,说明卫星发射时受到统计均方根加速度幅值为 7.22g,主要分布在 150~ 700Hz 频段。工程中一般只要给出  $G_{RMS}$  及频谱分布形状,随机振动的幅值状况就可以确定,也只有当环境扰动幅值的概率完整描述出来,设计工作者才能按着选取幅值较大且出现较多的数据作为现代设计的依据。对于装在卫星上的光学仪器来说,为了防止在运载发射过程中不破坏,不产生残余变形,就要通过给定的输入随机振动 PSD 曲线求出仪器输出的 PSD 响应曲线,计算仪器结构响应的  $G_{RMS}$ ,由于大多数结构破坏发生在  $3\sigma$  峰值状况下,故我们以计算求得的响应  $G_{RMS}$  乘以 3 作为许用参数值进行动态设计的依据。通过多次设计——分析计算迭代,最后达到技术指标要求止。

## 5 应用实例

利用动态分析设计的手段,在多种空间光学仪器的设计中,通过模态分析、随机振动响应分析计算较好地解决了合理的设计参数选取问题,并在可行性的基础上进一步实现了优化设计。在工业设备的设计制造方面,由于采用动态分析设计方法,很好地解决了矿井提升钢丝绳的选型问题,与传统方法相比,可以降低两个安全系数,而每降低一个安全系数可节省钢丝绳直接投资的 8%~ 10%,仅煤矿系统一年就消耗上万根钢丝绳<sup>[5]</sup>,可见由于设计方法的改进带来的效益是何等可观。

动态分析设计方法作为一种现代设计方法越来越引起人们的重视,这不仅是因为它更科学、更合理,使设计产品的质量、可靠性大大提高;而且它可以大大降低产品的成本(产品成本的 70% 是由设计阶段决定),获取更大的经济效益。随着计算机应用的普及及计算技术的不断提高和完善,动态分析设计方法也必将会越来越受到人们的重视,逐渐推广应用。

### 参 考 文 献

- 1 市川邦彦 机械振动学 北京: 科学出版社, 1978 387~ 391
- 2 Dossing Ole Going Beyond Modal Analysis or MAC in a New Key. Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Modal Analysis Conference, Nashville, Tennessee, U SA 1995. 24~ 32
- 3 庄表中, 黄志强 振动分析基础, 北京: 科学出版社, 1985 47~ 57
- 4 Vukobratovich Daniel Advanced Topics in Optomechanical Design Short Course Notes, 1990 75~ 95
- 5 刘桂斋, 焦岩 随机振动理论在矿用提升钢丝绳选型计算中的应用 全国第三届随机振动学术会议论文集, 1991. 283~ 290

## Study on Dynamical Analysis Design Method of Optical Instrument Structure

LU E

*(Changchun Institute of Optics Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)*

JIAO Yan

*(Jilin Vocational Teachers College, Changchun 130000)*

### Abstract

This paper describes the Dynamic Analysis Design as a modern design way is necessary for R & D of optical instrument design, the goal and task of it is also stated. The basic way of Dynamic Analysis Design is discussed and the advantages of it are mentioned here with some practical examples too.

**Key words:** Dynamic analysis, Design, Modal analysis, Random vibration

卢 镔 男 1941 年生, 1965 年毕业于哈尔滨工业大学机械系, 1984~ 1985 在英国计算力学所进修, 现从事机械 CAD/CAE/CAM 工作, 研究员