

大型光学仪器的CAT技术

韩荣久 卢 铿

摘要: 本文论述了由CAT完成的试验模态分析的基本技术问题, CAT与CAD的关系, 以及在我所开展CAT工作的必要性及某些设想。

一、前 言

现代科学技术的发展, 特别是航天航空、高能物理、激光及智能机器的发展, 使与相匹配的大型光学仪器的设计正面临着新的挑战。现代设计要求大型光学仪器的技术规范直接作为设计参数, 这样当我们在纸面上完成了设计, 就应当已经知道了它的动态性能, 它的响应。这就要求在设计阶段广泛地采用CAD技术, 用计算机建立设计的数学模型, 并把它形象地模拟出来。这是我们从传统的经验设计走出来, 走向理性地、用定量分析进行工程设计实现设计现代化的可贵一步。还接着进行样机制造并进行试验, 实地的对某些构件乃至整台仪器进行动态试验, 并和CAD的结果进行比较, 对仪器的某些部份作出修改, 完成一个最优化的设计过程。这些试验也要借助计算机加上某些测试装置来完成, 这就是目前人们通称的CAT (计算机辅助测试)

CAT不是简单的某一个试验中使用了计算机就算是CAT了, 它是针对机械工程设计, 相对于CAD而言。CAT是以计算机为核心具有数据采集、信号处理及模态分析功能的计算机辅助测试系统, 用以完成对某个机械构件或整个系统的动静特性进行测试的一个有计算机参加的工程分析系统。它是一个复杂产品动态设计、故障诊断及质量控制的重要手段, 是CAD工作的自然延续和必需的补充, 二者相辅相成缺一不可, 是整个仪器设计过程中不可缺少的二个组成部份。

在CAD的工程分析阶段, 设计者根据仪器的技术规范进行创造性构思, 提出不同方案, 充分论证它的可行性, 进行优化选择, 排出物理数学模型进行动力学分析。传统的结构动力学分析是从基本的力学原理出发, 作出若干假设, 使用有限元技术建立结构物理数学模型, 并计算结构对载荷的动力学响应。计算的响应能否与实际相符, 取决于所建立的物理数学模型——这是结构动力学分析的正问题, 由CAD来完成。

由于近代大型光学仪器结构的复杂性, 以及我们所采用的新材料、新工艺等, 这种解析计算的近似程度在产品制造之前作出预估是很困难的。仅仅研究结构动力学分析的正问题, 去预估整个结构的动态特性是很不够的, 我们还需要作另一方面的研究, 这就是结构动力学分析的逆问题, 利用系统的输出与输入的测试数据去建立结构的数学模型, 这就是CAT要完成的工作, 而这种建立在实际测试之上的数学模型才是可靠的, 我们才确切的知道了我们所设计仪器的动态性能, 我们才最终的完成了设计。

近年来国际上，CAD和CAT技术迅速地发展着，这首先是由于科学技术发展的需要，要求在给定的时间内具有绝对的可靠性和工作精度，不但要求考虑静特性，还要考虑动特性。正是这种需求刺激了测试和分析技术的发展，CAT技术就是从动态测试技术发展起来的。电子技术、计算机技术、传感器的发展，特别是FFT技术的迅速发展，各种数字信号分析仪器的不断涌现，各种模态分析综合软件的不推出，形成了各种不同的CAT系统；如有的信号分析仪本身已经突破了分析仪的框框，成为一个多功能的测试及分析系统——一个完整的CAT系统。其中还加进去有限元修改结构动力参数软件与CAD紧密结合，组成了机械工程设计中心，如HP公司的ME系列90测试系统，有的以32位微处理器的通用计算机为核心，加进数据采集及信号处理的专用大规模集成电路，分析部分加进模态分析综合软件形成CAT系统与CAD共同组成机械工程设计中心。

二、试验模态分析

机械工程的CAT主要是用计算机来完成对构件或整个系统的模态分析，在这里我们简要介绍一下模态分析的若干基本技术。

模态分析的主要思想是利用线性系统的叠加原理，分别研究一个复杂系统的各阶固有频率附近的动力学特性，相应地给出各阶模态参数。模态分析实际上就是确定结构系统振型的过程，这种模态分析过程，可以由计算机也可由试验来完成，是一个问题的两种手段，一个问题的正逆，现代的模态分析技术一般是专指试验分析，这是CAT的主要工作内容。

1. 模态实验

基于线性叠加原理，多自由度（MDOF）线性系统的动态特性，可以分解为若干单自由度（SDOF）模态的叠加。每阶模态相当于一个单自由度系统，可用模态参数来表征。模态试验就是采用某种激励方式，人为地对试验对象产生一定的振动响应，根据激励和响应建立其传递函数或频率响应函数，在所感兴趣的全部测点对激振点的传递函数组成的传递函数阵和对应的相干函数，进行曲线拟合，通过参数识别计算出被测系统（可以是整机或构件）的固有频率，模态阻压和模态振型等模态参数，建立由模态参数表征的数学模型，并在图形终端上将振动模态的全部动态过程以活动图像——动画的形式显示出来，给人以一个直观清晰的图像。图1是模态试验的示意图。一般包括三个部份，激励、测量和分析组成一个完整的CAT系统，最后由计算机完成被测系统的识别，给出各阶模态参数和动画。

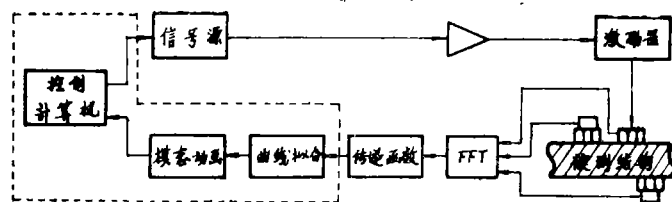


图1

2. 模态参数识别

通常, 一个被测系统对我们来说并非是一个一无所知的“黑箱”, 往往可以作出一些合理的假设, 对于动力学参数的识别, 一般采用离散化的数学模型, 其描述方程为:

$$m\{x''\} + c\{x'\} + k\{x\} = \{f\}$$

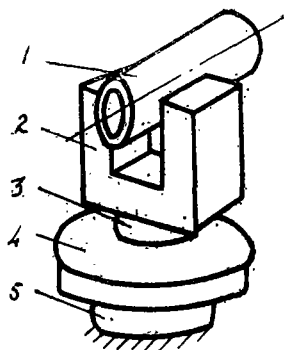
式中, m 、 c 、 k 分别为所研究结构的质量、阻尼、刚度等物理参数矩阵, 若三者都已知则系统就完全确定了。这三个矩阵中包含了大量的未知元素, 加上数学模型本身的自由度高, 这种物理参数的识别, 由于未知数的个数太多而难以进行。所以目前广泛应用的是模态参数识别, 这种识别在数学上是根据激励和响应的试验数据, 来识别结构的特征值和特征向量, 从而获得一个系统动态特性的数学描述和物理参数识别相比, 未知数少了许多, 我们只关心一定频率范围内各阶固有频率附近的事以振动模态为自由度, 大大的减少了自由度, 更由于模态参数是系统的固有特性, 数学结果是唯一的, 所以这种识别方法容易取得成功, 对工程的动力学分析和故障诊断就显得重要了。

模态识别就是寻求一个适当的数学模型及其接近被测系统的实际特性, 并确定所选数学模型参数的过程。

常用的识别方法有频域法和时域法, 将时域用微分方程表示的运动, 经过 FFT 变换到频域上就表现为代数方程的形式, 从频响函数就可以识别出固有频率、阻尼等参数, 比较直观, 图 1 所示就是常用的频域法。当所研究系统阻尼较小, 模态不太密集时, 常采用实模态模型, 而当阻尼较大, 特别是存在着粘性阻尼时, 则要用复模态模型了, 即在复空间进行模态转换。模态参数识别, 这牵扯到复杂的数学运算, 这里就不一一赘述了。

3. 示例

靶场光电经纬仪的研制, 使我们走过了测绘仿制到自行设计的全过程。在研制过程仪器的结构动态特性中是我们感到必须解决的问题。传统的方法是用露尔兹法对其动态刚度进行估算, 从而得到自振频率和振型。随着现代光电经纬仪复杂程度的提高, 这种估算和停留在凭经验的设计方法, 已经不能满足高技术飞速发展的要求, 使我们的竞争能力降低, 现代设计要求必须在设计阶段就能预估它的动态性能, 这就是我们要急需开展 CAD 和 CAT 工作, 采用模态分析方法进行动态设计。



- 1—俯仰轴以上部份
- 2—俯仰轴支架部份
- 3—中部
- 4—外转台
- 5—底部

图 2

模态分析首先是用有限元法,将光电经纬仪系统模型化,如图2所示,经纬仪系统看成是由若干构件按一定联接方法组成的结构整体,并由伺服控制系统形成一个完整的机电系统,图2。

一般说来,模态分析首先由计算机进行概念设计产生结构实体模型,然后进行工程分析,预示出结构的主要模态。而由CAT完成的结构模态试验,要以上述的CAD工作为依据,进行实验设计,并最终精确地测出结构动态特性的输入输出数据。

实验设计包括

1. 确定实验频带。
2. 选择激振形式,激振点的位置和保证不过载的容许极限。
3. 选择测点位置和测点数目,配置适当的测量系统并选择适当的测试通道的灵敏度。
4. 根据有效质量和动能分布,预示结构主模态,并进行模态参数识别。
5. 将测试结果与计算结果对比,给出自由度和测点一致的质量矩阵和未测自由度的Guyan转换矩阵。
6. 根据计算结果预示并解释试验结果和试验中出现的现象。

在样机加工制造之前,由工程分析给出的数学模型是一个需要验证的数学模型,具有一定的不完善性,这正是CAD和CAT互相补充相辅相成的所在,而CAT工作则是得到实际的精确解的过程——作为结构状态检测和性能改进的依据。

模态分析的另一个重要目的是我们还知道怎样去改善一个结构的动态特性,这有时要根据我们的工作经验和判断能力进行分析,有时我们可以通过模态分析直接找到影响整个动态特性的薄弱环节——找到敏感参数,并作出改进,这工作现代的模态综合软件已使我们不必去再加工试验构件,使用结构动力参数修改软件,我们可以直接修改某一个或某几个构件的结构参数,不必去修改其它构件的已知结果。只把修改构件参数加进去,只修改某个构件的模态参数,重新预示整个模态参数的变化,得到改进的系统动态特性参数,直到我们满意为止。这对设计是非常有意义的,对提高产品设计质量及缩短研制周期起着非常关键的作用。

三、结 束 语

以上我们简单介绍了CAT要完成的工作——模态分析的主要内容,模态分析是一项工程性很强的技术。它要求结构设计,计算分析和实验密切合作,共同进行结构模型化,环境模拟,优化设计和试验验证,发挥动态设计在整个设计工作中的作用,进而保证所设计仪器的结构性能、可靠性及其经济性。美国1982年发表的军用标准MIL-STD-1540B(空间飞行器环境实验要求),正式将模态试验列为研究性试验项目之一,并明确规定必须对飞行器整体结构和子结构进行模态试验,获得0~5.0Hz频带的固有频率、阻尼系数和振型。法国取名为SPOT的空间相机的研制过程中,具体的使用了CAD和CAT技术,其中各种实验竟用掉19个月的时间,可见实验工作在空间光学仪器研制的重要性。显然,我国科研和高技术的发展,要求我们对研制的各种陆用或空间使用的大型光学仪器,建立其模态特性数据库——CAD和CAT一体化的工程数据库。这对设计工作的现代化和研制出满足不断增长的工作精度和可靠性要求的大型光学仪器,都是必不可少的。

本工作得到13室边振绵、王家祯等领导同志的支持,王家祯同志校阅了全文并提出宝贵意见,在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] D. J. Ewins, Modal Testing, Theory and Practice, Research Studies Press, 1984.
- [2] 汪凤泉, 郑万泔, 试验振动分析, 江苏科学技术出版社, 1988.

CAT Technology for Large Optical Instruments

Han Rongjiu Lu E

Abstract

This paper mainly describes some fundamental problems of Testing Modal Analysis Technology by means of CAT, including the relationship between CAD and CAT, necessity of CAT research and some tentative ideas of carrying out CAT in our Institute.