

CAE技术在ATP系统R&D中的应用

卢 铿 唐家鹏* 杨洪波

摘要 描述了CAE技术在ATP（扑获、跟踪、瞄准）系统的R&D中的应用，探讨了建立用于ATP系统的光、机、电、热一体化工程分析与模拟软件包框架方案，通过实例说明其可行性及优越性。

一、CAE与R&D

CAE作为一种现代化的工程和产品研究与开发（R&D）手段，已引起人们越来越大的关注。目前，各工业化国家把CAE视为在R&D实施过程中必不可少的工具，并作为全面质量管理（TQC）的一个重要环节。

CAE的基本含义可理解为运用计算机辅助手段实现工程研制与产品开发的分析与模拟。随着计算机软硬件支撑环境（如：科学运算、图形与图像显示及通讯等）能力的不断增强，人们对工程研制与产品开发过程描述的量化程度不断提高，CAE的内涵也逐渐扩大，从工程或产品本身的建模与模拟，扩大到对工程或产品实施R&D过程的描述、建模及模拟。目前，CAE基本上处于对工程或产品本身的建模与模拟阶段。CAE对传统的R&D手段变革起了巨大的推动作用，使人们在工程研制与产品开发方式上产生了质的飞跃。传统的工程研制或产品开发是以手工详细工程设计（2D出图）为出发点，制作样机为目标驱动；CAE手段则是以工程或产品建模（3D模型构造）为出发点，对模型进行分析与模拟为目标驱动。采用CAE手段不仅可以使工程研制或产品开发的周期大大缩短，而且由于在样机制作出来之前通过分析与模拟对“产品”进行定量评价，可进行可行性论证及优化设计，从而使设计的质量大大提高。可以说，CAE就是实现在计算机上“制造”（建模）并“测试”（分析与模拟）“样机”（模型）的过程。所谓建模，是指在计算机或CAD工作站屏幕上构造3D实体模型的过程。由于3D实体模型不仅可以体现“产品”的几何与拓扑信息，还包含有“产品”的物理属性、富有质感的美学信息，使设计工作者可对“产品”进行定性及部分定量的评估。在此基础上对“产品”进行在“使用环境条件”下的工程分析与模拟，并利用计算机强大的运算能力及图形、图像、动画等显示功能，对工程分析结果加以直观、生动的说明，可以实现对“产品”性能进行定量评估及仿真，诸如：系统的动态特性、稳定性以及在使用环境条件下的系统响应等等。采用CAE手段可以实现“产品”产前的性能评估的优越性，大大提高了设计“满意”产品的成功概率，使产品的性能价格比得以明显的改进。难怪美国在机械设计（Machine Design）杂志上曾载文揭示日本成为经济大国的秘诀时说：“运用CAE手段进行产品开发是使日本企业在国际市场竞争中称雄的重要原因之一”。可见CAE在

注：* 中国大恒公司激光加工中心

R & D过程中是何等重要。

二、CAE与ATP系统的R&D

ATP (扑获、跟踪、瞄准)系统,无论对于陆基还是空间的使用来说,在R&D实施过程中所要考虑的一个关键问题是如何使所设计的光电系统在有干扰或结构变形的情况下保持精确的同心度(LOS)^[1],对于跟踪与瞄准系统来说尤其如此。影响ATP系统的LOS因素有很多,除因设计不当直接造成系统LOS精度降低外,还有环境的影响,如温度场变化、冲击振动以及加工、装配不合适等等。为了保证系统的同心度,在设计阶段时就要根据对系统所提的技术要求及影响LOS的各种因素进行分析和综合考虑,然后提出折中的设计方案。这个过程往往要花费很多时间,更主要的是有些影响因素对系统LOS的影响程度无法预见,更谈不上对各个影响因素进行综合考虑以及提出相应对策。所有这些往往都要等到样机加工出来并经过实际测试后才能有所认识,才算完成了一个认识过程的循环。对ATP系统来说,这种认识过程的循环周期往往要2—3年甚至更长些时间;此外,传统的设计方式主要靠凭经验及类比的方法进行,考虑问题也往往局限于单一学科,例如机械结构设计师只关心结构问题,光学或电学设计师们也只是分别关心光学系统或电路、控制系统等,缺乏统筹考虑,特别是缺乏站在系统高度定量地考虑如何保证系统的LOS。目前,随着高科技的迅猛发展,对ATP系统的要求也越来越高,特别是跟踪与瞄准系统,其LOS的指标不断提高,例如,光电经纬仪的跟踪误差现已要求达到角秒级,而跟踪误差是由系统的LOS与目标的LOS差值的RMS决定,此外,对系统的稳定性、快速响应性及可靠性等等都提出了更高的要求^[2]。ATP系统使用的环境也更加苛刻,无论对于陆基或空间ATP系统的设计来说,设计师们都将遇到一些以往经验所不及的苛刻的设计要求,如何在新的环境条件下使系统LOS保持不变,无疑,对设计师来说将是一个严峻的挑战。新的形势与落后的手段间巨大的反差迫使我们寻求更有效的手段,而CAE正是这样一种高效的手段。运用CAE技术不仅可以实现对所研制的ATP系统在制造前对性能进行评估,而且可以从系统高度对光、机、电(控制)等环节在外界环境干扰下对LOS精度的影响和贡献进行模拟与仿真,为进一步揭示系统内诸环节的内在关系、进行灵敏度分析及系统优化设计提供方便的手段。

三、ATP系统光/机/电(控制)/热一体化工程分析模型建立

尽管ATP系统有多种形式,然而无论是用于空间的系统还是陆基的系统,都离不开光电传感器、提供跟瞄运动及支撑光学系统的机械座架,伺服控制分系统等光、机、电三大部分。在ATP系统研制与开发过程的初期,人们所关心的是设计方案能否满足LOS精度的要求以及在外界环境干扰作用下LOS系统响应值变化能否超出许用范围。为了验证设计方案的合理性及探明环境因素对系统值的影响,采用CAE技术对系统进行仿真与模拟,有必要建立适应于ATP系统的光/机/电/热一体化工程分析模型。在建模的基础上建立人机交互与批处理相结合的工程分析与模拟软件包,供ATP系统研制开发的工程技术人员进行CAE操作。

建立ATP系统光/机/电/热一体化工程分析模型的指导思想与依据如下:

(1) 从系统的观点出发, 进行系统分析, 确定组成ATP系统的功能模块, 建立各功能模块的数学模型, 探讨各功能模块间相互关系;

(2) 运用控制论的观点和方法, 建立ATP系统的模型, 目的在于探讨系统在各种输入信号作用下种种功能输出, 尤其是系统LOS的变化;

(3) ATP系统实现光/机/电(控制)热一体化工程分析数学模型的依据:

- 组成ATP系统的光、机、电、热(可能来自外界干扰, 也可能是系统自身带的热源)各子系统不仅在逻辑上与物理上具有密切的“输入”与“输出”连接关系, 而且在数学模型上体现这种“输入”与“输出”关系的数据流具有连贯性与一致性, 这是由于系统中光、机、电、热对LOS的影响都直接或间接地与系统几何尺寸相关(包括位置误差与变形), 这种相关构成了相互联系的纽带;

- ATP系统中机械结构动力学控制方程、伺服控制系统传递函数及温度场描述等数学模型表达具有相似性, 这种相似性使建立统一的数学模型对整个物理系统加以描述成为可能。

图1所示为描述ATP系统光、机、电、热一体化工程分析数学模型框图。

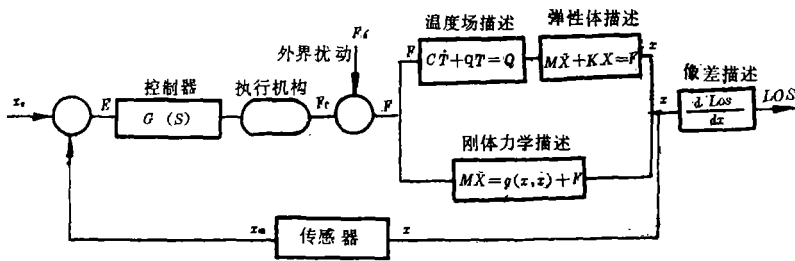


图1 光/机/电/热一体化工程分析模型框图

在建立系统的数学模型时, 为便于组装和计算, 应将光、机、电、热等有关物理量用广义坐标表达。对于象电量(如电流、电压等)这样具有单向性的物理量, 可以通过非对称矩阵的方式表达, 经过这样一些处理后, 即可着手进行系统模型组装, 然后联立求解, 就可实现系统整体的工程分析与模拟。

在实际系统模型组装中, 对于结构变形计算, 采用SAP6、I-deas及Ansys等流行的有限元分析程序, 通过有关接口程序并入到系统中。

运用光、机、电、热一体化工程分析与模拟的手段, 曾结合实际工程项目进行分析与模拟, 取得了有意义的结果, 对工程设计方案的选取、可行性论证及优化设计提供了有价值的参考。

四、应 用

例1^[3]、某空间光电制导系统, 其光学系统为Cassegrain结构。该系统承受太阳辐射的热载荷。欲探讨在热载荷作用下对该系统光学像差的影响。该例仅涉及光、机、热间相互作用与耦合问题。采用CAE手段进行工程分析与模拟包括如下步骤:

- (1) 温度场分析。求出在太阳辐射作用下系统内各处温度分布的梯度;
- (2) 根据温度梯度分布情况, 求出系统结构的变形, 其中包括主镜、次镜及CCD焦面

等相对位置的变化: 平移与倾斜, 还有镜面自身变形引起矢径矢高的变化;

(3) 光学系统像差计算, 并先计算出系统在无载荷作用下的像差, 尔后再求加上热载荷后的像差。由分析计算结果可得出模拟环境温度变化引起系统像差变化的规律。如以轴上球差为例, 取 $HR = 1.0$ 的一组值。随着环境温度从 0°C 上升到 90°C , 130°C 等工况时系统轴上球差对应为 $\delta_L'_{1} = 5.3986$, $\delta_L'_{2} = 5.4121$, $\delta_L'_{3} = 5.425$, 详细计算结果参考文献^[3]。根据工程分析与模拟的结果可以直接得出环境变化对系统性能、精度的影响规律, 从中可评价系统方案的可行性以及通过改变系统参数, 完成像差平衡的优化设计, 使系统达到满足使用环境条件作用下的 LOS 及像差等要求。

例 2^[4] 某用于空间仿真试验的精密随动三轴系统, 要求测角精度 $< 2''$ 。为满足这一指标要求, 需探讨系统的动态特性及稳定性, 寻求提高系统动态刚度、避免系统 LOS 抖动的途径。影响系统 LOS 抖动的因素主要来自三轴机械结构的动态刚度及伺服控制环节, 为此对该系统进行了包括机械结构与伺服控制系统在内的动态特性分析及稳定性分析^[5]。通过分析及模拟, 找到了影响动态刚度及 LOS 精度的薄弱环节, 为改进系统设计提供有实用的价值参考。分析计算结果与实测结果十分接近: 系统自振频率的计算值为 73Hz (一阶), 实测值为 69Hz (一阶) 由于分析与模拟是从系统高度, 光、机、电统筹考虑, 这就为实现系统折中的满意解提供了方便的手段。

五、结 论

近年来, CAE 技术在 ATP 系统的研制与开发中的应用越来越广泛, 有关软件的开发也引起人们的关注, 有的软件包已在实际工程中得到了应用^{[6][7]}取得了明显的效果。我们所作的工作只是为实现用于 ATP 系统的光、机、电、热一体化工程分析与模拟软件包在理论依据、实现途径、方法上进行了初步探索与开发, 许多方面还有待进一步完善。

参 考 文 献

- [1] Bobby L.Ulich; SPIE, 887, (1988)
- [2] D.Vukobratovich; SPIE, 817, (1987)
- [3] 唐家鹏; 理学硕士学位论文, 长春光机所, 1988
- [4] 杨洪波; 理学硕士学位论文, 长春光机所, 1991
- [5] Lu Eh et al.; SPIE, 1533, (1991)
- [6] J.Miller, et. al.; Proc.SPIE, 121, 146(1977)
- [7] D.B.Schaechter; Proc.SPIE, 1303, (1990)

The Application of CAE Technology to R&D for ATP System

Lu E, Tang Jiapong and Yang Hongbo

Abstract

The application of CAE technology to R&D for ATP system has been described in this paper. Discussion on creating the Optical/Mechanics/Electronics/Thermodynamics integrated software package used for ATP system analysis and simulation has been carried out. The feasible and superiority of the package were shown by taking some examples.