

文章编号: 0253-2239(2009)10-2866-05

光机系统集成分析仿真研究

史建亮^{1,2} 任 戈¹

(¹ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 在与传统的光机系统设计方法对比下, 构建了光机系统集成分析仿真的基本框架。以望远镜镜面为研究对象, 选择 Patran, Matlab/Simulink 和 Zemax 作为软件环境, 分别建立各自的独立模型, 探讨了光机系统集成化分析的实现策略。在简要研究模型创建、模型简化等技术的基础上, 编制了结构控制接口工具, 实现了光机系统结构和控制的集成分析。在研究动态数据交换 (DDE) 技术的基础上, 探讨了大数目光线追迹问题的解决方案, 实现了 Matlab 和 Zemax 的动态数据交换和光机系统的光控集成分析, 达到了光机系统光机控制集成分析的目的。

关键词 光机系统; 集成分析; 接口; 动态数据交换 (DDE)

中图分类号 TN941.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092910.2866

Integrated Analysis and Simulation of Opto-Mechanical System

Shi Jianliang^{1,2} Ren Ge¹

(¹ Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract With the comparison to traditional design method in opto-mechanical system, the basic frame of integrated analysis and simulation was conceived. A mirror in telescope was taken as an example, and Patran, Matlab/Simulink and Zemax were selected as the software environment, the each independent model was set up respectively, the realization methods for integrated analysis were discussed. On the basis of brief study on model generation and model reduction, the structural control interface tool was developed, and the structure control integrated analysis in mechanical/optical system was implemented. On the basis of study on dynamic data exchange (DDE), the method to the problem of a large number of ray tracing was discussed. The DDE of Matlab and Zemax and optical control integrated analysis in opto-mechanical system were implemented. The purpose of opto-mechanical control integrated analysis in opto-mechanical system was achieved.

Key words opto-mechanical system; integrated analysis; interface; dynamic data exchange (DDE)

1 引 言

传统的光机系统设计方法遵循公差分配的思想, 从满足光学系统的性能指标出发, 给出各项参数的变化对成像质量影响的变化范围, 然后给光学系统各部分分配误差量。这种设计方法曾经在光机产品的概念设计中发挥了重要的作用, 但随着光机系统向大型化和复杂化发展, 已对这种基于经验的传

统设计方法提出了挑战^[1]。光机系统集成分析方法就是在这种背景下提出的。它是基于光机系统光学系统设计、机械结构设计及分析和自动控制系统设计三大基本模块的常用软件, 建立各自相对独立的模型, 由计算机程序将三者有机地联系起来, 构成一个集成的光机系统模型, 用以对各模块之间的相互作用及接口进行校验、工作性能分析和优化设

收稿日期: 2008-11-05; 收到修改稿日期: 2009-03-09

基金项目: 国家 863 计划资助课题。

作者简介: 史建亮 (1979—), 男, 博士研究生, 主要从事光机系统的集成与仿真技术等方面的研究。

E-mail: zrf2003.student@sina.com

导师简介: 任 戈 (1964—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事精密跟踪控制技术与系统工程等方面的研究。

E-mail: gren@ioe.ac.cn

计^[2~9]。本文以一望远镜镜面为例，给出了光机系统集成建模与仿真的基本框架，通过研究模型建立和模型简化，编制了结构控制接口工具。为实现仿真的同步性研究了控制、光学软件间动态数据交换 (DDE)。

2 光机系统集成建模与仿真的基本框架

目前市场上比较常用的一些专业软件都已相对成熟，并有很大的市场占有率，因此开发一套全新的集各专业于一体的集成分析软件是没有必要而且也会造成资源的浪费。集成分析仿真工具就是通过一些接口软件将这些功能强大的专业软件连成一个整体^[10,11]。这样就可发挥各专业软件的优点同时也减轻了设计者的学习负担。通过该仿真系统可进行光、机、控制集成分析，其仿真运行环境如图 1 所示。其中 Matlab/Simulink 为集成仿真平台的核心，在该环境中构建光机系统的控制模型，在有限元软件 Patran 环境中构建光机系统的结构模型，在光学分析软件 Zemax 环境中构建光机系统的光学模型，这三个模型都是相对独立的，三个软件所支持的数据

结构也是不同的，这就需要构造它们之间的接口通道来实现三者的有机结合^[12]。因此需要研究数据转换算法、模型简化方法及动态数据交换 (DDE) 等技术。在此基础上编制结构控制接口工具实现结构模型和控制模型的有机联系，编制 DDE 工具实现 Matlab 和 Zemax 的动态连接。这样就实现了光、结构和控制的集成分析与仿真，大大地提高了光机产品的设计效率。

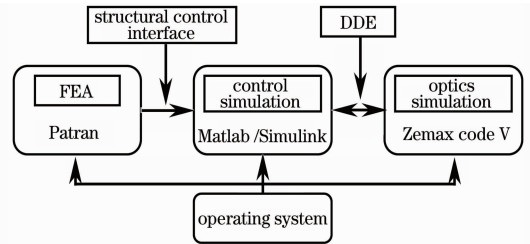


图 1 光机集成仿真的基本框架

Fig. 1 The basic frame of mechanical/optical integrated simulation

3 结构控制接口的实现

结构控制接口工具主要运行于如图 2 所示环境中^[13]。

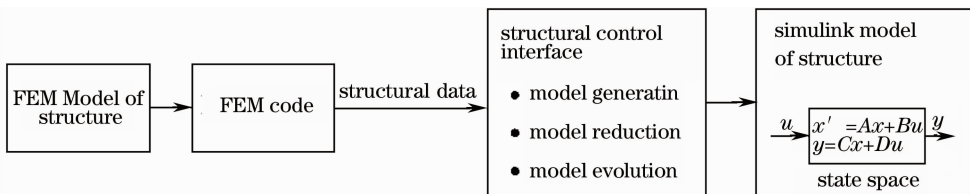


图 2 结构-控制接口的运行环境

Fig. 2 The run environment of structure and control interface

有限元软件分析得到的结构数据作为输入数据，在其导入接口工具后，通过模型数据转换、模型简化和模型评估，得到了 Matlab/Simulink 仿真环境可接收的状态空间系数矩阵，这些系数矩阵作为结构-控制接口的输出数据，可将其导入 Matlab/Simulink 得到状态空间方程。这时，系统结构模型已实现了由有限元软件向 Matlab/Simulink 的传送。这一环节是后续仿真工作的关键。

3.1 模型创建

有限元分析得到系统的质量和刚度矩阵，这些

数据是不能被 Matlab 使用的，需要将其转换为 Matlab/Simulink 可接收的状态空间方程。标准的状态空间方程如下：

$$\dot{x} = Ax + Bu, \tag{1}$$

$$y = Cx + Du, \tag{2}$$

其中 x 表示系统状态向量， y 表示系统输出向量， u 表示系统输入向量， A, B, C, D 分别表示状态空间方程的系数矩阵。对上式进一步细化，并通过模型转换可得到

$$\begin{Bmatrix} \dot{q} \\ \ddot{q} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & E \\ -\text{diag}(\omega_i^2) & -\text{diag}(2\xi_i\omega_i) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q \\ \dot{q} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \phi^T P_L \end{bmatrix} u, \tag{3}$$

$$y = [P_S^T \phi, 0] \begin{Bmatrix} q \\ \dot{q} \end{Bmatrix} + 0, \tag{4}$$

其中 q 代表节点的自由度, diag 表示对角矩阵, ω_i 代表系统固有频率, ξ_i 代表模态阻尼系数, ϕ 表示模态振型向量, P_L 表示载荷向量矩阵, P_S 表示系统输出量矩阵。对于不同的输入输出, P_L 和 P_S 有不同的形式。 P_L 矩阵包含了载荷的作用方向和分布情况, P_S 矩阵包含了输出量的方向及分布情况。

3.2 模型简化及结构控制接口工具

由于光机系统的复杂性,在将结构模型集成到控制模型后,计算规模急剧增大,从计算机能力和计算时间来考虑,需要进行模型简化^[14,15]。本文没有给出具体的模型简化算法,而只给出通过模型降阶

方法得到的一些结果。以一望远镜镜面为例,首先通过 Patran 构建了结构有限元模型,如图 3 所示。

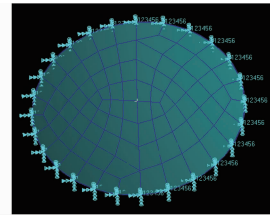


图 3 镜面的有限元模型

Fig. 3 Finite element model of mirror

采用二阶降阶方法对系统进行简化,得到简化模型在频域响应曲线,如图 4 所示。

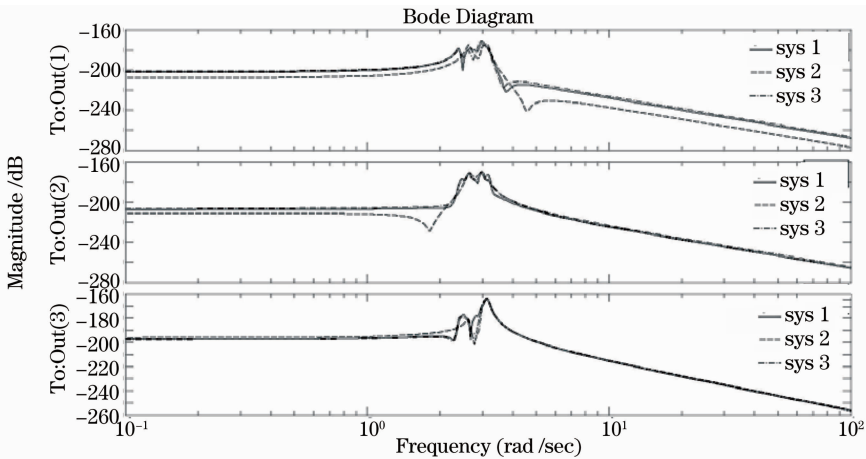


图 4 简化模型在频域的 Bode 图

Fig. 4 Bode graph of reduced system

其中 sys 1 代表原系统(40 个状态), sys 2 代表 6 个状态的简化系统, sys 3 代表 10 个状态的简化系统。sys 3 简化系统在高频和低频段都保留了很高的精度。其中频率在 100 Hz 时,相对误差仅为 0.3731%。因此采用二阶降阶方法能够实现模型简化,同时保留了很高的简化精度。

在此基础上编制了结构控制接口工具,它包括模型创建和模型简化及模型评估模块。模型创建模块可将有限元结果数据转换为状态空间方程的系数矩阵,以便 Matlab 使用。模型简化模块集成了五种一阶降阶方法和三种二阶降阶方法。模型评估模块可对简化模型进行评估分析,它引入了 Matlab 内置

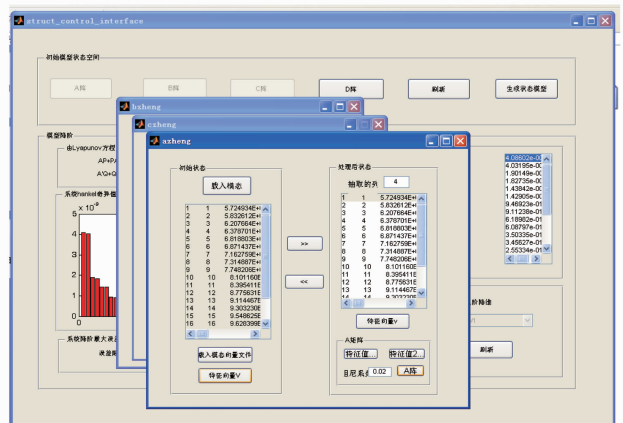
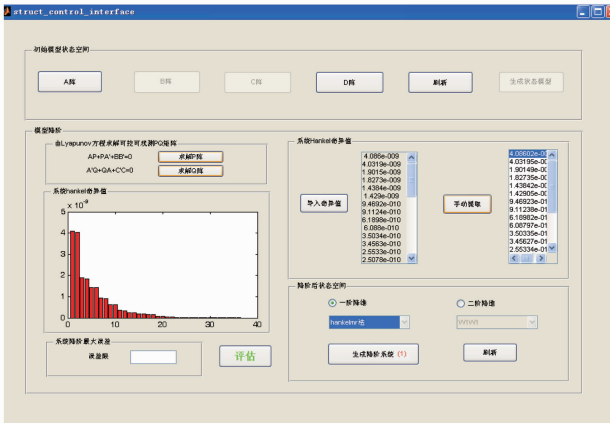


图 5 结构-控制接口工具的用户界面

Fig. 5 Graph user interface of structural control interface tool

的 LTI Viewer,可方便进行时域与频域分析。其结构控制接口工具用户界面如图 5 所示。

4 Matlab 和 Zemax 的动态数据交换 (DDE)

Windows 的 DDE 机制基于 Windows 的消息机制。两个 Windows 应用程序通过相互之间传递 DDE 消息进行 DDE 会话,从而完成数据请求、应答、传输。这两个应用程序分别称为服务器和客户。服务器是数据的提供者,客户是数据请求和接受者。本仿真系统中的 Matlab 和 Zemax 都支持 DDE 协议^[16]。Zemax 具有内置的 DDE 服务器,允许其它 Windows 应用程序调用。在 Zemax 启动后,DDE 服务器就已经准备就绪等待客户程序的请求。Zemax 和 Matlab 之间的 DDE 可通过 如图 6 所示四步实现。

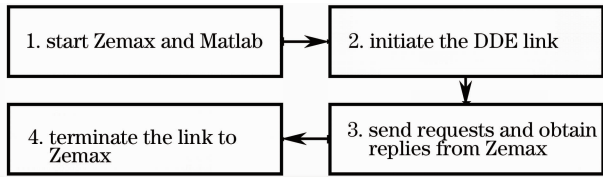


图 6 Matlab 和 Zemax 建立 DDE 的步骤流程图
Fig. 6 Step flow chart of the DDE of Matlab to Zemax

在通常情况下,每次建立 DDE 时,光线仅能追迹一条,这样效率是很低的。在光线很大的情况下,需要考虑大数目光线追迹的问题。可以将这些需要追迹的光线进行列表,形成一个矩阵,这时就可将这一矩阵一次性传送给 Zemax。在这个矩阵中包含了所有光线的情况。Zemax 得到这一矩阵后开始进行光线追迹,并将追迹结果返回客户程序 Matlab。通过 DDE 传送的不是追迹光线所得到的数据,而是传送指向该数据矩阵的一个指针。这样就可突破进行大数目光线追迹时 DDE 通信所存在的瓶颈。表 1 列出了大数目光线追迹时的耗时对比。它是采用 IntelCore(TM) 2CPU(2.13 GHz, 1.57 GHz)所得到的数据。从表中可看出随着追迹光线数目的增加,平均每条光线所用追迹时间单调减小。

在 Zemax 中建立好对应的光学模型,在 Matlab/Simulink 中创建控制模型,将 DDE 程序写入 Matlab Function 模块,State Space 模块中的数据是通过结构控制接口工具得到的镜面结构数据,最后通过施加风载荷信号得到光机系统的光程差(OPD)均方根(RMS)值,如图 7 所示。

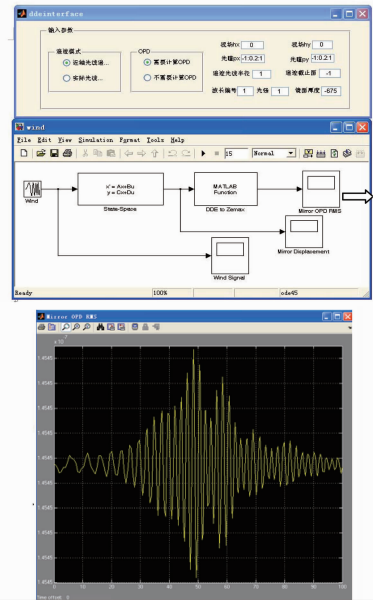


图 7 Simulink 环境下的系统仿真模型

Fig. 7 System simulation model in Simulink

表 1 光线追迹耗时对比

Table 1 The contrast of ray tracing time consumption

# Rays	Time /ms	Time per ray /ms
92	13.5	0.467
1257	23	0.018
7845	96.2	0.012
31417	354.9	0.011

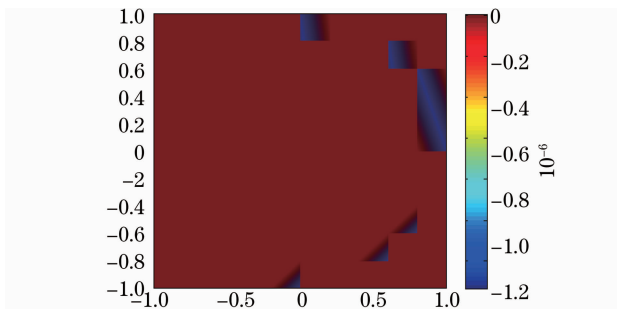


图 8 光机系统在 15 s 时像面 OPD 分布图

Fig. 8 Image plane OPD of mechanical/optical system in 15 s

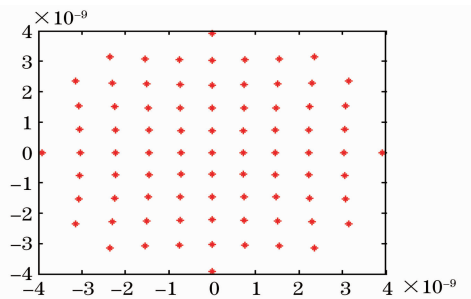


图 9 追迹光线像面分布面

Fig. 9 Distribution of tracing ray in image plane

同时得到系统在像面的 OPD 分布图和追迹的光线在像面的分布图,如图 8 和图 9 所示。

从得到的动态 OPD 分布图和追迹光线在像面的分布图就可得到整个光机系统在干扰作用下的动态光学性能,从而能够得到光机系统各变化因素的灵敏度矩阵。在此基础上进行优化设计变得更加容易。

5 结 论

光机系统集成分析是一种新型的光机产品设计方法,它比传统设计方法更加精确有效。本文通过研究结构控制接口,实现了结构模型与控制模型的集成。通过研究 DDE 技术,实现了控制模型与光学模型的集成。将光、结构和控制三者结合起来进行分析,使光机产品的设计更加科学、更加快捷。在分析过程中还出现了 Matlab 与 Zemax 动态数据交换的不稳定性,造成 Matlab 不明原因地退出,这些都是将来急需解决的问题,因此对 DDE 技术进行更深入地研究是今后光机系统集成分析研究中所开展的重要任务。

参 考 文 献

- 1 Scott Roberts, Simon Sun, Dan Kerley *et al.*. Optical performance analysis and optimization of large telescope structural designs[C]. *SPIE*, **5867**: 586700-1
- 2 G. Angeli, A. Segurson, R. Upton *et al.*. Integrated modeling tools for large ground based optical telescopes[C]. *SPIE*, 2004, **5178**: 49~63
- 3 R. Wilhelm, B. Koehler, H. Baier *et al.*. Integrated modeling for stellar interferometry-motivation, development strategy and practical usage[C]. *SPIE*, 2002, **4757**: 31~40
- 4 G. Z. Angeli, J. Dunn, S. Roberts *et al.*. Modeling tools to

- estimate the performance of the Thirty Meter Telescope: an integrated approach[C]. *SPIE*, 2004, **5497**: 237~250
- 5 M. Muller, R. Wilhelm, K. Scales *et al.*. The VLTI integrated model-a precursor model for integrated modeling of future telescopes[C]. *SPIE*, 2004, **5497**: 81~90
- 6 Zhang Wei, Deng Jian, Long Funian *et al.*. Image quality evaluation for segmented mirror synthetic aperture optics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 687~691
张 伟,邓 键,龙夫年等. 子孔径合成光学成像系统像质评价研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 687~691
- 7 J. D. Johnston, J. M. Howard, G. E. Mosier *et al.*. Integrated modeling activities for the James Webb Space Telescope; structural-thermal-optical analysis[C]. *SPIE*, 2004, **5487**: 600~610
- 8 Yang Yi, Chen Shijin, Zhang Wei. Review of thermal-structural-optical integrated analysis of space remote sensor[J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(6): 913~920
杨 恹,陈时锦,张 伟. 空间光学遥感器光机热集成分析技术综述[J]. *光学技术*, 2005, **31**(6): 913~920
- 9 Hang Xianxiang, Ma Changlin, Gao Qinhe *et al.*. Studies for collaborative simulation of large erection mechanism system[J]. *J. System Simulation*, 2007, **19**(1): 1~2
黄先祥,马长林,高钦和等. 大型装置起竖系统协同仿真研究[J]. *系统仿真学报*, 2007, **19**(1): 1~2
- 10 J. Dunn, S. Roberts, J. Fitzsimmons *et al.*. Very large optical telescope (VLOT) integrated model enhancements[C]. *SPIE*, 2004, **5497**: 520~530
- 11 T. Andersen, M. O. Petersen, H. Riewaldt. An integrated simulation model of the Euro50[C]. *SPIE*, 2002, **4757**: 84~92
- 12 M. Browne, T. Andersen, A. Enmark *et al.*. Parallelization of MATLAB for Euro50 integrated modeling [C]. *SPIE*, 2004, **5497**: 604~610
- 13 M. Mueller, H. Baier. SMI-a structural dynamics toolbox for integrated modeling[C]. *SPIE*, 2002, **4757**: 41~50
- 14 R. Yu, S. Roberts, I. Shart. Model order reduction of structural dynamics of a very large optical telescope[C]. *SPIE*, 2004, **5497**: 611~622
- 15 C. Teng. *Model Reduction of Second Order Linear Dynamical System* [D]. Rice university, Houston, 2004
- 16 P. Schipani, F. Perrotta, L. Marty. Integrated modeling approach for an active optics system [C]. *SPIE*, 2006, **6271**: 627116-1