

光栅刻划机的建模与仿真方法研究

刘栋材¹, 李端发¹, 练国富², 申 远¹, 竺长安¹

(1. 中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 合肥 230027; 2. 福建工程学院机电与自动化工程系, 福州 350108)

摘 要: 用于制作母光栅的光栅刻划机的性能指标直接决定最终生产的光栅质量。为此, 采用基于虚拟样机的联合仿真策略, 代替传统的物理样机开发。利用动力学分析软件 Pro/Engineer 和控制仿真软件 Simulink 分别建立光栅刻划机械动力学模型及控制系统模型, 实现机电一体化仿真分析。根据仿真结果确定控制系统参数, 实验结果表明, 使用该方法可降低开发成本, 提高研发效率。

关键词: 光栅刻划机; 虚拟样机; 联合仿真; 交互式仿真

Research on Modeling and Simulation Method of Grating Ruling Engine

LIU Dong-cai¹, LI Duan-fa¹, LIAN Guo-fu², SHEN Yuan¹, ZHU Chang-an¹

(1. Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

2. Department of Electromechanical and Automation Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108, China)

【Abstract】 Grating ruling engine, which is used to manufacture the master grating, directly determines the final quality of the production of grating. In this paper, co-simulation based on virtual prototype replaces the traditional physical prototype development. mechanical dynamic analysis software Pro/Engineer and control simulation software are used to build a grating ruling engine of mechanical dynamic model and controller model respectively. The mechatronics simulation is achieved and from the simulation result, the control parameter is determined. Using this method, cost is reduced and the efficiency of research is improved.

【Key words】 grating ruling engine; virtual prototype; co-simulation; interactive simulation

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.04.010

1 概述

光栅制造技术是当今最为精密的技术之一, 而用于制作母光栅的光栅刻划机则被誉为“精密机械之王”。目前, 国际上典型的光栅刻划机主要有美国麻省理工学院研制的 MIT-B 机、MIT-C 机及日本日立公司于 1992 年制造的光栅刻划机。其中, 日立公司制造的刻划机刻划密度达到 10 000 道/mm, 最大刻划面积为 200 m×300 m^[1]。国内某科研单位正在研制的大型高精度衍射光栅刻划机目标刻划密度为 6 000 道/mm, 刻划面积达到 400 m×500 m, 且所刻光栅的周期定位误差要小于±5 nm。

我国光栅刻划机的性能指标远低于国外同类产品, 如何尽快缩小差距, 提高光栅刻划机的设计水平已成为迫切需要。光栅刻划机的高刻划精度与刻划密度不仅要求具有精密的机械结构, 还需要先进的控制技术以提高控制精度。在传统的开发过程中, 机械设计人员与控制工程师一般建立各自的仿真模型并分别采用该领域的专业分析工具进行独立的设计、分析和试验, 最后制造一个实际的物理样机进行系统级的联合调试与实验^[2]。

如果在实验测试过程中发现问题, 需要分别返回初始的模型中进行修改, 然后再次制造新的物理样机进行调试, 需要经过多次的样机试制才能得到最终满意的产品。而光栅刻划机的性能指标决定了它的开发难度大、周期长且加工成本高, 因而需要一次制造成功。

近年来, 随着计算机技术的发展, 基于虚拟样机技术实现机械系统与控制系统的联合仿真, 将两者有机地结合在一

起实现多领域的综合优化越来越多地应用到机电仿真领域中。利用虚拟样机技术提供的集成环境, 在建造物理样机之前, 联合控制系统设计软件, 将复杂的控制系统添加到机械结构虚拟样机模型中, 对机械系统与控制系统进行联合仿真分析, 可以在设计阶段就比较各种设计方案并进行优化, 在物理样机制造出来之前反复利用虚拟样机进行机械系统与控制系统联合调试, 预估产品性能, 及时发现问题并修改, 直到满足设计要求为止, 再进行物理样机的制造与试验^[3]。

本文以光栅刻划机的超精密定位工作台为研究对象, 利用机械动力学仿真软件 Pro/Engineer 以及控制仿真软件 Simulink 进行机械-控制联合仿真, 建立工作台虚拟样机, 用于定位控制系统的设计与仿真。

2 联合仿真方法

联合仿真即是采用 2 个不同的仿真程序在同一步长时刻下进行数据的交换, 然后利用各自的求解器进行求解计算, 它能有效地结合 2 种软件的优点, 从而提高了仿真精度^[4]。

具体的实现方法是使用机械动力学/运动学分析软件建

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划基金资助重大项目(2006B AK03A02); 国家重大科研装备研制基金资助项目(ZBYZ2008-1); 中国科学院重大科研装备研制基金资助项目(YZ200804)

作者简介: 刘栋材(1984—), 男, 博士研究生, 主研方向: 虚拟样机技术; 李端发, 硕士研究生; 练国富、申 远, 博士研究生; 竺长安, 教授、博士生导师

收稿日期: 2011-08-05 **E-mail:** liudc@mail.ustc.edu.cn

立联合仿真系统的机械系统模型并添加初始条件、约束及载荷等,控制模型则采用专业的控制系统设计软件,或是用户通过编程的方式自行开发,将机械模型与控制模型连接起来,构建数据交互的通信接口,形成闭环回路,利用控制模型输出的结果驱动机械模型,并将机械分析中测量得到机械模型的位移、速度、加速度等反馈给控制模型,实现交互式仿真^[5],如图1所示。

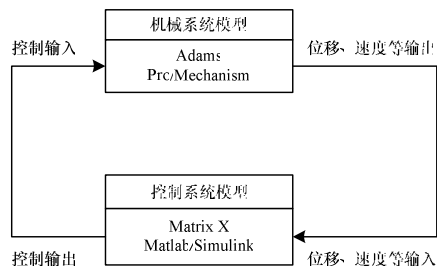


图1 联合仿真的原理示意图

Pro/Engineer 是美国 PTC 公司开发的一款优秀的三维建模及仿真软件,其中所提供的 Pro/Mechanism 模块主要用于机械运动学与动力学分析,在机械分析领域得到了广泛应用,具有强大的分析功能,并且包含 Custom Load 插件,可以实现与 Simulink 等控制设计软件的联合仿真。

利用 Pro/Mechanism 建立联合仿真系统的机械模型并添加约束及载荷。Matlab/Simulink 则构建联合仿真系统的控制模型,通过 Pro/Mechanism 模块中的 Custom Load 插件以及 Simulink 所提供的 S 函数,采用内存映射的方式将两者连接起来,构建数据交互的通信接口,形成闭环回路,利用 Simulink 的控制输出驱动机械模型,并将 Mechanism 中测量得到机械模型的位移、速度、加速度等反馈给控制模型,实现交互式仿真,如图2所示。

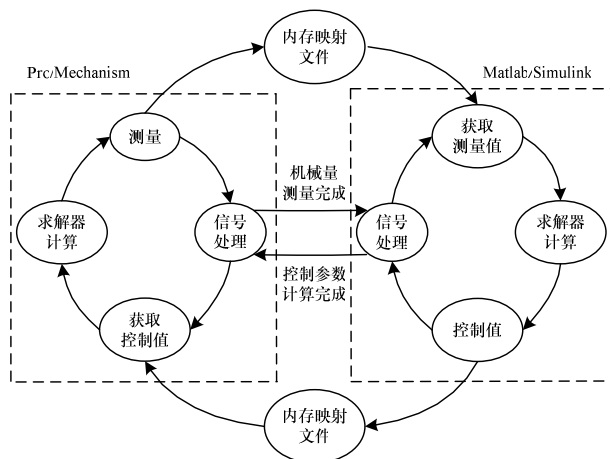


图2 Mechanism 与 Simulink 联合仿真原理

3 光栅刻划机建模

3.1 工作原理分析

光栅刻划机的设计思想都是提供毛坯与刻刀之间的相对运动^[6],根据工作方式的不同一般有如下4种工作方式,如图3所示。工作台负责承载光栅毛坯,它的运动被称为分度运动,刻刀的运动则被称为刻划运动。图3(a)为罗兰型,刀桥带动刻刀作往复刻划运动,工作台垂直于刻划方向作单方向的分度运动;图3(b)为斯特朗型,刀桥进行分度运动,工作台则往复运动实现刻划;图3(c)为斯托洛克型,工作台静止,由刀桥实现分度和往复刻划运动;图3(d)为反斯托洛克型,刀桥静止,工作台进行分度和往复运动实现刻划操作。

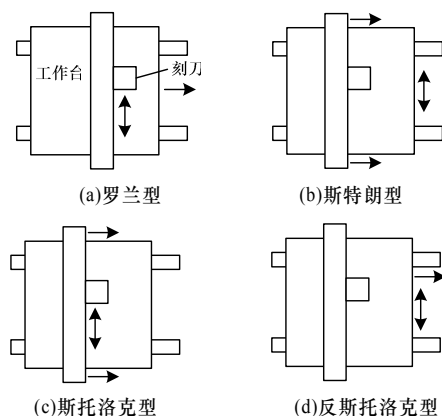


图3 光栅刻划机工作方式

运动方式的选择主要是根据具体的性能需要,目前国际上比较著名的光栅刻划机的工作方式都采用罗兰方式,这种运行方式的优点是运行精度易于保证,同时结构相对简单。

在罗兰型运动方式中,光栅刻划质量在很大程度上取决于分度方向的定位控制精度。为了兼顾大行程与超精密两方面的要求,分度运动分为粗、精两级定位,粗定位完成了工作台的大行程定位,精定位实现工作台的超精密定位,因而工作台的精定位控制直接影响了所刻划光栅的质量。

3.2 动力学建模

本文采用 Pro/Engineer 建立光栅刻划机三维模型,图4、图5分别为光栅刻划机分度系统及精定位工作台三维结构。

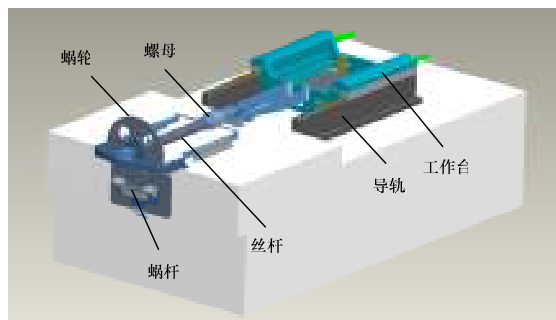


图4 光栅刻划机分度系统三维模型

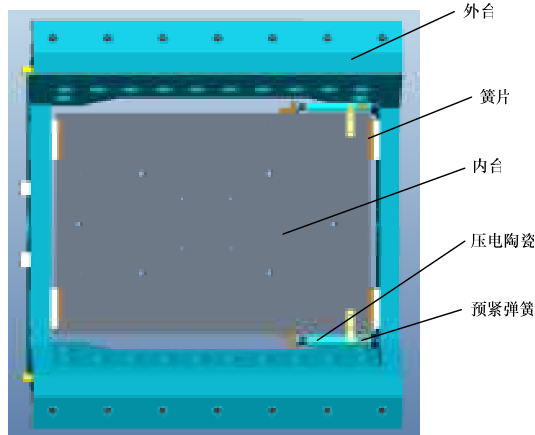


图5 精定位工作台三维模型

刻划机工作台为内外2层台结构,内台与外台用柔性铰链(弹性钢片)连接,并由安装于两者之间的压电驱动器调整两者的相对位置。在刻划机运行过程中,内台承载光栅毛坯并与外台共同作用,实现分度系统定位。伺服电机通过涡轮蜗杆、丝杆螺母传动链带动工作台整体实现粗定位运动,然后由压电陶瓷驱动内台实现内台的精定位。

将建立的精定位工作台导入 Pro/Mechanism 模块中, 由于其结构复杂性, 有必要在不影响其运动特性的前提下对运动学模型进行适当的简化: 工作台外台与上导轨固结, 作为整体在下导轨滑动, 内台与外台的柔性铰链以及外台与丝杠螺母的连接则简化为弹簧-阻尼, 设置系统初始条件、驱动条件和载荷状态, 赋予其摩擦、刚度和阻尼属性, 对其进行动力学分析, 动力学模型如图 6 所示。

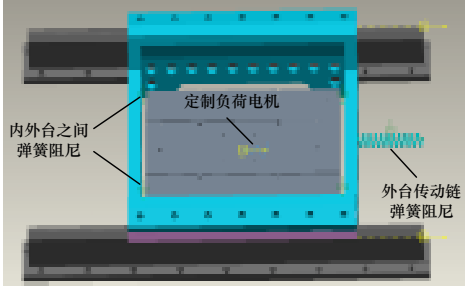


图 6 工作台动力学仿真模型

3.3 控制系统建模

在工作台精定位控制中, 压电陶瓷作为控制器件驱动内台, 相对于外台在分度方向上运动, 实现内台位移的精确定位。精定位控制系统主要包括控制器、压电陶瓷、反馈元件双频激光干涉仪。当给定期望内台位移时, 期望位移与实际位移之间进行比较, 产生偏差信号, 经控制器处理后驱动压电陶瓷伸缩以调整实际输出位移^[7]。系统的被控对象是内台, 被控量为位移, 输入是期望内台位移, 输出是实际内台位移, 系统方框图如图 7 所示。

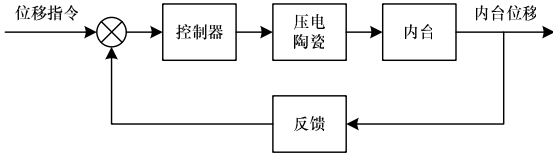


图 7 工作台精定位控制系统框图

3.3.1 控制器模型

单神经元 PID^[8]具有较强的自学习能力, 鲁棒性好, 因此, 本文采用单神经元 PID 控制方式实现对压电陶瓷的控制。图 8 为单神经元 PID 控制设计框图。

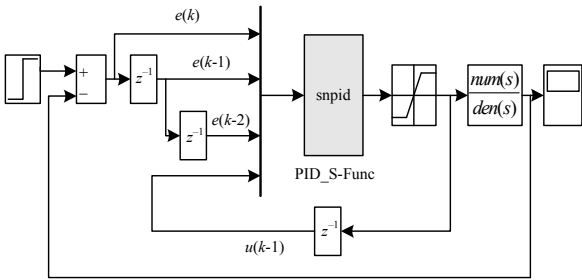


图 8 单神经元 PID 控制器框图

3.3.2 压电陶瓷模型

压电陶瓷系统框图如图 9 所示。其中, $U_1(s)$ 为输入电压; $G_1(s)$ 为压电陶瓷电学传递函数; $G_2(s)$ 为压电陶瓷输出电压与驱动力传递函数。

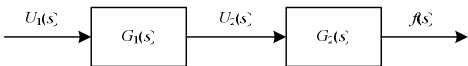


图 9 压电陶瓷传递函数框图

压电陶瓷微驱动器电路可以等效为一个 RC 环节, 即一阶惯性环节^[9], 如图 10 所示。

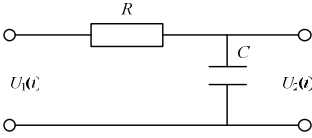


图 10 压电陶瓷等效电路

计算压电陶瓷的传递函数为:

$$G_1(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = \frac{1}{T_ms + 1}$$

其中, T_m 为时间常数, $T_m = RC$ 。

压电陶瓷的驱动力即为它所受的外力, 设在某一驱动电压下, 外力为 0 时压电陶瓷输出位移为 ΔL , 当输出位移为 0 时外力为 F , 不考虑压电陶瓷的迟滞非线性, 则可得到在压电陶瓷的驱动力 $f(t)$ 与输出位移 $\Delta l(t)$ 之间关系为:

$$\frac{f(t)}{F} = \frac{\Delta L - \Delta l(t)}{\Delta L}$$

输出位移为 0 时, 外力 $F = k_e \Delta L$, 外力为 0 时输出位移 $\Delta L = k_s U_2(t)$, 式中 k_e 为电压位移转换系数。计算得出压电陶瓷驱动力与输出电压关系为:

$$G_2(s) = \frac{f(s)}{U_2(s)} = k_s k_e$$

取值如下: $T_m = 7.2 \times 10^{-5}$, $k_e = 12$, $k_s = 0.59675$ 。

3.3.3 控制系统模型

为了实现与 Pro/Mechanism 的联合仿真, 将被控对象部分用 S 函数形式表达的接口模块进行替换, 将它与 PID 控制器模型、压电陶瓷模型等共同构成工作台精定位控制系统, 如图 11 所示, 其中灰色模块表示由 Pro/Mechanism 构建的运动学模型子系统。

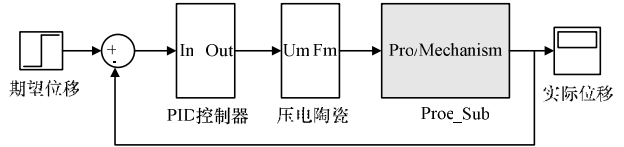


图 11 控制系统整体框图

控制系统模型的功能是实现内台的位移跟踪, 初始设定期望位移, 以 proe_sub 输出的实际内台位移作为反馈信号, 通过压电陶瓷模型的输出力控制 Pro/Mechanism 中的模型运动。

4 虚拟样机仿真

在建立工作台动力学仿真模型及控制系统模型后, 进行联合仿真分析。对单神经元 PID 控制策略, 选用不同的控制参数会导致控制结果的区别。设定采样时间为 0.003 s, 输入为阶跃信号, 期望位移 500 nm, PID 参数取值如表 1 所示。

表 1 PID 参数取值

变量名	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组
K	5.000 0	10.000 0	10.000 0	10.000 0
etaP	0.100 0	0.100 0	0.100 0	0.100 0
etaI	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
etaD	0.001 0	0.001 0	0.001 0	0.001 0
wkP	0.500 0	50.000 0	0.500 0	0.500 0
wkI	5.000 0	5.000 0	50.000 0	0.000 5
wkD	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0

图 12(a)~图 12(d)分别对应第 1 组~第 4 组 PID 参数, 可以看出, 选择不同的 PID 参数, 最终的控制效果是不同的。在某些 PID 参数的作用下, 系统甚至无法达到稳定状态, 因此, 在实际应用前, 利用基于虚拟样机的控制系统联合仿真可进行控制参数的测定, 并验证控制算法的有效性。

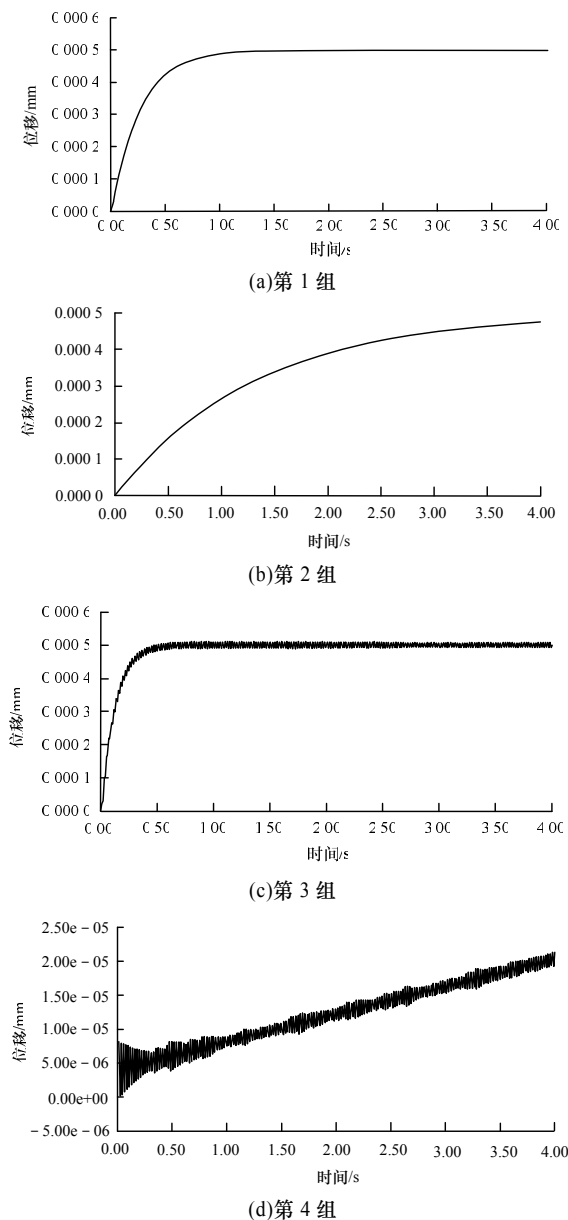


图12 不同PID参数的仿真结果

5 结束语

基于虚拟样机技术的多学科联合仿真开发模式是一种全新的开发方法,将这种开发模式与光栅刻划机控制系统开发相结合进行仿真开发,使开发人员在设计的初级阶段就能够定性地了解系统的整体性能。本文针对直接影响最终光栅刻划质量的分度系统精定位工作台,分别利用 Pro/Mechanism 与 Matlab/Simulink 建立了工作台动力学分析模型以及控制仿真模型,利用 Custom Load 插件功能,通过多软件联合仿真的方式将这两者有机的结合在一起,实现光栅刻划机精定位控制系统的仿真开发,确定了控制参数,提高了设计效率,降低了开发成本,为光栅刻划机的一次制造成功提供了技术支持。

参考文献

- [1] Kita T, Harada T. Ruling Engine Using a Piezoelectric Device for Large and High-groove Density Gratings[J]. Applied Optics, 1992, 31(10): 1399-1406.
- [2] 陈无畏, 时培成, 高立新, 等. ADAMS 和 Matlab 的 EPS 和整车系统的联合仿真[J]. 农业机械学报, 2007, 38(2): 22-25.
- [3] 沈俊, 宋健. 基于 ADAMS 和 Simulink 联合仿真的 ABS 控制算法研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(5): 1141-1143.
- [4] 杨秀清. 机电液耦合的搬运机械手虚拟样机研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.
- [5] 陈安宇. 面向 EPS 的建模与联合仿真研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [6] Hutley M C. Diffraction Gratings[M]. [S. l.]: Academic Press, 1982.
- [7] 黎海青, 郭百巍, 徐红. 基于 ADAMS 与 SIMULINK 的舵机虚拟样机建模和仿真[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(21): 6886-6888.
- [8] Astrom K J, Hagglund T, Hang Chang-Chieh, et al. Automatic Tuning and Adaptation for PID Controllers[J]. Control Engineering Practice, 1993, 1(4): 699-714.
- [9] 王健博. 压电陶瓷驱动技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2010.

编辑 顾逸斐

(上接第30页)

用作业管理系统满足了处理算法软件对资源的不同需求。在性能评价中,测试了2级图像产品生产流程在不同系统负载下每个作业的运行时间和调度各处理阶段时间,分析了作业调度延迟的影响因素。实验结果表明,系统空载时运行控制的作业响应时间约0.3s,随着系统负载的增加,运行控制模型延迟没有显著增加。

参考文献

- [1] Wohed P, Russell N, Andersson B. Patterns-based Evaluation of Open Source BPM Systems: The Cases of jBPM, OpenWFE, and Enhydra Shark[J]. Information and Software Technology, 2009, 51(8): 1187-1216.
- [2] Trappey C V, Trappey A J, Huang Ching-Jen, et al. The Design of a

JADE-based Autonomous Workflow Management System for Collaborative SoC Design[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(2): 2659-2669.

- [3] 张红蕾, 廖文和, 郭宇, 等. 快速扩散制造中的工作流管理技术[J]. 计算机工程, 2009, 35(18): 40-42.
- [4] Gil Y, Deelman E, Ellisman M, et al. Examining the Challenges of Scientific Workflows[J]. IEEE Computer, 2007, 40(12): 24-32.
- [5] Yildiz U, Guabtni A, Ngu A H. Business Versus Scientific Workflow: A Comparative Study[M]. Los Angeles, USA: [s. n.], 2010.
- [6] JBoss Community. JBPM Website[EB/OL]. (2010-12-22). <http://www.jboss.org/jbpm>.

编辑 顾逸斐