

考虑摩擦学行为的机械产品虚拟样机实现方法*

戴旭东 谢友柏

(上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200030)

摘要:提出了一种包括摩擦学行为仿真的机械产品虚拟样机快速实现方法。该方法利用实体建模工具软件建立各零部件的实体模型;利用有限元分析软件通过模态迭加方法来完成各个零部件的柔性体模型;利用系统动力学分析平台将柔性体模型组装成系统模型;在系统模型基础上,将摩擦学行为仿真 Fortran 程序及其它学科行为仿真程序(或软件)嵌入系统模型,实现具有摩擦学行为及摩擦学行为与其它学科行为耦合仿真功能的机械产品虚拟样机。最后,通过缸套-活塞-曲轴系统虚拟样机的开发实例,验证了该方法的可行性。

关键词:摩擦学行为;虚拟样机;仿真

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 0254-0150(2005)2-118-4

A Method to Develop Mechanical Product Virtual Prototype Considering Tribological Behavior

Dai Xudong Xie Youbai

(School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: A feasible method to speedily develop mechanical product virtual prototype considering tribological behavior was presented. In the method, a solid modeling software such as Ideas, Pro-E is applied to build solid models for every part, a finite element analysis software such as ANSYS, NASTRAN is applied to process modal analysis to create flexible solid models for all parts, and the mechanical system dynamics analysis software ADAMS is applied to build a product system model through assembling all flexible solid models. Based on the system model, the tribological behavior simulating Fortran programs and other discipline behavior simulating programs are integrated in the system model to realize the mechanical product virtual prototype which possess the function of tribological behavior simulating. Finally, the development of the virtual prototype of cylinder-piston-crank system validated the feasibility of the method.

Keywords: tribological behavior; virtual prototype; simulation

虚拟样机技术(或称虚拟产品设计)是产品现代设计过程中方案选择和详细设计中应用的一种快速高效的数字化设计技术,是一种基于计算机数值仿真模型的产品数字化设计方法。它通过对产品的不同物理(学科)行为的数值仿真,实现从外观、行为和功能上模拟真实产品^[1]。利用产品的虚拟样机可以快速高效地完成产品设计方案的选择和性能的测试,代替或者减少使用物理样机对产品进行测试和评估,并能够为制造直接提供数字模型,直接缩短开发周期,降低成本,增强企业竞争力。正是因为虚拟样机技术在产品现代设计中的巨大作用,近年来虚拟样机技术及其应用引起了广泛重视,并成为研究的热点。各种

类型的虚拟样机已经具备处理日益复杂的工程问题的能力并被广泛地应用在汽车制造业、工程机械、航空航天、国防工业及通用机械设计和制造等领域。

摩擦学行为是指发生在相对运动、相互作用表面和表面间的各种行为^[2]。在机械产品工作时,摩擦学行为及其与其它学科行为的耦合作用是普遍存在的。忽略摩擦学行为的机械产品虚拟样机,是难以真正模拟真实产品的物理行为的。因此,如何实现包含摩擦学行为在内的机械产品虚拟样机,关系到虚拟样机技术能否真正为企业开发复杂产品、进行产品创新设计提供有效的支持。纵观目前的机械产品虚拟样机,还无法支持对于机械产品中普遍存在的摩擦学行为及其与其它物理行为耦合作用的仿真评估。而在产品设计中,摩擦学的设计变得越来越重要^[3]。因此,实现包含摩擦学行为的机械产品虚拟样机,是目前虚拟样机技术在机械产品设计应用中必须要解决的问题。本文作者通过集成自己开发的摩擦学行为仿真分析程序和

* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(50175088)。

收稿日期:2004-04-13

作者简介:戴旭东(1972-),男,博士,主要研究方向为产品现代设计及内燃机摩擦学、动力学。E-mail:daixudong@sjtu.edu.cn

已有的各学科行为仿真软件,建立一种包含摩擦学行为为仿真的机械产品虚拟样机快速实现方法。

1 机械产品虚拟样机的构建方法

机械产品虚拟样机的开发不可避免地要涉及到动力学、材料学、传热学、摩擦学等多个学科理论以及多个学科行为耦合的理论数值仿真的实现。完全从底层构造和实施一个包含摩擦学行为的机械产品虚拟样机对一个企业或研究单位来说是非常复杂甚至是不可能的。要实现包含摩擦学行为的机械产品虚拟样机,必须要利用他人的成熟技术成果,并重点考虑如何在其中实现摩擦学行为的数值仿真。

1.1 基本思路

目前,许多学科行为的数值仿真已有成熟的软件,对于产品中的这些学科行为可以利用已有的软件来完成。对于具有强的系统依赖性的摩擦学行为的仿真,根据具体的系统来完成仿真程序的编制。本文作者将已有的仿真软件和自己编写的摩擦学仿真程序集成在一起,并考虑它们间的耦合作用,最后完成一个具有摩擦学行为仿真能力的机械产品虚拟样机。

1.2 具有摩擦学行为仿真功能的虚拟样机的实现

快速完成一个具有摩擦学行为仿真功能的机械产品虚拟样机的方法步骤为:

第一步:根据产品所涉及的学科领域选择虚拟样机基础平台软件和进行各种物理行为仿真的分析软件。系统平台要满足如下基本要求:(1)能够仿真产品基本的物理行为;(2)具有开放的体系结构或可以提供开放的接口来满足产品其它物理行为仿真工具的嵌入;(3)良好的合作关系和服务。如果无法选择到这样的平台则可考虑自己开发一个平台,但这个自己开发的平台同样要满足以上基本要求。对于机械产品虚拟样机的实现,可以选择 ADAMS 作为基础平台。

第二步:选择建模工具软件进行各零部件的实体建模。最初的模型可以是粗糙的,但建模要求是参数化的,这便于以后的修改和优化设计。设计建模的工具可以是虚拟样机开发平台接受的任何设计软件。对于基础平台 ADAMS 来说,可以选择 Ideas、Pro-E 或 Solid works。

第三步:对各零部件进行材料设计并用有限元法对各零部件进行模态分析,生成各零部件的柔性体模型,将各零部件的柔性体数字模型在虚拟样机基础平台上组装,建立产品的系统模型。通过对产品基本物理行为的仿真,测试其正确性。对机械零部件的有限元分析可用 ANSYS 或 NASTRAN 等进行。

第四步:分别进行系统中各种物理行为的仿真分析,如动力学分析、热力学分析等。

第五步:进行机械系统的摩擦学设计(如各种摩擦副的设计和润滑系统的设计),并进行摩擦学行为和机械系统中其它学科行为耦合的理论分析,建立耦合分析模型,并完成摩擦学行为仿真的程序定制。

第六步:通过基础平台开放的接口或自己编写的接口,将不同的仿真分析程序和自己编写的摩擦学行为仿真分析程序纳入虚拟样机系统中,来实现各种物理行为的集成仿真和不同物理行为间的耦合分析。

第七步:在虚拟样机上建立虚拟监测子系统、控制子系统及其它附属子系统,并对样机进行调试。如建立各种传感器、信号处理器、控制器等,并进行仿真调试。

第八步:进行虚拟样机整体的测试和考试,如果满足性能要求则该产品的虚拟样机开发完成。

2 应用实例

按照上面叙述的方法步骤,以实现内燃机中缸体-活塞-连杆-曲轴系统的虚拟样机为例,具体阐述上述开发包含摩擦学行为的虚拟样机的方法,同时验证本方法的可行性。

内燃机缸体-活塞-连杆-曲轴系统涉及到系统的机构动力学行为、结构动力学行为、燃烧传热及各种摩擦副的摩擦学行为等。本实例以不考虑燃烧传热行为来进行该虚拟样机的设计。

第一步:根据缸体-活塞-连杆-曲轴系统的特点,选择系统动力学仿真软件 ADAMS 作为基础平台;选择 I-DEAS 软件进行各零部件的实体建模;选择有限元分析软件 ANSYS 作为结构动力学分析手段。ADAMS 可以进行基本的系统动力学分析,而且具有和建模工具软件 I-DEAS、有限元分析软件 ANSYS、控制建模软件 MATLAB 及用户自己编写程序的接口。

第二步:使用 I-DEAS 软件完成内燃机虚拟样机需要的各个零部件的数字模型。这些零部件的数字模型如图 1 所示。

第三步:用 ANSYS 软件对内燃机各零部件进行结构模态分析,并将各零部件的柔性体数字模型在虚拟样机基础平台 ADAMS 中组装,建立产品的系统模型。图 2 所示为组装完成的内燃机缸体-活塞-连杆-曲

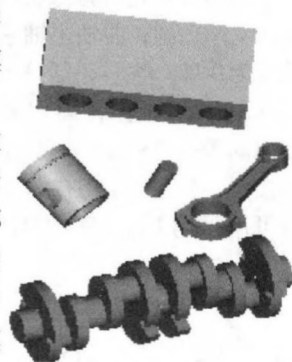


图 1 各零部件的数字模型

轴系统的模型。

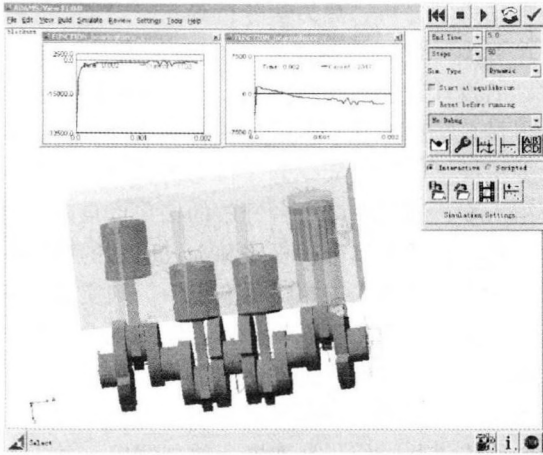


图 2 缸体-活塞-连杆-曲轴系统的虚拟样机模型

第四步：进行系统中各种物理行为的仿真分析。本例中进行了系统的机构动力学分析、缸体的振动分析及各零部件的结构动力学分析。如图 3 所示为缸体结构振

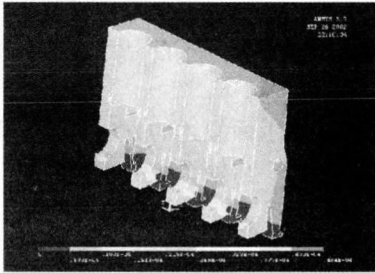


图 3 虚拟样机中的测量传感器

动分析。图 4、图 5 分别为缸体的第 1 阶及第 5 阶模态的振型。

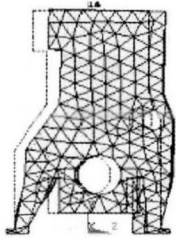


图 4 第 1 阶模态振型

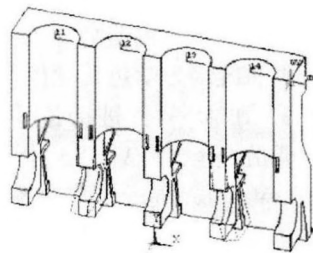


图 5 第 5 阶模态振型

第五步：进行该系统的摩擦学设计。缸套 - 活塞间为往复摩擦副，曲轴主轴承为径向摩擦副。润滑油动力粘度为 0.008 Pa · s，活塞裙部表面粗糙度均方根值为 1.515 μm，缸套表面粗糙度均方根值为 1.715 μm，径向间隙为 25 μm。考虑缸套和活塞间可能出现微凸体接触，缸套-活塞有时处于混合润滑状态。该模型可用平均 Reynolds 方程式表示^[4]：

$$\frac{\partial}{\partial x}(\Phi_x h^3 \frac{\partial p_h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\Phi_y h^3 \frac{\partial p_h}{\partial y}) = 6\mu U(\frac{\partial \bar{h}_T}{\partial y} + \sigma \frac{\partial \Phi_s}{\partial y}) + 12\mu \frac{\partial \bar{h}_T}{\partial t} \quad (1)$$

连杆两端轴承及曲轴主轴承采用径向滑动轴承，

处于完全流体动力润滑状态。边界条件采用雷诺边界条件，即进口压力与出口压力均为 0；忽略热效应；工作温度为 85 ℃。该模型可以用动态雷诺方程式表示^[5]：

$$\frac{\partial}{\partial \varphi}(H^3 \frac{\partial p}{\partial \varphi}) + (\frac{D}{L})^2 \frac{\partial}{\partial \lambda}(H^3 \frac{\partial p}{\partial \lambda}) = 3 \frac{\partial H}{\partial \varphi} + 6(\varepsilon' \cos \varphi + \varepsilon \theta' \sin \varphi) \quad (2)$$

通过对该系统中摩擦学行为与动力学行为的分析，建立系统中摩擦学行为与动力学行为耦合分析模型。缸套-活塞间润滑与缸体、活塞动力学行为的耦合分析模型为^[6]：

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(\Phi_x h^3 \frac{\partial p_h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\Phi_y h^3 \frac{\partial p_h}{\partial y}) = 6\mu U(\frac{\partial \bar{h}_T}{\partial y} + \sigma \frac{\partial \Phi_s}{\partial y}) + \\ 12\mu \frac{\partial \bar{h}_T}{\partial t} \begin{bmatrix} m_{pin}(1 - \frac{a}{L}) + m_{pis}(1 - \frac{b}{L}) & m_{pin} \frac{a}{L} + m_{pis} \frac{b}{L} \\ \frac{I_{pis}}{L} + m_{pis}(a-b)(1 - \frac{b}{L}) & m_{pis}(a-b) \frac{b}{L} - \frac{I_{pis}}{L} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \ddot{e}_i \\ \ddot{e}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F + F_s + F_f \tan \varphi \\ M + M_s + M_f \end{bmatrix} \\ p_c(d) = \frac{16\sqrt{2}}{15} \pi (\eta \beta \sigma)^2 E' \sqrt{\frac{\sigma}{\beta}} F_{\frac{d}{\sigma}} \\ M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = \vec{F} \end{cases} \quad (3)$$

曲轴主轴承与系统动力学行为耦合的分析模型为^[7]：

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}(\frac{\partial K}{\partial q_{ij}}) - \frac{\partial K}{\partial q_{ij}} + \sum_{i=1}^n \frac{\partial \Psi_i}{\partial q_{ij}} \lambda_i = F_{ij} \quad (j=1, 2, \dots, 6) \\ \Psi_i = 0 \quad (i=1, 2, \dots, m) \\ \frac{\partial}{\partial \varphi}(H^3 \frac{\partial p}{\partial \varphi}) + (\frac{D}{L})^2 \frac{\partial}{\partial \lambda}(H^3 \frac{\partial p}{\partial \lambda}) = 3 \frac{\partial H}{\partial \varphi} + \\ 6(\varepsilon' \cos \varphi + \varepsilon \theta' \sin \varphi) \end{cases} \quad (4)$$

根据耦合分析模型完成了摩擦学行为仿真程序的定制。

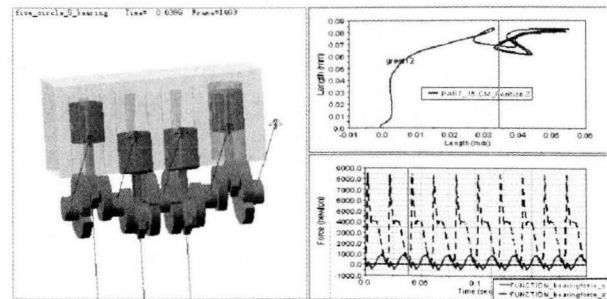


图 6 摩擦学行为与动力学行为的耦合仿真分析

第六步：通过 ADAMS 开放的接口将自己编写的摩擦学行为仿真分析程序纳入虚拟样机系统中，来实现虚拟样机中摩擦学行为的仿真及其与动力学行为的

耦合分析,如图6所示。

第七步:在内燃机缸体-活塞-连杆-曲轴系统虚拟样机上,建立内燃机曲轴转角缸体测量传感器、内燃机缸体内气体压力测量传感器等。图7显示了虚拟样机仿真过程中各传感器在测量相应的参数值。

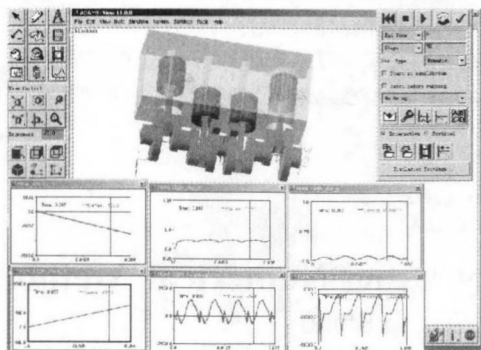


图7 虚拟样机中的测量传感器

第八步:对实现的内燃机缸体-活塞-连杆-曲轴系统虚拟样机进行整体的测试,基本满足性能要求,该产品的虚拟样机开发完成。

上述应用实例说明使用本文作者提出的方法可以快速开发出包含摩擦学行为的机械产品虚拟样机。

3 结论

(1) 充分利用已有的各学科行为仿真工具,提出了一种包含摩擦学行为的机械产品虚拟样机快速开发方法。该方法解决了机械产品虚拟样机中实现摩擦学行为仿真的困难,从而使机械产品的虚拟样机具有

了实现摩擦学行为的功能,更加逼近真实的物理样机。是该虚拟样机的开发方法非常适合中小型企业。

(2) 利用大型分析软件和自己编写的摩擦学仿真程序,以及通过摩擦学行为与动力学行为的耦合分析,实现了包括摩擦学行为的缸体-活塞-连杆-曲轴系统的虚拟样机的开发。该应用实例的实现说明本文提出的包含摩擦学行为的机械产品虚拟样机快速开发方法适用于具有多种物理行为的复杂机械产品虚拟样机的开发。

参考文献

- [1] 李伯虎,柴旭东,熊光楞,等.复杂产品虚拟样机工程的研究与初步实践[J].系统仿真学报,2002,14(3):336~341.
- [2] Xie You-Bai. Three Axioms in Tribology [A]. Proceeding of III International Symposium on Tribo-fatigue [C]. China, 2000. 17~23.
- [3] 谢友柏.产品的性能特征与现代设计[J].中国机械工程,2000,11(1-2):26~32.
- [4] Patir N, Cheng H S. An average flow model for determining effect of three dimensional roughness on partial hydrodynamic lubrication. ASME J Lubri Tech, 1978, 100(1):12~17.
- [5] 朱均,虞烈.流体润滑理论[M].西安交通大学出版社,1985.
- [6] 戴旭东,袁小阳,谢友柏,等.内燃机缸套-活塞系统摩擦学与动力学行为耦合分析.西安交通大学学报,2003,37(7):683~687.
- [7] 戴旭东,谢友柏,等.曲轴主轴轴承油膜动力润滑与系统动力学的耦合分析.内燃机学报,2003,21(1):86~90.
- [8] 戴旭东,袁小阳,谢友柏,等.内燃机缸套-活塞系统摩擦学与动力学行为耦合分析.西安交通大学学报,2003,37(7):683~687.
- [9] 戴旭东,谢友柏,等.曲轴主轴轴承油膜动力润滑与系统动力学的耦合分析.内燃机学报,2003,21(1):86~90.
- [10] Shuang Chen, Weimin Liu, et al. Preparation of DDP-coated PbS nanoparticles and investigation of the anti-wear ability of the prepared nanoparticles as additive in liquid paraffin. Wear, 1998, 218: 153~158.
- [11] Z S Hu, J X Dong, et al. Study on anti-wear and reducing friction additive of nanometer titanium oxide. Wear, 1998, 216: 92~96.
- [12] 欧忠文,徐滨士,等.纳米润滑材料应用研究进展.材料导报,2000,8:28~30.
- [13] 张治军.表面修饰纳米粒子的化学制备及摩擦学行为的研究:[博士学位论文].兰州:中科院兰州化学物理所,1996.
- [14] 王九,陈波水,等.润滑油中CuS纳米粒子的摩擦学性能研究.润滑与密封,2001,2:42~43.
- [15] 周静芳,张治军,等.油溶性铜纳米微粒作为液体石蜡添加剂的摩擦学性能研究.摩擦学学报,2000,20(2):123~126.
- [16] Z S Hu, J X Dong, et al. Preparation and tribological properties of nano-particles lanthanum borate. Wear, 2000, 243: 43~47.

参考文献

- [1] 张立德,牟季美.纳米材料和纳米结构.北京:科学出版社,2001.
- [2] Ze-Fu Zhang, Wei-min Liu, et al. The tribological behaviors of succinimi-demodified lanthanum hydroxide nanoparticles blended with zinc dialkyl-dithiophosphate as additives in liquid paraffin. Wear, 2001, 248: 45~54.
- [3] L Rapoport, Y Feldman, et al. Inorganicfullerence-like material as additives to lubricants: structure-functionrelationship.

(上接第104页)高了润滑油的摩擦学性能。

3 结论

(1) 添加纳米 Fe_3O_4 粒子的润滑油比基础油具有更好的摩擦学性能。其摩擦学性能的好坏与添加纳米 Fe_3O_4 粒子的质量分数的大小有关,添加纳米粒子的量有一最佳值。

(2) 添加纳米 Fe_3O_4 粒子的润滑油在摩擦磨损过程中,摩擦力矩的变化表现出了时间效应。

(3) 添加纳米 Fe_3O_4 粒子的润滑油在摩擦磨损过程中,纳米 Fe_3O_4 粒子对摩擦表面的抛光作用提高了润滑油的摩擦学性能。