

机械系统虚拟样机技术的研究与开发^①

张旭^② 毛恩荣

(中国农业大学车辆工程学院)

摘要 回顾了机械系统虚拟样机技术的发展历史,简述了它对缩短机械系统产品设计开发的周期、降低成本、提高质量等方面的作用。对比分析了其理论基础——求解机械系统运动学和动力学的各种常用方法及其特点。阐述了国内外机械系统虚拟样机技术的研究现状,以及目前国内研究存在的问题。最后提出并分析进一步研究与开发的任务和对策。

关键词 机械系统;虚拟样机技术;动力学

分类号 TP 391.75; TH 113

Study and Development of Mechanical System Virtual Prototyping

Zhang Xu Mao Enrong

(College of Vehicle Engineering, CAU)

Abstract The development of mechanical system virtual prototyping is introduced. The effects of mechanical system virtual prototyping on the time-saving, cost-cutting and quality-improving, etc. in the products designing are put forward briefly. The theoretical bases including many specialized techniques and analytical methods of dynamics and kinematics are compared. The present situation and problems of the research on mechanical system virtual prototyping are discussed. The tasks of further research are given.

Key words mechanical system; virtual prototyping; dynamics

机械系统虚拟样机技术,是指在机械系统的设计开发过程中,综合应用相关的先进技术手段,在计算机上建造出机械产品的模型,并对该机械系统整体在投入运行后的工作情况进行分析研究的一种高新技术手段。

1 产生背景

随着近代科学技术的发展,工程设计的理论、方法和手段都发生了很大变化。特别是近30年来,工程设计手段的先进与否、数字化程度(以CAD技术和FEA技术为典范)的高低,在很大程度上决定了产品设计开发的周期、质量和成本^[1]。CAD技术是计算机应用于工程设计中最早和最成功的典范。它的出现和广泛使用,从根本上改变了传统的以经验为主的设计方法。它将设计人员从费时、重复、繁琐的手工绘图方式中解放出来,不但提高了工程图纸的质量和绘制速度,而且能在设计完成前由计算机预先显示产品最终的外形结构以供估价,更重要的是

收稿日期:1998-09-30

①高校博士点基金资助项目

②张旭,北京清华东路17号中国农业大学(东校区)213信箱,100083

为设计人员将更多的时间和精力用于创造性的工作提供了条件, 并为社会带来了巨大的效益。FEA 技术在工程设计过程中的应用, 再次极大地改进了产品的设计手段。它可以帮助设计人员分析机械系统零部件的结构强度、刚度, 以及热特性和动态特性, 不但进一步推动了 CAD 技术在各行业的应用, 而且解决了许多以前难以处理的工程问题。

但是, 随着科学技术的发展, 人们逐渐认识到这样一个事实: 即使机械系统中的每个零部件都是经过优化的, 也不能保证整个系统的性能是良好的, 即系统级的优化绝不是系统中各部件优化的简单叠加。机械系统虚拟样机技术作为又一种应用于机械系统设计过程中的高新技术手段, 是现阶段解决这类问题的最有效的技术方案。

通常, 多数公司都采用常规的设计方法, 即首先进行不同的方案设计, 并绘制出工程图纸; 然后在经过较长时间的基于经验的方案论证后, 选出较合适的方案并试制出物理样机; 此后进行试验设计, 并对物理样机在多种工况下进行测试; 当发现结构或性能方面有缺陷时, 就修改设计方案及工程图纸, 然后再次制造物理样机并对其进行测试。不难看出这种传统的物理样机制造-试验方法大大增加了新产品开发的周期和成本, 而且很难选用真正的优化方案; 而机械系统虚拟样机技术则可直接利用 CAD 软件所提供的各零部件的物理信息(如质量、质心位置、对于任意参考坐标系的惯量等)及其几何信息, 在计算机上对机械系统进行虚拟装配(定义零部件间的联接关系及其作用力、运动激励等), 从而获得虚拟样机, 并对其进行仿真分析。这可使设计人员在各种虚拟环境中真实地模拟机械系统的工作情况, 快速分析多种设计方案; 可以帮助设计人员完成无数次物理样机无法进行的仿真试验, 直至获得系统级的优化设计方案。此外, 它还是分析对于物理样机来说是极其危险的工况的最佳手段, 如越野车辆的抗翻倾试验、飞机乘员的安全性试验等。机械系统虚拟样机技术不但可用于系统方案的论证及评估, 而且可用于产品的概念设计阶段、设计细化阶段、试验规划阶段以及工作状态再现等的全过程。机械系统虚拟样机技术作为进行样机设计、仿真研究复杂机械系统动力学问题的有效手段, 不但可以帮助产品制造摆脱对于物理样机的过度依赖, 而且可以缩短产品的设计开发周期, 降低成本, 提高质量, 进而突破制约产品设计水平提高的“瓶颈”。

2 多刚体系统动力学方法

机械系统虚拟样机技术是建立在多刚体系统动力学理论基础上的。多刚体系统动力学是近 30 年来在经典力学基础上发展起来的专门解决复杂机械系统的运动学和动力学问题的新的学科分支。

分析由多个刚体组成的机械系统, 原则上可采用传统的经典力学方法, 即以牛顿-欧拉方程为代表的矢量力学方法, 但随着组成机械系统的刚体数目的增多, 刚体之间的联系状况和约束方式就会变得极其复杂, 当对于作为隔离体的单个刚体列写牛顿-欧拉方程时, 铰约束力的出现会使未知变量的数目显著增加; 因此, 该方法也必须加以发展以便于计算机能自动识别刚体的联系状况并根据不同的约束形式自动形成约束方程。以拉格朗日方程为代表的分析力学方法也已广泛应用于多刚体系统动力学中^[2]。采用该方法可以避免出现不作功的铰的理想约束反力, 使未知变量的数目减少到最低程度; 但随着刚体数和自由度的增多, 动能和势能函数的项数会急剧扩张, 求导数的计算工作量庞大, 推导过程繁琐枯燥且容易出错, 尤其是若采用传统的独立的拉格朗日广义坐标, 在建立系统的动力学方程时会变得非常困难。1966 年罗伯

森(Roberson)和维滕堡(Wittenburg)创造性地将图论引入多刚体系统动力学,使这个学科分支跨入新阶段。他们利用图论的一些基本概念和数学工具成功地描述了机械系统内各刚体之间的结构特征。借助图论工具可使各种不同结构的系统能用统一的数学模型来描述,选用铰链相对运动变量作为系统的广义坐标可导出多刚体系统的一般形式的动力学方程^[3]。罗伯森-维滕堡(R & W)方法以十分优美的风格处理了树结构多刚体系统,对于非树系统,则必须利用铰切割或刚体分割方法转变成树系统处理。变分方法作为经典力学的重要组成部分,同样可用于求解多刚体系统动力学问题。变分的力学原理并不是直接描述机械系统运动的客观规律,而是把真实发生的运动和可能发生的运动加以比较,在相同条件下,从所发生的很多的可能运动中指出真实运动所应满足的条件;因此,该方法无需建立机械系统的动力学方程,而是以加速度作为变量,根据被称为拘束的泛函的极值条件,直接利用系统在每个时刻的坐标和速度值解出真实加速度,从而确定系统的运动规律^[4]。凯恩(Kane)方法是在1965年前后发展起来的一种用于分析复杂机械系统的新方法。该方法最先用于分析复杂航天器,以后发展成为使用范围更广泛的普遍方法。该方法的特点是以伪速度作为独立变量来描述系统的运动,既适用于完整约束,又适用于非完整约束;此外,在用该方法建立系统的动力学方程时既不会出现理想约束反力,也不必计算动能等动力学函数及其导数,而且推导计算十分规格化,所得结果是1阶微分方程组^[5];因而兼有矢量力学和分析力学的特点。但它只是一种普遍的方法,必须对每个具体的多刚体系统作具体处理,而不像R & W法那样可得到一个普遍的公式。作为凯恩方法的具体应用,修斯顿(Huston)等人发展了一种几何与计算相统一的方法^[6]。

国内对于多刚体系统动力学的研究总体上比较落后,基本上处于追踪国外发展动向的阶段。如上海交通大学刘延柱教授等人的工作都是牛顿-欧拉方程的几种其他表达形式,他们采用矩阵记法并与图论相结合,列写旋量形式的牛顿-欧拉方程,可使任意结构的多刚体系统的动力学方程具有简练的表达形式。又如中国农业大学周一鸣教授主持开发了广义机构计算机辅助设计系统GMCADS (Generalized Mechanisms Computer Aided Design System),该系统用迭代方法计算机械系统的自由度,在静力学分析中用势能极小原理求解系统的静平衡位置,在动力学分析中采用了哈密尔(Hamilton)正则方程。但是,国内的软件由于许多技术上和非技术上的原因,都只停留在实验室中,离软件商品化还有很大距离。

3 目前国内研究面临的主要问题

目前国际上对虚拟样机技术的研究已趋成熟,商品化的软件系统正逐渐在工程设计实践中得以推广利用,它正在由分析专家的专用研究工具逐渐向普通工程设计人员易于掌握的工程设计的工具转变;但这项技术在国内仍面临着许多问题,主要表现在以下几个方面。

1) 目前国内的研究范围较窄,仅停留在多体系统动力学的领域内,且仅停留在实验室阶段,尚难以在工程实践中应用。对于由少量刚体组成的简单系统,用任何一种方法,甚至手工推导都可进行动力学分析;但是对于由大量刚体组成的复杂系统,若不借助于计算机,人们是无法进行仿真分析研究的。从这个角度上讲,如果没有工程设计人员易于掌握的机械系统仿真分析软件,多体系统动力学的理论再精妙、再完美也只能停留在纸上,而无法解决现实中的工程问题。国内在虚拟样机方面的研究工作中对这方面的重视程度还很不够,有待进一步加强。

2) 对相关技术的研究不足。1966年罗伯森和维滕堡创造性地将图论引入多刚体系统动

力学,使这个学科分支一度呈现出崭新的形态。在此之后,国外有些学者较深入地研究了图论在多刚体系统动力学领域的应用,取得了一定的成果,如修斯顿等人提出了“低序体阵列”的概念,并在此基础上发展了一套独具特色的多体系统动力学的建模方法——“有限段建模法”。与国外的研究及其成果相比,国内学者在这方面投入的精力不多。受“面向对象技术”在计算机及其相关领域内的快速发展和成功应用的影响,目前国外已有学者开始研究如何将面向对象技术应用到虚拟样机技术中来^[7]。事实上,国外学者在这方面的研究已引起业界有关方面的重视,而国内在这方面的研究却是一片空白。机械系统虚拟样机技术涉及到大量描述机械系统及其力学特性的数据。这些数据如何存储,并使所存数据有足够的灵活性,以适应实际机械系统结构及组成的多样性和复杂性,还必须考虑所存数据的一致性;如何对各种相关信息进行添加、修改、删除、查找等操作;如何使数据与面向对象技术的要求和谐一致等:都要由数据结构来解决,而国内学者很少进行这方面的研究。

3) 对机械系统虚拟样机技术软件系统的开发和商品化的重要性及迫切性认识不足。虚拟样机技术在工程中应用的前提条件是软件,只是商品化的软件为机械系统设计师所使用,其巨大的社会效益和经济效益才会体现出来。国内学者对于机械系统虚拟样机技术软件系统的开发和商品化工作的重要性及迫切性认识不足,至今尚无进行商品化软件开发的迹象,而国外先进的、商品化的虚拟样机技术软件都具有良好的图形用户界面,具有直观、自然、友好、方便等优点。国内学者在这方面的工作远远不够,这是国内同类软件只能停留在实验室中,一般人员难以使用的根本原因之一。

4 进一步研究与开发的主要任务

1) 以具有几何与计算相统一的优点的修斯顿方法为进行力学分析计算的理论依据,建立基于特定描述形式的机械系统动力学仿真分析的算法。多刚体系统动力学从理论上讲,已日趋完善,现在人们又开始考虑组成机械系统的个别部件的变形及其与机械系统整体在大空间运动的相互作用及影响;但是我们应看到,虽然多刚体系统动力学的各种方法风格迥然不同,是否考虑弹性体也会使系统的方程差异很大,但要使虚拟样机技术真正应用于工程实践中,必须寻求建立一种高度程式化、适宜编制计算程序的动力学方程的方法,做尽可能少的准备工作就能处理一般结构的机械系统。在众多的多刚体系统动力学方法中,凯恩法兼有矢量力学和分析力学的特点,而作为凯恩法的一种具体应用的修斯顿法,具有几何与计算相统一的优点,因此更适宜编制计算程序^[8]。值得注意的是,机械系统的多刚体动力学公式的具体形式,是与机械系统的描述方式密切相关的,因此,须结合特定的机械系统的描述方式,推导相应的动力学仿真计算公式。

2) 将面向对象语言、面向对象程序设计方法学、面向对象的计算机体系结构应用于机械系统分析技术中。面向对象技术是近年来快速发展起来的一项新技术,起源于面向对象的计算机语言,但目前已超越计算机程序和软件开发。由于其概念和方法与人类在认识和理解客观现实世界的过程中普遍的方法极为相似,更符合人们的思维习惯,因此尤其适合解决复杂的问题。该技术在计算机软硬件开发方面呈现出了巨大的优越性,人们已普遍将其视为在目前情况下解决软件危机的最有希望的突破口。机械系统虚拟样机技术是否能在工程实践中得到应用和认同,关键在于是否有一套方便、实用的计算机软件。这种软件的设计开发是一项非常复

杂和艰巨的工作,这恰好为面向对象技术的应用创造了条件。研究在机械系统虚拟样机技术中如何利用面向对象技术,可直接利用90年代的软件技术,势必将减轻软件开发的难度并提高软件的可维护性。

3) 以图作为基础数据结构将物理空间中的机械系统映射到计算机中,确定用于描述机械系统的数据结构。图论是一门很有实用价值的数学分支学科,在计算机科学、物理学、生物学、电力工程、运筹学,以及社会科学等领域都有广泛的用途。图论在机械系统虚拟样机技术中的应用,目前还处于比较初级的阶段,但却有良好的应用前景,有可能用来求解复杂机械系统真实自由度等问题。当前的紧要任务是研究将物理空间中的机械系统如何映射到计算机中,建立相应的数据结构,为软件的实现奠定基础,并为深入研究图论在机械系统虚拟样机技术中的应用创造基础条件。

4) 建立基于图形的前后处理界面,以发挥计算机图形用户界面直观、自然、友好、方便等优点。机械系统虚拟样机软件系统本身都涉及到较深的力学及数学专业知识,而其用户则是具有一般机械知识的机械设计与制造业的工程技术人员;因此软件用户界面的友好程度,在很大程度上决定了工程技术人员对软件系统的认可程度。这种技术所具有的计算机图形用户界面直观、自然、友好、方便等优点,为更多非计算机专业用户将计算机技术更好地应用于其专业领域提供了方便。

5) 综合应用上述建模原理及算法,设计开发软件原型系统。机械系统虚拟样机技术要能在工程实践中发挥应有的作用,必须借助于优秀的软件系统。在这一点上,它与FEA技术非常相似:有限元方法作为求解微分方程的一种数值方法由来已久,但其在数字电子计算机发明前却难以有所作为;然而由于商品化的FEA软件(如NASTRAN, ANSYS, ADINA和MARC等)的发展及其在工程实践中的应用,才会有今天工程技术人员对FEA技术的信赖,而FEA技术也才能在工程实践中发挥巨大作用,取得巨大成绩。但是,实现机械系统虚拟样机技术的软件系统非常复杂,需要做长期大量复杂艰巨的工作,才有可能达到比较理想的水平。国际上较成功的软件系统,都是在专门的公司里经过20多年的不断发展,才达到目前水平的。当前我们的任务是综合上述各方面的研究,设计开发机械系统虚拟样机技术软件系统的原型系统,探索并尽可能发现问题,为深入研究机械系统虚拟样机技术及其软件系统奠定基础。

参 考 文 献

- 1 路甬祥. 工程设计的发展趋势和未来. 机械工程学报, 1997, 33(1): 1~8
- 2 Haug E J. Computer Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems. Vol 1 Basic Methods. Needham Heights: Allyn and Bacon, 1989. 199~237
- 3 袁士杰, 吕哲勤. 多刚体系统动力学. 北京: 北京理工大学出版社, 1992. 177~267
- 4 贾书惠. 刚体动力学. 北京: 高等教育出版社, 1987. 256~268
- 5 凯恩, 列文松著. 动力学理论与应用. 贾书惠, 薛克宗译. 北京: 清华大学出版社, 1988. 170~204
- 6 休斯敦, 刘又午. 多体系统动力学(上册). 天津: 天津大学出版社, 1988. 86~137
- 7 Koh A S, Park J P. Object oriented dynamics simulator. Computational Mechanics, 1994, 14(3): 277~287
- 8 休斯敦, 刘又午. 多体系统动力学(下册). 天津: 天津大学出版社, 1991. 81~124