

# 虚拟样机建模仿真的置信度评估

李瑞涛

(金峰通信有限责任公司, 北京 100083)

**摘要:** 以功能相似理论为基础, 认为虚拟样机技术中存在大量的相似问题, 主要集中在虚拟样机建模和虚拟试验仿真两个方面, 其中虚拟样机建模是核心和关键。以立式行星磨设备为例, 探讨了虚拟样机建模仿真方法, 并对所开发的虚拟样机的置信度进行了研究和评估。

**关键词:** 置信度; 虚拟样机; 仿真; 相似理论; 立式行星磨

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)23-0071-03

## Credibility evaluation on modeling and simulation of virtual prototype

Li Ruitao

(Golden Cellular Communication Co., Ltd., Beijing, 100083, China)

**Abstract:** In this paper, from function similarity theory point of view, there is lots of similarity in modeling and simulation of virtual prototyping, and the modeling of virtual prototype is a key point. Modeling method of virtual prototype are discussed from the example of prototype of vertical planetary mill, at the same time, credibility of developed virtual prototype is studied and evaluated.

**Key words:** credibility; virtual prototype; simulation; similarity theory; vertical planetary mill

虚拟样机是一种计算机的数字模型, 它能够反映实际产品的特性, 包括外观、空间关系以及运动学和动力学的特性。借助于虚拟样机技术, 可以在计算机上建立机械系统的数字化模型, 伴之以三维可视化处理, 模拟在现实环境下系统的运动和动力特性并根据仿真结果精化、优化系统。虚拟样机技术就是利用计算机仿真技术, 对一个与实际系统具有功能相似性的系统或子系统进行可视化的数字仿真, 并对数字模型进行评估和测试, 从而获取最优设计方案。虚拟样机技术利用抽象的虚拟样机系统模仿实际系统的某些行为特征。既然是一个系统模仿另一个系统, 当然两者不可能完全等同, 但是最基本的内容应该相同, 即虚拟样机必须反映实际系统的主要特性, 而如何判断两个系统的“可模仿性”变得尤为重要, 本文将探讨虚拟样机建模及仿真置信度评估方法<sup>[1-4]</sup>。

### 1 虚拟样机相似建模

基于虚拟样机的系统仿真过程中存在大量的相似问题, 其包含两个方面: 虚拟样机建模和虚拟试验, 其中虚拟样机建模是核心和关键。功能相似的虚拟样机仿真过程如图 1 所示。

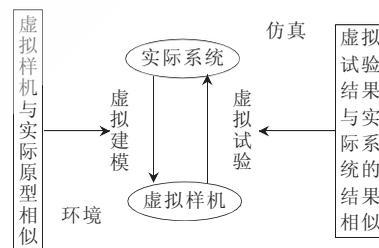


图 1 功能相似的虚拟样机仿真过程示意

虚拟样机建模的本质是在数字模型与实际系统之间建立相似关系, 其途径就是抽象, 抽象过程是建模过程的基础。为了保证仿真结果的可信度, 势必要进行验模, 验模至少包含两层意思, 一是检验仿真模型与特定数学模型是等价的, 称为检验 (Verification); 二是验证仿真结果同试验结果是否一致, 若不一致, 则修改仿真模型/特定数学模型, 直到一致。这个过程称为验证 (Validation)。

图 2 所示为建模、验模一般过程。建模有三类主要信息源: 目的、先验知识和试验。通过验模进行可信性分析, 着重在逻辑上正确、数学上严格的含义上进行演绎分析。总之, 可信性分析都归结为模型行为与真实系

# 技术与方法 Technique and Method

统行为之间的比较。如果运用一个模型能达到预期目的,那么这个模型就是成功的、可信的。从相似理论的角度看,明确建模目的有助于确定虚拟样机应具有的形式、把握建模过程所要用的相似方法及建模的复杂程序。

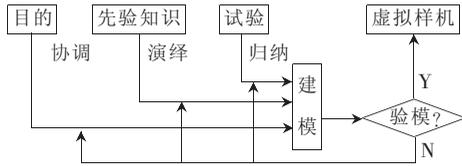


图2 建模、验模一般过程

相似方式的种类很多,最主要的有经典相似和功能相似两种。虚拟样机建模仿真就是一种以功能相似为基础的仿真方法,按照此种方法只需依据功能相似原理建立功能相似的虚拟样机,然后在该样机上进行功能模拟,以研究实际系统结构和动态行为。

依据相似系统建模原则,虚拟样机的建模要点是:使得建立的虚拟样机模型真实反映系统相似的特征,建立要素间的对应关系,并使虚拟样机与实际系统间要素相似、要素间相互关系等方面的特性相似。

## 2 系统置信度评估

根据相似理论,可以采用如下方法对虚拟样机系统的置信度进行评估。相似元数值确定的相似度  $Q_u$  为:

$$Q_u = \sum_{i=1}^n \beta_i q(u_i) = \sum_{i=1}^n (\beta_i q(u_1) + \beta_i q(u_2) + \dots + \beta_i q(u_n))$$

两个系统之间要素数量的相似度  $Q_n$  为:

$$Q_n = \frac{n}{k+l-n}$$

则系统相似度计算公式为:

$$Q(A, B) = Q_n Q_u = \frac{n}{k+l-n} \sum_{i=1}^n \beta_i q(u_i)$$

且有:

$$\begin{cases} Q=1 & k=l=n, & q(u_i) \equiv 1 \\ 0 < Q < 1 & 0 < n \leq \min(k, l), & q(u_i) \neq 1, q(u_i) \neq 0 \\ Q=0 & n=0, & q(u_i) \equiv 0 \end{cases}$$

其中:  $K$  为虚拟系统  $A$  的要素组成数量,  $l$  为实际系统  $B$  的要素组成数量,  $n$  为系统  $A$ 、 $B$  间存在的相似要素数量,  $q(u_i)$  为相似元,  $\beta_i$  为每一相似元对相似系统相似程度的影响权重。

## 3 实例

### 3.1 立式行星磨虚拟样机建模

建立切合实际情况的磨机虚拟样机是实现系统仿真和优化设计的关键和基础。开发虚拟样机的过程见图3。主要包括实体建模、设定运动学关系、设定动力学关系。

其中实体建模包括零件实体建模和实体零件装配,运动学关系包括行星架约束的施加、行星架与固定块之间的运动关系、固定块与行星轮之间的运动关系、行星

轮与衬套之间的运动关系,动力学关系包括行星架的主旋转运动激励和行星轮所受力矩的施加。基于设备机械系统力学模型,本文建立了该设备的虚拟样机数字模型见图4,模型校验信息见表1。

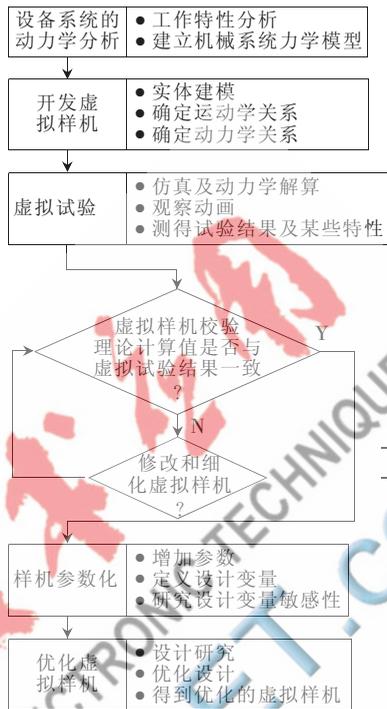


图3 立式行星磨虚拟样机研发流程图



图4 立式行星磨的数字模型

表1 数字模型的校验信息

模型校验	
自由度	12个
运动件	22个
旋转副	7个
移动副	6个
固定铰链	9个
运动激励	1个
力矩	6个
无多余的约束方程	
模型校验成功	

### 3.2 立式行星磨仿真置信度评估

根据设备的工作原理和力学系统模型,本文在虚拟样机和实际设备相似系统之间构造7个相似元,记为  $u_{ij}(a_i, b_j)$ , 其中  $i=j=7$ , 分别为行星轮、固定块、行星架、固定块与行星架的相对运动关系、固定块与行星轮的相对运动关系、行星架轮与衬套之间的关系、壳体。

首先计算行星架的相似度, 设虚拟样机的行星架 ( $a_3$ ) 与实际系统行星架 ( $b_3$ ) 构成相似元  $u_3(a_3, b_3)$ , 主要特征包括各种几何尺寸及转速。特征值记为  $S_j(j=1, 2)$ , 可计算得到特征比例系数为  $r_3(j=1, 2)$ :

$$r_{31} = \frac{\min(u_1(a_3), u_1(b_3))}{\max(u_1(a_3), u_1(b_3))} = 1$$

$$r_{32} = \frac{\min(u_2(a_3), u_2(b_3))}{\max(u_2(a_3), u_2(b_3))} = \frac{\min(1116.6, 1116.6)}{\max(1116.6, 1116.6)} = 1$$

则相似元的相似度为:  $q(u_3) = 1$

其次, 计算固定块与行星架的相对运动关系的相似度。很显然, 在固定块与行星架的相对运动关系方面, 虚拟样机与实际系统构成相似元  $u_4(a_4, b_4)$ , 相对运动形式和摩擦是主要特征, 特征值记为  $S_j(j=1, 2)$ , 特征比例系数为  $r_4(j=1, 2)$ , 则特征比例系数  $r_{41} = 1, r_{42} = 0$  (因为在虚拟样机中, 固定块与行星架的运动是理想状态的), 则:

$$q(u_4) = \sum_{j=1}^2 a_j r_{4j} = 0.8 \times 1 + 0.2 \times 0 = 0.8$$

技术与方法 Technique and Method

同理,可以得到: $q(u_1)=0.6, q(u_2)=1, q(u_5)=0.8, q(u_6)=0.68, q(u_7)=1$ 。

最后,按照上面公式可以计算系统的相似度,即:

$$Q=Q_nQ_n=\frac{n}{k+l-n}\sum_{i=1}^n\beta_iq(u_i)=\frac{7}{7+7-7}\sum_{i=1}^7\beta_iq(u_i)$$

$$=\beta_1q(u_1)+\beta_2q(u_2)+\dots+\beta_7q(u_7)$$

其中,权重为 $\beta_i$ 。 $\beta_i$ 数值可以通过层次分析法确定。首先,由相似元的评价因素组成评价因素集:

$$U=\{u_1, u_2, \dots, u_7\}$$

可以判断矩阵 $P$ 为:

$$P=\begin{matrix} & \begin{matrix} u_1 & u_2 & u_3 & u_4 & u_5 & u_6 & u_7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \\ u_7 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 & 1 & 1 & 1 & 9 \\ \frac{1}{2} & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 9 \\ \frac{1}{2} & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 9 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \frac{1}{2} & 9 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \frac{1}{2} & 9 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 1 & 9 \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

将判断矩阵每列归一化后得:

9	9	9	9	9	9	9
46	32	32	64	64	46	55
9	9	9	9	9	9	9
92	64	64	64	64	46	55
92	64	64	64	64	46	55
9	9	9	9	9	9	9
46	64	64	64	64	32	55
9	9	9	9	9	9	9
46	64	64	64	64	32	55
9	9	9	9	9	9	9
46	64	64	32	32	46	55
1	1	1	1	1	1	1
46	64	64	64	64	46	55

按行相加  
→

归一化  
→

1.04	0.19	$\beta_1$
1.02	0.14	$\beta_2$
1.02	0.14	$\beta_3$
1.20	0.16	$\beta_4$
1.20	0.16	$\beta_5$
1.40	0.19	$\beta_6$
0.124	0.02	$\beta_7$

将上面的权重数值代入系统相似度的计算公式可以得到:

$$Q(A, B)=0.19 \times 0.6 + 0.14 \times 1 + 0.14 \times 1 + 0.16 \times 0.8 + 0.16 \times 0.8 + 0.19 \times 0.68 + 0.02 \times 1 = 0.8$$

通过对虚拟系统的可信度分析及相似度的计算结果,可知本文开发的设备数字模型非常符合实际,由此数字建模进行的虚拟实验得到的仿真结果是可信的。

建立一个虚拟样机一般要经过从实际系统到基本模型,从基本模型再转换成数字样机的过程。由于对实际系统的观察不全面,数据的获取也不可能完全。但只要把基本模型中的有关分量集中起来,简化它们之间的相互关系,建立起相对简单相似模型并数字化成虚拟样机,这样,虚拟样机的仿真结果便能够完全可信。本文对虚拟样机的相似建模及仿真的置信度评估进行研究与探讨,相信会对实际系统的虚拟仿真、特别是对复杂系统虚拟样机的建模和有效性判定具有一定的指导意义。

参考文献

[1] 李瑞涛,方涓,张文明.虚拟样机技术及其在矿山机械领域的应用展望[J].矿山机械,2000(5):11-12.

[2] 李瑞涛,方涓,张文明,等.虚拟样机技术在立式行星磨设计中的应用研究[J].冶金设备,2001(3):4-8.

[3] Li Ruitao, Fang Mei, Zhang Wenming, et al. Simulation research on vertical planetary mill based on virtual prototyping [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2001(2):86-90.

[4] 周美立.相似工程学[M].北京:机械工业出版社,1998.

(收稿日期:2011-06-10)

作者简介:

李瑞涛,男,1971年生,博士,主要研究方向:计算机辅助设计,虚拟样机技术及其产品设计的应用。