

采用状态空间模型的产品设计行为预测

张执南, 谢友柏

(上海交通大学机械与动力工程学院, 200240, 上海)

摘要: 为在设计阶段预测产品运行中可能出现的问题,根据状态空间模型在系统预测方面的优势,结合扩展的功能-行为-结构模型在设计分析方面的优势,将原理知识、结构信息和状态变量包括在方程之内,建立了从设计过程到状态空间的映射模型. 系统行为预测的关键步骤包括获取结构信息、约束信息和确定状态变量,以及初值、确定输入信息和计算方法在内的使用状态空间模型,并通过某型号发动机的活塞运动学和摩擦学行为预测实例,验证了映射模型的有效性. 实验结果表明,所建立的模型能够准确地预测活塞的运动学和摩擦学行为,可作为优化系统结构和获取系统设计理由知识的有效设计工具.

关键词: 状态空间模型; 产品设计; 功能-行为-结构

中图分类号: TH11; TH12 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)01-0054-04

Product Behavior Prediction Using State-Space Model

ZHANG Zhinan, XIE Youbai

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Product behavior prediction plays a critical role in the early stage of product design due to the significant impact on the downstream design process. Integrating the strength of state-space model (SSM) in handling systems and the merit of purpose-function-effect-structure-behaviour ontology in analysis design process, a mapping relationship from effect-structure-behaviour to the SSM was established, and the key processes in the SSM were determined. The SSM for a crank-connecting rod mechanism was established to verify the proposed method. The result shows that SSM enables to provide a novel alternative to predict system behavior and optimize system design parameters.

Keywords: state-space model; product design; function-behavior-structure

随着产品在市场上竞争的日趋激烈,如何在提高产品性能的同时缩短产品开发时间和降低研发成本是企业不断追求的目标. 在产品设计阶段,通过预测和评估产品行为可以发现产品在运行中可能出现的问题,这对于提高产品性能、缩短开发时间和降低开发成本具有重要的意义^[1-2]. 因此,有必要针对产品设计行为的预测方法进行研究.

Gero^[3]提出了基于设计对象功能-行为-结构的设计认知过程模型(FBS),其中根据设计结构预测设计行为是FBS模型的重要组成部分,但文献[3]没有给出进行产品行为预测的方法. 许多设计理论

和方法方面的研究都注重建立产品的功能结构或致力于建立通用的设计求解过程^[2-6],因此设计结构矩阵方面的相关研究可用于分析和优化设计任务、设计参数之间的依赖关系^[7],而文献[2-7]都缺少对产品设计行为预测的关注,很多商用软件虽可预测产品行为,但都有固定的应用领域,且缺乏通用性,价格昂贵. 一方面由于产品的行为是状态变量的最小集合,它包含系统或过程的过去的足够信息,能够计算未来的性质和状态^[8-9];另一方面,状态空间模型应用领域十分广泛^[8-12],并且适合计算机模拟,因此建立系统的状态空间模型可以预测系统的设计

行为.

本文建立了产品设计空间到状态空间的映射模型,给出了运行状态空间模型预测系统行为的关键步骤.以发动机曲柄连杆机构系统为例,建立了系统状态空间模型,并对活塞动力学和摩擦学行为进行了预测.研究表明,状态空间模型可用来预测系统行为,进而可用于获取系统结构优化设计所需要的知识.

1 状态空间模型

1.1 状态空间模型的结构

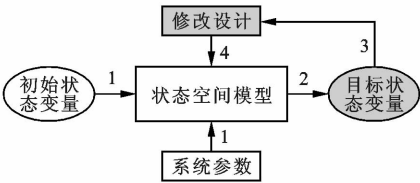
根据控制理论知识,一个给定系统的状态空间模型为

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = \mathbf{A}X(t) + \mathbf{B}U(t) \\ Y(t) = \mathbf{C}X(t) + \mathbf{D}U(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: X 为状态向量; U 为输入向量; Y 为输出向量; A 为系统结构矩阵; $B、C、D$ 分别为系统的输入和输出关系矩阵. $A、B、C、D$ 反映的是输入通过结构对状态变化和输出产生影响,状态变化通过结构影响输出.因此,在产品设计中,当产品结构关系已经确定时,根据学科原理知识,建立系统的状态空间模型,即可在给定输入条件下进行产品行为的预测.

1.2 状态空间模型的功能

如图 1 所示,可根据系统初始或者过去某一时刻的状态,预测系统未来某一时刻的状态.考察系统参数对系统状态的影响,通过分析系统行为(目标状态变量)来获取设计理由知识,用以改进设计.



1:准备运行模型所需参数;2:运行模型的系统行为结果;3:分析结果获取设计理由知识;4:修改系统设计结构重新运行模型

图 1 状态空间模型的功能

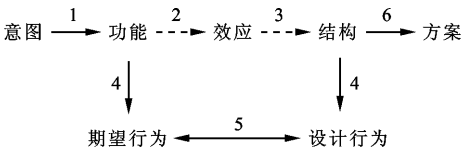
2 设计空间到状态空间的映射

2.1 设计空间建模

设计空间可由设计对象和设计过程所描述,根据 Gero^[3]的研究,设计对象和设计过程的描述本体都是 FBS.由于 Gero 的 FBS 模型过于依赖设计师个人的经验,不足以支持向多个领域寻求设计问题

的创新解,因此本文对 FBS 模型进行扩展得到的意图-功能-效应-结构-行为(PFESB)模型如图 2 所示.由图 2 可知,产品设计过程是从明确客户意图出发直至产生设计方案的迭代求解过程,图中数字 1~6 代表 PFESB 模型中所采取的关键设计过程.

根据图 2 对设计空间的描述,给定产品的功能,通过寻求实现功能的效应和综合作用原理即可得到产品的原理结构.同样,给定产品结构也可以预测产品设计行为和评价功能的实现程度,即评估设计行为与期望行为的匹配程度.由此可知,产品功能的实现程度和保持性主要由产品行为所体现,所以预测产品设计行为是评估产品设计结构能否满足产品功能需求的关键方法.



1:匹配;2:寻求;3:综合;4:分析;5:评估;6:表述

图 2 PFESB 设计本体模型

2.2 设计过程到状态空间模型的映射

对任何系统,无论其结构如何复杂,系统的输入和输出都遵循特定的工作原理.根据 PFESB 模型,设计师根据产品功能来寻求实现产品功能的作用原理,在获知产品作用原理后,设计师通常先对能够满足工作原理的已有产品功能模块的结构进行组合,进而得到产品结构.对于如何完成上述过程,可参考文献[4].

设 $B_s=[P]$ 为表征系统行为的状态集, P 为系统状态变量; $S=[G,T,M]$ 为表征系统结构的状态集, G 为几何变量的集合, T 为几何变量间的拓扑关系, M 为材料属性. $E=[D]$,表征与系统行为有关的原理知识, D 为领域知识的集合.由于人们总是从系统行为的结果去认识系统行为,在不包括结构变化时,系统的状态则表征系统行为的结果^[9].因此,系统行为可以表述为 $B_s=S \cap E$,即行为依赖于系统结构和系统工作的原理知识.设计过程到状态空间的映射模型可表述为

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix}' = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \cdots & B_{1n} \\ B_{21} & B_{22} & \cdots & B_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ B_{n1} & B_{n2} & \cdots & B_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

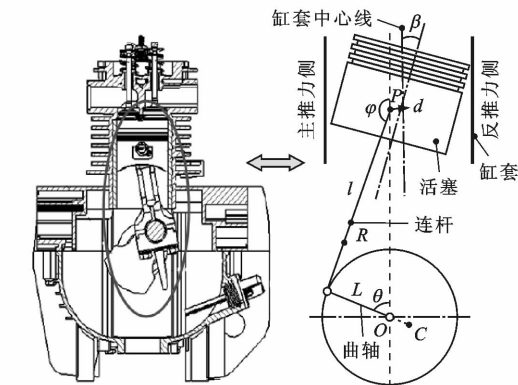
式中: $A_{ij}(i,j=1,2,\cdots,n)$ 反映的是结构对状态变化的影响; $B_{ij}(i,j=1,2,\cdots,n)$ 反映的是输入通过结构对状态变化的影响; $P_n(n=1,2)$ 反映的是能够进行系统行为预测的状态; $U_n(n=1,2)$ 则为施加在系统上的输入变量和环境等约束变量; n 为状态变量的数量.由于模型的建立依赖于对相关学科知识的集成,因此状态空间模型也承担着知识集成的功能.

2.3 模型的运行

状态空间模型的运行步骤:①获取产品结构信息,具体包括产品几何信息(如尺寸)和物理信息(如材料属性);②获取状态变量的初始信息和产品的约束信息;③获取系统输入信息;④在确定所有输入信息后,基于模型开发的相关计算程序,便可考察在给定系统环境下的系统行为,即由分析结构得到设计结构所能产生的设计行为.将得到的设计行为与产品的期望行为进行比较,即完成对产品行为的预测.

3 实 例

如图3所示,以文献[13]中的单缸四冲程OHV汽油机中曲柄滑块机构对模型的有效性进行验证.根据PFESB模型,在原理知识和结构确定的条件下,通过对系统设计行为的预测来评估设计方案是否满足期望的行为需求,其目标是建立状态空间模型,对系统中活塞的运动学行为和摩擦学行为进行预测.



(a)发动机实例 (b)曲柄连杆机构
 l :连杆长; L :曲柄长度; C :曲轴质心位置; R :连杆质心位置;
 β :活塞偏摆角度; d :活塞横向位移; P :活塞销心位置;
 φ :连杆缸套夹角; θ :曲柄转角

图3 样机及其曲柄连杆机构示意图

摩擦学系统的功能是保证系统运动^[9]和阻止系统性能衰退,因此期望的系统行为是活塞的运动应满足对活塞运动的要求,以及摩擦损失应在希望的范围之内.由于系统的运动学和摩擦学行为都与曲柄转角和活塞在缸套内的横向运动和绕活塞销的偏摆运动有关,因此选取 θ 、 d 和 β 作为系统的状态变量.根据力学、摩擦学等学科知识对系统进行建模,进而得到了系统的状态空间模型

$$\begin{bmatrix} d \\ \dot{d} \\ \beta \\ \dot{\beta} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{26} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{46} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ \dot{d} \\ \beta \\ \dot{\beta} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ U_2 \\ 0 \\ U_4 \\ 0 \\ U_6 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: A_{26} 、 A_{46} 、 A_{66} 是系统状态变量的函数且包括系统的结构要素; U_2 、 U_4 、 U_6 是输入要素并包括部分结构要素.

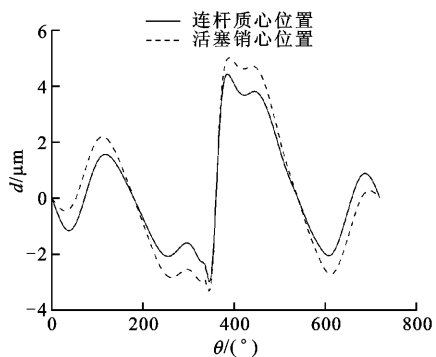
根据状态变量可建立求解不同系统行为的输出方程

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ P_f \\ \mathbf{X} \\ \beta \\ F_f \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{16} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{26} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{46} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ \dot{d} \\ \beta \\ \dot{\beta} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (4)$$

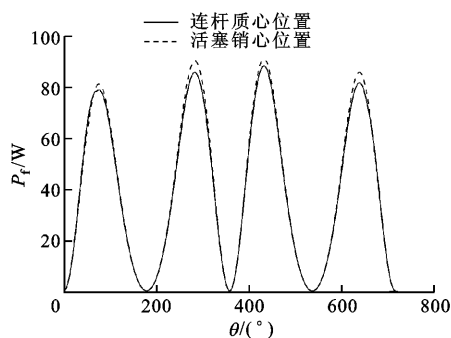
式中: $C_{16} \sim C_{66}$ 是输出关系阵中的元素; P_f 为活塞裙部摩擦功率损失; F_f 为活塞裙部摩擦力.式(3)、式(4)中各变量的具体含义和数值可参见文献[11].

利用式(3)可获取曲柄连杆机构在发动机工作中任意时刻的角度和角速度,以及活塞横向和偏摆运动的状态变化信息.根据需要预测的系统行为建立如式(4)所示的输出方程,给定输入参数,用式(3)获取目标时刻的系统状态变量值后,将状态变量带入输出方程中,便可对活塞的运动学和摩擦学行为进行预测.

图4是使用所建立的状态方程和输出方程得到的一组结果.实例中的配缸间隙为 $15\text{ }\mu\text{m}$,由于活塞横向位移小于配缸间隙,因此活塞在规定的范围内做横向运动.根据图4所示的系统行为结果,可以判断活塞横向运动和摩擦损失是否在规定的范围内,同时可以考察改变系统结构参数是否会得到优化设计方案.



(a) 活塞销心横向运动位移



(b) 活塞裙部摩擦功率损失

图4 活塞在曲柄 720° 转角中的输出行为

由曲柄滑块结构中的活塞运动学和摩擦学行为预测案例可知,建立系统状态空间模型,即可根据模型对系统的设计结构参数、系统的输入参数,以及环境影响参数进行评估.基于状态空间模型,可在设计阶段根据系统结构关系对系统可能产生的行为进行预测,也可针对已经投入使用的产品来预测产品寿命周期剩余阶段的系统行为.通过分析系统行为可以获取深层次设计知识,如通过分析本例中的活塞横向位移,可以获取活塞将于何时何处与缸套发生碰撞的信息,这将为活塞敲缸和噪声分析提供知识.通过分析已经投入使用的产品行为,可为下一代产品设计提供设计理由知识.

4 结论

基于状态空间模型的功能分析,本文使用状态

空间模型来评估系统影响因素对系统输出行为的影响.根据设计认知过程模型,建立了设计过程与状态空间模型的映射关系,通过状态空间模型对系统原理知识和系统结构进行集成,并给出了使用状态空间模型进行系统行为预测的条件和步骤.

案例分析表明,针对发动机子系统所建立的状态空间模型,可对系统的动力学和摩擦学行为进行预测,并作为优化系统结构和获取系统设计理由知识的有效设计工具.基于状态空间模型,可在设计阶段根据系统结构关系对系统可能产生的行为进行预测,也可针对已经投入使用的产品,来预测产品寿命周期剩余阶段的系统行为.

参考文献:

- [1] 谢友柏. 现代设计理论和方法的研究 [J]. 机械工程学, 2004, 40(4): 1-9.
XIE Youbai. Study on the modern design theory and methodology [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(4): 1-9.
- [2] ZHAI Lianyin, KHOO L, ZHONG Zhaowei. Design concept evaluation in product development using rough sets and grey relation analysis [J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36: 7072-7079.
- [3] GERO J S. Design prototypes: a knowledge representation schema for design [J]. AI Magazine, 1990 (11): 26-36.
- [4] PAHL G, BEITZ W. Engineering design: a systematic approach [M]. WALLACE K. New York, USA: Springer Verlag, 2007: 1-436.
- [5] ULLMAN D G. A taxonomy for mechanical design [J]. Research in Engineering Design, 1992 (3): 179-189.
- [6] ROY U, PRAMANIK N, SUDARSAN R, et al. Function-to-form mapping: model, representation and applications in design synthesis [J]. Computer-Aided Design, 2001(33): 699-719.
- [7] EPPINGER S D, WHITNEY D E, SIMITH R P, et al. A model-based method for organizing tasks in product development [J]. Research in Engineering Design, 1994(6): 1-13.
- [8] 汪应洛. 系统工程学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 66-75.
- [9] 谢友柏. 摩擦学系统的系统理论研究和建模 [J]. 摩擦学学报, 2010, 30(1): 1-8.
XIE Youbai. On the system theory and modeling of tribo-systems [J]. Tribology, 2010, 30(1): 1-8.
- [10] ZHANG Z, XIE Y, ZHANG X, et al. Analysis of

- piston secondary motion considering the variation in the system inertia [J]. Proc Instnmech Engrs: Part D Journal of Automobile Engineering, 2009,223(4):549-563.
- [11] 张执南,谢友柏. 考虑连杆-曲轴变惯性影响的活塞二阶运动分析 [J]. 上海交通大学学报, 2010,44(4): 555-559.
ZHANG Zhinan, XIE Youbai. Effects of connecting rod-crankshaft variable inertia on piston secondary motion [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2010,44(4):0555-0559.
- [12] 王跃武,胡芑,陈则韶. HFC-227ea 的 MBWR 状态方程 [J]. 西安交通大学学报,2007,41(1):37-40.
WANG Yuewu, HU Wan, CHEN Zeshao. MBWR equation of state of HFC-227ea [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007,41(1):37-40.
- [13] 孟祥慧. 复杂产品时变性能设计和设计中的知识服务研究 [R]. 上海:上海交通大学机械与动力工程学院, 2008.

(编辑 管咏梅)