

基于 Kuipers 定性推理方法的概念设计建模与仿真^{*}

李 珊, 邓益民

(宁波大学 机械工程与力学学院 浙江 宁波 315211)

摘 要: 概念设计是产品设计过程中最重要的一个阶段, 这个阶段的产品信息通常是不精确的、模糊的、不完全的。传统的定量方法无法对其进行建模。使用定性推理方法对其建模仿真, 进而对系统的行为进行预测, 能为概念设计提供分析、推理和验证方法, 能有效提高设计效率。在分析机械产品概念设计特性的基础上, 提出使用 Kuipers 定性推理方法开展概念设计的建模和设计推理并以平面四杆机构为例说明其分析及推理过程, 证实了这一方法的有效性。

关键词: 概念设计; 定性推理; 定性仿真

中图分类号: TH12

文献标志码: A

文章编号: 1007-4414(2013)01-0023-04

Modeling and simulation of conceptual design based on Kuipers qualitative reasoning method

Li Shan, Deng Yi-min

(Faculty of mechanical engineering and mechanics, Ningbo university, Ningbo Zhejiang 315211, China)

Abstract: Conceptual design is the most critical stage of product design. In this stage, the design information is usually not accurate, fuzzy and not complete. With this information, it is difficult to be modeled by conventional quantitative method. By modeling conceptual design with the qualitative reasoning method, predicting the system behaviour can assist design analysis, reasoning and verification, and can improve design efficiency effectively. Based on analyzing the characteristics of mechanical product conceptual design, the work on conceptual design modeling and simulation is presented with Kuipers qualitative reasoning method, which is followed by a case study of a four-bar linkage to illustrate the whole procedure and also to demonstrate its effectiveness.

Key words: conceptual design; qualitative reasoning; qualitative simulation

1 引 言

产品的设计通常经历阐明任务、概念设计、具体设计、详细设计等几个阶段^[1]。概念设计是在确定设计任务之后, 对任务进行抽象化, 建立系统的功能结构, 寻找合适的作用原理和组合等, 确定出基本的求解途径, 得出设计方案。虽然得出的是定性的设计方案, 但是它决定了产品的基本特征和主要框架, 后续的设计只是把它们具体化以更符合客户需求。从国内外学者对其从不同侧面进行研究可以看出它在产品设计阶段中的重要地位。

概念设计阶段得到的产品信息大多都不精确, 信息模糊。设计师根据设计经验给出初步设计方案, 利用经验知识对整个系统定性建模, 通过对系统行为的定性预测给出大致的设计方向, 可减少重复设计次数, 提高设计效率, 降低设计成本^[2]。但仅靠设计师的经验知识很难做到设计智能化, 解决这个问题的方法是使用人工智能中的定性推理技术。定性推理是使用定性信息对系统功能、行为和结构进行描述, 以及研究它们之间的关系和因果性, 获得定性解释, 是

一种模仿人的定性常识推理思维的跨领域的推理方法。它的主要思路是: 忽略所描述问题的次要因素或繁冗, 忽略问题中可能出现的非精确性和不完备性, 借助于规范、准则和掌握其主要因素来简化对问题的描述, 在此基础上, 将描述问题的传统定量方法转化为对相应的定性模型进行推理和给出定性解释^[3]。

通过对相关的定性推理方法的比较, 笔者提出使用 Kuipers 的定性仿真思想开展概念设计建模和仿真^[4]。Kuipers 把定性推理分成建立模型和定性仿真两个部分。模型建立的目的就是构造系统构件的定性微分方程 (QDE), 然后从定性微分方程出发预测系统行为。下面将结合概念设计的需要介绍 Kuipers 定性推理过程, 然后结合实例提出利用这一方法的概念设计建模的基本过程。

2 定性推理过程

提高产品设计效率的关键是如何使用概念设计中设计人员得到的定性知识, 且如何通过这一定性信息建立系统模型, 对系统行为和功能进行分析。建立模型, 找出该模型的仿真分析方法, 满足设计需求。

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50875133)

收稿日期: 2013-01-04

作者简介: 李 珊 (1987-) 女, 江西九江人, 在读硕士, 研究方向: 机械设计理论及方法。

本文所用到的 Kuipers 定性仿真方法就是在系统建模的基础上对系统的行为进行分析推理。

Kuipers 的定性仿真实理论中把系统的构成元素当作变量来描述,由物理规律得到变量间的约束关系,由这些约束关系得到定性微分方程,把变量随时间的变化作为定性状态转变。仿真算法是从每个变量的初始状态出发,先生成变量的后继状态,再过滤掉没有用或者不可能出现的状态,如此重复,直到变量没有新的状态生成为止,最后得到推理出的系统行为。

2.1 定性模型建立

在 Kuipers 的定性仿真实理论中,模型构建的目标就是建立系统的定性微分方程。建立定性微分方程首先要确立变量间的约束关系。约束关系由物理定律得到。把系统的构成元素看成变量,系统的结构被描述成代数约束和定性约束。由系统构件的约束关系得到定性微分方程,仿真从定性微分方程出发,设定系统的初始状态,先得出所有可能的后继状态再过滤掉无用状态。但是在确立变量间的约束关系之前根据物理定律对变量进行因果分析,得到变量的因果关系网,就能一目了然的得到变量间的约束关系,便于定性微分方程的建立,也有利于实现计算机化,这样的处理方式能有效的提高设计效率。之所以要描述出变量间的因果关系是因为因果关系是人们思维中一个非常重要的概念,它能用来对系统定性知识进行描述和推理^[5],尤其是在概念设计阶段,工程师们能利用它们之间的因果关系描述系统如何产生行为,说明了系统部件间的作用关系;而且,因果关系作为系统理解的一种模式,便于解释系统。因此,以因果关系为基础来分析系统变量间的关系,建立系统模型有着很大的便利。

Kuipers 定性仿真实理论中定性微分方程由时间加法、乘法、微分和单调函数关系组成。变量是时间的一个有理函数,变量间的约束关系表示成二元或三元函数,基本形式如下:

$$\text{ADD}(f, g, h) \equiv f(t) + g(t) = h(t)$$

$$\text{MULT}(f, g, h) \equiv f(t) \times g(t) = h(t)$$

$$\text{DERIV}(f, h) \equiv \frac{d}{dt}f(t) = h(t)$$

$$M^+(f, g)$$

$$M^-(f, g)$$

式中: f, g, h 是变量随着时间变化的有理函数; ADD 表示加法约束关系; MULT 表示乘法约束关系; DERIV 表示微分约束关系。这上三种约束关系是代数约束,还有定性约束 M^+ 和 M^- , M^+ 表示单调增函数, M^- 表示单调减函数。 M^+ 、 M^- 约束是对无法用精确数学描述的变量关系的一种抽象,它将多个变量

的关系描述为一个定性约束关系。该关系的引入使得描述系统的定性知识和系统的定性模型有了更完整的依据。这些约束就是组成定性微分方程也是仿真过程中过滤变量后继状态的依据。

2.2 定性仿真

定性仿真过程的本质是推理过程^[6],在建立了系统的定性微分方程之后,用定性仿真算法对其进行推理。推理的过程是通过变量当前的定性状态产生出其后继状态,然后过滤或消除,不断推进,直到不出现新的状态为止,最后那些没有过滤或消除的定性状态就是推理出的系统行为。每个变量的都有量空间(可以看成是值域)、定性状态和定性行为,定性行为就是定性状态的集合。在这里先给出几个定义:每个变量都有定义域,在定义域里面,变量有零点、起点、终点和极值点,这些点叫做界标值,例如有一个变量 x ,某个界标值为 x_i ,如果有时间 t ,使得 $x(t) = x_i$,那么称 t 为区分时间点,一个界标值对应一个时间点。在时间点上变量 x 表示为 x_i ,在时间区间变量表示为 (x_i, x_{i+1}) , x_{i+1} 是下一个界标值;变量对时间的微分为大于 0 用 inc 表示,小于 0 用 dec 表示,等于 0 用 std 表示;变量从时间点到时间区间的转换定义为 P 转换,反之定义为 I 转换;变量 x 在时间 t 上的定性状态 QS 包括变量的大小和变量的变化趋势;变量的定性行为就是变量的定性状态的序列。下面就用定性仿真算法对系统行为进行仿真推理。

为了方便定性仿真算法的进行,应先给出每个变量的量空间、初始状态和在相同时间上和时间区间上的状态转变。定性仿真算法的主要步骤如下:①选定变量的初始定性状态;②根据变量在时间上的变换,确定其所有可能的转换;③对每一个约束,产生约束中的变量所有可能的组对,再根据约束关系,做一致性过滤包括定性值的一致性和变化方向的一致性;④对有相同变量的约束,把它们也组对,在用一致性过滤原则过滤掉不可能的定性状态;⑤剩下的元组根据约束关系生成所有可能的解释,作为新的状态,新的状态作为后继状态;⑥用全局过滤方法过滤新的状态。全局过滤的目的是要过滤掉与前状态相同的新状态;无变化的状态和变量值为 ∞ 的发散状态。

重复这六个步骤,直到没有新的状态出现为止。本文中用图形表示算法输出的系统定性行为。

3 实例

以平面四杆机构设计为例,来说明 Kuipers 定性推理方法在概念设计中的应用。这是一个很简单的平面四杆机构,也是很多复杂系统的原型,所以分析平面四杆机构具有代表性。

其结构如图 1 所示,AD 两点固定且在同一直线

上与地面平行,主动杆,连杆,从动杆,固连杆。它们分别为 l_a, l_b, l_c, l_d, l_p 。固连杆与连杆之间的夹角为 θ 。现用位移法对机构进行位移分析,为了方便起见,设定机架杆与 x 轴重合,铰链点 A 与原点重合。给定铰链点 A, D 的坐标和和各部件的长度及 θ ,其余的参数通过位移约束分析得到。

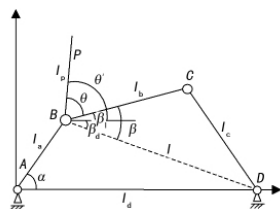


图 1 四连杆机构简图

连接 BD , 长度用 l 表示。各变量的表达式如下:

$$x_B = l_a \cos \alpha \quad (1)$$

$$y_B = l_a \sin \alpha \quad (2)$$

$$l = [(x_B - x_D)^2 + (y_B - y_D)^2]^{1/2} = [(x_B - l_d)^2 + y_B^2]^{1/2} \quad (3)$$

$$\beta_d = \arctan [(y_D - y_B) / (x_D - x_B)] = \arctan [(-y_B) / (l_d - x_B)] \quad (4)$$

应根据实际情况判断 β_d 的取值,若取值范围为 $[-\pi, \pi]$,判断方法如下:

$$\beta_d = \begin{cases} \beta_d & l_d - x_B \geq 0 \\ \beta_d - \pi & l_d - x_B < 0, y_B > 0 \\ \beta_d + \pi & l_d - x_B < 0, y_B < 0 \end{cases}$$

若取值范围为 $[0, 2\pi]$,则在上述基础上对 $\beta_d < 0$ 时,令 $\beta_d = \beta_d + 2\pi$ 即可。

对于 $\triangle BCD$ 有:

$$l_c^2 = l_b^2 + l^2 - 2l_b l \cos \beta \quad (5)$$

$$\text{则: } \beta = \arccos [(l_b^2 + l^2 - l_c^2) / 2l_b l] \quad (6)$$

那么图中的角度 β_1 有:

$$\beta_1 = \beta - \beta_d \quad (7)$$

P 点的运动轨迹,它的位移坐标为:

$$x_P = x_B + l_p \cos \theta' \quad (8)$$

$$y_P = y_B + l_p \sin \theta' \quad (9)$$

$$\theta' = \theta + \beta_1 \quad (10)$$

若想知道随着时间的推移这些变量的变化趋势,那么就要用到定性推理的方法。先描述这些变量之间的因果关系,这有利于后面的定性微分方程的表示。根据上面的表达式有如图 2 所示关系。

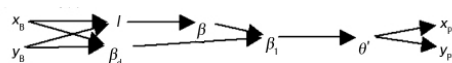


图 2 四连杆机构运动分析变量关系图

从图 2 中可以看自变量及因变量。从系统变量间的因果关系可以得出它们的定性约束。在如下约束下进行约束过滤: $x_B - l_d < 0, \alpha \in (0, \pi/2), l_a, l_b, l_c, l_d, l_p, \theta$ 为定值。

根据变量间的物理定律则系统模型的定性微分方程为: $M^-(\alpha, x_B), M^+(\alpha, y_B), M^+(x_B, y_B, l), M^-(x_B, y_B, \beta_d), M^-(l, \beta), \text{ADD}(\beta, \beta_d, \beta_1), \text{ADD}(\beta_1, \theta'), M^-(\theta', x_P), M^+(\theta', y_P)$ 。

得到这些定性微分方程后就可对其进行定性仿真。因为变量状态变化是从时间点到时间段变化所以是 P 变换。各变量的量空间如表 1 所示。各变量的定性初始状态如表 2 所列。变量的 P 变换的后续状态如表 3 所示;约束过滤后变量的后续状态如表 4 所示;仿真结果表明了各变量的变化趋势,也是它们的行为预测,如图 3 所列。

表 1 各变量的量空间

变量	α	x_B	y_B	β_d	l	β	β_1	x_P	y_P
量空间	0	0	$0, y_{Bmax}$	β_{dmin}	l_{min}	β_{min}	β_{1min}	x_{Pmin}	y_{Pmin}
	α_{max}	x_{Bmax}		0	l_{max}	β_{max}	β_{1max}	x_{Pmax}	y_{Pmax}

表 2 各变量的定性初始状态

$QS(\alpha, t_0) = \langle 0, std \rangle$	$QS(x_B, t_0) = \langle x_{Bmax}, std \rangle$
$QS(y_B, t_0) = \langle 0, std \rangle$	$QS(\beta_d, t_0) = \langle 0, std \rangle$
$QS(l, t_0) = \langle l_{min}, std \rangle$	$QS(\beta, t_0) = \langle \beta_{max}, std \rangle$
$QS(\beta_1, t_0) = \langle \beta_{1max}, std \rangle$	$QS(x_P, t_0) = \langle x_{Pmin}, std \rangle$
$QS(y_P, t_0) = \langle y_{Pmax}, std \rangle$	$QS(\theta', t_0) = \langle \theta'_{max}, std \rangle$

表3 各变量的P变换的后继状态

变量	后继状态	变量	后继状态
α	$P_1 \Rightarrow \langle 0 \text{ } s\text{td} \rangle$	β	$P_1 \Rightarrow \langle \beta_{\max} \text{ } s\text{td} \rangle$
	$P_2 \Rightarrow \langle 0 \text{ } \pi/2 \rangle \text{ } i\text{nc} \rangle$		$P_2 \Rightarrow \langle \beta_{\max} \text{ } \beta_{\min} \rangle \text{ } d\text{ec} \rangle$
x_B	$P_1 \Rightarrow \langle x_{B\max} \text{ } s\text{td} \rangle$	x_P	$P_1 \Rightarrow \langle x_{P\min} \text{ } s\text{td} \rangle$
	$P_2 \Rightarrow \langle x_{B\max} \text{ } 0 \rangle \text{ } d\text{ec} \rangle$		$P_2 \Rightarrow \langle x_{P\min} \text{ } x_{P\max} \rangle \text{ } i\text{nc} \rangle$
y_B	$P_1 \Rightarrow \langle 0 \text{ } s\text{td} \rangle$	y_P	$P_1 \Rightarrow \langle y_{P\max} \text{ } s\text{td} \rangle$
	$P_2 \Rightarrow \langle 0 \text{ } y_{B\max} \rangle \text{ } i\text{nc} \rangle$		$P_2 \Rightarrow \langle y_{P\max} \text{ } y_{P\min} \rangle \text{ } d\text{ec} \rangle$
β_d	$P_1 \Rightarrow \langle 0 \text{ } s\text{td} \rangle$	β_l	$P_1 \Rightarrow \langle \beta_{l\max} \text{ } s\text{td} \rangle$
	$P_2 \Rightarrow \langle 0 \text{ } \beta_{d\min} \rangle \text{ } d\text{ec} \rangle$		$P_2 \Rightarrow \langle \beta_{l\max} \text{ } \beta_{l\min} \rangle \text{ } d\text{ec} \rangle$
l	$P_1 \Rightarrow \langle l_{\min} \text{ } s\text{td} \rangle$	θ'	$P_1 \Rightarrow \langle \theta'_{\max} \text{ } s\text{td} \rangle$
	$P_2 \Rightarrow \langle l_{\min} \text{ } l_{\max} \rangle \text{ } i\text{nc} \rangle$		$P_2 \Rightarrow \langle \theta'_{\max} \text{ } \theta'_{\min} \rangle \text{ } d\text{ec} \rangle$

表4 过滤后的各变量后继状态

α	x_B	y_B	β_d	l	β	x_P	y_P	β_l	θ'
P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1
P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2	P_2

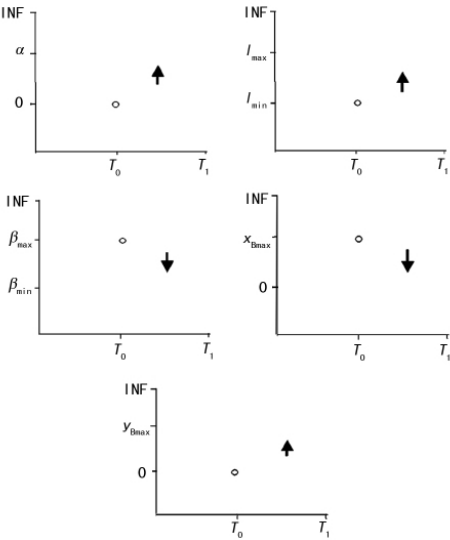


图3 行为预测

4 结 论

运用 Kuipers 定性推理方法对平面四杆机构进行了行为预测,这个案例虽然简单,但其所描述的方法对复杂的系统同样适用。通过这一方法,设计人员可以对设计中一些不确定的因素加以描述和推理,对所设计的概念或方案加以仿真和分析,从而帮助设计人员作出设计判断和修改,对概念设计,特别是涉及到复杂行为过程的机电系统的概念设计将尤为重要。

未来的研究将进一步探讨如何在定性推理中加入定量知识,结合定量、定性知识进行设计建模,为概念设计的建模和设计推理提供更全面的技术支持。

参考文献:

[1] Pahl G, Beitz W. Engineering design [M]. The Design Council, 1986.

[2] 夏文俊. 面向概念设计的定性建模技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.

[3] 石纯一, 廖士中. 定性推理方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

[4] Kuipers B. J. Qualitative simulation: reasoning with qualitative models [J]. Artificial Intelligence, 1993, 59(1): 125-132.

[5] 蔡勇, 石纯一. 定性推理中一种因果分析方法 [J]. 模式识别与人工智能, 1995, 8(3): 33-42.

[6] Kuipers B. J. Qualitative reasoning-modeling and simulation with incomplete knowledge [J]. Automatic, 1989, 25(4): 571-585.

• 信 息 •

全球最大太阳能电站在西班牙建成

该电站坐落在西班牙南部安达卢西亚地区海拔 1100m 的半干旱高原上,整个面积相当于 210 个足球场大小。该发电站一共安装了 60 万块抛面反射镜,每年每平方米能够聚集高达 2200℃ 的太阳能电力,折合每平方米 502W。这些抛面镜的焦点处有导热液体,当温度升高后会产生蒸汽,驱动附近的涡轮机发电,产生的电力可以满足西班牙 20 万户家庭的需求,同时每年减少二氧化碳排放 50 万吨。为保证日落后也有可靠的能量供给,电站将白天收集的多余太阳能存储在液体盐中。这些热能以熔盐的形式存储,可以用来加热水以生成蒸汽,确保涡轮机直到深夜都能继续发电。盐储存的热能能让涡轮机在夜间满负荷运转 7.5h。整座太阳能电站由 ABB 软件控制,所产生的电能通过 ABB 电力变压器和变电站设备输入电网。

• 本辑 •