

行为-结构演化序参量与运算*

侯悦民^{1,2} Michel van Tooren³ 季林红^{2,4}

(1. 北京信息科技大学机电学院, 北京 100192; 2. 清华大学机械工程系, 北京 100084;

3. 南卡罗里纳大学航天创新和研究中心, 哥伦比亚 SC 29201; 4. 清华大学教育部摩擦学重点实验室, 北京 100084)

摘要: 在系统层次研究设计的一般规律,以典型机构为实例,讨论结构演变过程,用宏观序参量加以描述,并通过设计机器人动作规划实现序列序参量运算,通过机构设计实例加以验证;用协同学序参量的概念描述行为-结构映射过程,揭示行为-结构映射的内在规律,在此基础上,进一步提出用设计机器人(D-Robot)执行序参量运算实现自动设计和分析,以实现往复运动行为的机构设计为例验证了方法的有效性。提出 D-Robot 通用模版,并以此为框架编制凸轮机构设计和分析 D-Robot 动作规划,实现了凸轮机构设计和分析自动设计。输入条件是从动件尖端运动轨迹,输出包括凸轮理论和实际廓线、速度和加速度运动分析、凸轮力分析、动平衡、速度波动及飞轮设计、运动模拟及设计分析报告。

关键词: 行为结构映射 序参量 设计机器人 自动设计

中图分类号: TH11; TH12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)12-0341-07

引言

机械设计问题的实质是匹配功能和结构^[1-2]。目前在这个领域的研究集中在算法和利用人工智能技术实现设计自动化。在算法方面,利用细胞自动机自动生成结构^[3-4]、用遗传算法自动生成结构^[5-8],利用基于规则的推理^[9]、形状语法^[10-12]、设计语言^[13]等实现功能-结构自动匹配,利用统计优化、基因算法、人工生命、定型物理(物理过程建模问题)、多代理(multiagent)系统、键合图、效用理论等集成算法^[14-16]实现自动设计。在计算机辅助设计方面,集中在应用 KBE 技术,用软件代码记录和重现设计和分析过程从而实现快速设计和分析^[17-19]。然而,尽管采用各种复杂算法和软件技术,目前基于计算机的设计系统只针对具体产品对象才有效。其原因在于:在设计过程中所采用的设计规则是针对具体产品对象所规定,不具备普遍性。

机床、运输机械、农业机械、以及普通机械装置一般是利用常用机构实现特定运动模式。传统机构的设计方法是采用图解法和坐标方程法求解尺度参数,因此,需要对每一种机构、每种机构的每一种类型建立方程或画图规则。其结果是对相同运动特性需要依据不同机构类型建立不同方程。例如,摆动推杆凸轮机构和直动推杆盘形凸轮机构虽然都是实

现往复运动,但是采用不同解析方程进行设计和分析。又例如曲柄滑块机构和直动推杆盘形凸轮机构,二者都是实现往复移动,其行为是相同的,但是二者的解析方程不同。从技术上说,针对每种机构建立方程和绘图规则,用计算机实现各种机构的设计和分析,并不造成很大的计算成本差异。然而,从理论上,设计规则依赖于特定机构形式而不是其行为特征,因此不能表达行为-结构映射的一般性,因此,对设计规则缺乏统一的描述框架。

另一方面,在制造业,通常采用工业机器人实现部分工序的集成和自动化操作。将设计过程视为一个信息生产过程,则设计和分析过程是将功能信息转化为结构描述的一系列操作。这个过程与制造过程中需要一系列加工工艺将原材料转化为最终产品的过程类似。

基于上述分析,本文提出机构设计和分析的序参量及算法实现,提出设计机器人^[20](Design robot, D-Robot)实现序参量运算,重点讨论描述设计过程结构演变模式的序参量,给出数学模型,并用实例验证。

1 结构演变序参量

依据哈肯的协同学理论^[21],一个系统在演变过程中,存在一个描述系统演变模式的参数,称为序参

收稿日期: 2013-12-06 修回日期: 2014-01-21

*北京市教委科研基金资助项目(SQKM201211232002)和国家自然科学基金资助项目(51175284)

作者简介: 侯悦民,副教授,博士,主要从事设计理论和算法、动力学分析及仿真研究,E-mail: hym01@mails.tsinghua.edu.cn

量。例如,磁铁加热到临界温度时,原子呈现混乱状态,当恢复后,又回到有序状态。在这种情况下,温度即为序参量^[21]。序参量的选取取决于系统性质,可以是物理量,也可以是想法^[22]。依据哈肯理论,只要参数能够描述系统演变模式,就是序变量。例如,对一个商业公司,生产销售产品或提供服务所获得的利润是序参量,因为利润决定了运营模式^[23]。对人脑而言,子系统是神经元,序参量是思想,因为思想决定了神经元的连接模式。又例如,人类抓握物体有单手或双手两种模式,在人能承担的重量范围内,采取哪个模式取决于物体的体积,因此,所抓取物体的体积是序参量^[24]。

如前所述,设计过程是信息生产过程,离散无序的概念逐渐演变成为空间有序、定量、有质的排列。从无序到有序,存在描述系统演变模式的序参量。

设计过程是从抽象概念到具体结构的过程,在这个过程中,宏观上可分为2个层次,一个是确定工作原理和工作结构,另一个是确定具体结构形状和尺寸。主要驱动力是物理、化学方程以及设计规则。前者即概念设计阶段,后者为详细设计阶段。

在实际机械设计中,并不严格区分概念设计和详细设计,而是一个边画边算的过程。首先依据功能需求,确定产品的主要结构及基本尺寸。将功能和结构联系在一起的基本依据是行为^[1]。

在这里,定义行为是结构所呈现状态的描述,通常用物理特性描述,例如温度、速度、位移、电压、电流、压力等物理量。依据功能需求,确定能够实现功能需求的行为。当行为确定之后,下一步工作是如何用物理结构实现特定行为,即确定工作原理和工作结构。因此,将设计需求转化为结构的关键,是将预定行为用物理结构加以实现,即行为-结构映射。一般地,在工程实际中,设计过程分为3个部分:行为-结构映射、分析以及工程文档,3个部分是并行进行的。

对机械设备和装置,行为-结构映射的第一步是选定实现预定行为的机构类型。机构形式确定后,建立方程(或者用图解法)求解机构尺度参数。尺度参数初步确定后,进一步进行分析验证。机构分析包括运动分析和力分析。如果需要动力学分析,则进一步进行动平衡及运动调速计算及其他计算,如结构有限元分析、流体动力学分析、热分析、动响应等。最后一步是结构绘图及制作分析报告。在实际工作中,设计、计算和绘图是穿插进行的,需要边画边算。目前的机构设计和分析过程是基于不同机构建立解析方程或用图解法求解尺度参数,然后进一步依据方程进行运动和力学分析,因此对不同机

构需要编制不同程序代码实现。

本文用协同学观点描述行为-结构映射过程、以及结构-行为映射过程,用宏观参量描述设计规则,从而建立统一的设计过程描述框架,以描述设计的内在规律。

1.1 行为-结构映射序参量

机构的基本特性是运动。依据理论力学,任何复杂运动都可以视为某个质点或刚体在那个瞬间相对某个点或轴线进行旋转运动叠加合成。在此,平动视为绕无穷远点的旋转运动。

在典型平面机构设计过程中(见任意机械原理教材),机构的基本运动特性是旋转,旋转中心是已知的。例如,对凸轮机构设计,凸轮廓线可以通过依次旋转从动件尖端位置投影而获得,回转中心为凸轮回转中心。直动推杆盘形凸轮、摆动推杆盘形凸轮、以及圆柱凸轮机构的凸轮廓线均可通过这种方法获得。对平面凸轮机构,回转中心为凸轮回转中心;对空间圆柱凸轮机构,回转中心为圆柱凸轮回转轴线。不仅如此,曲柄滑块机构、曲柄连杆机构也可以通过这种方法获得。对连杆机构设计,问题实质是求机构铰链点位置,求解方法为以某个杆为参考基础,即假想机架,然后以参考基础构件上一点为中心整体旋转构件,即可获得新的位置点序列,求新位置点序列圆心即为所求铰链位置。例如对已知两连架杆对应位置及曲柄标线或摇杆(滑块)标线求解四杆机构,以参考构件为基础,旋转曲柄或摇杆,得到曲柄相对摇杆相对运动的新位置点序列,求出新位置点序列圆心,即为曲柄或摇杆上铰链点位置。当已知两连架杆位置时,以构件参考位置为基准,进行两次旋转,先以无穷远处为回转中心旋转,即平动,然后以参考构件上基准点为回转中心再次旋转,获得新的位置点序列,求新位置点序列圆心,即为铰链点。因此,对平面凸轮机构和连杆机构,通过反复进行旋转运算或者结合旋转运算和求圆心运算,则初始位置序列演变为最终机构结构形式。

依据定义,当一个参量能够描述系统结构演变模式时,即为序变量。凸轮廓线可以通过重复旋转运算而实现,因此,对往复运动行为,旋转是行为-结构映射的序参量,用旋转矩阵描述。设 $P(x, y)$ 为任意位置序列点坐标, T_R 为旋转矩阵,则数学表达为

$$P(x, y) = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \\ \vdots & \vdots \\ x_n & y_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_R = \begin{bmatrix} \cos\delta_i & -\sin\delta_i \\ \sin\delta_i & \cos\delta_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

旋转 δ 角度后, 点 P 旋转到新位置 $P'(x, y)$, 数学表达为

$$P'(x, y) = P(x, y)T_R \quad (3)$$

对凸轮机构, $P'(x, y)$ 点轨迹即为凸轮廓线; 对连杆机构, 求 $P'(x, y)$ 点轨迹所形成的圆弧的圆心即为所求铰链点位置。

在此, 旋转运动回转中心是由控制参量^[21]所决定的。序参量描述系统演变过程, 而控制参量决定了系统发展方向, 即最终结构形态。在初始条件和序参量相同的情况下, 当控制参量不同时最终结构不同。为了避免概念过多, 将控制参量设置为已知。例如, 对平面凸轮是凸轮回转中心; 对空间凸轮机构是凸轮圆柱回转中心; 对四杆机构, 是待求构件上一点。即控制参量为输入值。

旋转运动旋转角度也是已知的, 旋转角度由初始位置时空序列决定, 即由期望的行为确定。例如, 对凸轮机构, 已知条件是推杆尖端位置时间序列 $s(t)$, 将时间序列转化为推杆和凸轮转角对应位置 $\delta(t)$ 。这个与通常凸轮设计方法原理相同, 但是不采用反转法, 而是直接转动推杆尖端点投影位置。又例如, 对平面连杆机构, 设计问题为已知连杆或连架杆位置, 则旋转角度由初始位置的夹角确定, 即转角也是已知的。采用序参量描述的计算基础是计算机编程, 例如, 反复进行旋转运算生成凸轮廓线, 这个过程需要借助于计算机实现。用图解法手工绘图求解时, 旋转依然是序参量, 但是需要首先对整个系统施加一个与凸轮转向相反的角度 $-\omega$, 即用反转法或称为机构倒置法。

上面提到旋转运动回转中心是由控制参量所决定的。对平面凸轮机构, 旋转中心是固定的, 即为固定铰链点。对平面连杆机构, 机架旋转中心是固定的, 即为静铰链点; 连杆旋转中心是运动的, 即为动铰链点。四杆机构尺度综合问题的实质是求未知铰链点位置。当机架上的铰链点位置未知时, 直接求连杆上动铰链点圆心即为所求静铰链点位置。当连杆上铰链点未知时, 需要求动铰链点圆心。因此, 行为-结构映射的另一个序参量是圆心, 数学方程为

$$x^2 + y^2 = R^2 \quad (4)$$

序参量圆心实际上与序参量旋转是相互关联的, 是否需要此序参量由控制参量决定。在这里, 不讨论控制参量, 因此将序参量圆心列为与旋转并列的序参量。

1.2 结构-行为映射序参量

当结构确定后, 需要进一步分析其性能, 即预测或验证其行为是否符合设计要求。行为可以是运动特性和力学特性或其他特性, 用物理参数描述。这

个过程通过列出方程运算或调用分析软件进行。这里采用序参量概念描述一般分析计算规则。

对往复行为而言, 运动特性分析相对简单, 无论哪种机构, 只需要对从动件位置坐标拟合、然后微分即可。运算过程为首先拟合从动件位置轨迹点 (在本文为输入条件), Matlab 函数为: Fitting Curve ($cf_ = cf_{it}()$), 其次进行一阶和二阶微分运算获得速度和加速度特性, Matlab 函数为 $[d_1, d_2] = \text{differentiate}(cf_, data)$ 。其中, $data$ 为拟合数据, 即拟合运动位移序列点为曲线, d_1 、 d_2 为一阶微分和二阶微分, 即速度和加速度。 $cf_$ 为拟合函数结构数组, 是计算过程中间变量。在此, 数值微分运算描述了运动特性演变过程, 因此“微分运算”是序变量。这里将数值微分计算由一个函数实现, 即序参量为 Matlab 函数 differentiate 。

当需要进行动平衡时, 动平衡问题是加上或减去平衡重, 这个结构形式的演变取决于偏心量, 因此需要分析偏心质量或“偏心距”, 故序参量为偏心量 (方位和大小)。

当需要预测速度不均匀系数时, 需要计算速度不均匀系数 δ , 此时, 计算不均匀系数的方程为

$$\delta = \frac{\Delta W_{\max}}{J\omega_m^2}$$

对一个系统而言, 平均角速度 ω_m 和最大盈亏功 ΔW_{\max} 是确定的, 此时等效转动惯量 J 是决定在当前状态下系统动特性的参量, 并且决定了系统的演变模式 (例如速度波动幅度)。此时序参量是“转动惯量”。

另一方面当需要设计飞轮时, 方程为

$$J = \frac{\Delta W_{\max}}{\delta\omega_m^2}$$

此时, 期望的速度不均匀系数决定了飞轮转动惯量的尺寸, 因此速度不均匀系数是序参量。

一般地, 结构-行为映射过程是计算机构的运动特性和动力学特性。对实现往复运动特性的机构而言, 分析过程可以归纳为: 计算运动特性的序参量为微分运算; 计算动平衡平衡量的序参量为偏心或质心; 计算速度波动的序参量为转动惯量或者期望的速度不均匀系数。

1.3 画图和设计分析报告

设计最终结果是绘图, 并需要分析报告。设计过程是边画边算的过程。这个过程可以简述为: 画线及分析结果列表, 即序变量为依据点位置或尺度画线及列表。实现方法可以用 Matlab 函数 line 和 report 实现。

1.4 序参量讨论

对不同运动行为要求,即使序参量相同,也会形成不同机构;对相同运动行为,当序参量不同时,机构也不相同。例如,当输入运动要求是往复直线运动时,序参量是旋转;当输入运动要求是往复摆动运动,序参量同样是旋转,但是,前者产生直动推杆凸轮机构,后者产生摆动推杆凸轮机构。其原因在于初始运动行为要求不同,一个为直线运动而另一个为圆弧曲线运动。又例如,同样是往复运动要求,在固定回转中心条件下,执行序参量旋转之后,得到凸轮廓线;在动态旋转中心情况下,旋转后得到的新点,需要再进一步求新点回转中心,则得到曲柄滑块机构。其原因在于后者回转中心不同(即控制参量不同),因此序参量为旋转及圆心。因此,在序参量相同的情况下,行为不同则结构也不同;在行为相同情况下,序参量不同则结构也不同。

由上述分析进一步得出结论:结构演变模式由序参量决定,因此,设计过程可用由序列序参量描述。仍以实现往复运动行为为例,当序参量为旋转时,产生凸轮机构;当序参量为旋转和圆心时,产生曲柄滑块机构。序参量是否为其一或者二者,取决于输入条件(控制参量),因此,当初始条件(及控制参量)、行为、序参量确定后,结构具有确定的演变形式。

用序参量描述结构演变过程,则设计和分析过程具有了统一描述和实现方法。在此仅以实现平面往复运动行为的机构的尺度综合和分析为例加以阐述。对其他机构、特别是复杂机构的序参量讨论涉及更为复杂的协同学概念(如控制参量)及方法,将在其他文章里讨论。

需要说明的是,描述设计分析演变过程的序变量与所使用的计算和绘图工具有关。例如,当采用计算机用数值微分函数实现微分运算时,序参量为微分;当采用解析方法求运动特性时,需要列位置方程、求导后获得运动方程和加速度方程,实际上是直接依据运动方程和加速度方程求解,此时,并不需要实施微分运算,但是运算的本质是微分。由此也可看出,序参量能够体现本质规律。

2 D-Robot 动作规划

当引入序参量后,机构设计和分析过程由一组序变量所规定,即从功能到结构的演变过程用一组序参量描述。对特定行为,其序变量是相同或类似的,即序参量具有普遍适用性。

例如,对实现往复运动行为的机构而言,序参量是旋转。序参量的另一个特点是重复使用性,通过

重复运用某个序参量可以获得机构尺度参数。例如求凸轮廓线,只要重复运用一个序参量旋转,即可获得凸轮廓线。因此引入序参量的概念后,机构综合和分析过程具有基本规范运算模式。这个思想导致了使用设计机器人的思想。

工业机器人通过执行系列工序或重复执行特定动作改变“工件”的状态。与工业机器人功能类似,D-Robot 执行序列操作和反复实施特定操作,从而改变“工件”(设计对象)的状态。当引入序参量概念后,机构尺度综合和分析过程通过 D-Robot 执行有限几个序参量运算即可完成。在制造过程中,通过一系列工序,将原材料加工为最终产品。同样道理,在设计过程中,通过执行一系列序参量,原始功能需求转化为最终结构、图表及分析报告。

在这里,序参量的概念是必不可少的。仅仅当引入序参量的概念之后,将特定行为演化为结构、以及将结构状态转化为行为的过程方可具有统一描述参量。

工业机器人的执行过程遵循规定的行动规划、或具有自行制定行动规划的能力。后者需要具有一定的智能,并需要具有感知环境的能力。在此只讨论执行规定程序的 D-Robot 的行动规划。

如上所述,机构的设计过程分为3部分:行为-结构映射、结构-行为映射、设计分析报告。因此,D-Robots 需要包含上述3项任务。实现上述任务的方法是执行一系列序参量。D-Robot UML(Unified modeling language)模型见图1。当考虑优化及设计修改过程时,加上循环迭代即可。

基于前述的分析,机构的设计、分析和绘图过程包括主要序参量:旋转、圆心、微分、连线、索引,具体需要哪些序参量取决于初始条件(控制参量)。初始条件不同(控制参量不同),则获得序参量组合不同。对往复运动,仅当需要未知铰链点时方需要圆心序参量操作。因此,一个机构设计和分析 D-Robot 具有通用性,可以反复使用。具体到不同设计和分析要求,在上述序参量基础上,通过添加或者删除或修改某个序参量运算,可应用于不同机构的设计分析。D-Robot 引入的意义也在于此,即具有重用性和可编程性。图1描述了 D-Robot 的动作规划模版。

对一个特定机构,需要一组序参量运算,同一个序参量需要反复使用;对不同机构,序参量具有通用性和适用性,因此可以运用相同序参量。图1所示 D-Robot 适用于实现往复运动行为的机构设计和分析。

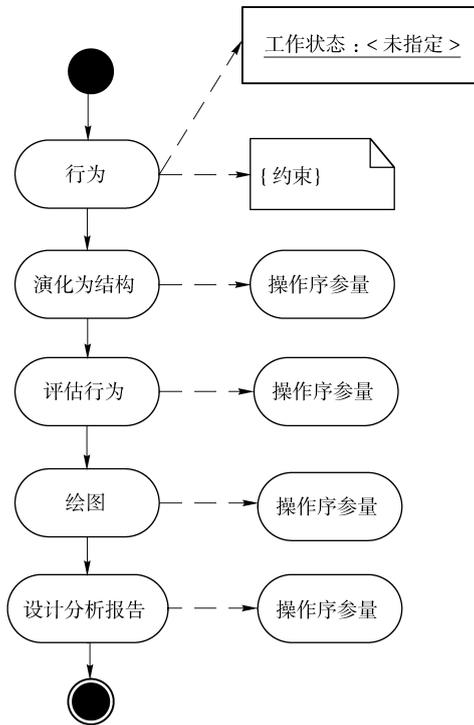


图 1 D-Robot 动作规划

Fig. 1 Action planning of D-Robots

3 往复运动设计实例

本节以实现往复运动的平面机构为例,说明序参量及 D-Robot 的实现。在这里,运动行为由从动件工作状态所确定。工作状态由时间序列位置所确定。当需要满足特定运动特性要求时,将运动特性转化为时间序列位置。

3.1 行为-结构映射

例 1. 输入数据:直动推杆盘形凸轮机构推杆尖顶位置随时间变化序列点坐标、及凸轮回转中心。序参量:旋转。输出凸轮廓线见图 2a。

例 2. 输入数据:摆动推杆盘形凸轮机构推杆尖顶位置随时间变化序列点坐标、及凸轮回转中心。序参量:旋转。输出凸轮廓线见图 2b。

例 3. 输入数据:摆动推杆圆柱凸轮机构推杆尖顶位置随时间变化序列点坐标、及凸轮回转中心轴线。序参量:旋转。输出图轮廓线见图 2c。图 2d 为极坐标下凸轮廓线。

例 4. 输入数据:摆动推杆盘形凸轮机构推杆滚子中心位置随时间变化序列点坐标、及凸轮回转中心。序参量:旋转、连线。用 D-Robot 实现,输出凸轮机构运动简图见图 3。

例 5. 输入数据:曲柄滑块机构滑块随时间变化序列点坐标及曲柄位置。序参量:旋转和连线,用 D-Robot 实现,输出连杆机构运动简图见图 4。

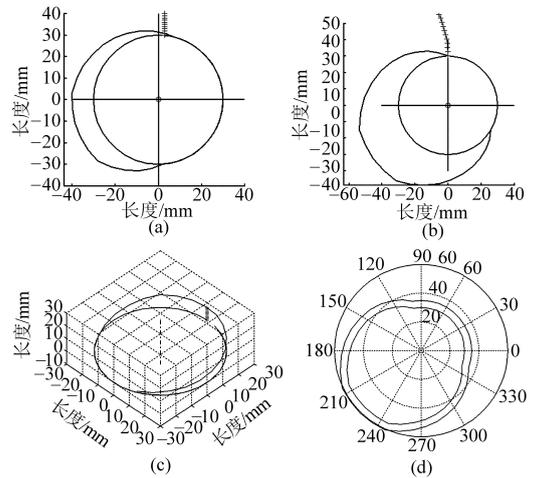


图 2 通过操作序参量生成实现往复运动的凸轮机构

Fig. 2 Cam profiles for reciprocating motion generated by rotation order parameter

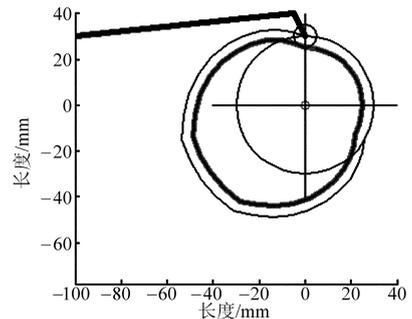


图 3 通过操作序参量生成实现往复运动的凸轮机构

Fig. 3 Cam mechanism design for reciprocating motion by operating order parameters

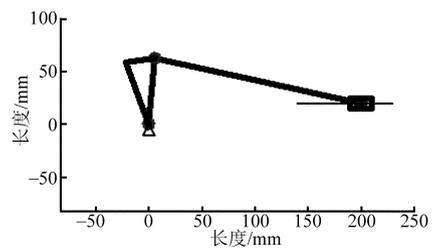


图 4 通过操作序参量生成实现往复运动的连杆机构

Fig. 4 Linkage mechanism design for reciprocating motion by operating order parameters

3.2 结构-行为映射

机构参数确定后需要进一步进行运动分析及力分析,将结构性能抽象化为行为描述,即结构-行为映射。当引入序参量后,不同机构的分析过程具有统一的运算及步骤。

机构运动分析序参量是微分运算,绘制运动线图的序参量是连线。必要时,需要进行动平衡计算及设计飞轮调速,序参量分别为几何中心或质心、速度不均匀系数或飞轮转动惯量。当做运动模拟时,需要记录瞬态位置,序参量是显示瞬态位置,用 Matlab 函数实现, $M(k) = \text{getframe}$ 和 $\text{movie}(M, \text{time})$ 。最后,需要生成分析报告,序参量是将分析

结果索引。整个设计和分析过程中一系列序参量起作用,本文将序参量归纳为 D-Robot 动作规划,然后用 Matlab 编程执行。

D-Robot 实现了凸轮机构设计和分析自动绘图和运算,输出见图 5。图 5a 为运动特性曲线,包括位移曲线、速度曲线和加速度曲线(用多项式表达运动方程);图 5b 为运动特性曲线,包括位移曲线、速度曲线和加速度曲线(用 B 样条曲线表达运动方程);图 5c 为速度调速计算;图 5d 为凸轮压力角计算;图 5e 为运动模拟;图 5f~5g 为凸轮理论和实际廓线;图 5h 为凸轮廓线面积和偏心;图 5i 为动平衡计算;图 5j 为三维图。图 6 为自动生成的分析报告文本,包括目录、主要参数数据图表、机构运动简图、材料表等设计和分析报告。

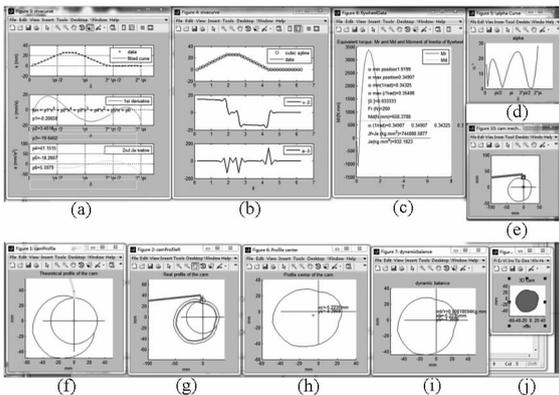


图 5 设计分析过程显示

Fig. 5 Display of design and analysis process

整个设计分析过程自动实现。本例是一个简单的例子,目的在于验证序参量概念的有效性以及

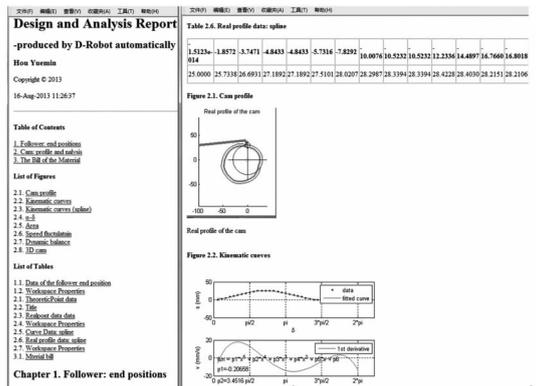


图 6 D-Robot 自动生成设计分析报告

Fig. 6 Report generated by the mechanism design and analysis D-Robot

D-Robot 概念以及动作规划有效性,并为常规机构设计提供快速设计和计算方法。更为复杂的机构设计和分析需要在目前研究基础上进一步归纳一般性设计规则和计算规则。

4 结束语

用协同学序参量的概念描述行为-结构映射过程的宏观变量,将行为-结构映射过程分为 3 部分,分别用序参量描述支配结构演化的原理及分析计算规律、以及生成工程文档报告的规律,表达了行为-结构映射的内在规律。在此基础上,进一步提出用 D-Robot 实现序参量运算,建立机构设计和分析 D-Robot 模版,以序参量为依据制定 D-Robot 动作规划,用 Matlab 编程实现,并用机构设计和分析实例实际验证,证明了序参量和 D-Robot 的有效性,实现了行为-结构映射一般性描述和自动运算。

参考文献

- Gero J S. Design prototypes: a knowledge representation schema for design[J]. AI Magazine, 1990, 11(4): 26 - 36.
- Fu K, Cagan J, Kotovsky K, et al. Discovering structure in design databases through functional and surface based mapping[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2013, 135(3): 031006.
- Kicinger R, Arciszewski T. Breeding better buildings: civil engineers may be able to design more innovative and improved structures by borrowing from genetics[J]. American Scientist, 2007, 95(6): 502 - 508.
- Kicinger R, Arciszewski T, De Jong K A. Parameterized versus generative representations in structural design: an empirical comparison[J]. GECCO, 2005, 2005: 2007 - 2014
- Lipson H, Pollack J B. Automatic design and manufacture of robotic lifeforms[J]. Nature, 2000, 406: 974 - 978
- Rosenman M. Case-based evolutionary design. Artificial intelligence for engineering design, analysis and manufacturing[J]. AIEDAM, 2000, 14(1): 17 - 29
- Madeira J F, Rodrigues H, Pina H. Multi-objective optimization of structures topology by genetic algorithms[J]. Advances in Engineering Software, 2005, 36(1): 21 - 28
- Srivastava R K, Deb K, Tulshyan R. An evolutionary algorithm based approach to design optimization, using evidence theory[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2013, 135(8): 081003.
- Bozzo L M, Barbat A, Torres L. Application of qualitative reasoning in engineering[J]. Applied Artificial Intelligence, 1998, 12(1): 29 - 48.
- Smyth M, Edmonds E. Supporting design through the strategic use of shape grammars[J]. Knowledge-Based Systems, 2000, 13(6): 385 - 393.
- Hsiao S W, Chen C H. A semantic and shape grammar based approach for product design[J]. Design Studies, 1997, 18(3):

- 275 – 296.
- 12 Oster A, McCormack J. A methodology for creating shape rules during product design[J]. *ASME Journal of Mechanical Design*, 2011, 133(6):061007.
 - 13 Rudolph S. Know—how reuse in the conceptual design phase of complex engineering products—or: “Are you still constructing manually or do you already generate automatically?” [C] // *Proceedings 6th International Conference on Integrated Design and Manufacture in Mechanical Engineering 2006 (IDMME 2006)*, 2006.
 - 14 Campbell M I. *The A-Design invention machine: a means of automating and investigating conceptual design*[D]. Pittsburgh, PA: Carnegie Mellon University, 2000.
 - 15 Egan P F, Cagan J, Schunn C, et al. Design of complex biologically based nanoscale systems using multi-agent simulations and structure-behavior-function representations[J]. *ASME Journal of Mechanical Design*, 2013, 135(6):061005.
 - 16 Helms B, Schultheiss H, Shea K. Automated mapping of physical effects to functions using abstraction ports based on bond graphs[J]. *ASME Journal of Mechanical Design*, 2013, 135(5):051006.
 - 17 Colombo G, Facoetti G, Gabbiadini S, et al. Knowledge-based system for guided modelling of sockets for lower limb prostheses[J]. *Computer Aided Design and Applications*. 2010, 7(5): 723 – 737.
 - 18 La Rocca G, Van Tooren M J L. Enabling distributed multi-disciplinary design of complex products: a knowledge based engineering approach[J]. *Journal of Design Research*, 2007, 5(3):333 – 352.
 - 19 La Rocca G, van Tooren M J L. Knowledge-based engineering to support aircraft multidisciplinary design and optimization[J]. *Proc IMech E, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2010, 224(9):1041 – 1055.
 - 20 Hou Y M, Ji L H. Role of D-Robots in designing[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 694 – 697:1717 – 1721.
 - 21 Haken H. *Synergetics: introduction and advanced topics*[M]. Berlin: Springer, 2004.
 - 22 Schweitzer F. *Brownian agents and active particles: collective dynamics in the natural and social sciences*[M]. Berlin: Springer, 2007.
 - 23 Haken H. An introduction to synergetics[J]. *Open Systems & Information Dynamics*, 1995, 3(1): 97 – 130.
 - 24 Frank T D, Richardson M J, Lopresti-Goodman S M, et al. Order parameter dynamics of body-scaled hysteresis and mode transitions in grasping behaviour[J]. *Journal of Biological Physics*, 2009, 35(2):127 – 147.

Mapping Behaviors onto Structures Using Order Parameters and D-Robots

Hou Yuemin^{1,2} Michel van Tooren³ Ji Linhong^{2,4}

(1. *School of Electromechanical Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China*

2. *Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

3. *Ronald E. McNair Center for Aerospace Innovation and Research, University of South Carolina, Columbia, SC 29201, USA*

4. *State Key Laboratory of Tribology (SKLT), Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: Design principles were investigated from a view of synergetics and meta rules for mechanical design and analyses were generated by introducing order parameters. Same order parameters can be used to produce different mechanisms according to specific behavior specification, and an order parameter can be used repetitively to produce the profile of a mechanism. The concept of design robots (D-Robots) was proposed to execute the repetitive operation of order parameters. Order parameters were used as action rules of D-Robots. By introducing the concept of order parameters, the process of synthesis and analysis of different mechanisms can be described in same order parameters. By introducing the concept of D-Robots, the synthesis and analysis procedure can be formulated as a generic template. Combining order parameters and D-Robots, the synthesis and analysis of mechanisms are automated. The order parameters and D-Robots were tested by mechanism synthesis and analysis. A D-Robot template for the mechanism synthesis and analysis is constructed. As case study, a D-Robot for cam mechanism design and analysis was developed and programmed. The output of the D-Robot includes generating the cam profile, kinematic analyses, the cam center and area, the bill of material, the balance weight, the speed fluctuation calculation, an animation and a report. This paper distinguishes with current research methods in generalizing meta rules to produce structures based on behavior specification rather than doing this by establishing equations for each type of mechanisms.

Key words: Behavior-structure mapping Order parameter D-Robot Design automation