

# 基于多粒度共进化功能推理的 机械运动方案设计新方法\*

肖人彬 刘 勇

(华中科技大学 CAD 中心 武汉 430074)

梅顺齐

(武汉科技学院机电工程学院 武汉 430073)

董方敏

(华中科技大学 CAD 中心 武汉 430074)

摘要：提出了基于多粒度共进化功能推理的机械运动方案设计方法。首先分析了共进化功能推理模型和多粒度设计模型的特点，并结合二者的优点构造了一种多粒度的共进化功能推理模型；然后将该推理模型应用于机械运动方案设计，提出了一种面向机械运动方案设计的共进化功能推理方法，该方法采用分类功能来描述机构单元及机械系统的运动特征信息，将机构单元和机械系统都采用运动功能变换函数进行抽象表达，通过功能推理来生成机械运动变换单元的串联组合方案；随即给出了相应的功能推理算法流程，通过与已有算法的比较详细分析了该算法的特性，并讨论说明了该算法所具有的效率、可精确描述运动功能变换特性等优点；最后通过电线给机构运动方案设计实例验证了该方法的有效性。

关键词：多粒度 共进化 功能推理 运动方案设计

中图分类号：TH122

## 0 前言

产品设计的根本目的就是要创新产品以满足市场需求和占领更大市场，设计的本质是创新。因此，创新设计的研究和实现是提高机械产品竞争力的重要途径<sup>[1]</sup>。机械运动方案设计是机械产品概念设计过程中的关键环节，它可在一定程度上决定机械产品的创新性，国内外学者对其已有深入研究并提出了多种方法，根据研究侧重点的不同可将这些方法大致分为两类。一类是从满足功能描述与求解的角度进行研究：形态学矩阵方法根据总功能分解而成的多个功能元寻求多种系统的组合方案<sup>[2]</sup>；基于图论的概念设计方法能较好地描述传动链及机构的拓扑表示<sup>[3]</sup>；人工智能及专家系统技术的采用也为功能描述及求解提供了手段<sup>[4]</sup>，S. J. Chiou 等<sup>[5]</sup>提出的矩阵分解方法依据机械运动变换的类型、方向及大小特征分别制定相应的变换规则与运算准则使计算机自动进行求解等。然而这些方法往往缺少严密的数学模型或者运动与其实现的功能缺少内在联系。

另一类方法则是从运动方案设计过程的数学模型描述方面着手进行研究，Y. M. Moon 等<sup>[6]</sup>采用对偶矢量代数法对机械方案设计进行建模，将机构基本单元的运动变换功能及其特征映射到对偶矢量空间，王德伦等<sup>[7]</sup>则提出机械运动变换状态空间表示方法，通过建立机械运动基本变换单元的运动变换状态方程，提取输入输出特征矢量并映射到状态空间中描述，把机械运动方案设计问题转化为状态空间中的路径规划问题。

总体而言，上述方法的主要特点是在明确设计约束条件下，借助计算机自动生成机构基本单元的排列组合方法以寻求更多的设计方案，从而辅助运动方案设计的优选和创新，其实质是面向给定设计问题的设计方法，而对于设计过程中设计问题本身的动态变化考虑不足。在实际设计过程中，设计问题是随着设计者对设计对象的认知水平不断变化的，设计应该视为一个设计问题和解通过相互作用实现问题重新定义和解的生成的迭代过程，其实质是问题和解通过相互作用实现共同进化的过程。因此，以单自由度串联机械运动方案设计(以下简称机械方案设计)过程中的设计问题约束和设计方案的共进化现象为研究对象，提出了一种面向机械运动方案设计创新设计的多粒度共进化模型，并给出了相应

\* 国家自然科学基金资助项目(50075028, 60474077)。20050130 收到初稿，20050629 收到修改稿

的用于机械系统运动方案设计的多粒度共进化功能推理算法，以辅助实现机械系统运动方案设计过程中设计者的创造性与计算机强大的推理能力的有机结合，提高机械产品方案设计过程的创造性。

## 1 面向创新设计的多粒度共进化功能推理模型

### 1.1 一种多粒度共进化设计描述模型

人们通常将设计过程看作一个从问题定义到解的生成的连续过程。然而，解的搜索过程并非一次性完成，而是基于从初始解到最终解的多次改进完成的，因此这种解的综合过程可以看作解随时间的进化过程。基于这一思路，M. L. Maher 和 J. Poon<sup>[8]</sup>提出了一种如图 1 所示的共进化模型来形象地描述设计空间和解空间之间随时间演变的相互作用，其中水平箭头表示问题空间和解空间的进化过程，向下箭头表示由当前问题空间到解空间的综合过程，向上箭头表示基于当前解对问题重定义的影响。这种模型将复杂的人类活动简化成为相对可操作的计算工作，其实质是将设计看成状态空间的搜索问题，但其前提是设计要求是明确给定的，即设计过程中问题空间的大小是不变的，问题空间的进化实际上是在既定问题空间内采用不同的方式来表达设计问题。然而设计问题会随着设计者对设计对象的认知水平不断变化，设计应该视为一个设计问题空间和解空间的大小和表示方式都通过相互作用不断进行重定义的迭代过程。

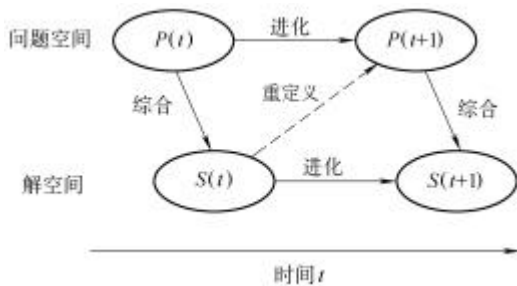


图 1 M. L. Maher 等提出的共进化设计模型

人类对客观事物的认知过程是一个从抽象到具体的层次渐进过程，设计是设计者对客观设计对象本质的一种抽象，设计过程是设计对象抽象概念具体化的过程，具体表现为对设计对象的认知“粒度”随着对设计对象认识程度的提高而逐渐细化。所谓“粒度”，指的是人们在某一设计阶段对设计对象认识深度的一种量化描述，在不同认知粒度下思考问题，即是指在不同认知层次上思考问题。一般来说，虽然设计人员对设计对象的认知粒度不一定是单调

减小的，但总体趋势是随着设计工作的深入而逐渐缩小的。因此，任意一个设计对象都可用一簇不同粒度下的设计问题进行描述，基于认知粒度的设计过程描述模型<sup>[9]</sup>可定义为  $O_d = \{P(d_1), P(d_2), \dots, P(d_n), L\}$ ，其中  $P(d_i)$  表示在粒度  $d_i$  下的设计问题。若  $d_i < d_j$ ，则称  $P(d_i)$  是  $P(d_j)$  的细化问题，简称细化；反之， $P(d_i)$  称为  $P(d_j)$  的粗化问题，简称粗化。

从设计问题的描述粒度上来看，共进化设计模型是一种单粒度的共进化设计模型。实际设计问题通常是一个不良定义问题，初始设计约束信息往往不完备，需要在设计过程中不断细化，因此设计过程应该视为一个问题空间和解空间的粒度和表示方式都不断进化的动态过程。基于这种思路，结合共进化设计的思路和上述粒度模型，提出了如图 2 所示的多粒度共进化模型，其中水平箭头表示问题空间和解空间随设计问题描述粒度细化而不断进化，向下箭头表示由当前粒度下问题空间到解空间的综合过程。表 1 对两种设计模型进行了简要的比较，从中可以看出，多粒度共进化模型中实际上包含了两个层次的共进化：一是在某种粒度下问题空间和解空间的共进化，二是问题空间和解空间在不同粒度下的共进化，共进化设计模型实质上是多粒度共进化设计模型中在某个粒度下进行的一段设计过程的描述。因此，采用多粒度共进化模型可以更全面地描述实际设计过程。

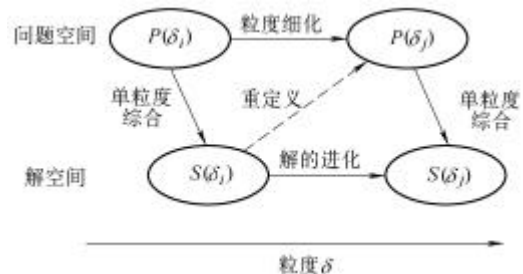


图 2 多粒度共进化设计模型

表 1 两种设计模型比较

	Maher 等提出的共进化设计模型	多粒度共进化设计模型
描述基准	时间	粒度
问题空间	仅随时间变化	随时间和粒度变化
问题描述粒度	不变	不断变化
设计过程描述	局部	全局

### 1.2 支持多粒度综合的共进化功能推理模型

要将多粒度共进化设计模型应用于计算机辅助设计，首先要找到一种支持不同问题粒度的适合使用计算机进行自动综合的方法，J. Poon 等<sup>[10]</sup>根据图 1 所示的共进化模型，借鉴简单遗传算法实现进化的思路，提出了两种共进化算法模型：组合基因算

法和互动群体算法,并仿照遗传算法基于问题空间和解空间的共进化对这两种算法的基本步骤如适应度定义、终止原则等进行了定性描述。然而要将这两种描述性算法应用于实际设计过程,就必须找到一种适合于实际设计对象的多粒度综合方法,功能推理就是这样一种常用的综合方法。

功能是贯穿设计全过程的主要设计约束,是几种常用设计过程模型<sup>[11~13]</sup>中的重要组成部分,因此,研究如何利用功能特性来指导和约束设计活动具有重要意义。功能推理模型与方法是概念设计研究的一个热点,A. Chakrabarti 等在参考文献[14]中对三种较有影响的功能推理模型(Freeman 和 Newell 的层次模型、YoshiKawa 的范式模型和 Pahl 以及 Beitz 的系统模型)的特性进行了分析,他们认为:理想的功能推理方法至少应该满足下列三个要求:第一,支持常规设计和创造性设计;第二,支持对给定设计问题在给定层次的概念解的综合;第三,可给出推理路线以支持后续的详细设计。根据这几项标准,他们认为上述三种功能推理模型都不完全满足这三个要求。因此提出了一种支持创新设计的描述性功能推理模型,其基本思路是采用多种设计路线通过递归地添加已有结构并对设计问题进行重定义来实现功能推理,实质上是通过功能和结构的共进化来实现功能到结构的映射过程。因此,该模型可采用图 3 所示的共进化功能推理模型来描述。

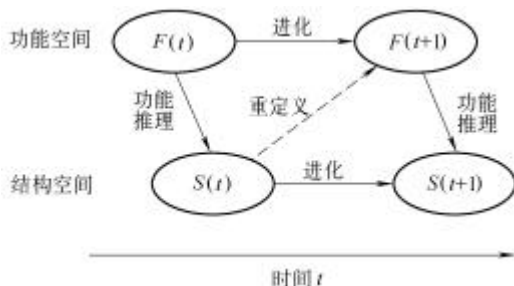


图 3 A. Chakrabarti 等的共进化功能推理模型

A. Chakrabarti 等提出的共进化功能推理模型的优点是可以有效解决系统模型中的问题划分和范式模型的部件替换方式存在的不足,可给出详细的设计路线以辅助详细设计实施,并可在一定程度上支持创新设计。但是该模型仍然是一个描述性模型,未给出具体算法,要将其应用于机械运动方案创新设计,还需要作进一步的研究。

### 1.3 多粒度共进化功能推理模型

机械运动方案设计的主要目的是生成满足预期运动功能的结构设计,机械运动“功能”的定义和通常设计过程模型中的“功能”有不同含义,

它是指机械所要实现的运动特性和约束,一般采用与对应的机构单元相同的表示方式,因此可较容易地实现功能到结构的直接映射。单自由度串联机械运动方案设计过程中的串联叠加特性和功能推理的结构添加方式类似,因此,采用功能推理方法可以很方便地实现机械运动方案综合。将图 3 中的共进化功能推理模型应用于机械运动方案设计中的多粒度共进化过程,可得如图 4 所示的机械运动方案设计的多粒度共进化功能推理模型,第 2 节中将详细讨论这种用于机械运动方案设计的多粒度共进化功能推理的实现算法。

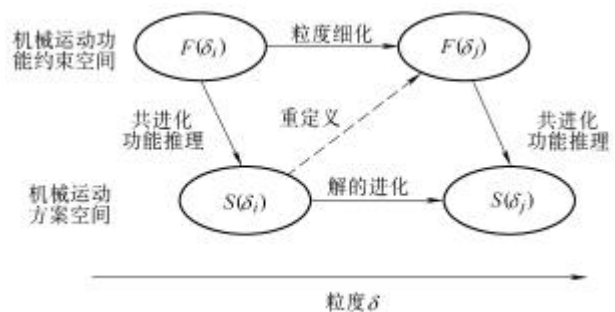


图 4 机械运动方案设计的多粒度共进化功能推理模型

## 2 面向机械运动方案设计的多粒度共进化功能推理算法

### 2.1 多粒度功能表达

对于机构功能的描述方法,不同的研究者有各种不同的定义方式。Chiou 等提出的矩阵分解方法中,将机构的运动特性分为功能和约束,进而将其细分为运动类型、运动方向等六项指标;在参考文献[15]中,叶志刚等则仅采用运动类型、运动连续性、运动速率特性、运动往复性进行机构综合;张国全等<sup>[16]</sup>采用了环境特性、组件输入特征、主从动件接触面特性等更多的指标来定义机构功能。上述方法中,设计者从不同的侧面描述了机构的功能约束;实际设计过程中,根据不同的设计对象所需实现的运动特性,相应的功能定义方式是不同的。因此,必须根据实际设计对象的设计需求采用特定的功能描述方法,固定的功能描述方式应用范围有限。

这里提出的多粒度共进化功能推理算法中,“功能”是指广义的功能特性,泛指描述机构运动特性的各类约束,采用的描述方法是动态的。具体地说,首先给出各类功能指标定义,并给出相应的操作算法,设计功能推理表。在设计工作中由设计者根据设计问题以及粒度的不同,选取其中若干项来组成功能基因进行推理。功能指标的定义是个开放

体系，设计者可以根据实际情况向总功能推理表中增加新的功能选项，同时还需要自定义相应的功能推理算法。

### 2.2 机构总功能表与基本机构功能元基因库的建立

#### 2.2.1 机构串联的形式化描述

单自由度串联机构运动方案设计的主要设计思路是根据基本机构单元的运动特性进行串行连接以实现期望运动，前一个机构的输出是后一个机构的输入。两个机构可进行串联叠加的基本条件如下。

(1) 前一机构输出运动的类型(平动、转动、螺旋运动)与后一机构的输入运动类型相同。

(2) 前一机构的输出运动往复性(单向 / 双向)与后一机构的输入运动往复性具有可连接性。

每个机构单元的作用就是将输入运动功能  $F_{in}$  变换成输出运动功能，如果每个机构看成一种运动变换函数  $f$ ，则  $n$  个机构串联的总输出功能  $F_{out}$  可采用式(1)表达，总输出功能等于各个输出功能的叠加，两机构可串联的条件实质上就是前一机构的输出运动在后一机构变换函数的定义域内。

$$F_{out} = f_n(f_{n-1}(\dots f_1(F_{in}))) \quad (1)$$

#### 2.2.2 基本功能分类

多粒度功能表达需要根据不同功能特性定义相应的推理算法，为了方便功能表达与推理，可根据串联总功能与基本机构单元的功能特性的关系，将机构运动方案设计中的功能分成两类，即单调推理功能和非单调推理功能两种。

(1) 单调推理功能。将推理过程中具有单调特性的功能称为单调推理功能，它又可细分为以下两种：

定义 1 单调替换功能。设两个机构单元满足可串联条件，对某功能特性  $x$ ，若串联后的总功能特性总表现为后一个串联机构单元的输出功能特性，也就是说机构串联时后者会替换前者的相应功能特性，故称这类功能特性为单调替换功能。单调替换功能  $x$  可采用式(2)来形式化描述

$$\forall x_i (i = 1, 2, \dots, n), f_1(f_2(x_i)) = f_{1out}, f_2(f_1(x_i)) = f_{2out} \quad (2)$$

例如串联机构的运动类型功能，只要几个机构满足可串联条件，则整个串联机构的输出运动类型必定和最后一个机构相同，故可称此运动类型功能特性为单调替换功能。

定义 2 单调增功能。设若干个机构单元  $M_i (i = 1, 2, \dots, n)$  满足可串联条件，对应某功能特性  $x$  的集合  $S = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ， $n \geq 2$ ，若有机构单元可将功能  $x_i$  变换成  $x_j$ ，但不存在机构单元可把  $x_j$  变换成  $x_i$ ，则称  $x_j$  具有比  $x_i$  更高的优先级，如果将这些不同优先级的功能特性  $x$  采用大小不同数值表示(高优

先级者用大数表示)，则  $x$  的值在变换过程中表现为单调增加，故此功能称为单调增功能。单调增功能可采用式(3)的形式化描述，其中  $x_2 \succ x_1$  表示  $x_2$  具有比  $x_1$  高的优先级。

若  $\exists f(x_1) = x_2 (x_1, x_2 \in S)$

$$\forall f_i (i = 1, 2, \dots, n) \neg \exists f(x_2) = x_1 \text{ 则 } x_2 \succ x_1 \quad (3)$$

例如对机构的运动连续性功能，存在机构单元可将连续运动变换成间歇运动，但不存在可将间歇运动变换成连续运动的机构，则可以认为间歇运动比连续运动特性具有更高的优先级，运动连续性功能即为单调增功能。

(2) 非单调推理功能。将单调增功能和单调替换功能以外的其他机构功能特性称为非单调推理功能，因为它们会随着功能特性值和变换函数的不同产生非单调变化的结果。非单调推理功能又可以根据其推理结果的确定性分成两类：一类是可确定性推理功能，这类功能推理虽然不能用一种统一的推理算法来定义，但可以根据变换函数和功能特性值来定义推理真值表；另一类是不确定性推理功能，这类功能的特点是变换结果具有多义性，以轴线方向特性为例，两个轴线垂直的机构变换函数(例如锥齿轮)可能产生与初始轴向成任意角度的输出运动。此类功能可以作为推理附加功能供设计者参考。

#### 2.2.3 功能基因表示方法与功能推理算子

可以对不同类型功能定义相应的功能推理算子，一般为便于计算机表达和推理，可采用数值形式表示功能基因。基于第 2.2.2 节所述功能分类，可定义各类功能的操作算子如下。

对单调替换功能基因  $g$ ， $g_{n-out}$  表示最后一个变换函数  $f_n$  的输出基因值，

$$g_{out} = f_n(f_{n-1}(\dots f_1(g_{in}))) = g_{n-out} \quad (4)$$

而对单调增功能基因  $g$ ，若  $\max(g_i)$  表示变换过程中出现的最大基因值，则有

$$g_{out} = f_n(f_{n-1}(\dots f_1(g_{in}))) = \max(g_i) \quad (5)$$

对于非单调可确定性推理功能，可以定义相应的推理真值表，例如对机构运动往复性功能，其推理真值表如表 2 所示，其中 0 表示单向，1 表示双向， $f$  表示机构变换函数， $f(0)=1$  表示功能变换函数  $f$  可将输入功能基因 0 变换为输出功能基因 1。

表 2 机构运动往复性功能推理真值表

变换函数	$f(0)=0$	$f(0)=1$	$f(1)=0$	$f(1)=1$
输入	0	1	0	1
输出	0	1	1	无意义
			无意义	0
				1

对于不确定性推理功能，可将其作为推理附加

功能供参考，由设计者最终决定。

基于以上基本功能的基因表示方法与功能推理算子的论述，可以得到如表 3 所示的总功能表的一般定义形式，其中运动方向变换特性的基因定义见表 4，表 4 中基因“5”是为了推理需要自定义的一

个功能基因。表 5 给出了对应的功能推理表，其中第 1 列表示输入运动功能基因，第 1 行表示后续串联叠加运动功能基因，其他行列表示所在行列对应运动功能连接的结果基因，“-”表示二者不具有可连接性。

表 3 总功能表的一般定义形式

功 能 特 性		常用功能值	数值型基因编码	功能叠加算子
单调替换功能	运动类型	转动/移动/螺旋运动	0/1/2	$g_{out} = g_{n-out}$
	主从动件接触面特性	齿面/非齿面	0/1	
	$\mathbb{N}$	$\mathbb{N}$	$\mathbb{N}$	
	运动连续性	连续/间歇	0/1	
单调增功能	运动速度特性	线性/非线性	0/1	$g_{out} = \max(g_i)$
	运动范围可调性	非可调/可调	0/1	
	$\mathbb{N}$	$\mathbb{N}$	$\mathbb{N}$	
可确定性推理功能	运动往复性	单向/双向	0/1	功能推理表
	运动方向变换特性	见表 4	0/1/2/3/4/5	
	$\mathbb{N}$	$\mathbb{N}$	$\mathbb{N}$	
非单调功能	轴线夹角	平行/垂直/斜交	0/1/2	设计者推理
	$\mathbb{N}$	$\mathbb{N}$	$\mathbb{N}$	

表 4 运动方向转换功能基因表示运动方向功能推理表

	0	1	2	3	4	5
运动转换含义	输入输出单向 运动方向相同	输入输出单向 运动方向相反	输入单向输出 双向运动	输入双向输出 单向运动	输入输出 双向运动	表示单向运动 (正负向均可)
矩阵表示	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

表 5 运动方向功能推理表

	0	1	2	3	4	5
0	0	1	2	—	—	5
1	1	0	2	—	—	5
2	—	—	—	5	2	—
3	3	3	4	—	—	3
4	—	—	—	3	4	—
5	5	5	2	—	—	5

2.2.4 基本功能元基因库

在单自由度串联机构运动方案设计中，单个机构就是功能推理的基本功能元。根据表 3 中的基因编码方式，可对常用基本机构单元基因加以定义，

进而构建基本功能元基因库，其中部分机构基因编码如表 6 所示，ID 为功能元的唯一性标示。为了避免数据冗余，在功能推理过程中只采用 ID 序列组合来记录推理路线，故还需要 ID 与机构名称的对应表作为辅助，以便在推理完成后根据 ID 序列自动给出相应的机构串联顺序，部分 ID 与机构名称对应表如表 7 所示。对于具有运动可逆性的曲柄滑块机构等，则采用不同的 ID 来表示。虽然有些功能特征由输入和输出共同决定(例如轴线方向关系等)，但为了功能推理基因简化表示的需要，将其分别归入输入、输出功能基因。

表 6 基本功能元基因库中部分机构基因编码

ID	输入功能基因								输出功能基因							
	类型	接触	连续	速度	范围	往复	方向	轴线	类型	接触	连续	速度	范围	往复	方向	轴线
001	0	0	0	0	0	1	4	1	1	0	0	0	0	1	4	1
002	1	0	0	0	0	1	4	1	0	0	0	0	0	1	4	1
003	0	0	1	0	01	0	2	1	1	0	1	0	01	1	2	1
004	1	0	1	0	01	1	34	1	0	0	1	0	01	0	34	1
005	0	0	1	0	01	1	3	0	0	1	1	0	01	0	3	0
006	0	0	0	0	0	0	01	1	0	0	0	0	0	0	01	1

2.3 共进化功能推理

2.3.1 共进化基因的表达方式

鉴于单自由度串联机械运动方案设计过程中的

机构串联运动叠加的紧耦合特性，本节借鉴 Poon 等提出的组合基因共进化算法，即设计解的基因和设计问题的基因共同组成设计基因，给出其进化基

表 7 部分功能元 ID 与机构名称对应表

功能元 ID	机构名称
001	齿轮齿条机构 R-T
002	齿轮齿条机构 T-R
003	曲柄滑块机构 R-T
004	曲柄滑块机构 T-R
005	棘轮机构 R-R
006	蜗轮蜗杆机构

因的表达方式。基于第 2.2.3 节所述的功能基因表示方式，可将共进化算法中的基因定义为如图 5 所示的基因结构。

设计问题		设计解	
输入功能基因	输出功能基因	输入功能基因	输出功能基因

图 5 共进化基因结构

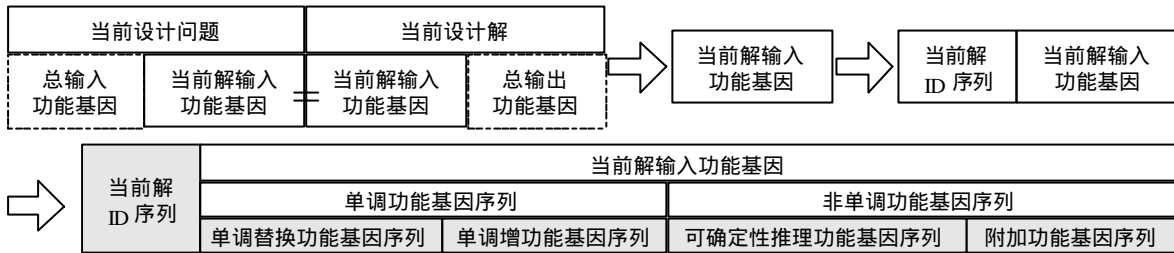


图 6 共进化基因结构演化

### 2.3.2 基本功能元的多粒度动态运动转换表

根据第 2.2.3 节中所述的功能推理规则，对每个基本功能元，给定输入功能基因就可以方便地推导出对应的输出功能基因；把每个功能元基因可实现的不同功能转换组织在一起，就可以得到该功能元的运动转换真值表。例如若采用运动类型、运动连续性、运动速率特性、运动往复性 4 项指标进行功能描述，则表 6 中 ID 为 001 的齿轮齿条机构功能元（齿轮为运动输入部件）的运动转换表如表 8 所示，其中由于不存在间歇线性运动，故没有功能基因型为“x/10/y”的运动输入。对于不同粒度描述的功能元基因，其运动转换表可根据设计问题描述粒度的不同进行调整，因此是动态变化的，例如若再添加一项运动范围可调性功能指标（基因列于运动速率特性基因后），则齿轮齿条机构功能元 001 的运动转换表就变成了表 9。

表 8 4 项指标进行功能描述的 001 功能元的运动转换表

输入功能	0/00/1	0/01/1	0/11/1
输出功能	1/00/1	1/01/1	1/11/1

表 9 5 项指标进行功能描述的 001 功能元的运动转换表

输入功能	0/000/1	0/010/1	0/110/1	0/001/1	0/011/1	0/111/1
输出功能	1/000/1	1/010/1	1/110/1	1/001/1	1/011/1	1/111/1

### 2.3.3 共进化功能推理基本操作算子与终止条件

共进化功能推理算法有两种基本的功能推理操

实际设计时一旦给定总体设计目标，即可确定总输入功能基因和总输出功能基因。功能推理过程中总的输入和输出功能是不变的，变化的只是当前解的输入和输出功能，也就是设计问题的输出功能基因，所以共进化基因可以简化成当前解的输入功能基因，当前设计解和设计问题功能基因都可以相应地推导出来。为了记录每个设计解的进化路线，需要在前面加入功能 ID 序列，对于当前解输出功能基因，还需要将其中的单调功能和非单调功能分别组合在一起以便进行相应的基因操作。图 6 给出了共进化基因结构的演化方式，最终的共进化基因如图 6 中阴影部分所示。

作，即个体复制和替换。当设计问题的功能要求给定时，根据其输出功能要求在基本功能元的运动转换表中搜索匹配者，若存在  $n$  个匹配的基本功能元，则当前解集中每个功能元个体复制  $n$  个，并采用这  $n$  个基本功能元的输入功能基因替换原解的输入功能基因，同时将  $n$  个基本功能元的 ID 加入相应解的 ID 序列中从而得到新解。然后，将这  $n$  个基本功能元对应的输入功能基因作为新设计问题的输出功能基因重新定义设计问题的功能要求。因此，可以将共进化功能推理算法的基本功能推理操作归结为个体解的复制以及对个体解相应设计问题的替换操作。

推理终止条件包括群体终止条件和个体终止条件两种。

(1) 群体功能推理终止条件。在大多数情况下，经过 3 次功能推理至少可以产生一种可行解，很少有 4 个或 4 个以上的机构组合来实现一种确定运动；同时功能推理次数过多会产生组合爆炸问题。因此，过多的功能推理是无意义的，通常群体功能推理 3 次以后终止推理。

(2) 个体功能推理终止条件。个体功能推理终止又有两种情况：一种是某些个体在群体终止推理前已满足预期功能要求，则这些个体解立即终止推理并加入到总体解集；另一种是无法找到能实现某些个体解所需输入功能（即当前设计问题输出功能）的机构单元，则个体功能推理终止，并删除这些无

法继续推理的个体解。

### 2.3.4 共进化功能推理算法流程

根据图 4 所示的共进化功能推理模型,本算法中采用设计解和设计问题交替进化的方式进行推理,由当前设计问题决定解的功能进化搜索方向,搜索到新解的输入功能再重新定义设计问题,从而交替进行直到达到群体推理终止条件。下面给出共进化功能推理算法的基本流程,对应流程图见图 7。

(1) 定义设计输入和输出功能,当前解集为空集。

(2) 解的进化。根据当前设计问题输出运动功能特性,在基本机构元件库中搜索与当前设计问题输出运动功能特性符合的机构并依据对应的运动转换表得到其对应的输入功能。若当前解集为空,则直接加入到当前解集并更新基因,否则执行复制操作后更新复制解的基因。此时若存在输入运动和设计问题相同的解,则该解满足整体问题解的要求,应终止推理并加入最终解集。

(3) 设计问题进化。根据这些当前解要求的输入功能基因,重新定义设计问题。

(4) 检验是否满足终止条件,若不满足则转第(2)步,否则转下一步。

(5) 输出当前解集,进行评价与优选。若找到满意解则结束,否则变换问题描述粒度,重新定义设计问题并转第(1)步。

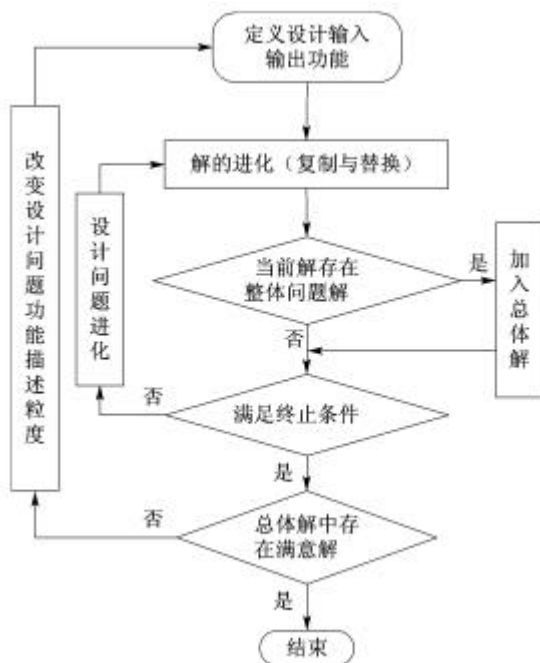


图 7 共进化功能推理算法流程图

## 3 算法特性分析

第 2 节中详细论述了基于多粒度共进化功能推

理的机械运动方案设计方法,它采用分类功能来表达机械运动变换单元及系统的类型、方向和运动传递等特征信息,将机械运动变换单元和设计目标都看成运动功能变换函数,通过功能推理来实现机械运动变换单元的串联组合。与其他几种具有代表性机械运动方案设计方法进行比较,该方法有以下几个优点。

(1) 设计效率高,可保证解集的完备性。在 Chiou 等提出的矩阵分解方法中,对可能的机构单元运动方案组合进行了分析,仅仅轴线平行的输入转动到输出转动的运动变换方案就达数十万之多,然而实际上其中大多数方案是无效的。其主要原因是仅仅从矩阵运算的角度来考虑运动变换而没有考虑相应的物理意义,例如许多运动转换方案无法找到对应的功能实现单元、单向输出的运动单元和需要双向输入的运动单元无法进行串联等。就其方案生成策略而言,本质上是一种穷举式搜索,虽然定义了一些优先分解规则,但不进行穷举搜索就无法保证解的完备性。该方法首先考虑了功能的物理意义,定义了功能元可连接条件,进而生成功能元的功能变换真值表,在功能推理过程中仅根据当前设计问题的功能特性在各功能元所对应的运动功能转换表中定向搜索,因此是一种启发式搜索方法,它可以大大提高设计效率,而且在给定基本功能单元库的条件下可以保证高效搜索到所有可能解,即保证设计方案解集的完备性。参考文献[15]虽然也采用了这种策略,但其对设计功能的描述粒度是固定的,需要预先定义功能变换真值表,因此应用范围有限。可以根据功能推理规则动态生成多粒度的功能变换真值表,因此应用范围更大;而且对有确定性变换规律的部分功能定义其串联叠加变换规则并采用计算机进行推理,将无法进行确定推理的功能作为辅助功能由设计者进行推理,有利于充分发挥计算机和设计者各自的优势。

(2) 通过功能分类可精确地描述运动变换单元及系统的运动功能变换特性。表达输入和输出运动之间的运动转换关系最常用的方法是运动变换矩阵表示法,但对于齿轮传动机构、圆柱凸轮摆动从动件传动机构等轴线相互垂直的机构单元,其输出轴线可以位于输入运动轴线所在平面内的任意位置,仅采用一个运动变换矩阵不足以表达这种运动转换关系。通过将功能进行细分,对不同功能特征分别进行定性描述和推理,运动功能单元的多种变换函数也分开处理,故可以更精确地描述运动变换单元及系统的运动功能变换特性。

(3) 多粒度共进化功能推理有助于确定合适的

问题定义，可支持创新设计。设计者对于设计问题的认识是一个逐渐明晰的渐进过程，粗粒度的问题描述会产生过多候选解，增加了方案评估难度，过于细化的问题描述粒度又会导致初始候选解过少。多粒度功能推理可以用于辅助确定设计问题的描述粒度，通过试探性推理产生解的数量初步判定设计问题描述粒度是否合适，这点对缺乏经验的设计者很有帮助。应用多粒度的功能推理还可以支持运动方案的创新设计，通过对不同粒度的问题定义及其对应解集的比较，可以发现某些约束的增加导致了部分可行解变成了非可行解，这样就可能应用 TRIZ 方法<sup>[17]</sup>、可拓学方法<sup>[18]</sup>等辅助解决这些新增约束引起的设计冲突，从而使部分非可行解变成可行解；同时还可将解决设计冲突的经验导入知识库指导后续设计工作。

(4) 可给出推理路线以支持后续详细设计。此处提出的多粒度共进化功能推理方法继承了 Chakrabarti 等提出的共进化推理模型的优点，即既可支持常规设计，也可支持创造性设计，可对给定设计问题在不同粒度层次支持概念解的综合，可以清楚地给出每个解的推理路线以支持后续详细设计。要得到每个解的推理路线，只需要在共进化基因序列后面增加一段用于记忆推理路线的基因片段即可。通过应用数据挖掘方法对解的推理路线进行分析，有助于发现推理过程中的内在规律以便提高推理效率和分析创新机制，这些将在后续工作中进一步深入研究。

## 4 应用实例

为了方便进行比较，此处仍采用 Chiou 等在参考文献[5]中所用的基本机构单元建立基本功能元基因库，也采用该文中的实例(电线进给机构)来说明本方法的有效性。

设计要求：设计一个机构实现对连续的电线的进给和切断操作。电线通过一对圆柱齿轮驱动的滚筒实现进给，在其切断前首先经过一个导管进行导向，如图 8 所示。要求采用一个激励源(动力源)实

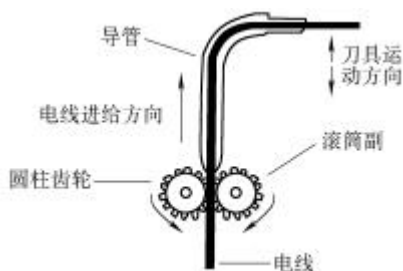


图 8 电线进给机构示意图

现进给和切断操作，且输入输出不可互换。显然该机构必须完成两个不同的任务：一个是实现电线进给，一个是切断电线。对电线进行切断操作时进给运动必须暂时停止，这就意味着进给运动应是间歇运动。此处只说明电线进给子任务的共进化功能推理综合过程。

### 4.1 设计输入输出功能确定

为了实现电线间歇进给，需要设计一个机构将连续匀速旋转的输入运动转换为一个间歇旋转的输出运动。表 10 中给出了参考文献[5]中列出的设计要求，由于此处将实现可逆运动的同一机构视为不同运动功能单元，故对互换性不予考虑。将这几种功能约束按照图 6 所示的共进化基因的表达方式排列，得到各项功能排列顺序为：运动类型、连续性、速度特性、运动方向转换特性、轴线夹角，对应输入输出功能基因为：0/00/0/0 和 0/11/1/0。

表 10 电线进给子任务设计要求列表

运动特性描述	输入	输出	系统
运动类型	旋转	旋转	-
轴向	Z 轴	Z 轴	-
连续性	连续	间歇	非连续
方向	+	-	-
线性	-	-	非线性
互换性	-	-	不可互换

### 4.2 共进化功能推理

基于参考文献[5]中所用的 43 个基本机构单元建立的基本功能元基因库，按照第 2.3 节所述的共进化功能推理方法，可得到 102 个候选解，图 9 给出了其中一个解的共进化推理过程。表 11 给出了部分解的 ID 序列和相应机构名称序列，其中第 3 个和第 6 个解就是参考文献[5]中通过矩阵分解方法所得的两个解。

### 4.3 变粒度功能推理

随着对设计对象认识程度的深入，需要动态更改设计要求进行再设计，本质上就是一簇不同粒度的设计问题。对于本应用实例，假如实际需要电线切断长度可调，则只需要添加运动范围可调性功能要求，对应功能序列为运动类型、连续性、速率特性、可调性、运动方向转换特性、轴线夹角，输入输出功能基因为：0/000/0/0 和 0/111/1/0。经分析发现，由于采用了一对圆柱齿轮驱动滚筒实现电线进给，两滚筒的旋转方向相反，输入运动可以连接到其中任意一个上面，因此输入输出运动方向设计约束是不必要的，故可以取消该约束已获得较多候选解，表 12 中对 3 种不同粒度的电线进给机构设计结果进行了对比。从该表中可以看出：采用本算法不仅可以适应设计者在设计过程中动态更改设计约束

进行多粒度设计的需要,而且设计效率高。采用多指标模糊评价法<sup>[1]</sup>对第三种设计问题描述粒度对应的解进行综合评价,得到最优解之一为曲柄摇杆机构和棘轮机构的组合,这种方案可调运动范围大、

调整方便,而且结构简单。经查询,陈守清等的豆制品成形切制机专利<sup>[19]</sup>(专利号:2063071)中的进给运动方案就是采用这一方案,说明了其有效性和实用性。

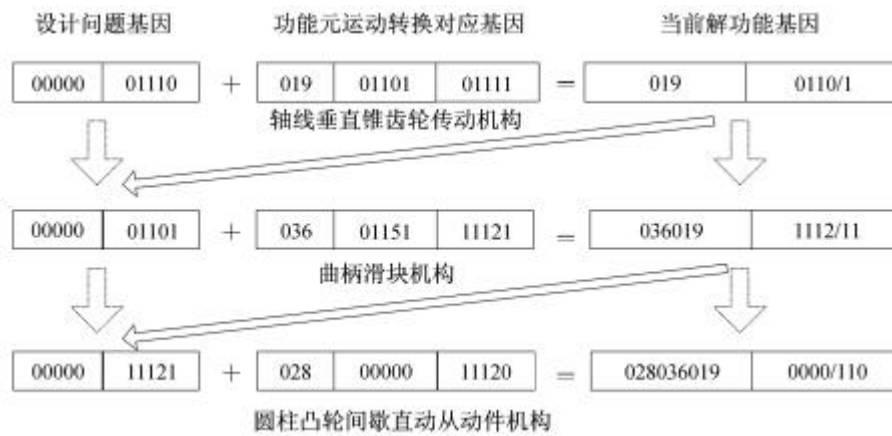


图 9 一个解的共进化推理过程

表 11 电线进给子任务部分解的 ID 序列和相应机构名称序列

ID 序列	对应机构名称序列
005	槽轮机构
008010	盘形凸轮间歇摆动从动件传动机构 R-R+棘轮机构 R-R
031036	盘形凸轮间歇直动从动件传动机构 R-T+曲柄滑块机构 T-R
013010	曲柄摇杆机构 R-R+棘轮机构 R-R
016029036	六杆间歇摆动机构 R-R+齿条齿轮机构 R-T+曲柄滑块机构 T-R
028036020	圆柱凸轮间歇直动从动件机构 R-T+曲柄滑块机构 T-R+轴线垂直锥齿轮传动机构 R-R
016029036	圆柱凸轮间歇摆动从动件传动机构 R-R+棘轮机构 R-R+轴线垂直锥齿轮传动机构 R-R

表 12 3 种不同粒度的电线进给机构设计结果比较

粒度	设计约束	输入输出基因	候选解数目
1	运动类型、连续性、速率特性、运动方向、轴线夹角	00000/01110	60
2	运动类型、连续性、速率特性、可调性、运动方向、轴线夹角	000000/011110	41
3	运动类型、连续性、速率特性、可调性、轴线夹角	00000/01110	57

## 5 结论

提出的基于多粒度共进化推理的机械运动方案设计方法,将机械运动变换单元和设计目标都看成运动功能变换函数,通过功能分类精确地描述运动变换单元及系统的运动功能变换特性,然后通过功能推理来实现多粒度的单自由度机械运动变换单元的串联组合,为机械运动方案设计提供了一种新思路。该方法不仅简单高效,具有更好的完备性,而

且它可以帮助设计者确定合适的问题定义粒度,对开发支持概念设计的计算机辅助产品创新设计软件系统有积极的促进作用。

在后续的研究工作中,将从辅助创新设计角度,研究机械方案创新设计共进化过程中的突出现象,以及粒度细化过程中产生的设计冲突问题,以辅助构建人机结合的机械方案创新设计工具。

## 参 考 文 献

- 1 周济, 查建中, 肖人彬. 智能设计. 北京: 高等教育出版社, 1998
- 2 邹慧君, 汪利, 王石刚, 等. 机械产品概念设计及其方法综述. 机械设计与研究, 1998, 14(2): 9~12
- 3 Kannapan S, Marshek K M. An algebraic and predicate logic approach to representation and reasoning in machine design. Mechanism and Machine Theory, 1990, 25(3): 335~353
- 4 Hoeltzel D A, Chieng W H. Knowledge-based approaches for creative synthesis of mechanisms. CAD, 1990, 22(1): 57~67
- 5 Chiou S J, Kota S. Automated conceptual design of mechanisms. Mechanism and Machine Theory, 1999, 34(3): 467~495
- 6 Moon Y M, Kota S. Automated synthesis of mechanism using dual-vector algebra. Mechanism and Machine Theory, 2002, 37(2): 143~166
- 7 王德伦, 张德珍, 马雅丽. 机械运动方案设计的状态空间方法. 机械工程学报, 2003, 39(3): 22~27
- 8 Maher M L, Poon J, Boulanger S. Formalising design

exploration as co-evolution : a combined gene approach.

In : Gero J S and Sudweeks Feds. Advances in formal design methods for CAD, London : Chapman and Hall, 1996

- 9 肖人彬, 胡维刚, 周济, 等. 设计过程的一种描述性模型. 华中理工大学学报, 1996, 24(2) : 106 ~ 108
- 10 Poon J, Maher M L. Co-evolution and emergence in design. Artificial Intelligence in Engineering, 1997, 11(3) : 319 ~ 327
- 11 Kota S, Ward A C. Function, structure and constraints in conceptual design. Design Theory and Methodology. In : DTM'90, American Society of Mechanical Engineers, Chicago, 1990 : 77 ~ 84
- 12 Umeda Y, Ishii M, Yoshioka M, et al. Supporting conceptual design based on the function-behavior-state modeler. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, 1996, 10(3) : 275 ~ 288
- 13 Gero J S. Computational models of innovative and creative design processes. Technological Forecasting and Social Change, 2000, 64 : 183 ~ 196
- 14 Chakrabarti A, Bligh T P. A scheme for functional reasoning in conceptual design. Design Studies, 2001, 22 (6) : 493 ~ 517
- 15 叶志刚, 邹慧君, 郭为忠, 等. 机械运动方案知识库的建立和机构自动化型综合. 机械设计与研究, 2003, 19(2) : 11 ~ 14
- 16 张国全, 钟毅芳, 何海. 基于功能推理机制研究复杂机械产品的概念设计. 机械工程学报, 2003, 39(4) : 19 ~ 24
- 17 檀润华. 创新设计 : TRIZ 发明问题解决理论. 北京 : 机械工业出版社, 2002
- 18 蔡文, 杨春燕, 林伟初. 可拓工程方法. 北京 : 科学出版社, 1997
- 19 <http://www.whinfo.com.cn/zl/zlold/cx/90210690.htm>

## NEW APPROACH TO MECHANICAL KINEMATIC SCHEME GENERATION BASED ON MULTI-GRANULARITY CO-EVOLUTIONARY FUNCTION REASONING

*Xiao Renbin Liu Yong*

*(CAD Center, Huazhong University of Science and  
Technology, Wuhan 430074)*

*Mei Shunqi*

*(School of Mechanical and Electrical Engineering,  
Wuhan University of Science and Engineering,  
Wuhan 430073)*

*Dong Fangmin*

*(CAD Center, Huazhong University of Science and  
Technology, Wuhan 430074)*

**Abstract:** A new approach to mechanical kinematic scheme generation based on multi-granularity co-evolutionary function reasoning is proposed. Firstly, features of co-evolutionary function reasoning model and multi-granularity design model are investigated, then a multi-granularity co-evolutionary function reasoning model is constructed by integrating their strongpoint. Such a model is applied into the kinematic scheme generation and a co-evolutionary algorithm for kinematic scheme generation is presented, in which classified functions are used to describe the kinematic characters of mechanical system and mechanisms, each mechanism and mechanical system is expressed by a motion-transforming function abstractly and series-connected mechanical kinematic schemes are generated based on function reasoning. Next, detailed flow of function reasoning algorithm is provided and the characteristics of the algorithm are analyzed by comparing with those of existed algorithms. Further, the advantages of the algorithm, such as high computing efficiency, high precision in describing motion transformation, are discussed. Finally, kinematic scheme generation of a wire-feeding mechanism is used to verify the effectiveness of the new approach.

**Key words :** Multi-granularity Co-evolution

Function reasoning

Kinematic scheme generation

作者简介：肖人彬，男，1965 年出生，博士，教授，博士生导师。主要研究方向为智能设计与复杂产品创新设计，群集智能与复杂性科学，管理决策理论与决策支持系统等。

E-mail : rbxiao@163.com