DOI: 10.3901/JME.2019.19.128

机械系统功能行为合成与创新*

李雨桐¹ 王玉新¹ 张旭光²

(1. 中国石油大学华东机电学院 青岛 266580;

2. 徐工集团工程机械股份有限公司 徐州 221004)

摘要: 功能作用原理创成能力不足是制约功能综合法获得新颖创新性概念设计方案的关键。针对机械系统行为特征,以基础行为片段集表达常用复杂机械系统的运动行为,给出了一种基于粒度、商结构和商属性等价关系的商空间论域合成功能综合方法。不同等价划分原则,得到不同功能构型方案。为使合成的子功能满足时间有序性与空间连续性要求,对粒度等价划分方案分别进行时序等价关系划分与空间等价关系划分,基于商结构合成方法,得到两商空间的合成空间,使获得的功能方案能够在时间与空间上连续有序地实现设计功能,为结构层创成新颖优化的机械系统结构方案,提供优化的功能构型。

关键词: 功能创新; 商空间合成; 等价划分; 计算机辅助概念设计; 机械系统

中图分类号: TH112

Functional Behaviors Synthesis and Innovation for Mechanical Systems

LI Yutong¹ WANG Yuxin¹ ZHANG Xuguang²

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580;

2. Xugong Group Construction Machinery Co., LTD., Xuzhou 221004)

Abstract: Incompetence in generating innovative functional principles has restricted the capability for AI-based functional synthesis approaches to obtain novel and innovative conceptual design schemes. In consideration of the behavior characteristics of mechanical systems, with a set of behavior segments to express the kinematic behaviors of common complex mechanical systems, a new kind of functional synthesis approach in accordance with the equivalence relations in granularity, quotient structures and quotient attributes based on the domain synthetic theory in quotient space is presented. Different equivalence partition rules lead to produce different function configuration schemes, in which the subfunctions are formed and contributed by all of basic operation actions in the divided subsets. For making the synthetic subfunctions formed and contributed by all of basic operation actions in the divided subsets take place in time and space continuously and orderly, the partition schemes relative to the granularity equivalence relations are secondly divided into two quotient spaces corresponding to the time sequence equivalence relation and the space position equivalence relation, respectively. Then the intersection quotient space of these two quotient spaces is synthesized, in which all of basic operation actions in the synthetic subfunctions occur in time and space continuously and orderly. In this way, the functional synthesis process can not only generate novel functional principles and new functional schemes, but also guarantee the generated subfunctions take place in time and space orderly and sequently. These kinds of functional schemes will benefit of finding optimal structures to realize the overall function.

Key words: functional innovation; synthesis in quotient space; equivalence partition; CAD-based conceptual design; mechanical system

0 前言

机械系统运动方案的创新性与先进性是决定机械产品性能、成本、可靠性及市场竞争力的关键^[1]。虽然在计算机辅助机械运动方案概念设计领域进行

了大量研究^[2-8],取得了重要进展,受推理模型以及缺少必要推理知识支撑等制约,复杂机械系统非常规创新设计问题仍是学术难题^[9,14]。

创成法^[10,15]、功能综合法^[11-12]和运动综合法^[13]是三类代表性的机械系统计算化概念设计方法^[14]。创成法根据设计规则和知识,基于发散思维原理,充分拓展概念设计解空间,能够创成超出设计者预期的新颖设计方案,在机构运动链再生^[15]等方面得

* 国家自然科学基金资助项目(51375496, 51775557)。20181007 收到初稿, 20190731 收到修改稿

到很好的应用。不过,该方法仅适于改变机构拓扑结构组成的机构创新设计问题。运动综合方法用输入-输出模式描述设计需求,建立任务空间的数学描述模型。通过对任务空间的分解,得到实现给定运动需求的构型,如运动行为矩阵分解方法^[13]、键合图^[16]、对偶矢量 MOON^[17]和运动行为组合方法^[18]等,解决了单输入、单输出机构的构型综合问题。功能综合法依赖于功能推理知识^[19-21],对于常规设计问题,基于功能综合模型的计算机化概念设计系统的主要任务是实现功能-结构之间的检索匹配,导致概念设计解空间非常狭窄,方案缺少创新性^[9,14],机构运动方案复杂、庞大;而对于非常规设计问题(包括 innovative design 和 Creative design^[22]),由于缺少必要的推理知识支撑,功能推理机制不能建立,方法难以应用。

已有概念设计方法重点致力于解决设计需求满足问题,即寻找满足设计需求的功能构型及实现功能的功能载体结构,很少有文献研究功能在时间与空间发生的连续性。作为一个完整的复杂机械系统,只有当各构成子功能在时间上与空间上连续有序发生,系统整体设计功能才得以有机协同实现,得到优化的功能构型与优化的匹配结构。文献[23]提出了一种功能-结构双向匹配模型,通过在功能层与结构层之间引入两个自底向上的功能动态划分与重组过程,替代 FBS 模型中功能-结构直接匹配过程,给出了支持非常规概念设计问题的计算机模型。本文在此基础上,给出功能原理创新的商空间合成理论模型,解决功能综合法功能作用原理创新能力不足问题,在实现功能原理创新的同时,使创成的子功能在时间上与空间上连续有序发生,有机协同地实现设计功能需求,为结构层匹配、创成新颖优化的结构方案,提供优化的功能构型。

1 行为片段

1.1 机械系统的行为片段

1.1.1 行为片段

机构的运动行为可以视为由若干个行为更为简单、不依赖于机构的行为片段,依次按序连接组合而成。若将行为片段集作为构成复杂机械系统运动行为的基集,则可以通过功能综合法,实现基于行为片段集的复杂系统创新设计。其优势在于:由于其功能层与结构层匹配采用论域合成方法,不需要功能-结构推理知识的支撑,因而其可以解决非常规设计问题的创新设计;通过功能层行为片段集的划分与重构,实现功能原理的创

新,或功能层创新,从而解决功能综合法不能创成新颖作用原理的瓶颈问题;采用行为片段集不仅可以描述构成机构的输入输出行为、运动停歇行为等,而且可以描述连杆曲线等特定的运动行为,因而可以使构建的创新设计平台能够解决一般复杂机械系统的创新设计问题。与连杆曲线综合的级数方法相比^[24-27],由于行为片段的粒度低于基本机构的运动行为,基于行为片段集的连杆曲线综合方法将可以获得更宽广的机构解,提升复杂机构概念设计的创新性。

1.1.2 行为片段特征与数学描述

行为片段是构成复杂机械系统运动行为的局部片段。行为片段的特征:描述行为,为完整行为体的组成单元;单独行为片段与结构无关,但由行为片段子集构成的完整行为体需要由知识库中的构成机构实现。行为片段具有:有向性,连续性,可逆性特点。如图 1 所示,连杆曲线可以划分为圆弧曲线 C_{Crac} 、 C_{Crcb} 与直线部分 L_{ba} 三个行为片段。有序性是指行为发生顺序按 $C_{Crac} \rightarrow C_{Crcb} \rightarrow L_{ba}$ 依次进行;可连接性是指这些行为在行为连接点 a 、 b 、 c 光顺连续连接;可逆性是指这些行为片段可以按逆序关系依次发生。

图 1 连杆曲线的行为片段描述

行为片段的数学描述包括:行为片段的来源、行为属性及质量属性三部分,如图 2 所示。行为片段的来源表明在功能层该行为片段来源于哪一个 FBS 模型中的子功能,在结构层来源于哪一个构成机构的主功能或某一个次要功能;行为属性,包括运动形式,如直线运动、圆弧运动、停歇运动等,行为类型、行为特征及行为接口特征。

图 2 行为片段的数学描述

1.2 基本操作集

1.2.1 行为片段的类型

如表 1 所示,行为类型包括 5 个方面。

行为变换(CO),将不同类型、不同属性的行

为进行转换,如输入连续转动,输出液体压强。

行为合成(CC)将多个输入行为转换为单一输出行为。行为合成类行为片段中存在多个相同或不同的输入行为。

行为分解(DE)将单一输入行为转换为多个输出行为。行为分解类行为片段中存在多个相同或不同的输出行为。

行为缩放(ZO),将输入行为转换为种类相同,但值不同的输出行为。如齿轮机构实现对输入转速(转矩)的放大或缩小。行为缩放还可以表达液压、气动系统中的稳压等功能。

行为运算(OP)。输入、输出行为种类相同,但值不同。存在多个输入行为。

表 1 行为片段的类型

行为类型	行为变换	行为合成	行为分解	行为缩放	行为运算
代号	CO	CC	DE	ZO	OP
图标					

1.2.2 行为片段的特征

行为特征用来描述行为片段的输入行为与输出行为之间的变换关系,包括轴位置特性、方向特性、速度特性、连续性、缩放特性、可缓冲性、流量特性、流速特性、运算特性,行为特性代号及可选项如表 2 所示。

表 2 行为片段的特征

行为特性	代号	可选项
轴位置特性	AX	同向(SAD);反向(RED);交错(STA)
方向特性	DIR	反向(RED);相同(SA);单向(UNI);可调(AJ)
速度特性	SP	均匀(UN);不均匀(NU);可调(AJ)
连续性	CON	连续(CO);间断(IN)
缩放特性	ZM	放大(L);缩小(NA);平衡(BA)
可缓冲性	AM	单向(SAM);双向(BAM);不缓冲(UAM)
流量特性	FL	恒定(UN);可调(AJ)
流速特性	FS	恒定(UN);可调(AJ)
运算特性	OP	加(ADD);减(MIN);微分(DC);积分(INT);与(AND);或(OR)

AX:表示基本操作输入、输出运动行为轴线方向之间的关系;DIR:用于表示液压、气动系统中液压(气动)介质的流动方向;SP:速度特性,表示输入运动行为速度均匀时,输出运动行为的角速度或线速度特性;CON:连续性,表示基本操作中输入、输出行为的连续性;ZM:缩放特性,表示输出行为相对于输入行为幅值的改变情况;AM:可缓冲性,用于液压及气动系统,表示运动行为是否具有缓冲能力;FL:流量特性,用于液压及气动系统,表示对流量的调节作用;FS:流速特性,用于液压

及气动系统,表示对流速的调节作用;OP:运算特性,表示行为之间的运算方式。

1.2.3 基本操作集

在图 2 所示的行为片段数学描述中,还包含由功能分解或由构成机构行为特征获得的行为片段之间的连接关系,与其他行为片段构成连接的约束条件,以及该行为片段发生的接口条件等。功能层与结构层的行为片段分别用符号 b, b' 表示,其行为分别用 op_b, op_s 表示

$$op_b = \{op_b | op_b \in \{F_o, F_c, B_v, B_c, I_c, O_c, V_b, E_b, A_{br}\}\}$$

$$op_s = \{op_s | op_s \in \{S_o, T_s, G_m, A_{ix}, I_m, O_m, V_s, E_s, A_{sr}\}\}$$

对常用复杂机械系统构成行为特征分析,建立构成一般机械系统运动行为的基础行为片段集,共分三大类,计 284 种,大类划分如表 3 所示。称构成常用复杂机械系统的基础行为片段集为基本操作集,行为片段为基本操作。

表 3 机械系统(含气动、液压)基本操作集

运动形态	运动关系	运动方式
匀速转动、非匀速转动、连续摆动、单侧停歇摆动、双侧停歇摆动、中间停歇摆动、连续直移、单侧停歇直移、双侧停歇直移、中途停歇直移、步进移动、直线点轨迹运动、曲线点轨迹运动	运动缩小、运动放大、运动合成、运动分解、运动换向、运动轴线变换、运动分支	分度、超越和反向止动、换向、离合、开关、定位、锁止、夹压、制动、安全保护、供料、整列和选别、装配、包装、搬运、升降、压、剪、振动、检测

2 基本操作的商空间描述及合成

2.1 基本操作的商空间描述

机械系统功能分解过程与商空间分层递阶等价划分具有类似的特征。为此,采用商空间理论,描述功能层基本操作的合成问题。令 (X, f, T) 表达一个基本操作集合。这里, $X = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ 为论域,即功能层所有子功能包含的基本操作的集合; T 为结构函数,描述基本操作之间的连接关系、序关系、因果关系、条件关系等拓扑结构关系,用于规定基本操作发生的顺序、时间与空间关系。基本操作行为之间存在序关系“ $b_i \rightarrow b_j$ ”,并行关系“ $b_i \uparrow b_j$ ”,或非相关关系“ $b_i \nabla b_j$ ”。 f 为属性函数,描述如图 2 所示的基本操作的行为属性、来源属性、质量属性,以及基本操作的时间属性与空间属性。

图 3 为三面切书机功能的基本操作组成及时序/空间位置关系。表 4 列出了这些基本操作的前序节点与后序节点的时序/空间顺序。这些序节点既表达

了基本操作的连接关系,又表达了行为连续性关系,在行为聚类合成时发挥重要作用。基于定义的空间关系、时间关系,这些基本操作可以合成为连续、有序的子功能行为,有机协同地实现总功能。

图3 三面切书机功能的基本操作组成及时序/空间关系

表4 三面切书机功能的基本操作时序/空间关系

基本操作	行为类型	时间属性		空间属性		实现行为
		前序节点	后序节点	起点	终点	
b_1	L	无	b_3	0, 1	3, 1	送书
b_2	L	b_3	b_4	3, 1	0, 1	送书装置退回
b_3	L	b_1	b_2, b_5	3, 2	3, 1	压书装置压书
b_4	L	b_2, b_8	无	3, 1	3, 2	压书装置退回
b_5	L	b_3	b_6	2, 2	3, 0	侧刀切书
b_6	L	b_5	b_7	3, 0	2, 2	侧刀退回
b_7	L	b_6	b_8	4, 2	4, 0	横刀切书
b_8	L	b_7	b_4	4, 0	4, 2	横刀退回

2.2 基本操作商结构合成

2.2.1 机械系统运动行为合成要求

在机械系统中,基本操作需要按照一定的时序关系,依次连接,先后发生,有机协同地实现系统预期的设计功能。例如,在正时节能汽车发动机工作过程中,正时机构必须保证活塞运行到一定位置时打开或关闭进、排气门,以保证发动机节能燃烧的实现。同时,系统运行过程中,运动行为在空间上是连续的,不能由一个空间位置跳跃到另一个空间位置。由此,在对基本操作集合进行划分时,既要保持行为的连续性与有序性,又要保证行为在空间上的连续性。

根据集合理论,论域 $X = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ 元素的合成,对应于对该论域进行一个基于等价关系 R 的划分。对于机械系统而言,这样的划分除满足约束条件之外,如粒度要求,还应满足行为的相容性、一致性要求。为得到既符合时序关系又满足空间连续性要求的划分方案,首先,采用时序划分 R_t 得到满足时序关系的商空间 $([X]_t, [f]_t, [T]_t)$;其次,依据空间连续性要求,得到满足空间等价关系 R_p 的商

空间 $([X]_p, [f]_p, [T]_p)$ 。然后,将时序关系商空间与空间关系商空间合成,得到同时符合时序关系与空间关系的合成商空间 $([X]_c, [f]_c, [T]_c)$ 。

2.2.2 时序关系合成

按照时序关系要求,机械系统基本操作论域结构,即拓扑连接关系,属于半序空间^[28],其半序“ $<$ ”定义如下。

$\forall b_1, b_2 \in X, b_1 < b_2 \Leftrightarrow$ 基本操作 b_1 在基本操作 b_2 之前发生。

满足上述半序定义的基本操作集合为商半序空间,可以用一功能有向网络图来表示^[29],如图 3c 所示。每个节点代表一个基本操作,节点间的箭线表达了节点间的半序关系,图中 $b_3 \rightarrow b_5$ 表示在序关系上有 $b_3 < b_5$ 。称节点 b_1 为节点 b_3 的前序节点,节点 b_3 为节点 b_1 的后序节点。

为得到划分的基本操作子集中的元素满足时序关系要求,通过等价关系 R_t 对原基本操作空间进行划分,得到满足时序关系的商空间 $([X]_t, [f]_t, [T]_t)$ 。制定保序性等价关系 $R_s = \{x_n | x_n \in X_B \text{ 且 } \forall i, j \subset n \text{ 有 } x_i < x_j, \text{ 或 } x_j < x_i\}$,则时序等价关系 R_t 为粒度等价关系 R_g 与保序等价关系 R_s 的合成: $R_t = R_s \wedge R_g$ 。

符合图 3c 时序关系要求的一组基本操作划分方案为: $\{\{b_1, b_3, b_2, b_5\}, \{b_6, b_4\}, \{b_7, b_8\}\}$,如图 4a 所示。这三组基本操作子集的运动行为,满足功能分解树对该三组基本操作子集运动行为发生有序性要求。不同的划分规则 R_t ,得到不同的由构成基本操作合成的基本操作子集运动行为-子功能,及由子功能构成的总功能方案-功能构型。

2.2.3 空间关系合成

与时序关系划分多解性不同,空间关系划分需要采用最大粒度原则^[28],将所有满足空间连续性要求的基本操作划分为一个分组。分组原则如下。

行为轨迹连续的基本操作划分为一组。

行为发生在同一节点的基本操作划分为一组。

出于对方案简便性要求,在同一个位置执行的基本操作划分为一组。

图 3d 中基本操作 b_2, b_3 符合第三项分组原则,应该划为一个分组。空间关系与基本操作的行为特征、空间持续位置密切相关,因而需要针对具体基本操作进行具体分析。

定义空间等价关系 R_p 对基本操作进行划分。

$R_p = \{x_n | x_n \in X_B \text{ 且 } \forall i, j \in n \text{ 有 } x_i \cdot Sn = x_j \cdot En \text{ 或 } x_i \cdot Sn = x_j \cdot En\}$ 。其中 n 为指标集, $x_i \cdot Sn$ 、 $x_j \cdot Sn$ 分别表示基本操作行为的起始点与终止点。

通过等价关系 R_p 对基本操作空间进行划分,得到符合空间关系要求的商空间 $([X]_p, [f]_p, [T]_p)$ 。图

4b 所示为一组满足图 3d 所示基本操作空间关系的分组: $\{b_1, b_3, b_2\}$, $\{b_7, b_8\}$, $\{b_4, b_5, b_6\}$ 。

图 4 基本操作时序关系与空间关系合成

2.2.4 时序关系与空间关系合成

将时序关系商空间 $([X]_t, [f]_t, [T]_t)$ 与空间关系商空间 $([X]_p, [f]_p, [T]_p)$ 合成, 得到同时符合时序关系及空间关系的合成商空间 $([X]_c, [f]_c, [T]_c)$ 。合成后的论域为

$$[X]_c = \{x_i \cap y_j \mid x_i \in [X]_t, y_j \in [X]_p; i, j \in N\}$$

合成过程为: 选取满足时序关系的一个划分方案, 将方案中每个分组与空间关系商空间中的每个分组求交集, 将交集中元素作为一个新的分组, 依次得到合成商空间包含的全部分组。如图 4b 所示为同时符合图 3c 时序关系与图 3d 空间关系的一组划分合成方案。

3 基本操作合成算法实现

3.1 保序合成流程与算法

3.1.1 保序合成流程

由于功能有向网络图中存在多个前序或后序节点, 如图 3c 中基本操作节点 b_3 和 b_4 , 为使保序划分过程不产生重复结果, 将基本操作功能有向网络图转化为树结构, 按深度优先原则选取划分节点。如图 5a 所示, 选定一基本操作节点 b_1 作为转化树的根节点, 将该节点的前序及后序节点转化为其第一层子节点 b_3 , 再将第一层子节点没有转化的前序及后序节点作为其第二层子节点。同理, 将第 n 层子节点没有转化的前序及后序节点作为第 $n+1$ 层子节点, 直到遍历所有叶节点。

以图 3c 所示的三面切书机的基本操作时序关系为例, 叙述保序划分的实现方法。取一组粒度划分方案 $\{\{2\}, \{2\}, \{4\}\}$, 保序划分流程如下。

(1) 首先选择一个未划分的结点作为划分计算的起始节点, 不失一般性, 这里选择 b_1 为起始节点。在划分结构中为节点 b_1 分配一个分组数, 首先选择分组数为 2, 得到第一个分组 (b_1, b_3) , 将 b_1, b_3 节点标记为已划分节点, 如图 5a 所示。

(2) 计算下一个分组。此时, 划分方案中剩余分组数为 $\{\{2\}, \{4\}\}$ 。选划分起始节点 b_2 为根节点, 为 b_2 点分配基本操作分组数为 2, 得到分组 (b_2, b_4) , 将 b_2, b_4 节点标记为已划分节点。此时剩余分组数为 4, 未划分的四个节点分为一组, 对应的划分方案为 $\{(b_1, b_3), (b_2, b_4), (b_5, b_6, b_7, b_8)\}$, 如图 5b 所示。

(3) 回溯划分过程, 清空后两个分组使划分返回到图 5a 所示状态, 此时, 剩余分组数为 $\{\{2\}, \{4\}\}$ 。检查是否存在其他以 b_2 为起始节点且分组数为 2 的分组, 对于图 5d, 不存在其他方案。为 b_2 点分配基本操作分组数为 4, 按照图 3c 所示的时序关系, 取分组 (b_2, b_4, b_8, b_7) , 划分方案为 $\{(b_1, b_3), (b_5, b_6), (b_2, b_4, b_7, b_8)\}$, 如图 5c 所示。

(4) 回溯划分过程到图 5a 所示状态, 此时对节点 b_2 不存在新的分组; 继续回溯, 到图 5a 所示的划分初始状态。因起始节点 b_1 不存在基本操作分组数为 2 的新分组, 改变分组数, 令其分组数为 4, 按照图 3c 所示的时序关系, 取分组 (b_1, b_3, b_2, b_4) , 如图 5d 所示, 此时剩余分组数为 $\{\{2\}, \{2\}\}$ 。

图 5 三面切书机基本操作有向网络划分过程

(5) 以 b_5 为划分新起点, 得到 $\{(b_1, b_3, b_2, b_4), (b_5, b_6), (b_7, b_8)\}$ 划分方案, 如图 5e 所示。

(6) 回溯划分过程。以节点 b_1 为划分起点, 分组数为 4 的分组还有 (b_1, b_3, b_2, b_5) 、 (b_1, b_3, b_5, b_6) 两组。则按照前述方法可以得到两组对应的划分方案 $\{(b_1, b_3, b_5, b_6), (b_2, b_4), (b_7, b_8)\}$ 及 $\{(b_1, b_3, b_2, b_5), (b_6, b_7), (b_4, b_8)\}$, 如图 5f 所示。此时, 在划分方案 $\{\{2\}, \{2\}, \{4\}\}$ 中, 基于初始节点 b_1 的所有分组数均得到遍历, 划分过程结束。

3.1.2 保序合成算法

保序合成流程的计算机实现算法如下。

步骤 1 初始化。

设置所有基本操作节点数据成员变量 $mSign$ 值设置为 0, 初始化整型变量 $nSumGroup$ 为基本操作节点总数 $nMax$, 从粒度划分存储数组 $g[]$ 中读取一组粒度划分结果。

步骤 2 选取一个划分起始节点, 并为其分配分组数, 循环读取基本操作节点, 选择一个不存在前序节点或其前序节点已划分的基本操作节点 b_k 作为划分的起始节点。读取划分结构数组 $g[]$, 如果 $g[i]$ 满足 $g[i] > 0$, 则为节点 b_k 分配分组数为 $nGroupNumber = i + 1$, $g[i] --$ 。

步骤 3 分组求解。

对于选取的划分起始节点, 调用分组函数生成包含基本操作数为 $nGroupNumber$ 的分组结果, 分组函数的实现过程将在下面进行论述。分组函数返回分组结果数及分组结果, 方案数存储于整型变量 $nNumber$ 中, 分组结果存储在变量 $pResultSave$ 中。如果 $nNumber > 0$, 进入步骤 4 如果 $nNumber \leq 0$, 进入步骤 5。

步骤 4 选取分组。

选取得到的第一组分组结果, 将分组中的节点成员变量 $mSign$ 值设置为 1, 标记节点为已划分, 将分组记录在变量 $lResultSave$ 中, 变量 $nSumGroup = nGroupNumber$ 。如果 $nSumGroup > 0$ 则进入步骤 2; 如果 $nSumGroup + = 0$, 记录分组结果, $nSumGroup + = nGroupNumber$, 并置分组中所有基本操作的成员变量 $mSign$ 值为 0, 进入步骤 5。

步骤 5 改变选用的分组。

判断是否具有新的分组结果, 如果存在, 则将原分组在变量 $lResultSave$ 中删除, 并将原分组中包含的基本操作节点成员变量 $mSign$ 值设置为 0, 选取新分组, 进入步骤 4; 如果不存在新分组, 则进入步骤 6。

步骤 6 改变分组数。

$g[nGroupNumber - 1]++$, 判断是否存在 $g[i] > 0$, 且满足 $(i - 1) < nGroupNumber$ 。如果存在, 则为节点分配新的分组数为 $nGroupNumber = i + 1$, $g[i] --$, 进入步骤 3; 如果不存在, 则进入步骤 7。

步骤 7 结束或返回上一分组求解。

$nSumGroup + = nGroupNumber$, 如果 $nSumGroup < nMax$, 进入步骤 5, 改变上一个分组的选用结果; 如果 $nSumGroup = nMax$, 计算过程结束。

步骤 3 调用的分组生成函数计算流程如下。

(1) 初始化。读入基本操作节点数据, 包括分组起始节点 b_k 及分组基本操作数 $nGroupNumber$ 将 b_k 计入分组结果, $nNumberRest = nGroupNumber$,

$Sum = 0$, $nNumberRest --$ 。分组过程中的第 i 层节点是指: 相对一个划分起始节点, 将图转化为其生成树的计算过程中得到的第 i 层子节点。节点层数用整型变量 $nVarCtrl$ 表示。存储每层选取节点数目的整型数组 $naNumber$ 为 0。如果 $nGroupNumber = 1$, 则直接返回分组; 如果 $nGroupNumber > 1$ 则进入下一步。

(2) 节点分组。对于节点 b_k , 如果其生成树中第 $nVarCtrl$ 层子节点数目 n , 满足 $nNumberRest > n$, 则将所有该层子节点计入分组, $naNumber[nVarCtrl] = n$, $nVarCtrl ++$, $nNumberRest = n$, 重回节点 b_k ; 如果 $nNumberRest \leq n$, 则 $naNumber[nVarCtrl] = n$, 将该层的前 $nNumberRest$ 个节点计入分组, 记录分组, $Sum ++$, 进入下一步; 如果当前层不存在子节点, 则 $nVarCtrl --$, 进入下一步。

(3) 改变层选用节点。判断 $nVarCtrl$ 层子节点中是否存在选取 $nNumberRest$ 个节点的新方案, 如果存在, 则将新方案计入分组, 记录分组, $Sum ++$, 选取下一新分组; 如果不存在新分组, 则进入下一步。

(4) 改变层选用节点数。 $naNumber[nVarCtrl]--$, 如果 $naNumber[nVarCtrl] > 1$, 则将该层的前 $naNumber[nVarCtrl]$ 个节点计入分组, 记录分组, $nNumberRest ++$, $nVarCtrl ++$ 进入 (2); 如果 $naNumber[nVarCtrl] == 1$, 则进入下一步。

(5) 结束或回溯到上一层子节点求解。如果 $nVarCtrl > 1$, 则在分组中删除 $nVarCtrl$ 层选用的子节点, $nVarCtrl --$, 进入 (3); 如果 $nVarCtrl = 1$, 则计算结束, 返回分组数及分组结果数据。

3.2 空间关系合成算法

步骤 1 初始化。

读取基本操作数据, 选取一个基本操作 b_i 作为划分起始位置, 读取基本操作 b_i 的空间位置坐标 Sn, En , 将 Sn, En 存入到 $CPoint$ 类数组 $aNS[nSize]$ 中, $int i = 0$ 进入步骤 2。

步骤 2 分组生成。

取基本操作 b_k , 如果满足 $b_k.Sn = aNS[i]$ 或 $b_k.En = aNS[i]$ 存在于数组 $aNS[]$ 中, 则将 b_k 计入分组, 进入步骤 3; 如果不满足则进入步骤 4。

步骤 3 坐标记录。

检测 $b_k.Sn$ 及 $b_k.En$ 是否存在于数组 $aNS[]$ 中, 如果都存在, 则直接进入步骤 4; 如果某个坐标不存在, 则将其存入到数组 $aNS[]$ 中, 进入步骤 4。

步骤 4 改变选取的基本操作节点。

如果已经遍历整个基本操作集合, 则进入步骤 5 如果未遍历整个基本操作集合, 则改变选取的基

本操作节点, 进入步骤 2。

步骤 5 结束或改变比较的位置坐标。

$i++$, 如果 $i < nSize$, 则进入步骤 2; 如果 $i \geq nSize$ 则计算结束。

对于图 3d 中所示基本操作空间关系, 划分过程中, 首先选取 b_1 为划分起始节点, 则将点(0, 0), (1, 0) 计入数组 $aNS[nSize]$ 中。选定(0, 0)点, 检索基本操作集合, 在(0, 0)点, 不存在其他基本操作, 则进一步选定(1, 0)点, 并检索基本操作集合。基本操作 b_2, b_3 交点为(1, 0), 可以将 b_1, b_2, b_3 划分为一个分组, 并将 b_3 的终止点坐标(6, 0)记录到数组 $aNS[nSize]$ 中。这时数组 $aNS[nSize]$ 中添加了新元素, 则继续选取(6, 0)点, 检索基本操作集合, 在此点上不存在其他基本操作, 并且数组 $aNS[nSize]$ 中无新节点, 则完成一个分组的划分, 此分组为 $\{b_1, b_2, b_3\}$ 。继续选取未分组的基本操作 b_4 执行上述过程, 最后得到的空间关系商空间为 $\{\{b_1, b_2, b_3\}, \{b_7, b_8\}, \{b_4, b_5, b_6\}\}$ 。

3.3 商结构合成算法

时序关系及空间关系合成流程如下。

步骤 1 初始化。

读取时序关系划分方案及空间关系划分方案。

int $i=1, j=1$ 。

步骤 2 合成计算

在时序关系划分方案集中取出一组划分方案, 设其为 $\{g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{im}\}$, g_{im} 为划分方案中的一个分组。设空间关系划分方案为 $\{g_{p1}, g_{p2}, \dots, g_{pm}\}$, g_{pm} 为其中一个分组, 取分组 g_{ii} 与分组 g_{pj} 。如果两个分组有共同节点, 则所有共同节点组成新分组 g_{ck} 计入到合成方案中, 两分组分别计入到合成方案中, 进入步骤 3; 如果不存在共同节点, 进入步骤 4。

步骤 3 遍历空间关系分组。

$j++$, 如果 $j < m$, 进入步骤 2; 如果 $j \geq m$, 则 $j=1$, 进入步骤 4。

步骤 4 遍历时序关系分组。

$i++$, 如果 $i < n$, 进入步骤 2; 如果 $i \geq n$, 则 $i=1$, 进入步骤 5。

步骤 5 结束或遍历时序关系划分方案。

如果未遍历整个时序关系划分方案集, 则取一组新的时序关系划分方案, 进入步骤 2; 如果已经遍历整个时序划分方案集, 则程序结束。

如图 4 所示: 取划分方案的第一分组 $\{b_1, b_2, b_3, b_5\}$, $\{b_1, b_2, b_3, b_5\}$ 与空间关系商空间划分方案中每个分组进行合成运算, 得到两个分组 $\{b_1, b_2, b_3\}$, $\{b_5\}$, 对分组 $\{b_4, b_6\}, \{b_7, b_8\}$ 重复合成过程, 得到最后的合成商空间划分方案

$\{b_1, b_2, b_3\}, \{b_5\}, \{b_4, b_6\}, \{b_7, b_8\}$ 。每个分组不仅满足保序性要求, 而且满足空间连续性要求。从合成结果可以看出, 合成的分组粒度低于时序关系及空间关系商空间的粒度。

4 实例

印刷机械及印后处理机械的定位递纸功能主要包含送纸、压纸、定位、咬纸几个分功能。对其进行功能分解^[29], 得到功能层基本操作的时序关系及空间关系, 如图 6a、6b 所示。各基本操作分别为: b_1 , 功能-送纸, 行为-(0, 0)点到(1, 0)点的直线运动; b_2 , 功能-压纸, 行为-(1, 2)点到(1, 1)点的曲线运动; b_3 , 功能-压纸结构让纸, 行为-(1, 1)点到(1, 2)点的曲线运动; b_4 , 功能-侧向定位, 行为-(3, 2)点到(3, 1)点的直线运动; b_5 , 功能-侧向让纸, 行为-(3, 1)点到(3, 2)点的直线运动; b_6 , 功能-横向定位, 行为-(2, 1)点到(1, 1)点的曲线运动; b_7 , 功能-横向让纸, 行为-(1, 1)点到(2, 1)点的曲线运动; b_8 , 功能-取纸, 行为-(3, 0)点到(4, 0)点的直线运动。

图 6 定位递纸功能基本操作时序及空间关系

设分组范围(GMin, GMax)=(1, 4); 分组中包含的最小、最大操作数(OMin, OMax)=(2, 5), 以及单基本操作分组最大数(SoMax)=1, 由粒度等价关系: $R_g = \{R | \forall [x]_\alpha \in R_i, \exists [x]_\beta \in R_j \text{ 满足 } [x]_\alpha \cdot l = [x]_\beta \cdot l\}$ 其中 $[x]_\alpha \cdot l$ 表示分组 $[x]_\alpha$ 中包含的基本操作数目, 得到 5 组分组方案: $\{\{2\}, \{3\}, \{3\}\}, \{\{3\}, \{5\}\}, \{\{4\}, \{4\}\}, \{\{2\}, \{2\}, \{4\}\}, \{\{2\}, \{2\}, \{2\}, \{2\}\}$ 。对于这些划分方案, 符合保序性要求的划分方案共计 25 种, 如图 8a 所示, 部分划分方案如图 7 所示。

虽然, 图中划分方案都满足图 6a 所示的时序关系要求, 保证由基本操作组成的子行为依次连续发生。但是, 由于此时得到的划分方案没有考虑基本操作的空间关系, 会产生空间连接不合理的划分方案。如图 7a 所示, 分组 $\{b_1, b_2, b_3, b_6, b_7\}$ 中基本操作满足时序关系, 但是由于基本操作空间行程位置并不连续, 难以采用同一结构将其实现。为了使得到的划分方案既能满足基本操作时序关系要求, 又能满足基本操作空间分布连续性要求, 将时序关系划分方案与空间关系划分方案进行合成, 得到同时符

合两种关系要求的划分方案,如图 8b 所示。

图 7 符合时序关系的划分方案

共有 25 组结果, 如下:		共有 25 组结果, 如下:	
序号	结果	序号	结果
1	{1,2,3,6,7},{4,5,8}	1	{1},{2,3,6,7},{4,5},{8}
2	{1,2,3,4,5},{6,7,8}	2	{1},{2,3,6,7},{4,5},{8}
3	{1,2,6,7,8},{3,4,5}	3	{1},{2,3,6,7},{4,5},{8}
4	{1,2,3,4},{5,6,7,8}	4	{1},{2,3,6,7},{4,5},{8}
5	{1,2,3,4},{5,6,7,8}	5	{1},{2,3,6,7},{4,5},{8}
6	{1,2,3,4},{5,6,7,8}	6	{1},{2,3,6,7},{4,5},{8}
7	{1,2,3,4},{5,6,7,8}	7	{1},{2,3,6,7},{4,5},{8}
8	{1,2,3,4},{5,6,7,8}	8	{1},{2,3,6,7},{4,5},{8}
9	{1,2,3,4},{5,6,7,8}	9	{1},{2,3,6,7},{4,5},{8}
10	{1,2,3,4},{5,6,7,8}	10	{1},{2,3,6,7},{4,5},{8}
11	{1,2,3,4},{5,6,7,8}	11	{1},{2,3,6,7},{4,5},{8}
12	{1,2,3,4},{5,6,7,8}	12	{1},{2,3,6,7},{4,5},{8}
13	{1,2,3,4},{5,6,7,8}	13	{1},{2,3,6,7},{4,5},{8}
14	{1,2,3,4},{5,6,7,8}	14	{1},{2,3,6,7},{4,5},{8}
15	{1,2,3,4},{5,6,7,8}	15	{1},{2,3,6,7},{4,5},{8}
16	{1,2,3,4},{5,6,7,8}	16	{1},{2,3,6,7},{4,5},{8}
17	{1,2,3,4},{5,6,7,8}	17	{1},{2,3,6,7},{4,5},{8}
18	{1,2,3,4},{5,6,7,8}	18	{1},{2,3,6,7},{4,5},{8}

(a) 符合时序关系划分方案 (b) 符合时序、空间关系划分方案

图 8 时序关系及空间关系合成方案

图 8b 给出了既满足图 6a 所示时序关系要求,又满足图 6b 所示空间位置连续性要求的划分方案合成结果。不同的功能构型方案对应着不同的功能作用原理,因此,在实现预期设计功能需求的前提下,基于商空间功能层等价划分方法,能够有效地创成新颖的功能方案。图 9 为图 8b 中的四组结果,其中,图 9a 及 9b 是常见的复合式前规定位递纸机构的功能行为。其他划分方案也都满足时序关系及空间关系约束,进行结构匹配也可以得到不同的定位递纸机构设计方案,实现结构创新。

图 9 时序关系及空间关系合成计算结果

对于建立的基本操作基集,以及以基本操作基集描述的基本机构,系统平台可以根据输入的等价划分规则,自动合成如图 8 所示的符合时序关系与空间关系要求的基本操作子集。不同的等价划分规则,得到不同的划分方案。由此可见,基于商空间

功能层等价划分(合成)方法,在保证子功能基本操作发生有序性的前提下,分组中基本操作行为在空间上满足连续性要求,使由基本操作构成的子功能在时间与空间上有机协同,实现给定的设计功能,为结构层匹配,提供优化的功能结构。

5 结论

(1) 针对机械系统行为特征,以基础行为片段集表达常用复杂机械系统的运动行为,基于商空间论域合成理论,给出了一种功能构型创新的商空间合成方法。

(2) 对粒度等价划分方案分别进行时序等价关系划分与空间等价关系划分,采用商结构合成理论,得到两商空间的合成空间,使获得的功能方案在保证子功能基本操作发生有序性的前提下,满足空间连续性要求,由基本操作构成的子功能能够在时间与空间上有机协同,实现给定的设计功能。

参 考 文 献

- [1] SINGHRY H B, RAHMAN A, IMM N S. Effect of advanced manufacturing technology, concurrent engineering of product design, and supply chain performance of manufacturing companies[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86(1-4): 663-669.
- [2] TANG Lin. An approach to the selection of mechanism types in computer-aided conceptual design[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2008, (222)3: 423-433.
- [3] CHEN Bin, XIE Youbo. A computer-assisted automatic conceptual design system for the distributed multi-disciplinary resource environment[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2017, 231(6): 1094-1112.
- [4] CAO Dongxing, FU M W. A knowledge-based prototype system to support product conceptual design[J]. Computer-Aided Design and Applications, 2011, 8(1): 129-147.
- [5] HE Bin, LU Haifeng, SONG Wei, et al. Space matrix-based conceptual design of mechanisms[J]. International Journal of Advancements in Computing Technology, 2012, 4(13): 123-130.
- [6] CHEN Bin. Conceptual design synthesis based on series-parallel functional unit structure[J]. Journal of Engineering Design, 2018, 29(3): 87-130.

- [7] CHEN Yong , FENG Peien , LIN Zhonquin. Automated conceptual design of mechanisms using improved morphological matrix[J]. Journal of Mechanical Design , 2006 , 128(5) : 516-552.
- [8] DENG Yimin. Function and behavior representation in conceptual mechanical design[J]. Artificial Intelligence for Engineering Design , Analysis and Manufacturing , 2002 , 16 : 343-362.
- [9] ERDEN M S , KOMOTO H , BEEK V , et al. A review of function modeling : Approaches and applications[J]. Artificial Intelligence for Engineering Design , Analysis and Manufacturing , 2008 , 22 : 147-169.
- [10] HELMS B , SHEA K , HOISL F. A Framework for computational design synthesis based on graph-grammars and function-behavior-structure[C]//American Society of Mechanical Engineers. 2009 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. 14th Design for Manufacturing and the Life Cycle Conference , August 30-September 2 , 2009 , San Diego , California , USA.
- [11] STONE R , WOOD K. Development of a functional basis for design[J]. Journal of Mechanical Design , 2000 , 122(4) : 359-370.
- [12] PAHL G , BEITZ W. Engineering design : A systematic approach[D]. London : Springer-Verlag , 1996.
- [13] CHIOU S J , KOTA S. Automated conceptual design of mechanisms[J]. Mechanism and Machine Theory , 1999 , 34(3) : 467-495.
- [14] CHAKRABARTI A , SHEA K , STONE R , et al. Computer-based design synthesis research : An overview [J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering , 2011 , 11(6) : 021003-1-10.
- [15] WANG Yuxin , YAN H S. Conceptual rules-based regeneration method for conceptual design of mechanisms[J]. Mechanism and Machine Theory , 2002 , 27(4) : 34-39.
- [16] KUMAR V R , SHANMUGAVEL M , GANAPATHY V , et al. Unified meta-modeling framework using bond graph grammars for conceptual modeling[J]. Robotics and Autonomous Systems , 2015 , (72) : 114-130.
- [17] MOON Y , KOTA S. Automated synthesis of mechanisms using dual-vector algebra[J]. Mechanism and Machine Theory , 2002 , 37(2) : 43-166.
- [18] WANG Yan , DENG Zongquan , LIU Rongqiang , et al. Topology structure synthesis and analysis of spatial pyramid deployable truss structures for satellite SAR antenna[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering , 2014 , 27(4) : 683-692.
- [19] KURTOGLU T , SWANTNER A , CAMPBELL M I. Automating the conceptual design process : From black box to component selection[J]. Artificial Intelligence for Engineering Design , Analysis and Manufacturing , 2010 , 24(1) : 49-62.
- [20] FAR B H , ELAMY A H. Functional reasoning theories : Problems and perspectives[J]. Artificial Intelligence for Engineering Design , Analysis and Manufacturing , 2005 , 19(2) : 75-88.
- [21] BOHM M R , NAGEL R L , RIGGS M K. Utilizing design intent information to aid in the synthesis of multi-domain systems[J]. Computer-Aided Design and Applications , 2017 , 14(1) : 17-27.
- [22] GERO J. Computational models of innovative and creative design processes[J]. Technological Forecasting and Social Change , 2000 , 64(2) : 183-196.
- [23] LI Yutong , WANG Yuxin , DUFFY A H. Computer- based creativity enhanced conceptual design model for non-routine design of mechanical systems[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering 2014 , 27(6) : 1083-1098.
- [24] ULLAH I , KOTA S. Optimal synthesis of mechanisms for path generation using fourier descriptors and global search methods[J]. ASME Journal of Mechanical Design , 1997 , 119 : 504-510.
- [25] 褚金奎 , 曹惟庆 . 用快速傅立叶变换进行再现平面四杆机构连杆曲线的综合[J]. 机械工程学报 , 1993 , 29(5) : 117-122.
- CHU Jinkui , CHAO Weiqing. Synthesis of coupler curves of planar four-bar linkage through fast Fourier transform[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering , 1993 , 29(5) : 117- 122.
- [26] 于红英 , 唐德威 . 平面二自由度全铰链五杆轨迹机构综合方法的研究[J]. 机械科学与技术 , 2006 , 25(7) : 853-859.
- YU Hongying , TANG Dewei. Study of the path synthesis of two-degree of five-bar mechanism[J]. Mechanical Science and Technology , 2006 , 25(7) : 853-859.
- [27] LIU Yi , MCPHEE J. Automated kinematic synthesis of planar mechanisms with revolute joints[J]. Mechanics Based Design of Structures and Machines , 2007 , 35(4) : 405-445.
- [28] ZHANG Ling , ZHANG Bo. A quotient space approximation model of multi-resolution signal

analysis[J]. Journal Computer Science and Technology , 2005 , 20(1) : 90-94.

- [29] 李雨桐, 王玉新, 毛晓辉. 功能分解有向网络图构造及计算机化实现[J]. 机械工程学报, 2017, 53(21) : 128-135.
LI Yutong , WANG Yuxin , MAO Xiaohui. Construction of functional directed network and its computerized realization[J]. Journal of Mechanical Engineering , 2017 ,

53(21) : 128-135.

作者简介：李雨桐，女，1973 年出生，博士研究生。主要研究方向为支持再创新的复杂机械系统创新设计自动化，并联机构运动奇异性规避。

E-mail : lyt_upc@163.com

王玉新(通信作者)，男，1964 年出生，博士，教授，博士研究生导师。主要研究方向为机构创新设计及自动化，机器人机构学，轴对称矢量喷管(AVEN)创新设计与免奇异设计，物理新能源及节能装备。

E-mail : strath_tj@hotmail.com