

## 变拓扑机构可变运动副设计目录研究\*

刘江南<sup>†</sup>, 张文博

(湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**可变运动副作为变拓扑机构改变拓扑结构的关键所在,其结构设计是变拓扑机构构型综合的难点.基于可变运动副拓扑变化方式的研究,构建可变运动副设计目录,用于可变运动副的结构设计.分别针对可变运动副的改变轴线方位、改变数目和改变类型等三类拓扑变化过程,分析可变运动副的约束变化特征,并采用运动副约束函数的算术运算进行描述.在归纳设计可变运动副结构形式的基础上,对可变运动副拓扑变化方式、约束变化特征和对应结构等设计信息进行分类和汇编,构建可变运动副设计目录.应用实例表明,采用可变运动副设计目录,能快速有效地设计可变运动副结构,为含可变运动副的变拓扑机构构型综合提供了方便.

**关键词:**变拓扑机构;运动副;约束变化特征;设计目录

**中图分类号:**TH112

**文献标志码:**A

## Study on Design Catalogue of Variable Joints of Variable Topology Mechanism

LIU Jiangnan<sup>†</sup>, ZHANG Wenbo

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Variable joints are the crucial structures for changing topological characteristics of variable topology mechanisms. Design of variable joints is a challenge for the type synthesis of variable topology mechanism. Based on the concept and method of design catalogue, the design catalogues of variable joints were proposed to design the structures of variable joints. Adopting the arithmetic operation of constraint functions, the constraint variation features of variable joints were described in the three processes of topological variations (including changing the axis azimuth, changing the numbers and changing the types), respectively. Based on summarizing and designing the corresponding variable structures of general joints, the design catalogues of variable joints were established through classifying and compiling the design information, including the ways of topological variations, constraint variation features, and structures of variable joints. Meanwhile, the example shows that the design catalogues of variable joints are applicable to design the structures of variable joints for variable topology mechanisms effectively. This method provides convenience for type synthesis of variable topology mechanisms with variable joints.

**Key words:** variable topology mechanism; joint; constraint variation features; design catalogue

\* 收稿日期:2016-11-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375153), National Natural Science Foundation of China(51375153)

作者简介:刘江南(1965—),女,湖南浏阳人,湖南大学教授,博士

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: jgy\_ljn@126.com

变拓扑机构<sup>[1-3]</sup>不同于传统机构,其运动链的拓扑结构在机构运动过程中会发生变化,因其特殊的结构特征和机构性能,近年来备受学者们的关注.Yan等提出了一种因运动副的拓扑变异特性而导致机构拓扑发生变化的变运动链机构<sup>[1]</sup>.Liu等根据拓扑结构不同阶段和输入数的多少将变运动链机构分为了三种类型,并提出了可变运动副的概念<sup>[2]</sup>.Kuo认为“尽管存在如机构奇异等导致与变拓扑同样效果的其他因素,但理论上变运动链机构就相当于变拓扑机构”<sup>[3]</sup>.Yan等研究了可变运动副发生拓扑变化的两种基本形式,采用符号编码法描述可变运动副的拓扑特征,通过相应的符号序列表示运动副拓扑变化顺序<sup>[4]</sup>.刘川禾研究了变拓扑机构的结构组成理论,提出了变元、变胞器等概念用于变拓扑机构的结构分析<sup>[5]</sup>.Kuo等研究了机构的拓扑结构与构态的基本概念,以及机构拓扑结构发生变化的四个条件,并采用约束矩阵法,结合可变运动副符号编码法提出了一种变拓扑机构的结构分析与同构识别方法<sup>[6-7]</sup>.Yan等将符号编码法与运动链结构图相结合,根据运动副的约束条件和坐标序列,提出了一种变拓扑机构构型综合方法<sup>[8-9]</sup>.变胞运动副作为变胞机构<sup>[10]</sup>的重要结构组成部分,也具有变拓扑的特性,是一种典型的可变运动副.Li等引入了等效阻力梯度模型,分析变胞运动副的约束特点,并结合扩展 Assur 杆组法,提出一种基于工作任务的变胞机构结构综合方法<sup>[11-12]</sup>.杨强等应用等效阻力梯度模型研究了变胞运动副的基本约束形式与约束变化规律<sup>[13]</sup>.以上研究表明,可变运动副是实现机构变拓扑的重要结构单元.但目前的相关研究多集中在变拓扑机构的结构分析、可变运动副拓扑描述与约束形式研究等方面,而对于如何有效设计可变运动副结构,以便于变拓扑机构的构型综合尚需进一步研究.

本文基于设计目录的理念和方法<sup>[14]</sup>,通过对可变运动副拓扑变化方式的研究,构建可变运动副设计目录,为可变运动副的结构设计和变拓扑机构的构型综合提供帮助.

## 1 变拓扑机构

机构是由构件组成的系统,用来传递运动或动力.在传统机构学中,机构一般具有一个固定的拓扑结构和运动形式.但变拓扑机构,具有多个稳定的拓扑构态,可以改变拓扑结构使得机构的构态发生变

化.变拓扑机构通过不同稳定构态之间的转换实现不同的机械运动,完成不同的工作任务.

由于变拓扑机构具有变拓扑结构的特性,机构的构件和运动副的类型、数目,或构件和运动副之间的邻接关系等拓扑特征,在机构构态转换过程中可能会发生相应变化,发生变化的充分条件包括<sup>[8]</sup>:

- 1) 构件和/或运动副的有效数目发生变化;
- 2) 某些运动副的运动形式发生变化;
- 3) 构件和运动副的邻接和关联性发生变化;
- 4) 运动副之间的相对排列(包含轴线方位)发生变化.

可见,采用具有变拓扑特性的可变运动副作为机构的结构组成单元,是使机构实现变拓扑功能的重要方式之一.因此,对可变运动副的拓扑变化及其结构实现形式进行研究,有助于设计可变运动副结构,综合变拓扑机构构型.

## 2 可变运动副拓扑变化分析

### 2.1 运动副约束函数

在机构运动过程中,运动副的组成构件间的相对运动关系是由该运动副的约束特征决定的.运动副在某一时刻的约束特征,采用运动副约束函数  $C(t)$ <sup>[15]</sup>进行表达.

$$C(t) = (c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6)^T \quad (1)$$

$$c_i = \begin{cases} 0 & p_i = p_{i\max} = 0 \\ \frac{p_{i\max}}{p_i} & p_i > p_{i\max} > 0 \\ 1 & p_{i\max} \geq p_i > 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $c_1, c_2, c_3$ 为运动副沿各坐标轴线方向的移动约束; $c_4, c_5, c_6$ 为运动副沿各坐标轴线方向的转动约束; $p_i$ 为运动副相应轴线方向的驱动力或力矩; $p_{i\max}$ 为运动副相应轴线方向的最大约束力或力矩.

当约束函数  $C(t)$  的分量  $c_i = 0$  时,运动副在  $i$  方向上无约束;当  $c_i = 1$  时,该方向上的约束为完全刚性约束;当  $0 < c_i < 1$  时,该方向上的约束为不完全约束,运动副元素可保持相对运动,运动副处在非稳定状态.

### 2.2 可变运动副拓扑变化方式

可变运动副拓扑变化的本质表现为组成构件之间相互接触关系的变化,并体现在运动副约束特征的变化上.由上节可知,可变运动副拓扑变化的主要方式包括:改变运动副轴线方位、改变运动副数目以及改变运动副类型.以不同的方式改变拓扑结

构,运动副具有不同的约束变化特征,需采取相应的结构形式。

### 2.2.1 改变运动副的轴线方位

改变运动副的轴线方位是指改变运动副的约束方向,从而改变运动副的运动特征,但没有改变运动副的数量和类型。例如 Gan 等<sup>[16-17]</sup>设计的 rT 和 rR 运动副,可通过改变运动副旋转轴线的方位,改变并联机构支链对动平台的约束特征,从而改变动平台的运动特性。改变运动副的轴线方位过程可通过相应的坐标变换计算来描述,由于约束函数表示运动副在各方向上的约束程度,各分量的值为 0~1 的非负数。因此,计算结果取其绝对值

$$\mathbf{C}^{\text{II}}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R} \end{bmatrix} \mathbf{C}^{\text{I}}(t) \quad (3)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos\alpha_1 & \cos\alpha_2 & \cos\alpha_3 \\ \cos\beta_1 & \cos\beta_2 & \cos\beta_3 \\ \cos\gamma_1 & \cos\gamma_2 & \cos\gamma_3 \end{bmatrix}$$

式中: $\alpha, \beta, \gamma$  分别为运动副轴线方位变化前的坐标系各轴关于变化后坐标系的方向角。

### 2.2.2 改变运动副的数目

改变运动副数目包含了两种形式:增加运动副和消除运动副,且伴随着组成构件间约束特征的增大或减小,运动副约束变化特征,通过以下数学运算进行描述。

$$\Delta \mathbf{C}(t) = \mathbf{C}^{\text{II}}(t) - \mathbf{C}^{\text{I}}(t) \\ = (\Delta c_1, \Delta c_2, \Delta c_3, \Delta c_4, \Delta c_5, \Delta c_6)^{\text{T}} \quad (4)$$

若  $\Delta c_i > 0$ , 表示运动副在  $i$  方向上增大了约束;若  $\Delta c_i < 0$ , 表示运动副在  $i$  方向上减小了约束。

通过增大构件间的约束特征使运动副数目发生变化时,若在无连接关系的两构件之间增加一定约束,使之相互连接构成运动副,如不完全齿轮机构在进入啮合时的齿轮高副约束变化,则运动副的数目增加,其约束变化特征为

$$\Delta \mathbf{C}(t) = \mathbf{C}^{\text{II}}(t) - \mathbf{C}^{\text{I}}(t) = \mathbf{C}^{\text{II}}(t) \quad (5)$$

若增大运动副组成构件间的约束特征,使两构件合并而消除运动副,使运动副数目减少,则运动副约束变化特征为

$$\Delta \mathbf{C}(t) = 1 - \mathbf{C}^{\text{I}}(t) \quad (6)$$

通过减小构件间的约束特征使运动副数目发生变化,若减小运动副组成构件间的约束,使之完全分离而消除运动副,则运动副数目减少,运动副约束变化特征为

$$\Delta \mathbf{C}(t) = \mathbf{C}^{\text{II}}(t) - \mathbf{C}^{\text{I}}(t) = -\mathbf{C}^{\text{I}}(t) \quad (7)$$

若减小已合并组成构件间的约束,使之分离形

成运动副时,则运动副数目增加,其约束变化特征为

$$\Delta \mathbf{C}(t) = \mathbf{C}^{\text{II}}(t) - 1 \quad (8)$$

设  $\Delta \mathbf{C}(t)$  不为零的分量为  $\Delta c_k$ , 则构件分离后,运动副在  $k$  方向上的约束特征  $0 \leq c_k^{\text{II}} < 1$ 。

当  $c_k^{\text{II}} = 0$  时,运动副  $k$  方向上的约束变化特征

$$\Delta c_k = -c_k^{\text{I}} = \frac{p_{k\max}^{\text{I}}}{p_k^{\text{I}}} = -1 \quad (9)$$

当  $0 \leq c_k^{\text{II}} < 1$  时,构件分离后,运动副  $k$  方向上的约束为不完全约束,驱动力克服约束力的作用,使两构件发生相对运动。若在变拓扑过程中,运动副  $k$  方向上的最大约束力不变,即  $p_{k\max}^{\text{II}} = p_{k\max}^{\text{I}}$ , 如克服重力或摩擦力的作用,则该方向上的约束变化特征

$$\Delta c_k = \frac{p_{k\max}^{\text{I}}(p_k^{\text{I}} - p_k^{\text{II}})}{p_k^{\text{II}} p_k^{\text{I}}} \quad (10)$$

若在变拓扑过程中,运动副  $k$  方向上的驱动力和最大约束力同时发生变化,如克服弹簧阻力作用,则该方向上的约束变化特征

$$\Delta c_k = \frac{p_{k\max}^{\text{II}} p_k^{\text{I}} - p_k^{\text{II}} p_{k\max}^{\text{I}}}{p_k^{\text{II}} p_k^{\text{I}}} \quad (11)$$

### 2.2.3 改变运动副的类型

改变运动副类型是指改变运动副的一个或几个约束分量,使运动副类型发生改变,且变化前后,机构构件数与运动副数都保持不变。改变运动副类型包含三种形式:增大运动副部分方向上的约束,但组成构件不形成刚性连接(如圆柱副转化为移动副);减小运动副部分方向上的约束,但不导致组成构件完全分离(如移动副转化为圆柱副);在运动副部分方向上增大约束,同时在其他一个或几个方向上减小约束(如移动副转换为转动副)。

在改变运动副类型的过程中,运动副的约束变化特征可直接由式(3)求得,其中各分量的值可采用式(9)(10)(11)进行计算。

## 3 可变运动副设计目录

### 3.1 设计目录

设计目录又称作设计信息库,最早是由德国学者 Roth 提出的一种设计信息存储方式<sup>[14]</sup>。在对已有设计知识、设计经验以及经典设计案例等相关设计信息进行归纳总结的基础上,按一定规律分类和汇编,并采用图文表格等形式进行表达,提供具有某种综合性和不同具体化程度的设计解及其变形解,以便于设计者查询、选用。

设计目录与一般的设计手册和资料不同,它所包含的信息通常具有一定的完备性、易表达性和可拓展性,既包含有设计过程中的数值信息,也包含有非数值信息.其数值信息和非数值信息可根据设计对象的物理特征和结构特征的不同而采用不同的数据形式进行表达.设计目录的信息内部包含一定的推理机制,使用者不仅可在其中独立(静态)查询相关设计信息,而且能在设计时相关联地(动态)查询符合设计要求的所有可能信息.Koller 在一系列相关著作中对设计目录的概念与内涵进行了比较全面的论述<sup>[18]</sup>,文献<sup>[19]</sup>汇编并发表了包括目录结构、解的汇编总目,以及连杆机构、匀变速传动机构等在内的大量设计目录.Winkelmann 针对工艺设计与加工系统,结合面向对象的程序设计提出了基于标准组件库构建智能设计目录的理论框架<sup>[20]</sup>.刘江南等将设计目录与 TRIZ 功能裁剪法相结合,构建了一种机构综合再创新过程模型,应用于机构综合再创新设计并规避有效专利<sup>[21]</sup>.因此,通过建立具有实用价值的设计目录,结合相关的产品设计理论与方法,有助于提高设计效率.

### 3.2 可变运动副设计目录构建

设计可变运动副时,可通过分析运动副的约束变化特征,设计对应的约束结构,实现其变拓扑功能.因此,可变运动副设计目录应包含运动副的拓扑变化方式、约束变化特征和对应结构形式等信息.

构建可变运动副设计目录的步骤如下:首先,对常见运动副(如移动副、平面高副、转动副等)的改变轴线方位、改变数量和改变类型等三类拓扑变化过程进行分析,得到运动副在相应拓扑变化过程中的约束变化特征;然后,在分析归纳相关文献<sup>[22-26]</sup>和工程实际中具有变拓扑功能的各类应用机构结构的基础上,针对各类运动副的约束变化特征,设计运动副相应的结构形式;最后,将相关的可变运动副设计信息进行分类和汇编,构建出可变运动副设计目录,如表 1~表 3 所示.

在含可变运动副的变拓扑机构构型综合过程中,可通过分析可变运动副在机构构型转换过程中的约束变化特征,查找相应的可变运动副设计目录,选择合理的运动副设计信息,再根据具体的设计要求和机构构型转换顺序,设计变拓扑运动副结构,从而设计出满足功能要求的变拓扑机构.

## 4 示例

垃圾车装车机械手<sup>[27-28]</sup>是一种采用单一驱动实现自动抓举垃圾桶,收集垃圾的装置.其工作过程为:首先,机械手动臂水平伸出,使手抓接近垃圾桶后停止移动;然后,手抓通过转动,夹紧垃圾桶;最后,动臂克服重力作用向上翻转倾倒垃圾.基于上述可变运动副设计目录,设计该机械手的机构构型.

表 1 可变运动副改变轴线方位变化设计目录

Tab.1 Design catalogue of variable joints on changing orientation of joint

变拓扑方式	运动副类型	方向余弦矩阵	结构形式	变拓扑方式	运动副类型	方向余弦矩阵	结构形式
改变运动副轴线方位	可锁止球铰 <sup>[25]</sup>	$R = \begin{bmatrix} 0 & \mp 1 & 0 \\ \pm 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$		改变运动副轴线方位	rT <sup>[16]</sup>	$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}$	
	转动副 R	$R = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$			rR <sup>[17]</sup>	$R = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	
	移动副 P	$R = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$			vA <sup>[26]</sup>	$R = \begin{bmatrix} 0 & \mp 1 & 0 \\ \pm 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	

表 2 可变运动副改变数目变化设计目录  
Tab.2 Design catalogue of variable joints on changing number of joints

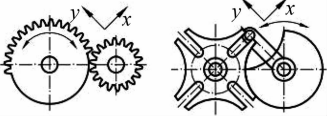
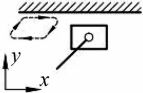
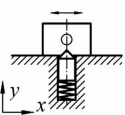
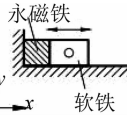
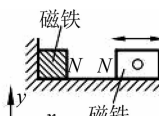
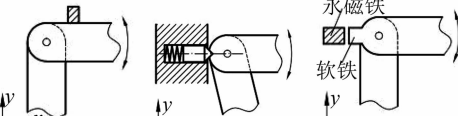
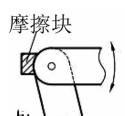

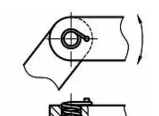
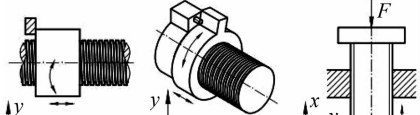
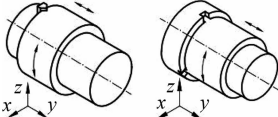
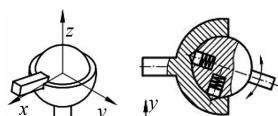
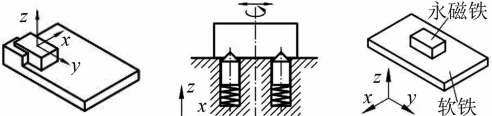
变拓扑方式	运动副类型	约束变化特征 $\Delta C(t)$	结构示例
改变运动副数目	平面高副 RP	$\pm(1,0,1,1,1,0)^T$	
		$\pm(0,1,1,1,1,1)^T$	
	移动副 P	$(\mp 1,0,0,0,0,0)^T$	
		$\pm(\Delta c_1,0,0,0,0,0)^T$ 其中 $0 < \Delta c_1 < 1$	 
	转动副 R	$(0,0,0,0,0,\mp 1)^T$	
		$\pm(0,0,0,0,0,\Delta c_6)^T$ 其中 $0 < \Delta c_6 < 1$	  
	螺旋副 H	$\pm(f(\Delta c_1),0,0,\Delta c_4,0,0)^T$ 其中 $0 < \Delta c_4 \leq 1$	
	圆柱副 C	$\mp(0,1,0,0,1,0)^T$	
球面副 S	$\mp(0,0,0,1,1,1)^T$		
平面副 E	$\pm(\Delta c_1,\Delta c_2,0,0,0,\Delta c_6)^T$ 其中 $0 < \Delta c_k \leq 1$		

表3 可变运动副改变类型变化设计目录  
Tab.3 Design catalogue of variable joints on changing joint type

变拓扑方式	运动副转换类型	约束变化特征 $\Delta C(t)$	结构示例
		$(0, \pm 1, 0, 0, \mp 1, 0)^T$	
	移动副 P $\leftrightarrow$ 转动副 R	$(0, \pm 1, 0, 0, \mp 1, 0)^T$	
		$(0, \pm 1, 0, 0, \mp 1, 0)^T$	
改变运动副类型	圆柱副 C $\leftrightarrow$ 移动副 P	$(0, \pm 1, 0, 0, \mp 1, 0)^T$	
	球销副 S $\leftrightarrow$ 球销副 S	$(0, \pm 1, 0, 0, \mp 1, 0)^T$	
	平面高副 RP $\leftrightarrow$ 转动副 R	$(0, \pm 1, 0, 0, \mp 1, 0)^T$	
	平面高副 RP $\leftrightarrow$ 移动副 P	$(0, \pm 1, 0, 0, \mp 1, 0)^T$	
	球面副 S $\leftrightarrow$ 转动副 R	$(0, \pm 1, 0, 0, \mp 1, 0)^T$	

4.1 机械手机变拓扑源机构构造

在设计变拓扑机构构型时,首先需要构造变拓扑源机构,本文采用形态学矩阵法构造垃圾车装车机械手的变拓扑源机构,具体步骤如下。

1) 分解机构各阶段功能并划分构态

根据机械手在一个完整周期内的工作任务,将其功能分解为动臂平移、手抓转动和动臂翻转等3个基本功能,其构态对应划分为  $U_1, U_2$  和  $U_3$  3个构态。

2) 构造各子构态机构,建立形态学矩阵

根据机构在构态  $U_1, U_2$  和  $U_3$  时的运动要求,分别设计机械手的各子构态机构,并建立相应的形态学矩阵。

$$F = \begin{bmatrix} U_1 & U_2 & U_3 \\ \text{曲柄滑块机构} & \text{滑块摇杆机构} & \text{推杆摇杆机构} \\ \text{推杆滑块机构} & \text{齿轮机构} & \text{曲柄摇杆机构} \\ \text{正弦机构} & \text{凸轮机构} & \text{导杆机构} \end{bmatrix} \quad (12)$$

3) 构造变拓扑源机构

采用相似度分析法<sup>[29]</sup>对步骤2)所得各机构组合进行分析,筛选出“相似度”较高的组合。

组合1:曲柄滑块机构+滑块摇杆机构+曲柄摇杆机构,组合2:推杆滑块机构+滑块摇杆机构+推杆摇杆机构。

然后,从机构整体设计出发,分别构造两组合的变拓扑源机构,如图1所示。

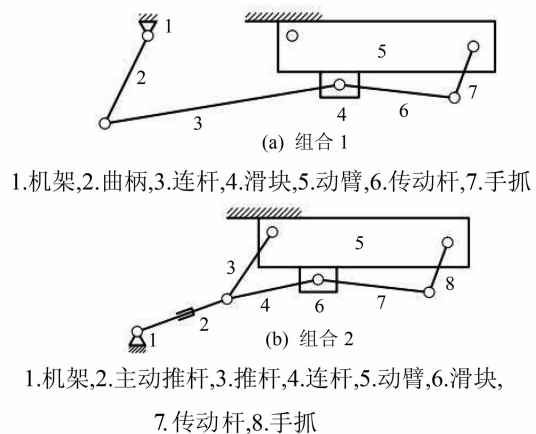


图1 机械手机变拓扑源机构  
Fig.1 Source variable topology mechanism of manipulator

4.2 机械手机构构型综合

在构造出机械手机变拓扑源机构后,需要分析机械手机构中可变运动副的约束变化特征,再根据可变运动副设计目录设计其结构,最后综合出机械手机变拓扑机构构型.这里介绍组合1变拓扑源机构综合机械手机构构型,具体步骤如下。

1) 设计可变运动副

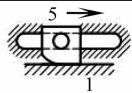
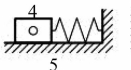
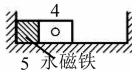
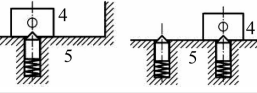
根据机构在构态  $U_1, U_2$  和  $U_3$  时的运动特性和相应子机构结构,可知动臂5与机架在构态  $U_1$  时构成移动副  $P_{15}$ ,在构态  $U_2$  时形成固定约束,在构态  $U_3$  时构成转动副  $R_{15}$ ;滑块4与动臂5在构态  $U_1$  时处于完全约束状态,在构态  $U_2$  时转化为移动副  $P_{45}$ ,在构态  $U_3$  时再次形成固定约束。

采用式(4)求解可变运动副  $P_{15}$  与  $P_{45}$  约束变化

特征,结合机械手构态转换顺序,根据表 2 和表 3 可变运动副设计目录设计其结构,  $P_{15}$  与  $P_{45}$  的约束变化特征与基本结构集合,如表 4 所示.

表 4 机械手机构的可变运动副结构

Tab.4 Structures of variable joints of manipulator

可变运动副	约束变化特征	基本结构
$P_{15}$	$\Delta C_{15}^{12}(t) = (1, 0, 0, 0, 0, 0)^T$	
	$\Delta C_{15}^{12}(t) = (0, 0, 0, 0, 0, -1)^T$	
$P_{45}$	$\Delta C_{45}^{12}(t) = (\Delta c_1^{12}, 0, 0, 0, 0, 0)^T$ $-1 \leq \Delta c_1^{12} < 0$	
	$\Delta C_{45}^{23}(t) = (1, 0, 0, 0, 0, 0)^T$	
		

2) 综合连杆运输机构构型

分别从表 4 中  $P_{15}$  与  $P_{45}$  的基本结构集合中选取一种应用于变拓扑源机构,得到组合 1 的四种机械手机构构型,如图 3 所示.

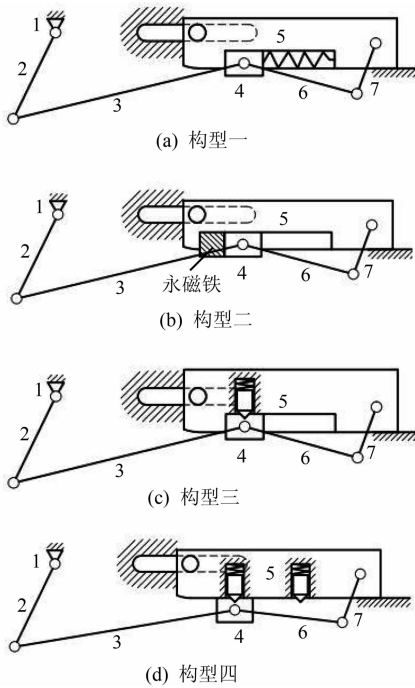


图 2 组合 1 变拓扑机构构型

Fig.2 Variable topology mechanisms of combination 1

图 2 所示的四种机构构型中,通过在移动副  $P_{15}$  的导轨上设置几何限位结构,实现其改变运动副类型变拓扑特性;对于移动副  $P_{45}$ ,则分别采用了弹簧约束、磁场约束,或弹簧与几何限位组合约束等结构形式来实现其变拓扑特性.

采用同样的方法对由组合 2 变拓扑源机构进行构型综合,即得到组合 2 的四种机械手机构构型,如

图 3 所示,其中,图 3(a)所示机械手机构型与文献[28-29]设计的机械手机构型一致.

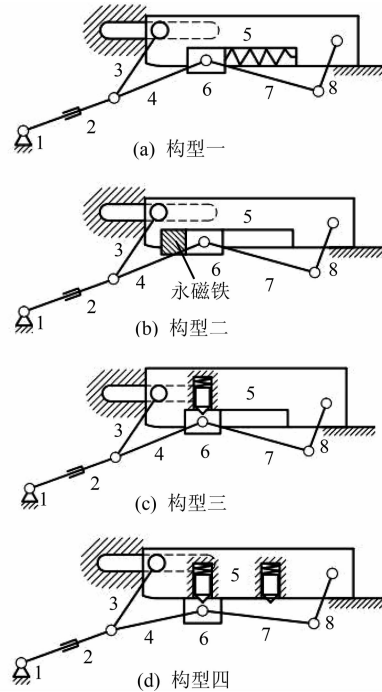


图 3 组合 2 变拓扑机构构型

Fig.3 Variable topology mechanisms of combination 2

综上所述,依据可变运动副的约束变化特征,通过查询和选用可变运动副设计目录中的相关设计信息,能够快速设计出多种可满足变拓扑机构构态转换顺序的可变运动副结构方案,以实现变拓扑机构的运动要求,从而得到多个满足功能需求的变拓扑机构构型.

5 结论

1) 分别对可变运动副的改变轴线方位、改变数目和改变类型等三类拓扑变化方式进行分析,并采用运动副约束函数的算术运算描述可变运动副在拓扑变化过程中的约束变化特征.

2) 对应每一种拓扑变化方式,基于可变运动副的约束变化特征,在分析归纳相关文献和工程实际中具有变拓扑功能的各类应用机构结构的基础上,设计可变运动副相应的结构实现形式,构建了可变运动副设计目录.

3) 实例表明,采用可变运动副设计目录,能快速有效地设计可变运动副结构以及综合变拓扑机构构型,为含可变运动副的变拓扑机构构型综合设计提供了方便.

## 参考文献

- [1] YAN H S, LIU N T. Finite-state-machine representations for mechanisms and chains with variable topologies[C]//Proceedings of ASME Design Engineering Technical Conference, Baltimore, Maryland, 2000.
- [2] LIU N T. Configuration synthesis of mechanisms with variable chains[D]. Tainan: Department of Mechanical Engineering, National Cheng Kung University, 2001.
- [3] KUO C H. Structural characteristics of mechanisms with variable topologies taking into account the configuration singularity [D]. Tainan: Department of Mechanical Engineering, National Cheng Kung University, 2004.
- [4] YAN H S, KUO C H. Topological representations and characteristics of variable kinematic joints[J]. Journal of Mechanical Design, 2006, 128(2): 384-391.
- [5] 刘川禾. 变拓扑机构结构组成理论[J]. 机械工程学报, 2012, 48(19): 52-58.  
LIU Chuanhe. Structure composition theory of variable topology mechanisms[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(19): 52-58. (In Chinese)
- [6] KUO C H, DAI J S, YAN H S. Reconfiguration principles and strategies for reconfigurable mechanisms[J]. Journal of Science & Innovation, 2012, 2(1): 27-38.
- [7] KUO C H, CHANG L Y. Structure decomposition and homomorphism identification of planar variable topology mechanisms[J]. Journal of Mechanisms & Robotics, 2014, 6(2): 149-168.
- [8] YAN H S, KUO C H. Structural analysis and configuration synthesis of mechanisms with variable topologies[C]//Asme/iftomm International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots, IEEE, 2009: 23-31.
- [9] YAN H S, KANG C H. Configuration synthesis of mechanisms with variable topologies[J]. Mechanism & Machine Theory, 2009, 44(5): 896-911.
- [10] DAI J S, JONES J R. Mobility in metamorphic mechanisms of foldable/erectable kinds [C]//Proceedings of ASME Design Engineering Technical Conference, Atlanta, Georgia, 1998.
- [11] 李树军, 王洪光, 戴建生. 变胞机构的等效阻力梯度模型及其设计方法[J]. 机械工程学报, 2014, 50(1): 18-23.  
LI Shujun, WANG Hongguang, DAI Jiansheng. The equivalent resistance gradient model of metamorphic mechanisms and the design method[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(1): 18-23. (In Chinese)
- [12] LI Shujun, WANG Hongguang. Task-based structure synthesis of source metamorphic mechanisms and constrained forms of metamorphic joints[J]. Mechanism & Machine Theory, 2016, 96: 334-345.
- [13] 杨强, 王洪光, 李树军, 等. 含变胞运动副结构的约束变胞机构构型综合[J]. 机械工程学报, 2014, 50(13): 1-8.  
YANG Qiang, WANG Hongguang, LI Shujun, et al. Type synthesis of constrained metamorphic mechanisms with structural forms of metamorphic joints[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(13): 1-8. (In Chinese)
- [14] ROTH K. Design catalogues and their usage [M]. London: Springer, 2012.
- [15] 刘江南, 于德介. 基于约束函数的变胞机构变胞方程[J]. 机械工程学报, 2012, 48(9): 1-9.  
LIU Jiangnan, YU Dejie. Metamorphic equation of variable topology mechanisms based on the constraint function [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(9): 1-9. (In Chinese)
- [16] GAN D M, DAI J S, LIAO Q. Mobility change in two types of metamorphic parallel mechanisms[J]. Journal of Mechanisms & Robotics, 2009, 1(4): 469-484.
- [17] GAN D M, DIAS J, SENEVIRATNE L. Unified kinematics and optimal design of a 3rRPS metamorphic parallel mechanism with a reconfigurable revolute joint[J]. Mechanism & Machine Theory, 2016, 96: 239-254.
- [18] 柯勒 R. 机械设计方法学 [M]. 党志梁等, 译. 北京: 科学出版社, 1990.  
KOLLER R. Methodology of mechanical design [M]. Translated by DANG Z L, et al. Beijing: Science Press, 1990. (In Chinese)
- [19] 符炜. 机械创新设计构思方法 [M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2006.  
FU Wei. Method of mechanical innovative design [M]. Changsha: Hunan Science & Technology Press, 2006. (In Chinese)
- [20] WINKELMAN P. A theoretical framework for an intelligent design catalogue [J]. Engineering with Computers, 2011, 27(2): 183-192.
- [21] 刘江南, 于德介, 彭丽, 等. 基于裁剪法的机构综合专利利用再创新模型[J]. 湖南大学学报: 自然科学报, 2013, 40(10): 43-51.  
LIU Jiangnan, YU Dejie, PENG Li, et al. Study on innovative mechanism synthesis by utilizing patent information based on trimming [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2013, 40(10): 43-51. (In Chinese)
- [22] SCLATER N. Mechanisms and mechanical devices sourcebook [M]. New York: McGraw-Hill Professional, 2011.
- [23] 潘承怡, 向敬忠. 机械结构设计技巧与禁忌 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [24] PAN Chengyi, XIANG Jingzhong. Techniques and taboos of mechanical structure design [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013. (In Chinese)
- [25] 邹慧君, 颜鸿森. 机械创新设计理论与方法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.  
ZOU Huijun, YAN Hongsen. Theory and method of mechanical innovative design [M]. Beijing: China Higher Education Press, 2008. (In Chinese)
- [26] PALPACELLI M, CARBONARI L, PALMIERI G. A lockable spherical joint for robotic applications [C]// IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications, 2014: 1-6.
- [27] ZHANG K, DAI J S, FANG Y. Geometric constraint and mobility variation of two 3SvPSv metamorphic parallel mechanisms [J]. Journal of Mechanical Design, 2012, 135(1): 184-194.
- [28] 陈捷, 王红州. 基于变胞原理的自动垃圾车装车机械手的设计与分析 [J]. 制造业自动化, 2014(16): 141-144.  
CHEN Jie, WANG Hongzhou. Design and account of metamorphic mechanism-based automatically-loading garbage truck [J]. Manufacturing Automation, 2014(16): 141-144. (In Chinese)
- [29] 王红州. 一种具有变胞功能的垃圾车用翻桶机构: CN103950668A [P]. 2015-11-18. (In Chinese)  
WANG Hongzhou. A loading mechanism for garbage truck with metamorphic function: CN103950668A [P]. 2015-11-18. (In Chinese)
- [30] 张武翔, 丁希仑, 戴建生. 基于约束变化特征分析的变胞机构构型综合方法 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(5): 1-9.  
ZHANG Wuxiang, DING Xilun, DAI Jiansheng. Method for configuration synthesis of metamorphic mechanisms based on constraint variation [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(5): 1-9. (In Chinese)