DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201703071

少自由度变胞并联机构综合设计方法

于红英,曾重元,郭 震

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 150001 哈尔滨)

摘 要:为实现可重组并联机构的创新设计,提出基于基本支链构型的变胞并联机构设计方法.该方法从少自由度并联机构 动平台所受的约束出发,运用螺旋理论中相逆螺旋的性质,构造约束螺旋为力或力偶的两类基本支链,并根据基本支链构型 的特点构造变胞支链,实现并联机构的变胞设计.对构型相似的线矢力和力偶基本支链进行融合得到变胞支链,通过锁住不 同运动副的方式实现变胞支链在两类基本支链之间转化,构造出动平台约束性质可变的变胞并联机构;根据基本支链约束螺 旋的方向特点,通过改变运动副轴线方向的方式实现支链约束螺旋方向的改变,进而构造出动平台约束方向可变的变胞并联 机构.用所提出的变胞并联机构设计方法,结合 Bricard 机构的单自由度运动特性,实现动平台为 Bricard 机构的变胞并联机构 的构造.基于基本支链构型进行变胞并联机构构型设计,根据动平台的约束对变胞支链进行组合和变型,实现变胞并联机构 的综合,为机构创新设计奠定基础.

关键词:螺旋理论;并联机构;基本支链构型;变胞机构;构型设计

中图分类号: TH112 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2018)01-0042-08

Type synthesis method of lower-mobility metamorphic parallel mechanism

YU Hongying, ZENG Zhongyuan, GUO Zhen

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To realize the innovative design of reconfigurable parallel mechanism, a design method of metamorphic parallel mechanism based on basic subchain configurations is proposed. Starting from the constraints acting on the moving platform of lower-mobility parallel mechanism, the basic subchains whose constraint is a force or a couple using characteristics of reciprocal screw are constructed. And according to configuration characteristics of the basic subchains, metamorphic subchains are constructed to realize the design of metamorphic parallel mechanism. The line vector force and couple subchains whose configurations are similar are combined to construct metamorphic subchains. The metamorphic subchains can transform between two types of basic subchains by locking different kinematic pairs, then the parallel mechanisms whose constrained type is variable can be constructed. According to the constrained screw direction characteristics of basic subchains, the force direction of subchain is changed by changing the axis direction of kinematic pairs, then the parallel mechanism whose constrained force direction is variable can be constructed. At the same time, using the proposed metamorphic parallel mechanism design method and Bricard linkage's single degree of freedom motion, a new type of parallel mechanism whose moving platform is Bricard linkage is constructed. Based on the basic subchains, the configurations of the metamorphic parallel mechanism are constructed. According to the constraint of the moving platform, the metamorphic subchains are combined and transformed, which realizes the type synthesis of metamorphic parallel mechanism and lays the foundation for innovation design of mechanism.

Keywords: screw theory; parallel mechanism; basic subchains; metamorphic mechanism; configuration design

并联机构比串联机构具有更高的刚度、精度和 承载能力,使其在航空航天、工业机床、机器人操作 手等方面得到广泛应用.随着科学技术的迅速发 展,具有多个工作构态、多功能的集成化设备的需求 与日俱增,促使人们研制出一种存在多种工作模式 的可重组并联机构,即变胞并联机构.变胞并联机 构能在不改变机构结构基础上,从一种工作模式转 换到另外一种模式,优化了并联机构的性能.

变胞的概念是在 1998 年第 25 届 ASME 机构学与机器人学双年会上提出的^[1],将变胞的思想应用于并联机构得到变胞并联机构,满足工业生产中对机器高精度、高刚度和功能集成化的要求,引起了国内外机构学专家的关注,并对此进行了深入的研究. Gan 等^[2]提出一种可重组运动副—rT 胡克铰链,并运用 rT 胡克铰链构造了 3R-2R1T 变胞并联机构. Kong^[3]利用一种特殊的 5R 支链构造变胞并联机构,并运用四元数的思想分析了机构的 15 种构态.

收稿日期:2017-03-13

作者简介:于红英(1968—),女,教授,博士生导师

通信作者:于红英, mcadyhy@hit.edu.cn

Zhang 等^[4]通过对 L 型折纸的研究,提出一种可以 在球副、万向节和转动副之间转化的运动副,并将其 应用到并联机构,构造出具有多种构态的变胞并联 机构. Qu 等^[5]提出了具有3种构态的可重组串并混 联机构,利用机构的运动奇异点,通过杆件的合并改 变约束的数目,实现机构自由度分别为0、1、2的构 态转换. Ye 等^[6]通过研究空间五杆机构的特点,得 到一系列带空间闭环的可重组支链构型,采用激活 不同运动副的方式进行变胞并联机构的设计.

综上所述,现阶段变胞并联机构的研究主要集 中于构型的创新设计,提出新型变胞并联机构,而较 少研究变胞并联机构设计方法.对于构型各异的变 胞并联机构^[7-10],其构型之间是否存在一定的联系, 这些机构实现变胞的原理是什么,是否存在一种通 用的变胞并联机构综合方法,既可以构造出新型的 变胞并联机构,又能够对现在已存在的变胞并联机 构的构造思想作出解释,这都是有待于研究的问题.

本文将首先运用相逆螺旋的性质构造并联机构 的基本支链构型,分析变胞并联机构的变胞方式,针 对每一种变胞方式,通过分析基本支链构型之间的 相似性和差异性及支链约束螺旋的方向特点,构造 相应的变胞支链,并在此基础上提出基于基本支链 构型的变胞并联机构设计方法.

1 基本支链构型综合

动平台的约束螺旋系是并联机构各支链约束螺旋系的并集^[11],影响着并联机构的运动输出.本节 从约束螺旋的角度出发,构造约束螺旋为线矢力或 力偶的基本支链,使得约束螺旋和支链构型联系起 来,为变胞支链的创建与转化提供构型基础.

为了叙述方便,本文将约束螺旋为线矢力的支链称 为线矢力支链,约束螺旋为力偶的支链称为力偶支链.

1.1 线矢力基本支链的构造

在螺旋理论中,刚体的瞬时转动和作用在刚体 上的力螺旋分别对应一个线矢量,刚体的瞬时移动 和作用在刚体上的力偶分别对应一个偶量.对于并 联机构,其支链中运动副的运动螺旋构成支链的运 动螺旋系,与支链每一个运动螺旋都相逆的螺旋为 该支链的约束螺旋(约束力螺旋或者力偶螺旋),相 逆螺旋具有如下性质^[12]:

 1)与螺旋系相逆的线矢量必须与该螺旋系中 所有偶量相垂直并且与所有线矢量相交或平行;2)
 与螺旋系相逆的偶量必须与该螺旋系中所有线矢量 垂直.

由相逆螺旋的性质可以得到两条推论:

1) 支链的约束力螺旋必须与所有转动副轴线

相交或平行,并且与所有移动副导路方向相垂直; 2)支链的约束力偶螺旋必须与支链中所有转动副 轴线相垂直.

现利用相逆螺旋第1条推论构造约束螺旋为线 矢力的并联机构支链.本节构造自由度为5,约束螺 旋数目为1的线矢力基本支链.

1.1.1 含有5个转动副的线矢力基本支链的构造

构造支链时,要保证支链的 5 个运动螺旋线性 无关.由 Grass 线几何和螺旋相关性可知,相交的转 轴不能超过 3 个,且 3 条相交转轴不能共面;同理相 互平行的转轴也不能超过 3 个,且 3 条平行转轴不 能共面.根据以上条件,分 3 种情况讨论 (*R*、*P*表示 运动副时,代表转动副和移动副;表示运动时,代表 转动和移动;表示位置关系时,代表转动副的轴线方 向和移动副的导路方向):

1)如图 1(a)所示,转动副 R₁、R₂、R₃轴线相交
 于 O₁,转动副 R₄、R₅轴线相交于 O₂. 此时,约束反 力 F_r 由 O₁ 指向 O₂.

2)如图 1(b)所示,转动副 R_1 、 R_2 、 R_3 轴线相交 于 O,转动副 R_4 、 R_5 轴线平行.此时,约束反力 F_r 经 过转动副交点 O,与平行转动副轴线方向一致,即 $F_r // (R_4 // R_5).$

3) 如图 1(c) 所示,转动副 R_1 、 R_2 轴线相交于 O,转动副 R_3 、 R_4 、 R_5 轴线平行. 此时,约束反力 F_r 经过转动副交点 O, 与平行转动副轴线方向一致,即 $F_r // (R_3 // R_4 // R_5).$

若5个转动副轴线任意布置且相交于一条直线, 并联机构在运动过程中稳定性难以保证,故不予考虑.

1.1.2 含有4个转动副和1个移动副的线矢力基本 支链的构造

构造支链时,要保证约束反力与不相交的转动 副轴线平行的同时与移动副导路方向相垂直,所以 移动副导路方向要垂直于平行转动副轴线方向.共 有两种情况,可看作是图1(b)构型和图1(c)构型 的变型:

1)如图 1(d)所示,将图 1(b)构型中的转动副 R_4 替换成移动副 P_4 , 且令 $P_4 \perp R_5$. 此时约束反力 F_r 经过转动副 R_1 、 R_2 、 R_3 轴线的交点 O, 且与转动副 R_5 轴线方向一致,即 $F_r // R_5$.

2)如图 1(e)所示,将图 1(c)中的转动副 R_3 替 换成移动副 P_3 , 且令 $P_3 \perp (R_4 // R_5)$.此时,约束反 力 F_r 经过转动副 R_1 、 R_2 轴线的交点 O, 与平行转动 副轴线方向一致,即 F_r // ((R_4 // R_5).

1.1.3 含有3个转动副和2个移动副的线矢力基本 支链的构造

支链的约束反力方向必须与支链中所有移动副

导路方向垂直,则要保证存在一条与移动副公法线 方向一致的线矢量与所有的转动副轴线相交,有两 种情况:

1) 如图 1(f) 所示,转动副 R₁, R₂, R₃ 的轴线相 交于 0, 此时约束反力 F, 经过转动副交点 0, 沿移



F R

(b) 构型2

动副 P4、P5 公法线方向.

2) 如图 1(g) 所示,转动副 R1、R2 的轴线相交于 O,转动副 R_3 轴线方向与移动副 P_4 、 P_5 的公法线方 向一致,此时约束反力 F,经过转动副交点 O,沿 R, 轴线方向.



(a)构型1









(g) 构型 7

线矢力基本支链构型 图 1



1.2 力偶基本支链的构造

图1所示的7种支链构型的约束螺旋是线矢力, 但如果支链只能产生约束力并不能实现动平台所有 的运动情形,因此,本节利用相逆螺旋第2条推论构 造自由度为5,约束螺旋数目为1的力偶基本支链.

(e)构型5

力偶基本支链的约束螺旋为一个力偶,转动自由 度的维数为2,则支链中转动副轴线位于平行平面内. 理论上空间中位于平行平面、无公法线目线性无关的 线矢最多有5条,但考虑到5条转轴位于平行平面内 的支链在运动过程中平行关系不容易保持.所以本节 只考虑转动副轴线最多平行于两个方向的支链. 由相 逆螺旋第2条推论可知,支链的约束力偶垂直于支链 中所有转动副的轴线,本节在此基础上进行力偶支链 构型的综合,可构造出5种构型,如图2所示.

力偶支链构型存在二维的转动,所以构造支链 时可首先确定实现此二维转动的两个转动副的轴线 方向(两个转动副记为 R_1 和 R_2),其余转动副轴线 与R1、R,轴线平行. 由螺旋相关性可知,两平行线矢 量与其构成平面的法向偶量线性相关,因此,构造支 链时要保证移动副导路方向不能与平行转动副轴线 构成的平面垂直.



Fig.2 Configurations of the basic couple subchains

共存在5种情况:

1) 若支链中具有 3 个不相关的移动副,即为图 2(a) 所示的构型.

2) 若支链中含有两个移动副,即为图 2(b)所示的构型,此时 R₂ // R₃,移动副 P₄、P₅导路方向不能与转动副 R₂、R₃轴线构成的平面垂直.

3) 若支链中含有一个移动副,如果另外两个转动副 R_4 、 R_5 轴线相交,即为图 2(c)所示的构型,此时 $R_1 // R_5$, $R_2 // R_4$,即转动副 R_1 、 R_2 轴线构成的平面和转动副 R_4 、 R_5 轴线构成的平面平行,同时移动副 P_3 导路方向不能和这两个平行平面的公法线垂直(确保移动副 P_3 导路方向在两平行平面公法线上有分量).

4) 若支链中含有一个移动副,如果另外两个转动副 R_3 、 R_4 轴线平行,即为图 2(d)构型,此时 R_2 // R_3 // R_4 , 且移动副 P_5 导路方向不能和转动副 R_2 、 R_3 、 R_4 轴线垂直(确保 P_5 导路方向在 R_2 、 R_3 、 R_4 轴线 方向有分量).

5) 若支链中全为转动副,即为图 2(e)构型,此时 R₁ // R₅, R₂ // R₃ // R₄.

图 1、图 2 所示为基本支链构型,可以通过改变 运动副的空间布置,组合运动副或者改变运动副数 目的方式进行支链构型的拓展,得到更多的并联机 构支链构型,实现并联机构的综合.

2 变胞并联机构综合设计方法

综合现阶段已经构造出的变胞并联机构,可以 发现变胞的实现主要有两种方式:

 改变支链约束螺旋性质,即支链的约束螺旋 可在线矢力和力偶之间转变.本节通过锁住运动副 的方式实现^[13].

2)改变支链约束反力方向,即支链约束反力方向
 可绕某轴线旋转.本节通过可变运动副方式实现^[14].

本节根据并联机构的两种变胞实现方式,构造 相应的变胞支链,并将变胞支链进行变型和组合,实 现并联机构的变胞设计.

2.1 可锁住运动副方式变胞

2.1.1 变胞支链的构建

线矢力和力偶基本支链都是5自由度支链,存 在一个约束螺旋,并且可以发现这两类支链的运动 副布置相似.如图1(c)所示的线矢力支链构型3和 图2(e)所示的力偶支链构型5都存在3个相互平 行的转动副,两者的区别是线矢力支链构型3的其 余两个转动副轴线相交于一点,而力偶支链构型5 的其余两个转动副轴线相互平行.本节利用这一性 质构造并联机构的变胞支链,实现变胞支链在线矢 力支链和力偶支链之间进行转化.

同样以线矢力支链构型3和力偶支链构型5为 例,构型6自由度支链,如图3(a)所示,支链中含有 6个转动副 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 、 R_5^1 和 R_5^2 . 令转动副 R_2 、 R_3 和 R_4 轴线方向相互平行,转动副 R_5^1 和 R_1 轴线方向 相互平行,转动副 R₅² 和 R₁ 轴线相交于一点,此时锁 住转动副R₅,支链转变为线矢力支链构型3,提供一个 约束力螺旋;锁住转动副 R₅,支链转变为力偶支链 构型5,提供一个约束力偶螺旋,即通过锁住不同运 动副的方式实现变胞支链在线矢力支链和力偶支链 之间转化. 与此类似,采用同样的方法可构造出其 他形式的变胞支链,由于图1(a)、(b)、(d)所示的3 种线矢力基本支链含有4个及以上线性无关的转动 副,当锁住一个转动副后仍存在3个线性无关的转 动副,无法创建约束反螺旋为力偶的支链,因此不能 构造此种类型的变胞支链,所以不同形式的变胞支 链共有4种,构型如图3所示.



图3 变胞支链构型



图 3(b)所示的变胞支链,转动副 R_5^1 和 R_1 轴线 相交于一点,转动副 R_5^2 和 R_1 轴线相互平行,锁住转 动副 R_5^1 ,变胞支链转化为图 2(c)所示的力偶支链; 锁住转动副 R_5^2 时,变胞支链转化为图 1(e)所示的 线矢力支链;图 3(c)所示的变胞支链,转动副 R_5^1 和 R_1 轴线方向相互平行,转动副 R_5^2 轴线方向垂直于移 动副 P_3 、 P_4 导路方向,锁住转动副 R_5^1 ,变胞支链转 化为图 1(g)所示的线矢力支链,锁住转动副 R_5^2 时, 变胞支链转化为图 2(b)所示的力偶支链;图 3(d) 所示的变胞支链,转动副 R_5^1 和 R_1 轴线方向相互平 行,转动副 R_1 、 R_2 和 R_5^2 轴线相交于一点,锁住转动 副 R_5^1 ,变胞支链转化为图 1(f)所示的线矢力支链, 锁住转动副 R_5^2 时,变胞支链转化为图 2(b)所示的 力偶基本支链.

2.1.2 利用图 3 所示变胞支链构造变胞并联机构

【例】构造变胞并联机构,其动平台存在两种构态:

1)构态1:水平面内的二维转动和竖直方向的 移动,即2R1T并联机构.

2)构态 2:空间三维的移动和轴线绕竖直方向 的转动,即 3T1R 型并联机构.

以动平台平面为 XOY 平面,竖直方向为 Z 轴方向建立坐标系,机构处于两种构态时动平台受力状态如图 4 所示:





由图 4 可看出,并联机构处于不同的构态时,约 束螺旋性质会发生改变,2R1T 并联机构动平台的约 束为 3 个共面不共点的线矢力,3T1R 并联机构动平 台的约束为两个水平面内的力偶,即构态转换时要 实现并联机构的约束由线矢力螺旋向力偶螺旋的转 变,即约束螺旋性质发生了改变,可通过锁住运动副 的方式实现.

选择如图 3(d) 所示的变胞支链进行变胞并联机 构的构造,采用三条支链.布置并联机构支链时,将移 动副 P_4 的导路布置在定平台上,移动副 P_3 导路方向 与移动副 P_4 导路方向垂直,转动副 R_2 轴线方向竖直 向上,与移动副 P_3 合成一个柱面副,转动副 R_1 、 R_2 和 R_5^2 轴线相交于 O,转动副 R_5^1 和 R_1 轴线相互平行. 三 条支链构型相同,对称布置,三条支链转动副交点 O不重合(线矢力作用点不重合),构型如图 5 所示.

构态转化时,锁住变胞支链的转动副 R_5^1 ,则变 胞支链转化为图 1(f)构型,为线矢力支链构型,为 动平台提供一个垂直于移动副 P_3 、 P_4 导路方向的线 矢力,由于 3 条支链中移动副 P_3 、 P_4 导路方向构成 的平面都垂直于定平台,所以 3 条支链提供的线矢 力共面且不共点,即为构态 1;锁住变胞支链的转动 副 R_5^2 ,则变胞支链转化为图 2(b)构型,为力偶支链 构型,为动平台提供一个垂直转动副 R_1 、 R_2 轴线的 力偶,由于转动副 R_2 轴线方向竖直向上,则由转动 副 R_1 、 R_2 轴线构成平面垂直于定平台,即 3 条支链 提供的力偶平行于定平台,约束水平面内的二维转 动,即为构态 2.



图 5 采用锁住运动副方式变胞的并联机构构型



自由度全周性分析:锁住 R¹5时,支链约束反螺 旋为垂直所有移动副导路方向的线矢力,由于两个 移动副导路方向不变,所以约束线矢力方向始终不 变,运动具有全周性.锁住 R²5时,由于转动副 R₂轴 线方向竖直向上,由几何关系知 3 个力偶始终平行 于定平台,机构的运动具有全周性.

2.2 可变运动副方式变胞

2.2.1 变胞支链的创建

以图 1(d)所示的线矢力支链构型为例,支链约 束反螺旋为通过转动副交点,方向沿转动副 R_5 轴线 的线矢力,如果此时改变转动副 R_5 轴线的方向,约 束线矢力的方向就会随着改变,就可以形成不同的 约束形式.为了实现转动副 R_5 轴线方向的改变,在 转动副 R_5 前面设置一个转动副 R',通过转动副 R'的旋转实现转动副 R_5 轴线的方向的改变,变胞支链 构型如图 6(a)所示.

以转动副交点为原点,转动副 R₅ 轴线方向为 Z 轴方向,水平面为 XOY 平面,建立如图 6(a) 所示的 坐标系,则添加转动副 R' 后支链的运动螺旋系为

 $\begin{aligned} \$_{1} &= (a_{1}, a_{2}, a_{3}; 0, 0, 0), \\ \$_{2} &= (b_{1}, b_{2}, b_{3}; 0, 0, 0), \\ \$_{3} &= (c_{1}, c_{2}, c_{3}; 0, 0, 0), \\ \$_{4} &= (0, 0, 1; d_{1}, d_{2}, 0), \\ \$_{5} &= (0, 0, 0; 1, 0, 0), \\ \$_{6} &= (1, 0, 0; 0, e_{1}, e_{2}). \end{aligned}$

支链运动螺旋系秩为 6,则基本支链构型添加 转动副 *R*′ 后转化为无约束支链.

结合图1所示的7种基本支链构型,通过在平 行转动副前添加转动副的方式,可得到多种变胞支 链,不同类型的变胞支链共有5种,如图6所示:

图 3 和图 6 所示的变胞支链构型是基本构型。

将运动副进行组合(如将3个不共面转动副合成一 个球副,两个轴线相互垂直转动副合成一个万向 节),改变运动副的布置方式可得到多种变胞支链, 实现变胞并联机构的构型综合.



(a) 构型1

(b) 构型2



(d) 构型4

(e) 构型5



变胞支链构型

图 6

2.2.2 利用图 6 所示变胞支链构造变胞并联机构

【例】构造变胞并联机构,其动平台存在3种 构态:

1) XOZ 平面内的平面运动.即 2T1R 并联机构.

2) 水平面内的二维转动和竖直方向的移动,即 2R1T 并联机构.

3) 空间6 维任意运动.

动平台处于不同构态的受力状态如图 7 所示. 机 构处于构态1时,动平台的约束螺旋为X、Z方向的力 偶和Y方向的线矢力,可由3个不在同一平面上、方向 沿Y轴的线矢力实现,如图7(a)所示:构态2时,动平 台的约束螺旋为Z方向的力偶和X、Y方向的线矢 力,可由3个共面不共点的线矢力实现,如图7(b) 所示:构态3时,动平台不受任何约束.本节采用图 6(a) 所示的变胞支链进行变胞并联机构的构造.

变胞并联机构构型如图 8 所示,每条支链中转 动副 R1、R2 和 R3 轴线相交于一点,3 条支链转动副 交点不重合(线矢力作用点不重合),且起始状态时 移动副 P4 的位移量不同,3 条支链转动副交点不位 于同一平面上. 移动副 P4 通过 R'和转动副 R,连 接,且移动副 P_4 的导路方向与转动副 R_5 的轴线方

向垂直.转动副 R, 位于圆环形滑道中, 实现其轴线 方向绕转动副 R'的连续转动,从而改变约束反力的 方向实现机构的变胞.





当进行构态转换时,旋转转动副 R', 令 3 条支 链转动副 R, 的轴线都平行于 Y 轴方向,则并联机构 的约束为3个沿Y方向、作用点不重合且不共面的 线矢力,满足图7(a)所示的受力状态,即为构态1; 旋转转动副 R', 令 3 条支链转动副 R, 的轴线两两 相交,则并联机构约束为3个平行于水平面且不共 点的线矢力,满足图7(b)的受力状态,即为构态2; 解锁三条支链的转动副 R', 3 条支链为无约束支 链,不提供任何约束,即为构态3.



图 8 采用变运动副方式变胞的并联机构构型

Fig.8 Configuration of metamorphic parallel mechanism with variable kinematic pairs

自由度全周性分析:机构处于构态 2 和构态 3 时,约束力方向始终平行于 R₅ 轴线方向,且运动过 程中 R₅ 轴线方向不变,全周性可保证.机构处于构 态1时,旋转 R'可转换到构态 2 和构态 3,且构态 2 和构态 3 运动螺旋的并集为构态 1 的运动螺旋,所 以机构处于构态 1 时也具有全周性.

3 新型变胞并联机构设计

由 2.1 节可知,线矢力支链和力偶支链构型相 似,区别是两种类型支链中两个转动副轴线的位置 关系不同(相交和平行的位置关系),本节采用一种 三重对称的六杆机构——Bricard 机构来实现这种 位置关系的变化,从而实现由线矢力支链向力偶支 链的转化.

三重对称的 Bricard 机构是一种单自由度闭环 机构,(如图 9),存在 3 个对称面,正是由于这种对 称性,机构运动时转动副轴线始终位于 3 个对称面 上^[15].构造变胞并联机构时,将刚性的动平台替换 为可进行单自由度运动的 Bricard 机构,且令 Bricard 机构的 3 个不相邻的转动副作为并联机构支链的末 端运动副.所以,在构造并联机构支链时,要确保支 链末端能实现平面运动,保证 Bricard 机构能够实现 本身的单自由度运动.



图 9 Bricard 机构结构图 Fig.9 Configuration of Bricard linkage

【例】利用 Bricard 机构构造变胞并联机构.

并联机构轴线布置如图 10(a)所示,转动副 R_2 、 R_3 和移动副 P_4 可看作一个平面副, R_1 可看作是 运动链 R_2 、 R_3 和 P_4 的末端执行器,即 R_1 可在某一 平面上任意运动(设此平面为平面 α),令平面 α 和 Bricard 机构的对称面重合,保证 Bricard 机构的单 自由度运动可以实现.初始位置时将转动副 R_1 和 R_5 轴线布置在平面 α 上,同时可知 R_1 在平面 α 上运 动,使得机构在运动过程中转动副 R_1 和 R_5 轴线构 终位于平面 α 中.通过 Bricard 的自运动来实现转动 副 R_1 轴线在平面 α 中的运动,改变转动副 R_1 和 R_5 轴线相交和平行的位置关系.

变胞并联机构构型如图 10(b)所示,调整 Bricard 机构的自运动,可得到并联机构多种构态:





Fig.10 Configurations of the metamorphic subchain and metamorphic parallel mechanism with a Bricard linkage moving platform

1)当转动副 R₁和 R₅轴线平行时,并联机构 3 条支链转化为图 2(c)所示的力偶支链,提供 3 个线 性无关的力偶,动平台的运动为三维的移动.若转 动副 R₁和 R₅轴线由平行变为重合,支链的运动螺 旋系的秩为 4,机构处于奇异位置,机构运动时要尽 量避开这一位置.

2)当转动副 R₁ 和 R₅ 轴线相交时,并联机构 3 条支链转化为图 1(e)所示的线矢力支链,此时,

①当3条支链转动副*R*₁和*R*₅轴线的交点不重 合时,可分为两种情况:

a) 若 3 条支链的平行转动副 R₂ 和 R₃ 的轴线方 向平行于水平面且不相交于一点时(平面线性无 关), 动平台的运动为水平面内二维转动和竖直方 向的移动;

b) 若 3 条支链的平行转动副 R₂ 和 R₃ 的轴线方 向平行于水平面且相交于一点时(平面线性相关), 动 平台的运动为三维的转动和竖直方向的移动. ②当3条支链转动副 R₁和 R₅轴线的交点重合 且3条支链的平行转动副 R₂和 R₃的轴线方向空间线 性无关时,动平台的运动为三维的转动.

通过 Bricard 的自运动,改变支链运动副轴线的 位置关系,当满足所需的轴线位置关系后,将 Bricard 机构锁住,完成并联机构的构态转化,实现 并联机构的变胞.

图 3(a)、(c)所示的变胞支链都存在可等效为平 面运动的运动副,当动平台替换为 Bricard 机构时,都 可实现 Bricard 机构本身的单自由度运动,从而改变 支链轴线的位置关系,实现并联机构的变胞设计.

并联机构处于每一构态时,Bricard 机构被锁住 而不能进行自身单自由度运动,相当于一个刚性动 平台,可在其不与并联机构支链连接的转动副上添 加操作工具,如机械手爪.利用变胞并联机构的运 动改变机械手爪的位置,利用机械手爪的运动改变 其自身的姿态,可实现变胞混联机构的构造.且采 用 Bricard 机构作为并联机构的动平台,通过控制 Bricard 机构的单自由度运动来调整并联机构 3 条 支链轴线的位置关系,可简化构态转化的过程,提高 机构的工作效率,具有很好的应用前景.

4 结 论

 1)从并联机构所受的约束出发,应用螺旋理论 中相逆螺旋的性质,构造约束螺旋分别为线矢力或 力偶的两类基本支链,将约束和支链构型联系起来, 为变胞支链的创建与转化提供构型基础.

2)提出基于基本支链构型的变胞并联机构设计方法.根据基本支链构型的特点构造约束性质可变和约束方向可变的变胞支链,并将变胞支链进行组合和变型,实现变胞并联机构的综合.

3)结合所提出的变胞设计方法,将并联机构的 刚性动平台替换为 Bricard 机构,利用 Bricard 机构 的单自由度运动实现并联机构支链中转动副轴线相 对位置关系的改变,实现并联机构的变胞设计,简化 了构态转化的过程.

参考文献

[1] 李端玲,张忠海,戴建生,等. 变胞机构的研究综述与展望[J].
 机械工程学报,2010,46(13):14-21. DOI:10.3901/JEM.2010.
 13.014.

LI Duanling, ZHANG Zhonghai, DAI Jiansheng, et al, Overview and prospects of metamorphic mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(13): 14-21. DOI:10.3901/JEM.2010.13. 014.

[2] GAN D, DIAS J, SENEVIRATNE L. Unified kinematics and optimal design of a 3rRPS metamorphic parallel mechanism with a reconfigurable revolute joint [J]. Mechanism and Machine Theory, 2016, 96: 239–254.DOI:10.1016/j.mechmachtheory.2015.08.005.

- [3] KONG X. Reconfiguration analysis of a 3-DOF parallel mechanism using Euler parameter quaternions and algebraic geometry method
 [J]. Mechanism and Machine Theory, 2014, 74: 188-201. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2013.12.010.
- [4] 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): 11001. DOI: 10.1115/ 1.4007920.
- [5] QU H, GUO S. Topology and mobility variations of a novel redundant reconfigurable parallel mechanism [M]. Cham: Springer International Publishing, 2016; 223-233. DOI: 10.1007/978-3-319-23327-7_20.
- [6] YE W, FANG Y, GUO S. Reconfigurable parallel mechanisms with planar five-bar metamorphic linkages [J]. Science China Technological Sciences, 2014, 57(1): 210-218. DOI: 10.1007/ s11431-013-5433-9.
- YE W, FANG Y, GUO S, et al. Two classes of reconfigurable parallel mechanisms constructed with multi-diamond kinematotropic chain
 J. Journal of Mechanical Engineering Science, 2015, 230: 3319-3330.DOI: 10.1177/0954406215611436.
- [8] NURAHMI L, CARO S, WENGER P, et al.Reconfiguration analysis of a 4-RUU parallel manipulator [J]. Mechanism and Machine Theory, 2016, 96: 269-289. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory. 2015.09.004.
- [9] WU T. Design and analysis of a novel parallel metamorphic mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51: 30. DOI: 10.3901/JME.2015.07.030.
- [10] ZHANG K, DAI J S. Screw-system-variation enabled reconfiguration of the bennett plano-spherical hybrid linkage and its evolved parallel mechanism [J]. Journal of Mechanical Design, 2015, 137 (6): 62303. DOI: 10.1115/1.4030015.
- [11] 畅博彦,金国光,戴建生.基于变约束旋量原理的变胞机构构型综合[J].机械工程学报,2014(5):17-25.DOI:10.3901/JME.2014.05.017.
 CHANG Boyan, JIN Guoguang, DAI Jiansheng. Type synthesis of metamorphic mechanism based on variable constraint screw theory [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014(5):17-25.DOI: 10.3901/JME.2014.05.017.
- [12]黄真,刘婧芳,李艳文.论机构自由度[M].北京:科学出版社, 2011:81-85.

HUANG Zhen, LIU Jingfang, LI Yanwen. Mobility of mechanisms [M]. Beijing: Science Press, 2011:81-85.

- [13] KONG X, JIN Y. Type synthesis of 3 DOF multi-mode translational/spherical parallel mechanisms with lockable joints[J]. Mechanism and Machine Theory. 2016, 96: 323 - 333. DOI: 10. 1016/j.mechmachtheory.2015.04.019.
- [14] GAN D, DAI J S, LIAO Q. Mobility change in two types of metamorphic parallel mechanisms [J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2009,1(4):41007. DOI:10.1115/1.3211023.
- [15]ZENG Q, EHMANN K F. Design of parallel hybrid-loop manipulators with kinematotropic property and deployability [J]. Mechanism & Machine Theory, 2014, 71: 1-26. DOI:10.1016/j.mechmachtheory.2013.08.017.