

DOI: 10.7652/xjtuxb201601015

两移动三转动完全解耦混联机器人机构型综合

秦友蕾^{1,3}, 曹毅^{1,2,3}, 陈海^{1,3}, 曹浩峰^{1,3}

(1. 江南大学机械工程学院, 214122, 江苏无锡; 2. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室, 200240, 上海; 3. 江南大学江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 214122, 江苏无锡)

摘要: 为综合得到两移动三转动(2T3R)完全解耦混联机器人机构, 基于 G_F 集理论提出了一种简单而有效的解耦混联机构型综合方法, 并且给出了完全解耦混联机构型综合的具体设计步骤。首先分析了 G_F 集的运算法则; 接着通过 G_F 集元素组合公式和混联机构数综合方程构造了混联拓扑结构, 并结合机构输入运动副选择原则和解耦分支设计准则, 确保了混联机构运动的解耦性; 然后根据该构型综合方法, 完成了完全解耦 2T3R 五自由度混联机构的型综合过程。运用该型综合方法, 得到了构成 2T3R 解耦混联机构各模块单元的组合形式, 再以其中一种组合形式为例, 综合出了 2T3R 五自由度完全解耦混联机构, 并得到了大量新构型。针对该完全解耦混联机构, 求解了机构位置的正解解析表达式, 推导出了机构的雅可比矩阵, 进而依据此雅可比矩阵表达式, 验证了混联机构的完全解耦特性, 进一步证明了该构型方法的正确性。基于 G_F 集的完全解耦混联机构型综合方法可用于具有确定运动特征的解耦串联、并联以及混联机构的构型设计。

关键词: 混联机构; G_F 集; 解耦; 型综合

中图分类号: TH112 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)01-0092-08

Structural Synthesis of Fully-Decoupled Two-Translational and Three-Rotational Hybrid Robotic Manipulators

QIN Youlei^{1,3}, CAO Yi^{1,2,3}, CHEN Hai^{1,3}, CAO Haofeng^{1,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 2. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: To obtain the structure of a fully-decoupled two-translational and three-rotational (2T3R) hybrid mechanisms, a simple and effective synthesis of decoupled hybrid mechanism (HM) is proposed and described in detail based on G_F set. The basic algorithms for G_F set are firstly introduced. The topological structure of the hybrid mechanism is developed by the elements of G_F set combination formula and the synthesis equation of the number of hybrid mechanism. Following the selection criterion of the input pair and the design principle of decoupled branches, the movement decoupling of the hybrid mechanism is ensured. According to the type synthesis theory, the combination of each module unit constituting HM is obtained. And taking one kind of the combination form as an example, the structural synthesis of the 2T3R 5-DOF decoupled hybrid mechanism is finished. Moreover, the expression of Jacobian matrix is

deduced, and the decoupling feature of the proposed hybrid mechanisms is validated, which demonstrates the correctness of the novel method of structural synthesis for HMs. The synthesis method proposed also can be used to obtain the structural design of serial, parallel and hybrid mechanisms with decoupled movement features.

Keywords: hybrid mechanism; G_F set; decoupling; type synthesis

机器人机构的发展经历了从串联机构到并联机构,再到混联机构的过程。混联机器人兼具串联机器人工作空间大、灵活性好,并联机器人刚性好、速度快、精度高等各自的优点,同时又避免了单纯串、并联机器人所带来的问题,是今后机构学研究的一个重要方向^[1]。国内外已设计出多种混联机器人,并得到了成功应用。例如:黄田等发明的 TriVariant 系列混联机器人^[2],沈惠平等研制的多喷枪协同式喷涂五轴混联机器人^[3]。然而,目前混联机器人的研究主要集中在建模^[4-5]及运动学和动力学性能优化分析^[6-9]方面,而对于混联机器人机构型综合的方法则研究较少^[10-12]。

运动耦合是机器人机构中普遍具有的特性,这种耦合性使得在机构的分析计算以及控制系统的设计中存在很多困难。为了简化机构控制和标定,提高机构运动的精度,降低成本,国内外学者对解耦机构做了许多研究^[13-16],但是这些研究主要集中在并联机构,而对混联解耦机构的研究尚属空白。

因此,本文基于 G_F 集理论提出一种简明、直观、有效的完全解耦混联机器人机构型综合方法;采用该方法完成了 2T3R 完全解耦混联机器人机构的型综合,并得到了大量新机构;最后通过实例验证了该方法的有效性。

1 G_F 集的运算法则

1.1 G_F 集的基本概念

G_F 集^[17]是用来描述机器人机构末端运动特征的集合,它由 6 个元素构成

$$G_F = (T_a T_b T_c; R_\alpha R_\beta R_\gamma) \quad (1)$$

式中: $T_i (i=a, b, c)$ 描述机构末端的移动特征; $R_j (j=\alpha, \beta, \gamma)$ 描述机构的转动特征。

根据移动特征 T_i 对转动特征 R_j 的影响,将 G_F 集分成两类:第一类如图 1 所示,转动中心随移动的变化而变化,表示为 $G_F^I (T_a T_b T_c; R_\alpha R_\beta R_\gamma)$;反之则为第二类,如图 2 所示,表示为 $G_F^{II} (R_\alpha R_\beta R_\gamma; T_a T_b 0)$ 。

1.2 运算法则

G_F 集的运算主要是求和运算和求交运算。求和运算适用于串联机构,而求交运算则适用于并联机构。

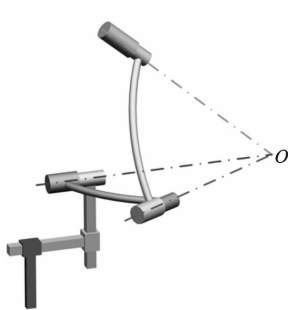


图1 第一类 G_F 集 G_F^I

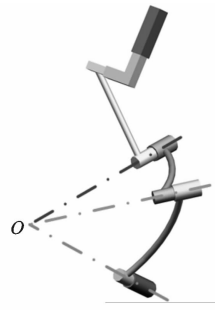


图2 第二类 G_F 集 G_F^{II}

求和运算具体定义为

$$\left. \begin{aligned} G_{F1} &= (A; B) = (T_{a1} T_{b1} T_{c1}; R_{\alpha1} R_{\beta1} R_{\gamma1}) \\ G_{F2} &= (C; D) = (T_{a2} T_{b2} T_{c2}; R_{\alpha2} R_{\beta2} R_{\gamma2}) \\ G_F &= G_{F1} \cup G_{F2} = (T_a T_b T_c; R_\alpha R_\beta R_\gamma) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中

$$(T_a T_b T_c) = A \cup C \cup T((A+B) \cup (C+D))$$

$$(R_\alpha R_\beta R_\gamma) = R((A+B) \cup (C+D))$$

其中 $\cup$ 为求和运算符, $+$ 为 T_i 对 R_j 影响的运算符, $T(\cdot)$ 为运动项的移动特征部分, $R(\cdot)$ 为运动项的转动特征部分。

求交运算具体定义为

$$G_F = G_{F1} \cap G_{F2} = (T_a T_b T_c; R_\alpha R_\beta R_\gamma) \quad (3)$$

式中

$$(T_a T_b T_c) = A \cap C$$

$$(R_\alpha R_\beta R_\gamma) = R((A+B) \cap (C+D))$$

其中 $\cap$ 为求交运算符。

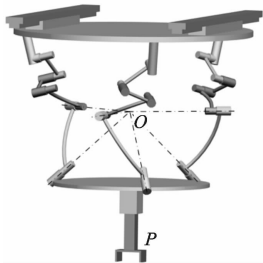
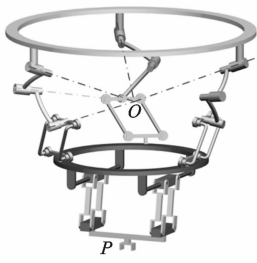
由式(3)可知,移动特征 T_i 容易确定,而转动特征 R_j 主要通过转动合成定律确定。 G_F 集的基本运算是机构综合的基础,而轴线迁移定理和转动合成定律^[18]是运算法则的依据。

2 完全解耦混联机构型综合理论

2.1 混联机构型综合方法

基于 G_F 集的分类,将混联机器人分成两类:第

一类如图3所示,表示为 $G_F^I(T_a T_b 0; R_\alpha R_\beta R_\gamma)$, 即转动中心随移动的变化而变化的混联机器人; 第二类如图4所示,表示为 $G_F^II(R_\alpha R_\beta R_\gamma; T_a T_b 0)$, 即转动中心不随移动的变化而变化的混联机器人。

图3 G_F^I 混联机器人图4 G_F^{II} 混联机器人

基于 G_F 集理论的混联机器人拓扑结构可描述为: 混联机构末端的运动特征是组成该机构的所有串联支链及并联机构末端运动特征的和集,即

$$G_F = G_{FS1} \cup G_{FS2} \cup \dots \cup G_{FSi} \cup \dots \cup G_{FPj} \cup \dots \cup G_{FSi} \quad (4)$$

式中: G_F 为机构末端的运动特征; G_{FSi} 为串联机构的运动特征; G_{FPj} 为并联机构的运动特征。

由式(4)可综合出给定末端运动特征的混联机构。必须指出的是,混联机器人机构的驱动器可布置在不同的支链上,同时还可以具有被动支链,因此有必要建立机构的拓扑结构、机构的基本拓扑元素及结构参数之间的关系模型,称为混联机构数综合方程,表示为

$$\left. \begin{aligned} F &= F_p + F_s \\ F - \sum_{i=1}^n q_i &= 0 \\ N &= F - \sum_{i=1}^n (q_i - 1) + p \\ n &= N - p \quad (n \leq F) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: F 、 F_p 、 F_s 分别为混联、并联、串联特征 G_F 集的维数; q_i 为主动支链 i 上的驱动数; N 为支链数; n 为主动驱动数; p 为被动支链数。

2.2 完全解耦混联机构型综合原则

金琼等基于输出矩阵,提出了完全解耦概念: 输入输出变量之间存在一一对应关系; 机构解耦是指自由度解耦,并且单个输出自由度仅由单个输入量控制^[19]。解耦混联机构设计主要包括支链的解耦性设计和输入运动副的选择。

为了使驱动具有某个方向的解耦输入,在此规定混联机构末端特征 $G_F(T_a T_b T_c; R_\alpha R_\beta R_\gamma)$ 中 T_i ($i=a, b, c$) 三个移动的方向必须相互垂直, R_j ($j=\alpha, \beta, \gamma$) 三个转动的轴线也必须相互垂直。

2.2.1 输入运动副选择原则 由混联机构数综合方程式(5)可知,当 $p=0$ 、 $q_i=1$ 时, $F=N=n$ 。为了简化输入运动副的选择,在此给出解耦混联机构输入运动副的选择原则:

(1)串联支链 G_{FSi} 运动特征中的每一个元素都是输入运动特征,当 T_i 为输入运动特征时,输入运动副为移动副,当 R_j 为输入运动特征时,输入运动副为转动副;

(2)并联模块单元 G_{FPj} 运动特征中的每一个元素分别为组成并联单元各个分支中的输入运动特征,当 T_i 为输入运动特征时,输入运动副可以为移动副或转动副,当 R_j 为输入运动特征时,输入运动副为移动副或转动副;

(3)并联模块单元中的各串联支链有且仅有 1 个输入运动副。

2.2.2 完全解耦支链设计准则 串联模块单元 G_{FSi} 支链的设计准则: 在给定串联支链末端运动特征 G_{FS} 时,表达式中的元素 T_i 和 R_j 分别与移动副和转动副一一对应。

当给定并联模块单元 G_{FPj} 末端运动特征时,首先确定该分支的输入运动副,然后设计构成并联模块的串联解耦分支,其设计准则如下。

(1)如果输入运动特征为 T_i ,当输入运动副为移动副时,该分支中的其余移动特征方向只能与 T_i 垂直,分支中存在轴线平行的转动副,其轴线方向只能平行于 T_i ,且最多有不超过 3 条相互平行的轴线;当输入运动副为转动副时,该分支中必须存在与其轴线平行的转动副和一个移动副,它们的移动方向垂直于该输入运动特征 T_i 的方向,且位于 2 个平行运动副所形成的平面。

(2)如果输入运动特征为 R_j ,当输入运动副为转动副时,该分支中其余转动副或圆柱副 C 的轴线只能垂直于 R_j 轴线;当输入运动副为移动副时,支链中必须存在与之相连接的 2 个轴线平行的转动副,且转动轴线垂直于输入移动副;由于并联机构的解耦设计减弱了机构的稳定性,所以各支链的设计输入运动副最好位于定平台或者动平台上。

(3)对于含有移动输入运动特征的支链,其支链与定平台连接的移动特征必须相互垂直布置;对于含有转动输入特征的支链,其支链与动平台连接的转动轴线必须相互垂直布置。

2.3 完全解耦混联机构型综合步骤

根据上述设计原则,得到设计步骤如下:

(1)给定混联机构末端的运动特征用 G_F 集表

示,例如两移动三转动混联机构末端的运动特征为 $G_F^I(T_a\ T_b\ 0;R_a\ R_\beta\ R_\gamma)$;

(2)对于给定的 G_F 集,根据式(4)确定并联模块 G_{FPj} 的运动特征和串联支链 G_{FSi} 的运动特征,依据解耦混联机构输入运动副的选择原则确定机构输入运动副;

(3)根据串联机构 G_F 集的表达式 G_{FSi} ,按照式(2)和串联分支解耦准则构造满足要求的串联分支;

(4)根据并联机构的 G_{FPj} 表达式,首先按照式(3)确定构成并联机构各支链的运动特征 G_F 集,然后用分支 G_F 集根据式(1)和并联分支解耦设计准则来构造并联分支;

(5)用从步骤(3)、(4)得到的并联机构和串联机构,根据式(4)的模块单元顺序及混联机构转动轴线迁移定理,组合成完全解耦混联机构。

3 2T3R 完全解耦混联机构型综合

运用上述方法和步骤,对 2T3R 完全解耦混联机构进行机构型综合,2T3R 五自由度混联机构末端的 G_F 集表达式为

$$G_F^I(T_a\ T_b\ 0;R_a\ R_\beta\ R_\gamma)$$

(6)

$$G_F^{II}(R_a\ R_\beta\ R_\gamma;T_a\ T_b\ 0)$$

(7)

设 T_a 、 T_b 分别为沿 X 、 Y 方向的移动特征, R_a 、 R_β 、 R_γ 分别为绕平行于 X 、 Y 、 Z 方向轴线的转动特征。式(6)、式(7)可分别简记为 G_F^{2T3R} 、 G_F^{3R2T} 。不失一般性,以式(6)第一类混联机构为研究对象,根据式(4)可得到第一类 G_F^{2T3R} 混联机构的组合方式,如表 1 所示。

不失一般性,以表 1 中序号 14 的构型为研究对象,该混联机构的组合方式为 $G_{FS}^{1T} \cup G_{FP}^{1T2R} \cup G_{FS}^{1R}$,2 个串联支链的运动特征分别是 $G_{FS}^{1T}=(T_a\ 0\ 0;0\ 0\ 0)$ 和 $G_{FS}^{1R}=(0\ 0\ 0;0\ R_\beta\ 0)$,并联模块运动特征为 $G_{FP}^{1T2R}=(0\ T_b\ 0;R_a\ 0\ R_\gamma)$ 。首先构造串联单元解耦支链,按照解耦设计原则,2 个串联单元支链分别为一个沿 X 轴的移动副和一个绕平行于 Y 轴轴线的转动副。

$G_{FP}^{1T2R}=(0\ T_b\ 0;R_a\ 0\ R_\gamma)$ 是末端能够实现 2 个移动 1 个转动的并联单元。根据式(5)可知,当 $p=0$ 、 $n=3$ 时,并联单元的支链数 $N=3$ 。

由式(2)可知,并联单元末端的 G_{FP} 由下式决定

$$G_{FP}^I = G_{F1} \cap G_{F2} \cap G_{F3}$$

(8)

式中: G_{F1} 、 G_{F2} 、 G_{F3} 分别为 3 个支链的 G_F 集。可选支链的形式为

表 1 G_F^{2T3R} 混联机构 G_F 集的组合方式

序号	组合方式	类型	条件
1	$G_{FP}^{2T2R} \cup G_{FS}^{1R}$	P+S	$R_a \perp_{\square} T_a T_b$
2	$G_{FP}^{2T1R} \cup G_{FS}^{2R}$		
3	$G_{FP}^{2T} \cup G_{FS}^{3R}$		
4	$G_{FP}^{1T1R} \cup G_{FS}^{1T2R}$		
5	$G_{FS}^{1T} \cup G_F^{1T3R} P$	S+P	$R_a \perp_{\square} T_a T_b$
6	$G_{FS}^{1R} \cup G_{FP}^{2T2R}$		
7	$G_{FS}^{2T} \cup G_{FP}^{3R}$		
8	$G_{FS}^{1T1R} \cup G_{FP}^{1T2R}$		
9	$G_{FS}^{2T1R} \cup G_{FP}^{2R}$		
10	$G_{FP}^{2T} \cup G_{FP}^{3R}$	P+P	$R_a \perp_{\square} T_a T_b$
11	$G_{FP}^{2T1R} \cup G_{FP}^{2R}$		
12	$G_{FP}^{1T1R} \cup G_{FP}^{1T2R}$		
13	$G_{FS}^{1T} \cup G_{FP}^{1T1R} \cup G_{FS}^{2R}$	S+P+S	$R_a \perp_{\square} T_a T_b$
14	$G_{FS}^{1T} \cup G_{FP}^{1T2R} \cup G_{FS}^{1R}$		
15	$G_{FS}^{2T} \cup G_{FP}^{2R} \cup G_{FS}^{1R}$		
16	$G_{FS}^{1T1R} \cup G_{FP}^{1T1R} \cup G_{FS}^{1R}$		
17	$G_{FS}^{1R} \cup G_{FP}^{2T1R} \cup G_{FS}^{1R}$		
18	$G_{FP}^{2T} \cup G_{FP}^{2R} \cup G_{FS}^{1R}$	P+P+S	$R_a \perp_{\square} T_a T_b$
19	$G_{FP}^{1T1R} \cup G_{FP}^{1T1R} \cup G_{FS}^{1R}$		
20	$G_{FS}^{1T} \cup G_{FP}^{1T1R} \cup G_{FP}^{2R}$	S+P+P	$R_a \perp_{\square} T_a T_b$
21	$G_{FS}^{1R} \cup G_{FP}^{2T} \cup G_{FP}^{2R}$		
22	$G_{FP}^{2T} \cup G_{FS}^{1R} \cup G_{FP}^{2R}$	P+S+P	$R_a \perp_{\square} T_a T_b$
23	$G_{FP}^{1T1R} \cup G_{FS}^{1T} \cup G_{FP}^{2R}$		

$T_a T_b$:移动特征 T_a 、 T_b 所形成的平面; $R_a \perp_{\square} T_a T_b$:转动特征 R_a 的轴线垂直于 T_a 、 T_b 所形成的平面;P:并联;S:串联。

$$G_{Fi}^I = (0\ T_b\ 0;R_a\ 0\ R_\gamma)$$

(9)

$$G_{Fi}^I = (T_a\ T_b\ 0;R_a\ 0\ R_\gamma)$$

(10)

$$G_{Fi}^I = (T_a\ T_b\ 0;R_a\ R_\beta\ R_\gamma)$$

(11)

$$G_{Fi}^I = (T_a\ T_b\ T_c;R_a\ 0\ R_\gamma)$$

(12)

$$G_{Fi}^I = (T_a\ T_b\ T_c;R_a\ R_\beta\ R_\gamma)$$

(13)

式(9)~(13)分别简记为 G_F^{1T2R} 、 G_F^{2T2R} 、 G_F^{2T3R} 、 G_F^{3T2R} 、 G_F^{3T3R} 。对式(9)~(13)进行求交运算,可得到构成 G_{FP}^{1T2R} 类并联单元分支 G_F 集的组合方式,如表 2 所示。

表 2 G_{FP}^{1T2R} 类并联机构末端的 G_F 集组合方式

序号	组合方式	序号	组合方式
1	$G_{F1}^{1T2R} \cap G_{F2}^{2T2R} \cap G_{F3}^{3T2R}$	7	$G_{F1}^{1T2R} \cap G_{F2}^{3T3R} \cap G_{F3}^{3T3R}$
2	$G_{F1}^{1T2R} \cap G_{F2}^{2T2R} \cap G_{F3}^{3T3R}$	8	$G_{F1}^{1T3R} \cap G_{F2}^{2T2R} \cap G_{F3}^{3T2R}$
3	$G_{F1}^{1T2R} \cap G_{F2}^{2T3R} \cap G_{F3}^{3T2R}$	9	$G_{F1}^{1T3R} \cap G_{F2}^{2T2R} \cap G_{F3}^{3T3R}$
4	$G_{F1}^{1T2R} \cap G_{F2}^{2T3R} \cap G_{F3}^{3T3R}$	10	$G_{F1}^{1T3R} \cap G_{F2}^{2T3R} \cap G_{F3}^{3T2R}$
5	$G_{F1}^{1T2R} \cap G_{F2}^{3T2R} \cap G_{F3}^{3T2R}$	11	$G_{F1}^{1T3R} \cap G_{F2}^{3T2R} \cap G_{F3}^{3T2R}$
6	$G_{F1}^{1T2R} \cap G_{F2}^{3T2R} \cap G_{F3}^{3T3R}$	12	$G_{F1}^{1T3R} \cap G_{F2}^{3T2R} \cap G_{F3}^{3T3R}$

需要特别指出的是,表 2 中组合方式的前后顺序可以发生变化。按照支链解耦准则分别构造 G_F^{1T2R} 、 G_F^{1T3R} 、 G_F^{2T2R} 、 G_F^{2T3R} 、 G_F^{3T2R} 、 G_F^{3T3R} 支链,如表 3~表 8 所示。

表 3 G_{Fi}^{1T2R} 型解耦串联支链构型

输入运动特征	驱动副	支链构型		
T_b	P_Y	$P_Y R_X R_Z$	$P_Y R_Z R_X$	$P_Y U_{XZ}$
R_a	R_X	$P_X R_Z R_X$	$P_a^Z R_Z R_X$	
R_Y	R_Z	$P_X R_X R_Z$	$P_a^Z R_X R_Z$	$C_X R_Z$

表 3 中分别给出了输入运动特征为移动或转动特征时的支链构型,其中 P_Y 表示沿 Y 方向的移动副, R_X 表示轴线平行于 X 轴的转动副, U_{XZ} 表示绕平行于 X 、 Z 方向 2 条轴线的虎克铰。

表 4 G_{Fi}^{1T3R} 型解耦串联支链构型

输入运动特征	驱动副	支链构型		
T_b	P_Y	$P_Y R_X R_Y R_Z$ $P_Y R_Z R_Y R_X$	$P_Y R_Y R_X R_Z$ $P_Y R_X U_{YZ}$	$P_Y R_Z U_{XY}$ $P_Y U_{XZ} R_Y$
R_Y	R_Z	$P_X R_Z R_Y R_Z$ $^Z U^\wedge R_Y R_Z$	$P_X U_{YX} R_Z$ $P_a^Z U_{XY} R_Z$	$P_a^Z R_Z R_Y R_Z$

表 4 中分别给出了输入运动特征为 T_b 、 R_Y 时的支链构型,其中 P_a^Z 为轴线平行于 Z 轴的平行四边形铰链, $^Z U^\wedge$ 为转-平万向铰^[20]。当输入运动特征为 R_a 时其驱动副是 R_X ,只需将驱动副 R_Z 对应的支链构型中的 R_X 、 R_Z 交换位置即可。

表 5 G_{Fi}^{2T2R} 型解耦串联支链构型

输入运动特征	驱动副	支链构型		
T_b	P_Y R_Z	$P_Y P_X R_X R_Z$ $R_Z R_Z P_X R_X$	$P_Y C_X R_Z$ $R_Z P_X R_Z R_X$	$P_Y P_X U_{XZ}$ $R_Z R_Z C_X$
R_Y	R_Z P_X	$P_X P_Y R_X R_Z$ $P_X R_Z R_Z R_X$	$P_a^Z P_a^Z R_X R_Z$ $P_X R_Z U_{ZX}$	$U^P R_X R_Z$ $R_Z P_X R_Z R_X$
R_a	R_X	$R_Z R_Z P_X R_X$ $R_Z R_Z R_Z R_X$ $P_Y R_Z R_Z R_X$	$R_Z P_X R_Z R_X$ $P_a^Z R_Z R_Z R_X$ $P_Y R_Z U_{ZX}$	$R_Z R_Z C_X$ $P_a^Z R_Z P_a^Z R_X$ $R_Z P_Y R_Z R_X$

表 5 中分别给出了输入运动特征为 T_b 、 R_a 、 R_Y 时的支链构型。当输入运动特征为 R_Y 时,其驱动副可以为 P_Y ,此时只需将驱动副 P_X 对应的支链构

型中的 P_X 替换成 P_Y 即可。

表 6 G_{Fi}^{2T3R} 型解耦串联支链构型

输入运动特征	驱动副	支链构型		
	P_Y	$P_Y P_X R_Z R_X R_Y$	$P_Y P_X R_Z U_{XY}$	$P_Y P_X U_{XY} R_Z$
T_b	R_Z	$R_Z R_Z P_X R_Y R_X$ $R_Z P_X R_Z U_{XY}$	$R_Z P_X R_Z R_X R_Y$ $R_Z P_X U_{ZX} R_Y$	$R_Z R_Z C_X R_X$
R_a	R_X	$P_Y P_X R_Z R_Y R_X$ $P_Y P_X U_{ZY} R_X$ $R_Z P_Y P_a^Z R_Y R_X$ $U^* R_Y R_Z R_X$	$R_Z R_Z R_Z R_Y R_X$ $R_Z R_Z U_{ZY} R_X$ $P_a^Z R_Z R_Z R_Y R_X$ $R_Z P_a^Z U_{ZY} R_X$	$R_Z P_Y R_Z R_Y R_X$ $R_Z P_Y U_{ZY} R_X$ $P_a^Z P_a^Z R_Z R_Y R_X$ $P_a^Z P_a^Z U_{YZ} R_X$

表 6 中分别给出了输入运动特征为 T_b 、 R_a 时的支链构型。当输入运动特征为 R_Y 时,其驱动副为 R_Z ,此时只需将驱动副 R_X 对应的支链构型中的 R_X 和 R_Z 互换位置即可。

表 7 G_{Fi}^{3T2R} 型解耦串联支链构型

输入运动特征	驱动副	支链构型		
	P_Y	$P_Y P_X P_Z R_X R_Z$ $P_Y U^P R_X R_Z$	$P_Y P_Z P_X U_{ZX}$ $P_Y U^* U_{ZX}$	$P_Y P_a^Y P_a^Y R_X R_Z$ $P_Y P_a^Y P_Z R_X R_Z$
T_b	R_Z	$R_Z R_Z P_X P_Z R_X$ $R_Z R_Z P_X P_a^X R_X$	$R_Z P_X R_Z P_Z R_X$ $R_Z P_X R_Z P_a^X R_X$	$R_Z P_X C_Z R_X$ $R_Z P_X R_Z P_Z R_X$
R_a	R_X	$P_a^X P_a^Y P_a^Z R_Y R_X$ $P_a^X C_Y R_Y R_X$ $R_Y R_Y^\wedge U^Y R_X$ $U^* P_Z R_Y R_X$	$P_a^X R_Y R_Y P_X R_X$ $C_Y R_Y R_Y R_X$ $P_a^X R_Y^\wedge U^Y R_X$ $P_a^X U^* R_Y R_X$	$P_a^X P_a^X R_Y P_X R_X$ $C_Y P_Z R_Y R_X$ $R_Y R_Y R_Y^\wedge U^\wedge$ $P_Y U^* R_Y R_X$
	P_Z	$P_Z R_X R_X P_X R_Z$	$P_Z R_X C_X R_Z$	$P_Z R_X R_X P_a^Y R_Z$

表 7 中分别给出了输入运动特征为 T_b 、 R_a 时的支链构型。当输入运动特征为 R_Y 时,其驱动副为 R_Z 、 P_X ,此时只需将驱动副 R_X 、 P_Z 对应的支链构型中的下角标 X 、 Z 互换位置即可。

表 8 中分别给出了输入运动特征为 T_b 、 R_Y 时的支链构型。当输入运动特征为 R_a ,其驱动副为 R_X 、 P_Z 时,只需将运动特征为 R_Y ,驱动副为 R_Z 、 P_X 的支链构型中的下角标 Z 、 X 互换位置即可。

根据表 2 中串联支链构成的 G_{FF}^{1T2R} 类并联单元,可得到各串联支链的运动特征,再按照输入运动副选择原则分别选取各支链的输入运动特征,并从表 3~表 8 中给出的串联支链构型中选出一一种构成 G_{FF}^{1T2R} 解耦并联单元,最后根据表 1 将各解耦 G_{FS}^{1T} 、

G_{FP}^{1T2R} 、 G_{FS}^{1R} 单元组合成 G_F^{2T3R} 解耦混联机构。

表 8 G_{Fi}^{3T3R} 型解耦串联支链构型

输入驱动运动特征副	支链构型		
T_b	$P_Y P_X P_Z S$	$P_Y P_X P_Z R_Y R_Y$	$P_Y P_X C_Z R_Y R_Y$
	$P_Y P_X C_Z U_{XY}$	$P_Y R_Y R_Y U_{YZ} R_X$	$P_Y R_Z R_Z R_X R_X R_Y$
	$P_Y P_Y R_Y R_Y R_Y R_Z R_X$	$P_Y^Y U^P R_Z R_Y R_X$	$P_Y^Y U^P U_{YX} R_Z$
	$P_Y P_a^Y C_X R_Z R_Y$	$P_Y R_Y R_Y^Y U^A R_Z$	$P_Y P_a^Y P_a^Y S$
R_X	$P_Y P_a^Y P_a^Y U_{XY} R_Z$	$P_Y R_Y P_a^Y P_a^Y U_{YX}$	$P_Y R_Y P_Y^Y U^A R_Z$
	$R_X R_X P_Z P_Y R_Z R_X R_X P_Z R_X P_Y R_Z R_Y$	$R_X P_Z C_X R_Z R_Y$	
	$R_X R_X P_Z P_a^Y R_Y R_X R_Y P_Z R_Y P_a^Z R_X R_Y$	$R_X P_Z C_X U_{YZ}$	
R_Z	$R_X R_X R_Z R_Z R_Z R_Y$	$P_X R_X R_X R_X R_Z R_Y$	$R_X R_X P_Z R_Z R_Z R_Y$
	$R_Y R_Y P_X P_Z R_X R_Z$	$R_X R_X R_X R_Y R_Y R_Z$	$P_X P_Y P_Z R_Y R_X R_Z$
	$R_X P_Y R_X R_Z R_Z R_Z$	$R_Y R_Y P_X R_X R_X R_Z$	$R_Y R_Y P_Y P_X R_X R_Z$
	$C_X R_X R_X R_Y R_Z$	$C_X P_Z R_X R_Y R_Z$	$P_Z P_Y C_X R_Y R_Z$
R_Y	$C_X R_X U_{XY} R_Z$	$P_Z C_X U_{XY} R_Z$	$U_{XY} C_Y R_Y R_Z$
	$U^* P_Z R_X R_Y R_Z$	$U_{XZ} R_Y U_{YX} R_Z$	$P_Z U^* U_{XY} R_Z$
	$R_X R_X U_{XY} R_Y R_Z$	$P_X R_X R_X U_{XY} R_Z$	$R_X U_{XY} R_Y P_X R_Z$
	$P_Z U^P R_X R_Y R_Z$	$P_X U^P R_X R_Y R_Z$	$P_Y^P U U_{XY} R_Z$
P_X	$P_a^X R_X R_X P_a^X R_Y R_Z$	$P_a^X P_a^X R_X P_X R_Y R_Z$	$R_X P_a^X P_a^X P_X R_Y R_Z$
	$C_X P_a^X R_X R_Y R_Z$	$C_X P_a^X P_a^X R_Y R_Z$	$R_X P_a^X C_X R_Y R_Z$
	$P_a^X C_X U_{XY} R_Z$	$X U^A R_X U_{XY} R_Z$	$X U^A P_Z U_{XY} R_Z$

以表 1 中的组合方式 $G_{FS}^1 \cup G_{FP}^{1T2R} \cup G_{FS}^{1R}$ 为例,设混联机构的输入运动特征依次为 T_a 、 T_b 、 R_a 、 R_y 、 R_ρ ,首先按照解耦设计原则构造串联单元解耦支链, G_{FS}^1 、 G_{FS}^{1R} 串联单元支链分别为沿 X 轴的移动副和绕平行于 Y 轴轴线的转动副,然后构造 G_{FP}^{1T2R} 并联单元,设 3 个支链的驱动副为 P_Y 、 R_X 、 R_Z ,选取表 3 中 $P_Y R_Z R_X$ 为支链 1,选取表 7 中 $R_X P_Z R_Z R_Z R_Z$ 为支链 2, $R_Z P_X R_X R_X R_X$ 为支链 3,构成完全解耦 G_{FP}^{1T2R} 并联机构,最后将 G_{FS}^1 、 G_{FP}^{1T2R} 、 G_{FS}^{1R} 单元组合成 G_F^{2T3R} 解耦混联机构,其 CAD 三维构型如图 5 所示。

4 机构运动速度分析

如图 6 所示,支链 1 中与上平台连接的 2 个转动副的轴线以及与机构末端连接的转动副的轴线相交于 O_1 点,设 O_1 为动坐标系的原点,静平台上两导轨之间的中点 O 为定坐标系的原点。

由前述输入运动副的选择原则,可确定混联机构的输入运动副,对应的运动参数为底平台在移动

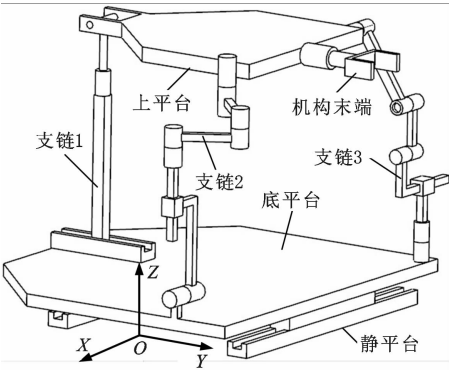


图 5 一种完全解耦 2T3R 混联机构

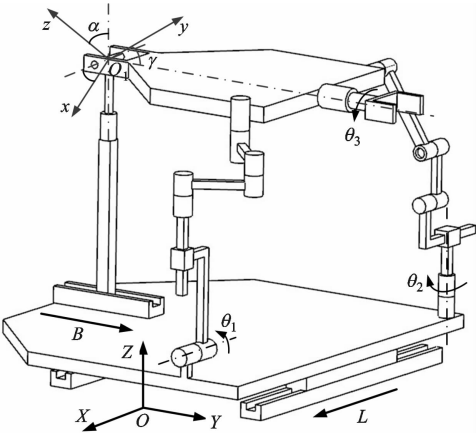


图 6 机构运动参数示意图

副驱动下沿定坐标系 X 方向发生的位移 L ,支链 1 的输入为沿 Y 方向发生的位移 B ,支链 2 的输入为绕平行于 X 轴的轴线转动的角度 θ_1 ,支链 3 的输入为绕平行于 Z 轴的轴线转动的角度 θ_2 ,混联机构在转动副 R_Y 驱动下绕平行于 Y 轴的轴线转动的角度为 θ_3 。

输出参数为动坐标系分别绕 x 、 y 、 z 轴的转动角 α 、 β 、 γ ,动坐标系原点 O_1 在定坐标系中的坐标为 (l, b, h) 。规定机构初始位姿,定坐标系和动坐标系各轴对应平行, $\theta_1=0, \theta_2=0, \theta_3=0$ 。 O_1 在定坐标系中的初始坐标为 (l_0, b_0, h) 。机构位置正解即为已知输入量 $(L, B, \theta_1, \theta_2, \theta_3)$,下面求解输出量 $(l, b, \alpha, \beta, \gamma)$ 。由图 6 可知

$$\left. \begin{aligned} l &= l_0 + L; & b &= b_0 + B; & \alpha &= \theta_1 \\ \beta &= \theta_2; & \gamma &= \theta_3 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

混联机构末端的速度和输入驱动的速度之间的关系可以表示为

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{J} \dot{\mathbf{q}} \quad (15)$$

式中: $\dot{\mathbf{X}}$ 为机构末端的速度矢量; $\dot{\mathbf{q}}$ 为各输入的速度矢量; $\mathbf{J}$ 为雅克比矩阵,它表述了机构的输入速度和

机构末端输出速度减的映射关系。

将式(14)中各式的两边对时间 t 求导,可得

$$\left. \begin{aligned} l' &= L'; & b' &= B'; & \alpha' &= \theta'_1 \\ \beta' &= \theta'_2; & \gamma' &= \theta'_3 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

将式(16)以矩阵形式表示为

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L' \\ B' \\ \theta'_1 \\ \theta'_2 \\ \theta'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l' \\ b' \\ \alpha' \\ \beta' \\ \gamma' \end{bmatrix} \quad (17)$$

令 $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, 则式(17)可整理为

$$\begin{bmatrix} L' \\ B' \\ \theta'_1 \\ \theta'_2 \\ \theta'_3 \end{bmatrix} = \mathbf{M}^{-1} \begin{bmatrix} l' \\ b' \\ \alpha' \\ \beta' \\ \gamma' \end{bmatrix}$$

由式(15)可知

$$\mathbf{J} = \mathbf{M}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

可见,该机构的雅克比矩阵 $\mathbf{J}$ 为下三角矩阵,表明该并联机构是完全解耦的,同时也验证了上述构型综合方法的正确性。

5 结 论

(1)本文基于 G_F 集理论,提出一种完全解耦混联机构型综合方法,同时给出了完全解耦混联机构型综合的具体设计步骤。

(2)运用该型综合方法,得到了构成 2T3R 解耦混联机构各模块单元的组形式,以其中一种组形式为例,综合出了 2T3R 五自由度完全解耦混联机构,并得到了大量新构型。

(3)针对综合出的一种解耦混联机构,推导出了该机构的雅克比矩阵,验证了混联机构的完全解耦特性。

(4)基于 G_F 集的完全解耦混联机构型综合方法可用于具有确定运动特征的解耦串联、并联、混联机构的型设计,对机构型综合具有一定的指导作用。

参考文献:

- [1] 李彬, 黄田, 刘海涛. Exechon 混联机器人三自由度并联机构模块位置分析 [J]. 中国机械工程, 2010, 21(23): 2785-2789.
- LI Bin, HUANG Tian, LIU Haitao. Position analysis of a 3-DOF PKM module for a 5-DOF hybrid robot Exechon [J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(23): 2785-2789.
- [2] HUANG T, WANG P F, ZHAO X M, et al. Design of a 4-DOF hybrid PKM module for large structural component assembly [J]. CIRP Annals: Manufacturing Technology, 2010, 59(1): 159-162.
- [3] 邓嘉鸣, 沈惠平, 蒋益兴, 等. 一种多喷枪协同式喷涂五轴混联机器人: 中国, 201110042831.1 [P]. 2011-02-23.
- [4] 姜铭, 易红. RGRR-I 构造混联 6R 机器人 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(1): 32-36.
- JIANG Ming, YI Hong. Hybrid serial-parallel 6R robot made of RGRR-I [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(1): 32-36.
- [5] 李菊, 赵德安, 沈惠平. 多喷枪协同式喷涂五轴混联机器人设计 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 216-220.
- LI Ju, ZHAO Dean, SHEN Huiping. Design of 5-axes hybrid robot with several spray guns for collaborative spraying [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 216-220.
- [6] 高云峰, 吕明睿, 周伦. 一种五自由度混联机器人运动学分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(7): 1-7.
- GAO Yunfeng, LÜ Mingrui, ZHOU Lun. Analysis of kinematics of a five-axis hybrid manipulator [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(7): 1-7.
- [7] UCHIYAMA T, TERADA H, MITSUYA H. Continuous path control of a 5-DOF parallel-serial hybrid robot [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(1): 47-50.
- [8] LIU Haitao, HUANG Tian, MEI Jianping. Kinematic design of a 5-DOF hybrid robot with large workspace/limb-stroke ratio [J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2007, 129(5): 530-537.
- [9] GÓMEZ-BRAVO F, CARBONE G, FORTES J C. Collision free trajectory planning for hybrid manipulators [J]. Mechatronics, 2012, 22(6): 836-851.
- [10] CAMPOS A, BUDDE C, HESSELBACH J. A type synthesis method for hybrid robot structures [J]. Mechanism and Machine Theory, 2008, 43(8): 984-

- 995.
- [11] 沈惠平, 赵海彬, 邓嘉鸣, 等. 基于自由度分配和方位特征集的混联机器人机型设计方法及应用 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(23): 56-64.
SHEN Huiping, ZHAO Haibin, DENG Jiaming, et al. Type design method and the application for hybrid robot based on freedom distribution and position and orientation characteristic set [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(23): 56-64.
- [12] ZENG Qiang, FANG Yuefa. Structural synthesis and analysis of serial-parallel hybrid mechanisms with spatial multi-loop kinematic chains [J]. Mechanism and Machine Theory, 2012, 49(3): 198-215.
- [13] GOGU G. Structural synthesis of fully-isotropic translational parallel robots via theory of linear transformations [J]. European Journal of Mechanics: A Solids, 2004, 23(6): 1021-1039.
- [14] ZENG D X, HUANG Z. Type synthesis of the rotational decoupled parallel mechanism based on screw theory [J]. Science China: Technological Sciences, 2011, 54(4): 998-1004.
- [15] ZHANG Y, LIU H, WU X. Kinematics analysis of a novel parallel manipulator [J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(9): 1648-1657.
- [16] KONG X W, GOSSELIN C M. Type synthesis of input-output decoupled parallel manipulators [J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2004, 28(2): 185-196.
- [17] YANG Jialun, GAO Feng, GE Qiaode Jeffrey, et al. Type synthesis of parallel mechanisms having the first class G_F sets and one-dimensional rotation [J]. Robotica, 2011, 29(6): 895-902.
- [18] 高峰. 并联机器人型综合的 G_F 集理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 9-16.
- [19] JIN Q, YANG T L. Synthesis and analysis of a group of 3-degree-of-freedom partially decoupled parallel manipulators [J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2004, 126(2): 301-306.
- [20] GAO F, LI W, ZHAO X. New kinematic structures for 2-, 3-, 4-, and 5-DoF parallel manipulator designs [J]. Mechanism and Machine Theory, 2002, 37(12): 1395-1411.

(编辑 葛赵青)

(上接第 91 页)

- DING Wen, LIANG Deliang, LUO Zhanqiang. Position sensorless control of PMSM using sliding mode observer with two-stage filter [J]. Electric Machines and Control, 2012, 16(11): 1-10.
- [10] QIAO Zhaowei, SHI Tingna, WANG Yindong, et al. New sliding-mode observer for position sensorless control of permanent-magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(2): 710-719.
- [11] FENG Yong, ZHENG Jianfei, YU Xinghuo, et al. Hybrid terminal sliding-mode observer design method for a permanent-magnet synchronous motor control system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(9): 3424-3431.
- [12] 陆姚泉, 林鹤云, 冯奕, 等. 永磁同步电机无传感器控制的软开关滑模观测器 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(2): 106-113.
LU Xiaquan, LIN Heyun, FENG Yi, et al. Soft switching sliding mode observer for PMSM sensorless control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(2): 106-113.
- 张蕾, 张爱民, 景军锋, 等. 静止无功补偿器与发电机励磁系统的自适应鲁棒协调控制策略. 2015, 49(11): 96-101. [doi: 10.7652/xjtuxb201511016]
- 李彪, 李黎川. 新型磁链观测算法及其在永磁同步电机无位置传感器控制中的应用. 2015, 49(11): 102-109. [doi: 10.7652/xjtuxb201511017]
- 常雪剑, 刘凌, 崔荣鑫. 永磁同步电机非奇异快速终端可变边界层滑模控制. 2015, 49(6): 53-59. [doi: 10.7652/xjtuxb201506009]
- 郝双晖, 王磊, 宋宝玉, 等. 交流伺服系统永磁同步电机电流及位置二级状态观测器设计. 2015, 49(5): 100-107. [doi: 10.7652/xjtuxb201505016]
- 郭伟, 王跃, 李宁. 永磁同步电机飞轮储能系统充放电控制策略. 2014, 48(10): 60-65. [doi: 10.7652/xjtuxb201410010]
- 丁树业, 刘书齐, 毕刘新, 等. 矢量控制下永磁同步电机的损耗分析. 2013, 47(12): 95-101. [doi: 10.7652/xjtuxb201312017]
- 续丹, 包鑫, 霍小宁, 等. 永磁同步电机宽速域无位置传感器控制. 2013, 47(9): 60-64. [doi: 10.7652/xjtuxb201309010]
- 罗战强, 梁得亮, 丁文. 双余度稀土永磁无刷伺服系统的控制策略. 2012, 46(12): 66-73. [doi: 10.7652/xjtuxb201212012]

(编辑 葛赵青)