

并联机构运动解耦设计方法与应用研究

沈惠平¹ 熊 坤¹ 孟庆梅¹ 刘安心²

(1. 常州大学机械工程学院, 常州 213016; 2. 解放军理工大学野战工程学院, 南京 210007)

摘要: 根据基于方位特征集(POC)的并联机构拓扑结构设计理论,对国内外已有的2~6自由度运动解耦并联机构,进行拓扑结构及其运动解耦性分析,发现机构运动解耦不仅与拓扑结构有关,而且还与运动参数有关;接着从这2个层面提出了并联机构运动解耦的4个规律,以及相应的基于基本运动链(BKC)合成与分解、基于子并联机构等效支链、基于合理选取基点,以及基于移动副平行、垂直配置等4个运动解耦设计原理及其方法,其中,提出了将并联机构的运动解耦分为位-姿分离解耦、位-姿内部解耦的思路,可作为运动解耦的方向和顺序;进一步,设计了15个运动解耦并联机构。

关键词: 并联机构; 运动解耦; 自由度; 方位特征集; 耦合度

中图分类号: TH112 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)06-0348-09

Design Methods for Kinematic Decoupled Parallel Mechanisms and Its Applications

Shen Huiping¹ Xiong Kun¹ Meng Qingmei¹ Liu Anxin²

(1. School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213016, China

2. College of Field Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: Kinematic decoupling of parallel mechanisms is a significant characteristic. Parallel mechanism with decoupling features is easy in kinematic analysis, real-time control and industrial applications. The topic was dealt by many scientists and some kinematic decoupled parallel mechanisms were proposed. The design theory for parallel mechanisms was used based on the position and orientation characteristics (POC) and the ordered single-open-chain (SOC), the existed input-output decoupled parallel mechanisms covered 2-DOF to 6-DOF were analyzed for their topology analysis and motion decoupling analysis, from which it can be known that kinematic decoupling can be viewed simultaneously into the topology decoupling and kinematic parameters decoupling. Based on this investigation, four general design rules and principles and the corresponding methods for decoupling parallel mechanisms were proposed respectively, which were based on the synthesis and decomposition of basic kinematic chain (BKC), sub parallel mechanisms, reasonable chosen base point and special prismatic joints configuration. The corresponding examples were designed to illustrate each method. Fifteen novel decoupled parallel mechanisms were totally proposed. Among them, the kinematic decoupling can be divided into position-posture separate decoupling, position-posture internal decoupling, which can be regarded as the direction and roadmap of the kinematic decoupling. The research enriched the numbers of decoupled parallel mechanisms and provided an effective methodology for decoupled parallel mechanisms design.

Key words: parallel mechanisms; kinematic decoupling; degree of freedom; position and orientation characteristics set; coupling degree

收稿日期: 2015-12-30 修回日期: 2016-02-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51375062, 51405039)、江苏省重点研发计划项目(BE2015043)和江苏省科技成果转化专项资金项目(BA2015098)

作者简介: 沈惠平(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事机构学和并联机构研究,E-mail: shp65@126.com

引言

串联机器人的每个关节可分别独立运动,因此,各运动是解耦的;而并联机器人一般为多回路结构,且各回路间存在运动耦合,这种耦合性会给予运动学、动力学性能分析和运动控制带来困难与不便。所谓机构运动耦合是指机构输出参数与输入参数之间存在相互关联、依赖;而运动解耦则是指减弱或解除输出参数对输入参数的关联或依赖度,增强输出参数各自的独立存在能力,其目的是为了机构控制方便、容易。

ZHANG 等^[1]在研究 Stewart - Gough 平台支链分布对其运动学正解计算复杂程度影响时,首次发现了当动平台上有 5 个球副共线时,动平台绕 5 个球副共线转动的那个角度仅由一条 SPS 支链决定,而其他的 5 个输出量(2 个转动角和 3 个平移量)由其他的 5 条 SPS 支链决定,也即动平台的一个转动角度与其他 5 个输出量是解耦的;而对于特殊构型的 3-2-1 式 6-SPS 机构,其动平台的 3 个转角和 3 个平移(分别由 2 组不同的 3 条 SPS 支链确定)可完全解耦分离。

后来,国内外一些学者对并联机构的运动解耦设计与分析进行了研究,一方面,分别提出了部分解耦或完全解耦的二转动^[2-3]、一平移二转动^[4-5]、三平移^[6]、XYZ 并联弹性机构^[7]、2R-3R-4R 球面^[8]、二平移二转动^[9]、三平移两转动^[10]、六自由度^[11]等并联机构,涵盖了 2~6 自由度,但总的来说,运动解耦机型还较少。另一方面,一些研究人员开始探究运动解耦的一般性设计方法^[12-17],但具体的运动解耦原理和方法尚未推出。

机构具有输入-输出运动解耦性,不仅可使其运动学、动力学分析简单,而且能简化机器人的运动、轨迹规划控制。机构输入(I)-输出(O)运动完全解耦或部分解耦,本文简称为运动解耦。最理想的情况是一个输入参数控制一个输出变量。因此,实现输入-输出运动解耦既是机构设计的重要目标,也是机构拓扑结构优化设计的重要内容,从而成为并联机构研究的热点之一,但相比于并联机构的其他研究内容(例:运动学正、逆解、工作空间、奇异性分析等),并联机构的运动解耦设计方法和解耦新机型的的设计还较少。

本文运用基于 POC (Position and orientation) 的并联机构拓扑结构设计理论,对国内外已有的 2~6 自由度运动解耦并联机构进行拓扑结构及其运动解耦性分析,提出机构运动解耦的 4 个规律;在此基础上,提出基于基本运动链(BKC)合成与分解、基于

子并联机构等效支链、基于合理选取基点,以及基于移动副平行、垂直配置的运动解耦 4 个设计原理及其方法,并据此设计 15 个运动解耦的并联机构,以期对并联机构的运动解耦设计提供有效方法。

1 并联机构运动解耦规律与设计原则

1.1 设计规律

运用基于 POC 的并联机构拓扑结构设计理论和方法,按照:机构的支链构成及布置、组成原理及拓扑结构表达,以及运动解耦性这种统一范式,对国内外已有的 2~6 自由度的 18 个运动解耦并联机构进行了案例研究,表 1 按自由度(DOF)和 POC,已将它们汇总(限于篇幅,仅将其机构简图列出,见表 1 中的图 1~18 机构^[18-33],其中,括号[]中的数字为文献的序号),具体详见文献[34];同时,发现:机构运动解耦不仅与拓扑结构有关,而且与运动参数有关,且有如下运动解耦规律:

(1) 当一个并联机构具有 2 个或 2 个以上基本运动链,且驱动副分布在不同的子运动链^[17]时,该并联机构一定可实现运动解耦;例:图 10、图 15b。

(2) 当一个并联机构包含有子并联机构的等效支链时,其动平台一部分输出运动元素由该子并联机构的驱动副决定,因此,可实现部分运动解耦,如图 10、11。

(3) 当对一个并联机构各支链中的移动副,在二维平面或三维空间内作平行、正交、圆形等特殊布置时,该机构能实现动平台二维或三维的独立解耦运动;如图 4、7、16、29b。

(4) 当一个并联机构仅由 1 个基本运动链组成,且包含 PR、PU、PC (下划线表示驱动副,下同)等特征支链^[35]时,若在特征支链上选取合理的基点(运动参考系),则也可实现运动解耦;如图 2、3、5、6、26b 等。

其中,规律(1)~(3)属于拓扑结构层面的运动解耦规律,规律(4)属于运动参考系层面的运动解耦规律。可见,机构运动解耦不仅与拓扑结构有关,而且与运动参数有关。

1.2 设计原则与流程

进一步,探讨运动解耦的设计流程和方法。根据大量运动解耦并联机构的结构特点及其分析,作者认为,为实现运动解耦,应弱化输入参数子系统与输出参数子系统间、输出参数子系统本身之间存在的耦合关系。这样,一方面,一个输出参数子系统可以独立于某个输入子系统而存在;另一方面,输出子系统之间的元素最好也没有耦合或弱耦合,且易实现模块化设计。为此,作者提出位-姿分离

解耦、位-姿内部解耦两个概念,并把它作为运动解耦的方向和顺序。

所谓“位-姿分离解耦”是指输出系统中的位移量组与转动量组整体上是分离的,但位移量、转动量组内部每个输出量仍与多输入参数存在耦合关系,因此,是一种“外部”解耦,即输入-输出具有部分运动解耦性;而“位-姿内部解耦”则是指解除或弱化输出系统中的位移量组、转动量组内部每个输出量与输入参数之间存在的耦合关系,使其每个输出量应分别与输入参数间呈一一对应关系。

需要说明的是:针对具体机构的运动解耦,有 3 类:①对纯平移(2T、3T)或纯转动(2R、3R)输出机构,无“位-姿分离解耦”,仅有“位-姿内部解耦”。②对含一个移动量或一个转动量输出机构(1T1R、1T2R、1T3R;1R2T、1R3T)而言,实际上,移动量-转动量已分离,只要进行“位-姿内部解耦”即可。③除上述情况外,对其他一般的并联机构(同时含 2 个以上移动或 2 个以上转动),例:2T2R、2T3R、3T2R、3T3R 机构,则应先进行“位-姿分离解耦”,再进行“位-姿内部解耦”。

图 19 给出了一般并联机构运动解耦从“分离解耦”到“内部解耦”的流程,表明其解耦程度越来越高,越来越有利于运动控制。其中,参数 $(x,y,z,\alpha,\beta,\gamma)^T$ 表示为六维输出,而参数 $(\theta_1,\theta_2,\theta_3,\theta_4,\theta_5,\theta_6)^T$ 表示为六维输入,典型的运动解耦情况有以下 5 种,如图 19 所示。

这一流程,也可作为并联机构运动解耦的设计原则和方法。

2 运动解耦并联机构的设计原理与方法

根据上述机构运动解耦的设计规律与流程,作者提出如下具体的设计原理与方法,并据此设计了相应的新机构。

2.1 基于基本运动链(BKC)合成与分解的设计

2.1.1 设计原理

若要设计一个给定 POC 的并联机构,其耦合度为 k ,可通过使用若干个低耦合度 $k'(k'=0 \text{ 或 } 1)$ 的 BKC($k' < k$),并使 POC 元素分别由这些低耦合度 k' 的 BKC 产生;同时,使机构的驱动副尽量分布于这些不同 BKC 内,并使这些 BKC 各产生一部分 POC 元素。这条原理也可用作对已有并联机构的运动解耦特性的性能优化,见以下两例。

2.1.2 举例

(1)设计位-姿分离解耦的 6 自由度运动平台

提出一种位-姿分离解耦的 6 自由度运动平台^[36],如图 20 所示。

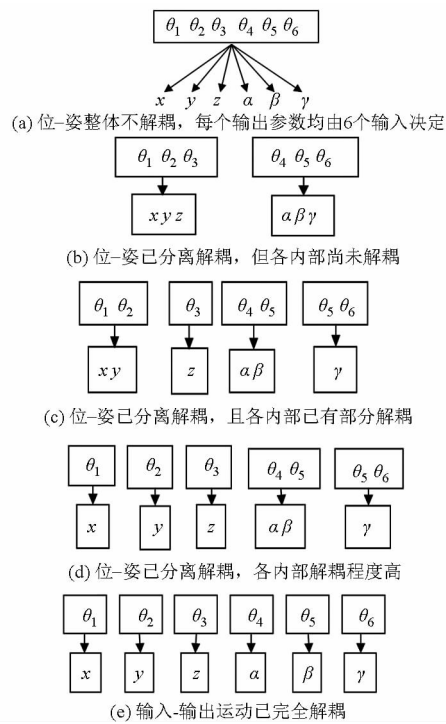


图 19 并联机构位置-姿态运动解耦的流程

Fig. 19 Roadmap of position and orientation decoupled parallel mechanisms

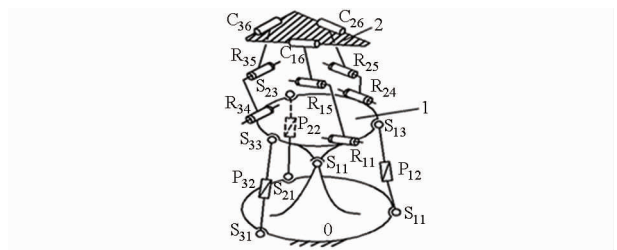


图 20 基于 BKC 合成的位-姿解耦 6-DOF 平台

Fig. 20 Design of 6-DOF position-posture decoupled platform based on synthesis of BKC

该机构包括静平台 0、中间动平台 1、输出动平台 2 及 6 条支链,其中, $SOC \{ -S_{i1} - P_{i2} - S_{i3} - \} (i = 1, 2, 3)$ 及球副 S_{41} 联接静平台 0 与中间动平台 1,构成一个 3 转动子机构(耦合度 $k = 1$);而另外 3 条支链: $SOC \{ -R_{i4} - R_{i5} - C_{i6} - \} (i = 1, 2, 3)$ 连接中间动平台 1 与输出动平台 2,构成另一个 3 平移子机构($k = 1$)。

其中,移动副 P_{12}, P_{22}, P_{32} 控制动平台 2 的 3 转动姿态;而转动副 $P_{12}, P_{22}, P_{32}, R_{14}, R_{24}, R_{34}$ 控制输出动平台 2 的 3 平移位置,从而实现位置和姿态分离解耦。该机构可代替典型的高耦合度($k = 3$)的 6-SPS Stewart 机构。此例是基于基本运动链(BKC)合成而提出。

(2)设计位-姿态分离解耦的 3-DOF 平面并联机构

图 21a 机构为作者提出的一种位-姿态分离解

耦的 3-DOF 平面并联机构,它包含 1 条混合链 $\underline{RRRRR}$ 和 1 条简单支链 $\underline{RRR}$,动平台 1 为输出构件。

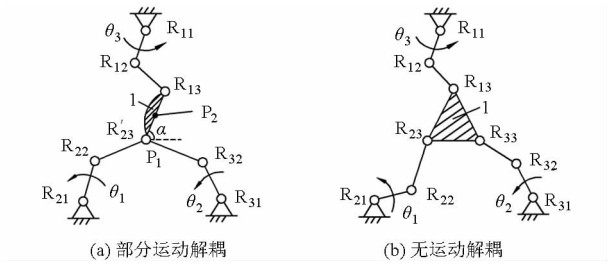


图 21 基于 BKC 分解的 3-DOF 位-姿解耦平面机构设计
Fig. 21 Design of 3-DOF position-posture planar decoupled mechanism based on decomposition of BKC

显然,第 1、2 个单开链及其约束度分别为:
 $SOC_1: R_{21} - R_{22} - R'_{23} - R_{32} - R_{31}$
 $\Delta_1 = f_1 - I_1 - \xi_1 = 5 - 2 - 3 = 0$
 $SOC_2: R_{11} - R_{12} - R_{13} - R'_{23}$
 $\Delta_2 = f_2 - I_2 - \xi_2 = 4 - 1 - 3 = 0$
即该机构包含 2 个 $k=0$ 的 BKC(即 Assur II 运动链),机构耦合度 $k=0$ 。

此时,若选动平台 1 上的 P_1 为基点,则动平台 1 的位置 P_1 由转角 $\theta_1、\theta_2$ 确定;而其姿态角 α 由转角 $\theta_1、\theta_2、\theta_3$ 角确定,从而实现了位-姿态分离解耦性,具有部分运动解耦性。

若选取动平台 1 上的 P_2 点为基点,则其位置 (x,y) 和姿态角 α 均由 $\theta_1、\theta_2、\theta_3$ 确定,从而无位-姿解耦性。可见,机构的位-姿解耦性与基点选择有关。

而典型的具有平面定位功能的 3-DOF 平面 3- $\underline{RRR}$ 机构,如图 21b 所示,该机构耦合度 $k=1$,包含 1 个 $k=1$ 的 BKC(Assur III 级运动链),且三角形动平台 1 的两平移 (x,y) 一转动 (θ) 输出运动,均由 3 个驱动转动副 $R_{11}、R_{21}、R_{31}$ 的转角 $\theta_1、\theta_2、\theta_3$ 确定。因此,该机构为输入-输出强运动耦合。

此例是基于基本运动链(BKC)分解而提出的。

2.2 基于子并联机构(sub-PKM)的设计

2.2.1 设计原理

将目前已有的结构较简单的实用并联机构(一般选择自由度小于等于 3)作为子并联机构,在其输出构件子平台上再串联 1、2 个单自由度运动副(R、P)或多自由度运动副(C、T、S)作为一条混合支链,连接到动平台的一端;而在动平台的其他端再串联 1 条或几条 $\underline{SPS}$ (或 $\underline{SSR}$)型无约束支链,则可实现动平台输出运动的部分解耦,即由子并联机构内的驱动副确定的输出子平台运动元素作为动平台输出运动的一部分;而 $\underline{SPS}$ (或 $\underline{SSR}$)支链上的驱动副确定

其动平台的其他部分输出元素,从而实现位-姿分离解耦。

2.2.2 举例

(1)设计位-姿分离解耦的 3 平移 n 转动并联机构($n=1、2、3$)

如图 22 所示,在一个三维纯平移子并联机构的输出子动平台 1' 上,串联一个转动副 R_7 ,构成的混合支链末端产生三维平移一转动的输出,记 $HSOC\{-P^{(3T-0R)}-P^{(3T-0R)}-P^{(3T-0R)}-R-\}$,并将之联接

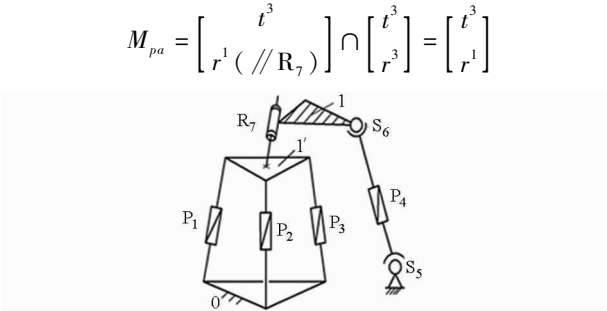


图 22 基于 3 平移子并联机构的 4-DOF 位-姿解耦机构设计
Fig. 22 Design of 4-DOF 3T1R decoupled parallel mechanism based on 3T sub-parallel mechanism

因此,动平台 1 产生 3 平移 1 转动的输出运动,即,动平台 1 的位置 $O(x,y,z)$ 由子并联机构中的 3 个驱动副 $P_1、P_2、P_3$ 确定;而其绕转动副 R_7 轴线的姿态角 α 则由 $P_1、P_2、P_3$ 和 $\underline{SPS}$ 支链中的驱动副 P_4 共同决定。因此,该机构具有部分运动解耦性。

同理,如图 23 所示,若在子动平台 1' 上,串联一个 T 副或 S 副,并相应添加 2 条或 3 条 $\underline{SPS}$ 支链,则构成 5-DOF 的 3T2R(图 23a)或 6-DOF 的 3T3R(图 23b)位-姿分离解耦机构,即它们的移动量和转动量是解耦分离的。

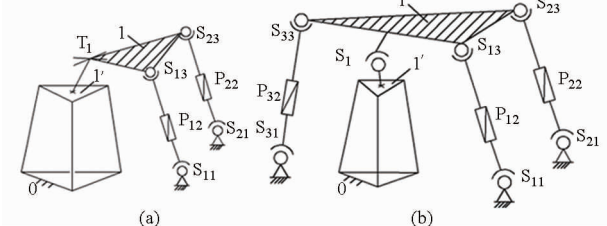


图 23 基于三平移机构的 5-DOF 或 6-DOF 位-姿分离解耦机构
Fig. 23 Design of 5-DOF or 6-DOF decoupled parallel mechanisms based on 3T sub-parallel mechanisms

同样,如图 24 所示,在一个二维纯平移子并联机构的输出子动平台 1' 上,串联一个轴线垂直于二维平动平面的圆柱副 C_1 ,构成的混合支链产生三平

移—转动输出,记 $HSOC \{ -P^{(4-4P)} - P^{(4-4P)} - C \}$, 并将之联接到动平台 1 的一端;而在动平台 1 的另一端联接 2 条 $\underline{SPS}$ 支链,最终得到的并联机构动平台 1 的方位特征集 M_{pa} 为

$$M_{pa} = \left[\begin{matrix} t^2 \cup t^1 (// C_1) \\ r^1 (// C_1) \end{matrix} \right] \cap \left[\begin{matrix} t^3 \\ r^3 \end{matrix} \right] \cap \left[\begin{matrix} t^3 \\ r^3 \end{matrix} \right] = \left[\begin{matrix} t^3 \\ r^1 \end{matrix} \right]$$

因此,动平台 1 产生三平移—转动的输出运动,其中,位置 (x,y) 由子并联机构中的 2 个驱动副 P_{11} 、 P_{21} 确定;而沿圆柱副 C_1 轴线的位置 z 及其转角 α 由 P_{11} 、 P_{21} 和其他 2 条 $\underline{SPS}$ 支链中驱动副 P_{32} 、 P_{42} 确定。该机构不仅位—姿分离解耦,而且位置内部也已解耦。

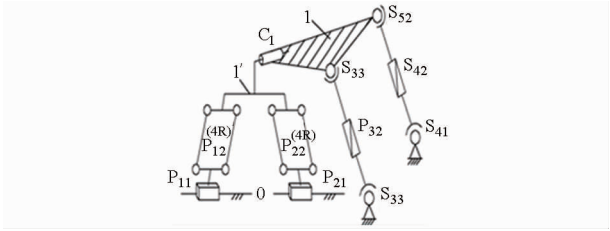


图 24 基于两平移子并联机构的 4-DOF 位姿解耦机构设计

Fig.24 Design of position-posture decoupled 4-DOF parallel mechanisms based on 2T sub-parallel mechanisms

同理,如图 25 所示,若在子动平台 1' 上,串联一个 U 副或 S 副,并相应添加 2 条或 3 条 $\underline{SPS}$ 支链,则构成 4-DOF 的 2T2R (图 25a) 以及 5-DOF 的 2T3R (图 25b) 运动解耦机构,它们的移动量和转动量是解耦分离的。

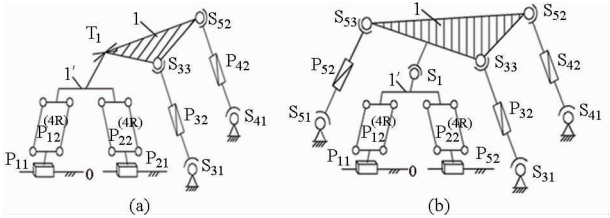


图 25 基于两平移子并联机构的 4-DOF 或 5-DOF 位姿解耦机构

Fig.25 Design of position-posture decoupled 4-DOF or 5-DOF parallel mechanisms based on 2T sub-parallel mechanisms

2.3 基于合理选取基点的设计

2.3.1 设计原理

将 $\underline{PR}$ 、 $\underline{PU}$ 、 $\underline{PC}$ 、 $\underline{PS}$ 或 $\underline{RR}$ 、 $\underline{RU}$ 、 $\underline{RC}$ 、 $\underline{RS}$ 等“一杆两副”型特征支链^[35],作为动、静平台之间的 1 条支链;其余为 $\underline{SPS}$ 或 $\underline{PSS}$ 、 $\underline{RSS}$ 型无约束支链,且选取特征支链上运动位置已知的点作为基点(该点也是动平台运动副轴线上的一点),则该基点(即动平台)的位置由特征支链上的驱动副 $\underline{P}$ 或 $\underline{R}$ 决定;而其姿态角则由其它 $\underline{SPS}$ 、 $\underline{PSS}$ 或 $\underline{RSS}$ 支链上的驱动副确定,从而实现位置和姿态的部分解耦。

2.3.2 举例

(1)设计位—姿分离解耦的 1T2R 并联机构

如图 26a 所示,该机构由静平台 0、动平台 1 及 1 条 $\{ \underline{P} - \underline{RR} \}$ 型支链、两条 $\underline{SPS}$ 型支链组成。

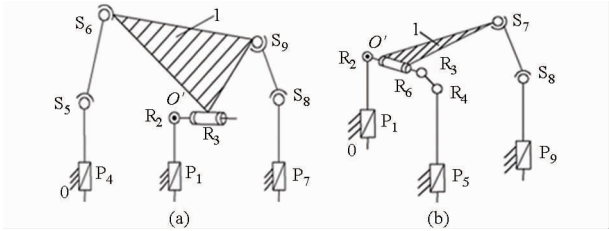


图 26 基于合理基点的位—姿解耦 3-DOF 机构设计

Fig.26 Design of position-posture decoupled 3-DOF parallel mechanisms based on reasonable chosen base point

该机构动平台 1 的方位特征集 M_{pa} 为

$$M_{pa} = \left[\begin{matrix} t^1 (// P_1) \\ r^2 (// \diamond (R_2, R_3)) \end{matrix} \right] \cap \left[\begin{matrix} t^3 \\ r^3 \end{matrix} \right] \cap \left[\begin{matrix} t^3 \\ r^3 \end{matrix} \right] = \left[\begin{matrix} t^1 \\ r^2 \end{matrix} \right]$$

即该机构动平台 1 产生两转动—一平移输出。选取第 1 条支链 R_2 副与 R_3 副两轴线的交点为基点 O' ,显然,基点 O' 的位置只由 P_1 副输入确定,即动平台 1 的位置由驱动副 P_1 确定,而其 2 个转动姿态角由驱动副 P_1 、 P_4 和 P_7 确定,因此,该机构具有位—姿分离解耦。若基点 O' 取在动平台 1 内任一点,则动平台 1 的位置、2 个转动姿态角均由 P_1 、 P_4 、 P_7 三者确定,无位—姿分离解耦。

图 26b 所示机构的位—姿分离解耦性,与图 26a 所示的机构一样。

(2)设计位—姿分离解耦的 2~4 DOF 并联机构

如图 27 所示,若动平台 1 的 1 条支链分别为由 1 个 $\underline{R}$ 副和 $\underline{C}$ 副、 $\underline{T}$ 副或 $\underline{S}$ 副组成的 $\underline{PR}$ 、 $\underline{PC}$ 、 $\underline{PT}$ 、 $\underline{PS}$ 特征支链;相应地添加 1 条、3 条或 4 条 $\underline{SPS}$ 支链,则构成 2-DOF 的 1T1R (图 27a)、3-DOF 的 2T1R (图 27b)、1T2R (图 27c) 以及 4-DOF 的 1T3R (图 27d) 位—姿分离解耦机构,它们的移动量和转动量是解耦分离的。

2.4 基于移动副平行、垂直配置的设计

2.4.1 设计原理

利用移动副或含移动自由度的圆柱副的特殊配置的方法,即将支链上 2 个或多个移动副或圆柱副按平行或垂直的配置方式进行装配,并给予驱动副合理的驱动顺序和形式,可实现预期的单向平动或转动运动,从而实现机构位—姿态的分离解耦。

2.4.2 举例

(1)3 自由度两平移—转动解耦平面机构设计

基于上述原理,提出一种特殊拓扑结构的 3- $\underline{PRP}$ 并联平面定位机构,其 3 条支链结构均为 $\underline{P} \perp \underline{R} \perp \underline{P}$ 。如图 28a 所示,当移动副 P_3 位置不变, P_1 、 P_2

副以相同速度同向驱动时,动平台 1 沿 y 轴向运动,即 $P_y = f_1(P_1, P_2)$;而当移动副 P_1 、 P_2 位置不变, P_3 副驱动时,动平台 1 沿 x 轴向运动,即 $P_x = f_2(P_1)$;而当 P_1 、 P_2 、 P_3 副三者协调运动时,如图 28b 所示,则可实现动平台 1 的转动,因此,该机构实现了位-姿态分离解耦。

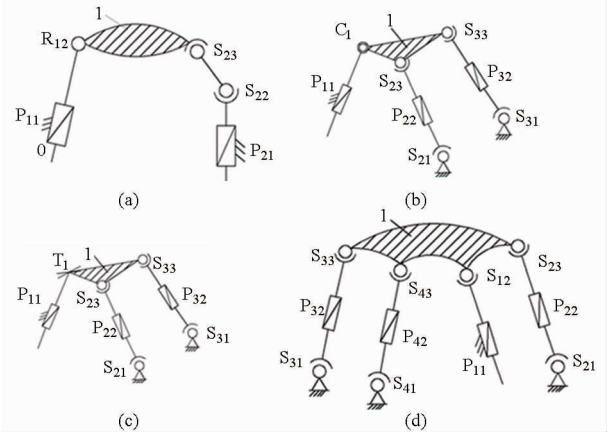


图 27 基于一平移子机构的 2-DOF ~ 4-DOF 解耦机构设计

Fig. 27 Design of 2-DOF ~ 4-DOF decoupled mechanisms based on selection of proper reference point

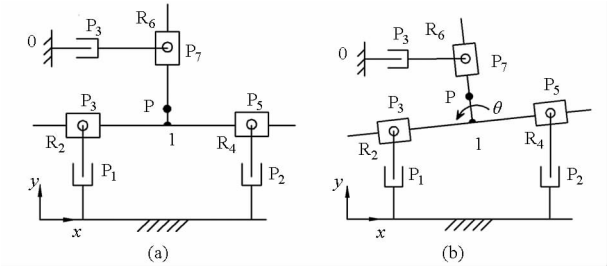


图 28 基于移动副平行、垂直配置的解耦 3-DOF 机构设计

Fig. 28 Design of 3-DOF parallel mechanism based on parallel placement of cylindrical joints

(2) 3 自由度 3 平移解耦并联机构的设计

3 平移 3-R//R//C 并联机构的一种典型构型如图 29a 所示^[37],它由三角形动、静平台及 3 条结构相同的支链组成,每条支链的 3 个运动副轴线相互平行,而静平台上运动副轴线分别与三角形一条边重合。该机构耦合度 $k = 1$,位置输入-输出之间为强耦合。

保持 3 条支链的结构不变,仅优化其在动、静平台之间的拓扑结构,即 R_{11} 与 R_{21} 轴线平行,但与 R_{31} 垂直,如图 29b 所示。由文献[34]可知,该机构的 x 、 z 量由驱动副 R_{11} 与 R_{21} 两者决定;而 y 量由驱动副 R_{11} 、 R_{21} 、 R_{31} 三者决定;因此,属于位置内部解耦,

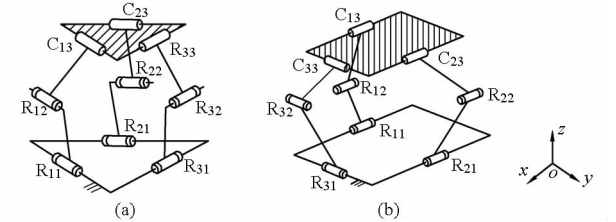


图 29 基于移动自由度平行、垂直的解耦 3-DOF 机构设计

Fig. 29 Design of 3T decoupled parallel mechanisms based on parallel placement of cylindrical joints

该机构具有部分运动解耦性。

3 结论

提出了机构运动解耦的设计原则和一般流程,以及基于基本运动链(BKC)合成与分解、基于子并联机构、基于合理选取基点,以及移动副平行或垂直配置的运动解耦设计原理与方法;据此设计了相应的 15 个位置-姿态运动解耦的新型并联机构(表 1 中加框者),得到的结论是:

(1) 提出的位-姿分离解耦、位-姿内部解耦两个概念,反映了运动解耦的方向和顺序;从位-姿分离解耦到内部解耦,解耦程度不断提高,有利于运动控制。

(2) 运动解耦的本质是弱化或解除机构输出参数对输入参数的依赖,即削弱输入参数对输出参数的控制,增强输出参数的独立存在性,尽可能地消除输入与输出之间存在的耦合与依赖。

(3) 机构运动解耦不仅取决于机构的拓扑结构,即①若一个机构至少包含 2 个基本运动链(BKC),且驱动副的位置在不同的子运动链中,则该机构一定运动解耦。②当一个并联机构包含有子并联机构的等效支链时,其动平台一部分输出运动元素由该子并联机构的驱动副决定,可实现部分运动解耦。③当对一个并联机构各支链中的移动副,作特殊布置(平行、垂直)时,该机构能实现部分运动解耦。同时,也取决于机构的运动参数,即当一个并联机构仅由一个基本运动链组成,且包含 $\underline{PR}$ 、 $\underline{PU}$ 、 $\underline{PC}$ 等特征支链时,若在特征支链上选取合理的基点,也可实现运动解耦。

(4) 提出的 4 种运动解耦机构设计方法,丰富、完善了并联机构运动解耦理论研究及其设计内容,且原理简单、实用,具有较好的启示性,据此,可提出更多实用的运动解耦机构。

参 考 文 献

1 ZHANG Changde, SONG Shinmin. Forward kinematics of a class of parallel (Stewart) platforms with closed-form solutions [J]. Journal of Robotic Systems, 1992, 9(1): 93 ~ 112.

- 2 黄真,刘婧芳,李艳文. 论机构自由度:寻找了 150 年的自由度通用公式[M]. 北京:科学出版社,2011.
- 3 侯雨雷,卢文娟,曾达幸,等. 运动解耦的两自由度转动并联机构:中国,CN1010617042[P]. 2010-12-24.
- 4 JIN Qiong, YANG Tingli. Synthesis and analysis of a group of 3-degree-offreedom partially decoupled parallel manipulators[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2004, 126: 301-306.
- 5 赵新华,李彬,魏璇. 一种全解耦三自由度空间并联机器人机构:中国, CN200910228323[P]. 2010-06-09.
- 6 LI Weimin, GAO Feng, ZHANG Jianjun. A three-dof translation manipulator with decoupled geometry[J]. Robotica, 2005, 23(6): 805-808.
- 7 SHORYA A, JOHN U, SHILADITYA S. An XYZ parallel-kinematic flexure mechanism with geometrically decoupled degrees of freedom[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2013, 5(1): 015001-1-015001-7.
- 8 杭鲁滨,王彦,吴俊,等. 基于拓扑解耦准则的球面并联机构解耦条件研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(9): 28-32. HANG Lubin, WANG Yan, WU Jun, et al. Research on decoupling conditions of spherical parallel mechanism based on the topological decoupling rules[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(9): 28-32. (in Chinese)
- 9 ZENG Qiang, FANG Yuefa, KORNEI F E. Design of a novel 4-dof kinematic tropic hybrid parallel manipulator [J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2011, 133(12): 121006-1-121006-9.
- 10 石志新,罗玉峰,叶梅燕. 一类新型 5 自由度解耦并联机器人机构及位置分析[J]. 机床与液压, 2010, 38(17): 5-8. SHI Zhixin, LUO Yufeng, YE Meiyun. Configuration design and displacement analysis for a class of novel fully decoupling 5 dof parallel manipulators [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2010, 38(17): 5-8. (in Chinese)
- 11 JIN Yan, CHEN I M, YANG Guilin. Kinematic design of a 6-dof parallel manipulator with decoupled translation and rotation[J]. IEEE Transactions of Robotics, 2006, 22(3): 545-551.
- 12 张帆,张丹. 基于支链驱动理论的解耦球面转动并联机构型综合[J]. 农业机械学报, 2011, 42(11): 195-199. ZHANG Fan, ZHANG Dan. Structural synthesis of decoupled spherical parallel mechanism based on driven-chain principle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11): 195-199. (in Chinese)
- 13 童幸,高峰,张勇. 操作机主运动机构的解耦性研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(11): 14-20. TONG Xing, GAO Feng, ZHANG Yong. Research on decoupling performance of major-motion mechanism for forging manipulators [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(11): 14-20. (in Chinese)
- 14 HAYWARD V, NEMRI C, CHEN Xianze, et al. Kinematic decoupling in mechanisms and application to a passive hand controller design[J]. Journal of Robotic Systems, 1993, 10(5): 767-790.
- 15 KONG Xianwen, GOSSELIN C M. Type synthesis of input-output decoupled parallel manipulators [J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2004, 28(2A): 185-196.
- 16 BARON L, ANGELES J. The kinematic decoupling of parallel manipulators using joint-sensor data[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2000, 16(6): 644-651.
- 17 杨廷力. 机器人机构拓扑结构学[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.
- 18 HERVE J M. Uncoupled actuation of pan-tilt wrists[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2006, 22(1): 56-64.
- 19 曲云霞. 二自由度解耦球面并联机构运动学行为研究[D]. 天津:河北工业大学, 2008. QU Yunxia. Research on kinematics behaviors of 2-dof decoupled spherical parallel mechanisms[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2008. (in Chinese)
- 20 MARCO C, VINCENZO P C. A novel fully decoupled two-degrees-of-freedom parallel wrist [J]. International Journal of Robotics Research, 2004, 23(6): 661-667.
- 21 张志胜,郑建勇,史金飞,等. 一种运动解耦的 XY 向精密定位平台:中国, CN101556933A[P]. 2009-10-14.
- 22 窦玉超,曾达幸,李明洋,等. 一种两转一移完全解耦并联机器人机构及其特性分析[J]. 中国机械工程, 2014, 25(2): 241-245. DOU Yuchao, ZENG Daxing, LI Mingyang, et al. Analysis of a 2T1R fully decoupled parallel robot mechanism and its characteristics[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(2): 241-245. (in Chinese)
- 23 张彦斌,吴鑫. 无耦合 3 自由度并联机构的设计与分析 [J]. 农业机械学报, 2008, 39(8): 208-210. ZHANG Yanbin, WU Xin. Design and analysis of no coupling 3 dof parallel mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(8): 208-210. (in Chinese)
- 24 石志新,叶梅燕. 一类新型全解耦三平移并联机器人机构的构型设计[J]. 机械设计与制造, 2010(8): 178-180. SHI Zhixin, YE Meiyun. Configuration design of a class of novel fully decoupled three-translation parallel manipulators [J]. Machinery Design & Manufacture, 2010(8): 178-180. (in Chinese)
- 25 李秦川,武传宇,沈卫平,等. 新型 3-P_cR_xS 球面 3 自由度并联机构[J]. 机械工程学报, 2006, 42(11): 44-47. LI Qinchuan, WU Chuanyu, SHEN Weiping, et al. Novel 3-P_cR_xS 3-dof parallel mechanism[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(11): 44-47. (in Chinese)
- 26 余顺年,陈拓西. 两平移两转动并联机器人机构运动学分析[J]. 机械工程师, 2006(9): 33-35. YU Shunian, CHEN Exi. Kinematics analysis for a parallel robot mechanism with 2 translational freedom and 2 rotational freedom [J]. Mechanical Engineer, 2006(9): 33-35. (in Chinese)
- 27 杭鲁滨,王彦,杨廷力. 一种新型三平移一转动解耦并联机构分析[J]. 中国机械工程, 2004, 15(12): 1035-1037. HANG Lubin, WANG Yan, YANG Tingli. Analysis of a new type 3 translations-1 rotation decoupled parallel manipulator[J]. China

- Mechanical Engineering, 2004, 15(12): 1035 – 1037. (in Chinese)
- 28 ALTUZARRA O, LOIZAGA M, PINTO C. Synthesis of partially decoupled multi-level manipulators with lower mobility[J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(1): 106 – 118.
- 29 SÉBASTIEN B, ILIAN A B. Pantopteron-4: a new 3T1R decoupled parallel manipulator for pick-and-place applications[J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(5): 707 – 721.
- 30 SÉBASTIEN B, VIGEN A, SYLVAIN G. PAMINSA: a new family of partially decoupled parallel manipulators[J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(2): 425 – 444.
- 31 张建民, 李为民, 高峰, 等. 一种新型正交结构 6 – PPPS 并联机构及其运动学解耦性研究[J]. 机械设计及研究, 2004, 20(增刊 1): 210 – 213.
- ZHANG Jianmin, LI Weimin, GAO Feng, et al. Study on kinematics decoupling characteristic of a new 6 – PPPS parallel mechanism with vertical structure[J]. Mechanical Design and Research, 2004, 20(Supp. 1): 210 – 213. (in Chinese)
- 32 GLAZUNOV V. Design of decoupled parallel manipulators by means of the theory of screws[J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(2): 239 – 250.
- 33 LEGNANI G, FASSI I, GIBERTI H, et al. A new isotropic and decoupled 6-DOF parallel manipulator[J]. Mechanism and Machine Theory, 2012, 58: 64 – 81.
- 34 熊坤. 基于 POC 法的并联机构运动特性及其应用研究[D]. 常州: 常州大学, 2016.
- XIONG Kun. Research on kinematic performance and its application based on POC method [D]. Changzhou: Changzhou University, 2016. (in Chinese)
- 35 朱帅帅. 特殊五自由度并联机构及其结构特性分析[D]. 常州: 常州大学, 2014.
- ZHU Shuaishuai. Special five degrees of freedom parallel mechanism and its structural characteristics analysis [D]. Changzhou: Changzhou University, 2014. (in Chinese)
- 36 沈惠平, 黄涛, 邓嘉鸣, 等. 一种位置和姿态解耦的双并联六自由度运动平台: 中国, ZL201210323495. 2[P]. 2015 – 04 – 15.
- 37 杨廷力, 刘安心, 罗玉峰, 等. 机器人机构拓扑结构设计[M]. 北京: 科学出版社, 2012.

(上接第 380 页)

- 18 YAN Chenggang, GAO Feng, GUO Weizhong. Coordinated kinematic modeling for motion planning of heavy-duty manipulators in an integrated open-die forging centre[J]. Proc. IMech E, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2009, 223(10): 1299 – 1313.
- 19 LALIBERTE T, GOSSELIN C. Construction, mobility analysis and synthesis of polyhedra with articulated faces[J]. ASME Journal of Mechanisms and Robotics, 2014, 6(1): 011007.
- 20 CAMPOS A, BUDDE C, HESSELBACH J. A type synthesis method for hybrid robot structures[J]. Mechanism and Machine Theory, 2008, 43(8): 984 – 995.
- 21 杨毅, 丁希仑. 基于空间多面体向心机构的伸展臂设计研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(5): 26 – 34.
- YANG Yi, DING Xilun. Design and analysis of mast based on spatial polyhedral linkages mechanism along radial axes[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(5): 26 – 34. (in Chinese)
- 22 LU Shengnan, ZLATANOV Dimitar, DING Xilun, et al. Novel deployable mechanisms with decoupled degrees-of-freedom[J]. ASME Journal of Mechanisms and Robotics, 2016, 8(2): 021008.
- 23 刘婧芳, 黄晓欧, 余跃庆, 等. 多环耦合机构末端件自由度计算的等效法[J]. 机械工程学报, 2014, 50(23): 13 – 19.
- LIU Jingfang, HUANG Xiaou, YU Yueqing, et al. Equivalent method of output mobility calculation for a novel multi-loop coupled mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(23): 13 – 19. (in Chinese)
- 24 高慧芳, 刘婧芳, 黄晓欧. 基于独立运动分流标记法的多环耦合机构自由度分析方法[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(11): 1658 – 1664.
- GAO Huifang, LIU Jingfang, HUANG Xiaou. Method of mobility calculation for a coupled mechanism based on independent motion shunting measurement[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41(11): 1658 – 1664. (in Chinese)