DOI: 10.3901/JME.2021.01.001

与串并联机构运动等效的新型并联机构 综合方法研究*

孙 静¹ 单彦霞^{1,2} 张建伟¹ 邵 磊¹ 李仕华¹

(1. 燕山大学河北省并联机器人与机电系统重点实验室 秦皇岛 066004;

2. 燕山大学里仁学院 秦皇岛 066004)

摘要: 为简化串并联机构结构, 使该类机构得到更好的应用, 提出一类与串并联机构运动等效的并联机构, 其特点在于没有中间平台, 两个并联机构通过对应分支直接连接或共用部分运动副连接在一起融合为一个整体机构。基于螺旋理论, 提出了这类并联机构综合方法, 给出了综合条件, 制定了综合流程。采用该方法, 对与三转动机构和三平移机构构成的串并联机构运动等效的新型 6 自由度并联机构进行了综合, 综合出多种新机构, 丰富了并联机构构型。新型 6 自由度并联机构结构上具有结构简单、紧凑, 轻量化的优点。对综合出的机构进行约束力分析表明, 球面三转动子机构力学分析中不存在静不定问题。综合的 6 自由度并联机构以其在结构和分析上的优点, 在指向隔振等领域具有良好的应用前景。

关键词: 串并联机构; 运动等效特性; 螺旋理论; 综合方法; 新型 6 自由度并联机构

中图分类号: TH112

Research on Synthesis Method of Novel Parallel Mechanisms with Equivalent Motion to Serial-parallel Mechanism

SUN Jing¹ SHAN Yanxia^{1,2} ZHANG Jianwei¹ SHAO Lei¹ LI Shihua¹

(1. Parallel Robot and Mechatronic System Laboratory of Hebei Province, Yanshan University,

Qinhuangdao 066004;

2. Liren College, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract: In order to simplify the structure of the serial-parallel mechanisms and make this kind of mechanisms better applied, a novel kind of parallel mechanisms with equivalent kinematics to serial-parallel mechanisms are proposed. The difference is that two parallel mechanisms are directly connected through corresponding branches or indirectly connected through the common kinematic pairs of corresponding branches to form an integral mechanism with no intermediate platform. Based on screw theory, a new synthesis method for this kind of novel mechanisms is proposed, the synthesis conditions are given and the synthesis process is formulated. With this method, new six degrees of freedom (6-DOF) parallel mechanisms with equivalent kinematics to serial-parallel mechanisms composed of 3-DOF rotational mechanisms and 3-DOF translational mechanisms are synthesized. Some new mechanisms have been synthesized, which enriches the parallel mechanism configurations. The new 6-DOF parallel mechanisms have simple and compact structure. The constraint force analysis indicates that there exists no statically indeterminate problem in the spherical 3-DOF rotational mechanism. The synthesized 6-DOF parallel mechanisms have potential application to pointing and vibration isolation platform for the advantages of structure and analysis.

Key words: serial-parallel mechanism; equivalent motion characteristic; screw theory; synthesis method; novel 6-DOF parallel mechanisms

* 国家自然科学基金(51775475)和河北省自然科学基金重点(E2016203463)

资助项目。20200110 收到初稿, 20200302 收到修改稿

0 前言

并联机构构型综合一直以来都是机构学重点研究方向,国内外学者在这方面做了大量的研究工作,综合方法主要有:基于位移群论的构型综合方法、基于螺旋理论的构型综合方法和基于拓扑结构学的构型综合方法等^[1]。并联机构综合已经从特定自由度机构综合向解耦并联机构、各向同性并联机构和多模式并联机构等具有特殊运动特性的机构综合方向发展^[2-6],目的都是为了更好地推动并联机构的发展与应用。

随着机械结构的不断发展,由并联机构串联构成的串并联机构因其具有更多的优点得到了许多学者的重视^[7-9]。串并联机构是由两个并联机构通过中间平台串联而形成的机构,两个并联机构既可以是相同的机构也可以是不同的机构。串并联机构具有两个子并联机构运动互不影响、满足运动叠加的运动特性。梁辉等^[10]提出一种 3-UPU 机构与 3-RPS 机构串联的串并联机构,对其进行了速度、加速度分析和静力学分析。TANIO^[11]提出了一种新型串并联机械手(2-SPS+RCR)+(SPS+RPS+RPR)机构,对其进行了自由度和运动学分析。GALLARDO-ALVARADO 等^[12-13]对一种 2(3-RPS)机构的运动学、奇异性和动力学进行了分析。虞启凯等^[14]提出了一种底部是基于 Delta 机构、上面是球面 2 自由度五杆机构和一个独立旋转复合结构的 6-DOF 串并联机构,建立了机构的雅可比矩阵,对机构的灵巧度综合评价进行了研究。胡波等^[15-17]对提出的串并联机构的运动学及动力学分析等问题进行了深入的研究。JUNG 等^[19-20]对柔性串并联机构的刚度问题进行研究^[18]。CHONG 等对基于 3-RRS 并联机构组合成的 $n(3RRS)$ 多个并联机构串联的串并联机构的工作空间进行了研究。串并联机构在一些领域得到了很好的应用。李锐明等^[21]提出了两个空间 3-RPR 并联机构组成的串并联机构,其三个平台均为可缩放移动平台,通过三个平台依次缩放配合支链的伸缩,该机构可实现蠕动运动。RAN 等^[22]将两个 3-RPC 与单自由度伸缩平台构造成串并联机构并应用于蠕虫机器人,对其进行了步态规划和动力学分析。LIANG 等^[23]设计了一种基于(3-UPS+S)+(6-UPS)串并联机构的人形机器人的腰干。

然而传统串并联机构结构相对复杂,中间平台会增加机构的额外负载,也会增加机构运动学、静力学和动力学分析的难度。因此,本文提出了一种没有串并联机构的中间平台却与串并联机构运动等

效的新型并联机构,这不仅可以使机构变得简单,还可以消除机构中部分约束,消除机构中的静不定,使机构的力学分析变得更加容易。提出了新型并联机构综合方法,制定了综合流程,并采用该方法综合了与三转动机构与三平移机构串联构成的串并联机构运动等效的新型 6 自由度并联机构,并对机构应用进行了展望。

1 新型并联机构综合方法

新型并联机构综合首先需要根据期望自由度和运动性质,确定两个子并联机构的自由度和运动性质,然后确定子并联机构 1 和子并联机构 2 的机构构型并按分支运动副个数对子并联机构 1 和子并联机构 2 进行分类,其次确定分支连接形式和组合构型,再根据综合条件判断组合机构是否为满足要求的构型,最后对综合出的新型并联机构的自由度和运动性质进行验证。

1.1 综合条件

与串并联机构运动等效的新型并联机构综合条件涉及两个子机构的分支数、与平台相连的运动副布置形式及运动等效的判定条件。

设子机构 1 的分支数为 n_1 , 设子机构 2 的分支数为 n_2 , 两个机构串联时通过分支连接融合为一个新机构, 需要满足两个子机构的分支数相等, 即 $n_1 = n_2$, 并且两个子机构均为对称并联机构, 每个分支有一个驱动。

子机构 1 与子机构 2 串联时, 去掉中间平台将两个机构分支连接在一起, 构成一个新整体机构, 可以通过两个机构对应分支直接连接或者使两个机构对应分支共用部分运动副连接。当两个机构分支共用运动副连接时, 需要满足子机构 1 各分支与上平台连接的若干个运动副布置形式和子机构 2 各分支与下平台连接的若干个运动副布置形式相同的条件。

设子机构 1 的运动螺旋系为 $\$1$, 子机构 2 的运动螺旋系为 $\$2$, 两个机构通过分支连接构成的新机构的运动螺旋系为 $\$$ 。刚化子机构 2 的驱动副, 新机构剩余运动副构成的机构的运动螺旋系为 $\$1'$, 刚化子机构 1 驱动副, 新机构剩余运动副构成的机构的运动螺旋系为 $\$2'$ 。若要满足子机构 1 与子机构 2 串联融合后, 仍然具有子机构 1 与子机构 2 串联融合成的串并联机构的运动特性, 即两个子机构的运动互相不产生影响, 则需要满足运动等效判定条件

$$\$1 = \$1' \quad \$2 = \$2' \quad (1)$$

在去掉传统串并联机构的中间平台, 将两个子

机构通过对应分支直接连接或共用部分运动副连接在一起融合为一个新机构时, 会消除原有机构中的一些约束, 要想使新机构仍具有传统串并联机构中两个子机构的运动互不影响、运动可以叠加的运动特性, 就需要两个子机构中存在过约束, 这也是构成新型机构的子机构的一个特点。

1.2 综合流程

综合期望自由度的与串并联机构运动等效的新机构, 首先需要根据期望自由度, 确定其运动螺旋系, 再确定子机构 1 和子机构 2 的运动螺旋系, 然后根据螺旋理论等机构综合方法或者通过现有机构综合的研究成果确定子机构 1 和子机构 2 的构型集合, 并对机构的分支运动副的数目进行分类, 确定两个机构的分支运动副的最大的数目, 再根据融合条件即可确定满足要求的新型并联机构。最后, 通过自由度计算公式和螺旋理论验证机构的自由度和运动性质是否满足要求。综合流程图如图 1 所示。

图 1 融合串并联机构综合流程图

(1) 根据期望自由度确定子机构 1、子机构 2 的构型集合。

根据期望的新型并联机构的自由度 M , 确定子机构 1 自由度 M_1 , 子机构 2 自由度 M_2 。

子机构 1 和子机构 2 串联, 满足以下关系

$$\mathcal{S} = \mathcal{S}_1 \cup \mathcal{S}_2 \quad (2)$$

由式(2)可以确定子机构 1 和子机构 2 的自由度

和运动螺旋系, 通过螺旋理论等机构综合方法或已有的机构综合研究结果, 可以得到子机构 1 和子机构 2 的构型集合。

设子机构 1 的构型构成集合 A , 子机构 2 的构型构成集合 B 。按分支运动副个数对子机构 1 和子机构 2 进行分类, 并确定集合 A 和集合 B 中分支运动副个数的最大值 n_{Amax} 、 n_{Bmax} (这里需要将 C 副、 U 副和 S 副等效成 R 副和 P 副进行计算)。

(2) 选取集合 A 、 B 中元素构成组合机构。

设子机构 1 和子机构 2 分支连接时共用运动副个数为 n_s , 当 $n_s = 0$ 时, 即为子机构 1 分支与子机构 2 分支直接连接的情况。

当 $n_s \neq 0$ 时, 分支可以共用 R 副和 P 副, 至于共用 U 副和共用 S 副的情况可以等效为共用 2 个 R 副和共用 3 个 R 副, 共用 C 副可以等效为共用 1 个 R 副和 1 个 P 副。

根据式(1)的运动等效判定条件, 两个子机构的分支运动副数 n_1 和 n_2 需要满足

$$n_1 + n_2 \leq \min\{n_{1max}, n_{2max}\} + n_s + 1 \quad (3)$$

选取满足式(3)的集合 A 和集合 B 中的元素, 构成组合机构构型 d 。

(3) 机构判定。

对组合机构 d , 刚化子机构 1 各分支的驱动副, 剩下运动副构成的机构构型为 e ; 刚化子机构 2 各分支的驱动副, 剩下运动副构成机构构型为 f 。

如果对于 e 和 f 满足

$$e \in B \text{ 且 } f \in A \quad (4)$$

则组合构型 d 为满足要求的具有与串并联机构运动等效的新型并联机构。

(4) 自由度分析与运动特性验证。

通过自由度计算公式计算新型并联机构的自由度, 验证综合出的新型机构自由度是否为期望自由度。根据螺旋理论验证综合的新机构运动性质是否与子机构 1 与子机构 2 直接串联相同。

重复上述过程, 即可综合出所有期望的无中间平台且与串并联机构运动等效的新型并联机构构型集合 D 。

2 新型 6 自由度并联机构综合

2.1 机构综合

(1) 确定新型并联机构自由度与子机构构型集合。

采用提出的与串并联机构运动等效的新型并联综合新方法, 对新型 6 自由度并联机构进行综合。

根据式(1), 子机构 1 和子机构 2 可以有多种组

合形式, 本文选取子机构 1 为三转动并联机构, 子机构 2 为三平移并联机构, 这样选取可以实现转动自由度和移动自由度的解耦、结构简单、易于控制。

根据文献[24-26]列出三支三转动机构和三支三平移机构构型, 并对支链运动副个数进行分类, 如表 1 所示, 其中机构的上下平台交换的构型和一些具有等效运动链的机构没有列出。

(2) 确定子机构共用运动副和组合构型。

三转动机构(即集合 A)分支运动副数最大为 5, 三平移机构(即集合 B)分支运动副数最大为 5。

两个子机构分支连接时可以共用运动副也可以不共用运动副。

当两个子机构分支连接时不共用运动副, 即 $n_s=0$ 时, 满足式(3)的机构组合为: 集合 A 中选取 $3-(^iR^jR^kR)_N$ 机构, 集合 B 中选取 $3-P^jP^kP$ 机构, 组合构型为 $3-(^iR^jR^kR)_N^{il}P^{jl}P^{kl}P$ 机构。

当两个子机构分支连接时存在共用运动副时, 需要三转动机构的上平台运动副布置形式与三平移机构的下平台运动副布置形式相同。根据文献[27], 三转动机构和三平移机构的几何条件都是空间汇交, 因此可以实现运动副共用的几何约束要求。分支通过共用运动副连接可以分为以下几种情况。

① 共用 1 个运动副, 即 $n_s=1$ 。

各个分支均共用 1 个转动副时, 满足式(3)的机构组合为: 集合 A 中选取 $3-(^iR^jR^kR)_N$ 机构, 集合 B 中选取支链运动副个数为 4 的机构, 组合构型为 $3-(^iR^jR^kR)_N^{il}P^{jl}P^{kl}P$ 机构、 $3-(^iR^jR^kR)_N^{kl}P^{kl}P^{kl}P$ 机构、 $3-(^iR^jR^kR)_N^{kl}P^{kl}P^{kl}P$ 机构和 $3-(^iR^jR^kR)_N^{kl}P^{kl}P^{kl}P$ 机构。各个分支均共用 1 个移动副时, 满足式 3 的机构组合为: 集合 A 中选取 $3-(^iR^jR^kR)_N$ P 机构, 集合 B 中选取 $3-P^jP^kP$ 机构, 组合构型为 $3-(^iR^jR^kR)_N^{il}P^{jl}P^{kl}P$ 。

表 1 三转动机构和三平移机构构型

分支运动副个数 n	三转动机构(即集合 A)	三平移机构(即集合 B)
3	$3-(^iR^jR^kR)_N$	$3-P^jP^kP$
4	$3-P(^iR^jR^kR)_N$	$3-^{x1}R^{y1}P^{x1}C$ $3-^{x1}R^{x1}R^{x1}C$ $3-^{x1}R^{y1}P^{x1}R^{x1}P$ $3-^{x1}R^{x1}R^{x1}R^{x1}P$ $3-R^iP^jP^kP$
5	$3-^{x1}R^{x1}R(^iR^jR^kR)_N$ $3-^{x1}R^{y1}P(^iR^jR^kR)_N$ $3-^{x1}R^{x1}R^{x1}R(^iR^jR)_N$ $3-^{x1}R^{y1}P^{x1}R(^iR^jR)_N$ $3-(^iR^jR^kR)_N(^iR^jR)_N$ $3-C(^iR^jR^kR)_N$ $3-^{x1}R^{y1}RP^{x2}R^{y2}R(^{x1}R$ 与 ^{y2}R 相交, ^{y1}R 与 ^{x2}R 平行, 即 3-UPU)	$3-(^iR^jR)_N^{jl}P^jC(^iR^jP)$ $3-(^iR^jR)_N^{jl}R^jC$ $3-^{x1}R^{x1}R^{x1}R^{x2}R^{x2}R$ $3-^{x1}R^{y1}P^{x1}R^{x2}R^{x2}R$ $3-^{x1}R^{x1}R^{y1}P^{x2}R^{y2}P$ $3-^{x1}R^{y1}RP^{x2}R^{y2}R(^{x1}R$ 与 ^{y2}R 平行, ^{y1}R 与 ^{x2}R 平行, 即 3-UPU)

② 共用 2 个运动副, 即 $n_s=2$ 。

各个分支均共用两个转动副(或 U 副)时, 满足式(3)的机构组合为: 集合 A 中选取 $3-(^iR^jR^kR)_N$ 机构, 集合 B 中选取 $3-(^iR^jR^kR)_N^{jl}P^jC(^iR^jP)$ 和 $3-(^iR^jR)_N^{jl}R^jC$ 机构。组合机构构型为 $3-(^iR^jR^kR)_N^{il}P^{jl}P^{kl}P$ 机构和 $3-(^iR^jR^kR)_N^{kl}P^{kl}P^{kl}P$ 机构。

各个分支均共用 1 个转动副和 1 个 P 副(或 C 副)时, 满足式(3)的机构组合为: 集合 A 中选取 $3-(^iR^jR^kR)_N$ P 机构, 集合 B 中选取 $3-^{x1}R^{y1}P^{x1}C$ 和 $3-^{x1}R^{y1}P^{x1}R^{x1}P$ 机构, 组合机构构型为 $3-(^iR^jR^kR)_N^{il}P^{jl}P^{kl}P$ 机构和 $3-(^iR^jR^kR)_N^{kl}P^{kl}P^{kl}P$ 机构。

各个分支均共用 2 个 P 副时, 集合 A 中没有满足要求的机构。

③ 共用 3 个运动副, 即 $n_s=3$ 。

各个分支均共用 3 个转动副时, 满足式(3)的机构组合为: 集合 A 中选取 $3-(^iR^jR)_N^{x1}R^{x1}R^{x1}R$ 机构, 集合 B 中选取 $3-^{x1}R^{x1}R^{x1}R^{x1}P$ 机构, 由于两个机构与平台相连的运动副布置形式不同, 所以不能组合。

各个分支均共用 2 个转动副和 1 个 P 副(或 1 个转动副和 1 个 C 副)时, 满足式(3)的机构组合为: 集合 A 中选取 $3-(^iR^jR)_N^{x1}R^{y1}P^{x1}R$ 机构, 集合 B 中选取 $3-^{x1}R^{y1}P^{x1}R^{x1}P$ 机构, 同样由于两个机构与平台连接的运动副布置形式不同, 所以不能组合。

各个分支均共用 1 个转动副和 2 个 P 副(或共用 1 个 P 副 1 个 C 副)或共用 3 个 P 副时, 集合 A 中没有满足要求的机构。

④ 共用四个运动副, 即 $n_s = 4$ 。

共用的运动副个数达到 4 个的时候, 已经不可能满足集合 A 和集合 B 中机构具有相同的 4 个运动副。

(3) 机构判定。

对于上述的组合机构, 通过式(4)的判定条件, 即可确定组合机构是否为满足要求的新型机构。由于在判定组合机构是否为期望综合的机构时, 需要刚化两个子机构的驱动, 因此, 需要先确定两个子机构的合理驱动组合, 可以采用全局雅可比矩阵法确定子机构的合理驱动方式^[28]。

以集合 A 中取 $3-(^iR^jR^kR)_N$ 机构, 集合 B 中取 $3-{}^{x1}R^y1P^{x1}C$ 机构时为例, 共用 1 个转动副, 两个机构分支连接后的组合构型为 $3-(^iR^jR^kR)_N^{k'}P^kC$ ($k' \perp k$) 机构。 $3-(^iR^jR^kR)_N$ 机构以三个分支的第一转动副为驱动时为一种合理驱动方式, $3-{}^{x1}R^y1P^{x1}C$ 机构以三个分支的移动副作为驱动时为一种合理驱动方式。

刚化 $3-(^iR^jR^kR)_N$ 机构的驱动副, 剩下的运动副构成的机构构型为 $3-(^jR^kR)_N^{k'}P^kC$, 构型属于三平移机构; 刚化 $3-{}^{x1}R^y1P^{x1}C$ 机构的驱动副, 剩下的运动副构成的机构构型为 $3-(^iR^jR^kR)_N^{k'}C$, 构型属于三转动机构, 因此 $3-(^iR^jR^kR)_N^{k'}P^kC$ 机构为满足要求的新型 6 自由度并联机构。

同理, 可以判定所有组合机构是否为满足运动等效判定条件。

(4) 自由度分析与运动特性验证。

根据修正的 G-K 自由度计算公式^[27], 计算 $3-(^iR^jR^kR)_N^{k'}P^kC$ 融合串并联机构的自由度

$$M = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i + \mu \quad (5)$$

式中, $d = 6$, $n = 14$, $g = 15$, $\sum_{i=1}^g f_i = 18$, $u = 0$, 因此, $3-(^iR^jR^kR)_N^{k'}P^kC$ 机构的自由度为 6。

$3-(^iR^jR^kR)_N^{k'}P^kC$ 机构的分支为无约束分支, 因此, 容易确定机构为具有三转动与三平移运动的 6 自由度机构。

同理, 可以综合得到其他与三转动并联机构和三平移并联机构构成的与串并联机构运动等效的新型 6 自由度并联机构, 见表 2。从表 2 中可以看出, 只有共用运动副个数为 1 和 2 的时候存在满足综合要求的机构, 并且共用运动副个数为 1 综合出的机构包含了共用运动副个数为 2 综合出的机构。

2.2 机构约束分析

机构的静力学和动力学分析是机构分析的重要内容, 而当机构中存在静不定问题时, 其力学分析

将会变得十分困难。根据机构的约束力/力偶个数, 和机构可以列出的平衡方程个数, 确定机构力学分析时是否存在静不定问题。

表 2 综合的 6 自由度并联机构

n_s	机构构型
0	$3-(^iR^jR^kR)_N^{il}P^{jl}P^{kl}P$
1	$3-(^iR^jR^kR)_N^{k'}P^kC$ $3-(^iR^jR^kR)_N^{k'}R^kC$ $3-(^iR^jR^kR)_N^{k'}P^kR^kP$ $3-(^iR^jR^kR)_N^{k'}R^kR^kP$ $3-(^iR^jR^kC)_N^{k'}P^kR$ $3-(^iR^jR^kC)_N^{k'}R^kR$
2	$3-(^iR^jR^kR)_N^{k'}P^kC$ $3-(^iR^jR^kR)_N^{k'}R^kC$ $3-(^iR^jR^kR)_N^{k'}P^kR^kP$

$3-(^iR^jR^kR)_N$ 机构具有 7 个运动构件, 可以列 42 个平衡方程, 机构具有 9 个转动副, 约束力/力偶共有 48 个, 因此 $3-(^iR^jR^kR)_N$ 球面并联机构的静力学和动力学分析问题为静不定问题。当机构中存在静不定时, 其静力学和动力学计算和求解十分困难, 需要建立机构变形协调方程^[29-30]。当 $3-(^iR^jR^kR)_N$ 机构通过传统的串联方式与三平移机构串联时, 仍然存在静不定问题。

本文提出的融合串并联机构可以消除 $3-(^iR^jR^kR)_N$ 机构中的静不定问题。以 $3-(^iR^jR^kR)_N^{k'}P^kC$ 机构为例, 机构具有 13 个运动构件, 可列平衡方程数为 78 个, 共有 9 个转动副、3 个移动副和 3 个圆柱副, 总约束力/力偶个数为 78 个, 因此在静力学和动力学分析时, 不存在静不定问题, 这使机构的静力学和动力学分析变得相对容易很多。本文综合出的新型 6 自由度机构均具有消除 $3-(^iR^jR^kR)_N$ 机构静不定问题的特点。

2.3 机构应用展望

为了更加直观地体现新型机构的特点, 选取 $3-(^iR^jR^kR)_N^{k'}P^kC$ 机构, 建立机构三维模型图如图 2 所示。

图 2 $3-(^iR^jR^kR)_N^{k'}P^kC$ 机构

综合的新型 6 自由度机构均为三支机构,分支和运动副个数都相对较少,同传统六分支 6 自由度并联机构相比具有结构简单、轻量化,工作空间大,转动自由度与移动自由度解耦,运动学分析、动力学分析与控制简单等优点;同传统串并联 6 自由度并联机构相比具有结构简单、轻量化,易于分析的优点,在指向隔振平台、仿生机器人关节等领域具有良好的应用前景。

3 结 论

(1) 提出了一类与串并联机构运动等效、无中间平台的新型并联机构综合新方法。

(2) 利用提出的机构综合新方法,综合出若干种由三转动子机构与三平移子机构组成的 6 自由度并联机构新构型。

(3) 综合出的新型 6 自由度并联机构具有结构简单、可以消除三转动机构中的静不定和易于分析与控制等优点,在指向隔振平台、仿生机器人等领域具有良好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 杨廷力,刘安心,罗玉峰,等. 机器人机构结构综合方法的基本思想、特点及其发展趋势[J]. 机械工程学报, 2010, 46(9): 1-11.
YANG Tingli, LIU Anxin, LUO Yufeng, et al. Basic principles, main characteristics and development tendency of methods for robot mechanism structure synthesis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(9): 1-11.
- [2] 张彦斌,吴鑫. 完全解耦二移动二转动并联机构结构综合[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 250-256.
ZHANG Yanbin, WU Xin. Structural synthesis of fully-decoupled two-translational and two-rotational parallel mechanisms[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2013, 44(8): 250-256.
- [3] ZENG Daxing, HUANG Zhen. Type synthesis of the rotational decoupled parallel mechanism based on screw theory[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2011, 54(4): 998-1004.
- [4] 陈海,曹毅,秦友蕾. 无耦合完全各向同性 1T1R 并联机器人机构构型综合[J]. 中国机械工程, 2016, 27(5): 589-595.
CHEN Hai, CAO Yi, QIN Youlei. Type synthesis of fully-decoupled and fully-isotropic 1T1R parallel robotic manipulators[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(5): 589-595.
- [5] KONG Xianwen. Type synthesis of 3-DOF parallel manipulators with both a planar operation mode and a spatial translational operation mode[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2017, 5(4): 041015-041015-8.
- [6] 石志新,叶梅燕,罗玉峰,等. 四自由度两模式并联机构结构综合与位置分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 383-389.
SHI Zhixin, YE Haiyan, LUO Yufeng, et al. Type synthesis and position analysis of 4-DOF parallel mechanisms with two operation modes[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2017, 48(4): 383-389.
- [7] ZHENG Xiangzhou, BIN Hongzan, LUO Yougao. Kinematic analysis of a hybrid serial-parallel manipulator[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004, 23(11-12): 925-930.
- [8] LU Yi, HU Bo, SUN Tao. Analyses of velocity, acceleration, statics, and workspace of a 2(3-SPR) serial-parallel manipulator[J]. Robotica, 2009, 27(4): 529-539.
- [9] ROMDHANE L. Design and analysis of a hybrid serial-parallel manipulator[J]. Mechanism and Machine Theory, 1999, 34(7): 1037-1055.
- [10] 梁辉,杨加礼,王蕾,等. 3UPU+3RPS 并串联机构的运动学分析及仿真[J]. 机械与电子, 2017(10): 42-45, 50.
LIANG Hui, YANG Jiali, WANG Lei, et al. Kinematics analysis and simulation of 3UPU+3RPS parallel-series mechanisms[J]. Machinery and Electronics, 2017(10): 42-45, 50.
- [11] TANIO K. TANEV. Kinematics of a hybrid (parallel-serial) robot manipulator[J]. Mechanism and Machine Theory, 2000, 35: 1183-1196.
- [12] GALLARDO-ALVARADO J, AGUILAR-NÁJERA C R, CASIQUE-ROSAS L, et al. Kinematics and dynamics of 2(3-RPS) manipulators by means of screw theory and the principle of virtual work[J]. Mechanism and Machine Theory, 2008, 43(10): 1281-1294.
- [13] GALLARDO-ALVARADO J, RODRÍGUEZ-CASTRO R, AGUILAR-NÁJERA C R, et al. A novel six-degrees-of-freedom series-parallel manipulator[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26(6): 1901-1909.
- [14] 虞启凯,游有鹏,韩江义. 一种 6DOF 串并联机构性能指标分析[J]. 机械传动, 2015, 39(6): 159-165.
YU Qikai, YOU Youpeng, HAN Jiangyi. Performance

- index analysis of a 6 DOF serial and parallel mechanism[J]. *Mechanical Transmission*, 2015, 39(6): 159-165.
- [15] 胡波, 宋春晓, 张庆玲, 等. 2(2-UPR+SPR)串并联机构雅可比矩阵的建立[J]. *中国机械工程*, 2015, 26(7): 853-858.
- HU Bo, SONG Chunling, ZHANG Qingling, et al. Jacobian matrix establishment of 2(2-UPR+SPR) serial-parallel manipulator[J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(7): 853-858.
- [16] HU Bo, ZHAO Jinjun, CUI He. Terminal constraint and mobility analysis of serial-parallel manipulators formed by 3-RPS and 3-SPR PMs[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, 134: 685-703.
- [17] HU Bo, YU Jingjing. Unified solving inverse dynamics of 6-DOF serial-parallel manipulators[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2015, 39(16): 4715-4732.
- [18] JUNG H K, CRANE III C D, ROBERTS R G. Stiffness mapping of compliant parallel mechanisms in a serial arrangement[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2008, 43(3): 271-284.
- [19] ZHAO Chong, GUO Hongwei. Actuation distribution and workspace analysis of a novel 3(3RRIS) metamorphic serial-parallel manipulator for grasping space non-cooperative targets[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, 139: 424-442.
- [20] GUO Hongwei, ZHAO Chong, LI Bing. A transformation method to generate the workspace of an n(3RRS) serial-Parallel manipulator[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2019, 141(9): 092301.
- [21] 李锐明, 姚燕安. 具有缩放平台的串并联蠕动机构[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(23): 94-101.
- LI Ruiming, YAO Yanan. Serial-parallel ichworm mechanism with scalable platforms[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(23): 94-101.
- [22] LIU Ran, YAO Yanan. A Novel serial-parallel hybrid worm-like robot with multi-mode undulatory locomotion[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, (137): 404-431.
- [23] LIANGS C, CECCARELLI M. ROMANSY 18 robot design, dynamics and control[M]. Vienna: Springer, 2010.
- [24] 余同柱, 沈惠平, 邓嘉鸣, 等. 方位特征集法在三平移并联机构型综合中的应用[J]. *机械设计*, 2012, 29(8): 52-58.
- YU Tongzhu, SHEN Huiping, DENG Jiaming, et al. Application of azimuth feature set method in three-translation parallel mechanism type[J]. *Synthesis Mechanical Design*, 2012, 29(8): 52-58.
- [25] 李秦川, 黄真. 基于位移子群分析的 3 自由度移动并联机构型综合[J]. *机械工程学报*, 2003, 39(6): 18-21.
- LI Qinchuan, HUANG zhen. Type synthesis for 3-DOF translational parallel mechanisms based on displacement subgroup[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 39(6): 18-21.
- [26] 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.
- YANG Tingli, LIU Anxin, LUO Yufeng, et al. Theory and application of robot mechanism topology[J]. Beijing: Science Press, 2014.
- [27] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2014.
- HUANG Zhen, ZHAO Yongsheng, ZHAO Teishi. Higher space institution[M]. Bieijing: Higher Education Press, 2014.
- [28] 张彦斌, 赵浥夫, 荆献领, 等. 一种空间移动并联机器人机构的设计与分析[J]. *机械科学与技术*, 2018, 37(12): 64-71.
- ZHANG Yanbin, ZHAO Yifu, JING Xianling, et al. Design and analysis of a mechanism for spatial translational parallel robot[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2018, 37(12): 64-71.
- [29] 周玉林, 高峰. 3-RRR 3 自由度球面并联机构静刚度分析[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(4): 25-33.
- ZHOU Yulin, GAO Feng. Stiffness analysis of spherical parallel mechanism 3-RRR with 3-DOF[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(4): 25-33.
- [30] 李永泉, 宋肇经, 郭菲, 等. 多能域过约束并联机器人系统动力学建模方法[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(21): 17-25.
- LI Yongquan, SONG Zhaojing, GUO Fei, et al. Dynamic modeling method for overconstrained multi-energy domain parallel manipulator[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(21): 17-25.

作者简介: 孙静, 男, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为并联机器人技术及理论。

E-mail: 990294539@qq.com

李仕华(通信作者), 男, 1966 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为并联机器人技术及理论。

E-mail: shli@ysu.edu.cn