

DOI: 10.3901/JME.2014.23.013

多环耦合机构末端件自由度计算的等效法^{*}

刘婧芳¹ 黄晓欧¹ 余跃庆¹ 丁华锋¹ 黄 真²

(1. 北京工业大学机械工程与应用电子技术学院 北京 100124;
2. 燕山大学机器人研究中心 秦皇岛 066004)

摘要: 针对新型耦合机器人与常见并联机器人机构结构的迥异性, 提出一种适应多环耦合机构末端件约束分析和自由度计算的新方法, 此方法的主要思路是将多环耦合机构转化为并联机构。提出机构拆分原则, 将连接输入和输出的部分拆分为多个独立单元体。应用螺旋理论逐一分析拆分出的单元体中各个耦合节点构件相对于机架的独立运动, 将含耦合结构的独立单元体等效为一个串联分支, 整个机构就等效为一个并联机构。分析等效并联机构各分支的运动螺旋系和约束螺旋系, 采用二次反螺旋求得机构末端件的自由度。应用提出的等效替代法计算一个耦合机构的自由度, 计算结果与原型一致, 表明提出的新方法能够有效简化耦合机构的复杂性并正确求得自由度。

关键词: 并联机器人; 多环耦合机构; 螺旋理论; 自由度

中图分类号: TH112

Equivalent Method of Output Mobility Calculation for a Novel Multi-loop Coupled Mechanism

LIU Jingfang¹ HUANG Xiaoou¹ YU Yueqing¹ DING Huafeng¹ HUANG Zhen²

(1. College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology,
Beijing University of Technology, Beijing 100124;
2. Robotics Research Center, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract: In view of the different structures between novel multi-loop coupled mechanisms and common parallel mechanisms, a novel method is proposed for output constraint and mobility analysis of multi-loop coupled mechanisms. Converting a coupled mechanism into a common parallel mechanism is the main idea. A rule is given to split the connection between input and output into several independent elements. Relative motions of the coupled-nod link in every element are analyzed based on screw theory, and the element including coupled structure is ultimately equivalent to a serial chain. Thus the whole coupled mechanism is equivalent to a parallel mechanism. Limb twist systems and limb constraint systems of the equivalent parallel mechanism are analyzed, and the output mobility is calculated by re-solving the reciprocal screws of the constraint screws. The proposed method is applied to a typical coupled mechanism, and the computed result is in accordance with the prototype, which shows that the equivalent method can effectively simplify the complicated structure and get the correct mobility.

Key words: parallel robot; multi-loop coupled mechanism; screw theory; mobility

0 前言

由于混联机器人兼具了并联机器人刚度好和串联机器人工作空间大的优点, 具有良好的应用前

景, 将成为今后机构学重要的研究方向。

最初出现的混联机器人以分支中含闭环回路为主, 用以提高机构的刚度。随后以并联机构为基础, 添加连接上下平台的一个串联机械手, 来实现较大的工作空间。其中设计成功且应用良好的当以瑞典 Neos Robotic 公司开发生产的 Tricept 系列机器人和德国 DS-Technology 公司生产的 5 自由度 Exechon 机器人最为著名^[1-2]。这类机器人的特点

^{*} 国家自然科学基金(51105004)和北京市教委科研计划面上项目(KM201310005016)资助项目。20131209 收到初稿, 20140808 收到修改稿

是,机构结构很复杂,但是可以将其看作由若干个独立的支链连接着机架和末端执行器,当然这些支链中也可能含有一个或多个闭环。目前出现的混联机构很大数量上是含独立分支的。

还有一类新型机构,与传统的并联机构或上述混联机构不同,连接机架和末端执行器的运动链并不能看成是若干个独立支链的组合。各运动链之间是耦合的,因此将这类机构称为多环耦合机构。多环耦合机构已经有不少应用。上海交通大学 YAN 等^[3]发明了各种类型的耦合锻造机,已经应用到了实际场合。沈惠平等^[4]研制了两种混联高速喷涂机器人。

但是,人们对多环耦合机构的理论认识还不足,仅有为数不多的一些学者开展部分研究,目前主要针对机构的自由度和构型综合开展一些基础性的探索研究,所用方法还都是一些个体的设计方法。THIERRY 等^[5]基于 Jacobian 矩阵零空间分析了此多面体机构的极小自由度,并通过数值分析和实体建模来模拟并估算了这个机构的自由度。DING 等^[6]分析了一个双色变形花球机构的拓扑结构并进行了运动学求解。CAMPOS^[7]基于 Assur 杆组提出了一种串并联机构的综合方法。ZENG 等^[8]基于位移子群综合出了一系列耦合机构。戴建生等^[9]研究了一个可伸缩的球形机构,并计算出其自由度。他们将机构分解为若干单元机构,这些单元都是自由度数目为一的并联机构,并且得出了这个球形机构的自由度,变胞机构也是结构较复杂的一类机构,其自由度求解可为多环耦合机构提供一定思路和依据。黄真等^[10]通过拆分杆组,应用螺旋理论分析后一个杆组的约束螺旋对前一个杆组运动螺旋的影响,来判断机构的实约束和虚约束。此方法可以计算出多环耦合机构的自由度性质,但对于较复杂的结构,在每次添加杆组之后都需要重新计算新机构中两个连接点之间的相对运动,计算过程比较繁琐。

对于一个新机构最基本的理论认识就是要知道它的自由度,这是对这个机构开展运动学以及动力学分析的基本条件。人们对自由度的研究已有 150 多年的历史,很多学者应用不同的方法对机构的自由度展开了研究^[11-15]。但是这些自由度方法主要是针对传统的并联和古典机构开展的,对于混联机构还没有形成系统的自由度理论。

对于并联机构的求解,人们往往是基于独立支链或独立环路来求解。因为对于并联机构,若将动平台断开,连接机架和动平台的各个分支之间是相互独立没有耦合关系的。而按照环路计算,则需要判断所有环路中的独立环路数。独立环路数可以根

据欧拉公式求得。但是这种方法要求计算机构的阶。计算阶的方法有很多种,但本质上还是基于独立支链来求解。还有一些学者基于杆组求解并联机构的自由度,但需要计算两个闭合杆件之间的相对运动(运动参数),但不能确定自由度的性质^[16]。

对于常规的分支中含独立闭环的混联机构,将其中的闭环看作一个广义运动副来处理,就相当于一个并联机构^[17]。但是对于复杂多环耦合机构,由于其结构的耦合特性,对其自由度求解带来了很大的困难。首先由于运动副众多,很难直接求出机构的阶来,另外由于运动链具有耦合性且具有多个运动链,因此求解各运动链之间的过约束也很困难。这是机构学中出现的新的难题,限制了多环耦合机构的运动学及受力等其他分析方法的建立和创新。因此,研究适合多环耦合机构自由度分析的一般方法,具有重要的理论意义和实用价值。

为此,本文基于螺旋理论,提出了适合多环耦合机构约束和自由度分析的方法,为进一步设计和开发多环耦合机构,提供了理论基础。

1 多环耦合机构自由度计算的新方法描述

主要思路是先将机构按照一定的拆分原则,拆分为若干个独立单元体,这里的独立不是指结构独立,而是指运动独立,即将耦合机构拆除动平台及动平台上的运动副后,单元体末端件的运动仅由此单元体的结构决定,不受其他结构影响。然后应用螺旋理论对拆分出来的各单元体的耦合结构进行分析,将单元体等效为一个单链,这样整个多环耦合机构就等效为一个并联机构,最后应用螺旋理论对等效并联机构进行约束和自由度分析,就得到多环耦合机构的自由度数目和性质。其中,从耦合机构到并联机构的转化和等效是这个方法的关键部分。

1.1 机构拆分原则

这里主要是将连接机构机架和末端件的运动链拆分为若干个独立单元体,单元体中可能含有耦合结构。机构的拆分原则包含以下几点。

(1) 以输出平台所包含的运动副数目来确定将要拆分出的独立单元体数目。假设动平台含有 p 个运动副,那么最终要将机构拆分为 p 个独立分支。注意这 p 个运动副中不含复合运动副(注:将同时连接两个以上构件的运动副成为复合运动副)。若动平台含有 s 个常规运动副和连接 t 个构件的一个复合运动副,则 $p=s+(t-1)$ 。

(2) 将与动平台相连的各杆件记为 L_i , 其中, $i=1, 2, \dots, p$ 。

(3) 设 L_i 到机架的最直接独立运动连接为 C_i , L_i 是其末端件。若 C_i 中含有耦合节点, 则 C_i 应包括实现机架对节点运动传输的有效结构, 另外拆分时须保证所有 C_i 的集合为机构除去动平台及 p 个运动副之后的全部结构。

1.2 机构等效方法

对于拆分出来的每一个连接 C_i , L_i 是其末端件。若一个构件含有两个以上运动副, 那么就认为此构件含有耦合节点, 把此构件称为耦合构件。首先应用螺旋理论分析 L_i 相对于机架的独立运动。

(1) C_i 不含耦合节点。这种情况下, C_i 就是一个开链, C_i 再加上连接 L_i 及输出平台的运动副, 就形成了机构的一个独立分支。

(2) C_i 含有多个耦合节点。若 C_i 中含有多个耦合节点, 那么从距离 L_i 最近的耦合节点构件处开始, 按照前面所述的机构拆分原则, 将其拆分指向机架的多个独立运动链, 此独立运动链的数目与指向机架的运动副数目相同。

将耦合结构拆分后, 与上面的拆分顺序相反, 从距离机架最近的耦合节点开始, 将此节点处的构件作为第一个输出件, 分析此输出件相对于机架的运动特性。设从机架到此构件有 j 个独立运动链, 建立合适的坐标系, 得螺旋表达式的六个元素有尽可能多的 0 和 1。用 \mathcal{S}_{lm}^i 表示作用于 C_i 连接第一个节点构件的第 m 个运动链的运动螺旋系, 则此运动链的约束螺旋系 \mathcal{S}_{lm}^{ir} 满足

$$\mathcal{S}_{lm}^{ir} \circ \mathcal{S}_{lm}^i = 0 \quad (1)$$

式中, “ \circ ” 为螺旋互易积的符号, 此处 r 只是一个标记, 代表反螺旋。对于两个螺旋: $\mathcal{S} = (\mathcal{S}; \mathcal{S}_0)$ 和 $\mathcal{S}^r = (\mathcal{S}^r; \mathcal{S}_0^r)$, 它们的互易积记为

$$\mathcal{S} \circ \mathcal{S}^r = \mathcal{S} \cdot \mathcal{S}_0^r + \mathcal{S}^r \cdot \mathcal{S}_0 \quad (2)$$

对于一条直线来说, \mathcal{S} 为方向矢量, $\mathcal{S}_0 = \mathbf{r} \times \mathcal{S}$, \mathbf{r} 表示从原点到直线上任意一点的位置矢量。

将从式(1)中求到的所有 j 个分支的约束螺旋系的集合记为 $\bigcup_{m=1}^j \mathcal{S}_{lm}^{ir}$, 对其求二次反螺旋, 得 C_i 连接第一个节点构件的各运动螺旋 \mathcal{S}_{ln}^{ig} 为

$$\mathcal{S}_{ln}^{ig} \circ \bigcup_{m=1}^j \mathcal{S}_{lm}^{ir} = 0 \quad (3)$$

这些运动副螺旋代表着第一个节点构件相对于机架的运动。若 \mathcal{S}_{ln}^{ig} 代表着一个独立转动, 可以对应用一个转动副来表示。若 \mathcal{S}_{ln}^{ig} 代表着一个独立的移

动, 则对应用一个移动副来表示。这样 C_i 中连接机架与第一个节点构件的结构就可以等效为一个广义运动链, 此广义运动链由与节点构件独立运动数目相同的单自由度运动副串联而成的。

以此类推, 直至完成 C_i 连接的最后一个耦合节点构件的运动螺旋分析和广义运动链替代。最后形成的广义运动链再加上连接 L_i 及输出平台的运动副, 就形成了一个独立单链分支。

这样, 就将整个耦合机构等效为含 p 个独立运动分支且不含耦合结构的并联机构。值得说明的是, 当在 C_i 中存在空间任意方向的转动副时, 其反螺旋与二次反螺旋的表达式都较为复杂, 那么可以在每一个节点处分别建立合适的局部坐标系, 来求得对应的广义运动链, 然后再在下一节点处建立另外一个适合的坐标系, 根据广义运动链的自由度性质, 等效映射于第二个坐标系中, 就能得到下一个节点构件在第二个坐标系中的运动螺旋系。以此类推, C_i 的等效运动链就可以在同一个坐标系中表示。坐标系的建立时应尽可能使螺旋表达式中有较多的 0 和 1。

1.3 等效并联机构自由度求解

自由度求解过程如下所述。

(1) 求解各独立分支的运动螺旋系。这里, 对于由耦合结构转化而来的分支, 仍然使用前面机构等效时最终使用的坐标系, 来确定此分支的运动螺旋系。

而对于不含耦合结构的独立分支, 若不方便在上述坐标系中建立螺旋系, 可以重新建立不同的局部坐标系来求得分支的运动螺旋系。

(2) 求解每个独立分支的约束螺旋系 $\hat{\mathcal{S}}_j^r$ 和过约束 μ 。

对上述各分支的运动螺旋系求反螺旋, 即可得到各分支的约束螺旋系。

倘若这里得到的各个反螺旋表达式是建立在不同的坐标系上的。为讨论这些反螺旋对动平台的作用, 必须有相同的坐标框架。但是不需要以代数方法来将它们变换到同一坐标下, 借助于螺旋的相关性和概念上的逻辑推理, 可以便捷地得到出过约束。求得的反螺旋中若存在

$$\mathcal{S}_i^r = a_{j1} \mathcal{S}_{j1}^r + a_{j2} \mathcal{S}_{j2}^r + \dots + a_{jk} \mathcal{S}_{jk}^r \quad (4)$$

式中, $a_{j1}, a_{j2}, \dots, a_{jk}$ 为不同时为 0 的系数, 则 \mathcal{S}_i^r 为一个过约束。

(3) 计算自由度的数目和性质。若得到同一坐标系下各分支的约束螺旋, 那么对所有约束螺旋的

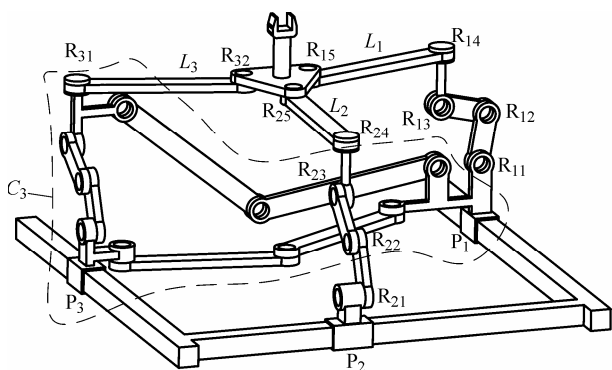
集合再求反螺旋,即可得出输出件的运动螺旋系,这些运动螺旋就代表了动平台的所有独立运动。

若是从不同局部坐标系得出各分支的约束螺旋,则需要经过逻辑推理判断。每个约束螺旋代表着一个约束力或者约束力偶,分别限制了动平台的一个移动或一个转动。因此分析所有动平台上的约束力和约束力偶所限制的运动,就可以得出动平台所允许的独立运动。

(4) 自由度连续性判别。在确定出初始时刻末端件的自由度数目和性质之后,还应当进一步检验自由度的连续性。这可以按照机构具有的自由度数目和性质给定机构一定大小的有限运动,通过机构各运动副之间的几何关系变化,检查加于动平台上的约束有没有发生变化,来判断机构的自由度是否发生变化。

2 实例应用

图 1 所示为一个非对称的多环耦合机构^[16]。机架上 3 个移动副,两个平行,另外一个和它们垂直。动平台上有 3 个相互平行的转动副,初始位形下,动平台的 3 个转动副垂直于机架平面。可以看到,这个机构有 4 条运动链是相互耦合的。



对于第三分支 $P_{B1}-P_{B2}-R_{31}-R_{32}$ ，它的运动螺旋系为

$$\tilde{\mathcal{S}}_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0; & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0; & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1; & x_{e1} & y_{e1} & 0 \\ 0 & 0 & 1; & x_{e2} & y_{e2} & 0 \end{pmatrix} \quad (19)$$

求反螺旋，得

$$\tilde{\mathcal{S}}_3^r = \begin{cases} \mathcal{S}_{31}^r = (0 & 0 & 0; & 1 & 0 & 0) \\ \mathcal{S}_{32}^r = (0 & 0 & 0; & 0 & 1 & 0) \end{cases} \quad (20)$$

这个分支的约束螺旋系具有 2 个约束力偶，分别限制了动平台绕 X 轴和 Y 轴的转动。

由式(16)、(18)以及式(20)可以看出

$$\mathcal{S}_{31}^r = \mathcal{S}_{21}^r \quad \mathcal{S}_{32}^r = \mathcal{S}_{11}^r \quad (21)$$

这表明由式(16)、(18)以及式(20)组成的约束螺旋系中，共有 4 个螺旋形成了 2 系螺旋， \mathcal{S}_{31}^r 和 \mathcal{S}_{32}^r 都是过约束。过约束数 $\mu=4-2=2$ 。再对由式(16)、(18)以及式(20)组成的约束螺旋系求二次反螺旋，得到动平台的运动螺旋系为

$$\mathcal{S}^g = \begin{cases} \mathcal{S}_1^g = (0 & 0 & 0; & 1 & 0 & 0) \\ \mathcal{S}_2^g = (0 & 0 & 0; & 0 & 1 & 0) \\ \mathcal{S}_3^g = (0 & 0 & 0; & 0 & 0 & 1) \\ \mathcal{S}_4^g = (0 & 0 & 1; & 0 & 0 & 0) \end{cases} \quad (23)$$

这说明动平台具有 4 个自由度，分别是绕 Z 方向的转动，以及沿着 X , Y , Z 方向的移动，此结果与原机构模型一致^[18]。

当然，还可以根据逻辑推理来判断。前面分析到，动平台的 4 个约束螺旋中有 2 个过约束 \mathcal{S}_{31}^r 和 \mathcal{S}_{32}^r ，那么 \mathcal{S}_{11}^r 和 \mathcal{S}_{21}^r 是真实约束。这两个约束分别限制了动平台绕 X 和 Y 方向的转动，那么动平台必然只有 4 个独立运动，即绕 Z 方向的一个转动，以及沿着 X , Y , Z 方向的三个移动。

当动平台无论以哪种形式的运动离开初始位置，机构各运动副之间的几何关系保持不变，因此总可以建立坐标系 $OXYZ$ ，依然按照前述拆分原则，那么拆分出来的各单元体的螺旋保持不变，这样仍可以将机构等效为图 3 所示的并联机构，此机构的运动螺旋系和约束螺旋系总可以由式(15)~(20)表示，因此动平台的自由度总为 4。

3 讨论

本方法的特点之一是它是基于螺旋理论的基本定义和基础运算提出的。螺旋可以清楚地表达一

些几何概念，直观地描述运动和约束，运动螺旋和约束螺旋的互易积在自由度中可以用来判别过约束和确定自由度性质。对比李群李代数方法^[14]，螺旋理论在分析自由度时运算简便更易于被广大机械师所掌握。

本方法的特点之二是它能够将复杂耦合机构转化为具有独立分支的并联机构来处理。目前，基于螺旋理论的自由度原理已经相对比较成熟^[9]，因此应用螺旋理论求解耦合机构自由度的最关键问题就在于如何将耦合结构转化为并联结构。本文以各耦合节点切入点，提出了机构的拆分原则，通过分析各节点间以及节点相对于机架连接和运动，得到了含耦合节点的独立运动结构。对此结构进行广义运动链替代，就可得到一个等效的单链。

应用本方法可以较快速地将耦合机构拆分为独立运动连接，从而进一步求得自由度。对比文献[9]中第八章所分析的机构，应用本方法可以将其拆分为具有三个独立分支的对称并联机构。每个独立分支包含 8 杆单环和连接 V_3 及动平台的二副杆。可以看出，对比原来的方法，本方法的分析更加简单快速。

4 结论

(1) 本文针对多环耦合结构的复杂性和特殊性，基于螺旋理论分析其运动和约束特性，提出了一种适应于多环耦合机构末端件自由度计算的新方法。

(2) 根据提出的机构拆分原则，将多环耦合机构拆分为相互运动独立的单元体，化简了此类机构的耦合结构；应用螺旋理论分析耦合节点构件相对于机架的运动，将耦合结构等效为一个广义运动链，从而将耦合机构等效为并联机构来分析。通过分析等效并联机构的分支运动和约束，得到输出构件的自由度数目的性质。

(3) 应用提出的等效方法计算了一个多环耦合机构末端件的自由度，结果与机构原型一致，表明该方法克服耦合结构带来的困难，化简分析过程，正确得出自由度的数目和性质，为进一步分析耦合机构的运动学和受力分析提供理论依据。

参 考 文 献

- [1] CLAVEL R. Delta, a fast robot with parallel geometry[C]// Proceedings of International Symposium on Industrial Robot, Apr. 26-28, 1988, Lausanne. Switzerland: ISIR, 1988: 91-100.

- [2] 张曙, HEISEL U. 并联运动机床[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
ZHANG Shu, HEISEL U. Parallel kinematics machine tool[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [3] YAN Changya, GAO Feng, GUO Weizhong. Coordinated kinematic modeling for motion planning of heavy-duty manipulators in an integrated open-die forging centre[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2009, 223(10): 1299-1313.
- [4] 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]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(23): 56-64.
- [5] THIERRY L, GOSSELIN C M. Polyhedra with articulated faces[C]// Proceedings of 12th IFToMM World Congress, Besancon, France, Jun. 18-21, 2007.
- [6] DING X L, YANG Y, DAI J S. Topology and kinematic analysis of color-changing ball[J]. Mechanism and Machine Theory, 2011, 46: 67-81.
- [7] CAMPOS A, BUDDE C. A type synthesis method for hybrid robot structures[J]. Mechanism and Machine Theory, 2008, 43(8): 984-995.
- [8] ZENG Q, FANG Y F. Structural synthesis of serial parallel hybrid mechanisms based on representation and operation of logical matrix[J]. ASME Journal of Mechanisms and Robotics, 2009, 041003-1-10.
- [9] 黄真, 刘婧芳, 李艳文. 论机构自由度[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
HUANG Zhen, LIU Jingfang, LI Yanwen. Mobility of mechanisms[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [10] 李端玲, 戴建生, 张启先, 等. 一种变脆机构—魔术花球的自由变分析[J]. 机械工程学报, 2002, 38(9): 12-16.
LI Duanling, DAI Jiansheng, ZHANG Qixian, et al. Mobility of a kind of metamorphic mechanism-magic ball[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(9): 12-16.
- [11] 黄真, 孔令富, 方跃法. 并联机器人机构学理论及控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
HUANG Zhen, KONG Lingfu, FANG Yuefa. Mechanism theory of parallel robotic manipulator and control[M]. Beijing: China Machine Press, 1999.
- [12] HUANG Zhen, LI Qinchuan. General methodology for type synthesis of lower-mobility symmetrical parallel manipulators and several novel manipulators[J]. The International Journal of Robotics Research, 2002, 21(2): 131-145.
- [13] GOGU G. Mobility of mechanisms: A critical review[J]. Mechanism and Machine Theory, 2005, 40(9): 1068-1097.
- [14] MENG J, LIU G F, LI Z X. Geometric theory for synthesis and analysis of sub 6-DOF parallel manipulators[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2007, 23(4): 625-649.
- [15] 杨廷力. 机器人机构拓扑结构学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
YANG Tingli. Topology structure design of robot mechanisms[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [16] ZHANG Yitong, LI Yanwen, WANG Liya. A new formula of mechanism mobility based on virtual constraint loop[J]. Science China-Technological Sciences, 2009, 54(10): 2768-2775.
- [17] HUANG Zhen, LIU Jingfang, ZENG Daxing. A general methodology for mobility analysis of mechanisms based on constraint screw theory[J]. Science China-Technological Sciences, 2009, 52(5): 1337-1347.
- [18] ZENG Qiang, FANG Yuefa. Topological structural synthesis of 4-DOF serial-parallel hybrid mechanisms[J]. Journal of Mechanical Design, 2011, 138: 091008-1-9.

作者简介: 刘婧芳(通信作者), 女, 1985 年出生, 讲师。主要研究方向为机构学理论和方法设计。

E-mail: jfliu@bjut.edu.cn

黄晓欧, 女, 1988 年出生。主要研究方向为机构学理论和方法设计。

E-mail: xo@emails.bjut.edu.cn

余跃庆, 男, 1958 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机构及机器人动力学。

E-mail: yqyu@bjut.edu.cn

丁华锋, 男, 1977 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为数字化机械装备的设计与制造。

E-mail: dinghf@bjut.edu.cn

黄真, 男, 1936 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机构学理论和方法设计。

E-mail: huangz@ysu.edu.cn