

# 并联机器人机构构型创新设计研究\*

汪劲松 关立文 王立平 李铁民  
(清华大学精密仪器与机械学系 北京 100084)

**摘要:** 提出一种并联机器人机构构型创新设计新方法——桁架推演法, 该方法包括三个主要步骤: 根据具体设计需求选择自由度为0的并联机构桁架, 并选择适当的推演规则; 在一定的约束条件下对桁架进行推演; 对推演结果分析、判断和决策, 得到新并联机构构型。最后举例说明了桁架和推演规则等对并联机器人机构构型创新设计具有决定性影响的关键技术问题。

**关键词:** 并联机器人 构型设计 创新设计 桁架

**中图分类号:** TH112

## 0 前言

并联机器人机构是由一个具有  $n$  自由度的末端执行器、一个定平台和连接于二者之间的两个以上独立支链组成的闭环机构, 由  $n$  个驱动器驱动<sup>[1]</sup>, 因具有高刚度、高承载能力、高动态性能、高速度和结构紧凑等优点, 它应用于机床、医疗器械(外科手术、检查等)、娱乐设施、航空航天(飞行模拟器、卫星天线定位、飞船对接等)、移动机器人、精密定位装置以及各种工业机器人(装配、核操作、勘测与探伤等)等领域, 已经具有相当重要的地位和价值。

早在 1947 年, Gough<sup>[2,3]</sup>提出了闭环结构的机构设计基本原理, 并于 1962 年完成了轮胎检测装置的样机, 1965 年 Stewart<sup>[4]</sup>设计了飞行模拟器, 1978 年 Hunt<sup>[5, 6]</sup>系统地分析了并联机器人机构的运动链机构, 提出了多种可用于并联机器人的机构类型, 之后相继出现了更多的并联机构<sup>[6-9]</sup>, 从此并联机器人机构成为研究热点。

按照并联机构自由度划分, 到 2001 年为止, 公开的并联机构(包括非完全并联机构)有 87 种, 其中 3、6 自由度的各占 40%, 4 自由度的占 6%, 5 自由度的占 3.5%, 2 自由度的占 10.5%<sup>[10]</sup>。

构型创新设计是并联机器人机构研究的重要领域。并联机构是否适合于特定场合, 主要取决于并联机构的末端执行器的自由度数目、运动类型、工作空间、奇异性和刚度和速度等性能指标是否满足特定需求, 这些性能指标与并联机构的构型、尺

度、结构有关, 其中并联机构构型无疑是最为重要的影响因素。因此, 拓展并联机构的应用范围, 开发并联机构新构型是必经之路。

并联机构构型研究大致分为两大类: 构型综合和构型优化。构型综合目的是得到满足自由度和运动要求的并联机构, 包括并联机构的拓扑结构和驱动综合; 而构型优化是针对特定构型的某些属性进行优化以提高机构性能, 显而易见, 构型综合更具创新性。

并联机构构型综合研究方法包括数综合型综合结合法、系统化方法、运动螺旋法和运动群论法等。数综合型综合结合法首先进行数综合, 利用通用自由度计算公式列举出一定公共约束和自由度条件下支链数及支链中自由度配置, 然后进行型综合, 针对具体的支链数及支链中自由度配置情况列举可能的铰链配置, 最后进行驱动器配置, 得到并联机构构型<sup>[6, 8, 11]</sup>。系统化方法也是并联机构构型综合的重要方法, 如 Tsai 等<sup>[12]</sup>给出了 3 自由度并联机器人机构构型, Prischow 等<sup>[13]</sup>提出了六条支链的并联机构系统综合方法。Huang 等<sup>[14]</sup>、Fang 和 Tsai<sup>[15]</sup>采用螺旋理论进行少自由度并联机构型综合, 事先给定支链描述输出杆位移的 Plücker 坐标, 并联机构末端执行器的运动是所有支链输出杆位移 Plücker 坐标的交集。Hervé<sup>[8]</sup>提出基于运动群论的构型综合方法, 用群表达不同空间运动, 给出实现运动群的支链。

## 1 桁架推演法

### 1.1 并联机构及其组成原理

并联机构和其他机构一样, 包括由多个构件组成的运动链、位置固定的机架和若干个驱动副, 即

\* 国家 863 高科技计划(2001AA421110, 2002AA424011)、国家自然科学基金(50275084)、国家科技攻关计划(2001BA203B20)和中国博士后科学基金资助项目。20031220 收到初稿, 20040305 收到修改稿

并联机构={机架, 驱动副, 运动链} (1)

在并联机构运行中的某一时刻, 锁定并联机构的驱动副, 相当于“固连”驱动副中相对运动的元素, 并联机构将会变成自由度为 0 的桁架或“结构”。

桁架=并联机构- {驱动副} (2)

如图 1a 所示的 2 自由度平面并联机构, 驱动副为杆 2 绕机架 1 的转动副和杆 4 和杆 5 之间的移动副, 如果锁定两个驱动副, 得到图 1b 所示自由度为 0 的桁架。

并联机构拓扑结构可以通过文字、运动简图(如图 1a)、字符串或拓扑图(如图 1c)等表达。其中拓扑图可以简洁、准确、直观表达并联机构拓扑结构, 而且便于处理, 图中左侧两竖线代表机架, 右侧粗实线代表动平台, 方框代表运动副, 线段代表构件, 带下划线的运动副为驱动副, 其他运动副为从动副。图 1c 为图 1a 所示并联机构的拓扑结构图, 图 1d 为图 1b 并联机构桁架的拓扑结构图。

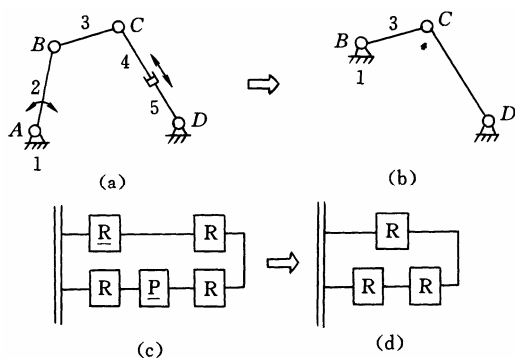


图 1 并联机构与桁架

## 1.2 桁架推演法基本思想

并联机构与桁架之间是多对一关系, 多个不同构型并联机构可能具有相同的桁架, 如图 2 中的三种并联机构与图 1a 机构在锁定驱动副后得到相同的桁架(图 1b)。具有相同桁架的所有并联机器人机构被称为以该桁架为基的并联机器人机构族, 从桁架的角度研究并联机构可以缩小研究的范畴, 对于构型设计、运动分析等都有很大益处。

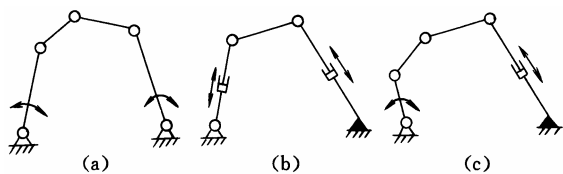


图 2 具有相同桁架的并联机构

提出并联机构构型创新设计方法——桁架推演法, 从桁架出发, 在一定约束条件下对桁架施加推演规则, 由桁架演化生成并联机构新构型。图 3 为

并联机构构型创新设计方法的系统示意图, 主要包括如下步骤。

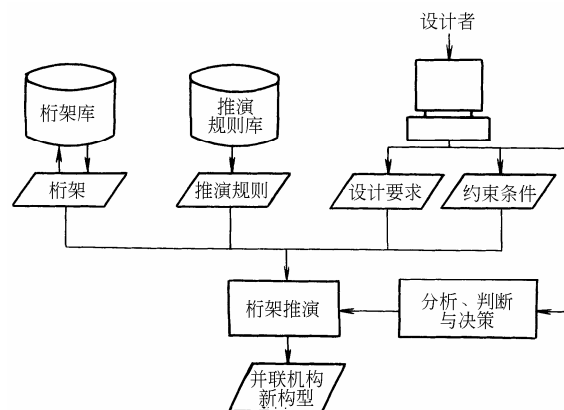


图 3 桁架推演法流程图

(1) 建立桁架库。桁架库是基于桁架的并联机构构型创新设计方法的基础。桁架库可以通过以下方法建立: ①对现有并联机构进行结构化处理和归纳、整理。②基于螺旋理论的桁架综合。③专家构造。

(2) 建立推演规则库。推演规则是基于桁架的构型创新设计的实现手段, 决定着从桁架演变到机构构型的重要过程。推演规则一方面可以通过对现有并联机构进行结构化处理, 从中得到启发, 总结出推演规则, 另一方面可以由专家直接给出。

(3) 由桁架到并联机构的推演。将设计者输入的具体设计要求和约束条件、从结构库中选取的桁架和从推演规则库中选取的推演规则一并输入到推理机中进行桁架推演, 推演结束得到一系列待处理的并联机构构型。

(4) 构型分析、判断与决策。通过对步骤(3)输出构型进行分析, 设计者判断构型是否为所需构型, 从推理结果中除去无效构型, 最终得到所需并联机构构型。

## 2 关键技术问题

在基于桁架的并联机构构型创新设计方法中, 桁架是构型和构型设计的基础, 推演规则是构型设计实现的基础, 约束条件是对构型设计进程控制的关键。

### 2.1 桁架及其获取

并联机构桁架从公共约束角度划分为平面桁架、球面桁架和空间桁架等。平面桁架(如图 4a~d)种类不多、形式也很简单, 但不乏来源于平面桁架的并联机构新颖构型。空间并联机构桁架(如图

4e~j)比平面桁架复杂得多,不能简单依靠通用自由度判断,需要分析桁架中各支链对动平台运动的约束以及这些约束之间的相关性。螺旋理论方法是解决这一问题的最有效手段<sup>[9,14,15]</sup>。

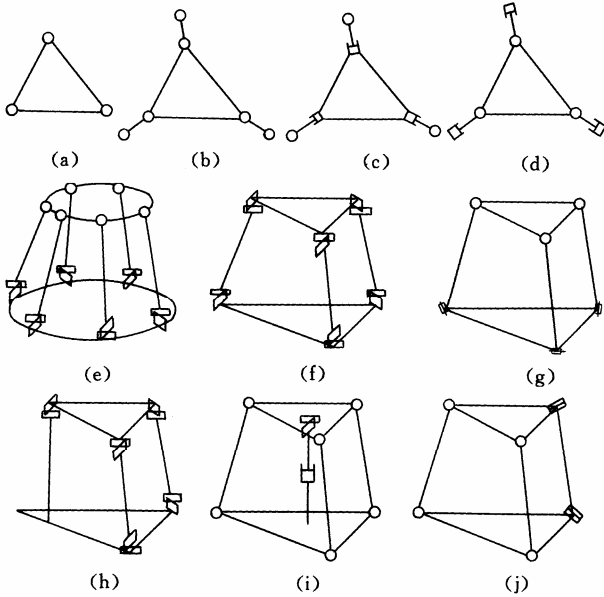


图 4 几种典型桁架

并联机构桁架根据支链拓扑结构的对称性分为对称桁架(如图4e~g)与非对称桁架(如图4h~j)。对称桁架在数量上远少于非对称桁架,但在应用上却远较非对称桁架广泛。

并联机构桁架根据新颖性可以分为已有桁架和新型桁架。在桁架推演法中桁架是并联机构构型的源头和基础,对现有桁架推演固然可以得到一些并联机构新构型,对新型桁架推演得到并联机构新构型的几率要大大增加。

桁架可以通过对现有并联机构进行结构化获得,去除一些可以通过简单桁架推演得到的复杂桁架,降低桁架的数量和复杂程度。

螺旋理论是获得新型桁架的有效手段,可以分为建立支链、建立支链组合、支链组合分析等几个步骤进行。首先利用简单运动副(如移动副、转动副、球铰、虎克铰等)建立支链列表,并在支链坐标系下建立 Plücker 坐标(如表 1 所示,表中  $v_{xj}$ 、 $v_{yj}$ 、 $v_{zj}$ 、 $\omega_{xj}$ 、 $\omega_{yj}$  和  $\omega_{zj}$  分别为运动螺旋的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  向的速度和角速度分量),用以表达支链为动平台提供的可能运动;然后建立支链组合列表,其中有些支链组合是桁架;通过坐标变换把所有支链的 Plücker 坐标转换到公共坐标系下,并考察变换后所有支链 Plücker 坐标的交集是否为空集,空集表示动平台的自由度为 0,该支链组合可以用来构造桁架。此外,桁架也可以由专家通过人脑创造获得。

表 1 几种支链的 Plücker 坐标

支链	运动螺旋					
	$v_{xj}$	$v_{yj}$	$v_{zj}$	$\omega_{xj}$	$\omega_{yj}$	$\omega_{zj}$
R	0	0	0	1	0	0
P	1	0	0	0	0	0
U	0	0	0	1	1	0
S	0	0	0	1	1	1
RR	0	1	0	1	0	0
RP	0	0	1	1	0	0
RU	0	1	0	1	1	0
RS	0	1	0	1	1	1
PP	1	1	0	0	0	0
PU	0	0	1	1	1	0
PS	0	0	1	1	1	1
UU	1	1	0	1	1	0
US/SS	1	1	0	1	1	1

表 2 给出了部分并联机构桁架,包括对称和非对称桁架,具有很强的代表性和实用性。

表 2 几种并联机构桁架

支链数	桁架
6	6-US/SS
5	RS-4US/4SS、PS-4US/SS、UU-4US/SS
4	2RS-2US/SS、2PS-2US/SS、2UU-2US/SS、RS-PS-2US/SS、RS-UU-2US/SS、PS-UU-2US/SS、S-3US/SS、RU-3US/SS、PU-3US/SS
3	3RS、3PS、3UU、RS-2UU、RS-2PS、PS-2UU、PS-2RS、UU-2PS、UU-2RS、UU-PS-RS、S-UU-US/SS、RU-UU-US/SS、PU-UU-US/SS、S-PS-US/SS、RU-PS-US/SS、PU-PS-US/SS、S-RS-US/SS、RU-RS-US/SS、PU-RS-US/SS、U-2US/SS、RR-2US/SS、PR-2US/SS、PP-2US/SS

### 2.2 推演规则

演化规则根据对并联机构自由度的影响情况分为三大类:自由度增加的推演规则(如图 5a~c)、自由度减少的推演规则(如图 5d~h)和自由度不变的推演规则(如图 5i~j)。

#### 2.2.1 自由度增加的推演规则

基于桁架的并联机构构型创新设计是从自由度为 0 的桁架出发,推演出具有一定自由度的并联机构,显然自由度增加的推演规则是必需的、重要的推演规则。

所有并联机构的运动都是通过三种方法实现的,即杆长变化、点位置变化和二者的组合<sup>[13]</sup>,由此归纳出自由度增加的推演规则。

(1) 定长杆变为变长杆。如图 5a 所示,根据一定的优先次序从拓扑结构图中选择一构件(定长杆),将其替换为变长杆,即用两个做相对移动的构件替换原有构件。

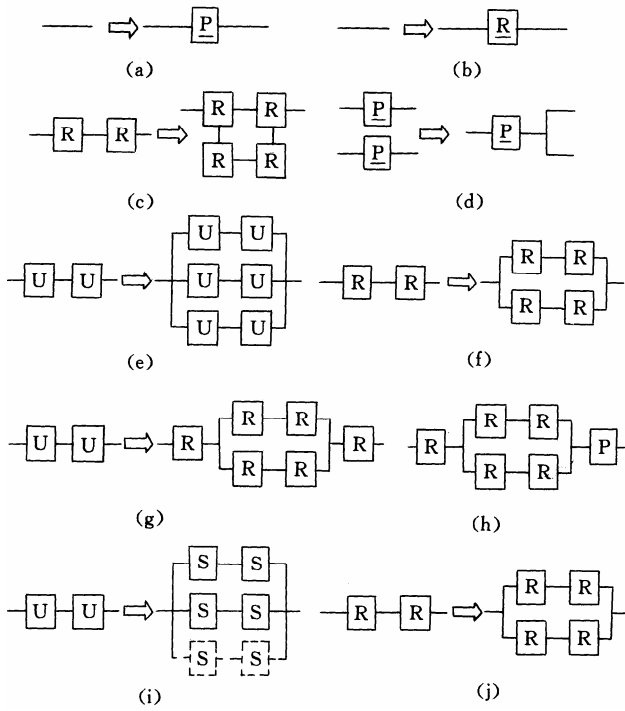


图 5 部分推演规则

图 6a 和 b 为定长杆变为变长杆推演规则的一个应用实例。图 6a 为一空间并联机构桁架，对其中每条支链施加定长杆变为变长杆的推演规则，得到图 6b 所示的 Stewart 机构。

(2) 相对静止变为相对运动。并联机构或桁架中的两构件，其中一构件上一点相对另一构件静止，应用相对静止变为相对运动推演规则后，该点相对另一构件由相对静止变为按一定规律运动，即在两构件间添加一构件，由该构件实现相对运动。最常用的两种运动规律为圆周运动和直线运动，分别可以通过添加曲柄和滑块获得。如图 1b，构件 3 上 B 点相对于构件 1 静止，添加曲柄 2 后，如图 1a，构件 3 上 B 点相对于构件 1 做圆周运动；直线运动通过加滑块获得，构件 3 上 B 点相对于构件 1 静止，添加曲柄 2 后，如图 6a 所示的并联机构桁架，每个虎克铰相对机架是静止的，如果在虎克铰和机架之间添加沿直线移动的滑块，虎克铰相对机架沿直线移动，则得到图 6c 所示的并联机构。值得注意的是，如果此推演规则发生在多个与机架相连的构件上，滑轨的空间位置布置不同，导致不同的构型(如图 6c、d 和 e 等)，这些并联机构的拓扑结构是一致的。

(3) 自由度重构。自由度重构在并联机构上添加构件，实现局部自由度，图 5c 为自由度重构规则的拓扑示意图。图 6f 是一平面 2 自由度并联机构，为了获得平面内的转动自由度，在左侧支链上添加平行四边形机构(如图 6g)，原机构实现 CE 平动，平行四边形实现 CE 的转动。

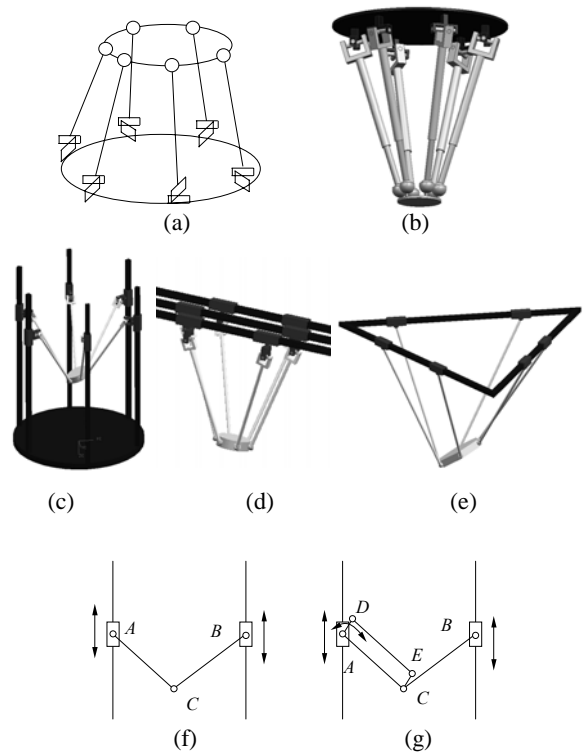


图 6 自由度增加的推演规则

### 2.2.2 自由度减少的推演规则

自由度减少的推演规则包括合并构件和构造平行四边形两类。

一并联机构(桁架)上的两个构件具有独立的、相似的运动，通常是沿平行或者同一直线移动，或者相对转动，两构件间的相对运动为简单的直线运动或者为转动，如果将两构件合并为一个构件，则二者之间的相对运动消失，机构损失 1 自由度。如图 7a 所示的 3 自由度平面并联机构，左侧两个滑块之间相对位置关系为直线移动关系，如果将两个滑块合二为一，得到图 7b 所示的 2 自由度平面并联机构。

构造平行四边形是常用的重要推演规则之一，通过构造平行四边形，约束 1 或多转动自由度。

(1) 构造平面平行四边形，约束一个转动自由度。如图 7c 所示，构件 1 和 3 之间通过构件 2、两个转动副相连，添加构件 4 后形成平行四边形，构件 3 相对于构件 1 的转动自由度消失。

(2) UU 变换为 3UU，约束两个转动自由度。如图 7d 所示的 3-UU 并联机构桁架，UU 变换为 3UU (见图 7e<sup>[18]</sup>)，构件 1 与构件 2 之间为平动关系，约束了原来 UU 中两个相对转动自由度。

(3) UU 变换为 R(2RR)R，减少 1 自由度。如图 7d 所示 3-UU 并联机构桁架，UU 变换为 R(2RR)R(见图 7f<sup>[18]</sup>)，构件 1 与构件 2 之间的运动关系由两移动加两转动变为两移动加一转动。

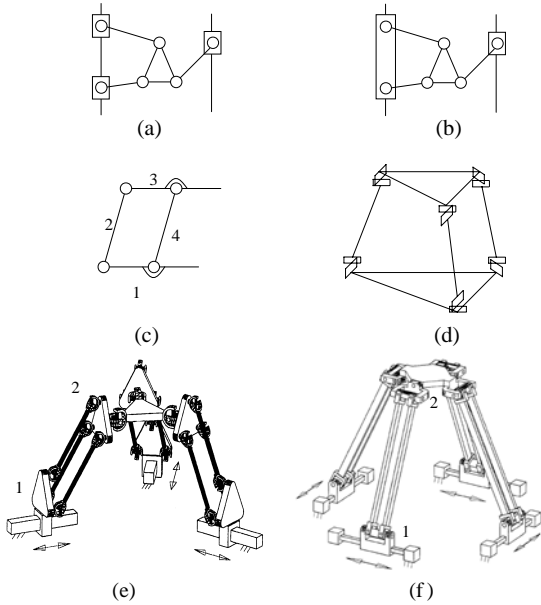


图 7 自由度减少的推演规则

### 2.2.3 自由度不变的推演规则

(1) UU 与 2-2SS(3-2SS)的等价变换。多个文献证明了 UU 支链与 2-2SS(3-2SS)支链的等价关系<sup>[16]</sup>，图 8a 中的 UU 支链分别被替换为 2-2SS(如图 8b)和 3-2SS(如图 8c)。

(2) 刚度重构。刚度重构通过在并联机构上附加一些功能单元提高机构的刚度<sup>[17]</sup>。图 8d 为平面 2 自由度并联机构，为了提高该机构的刚度，在支链上附加了一套相同的支链，对机构的自由度没有影响(如图 8e)。

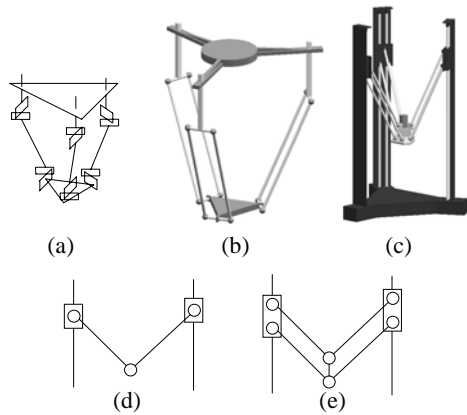


图 8 自由度不变的推演规则

(3) 其他等价变换。SS 与 US、SPS 与 UPS 是公认的等价关系，SS 和 SPS 除存在绕两个球铰连线转动自由度外与 US、UPS 一致，而且该自由度为局部自由度，对机构整体没有影响。

### 2.3 其他推演规则

除以上基本推演规则外，还有控制推演过程的推演规则，如推演深度、对称性规则、优先规则和支链驱动配置规则等，合理利用这些推演规则可以

把握桁架到并联机构推演过程方向，提高推演结果中有效构型的比例，提高构型实用性。

推演深度用来表征推演过程中推演的次数，对控制并联机构构型的复杂程度和推演结果构型的总量具有重要意义。

设定优先规则以反应设计者的倾向或者具体设计的需要，有助于控制推演的方向和提高推演效率。

对称性规则也是一个重要规则，它要求推演过程中尽可能地考虑对称原则，从而保证并联机构的构型具有一定的对称性。对称性原则使得并联机构的结构相对简单，而且实际中也常见某些性能的对称性。

支链驱动配置规则是出于并联机构动力学性能考虑，支链上驱动器通常远离末端执行器，提高动态性能。

## 3 实例

下面以清华大学发明的三种并联机构新构型为例说明并联机构构型创新设计方法。图 9a 所示平面桁架应用自由度增加推演规则之二，得到图 9b 所示并联机构；再应用自由度重构推演规则，得到图 9c 所示并联机构(其应用实例见图 9i)；再应用自由度减少推演规则，得到图 9d 所示并联机构(其应用实例见图 9j)。图 9e 所示平面桁架应用自由度增加推演规则之二，得到图 9f 所示并联机构；应用自由度减少推演规则将左侧两个滑块合并为一个滑块，得到图 9g 所示并联机构；刚度重构得到图 9h 所示并联机构(其应用实例见图 9k)。

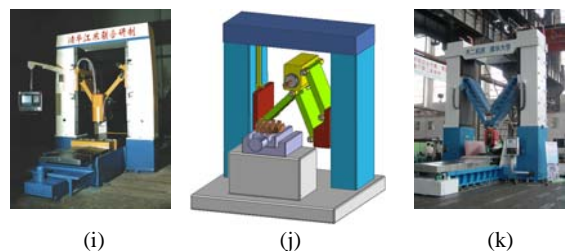
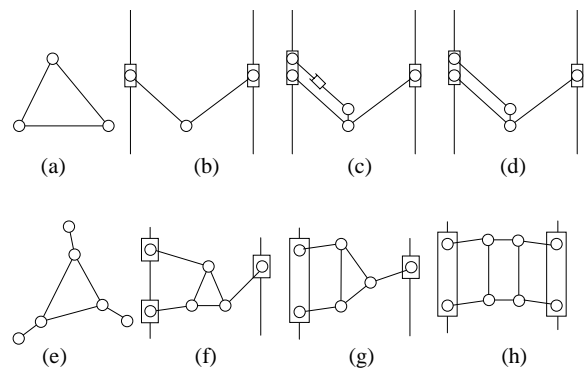


图 9 并联机构构型设计实例

## 4 结论

把并联机构看作驱动副和桁架的集合, 从而提出并联机器人机构创新构型设计的桁架推演法, 在有效构型比例和实用性上有很大提高, 并且设计者可以方便操纵构型创新设计过程。并联机构的桁架和推演规则具有开放性、可拓性。

### 参 考 文 献

- 1 Merlet J P. Parallel Robots. London: Kluwer Academic Publishers, 2000
- 2 Gough V E. Contribution to discussion of papers on research in automobile stability control and the tyre performance. Proc. Auto Div. Inst. Mech. Eng., 1956: 392~395
- 3 Gough V E, Whitehall S G. Universal tyre test machine. In: Proc. 9th International Technical Congress, FISITA, 1962: 117~135
- 4 Stewart D. A platform with six degrees of freedom. Proc. Inst. Mech. Eng., 1965, 180: 371~386
- 5 Hunt K H. Kinematic geometry of mechanisms. Oxford: Clearendon Press, 1978
- 6 Hunt K H. Structural kinematic of in-parallel-actuated robot-arms. ASME Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design, 1983, 105: 705~712
- 7 Behi F. Kinematic Analysis for a six-degree-of-freedom 3-PRPS parallel manipulator. IEEE J. of Robotics and Automation, 1988, 4(5): 561~565
- 8 Hervé J M. Group mathematics and parallel link mechanisms. In: 9th World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms, Milan, 1995: 2 079~2 082
- 9 黄真, 孔令富, 方跃法. 并联机器人机构学理论及控制. 北京: 机械工业出版社, 1997
- 10 Merlet J P. Information on parallel manipulators. <http://www-sop.inria.fr/coprin/equipe/merlet/merlet-eng.html>
- 11 Dimitar C, Parush P. Synthesis of parallel manipulators with linear drive modules. Mech. Mach. Theory, 1994, 29(7): 917~932
- 12 Tsai L W, Stamper R. A parallel manipulator with only translational degrees of freedom. ASME 96-DETC-MECH-1152, 1996
- 13 Pritschow G, Wurst K H. Systematic design of Hexapods and other parallel link systems. Annuals of the CIRP, 1997, 46(1): 291~295

- 14 Huang Z, Li Q C. General methodology for type synthesis of symmetrical lower-mobility parallel manipulators and several novel manipulators. The International Journal of Robotics Research, 2002, 21(2): 131~145
- 15 Fang Y F, Tsai L W. Structure synthesis of a class of 4-DOF and 5-DOF parallel manipulators with identical limb structures. The International Journal of Robotics Research, 2002, 21(9): 799~810
- 16 Pierrot F, Marquet F, Company O, et al. H4 parallel robot: Modeling, design and preliminary experiments. IEEE Int. Conf. Robot., 2001: 3 256~3 261
- 17 Jovane F, Negri S P, Fassi I, et al. Design issues for reconfigurable PKMs. In: Proceedings of 2002 Parallel Kinematic Machines International Conference, 2002: 69~82
- 18 Gao F, Li W M, Zhao X C, et al. New kinematic structures for 2-, 3-, 4-, and 5-DOF parallel manipulator designs. Mech. and Mach. Des., 2002, 37(11): 1 395~1 411

## RESEARCH ON PARALLEL ROBOT CONFIGURATION CREATIVE DESIGN

*Wang Jinsong Guan Liwen*

*Wang Liping Li Tiemin*

*(Department of Precision Instruments and  
Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084)*

**Abstract:** A new method, truss inference method, is presented for parallel robot configuration creative design. When actuated joints are locked, a parallel robot becomes a truss with 0-DOF. So a parallel robot is combination of driving pairs and a truss. The proposed method includes three main steps: Selects appropriate parallel robot truss with 0 degree of freedom and inference rules considering design requirements; Generates a series of configurations available by truss inference; Finally obtain novel parallel robot configurations by further analysis and decision. Key techniques, such as truss and inference rules, are detailed discussed. A design cases are given to illuminate the proposed method.

**Key words:** Parallel robot Configuration design  
Creative design Truss

作者简介: 汪劲松, 男, 1964 年出生, 工学博士, 教授、博士生导师。主要研究方向为先进制造技术与机器人学等。

E-mail: wangjs@tsinghua.edu.cn