

6 自由度弱耦合并联机构机型设计及其方法*

沈惠平

(江苏工业学院机械工程系 常州 213016)

杨廷力

(中国石化金陵石油化工有限公司科学技术协会 南京 210037)

马履中

(江苏大学机械学院 镇江 212013)

摘要: 提出了基于混合单开链的6自由度弱耦合并联机器人机构机型设计的一种程式化有效新方法,系统地阐述了动平台可实现三平移及三转动输出的6自由度并联机器人机构机型设计过程。设计出输出构件可实现三平移及三转动的7个新的实用混合单开链,首次给出静平台上6个转动副(或6个移动副)为主动副、具有较低耦合度及某些拓扑结构对称性的27种新的基本机型。通过改变主动副类型、主动副位置或支链的局部结构等又可得到更多的衍生机型。又按照机构拓扑结构对称性、输入—输出运动耦合复杂性、结构简单性及制造装配性能等对基本机型进行了简明分类并推荐了优选机型。

关键词: 并联机构 并联机器人 机型设计 型综合 混合链 单开链

中图分类号: TH112 TP242

0 前言

6自由度并联机构具有刚度大、自由度高、承载能力强和自重负荷比小等优点,对6自由度并联机构的已有研究,主要是对Stewart原型6-SPS及其改进型(6-SPT、6-RSS、6-PSS等)的运动学、动力学及控制等的分析及设计,一般地讲,这些机型具有输入—输出运动耦合性强、运动学正解求解复杂、工作空间较小等特点;目前尚未见到6自由度并联机构机型设计(也称运动结构型综合或拓扑结构型综合)方法的系统报道^[1~4]。

根据基于单开链单元的并联机构结构组成原理,提出了基于混合单开链(含单开链)的6自由度弱耦合(即输入—输出运动耦合性较弱)并联机器人机构机型设计的一种程式化有效新方法。该方法的特点是将混合单开链(含单开链)作为并联机构的“腿”结构(或称支链、支路);创新设计出7个输出构件可实现三平移及三转动(3T—3R)的实用混合单开链;首次给出了静平台上6个转动副(也可为6个移动副)为主动副、弱耦合并具有某些拓扑对称性的27种基本机型;又按照拓扑结构对称性、机构输入—输出运动耦合复杂性(回路间的耦合度)、结构简单性及

制造加工装配性能等对这些基本机型进行了简明分类并推荐了优选机型。

研究结果为这些原始创新的6自由度并联机构的运动学、动力学研究及其潜在的工业应用研究奠定了基础。

1 理论基础

1.1 并联机构机型设计的基本要求

为具有一般性,文中方法考虑了并联机构应满足的6个基本要求:①实现运动平台的期望运动输出,且非期望运动输出为常量。②机构运动学正解较为简单。③输入—输出运动具有弱耦合性。④全部主动副位于同一静平台上。⑤机构可由R(转动副)、P(移动副)及S(球副)组成,但每一支链中的P副数目不超过一个,且尽可能为位于同一静平台的主动副。⑥拓扑结构具有某些对称性。

1.2 并联机构的运动输出矩阵

支链、并联机构的运动输出矩阵M的一般形式定义为

$$M = \begin{bmatrix} x(\theta_i) & y(\theta_i) & z(\theta_i) \\ \alpha(\theta_i) & \beta(\theta_i) & \gamma(\theta_i) \end{bmatrix} \quad i=1 \sim F \quad (1)$$

式中 $x(\theta_i), y(\theta_i), z(\theta_i)$ ——动坐标系(附着于支链输出构件或并联机构动平台上)原点在静坐

* 国家自然科学基金(50275070、50375067)和江苏省自然科学基金(BK2001413)资助项目。20030314收到初稿,20031205收到修改稿

标系中的坐标
 $\alpha(\theta_i), \beta(\theta_i), \gamma(\theta_i)$ —— 动坐标系相对于静坐标系坐标轴的三个欧拉角
 θ_i —— 第 i 个主动副的广义变量
 F —— 机构自由度

1.3 并联机构运动输出方程

支链数为 N 的并联机构可视为由 N 个支链(单开链或混合单开链)组成, 每一支链的机架与输出构件分别是并联机构静、动平台的一部分。因此动平台在 N 个支链的共同约束下运动, 只能实现所有支链运动输出矩阵组成元素的交集部分^[5], 即其运动输出矩阵方程为

$$M_p = \bigcap_{i=1}^N M_{si} \quad (2)$$

式中 M_p —— 并联机构动平台的运动输出矩阵
 M_{si} —— 第 i 个支链的运动输出矩阵, 与支链的结构类型及其在静、动平台的配置方位有关

1.4 活动度方程

参考文献[6]给出了较有普遍意义的机构自由度方程

$$F = \sum_{i=1}^m f_i - \min \left\{ \sum_{j=1}^v \xi_j \right\} \quad (3)$$

式中 F —— 机构自由度
 f_i —— 第 i 运动副的自由度
 m —— 运动副数
 v —— 基本回路数
 $\min\{\cdot\}$ —— 取 ξ_j 最小的 v 个基本回路
 ξ_j —— 第 j 个基本回路的独立位移方程数

2 机型设计及其方法

步骤 1 列出欲设计的机构的运动输出矩阵

$$M_p = \begin{bmatrix} x & y & z \\ \alpha & \beta & \gamma \end{bmatrix} \quad (4)$$

步骤 2 设计构造联接动、静平台的支链结构类型。

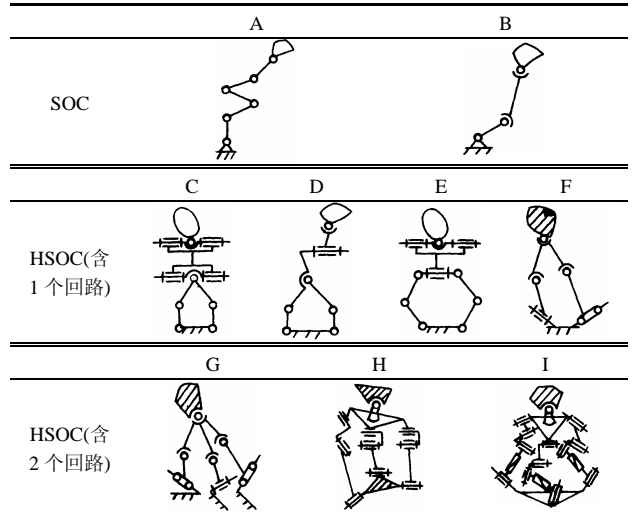
根据式(2)可知, 待构造的支链输出构件的运动输出元素, 应包含欲设计机型动平台的所有期望运动输出元素(3T-3R)。设各支链输出构件的运动输出矩阵为 M_{si} , 而并联机构动平台期望的运动输出矩阵为 M_p , 则 $M_{si} = M_p (i=1, \dots, v+1)$, 满足该条件的支链结构有以下两种情况。

(1) 一般单开链(SOC)。一般单开链是指由运动

副与构件串联而成的开式运动链。具有 3T-3R 运动输出的一般单开链, 较常见的有表 1 中的 A 型支链 6-R、B 型支链 S-S-R。事实上, S-P-S、S-P-U、S-R-S 型等支链皆可看作是 S-S-R 的变型结构。

(2) 混合单开链(HSOC)。混合单开链是指含有回路的单开链, 简称混合链。这样, 根据运动输出矩阵 M_p 且考虑实用简单原则(每一混合链支链至多含有二个回路), 设计构造出输出构件能实现 3T-3R 的 7 个较为实用的混合单开链, 见表 1 中的 C 型~I 型。

表 1 用于综合 6 自由度并联机构的 9 个支链结构



混合单开链作并联机构的支链, 不仅可以扩大机型空间, 有利于优选设计方案, 而且综合出的新机型具有较低的机构耦合度及良好的输入-输出运动控制解耦性能。

步骤 3 列举可行的支链组合方案。

能实现本设计要求($F=6$ 及 3T-3R 输出)的支链可分为 3 类、共 29 个组合方案。

(1) 仅由一般的 B 型支链组合, 其结果为 6-B 型, 即产生 6-SSR 型并联机构。事实上, 目前的 6-SPS、6-SPU 型等并联机构皆可看作是由这一组合方案变形而得(由于 A 型支链(即 6-R 型或 RRRRRR 型)由 6 个转动副组成, 结构过分复杂, 在以下讨论中没有采用)。

(2) 由含一个回路的 C 型~F 型混合链, 与一般 B 型支链进行组合, 可有: ①3-C, 3-D, 3-E, 3-F。②2-C ⊕ 2-B, 2-D ⊕ 2-B, 2-E ⊕ 2-B, 2-F ⊕ 2-B。③1-C ⊕ 4-B, 1-D ⊕ 4-B, 1-E ⊕ 4-B, 1-F ⊕ 4-B(2-C ⊕ 2-B 型表示动、静平台由 2 条 C 型混合链和 2 条 B 型支链连接, 下同)。

(3) 由含一、二个回路的 C 型~I 型混合支链, 与一般 B 型支链进行组合, 可有: ①1-G ⊕ 3-B, 1-I ⊕ 3-B, 1-H ⊕ 3-B; ②1-G ⊕ 1-C ⊕ 1-B; 1-H ⊕ 1-C ⊕ 1-B; 1-I ⊕ 1-C ⊕ 1-B; ③1-G ⊕ 1-D ⊕ 1-B; 1-H ⊕ 1-D

⊕1-B; 1-I⊕1-D⊕1-B; ④ 1-G⊕1-E⊕1-B; 1-H ⊕1-E ⊕1-B; 1-I ⊕1-E ⊕1-B; ⑤ 1-G ⊕1-F ⊕1-B; 1-H ⊕1-F ⊕1-B; 1-I ⊕1-F ⊕1-B。

步骤 4 确定基本回路的独立位移方程数 ξ_j 。

对上述每一支链组合方案, 皆有可能组成一个 6 自由度并联机构, 为此需要确定各支链组成的基本回路的独立位移方程数 ξ_j 。由于各支链运动副自由度 f_i 已知, 且欲设计机构的自由度 $F=6$, 因此由机构自由度方程式(3)

$$\min \sum \xi_j = \sum f_i - F$$

求得 $\min \sum \xi_j$, 再由 $\min \sum \xi_j$ 分配给各基本回路的独立位移方程数 $\xi_j (j=1, 2, \dots)$ 。

例如, 对于 2-C ⊕ 2-B (或 2-D ⊕ 2-B、2-E ⊕ 2-B) 支链组合方案, 因 C 型混合链支链有 9 自由度, 而 B 型链有 6 自由度 (绕二球副轴心连线的转动局部自由度应去除), 所以 $\min \sum \xi_j = (2 \times 9 + 2 \times 6) - 6 = 24$; 又该机构运动副总数 $m = 24$, 构件数 $n = 20$, 所以该机构共有 $v = m - n + 1 = 5$ 个基本回路, 又因每个 C 型混合链中含 1 个 $\xi_j = 3$ 的平面回路, 于是对第 1、2 个平面回路有 $\xi_1 = \xi_2 = 3$; 这样, 其余 3 个空间回路的独立位移方程数只能分配为 $\xi_3 = \xi_4 = \xi_5 = 6$ 。

用同样方法可求得上述其余各种支链组合方案的基本回路独立位移方程数 $\xi_j (j = 1 - v)$ 。

步骤 5 判定基本回路结构类型的存在性。

由步骤 4 给出的支链可能形成的各基本回路的 ξ_j 值分配方案, 进一步可判定具有各 ξ_j 值的这些基本回路结构类型是否存在。

例如, 对于前述 2-C ⊕ 2-B 组合方案及其各基本回路分配的 ξ_j 值, 因 2 个 C 型混合支链中的 2 个平面回路的独立位移方程数确实为 $\xi_1 = \xi_2 = 3$; 而 $\xi_3 = \xi_4 = \xi_5 = 6$ 的其余 3 个空间回路也存在, 因此该支

链组合方案能构成所需并联机构。

同样, 经判定, 相应于步骤 3 中所述的各种组合方案的 $\xi_1 \sim \xi_6$ 对应值的基本回路结构类型确实存在, 因此这些组合方案都能构成所需的并联机构。

步骤 6 确定各支链在动、静平台间的配置方位。

由机构运动输出矩阵式(4)、支链组合方案(步骤 3)及其 ξ_j 分配方案(步骤 4)、相应的基本回路类型(步骤 5)等已知条件, 按照运动输出方程(2), 即可确定各支链在动、静两平台间的配置方位, 使配置方位既能满足已知条件, 又能实现 6 自由度、3T—3R 输出, 并可画出并联机构简图。

对所给出的所有支链组合方案的回路结构, 除了对各混合支链中存在 $\xi < 6$ 的过约束回路, 需特别确定其在动、静两平台的特殊配置方位 (详见表 2 并联机构简图), 才能保证 3T—3R 输出外, 因为其余支链结构均为一般空间回路 ($\xi_j = 6$), 因此可任意配置支路方位, 于是, 动平台在 6 个支链的共同约束作用下具有 3 个平动及 3 个转动, 它们的运动输出矩阵可表示为

$$\bigcap_{i=1}^6 \begin{bmatrix} x & y & z \\ \alpha & \beta & \gamma \end{bmatrix}_{s_i} = \begin{bmatrix} x & y & z \\ \alpha & \beta & \gamma \end{bmatrix}_P$$

考虑到并联机构应满足前面所述的 6 个基本要求, 至此可得到静平台上 6 个 R 副为主动副、动平台能实现三平移三转动输出的 29 种并联机构基本机型, 如表 2 所示。由于步骤 3 没有穷尽所有的支链组合方案, 因此读者可取表 1 中支链的其他多种组合方案, 重复上述步骤, 还可得到并联机构的其他机型。

步骤 7 确定主动副。

按照主动副存在准则^[6], 表 2 中 29 种机型的静平台上的 6 个 R 副满足主动副存在准则, 因此皆可成为主动副。

表 2 29 个 6 自由度并联机构基本机型运动简图

No.	1	2	3	4	5
	6-A	6-B	3-C	3-D	3-E
机构简图					
K 值及控制耦合性	$k=4$ 无控制解耦性	$k=3$ 无控制解耦性	$k_1=k_2=k_3=0, k_4=2$ 无控制解耦性	$k_1=k_2=k_3=0, k_4=1$ 无控制解耦性	$k=3$ 无控制解耦性
No.	6	7	8	9	
	3-F	2-C ⊕ 2-B	2-D ⊕ 2-B	2-E ⊕ 2-B	
机构简图					
k 值及控制耦合性	$k=1$ 无控制解耦性	$k_1=k_2=0, k_3=2$ 无控制解耦性	$k_1=k_2=0, k_3=1$ 无控制解耦性	$k=2$ 无控制解耦性	

(续)

No.	10	11	12	13
	2-F ⊕ 2-B	1-C ⊕ 4-B	1-D ⊕ 4-B	1-E ⊕ 4-B
机构简图				
k 值及控制耦合性	$k_1=k_2=0, k_3=1$ 部分控制解耦性	$k_1=0, k_2=3$ 无控制解耦性	$k_1=0, k_2=2$ 无控制解耦性	$k=3$ 无控制解耦性
No.	14	15	16	17
	1-F ⊕ 4-B	1-G ⊕ 3-B	1-I ⊕ 3-B	1-H ⊕ 3-B
机构简图				
k 值及控制耦合性	$k_1=0, k_3=2$ 部分控制解耦性	$k_1=0, k_2=1$ 部分控制解耦性	$k_1=1, k_2=2$ 部分控制解耦性	$k_1=1, k_2=1$ 部分控制解耦性
No.	18	19	20	21
	1-G ⊕ 1-C ⊕ 1-B	1-G ⊕ 1-D ⊕ 1-B	1-G ⊕ 1-E ⊕ 1-B	1-G ⊕ 1-F ⊕ 1-B
机构简图				
k 值及控制耦合性	$k_1=k_2=k_3=0, k_4=1$ 部分控制解耦性	$k_1=k_2=k_3=k_4=k_5=0$ 部分控制解耦性	$k_1=k_2=0, k_3=1$ 部分控制解耦性	$k_1=k_2=k_3=0$ 部分控制解耦性
No.	22	23	24	25
	1-H ⊕ 1-C ⊕ 1-B	1-H ⊕ 1-D ⊕ 1-B	1-H ⊕ 1-E ⊕ 1-B	1-H ⊕ 1-F ⊕ 1-B
机构简图				
k 值及控制耦合性	$k_1=0, k_2=k_3=1$ 部分控制解耦性	$k_1=0, k_2=1, k_3=0$ 部分控制解耦性	$k_1=k_2=1$ 部分控制解耦性	$k_1=1, k_2=k_3=0$ 部分控制解耦性
No.	26	27	28	29
	1-I ⊕ 1-C ⊕ 1-B	1-I ⊕ 1-D ⊕ 1-B	1-I ⊕ 1-E ⊕ 1-B	1-I ⊕ 1-F ⊕ 1-B
机构简图				
k 值及控制耦合性	$k_1=0, k_2=2, k_3=1$ 部分控制解耦性	$k_1=0, k_2=2, k_3=0$ 部分控制解耦性	$k_1=k_2=1$ 部分控制解耦性	$k_1=2, k_2=k_3=0$ 部分控制解耦性

步骤 8 确定机构耦合度及控制解耦性。

例如, 对表 2 中第 7 种机构(属 2-C ⊕ 2-B 组合), 由机构耦合度 k 计算公式及其算法^[6]得, 该并联机构由两个 $\nu=1, k=0$ 的 BKC_1, BKC_2 及一个 $\nu_3=3, k_3=2$ 的 BKC_3 组成; 而对表 2 中第 2 种机构(属 6-SSR 型, 可看作是 6-SPS Steward 原型的变形结

构), 仅由一个 BKC 组成, 但其耦合度值较大, 为 $k=3$, 这正是 Steward 原型及其改进型并联机构运动学正求解甚难的原因。

其余并联机构的 k 值(绝大多数仅为 0、1 和 2)及控制解耦性能情况也已列于表 2。从表 2 可知, 用混合单开链(含部分单开链)作支链得到的并联机

构,其耦合度值要低得多,运动学正解求解较易,且具有良好的控制解耦性。

步骤 9 扩大机型解空间,得到衍生机型。

对表 2 中各机型,可以利用 P 副替代主动副 R(但应保持各基本回路 ξ_j 值不变)、改变运动副 R 位置、改变支链的某些局部结构及增加支链组合方案等扩展方法,得到更多的衍生机型,进一步扩大机型的选优空间,有利于优选并联机构。

3 机型定性分类与优选

在上述得到的 29 种 6 自由度并联机构基本机型(表 2)中,第 2 种(及第 1 种)机型已有较多的研究,因其 k 值为 3(4),运动学正解求解困难;其余第 3~29 种,共 27 种新的基本机型,为首次提出。为了更好地理解这些新型结构并为这些新机型找到潜在的应用背景,有必要进行初步的分类,为此,提出以下 4 个分类指标:①拓扑结构尽可能具有对称性。②运动学与动力学问题复杂性(回路耦合度大小)。③结构尽可能简单(具有较少的运动副及构件)。④具有较好的制造装配性能(不含或少含球副)。对这 27 种新基本机型进行如下简明定性分类与优选。

(1) 具有较好结构对称性的机型有:第 3~17 种。

(2) 运动学与动力学问题复杂性较低的机型有:第 4、6、8、10、15、17、18、19、20、21、22、23、24、25、28 种。

(3) 结构较简单的机型有:第 3、4、5、6、18、19、20、24 种。

(4) 具有较好制造加工性能的机型有:第 3、4、5、7、8、9 种。

(5) 同时具有上述 4 条要求的机型(称为定性优选机型)有:第 4 种。

这一工作为进一步按运动学与动力学性能优选机型(称为定量优选机型)奠定了基础。

4 结论

(1) 基于混合单开链(含部分单开链)单元与并联机器人机构结构组成规律,提出了 6 自由度并联机器人机构机型设计的一种系统有效程式化方法,且易于实现计算机辅助机型设计的自动生成,该方法也可用于其他输出运动形式(如三平移、一平移及二转动、二平移及二转动、三平移及二转动、二平移及三转动)、自由度为 3、4、5 的并联机器人机型设计^[8]。

(2) 混合单开链概念的提出及其作为并联机构的支链,可综合出大量并联机器人新的基本机型,且这些基本机型的输入—输出复杂性较低,这对扩大机型优选空间、运动学求解及设计具有良好性能

的新机型均具有重要的学术意义及工业应用价值。

(3) 首次给出了 27 种 6 自由度、三平移三转动输出的并联机构原始创新机型,还可用扩展方法得到更多实用的衍生机型,有利于优选并联机构。文中的优选机型已申请国家发明专利^[9]。

(4) 按照作者提出的 4 个分类指标对 27 个新的基本机型进行了定性分类优选,其目的是为这些新机型找到潜在的应用背景。

参 考 文 献

- 1 Stewart D A. Platform with six degrees of freedom. Proc. on Institution of Mechanical Engineering, 1965, 180(I): 371~386
- 2 Hunt K H. Structural kinematics of in-parallel-actuated robot-arms. ASME Journal of Mechanical Design, 1983, 105: 705~712
- 3 Dasguta B, Mruthyunjaya T S. The Stewart platform manipulator: a review. Mechanism and Machine Theory, 2000, 35(1): 15~40
- 4 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
- 5 杨廷力,金琼,刘安心,等. 基于单开链单元的欠秩并联机器人机构型综合的一般方法. 机械科学与技术, 2001, 20(3): 321~325
- 6 杨廷力. 机械系统基本理论——结构学、运动学、动力学. 北京:机械工业出版社,1996
- 7 金琼. 过约束机构与欠秩并联机器人机构研究:[博士学位论文]. 南京:东南大学,2001
- 8 沈惠平,杨廷力,金琼,等. 用于虚轴机床和机器人等的一类并联机构. 中国发明专利: 01108283.6, 2003-09-17
- 9 沈惠平,杨廷力,马履中,等. 用于虚拟轴数控机床与机械测量机的 6 自由度并联机构. 中国发明专利申请号: 03113115.8, 2003-10-24

METHODOLOGY FOR TYPE SYNTHESIS OF KINEMATIC STRUCTURES OF 6-DOF WEAKLY-COUPLED PARALLEL MECHANISMS

Shen Huiping

(Department of Mechanical Engineering, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213016)

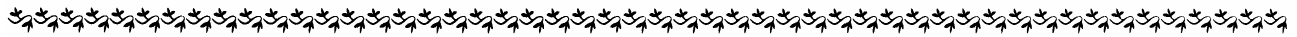
Yang Tingli

(Association for Science and Technology, Sinopec Jinling Petrochemical Corporations, Nanjing 210037)

Ma Lüzhong

(College of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013)

Abstract : Based on basic structure theory of parallel robotic mechanisms, a novel type synthesis methodology for kinematic structures of 6-DOF weakly-coupled parallel mechanisms is presented, which considers the hybrid chain as the “limps” connecting the moving platform with the base. The 27 promising 6-DOF parallel kinematic structures with lower coupling degree between independent loops, actuated by 6 rotation joints (or 6 prismatic joints) amounted at the base, are presented originally, the platform of which can possess general spatial motions, i.e. three translations and three Rotations. The much more alternatives to these kinematic structures also could be obtained by altering the location and



(上接第 9 页)

Annals of the CIRP, 2001, 50(1): 305~308

- 81 Naito T, Kashima T. A recycling information system for television sets. In: Proceedings of First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Tokyo, Japan, 1999: 154~157
- 82 Yuji I, Hironobu Y, Susumu S, et al. Advanced transportation in the dismantling / recycling factory—development of the flexible transfer system. In: Proceedings of First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Tokyo, Japan, 1999: 576~579
- 83 Kouikoglou V S. Optimal rate allocation in unreliable assembly/disassembly production networks with blocking. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2000, 16(4): 429~343
- 84 Kotera Y, Hirasawa E, Sakitani H. Integrated recycle plant for electric home appliances—automated primary disassembly for refrigerators process. In: Proceedings of First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Tokyo, Japan, 1999: 268~272
- 85 Hudson-Hanley B A, Terhune A C, Degher A. A step towards closing the loop: implementing DfE criteria to invent product-specific de-manufacturing capability. In: Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, San Francisco, USA, 2002: 17~20

the type of the driving joints or by changing some partial sub-structures relevant to the branch loops. The classification of these parallel kinematic structures is identified according to the four structure evaluation criteria suggested here, i.e.(a)structure topological symmetry; (b)coupling degree value between independent loops; (c) structure simplicity (with fewer links and fewer joints); (d) manufacturability, from which optimal 6-DOF parallel kinematic structures are recommended in terms of different design requirements.

Key words: Parallel mechanisms Parallel robotics
Kinematic structures Type synthesis
Hybrid chains Single-opened chains

作者简介: 沈惠平, 男, 1965 年出生, 教授。主要从事机构学、并联机器人、机械设计及其设计方法学的研究, 发表论文 60 余篇。

E-mail: hpshen@public.cz.js.cn

DISASSEMBLY OF MECHANICAL AND ELECTRONIC PRODUCTS: THE STATE-OF-ARTS

Gao Jiangang Wu Ying Xiang Dong
Liu Xueping Duan Guanghong Wang Jinsong
(Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: As an important part of Green Manufacturing, disassembly is a way to save natural resource, to protect environment and to realize sustainable development of manufacturing industry. By collection, classification and study of the achievements on disassembly of mechanical and electronic products, the state-of-arts of design for disassembly, disassembly process planning, disassembly technology and tools, and disassembly system configuration are presented. Several problems on disassembly that need be further studied and developed are also discussed.

Key words: Design for disassembly
Disassembly process planning
Disassembly technology Disassembly tool
Disassembly system configuration

作者简介: 高建刚, 男, 1976 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机电产品绿色设计与制造的理论与应用。

E-mail: gjg@mails.tsinghua.edu.cn