

文章编号: 1005—8893 (2000) 04—0035—04

基于单开链单元的三平移并联机器人机构型综合及分类^{*}

杨廷力¹, 金 琼², 刘安心³, 沈惠平⁴, 罗玉峰⁵

(1. 金陵石化公司, 江苏南京 210037; 2. 东南大学 机械工程系, 江苏南京 210096; 3. 解放军理工大学 工程兵工程学院, 江苏南京 210007; 4. 江苏石油化工学院 机械工程系, 江苏常州 213016; 5. 南昌大学 机电工程学院, 江西南昌 330029)

摘要: 以单开链支路为单元, 揭示了欠秩并联机器人机构结构组成的某些规律。提出了三平移输出并联机器人机构型综合的一种系统、有效的新方法。型综合共得到 31 个机构, 并进行了分类。其中 27 个机构为本文首次给出。提出的三平移并联机器人机构型综合方法具有普遍性意义, 并已用于其它运动输出类型的欠秩并联机器人机构的型综合。

关键词: 并联机器人机构; 欠秩; 单开链支路; 型综合

中图分类号: TH 111. 1; TP 24 **文献标识码:** A

近十多年来, 欠秩并联机器人机构成为研究热点之一。这是由于欠秩并联机器人结构简单、造价低, 具有良好的应用前景, 其中以三平移并联机器人机构研究最多, 但没能给出较系统的综合方法^[1~3]。本文以单开链 (记作 SOC) 支路为单元, 揭示了欠秩并联机器人机构组成的某些规律, 提出了一种欠秩并联机器人机构型综合的系统、有效方法。以 4 个基本条件 (①期望输出运动为三维平移, 且非期望输出为常量; ②机构可由 R、P、C、T 及 S 副组成, 且尽可能减少运动副数目; ③全部主动副可位于同一平台上; ④部分或全部 SOC 支路应具有相同结构类型) 为目标, 用本文方法完成了三维移动并联机器人机构的型综合, 并进行了分类, 为优选并联机器人机构提供了基础。

1 理论基础

1.1 并 (串) 联机构的运动输出矩阵

并 (串) 联机构的运动输出矩阵 U 为

$$U = \begin{bmatrix} \overline{x}(\theta_i) & \overline{y}(\theta_i) & \overline{z}(\theta_i) \\ x(\theta_i) & y(\theta_i) & z(\theta_i) \end{bmatrix} \quad i = 1 \sim F \quad (1)$$

式中: $\overline{x}(\theta_i)$, $\overline{y}(\theta_i)$, $\overline{z}(\theta_i)$ 为输出构件 (并联机构的动平台或串联机构的末端构件) 上基点位置的广义坐标; $x(\theta_i)$, $y(\theta_i)$, $z(\theta_i)$ 为输出构件上基轴方向的广义坐标; θ_i 为第 i 个主动输入的广义变量; F 为机构的活动度。

定义: 并 (串) 联机构输出构件的独立广义坐标数为该机构的秩, 即

$$\begin{cases} \text{对并联机构, } \zeta^p = \zeta^p + \zeta^p \\ \text{对串联机构, } \zeta^o = \zeta^o + \zeta^o \end{cases} \quad (2)$$

式中: ζ^p (ζ^o) 为并 (串) 联机构的秩, 文中所有符号的右上标 p 表示并联机构, o 表示串联机构 (或单开链 SOC), 1 表示单回路; ζ^p (ζ^o) 为输出构件上基点位置的独立广义坐标数, ζ^p (ζ^o) = 0, 1, 2, 或 3; ζ^p (ζ^o) 为输出构件上基轴方向的独立广义坐标数, ζ^p (ζ^o) = 0, 1, 2, 或 3。

^{*} 收稿日期: 2000—10—27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59875084)

作者简介: 杨廷力 (1940—), 男, 河南南阳人, 教授, 主要从事机构学方面的研究。

当 $\zeta^p (\zeta^o) = 1 \sim 5$ 时称为欠秩机构。本文讨论 ζ^p 与并联机器人机构活动度 F 等价的情形。

欠秩并联机构型综合应使期望运动输出满足设计要求, 而非期望运动输出保持常量。

1.2 单开链支路的结构类型

二副杆串联机构简称为单开链 (SOC)。表 1

表 1 $\zeta^o = 3 \sim 5$ 且 $\zeta^p = 3$ 的欠秩 SOC 的结构类型 (部分)

No	过约束回路		相应 SOC 支路	
	ζ^l	结构类型	ζ^o	输出矩阵
1	3	P-P-P-P	$\zeta^o = 3$ $\zeta^p = 0$	$-P-P-P-$ $\begin{pmatrix} \bar{x} & \bar{y} & \bar{z} \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix}$
2	4	R//R//R-P-P	$\zeta^o = 3$	$-R//R-P-P- (-R//C//P-)$
3			$\zeta^p = 1$	$-R//R//R-P-P- (-R//R//C-)$ $\begin{pmatrix} \bar{x} & \bar{y} & \bar{z} \\ \wedge & \cdot & \cdot \end{pmatrix}$

1.3 并联机构运动输出矩阵的确定

支路数为 n 的并联机构可视为由 n 个 SOC 组成, 每一 SOC 支路的机架与输出构件分别是并联机器人机构静、动平台的一部分。机构动平台在 n 个 SOC 支路的共同约束下运动, 故有

$$U^p = \bigcap_{i=1}^n U_i^o \quad (3)$$

式中: U^p 为动平台运动输出矩阵; U_i^o 为第 i 个 SOC 支路的运动输出矩阵, 它与 SOC 支路的结构类型及其在静、动平台上的配置方式有关。例如, 图 1 (a) 为 $F=1$ 的 Sarrus 机构, 由两个 SOC 支路 $\{-R_1 // R_2 // R_3-\}$ 和 $\{-R_4 // R_5 // R_6-\}$ 按图示配置而成。由式 (3) 有

$$U^p = U_1^o \cap U_2^o = \begin{bmatrix} \bar{x} & \cdot & \bar{z} \\ \cdot & y & \cdot \end{bmatrix}_1 \cap \begin{bmatrix} \cdot & \bar{y} & \bar{z} \\ x & \cdot & \cdot \end{bmatrix}_2 = \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \bar{z} \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix}_p$$

其中元素“ \cdot ”表示输出运动为常量。上式表明: 并联机构动平台只能沿垂直于 R_3 与 R_6 的 z 方向平移。若在该机构动、静平台之间再附加一个 SOC 支路 $\{-R_7 // R_8 // R_9-\}$, 且 R_1 、 R_4 与 R_7 三轴线不平行于同一平面, 则机构不能运动, 这表明附加 SOC 支路对动平台增加了新的约束。若 R_1 、 R_4 与 R_7 三轴线平行于同一平面 (如图 1 (b) 所示), 显然动平台仍沿 z 方向平移, 即附加 SOC 支路没有对动平台提供新的约束, 或称只提供了虚约束, 它表明回路的运动学方程之间存在相关性。

给出本文将用到的、与一般过约束回路 (或称欠秩回路^[4~6]) 相应的 $\zeta^o = 3 \sim 5$ 且 $\zeta^p = 3$ 的部分欠秩 SOC 的结构类型及其运动输出矩阵。

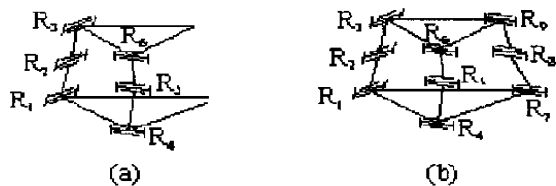


图 1 (a) Sarrus 机构 (b) 带有虚约束的 Sarrus 机构

1.4 单开链支路的约束度及机构耦合度

文献 [5, 7] 提出用耦合度来描述多回路机构回路之间运动学、动力学方程联立求解的复杂性。其基本要点是:

一个具有 v 个基本回路的机构可分解为 $v+1$ 个有序的 SOC, 第 j 个 SOC 对机构的约束度 Δ_j 为

$$\Delta_j = \sum_{i=1}^{m_j} f_i - I_j - \zeta_j \quad (4)$$

式中: m_j 为第 j 个 SOC 的运动副数, I_j 为第 j 个 SOC 的主动输入数, ζ_j 为第 j 个 SOC 组成的所有回路之秩的最小值 (当仅有一个 SOC 时, 由于不构成回路, $\zeta_1=0$), 则机构耦合度 κ 为:

$$\kappa = \frac{1}{2} \min \left\{ \left[\sum_{j=1}^{v+1} |\Delta_j| \right]_t \mid t=1, 2, 3, \dots \right\} \quad (5)$$

当 $\kappa=0$ 时, 各回路运动学与动力学分析可依次单独求解, 不同回路的方程之间无须联立。当 $\kappa>0$ 时, 运动学、动力学分析需要多个回路联立求解, κ 恰为联立方程的维数。

对图 1 (b) 机构, 当将附加的 SOC $\{-R_7 // R_8 // R_9-\}$ 任意安置时, 其对原机构的约束度为

$$\Delta_3 = \sum_{i=1}^3 f_i - I_3 - \zeta_3 = 3 - 0 - 5 = -2, \text{ 即提供了两个}$$

约束。当将 R_1 、 R_4 与 R_7 三轴线配置成平行于同一平面而彼此又不相平行时，由于 U^p 不变，故该支路没有提供新的约束，或称仅提供了 2 个虚约束。

2 基于 $\zeta^o=4$ 且 $\zeta^r=3$ SOC 的并联机器人机构的型综合

2.1 选定 SOC 支路的结构类型

对应于 $\zeta^o=4$ 且 $\zeta^r=3$ 的 SOC 有多种类型（见表 1，No. 2，No. 3），现选定 $\{-R // R // C-\}$ 支路。

2.2 确定并联机构最少支路数 n_{min}

对所有 SOC 支路具有相同结构的并联机构，为使等式（3）左侧不含任何转动输出，必有 $n_{min} = \zeta^o + 1$ 。当 $\zeta^o=1$ 时， $n_{min}=2$ ，即由两个 SOC 支路 $\{-R_1 // R_2 // C_3-\}$ 与 $\{-R_4 // R_5 // C_6-\}$ 组成只有一个基本回路的并联机构。

2.3 确定各基本回路的秩 ζ_j^l

各基本回路的秩 ζ_j^l 应满足 $\sum_{j=1}^{n-1} \zeta_j^l = \sum_{i=1}^m f_i - F^{[7]}$ ，对本 SOC 支路因 $n_{min}=2$ ，故唯一的基本回路之秩 $\zeta^l=5$ 。

2.4 确定 SOC 支路配置方式及机构简图

由（3）式，若要 $U^p = \begin{bmatrix} \bar{x} & \bar{y} & \bar{z} \\ x & \cdot & \cdot \\ \cdot & y & \cdot \end{bmatrix}$ ，两 SOC

支路的输出矩阵只能分别为 $\begin{bmatrix} \bar{x} & \bar{y} & \bar{z} \\ x & \cdot & \cdot \\ \cdot & y & \cdot \end{bmatrix}$ 与 $\begin{bmatrix} \bar{x} & \bar{y} & \bar{z} \\ x & \cdot & \cdot \\ \cdot & y & \cdot \end{bmatrix}$ 。由上述已知条件得到表 2No. 3（a—1）所示机构。易知其三个主动副不可能位于同一平台上。

2.5 主动副在同一平台的并联机构型综合

为实现三个主动副位于同一平台上，需要三个 SOC 支路。为此，应在上述机构上附加一新的 SOC 支路，组成有两个基本回路的并联机构。所附加 SOC 支路的约束度 Δ_3 应为零或只提供虚约束，可分两种情况讨论：①附加 SOC 支路 $\{-R_7 // R_8 // C_9-\}$ 与原 SOC 支路结构相同。有 $\zeta_1^l + \zeta_2^l = 9$ ，其分配方案只能是：原有基本回路 $\zeta_1^l = 5$ ，新生成基本回路 $\zeta_2^l = 4$ 。因 $\zeta_2^l = 4$ ，在表 2No. 3（a—1）上配置附加的 SOC 支路 $\{-R_7 // R_8 // C_9-\}$ 时，应使 $R_7 // R_1$ （或 R_4 ），相应其约束度 $\Delta_3 = 0$ ，如表 2No. 3（b—1）所示。②附加 SOC 支路 $\{-R_7 // R_8 // C_9-\}$ 与原有 SOC 支路结构相同，且要求 $\zeta_1^l = \zeta_2^l = 5$ 。当在表 2No. 3（a—1）上附加任意配置的 SOC 支路时，易知 $F = 2 < 3$ 。这是由于附加 SOC 支路的约束度 $\Delta_3 = \sum_{i=1}^3 f_i - I_3 - \zeta_3 = 4 - 0 - 5 = -1$ 所致。由图 1（b）可知，若在配置附加 SOC 支路时保证 R_1 、 R_4 、 R_7 三者平行于同一平面，则附加 SOC 支路只提供虚约束，即仍保持机构的 U^p 不变，如表 2No. 3（c—1）所示。

表 2 基于 $\zeta^o=3$ 且 $\zeta^r=1$ 或 2 SOC 的三平移并联机器人机构型综合及其分类(部分)

No.	ζ^o (ζ^r)	SOC 结构类型	两支路并联机器人机构	三支路并联机器人机构	三支路并联机器人机构 (用平行四边形 4R 机构替代 P 副)	三支路并联机器人机构 (用 S 副替代部分 R 副)
3	4 (1)	-R/R/R-P- (-R/R/C-)	(a-1) $\kappa=0$ 	(b-1) $\kappa=1$ $R_4 // R_1$ 	(b-2) $\kappa=1$ $R_4 // R_1$ 	(b-3)
			(c-1) $\kappa=1$ R_1, R_4, R_7 平行于同一平面 	(c-2) $\kappa=1$ R_1, R_4, R_7 平行于同一平面 	(c-3) 	
			(d-1) $\kappa=1$ 	(d-2) $\kappa=1$ 		

2.6 选定主动副

对表 2No. 3 (c-1) 机构, 三个 C 副的三个移动自由度不能同时作为主动输入。因三个移动自由度刚化后, 机构 $F > 0$, 不满足主动副选择准则^[5]。类似地, 对表 2No. 3 (b-1) 机构, C_6 与 C_9 的两个移动自由度不能同时作为主动输入。

2.7 P 副替代

表 2No. 3 (a-1) ~ (d-1) 中所有 P 副都可用平行四边形 4R 机构替代, 且不改变运动特性, 如表 2No. 3 (a-2) ~ (d-2) 所示。应注意到, 表 2No. 3 (c-2) 就是 Maryland 三平移机构^[2], 它仍含虚约束。若将其平行四边形的 4 个 R 副全部用 S 副替代, 且舍去平行四边形两端的 R 副, 就成为 Delta 三平移机构, 但 Delta 机构不含虚约束, 如表 2No. 3 (c-3) 所示。

将表 1 中各 SOC 类型用于并联机构的型综合, 本文共得到 31 个三平移并联机器人机构, 其中 27 个为本文首次提出。

3 结 论

①以单开链为单元, 揭示了并联机器人机构结构组成的某些规律: 提出了一些新概念 (如 SOC 结构类型、SOC 约束度、并联机构与 SOC 的运动输出矩阵、欠秩 SOC 等), 并发现了并联机构运动

输出矩阵与 SOC 支路输出矩阵间的关系。据此提出了并联机器人机构型综合的一种系统、有效方法。②基于与欠秩回路相应的 SOC 支路类型, 共综合出 31 个三平移并联机器人机构, 并进行了分类, 其中 27 个为本文提出的新机构。③欠秩并联机构含有欠秩 SOC 支路, 但不一定包含欠秩回路。欠秩 SOC 可以对应欠秩回路, 也可不对应欠秩回路。④在保持并联机器人机构运动输出矩阵不变条件下, 用平行四边形 4R 机构替代 P 副可得到新型机构, 以实现快速运动并改善机构的某些性能。

参考文献:

- [1] Gosselin C, Angeles J. The Optimum Kinematic Design of a Planar Three-Degree-of-Freedom Parallel Manipulator [J]. ASME Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, 1988, 110 (1): 35-41.
- [2] Tsai L W. Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1999.
- [3] 黄真, 赵铁石. 一种新型三维移动并联机构及其位置分析 [J]. 机器人, 1999, 21 (7): 507-513.
- [4] Yang T L. Proc of the 6-th World Cong on the Theory of Machines and Mechanisms [C]. New Delhi: 1983, 1: 280-283.
- [5] 杨廷力. 空间机构的结构分析与综合—I, II [J]. 机械设计 (西安), 1987, 2: 1-21, 1987, 3: 1-11.
- [6] 金琼. 欠秩回路及欠秩机器人机构的分析 [D]. 南京: 东南大学, 2000.
- [7] 杨廷力. 机械系统基本理论—结构学、运动学、动力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.

Structural Synthesis and Classification of the 3DOF Translational

Parallel Robot Mechanisms Based on the Units of Single-Opened-Chain

YANG Ting-li¹, JIN Qiong², LIU An-xin³, SHEN Hui-ping⁴, LUO Yu-feng⁵

(1. Jinling Petrochemical Corporation, Nanjing 210037, China; 2. Department of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 3. PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China; 4. Department of Mechanical Engineering, Jiangsu Institute of Petrochemical Technology, Changzhou 213016, China; 5. Nanchang University, Nanchang 330029, China)

Abstract: Based on the units of single-opened-chain limb, some structural laws of deficiency-rank parallel robot mechanisms are revealed, and a systematic and effective new method for structural synthesis of 3d. o. f. translational parallel robot mechanisms is put forward in this paper. 31 mechanisms are synthesized and classified, 27 of which are presented for the first time. The method proposed in this paper is of universal significance and has been used for the structural synthesis of deficiency-rank parallel robot mechanisms with other kinematics output types.

Key words: parallel robot mechanisms; deficiency-rank; single-opened-chain limb; structural synthesis