

文章编号:1000-582X(2009)05-0481-06

## 平面 2T1R 并联机构无过约束构型设计

黄勇刚,黄茂林

(重庆大学 机械工程学院,重庆 400030)

**摘要:**基于螺旋理论和集合论原理,根据动平台所受约束与支链约束之间的关系,分析平面 2T1R 并联机构无过约束构型条件,得到了 6 种 3 支链结构的约束配置方式。根据支链约束要求,采用转动副和移动副设计具体的支链结构,并按不同支链间约束配置方式确定各支链运动副轴线的几何布置,综合出了一类新的完全对称结构和非完全对称结构无过约束平面 2T1R 并联机构。

**关键词:**螺旋;平面 2T1R 并联机构;无过约束构型;构型设计

中图分类号:TH112.1

文献标志码:A

## Synthesis of planar 2T1R non-overconstrained parallel mechanisms

HUANG Yong-gang, HUANG Mao-lin

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** Based upon screw theory and set theory, and according to the constraint system between mobile platforms and limbs, the structural conditions of non-overconstrained planar 2T1R parallel mechanisms are proposed. Six types of limb constraint patterns are found. Using R and P pairs, limb structures are built according to the constraint requirements. The geometrical conditions of kinematic pairs between different limbs are obtained based on the limb constraint pattern. Finally, a series of novel symmetrical and asymmetrical structures are constructed.

**Key words:** screw; planar 2T1R parallel mechanism; non-overconstrained structure; structure design

闭链机构特别是平面多回路机构中,一般存在较多过约束。由于制造误差(主要是运动副元素形位误差)、载荷和工作环境温度等引起的构件变形,机构的理想平面约束条件难以得到满足,引起附加内力,机械效率降低,运动卡滞出现,严重时甚至不能装配<sup>[1-3]</sup>。如常见的平面 3-RRR 并联机构,具有 6 个过约束,要求 9 个转动副轴线均精确平行,这显然只有在理想状态下才能满足。通过提高制造精度减小平行度误差将急剧增加制造成本,若通过加大运动副配合间隙来补偿平行度误差,则影响机构的精度,并且高速运动时冲击增大。因此,设计出能够满足自由度要求,对制造误差不敏感且能够自动适

应外部工作条件随机性变化的新构型具有重要意义<sup>[4-7]</sup>。

在平面机构设计领域,已采用 C 副和 S 副等多自由度运动副,将平面过约束机构改造为无过约束结构,从而在一定范围内获得自动适应运动副形位误差的自调性<sup>[8-11]</sup>。在并联机构领域,无过约束构型的设计也开始受到重视。文献<sup>[12]</sup>针对 3-RRR 平面并联机构,利用 C 副和 S 副替换某些 R 副设计出一系列无过约束结构。Kong<sup>[13]</sup>针对 3-RRR 球面并联机构,通过在每条支链中组合一四杆回路,将每条支链改造为 5 副 4 杆结构,从而得到无过约束构型。Karouia<sup>[14]</sup>应用支链末杆自由度条件,直接进行

投稿日期:2008-12-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50075087)

作者简介:黄勇刚(1976-),男,重庆大学博士研究生,主要从事并联机器人机构学研究。

黄茂林(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail) mlhuang219@163.com。

3-RRR 无过约束球面并联机构的设计。Karouia<sup>[15]</sup>通过对多自由度运动副的分解,从 3 种含 C 副的无过约束球面并联机构派生出了更多的只含单自由度运动副的无过约束构型。

机构构型设计的首要任务是满足运动自由度要求。实质上自由度只是机构的运动学表征,如何实现所需要的自由度,关键是在“约束”的设计。运动自由度是各构件客观存在的,而约束是人为设计并加于构件之间的。从这一观点出发,笔者应用螺旋理论和集合论原理,直接进行约束设计和约束配置来获得合适的无过约束机构构型。通过分析具有两移动—转动自由度特性的平面 2T1R 并联机构动平台所需约束与支链约束的关系,以及支链约束集合间的相互关系,得到了该类并联机构无过约束构型条件和 6 种用于无过约束构型设计的支链约束配置模式。根据支链约束要求,使用移动副和转动副设计具体的支链结构,并按相应的支链约束配置要求获得支链间运动副轴线的几何布置,详细讨论无过约束构型设计的具体过程,综合出了一类新的完全对称和非完全对称结构的无过约束平面 2T1R 并联机构。

## 1 平面 2T1R 并联机构无过约束条件

平面 2T1R 并联机构动平台只能实现平面内的两个移动自由度和一个轴线垂直于运动平面的转动自由度,其余方向的移动和转动自由度受到约束,不能运动。当动平台沿着这些被约束的方向有运动趋势时,约束对动平台产生约束反力。约束反力的方向总是与运动趋势方向相反。不失一般性,假设动平台在 XY 平面内运动,则其所有支链对动平台提供的约束反力的合成必须能构成力系  $\{F_z, M_x, M_y\}$ 。并联机构各支链提供的约束数量和约束类型(力约束  $F$  或力偶约束  $M$ )以及约束间的几何关系,决定了动平台的运动自由度和过约束性。

根据支链并联连接的特点,单条支链提供的约束最多只能限制动平台沿 Z 向的移动自由度和绕 X 轴与绕 Y 轴的转动自由度,即单条支链提供的约束反力最多有 3 个,分别为  $M_x$ 、 $M_y$  和  $F_z$ 。由螺旋理论可知,运动螺旋的反螺旋是约束力的概念。因此,第  $j$  条支链运动螺旋系的反螺旋(系)满足关系:

$$S^{r(j)} \subseteq \{F_z, M_x, M_y\}, \quad (1)$$

式中力约束  $F$  和力偶约束  $M$  均为 Plücker 坐标表示。

有  $k$  条支链的平面 2T1R 并联机构,其动平台所受独立约束是所有支链约束的合成,并且刚好提

供上述的 3 个力螺旋。采用集合论中的并运算符表示如下:

$$\bigcup_{j=1}^k S^{r(j)} = \{F_z, M_x, M_y\}. \quad (2)$$

由于支链约束集合间可能存在公共约束,即过约束,根据集合运算原理及螺旋的线性相关性,约束的数量关系满足

$$\dim\left(\bigcup_{j=1}^k S^{r(j)}\right) = \sum_{j=1}^k \dim(S^{r(j)}) - \sum_{0 < i < j \leq k} \dim(S^{r(i)} \cap S^{r(j)}) + \sum_{0 < i < j < m \leq k} \dim(S^{r(i)} \cap S^{r(j)} \cap S^{r(m)}) - \dots + (-1)^{k-1} \dim(S^{r(1)} \cap S^{r(2)} \cap \dots \cap S^{r(k)}) = 3, \quad (3)$$

式(3)中交运算符表示求支链间的公共约束,即过约束,是两个螺旋系中的线性相关部分。显然,只有当

$$\sum_{j=1}^k \dim(S^{r(j)}) = 3 \quad (4)$$

成立才能成为无过约束构型,式(1)、(2)、(4)是综合平面 2T1R 并联机构无过约束构型的充分必要条件。

## 2 支链约束配置模式和构型设计步骤

### 2.1 支链约束配置模式

由式(1),所有可用来构成该类并联机构无过约束构型的支链,其对动平台提供的约束是集合  $\{F_z, M_x, M_y\}$  的幂集。即  $S^{r(j)}$  为以下约束集合中的一种:

$$\emptyset, \{F_z\}, \{M_x\}, \{M_y\}, \{F_z, M_x\}, \{F_z, M_y\}, \{M_x, M_y\}, \{F_z, M_x, M_y\}.$$

由式(2)、(4),根据约束数量和类型在支链中的分配,以及支链约束间的几何关系,可以方便地得到所有 3 支链形式的平面 2T1R 并联机构无过约束构型的支链约束配置模式共 6 种,分别如下:

$$\{M_x\} \cup \{M_y\} \cup \{F_z\}, \{M_x, M_y\} \cup \{F_z\} \cup \emptyset, \{M_y, F_z\} \cup \{M_x\} \cup \emptyset, \{M_x, M_y, F_z\} \cup \emptyset \cup \emptyset, \{F_z\} \cup \{F_z\} \cup \{M_y\}, \{F_z\} \cup \{F_z\} \cup \{F_z\}.$$

这些配置模式确定了其构型特点以及具体的综合步骤。需要说明的是,平行力系合成后可以得到合力和力偶,因而含有 2 个或 3 个平行力约束的模式也满足构型条件。其它支链数的约束配置模式可按相同方法表示。以上符号中  $x, y, z$  表示 3 个独立的坐标方向,  $F, M$  分别表示力约束和力偶约束,  $\emptyset$  表示空约束集合。例如:  $\{F_z\} \cup \{M_x\} \cup \{M_y\}$  表示支链的约束数量配置为 1-1-1, 3 条支链均只提供 1 个约束,其中 2 条支链提供 2 个独立的力偶约束,1 条支链提供垂直于两个力偶矢的力约束。

### 2.2 无过约束构型设计步骤

根据支链中约束数分配特点,可以将平面 2T1R

并联机构无过约束构型分成两类。

第一类是只由一条支链提供 3 个约束  $\{F_z, M_x, M_y\}$ , 其余支链均为不提供约束的 6 自由度支链。对此类构型, 只要设计一条提供  $\{F_z, M_x, M_y\}$  约束的支链, 其余选用 6 自由度支链如: SPS、UPS、RCS、RUS、RSS、PSS 等即可。

第二类是动平台所受约束由不同的支链提供。对此类构型, 根据约束配置模式中各支链约束数量和类型, 设计出相应的支链结构, 再按约束配置模式中支链约束间几何关系装配, 就能综合出无过约束平面 2T1R 并联机构。

由约束配置的特点可知, 第一类无过约束构型不可能设计出完全对称结构。第二类无过约束构型在所有支链约束完全相同的情况下可以设计出完全对称结构。

### 3 支链结构设计

由于 X 和 Y 向的力偶约束通过合适的布置可以交换, 根据支链约束配置模式, 设计 2T1R 平面并联机构只需要首先设计出提供如下 6 种约束的具体支链结构:

$$\emptyset, \{F_z\}, \{M_{\perp z}\}, F_z, M_{\perp z}, \{M_x, M_y\}, \{F_z, M_x, M_y\}.$$

对于空约束  $\emptyset$  集合, 可以直接采用前述常用的 6 自由度支链结构。对于非空约束集合, 按支链约束数量和类型要求, 将  $n$  个约束写成螺旋(系)的形式, 根据螺旋互逆原理, 确定转动副或移动副运动螺旋轴线与约束方位的几何关系, 在保证不出现运动冗余的情况下, 将轴线方位满足几何要求的  $6-n$  个运动副串联连接, 即获得满足该约束要求的支链。并且可以通过相邻单自由度运动副合并构造多自由度运动副, 扩充支链结构类型。

#### 3.1 只提供一个力约束的支链结构设计

由螺旋理论, 力约束可以写成 0 节距的单位力螺旋

$$S_F = [s_r, r_r \times s_r], \quad (5)$$

$s_r$  为力约束方向单位矢量,  $r_r$  为力约束作用线上一个点的向量。由螺旋互逆性质, 对应此力螺旋, 有 5 个线性无关的单位运动螺旋与之互逆。如果某运动螺旋由转动副形成, 则可表示为

$$S_R = [s, r \times s], \quad (6)$$

其与力螺旋满足互易积为 0, 用符号  $\circ$  表示互易积运算, 则

$$S_F \circ S_R = s_r \cdot (r \times s) + s \cdot (r_r \times s_r) =$$

$$s_r \cdot [(r - r_r) \times s] = 0, \quad (7)$$

式(7)成立的充分必要条件为

$$s_r \perp (r - r_r) \times s. \quad (8)$$

由矢量叉积的几何意义, 式(8)成立的充要条件是  $s_r, r - r_r, s$  有公垂线。只有转动副轴线与力约束作用线共线或共面(平行或相交)时成立。

如果某个运动螺旋由移动副形成, 则可表示为

$$S_P = [0, s], \quad (9)$$

其与力螺旋满足互易积为 0, 即

$$S_F \circ S_P = s_r \cdot s = 0, \quad (10)$$

由式(10), 移动副的方向与力约束方向垂直。

综上分析, 只提供一力约束的支链, 所有转动副轴线与力约束作用线共面相交或平行(包括共线), 所有移动副的移动方向与力约束作用线垂直。

由上述几何关系, 可以用 5 个运动副(移动副和转动副)串联连接, 确保 5 个运动副的运动螺旋非线性相关, 即无自由度冗余, 其中将不多于 3 个的平行转动副或 2 个不平行的移动副与力约束方向平行或垂直, 将至少 2 个(不多于 3 个)转动副汇交于力约束作用线上的一点, 并且将平行于力约束的转动副或垂直于力约束的移动副作为连架副, 就可设计出如下符号表示的支链结构:  $(RRR)_i(RR)_o, (RRR)_i U_o, (RR)_i U_o R_o; (RR)_i (RRR)_o, R_i U_o (RR)_o, (RR)_i S_o, R_i U_o U_o; (RR)_i P_{\perp i} (RR)_o, (RR)_i P_{\perp i} U_o, R_i P_{\perp i} U_o R_o, (RR)_i (C_{\perp i} R)_o; R_i P_{\perp i} (RRR)_o, R_i P_{\perp i} S_o, R_i (C_{\perp i} U)_o, P_{\perp i} U_o U_o R_i P_j P_k (RR)_o, R_i P_j P_k U_o, R_i P_j (C_k R)_o, R_i (CC)_{\perp i}; P_j P_k (RRR)_o, P_j (C_k RR)_o, P_j P_k S_o.$

以上符号表示中: 力约束的方向为  $i$ , 且通过点  $o$ 。  $U_o$  表示  $U$  副中与前一个运动副连接的转动副方向为  $i$ , 与后一个运动副连接的转动副过  $o$  点。这样设计出的支链, 当位形发生变化时, 力约束方向不变, 仅力约束位置发生变化, 可以方便确定不同支链约束的相互几何关系, 并且可以避免支链并联后机构为瞬时可动机构。典型支链结构见图 1-3。需要说明的是, 上述的具体支链结构, 确定力约束方向的运动副只要其轴线方向相互关系不变, 可以交换位置。

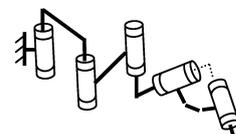


图 1  $(RRR)_i(RR)_o$  结构简图

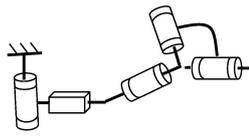


图 2  $R_i P_{\perp_i} (RRR)_o$  结构简图

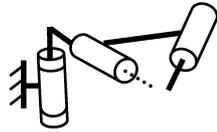


图 3  $R_i (CC)_{\perp_i} o$  结构简图

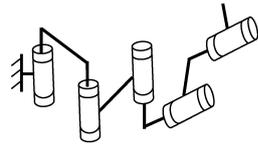


图 4  $(RRR)_i (RR)_j$  结构简图

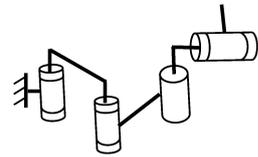


图 5  $(RRC)_i R_j$  结构简图

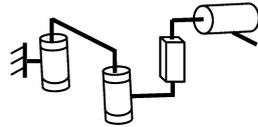


图 6  $(RRP)_i C_j$  结构简图

### 3.2 只提供一个力偶约束的支链结构设计

力偶约束可以写成单位力螺旋

$$S_C = [0, s_r], \tag{11}$$

$s_r$  表示单位力偶矢方向,是自由矢量,与位置无关。由螺旋互逆性质,对应此力偶螺旋,有 5 个线性无关的单位运动螺旋与之互逆。假设某个运动螺旋如式(6),是转动副,则

$$S_C \circ S_R = s_r \cdot s = 0, \tag{12}$$

由式(12)可知,转动副的轴线方向与力偶约束方向垂直。

如果某个运动螺旋如式(9),是移动副,则

$$S_C \circ S_P = 0, \tag{13}$$

式(13)恒成立,因此移动副的移动方向与力偶约束方向无关。

综上所述,只提供一个力偶约束的支链,所有转动副的轴线方向垂直于力偶矢方向,移动副的移动方向可以任意布置。

由上述几何关系,用 5 个运动副(移动副和转动副)串联连接构成一条只提供一个力偶约束的支链,需要至少 2 个不平行的转动副确定力偶约束的方向(公垂线方向)。为了不出现运动冗余,最多 3 个转动副平行,最多 3 个转动副汇交,且移动副不多于 3 个,并且仅将转动副作为连架副,则力偶约束的一条垂线方向由连架副确定。由此可得如下支链结构:  $(RRR)_i (RR)_j$ ,  $(RR)_i U_{ij} R_j$ ,  $(RRR)_i P R_j$ ,  $(RRC)_i R_j$ ,  $(RRR)_i C_j$ ,  $(RR)_i P U_{ij}$ ,  $(RC)_i U_{ij}$ ;  $(RR)_i (RR)_j P$ ,  $R_i U_{ij} R_j P$ ,  $(RR)_i (RC)_j$ ,  $R_i U_{ij} C_j$ ,  $(RR)_i R_j P_i P_j$ ,  $R_i U_{ij} P_i P_j$ ,  $(RRP)_i C_j$ ,  $R_i C_i R_j P_j$ ,  $C_i U_{ij} P_j$ ,  $R_i C_i C_j$ ,  $R_i R_j P_i P_j P_k$ ,  $U_{ij} P_i P_j P_k$ ,  $R_i C_j P_i P_k$ ,  $C_i C_j P_k$ 。

以上符号中  $k$  方向为力偶约束的方向,  $U_{ij}$  表示  $U$  副中与前一个运动副连接的转动副方向为  $i$ , 与后一个运动副连接的转动副方向为  $j$ 。

典型支链结构见图 4-6。

### 3.3 提供多个约束的支链结构设计

对于提供多个约束的支链,其运动副轴线必须同时满足各个约束的几何要求。由前面分析的力约束和力偶约束与转动副和移动副的几何关系,可得如下结论:

提供  $\{F_z, M_{\perp_x}\}$  约束的支链,所有转动副的轴线位于包含力约束作用线的力偶矢法平面上,所有移动副的移动方向与力约束作用线垂直。

提供  $\{M_x, M_y\}$  约束的支链,所有转动副的轴线方向为  $XY$  平面的法线方向,移动副的移动方向可以任意布置。

提供  $\{F_x, M_x, M_y\}$  约束的支链,所有转动副的轴线方向必须与力约束方向平行,所有移动副的移动方向必须与力约束方向垂直。

上述提供  $n > 1$  个约束的支链,在运动副串联连接不出现运动自由度冗余的情况下,可采用  $6 - n$  个运动副串联设计具体的支链结构。与只提供一个约束的支链设计类似,可得各类支链结构的符号表示。提供一个力约束和一个力偶约束的支链为:  $(RR)_i (R_i R)_o$ ,  $(RR)_i U_{io}$ ,  $R_i U_{io} R_i$ ,  $U_{io} R_i R_i$ ,  $R_i P_{\perp_i} (R_i R)_o$ ,  $R_i P_{\perp_i} U_{io}$ ,  $(RR)_i C_{\perp_i}$ ,  $R_i C_{\perp_i} R_i$ ,  $(R_i R)_o P_j P_k$ ,  $P_j P_k (R_i R)_o$ ,  $U_{io} P_j P_k$ ,  $P_j P_k U_{io}$ ,  $P_j U_{io} P_k$ ,  $R_i P_k C_j$ ,  $P_k R_i C_j$ 。提供 2 个力偶约束的支链为:  $(RRRP)_i$ ,  $(RRC)_i$ ,  $(RR)_i P_i P_{\perp_i}$ ,  $(RC)_i P_{\perp_i}$ ,  $R_i P_i P_j P_k$ ,  $C_i P_j P_k$ 。提供 1 个力约束和 2 个力偶约束的支链为:  $(RRR)_i$ ,  $(RR)_i P_{\perp_i}$ ,  $R_i P_{\perp_i} R_i$ ,  $P_{\perp_i} (RR)_i$ ,  $R_i P_j P_k$ ,  $P_j R_i P_k$ ,  $P_j P_k R_i$ 。

### 4 无过约束构型设计

因为各支链与静平台或与动平台直接连接的运动副之间有固定的几何关系,在前面各种约束形式的支链结构基础上,可以利用这些固定的几何关系来确定约束的相对方向或相对位置,从而装配出符合支链约束配置要求的平面 2T1R 并联机构无过约束结构。

#### 4.1 完全对称结构设计

完全对称结构要求支链完全相同,只有支链约束配置模式  $\{F_z\} \cup \{F_x\} \cup \{F_y\}$  才可能设计出完全对称结构。这要求 3 条相同的支链分别提供的 3 个力约束相互平行,但不能共线或共面,亦即确定力约束位置的点不能重合或共线。由于前面设计的支链结构已将确定力约束方向的运动副作为连架副,所以将 3 条支链的连架转动副(或移动副)安装在静平台上,使其轴线相互平行指向  $z$  方向(或垂直  $z$  方向),将确定力约束作用点的某个运动副安装在动平台上,使各支链的力约束作用点(支链符号表示中的  $o$  点)构成三角形,这样就保证了 3 个力约束相互平行且不会共线或共面。利用只提供 1 个力约束的支链结构按照上述条件装配,就可以设计出如下的完全对称平面 2T1R 并联机构无过约束构型:  
 $3-(RRR)_z(RR)_o, 3-(RRR)_zU_o, 3-(RR)_zU_{zo}R_o,$   
 $3-(RR)_z(RRR)_o, 3-R_zU_{zo}(RR)_o, 3-(RR)_zS_o,$   
 $3-R_zU_{zo}U_o, 3-(RR)_zP_{\perp z}(RR)_o, 3-(RR)_zP_{\perp z}U_o,$   
 $3-R_zP_{\perp z}U_{zo}R_o, 3-(RR)_z(C_{\perp z}R)_o, 3-R_zP_{\perp z}(RRR)_o,$   
 $3-R_zP_{\perp z}S_o, 3-R_z(C_{\perp z}U)_o, 3-P_{\perp z}U_{zo}U_o, 3-R_zP_xP_y(RR)_o,$   
 $3-R_zP_xP_yU_o, 3-R_zP_x(C_yR)_o, 3-R_z(C_{\perp z}C_{\perp z})_o,$   
 $3-P_xP_y(RRR)_o, 3-P_x(C_yRR)_o, 3-P_xP_yS_o。$

典型的构型见图 7-9。

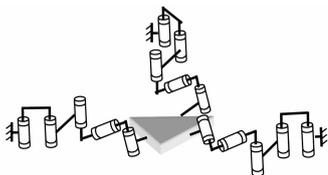


图 7 3-(RRR)<sub>z</sub>(RR)<sub>o</sub> 并联机构

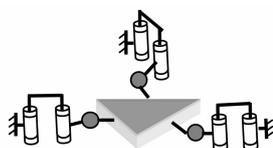


图 8 3-(RR)<sub>z</sub>S<sub>o</sub> 并联机构

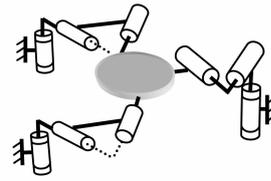


图 9 3-R<sub>z</sub>(C<sub>⊥z</sub>C<sub>⊥z</sub>)<sub>o</sub> 并联机构

#### 4.2 非完全对称结构设计

非完全对称结构不要求各支链完全相同,因此 2.1 节得出的 6 种约束模式均能综合出该类无过约束构型。

对 2.2 节中所述的第一类构型,只要选用提供  $\{F_z, M_x, M_y\}$  约束的 1 条支链结构,与任意的 6 自由度支链并联连接就能综合出该类无过约束构型。如果该条提供 3 个约束的支链中不分配驱动副,且采用 3 条 6 自由度支链,并且这 3 条支链都包含一个驱动副,目前已引起广泛研究兴趣的含被动支链构型。对于 4.1 节中可以设计出完全对称结构的约束模式,只要选用不同的支链结构按完全对称结构设计方法也可以综合出非完全对称的构型。

对于其它 4 种约束配置模式,按照相应各支链约束的要求选择具体支链结构,依据 4.1 节中的方法,同样可以方便地设计出众多的非完全对称结构。

根据目前并联机构的发展趋势,结构完全对称且支链中运动副数和连杆数较少的构型应用较广泛。由于篇幅关系非完全对称的构型不一列出。典型的非完全对称结构可参见文献[12]。

### 5 结 论

笔者基于约束设计和约束装配的观点,直接进行无过约束构型设计,得到了一类新的无过约束平面 2T1R 并联机构,丰富了并联机构的构型类型。该方法还可以用于其他机构的无过约束构型设计,为并联机构的构型综合提供了一种新的观点和手段,亦为消除过约束对运动副形位误差的敏感性提供了新的途径。

#### 参考文献:

[1] 秦伟,黄茂林,伍驭美. 制造误差对过约束机构性能影响的研究[J]. 中国机械工程,2002,13(15):1327-1331.  
 QIN WEI, HUANG MAO-LIN, WU YU-MEI. Influence of manufacturing errors on performance of overconstrained mechanism [J]. China Mechanical Engineering,2002,13(15):1327-1331.

- [2] MENG J, LI Z X. A general approach for accuracy analysis of parallel manipulators with joint clearance[C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, August 2-6, 2005, Edmonton, Alberta, Canada. Edmonton: IEEE, 2005: 790-795.
- [3] NAKAMURA Y, MURAI A. A constraints and deformations analysis for machining accuracy assessment of closed kinematic chains[C]//Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation, April 26, 2004, New Orleans, USA. New Orleans:IEEE, 2004: 1706-1712.
- [4] Di GREGORIO R. A new parallel wrist using only revolute pairs; the 3-RUUwrist[J]. Robotica, 2001, 19(3):305-309.
- [5] Di GREGORIO R. The 3-RRS wrist: a new simple and non-overconstrained spherical parallel manipulator[J]. Journal of Mechanical Design, 2004, 126(5):850-855.
- [6] 郭盛, 方跃法. 可实现空间取放作业的 4 自由度并联机器人机构综合[J]. 机器人, 2007, 29(5):417-422.  
GUO SHENG, FANG YUE-FA. Structural synthesis for 4-DOF parallel manipulators with spatial taking and putting functions [J]. Robot, 2007, 29(5):417-422.
- [7] HERVE J M, KAROUTIA M. The novel 3-RUU wrist with no idle pair [C] // Proceedings of the Workshop on Fundamental Issues and Future Research Directions for Parallel Mechanisms and Manipulators, October 3-4, 2002, Quebec City, Canada. [S.l.]: IEEE, 2002:284-286.
- [8] 安培文, 黄茂林. 平面连杆机构的自调及其允差的分析研究[J]. 中国机械工程, 2002, 13(23):2040-2044.  
AN PEI-WEN, HUANG MAO-LIN. Research on self-adjustment and allowable errors of planar linkage mechanism [J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(23):2040-2044.
- [9] 安培文, 黄茂林. 平面曲柄摇杆机构自调结构的分析与设计[J]. 机械工程学报, 2004, 40(5):11-16.  
AN PEI-WEN, HUANG MAO-LIN. Analysis and design of selfadjustable structures for the plane crank-rocker mechanism[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(5):11-16.
- [10] 安培文, 邵金龙, 黄茂林. 理论平面过约束分析及无过约束自调结构设计[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2004, 27(11):15-17.  
AN PEI-WEN, SHAO JING-LONG, HUANG MAO-LIN. Analysis of theoretical-plane-overconstraint and synthesis of self-adjusting structures without overconstraint[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2004, 27(11):15-17.
- [11] 安培文, 黄茂林. 过约束自调机构允差分析的一种精确方法[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2003, 26(1):1-3.  
AN PEI-WEN, HUANG MAO-LIN. An accurate method of the analysis of allowable error for the self-adjustable mechanisms without overconstraint [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2003, 26(1):1-3.
- [12] 黄勇刚, 黄茂林, 杜力, 等. 平面 3-RRR 并联机构过约束分析及自调结构设计[J]. 中国机械工程, 2006, 17(3):303-306.  
HUANG YONG-GANG, HUANG MAO-LIN, DU LI, et al. Over-constraint analysis and self-adjusting structure design of planar 3-RRR parallel mechanism[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(3):303-306.
- [13] KONG X W, GOSSELIN C M. Type synthesis of three-degree-of-freedom spherical parallel manipulators[J]. The International Journal of Robotics Research, 2004, 23(3):237-245.
- [14] KAROUIA M, HERVE J M. Asymmetrical 3-dof spherical parallel mechanisms[J]. European Journal of Mechanics A/Solids, 2005, 24(1):47-57.
- [15] KAROUIA M, HERVE J M. Non-overconstrained 3-dof spherical parallel manipulators of type: 3-RCC, 3-CCR, 3-CRC[J]. Robotica, 2006, 24(1):85-94.

(编辑 张 苹)