DOI: 10.3901/JME.2020.03.031

非对称 3-PRS 机构运动等效机构 演化及约束性能对比分析*

胡 波^{1,2} 施东生^{1,2} 史艳国^{1,2} 张 达^{1,2} 叶妮佳^{1,2}

(1. 燕山大学河北省并联机器人与机电系统实验室 秦皇岛 066004;

2. 燕山大学先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室 秦皇岛 066004)

摘要: 少自由度并联机构存在运动等效机构, 表现为多种结构不同的机构运动学完全相同而性能各异, 从具有运动等效特性的一组机构中遴选出性能优异的机型具有重要意义。基于运动等效机构的演化机理导出了一种非对称 3-PRS 机构的三种无过约束和三种含过约束的运动等效机构。基于运动/力传递指标对非对称 3-PRS 机构及其运动等效机构进行了优化设计, 得到了优化尺寸区域。针对非对称 3-PRS 机构及其运动等效机构运动学相同而约束不同导致机构约束性能各异的特点, 建立了此类机构的约束性能指标, 在运动/力传递性能优化尺寸下, 绘制了各机构的约束性能图谱, 求解了各机构的全局约束指标, 完成了此类机构的约束性能对比研究, 实现了非对称 3-PRS 机构及其运动等效机构兼顾传递和约束性能的机构优选。

关键词: 并联机构; 运动等效; 传递性能; 约束性能; 构型优选

中图分类号: TG156

Kinematically Identical Manipulators for an Asymmetric 3-PRS Parallel Manipulator and Their Constraint Performance Comparison Study

HU Bo^{1,2} SHI Dongsheng^{1,2} SHI Yanguo^{1,2} ZHANG Da^{1,2} YE Nijia^{1,2}

(1. Parallel Robot and Mechatronic System Laboratory of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004;

2. Key Laboratory of Advanced Forging & Stamping Technology and Science of Ministry of National Education, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract: Some limited-dof parallel manipulators (PMs) with different architectures have identical kinematics and different performances are called kinematically identical manipulators (KIMs). Selecting the PMs with good performances in KIMs is a significant work. Based on the principle of deriving KIMs, three non-overconstrained and three overconstrained KIMs of the asymmetric 3-PRS PM are derived. According to motion/force transmission indices, the optimal design of the PMs is performed and the optimal area is obtained. Based on the property that the asymmetric 3-PRS PM and its KIMs have identical kinematics but different constraints, the constraint indices of KIMs are established and the performance atlases of constraint performance are drawn under the optimal parameters. Global constraint indices (GCI) of the PMs are solved and the constraint performance is compared among them. Optimal selection considering both transmission and constraint performance for the asymmetric 3-PRS PM and its KIMs is realized.

Key words: parallel manipulator; kinematically identical; transmission performance; constraint performance; select configuration

0 前言

两转一移三自由度并联机构是少自由度并联机构中非常重要的部分, 已经得到广泛的应用, 如以 3-PRS 机构为并联模块的 Sprint Z3 刀头^[1], 以

2-UPR+SPR 为并联模块的 Exechon 机器人^[2]和以 3-UPS+UP 为本体的 Tricept 机床^[3]等。Sprint Z3 刀头采用的是对称型 3-PRS 并联机构, 各 PRS 分支中的 R 副呈对称布置^[4]。实际上, 通过改变该机构三个分支中 R 副的布置方式可以得到多种具有不同特性的非对称 3-PRS 机构^[4-5], 这些机构可有效减弱伴随运动的影响。

性能分析是机构研究的重要内容, 近年来, 运动/力传递性能被广泛应用于并联机构的性能评价

* 国家自然科学基金(51305382)、河北省杰出青年基金(E2017203094)和河北省研究生创新(CXZZBS2018043)资助项目。20190522 收到初稿, 20190927 收到修改稿

中^[6-7], 相应的性能指标建立在虚拟系数的基础上^[8], 用于分析机构的运动/力传递特性。WANG 等^[9-10]综合考虑机构输入与输出端的传递特性, 系统建立了非冗余并联机构的运动/力传递性能评价体系。基于传递性能, XIE 等^[11]比较分析了 2-PRU+PRS 与 2-PRU+PUR 机构的传递姿态能力, 李秦川等^[12-13]对 2-PUR+PSR、2-UPR+RPU 机构进行了尺度综合, WANG 等^[14]对一种 3-PUU 机构进行了优化设计。相较于运动/力传递性能, 约束性能对少自由度并联机构同样具有非常重要的影响。LIU 等^[15]基于螺旋理论定义了约束指标用于评价少自由度非过约束并联机构的运动/力约束性能。GAN 等^[16]采用传递和约束指标分析了一种可变自由度 3-UPU 机构的奇异性。

胡波等^[17-18]提出了少自由度运动等效并联机构的理念, 其研究表明一些结构不同的少自由度并联机构存在运动学完全相同而性能各异的现象, 此类现象的研究可为并联机构的应用提供更优的选型。非对称 3-PRS 并联机构(其中两个 R 副平行垂直于另一 R 副)具备此类特性, 具有多种运动等效机构。本文以该机构为例来阐明运动等效机构的演化与机构优选。提出了该机构的多种运动等效机构, 并建立其运动/力传递指标和约束指标, 通过对比分析机构的性能差异, 实现非对称 3-PRS 机构及其运动等效机构的优选。

1 运动等效并联机构的演化

1.1 非对称 3-PRS 并联机构约束分析

如图 1 所示, 非对称 3-PRS 并联机构包含固定平台 B , 动平台 m 和三个 PRS 分支, 每个分支都由 P 副驱动。定平台 B 与动平台 m 均为正三角形, 中心点分别为 O 和 o , 顶点分别为 A_i 和 B_i ($i=1,2,3$)。其中 $OA_i = E$, $oB_i = e$ 。在各 PRS 分支中, P 副垂

图 1 非对称 3-PRS 并联机构简图

直固定于定平台 B , 其下端与定平台连接于 A_i , 上端与 R 副连接于 C_i , 定长连杆下端与 R 副相连, 上端通过 S 副与动平台 m 连接于 B_i , 三个定长连杆的长度均为 L 。

定义: $\perp$ 和 $\parallel$ 分别表示垂直和平行符号。令 R_{ij} ($i=1,2,3; j=1,2,\dots$) 表示机构第 i 分支中的第 j 个转动副。图 1 中非对称 3-RPS 机构存在的约束关系为: $r_i \perp R_{i1}$, $R_{i1} \perp C_i B_i$ ($i=1,2,3$); $R_{i1} \perp A_i A_3$ ($i=1,3$), $R_{21} \parallel A_1 A_3$ 。为便于分析, 分别在定、动平台中心 O 、 o 建立静、动坐标系 $OXYZ$ 与 $oxyz$, X_0, Y_0, Z_0 为 o 点在坐标系 $OXYZ$ 下的坐标。各坐标轴满足的几何关系为: $X \parallel A_1 A_3$, $Y \perp A_1 A_3$, $Z \perp B$, $x \parallel B_1 B_3$, $y \perp B_1 B_3$, $z \perp m$ 。

根据求解约束螺旋的几何法可知^[19], 3-PRS 机构各分支中均存在一过球副中心, 方向平行于转动副的约束力 F_{Ci} ($i=1,2,3$), 令 $\$_{Ci}$ 为 F_{Ci} 对应的单位螺旋, $\$_{Ci}$ 可表达为

$$\$_{Ci} = (f_i; d_i \times f_i) \quad (i=1,2,3) \quad (1)$$

$$f_1 = f_3 = R_{11} = R_{31} = Y \quad f_2 = R_{21} = X$$

式中, f_i 表示第 i 分支中转动副轴线方向的矢量, $X=(1 \ 0 \ 0)^T$, $Y=(0 \ 1 \ 0)^T$, d_i 为 o 到 B_i 的矢量, R_{ij} 为 R_{ij} 对应的单位矢量。

根据机构中的约束力/矩对末端平台不做功的原理可得^[20]

$$J_{C0} \begin{pmatrix} v \\ w \end{pmatrix} = \theta_{3 \times 1} \quad J_{C0} = \begin{pmatrix} \$_{C1}^T \\ \$_{C2}^T \\ \$_{C3}^T \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中, J_{C0} 为非对称 3-PRS 机构的约束雅可比矩阵, v 和 w 分别为动平台中心 o 的线速度和角速度。式(2)为非对称 3-PRS 并联机构的速度约束方程。

令机构的驱动速度为 v_{ri} ($i=1,2,3$), 该机构的速度传递关系可表达为^[20]

$$\begin{pmatrix} v_{r1} \\ v_{r2} \\ v_{r3} \end{pmatrix} = J_\alpha \begin{pmatrix} v \\ w \end{pmatrix} \quad J_\alpha = \begin{pmatrix} \frac{\delta_{d1}^T}{(\delta_1 \cdot \delta_{d1})} & \frac{(d_1 \times \delta_{d1})^T}{(\delta_1 \cdot \delta_{d1})} \\ \frac{\delta_{d2}^T}{(\delta_2 \cdot \delta_{d2})} & \frac{(d_2 \times \delta_{d2})^T}{(\delta_2 \cdot \delta_{d2})} \\ \frac{\delta_{d3}^T}{(\delta_3 \cdot \delta_{d3})} & \frac{(d_3 \times \delta_{d3})^T}{(\delta_3 \cdot \delta_{d3})} \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中, J_α 是非对称 3-PRS 并联机构 3×6 形式的速度雅可比矩阵, $\delta_i = Z=(0 \ 0 \ 1)^T$ 为第 i 分支中驱动对应的单位矢量, $\delta_{di} = (B_i - C_i)/|B_i - C_i|$ 为第 i 分支中沿定长杆方向的单位矢量。

结合式(2)、(3)可得非对称 3-PRS 机构的 6×6 形式的雅可比矩阵 J_0 为

$$\mathbf{V}_r = \mathbf{J}_0 \begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ \mathbf{w} \end{pmatrix} \quad \mathbf{J}_0 = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_\alpha \\ \mathbf{J}_{C0} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, $\mathbf{V}_r = (v_{r1} \ v_{r2} \ v_{r3} \ \theta_{1 \times 3})^T$ 。

1.2 运动等效机构及其演化机理

运动等效机构是指运动学相同但构型各异的一组并联机构^[7], 这组机构具有相同的速度雅可比矩阵 $\mathbf{J}_\alpha$ 。各机构中驱动关节的数量、类型及布置方式完全相同, 而被动关节各不相同。

式(4)可看作一个线性方程组, 根据线性代数理论, 对 $\mathbf{J}_0$ 进行初等变换不影响该方程组的解, 故运动等效机构的演化可通过对原始机构的 $\mathbf{J}_0$ 进行初等变换来实现。由于运动等效机构的 $\mathbf{J}_\alpha$ 完全相同, 因而机构演化时只需对 $\mathbf{J}_0$ 中的约束雅可比矩阵 $\mathbf{J}_{C0}$ 进行初等变换来得到新的约束雅可比矩阵。初等变换得到的雅可比矩阵的新项即为原机构约束螺旋通过线性运算得到的新约束项。根据约束螺旋和分支运动副对应的关系, 就可以推导出与原机构运动学相同但构型不同的并联机构。在此过程中, 机构的约束螺旋项发生了变化, 但约束空间保持不变。

需要指出的是此处使用的运动等效机构的演化方法本质上是一种构型综合的方法, 与传统基于螺旋理论的构型综合方法^[21-22]不同, 该方法未给定机构的末端运动螺旋, 而是直接将已知机构的末端约束采用精确矢量表达出, 并对其进行线性运算得到新的约束项, 同时固化驱动部分, 从而得具有运动等效特性的新机构, 该方法针对末端具有伴随运动的机构仍然适用。

1.3 非对称 3-PRS 机构构型演化

令 $\mathbf{J}_{Cn} (n=1, 2, \dots)$ 表示非对称 3-PRS 机构第 n 个运动等效机构的约束雅可比矩阵, $\mathbf{J}_{C0j}$ 表示 $\mathbf{J}_{C0}$ 的第 j 行。令 F_{Ci} 与 $T_{Ci} (i=1, 2, 3)$ 分别表示 3-PRS 机构及其运动等效机构第 i 分支中的约束力与约束力矩。令 $\mathcal{S}_{Ci} (i>3)$ 为对 $\mathbf{J}_{C0j}$ 进行线性运算产生的新的约束螺旋。对 $\mathbf{J}_{C01}$ 、 $\mathbf{J}_{C03}$ 进行线性运算可得

$$\mathcal{S}_{C4}^T = \frac{1}{qe} (\mathbf{J}_{C01} - \mathbf{J}_{C03}) = \frac{1}{qe} (\mathcal{S}_{C1} - \mathcal{S}_{C3}) =$$

$$\begin{bmatrix} \theta_{1 \times 3} & \frac{1}{qe} (\mathbf{B}_3 \mathbf{B}_1 \times \mathbf{Y})^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{1 \times 3} & (\mathbf{x} \times \mathbf{Y})^T \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, $q = \sqrt{3}$ 。

由式(5)可知, 通过对 $\mathcal{S}_{C1}$ 、 $\mathcal{S}_{C3}$ 进行线性运算可得到 1 个新的约束力偶 $\mathcal{S}_{C4}$, 其方向同时与 $\mathbf{x}$ 和 $\mathbf{Y}$ 垂直。不难发现, $\mathcal{S}_{C1}$ 、 $\mathcal{S}_{C4}$ 组合正好对应 PRU 分支中的两个约束, 如图 2 所示。

同理, 再对 $\mathbf{J}_{C01} (\mathcal{S}_{C1}^T)$ 、 $\mathbf{J}_{C03} (\mathcal{S}_{C3}^T)$ 进行其他形式的线性运算, 可得

$$\mathcal{S}_{C5} = \mathcal{S}_{C1} + t_1 (\mathcal{S}_{C1} - \mathcal{S}_{C3}) = [\mathbf{f}_4; \mathbf{d}_4 \times \mathbf{f}_4] \quad (6)$$

$$\mathcal{S}_{C6} = \mathcal{S}_{C3} + t_2 (\mathcal{S}_{C1} - \mathcal{S}_{C3}) = [\mathbf{f}_5; \mathbf{d}_5 \times \mathbf{f}_5] \quad (7)$$

式中, t_1 、 t_2 为任意常数, 随机机构的瞬时位姿而定, $\mathbf{f}_4 = \mathbf{f}_5 = \mathbf{Y}$, $\mathbf{d}_4 = \mathbf{oB}_1 + t_1 \mathbf{B}_3 \mathbf{B}_1$ 表示由 o 到 c_1 点的矢量, $\mathbf{d}_5 = \mathbf{oB}_3 + t_2 \mathbf{B}_1 \mathbf{B}_3$ 表示由 o 到 c_2 点的矢量。 c_1 、 c_2 分别为 $B_1 B_3$ 两端延长线上一点, 如图 3d 中所示。不难得出, $\mathcal{S}_{C5}$ 与 $\mathcal{S}_{C6}$ 分别表示过 c_1 、 c_2 点且平行于 $\mathbf{Y}$ 轴的两个约束力线矢, 分别对应图 3d 中两 UPU 分支中的约束力 F_{C1} 与 F_{C3} 。图 3d 中两 UPU 分支中存在约束为: $r_1 \parallel R_{11}$, $R_{11} \perp R_{12}$, $R_{12} \perp C_1 B_1$, $R_{12} \parallel R_{13}$, $R_{13} \perp R_{14}$, $R_{14} \parallel B_1 B_3 (i=1, 3)$ 。

式(5)~(7)中给出了线性运算可能得到的新约束螺旋项。从 $\mathcal{S}_{Ci} (i=1, 2, \dots, 6)$ 中选择合适的约束螺旋构成新的约束雅可比矩阵 $\mathbf{J}_{Cn}$ 并保证其秩为 3, 结合约束螺旋和分支的关系即可构造非对称 3-PRS 机构的运动等效机构。例如, 选择 $\mathcal{S}_{C1}$ 、 $\mathcal{S}_{C2}$ 、 $\mathcal{S}_{C3}$ 、 $\mathcal{S}_{C4}$ 构成新的约束雅可比矩阵 $\mathbf{J}_{C1}$ 如下所示

$$\mathbf{J}_{C1} = (\mathcal{S}_{C1}; \mathcal{S}_{C4}; \mathcal{S}_{C2}; \mathcal{S}_{C3})^T \quad (8)$$

对比 $\mathbf{J}_{C0}$ 与 $\mathbf{J}_{C1}$ 可知, $\mathcal{S}_{C1}$ 、 $\mathcal{S}_{C4}$ 可作为 PRU 分支中的两个约束螺旋, 将原始机构第一分支更换为 PRU 分支可得 PRU+2-PRS 机构, 构型简图如图 2 所示, 其中 PRU 分支中存在约束为: $r_1 \perp R_{11}$, $R_{11} \perp A_1 A_3$, $R_{11} \perp C_1 B_1$, $R_{11} \parallel R_{12}$, $R_{12} \perp R_{13}$, $R_{13} \parallel B_1 B_3$ 。

图 2 PRU-2-PRS 并联机构简图

对比式(2)、(8)可知, 由 $\mathbf{J}_{C0}$ 到 $\mathbf{J}_{C1}$ 的变换过程可通过如下方式表示

$$\mathbf{M}_{C1} \mathbf{J}_{C0} = \mathbf{J}_{C1} \quad \mathbf{M}_{C1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1/qe & 0 & -1/qe \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中, $\mathbf{M}_{C1}$ 为 $\mathbf{J}_{C1}$ 与 $\mathbf{J}_{C0}$ 之间的变换矩阵。

依据相同的原则, 还可得到非对称 3-PRS 机构

的另外五种运动等效机构, 其约束雅可比矩阵 $J_{Cn} (n=2,3,\dots,6)$ 以及对应的变换矩阵 M_{Cn} 如表 1 所示, 各机构简图如图 3 所示。

表 1 3-PRS 机构的五种运动等效机构的演化过程

运动等效 并联机构	约束雅可比矩阵 J_{Cn}	变换矩阵 M_{Cn}
2-PRU+PRS	$J_{C2} = \begin{pmatrix} \mathcal{S}_{C1} \\ \mathcal{S}_{C4} \\ \mathcal{S}_{C2} \\ \mathcal{S}_{C3} \\ \mathcal{S}_{C4} \end{pmatrix}$	$M_{C2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1/qe & 0 & -1/qe \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1/qe & 0 & -1/qe \end{pmatrix}$
PRU+PRS+PUS	$J_{C3} = \begin{pmatrix} \mathcal{S}_{C1} \\ \mathcal{S}_{C4} \\ \mathcal{S}_{C2} \end{pmatrix}$	$M_{C3} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1/qe & 0 & -1/qe \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$
PUU+2-PRS	$J_{C4} = \begin{pmatrix} \mathcal{S}_{C5} \\ \mathcal{S}_{C2} \\ \mathcal{S}_{C3} \end{pmatrix}$	$M_{C4} = \begin{pmatrix} 1+t_1 & 0 & -t_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
2-PUU+PRS	$J_{C5} = \begin{pmatrix} \mathcal{S}_{C5} \\ \mathcal{S}_{C2} \\ \mathcal{S}_{C6} \end{pmatrix}$	$M_{C5} = \begin{pmatrix} 1+t_1 & 0 & -t_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ t_2 & 0 & 1-t_2 \end{pmatrix}$
PUU+PRS+PRU	$J_{C6} = \begin{pmatrix} \mathcal{S}_{C5} \\ \mathcal{S}_{C2} \\ \mathcal{S}_{C3} \\ \mathcal{S}_{C4} \end{pmatrix}$	$M_{C6} = \begin{pmatrix} 1+t_1 & 0 & -t_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1/qe & 0 & -1/qe \end{pmatrix}$

图 3 非对称 3-PRS 机构五种运动等效机构简图

综上所述, 通过运动等效机构演化共得到了非对称 3-PRS 机构的六种运动等效机构, 这组机构的特点是运动学功能相同而约束不同, 对比分析各机构之间的约束性能差异可以实现这组机构的构型优选。下文将基于运动/力传递性能和约束性能对运动等效机构进行分析, 首先基于传递性能对机构尺寸进行优化设计并得到优化尺寸, 然后在优化尺寸下对比分析各机构间的约束性能并完成优选, 得到同

时具备优质传递性能和约束性能的构型。

2 机构运动/力传递性能分析

2.1 传递力螺旋与运动螺旋

传递力螺旋(TWS)^[6]是指将并联机构含驱动分支中的驱动关节锁住后, 分支中多出的一个约束力螺旋。输入运动螺旋(ITS)为分支中驱动关节对应的运动螺旋。TWS 与分支中除 ITS 外的其他运动螺旋的互易积为零, 则非对称 3-PRS 机构及其运动等效机构中第 i 分支的传递力螺旋 $\mathcal{S}_{Ti}$ 可表达为

$$\mathcal{S}_{Ti} = (\delta_{di}^T \quad (d_i \times \delta_{di})^T)^T \quad (i=1,2,3) \quad (10)$$

对于非对称 3-PRS 机构及其运动等效机构, 锁住各机构中除第 i 分支外的另外两分支中的驱动关节, 此时末端平台的运动螺旋 $\mathcal{S}_{Oi}$ 即为输出运动螺旋(OTS), 可按式(11)求解

$$\begin{pmatrix} \mathcal{S}_{Tj}^T \\ \mathcal{S}_{Tk}^T \\ J_{Cn} \end{pmatrix} \circ \mathcal{S}_{Oi}^n = 0 \quad \begin{cases} i, j, k = 1, 2, 3 \\ i \neq j, i \neq k \\ n = 0, 1, \dots, 6 \end{cases} \quad (11)$$

式中, $\mathcal{S}_{Oi}^n$ 表示第 n 个机构中第 i 分支对应的 OTS。

2.2 运动/力传递性能指标

2.2.1 输入传递指标

输入传递指标(ITI)表示分支中 ITS 与 TWS 之间的能效系数^[23], 非对称 3-PRS 机构及其运动等效机构第 i 分支的输入传递指标为^[9]

$$\lambda_{Ti} = \frac{|\mathcal{S}_{Ti} \circ \mathcal{S}_{Ti}|}{|\mathcal{S}_{Ti} \circ \mathcal{S}_{Ti}|_{\max}} \quad (i=1,2,3) \quad (12)$$

式中, 分子表示两螺旋间的实际功率, 分母表示潜在最大功率, 其求解方法见文献[23]。

由非对称 3-PRS 机构及其运动等效机构之间的运动学等效可知, 各机构中的 $\mathcal{S}_{Ti}$ 与 $\mathcal{S}_{Ti}$ 均相同, 故 λ_{Ti} 相同, 即各机构的输入传递指标相同, 可表达为^[14-15]

$$\lambda_i = \min(|\sin \alpha_i|) \quad (i=1,2,3) \quad (13)$$

式中, α_i 表示各分支中定长杆与水平面的夹角。

2.2.2 输出传递指标

输出传递指标(OTI)表示分支中 TWS 与对应的 OTS 之间的能效系数, 非对称 3-PRS 机构及其运动等效机构第 i 分支的输出传递指标为^[9]

$$\lambda_{Oi} = \frac{|\mathcal{S}_{Oi} \circ \mathcal{S}_{Ti}|}{|\mathcal{S}_{Oi} \circ \mathcal{S}_{Ti}|_{\max}} \quad (i=1,2,3) \quad (14)$$

由于各机构的约束力螺旋系 J_{Cn} 之间可以通过线性运算相互转化, 根据线性代数理论知, 对于各机构而言, 式(11)的解相同, 即 $\mathcal{S}_{Oi}^n (n=0,1,\dots,6)$ 相

同, 故各机构的 λ_{O_i} 相同, 则各机构的输出传递指标相同, 可表达为

$$\lambda_o = \min \left(\frac{|\mathbf{s}_{O_i} \circ \mathbf{s}_{T_i}|}{|\mathbf{s}_{O_i} \circ \mathbf{s}_{T_i}|_{\max}} \right) \quad (i=1,2,3) \quad (15)$$

2.2.3 局部传递指标

综合考虑机构输入端与输出端的运动/力传递特性, 局部传递指标 LTI 可表达为^[9]

$$\text{LTI} = \min(\lambda_{T_i}, \lambda_{O_i}) \quad (i=1,2,3) \quad (16)$$

显然, LTI 指标无量纲且与坐标系的选取无关, 大小均介于 0 到 1 之间, LTI 的值越大, 表示机构在该瞬时位姿的运动/力传递性能越好。由于非对称 3-PRS 机构及其运动等效机构的输入与输出传递指标均相同, 故各机构的局部传递指标相同。

选用 T&T 角^[11]描述非对称 3-PRS 机构及其运动等效并联机构的姿态, T&T 角 (φ, θ) 与 YZX 型欧拉角 $(\alpha, 0, \gamma)$ 之间的转换关系可表达为

$$\begin{aligned} \gamma &= \arcsin(-\sin \theta \sin \varphi) \\ \alpha &= \arctan(\tan \theta \cos \varphi) \end{aligned} \quad (17)$$

式中, φ 为方位角, θ 为倾斜角, $\alpha, \gamma \in [-90^\circ, 90^\circ]$, $\varphi \in [0, 360^\circ]$, $\theta \in [0, 90^\circ]$ 。

当非对称 3-PRS 机构及其运动等效机构的姿态固定时, 其 LTI 不受动平台中心高度 Z_0 影响^[24], 故可选择一个合适 Z_0 绘制其在 (φ, θ) 下的 LTI 图谱。设定机构的几何参数为: $L = 600 \text{ mm}$, $E = 360 \text{ mm}$, $e = 240 \text{ mm}$, $Z_0 = 1200 \text{ mm}$, 以 φ, θ 为坐标绘制非对称 3-PRS 机构及其运动等效机构的 LTI 图谱如图 4 所示。

图 4 非对称 3-PRS 机构及其运动等效机构 LTI 图谱

图 4 中(1)所代表的粗实线处, 机构的 $\text{LTI} < 0.1$, 机构非常接近或到达传递奇异位形^[10], 即该粗实线为传递奇异轨迹, (2)所代表的粗实线为姿态空间边界, (1)、(2)所表示的粗实线内部即为无传递奇异姿态空间。由图 6 可知, 非对称 3-PRS 机构及其运动等效机构的 LTI 图谱关于 $\varphi = 90^\circ$ 对称, 机构的最佳

传递性能区域位于 $\varphi = \theta = 0^\circ$ 附近。

2.2.4 全局传递指标与全局传递姿态能力

为了评价机构的全局传递性能, 以 $\text{LTI} \geq 0.7$ 为条件定义机构优良传递空间(GTW)^[9], 如图 4 中所示, 该区域内机构的传递性能优良, 并且远离传递奇异位形。定义机构在 GTW 内的全局传递指标(GTI)^[11, 14]为

$$\text{GTI} = \frac{\int (\text{LTI}) dW_1}{\int dW_1} \quad (18)$$

式中, W_1 表示机构的 GTW。

在 GTW 内部, 存在一个以 $(0, 0)$ 为圆心, $\theta_{T_{\max}}$ 为半径的最大圆形区域, 该区域内满足 $0 \leq \theta \leq \theta_{T_{\max}}$, $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ 。将 $\theta_{T_{\max}}$ 定义为机构的优良传递姿态能力(GTOC)^[11], 即 $\text{GTOC} = \theta_{T_{\max}}$ 。

GTI 与 GTOC 越大, 机构的传递性能越好, 图 4 对应的 GTI 和 GTOC 分别为: $\text{GTI} = 0.86$, $\text{GTOC} = 24.6^\circ$ 。显然, 该尺寸下非对称 3-PRS 机构及其运动等效机构的 GTOC 较小, 因此需要对机构的几何尺寸进行优化。

3 基于运动/力传递性能的优化设计

为使非对称 3-PRS 及其运动等效机构具有更优的传递性能, 以 GTI 与 GTOC 指标值更大为目标对机构进行尺寸优化设计。非对称 3-PRS 机构及其运动等效机构需要优化的尺寸参数有 E, e 及 L 。首先对尺寸参数进行标准化处理, 令 $D = (E + e + L)/3$, 则标准化后的几何参数为: $r_1 = e/D$, $r_2 = E/D$, $l = L/D$, 且 $r_1 + r_2 + l = 3$ 。

由机构本身的几何约束可得

$$0 < r_1, r_2 \quad l < 3r_1 \leq r_2 \quad 1.5r_2 < 1.5r_1 + l \quad (19)$$

由式(19), 分别以 r_1, r_2, l 为坐标轴可以确定一个平面区域 ABC, 即非对称 3-PRS 及其运动等效机构的参数设计空间^[25], 如图 5a 中阴影区域所示。在该参数设计空间中, 每一个点均代表机构的一组尺寸参数。通过该参数设计空间便可以建立优化指标与机构的几何尺寸参数之间的联系。

图 5 参数设计空间

如图 5b 所示, 参数设计空间可表示成二维形式, (r_1, r_2, l) 与 (S, T) 之间的关系如下所示

$$\begin{cases} S = l \\ T = \sqrt{3} - \frac{2\sqrt{3}}{3}r_1 - \frac{\sqrt{3}}{3}l \end{cases}$$

或

$$\begin{cases} l = S \\ r_1 = \frac{3 - S - \sqrt{3}T}{2} \\ r_2 = 3 - r_1 - l \end{cases} \quad (20)$$

根据 GTI 与 GTOC 的定义, 可得非对称 3-PRS 机构及其运动等效机构在参数设计空间中的优化设计图谱如图 6 所示。

(a) GTI

(b) GTOC

图 6 优化设计图谱

由图 6 可知, GTI 与 GTOC 随 S 、 T 的变化规律大致相同, 均随 S 增大而增大, 随 T 增大而减小。为了使机构具备更优的运动/力传递性能, 指标 GTI 与 GTOC 均应尽可能取到最大值。因此, 选取图 6a 中 $\text{GTI} \geq 0.88$ 区域与图 6b 中 $\text{GTOC} \geq 30^\circ$ 区域的交集, 可得到非对称 3-PRS 机构及其运动等效机构的优化设计区域如图 7 中阴影区域所示。

图 7 优化设计区域

在图 7 中优化设计区域内任一点对应的几何尺

寸下, 机构的 GTI 与 GTOC 均能达到设计要求, 即 $\text{GTI} \geq 0.88$, $\text{GTOC} \geq 30^\circ$ 。从优化设计区域中选择机构标准化的几何参数: $r_1 = 0.55$, $r_2 = 0.65$, $l = 1.8$ 。取 $D = 500 \text{ mm}$, 则机构实际尺寸为: $E = 325 \text{ mm}$, $e = 275 \text{ mm}$, $L = 900 \text{ mm}$ 。此时, 机构在 (φ, θ) 下的局部传递指标图谱如图 8 所示, 对应的指标值分别为 $\text{GTI} = 0.89$, $\text{GTOC} = 30.2^\circ$ 。

图 8 优化尺寸下的 LTI 图谱

对比图 8 与图 4 可知, 经过优化设计后, 非对称 3-PRS 机构及其运动等效机构的 LTI 较优化之前明显增大, GTW、GTI 及 GTOC 都较优化之前得到了可观的改善。

4 机构约束性能对比分析

得到 3-PRS 机构及其运动等效机构传递性能的优化尺寸后, 可在该优化尺寸下开展机构约束性能的对比研究。刘辛军等^[15]提出了评价无过约束机构约束性能的输出约束指标(OCI), 可用于判断机构到约束奇异位形的“距离”^[10]。本文采用该指标进行约束性能对比分析, 对于非对称 3-PRS 及其无过约束运动等效机构, 其 OCI 可表达为

$$\text{OCI} = \min \left(\frac{|\mathbf{s}_{Ci} \circ \Delta \mathbf{s}_{Oi}|}{|\mathbf{s}_{Ci} \circ \Delta \mathbf{s}_{Oi}|_{\max}} \right) \quad (21)$$

$$i = 1, 2, \dots, 3$$

式中, $\Delta \mathbf{s}_{Oi}$ 表示与 $\mathbf{s}_{Ci}$ 相对应的末端平台的“虚拟运动螺旋”^[15], 即锁住并联机构所有驱动副并“释放”末端平台所受的第 i 个约束力螺旋时末端平台的单位输出运动螺旋。

$\Delta \mathbf{s}_{Oi}$ 可按下式求解

$$\begin{cases} \mathbf{s}_{Tj} \circ \Delta \mathbf{s}_{Oi} = 0 \\ \mathbf{s}_{Ck} \circ \Delta \mathbf{s}_{Oi} = 0 \end{cases} \quad (22)$$

$$j = 1, 2, 3 \quad k = 1, 2, \dots, k \neq i$$

由式(21)知 OCI 大小介于 0 到 1 之间, OCI 值越大机构的约束性能越好。

对于过约束并联机构而言, 由于各分支 TWS 和末端约束螺旋数目之和大于 6, 当锁住其所有驱动关节, 并释放末端所受的某个约束螺旋, 末端不一定会产生对应的“虚拟运动螺旋”, 因此式(21)无法直接用于求解过约束并联机构的约束性能。

针对以上机构中出现冗余力带来的问题, 文献[26]在求解冗余驱动机构运动/力传递指标时给出了一种有效的方法, 其思想为去除机构中的冗余力, 将冗余驱动机构转化为几种非冗余驱动机构, 再以这几种非冗余驱动机构中的 LTI 最大值作为原机构的局部传递指标, 实现了对冗余驱动机构传递性能的分析。该方法可用于解决本文中过约束并联机构的约束性能分析问题, 具体步骤可概括如下。

从过约束机构中的某些分支中去除约束力/矩, 并确保机构末端仅受到 3 个线性无关的约束力/矩。将去除约束力/矩的分支用对应新约束的新分支代替, 将过约束机构转化为非过约束机构。转化过程中, 过约束机构可能转化为 q 种非过约束机构, 令各非过约束机构对应的 OCI 为 $\tau_i (i=1, 2, \dots, q)$, 将 τ_i 中的最大值作为过约束机构的输出约束指标, 即

$$\text{OCI} = \max(\tau_i) \quad (i=1, 2, \dots, q) \quad (23)$$

依照上述步骤, 非对称 3-PRS 机构及其运动等效机构中的三种过约束 PRU+2-PRS、2-PRU+PRS 及 PUU+PRS+PRU 机构向非过约束机构转化时存在的所有可能情况如表 2 所示。根据表 2, 联立式(21)~(23)可对非对称 3-PRS 机构及其运动等效机构进行约束性能分析。

表 2 过约束并联机构向非过约束并联机构转化情况

过约束机构	转化过程		非过约束机构
	被去除的约束	分支替换	
2PRU+PRS	T_{C1} T_{C3}	PRU $\Rightarrow$ PRS	3-PRS
	F_{C1} T_{C1}	PRU $\Rightarrow$ PUS	PUS+PRS+PRU
	F_{C3} T_{C3}	PRU $\Rightarrow$ PUS	PRU+PRS+PUS
PRU+2PRS	T_{C1}	PRU $\Rightarrow$ PRS	3-PRS
	F_{C3}	PRS $\Rightarrow$ PUS	PRU+PRS+PUS
PUU+PRS+PRU	F_{C1}	PUU $\Rightarrow$ PUS	PUS+PRS+PRU
	T_{C3}	PRU $\Rightarrow$ PRS	PUU+2PRS

为实现非对称 3-PRS 机构及其运动等效机构兼顾传递和约束性能的机构对比, 设定各机构 E, e, L 为传递性能的优化尺寸。与 LTI 相似, 对非对称 3-PRS 机构及其运动等效机构而言, 各分支中的约

束力螺旋、分支传递力螺旋之间的相对位置并不会随 Z_0 改变而发生改变, 即各机构的 OCI 不受 Z_0 影响。设定 $Z_0 = 1200 \text{ mm}$, 绘制 (φ, θ) 坐标下非对称 3-PRS 机构及其运动等效机构在无传递奇异姿态空间中的约束性能图谱如图 9 所示, 图中分别展示了可直观体现各机构约束性能分布的三维曲面图谱和便于进行性能对比的二维等高线图谱。图中各机构等高线图谱中(1)、(2)所代表粗实线的含义与图 4 中一致。从图 9 可以看出, 各机构约束性能图谱的对称性与机构构型的对称性一致, 并且在无传递奇异姿态空间的内部, 所有机构不会出现约束奇异位形。

(a) 3-PRS 并联机构约束性能图谱

(b) PRU+PRS+PUS 并联机构约束性能图谱

(c) PUU+2-PRS 并联机构约束性能图谱

(d) 2-PUU+PRS 并联机构约束性能图谱

图 9 非对称 3-PRS 机构及其运动等效机构约束性能图谱

与 GTW 相似, 定义机构约束性能图谱中 $OCI \geq 0.7$ 区域为机构的优良约束空间(GCW), 该区域内机构的约束性能优异, 并且远离约束奇异位形。在 GCW 内部存在一个圆心为 $(0,0)$ 半径为 θ_{Cmax} 的最大圆形区域 W_2 , 如图 9 中各等高线图谱中虚线圆形所示, 该区域内满足 $0 \leq \theta \leq \theta_{Cmax}$, $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ 。将 θ_{Cmax} 定义为机构的优良约束姿态能力(GCOC)。显然, GCOC 和 W_2 内的 OCI 越大, 机构的约束性能越好。

由图 9 可知, 2-PRU+PRS 机构 W_2 内的 OCI 值优于其他六种机构, 其 GCOC 小于 2-PUU+PRS 机构, 大于除 2-PUU+PRS 机构外的其他机构, 故 2-PRU+PRS 机构的约束性能明显优于除 2-PUU+PRS 机构外的其他机构。

为了更精确地比较非对称 3-PRS 机构及其运动等效机构的约束性能优劣, 定义圆形区域 W_2 内的全局约束指标(GCI)为

$$GCI = \frac{\int (OCI) dW_2}{\int dW_2} \quad (24)$$

根据 GCI 与 GCOC 的定义可得非对称 3-PRS 机构及其运动等效机构的 GCI 与 GCOC 如表 3 所示。

表 3 各并联机构 GCI 与 GCOC

机构名称	GCI	GCOC
3-PRS	0.7541	27.90°
PRU+PRS+PUS	0.9531	38.53°
PUU+2-PRS	0.7847	32.93°
2-PUU+PRS	0.8138	43.37°
PRU+2-PRS	0.9531	38.53°
2-PRU+PRS	0.9588	41.51°
PUU+PRS+PRU	0.9531	38.53°

由表 3 可知, 2-PRU+PRS 机构的 GCOC 略小于 2-PUU+PRS 机构, 但其 GCI 值远超 2-PUU+PRS 机构, 故认为 2-PRU+PRS 机构的约束性能优于 2-PUU+PRS 机构。此外, PRU+PRS+PUS、PRU+2-PRS 及 PUU+PRS+PRU 三种并联机构的 GCI 与 GCOC 均相同, 表明这三种并联机构的约束性能相当, 而非对称 3-PRS 机构的约束性能最差。综上所述, 在运动/力传递性能优化尺寸下, 以约束性能优劣为依据进行构型选择时, 2-PRU+PRS 机构为优选构型。

5 结论

(1) 针对非对称 3-PRS 机构开展了运动等效机构的演化研究, 通过该机构约束雅可比矩阵进行线性运算演化出了该机构的 6 种运动等效机构, 包括 PRU+2-PRS、2-PRU+PRS 及 PUU+PRS+PRU 三种过约束机构和 PUU+2-PRS、2-PUU+PRS 及 PRU+PRS+PUS 三种非过约束机构, 揭示了少自由度并联机构中机构结构不同而运动学相同这一客观现象。

(2) 分析了非对称 3-PRS 机构及其运动等效机构的运动/力传递性能, 基于运动等效机构运动/力传递性能相同的特性, 根据 GTI 与 GTOC 指标对非对称 3-PRS 机构及其运动等效机构进行了优化设计并得到了优化设计参数。

(3) 解决了运动等效机构中过约束机构约束性能的评价问题, 基于传递性能的优化尺寸开展了非对称 3-PRS 机构及其含过约束与无过约束运动等效机构的约束性能对比研究, 实现了兼顾机构传递和约束性能的构型优选。本文针对非对称 3-PRS 机构的研究思路也适用于其他类型的运动等效机构。

参 考 文 献

- [1] WAHL J. Articulated tool head : Germany , WO2000025976A2[P]. 2001-5-11.
- [2] NEUMANN K E. Parallel-kinematic machine: PCT, WO/2006/054935[P]. 2006-05-26.
- [3] NEUMANN K E. Robot: US, 4732525[P]. 1988-03-22.
- [4] CARRETERO J, PODHORODESKI R, NAHON M, et al. Kinematic analysis and optimization of a new three degree-of-freedom spatial parallel manipulator[J]. Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, 2000, 122(1): 17-24.
- [5] LI Qinchuan, CHEN Zhi, CHEN Qiaohong, et al. Parasitic motion comparison of 3-PRS parallel mechanism with different limb arrangements[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2011, 27(2): 389-396.
- [6] SUTHERLAND G, ROTH B. A transmission index for spatial mechanisms[J]. Journal of Engineering for Industry, 1973, 95(2): 589-597.
- [7] TSAI M J, LEE H W. Generalized evaluation for the transmission performance of mechanisms[J]. Mechanism and Machine Theory, 1994, 29(4): 607-618.
- [8] BALL R S. A treatise on the theory of screws[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1900.
- [9] WANG Jinsong, WU Chao, LIU XinJun. Performance evaluation of parallel manipulators : Motion/force transmissibility and its index[J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(10): 1462-1476.
- [10] LIU Xinjun, WU Chao, WANG Jinsong. A new approach for singularity analysis and closeness measurement to singularities of parallel manipulators[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2012, 4(4): 041001-1-10.
- [11] XIE Fugui, LIU Xinjun, LI Tiemin. A comparison study on the orientation capability and parasitic motions of two novel articulated tool heads with parallel kinematics[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2013(1): 1-11.
- [12] 张伟中, 徐灵敏, 童俊华, 等. 2-PUR-PSR 并联机构的运动学分析及尺度综合[J]. 机械工程学报, 2018, 54(7): 45-53.
ZHANG Weizhong, XU Lingmin, TONG Junhua, et al. Kinematic analysis and dimensional synthesis of 2-PUR-PSR parallel manipulator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(7): 45-53.
- [13] WANG Feibo, CHEN Qiaohong, LI Qinchuan. Optimal design of a 2-UPR-RPU parallel manipulator[J]. Journal of Mechanical Design, 2015, 137(5): 054501-1.
- [14] WANG Liping, XU Huayang, GUAN Liwen. Optimal design of a 3-PUU parallel mechanism with 2R1T DOFs[J]. Mechanism and Machine Theory, 2017, 114: 190-203.
- [15] LIU Xinjun, CHEN Xiang, NAHON M. Motion/force constrainability analysis of lower-mobility parallel manipulators[J]. Journal of Mechanisms & Robotics. 2014, 6(3): 031006-1-9.
- [16] GAN Dongming, DAI Jiansheng, DIAS J. Variable motion/force transmissibility of a metamorphic parallel mechanism with reconfigurable 3T and 3R motion[J]. 2016, 8(5): 051001-051001-9.
- [17] HU Bo, HUANG Zhen. Kinematically identical manipulators of a 2-RPU+UPR parallel manipulator and their kinematics analysis[C]// Proceedings of the 14th IFToMM World Congress, Taipei, Taiwan, China. 2015: 310-319.
- [18] HU B. Kinematically identical manipulators for the Exechon parallel manipulator and their comparison study[J]. Mechanism and Machine Theory, 2016, 103: 117-137.
- [19] 胡波. 基于约束力/矩的少自由度并联机构和串并联机构理论研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2010.
HU Bo. Theoretical study of limited-Dof parallel manipulators and serial-parallel manipulators based on constrained force/torque[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2010.
- [20] LI Yangmin, XU Qingsong. Kinematic analysis of a 3-PRS parallel manipulator[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2007, 23(4), 395-408.
- [21] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 空间高等机构学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
HUANG Zhen, ZHAO Yongsheng, ZHAO Tieshi. Advanced spatial mechanism[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [22] 戴建生. 机构学与机器人的几何与旋量代数[M]. 北京: 高等教育出版社, 2014.
DAI Jiansheng. Geometrical foundations and screw algebra for mechanisms and robotics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2014.
- [23] CHEN Chao, ANGELES J. Generalized transmission index and transmission quality for spatial linkages[J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, 42(9): 1225-1237.

- [24] CHEN Xiang, LIU Xinjun, XIE Fugui. A comparison study on motion/force transmissibility of two typical 3-DOF parallel manipulators: the sprint Z3 and A3 tool heads[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2014, 11(1): 1-10.
- [25] LIU Xinjun, WANG Jinsong. A new methodology for optimal kinematic design of parallel mechanisms[J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, 42(9): 1210-1224.
- [26] XIE Fugui, LIU Xinjun, WANG Jinsong. Performance evaluation of redundant parallel manipulators assimilating motion/force transmissibility[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2011, 8(5): 113-124.
- 作者简介: 胡波(通信作者), 男, 1982 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为并联机器人理论。
E-mail: hubo@ysu.edu.cn

第 9 届上银优秀机械博士论文奖——金奖

2219 铝合金大型环件组织性能调控方法与工程应用研究

作 者: 何海林

毕业学校: 中南大学

指导教师: 易幼平

Ø9.5 m 2219 铝合金贮箱过渡环是我国计划研制的重型运载火箭关键承力构件, 其力学性能指标要求高于现役长征五号 Ø5 m 过渡环, 我国尚未有制造该超大规格高性能整体环件的工艺技术与先例。铸锭重量达到 10 吨、环件尺寸达到 Ø9.5 m 的超大环件高性能成形制造所面临的巨大挑战表现在: 超大规格铸锭成分的不均匀性与粗大残余结晶相的富聚, 易造成应力集中和裂纹萌生, 导致环件延伸率偏低; 环件在开坯、扩孔以及环轧成形中微观组织演变复杂, 易形成粗大纤维状晶粒组织, 环件各方向性能差异显著。

本文围绕制约环件性能的粗大残余结晶相与粗大纤维组织两个关键因素, 通过实验室基础研究与工业试验, 提出了一种“高温开坯+中低温环轧”贮箱过渡环成形制造创新思路, 突破了现有铝合金环件制造技术, 取得了如下主要研究成果:

(1) 研究了 2219 铝合金高温塑性流变特性与组织演变规律, 建立了 2219 铝合金高温稳态流变应力本构方程与热加工图, 获得了 2219 铝合金最佳热变形工艺窗口, 探明了 2219 铝合金热变形过程中动态再结晶产生的热力学条件, 为 2219 铝合金成形制造工艺研究提供了基础实验数据。

(2) 揭示了 2219 铝合金粗大结晶相在塑性流变过程中的细化机制, 即高温下为溶解扩散机制、低温下为剪切破碎机制, 提出了高温大流变多向锻造与工序间固溶的环件开坯新工艺, 显著细化、减少了环件粗大残余结晶相, 增大了基体组织中溶质原子过饱和度, 提高了时效析出相密度和均匀性, 材料强度和塑性同时提高。

(3) 探明了 2219 铝合金环件制造全流程再结晶组织演变规律, 即高温多向锻造发生了连续动态再结晶, 后续加热过程出现静态再结晶长大; 中低温变形与高温固溶可使 2219 铝合金产生细小的静态再结晶组织, 且具有良好的热稳定性。突破了 2219 铝合金环件常规轧制技术, 提出了基于中低温变形的细晶轧制新工艺, 获得了再结晶晶粒细化的热力学条件。

(4) 提出了基于“高温开坯+中低温环轧”铝合金环筒件成形制造新方法, 开展了 Ø3.35 m 过渡环工业应用试验, 获得了优异力学性能。首次成功研制出高性能 Ø9.5 m 贮箱整体过渡环, 为我国重型运载火箭立项提供了重要支撑。形成了 2xxx 系铝合金环筒件制造新技术, 在运载火箭、武器装备等环筒件高性能成形制造中获得了推广应用, 具有重大社会效益与军事意义。