doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.051

机械手臂结构设计与性能分析

孙龙飞[1]　房立金[2]

(1.东北大学机械工程与自动化学院,沈阳 110819;2.东北大学机器人科学与工程学院,沈阳 110819)

摘要:工业机器人具有工作空间大、结构紧凑、灵活性好等优点,但工业机器人机械臂的串联结构形式使其整体刚性存在不足。机器人的末端负载完全由关节处的伺服电机分担,增加了机械臂的驱动功率及能耗。针对上述问题提出一种具有机械手臂的机器人结构,机器人大臂和小臂采用平行四边形框架及对角线驱动的结构形式,利用平行四边形框架平衡外部弯矩作用。仿真结果表明,与工业机器人相比,在仅有外部重力负载作用时大臂的驱动功率可以降低 20% ~80%,小臂的功率与工业机器人相当;在仅有外部弯矩作用时,无需消耗电机的驱动功率,从原理上降低了机械臂的驱动功率及能耗。此外,对机器人整体刚度进行计算,计算结果表明,此机器人的整体刚度优于工业机器人,有利于提高机器人在搬运、码垛等作业中的负载能力。

关键词:机械手臂;结构设计;性能分析

中图分类号:TP242.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2017)09-0402-09

Design and Performance Analysis of Novel Robotic Arm

SUN Longfei[1]　FANG Lijin[2]

(1. *School of Mechanical Engineering and Automation*, *Northeastern University*, *Shenyang* 110819, *China*
2. *Faculty of Robot Science and Engineering*, *Northeastern University*, *Shenyang* 110819, *China*)

Abstract: Industrial robots are widely used in the fields of handling, stacking and machining due to their advantages of large workspace, compact structure and good flexibility, but the stiffness of the robot is relatively weak due to the series structure. In addition, the external load of the robot is fully shared by servo motors which increase the driving power and energy consumption of the robot arm, especially for the big and small arms. In order to increase the robot stiffness and reduce the driving power of the robot arm, a robot structure with a novel robot arm was presented. A parallelogram structure with diagonal driven was adopted for robot big and small arms. The diagonal electric cylinders driven by ball screws using double nuts with preload to eliminate the reverse backlash, and the anti-backlash method was applied to the rotary base and the robot wrist to eliminate the transmission backlash. By using the parallel quadrilateral frame to balance the external bending moment, the driving power and the energy consumption of the mechanical arm were reduced in principle. The energy consumption of the novel robot and the corresponding industrial robot were compared under the same external load, and the simulation results showed that the driving power of the big arm can be reduced from 20% to 80% compared with the industrial robot and the small arm was equal to the industrial robot when only the external gravity load was applied. Moreover, the power consumption of the driving motor was not required when only external bending moment was applied. Finally, based on the strain energy and Castigliano's theorem, combining with the robot arms stiffness results using finite element analysis (FEA), the integral robot stiffness was calculated and the results showed that the overall stiffness of the robot was better than that of industrial robots, which made it beneficial to improve the load capacity in the operations of handling, stacking and so on.

Key words: mechanical arm; structural design; performance analysis

收稿日期:2016-12-20　修回日期:2017-01-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51575092)和辽宁重大装备制造协同创新中心项目

作者简介:孙龙飞(1987—),男,博士生,主要从事提高机器人精度关键技术研究,E-mail:lfsun_neu@163.com

通信作者:房立金(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事机器人与自动化装备研究,E-mail:ljfang@mail.neu.edu.cn

引言

工业机器人由于具备工作空间大、结构紧凑、柔性好等优点而广泛应用于搬运、焊接、喷涂等领域[1]，特别是高速重载机器人在多种行业的重物搬运作业中优势较为明显，国内外典型的重载工业机器人有 FUNUC M－2000i、KUKA TITAN KR1000 及新松的 SRB500A 等。对机器人驱动负载能力及运行速度等方面需求的不断提升要求机器人具备较大的驱动功率，因此，在 TITAN 等高速重载机器人机械臂的 2、3 轴均配置两台大功率伺服电机共同驱动[2]。如何降低工业机器人能耗已引起科研人员的关注[3]。LEE 等[4－5]提出了采用并联冗余驱动的方式实现机器人系统节能控制，该方法需要额外增加驱动电机的数量，一定程度上增加了控制的复杂程度。另外，文献[6]提出基于最优时间和最优能量的工业机器人最优轨迹规划方法。文献[7]建立了机器人系统能耗模型并研究了机器人速度和负载等参数对能耗的影响。文献[8]提出通过缩短机器人作业时间、空闲时间及优化机器人工序等方法降低制造系统的综合能耗。然而，上述优化方法均无法从根本上降低机器人自身的驱动能耗。

传统工业机器人由于关节内减速器柔性、齿隙等因素造成的传动误差使机器人关节刚度变差[9]，典型关节型工业机器人的整体刚度通常低于 1 N/μm[10－11]。PALPACELLI[12] 提出在机器人末端执行器上加装一套辅助柔锁驱动装置，采用冗余驱动的方式提升机器人的刚度及静态特性。电动缸作为直线驱动单元多采用滚珠丝杠驱动，在并联机器人中使用较为广泛[13－14]。在机床等高精度直线进给系统中可通过双螺母预紧来消除滚珠丝杠副传动间隙及死区对传动精度的影响[15－16]。

本文设计一种具有机械臂的机器人系统。机械臂采用平行四边形框架对角推缸驱动的结构形式，从结构原理上与传统关节型工业机器人相比具备低驱动能耗的优势。基于能量法和卡氏定理对机器人系统的整体刚度进行计算，并通过整机有限元模型进行验证。

1　机器人结构设计

图 1 所示为机器人的整体结构。机器人主要由回转单元、大臂、小臂及腕部 4 部分组成。机器人的机械臂及腕部可绕立柱回转。机械臂可以实现水平和竖直方向 2 个自由度运动，机器人腕部具有俯仰及摆动 2 个自由度，用于调整机器人末端姿态。与传统工业机械臂结构形式不同，该机器人大臂和小臂均采用平行四边形框架对角线电动缸驱动的结构形式，通过控制平行四边形对角线上的电动缸的伸缩运动，实现机械臂的水平和竖直运动。

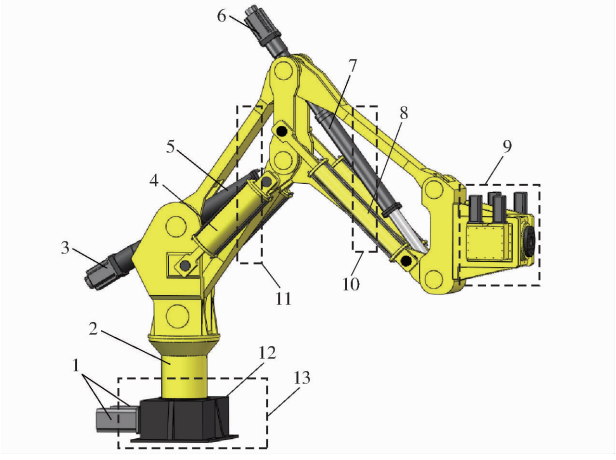


图 1　机器人整体结构示意图

Fig. 1　Schematic diagram of robot

1. 伺服电机　2. 立柱　3. 大臂电动机　4. 大臂平衡缸　5. 大臂电动缸　6. 小臂电动机　7. 小臂电动缸　8. 小臂平衡缸　9. 腕部　10. 小臂　11. 大臂　12. 基座　13. 回转单元

电动缸由伺服电机经安全离合器驱动丝杠做回转运动，丝杠经丝母将旋转运动转换为丝母及推杆的直线运动，通过缸体内壁加工的导向槽限制了丝母的回转自由度。电动缸中的滚珠丝杠传动副采用双螺母预加载荷的方式来消除反向传动间隙并提高滚珠丝杠的刚度，如图 2 所示。

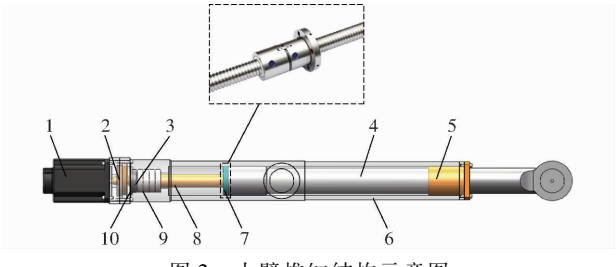


图 2　大臂推缸结构示意图

Fig. 2　Schematic diagram of cylinder

1. 伺服电机　2. 安全离合器　3. 调整垫片　4. 推杆　5. 密封端盖　6. 缸体　7. 预压型双丝母　8. 丝杠　9. 轴承　10. 密封端盖

基座部分提供一个自由度的回转运动，如图 3 所示。2 台伺服电机与蜗杆分别对称布置在蜗轮的两侧，共同驱动蜗轮转动，蜗轮通过回转轴带动机器人立柱完成回转动作。采用双电动机驱动的结构形式，可通过双电动机主动消隙控制消除蜗轮蜗杆副的传动间隙，提高回转运动精度[17]。此外，蜗轮蜗杆的大传动比可以代替减速器实现减速的功能。

腕部基于差动原理设计而成，如图 4a 所示，传动原理如图 4b 所示，主要由第一差动输入、第二差动输入及差动输出 3 部分组成，第一差动输入包括蜗杆、蜗轮及锥齿轮，第二差动输入与第一差动输入

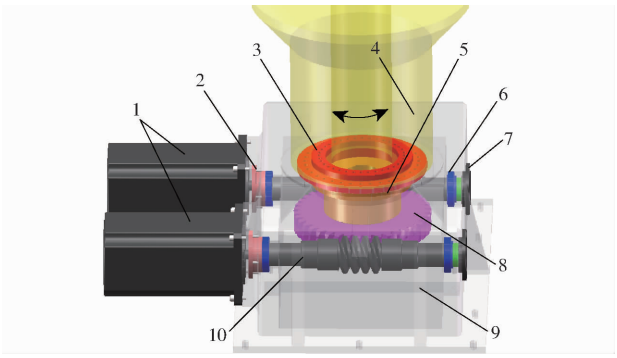


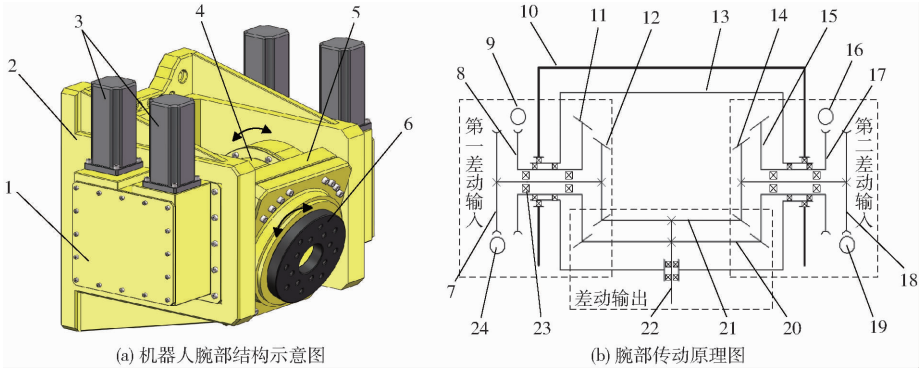
图 3 机器人回转驱动结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of rotary unit

1. 伺服电机 2. 密封端盖 3. 转台轴承 4. 立柱 5. 回转轴 6. 轴承 7. 端盖 8. 蜗轮 9. 箱体 10. 蜗杆

关于 U 型支撑对称并安装于 U 型支撑件的外侧;差动输出部分主要包含锥齿轮及摆轴。通过控制两侧蜗轮的转动实现俯仰轴及摆轴 2 个自由度的回转运动。腕部也可采用消隙控制实现无间隙传动。为实现传动部件合理布置并保证传动零部件工作在封闭空间内,支撑件内外两侧锥齿轮与蜗轮分别通过传动轴和中空传动轴联接,其轴向位置均可通过套筒进行调整,机械臂腕部内部主要结构如图 5 所示。

针对工业应用需求对机械臂关节设计了必要的防护环节,如图 6 所示。机械臂作相对回转运动的大臂、小臂等杆件间均通过密封圈实现密封,关节转动副外部采用端盖密封,实现对回转关节内部轴承



(a) 机器人腕部结构示意图 (b) 腕部传动原理图

图 4 机器人腕部结构及传动原理图

Fig. 4 Schematic diagram of robot wrist and driving principle

1. 蜗轮蜗杆减速箱体 2. U 型支撑 3. 伺服电机 4. 密封端盖 5. 俯仰部件 6. 输出法兰 7. 主动蜗轮 8. 从动蜗轮 9. 从动蜗杆 10. U 型支撑 11. 从动锥齿轮 12. 主动锥齿轮 13. 俯仰部件 14. 主动锥齿轮 15. 从动锥齿轮 16. 从动蜗杆 17. 从动蜗轮 18. 主动蜗轮 19. 主动蜗杆 20. 大锥齿轮 21. 小锥齿轮 22. 摆动摆轴 23. 轴承 24. 主动蜗杆

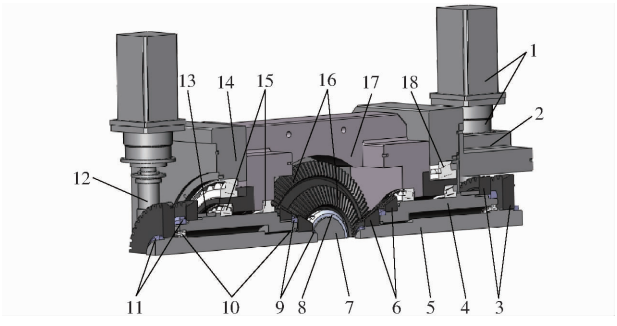


图 5 腕部结构剖视图

Fig. 5 Section view of robot wrist

1. 电动机与减速器 2. 蜗轮箱 3. 蜗轮 4. 中空轴 5. 传动轴 6. 驱动锥齿轮 7. 输出轴 8、9. 锁紧螺母 10、15、18. 轴承 11. 锁紧螺母 12. 蜗杆 13. 套筒 14. 支座 16. 输出锥齿轮 17. 俯仰件

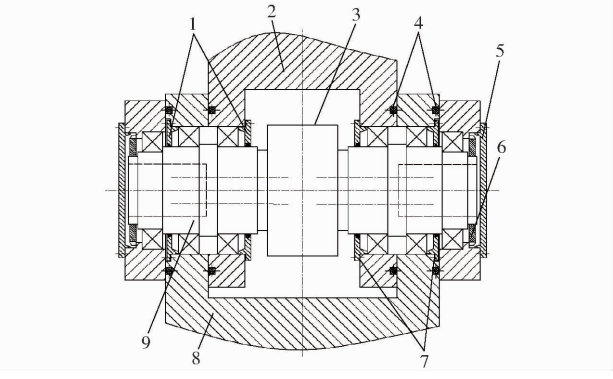


图 6 机械臂关节装配图

Fig. 6 Assembly drawing of passive joint

1. 密封端盖 2. 小臂杆件 3. 推杆 4. O 型密封圈 5. 外端盖 6. 锁紧螺母 7. 调整垫 8. 大臂杆件 9. 半轴

的防护;此外,电动缸的推杆伸出部分可采用折皱保护罩进行完全防护,有效避免推杆暴露在外导致污物异物等进入推缸,影响滚珠丝杠的使用寿命。

2 机器人驱动能耗特性分析

2.1 机械手臂驱动功率及能耗模型

机器人小臂运动角度 $\theta_1 \in [0,70°]$,大臂与水平方向的俯仰运动夹角 $\theta_3 \in [0,70°]$,根据机构设计尺寸,机器人水平可达距离为 3 460 mm,如图 7 所示。

机器人大臂和小臂对角线电动缸所受载荷 F_{DE}、F_{AC}与外部载荷关系为

$$\begin{cases} F_{AC} = \dfrac{\cos\theta_1}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} G \\ F_{DE} = \dfrac{\cos\theta_3}{\sin(\theta_3 + \theta_4)} G \end{cases} \tag{1}$$

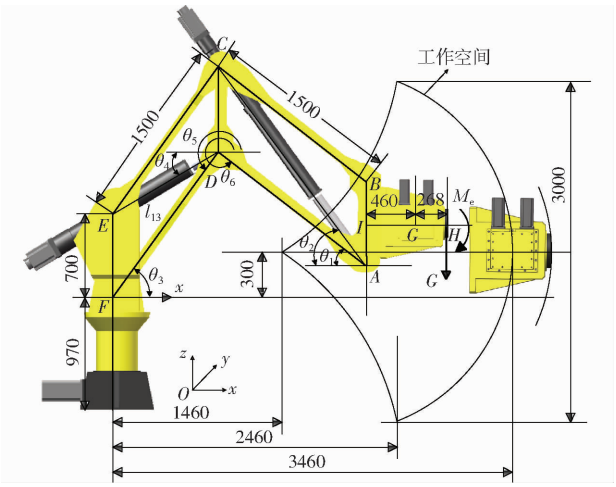


图 7　机器人尺寸及工作空间示意图

Fig. 7　Robot size and workspace

式中　θ_1、θ_2、θ_3、θ_4——杆件之间夹角

G——重力负载

平行四边形框架杆件受力与外部载荷的关系为

$$\begin{cases} F_{BC} = \dfrac{1}{L_{AB}\cos\theta_1} M_e \\ F_{AD} = \dfrac{-\cos\theta_2}{\sin(\theta_2-\theta_1)} G - \dfrac{1}{L_{AB}\cos\theta_1} M_e \\ F_{CD} = -\dfrac{\cos\theta_1\sin\theta_2}{\sin(\theta_2-\theta_1)}(1+\cot\theta_2\tan\theta_3)G - \dfrac{1}{L_{AB}}(\tan\theta_1+\tan\theta_3)M_e \\ F_{CE} = \dfrac{\cos\theta_1\cos\theta_2}{\sin(\theta_2-\theta_1)\cos\theta_3} G + \dfrac{1}{L_{AB}\cos\theta_3} M_e \\ F_{DF} = -\left[\dfrac{\cos\theta_1\cos\theta_2}{\sin(\theta_2-\theta_1)\cos\theta_3} + \dfrac{\cos\theta_4}{\sin(\theta_3+\theta_4)}\right] G - \dfrac{1}{L_{AB}\cos\theta_1\cos\theta_3} M_e \end{cases} \tag{2}$$

式中　F_i——杆件 i 作用力　　M_e——外部弯矩

L_{AB}——杆件 AB 长度

由式(1)可得到大臂和小臂电动缸电动机驱动扭矩 T_{DE}、T_{AC} 与外部载荷的关系分别为

$$\begin{cases} T_{AC} = \dfrac{F_{AC}p_{AC}}{2\pi\eta_1} = \dfrac{p_{AC}\cos\theta_1}{2\pi\eta_1\sin(\theta_2-\theta_1)} G \\ T_{DE} = \dfrac{F_{DE}p_{DE}}{2\pi\eta_2} = \dfrac{p_{DE}\cos\theta_3}{2\pi\eta_2\sin(\theta_3+\theta_4)} G \end{cases} \tag{3}$$

式中　p_{AC}、p_{DE}——小臂和大臂的丝杠导程

η_1、η_2——小臂和大臂的丝杠传动效率

机器人大臂和小臂的驱动功率表示为

$$\begin{cases} P_B = \dfrac{1}{9\,550}\dfrac{v_B}{p_{DE}} T_{DE} = F_{DE}v_B \\ P_S = \dfrac{1}{9\,550}\dfrac{v_S}{p_{AC}} T_{AC} = F_{AC}v_S \end{cases} \tag{4}$$

其中

$$\begin{cases} v_B = L_{DF}\omega_B\sin(\theta_5-\theta_3) \\ v_S = L_{AD}\omega_S\sin(\pi-\theta_2-\theta_6) \end{cases} \tag{5}$$

式中　v_B、v_S——大臂和小臂电动缸伸缩速度

ω_B、ω_S——大臂和小臂的角速度

L_{DF}、L_{AD}——大臂和小臂的长度

忽略功率损失等因素，连续工作时间段(0 ~ T_0)内，机器人驱动能耗为

$$E = \int_0^{T_0} (P_S + P_B)\,\mathrm{d}t \tag{6}$$

2.2　工业机器人驱动功率及能耗模型

典型四自由度重载型工业机器人，常用于搬运、码垛等场合，其受力如图 8 所示。

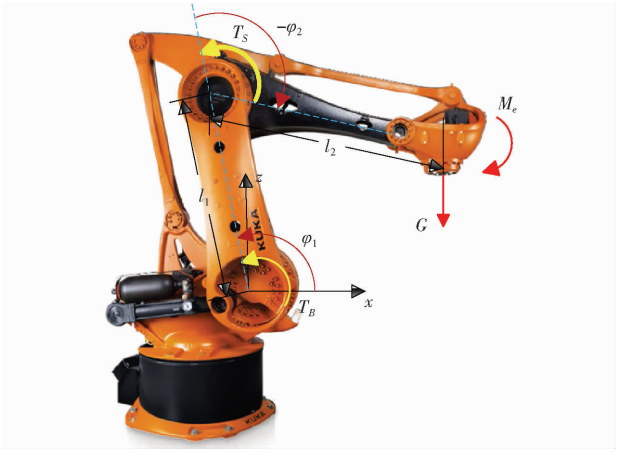


图 8　典型四自由度工业机器人受载示意图

Fig. 8　Force analysis of 4-DOF industrial robot

工业机械臂小臂和大臂驱动扭矩可以表示为

$$\begin{cases} T_S = l_2\cos(\varphi_1+\varphi_2)G + M_e \\ T_B = [l_1\cos\varphi_1 + l_2\cos(\varphi_1+\varphi_2)]G + M_e \end{cases} \tag{7}$$

式中　l_1、l_2——大臂和小臂长度

φ_1、φ_2——杆件之间夹角

小臂和大臂驱动功率可以表示为

$$\begin{cases} P_{IRS} = \dfrac{n_S T_S}{9\,550} \\ P_{IRB} = \dfrac{n_B T_B}{9\,550} \end{cases} \tag{8}$$

式中　n_S、n_B——小臂和大臂的转速

机械臂驱动负载所需消耗驱动能量为

$$E_{IR} = \int_0^{T_0} (P_{IRS} + P_{IRB})\,\mathrm{d}t \tag{9}$$

2.3　机器人驱动功率比较分析

将本文机械臂与臂长 $l_1 = l_2 = 1\,500$ mm 的等效二连杆机械臂比较，同时给出尺寸参数相近的 KUKA TITAN KR1000 的功率计算结果，如图 9 ~ 11 所示。其中，TITAN 机器人大臂长度为 $l_1 = 1\,400$ mm，运动范围为 $-130° \sim 17.5°$，小臂等效长度为 $l_2 = 1\,572$ mm，运动范围为 $-110° \sim 145°$。参考 TITAN 2

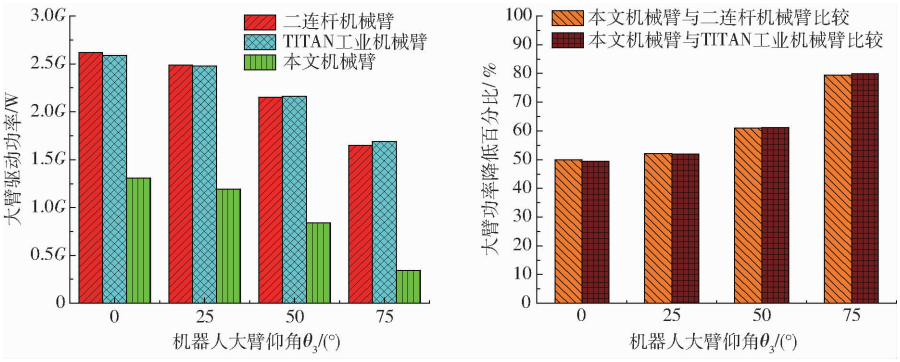


图 9 机器人小臂展开状态下大臂驱动功率

Fig. 9 Driving power of big arm with unfolded small arm

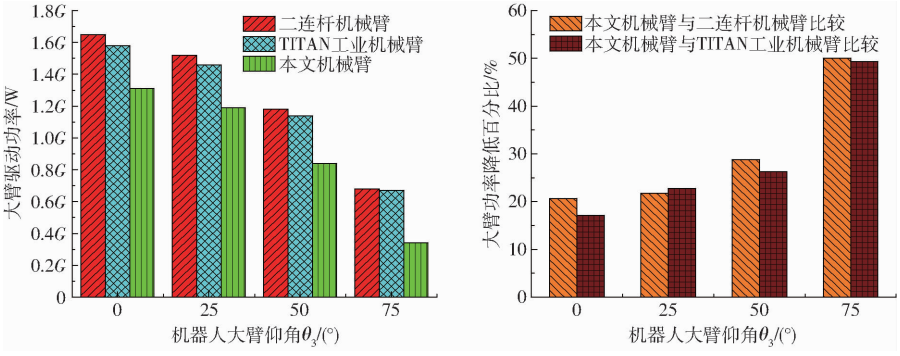


图 10 机器人小臂缩回状态下大臂驱动功率

Fig. 10 Driving power of big arm with folded small arm

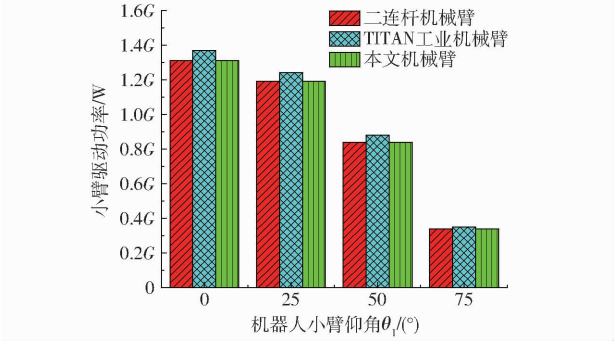


图 11 机器人小臂驱动功率对比

Fig. 11 Comparison of small arm driving power

轴和 3 轴 50 (°)/s 的额定转速,设定外部重力负载 G。

图 9 为小臂展开状态下的大臂驱动功率,与二连杆及 TITAN 机械臂相比,本文大臂功率降低 50% ~80%;图 10 为小臂缩回状态下的大臂功率计算结果,驱动功率降低 20% ~50%,由此,得出本文机器人的大臂功率降低范围为 20% ~80%。小臂驱动功率与二连杆机械臂相当,略低于 TITAN 工业机器人的小臂驱动功率,如图 11 所示。

由式(4)可知,外部弯矩不影响本文机械手臂的驱动功率;反之,工业机器人的外部弯矩直接导致关节的驱动功率增大,因此,计及外部弯矩作用下本文机械臂的功率优势更为明显。

2.4 算例仿真

以大臂回转中心(本文机械臂 F 点)作为坐标原点(x,z) = (0,0),使小臂末端(本文机械臂 A 点)以水平速度 200 mm/s 匀速由坐标点(1 500,0)运动至坐标点(2 500,0),运动时间为 5 s,设定重力负载为 1 000 N,分别比较负载质心与末端输出法兰中心重合及负载质心沿法兰中心 x 向偏出 500 mm 两种状态下机器人驱动功率,如图 12 所示。

如图 12 所示,相同工作条件下,本文机械臂驱动功率明显降低。驱动功率曲线与时间坐标系围成的面积为消耗的驱动能量。采用复化求积公式近似计算得到机械臂消耗的驱动能量,如表 1 所示。负载质心无偏移时本文机械臂与二连杆机械臂和 TITAN 工业机械臂相比驱动能耗分别降低 25% 和 34.9%;质心偏移 500 mm 状态下,本文机械臂驱动能耗分别降低 45.2% 和 51.5%。

3 机器人刚度特性分析

机器人刚度主要取决于机械臂杆件及电动缸刚度,本节在对电动缸刚度优化的基础上分析了机械手臂的综合刚度特性。

3.1 电动缸刚度优化

机器人小臂的驱动对角线长度变化范围为

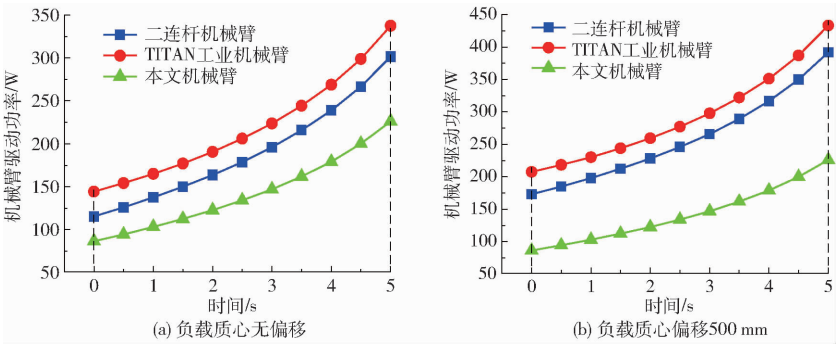


图 12　机器人综合驱动功率变化曲线

Fig. 12　Driving power changing curves of robot

表 1　机器人驱动能耗

Tab. 1　Robot driving energy consumption　J

机械臂	质心无偏移	质心偏移 500 mm
二连杆机械臂	940. 8	1 287. 3
TITAN 工业机械臂	1 084. 6	1 454. 7
本文机械臂	705. 7	705. 7

1 600 ~ 2 300 mm，丝杠工作螺纹长度约为 700 mm。综合考虑驱动单元中丝杠轴向负载、安装间距及稳定性等工况要求，选择 THK 丝杠公称型号为 BNFN 4510A－5，即丝杠外径为 45 mm，内径为 41. 4 mm，导程为 10 mm，该丝杠采用的预压型双丝母轴向刚度 $K_N = 1\,610$ N/μm。综合考虑电动缸的整体直径尺寸，设计推杆内径为 50 mm，外径为 100 mm，丝杠支撑轴承内径为 40 mm，选择 NSK 型号为 40TAC90B 四列组合轴承并中度预紧，其轴向刚度为 2 650 N/μm。设定缩短状态下丝母与缸体安装点的距离为 Δx，推杆安装中心点与缸体前端面的距离 $L_F = 200$ mm，要求对角线伸长距离为 2 300 mm 时，丝母与缸体前端面的距离 $\Delta y = 200$ mm，其中，缸体长度为 L_B，丝杠长度为 L_S，推杆长度为 L_R，如图 13 所示。

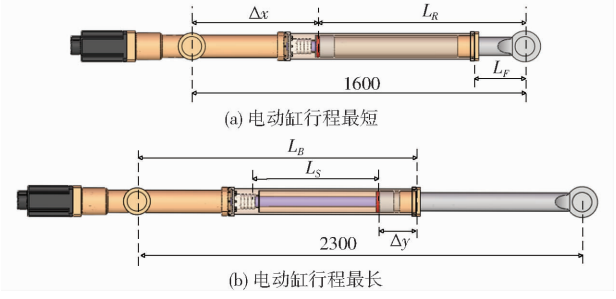


图 13　小臂电动缸尺寸链示意图

Fig. 13　Size of small arm cylinder

电动缸的综合轴向刚度 K 表示为

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_R} + \frac{1}{K_N} + \frac{1}{K_S} + \frac{1}{K_B} \tag{10}$$

式中　K_R——推杆轴向刚度

K_S——丝杠轴向刚度

K_B——支撑轴承轴向刚度

其中，电动缸推杆结构如图 14 所示，其刚度计算公式近似为

$$\frac{1}{K_R} \approx \frac{L_R}{E\pi(R^2 - r^2)} \tag{11}$$

式中　E——推杆材料弹性模量

R——推杆外圆半径

r——推杆内圆半径

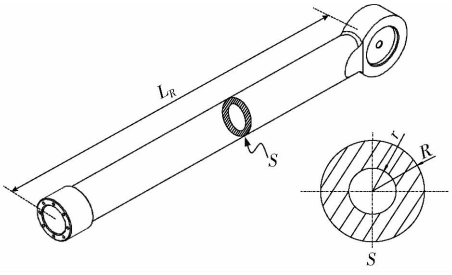


图 14　小臂推杆结构示意图

Fig. 14　Schematic diagram of piston rod

在丝杠、丝母、轴承刚度确定的条件下，提升推杆刚度是保证电动缸输出刚度的唯一方法，因此，将获取电动缸最优刚度的问题转化为推杆长度最小化的问题，来确定电动缸各部件的尺寸参数。优化问题的目标函数及约束条件为

$$\begin{cases} \min\ L_R \\ \text{s. t.} \begin{cases} L_R = 1\,600 - \Delta x \\ L_B = L_R - L_F + \Delta x \\ L_S = L_B - \Delta x - \Delta y \\ L_R - L_F \geqslant L_S + \Delta y \\ L_R - \Delta y \geqslant 2\,300 - L_B \end{cases} \end{cases} \tag{12}$$

将优化计算结果取整后得出小臂电动缸部件的尺寸参数如表 2 所示。

表 2　机器人小臂电动缸优化尺寸

Tab. 2　Optimal size of small arm cylinder　mm

参数	初始距离 Δx	推杆长度 L_R	缸体长度 L_B	丝杠长度 L_S
数值	500	1 100	1 400	700

大臂电动缸丝杠公称型号为 BNFN 5010－5，丝

母轴向刚度为 1 750 N/μm;丝杠支撑轴承内径为 45 mm,选择 45TAC100B 四列组合并中度预紧,其轴向刚度为 3 000 N/μm。推杆内径 60 mm,外径 110 mm,长度 1 200 mm。图 15 所示为优化后电动缸轴向刚度随行程的变化曲线。

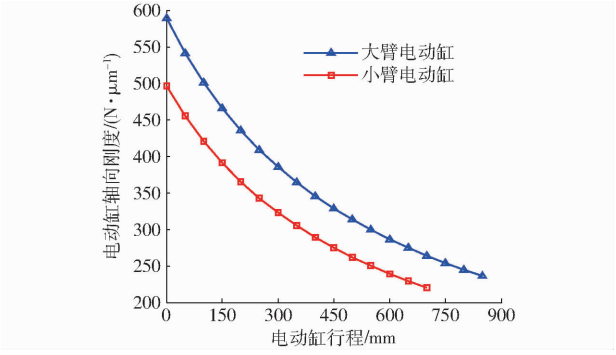


图 15 电动缸刚度特性曲线

Fig. 15 Stiffness curves of cylinders

3.2 机器人刚度建模

机器人末端所受外部载荷可以用矩阵表示为

$$\boldsymbol{F}_e = [F_{ex} \quad F_{ez} \quad F_{ey}]^{\mathrm{T}} \tag{13}$$

外部载荷、刚度矩阵 $\boldsymbol{K}$ 及变形量的关系为

$$\boldsymbol{F}_e = \boldsymbol{K}\delta\boldsymbol{S}_P \tag{14}$$

其中

$$\delta\boldsymbol{S}_P = [\delta S_x \quad \delta S_z \quad \delta S_y]^{\mathrm{T}} = \boldsymbol{C}\boldsymbol{F}_e \tag{15}$$

式中 $\delta\boldsymbol{S}_P$——机器人末端综合变形量矩阵

$\boldsymbol{C}$——机器人柔度矩阵

根据式(14)、(15)可以得出

$$\boldsymbol{K} = \boldsymbol{C}^{-1} \tag{16}$$

机器人腕部支撑结构与内部齿轮传动部件均具备较高刚度,因此,本文将该部分结构简化等效为刚体。机械臂简化为如图 16 所示的柔性模型。通过计算杆件应变能并基于卡氏定理可以计算出平行四边形机械臂关节点沿载荷作用方向的变形量。

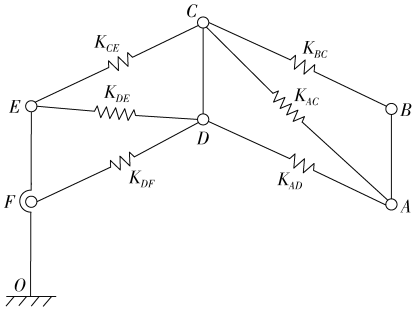


图 16 平行四边形机械臂柔性模型

Fig. 16 Schematic diagram of flexible robot arms

以大臂回转中心作为初始参考点,D 点相对于 F 点的变形量为

$$\begin{cases} \delta D_x = \dfrac{\partial U_D}{\partial F_{Dx}} = \dfrac{F_{DE}}{K_{DE}}\dfrac{\partial F_{DE}}{\partial F_{Dx}} + \dfrac{F_{DF}}{K_{DF}}\dfrac{\partial F_{DF}}{\partial F_{Dx}} \\ \delta D_z = \dfrac{\partial U_D}{\partial F_{Dz}} = \dfrac{F_{DE}}{K_{DE}}\dfrac{\partial F_{DE}}{\partial F_{Dz}} + \dfrac{F_{DF}}{K_{DF}}\dfrac{\partial F_{DF}}{\partial F_{Dz}} \end{cases} \tag{17}$$

式中 U_D——D 点变形能

F_{DE}、F_{DF}——杆件 DE、DF 作用力

K_{DE}、K_{DF}——杆件 DE、DF 等效刚度

F_{Dx}、F_{Dz}——D 点处沿 x、z 向附加力

平行四边形 C 点相对于 D 点的变形量为

$$\begin{cases} \delta C_x = \dfrac{\partial U_C}{\partial F_{Cx}} = \dfrac{F_{CE}}{K_{CE}}\dfrac{\partial F_{CE}}{\partial F_{Cx}} \\ \delta C_z = \dfrac{\partial U_C}{\partial F_{Cz}} = \dfrac{F_{CE}}{K_{CE}}\dfrac{\partial F_{CE}}{\partial F_{Cz}} \end{cases} \tag{18}$$

式中 U_C——C 点变形能

F_{CE}——杆件 CE 作用力

K_{CE}——杆件 CE 等效刚度

F_{Cx}、F_{Cz}——C 点处沿 x、z 向附加力

同理,平行四边形 A 点相对于 D 点的变形量为

$$\begin{cases} \delta A_x = \dfrac{\partial U_A}{\partial F_{Ax}} = \dfrac{F_{AC}}{K_{AC}}\dfrac{\partial F_{AC}}{\partial F_{Ax}} + \dfrac{F_{AD}}{K_{AD}}\dfrac{\partial F_{AD}}{\partial F_{Ax}} \\ \delta A_z = \dfrac{\partial U_A}{\partial F_{Az}} = \dfrac{F_{AC}}{K_{AC}}\dfrac{\partial F_{AC}}{\partial F_{Az}} + \dfrac{F_{AD}}{K_{AD}}\dfrac{\partial F_{AD}}{\partial F_{Az}} \end{cases} \tag{19}$$

式中 U_A——A 点变形能

F_{AC}、F_{AD}——杆件 AC、AD 作用力

K_{AC}、K_{AD}——杆件 AC、AD 等效刚度

F_{Ax}、F_{Az}——A 点处沿 x、z 向附加力

平行四边形 B 点相对于 A 点的变形量为

$$\begin{cases} \delta B_x = \dfrac{\partial U_B}{\partial F_{Bx}} = \dfrac{F_{BC}}{K_{BC}}\dfrac{\partial F_{BC}}{\partial F_{Bx}} \\ \delta B_z = \dfrac{\partial U_B}{\partial F_{Bz}} = \dfrac{F_{BC}}{K_{BC}}\dfrac{\partial F_{BC}}{\partial F_{Bz}} \end{cases} \tag{20}$$

式中 U_B——B 点变形能

F_{BC}——杆件 BC 作用力

K_{BC}——杆件 BC 等效刚度

F_{Bx}、F_{Bz}——B 点处沿 x、z 向附加力

杆件 EF、CD 及 AB 的姿态变化间接影响机器人末端的偏移量 Δa_x 和 Δa_z,该变形量可通过几何关系计算直接得到,机器人末端在 xOz 平面的综合变形量为

$$\begin{cases} \delta S_x = \delta D_x + \delta A_x + \Delta a_x \\ \delta S_z = \delta D_z + \delta A_z + \Delta a_z \end{cases} \tag{21}$$

此外,机器人末端的 y 向变形量 δS_y 可根据杆件 CE、DF、BC 和 AD 所受载荷及其等效抗弯刚度直接计算得到,这里不再赘述。

3.3 刚度计算结果分析

对机械臂杆件进行有限元分析,近似得到杆件的等效抗拉刚度及抗弯刚度,如表 3 所示。

有限元分析(FEA)能提供相对可靠、准确的计算结果,常被用来验证数值计算结果的正确性[18-20]。通过任意选取工作空间内位置点(θ_1 =

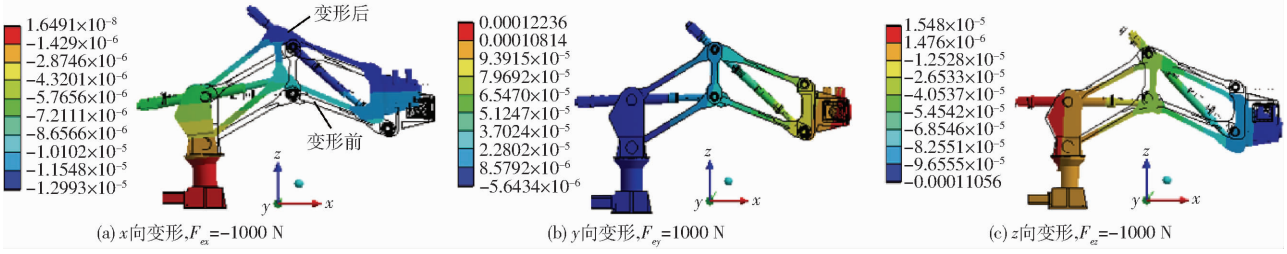
表 3　机器人杆件等效刚度

Tab. 3　Equivalent stiffness of robot arms　N/μm

参数	杆 *AD*	杆 *BC*	杆 *FD*	杆 *CE*
等效抗拉刚度	2 100	1 125	3 510	1 180
等效抗弯刚度	27	20	29	25

20°，θ_3 = 30°）处的有限元计算结果对机器人刚度数值计算结果进行验证，变形结果如图 17 所示。

将数值计算结果与有限元计算结果进行比较，如表 4 所示，由于将腕部结构等效为刚体处理导致刚度数值计算结果略大于有限元计算结果。但是，



(a) x向变形，F_{ex}=−1000 N　(b) y向变形，F_{ey}=1000 N　(c) z向变形，F_{ez}=−1000 N

图 17　机器人变形有限元计算结果

Fig. 17　Robot deformations in FEA

表 4　机器人刚度计算结果比较

Tab. 4　Comparison of robot stiffness　N/μm

参数	数值计算结果	FEA 结果	差值
x 向刚度 K_x	86. 44	85. 21	1. 23
y 向刚度 K_y	9. 67	8. 18	1. 49
z 向刚度 K_z	10. 94	9. 04	1. 90

数值计算结果与有限元结果相差不大，可用于近似估算机器人系统工作空间内的整体刚度水平。

机器人工作空间内的刚度分布如图 18 所示。机器人的 x 向刚度为 2. 2 ~ 244. 4 N/μm，y 向刚度为 2. 8 ~ 16. 3 N/μm，z 向刚度为 7. 8 ~ 13. 4 N/μm。缩回状态下机器人 x 向和 y 向刚度与工业机器人刚度水平基本相当；机械臂展开状态的刚度优于缩回状态，特别是 x 向刚度增加较为明显，并且其综合刚度优于工业机器人整体刚度。

综合上述分析，本文机械臂具备以下特点：机械臂俯仰至较大角度时，电动缸会与框架发生干涉，限制了该型机械臂的俯仰角度，导致机械臂结构的紧凑性稍显不足；尺寸相近的六自由度工业机器人在工作空间及灵活性等方面优于文中的机械臂结构；但是，本文机械臂与尺寸相近的四自由度工业机器人相比，两者的工作空间相近，同时具备较好的综合刚度，有利于提升该型机器人在搬运、码垛等作业中的负载能力。

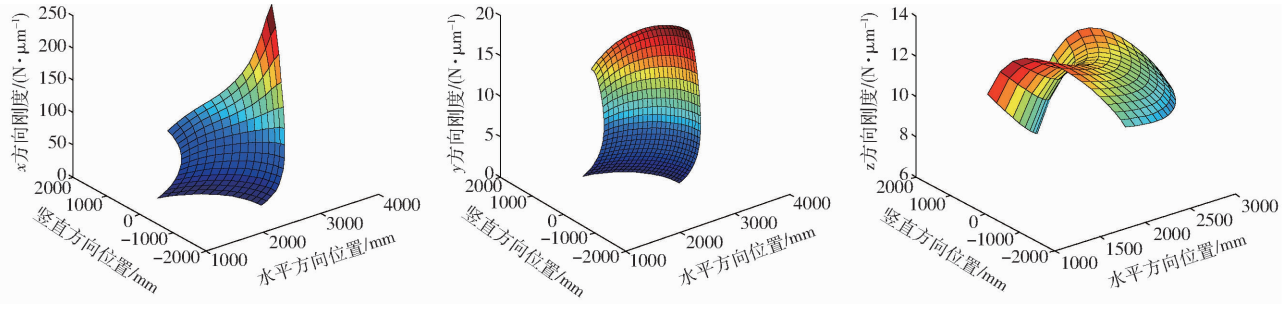


图 18　机器人刚度分布曲面

Fig. 18　Robot stiffness distribution surfaces in workspace

4　结论

（1）设计了一种具有新型机械手臂的机器人结构，机器人的大臂、小臂均采用平行四边形框架对角线电动缸驱动的结构形式。电动缸采用预紧双螺母消除滚珠丝杠副的反向间隙，此外，机器人回转底座及腕部均可通过双电机消隙控制消除传动间隙。

（2）与工业机器人相比，机械臂的平行四边形框架可以平衡外部的弯矩作用，减小电动缸的等效负载，在提升机器人的负载能力的同时有效降低机械臂的驱动功率及能耗。与传统工业机器人相比，相同外部重力负载及速度条件下，机器人的大臂驱动功率降低 20% ~80%，小臂驱动功率与工业器人小臂相当；当仅有外部弯矩作用时，机器人不需提供驱动功率。

（3）对机器人的整体刚度计算结果表明：机器人在垂直方向的刚度明显优于工业机器人；机器人缩回状态的刚度与工业机器人基本相当，而展开状态的刚度明显优于缩回状态，有利于在铸造、搬运、码垛等重载场合应用。

参 考 文 献

1 SCHNEIDER U, MOMENNI K M, ANSALONI M, et al. Stiffness modeling of industrial robots for deformation compensation in machining[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2014: 4464 - 4469.

2 KUKA Roboter Gmbh. KR 1000 titan, KR 1000 L750 with F variants and KR C2 specification[EB/OL]. [2016-05-23]. http://www.kuka-robotics.com/china/zh/.

3 PELLICCIARI M, BERSELLI G, LEALI F, et al. A method for reducing the energy consumption of pick-and-place industrial robots[J]. Mechatronics, 2013, 23: 326 - 334.

4 LEE G, SUL S K, KIM J. Energy-saving method of parallel mechanism by redundant actuation[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2015, 2(4): 345 - 351.

5 LEE G, PARK S, LEE D, et al. Minimizing energy consumption of parallel mechanisms via redundant actuation[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(6): 2805 - 2812.

6 徐海黎, 解祥荣, 庄健, 等. 工业机器人的最优时间与最优能量轨迹规划[J]. 机械工程学报, 2010, 46(9): 19 - 25.
XU Haili, XIE Xiangrong, ZHUANG Jian, et al. Global time-energy optimal planning of industrial robot trajectories[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(9): 19 - 25. (in Chinese)

7 PARYANTO, BROSSOG M, BORNSCHLEGL M, et al. Reducing the energy consumption of industrial robots in manufacturing systems[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(5): 1315 - 1328.

8 MUKUND N J, HUANG G Q, PONNAMBALAM S G. An investigation on minimizing cycle time and total energy consumption in robotic assembly line systems[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 90: 311 - 325.

9 KARIM A, VERL A. Challenges and obstacles in robot-machining[C]// 44th International Symposium on Robotics, 2013: 1 - 4.

10 SLAVKOVIC N R, MILUTINOVIC D S, GLAVONJIC M M. A method for off-line compensation of cutting force-induced errors in robotic machining by tool path modification[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70(9 - 12): 2083 - 2096.

11 PAN Z X, ZHANG H. Robotic machining from programming to process control: a complete solution by force control[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2008, 35(5): 400 - 409.

12 PALPACELLI M. Static performance improvement of an industrial robot by means of a cable-driven redundantly actuated system[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 38: 1 - 8.

13 鹿玲, 姚建涛, 顾伟栋, 等. 基于 Kane 方程的冗余驱动 5UPS/PRPU 并联机床动力学分析[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 366 - 372. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160648&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.048.
LU Ling, YAO Jiantao, GU Weidong, et al. Dynamics analysis of 5UPS/PRPU parallel machine tool with redundant actuation based on Kane equation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 366 - 372. (in Chinese)

14 苑飞虎, 赵铁石, 边辉, 等. 重载并联运动模拟台机构动力特性分析[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 311 - 317. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20140950&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.050.
YUAN Feihu, ZHAO Tieshi, BIAN Hui, et al. Analysis on dynamics characteristic of heavy-load parallel motion simulation platform mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 311 - 317. (in Chinese)

15 WANG C R, LIU D S, HUANG C H, et al. Numerical investigation into dynamic behavior of adjustable preload double-nut ball screw[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30(10): 4489 - 4496.

16 胡建忠, 王民, 高相胜, 等. 双螺母定位预紧滚珠丝杠副轴向接触刚度分析[J]. 机械工程学报, 2014, 50(7): 60 - 69.
HU Jianzhong, WANG Min, GAO Xiangsheng, et al. Axial contact stiffness analysis of position preloaded ball screw mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(7): 60 - 69. (in Chinese)

17 ROBERTZ S G, HALT L, KELKAR S, et al. Precise robot motions using dual motor control[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2010: 5613 - 5620.

18 ANH V N, BOUZGARROU B C, CHARLET K, et al. Static and dynamic characterization of the 6-Dofs parallel robot 3CRS[J]. Mechanism and Machine Theory, 2015, 93: 65 - 82.

19 CHENG G, XU P, YANG D H, et al. Stiffness analysis of a 3CPS parallel manipulator for mirror active adjusting platform in segmented telescope[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2013, 29(5): 302 - 311.

20 HUANG T, ZHAO X Y, WHITEHOUSE D J. Stiffness estimation of a tripod-based parallel kinematic machine[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18(1): 50 - 58.