

• 机械工程 •

DOI:10.12454/j.jsuese.202300864



本刊网刊

## 大型铸锻件打磨机器人设计与分析

刘毅<sup>1,2</sup>, 丰宗强<sup>2\*</sup>, 毛崇博<sup>2</sup>, 韩伟达<sup>2</sup>, 杨长安<sup>2</sup>, 马启凡<sup>2</sup>

(1. 河北工业大学机械工程学院, 天津 300401; 2. 燕山大学河北省并联机器人与机电系统实验室, 河北 秦皇岛, 066004)

**摘要:**大型铸锻件表面打磨存在结构尺寸大、表面复杂、人工作业强度高等问题, 现有的打磨机器人系统虽然可以实现大型铸锻件的打磨作业, 但存在占地面积大、灵活性差以及设备成本高的问题; 本文针对以上问题, 提出了一种融合移动平台、桁架式折叠结构、串联机械臂、并联自适应打磨头的大型铸锻件表面打磨机器人系统平台, 具有打磨范围大、占用空间小, 布置灵活等特点, 可以有效兼顾各种不同尺寸的大型铸锻件表面打磨需求。基于 D-H (Denavit-Hartenberg) 法对等效后所得到的 8 关节串联机构进行正逆运动学分析, 采用数值法分析了混联机构整体工作空间, 得到单机械臂工作状态下的打磨范围; 基于矢量法对末端被动式并联打磨头建立运动学模型, 并进一步分析了在串联机械臂保持一定姿态时并联打磨头的工作空间; 研究被动式并联打磨头末端负载与驱动关节自适应调节之间的理论联系, 优化气压阻尼系统的整体负荷状态; 基于机械臂运动学模型获得关节速度及加速度, 以机械臂整体功耗为优化目标建立能耗函数, 分析得到平面打磨时打磨机器人在不同轨迹下的整体功耗, 并通过数字算例与仿真计算验证了优化方程的合理性。基于 ADAMS 仿真模型对上述分析进行仿真验证, 证明了桁架式混联打磨机器人设计与理论分析的合理性, 为大型铸锻件打磨机器人设计开发提供了参考。

**关键词:**大型铸锻件; 打磨机器人; 运动学分析; 自适应控制; 轨迹优化

**中图分类号:** TP242; TH122

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3246(2025)05-0320-13

大型复杂结构件被广泛应用于航空航天、能源、船舶等领域, 且此类构件具有尺寸大、形状复杂、刚性弱等特点, 现有机器人装备难以同时兼顾针对大型铸锻件的大范围、高质量打磨需求。因此, 针对大型复杂结构件的打磨需求, 提升打磨机器人工作空间及打磨效率是实现大型复杂结构件智能化加工的关键<sup>[1-2]</sup>

针对大型复杂结构件打磨, 为了有效提高打磨机器人的工作行程, 现有的方式有以下 3 种:

1) 直线式导轨与打磨机器人相结合。丰飞等<sup>[3]</sup>采用直线轨道与打磨机械臂相结合的方式实现了移动式柔性加工, 该方法结构简单, 控制难度小, 但占地面积大, 灵活性差; 2) 全向移动平台与打磨机器人相结合。德国 Fraunhofer IFAM 研究所开发了一种移动式数控加工机器人系统<sup>[4]</sup>; 丹麦 Eltronic 公司开发了 AGV 移动单元与可伸缩机械臂相结合的系统<sup>[5-6]</sup>; 丰

飞等<sup>[7]</sup>进一步提出多移动机器人协同式超柔性加工系统, 有效提升了打磨工作空间及打磨效率, 但随着机器人的增加, 控制难度及设备成本增大; 3) 基于龙门架式的可移动打磨机器人。乐韵斐等<sup>[8]</sup>采用滑轨与龙门架相结合的方式, 设计了一种双龙门架与多打磨机械臂相结合的打磨系统; 卜迟武等<sup>[9]</sup>采用移动平台与打磨机械臂相结合的方式, 提高了灵活性及打磨作业效率, 但控制难度也随之提高。张一军等<sup>[10]</sup>设计了一种龙门式直角坐标系机械臂自动化打磨机器人, 采用移动单元与大型复杂打磨件相结合的方式移动及定位, 以直线往复式打磨执行装置进行铸件的自动化打磨, 但其所占空间大、可移动性弱, 忽略了大型铸件搬移与调平的复杂性; 庞英杰等<sup>[11]</sup>采用打磨件相对固定, 龙门架沿着对地导轨移动及打磨机械臂沿龙门架上下移动的方式, 设计了一种基于龙门架及导轨的双移动式打磨平台, 可移动性

收稿日期: 2023-10-30 修回日期: 2024-01-26 网络出版日期: 2024-06-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U2037202; 52075466)

作者简介: 刘毅 (1991-), 男, 博士。研究方向: 机器人理论及应用; 机电一体化集成与控制。E-mail: 17803332154@163.com

\* 通信作者: 丰宗强, 实验师, E-mail: zqf@ysu.edu.cn

增强。针对打磨机械臂本体结构设计,国内外学者大多单独采用串联<sup>[12-14]</sup>或并联<sup>[15-18]</sup>的形式,前者存在末端接触刚度低,打磨精度差等局限性,后者则存在打磨空间范围小,且存在奇异位形的问题;因此结构设计也越来越偏向串联机械臂加末端并联执行器的混联构型<sup>[19-22]</sup>。

现有自动化打磨装置中,虽然工作范围及打磨效率获得了显著提升,但还是存在占地面积大、控制难度高、灵活性差等问题,本文面向大型复杂曲面铸件,充分考虑以上结构的优缺点,基于桁架结构,提出了一种折展式混联打磨机器人,对其进行了运动学、动力学分析以及自适应打磨和轨迹规划的研究,并通过模拟仿真,验证了所设计机构能够满足大范围打磨要求,且对不同曲率表面的铸件有自适应能力。

### 1 折展桁架式打磨机器人结构设计

大型复杂曲面铸造件所需打磨范围大,打磨面情况复杂,传统串联或并联打磨机器人无法满足工

况要求。针对其复杂工况,对打磨机器人整体功能进行设计,如图 1 所示。

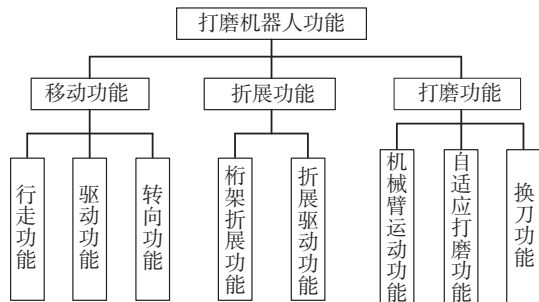


图 1 打磨机器人功能的 2 级分解

Fig. 1 Secondary decomposition of the overall function of the polishing robot

面向大型铸锻件打磨的机器人包括全向移动平台、可折展桁架结构、串联机械臂、并联打磨头。单台打磨机器人通过折展桁架结构实现不同跨度铸锻件打磨,如图 2(a)所示;2 台打磨机器人组成龙门结构,如图 2(b)所示,实现超大跨度铸锻件打磨,其可移动特性适合厂区内灵活布置。打磨机械臂包括平动架、升降臂、旋转臂、翻转臂、伸展臂。机械臂在桁架上进行移动,从而增大机械臂打磨范围。

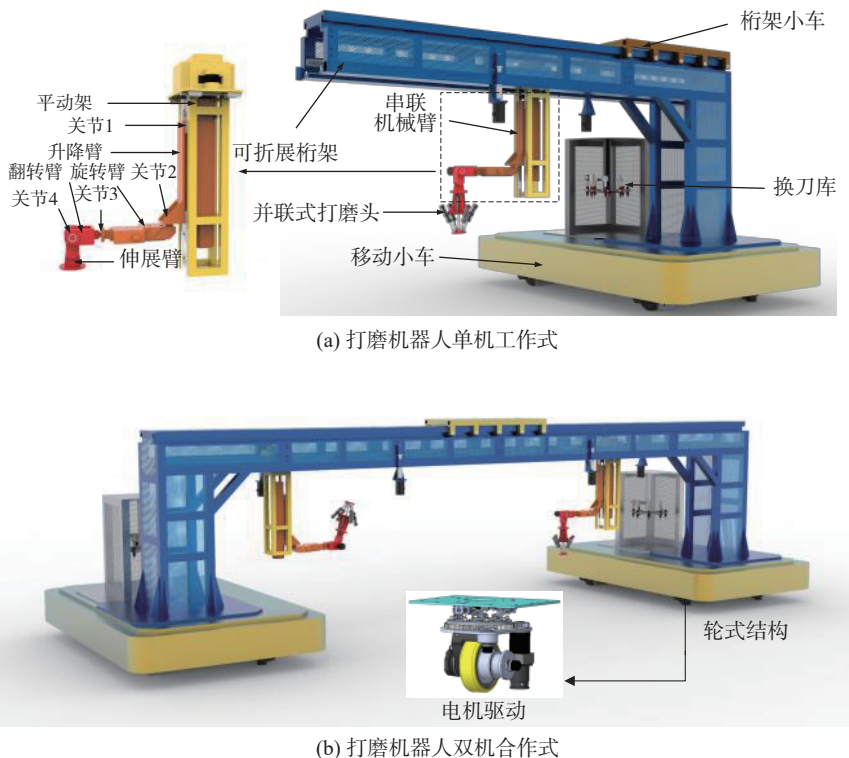


图 2 打磨机器人 3 维图

Fig. 2 3D drawing of polishing robot

结合龙门结构与折展机构优点,提出可实现不同程度伸展的桁架结构,如图 3 所示,以扩大打磨范围实现不同宽度范围铸锻件打磨。

针对铸件表面曲率变化及磨削振动,提出 2-RPU/2-UPS/PU 3 自由度被动式柔性并联打磨头,具

备两轴转动及垂直移动能力,实现 2 转 1 移自适应打磨,末端平台受到 5 个气压阻尼联合作用,在无负载状态下,打磨头处于运动极限位置,当动平台受载时,阻尼系统发生自适应调整,使得动平台完成贴合打磨。

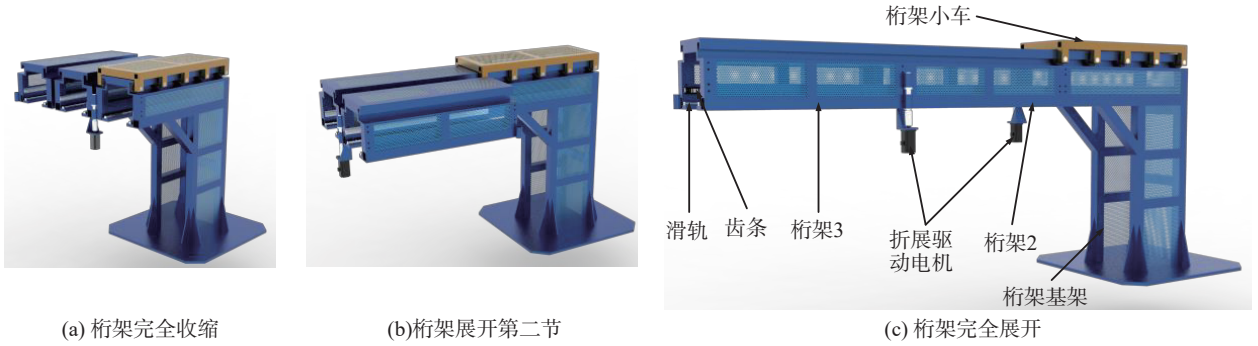


图3 桁架不同程度伸展图

Fig. 3 Diagram of truss stretching to different degrees

## 2 运动学分析

### 2.1 等效混联机构正反解分析

并联式打磨头等效为1个移动关节加2个转动关

节的串联机构<sup>[23]</sup>进行串并混联机构整体运动学分析,如图4所示。混联机构整体等效为一个具有8关节的串联机构,基于D-H法<sup>[24]</sup>,建立D-H坐标系,D-H参数如表1所示。表1中, $\alpha_{i-1}, a_{i-1}, \theta_i, d_i$ 为连杆参数, $i=1\sim 8$ 。

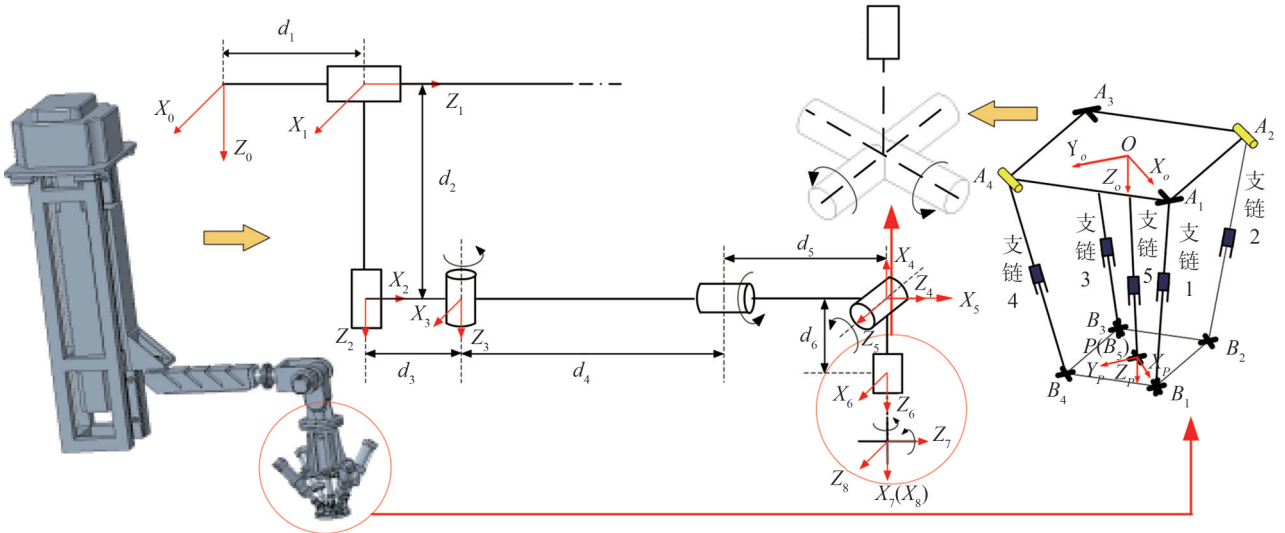


图4 并联式打磨头等效过程

Fig.4 Equivalent process of parallel grinding head

表1 等效串联机械臂D-H连杆参数

Tab. 1 Equivalent series manipulator D-H link parameters

$i$	$\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	$a_{i-1}$	$\theta_i$	$d_i$
1	90	0	0	$d_1$
2	-90	0	-90°	$d_2$
3	0	$d_3$	$\theta_3$	0
4	90	0	$\theta_4$	$d_4+d_5$
5	-90	0	$\theta_5$	0
6	90	0	90°	$d_6$
7	90	0	$\theta_7$	0
8	90	0	$\theta_8$	0

#### 1) 正运动学分析

将相邻两个坐标系间的齐次变换矩阵( $T_1\sim T_8$ )依次相乘可得混联机构末端( $T_0$ )在基坐标系中的

表达式如下:

$$T_0 = T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot T_4 \cdot T_5 \cdot T_6 \cdot T_7 \cdot T_8 \quad (1)$$

$$T_0 = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

#### 2) 逆运动学分析

从 $T_1$ 开始依次对 $T_i$ 取逆,采用反变换法求出各个关节所对应变量表达式如下:

$$\begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

对式(3)两边分别乘 $(T_1)^{-1}$ 、 $(T_1 \cdot T_2)^{-1}$ 、 $(T_1 \cdot T_2 \cdot T_3)^{-1}$ 、 $(T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot T_4)^{-1}$ 、 $(T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot T_4 \cdot T_5)^{-1}$ 、 $(T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot T_4 \cdot T_5 \cdot T_6)^{-1}$ 、 $(T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot T_4 \cdot T_5 \cdot T_6 \cdot T_7)^{-1}$ ,可解得各个关节变量 $[d_1, d_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, d_6, \theta_7, \theta_8]$ 的值。

### 2.2 混联机构工作空间分析

表 2 为等效串联机械臂各个关节的实际运动范围。在表 2 所示关节运动范围内,基于正运动学方程,选取各关节变量进行自由组合,对混联机构末端进行工作空间分析<sup>[25]</sup>,结果如图 5 所示。

表 2 等效串联机械臂各个关节的实际运动范围  
Tab. 2 Range of motion of the robotic arm joints

关节	运动范围
1	0~3 000 mm
2	537~1 537 mm
3	$-\frac{2\pi}{3} \sim \frac{2\pi}{3}$
4	$-\pi \sim \pi$
5	$-\frac{2\pi}{3} \sim \frac{2\pi}{3}$
6	200~300 mm
7	$-\frac{\pi}{6} \sim \frac{\pi}{6}$
8	$-\frac{\pi}{6} \sim \frac{\pi}{6}$

### 2.3 2-RPU/2-UPS/PU 并联打磨头运动学分析

#### 1) 位置反解分析

如图 4 所示,定平台、动平台分为外接圆半径  $a$ 、 $b$  的正方形,  $OA_1=a$ ,  $PB_1=b$ ,  $OP=d_5$  ( $d_5$  为变量)。点  $A_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 在定系  $\{O\}$  中描述为:

$$[{}^O A_1 \quad {}^O A_2 \quad {}^O A_3 \quad {}^O A_4 \quad {}^O A_5] = \begin{bmatrix} a & 0 & -a & 0 & 0 \\ 0 & -a & 0 & a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

点  $B_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 在动坐标系  $\{P\}$  中的描述为:

$$[{}^P B_1 \quad {}^P B_2 \quad {}^P B_3 \quad {}^P B_4 \quad {}^P B_5] = \begin{bmatrix} b & 0 & -b & 0 & 0 \\ 0 & -b & 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

通过旋转变换矩阵,可将动坐标系  $\{P\}$  的位置变换到定坐标系  $\{O\}$  中:

$${}^O B_i = [R]^P B_i + {}^O P_P \quad (6)$$

式中,  ${}^O B_i$  表示  $B_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 点在定坐标系  $\{O\}$  的坐标矢量,  $[R]$  表示动坐标系  $\{P\}$  相对于定坐标系  $\{O\}$  的旋转变换矩阵,  ${}^O P_P$  表示动坐标系  $\{P\}$  的坐标原点在定坐标系  $\{O\}$  的位置矢量。

如图 4 所示,中间 PU 支链,沿  $P$  副移动方向与定坐标系中的  $Z$  轴方向重合,  $U$  副的两个旋转轴的方向

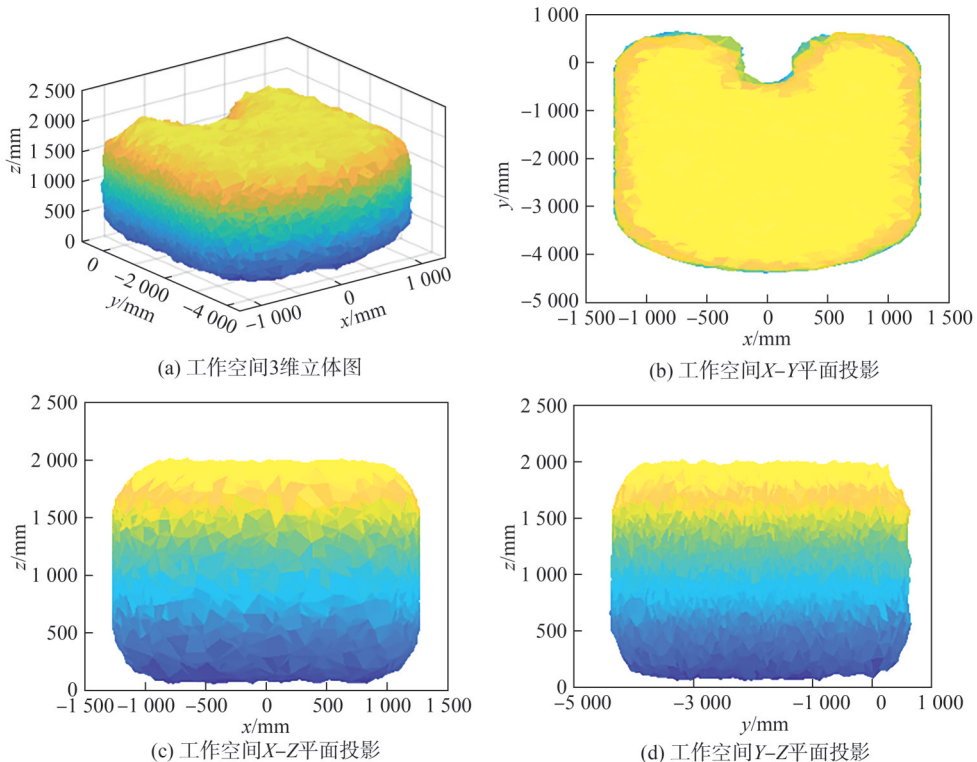


图 5 混联机构实际工作空间

Fig. 5 Actual workspace of hybrid mechanism

与定坐标系中的  $X$ 、 $Y$  轴的方向重合, 所以规定绕  $X$  轴旋转的角度为  $\theta_7$ , 绕  $Y$  轴旋转的角度为  $\theta_8$ 。令  $\mathbf{P} = [x \ y \ z]^T$  表示动平台坐标系原点  $P$  在定坐标系  $\{O\}$  中的位置矢量。因此, 沿  $Z$  轴移动, 绕  $X$ 、 $Y$  轴旋转的齐次坐标变换矩阵为:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{P} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \text{Trans}(z, d_6) \text{Rot}(x, \theta_7) \text{Rot}(y, \theta_8) = \begin{bmatrix} \cos \theta_8 & 0 & \sin \theta_8 & 0 \\ \sin \theta_7 \sin \theta_8 & \cos \theta_7 & -\cos \theta_8 \sin \theta_7 & 0 \\ -\cos \theta_7 \sin \theta_8 & \sin \theta_7 & \cos \theta_7 \cos \theta_8 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

因此, 由式(6)可得:

$${}^0\mathbf{B}_1 = \mathbf{R}^P \mathbf{B}_1 + {}^O\mathbf{P}_P = \begin{bmatrix} \cos \theta_8 & 0 & \sin \theta_8 \\ \sin \theta_7 \sin \theta_8 & \cos \theta_7 & -\cos \theta_8 \sin \theta_7 \\ -\cos \theta_7 \sin \theta_8 & \sin \theta_7 & \cos \theta_7 \cos \theta_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b \cos \theta_8 \\ b \sin \theta_7 \sin \theta_8 \\ d_6 - b \cos \theta_7 \sin \theta_8 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{cases} l_1 = |{}^0\mathbf{B}_1 - {}^O\mathbf{A}_1| = \left| [b \cos \theta_8 - a \quad b \sin \theta_7 \sin \theta_8 \quad d_6 - b \cos \theta_7 \sin \theta_8]^T \right|, \\ l_2 = |{}^0\mathbf{B}_2 - {}^O\mathbf{A}_2| = \left| [0 \quad a - b \cos \theta_7 \quad d_6 - b \sin \theta_7]^T \right|, \\ l_3 = |{}^0\mathbf{B}_3 - {}^O\mathbf{A}_3| = \left| [a - b \cos \theta_8 \quad -b \sin \theta_7 \sin \theta_8 \quad d_6 + b \cos \theta_7 \sin \theta_8]^T \right|, \\ l_4 = |{}^0\mathbf{B}_4 - {}^O\mathbf{A}_4| = \left| [0 \quad b \cos \theta_7 - a \quad d_6 + b \sin \theta_7]^T \right|, \\ l_5 = d_6 \end{cases} \quad (12)$$

由机构结构可知, 分支 1、3 只会在  $A_1OP$  的平面内运动, 因此有:  ${}^0B_{1y} = {}^0B_{3y} = 0$ 。

所以, 各个杆长为:

$$\begin{cases} l_1 = \sqrt{(a - b \cos \theta_8)^2 + (d_6 - b \cos \theta_7 \sin \theta_8)^2}, \\ l_2 = \sqrt{(a - b \cos \theta_7)^2 + (d_6 + b \sin \theta_7)^2}, \\ l_3 = \sqrt{(a - b \cos \theta_8)^2 + (d_6 + b \cos \theta_7 \sin \theta_8)^2}, \\ l_4 = \sqrt{(a - b \cos \theta_7)^2 + (d_6 - b \sin \theta_7)^2}, \\ l_5 = d_6 \end{cases} \quad (13)$$

得到各驱动分支杆长为:

$$\begin{cases} l_i = |{}^0\mathbf{B}_i - {}^O\mathbf{A}_i|, \quad i = 1, 2, 3, 4; \\ l_5 = [0 \quad 0 \quad d_6]^T \end{cases} \quad (14)$$

此过程为运动学逆解。

## 2) 位置正解

根据式(13)中的  $l_2$  方程可知, RPU 支链驱动杆  $l_2$  只与  $\theta_7$ 、 $d_6$  有关, 求  $l_2$  方程的反函数便能求出姿态角  $\theta_7$ ,

$${}^0\mathbf{B}_2 = \mathbf{R}^P \mathbf{B}_2 + {}^O\mathbf{P}_P = \begin{bmatrix} \cos \theta_8 & 0 & \sin \theta_8 \\ \sin \theta_7 \sin \theta_8 & \cos \theta_7 & -\cos \theta_8 \sin \theta_7 \\ -\cos \theta_7 \sin \theta_8 & \sin \theta_7 & \cos \theta_7 \cos \theta_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -b \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -b \cos \theta_7 \\ d_6 - b \sin \theta_7 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$${}^0\mathbf{B}_3 = \mathbf{R}^P \mathbf{B}_3 + {}^O\mathbf{P}_P = \begin{bmatrix} \cos \theta_8 & 0 & \sin \theta_8 \\ \sin \theta_7 \sin \theta_8 & \cos \theta_7 & -\cos \theta_8 \sin \theta_7 \\ -\cos \theta_7 \sin \theta_8 & \sin \theta_7 & \cos \theta_7 \cos \theta_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -b \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -b \cos \theta_8 \\ -b \sin \theta_7 \sin \theta_8 \\ d_6 + b \cos \theta_7 \sin \theta_8 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$${}^0\mathbf{B}_4 = \mathbf{R}^P \mathbf{B}_4 + {}^O\mathbf{P}_P = \begin{bmatrix} \cos \theta_8 & 0 & \sin \theta_8 \\ \sin \theta_7 \sin \theta_8 & \cos \theta_7 & -\cos \theta_8 \sin \theta_7 \\ -\cos \theta_7 \sin \theta_8 & \sin \theta_7 & \cos \theta_7 \cos \theta_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ b \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ b \cos \theta_7 \\ d_6 + b \sin \theta_7 \end{bmatrix} \quad (11)$$

令  $l_5 = [0 \quad 0 \quad d_6]^T$ , 由式(8)~(11)可得  $l_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4, 5$ ) 的杆长为:

与  $l_2$  杆长的正解关系式。则:

$$d_6 \sin \theta_7 - a \cos \theta_7 = (l_2^2 - a^2 - b^2 - d_6^2) / (2b) \quad (15)$$

根据辅助角公式, 可得出:

$$\theta_7 = \pm \arccos \left( \frac{l_2^2 - a^2 - b^2 - d_6^2}{2b \sqrt{a^2 + d_6^2}} \right) + \arctan \left( \frac{-d_6}{a} \right) \quad (16)$$

由式(10)可知正解存在多解, 如图6所示, 机构动平台在  $B_2B_4$  和  $B'_2B'_4$  的位置时, 分支  $l_2$  的长度相同, 即  $A_2B_2 = A_2B'_2$ 。

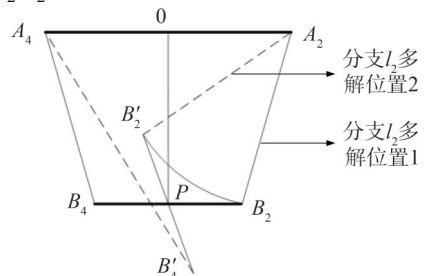


图6 正解多解位置情况

Fig. 6 Position of multiple positive solutions

将式(16)求得的 $\theta_7$ 代入式(14)杆 $l_1$ 的方程中,则可得 $\theta_8$ 的解析式。

3) 工作空间分析

$\alpha, \beta$ 为机构绕动坐标系中的 $X, Y$ 轴转动的两个欧拉角,动坐标系原点与定坐标系原点的距离为 $d_5$ ,每个分支的最大移动 $l_i$ 。转动副、U副的转动范围为 $\pm 60^\circ$ ,球副的转动范围为 $\pm 30^\circ$ ;分支5的移动范围为 $0 \sim 100$  mm,其他4个分支移动范围为 $0 \sim 150$  mm。基于蒙特卡洛法得到并联式打磨头工作空间,如图7所示。 $Z$ 轴移动范围为 $90 \sim 210$  mm,当沿 $Z$ 方向的位置在 $90, 120$  mm时, $\alpha$ 转动范围分别为 $-13.03^\circ \sim 13.03^\circ, -7.576^\circ \sim 7.576^\circ$ ;  $\beta$ 转动范围分别为 $-12.42^\circ \sim 12.42^\circ, -6.97^\circ \sim 6.97^\circ$ 。当沿 $Z$ 方向位置在 $107.1 \sim 183.1$  mm时, $\beta$ 转动范围为 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 。

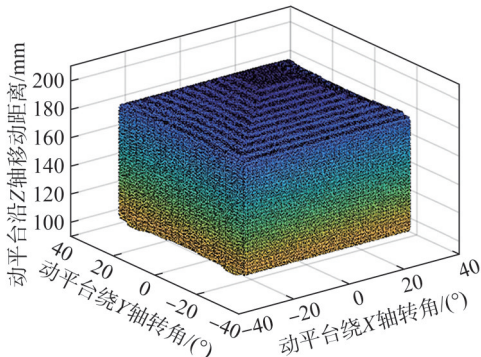
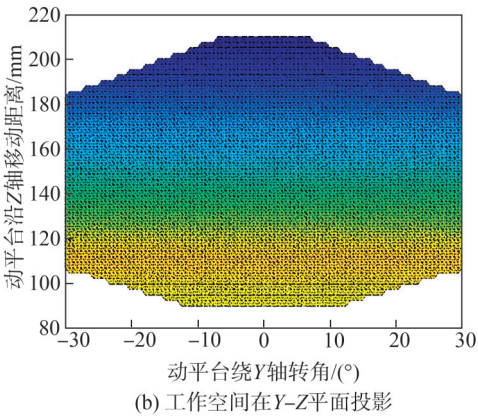
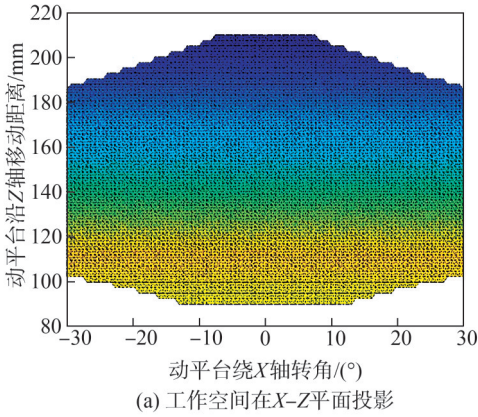


图7 并联式打磨头工作空间

Fig. 7 Parallel grinding head workspace

3 基于被动式打磨头的自适应打磨与轨迹功耗

3.1 并联式打磨头自适应作业

如图8所示,并联打磨头4支链为压力式阻尼器,简化气压阻尼系统结构,设为压力作用区为圆柱体区域设分支 $i$ 上的压力值为 $\eta_i$ ,则得到每个阻尼产生的压力作用如下:

$$F_{\eta,i} = \begin{cases} \eta_i S_c, & i = 1, 2, 3, 4; \\ \eta_5 S_c, & i = 5 \end{cases} \quad (17)$$

式中, $S_c$ 为等效压力面积, $S_c$ 为中心阻尼等效压力面积,考虑动平台的负载情况,设其承受与自由度相应的3维载荷,作用点为坐标系中心,即:

$$\text{Load}(t) = \{F_z(t), M_x(t), M_y(t)\} \quad (18)$$

式中,载荷Load为关于时间变化的函数。

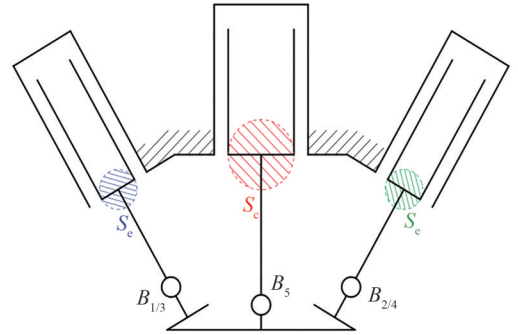


图8 简化阻尼系统的原理图

Fig. 8 Schematic diagram of simplified damping system

考虑打磨头处于恒静止的情况,建立静态平衡方程:

$$\begin{cases} F_z(t) + \eta_5(t)S_c + \sum_{i=1}^4 \eta_i(t)S_c \cos \theta_i = 0, \\ M_x(t) + \eta_2(t)S_c h_2 + \eta_4(t)S_c h_4 = 0, \\ M_y(t) + \eta_1(t)S_c h_1 + \eta_3(t)S_c h_3 = 0 \end{cases} \quad (19)$$

式中, $\theta_i$ 为分支 $i$ 与 $Z$ 轴的锐夹角, $h_i$ 为分支 $i$ 的轴线到点 $P$ 的距离。

当打磨对象为平面型结构,打磨动作仅需由串联结构部分完成,打磨头呈现出恒静态。

设分支杆3与分支杆4的压力为常数,则其余支链的气压值将发生伴随响应,得到:

$$\begin{bmatrix} \eta_1(t) \\ \eta_2(t) \\ \eta_5(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{M_y(t)}{S_c h_1} - \frac{\eta_3 h_3}{h_1} \\ -\frac{M_x(t)}{S_c h_2} - \frac{\eta_4 h_4}{h_2} \\ -\frac{F_z(t)}{S_c} + \frac{\sigma_4 + \sigma_5(t) + \sigma_6(t)}{h_1 h_2 S_c} \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中, $\sigma_4 = -h_1 h_2 S_c (\eta_3 \cos \theta_3 + \eta_4 \cos \theta_4)$ ,  $\sigma_5(t) = h_2 \cos \theta_1$ 。

$(M_y(t) + \eta_3 S_c h_3), \sigma_6(t) = h_1 \cos \theta_2 (M_x(t) + \eta_4 S_c h_4)$ 。

据打磨头的自由度性质, 设动坐标系需要完成的运动

当打磨头需要根据工件表面做自适应调整时, 根

轨迹为:

$$L_P(t) = \begin{bmatrix} \cos(\psi(t)) & \sin(\psi(t))\sin(\varphi(t)) & \sin(\psi(t))\cos(\varphi(t)) & 0 \\ 0 & \cos(\varphi(t)) & 0 & 0 \\ -\sin(\psi(t)) & \cos(\psi(t))\sin(\varphi(t)) & \cos(\psi(t))\cos(\varphi(t)) & z_P(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中,  $[0 \ 0 \ z_P(t) \ 1]$  表示点  $P$  的齐次坐标。因此, 齐次矩阵  $L_P(t)$  即表示动坐标系的时域运动轨迹。

通过对  $L_P(t)$  分别进行一次、二次求导, 得到式 (22) 和 (23)。

$$V_P(t) = \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} \cos(\psi(t)) & \frac{d}{dt} (\sin(\psi(t))\sin(\varphi(t))) & \frac{d}{dt} (\sin(\psi(t))\cos(\varphi(t))) & 0 \\ 0 & \frac{d}{dt} \cos(\varphi(t)) & 0 & 0 \\ -\frac{d}{dt} \sin(\psi(t)) & \frac{d}{dt} (\cos(\psi(t))\sin(\varphi(t))) & \frac{d}{dt} (\cos(\psi(t))\cos(\varphi(t))) & \frac{d}{dt} z_P(t) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$A_P(t) = \begin{bmatrix} \frac{d^2}{dt^2} \cos(\psi(t)) & \frac{d^2}{dt^2} (\sin(\psi(t))\sin(\varphi(t))) & \frac{d^2}{dt^2} (\sin(\psi(t))\cos(\varphi(t))) & 0 \\ 0 & \frac{d}{dt^2} \cos(\varphi(t)) & 0 & 0 \\ -\frac{d^2}{dt^2} \sin(\psi(t)) & \frac{d^2}{dt^2} (\cos(\psi(t))\sin(\varphi(t))) & \frac{d^2}{dt^2} (\cos(\psi(t))\cos(\varphi(t))) & \frac{d^2}{dt^2} z_P(t) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

对于动平台上任意一点的坐标  $(x_r, y_r, z_r)$ , 其在时刻  $t = t_s$  的坐标位置为  $L_P(t) \cdot [x_r, y_r, z_r, 1]^T$ , 速度为  $V_P(t) \cdot [x_r, y_r, z_r, 1]^T$ , 加速度为  $A_P(t) \cdot [x_r, y_r, z_r, 1]^T$ 。

设分支  $i$  气缸所推动的杆件部分的质量为  $m_i$ , 得到  $t = t_s$  时, 分支  $i$  向动平台提供的实际推力:

$$\xi_i = \begin{cases} \eta_i(t_s) S_c - m_i \left( (A_P(t_s) \cdot PB_i(0)) \cdot \frac{A_i B_i(t_s)}{|A_i B_i(t_s)|} \right), i = 1, 2, 3, 4; \\ \eta_i(t_s) S_c - m_i (A_P(t_s) \cdot [0, 0, 0, 1]^T), i = 5 \end{cases} \quad (24)$$

对于动平台, 在受到式 (18) 作用同时受到来自点集  $\{B_1, B_2, \dots, B_5\}$  的压力集  $\{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_5\}$ , 其中:

$$\xi_i = \begin{cases} \xi_i \frac{A_i B_i(t)}{|A_i B_i(t)|}, i = 1, 2, 3, 4; \\ -\xi_i [0, 0, 1]^T, i = 5 \end{cases} \quad (25)$$

设动平台关于动坐标系的惯量矩阵如下:

$$J_P = \begin{bmatrix} J_x & -J_{xy} & -J_{zx} \\ -J_{xy} & J_y & -J_{yz} \\ -J_{zx} & -J_{yz} & J_z \end{bmatrix} \quad (26)$$

此时动平台的负载如下:

$$\begin{cases} F_z(t) + \sum_{i=1}^5 (\xi_i(t) \cdot w(t)) = m_P a_P(t), \\ M_x(t) + \sum_{i=1}^4 (P(t) B_i(t) \times \xi_i(t)) \cdot u(t) = \sigma_x(t), \\ M_y(t) + \sum_{i=1}^4 (P(t) B_i(t) \times \xi_i(t)) \cdot v(t) = \sigma_y(t), \\ \sigma_x(t) + \sigma_y(t) = \frac{\alpha(t)^T J_P \alpha(t)}{|\alpha(t)|^2} a_P(t) \end{cases} \quad (27)$$

式中, 动平台的加速度  $a_P(t)$  与角加速度  $\alpha_P(t)$  相对于动坐标系。

给定式 (28) 的算例方程如下:

$$\text{Load}(t) = \begin{cases} F_z(t) = 250 \sin(\pi t) + 250, \\ M_x(t) = 10 \sin(\pi t), \\ M_y(t) = 10 \sin(\pi(t-1)) \end{cases} \quad (28)$$

通过对模型的测量, 确定如下参数:  $S_c = 113.097 \text{ mm}^2$ ,  $S_c = 153.928 \text{ mm}^2$ ,  $h_1 = h_3 = 25.793 \text{ mm}$ ,  $h_2 = h_4 = 30.466 \text{ mm}$ ,  $\theta_1 = \theta_3 = 30.708^\circ$ ,  $\theta_2 = \theta_4 = 30.751^\circ$ 。

将式 (28) 代入式 (20), 经 MATLAB 计算得到结果如图 9 所示。

如图 9 所示, 当常数化的压力端锁定压力值时, 浮动端的压力变化趋势更多地会受到负载浮动的

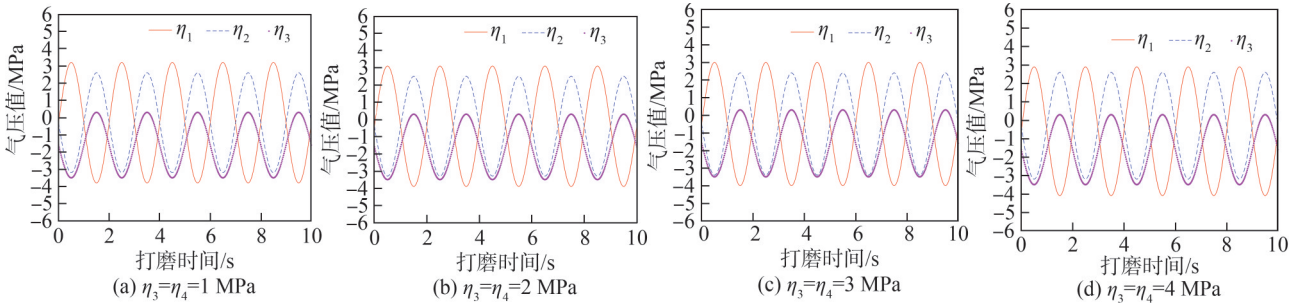


图9 恒静态打磨下阻尼气压浮动趋势

Fig. 9 Damping air pressure floating trend under constant static grinding

影响,当常数压力端的气压值发生变化时,浮动端数值变化趋势保持稳定,保证了阻尼系统的稳定作业。

### 3.2 基于平面打磨的轨迹优化

#### 3.2.1 优化目标函数建立

面对复杂曲面,打磨机器人的打磨路径方式如图10所示。

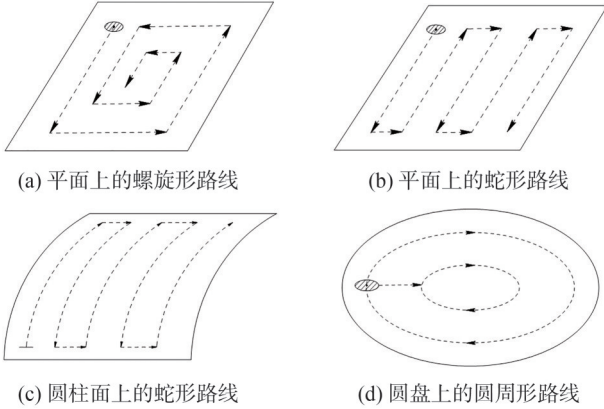


图10 打磨机器人的几种工况与打磨路径

Fig. 10 Several working conditions and polishing paths of polishing robots

在打磨机器人进行平面打磨时,其末端由空间坐标点  $P(x_p, y_p, z_p)$  向点  $Q(x_q, y_q, z_q)$  平动,主要参与的是关节1、2、3,关节4与关节5则保持一定的姿态。基于运动学模型可得到上述关节的运动方程如下:

$$\begin{cases} \frac{s(t)(x_q - x_p)}{\sqrt{(x_q - x_p)^2 + (y_q - y_p)^2 + (z_q - z_p)^2}} + x_p = L \sin s_3(t), \\ \frac{s(t)(y_q - y_p)}{\sqrt{(x_q - x_p)^2 + (y_q - y_p)^2 + (z_q - z_p)^2}} + y_p = s_1(t) + L \cos s_3(t), \\ \frac{s(t)(z_q - z_p)}{\sqrt{(x_q - x_p)^2 + (y_q - y_p)^2 + (z_q - z_p)^2}} + z_p = s_2(t) \end{cases} \quad (29)$$

式中,  $s(t)$  为磨具末端在线段  $PQ$  上的位置函数,  $(s_1, s_2, s_3)$  为驱动关节从零位开始的变化量,  $L=377.5$  mm。

以打磨机器人的整体功耗为优化目标,以关节1和关节2作为质量、关节3的转动惯量作为权重,建立优化函数  $W$ :

$$W = M_1 \int_0^{t_e} |\ddot{s}_1(t)| ds_1(t) + M_2 \int_0^{t_e} |\ddot{s}_2(t) - g| ds_2(t) + M_3 |\ddot{s}_3(t)| ds_3(t) \quad (30)$$

式中,  $t_e$  为打磨作业结束时间,  $g$  为重力加速度,  $\dot{S}_i, \ddot{S}_i$  分别为关节速度、加速度。在本文所使用模型中,  $M_1=79.282$  kg,  $M_2=43.238$  kg,  $M_3=1.12 \times 10^5$  kg·mm<sup>2</sup>。

为了保证打磨质量的均匀性,通常采用匀速打磨策略,综合各阶参数,可获得解耦形式下的加速度矩阵如下:

$$\begin{bmatrix} \ddot{s}_1(t) \\ \ddot{s}_2(t) \\ \ddot{s}_3(t) \end{bmatrix} = \frac{L^2 C^2 (v_D) (x_q - x_p)^2}{\left[ L^2 - \left[ C(v_D) (x_q - x_p) t + x_p \right]^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \frac{C(v_D) (x_q - x_p) t + x_p}{L^2} \end{bmatrix} \quad (31)$$

式中,  $v_D$  为打磨速度。

#### 3.2.2 直线式打磨数值算例

当打磨机器人从点  $P(-200, 200, 100)$  向点  $Q(200, 400, 300)$  沿直线打磨,得到驱动关节的加速度为:

$$\begin{bmatrix} \ddot{s}_1(t) \\ \ddot{s}_2(t) \\ \ddot{s}_3(t) \end{bmatrix} = \frac{151^2 C^2 (v) \times 10^6}{\left[ 377.5^2 - (400C(v)t - 200)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \frac{400C(v)t - 200}{377.5^2} \end{bmatrix} \quad (32)$$

将关节速度及关节加速度代入式(30),建立总功耗  $W$  为目标函数,求解其能耗最小值时的速度。

当打磨机器人的末端移动速度  $v$  变化时,中间变量  $C(v_D)$  发生变化,即总功耗  $W$  为中间变量  $C(v_D)$  的函数。利用 MATLAB 对其进行求解运算得到结果图11所示。计算结果显示,在该算例的条件下,当  $v=$

27.534 mm/s 时, 打磨时间约 16.792 s, 打磨机器人的总功耗最低, 约为 383.573 J。

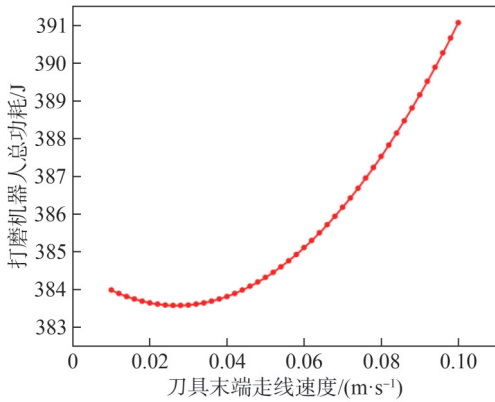


图 11 打磨机器人末端走线速度与总功耗关系

Fig. 11 Diagram of the relationship between the terminal wire speed and total power consumption of the polishing robot

### 3.2.3 打磨方案对比分析

当打磨机器人的工作对象为一个 400 mm × 400 mm 的矩形平面时, 为了便于数值算例计算, 设刀具的打磨半径为  $50\sqrt{2}$  mm, 基于图 11 所示的螺旋形路线与蛇形路线, 研究高效率的打磨策略。考虑刀具对打磨表面的覆盖率, 设计 2 种打磨路径, 如图 12 所示。

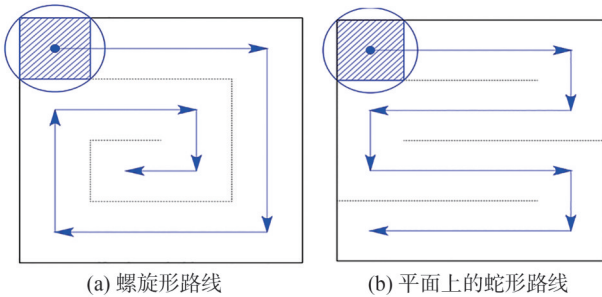


图 12 矩形打磨区域的两种打磨方案

Fig. 12 Two polishing schemes for rectangular polishing areas

对于螺旋形打磨路径, 以矩形打磨区域中心为原点, 刀具路径依次经过节点:  $(-150, 150) \rightarrow (150, 150) \rightarrow (150, -150) \rightarrow (-150, -150) \rightarrow (-150, 50) \rightarrow (50, 50) \rightarrow (50, -50) \rightarrow (-50, -50)$ 。对于蛇形的打磨路径, 以矩形打磨区域的中心为原点, 刀具的路径依次经过节点:  $(-150, 150) \rightarrow (150, 150) \rightarrow (150, 50) \rightarrow (-150, 50) \rightarrow (-150, -50) \rightarrow (150, -50) \rightarrow (150, -150) \rightarrow (-150, -150)$ 。打磨路径能耗函数分别为  $W_1$ 、 $W_2$ 。

通过 MATLAB 计算, 得到两种打磨方案的总功耗对比, 如图 13 所示。

由图 13 可知, 螺旋形打磨路线在功率消耗上整体高于蛇形打磨路线, 功耗比率约为 2:3。

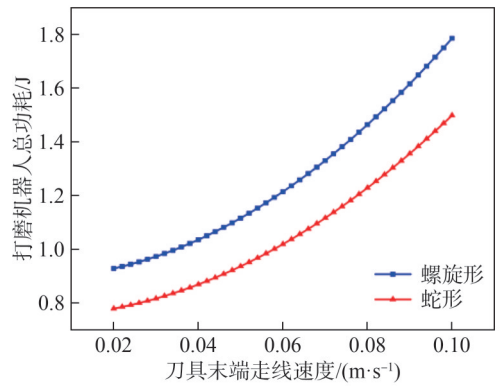


图 13 两种打磨方案的总功耗对比

Fig. 13 Comparison of total power consumption between two polishing schemes

## 4 仿真分析

### 4.1 并联式打磨头运动学仿真

在 ADAMS 中配置仿真环境, 添加约束、驱动、及末端轨迹。对动平台末端轨迹设定为如下:

$$\begin{cases} T_z = 25\sin\left(\frac{\pi}{2}t\right), \\ R_x = \frac{\pi}{6}\sin(\pi t), \\ R_y = \frac{\pi}{6}\sin\left(\pi t + \frac{\pi}{2}\right) \end{cases} \quad (33)$$

ADAMS 仿真位移变化和理论位移变化曲线如图 14、15 所示。图 14、15 中, PU 等表示运动分支。由图 14、15 看出, 基于 ADAMS 仿真实验及 MATLAB 数值计算, 验证了 2-RPU/2-UPS/PU 并联机构运动学模型。

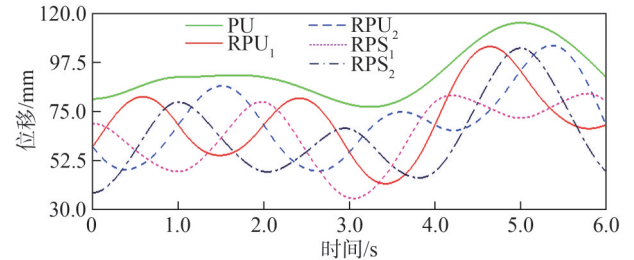


图 14 ADAMS 仿真位移变化曲线

Fig. 14 Simulated displacement changing curves

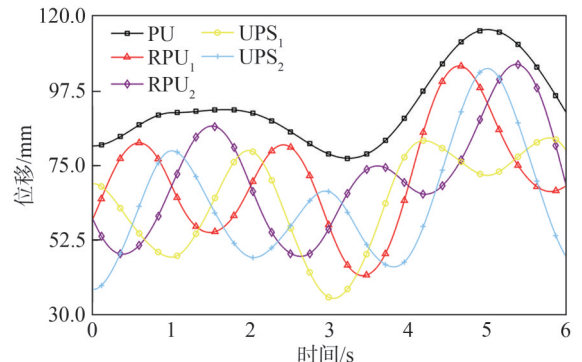


图 15 理论位移变化曲线

Fig. 15 Theoretical displacement changing curves

### 4.2 不同轨迹功耗仿真分析

基于打磨机器人针对平面打磨时的轨迹计算,在 ADAMS 中进行仿真实验的验证。

在直线形轨迹仿真时,理论计算的打磨机器人末端走刀速度为  $v=27.534\text{ mm/s}$  时功耗最小,因此为末端运动再加上该限定条件。螺旋形轨迹和蛇形轨迹的仿真条件与直线形轨迹的不同,在 ADAMS 软件中进行这

两种轨迹仿真时,设定打磨加工的面积  $0.16\text{ m}^2$ ,打磨机器人末端走刀速度定为  $v=0.1\text{ m/s}$ 。串联机械臂在 ADAMS 中的 3 种轨迹如图 16 所示。

将不同轨迹下打磨机器人各驱动关节的功率数据导出,进行数据处理即将功率图转化为功耗图,得到如图 17、18 和 19 所示的 3 种打磨轨迹下各驱动关节的功耗图随时间的变化曲线。

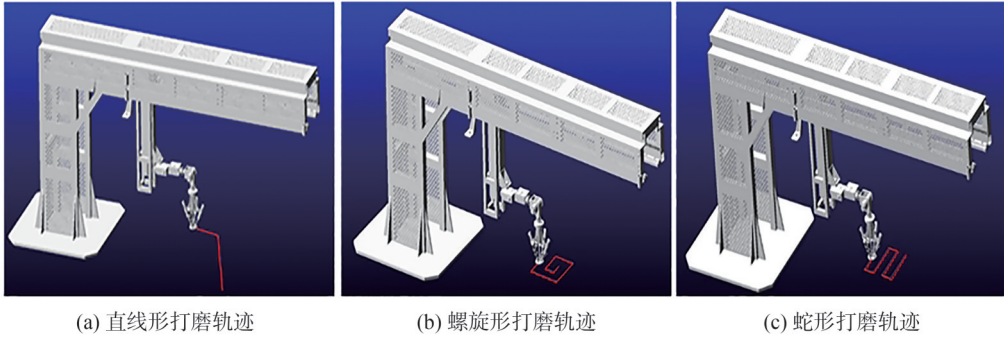


图 16 ADAMS 不同打磨轨迹仿真

Fig. 16 ADAMS simulation of different grinding trajectories

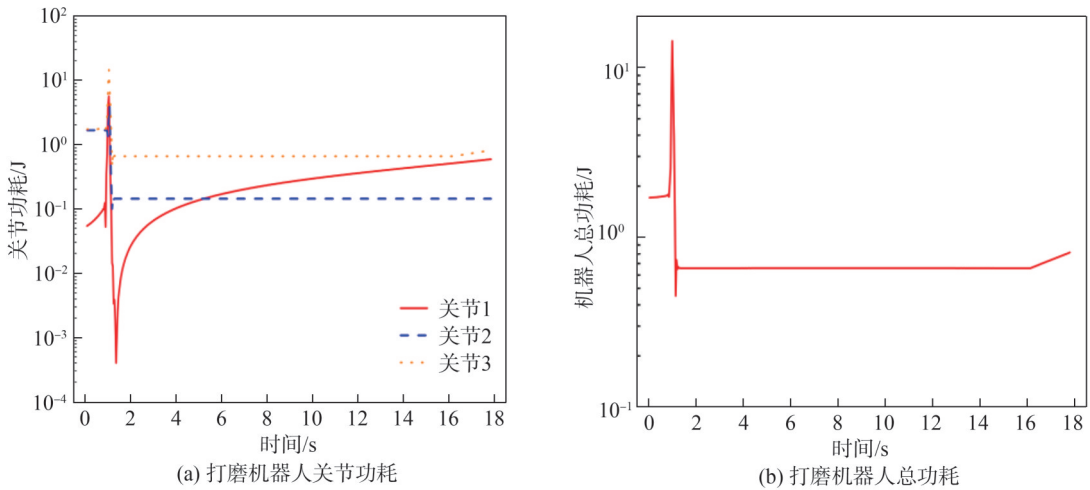


图 17 直线形轨迹打磨功耗

Fig. 17 Power consumption diagram of linear trajectory grinding

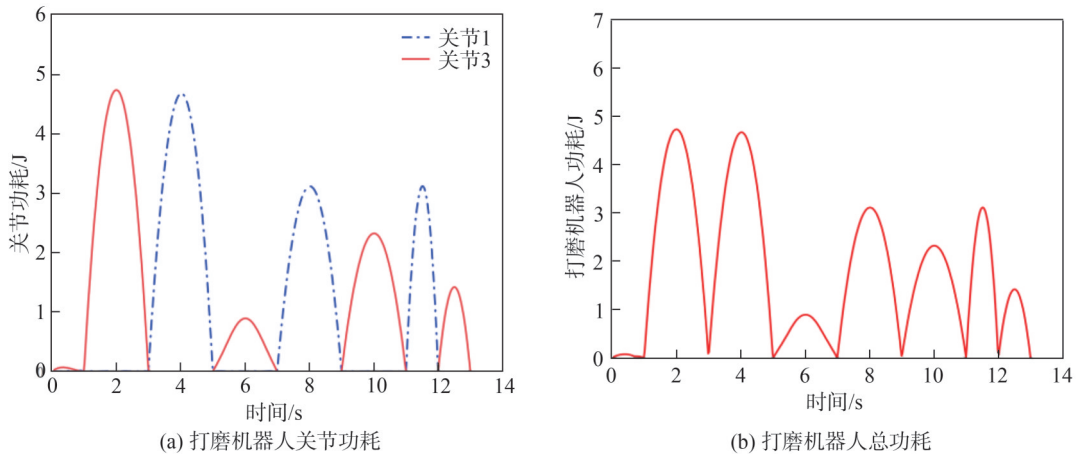


图 18 螺旋形轨迹打磨功耗

Fig. 18 Power consumption diagram of spiral trajectory grinding

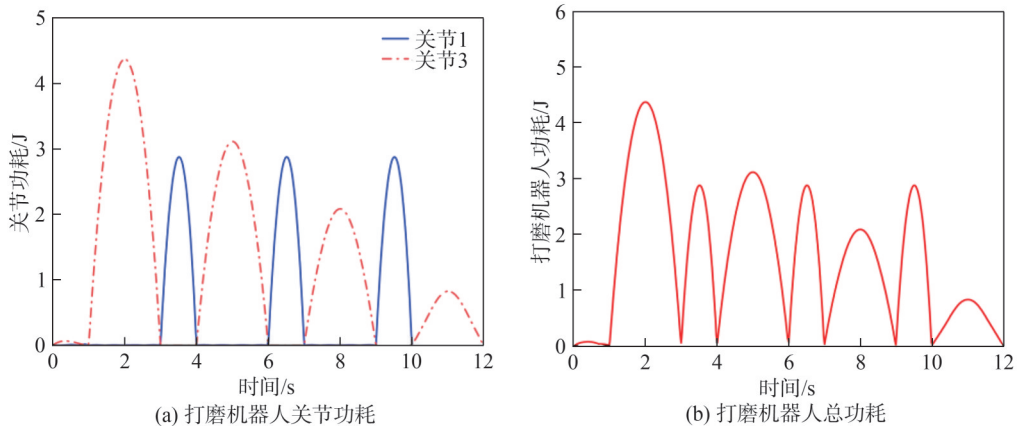


图 19 蛇形轨迹打磨功耗

Fig. 19 Power consumption diagram of snake shaped trajectory polishing

经过以上的仿真实验分析以及综合理论的推导计算,打磨机器人在进行直线打磨过程中,其末端的打磨速度为 27.534 mm/s 时,打磨时间约 17.792 s,打磨机器人的总功耗约为 392.259 J;在进行相同区域打磨时,打磨头以螺旋形的轨迹进行工作打磨机器人的总功耗高于以蛇形轨迹工作打磨机器人的总功耗。所以在进行同区域的平面打磨时,令机械臂末端轨迹为蛇形运动功耗最小,与上述 MATLAB 数值分析结果一致。

## 5 结 论

面向大型复杂铸锻件,提出基于桁架结构的混联打磨机器人系统,由移动平台、可折展桁架结构、2 移动 3 转式 5 自由度串联机械臂、2 转 1 移被动式并联打磨头组成。打磨机器人可以在单机模式下实现不同跨度尺寸的大型铸锻件打磨,也可以双机组合为龙门式打磨机器人,实现超大尺寸铸锻件表面打磨,其移动特性有效扩大了设备布置灵活性。分析打磨机器人的运动学、工作空间,以总功耗最小为优化目标,获得平面直线式打磨的最佳速度为  $v=27.534$  mm/s,在相同区域打磨过程中,打磨头采用螺旋形轨迹时打磨机器人的总功耗高于采用蛇形轨迹时的总功耗。基于 ADAMS 和 MATLAB 仿真验证了理论分析的正确性、打磨机器人设计的合理性。

### 参考文献:

[1] Wang Qilong, Wang Wei, Zheng Lianyu, et al. Force control-based vibration suppression in robotic grinding of large thin-wall shells[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2021, 67: 102031.

[2] Xie Fugui, Mei Bin, Liu Xinjun, et al. A new mode and equipment for processing large and complex components [J] Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(19): 70–78. [谢福贵, 梅斌, 刘辛军, 等. 一种大型复杂构件加工新模式及新装备探讨[J]. 机械工程学报, 2020, 56(19): 70–78.]

[3] Feng Fei, Yan Sijie, Ding Han. Design and research of multi-robot collaborative grinding and polishing system for large wind turbine blades[J]. Robot Technique and Application, 2018(5): 16–24. [丰飞, 严思杰, 丁汉. 大型风电叶片多机器人协同磨抛系统的设计与研究[J]. 机器人技术与应用, 2018(5): 16–24.]

[4] Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Advanced Materials. CNC Machining Robot[EB/OL]. [2023-10-30]. [https://www.ifam.fraunhofer.de/content/dam/ifam/en/documents/Adhesive\\_Bonding\\_Surfaces/FFM/CNC\\_Machining\\_Robot\\_fraunhofer\\_if-am.pdf](https://www.ifam.fraunhofer.de/content/dam/ifam/en/documents/Adhesive_Bonding_Surfaces/FFM/CNC_Machining_Robot_fraunhofer_if-am.pdf).

[5] Zhang Haohan, Luna Tatiana, Yang Lillian, et al. A robotic arm training system designed for rats[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2021, 13(3): 1–10.

[6] Gromniak M, Neidhardt M, Heinemann A, et al. Needle placement accuracy in CT-guided robotic post mortem biopsy[J]. Current Directions in Biomedical Engineering, 2020, 6: 20200031.

[7] Feng Fei, Yang Haitao, Tang Lina, et al. Key technologies of design and performance improvement of heavy-duty and high precision machining robot bodies for large-scale components[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(19): 2269–2287. [丰飞, 杨海涛, 唐丽娜, 等. 大尺度构件重载高精加工机器人本体设计与性能提升关键技术[J]. 中国机械工程, 2021, 32(19): 2269–2287.]

[8] Le Yunfei, Song Laigen. Structural design and lightweight research of grinding machine for wind turbine rotor blade surface[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2017(1): 29–32. [乐韵斐, 宋来根. 风电叶片表面打磨机结构设计与轻量化研究[J]. 装备制造技术, 2017(1): 29–32.]

[9] Bu Chiwu. Research on control of fan blade grinding robot [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013. [卜迟武. 风机叶片打磨机器人的控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.]

[10] Zhang Yijun. A type of automated grinding device for heavy

- castings[J]. CFHI Technology, 2018(1):29–31. [张一军. 一种大型铸件自动化打磨装置[J]. 一重技术, 2018(1):29–31.]
- [11] Pang Yingjie. Design and analysis of wind turbine blade polishing robot[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2021. [庞英杰. 风电叶片打磨机器人设计与分析[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.]
- [12] Zhao Xingwei, Lu Hao, Yu Wenfu, et al. Vision-based mobile robotic grinding for large-scale workpiece and its accuracy analysis[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2023, 28(2):895–906.
- [13] Jing Chenning. Research on layout optimization and multi-objective trajectory planning technology and application of 6R serial robot[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. [景琛宁. 6R串联机器人布局优化和多目标轨迹规划技术及应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.]
- [14] Park S, Koh D, Shim J, et al. Gantry type lapping manipulator toward unmanned lapping process for a large work surface[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing—Green Technology, 2021, 8(6):1723–1737.
- [15] Zhao Xinhua, Feng Jianfeng, Liu Liang, et al. Singularity evaluation and synthesis of isomeric grinding robot[J]. Journal of Machine Design, 2023, 40(5):58–69. [赵新华, 冯建峰, 刘凉, 等. 同类异构打磨机器人奇异性评价与综合方法研究[J]. 机械设计, 2023, 40(5):58–69.]
- [16] Jing Hongxiang, Qin Huibin, Hou Zhili, et al. Design and motion analysis of polishing robot with 3-RSS coaxial drive layout parallel mechanism[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2021, 45(2):76–82. [景鸿翔, 秦慧斌, 侯志利, 等. 3-RSS同轴驱动布局并联机构的打磨机器人设计与运动分析[J]. 机械传动, 2021, 45(2):76–82.]
- [17] Tian Heqiang, Wang Chenchen, Dang Xiaoqing, et al. A 6-DOF parallel bone-grinding robot for cervical disc replacement surgery[J]. Medical & Biological Engineering & Computing, 2017, 55(12):2107–2121.
- [18] Wang Jun, Liang Fei, Zhou Hongjun, et al. Analysis of position, pose and force decoupling characteristics of a 4-UPS/1-RPS parallel grinding robot[J]. Symmetry, 2022, 14(4):825.
- [19] Wang Yu, Zhang Huibo, Dai Shijie, et al. Terminal sliding mode control of flexible end grinding force of wind turbine blade grinding robot[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(7):1757–1766. [王雨, 张慧博, 戴士杰, 等. 风电叶片打磨机器人柔性末端终端滑模力控制[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(7):1757–1766.]
- [20] Wang Yuan, Zhu Wei, Shen Huiping. Exploring adaptive polishing mechanism of a complex curved surface polishing robot[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(8):1171–1176. [汪源, 朱伟, 沈惠平. 一种复杂曲面打磨机器人自适应贴合柔性机构研究[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(8):1171–1176.]
- [21] Zhang Jian, Zhao Liangxiao, Li Lingling, et al. Design of passive constant-force end-effector for robotic polishing of optical reflective mirrors[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2022, 35(1):141.
- [22] Ding Bingxiao, Zhao Jiyu, Li Yangmin. Design of a spatial constant-force end-effector for polishing/deburring operations[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 116(11):3507–3515.
- [23] Sun Guokang. Research on control technology of series-parallel-series compliant manipulator[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021. [孙国康. 串并混联柔顺机械臂控制技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.]
- [24] Tan Shuai. Research on multi-objective trajectory optimization and friction compensation control method for six-degree-of-freedom tandem robot[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022. [谭帅. 六自由度串联机器人多目标轨迹优化与摩擦补偿控制方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.]
- [25] Zhao Hongyu. Structural design and kinematics research of a series-parallel hybrid manipulator[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017. [赵宏宇. 一种串并混联机械臂结构设计及运动学研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.]

## Design and Analysis of a Large Casting and Forging Grinding Robot

LIU Yi<sup>1,2</sup>, FENG Zongqiang<sup>2\*</sup>, MAO Chongbo<sup>2</sup>, HAN Weida<sup>2</sup>, YANG Changan<sup>2</sup>, MA Qifan<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2. Laboratory of Parallel Robotics and Mechatronic Systems in Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

### Abstract:

**Objective** The demand for automated surface grinding of large castings and forgings continues to increase with production scale and quality requirements. Conventional grinding robot systems, while functional, present significant limitations: large spatial footprint, poor adaptability to diverse workpiece sizes and shapes, and high investment and maintenance costs. These constraints hinder their application in space- and cost-sensitive manufacturing. Therefore, this research introduces a truss-based hybrid grinding robot system that combines a wide operational reach with a compact layout, ensures high stiffness at the grinding head for precision, and adapts to varied workpiece sizes and complex geometries. The study presents an innovative structural configuration, a complete theoretical framework, and simulation-based validation, making contribu-

tions to industrial robotic grinding.

**Methods** The design process started with functional decomposition, including omnidirectional mobility, an extendable and retractable structure for large workpieces, a high-reach manipulator for complex positioning, and a grinding end-effector that maintained constant contact force over varying surfaces. The system integrated: 1) an omnidirectional mobile platform that allowed free movement without reorientation constraints; 2) a truss-type folding structure that provided a deployable framework expanding the workspace while minimizing the idle footprint; 3) a serial robotic arm that offered large reach and positioning flexibility; and 4) a parallel adaptive grinding head, a passive parallel mechanism with pneumatic damping that ensured constant-force compliance and high stiffness. The serial arm and parallel head were modeled as an equivalent eight-DOF hybrid mechanism, combining the stiffness and load capacity of parallel kinematics with the reach of serial designs. Forward and inverse kinematics were developed using the Denavit–Hartenberg (D–H) method to map joint space to Cartesian space. The workspace of the system and the single-arm grinding range were analyzed to define operational limits and optimal deployment. The passive parallel head was modeled separately using the vector method to assess the workspace under fixed arm postures, which enabled optimization of adaptability without affecting positioning. For constant-force grinding, mechanical and pneumatic conditions for adaptive drive joint adjustment under varying end-loads were examined. Pneumatic damping was optimized so that variations on the constant-pressure side yielded stable trends on the floating side, ensuring surface-contact stability. For energy efficiency, the hybrid arm’s kinematic model derived joint velocities and accelerations during grinding tasks. An energy consumption function was formulated with total arm power as the optimization objective. Case studies of linear grinding evaluated power patterns. Finally, the design and models were validated through an ADAMS virtual prototype that simulated realistic motions to verify kinematics, workspace, constant-force behavior, and energy use.

**Results and Discussions** Workspace analysis confirmed that the truss-folding structure greatly extended the operational range without a proportional increase in footprint, enabling grinding of large and irregular workpieces. For single-arm operation, the reachable range was quantified, supporting task allocation in dual-arm setups. The passive parallel head maintained stable floating-end pressure under constant-force control, validating pneumatic optimization and ensuring consistent surface contact for uniform removal and finish. Simulations confirmed the kinematic accuracy of the serial and parallel subsystems, with minimal deviation between theoretical and simulated outcomes. The hybrid model achieved the intended stiffness and reach. Energy analysis demonstrated that spiral grinding trajectories consumed more power than serpentine paths in straight-line grinding, which highlighted the impact of trajectory on energy usage and provided guidance for task planning. The omnidirectional base enabled rapid repositioning between zones, reducing idle time and improving coverage. The truss-folding design enhanced adaptability when shifting between large flats and contoured areas without requiring full disassembly or repositioning.

**Conclusions** The truss-based hybrid grinding robot integrates the advantages of parallel and serial configurations, delivering high stiffness and wide coverage. The folding truss design accommodates large workpieces while maintaining a compact footprint when not in operation. Complete kinematic, workspace, energy, and pneumatic control models were validated through simulation. The system adapts to varying sizes and shapes while ensuring precision and surface quality. In addition, the modeling framework is transferable to other hybrid robotic designs. In practice, this approach enhances productivity, reduces labor demands, and improves quality consistency in large-scale surface finishing. Key innovations include the following: eight-DOF hybrid mechanism modeling of a passive parallel head and serial arm as a unified analytical framework; pneumatic damping optimization for stable floating-end pressure under varying inputs, advancing constant-force compliance in grinding; integration of truss-folding structures into mobile robots to achieve large workspaces with minimal idle footprint; and trajectory-dependent energy consumption analysis that informs energy-efficient path planning. The research contributes both a practical robotic design and analytical tools applicable to various automated manufacturing processes involving large and complex workpieces.

**Keywords:** large castings and forgings; polishing robot; kinematic analysis; adaptive control; trajectory optimization

(编辑 张 琼)

引用格式: Liu Yi, Feng Zongqiang, Mao Chongbo, et al. Design and analysis of a large casting and forging grinding robot[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2025, 57(5): 320–332. [刘毅, 丰宗强, 毛崇博, 等. 大型铸锻件打磨机器人设计与分析[J]. *工程科学与技术*, 2025, 57(5): 320–332.]