

中文引用格式:董祥杰,石艳,林椿松,等. 基于 SEKOA 的煤尘环境下机械臂转运煤粉物料轨迹规划[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(8): 171-179.

英文引用格式:DONG Xiangjie, SHI Yan, LIN Chunsong, et al. Trajectory planning for robotic arm transfer of pulverized coal material in coal dust environment based on SEKOA[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(8): 171-179.

基于 SEKOA 的煤尘环境下机械臂转运煤粉物料 轨迹规划*

董祥杰¹, 石艳^{**1,2}教授, 林椿松¹, 罗毅¹, 李培华³高级工程师, 税小叶³

(1 四川轻化工大学 机械工程学院, 四川 宜宾 644000; 2 四川轻化工大学 过程装备
与控制工程四川省重点实验室, 四川 宜宾 644000; 3 四川宜宾江源化工机械制造
有限责任公司, 四川 宜宾 644000)

中图分类号:X936

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.08.1517

资助项目:四川省科技厅重点研发项目(2022YFG0068);宜宾市科技计划重点项目(2022GY003);宜宾市科技计划
重大专项(24KJH0033)。

【摘要】 针对煤矿等中、重型易燃物料在智能转运过程中因机械臂、物料运动引起易燃粉尘扬散导致粉尘爆炸的潜在安全问题,以6轴工业机械臂为对象,以该机械臂关节运动的技术参数与煤尘扬散的风速阈值作为运动约束条件,将“4-5-4-4-5-4”多项式位姿插值法与提出的螺旋探索开普勒优化算法(SEKOA)作为该机械臂的运动轨迹规划模型,分析机械臂安全、高效作业的非线性组合工程优化问题。结果表明:在设置的运动约束条件下,相较于其他算法,SEKOA的机械臂安全转运煤粉物料效率更高,最快为9.5 s,且物料运动姿态平稳无倾斜碰撞;“4-5-4-4-5-4”多项式插值法规划的机械臂运动轨迹平滑、连续,物料下放阶段的主驱动关节1、2速度峰值分别为0.72、0.47 rad/s,加速度峰值为0.5 rad/s²,经历约2.5 s减速到0 rad/s,机械臂可平缓将物料放到指定位置,可防范封装箱上的煤尘二次扬散。

【关键词】 螺旋探索开普勒优化算法(SEKOA); 煤尘; 机械臂; 煤粉物料; 轨迹规划;
多项式插值

Trajectory planning for robotic arm transfer of pulverized coal material in coal dust environment based on SEKOA

DONG Xiangjie¹, SHI Yan^{1,2}, LIN Chunsong¹, LUO Yi¹, LI Peihua³, SHUI Xiaoye³

(1 School of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Yibin Sichuan 644000, China; 2 Sichuan Provincial Key Laboratory of Process Equipment and Control Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Yibin Sichuan 644000, China; 3 Sichuan Yibin Jiangyuan Chemical Machinery Manufacturing Co., Ltd., Yibin Sichuan 644000, China)

Abstract: In order to address potential safety hazards of dust explosions caused by the dispersion of

* 文章编号:1003-3033(2025)08-0171-09; 收稿日期:2025-04-01; 修稿日期:2025-06-18

** 通信作者:石艳(1971—),女,四川泸州人,博士,教授,硕士生导师,主要从事装备安全、智能制造技术与管理等方面的研究。E-mail: sy71email@163.com。

combustible dust during the intelligent transfer of medium and heavy flammable materials (such as coal) in mines, triggered by the movement of robotic arms and materials, this study takes 6-axis industrial mechanical arm as the subject. Referencing the technical parameters of the arm's joint motion and the wind speed threshold for coal dust dispersion as motion constraints, the "4-5-4-4-5-4" polynomial pose interpolation method and the proposed SEKOA were employed as the motion trajectory planning model for the robotic arm. This model analyzed the nonlinear combinatorial engineering optimization problem for achieving safe and efficient operation of the robotic arm. Under the established motion constraints, the SEKOA algorithm demonstrates higher efficiency compared to other algorithms in safely transferring coal powder materials, achieving the fastest time of approximately 9.5 seconds. The material movement is stable, with no tilting or collision. The motion trajectory planned by the "4-5-4-4-5-4" polynomial interpolation method is smooth and continuous. During the material lowering phase, the peak velocities of the main drive joints 1 and 2 are approximately 0.72 rad/s and 0.47 rad/s, respectively, with peak accelerations around 0.5 rad/s². After decelerating for about 2.5 seconds to 0 rad/s, the robotic arm can gently place the material at the designated position. This approach effectively prevents secondary dispersion of coal dust on the sealing container.

Keywords: spiral exploration Kepler optimization algorithm (SEKOA); coal dust; robotic arm; coal powder material; trajectory planning; polynomial interpolation

0 引言

粉尘防爆是我国防范遏制重特大事故的重要领域。粉尘爆炸主要由煤尘、金属粉尘等易燃粉尘引起^[1]。易燃粉尘在空气中扩散形成粉尘云的浓度过大是引发粉尘爆炸的主要因素之一,也是唯一可以人为控制的因素^[2]。随着智能制造时代的到来,机器臂开始被应用于易燃粉尘物料运输、上料等车间工序。对于车间内的干燥粉尘,风速与机械振动是造成其扩散的重要原因^[3]。由于机械臂在运动过程中会产生一定的相对风速或机械振动,因此,如何规划机械臂的运动,使机械臂安全、高效、平稳运输易燃粉尘物料,从而减少易燃粉尘二次扬散,对防范粉尘爆炸具有重要意义。

对于机械臂的运动规划,袁帅等^[4]提出基于机械臂动态调整机制与凸优化理论的轨迹规划方法,通过仿真实现了在航天员干预下进行高效安全的机器人作业。海素峰等^[5]采用5次多项式插值法规划机械臂关节运动,确保了机械臂平稳性,提高了机械臂的安全性能,但未考虑机械臂末端的姿态变化,且机械臂作业效率低。为此,不少研究通过将优化算法与多项式插值法结合来实现机械臂的时间最短运动轨迹规划^[6-9],但这会造成机械臂关节速度、加速度激变,容易引起机械振动,且忽略了机械臂实际应用领域的生产节奏与环境对机械臂作业效率的限制。

对于在车间内使用重型机械臂转运体积大、质量重且表面附着有煤尘的煤粉物料封装箱,过高的转运效率会伴随机械臂关节速度、加速度的激变,从而产生较大的相对风速与机械振动,引起煤尘二次扬散,增加粉尘爆炸隐患。此外,机械臂运动姿态的改变可能引发封装箱倾斜滑落或与机械臂发生碰撞刮蹭,也会引起煤尘的扬散。因此,体积大、质量重的煤粉物料转运对机器臂的作业效率、运动安全性和平稳性提出了更严格的要求。开普勒优化算法(Kepler Optimization Algorithm, KOA)^[10]作为2023年新提出的元启发式优化算法,可以用于解决机械臂作业的效率问题,但也存在一些性能缺陷^[11]。针对以上问题,首先,采用多项式插值法对机械臂进行柔顺性轨迹规划,并在机械臂运动路径中设置姿态约束,以防范因机械臂、封装箱运动姿态改变引起煤尘二次扬散;其次,为了在规定的安全转运效率下高效作业,改进 KOA 算法,提出一种螺旋探索 KOA(Spiral Exploration KOA,SEKOA),以期通过设置防止煤尘扬散的运动约束来优化机械臂的作业效率。

1 机械臂作业场景的搭建

基于某企业智能转运煤粉物料的车间场景及参数信息(表1),以车间中使用的6轴工业机器人臂为对象,在 Visual Components 平台搭建其作业场景,场景中的封装箱表面和地面附着有煤尘,如图1所示。

首先,装箱工人从物料堆放区将煤粉物料搬运进封装箱(物料包装表面附着有少量煤尘,搬运装箱会扰动包装表面和地面的煤尘,引起飞散),然后启动传送带,将装满物料的封装箱输送到机械臂作业区的 A 点后会暂停,接着机械臂会将封装箱抓取到感应传送带上的 D 点进行码垛,码垛至指定层数后,感应传送带启动,将码垛的封装箱运走装车。

表 1 智能转运参数信息

参数	数值
物料外尺寸/(m×m×m)	1.5×1×0.4
物料质量/kg	300~400
空间安全作业区域/(m×m×m)	3.5×3.5×3
作业效率要求/(s·件 ⁻¹)	7~15
机械臂额定负载/kg	560
运动范围/mm	3 100

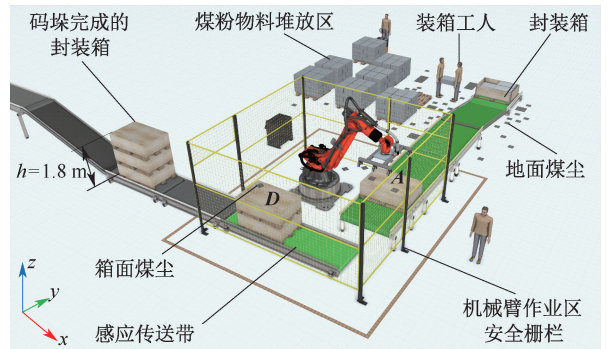


图 1 机械臂转运作业场景

Fig. 1 Transfer operation scenario for robotic arm

2 机械臂运动轨迹规划

2.1 笛卡尔空间轨迹规划

在作业过程中,为了避免机械臂的运动路径突变导致封装箱运动位姿、速度与加速度突变,引起煤尘二次扬散,需要在笛卡尔空间中对机械臂末端执行器规划 1 条连续平滑的曲线运动路径。以机械臂转运第 2 层封装箱为例,根据 KUKA-KR560-R3100-2 机器臂技术资料中的参数,在 Matlab 平台建立其运动学仿真模型,并在笛卡尔空间规划出运动轨迹,如图 2 所示。

机械臂在 A 点夹取封装箱后开始平稳加速经过约束点 B 将物体抬升到一定高度,再下降到减速

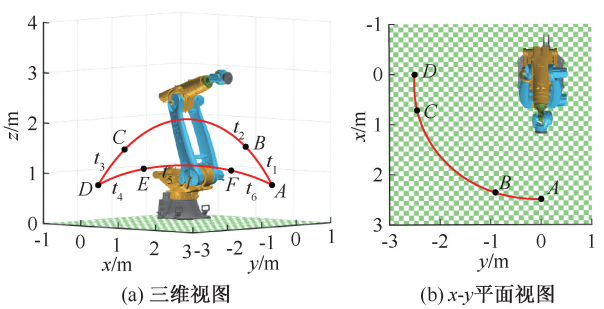


图 2 空间轨迹规划

Fig. 2 Schematic diagram of spatial trajectory planning

点 C 开始平缓减速将物体放到位置 D。然后机械臂依次经过约束点 E、减速点 F 平缓减速返回起点 A,准备下一次作业,其中每段轨迹运动时间分别为 $t_1 \sim t_6$ 。

2.2 关节空间轨迹规划

文中采用多项式插值规划机械臂关节空间轨迹。低阶多项式插值规划出的曲线具有一定的平滑性,但阶次过低的多项式不能约束过多变量,导致加速度曲线不连续;高阶多项式可以约束更多变量,但过高阶次多项式规划出的速度与加速度曲线波动激烈^[12],会造成机械臂关节负荷过大与冲击振动,容易引发煤尘二次扬散。为了兼顾图 2 中每个点的变量约束和曲线平滑性,将 B、C、E、F 点作为轨迹衔接点,选择以“4-5-4-4-5-4”多段多项式对机械臂进行轨迹规划。即图 2 中的 AB、CD、DE、FA 段轨迹以 4 次多项式规划,以达到平缓增、减速的效果;BC 段与 EF 段轨迹以 5 次多项式规划,以满足对关节变量的约束。轨迹的数学方程如下:

$$\begin{cases} \theta_{AB,j} = a_{1,0} + a_{1,1}t_{1j} + a_{1,2}t_{1j}^2 + a_{1,3}t_{1j}^3 + a_{1,4}t_{1j}^4 \\ \theta_{BC,j} = a_{2,0} + a_{2,1}t_{2j} + a_{2,2}t_{2j}^2 + a_{2,3}t_{2j}^3 + a_{2,4}t_{2j}^4 + a_{2,5}t_{2j}^5 \\ \theta_{CD,j} = a_{3,0} + a_{3,1}t_{3j} + a_{3,2}t_{3j}^2 + a_{3,3}t_{3j}^3 + a_{3,4}t_{3j}^4 \\ \theta_{DE,j} = a_{4,0} + a_{4,1}t_{4j} + a_{4,2}t_{4j}^2 + a_{4,3}t_{4j}^3 + a_{4,4}t_{4j}^4 \\ \theta_{EF,j} = a_{5,0} + a_{5,1}t_{5j} + a_{5,2}t_{5j}^2 + a_{5,3}t_{5j}^3 + a_{5,4}t_{5j}^4 + a_{5,5}t_{5j}^5 \\ \theta_{FA,j} = a_{6,0} + a_{6,1}t_{6j} + a_{6,2}t_{6j}^2 + a_{6,3}t_{6j}^3 + a_{6,4}t_{6j}^4 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\theta_{AB,j} \sim \theta_{FA,j}$ 分别为图 2 中对应轨迹的第 j 个点的关节角度; $t_{1j} \sim t_{6j}$ 分别为图 2 中对应轨迹的第 j 个时间点; $a_{1,0} \sim a_{6,4}$ 为待定系数。求解第 n 关节轨迹方程系数 $a_{1,0} \sim a_{6,4}$ 的矩阵方程表示为:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & t_i & t_i^2 & t_i^3 & t_i^4 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2t_i & 3t_i^2 & 4t_i^3 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 6t_i & 12t_i^2 & 0 & 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6 & 24t_i & 0 & 0 & 0 & -6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & t_{i+1} & t_{i+1}^2 & t_{i+1}^3 & t_{i+1}^4 & t_{i+1}^5 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2t_{i+1} & 3t_{i+1}^2 & 4t_{i+1}^3 & 5t_{i+1}^4 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 6t_{i+1} & 12t_{i+1}^2 & 20t_{i+1}^3 & 0 & 0 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 24t_{i+1} & 60t_{i+1}^2 & 0 & 0 & 0 & -6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & t_{i+2} & t_{i+2}^2 & t_{i+2}^3 & t_{i+2}^4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2t_{i+2} & 3t_{i+2}^2 & 4t_{i+2}^3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 6t_{i+2} & 12t_{i+2}^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 24t_{i+2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_{i,0} \\ a_{i,1} \\ a_{i,2} \\ a_{i,3} \\ a_{i,4} \\ a_{i+1,0} \\ a_{i+1,1} \\ a_{i+1,2} \\ a_{i+1,3} \\ a_{i+1,4} \\ a_{i+1,5} \\ a_{i+2,0} \\ a_{i+2,1} \\ a_{i+2,2} \\ a_{i+2,3} \\ a_{i+2,4} \end{bmatrix} = \theta_n,$$

$$\theta_n = \begin{cases} [\theta_{nA} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \theta_{nD} & 0 & 0 & 0 & \theta_{nB}]^T, i = 1 \\ [\theta_{nD} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \theta_{nA} & 0 & 0 & 0 & \theta_{nE}]^T, i = 4 \end{cases} \quad (2)$$

式中： θ_n 为第 n 关节运动约束变量组成的向量； θ_{nA} 、 θ_{nB} 、 θ_{nD} 、 θ_{nE} 分别为机械臂末端运动到图 2 中 A、B、D、E 点时第 n 关节的角度。

2.3 建立运动约束与优化函数

2.3.1 建立运动约束

在实际作业中,机械臂转运封装箱运动会不可避免扰动空气,产生相对风速,当风速大于 3 m/s 时会引起粉尘二次扩散^[13-14]。封装箱在 x - y 平面上的运动幅度较大,其表面的煤尘受平行于 x - y 平面的相对风速影响较大,因此,封装箱在 x - y 平面的线速度 v_{xy} 应小于 3 m/s,且封装箱应保持水平姿态运动以降低空气扰动和倾斜滑落、碰撞的风险,如图 3 所

示。结合表 1 与图 1 中的作业环境信息,约束封装箱运动姿态的机械臂位姿矩阵见表 2。

Figure 3 consists of two parts. Part (a) is a 3D perspective view of a robotic arm holding a packaging box. The box is tilted, and a red circle highlights a point of contact or collision with a surface, labeled '碰撞刮蹭' (collision/scraping). Part (b) is a 2D top-down view in the x-y plane. It shows the trajectory of the packaging box from point A to point B. A dashed line represents the relative wind velocity vector v_{xy} . The distance between A and B is labeled $R=2.5\text{m}$. The angle of the arm is labeled θ_1 .

图3 封装箱运动姿态

Fig.3 Motion posture of packaging box

表 2 封装箱运动姿态约束信息

Table 2 Constraint information on the motion posture of the packaging box

位置	A 点	B 点	D 点
位姿矩阵	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 2.5 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0.7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 1.8 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -2.5 \\ 0 & 0 & -1 & 0.7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

在转运过程中,为了避免因速度、加速度变化过大发生定位偏移、冲击振动等不稳定因素而引发封装箱表面煤尘二次扬散,还需要约束其他各关节的速度、加速度以及封装箱下放过程的速度、加速度变化率,如下式:

$$\begin{cases} |\theta'_n| \leq \theta'_{n-\max} \leq \theta'_{n-e} \\ |\theta''_n| \leq \theta''_{n-\max} \leq \theta''_{n-e} \\ t_2 > \max(t_1, t_4, t_5) \\ t_3 > \max(t_1, t_2, t_4, t_5, t_6) \\ t_6 > \max(t_1, t_2, t_4, t_5) \\ 7 \leq t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 \leq 15 \end{cases} \quad (3)$$

式中: θ'_n 、 θ''_n 分别为第 n 关节运动的角速度、角加速度; $\theta'_{n-\max}$ 、 $\theta''_{n-\max}$ 分别为第 n 关节设置的最大角速度、最大角加速度; θ'_{n-e} 、 θ''_{n-e} 分别为 KUKA-KR560-R3100-2 机械臂第 n 关节的额定最大角速度、额定最大角加速度。

在图 3 中,由于决定封装箱在 x - y 平面运动的机械臂关节为关节 1,因此,将封装箱在 x - y 平面的运动轨迹投影近似看作 1/4 圆弧,结合封装箱尺寸计算出关节 1 的角速度应小于 0.882 rad/s,即 $\theta'_{1-\max}=0.882$ rad/s,约 50.5°/s(为了方便机械臂设置,取 50°/s,即 0.872 rad/s);其余关节的运动变量约束参考 KUKA-KR560-R3100-2 机器臂的技术资料信息设置。具体见表 3。

表 3 各关节额定角速度、角加速度
Table 3 Rated angular velocity and angular acceleration of each joint

关节 n	$\theta'_{n-\max}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	$\theta''_{n-\max}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-2})$
1	0.872	1.50
2	1.396	1.50
3	1.308	1.50
4	1.570	1.50
5	1.570	1.50
6	2.268	1.50

2.3.2 建立机械臂作业效率优化函数

机械臂作业过程中需要完成包括抓取、提升、下放、返回等一系列复杂的动作,若机械臂完成这些动作的时间过长,会降低转运效率;时间过短,则无法配合转运线节奏,且不利于安全转运。因此,需要建立作业效率优化函数,以保证机械臂在满足安全生产条件下高效作业。目标优化函数如下式:

$$f(S) = \min\left(\sum_{i=1}^6 t_i\right) \tag{4}$$

$$S = [t_1 \quad t_2 \quad t_3 \quad t_4 \quad t_5 \quad t_6] \tag{5}$$

式中: $f(S)$ 为最优函数值,代表机械臂作业的最优时间; S 为 SEKOA 的最优解。

3 SEKOA 及其优化

3.1 KOA 原理

在 KOA 中,每一个解视为一个行星,KOA 通过模拟开普勒第一定律的行星运动以探索和开发更优解。行星位置更新由当前解 X 、引力 F_g 、质量 m 和轨道速度 v 等 4 个参数控制^[10]。KOA 的初代解群生成方式为:

$$X_{i,j} = l + (u - l) \times r \tag{6}$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$
$$j = 1, 2, \dots, d$$

KOA 在迭代期间,会通过以下 2 式来更新解:

$$X_{Pi} = X_i(g) + \lambda v_i(g) + (F_{gi}(g) + |T_n|)U \otimes (S - X_i(g)) \tag{7}$$

$$X_{Pi} = X_i(g) \otimes U_1 + (1 - U_1) \otimes \left[\frac{X_i(g) + S + X_h(g)}{3.0} + \eta \left(\frac{X_i(g) + S + X_h(g)}{3.0} - X_k(g) \right) \right] \tag{8}$$

式中: $X_{i,j}$ 为第 i 个解的第 j 维度,在文中代表图 2 中的 6 段轨迹时长; u 、 l 分别为时长的上、下界; r 为 0 到 1 之间的随机数; N 为解群规模; g 为当前迭代次数; X_{Pi} 为 KOA 中每次迭代更新的解;符号“ $\otimes$ ”表示数组元素相乘; λ 为行星的方向参数; v_i 为行星的速度参数; T_n 为基于标准正态分布的随机数。 U 取 0 或 -1,由 0 到 1 之间的 2 个随机数向量相比较而定; S 为当前最优解(太阳位置); X_h 、 X_k 为解群中 2 个随机解; U_1 取 0 或 1,由 0 到 1 之间的一个随机数与一个随机数向量相比较而定; η 为自适应系数。

3.2 改进策略

3.2.1 螺旋包围策略

由于 KOA 在每次迭代中,每个解只能通过式(7)或式(8)更新 1 次,导致算法收敛速度缓慢、子代解多样性差,算法容易陷入局部最优。为了增强 KOA 在实际应用中的优化性能,在 KOA 中引入鲸鱼优化算法(Whale Optimization Algorithm, WOA)^[15] 的螺旋包围策略,以提高算法解群多样性。如图 4 所示,每个解 X_i 在更新位置前发射探测解 X_{oi} , X_{oi} 会通过式(9)或式(12)更新自身位置以对目标区域收缩包围。 X_{oi} 会将更优位置信息 X_{Pi} 传递给 X_i 以指引 X_i 位置更新。其计算方式如下:

$$X_{oi,j} = S_j + R_{i-\text{norm}}(g) \times \exp(b\omega) \cos(2\pi\omega) \tag{9}$$

$$b = \beta \cos^2\left(\frac{4\pi g}{G}\right) + 1 \tag{10}$$

$$\omega = 1 - \left(2 + \frac{g}{G}\right)r \tag{11}$$

$$X_{oi} = S - \left[\left(4 - \frac{4g}{G}\right)r + \frac{2g}{G} - 2 \right] \times |C \otimes S - X_i(g)| \tag{12}$$

式中: S_j 为最优解 S 的第 j 维元素; $R_{i-\text{norm}}$ 为行星与太阳欧氏距离的归一化值; b 为余弦扰动因子; G 为

最大迭代次数; C 为0到1之间的随机数组成的数组; β 为常数,本文取2.5。

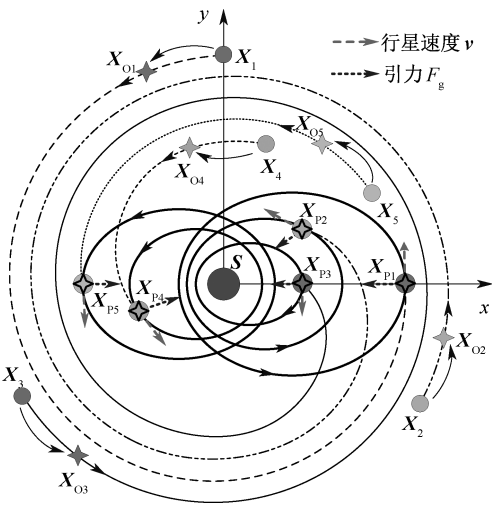


图4 探测解与行星解位置更新

Fig.4 Schematic diagram for updating detection and planetary solutions

3.2.2 随机反向学习

随机反向学习^[16]的核心思想是在全局范围内随机计算出与解相对立的解,以扩大搜索范围,增强算法的探索能力。利用随机反向学习对 X_{Pi} 与 X_{Oi} 生成相对立解 X^q ,并比较 X^q 与 X_{Pi} 或 X_{Oi} 的优劣,保留较优者,保证算法向更好的方向迭代,同时促进算法在迭代中快速跳出局部最优以加快收敛。该算法的表达式为:

$$X_{i,j}^q = u + l - rX_{i,j} \tag{13}$$

式中 X^q 为反向解。

3.2.3 非线性衰减参数

针对KOA开发能力弱的特点,将式(8)中的 η 改为侧重开发的非线性衰减参数,以平衡算法的探索与开发能力,其表达式如下式。前期 h 波动较大,使式(8)有一定的探索能力;后期波动较小,式(8)完全倾向于开发。

$$\eta = \left| 2r - 1 + (0.2r - 0.1) \cos\left(\frac{\pi g}{G}\right) \right| \tag{14}$$

3.2.4 纵向交叉策略

针对上述改进策略使算法的收敛速度过快导致算法陷入局部最优、收敛停滞等问题,引入纵向交叉策略^[17],以进一步增强算法跳出局部最优的能力。纵向交叉是将个体在2个不同维度进行算术交叉计算。为不破坏其他维可能是最优值,纵向交叉只对每个解的少数维进行更新。生成的交叉解 X^* 表示为:

$$X_{i,j_1}^*(g+1) = rX_{Pi,j_1}(g) + (1-r)X_{Pi,j_2}(g) \tag{15}$$

式中 j_1, j_2 为第 i 个解的2个随机维度。

3.3 SEKOA 优化步骤

SEKOA 的具体执行步骤如下:

第1步:设置算法初始化参数 $N=30, d=6, l=0.5, u=10, G=500$;使用式(6)生成初代解。

第2步:计算式(4),记录 $S, f(S)$ 、最差解 W_s 、最差函数值 W_f 。使用式(13)生成对立解,将对立解与 X_i 对比并保留较优值,更新 S 与 $f(S)$ 。

第3步:计算欧氏距离 R_{i-norm} ,并生成一个0到1之间的随机数 P 。

第4步:如果 $P < 0.5$,使用式(9)更新 X_{Oi} 。否则使用式(12)更新 X_{Oi} ,并利用式(6)进行边界约束。使用式(13)生成对立解,将对立解与 X_{Oi} 对比并保留较优值,更新 S 与 $f(S)$ 。

第5步:生成2个随机数 r_m, r_n ,如果 $r_m < r_n$,使用式(7)更新 X_{Pi} ;否则计算式(14),使用式(8)更新 X_{Pi} ,并利用式(6)进行边界约束。使用式(13)生成对立解,将对立解与 X_{Pi} 对比并保留较优值,更新 S 与 $f(S)$ 。

第6步:使用式(15)对解群进行纵向交叉,当前迭代完成; $g=g+1$ 。

第7步:如果 $g \geq G$,输出全局最优解 S 、全局最优函数值 $f(S)$;否则从第3步开始继续执行算法。

4 机械臂转运作业仿真分析

在式(3)与表3的运动约束下,将SEKOA用于优化机械臂转运煤粉物料的作业效率,并选取标准的KOA、WOA、麻雀优化算法(Sparrow Search Algorithm, SSA)^[18]、蜣螂优化算法(Dung Beetle Optimizer Algorithm, DBO)^[19]、冠豪猪优化算法(Crested Porcupine Optimizer, CPO)^[20]作参照对比,各算法的寻优结果向上舍入保留2位小数,结果见表4。其中,SEKOA第3次优化得到的每段轨迹时长见表5。

表4 作业总时长寻优结果

Table 4 Optimization results for total homework

次数	duration					s
	KOA	WOA	DBO	CPO	SSA	
1	19.25	10.46	10.88	9.76	13.37	9.56
2	13.70	10.20	10.88	9.81	10.95	9.61
3	17.66	9.81	11.98	9.75	11.21	9.54
4	20.65	9.76	11.57	9.79	10.93	9.57
5	18.76	9.87	11.95	9.71	12.58	9.56

表 5 SEKOA 第 3 次寻优结果的每段轨迹时长

Table 5 Duration of each trajectory segment in the third optimization result of SEKOA

$f(S)$	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
9.54	1.65	1.70	1.80	1.29	1.33	1.77

表 4 结果表明:在式 (3) 与表 3 的安全运动约束条件下,SEKOA 相比其他算法对机械臂转运效率的优化性能更高,机械臂安全转运煤粉物料的最快时间约为 9.5 s。将表 5 中每段轨迹的寻优时长代入式 (2) 中,通过机器人运动学计算出机械臂的运动轨迹,如图 5 所示;煤粉封装箱的运动趋势如图 6 所示。

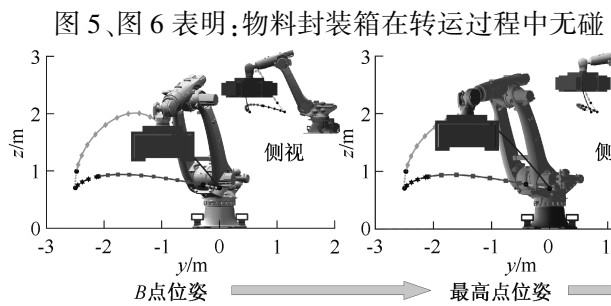


图 5 机械臂空间运动轨迹

Fig. 5 Spatial motion trajectory of robotic arm

图 6 y-z 平面的位姿变化趋势

Fig. 6 Trend of pose change in y-z plan

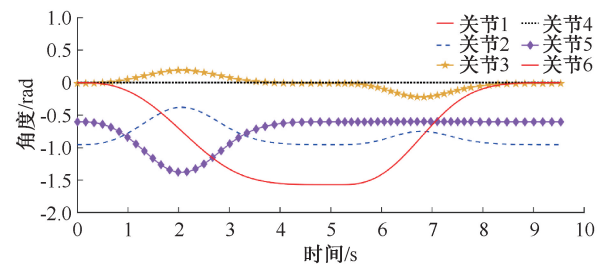


图 7 关节角位移曲线

Fig. 7 Joint angular displacement curve

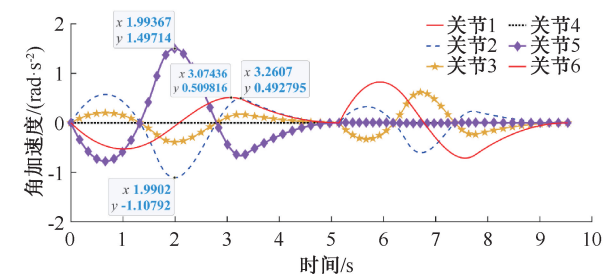


图 9 关节角加速度曲线

Fig. 9 Joint angular acceleration curve

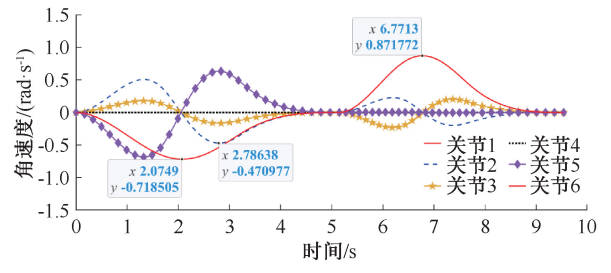


图 8 关节角速度曲线

Fig. 8 Joint angular velocity curve

约为 2.45、2.96 m/s,产生的相对风速小于导致煤尘二次扬散的最低风速,可防止封装箱表面的煤尘二次扬散。结合图 6 分析可知:封装箱的位置变化主要受机械臂关节 1、2 控制,二者的加速度峰值均小于设置的加速度约束,且在最后放下封装箱的过程中,关节 1、2 的峰值速度分别约为 0.72、0.47 rad/s,加速度峰值仅约为 0.5 rad/s²,经历约 2.5 s 减速到 0,相较于文献[6]效率提高的同时,在到达目标点前减速更加平缓,且各关节角加速度变化相较于文献[6—8]中规划的角加速更平滑、连续,能减少因加速度激变导致的冲击振动、定位偏移等因素引发的煤尘二次扬散。

5 结 论

- 1) 采用“4-5-4-4-5-4”多段多项式规划 6 轴工业机械臂转运煤粉物料的运动轨迹,并约束物料运动姿态,物料在运动中无碰撞、倾斜现象;各关节角位移、角速度和角加速度曲线平滑、连续。
- 2) 在设置的防止煤尘扬散的运动变量约束条

件下,SEKOA 相比其他算法对机械臂作业效率的优化更高,机械臂安全转运煤粉物料的最快时间约为 9.5 s;机械臂关节 1、2 在放下物料过程中,角速度峰值分别约为 0.72、0.47 rad/s,角加速度峰值约为 0.5 rad/s²,能平缓减速将物料放到目标点;物料在 x-y 平面的最大速度小于约束速度,可防范封装箱上的煤尘二次扬散。

参 考 文 献

[1] 陈刚,张晓蕾,徐帅,等. 我国 2005—2020 年粉尘爆炸事故统计分析[J]. 中国安全科学学报,2022,32(8):76-83.
CHEN Gang, ZHANG Xiaolei, XU Shuai, et al. Statistical analysis on dust explosion accidents in China from 2005 to 2020[J]. China Safety Science Journal,2022,32(8):76-83.

[2] 赵欣然,张琪,王卫东,等. 可燃性粉尘云的图像检测方法[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(4): 8-13.
ZHAO Xinran, ZHANG Qi, WANG Weidong, et al. Image detection method of combustible dust cloud[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(4): 8-13.

[3] 刘茜尧. 选煤厂筛分车间粉尘运移规律及降尘技术研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
LIU Xiyao. Study on dust migration law and dust reduction technology in screening workshop of coal preparation plant[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022.

[4] 袁帅,王义宇,张泽旭,等. 月面人机协同作业机械臂安全轨迹规划[J]. 宇航学报,2023,44(6):874-884.
YUAN Shuai, WANG Yiyu, ZHANG Zexu, et al. Safe path planning for human-robot cooperative lunar tasks[J]. Journal of Astronautics, 2023, 44(6): 874-884.

[5] 海素峰,于景斌,李金辉,等. 矿山智能加水站四自由度机械臂运动特性研究[J]. 中国安全科学学报,2023, 33(增 2):158-163.
HAI Sufeng, YU Jingbin, LI Jinhui, et al. Research on motion characteristics of manipulator for intelligent water filling stations in mines[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(S2):158-163.

[6] 赵业和,刘达新,刘振宇,等. 基于多种种群竞争松鼠搜索算法的机械臂时间最优轨迹规划[J]. 浙江大学学报:工学版,2022,56(12):2 321-2 329,2 402.
ZHAO Yehe, LIU Daxin, LIU Zhenyu, et al. Time-optimal trajectory planning of manipulator based on multi-group competition squirrel search algorithm [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2022, 56 (12): 2 321-2 329, 2 402.

[7] 吴继春,张斋武,杨永达,等. 基于改进金枪鱼群算法的机械臂时间最优轨迹规划[J]. 计算机集成制造系统,2024, 30(12):4 292-4 301.
WU Jichun, ZHANG Zhaiwu, YANG Yongda, et al. Time optimal trajectory planning of robotic arm based on improved tuna swarm algorithm. [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2024, 30(12): 4 292-4 301.

[8] DU Yuxiao, CHEN Yihang. Time optimal trajectory planning algorithm for robotic manipulator based on locally chaotic particle swarm optimization[J]. Chinese Journal of Electronics, 2022, 31(5): 906-914.

[9] XU Jing, REN Chaofan, CHANG Xiaonan, et al. Robot time-optimal trajectory planning based on quintic polynomial interpolation and improved Harris Hawks algorithm[J]. Axioms, 2023, 12: DOI: 10. 3390/axioms12030245.

[10] ABDEL-BASSET M, MOHAMED R, ABDEL AZEEM S A, et al. Kepler optimization algorithm: a new metaheuristic algorithm inspired by Kepler’s laws of planetary motion[J]. Knowledge-Based Systems, 2023, 268: DOI: 10. 1016/j. knosys. 2023. 110454.

[11] HU Gang, GONG Changsheng, LI Xiuxiu, et al. CGKOA: an enhanced Kepler optimization algorithm for multi-domain optimization problems[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2024, 425: DOI: 10. 1016/j. cma. 2024. 116964.

[12] PARIKH P A, TRIVEDI R, DAVE J. Trajectory planning for the five degree of freedom feeding robot using septic and

nonic functions[J]. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 2020, 9(7): 1 043–1 050.

[13] 陈景序,马恒,荆德吉. 受限空间沉积粉尘二次飞扬特征及数值分析[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版, 2019,38(2):130–135.

CHEN Jingxu, MA Heng, JING Deji. Dust emission tension and numerical analysis in confined space sedimentary[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science,2019,38(2):130–135.

[14] 韩桂波,詹水芬,张晓春,等. 煤炭粉尘颗粒起动风速影响因素及数学模型[J]. 煤炭学报, 2009, 34(10): 1 359–1 363.

HAN Guibo,ZHAN Shuifen,ZHANG Xiaochun, et al. Influence factors and mathematical model of coal dust particles threshold velocity[J]. Journal of China Coal Society,2009,34(10):1 359–1 363.

[15] MIRJALILI S, LEWIS A. The whale optimization algorithm[J]. Advances in Engineering Software, 2016, 95: 51–67.

[16] WEN Long, JIAO Jianjun, LIANG Ximing, et al. A random opposition-based learning grey wolf optimizer[J]. IEEE Access, 2019, 7: 113 810–113 825.

[17] MENG Anbo, CHEN Yucheng, YIN Hao, et al. Crisscross optimization algorithm and its application[J]. Knowledge-Based Systems, 2014, 67: 218–229.

[18] XUE Jiankai, SHEN Bo. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm[J]. Systems Science & Control Engineering, 2020, 8(1): 22–34.

[19] XUE Jiankai, SHEN Bo. Dung beetle optimizer: a new meta-heuristic algorithm for global optimization[J]. The Journal of Supercomputing, 2023, 79(7): 7 305–7 336.

[20] ABDEL-BASSET M, MOHAMED R, ABOUHAWWAS M. Crested porcupine optimizer: a new nature-inspired metaheuristic[J]. Knowledge-Based Systems, 2024,284;DOI:10.1016/j.knosys.2023.111257.

作者简介： 董祥杰 （2000—）,男,四川成都人,硕士研究生,研究方向为机器人安全运动控制。E-mail:2931341074@qq.com。

