

基于改进差分进化算法的热电池装配机器人优化设计

何玲, 钟江川, 张钦仰

(贵州大学 现代制造技术教育部重点实验室, 贵阳 550025)

摘要: **目的** 为了实现异形热电池组的智能化装配和解决装配过程中存在装配精度不高的问题, 设计了一种装配机器人, 并仿真验证该机器人是否能够满足异形热电池组的装配精度需求。**方法** 采用改进 D-H 参数法构建运动学模型, 通过正运动学分析机器人末端轨迹。采用改进 DE 算法进行逆运动学求解, 并通过仿真实验分析运动学求解结果。**结果** 求得平均位置误差为 1.4×10^{-4} mm, 平均姿态误差为 2.4×10^{-4} 度, 平均解迭代次数为 219.857, 各构件最大角速度不应超过 3.5 rad/s。**结论** 设计的装配机器人能够满足异形热电池组装配精度要求, 运动学求解精度提高 2 个数量级, 效率提高 72.5%。

关键词: 装配机器人; 正运动学; 逆运动学; 差分进化算法; 热电池

中图分类号: TB472; TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)08-0035-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.08.005

Optimization Design of Thermal Battery Assembly Robot Based on Improved Differential Evolution Algorithm

HE Ling, ZHONG Jiang-chuan, ZHANG Qin-yang

(Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology of the Ministry of Education,
Guizhou University, Guiyang 550025, China)

ABSTRACT: In order to achieve the intelligent assembly of special-shaped thermal battery packs and solve the problem of low assembly accuracy in the assembly process, an assembly robot was designed and verified whether the robot can meet the assembly accuracy requirements of special-shaped thermal battery packs. The improved D-H parameter method was used to construct a kinematic model, and the end trajectory of the robot was analyzed through positive kinematics. The improved DE algorithm is used to solve the inverse kinematics, and the kinematics solution results are analyzed through simulation experiments. The average position error is 1.4×10^{-4} mm, the average attitude error is 2.4×10^{-4} degrees, the average number of solution iterations is 219.857, and the maximum angular velocity of each component should not exceed 3.5 rad/s. The designed assembly robot can meet the assembly requirements of special-shaped thermal battery packs, the kinematics solution accuracy is improved by two orders of magnitude, and the efficiency is improved by 72.5%.

KEY WORDS: assembly robot; positive kinematics; inverse kinematics; differential evolution algorithm; thermal battery

工业机器人具备工作空间大、结构紧凑、柔性好、成本低等优点^[1], 广泛应用在智能制造领域。精度是衡量机器人性能的重要指标, 精度的提高将使机器人在智能装配中有更优秀的表现^[2]。日趋复杂的工业产品结构对智能装配控制精度的要求越来越高, 热电池组通常由若干单体热电池串并联形成, 受总体结构等

条件限制, 就出现了异形热电池组, 增加了机器人装配难度^[3]。智能制造装配过程中装配精度要求高, 装配环境复杂, 装配的可视化程度低, 为装配带来较大的难题^[4]。

热电池具有比能量和比功率高、激活迅速可靠、适应环境能力强、贮存时间长、结构紧凑、工艺简

收稿日期: 2021-12-06

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2021]一般 439, 黔科合平台—JXCX[2021]001, 黔科合平台人才[2020]6007, 黔科合支撑[2019]2814); 国家自然科学基金(61863005, 62163007)

作者简介: 何玲(1975—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为自主智能机器人。

便、生产成本低、免维护等优点,成为航天的首选电源^[5-6]。随着航天技术的进步,对电源系统的要求也越来越高^[7],为满足电源系统的要求,通常将若干单体热电池排列串(并)联形成热电池组。受到应用场景的影响,热电池有许多形状、尺寸不一的结构,这就导致热电池装配顺序复杂、不统一,并且航天器内部装配空间小,可视化程度低。这些都要求机器人在装配过程中有精度高、智能化程度高的能力。

为发挥机器人在装配中高精度、智能化的能力,季旭全等^[8]针对星载设备装配空间半封闭、可视化程度低的问题提出了一种基于机器人与视觉引导的智能装配方案,该方案提高了装配效率,但在装配过程中未考虑实际装配空间。胡瑞钦等^[9]针对大型航天装备提出了一套基于力/位移的机器人柔性装配方法,该方法虽成功应用于多类航天器大部件装配中,但是在装配过程中力感知与力控制精度方面还需进一步优化。陈雨杰等^[10]得出一种利用机器人自动绘制基准标定、工艺标识等进行辅助装配的方法,这些装配方案主要研究的是可行性问题,缺乏对装配精度问题的关注。

为了提高机器人的精度,范文强等^[11]针对 LED 装配位置精度无法保证的问题提出了一种基于待装配孔位姿测量的装配轨迹在线修正方法,该方法虽成功解决了工业机械臂运动误差,提高了自动装配的实际生产效率和精度,但该方法并未分析、考虑待装配工件的实际位置与工业机械臂预编译装配轨迹之间的偏差。顾岩等^[12]针对狭小空间内虚拟手臂运动规划求解难等问题提出了一种运动学与动力学结合的分层求解优化方法,该方法提高了手臂路径生成效率以及装配精度,但只适用于自由度低于 3 的机器人。何启嘉等^[13]提出了一种解析法求解部分解、自适应多种群的遗传算法求解其余解的机器人逆运动求解方法,该解析法求解精度高,但求解必须满足 Pieper 准则,实际应用性较差。谢习华^[14]、李清^[15]和 Mao^[16]等采用优化差分进化算法求解机器人逆运动学问题,该算法求解稳定性高,但在设置姿态误差和位置误差权重时采用经验值,主观性较强,没有考虑机器人运动学特性。

针对异形热电池装配,文中设计一种装配机器人。通过改进 D-H 参数法构建机器人连杆参数坐标系,对机器人进行运动学建模,结合机器人运动特性分析姿态误差和位置误差的关系,利用改进差分进化算法求解装配机器人。

1 装配机器人工作原理

热电池组的装配任务多为紧固螺钉,所用的螺钉会随着热电池组的大小而发生改变,且热电池组的大小、形状各不相同。较大的热电池组四周会有单个热电池,因此需要装配机器人伸展空间大、灵活性好。

考虑到机器人自身误差和螺钉尺寸误差,得出机器人末端误差不超过螺钉公称直径 1% 的结果。热电池组装配使用 M2 的螺钉,因此热电池组装配误差最大不超过 0.02 mm,见图 1。

根据热电池组装配的特点,设计了六轴关节型机器人,见图 2。该机器人由 6 个转动关节串联而成,机器人主体由机器人底座、机器人底座旋转关节、大臂、小臂、手腕和末端法兰盘构成。机器人底部旋转关节 360° 旋转控制机器人横向工作,调整大臂与小臂位姿实现不同高度的热电池装配,轴 4 旋转关节控制横向与竖向装配,使机器人实现对热电池四周附着单体热电池的固定。通过调整轴 5 与轴 6 旋转关节来提高装配精度。较长的大臂与小臂结构使机器人运行空间增大,但是这也对机器人的精度造成巨大影响,悬臂式的结构使得机器人工作时振动较大。

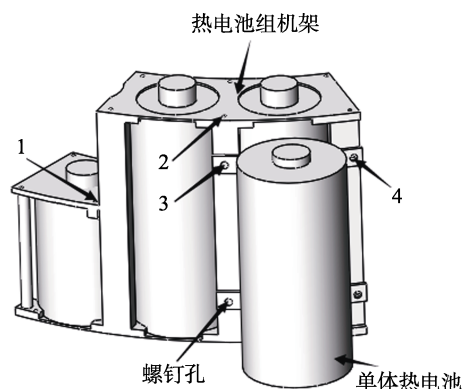


图 1 热电池组三维模型

Fig.1 3D model of the thermal battery

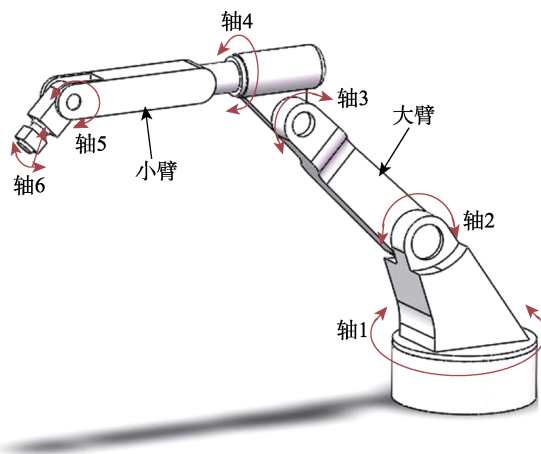


图 2 机器人三维模型

Fig.2 3D model of the robot

2 运动学模型

使用改进 D-H 参数法对机器人构建数学模型,构建连杆坐标系,其中 X_0 、 Y_0 、 Z_0 分别为基坐标系的坐标轴, X_i 、 Y_i 、 Z_i 分别为各关节坐标系的坐标轴,见图 3。

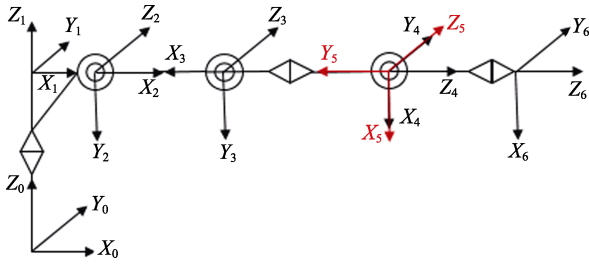


图 3 机器人连杆坐标系

Fig.3 Robot connecting rod coordinate system

机器人连杆参数见表 1。其中 d_i 表示相邻关节之间的连杆长度, a_{i-1} 表示相邻关节连杆偏移量, α_{i-1} 表示相邻关节坐标系之间的扭转角。 θ_i 表示相邻关节的关节角。

表 1 机器人连杆参数

Tab.1 Robot connecting rod parameters

连杆 i	$\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	a_{i-1}/mm	$\theta_i/(^{\circ})$	d_{i-1}/mm	转角范围/ $(^{\circ})$
1	0	0	0	480	-180 180
2	90	150	0	0	-4 060
3	0	550	-90	0	-4 545
4	-90	0	0	715	-180 180
5	90	0	0	0	-120 120
6	-90	0	0	110	-180 180

根据改进 D-H 参数法构建杆与杆之间的相对变换通式见式 (1)。

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & s\alpha_{i-1} d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $s\theta_i$ 、 $c\theta_i$ 、 $s\alpha_i$ 、 $c\alpha_i$ 分别表示 θ 与 α 的正余弦值。机器人末端连杆坐标系相对于基坐标系的关系可由上述各连杆变换矩阵相乘得到式 (2)。

$${}^0T_6 = T(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P_{1 \times 3} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: 姿态矩阵 $R_{3 \times 3}$ 表示机器人末端连杆坐标系各基准轴相对于基坐标系的位置向量; 位置矩阵 $P_{1 \times 3}$ 表示机器人末端连杆坐标系原点相对基坐标系位置。

按照图 1 中的热电池组装配螺钉 1、2、3、4 的位置, 生成机器人末端轨迹, 见图 4。该轨迹表示机

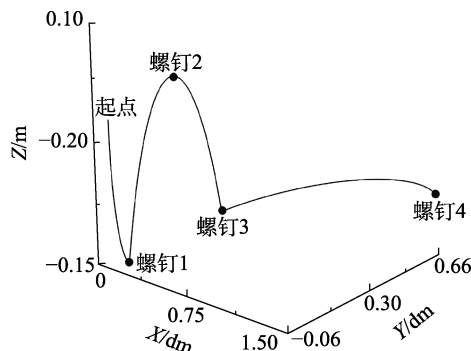


图 4 机器人末端轨迹

Fig.4 The trajectory of the end of the robot

器人的 3 种装配情况, 分别为上下来回装配、从热电池组上下两端向热电池组四周装配和同一高度平移装配。根据机器人末端的位姿计算各关节角度值对机器人动态特性分析、运动控制等研究有重要意义。

3 基于改进差分进化算法的逆运动学求解

DE 进化算法是基于实数编码的一种遗传算法, 增强了全局寻优的能力, 但也暴露出易陷于局部收敛的缺陷。针对此问题, 文中在变异过程中提出了新的自适应算子, 在边界处理上提出了边界比例映射法。

3.1 目标函数设计

位姿矩阵分为位置函数与姿态函数, 因此可将求逆解问题转化为在变量取值范围内求解函数最值的问题, 即为求解的机器人末端执行器的位姿和目标位姿之间的误差函数。由式 (2) 可知, 机器人末端执行器的目标位姿矩阵见式 (3)。

$$T_a = \begin{bmatrix} R_a & P_a \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: R_a 表示目标姿态矩阵; P_a 表示目标位置矩阵。机器人末端执行器的当前位姿矩阵见式 (4)。

$$T_t = \begin{bmatrix} R_t & P_t \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: R_t 表示当前姿态矩阵, P_t 表示当前位置矩阵。则目标函数计算公式见式 (5)。

$$f(\theta_1 \cdots \theta_6) = \alpha \|R_t - R_a\| + \beta \|P_t - P_a\| \quad (5)$$

式中: α 、 β 为位置误差与姿态误差的权重, 为使该求解方法能够适用于其他机器人, 设计了权重计算见式 (6)。

$$\alpha = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^6 \lambda_i P_{di}}}{\pi}, \quad \beta = 1 \quad (6)$$

式中: λ_i 表示机器人各轴连杆长度, P_{di} 表示各轴连杆偏距, 该方法根据机器人的结构引入的自适应权重系数不仅能够平衡两种误差的重要性, 还提高了普遍适用性。

3.2 算法流程

1) 种群初始化。根据关节转角范围随机生成 N 组关节角, 则初始种群个体计算见式 (7)。

$$x_{ij}(0) = \text{rand}(U_{ij}^{\max} - U_{ij}^{\min}) + U_{ij}^{\min} \quad (7)$$

式中: rand 表示 (0,1) 随机取值, 且服从均匀分布的小数; $U_{ij}^{\max}$ 、 $U_{ij}^{\min}$ 分别为个体 i 关节角 j 取值的上下限; $N_p=200$ 为种群大小, $i=1,2,\dots,N_p$ 、 $j=1,2,\dots,6$ 。

2) 变异操作。标准 DE 算法的变异控制随机性大, 使种群差异大, 增大了搜索范围, 降低了收敛速度, 因此文中在保留原有变异方式的同时, 引入当前种群最优个体作为初始量, 不仅避免局部最优结果, 而且能达到提高收敛的速度。则变异个体的计算见式 (8)。

$$h_{ij}(t+1) = \begin{cases} x_{bj}(t) + F[(x_{bj}(t) - x_{p2j}(t)) + (x_{bj}(t) - x_{p3j}(t))], & \text{rand} < 1 - (t/T)^2 \\ x_{p1j}(t) + F(x_{p2j}(t) - x_{p3j}(t)), & \text{rand} \geq 1 - (t/T)^2 \end{cases} \quad (8)$$

式中: x_{p1} 、 x_{p2} 、 x_{p3} 为种群随机选择的 3 个个体, 且 $p1 \neq p2 \neq p3$; 缩放因子 F 取值为 0.8; $x_b(t)$ 为迭代 t 次种群中最好的个体, $T=1\ 000$ 为迭代次数。

3) 边界处理。边界处理多以随机再生的方式, 这样的方式将减少父代与子代间的联系, 降低收敛速度。文中采用比例映射法, 将边界内的值与边界外的值成比例一一对应, 保留变异个体的位置信息, 一定程度上削弱了随机性, 其边界处理见式 (9)。

$$h_{ij}(t) = \begin{cases} h_{ij}(t), & U_{ij}^{\min} \leq x_{ij} \leq U_{ij}^{\max} \\ \frac{U_{ij} - (U_{ij}^{\max} - U_{ij}^{\min})^2}{360 - U_{ij}^{\max} + U_{ij}^{\min}}, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

4) 交叉选择。交叉选择在增加种群的多样性的同时, 保留了优化的个体。其交叉的计算见式 (10)。

$$v_{ij}(t+1) = \begin{cases} h_{ij}(t+1), & \text{rand}(0,1) \leq C \\ x_{ij}(t), & \text{rand}(0,1) > C \end{cases} \quad (10)$$

式中: 交叉概率 C 取值为 0.9。

通过变异、交叉产生的实验体采用贪婪的选择策略, 其计算公式见式 (11)。

$$x_i(t+1) = \begin{cases} x_i(t), & f(x_i(t)) \leq f(v_i(t+1)) \\ v_i(t+1), & f(x_i(t)) > f(v_i(t+1)) \end{cases} \quad (11)$$

5) 终止判断。重复步骤 2 至 4, 使迭代次数达到最大值即终止程序, 输出最优解。

3.3 实验测试与分析

为验证上述改进 DE 算法的稳定性, 进行如下实验: 将螺钉 1 所在位置的机器人位姿矩阵作为目标矩阵, 对该位置进行重复 100 次求解实验, 实验结果绘制见图 5。由图 5a 可知, 改进 DE 算法求解平均迭代次数为 219.85 次, 比 DE 算法平均迭代次数少 600 次, 并且每次求解都能得到最优结果。由图 5b 可知, 改进 DE 算法平均求解时间为 5.27 s, 比 DE 算法平均求解时间少 1.8 s, 并且 2 种算法求解均未出现异常值。表 2 为 100 次实验结果分析, 其中改进 DE 算法的最优结果平均值为 3.337×10^{-4} , 求解时间偏差为 0.197, 说明改进 DE 算法收敛速度较快, 且精度更高。综合以上结论表明改进 DE 算法具有稳定的求解能力并且求解速度更快。

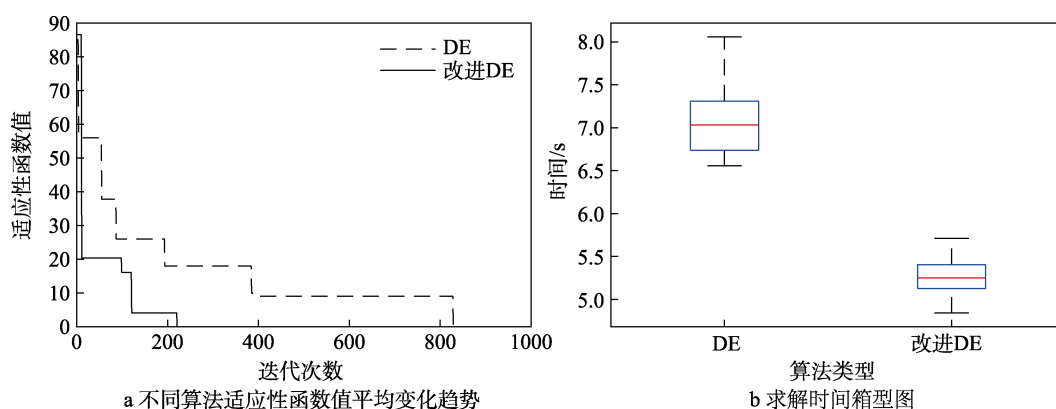


图 5 实验结果统计

Fig.5 Statistics of experimental results

表 2 100 次实验结果分析
Tab.2 Analysis of 100 experimental results

算法类型	求解最优结果平均值	求解最优结果偏差	平均求解时间/s	求解时间偏差
DE	0.930	0.575	7.08	0.404
改进 DE	0.000 337	0.000 418	5.27	0.197

为验证改进 DE 算法所求的结果是否优于传统 DE 算法, 研究如下。

将图 4 机器人末端轨迹均分为 35 个位姿, 分别采用 DE 算法与改进 DE 算法对这 35 个位姿矩阵进行求解, 所求结果应为一组关节角度, 但为了对比位置

与姿态, 将所求关节角带入式 (2) 得到位姿矩阵, 其结果如下。

标准 DE 算法的平均位置误差约为 0.01 mm, 姿态误差约为 1° , 位置误差最大值为 0.1 mm, 出现不满足装配精度的情况, 见图 6。改进 DE 算法的位置误差约为 1×10^{-4} mm, 位置误差最小值为 1×10^{-8} mm, 姿态误差约为 1×10^{-5} 度, 满足装配精度。将上述 35 个点平均位置误差、姿态误差及迭代次数统计于表 3 中, 改进 DE 算法求解平均迭代次数为 219.857, 相较 DE 算法结果降低了 600 次, 效率提高了 72.5%。由计算结果的平均值也可以得到改进 DE 算法求解精度高于 DE 算法, 并且迭代次数标准偏差结果显示改

进 DE 算法求解效率更高, 稳定性更好。综上所述表明改进 DE 算法相较于标准 DE 算法有更高的精度而且收敛速度更快、稳定性更好, 完全满足机器人的精度要求。

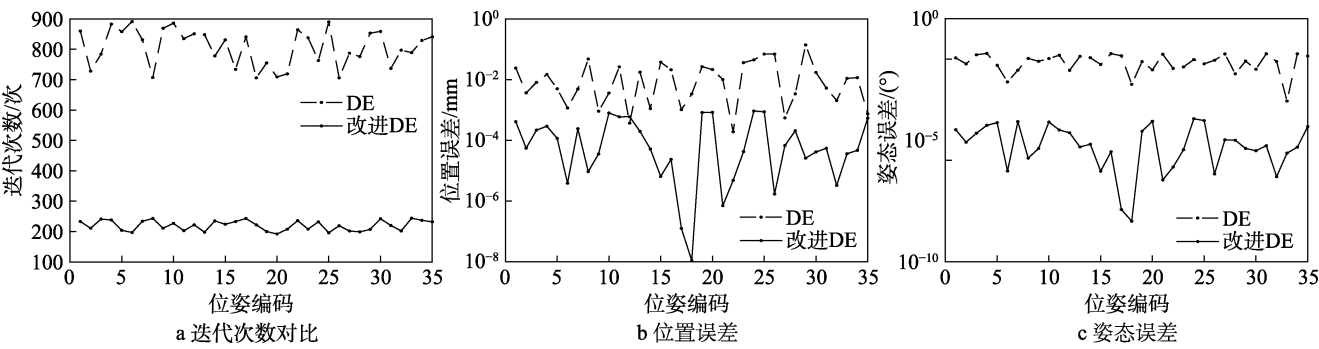


图 6 2 种算法结果对比
Fig.6 Comparison of the results of the two algorithms

表 3 对比实验数据分析
Tab.3 Comparative experiment data analysis

算法类型	平均姿态误差/(°)	姿态误差标准偏差	平均位置误差/mm	位置误差标准偏差	平均迭代次数	迭代次数标准偏差
DE	0.928 83	0.590 58	0.019 80	0.027 61	806.657	59.667 1
改进 DE	0.000 24	0.000 32	0.000 14	0.000 25	219.857	16.539 4

4 仿真实验分析

将上述改进 DE 算法所求得的位置矩阵作为机器人在对应点的动作执行方案, 根据五次多项式插值求解各关节角速度、角加速度见图 7—8。

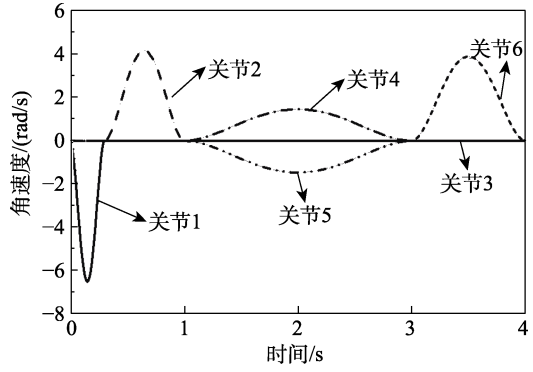


图 7 机器人各关节角速度
Fig.7 Angular velocity of each joint of the robot

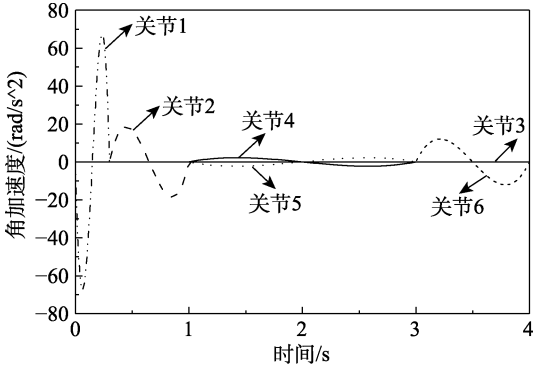


图 8 机器人各关节角加速度
Fig.8 Angular acceleration of each joint of the robot

各机器人各关节角速度曲线变化平滑, 表明在理想条件下, 机器人能够较好实现整个工作流程。各关节角加速度曲线呈现出类似正弦变化趋势, 其中关节 2、3 角加速度曲线关于时间轴对称。仅关节 1 速度与加速度值较大, 但机器人各关节先后运动, 且关节 1 为底部旋转关节, 速度与加速度较大符合机器人快速大范围转动的特点。这说明在整个动作过程中, 机器人能够稳定运行, 本体未产生较大振动。

为验证前文研究所得理想情况下关节角速度是否适合实际情况, 将图 7 的关节角速度作为机器人的实际工作角速度, 得到机器人末端实际轨迹, 见图 9。

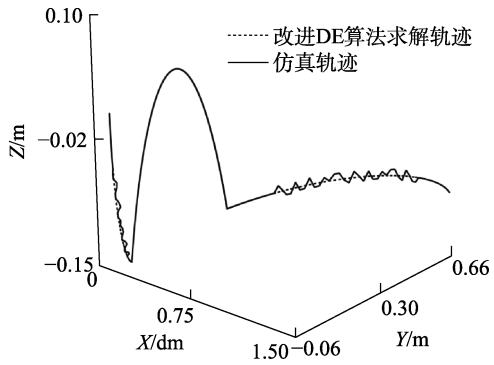


图 9 机器人末端轨迹
Fig.9 The trajectory of the end of the robot

机器人末端仿真轨迹对比图与机器人各关节转角速度对比, 见图 9—10。由图可知, 末端执行器运动轨迹与运动学仿真运动轨迹重合, 但是在运动中出现了较为明显的波动, 对比关节旋转角速度曲线可知, 在 0.55 s~0.75 s 与 3.4 s~3.6 s 时间段内实际速度在理论速度附近波动。在 0.55 s 与 3.4 s 角速度出现

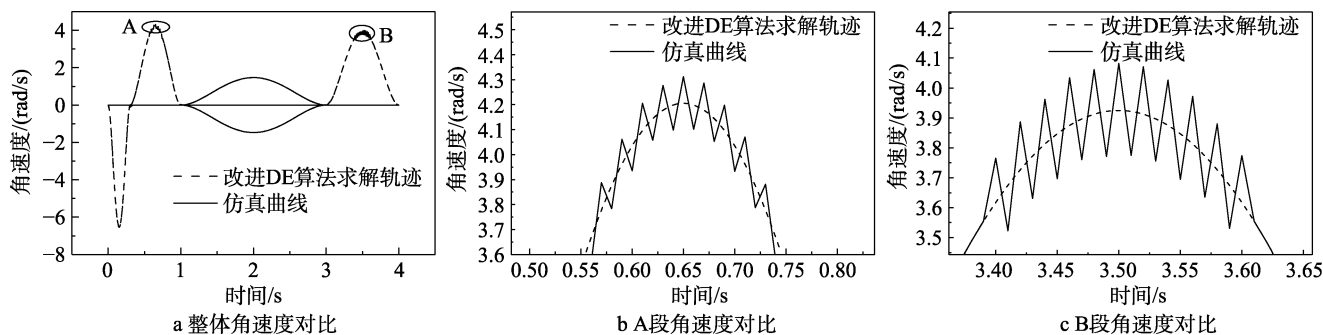


图 10 机器人各关节角速度对比

Fig.10 Comparison of the angular velocity of each joint of the robot

大于 3.5 rad/s 的情况时,机器人末端位置产生大幅度偏差,经分析是由于角速度过大引起机器人出现波动。

因此设计以下仿真实验进行验证,增大关节 5 与关节 1 角速度切线斜率,降低幅值,使得各关节旋转角度总体不变、时间不变的前提下,避免机器人关节角速度出现大于 3.5 rad/s 的情况。

关节角速度优化后的末端轨迹曲线与角速度变化曲线,见图 11—12。由图可知,各关节角速度优化之后,机器人末端执行器轨迹的理论曲线与仿真曲线能够基本吻合,出现的偏差也在误差范围内。关节 1 到 6 的最大角速度均不超过 3.5 rad/s ,其中机器人关节角提速、降速仅需要 0.01 s ,其余时间内都保持匀速运动,保证机器人运动的平稳性。

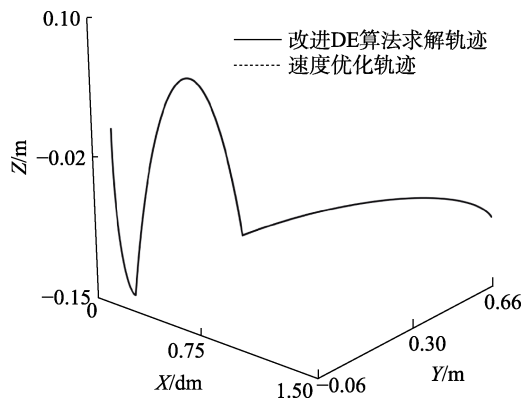


图 11 优化后机器人末端轨迹

Fig.11 The trajectory of the end of the robot after optimization

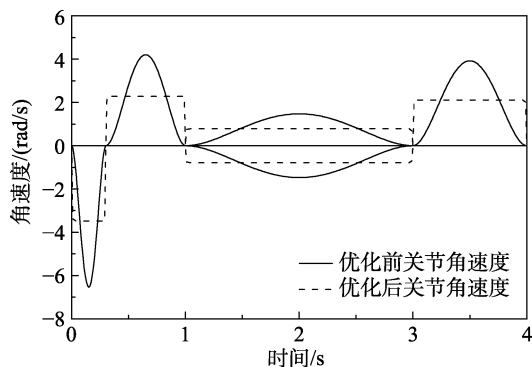


图 12 优化后各关节角速度曲线

Fig.12 Angular velocity curve of each joint after optimization

5 结语

针对热电池组的装配要求,设计了一种装配机器人。采用改进 D-H 参数法进行运动学求解,通过正运动学分析,建立机器人正解的非线性方程,计算出机器人末端轨迹。运用改进 DE 算法对机器人进行求逆解,得到平均位置误差为 $1.4 \times 10^{-4} \text{ mm}$,平均姿态误差为 2.4×10^{-4} 度,较 DE 算法求解精度提高了 2 个数量级。平均迭代次数为 219.857,较 DE 算法求解迭代次数降低了约 600 次,计算效率提高了 72.5%。通过动力学仿真分析确定此机器人运动过程中的振动主要与速度有关,通过优化关节角速度,将关节角速度降低至 3.4 rad/s ,机器人能够平稳运行,确定各构件的运动速度最大值为 3.5 rad/s 。通过运动学与动力学分析,以及构建机器人仿真装配模型可知,所设计的装配机器人能满足异形热电池组装配精度要求,具有较好地稳定性,为模型实际调试提供依据。

文中装配机器人的运动采用各关节依次运动的方式,较容易减小机器人本体运动产生的振动,但增加了机器人装配运动时间,并且在实际生产中机器人末端会与螺钉拧紧工具连接,因此螺钉拧紧工具的振动同样会影响装配机器人的精度。后续研究的重点可放在如何设计机器人整体运动速度以减少装配的时间,以及减小机器人末端工具的振动对机器人精度的影响。

参考文献:

- [1] 孙龙飞, 房立金. 机械手臂结构设计与性能分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 402-410.
SUN Long-fei, FANG Li-jin. Design and Performance Analysis of Novel Robotic Arm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 402-410.
- [2] 叶长龙, 万增齐, 于苏洋, 等. 全方位装配机器人的刚度误差分析[J]. 机械设计与制造, 2021(4): 287-292.
YE Chang-long, WAN Zeng-qi, YU Su-yang, et al. Stiffness Error Analysis of an Omni-Directional Assem-

- bly Robot[J]. Machinery Design & Manufacture, 2021(4): 287-292.
- [3] PRADEEP G M, SANKARAMOORTHY T, ELANGO M, et al. Structural Analysis and Mechanical Properties of Thermal Battery by Flexible Phase Change Materials [P.C.M.][J]. Materials Today: Proceedings, 2021.
- [4] 黎田, 胡晓雪, 姚为, 等. 机器人在航天装备自动化装配中的应用研究[J]. 航空制造技术, 2014, 57(21): 102-104.
- LI Tian, HU Xiao-xue, YAO Wei, et al. Research on Application of Robot in Space Equipment Automatic Assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(21): 102-104.
- [5] 李翰朋, 宣兆龙, 李天鹏, 等. 弹载电池应用现状及发展方向[J]. 电源技术, 2018, 42(11): 1761-1763.
- LI Han-peng, XUAN Zhao-long, LI Tian-peng, et al. Application Situation and Development Direction of Battery in Ammunition[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2018, 42(11): 1761-1763.
- [6] CAO Yong, DONG Liang-ping, DENG Ya-feng, et al. Working Temperature Maintenance of Thermal Batteries by Using a Slow Heat Supply Component with Layer Structure and Its Positive Effect on the Improvement of Electrochemical Performance[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 222: 109036.
- [7] LI Qing, SHAO Yu-qiang, SHAO Xiao-dong, et al. Activation Process Modeling and Performance Analysis of Thermal Batteries Considering Ignition Time Interval of Heat Pellets[J]. Energy, 2021, 219: 119631.
- [8] 季旭全, 王君臣, 赵江地, 等. 基于机器人与视觉引导的星载设备智能装配方法[J]. 机械工程学报, 2018, 54(23): 63-72.
- JI Xu-quan, WANG Jun-chen, ZHAO Jiang-di, et al. Intelligent Robotic Assembly Method of Spaceborne Equipment Based on Visual Guidance[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(23): 63-72.
- [9] 胡瑞钦, 张立建, 孟少华, 等. 基于柔顺控制的航天器大部件机器人装配技术[J]. 机械工程学报, 2018, 54(11): 85-93.
- HU Rui-qin, ZHANG Li-jian, MENG Shao-hua, et al. Robotic Assembly Technology for Heavy Component of Spacecraft Based on Compliance Control[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(11): 85-93.
- [10] 陈雨杰, 鲍劲松, 孔庆超, 等. 基于机器人的大尺寸舱段支架辅助装配方法[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2016, 42(5): 745-751.
- CHEN Yu-jie, BAO Jin-song, KONG Qing-chao, et al. The Method of Assembling Brackets in the Large Cabin Assisted by Industrial Robot[J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2016, 42(5): 745-751.
- [11] 范文强, 陈宝刚, 王志臣, 等. 基于装配轨迹在线修正的红外 LED 自动装配系统设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(8): 146-150.
- FAN Wen-qiang, CHEN Bao-gang, WANG Zhi-chen, et al. Infrared LED Automatic Assembly System Design Based on the Online Correction of Assembly Trajectory[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2020(8): 146-150.
- [12] 顾岩, 何其昌, 范秀敏, 等. 狭小空间虚拟人手臂装配运动规划及智能寻优[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(6): 1447-1455.
- GU Yan, HE Qi-chang, FAN Xiu-min, et al. Motion Planning and Intelligent Optimization of Virtual Human Arm for Narrow Space Assembly Simulation Task[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(6): 1447-1455.
- [13] 何启嘉, 王启明, 雷政. 基于改进遗传算法的 FAST 促动器油缸装配机器人运动学[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(19): 8072-8078.
- HE Qi-jia, WANG Qi-ming, LEI Zheng. Kinematics for Oil Cylinder Assembly Robot of FAST Actuators Based on Improved Genetic Algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(19): 8072-8078.
- [14] 谢习华, 范诗萌, 周烜亦, 等. 基于改进差分进化算法的机械臂运动学逆解[J]. 机器人, 2019, 41(1): 50-57.
- XIE Xi-hua, FAN Shi-meng, ZHOU Xuan-yi, et al. Inverse Kinematics of Manipulator Based on the Improved Differential Evolution Algorithm[J]. Robot, 2019, 41(1): 50-57.
- [15] 李清, 丰玉玺, 刘荣帅, 等. 2-UPS/(S+SPR)R 并联机构伴随运动与正反解分析[J]. 包装工程, 2020, 41(7): 164-168.
- LI Qing, FENG Yu-xi, LIU Rong-shuai, et al. Concomitant Motion and Forward and Inverse Solutions of 2-UPS/(S+SPR)R Parallel Mechanism[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(7): 164-168.
- [16] MAO Bing-yan, XIE Zhi-jiang, WANG Yong-bo, et al. A Hybrid Differential Evolution and Particle Swarm Optimization Algorithm for Numerical Kinematics Solution of Remote Maintenance Manipulators[J]. Fusion Engineering and Design, 2017, 124: 587-590.

责任编辑: 陈作