

分类号：TP241

密 级：公开

学校代码：10363

学 号：2210110106



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 工业机器人作业能耗评价和节
能策略研究

论 文 作 者	<u>欧阳俊祎</u>
校 内 导 师	<u>许德章 教授</u>
校 外 导 师	<u>李公文 高级工程师</u>
专业学位类别	<u>机械工程</u>
研究方向（领域）	<u>智能机器人</u>

论文提交日期： 2024 年 5 月 30 日

分类号：TP241

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2210110106

工业机器人作业能耗评价和节能策略研究

RESEARCH ON ENERGY CONSUMPTION EVALUATION AND ENERGY- SAVING STRATEGIES FOR INDUSTRIAL ROBOTS

学生姓名：	欧阳俊祎
校内导师：	许德章（教授）
校外导师：	李公文（高级工程师）
专 业：	机械工程
研究方向：	智能机器人

论文答辩日期： 2024 年 5 月 24 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：欧阳俊祯

日期：2024 年 5 月 28 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 _____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：欧阳俊祯

指导教师签名：i q i k 手

日期：2024 年 5 月 28 日

日期：2024 年 5 月 28 日

工业机器人作业能耗评价和节能策略研究

摘要

面对全球能源危机，绿色发展受到各领域高度重视。尤其在制造业，为了实现绿色生产，工业机器人被广泛应用，提高生产效率，同时减少能源消耗。中国工业机器人装机量占全球半数以上，但作业规划不当引发效率低下和能耗过高问题亟待解决。本文以工业机器人为研究对象，涵盖以下内容，工业机器人能耗构成、动力学模型建立、典型作业能耗及节能特性分析，以及层次分析法与模糊评价法的综合能耗评估。主要研究内容如下。

(1) 工业机器人能耗构成分析。根据工业机器人系统组成和工作原理揭示其能耗特征，依据“能量流”原理，分析能耗构成，包括输入、内部和输出能耗及其 22 个子维度；采用层次分析法，评估各维度在总能耗中所占比例，利用权重相乘法计算综合权重，为制定节能策略提供理论依据。

(2) 工业机器人节能策略研究。建立正逆运动学模型，基于多个逆解方案提出优化逆解能效策略，理论分析和案例验证表明，减少高功率电机作业和保持部分关节静止有效降低能耗；构建动力学模型，依据转速对动力学特性影响，提出优化转速能效策略，理论推导和案例对比分析，制定“转速-能耗”对照表，实时反馈调控转速，确保作业各阶段均以最节能速度运行，有效减少总能耗。综合两种策略，考虑不同作业任务的整体流程和单个工序对能耗影响，定义“任务级”和“过程级”优化层次，为不同作业场景节能策略研究提供理论基础。

(3) 码垛作业能耗及其节能策略应用。根据码垛作业需搬运和放置的特点，采用“任务级”优化，分析“门”字型和最短路径轨迹能耗，得到最短路径能耗最优，对比两种轨迹各轴电机的转角和能耗，揭示作业时间越长能耗越大、高功率电机短暂运行时能耗呈“抛物线”式增长的规律，验证优化逆解能

效策略可行性。

(4) 焊接作业能耗及其节能策略应用。针对作业速度和质量的关系，采用“过程级”优化，分析焊接速度与质量的耦合特性，引入比能耗衡量能源效率，讨论平面内及相邻平面间最短路径，利用优化转速能效结论，探究比能耗与转速关系，得到最优能耗策略，验证优化转速能效策略可行性。

(5) 工业机器人能耗评价研究。分析影响能耗诸多因素，提出一种基于层次分析和模糊评价法的综合评价法。依据第二章所述的能耗构成，构建能耗评价指标，利用层次分析和权重相乘法计算各指标综合权重，采用模糊评价法确定能耗等级，建立能耗综合评价体系。

研究工作的亮点和特色包括，优化逆解和转速能效策略，码垛和焊接作业能耗分析及建模，以及层次分析法和模糊评价法应用于能耗占比计算和能耗等级评价。

关键词：工业机器人，优化逆解，优化转速，层次分析法，模糊评价法

RESEARCH ON ENERGY CONSUMPTION EVALUATION AND ENERGY-SAVING STRATEGIES FOR INDUSTRIAL ROBOTS

ABSTRACT

Faced with the global energy crisis, green development is highly valued in various fields. Especially in the manufacturing industry, in order to achieve green production, industrial robots are widely used to improve production efficiency and reduce energy consumption. China's industrial robot installation accounts for more than half of the world's total, but the problems of low efficiency and high energy consumption caused by improper operation planning urgently need to be addressed. This article focuses on industrial robots and covers the following content: the composition of industrial robot energy consumption, establishment of kinetic models, analysis of typical operation energy consumption and energy-saving characteristics, as well as a comprehensive energy consumption evaluation using both Analytic Hierarchy Process (AHP) and Fuzzy Evaluation Method. The main research contents are as follows.

(1) Analysis of the energy consumption composition of industrial robots. Based on the system components and working principles of industrial robots, their energy consumption characteristics are revealed. According to the "energy flow" principle, the energy consumption composition is analyzed, including input, internal, and output energy consumption and their 22 sub-dimensions. Using AHP, the proportion of each dimension in the total energy consumption is evaluated, and the comprehensive weight is calculated using the weight multiplication method, providing a theoretical basis for formulating energy-saving strategies.

(2) Research on energy-saving strategies for industrial robots. Forward and inverse kinematic models are established. Based on multiple inverse solution schemes, optimized inverse solution energy efficiency strategies are proposed.

Theoretical analysis and case verification show that reducing the operation of high-power motors and keeping some joints stationary can effectively reduce energy consumption. A kinetic model is constructed, and based on the influence of rotational speed on kinetic characteristics, an optimized rotational speed energy efficiency strategy is proposed. Theoretical derivation and case comparison analysis lead to the creation of a "rotational speed-energy consumption" reference table, which provides real-time feedback control of rotational speed to ensure that operations at all stages run at the most energy-efficient speed, effectively reducing overall energy consumption. Combining these two strategies, considering the overall process and individual steps of different operational tasks on energy consumption, "task level" and "process level" optimization levels are defined, providing a theoretical basis for energy-saving strategy research in different operational scenarios.

(3) Energy consumption and application of energy-saving strategies in stacking operations. According to the characteristics of stacking operations requiring lifting and placing, "task level" optimization is adopted. Energy consumption for "gate" shaped and shortest path trajectories is analyzed, showing that the shortest path has optimal energy consumption. Comparing the angles of rotation and energy consumption of each axis motor for the two trajectories reveals patterns where longer operation times result in higher energy consumption, and high-power motors show a "parabolic" increase in energy consumption during brief operation periods, verifying the feasibility of the optimized inverse solution energy efficiency strategy.

(4) Energy consumption and application of energy-saving strategies in welding operations. Considering the relationship between operating speed and quality, "process level" optimization is used. The coupling characteristics of welding speed and quality are analyzed, specific energy consumption is introduced to measure energy efficiency, discussions on shortest paths within the plane and between adjacent planes are made, and using the optimized rotational

speed energy efficiency conclusions, the relationship between specific energy consumption and rotational speed is explored to obtain the optimal energy consumption strategy, validating the feasibility of the optimized rotational speed energy efficiency strategy.

(5) Research on energy consumption evaluation of industrial robots. Many factors affecting energy consumption are analyzed, and a comprehensive evaluation method based on AHP and the Fuzzy Evaluation Method is proposed. Based on the energy consumption composition described in Chapter 2, an energy consumption evaluation index is constructed. Using AHP and the weight multiplication method, the comprehensive weight of each index is calculated, and the fuzzy evaluation method is used to determine the energy consumption level, establishing a comprehensive energy consumption evaluation system.

The highlights and features of this research work include the optimized inverse solution and rotational speed energy efficiency strategies, energy consumption analysis and modeling for stacking and welding operations, as well as the application of AHP and fuzzy evaluation methods in calculating the proportion of energy consumption and evaluating energy consumption levels..

Author: Ouyang Junyi (School of Mechanical Engineering, Anhui Polytechnic University)

Supervised by: Xu Dezhong

KEY WORDS: Industrial Robots, Optimization Of Inverse Kinematics, Optimization Of Rotational Speed, Hierarchical Analysis Method, Fuzzy Evaluation Method.

目录

摘要	I
ABSTRACT	III
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外机器人作业能耗及节能研究现状	2
1.3 研究意义	7
1.4 论文主要内容及其组织结构	8
1.4.1 主要内容	8
1.4.2 章节安排	9
第 2 章 工业机器人作业能耗建模及节能策略分析	11
2.1 引言	11
2.2 典型研究对象和实验环境	11
2.3 机器人能耗构成及建模分析	14
2.4 工业机器人动力学建模及能效分析	17
2.4.1 运动学数学基础	17
2.4.2 运动学建模	20
2.4.3 优化逆解能效策略	28
2.4.4 动力学建模	32
2.4.5 优化转速能效策略	37
2.5 工业机器人典型作业优化	39
2.5.1 TL-机器人码垛作业	40
2.5.2 PL-机器人焊接作业	41
2.6 本章小结	41
第 3 章 工业机器人码垛作业能耗优化	42
3.1 引言	42
3.2 优化逆解能效策略在码垛中的应用	42
3.2.1 “门”字型轨迹作业	42
3.2.2 最短路径轨迹作业	47
3.3 结果分析	49
3.4 本章小结	51

第 4 章 工业机器人焊接作业能耗优化	53
4.1 引言	53
4.2 焊接作业速度与能耗耦合分析	53
4.3 转速优化能效策略在焊接中的应用	56
4.4 结果分析	58
4.5 本章小结	59
第 5 章 基于层次分析法的工业机器人作业能耗模糊综合评价	60
5.1 引言	60
5.2 工业机器人作业能耗评价流程及方案	60
5.3 基于层次分析法的指标组合赋权	61
5.3.1 基于层次分析法的工业机器人作业能耗评价	61
5.3.2 指标综合权重	66
5.3 模糊综合评价模型	67
5.3.1 构建隶属度矩阵	68
5.3.2 计算隶属度	68
5.4 本章小结	69
第 6 章 总结与展望	71
6.1 总结	71
6.2 展望	72
参考文献	73
攻读硕士期间学术成果	78
致谢	79

第 1 章 绪论

1.1 研究背景

随着全球对气候变化和可持续发展的关注持续加深，制造业在提升能效和实施减排措施方面的重要性日益凸显。作为国民经济的重要支柱，中国制造业已连续 14 年保持全球增加值首位，其碳排放量也随之增加。根据国际能源署（IEA）数据，制造业消耗了全球 33.25% 的能源，直接或间接导致大量 CO₂ 排放^[1-2]。在 2019-2022 年间，全球二氧化碳排放量经历了“V”字型变化。受新冠疫情冲击，2020 年全球排放量从 2019 年的 346.1 亿吨骤减至 327.3 亿吨。然而，随着疫情得到控制和经济活动的恢复，2021 年全球排放量反弹至 348.8 亿吨，比 2020 年上升 6.6%，比 2019 年微增 0.8%。到 2022 年，排放量进一步增至 354.2 亿吨，比 2021 年增加 1.6%，比 2020 年增长 8.2%，与 2019 年疫情前水平相比上升了 2.3%，表明社会经济活动已基本恢复至疫情前的常态。在过去四年中，中国的二氧化碳排放量持续位居全球首位，其份额从 30.5% 小幅上升至 30.9%，但人均二氧化碳排放量依然很低。同时，美国作为世界第二大碳排放国，其排放份额有轻微下降，从 14.7% 降至 14%，但人均二氧化碳排放量依然较高。这一数据反映中国和美国在全球排放中的主导地位，尽管美国的份额有所下降，但两国依然是全球最大的碳排放源^[3]。

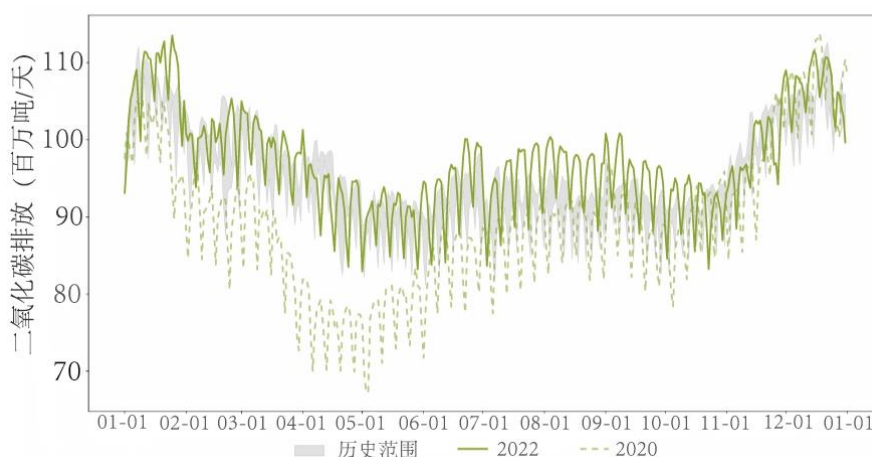


图 1-1 2019-2022 全球每日二氧化碳排放量

全球气候变暖受到了庞大碳排放量的显著影响，英国石油公司（BP）的报告揭示了工业制造领域碳排放持续上升的趋势，地球的气候系统产生了深远的负面影响^[4]。因此，国际社会采取了紧急行动，各国政府纷纷提出了实现碳中和的目标。虽然增加植被覆盖和植树等措施在一定程度上改善环境，但这些方法并不能从根本上解决碳排放问题。为

了有效地降低碳排放量，必须着眼于能源消耗的根源，尤其是制造业的能耗和碳排放源。因此，对于各国而言，降低制造业的能源消耗和提高能源效率已迫在眉睫，成为亟待解决的全球性挑战。

在实现制造业能效提升的过程中，工业机器人的作用不容忽视。近年来，中国的工业机器人产业显著增长，根据《2023 世界机器人报告》，2022 年中国的工业机器人安装量达到了 290258 台，同比增长了 5%^[5]，打破了 2021 年的历史记录。自 2017 年以来，中国机器人安装量的年均增长率保持在 13%。更为引人注目的是，2022 年中国工业机器人的装机量占据了全球市场的半壁江山，超过 50%，确立了其作为全球最大工业机器人市场的地位^[6]，反映了中国在推进制造业升级和转型过程中，对于自动化和智能制造技术的强烈需求与广泛应用。

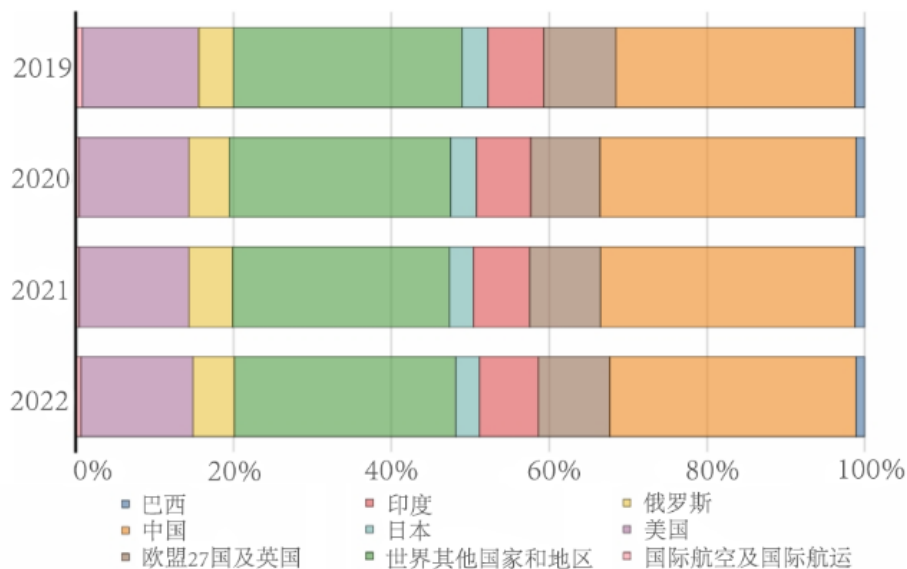


图 1-2 各国二氧化碳排放占比

1.2 国内外机器人作业能耗及节能研究现状

正如前文所指出的，随着工业机器人在制造业中的广泛应用不断推动着行业的节能减排进程，机器人作业过程中的能耗和节能策略已经成为了当下研究的焦点，吸引了众多从业者与学术研究者的目光。学者们正致力于探索更为高效的能源管理方法以及创新的节能策略，在提升制造效率的同时，进一步降低对环境影响。

针对工业机器人加工系统的能耗问题，2022 年，重庆大学的周进采用基于时间尺度函数的节能优化方法，分析机器人加工系统的能耗模型，提出结构化分解方式和参数化建模技术。通过修改机器人轨迹和建立任务能量特征模型，实现加工任务的节能优化^[7]。兰运坤采用运动学和动力学模型研究并优化 KUKA KR60-3 六自由度工业机器人的能耗，

分析电气系统内部的能量流动，建立能耗模型作为优化目标，提出一种基于变时间尺度缩放因子的能量特征参数模型，将能量消耗与时间缩放因子关联起来。同时，提出一种高效计算方法，降低工业机器人能耗和缩短动态规划算法运行时间^[8]。吴永强利用动力学参数辨识理论和遗传算法减小关节扭矩的预测误差。针对电气参数缺失问题，分析电气系统的功耗特性，使用最小二乘法建立损耗功率的线性模型，准确预测工业机器人的功率，同时应用 B 样条函数规划机器人轨迹，以能耗为目标函数，采用粒子群算法优化运行轨迹^[9]。

2016 年，武汉理工大学的李园明为了实现工业机器人制造系统的能量优化和节能减排，首先对该系统中的能耗特性分类描述和分析，将能耗划分为电机能耗、机械能耗、辅助部分能耗等，并建立相应的数学模型表达这些能耗的变化规律。针对现有能耗模型的不足，作者提出元信息、元动作、元能耗三个部分的工业机器人制造系统元状态概念，并设计一种实用化方法拟合能耗函数系数，从而建立工业机器人制造系统元状态能耗模型^[10]。2017 年，刘欢针对工业机器人在制造业中的广泛应用及其能耗问题的重要性，以串联工业机器人为对象，研究分析其能耗特性、动态建模，提出一种实用的参数辨识方法估计模型中的未知惯性参数，使能耗模型能够适应不同运行轨迹和负载条件^[11]。2018 年，徐威针对工业机器人在制造业中的能耗问题及其对动态性能的影响，分析平滑运行控制和能量效率，提出能量有效的平滑运行控制模型，利用改进的蜜蜂算法在关节空间内轨迹规划，实现能耗和关节冲击的最小化^[12]。2019 年，颜克提出一种物理模型驱动的数字建模方法分析和预测工业机器人的能耗。基于 Gbest 引导型蜂群算法，建立参数辨识的工业机器人物理能耗模型，结合数字描述与可视化数字虚拟建模理论和方法，利用 OWL 本体描述语言，建立工业机器人能耗领域的数字描述模型，实现能耗分析和预测^[13]。

2019 年武汉科技大学的周博为了解决工业机器人高能耗问题并实现生产效率与节能的平衡，提出一种面向时间与能耗的工业机器人运动参数优化方法。该方法通过建立时间和能耗广义模型，并采用改进的粒子群算法求解，获得时间和能耗综合最优的运动参数。所提出的优化模型和算法能够有效减少机器人的作业时间和能耗，实验验证了该方法的可行性和优越性^[14]。

针对工业机器人在轨迹规划中的能耗与工作效率问题，2020 年浙江大学的李昊天提出一种基于能耗和时间最优的综合轨迹规划模型，通过牛顿欧拉法建立机器人关节能耗模型，运用免疫算法优化逆解，结合内插法提升运动规划的效率。该综合模型能够有

效实现工业机器人的能耗降低和作业效率提高,为机器人提升生产效率提供重要的理论与实践意义^[15]。针对工业机器人生产线的优化调整需求,2021年,徐政提出基于 NSGA-II 算法的多目标平衡方法、效率和能耗约束的工作单元布局优化方法以及作业时间调整的能耗优化方法,能够有效提升生产线的平衡性、工作单元布局的效率和降低能耗,通过在 D 公司 DG15 产线及自动贴脚垫&logo 工作单元的应用测试,验证所提算法在平衡、布局和能耗优化方面的有效性^[16]。针对工业机器人在实际生产过程中的能耗问题,在 2021 年,谭颖基于新松 SR4B 工业机器人实训操作平台,提出一种针对机器人实训作业动作能耗的离线预测模型,建立运动学模型、设计轨迹规划和构建逆动力学模型,结合长短期记忆网络和门控循环单元技术,实现机器人运动过程中总能耗的有效预测^[17]。

针对工业机器人 IRB140 在运行过程中的能量损失问题,2020 年,宁夏大学的吕宁波建立机器人系统总能耗模型并运用遗传算法辨识摩擦参数,提出能耗最优的轨迹规划方法。基于能量模型的关节摩擦辨识方法和五次非均匀 B 样条曲线轨迹规划能有效降低工业机器人的能耗,为机器人节能运行提供有效的理论和实验支持^[18]。针对六自由度串联工业机器人的能耗优化问题,2015 年,湖南大学的罗正平通过运动学和动力学分析,建立轨迹能耗模型,采用蜜蜂进化型遗传算法求解最优轨迹。研究表明,该方法能够在满足约束条件下显著减少点焊机器人的能耗,为工业机器人的绿色制造提供了有效的轨迹规划策略^[19]。针对 MD1200-YJ 码垛机器人,2018 年,天津大学的贺莹采用 Kane 方程法和 Stribeck 摩擦模型等工具建立多因素动力学模型和能耗模型,并提出基于傅里叶级数和遗传算法的能耗优化方法。新提出的优化算法显著降低机器人的能耗并改善动态性能。此外,结合有限元分析和层次分析法对机器人本体结构优化,进一步验证了所提方法的有效性^[20]。针对高速重载码垛机器人在传统控制和轨迹规划方法中存在的问题,在 2016 年,哈尔滨工业大学的张世杰提出一种能耗最优轨迹规划方法和模糊滑模变结构控制策略。通过建立运动学和刚柔耦合动力学模型,并运用数值方法求解能耗最优问题^[21]。安徽工程大学的操鹏飞针对 ER20-C10 型工业机器人的高能耗问题,采用基于运动轨迹优化和运动速度控制的节能策略,使用五次 B 样条插值方法和改进遗传算法求得工业机器人的最优能耗轨迹,并结合动力学模型和 MATLAB 仿真分析确定最优控制速度^[22]。

学者们通过实验揭示工业机器人及其加工系统的能耗特性,确定关键影响因素。研究自动化领域的能效提升,提供理论与实践指导,有助于优化能源管理,减少环境影响。Oliva 等人提出一种用于位置控制伺服机制功率流评估的工程方法。系统由永磁同步电

机、标准功率转换器和直连滑块曲柄机构组成。文章描述功率流模型，讨论顺序识别技术，通过非侵入式实验测量确定连杆、电动马达和电子驱动器的动态参数，提出的模型能够准确预测系统内的主要功率损耗源^[23]。Um 等人针对远程激光焊接机器人在汽车后门组装过程中的能耗问题提出一种综合考虑工艺变化和机器规格的集成方法。运用深度学习构建融合工艺参数和机器规格影响的神经网络模型，使用从远程激光焊接机器人实验中收集的数据作为训练集，所提出的估算模型与线性回归方法相比展现出更高的准确度^[24]。Meike 团队针对中高负载工业机器人的能效使用，提出回收能量节能的创新方法。通过实验和模拟，验证机器人直流母线上电容性能量缓冲器的有效性，并推出“机器人能量团队（EnergyTeam）”概念，合并多个机器人功率控制器的直流母线，实现了减速机器人回收的能量与需要加速的机器人之间的受控流动。此外，文中还评估智能刹车管理、动能临时存储及能量交换等策略，并探讨不同使用方案如选择合适的机器人、生产间隙关机和设定待机模式的节能潜力，基于汽车制造业的实际生产数据估算了这些方法的节能效益^[25,26]。Rassölkin 等人探讨现代工业机器人的电能节约可能性及电力消耗特性，通过实验室内 IRB 1600 工业机器人的实际测量案例阐述机器人编程和定位方面的问题。通过实验数据分析，揭示工业机器人在不同操作过程中的能耗特点，提出相应的节能优化策略^[27]。

尽管实验方法在确定能耗特性时提供高度的准确性，但其实施往往伴随着较高的经济成本和较低的操作效率，同时对于能耗影响因素背后的深层逻辑机制的探讨也面临着一定的局限性。当前学术界在研究工业机器人系统的能耗行为及其影响因素时，普遍采取一种更为高效的方法，构建能耗分析模型，辅以针对性的实验验证。Sinaga 团队通过实验验证六轴工业机器人的动态模型，并分析其功率消耗及动态行为，同时考察机器人操作参数如负载和速度对功率消耗和动态行为的影响。研究通过对比仿真与实验结果，证明仿真模型的准确性和代表性。作者还指出重力负载对工业机器人扭矩和能量消耗的重大影响，特别是在上举运动期间，并通过基于模型的方法结合机电一体化仿真工具，分析重力负载对能耗的具体影响，为提高工业机器人系统的性能提供有价值的见解^[28,29]。Fysikopoulos 等人讨论远程激光焊接(RLW)技术相对于其主要竞争技术电阻点焊(RSW)的主要优势和局限性。研究一种评估策略，并在 DELMIA 决策支持工具中实现。通过汽车组装行业中汽车门焊接的实际工业案例测试和评估了所提出的方法^[30]。Pastras 等人通过优化机器人运动加速度曲线来节省潜在能量，研究限定在不改变运动时间的运动曲线上，因此无需新设备也不会改变生产周期时间。示例案例表明，简单原则导致改进后的

运动,并带来可观的能量收益,这对自动化制造工厂的能源成本有重大影响^[31]。**Kurilova-Palisaitiene** 等人研究工业机器人操作中的高能耗问题,并针对三种不同机器人设计概念评估节能潜力。通过文献回顾,比较传统串联机器人和并联运动机器人在标准作业任务中的能耗,结合前两者设计的 **PARAGRIP** 概念,并通过仿真实验分析其能耗。研究结果显示,不同机器人概念之间的能耗存在显著差异,在选定的工业应用场景中可实现约 40% 的节能潜力^[32]。**Garcia** 等人在三个模拟实验分析工业机器人的能耗,确定关键影响因素如关节速度和载荷。研究提出减少静止时间、优化运动路径和调整关闭伺服电机的计时器可节能。实验结果应用于汽车工业焊接机器人,证实这些方法的实际节能效果^[33]。**Stuhlenmiller** 等人强调准确建模对预测工业机器人使用寿命和评估最小能耗与最大寿命之间冲突的重要性。通过参数化研究,评估轨迹、运动时间和载荷的潜在益处及其影响。结果表明,综合考虑能耗和预期寿命为改善生命周期评估和优化生态与经济效率提供依据^[34]。

一些学者在机器人多轴驱动系统的能耗特性研究方面,综合分析机电模型特性,提高机器人能源效率。模型有助于理解复杂系统的能量行为,并揭示了多轴协同工作中的节能潜力。**Hansen** 等人通过轨迹优化和成本函数,实现工业机器人能耗的降低,分析机器人运动学、摩擦损耗及伺服驱动系统的能量交换机制。利用 **B** 样条函数定义点对点轨迹,结合梯度优化方法,确保算法适用于多种操纵臂且能有效地减少能耗^[35]。

还有一些学者提出新的能耗估算方法,将能耗成本与动力学分析分离。简化评估过程,使不同机器人系统的能效性能直接比较,促进能效优化研究。**Riazi** 等人提出一种优化程序,该程序在真实工业机器人上测试的轨迹中减少了多达 30% 的能耗和多达 60% 的峰值功率。评估多种成本函数,并在交流和直流操作的机器人单元中针对各种情况如不同的周期时间、负载以及单/多机器人案例测试算法。这项工作的意义不仅在于实现了显著的节能效果、实施简便并保持了路径和周期时间的稳定,还在于涵盖不同型号 **KUKA** 机器人在内的多样化测试场景^[36]。**Glorieu** 等人开发一种优化周期性多机器人系统轨迹和协调的新方法,通过非线性规划同时调整速度和时间延迟以避免碰撞。实验验证表明该方法能显著提高生产效率和平滑性,并在相同生产率下减少能耗,为多机器人系统的能效和生产力优化提供一种有效的解决方案^[37]。**A Vergnano** 等人提出一种优化机器人制造系统能耗的新方法。该方法将机器人能耗的详细评估嵌入到整体系统的调度模型中,通过求解混合整数非线性规划问题得到能量最优的调度方案。案例研究显示,与现有调度方法相比,该方法能显著降低能耗^[38]。

学者们在能效评估和仿真实验中引入了新理念。Hongtu Shi 等人根据工业用户的电力特性对工业用户电力系统分类。通过层次分析结构建立工业用户能效评价指标体系, 并使用 AHP-熵权法确定指标权重, 实现工业用户能效的综合评价。结果表明, 该能效评价指标体系能够系统科学地分析和评估工业用户的用电情况, 为工业用户的管理运营和节能改造提供有力支持, 有助于提升工业用户的能效水平和企业的竞争力^[39]。Othman 等人通过结合 CAD 软件 Solidworks 和 MATLAB/Simulink 仿真环境以及 SimMechanics 与 SimPowerSystems 库, 提出一种基于图形导向的工业机器人能耗建模方法。方法利用这些软件工具构建一个动态仿真模型, 反映机械臂结构和机器人驱动器在运动中的情况, 引入机械臂运动的动力学方程和机器人驱动器的动态方程, 建立能耗方程。通过沿选定轨迹不同速度的机器人运动仿真实验, 验证提出的方法, 并针对实际的工业机器人 KUKA KR 实验探究^[40]。王国顺应用数字孪生技术, 构建小型制造系统的三维立体模型, 研究重点在于绿色柔性车间的动态调度与能效优化问题, 提出改进保留策略的 NSGA-II 算法, 实现多目标优化, 包括最短加工完成时间、最小设备能耗和最高设备利用率^[41]。

当前学术界在工业机器人节能研究方面主要采用理论建模与实验验证相结合的方法, 通过轨迹规划、控制策略优化以及结构设计的改进实现能耗降低。然而, 关于工业机器人自身动力学属性的深入探究还相对有限。鉴于工业机器人的运动学存在多组逆解及其对能耗的显著影响, 研究基于动力学特性的能耗优化策略, 如逆解选择和转速调控显得尤为重要。因此, 本文在前人工作的基础上, 进一步研究如何通过优化机器人的控制策略和运动参数, 实现工业机器人高效率、低能耗作业。

1.3 研究意义

作为自动化与智能化的核心, 工业机器人在提升生产线效率和质量方面发挥着关键作用。然而, 机器人作业规划不合理会导致能源消耗。因此, 评估机器人的能耗并开发节能策略显得极为重要。通过优化机器人作业轨迹、速度, 合理分配作业任务, 控制电机运行策略, 降低大概率电机运行时间, 可以有效提高工业机器人的能源效率。这些措施不仅有助于维持生产效率, 还能减少制造业的碳足迹, 对实现碳中和目标具有积极影响。不断推进机器人技术的节能创新至关重要, 同时为工业的可持续发展提供动力, 为全球环境保护做出贡献。

(1) 细分能耗构成, 厘清关键因素。分析工业机器人系统组成, 并依据“能量流”原理, 本文详细分析工业机器人作业能耗的构成, 揭示了能量在输入、内部处理、以及输

出过程中的损耗分布情况及其建模特征，为建立精确的能耗计算模型和开展实验研究提供清晰的思路，同时也为深入探讨机器人节能策略奠定了坚实的理论基础。

(2) 分析理论原理，挖掘节能潜力。分析工业机器人运动学和动力学原理，建立运动学和动力学模型，结合多组逆解和转速特征，揭示了能耗优化的新途径。本文提出优化逆解能效策略和优化转速能效策略，并通过理论计算与实验探究验证这些方法的有效性和可行性。这些成果为进一步讨论不同作业场景下工业机器人的能耗特性及其优化策略提供了重要的理论基础和技术支撑。

(3) 理论指导实践，实施节能策略。分析工业机器人典型作业特点和能量损耗形式，构建不同作业场景的节能策略，为机器人作业能耗评价及能效优化提供了有效的方法和实用的应用参考，同时指导工业生产中的能源管理和优化，提高生产线的能效，降低运营成本。

(4) 构建综合评价，确定能耗级别。本文在不同作业场景下的能耗特性及优化策略的基础上，针对作业能耗构成复杂、能耗评价指标不全面、评价结果不准确的问题，提出了一种结合层次分析法和模糊评价法的能耗综合评价方法，确定工业机器人当前作业能耗级别，有利于及时调整作业方案。目前，该方法在工业机器人能耗评价领域研究尚浅，本文给出了具体的实时方案。

1.4 论文主要内容及其组织结构

1.4.1 主要内容

针对当前工业机器人作业能耗评价和节能策略研究存在的问题和不足，本文围绕工业机器人作业能耗评价和节能策略研究的关键问题开展如下研究。

(1) 根据工业机器人系统的组成和结构，依据“能量流”原理，构建了一个全面的作业能耗体系。阐明了输入、内部处理、输出过程中的能耗分布及其物理公式，分析了工业机器人的运动学和动力学特性，识别了关键能耗因素，提出了优化逆解和优化转速的能效策略。搭建了能耗测量实验台，设计了实验方法，通过理论计算与实验结果对比，验证了能效策略可行性。

(2) 基于工业机器人能耗特性，分析了机器人在不同作业场景下的运行特点，探究了作业时的能耗行为。基于此前提出的能效策略，分析了典型作业场景下的节能方法，为实际应用提供了切实可行的节能指导。

(3) 基于典型作业场景下工业机器人的能效分析，进一步研究了该型号机器人当前

作业能耗情况。提出了一种层次分析法结合模糊综合评价法的能耗综合评价方法，通过运用模糊综合评价法确定能耗级别，构建了完整的工业机器人能耗综合评价体系。该方法确定工业机器人当前作业能耗情况，及时引导作业任务调整和布局，为工业机器人作业的能效优化和成本降低提供指导。

1.4.2 章节安排

第一章，在制造业不断发展的今天，能源消耗成为一个不容忽视的问题。本章介绍论文研究背景，突出能源消耗问题的重要性；分析国内外工业机器人能耗及其节能策略方面的研究现状，阐述论文的研究意义，并列出课题来源；最后，概述每章节主要研究内容，以及论文的总体框架。

第二章，介绍 ER10-1600 工业机器人基本参数和搭建能耗监测实验平台；分析工业机器人系统的工作原理，构建能耗体系及其物理建模，确立能耗基本模型；建立机器人动力学模型，分析运动学与动力学特性，提出优化逆解和转速的能效策略，为后续章节的典型作业分析与能耗优化奠定了基础；分析典型作业时能耗特点，揭示工业机器人在不同作业场景下的能耗构成。

第三章，本章聚焦于码垛机器人的作业特点，基于第二章建立的理论和实验基础，分析码垛作业的“门”字型和最短路径的作业轨迹，通过实施优化逆解策略，利用理论推导并结合实验数据，对比其他文献能耗模型和实验测量的能耗数据，确定能耗误差。揭示了实现码垛作业最优能效的姿态和动作，明确码垛作业能耗减少的有效途径。

第四章，运用第二章建立的理论和实验基础，针对焊接机器人的特殊作业需求，深入分析了其能耗特征，并构建了相应的能耗模型。在焊接作业环境下应用优化转速策略，对比理论计算与实验测量的能耗结果，确定焊接过程中降低能耗的关键因素，实现了能效的最优化。

第五章，在不同作业场景下能耗特征及优化策略的研究基础上，构建一个全面合理的工业机器人作业能耗评价体系。采用层次分析法计算工业机器人作业能耗影响因素权重，结合模糊综合评价法确定能耗级别，提供一种评价工业机器人作业能耗等级的策略，并根据评价结果及时反馈调控作业。

第六章，总结本研究的核心要点，以及在工业机器人能耗评价和节能策略方面的研究成果。同时，展望了未来可能的研究方向，并为接下来的研究工作提供有益建议。

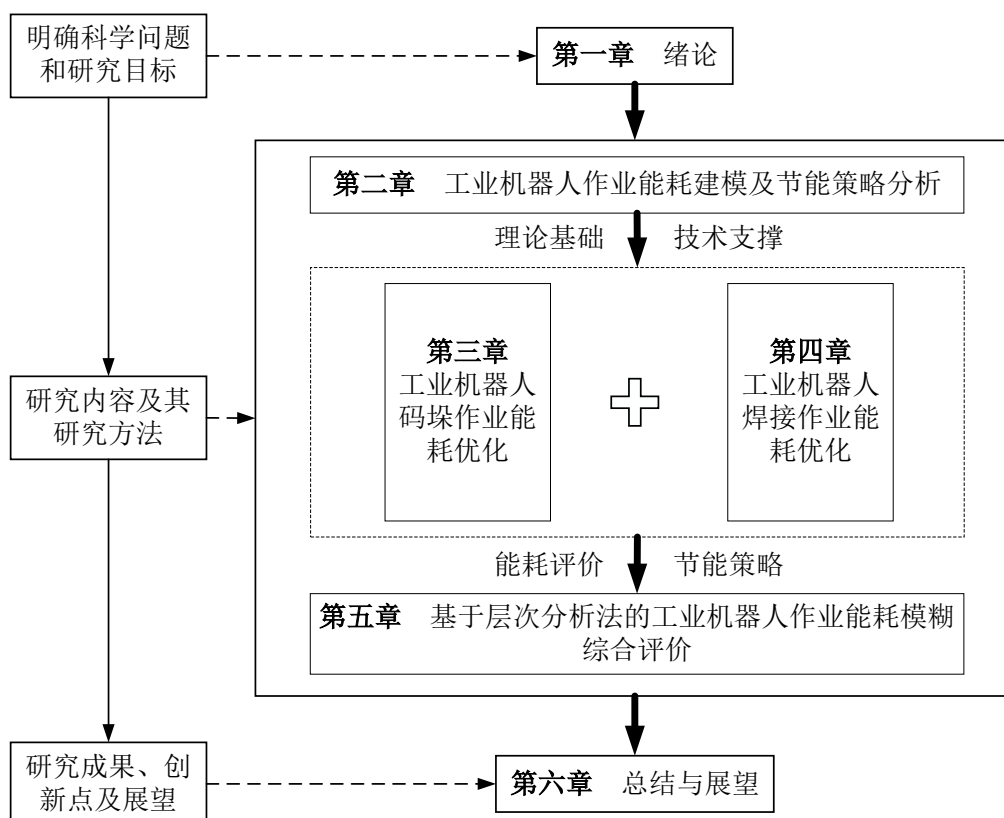


图 1-3 论文的总体组织框架

第 2 章 工业机器人作业能耗建模及节能策略分析

2.1 引言

随着工业自动化的迅猛发展，工业机器人已转变为制造领域的核心，提升生产效率、降低成本并确保作业精度。尽管机器人带来显著益处，不恰当的作业会导致不必要的能源浪费，提高能效成为研究的焦点。本章将探究工业机器人的能耗构成，建立运动学与动力学模型，描述本体作业特征，提出优化逆解及转速能效策略，根据不同作业任务整体流程和单个工序对能耗影响，定义“任务级”和“过程级”优化策略，为工业机器人节能优化提供理论支撑。

2.2 典型研究对象和实验环境

本研究聚焦于分析埃夫特智能装备股份有限公司生产的 ER10-1600 机器人，图 2-1 揭示了该机器人的外观与规格。表 2-1 详细列出 ER10-1600 机器人的基础规格参数，为后续分析提供了必要的技术数据。为了全面了解 ER10-1600 机器人的性能特点，图 2-2 展示了其操作的动作范围，提供评估机器人的工作空间直观的视图。表 2-2 不仅详细列出该机器人各轴的运动范围，还给出每个关节最大单轴速度。分析 ER10-1600 机器人的综合性能，研究转向和电机配置参数。表 2-3 详细列出了各轴电机的型号和额定功率等参数，这对评价机器人的动态性能至关重要。分析上述图表和数据，能够对 ER10-1600 机器人的性能有一个综合且深入的了解，为研究成果提供坚实的基础。



图 2-1 ER10-1600 机器人本体和各轴运动方向布置

表 2-1 ER10-1600 基本参数

序号	参数	详细数据
1	型号	ER10-1600
2	机构	多关节机器人
3	控制轴数	6 轴
4	手腕可搬运质量	10 kg
5	重复定位精度	± 0.05 mm
6	本体质量	185 kg
7	可达半径	1640 mm
8	本体防护等级	IP54/67（手腕）
9	控制柜防护等级	IP54
10	驱动方式	AC 伺服驱动
11	安装方式	地面、吊顶、壁挂、倾斜角
12	环境温度	0~45℃
13	环境湿度	RH $\leq$ 80%
14	振动加速度	4.9 m/s ² (0.5G 以下)

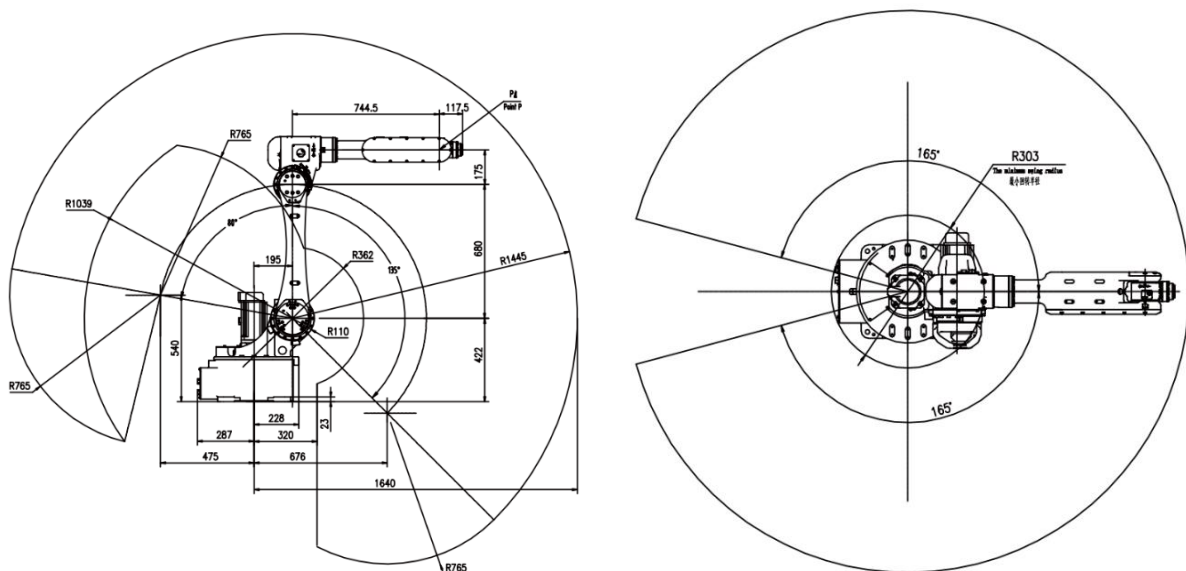


图 2-2 动作范围

表 2-2 运动范围及单轴速度

关节	运动范围	最大单轴速度
J1	$\pm 165^\circ$	170°/sec
J2	-135°/+80°	160°/sec
J3	-75°/+163°	180°/sec
J4	$\pm 180^\circ$	330°/sec
J5	$\pm 130^\circ$	360°/sec
J6	$\pm 360^\circ$	600°/sec

表 2-3 电机型号和功率

	电机型号	功率
J1	TSM1308N8225E726	0.4 KW
J2	TSM1308N8225E726	0.4 KW
J3	TSM1008N8235E736	1 KW
J4	TS4609N7191E200	0.4 KW
J5	TS4609N7193E200	0.4 KW
J6	TS4607N7193E200	0.2 KW

应用机器人控制器调试软件 ServoITE，搭建了机器人能耗测量实验平台，测量 ER10-1600 机器人运行时电流及解算其能耗，见图 2-3。直接读取电动机控制器内实时电流、电压、功率等数据，相较于周进、操鹏飞利用电流钳等外设仪器测量机器人系统电流值^[7,22]，测量结果更加精准。

ServoITE 软件由固高科技专为伺服驱动器参数设定和调试而设计的上位软件。其人性化的用户界面设计以及多功能模块，方便用户设置驱动器参数，掌握驱动器状态。ServoITE 提供多种调试方式，其中包括参数自动整定功能、快速向导功能调试基本参数，以及专为高级机电系统设计的近 500 个调试参数和变量。设计的多样性赋予用户在实操中选择最适合的调试方式更加灵活，提高调试效率。IO 配置灵活，ServoITE 支持多达 25 种类型的 Input 功能和 25 种类型的 Output 功能。用户自定义 Input 脚本触发，运行编写的脚本指令，使 IO 配置更加符合实际应用需求，提升系统的灵活性和可定制性。ServoITE 软件内置脚本运行功能和示波图功能，通过观测波形，使调试过程更加直观。用户能够在调试时通过内置的示波图功能实时观测系统状态，了解驱动器的性能实况。调试界面采用原理示意图，帮助用户直观地理解参数设

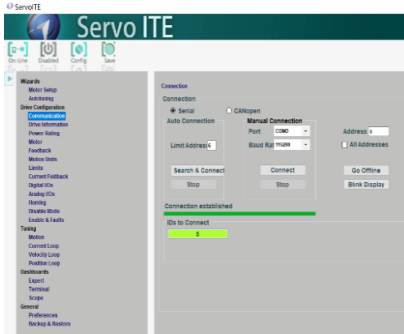
置的原理。直观性设计不仅使用户更轻松地理解和配置驱动器参数，同时提升操作友好性和用户体验。ServoITE 支持用户自行设定电流折返参数，提高驱动器和电机的安全等级。根据实际工作环境和要求，灵活调整电流折返参数，确保系统运行稳定。



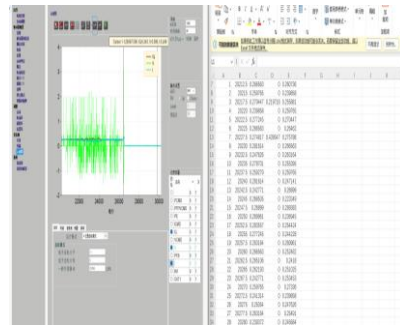
(a)实验环境



(b)设备连线



(c)数据连接成功



(d)数据采集系统界面

图 2-3 机器人能耗测量实验平台

2.3 机器人能耗构成及建模分析

工业机器人系统由五大核心部件构成，如图 2-4，主要有输入输出系统、控制系统、传感系统、驱动系统和执行系统。输入输出系统是机器人与外部的接口，负责接收指令和反馈信息。输入设备如按钮和触摸屏用于指令输入；输出设备如显示屏提供状态反馈，并与其他工业设备交互。控制系统相当于机器人的大脑，由微处理器和软件构成，负责解析输入指令并控制机器人动作，其性能决定了机器人的作业精度和效率。传感系统赋予机器人感知能力，包括视觉、力量、触觉等传感器，让机器人能够准确获取环境数据并作出响应。驱动系统是动力的核心，将控制信号转换为机械动作，常见的驱动方式有电动、液压和气动，各有适用范围和特点。执行系统，包括末端执行器和机械结构，如臂和手腕，执行具体任务如搬运、装配，设计时需考虑操作复杂性、载荷和精度要求。这些组件协同工作，确保工业机器人高效、精确地完成自动化任务。

深入分析工业机器人系统构成，其电能损耗遵循逐步细分的“能量流”模式，揭示工业机器人作业系统中能耗的复杂性及其精细的分布情况，主要涵盖了输入能耗、内部能

耗和输出能耗三个关键维度，每个维度又涉及诸多影响因素和细节，见图 2-5。

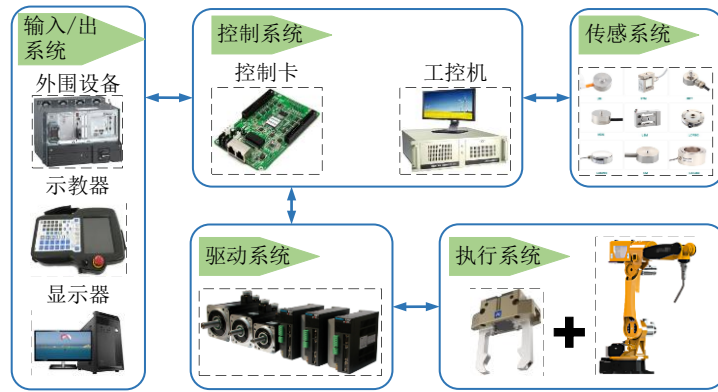


图 2-4 工业机器人系统组成

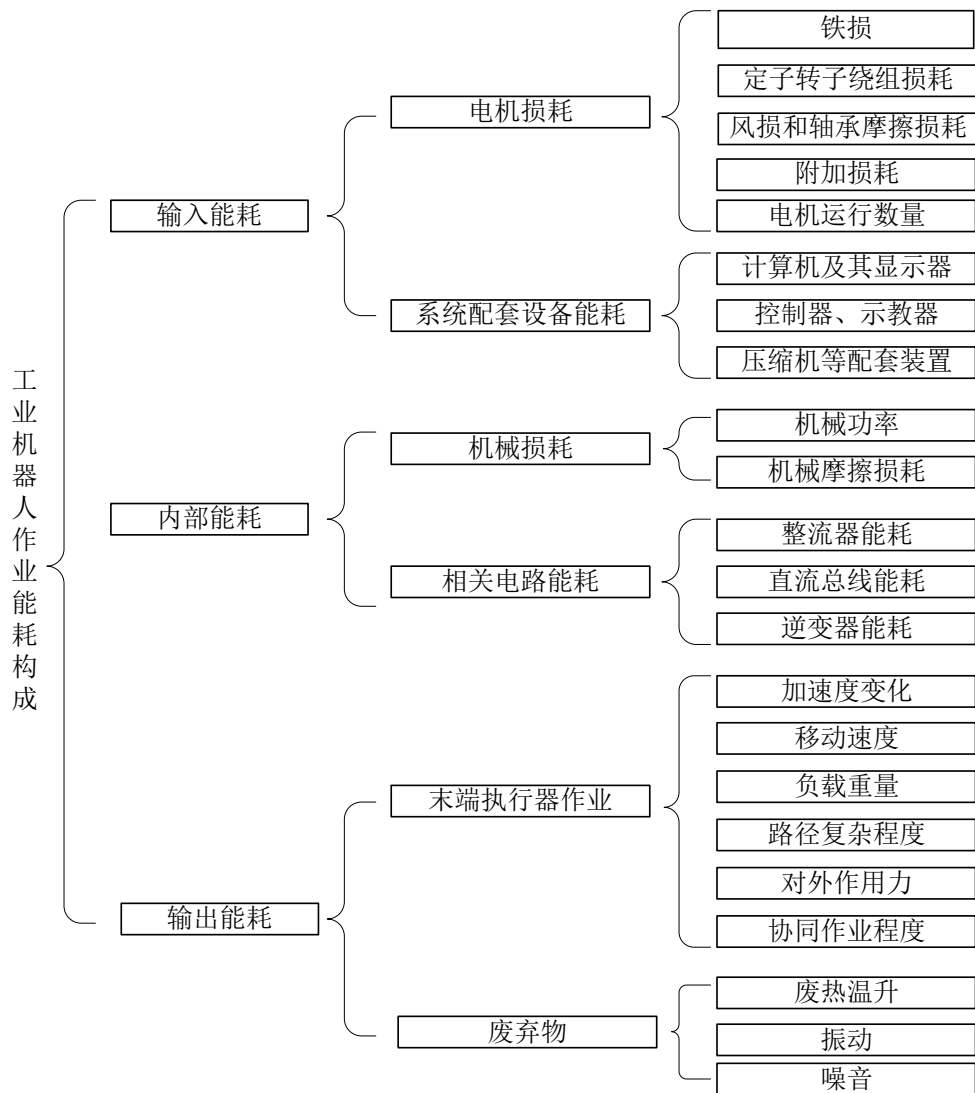


图 2-5 工业机器人作业能耗构成

输入能耗(E_{IEC})是工业机器人作业过程中能量消耗的起始阶段，占总能耗的 77.87%。主要由电机损耗(E_{ML})和系统配套设备的能耗(E_{SAE})组成。电机作为工业机器人的核心驱动部件，负责提供动力以驱动机械手臂、执行器等关键部件。本文第五章分析结果

表明电机损耗占据输入能耗绝大部分，达到了 85.47%。包括铁损（ E_{IL} ）、定子转子绕组损耗（ E_{SRWL} ）、风损以及轴承摩擦损耗（ E_{WBFL} ）、附加损耗（ E_{AL} ）等。为了协助机器人高效完成作业任务，系统配套设备如计算机及其显示器、控制器及其示教器、压缩机等配套装置，这些设备的能耗占据了输入能耗的 14.53%。输入能耗计算如下。

$$E_{IEC} = E_{ML} + E_{SAE} \quad (2-1)$$

内部能耗（ E_{IECN} ）占据总能耗的 9.23%。能耗涉及到作业过程中系统内部各个组件和操作中的能源损耗。机械损耗（ E_{MechL} ）和相关电路损耗（ E_{RCEC} ）是内部能耗的主要组成部分。本文第五章分析表明机械损耗占据内部能耗的 11.77%，这主要是由于执行器在作业过程中的机械功率以及关节运动时的机械摩擦所消耗的能量。同时，相关电路损耗占据了 88.23%，包括了整流器、直流总线和逆变器在能量转换和流动过程中的损耗。内部能耗计算如下。

$$E_{IECN} = E_{MechL} + E_{RCEC} \quad (2-2)$$

输出能耗（ E_{OEC} ）代表工业机器人作业最终环节的能量输出，它占总能耗的 12.81%。包括末端执行器作业（ E_{EEO} ）和废弃物（ E_W ）的产生。末端执行器作业是工业机器人能量消耗的终极目标，其效率受到加速度变化、移动速度、负载重量、路径复杂程度和外作用力等多种因素的影响。其末端执行器作业占据了 80%的能耗，而废弃物的产生则占据了 20%，主要以废热、振动、噪音等形式释放到环境中。输出能耗计算如下。

$$E_{OEC} = E_{EEO} + E_W \quad (2-3)$$

本文构建能耗监测实验台，用于测量工业机器人各电机作业时产生的功率、电流等数据。基于实测数据和第五章层次分析法，得到工业机器人作业系统能耗构成要素，各要素占总能耗比重见图 2-6。

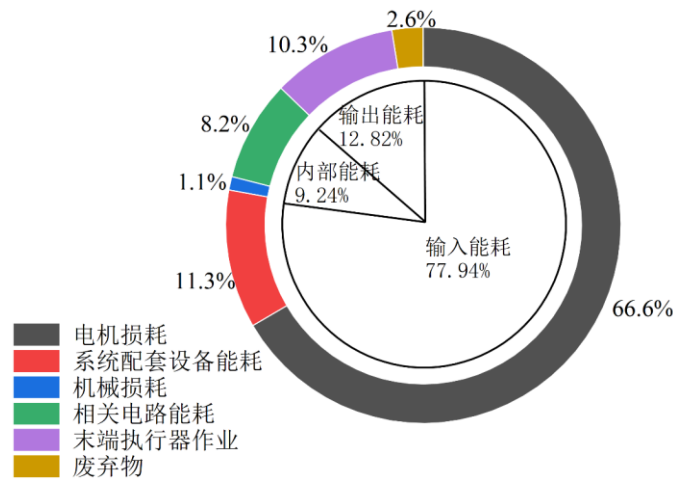


图 2-6 工业机器人系统能耗占比

详细分析工业机器人的能耗，考虑机器人在执行任务时各部分所消耗的能量。计算机器人的总能耗（ E_P ），分析机器人各部分的功率（ P_i ）随时间（ t ）的变化关系并积分。功率是指单位时间内完成工作或消耗能量的速率，而能耗则是功率与时间的积分，表示在某段时间内消耗的总能量。

$$E_P = \int_{t_0}^{t_f} P dt \quad (2-4)$$

其中， E_P 是机器人从 t_0 到 t_f 的总能耗， P 是机器人在时间 t 的瞬时功率， t_0 是机器人开始作业的时间， t_f 是机器人结束作业的时间。

根据图 2-5 的能耗分解，可知机器人总能耗由输入能耗（ E_{IEC} ）、内部能耗（ E_{IECN} ）和输出能耗（ E_{OEC} ）构成，则 E_P 表达式如下。

$$E_P = E_{IEC} + E_{IECN} + E_{OEC} \quad (2-5)$$

$$\begin{cases} E_{IEC} = E_{ML} + E_{SAE} = \int_0^T (P_{ML} + P_{SAE}) dt \\ E_{IECN} = E_{MechL} + E_{RCEC} = \int_0^T (P_{MechL} + P_{RCEC}) dt \\ E_{OEC} = E_{EEO} + E_W = \int_0^T (P_{EEO} + P_W) dt \end{cases} \quad (2-6)$$

其中， P_{ML} 、 P_{SAE} 、 P_{MechL} 、 P_{RCEC} 、 P_{EEO} 和 P_W 分别是电机损耗、系统配套设备的能耗、机械损耗、相关电路损耗、末端执行器作业和废弃物的功率， T 表示作业的时间。

2.4 工业机器人动力学建模及能效分析

分析工业机器人动力学，阐述机器人作业时力与力矩之间的关系。研究包含机器人的运动学和动力学特性分析，运动学方程阐述机器人的位置、速度与加速度间的作用关系，提供机器人位置空间的数学模型。动力学方程揭示机器人作业时，力和力矩与运动的关系。应用动力学方程，预测和控制机器人的行为，可设计出更节能的工业机器人系统。

2.4.1 运动学数学基础

有效控制工业机器人在空间运动轨迹，完成既定的任务，必须精确了解机器人手部在空间中瞬时的位置和姿态。采用 D-H 参数法求解，得出坐标变换之间的平移和旋转的具体参数，为机器人的准确运动提供了数学基础。当机器人从静止状态转入运动状态时，涉及到一系列动态过程，包括运动中的力、速度、加速度等。在这个背景下，建立雅可比矩阵变得至关重要，分析机器人运动和受力关系。仿真分析正逆动力学，获得机器人在不同工作场景下的动态响应。

本文建立直角坐标系 $\{A\}$ ，利用 3×1 的位置矢量描述该空间内任意点的位置。任意点 P 位置用 3×1 的列矢量 ${}^A P$ 表示，如式(2-7)。其中， P_x, P_y, P_z 分别代表点 P 在坐标系 $\{A\}$ 中的三个坐标分量，且分量构成位置矢量 ${}^A P$ ，如图 2-7(a)所示。其中，上标 A 表示参考坐标系 $\{A\}$ 。

$${}^A P = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

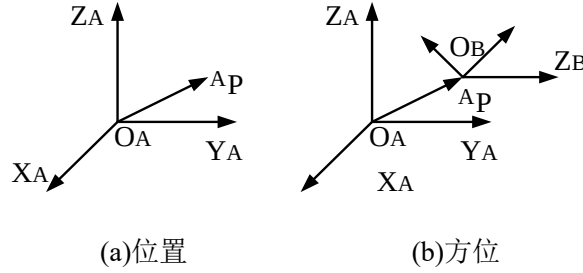


图 2-7 坐标描述

在研究机器人运动与操作时，需要关注空间中某一点的位置，深入描述物体的方位。为了准确描述物体方位，常引入一个坐标系，该坐标系与物体相固定。为了确保某刚体 B 在空间中保持稳定，引入一个直角坐标系 $\{B\}$ ，与该刚体紧密相连，见图 2-7(b)。坐标系 $\{B\}$ 的三个单位主矢量 x_B, y_B, z_B 相对于参考坐标系 $\{A\}$ 的方向余弦被整合成一个 3×3 的矩阵表示刚体 B 相对于坐标系 $\{A\}$ 的方位。

$${}^A R_B = [{}^A x_B \quad {}^A y_B \quad {}^A z_B] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

式中， ${}^A R_B$ 表示旋转矩阵，其中上标 A 表示参考坐标系 $\{A\}$ ，而下标 B 则代表被描述的坐标系 $\{B\}$ 。尽管旋转矩阵 ${}^A R_B$ 包含了 9 个元素，但实际上只有其中的 3 个是独立的。这是因为 ${}^A R_B$ 的三个列矢量，即 $[{}^A x_B \quad {}^A y_B \quad {}^A z_B]$ 均为单位向量，且正交。因此，这 9 个元素必须满足约束条件，见式(2-9)，即正交条件。

$$\begin{cases} {}^A x_B \cdot {}^A x_B = {}^A y_B \cdot {}^A y_B = {}^A z_B \cdot {}^A z_B = 1 \\ {}^A x_B \cdot {}^A y_B = {}^A y_B \cdot {}^A z_B = {}^A z_B \cdot {}^A x_B = 0 \end{cases} \quad (2-9)$$

分别绕 x 、 y 、 z 轴旋转角度 θ 的各旋转矩阵变换，其矩阵表示如下

$$\begin{cases} R(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \\ R(y, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \\ R(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2-10)$$

描述刚体 **B** 在三维空间中的位姿，利用位置矢量描述空间中点的位置，并利用旋转矩阵定义物体的方向，得到具体位姿。通常情况下，将物体 **B** 与特定的坐标系 **{B}** 关联，其中，坐标系 **{B}** 的原点通常选择在物体 **B** 的特征点，如质心位置。相对于参考坐标系 **{A}**，坐标系 **{B}** 的原点位置和坐标轴方向分别由位置矢量 ${}^A P_B$ 和旋转矩阵 ${}^A R_B$ 描述。因此，详细描述坐标系 **{B}**，刚体 **B** 的位姿准确表达

$$\{B\} = \{ {}^A R_B \quad {}^A P_B \} \quad (2-11)$$

在不同坐标系中，在空间中任意点 **P** 的描述存在差异。若阐明从一个坐标系到另一个坐标系的描述关系，需探讨平移坐标变换和旋转坐标变换。假设坐标系 **{B}** 与 **{A}** 的方向相同，但原点并不重合。借助矢量 ${}^A P_B$ 描述相对于 **{A}** 的位置，见图 2-8，将 ${}^A P_B$ 称为 **{B}** 相对于 **{A}** 的平移矢量。如果点 **P** 在坐标系 **{B}** 中的位置为 ${}^B P$ ，那么点 **P** 相对于坐标系 **{A}** 的位置矢量 ${}^A P$ 可通过矢量相加获得，见式(2-12)。

$${}^A P = {}^B P + {}^A P_B \quad (2-12)$$

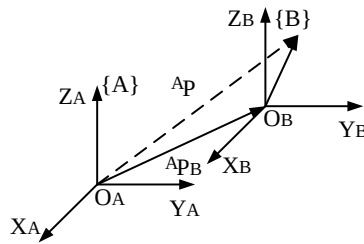


图 2-8 坐标平移变换

假设坐标系 **{B}** 与 **{A}** 共享相同的坐标原点，仅方向不同，如图 2-9 所示。通过旋转坐标矩阵 ${}^A P_B$ 描述 **{B}** 相对于 **{A}** 的方向。同一点 **P** 在两个坐标系 **{A}** 和 **{B}** 中的描述，即 ${}^A P$ 和 ${}^B P$ ，具有以下变换关系

$${}^A P = {}^A P_B {}^B P \quad (2-13)$$

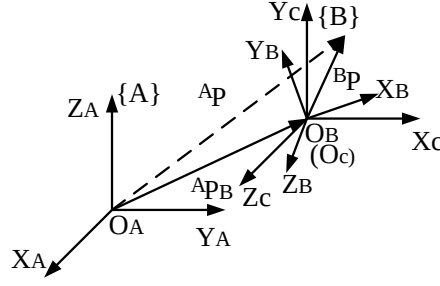


图 2-9 坐标平移及旋转变换

在最一般的情形下，坐标系{B}的原点既不与{A}的原点重合，也与{A}的方位不同。利用位置矢量 ${}^A P_B$ 描述{B}的坐标原点相对于{A}的位置，并使用旋转矩阵 ${}^A R_B$ 描述{B}相对于{A}的方位。具体表现在图 2-9 中，此时 ${}^A P$ 和 ${}^B P$ 有以下变换关系。

$${}^A P = {}^A P_B + {}^A R_B {}^B P \quad (2-14)$$

如果在一个直角坐标系中已知某点的坐标，那么通过齐次坐标变换求得该点在另一个直角坐标系中的坐标。尽管变换式(2-14)对于点 ${}^B P$ 而言是非齐次的，但将其表示为等效的齐次变换形式，见式(2-15)。

$$\begin{bmatrix} {}^A P \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A P_B & {}^A R_B \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^B P \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-15)$$

其中， 4×1 的列矢量表示三维空间的点，被称为点的齐次坐标，记为 ${}^B P$ 或者 ${}^A P$ 。将式(2-15)写成矩阵形式，见式(2-16)。

$${}^A P = {}^A T_B {}^B P \quad (2-16)$$

其中，齐次坐标 ${}^B P$ 或者 ${}^A P$ 表示为 4×1 的列矢量。齐次变换矩阵 ${}^A T_B$ 是一个 4×4 的方阵，描述了平移变换和旋转变换，见式(2-17)。

$${}^A T_B = \begin{bmatrix} {}^A R_B & {}^A P_B \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-17)$$

2.4.2 运动学建模

工业机器人采用灵活的开链式结构，能精确控制各连杆的位置、速度和加速度，适应多样化作业任务。提高了机器人在自动化生产线上的适应性，优化制造效率和产品质量。利用运动控制系统，机器人能够执行复杂操作任务，有利于生产线升级。

工业机器人通常由转动关节和移动关节组成，每个关节均具有一个自由度，构成 6 个自由度的机械手，由 6 个连杆和 5 个关节组成。其中，基座被称为连杆 0，不计入这 6 个连杆中。关节 1 将连杆 1 与基座相连接，而关节 2 则将连杆 2 与连杆 1 连接，以此

类推。分析工业机器人动力学时，将其操作臂视为一系列刚体通过关节相连的运动链，这些刚体即为连杆^[42]。为了处理操作臂的复杂几何参数，需要在每个连杆上固定一个连杆坐标系，并描述这些坐标系之间的关系。连杆的功用是固定关节轴线的几何关系，见图 2-10。杆件*i*是由关节轴线*i*和*i+1*的公法线长度为 a_i 和夹角 α_i 规定的， a_i 和 α_i 表示杆件*i*的程度和扭角， a_i 指向从轴线*i*公垂线转至轴线*i+1*，这样就完全定义杆件*i*的特征。

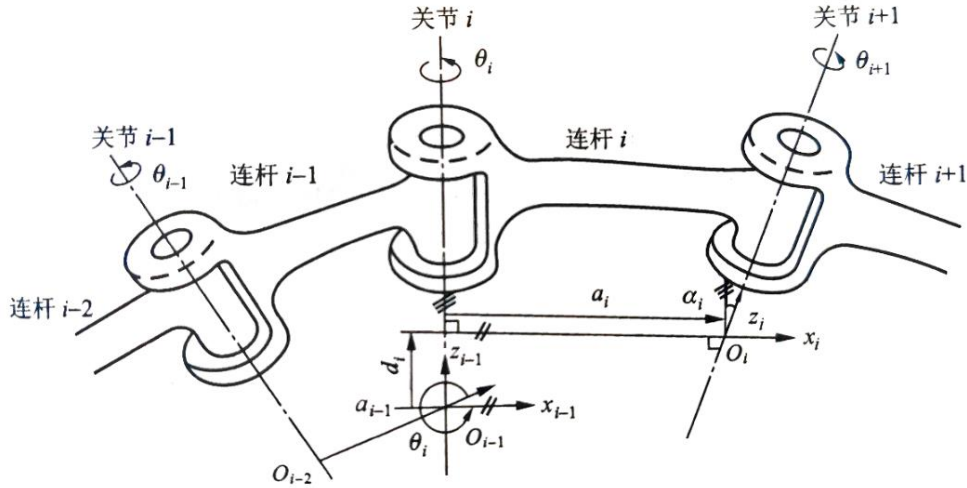


图 2-10 转动关节连杆 D-H 坐标系示意图

每个连杆的特征由四个参数 a_i 、 α_i 、 d_i 和 θ_i 描述。其中， a_i 和 α_i 用于表征连杆本身的特性，而 d_i 和 θ_i 则用于描述连杆与前一连杆之间的连接关系。在旋转关节*a*-1 的情况下，只有 θ_i 是关节变量，而其他三个参数保持不变；而在移动关节*a*-1 的情况下，仅有 d_i 是关节变量，而其他三个参数保持固定。这种描述机构运动的方法被称为 D-H 方法，而相应的坐标系被称为 D-H 坐标系。

描述工业机器人的每个杆件，需要建立相应的坐标系，并利用齐次坐标变换确定杆件位置和姿态。通常，用齐次变换矩阵来描述一个杆件与相邻杆件之间的关系，被称为 A 矩阵或连杆变换矩阵。每个 A 矩阵表示杆件坐标系之间的平移和旋转关系。一旦为所有杆件规定了坐标系，就按照以下顺序使用旋转和平移来建立相邻两个杆件（*i* 与 *i+1*）之间的相对关系。首先，绕 z_i 轴旋转角 θ_{i+1} ，使 x_i 旋转至 x_{i+1} 同平面；其次，沿着 z_i 轴平移距离 d_{i+1} 至 x_{i+1} 同一直线上；再次，沿着*i+1*轴平移距离 a_i ，把杆件*i*的坐标系原点移动至杆件*i+1*的坐标系原点；最后，绕 x_i 旋转 α_i 角，使其*i*与*i+1*在同一条直线上^[43]。

杆件*i*与杆件*i+1*相对位置关系可用四个齐次变换来描述，并称为 A_i 。

$$A_i = Rot(z, \theta_{i+1}) Tran(0, 0, d_{i+1}) Trans(a_{i-1}, 0, 0) Rot(x, \alpha_i) \quad (2-18)$$

展开式(2-18)可得式(2-19)。

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_{i+1} & -\sin \theta_{i+1} \cos \alpha_i & \sin \theta_{i+1} \sin \alpha_i & \alpha_i \cos \theta_{i+1} \\ \sin \theta_{i+1} & \cos \theta_{i+1} \cos \alpha_i & -\cos \theta_{i+1} \sin \alpha_i & \alpha_i \sin \theta_{i+1} \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_{i+1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-19)$$

对于关节处, A_i 矩阵为

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_{i+1} & -\sin \theta_{i+1} \cos \alpha_i & \sin \theta_{i+1} \sin \alpha_i & 0 \\ \sin \theta_{i+1} & \cos \theta_{i+1} \cos \alpha_i & -\cos \theta_{i+1} \sin \alpha_i & 1 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_{i+1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-20)$$

工业机器人末端装置即为连杆 6 的坐标系, 它与连杆坐标系 i 的关系可由 ${}^i T_6$ 表示。

$${}^i T_6 = A_1 A_{1+1} \cdots A_6 \quad (2-21)$$

可得连杆变换一般表达式如下。

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & \alpha_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -d_i \sin \alpha_{i-1} \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & d_i \cos \alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-22)$$

已知工业机器人运动模型, 杆件几何参数和关节角矢量 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$, 其中 n 表示自由度数。正运动学中需要求解机器人末端执行器相对于参考坐标系的位置和姿态。如果已知机器人关键几何参数, 并且给定了机器人末端执行器相对于参考坐标系的期望位姿, 那么在逆运动学问题中, 需要确定机器人是否能够使其末端执行器达到所期望的位姿^[43]。若能够达到, 还需要确定机器人在满足相同条件时可能存在不同作业状态, 如图 2-11。

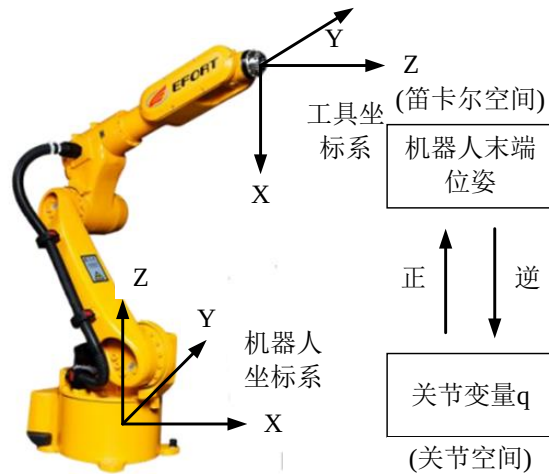


图 2-11 正逆运动学图示

将机器人的六个关节转动角度 (θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 、 θ_5 、 θ_6) 输入正运动学方程, 得到机器人末端在三维空间中的位姿矩阵。通过调整本文研究的机器人初始状态, 如图 2-12。测量机器人的各部分尺寸, 得到机器人连杆的参数值, 见表 2-3。根据式 (2-15), 结合矩阵传递特性, 得到机器人从底座到末端的齐次变换矩阵如下。

$${}^0T_6 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 {}^5A_6 \quad (2-23)$$

利用 MATLAB 软件仿真表 2-4 参数, 结果如图 2-13, 仿真模型与实体模型完全一致。

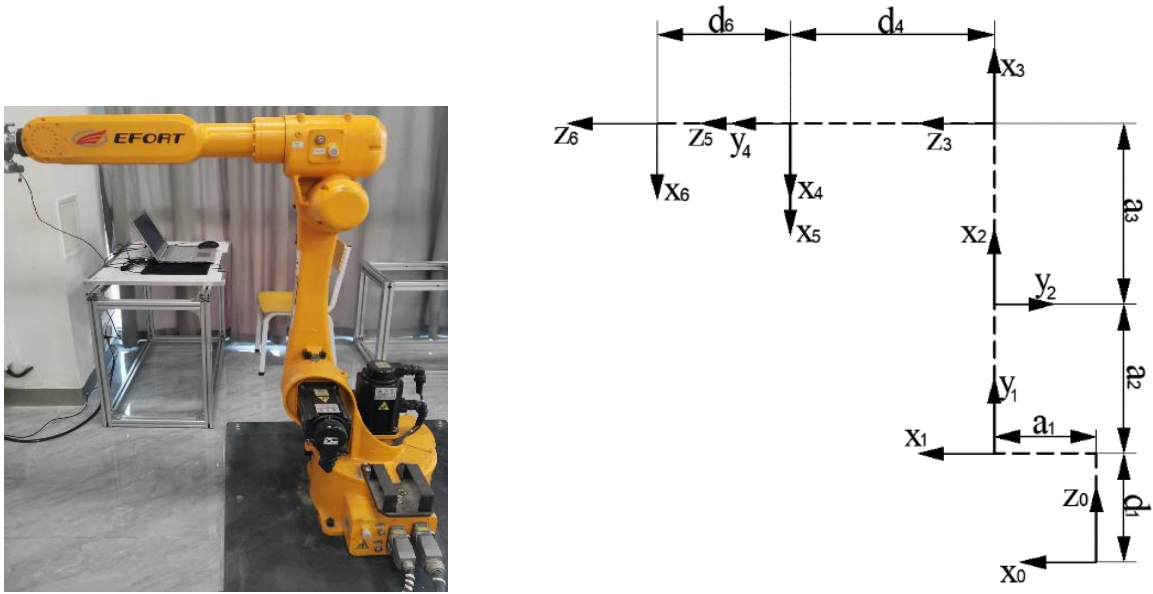


图 2-12 机器人状态及连杆 D-H 坐标系

表 2-4 机器人各连杆参数表

连杆 i	关节转角 θ_i	连杆偏距 d_i	连杆长度 a_{i-1}	连杆扭角 α_{i-1}	转角范围
1	θ_1	435 mm	195 mm	$\pi/2$	$-165^\circ \sim 165^\circ$
2	θ_2	0	680 mm	0	$-135^\circ \sim 80^\circ$
3	θ_3	0	175 mm	$\pi/2$	$-75^\circ \sim 165^\circ$
4	θ_4	744.5 mm	0	$\pi/2$	$-180^\circ \sim 180^\circ$
5	θ_5	0	0	$-\pi/2$	$-130^\circ \sim 130^\circ$
6	θ_6	117.5 mm	0	0	$-360^\circ \sim 360^\circ$

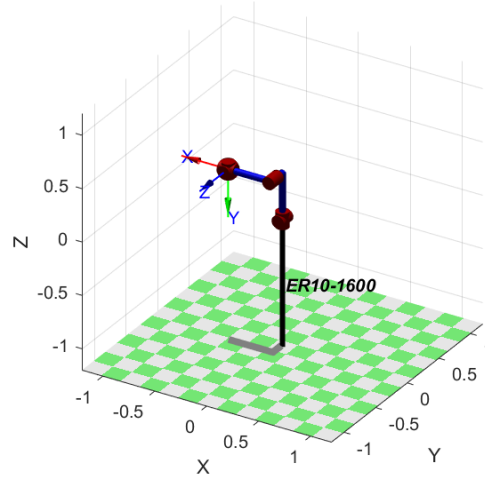


图 2-13 MATLAB 建模仿真

将机器人各连杆的参数代入式(2-11)中，得到机器人各连杆间的变换矩阵如下。

$$\begin{aligned}
 {}^0_1A &= \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 & a_1 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & a_1 \sin \theta_1 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; {}^1_2A = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & a_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 1 & a_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^2_3A &= \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & 0 & \sin \theta_3 & a_3 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & 0 & -\cos \theta_3 & a_3 \sin \theta_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; {}^3_4A = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & 0 & \sin \theta_4 & 0 \\ \sin \theta_4 & 0 & -\cos \theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^4_5A &= \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & 0 & -\sin \theta_5 & 0 \\ \sin \theta_5 & 0 & \cos \theta_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; {}^5_6A = \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & 0 \\ \sin \theta_6 & \cos \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (2-24)$$

则机器人从底座到末端的齐次变换矩阵为式(2-25)。

$${}^0_6T = {}^0_1A {}^1_2A {}^2_3A {}^3_4A {}^4_5A {}^5_6A = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-25)$$

在式(2-19)中， $\mathbf{n}$ 、 $\mathbf{o}$ 、 $\mathbf{a}$ 分别代表机器人末端坐标系各个坐标轴在底座坐标系中的投影向量，而 $\mathbf{p}$ 表示机器人末端坐标系的坐标原点在底座坐标系中的各轴坐标值。其各个部分具体表示为

$$\begin{cases}
 n_x = c_6[c_5s_1s_4 + c_1(c_5c_4c_{23} + s_5s_{23})] + s_6(c_4s_1 - s_4c_1c_{23}) \\
 n_y = -s_6(c_1c_4 + s_4s_1c_{23}) - c_6[c_5c_1s_4 - s_1(c_5c_4c_{23} + s_5s_{23})] \\
 n_z = -c_6(s_5c_{23} - c_4c_5s_{23}) - s_4s_6s_{23} \\
 o_x = c_6(c_4s_1 - s_4s_1c_{23}) - s_6[c_5s_1s_4 + c_1(c_5c_4c_{23} + s_5s_{23})] \\
 o_y = -c_6(c_1c_4 + s_4s_1c_{23}) + s_6[c_5s_1s_4 - s_1(c_5c_4c_{23} + s_5s_{23})] \\
 o_z = s_6(s_5c_{23} - c_4c_5s_{23}) - s_4c_6s_{23} \\
 a_x = c_5c_1s_{23} - s_5(s_1s_4 + c_4c_1c_{23}) \\
 a_y = c_5c_1s_{23} + s_5(c_1s_4 - c_4s_1c_{23}) \\
 a_z = -c_5c_{23} - c_4c_5s_{23} \\
 p_x = d_4c_1s_{23} - d_6[s_5(s_1s_4 + c_4c_1c_{23}) - c_5c_1s_{23}] + a_1c_1 + a_2c_1c_2 + a_3c_1s_{23} \\
 p_y = d_4c_1s_{23} + d_6[s_5(c_1s_4 - c_4s_1c_{23}) + c_5s_1s_{23}] + a_1s_1 + a_2s_1c_2 + a_3s_1s_{23} \\
 p_z = d_1 - d_4c_{23} + a_2s_2 - d_6(c_5c_{23} + c_4s_5s_{23}) + a_3s_{23}
 \end{cases} \quad (2-26)$$

式中, $\sin \theta_i$ 表示 s_i , $\cos \theta_i$ 表示 c_i , $\sin(\theta_m + \theta_n)$ 表示 s_{mn} , $\cos(\theta_m + \theta_n)$ 表示 c_{mn} 。

TCP (工具中心点) 的运动路径预先规划是一项必要且复杂的工作。路径上的每个点都有其笛卡尔空间中的位置和姿态。但是, 机器人系统只能控制各个转动关节的角度, 因此需要把路径点的位置和姿态转换为关节角度。这个转换过程就涉及到逆运动学的求解, 它是一个非线性问题, 比正运动学更难解决。对于多自由度的机器人, 尤其是 6 自由度的串联机器人, 通常会有多个解。多解的存在为能耗优化在理论上提供了可能性。一般情况下, 有 8 个可能的解参与选择。然而, 解的选择不仅要看解是否存在, 还要考虑当前的作业环境、关节限制和机器人的作业状态等多个因素。在确定最佳解时, 要综合考虑这些因素, 以便选出最适合当前情况的解。

本文针对符合 Pieper 准则的工业机器人 ER10-1600, 运用了一种逆运动学优化算法。该算法根据手臂的几何关系和末端位置坐标, 先求解前三个关节角, 再利用末端姿态矩阵和连杆旋转矩阵, 求解后三个关节角。最后, 选取与初始关节角差值最小的一组关节角作为最优解。该算法避免多次矩阵逆乘, 具有快速和简洁的特点。将图 2-6 中坐标系 {6} 的原点移至坐标系 {5} 的原点, 为了降低计算量, 令 d_6 为 0, 并将其融入工具坐标系 {T} 中。{T} 与 {6} 之间仅有位置变化, 无姿态转换。因此, 齐次转换矩阵为式 (2-27), 末端坐标系相对于基坐标系的表示为式 (2-28), 整简化逆运动学问题, 提高了计算效率。

$${}^6_pT = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-27)$$

$${}^0T = {}^0A_1{}^1A_2{}^2A_3{}^3A_4{}^4A_5{}^5A_6{}^6A \quad (2-28)$$

计算法兰盘中心点位姿，得到齐次转换矩阵 ${}^0T^{-1}{}^0T$ 的计算过程中，采用逆变换 ${}^6T^{-1}$ 右乘式(2-26)和逆变换 ${}^0T^{-1}$ 左乘式(2-26)。得到 ${}^0T^{-1}{}^0T = {}^1A_3{}^2A_4{}^3A_5{}^4A_6{}^5A$ ，具体的有

$$\begin{pmatrix} C_1 & S_1 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 1 & -d_1 \\ s1 & -c1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = {}^1A_3{}^2A_4{}^3A_5{}^4A_6{}^5A \quad (2-29)$$

因为坐标系{4}、{5}、{6}的原点相互重叠，使得 ${}^1A_3{}^2A_4{}^3A_5{}^4A_6{}^5A$ 的位置与 ${}^1A_3{}^2A_4{}^3A$ 的位置完全相同。因此，式(2-30)中的第四列与式(2-29)中对应的列存在一一对应的关系。

$$\begin{pmatrix} n'_x & o'_x & a'_x & d_4s_{23} + a_2c_2 + a_3c_{23} \\ n'_y & o'_y & a'_y & a_2s_2 - d_4c_{23} + a_3s_{23} \\ n'_z & o'_z & a'_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = {}^1A_3{}^2A_4{}^3A \quad (2-30)$$

明显地， $S_1P_x - C_1P_y = 0$ 成立。对于三角方程 $x\sin\theta + y\cos\theta = d$ ，其通解见式(2-31)。

$$\theta = a \tan 2(\pm\sqrt{x^2 + y^2 - d^2}, d) - a \tan 2(x, y) \quad (2-31)$$

求解式(2-25)，得到 θ_1 的解，见式(2-32)，其中正负号表明有两个解。

$$\theta_1 = a \tan 2(\pm\sqrt{P_x^2 + P_y^2}, 0) - a \tan 2(P_x, -P_y) \quad (2-32)$$

联立式(2-29)和式(2-30)，得到式(2-33)。

$$\begin{cases} c_1P_x + s_1P_y - a_1 = d_4s_{23} + a_2c_2 + a_3c_{23} \\ P_z - d_1 = a_2s_2 - d_4c_{23} + a_3s_{23} \\ s_1P_x - c_1P_y = 0 \end{cases} \quad (2-33)$$

分别对三个方程两边平方，再相加，得到式(2-34)。

$$\begin{cases} P_z^2 + d_1^2 - 2P_zd_1 + P_x^2 + P_y^2 - 2a_1(P_xc_1 + P_ys_1) + a_1^2 = \text{左边} \\ d_4^2 + a_2^2 + a_3^2 + 2a_2d_4s_3 + 2a_2a_3c_3 = \text{右边} \end{cases} \quad (2-34)$$

式(2-32)解算出 θ_1 ，那么式(2-34)只有 s_3 是未知量，整理式(2-34)得到式(2-35)，解得 θ_3 见式(2-36)。

$$\frac{P_z^2 + d_1^2 - 2P_zd_1 + P_x^2 + P_y^2 - 2a_1(P_xc_1 + P_ys_1) + a_1^2 - d_4^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2} = d_4s_3 + a_3c_3 \quad (2-35)$$

$$\theta_3 = a \tan 2(\pm \sqrt{(d_4)^2 + (a_3)^2 - M^2}, M) - a \tan 2(d_4, a_3) \quad (2-36)$$

将 ${}^2_3T^{-1} {}^1_2T^{-1} {}^0_1T^{-1}$ 左乘式(2-25), 得到 ${}^2_3T^{-1} {}^1_2T^{-1} {}^0_1T^{-1} {}^0_6T = {}^3_6T$ 。具体的展示式见式(2-37)。

$$\begin{pmatrix} c_4c_5c_6 - s_4s_6 & -c_4c_5s_6 - s_4c_6 & -c_4s_5 & 0 \\ s_4c_5c_6 + c_4c_6 & -s_4c_5s_6 + c_4c_6 & -s_4s_5 & 0 \\ s_5c_6 & -s_5s_6 & c_5 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = {}^3_6A \quad (2-37)$$

$$\begin{pmatrix} c_3 & s_3 & 0 & -a_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ s_3 & -c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_2 & s_2 & 0 & -a_2 \\ -s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1 & s_1 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 1 & -d_1 \\ s_1 & -c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = {}^2_3A^{-1} {}^1_2A^{-1} {}^0_1A^{-1}$$

由式(2-37)可知, 关节 2 的角度值未知。由于腕部位置与参数 d_4 相关, 令等式两边的第三行第四列以及第一行第四列的数值分别相等, 经过运算得到了式(2-38)。

$$\begin{aligned} s_{23}(c_1p_x + s_1p_y - a_1) + c_{23}(d_1 - p_z) &= d_4 + a_2s_3 \\ c_{23}(c_1p_x + s_1p_y - a_1) + s_{23}(p_z - d_1) &= a_3 + a_2c_3 \end{aligned} \quad (2-38)$$

由 $\theta_2 = \theta_{23} - \theta_3$ 可知

$$\begin{pmatrix} s_{23} \\ c_{23} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1p_x + s_1p_y - a_1 & d_1 - p_z \\ p_z - d_1 & c_1p_x + s_1p_y - a_1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} d_4 + a_2s_3 \\ a_3 + a_2c_3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} \theta_{23} &= a \tan 2(c_{23}, s_{23}) \\ \theta_2 &= a \tan 2(c_{23}, s_{23}) - \theta_3 \end{aligned} \quad (2-39)$$

到目前为止, 前三个关节角已成功求解, 其中 ${}^0_6A; {}^0_1A; {}^1_2A; {}^2_3A$ 的数值都已知。显而易见, 根据方程式(2-37), 计算得到 ${}^3_6A$ 的参数值, 即式(2-40)。

$$\theta_5 = a \tan 2(c_5, \pm \sqrt{1 - c_5^2}) \quad (2-40)$$

当 $\theta_5 \neq 0$ 时, 得到

$$\theta_4 = a \tan 2(\pm c_4c_5, \pm s_4s_5) \quad (2-41)$$

由式(2-40)和前四个关节角, 得到 ${}^4_6T$ 数值, 解得 θ_6 。

$${}^4_6A = \begin{pmatrix} c_5c_6 & -c_5s_6 & -s_5 & 0 \\ s_5c_6 & -s_5s_6 & c_5 & 0 \\ -s_6 & -c_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2-42)$$

$$\theta_6 = a \tan 2(\pm c_6, \pm s_6) \quad (2-43)$$

当 $\theta_5 = 0$ 时, 得到 ${}^4_6A$ 简化矩阵

$${}^3_6A = \begin{pmatrix} c_{46} & -s_{46} & 0 & 0 \\ s_{46} & c_{46} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2-44)$$

$$\theta_{46} = a \tan 2(c_{46}, s_{46}) \quad (2-45)$$

令 $\theta_4 = 0$, 则 $\theta_6 = \theta_{46} - \theta_4$ 。在关节 5 的角度为零的情况下, 关节 4 和关节 6 的功能会退化, 导致机器人处于奇异状态。在路径规划时, 务必要避免出现这种情况。因此, 需要采取相应的措施, 确保机器人在运动过程中不会陷入奇异状态, 保障机器人正常运行和操作。因此, 本文可能解见表 2-5。

表 2-5 D-H 运动逆解

关节号	表达式
关节 1	$\theta_1 = a \tan 2(\pm\sqrt{P_x^2 + P_y^2}, 0) - a \tan 2(P_x, -P_y)$
关节 2	$\theta_2 = a \tan 2(c_{23}, s_{23}) - \theta_3$
关节 3	$\theta_3 = a \tan 2(\pm\sqrt{(d_4)^2 + (a_3)^2 - M^2}, M) - a \tan 2(d_4, a_3)$
关节 4	$\theta_4 = a \tan 2(\pm c_4 c_5, \pm s_4 s_5)$
关节 5	$\theta_5 = a \tan 2(c_5, \pm\sqrt{1 - c_5^2})$
关节 6	$\theta_6 = a \tan 2(\pm c_6, \pm s_6)$

2.4.3 优化逆解能效策略

逆运动学是一种用于求解机器人关节位置的方法, 已知机器人末端的位置和姿态, 以及所有连杆的几何参数, 运用逆运动学原理, 求解各关节的位姿, 有利于控制机器人的运动。依据逆运动学原理, 提出一种优化逆解能效策略, 基于两个关键点, 一是尽量不投入高功率电机运动。高功率电机通常负责机器人的主要负荷和运动, 因此其能耗占比较大。利用优选逆解方法, 将所需的运动分配给功率较小的电机, 从而降低高功率电机的运行量。这种策略不仅降低了单个高功率电机的能耗, 还有助于平衡整个系统的功率消耗, 从而实现整体节能。二是在满足任务要求的情况下, 尽可能地让部分关节保持静止。如果机器人的某些关节在特定任务中不需要移动, 那么这些关节保持静止可有效减少能耗。静止关节不会消耗电能, 因此在满足任务要求的前提下, 尽量增加静止关节的数量, 优化逆解能效策略见图 2-14。在选择逆解时, 优先考虑那些能让关节保持静止或运动范围较小的解。利用这种方法, 降低系统的总功率消耗, 因为电机的能耗与其承

担的负载和运动速度成正比。

在 MATLAB 软件环境中, 构建了 ER10-1600 机器人的仿真模型。根据运动学建模过程编写两个重要的计算脚本, `forward_kinematics.m` 用于执行正运动学计算, `inverse_kinematics.m` 用于逆运动学计算, 见图 2-15。为了演示这两个脚本的功能, 设定了一个目标角度数组 `joint_rads`, 其值为 $[0 -180 0 90 0 0]/180 \times \pi$, 这代表将角度转换为弧度, 符合 MATLAB 的计算要求。首先, 使用 `forward_kinematics.m` 脚本计算给定关节角度下末端执行器的位置和姿态矩阵。随后, 利用 `inverse_kinematics.m` 脚本计算逆运动学, 得到了 8 组可能的解。这些解表示机器人达到相同末端执行器位置和姿态的不同关节配置。关于 ER10-1600 机器人的其他 8 组解的具体计算结果, 已经在表 2-6 和图 2-16 中详细列出。通过上述方法, 不仅验证了仿真模型和运动学脚本的准确性, 而且为 ER10-1600 机器人能耗的进一步研究提供了重要的理论基础和实验数据。

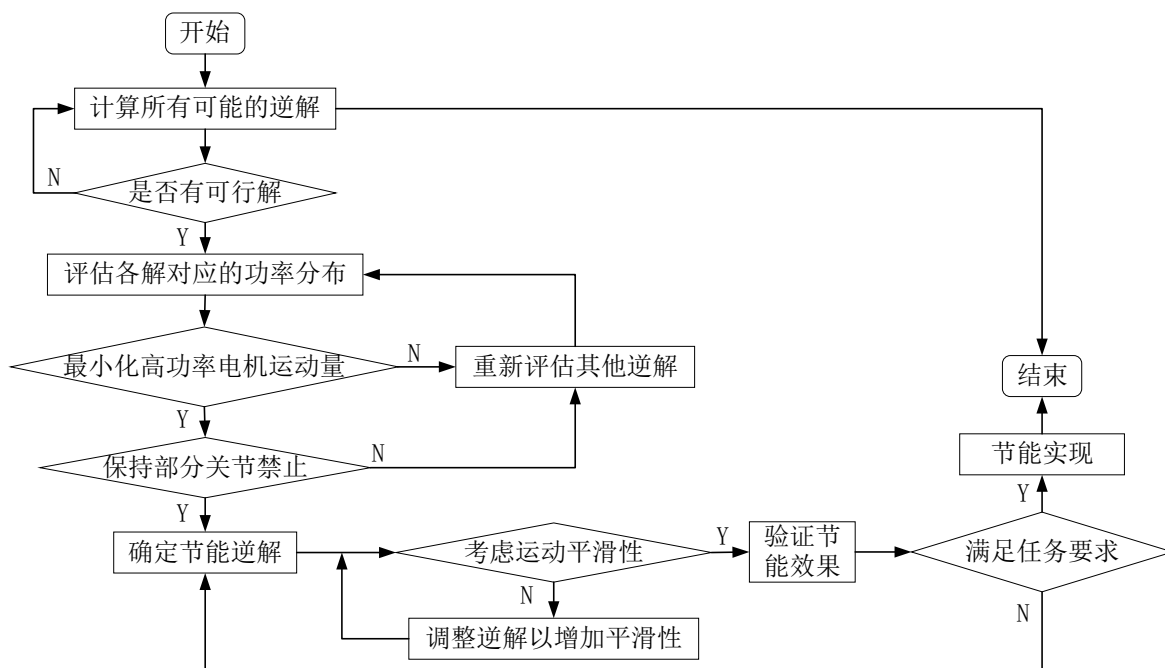


图 2-14 优化逆解能效策略

```

20 forward_kinematics.m*
21 %% DH data
22 [alpha_data,a_data,d,qlim1,qlim2,qlim3,qlim4,qlim5,qlim6] = ER10-1600_dh();
23
24 % 将alpha和a的下标从1开始转换成从0开始
25 alpha_0=alpha_data(1); a_0=a_data(1); th(1) = joint_rads(1);
26 alpha(1)=alpha_data(2); a(1)=a_data(2); th(2) = joint_rads(2);
27 alpha(2)=alpha_data(3); a(2)=a_data(3); th(3) = joint_rads(3);
28 alpha(3)=alpha_data(4); a(3)=a_data(4); th(4) = joint_rads(4);
29 alpha(4)=alpha_data(5); a(4)=a_data(5); th(5) = joint_rads(5);
30 alpha(5)=alpha_data(6); a(5)=a_data(6); th(6) = joint_rads(6);
31
32 %% general
33 if i==1
34     T=[cos(th(i)) -sin(th(i)) 0 a_0;
35        cos(alpha_0)*sin(th(i)) cos(alpha_0)*cos(th(i)) -sin(alpha_0) -sin(alpha_0)*d(i);
36        sin(alpha_0)*sin(th(i)) sin(alpha_0)*cos(th(i)) cos(alpha_0) cos(alpha_0)*d(i);
37        0 0 0 1];
38 else
39     T=[cos(th(i)) -sin(th(i)) 0 a(i-1);
40        cos(alpha(i-1))*sin(th(i)) cos(alpha(i-1))*cos(th(i)) -sin(alpha(i-1)) -sin(alpha(i-1))*d(i);
41        sin(alpha(i-1))*sin(th(i)) sin(alpha(i-1))*cos(th(i)) cos(alpha(i-1)) cos(alpha(i-1))*d(i);
42        0 0 0 1];
43 end
44 end

```

(a) 正运动学模型

```

49 forward_kinematics.m* find_best_joints_with_min_change.m ik_double_theta456.m inverse_kinematics.m*
50 end
51
52 function [joints1,joints2,joints3,joints4,joints5,joints6,joints7,joints8] = inverse_kinematics_8_result(cartesian_position_DH)
53
54 [alpha_data,a_data,d,qlim1,qlim2,qlim3,qlim4,qlim5,qlim6] = ER10-1600_dh();
55 d3=d(3);
56 d4=d(4);
57 a2=a_data(3);
58 a3=a_data(4);
59
60 Px = cartesian_position_DH(1,4);
61 Py = cartesian_position_DH(2,4);
62 Pz = cartesian_position_DH(3,4);
63
64 r11=cartesian_position_DH(1,1);
65 %r12=cartesian_position_DH(1,2);
66 r13=cartesian_position_DH(1,3);
67
68 r21=cartesian_position_DH(2,1);
69 %r22=cartesian_position_DH(2,2);
70 r23=cartesian_position_DH(2,3);
71
72 r31=cartesian_position_DH(3,1);
73 %r32=cartesian_position_DH(3,2);
74 r33=cartesian_position_DH(3,3);

```

(b) 逆运动学模型

图 2-15 MATLAB 部分计算脚本

表 2-6 逆解数值

逆解编号	关节角度 ($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$)
joint_degree_set 1	(140.23 -92.85 0.00 175.34 63.97 -173.99)
joint_degree_set 2	(140.23 0.00 174.71 55.04 -4.10 -138.77)
joint_degree_set 3	(0.00 -180.00 0.00 90.00 0.00 0.00)
joint_degree_set 4	(0 -87.15 174.71 -3.80 90.96 -110.87)
joint_degree_set 5	(140.23 -92.85 -0.00 355.34 -63.97 6.00)
joint_degree_set 6	(140.23 0 174.71 235.04 4.10 41.23)
joint_degree_set 7	(0 -180.00 0.00 270.00 0.00 180.00)
joint_degree_set 8	(0 -87.15 174.71 176.20 -90.96 69.13)

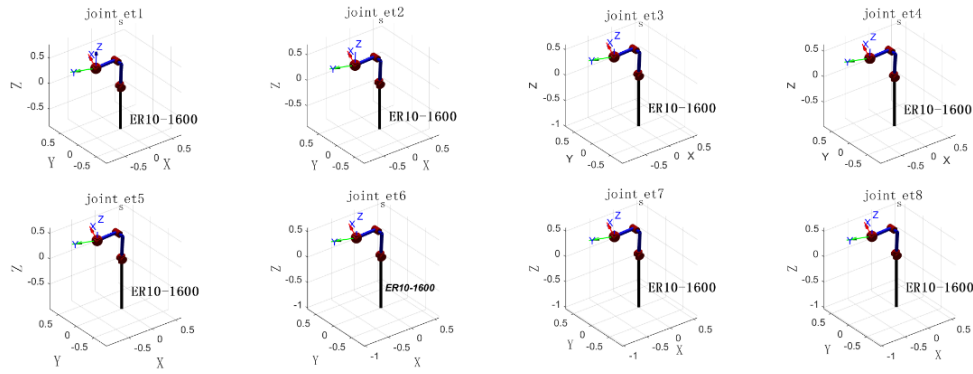


图 2-16 逆解机器人状态

鉴于机器人本体的物理尺寸以及作业空间的限制，本文特别界定了各轴的极限作业范围，具体数据如表 2-7。根据表 2-7 筛选出符合条件的可行解分别是 joint_degree_set 2、joint_degree_set 3 和 joint_degree_set 4，记为 Q1、Q2 和 Q3。

表 2-7 极限作业范围

关节	可运动范围
J1	[-160, 160]
J2	[-225, 45]
J3	[-45, 225]
J4	[-110, 170]
J5	[-100, 100]
J6	[-266, 266]

根据工业机器人系统能耗占比，得出电机损耗占据工业机器人系统能耗的主要部分，本章只讨论电机损耗。评估三种可行解的功率分布，应准确计算各轴的电机的能耗。每个电机使用以下步骤来计算其能耗。

Step1 确定功率和转角。已知电机的功率 (P_i) (以千瓦为单位) 和它需要转动的角度 θ_i (以度或弧度为单位)。

Step2 确定每个电机转动的时间 (t)。如果给定的时间 (t) 是所有电机完成各自转角的总时间，则需要根据每个电机的转角和速度分布确定每个电机的运动时间 (t_i)。

Step3 得到每个电机的能耗 (E_i) 实验数据，同时也可运用数学公式 $E' = PT \cdot \cos \alpha \cdot \eta$ 计算得出，其中 $\cos \alpha = 0.8$ 表示功率因数， $\eta = 0.75$ 表示伺服电机的能量效率。

Step4 计算总能耗 E 。所有电机的能耗相加，得到工业机器人特定工况下的总能耗，总能耗 (E) 公式 $E = \sum_{i=1}^6 E_i$ 可计算。

根据表 2-3 所提供的数据，观察机器人六个轴的 6 个电机，轴 3 的电机功率最高，而轴 6 的电机功率则最低。应用逆解能效优化策略，关键点在于尽量减少高功率电机的运动量，尽可能地让部分关节保持静止。分析三种状态，只有在 Q2 状态下，轴 3 没有运行，且轴 1、5 和 6 也保持静止。基于这些观察结果，推断在 Q2 状态下，机器人的能耗将达到最小值。

依据 3 种逆解分别实验，记录每个电机运行的时间和功率，并计算其产生的能耗。各轴在 30°/S 的恒速下运行，各轴作业时间和总能耗见表 2-8。各轴在 60°/S 的恒速下运行，各轴作业时间和总能耗见表 2-9。

表 2-8 30°/S 各轴作业时间及总能耗

可行解	J1 时间 (S)	J2 时间 (S)	J3 时间 (S)	J4 时间 (S)	J5 时间 (S)	J6 时间 (S)	理论总 能耗(J)	实际总 能耗(J)
Q1	4.67	0	5.82	1.83	0.14	4.63	5641.2	5247.6
Q2	0	6	0	3	0	0	2160.0	2230.3
Q3	0	2.91	5.82	0.13	3.03	3.7	5392.8	5465.2

表 2-9 60°/S 各轴作业时间及总能耗

可行解	J1 时间 (S)	J2 时间 (S)	J3 时间 (S)	J4 时间 (S)	J5 时间 (S)	J6 时间 (S)	理论总 能耗(J)	实际总 能耗(J)
Q1	2.34	0	2.91	0.92	0.07	2.31	2822.4	2613.4
Q2	0	3	0	1.5	0	0	1080	1134.2
Q3	0	1.45	2.91	0.06	1.52	1.85	2695.2	2816.8

由表 2-8、2-9 计算出理论与实际总能耗的平均误差 $\bar{\delta}$ 分别是 3.7% 和 5.3%，实验数据分析揭示，各轴在恒定速度 30°/S 和 60°/S 的操作条件下，Q2 状态表现出显著的能效优势。具体来说，Q2 状态的总能耗分别测得为 2160.0 J 和 1080 J，这一数值明显低于 Q1 和 Q3 状态下的能耗。结果表明，本文提出的优化逆解能效策略的有效性，也验证了该策略逻辑推理的准确性与合理性。

2.4.4 动力学建模

工业机器人动力学专注于分析机器人运动中的力学特性和控制策略，以优化其性能。涉及工业机器人系统内部因素如关节摩擦和传动弹性，以及外部因素如工件负载和环境干扰。实时反馈和精确控制，提高了机器人在不确定环境中的适应性、稳定性和操作精度，确保了高效可靠的工作表现。

动力学研究优化机器人的运动轨迹，以最小化完成任务所需的能量消耗。采用能耗

函数规划和优化轨迹，不仅提高了运动效率，也促进了能源的可持续利用。在方法论层面，研究者根据不同的机器人结构和运动模式灵活选择适合的动力学建模方法，包括牛顿-欧拉方法和拉格朗日方法。工业机器人动力学研究在理论与实践层面都取得了显著进展，为自动化制造等领域中机器人技术的发展提供了关键支撑。特别是拉格朗日方程法，作为一种描述多体系统动力学行为的数学工具，它在机器人动力学建模中的应用展示了该领域的理论基础和实用价值。拉格朗日方程法基于拉格朗日力学原理，即达朗贝尔原理，定义系统的拉格朗日函数，推导出描述系统运动的运动方程。

首先，需要定义系统的拉格朗日函数（Lagrange function）。拉格朗日函数通常表示为 L ，它是系统的动能（kinetic energy） T 和势能（potential energy） U 的差，即

$$L = T - U \quad (2-46)$$

描述机器人系统自由度，需要选择合适的广义坐标（generalized coordinates），同时引入广义速度（generalized velocities）描述其坐标的变化率。其中， T 和 U 分别在笛卡尔和关节空间坐标系中计算求解。利用拉格朗日函数，得到系统的拉格朗日方程，它描述了系统的运动方程。建立机器人动力学模型，利用拉格朗日方程表示方法，写成以下形式

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \quad (2-47)$$

其中， q_i 是广义坐标， $\dot{q}_i$ 是对应的广义速度， τ_i 是由外部施加在系统上的广义力矩。

推导拉格朗日方程的过程主要涉及对拉格朗日函数的偏导数运算。首先计算动能和势能的表达式，然后代入拉格朗日函数中，再分别对广义坐标和广义速度偏导数运算，最终得到系统的拉格朗日方程。在机器人动力学的详细计算中，首要步骤是计算各个连杆伪惯性矩阵和相对于前一个连杆的质心位置。每个连杆的伪惯性矩阵，式(2-48)描述了其在系统整体动力学中所扮演的角色，同时需要考虑各连杆相对于前一连杆的质心位置，见式(2-49)，这一过程构成了建立系统动力学模型的基础。

$$I_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{3}m_1l_1^2 & 0 & \frac{1}{2}m_1l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}m_1l_1 & 0 & m_1 \end{bmatrix}, \quad I_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{3}m_2l_2^2 & 0 & 0 & \frac{1}{2}m_2l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2}m_2l_2 & 0 & 0 & m_2 \end{bmatrix} \quad (2-48)$$

$$I_3 = \begin{bmatrix} m_3 a_3^2 & \frac{1}{2} m_3 a_3 l_3 & 0 & m_3 a_3 \\ \frac{1}{2} m_3 a_3 l_3 & \frac{1}{3} m_3 l_3^2 & 0 & \frac{1}{2} m_3 a_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_3 a_3 & \frac{1}{2} m_3 a_3 & 0 & m_3 \end{bmatrix}, I_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{3} m_4 l_4^2 & \frac{1}{2} m_4 l_4 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} m_4 l_4 & m_4 \end{bmatrix} \quad (2-49)$$

$$I_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{12} m_5 l_5^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_5 \end{bmatrix}, I_6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{12} m_6 l_6^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} m_6 a_6^2 & m_6 a_6 \\ 0 & 0 & m_6 a_6 & m_6 \end{bmatrix} \quad (2-50)$$

$$r_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{l_1}{2} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, r_2 = \begin{bmatrix} \frac{l_2}{2} \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, r_3 = \begin{bmatrix} a_3 \\ \frac{l_3}{2} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, r_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{l_4}{2} \\ 1 \end{bmatrix}, r_5 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, r_6 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{a_6}{2} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-51)$$

式中, m_i 表示连杆质量, l_i 表示连杆长度, a_i 表示连杆中心线的距离。

计算机器人系统总动能 T , 其中, 涉及各连杆的伪惯性矩阵、各部件的质量分布和运动状态。连杆 i 上 i_r 处质点的动能见式(2-50), 其中, 质点质量表示为 dm 。

$$\begin{aligned} dT_i &= \frac{1}{2} \text{Trace} \left[\sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \frac{\partial \tau_i}{\partial q_j} {}^i r^i r^\tau \frac{\partial \tau_i^\tau}{\partial q_k} \dot{q}_j \dot{q}_k \right] dm \\ &= \frac{1}{2} \text{Trace} \left[\sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \frac{\partial \tau_i}{\partial q_j} ({}^i r dm {}^i r^\tau) \frac{\partial \tau_i^\tau}{\partial q_k} \dot{q}_j \dot{q}_k \right] \end{aligned} \quad (2-52)$$

连杆 i 的动能, 见式(2-51)。

$$T_i = \int_{link_i} dT_i = \frac{1}{2} \text{Trace} \left[\sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \frac{\partial \tau_i}{\partial q_j} \left(\int_{link_i} {}^i r^i r^\tau dm \right) \frac{\partial \tau_i^\tau}{\partial q_k} \dot{q}_j \dot{q}_k \right] \quad (2-53)$$

得到机器人系统总动能, 见式(2-52)。

$$T = \sum_{i=1}^6 T_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 \text{Trace} \left[\sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \frac{\partial \tau_i}{\partial q_j} I_i \frac{\partial \tau_i^\tau}{\partial q_k} \dot{q}_j \dot{q}_k \right] \quad (2-54)$$

计算机器人系统的总势能 U , 涉及机器人重力场位置变化、各部件间相互作用。令连杆 i 的质心矢量表示 r_i , 其势能见式(2-53)。

$$U_i = -m_i g^\tau \tau_i^i \bar{r}_i \quad (2-55)$$

式中, $g = [g_x \ g_y \ g_z \ 0]^T$ 。因此, 机器人总势能 U , 见式(2-54)。

$$U = -\sum m_i g^\tau \tau_i^i \bar{r}_i \quad (2-56)$$

建立机器人的动力学方程, 综合各个连杆的伪惯性矩阵、系统的总动能和总势能, 分析机器人系统在运动中所受的力和力矩, 得出式(2-55)。

$$L = T - U = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \text{Trace} \left(\frac{\partial \tau_i}{\partial q_j} I_i \frac{\partial \tau_i^\tau}{\partial q_k} \right) \dot{q}_j \dot{q}_k + \sum_{i=1}^n m_i g^\tau \tau_i^i r_i, n=1, 2, \dots, 6 \quad (2-57)$$

得到

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_p} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^i \text{Trace} \left(\frac{\partial \tau_i}{\partial q_j} I_i \frac{\partial \tau_i^\tau}{\partial q_k} \right) \dot{q}_k + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i \text{Trace} \left(\frac{\partial \tau_i}{\partial q_j} I_i \frac{\partial \tau_i^\tau}{\partial q_k} \right) \dot{q}_j \quad (2-58)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_p} = \sum_{i=p}^n \sum_{k=1}^i \text{Trace} \left(\frac{\partial \tau_i}{\partial q_j} I_i \frac{\partial \tau_i^\tau}{\partial q_k} \right) \ddot{q}_k + 2 \sum_{i=p}^n \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \text{Trace} \left(\frac{\partial^2 \tau_i}{\partial q_j \partial q_k} I_i \frac{\partial \tau_i^\tau}{\partial q_k} \right) \dot{q}_j \dot{q}_k, \quad (p=1, \dots, n) \quad (2-59)$$

$$\frac{\partial L}{\partial q_p} = \sum_{i=p}^n \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \text{Trace} \left(\frac{\partial^2 \tau_i}{\partial q_p \partial q_j} I_i \frac{\partial \tau_i^\tau}{\partial q_k} \right) \dot{q}_j \dot{q}_k + \sum_{i=p}^n m_i g^\tau \frac{\partial \tau_i^i}{\partial q_p} r_i \quad (2-60)$$

所以, 机器人动力学方程见下式(2-59)。

$$F_i = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^j \text{Trace} \left(\frac{\partial \tau_i}{\partial q_k} I_j \frac{\partial \tau_j^\tau}{\partial q_i} \right) \ddot{q}_k + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^j \sum_{m=1}^j \text{Trace} \left(\frac{\partial^2 \tau_i}{\partial q_k \partial q_m} I_i \frac{\partial \tau_i^\tau}{\partial q_k} \right) \dot{q}_k \dot{q}_m - \sum_{j=1}^n m_j g^\tau \frac{\partial \tau_i^i}{\partial q_i} r_i = \sum_{i=1}^n D_{ij} \ddot{q}_i + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n D_{ijk} \dot{q}_j \dot{q}_k + D_i \quad (2-61)$$

式中

$$D_{ij} = \sum_{p=\max i, j}^6 \text{Trace} \left(\frac{\partial \tau_p}{\partial q_j} I_p \frac{\partial \tau_p^\tau}{\partial q_i} \right) \quad (2-62)$$

$$D_{ijk} = \sum_{p=\max i, j, k}^6 \text{Trace} \left(\frac{\partial^2 \tau_p}{\partial q_j \partial q_k} I_p \frac{\partial \tau_p^\tau}{\partial q_i} \right) \quad (2-63)$$

$$D_i = \sum_{p=i}^6 \left(-m_p g^\tau \frac{\partial \tau_p^p}{\partial q_i} r_p \right) \quad (2-64)$$

使用拉格朗日方程法建模机器人动力学的优势在于, 提供一种系统化的方法, 能够有效地描述系统的机器人结构、运动模式和运动规律。从图 2-3 中可知 ER10-1600 机器人伺服电机功率, 其中轴 3 的功率最大, 轴 6 的功率最小, 其余轴功率大小一样。因此,

本文简化工业机器人结构成开链式四杆机构，简图见图 2-17。建立腰部、大臂、小臂和腕部的动力学模型，分析其影响动力学特性的主要因素。

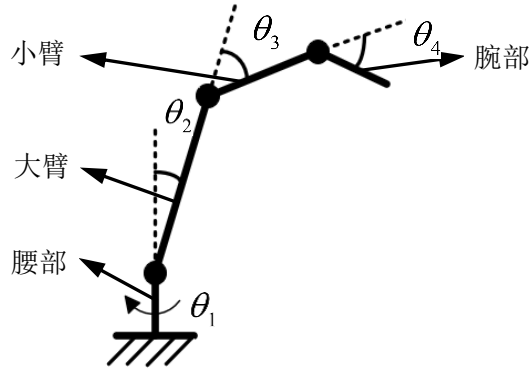


图 2-17 工业机器人杆件简图

图中 θ_1 表示腰部转动、 θ_2 表示大臂摆动、 θ_3 表示小臂转动、 θ_4 表示腕部摆动。将腰部、大臂、小臂和腕部的质量和长度记为 m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_4 、 d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 。由公式(2-47) 拉格朗日方程，可知腰部、大臂、小臂和腕部的末端力矩 τ_1 、 τ_2 、 τ_3 和 τ_4 ，力矩具体表达如下

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} = \tau_1 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_2} = \tau_2 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_3} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_3} = \tau_3 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_4} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_4} = \tau_4 \end{cases} \quad (2-65)$$

根据公式(2-46)，可知欲求出动能 T 和势能 U 得到动力学模型。计算总动能 T

$$\begin{aligned} T &= T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \\ &= \frac{1}{2} J_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} J_2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} J_3 \dot{\theta}_3^2 + \frac{1}{2} (m_2 + m_3 + m_4) d_2^2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} (m_3 + m_4) d_3^2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2 \\ &\quad + \frac{1}{2} m_4 d_4^2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4)^2 + m_3 d_2 d_3 \cos \theta_3 (\dot{\theta}_2^2 + \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3) + m_4 d_3 d_4 \cos \theta_4 (\dot{\theta}_3^2 + \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_4) \end{aligned} \quad (2-66)$$

式中， J_1 、 J_2 、 J_3 、 J_4 表示机器人腰部、大臂、小臂、腕部的转动惯量。

工业机器人的总势能 U

$$\begin{aligned} U &= U_1 + U_2 + U_3 + U_4 = m_1 g d_1 + m_2 g (d_1 + d_2 \cos \theta_2) \\ &\quad + m_3 g (d_1 + d_2 \cos \theta_2 + d_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \\ &\quad + m_4 g (d_1 + d_2 \cos \theta_2 + d_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + d_4 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)) \end{aligned} \quad (2-67)$$

将式(2-64)、式(2-65)代入式(2-46)、式(2-63)得出

$$\begin{cases} \tau_1 = J_1\ddot{\theta}_1 + J_2\ddot{\theta}_2 + J_3\ddot{\theta}_3 + J_4\ddot{\theta}_4 \\ \tau_2 = (m_2d_2^2 + m_3d_2^2 + m_3d_3^2)\ddot{\theta}_2 + 2m_3d_2d_3\cos\theta_3\ddot{\theta}_2 + m_3d_3^2\ddot{\theta}_3 \\ + m_3d_2d_3\cos\theta_3\ddot{\theta}_3 - 2m_3d_2d_3\sin\theta_3\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 - m_3d_2d_3\sin\theta_3\dot{\theta}_3^2 \\ + (m_2gd_2 + m_3gd_2)\sin\theta_2 + m_3gd_3\sin(\theta_2 + \theta_3) \\ \tau_3 = (m_3d_3^2 + m_4d_3^2 + m_4d_4^2)\ddot{\theta}_3 + 2m_4d_3d_4\cos\theta_4\ddot{\theta}_3 + m_4d_4^2\ddot{\theta}_4 \\ + m_4d_3d_4\cos\theta_4\ddot{\theta}_4 - 2m_4d_3d_4\sin\theta_4\dot{\theta}_3\dot{\theta}_4 - m_4d_3d_4\sin\theta_4\dot{\theta}_4^2 \\ + (m_3gd_3 + m_4gd_3)\sin\theta_3 + m_4gd_4\sin(\theta_3 + \theta_4) \\ \tau_4 = m_4d_4^2\ddot{\theta}_4 + m_4d_3d_4\cos\theta_4\ddot{\theta}_3 + m_4d_4^2\ddot{\theta}_2 - m_4d_3d_4\sin\theta_4\dot{\theta}_3\dot{\theta}_4 + m_4gd_4\sin(\theta_3 + \theta_4) \end{cases} \quad (2-68)$$

将式(2-66)变换可得

$$\begin{cases} \tau_2 = A_1\ddot{\theta}_2 + A_2\cos\theta_3\ddot{\theta}_2 + A_3\ddot{\theta}_3 + A_4\cos\theta_3\ddot{\theta}_3 - A_5\sin\theta_3\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 \\ - A_6\sin\theta_3\dot{\theta}_3^2 + A_7\sin\theta_2 + A_8\sin(\theta_2 + \theta_3) \\ \tau_3 = B_1\ddot{\theta}_3 + B_2\cos\theta_4\ddot{\theta}_3 + B_3\ddot{\theta}_4 + B_4\cos\theta_4\ddot{\theta}_4 - B_5\sin\theta_4\dot{\theta}_3\dot{\theta}_4 \\ - B_6\sin\theta_4\dot{\theta}_4^2 + B_7\sin\theta_3 + B_8\sin(\theta_3 + \theta_4) \\ \tau_4 = C_1\ddot{\theta}_3 + C_2\cos\theta_4\ddot{\theta}_3 + C_3\ddot{\theta}_4 - C_4\sin\theta_4\dot{\theta}_3\dot{\theta}_4 + C_5\sin(\theta_3 + \theta_4) \end{cases} \quad (2-69)$$

式中, $A_1 = m_2d_2^2 + m_3d_2^2 + m_3d_3^2$, $A_2 = 2m_3d_2d_3$, $A_3 = m_3d_3^2$, $A_4 = m_3d_2d_3$, $A_5 = 2m_3d_2d_3$,

$A_6 = m_3d_2d_3$, $A_7 = m_2gd_2 + m_3gd_2$, $A_8 = m_3gd_3$, $B_1 = m_3d_3^2 + m_4d_3^2 + m_4d_4^2$, $B_2 = 2m_4d_3d_4$,

$B_3 = m_4d_4^2$, $B_4 = m_4d_3d_4$, $B_5 = 2m_4d_3d_4$, $B_6 = m_4d_3d_4$, $B_7 = m_3gd_3 + m_4gd_3$, $B_8 = m_4gd_4$,

$C_1 = m_4d_4^2$, $C_2 = m_4d_3d_4$, $C_3 = m_4d_4^2$, $C_4 = m_4d_3d_4$, $C_5 = m_4gd_4$ 。

上述推导得出, 机器人的动力学特性不仅受到其各部件的转动惯量和质量分布的影响, 还与其转动速度和加速度密切相关。上述分析结果表明, 在确保机器人高效精确执行动作的同时, 在理论上存在能耗优化的可能性。

2.4.5 优化转速能效策略

动力学是研究机器人在作业中的力学特性和控制方法, 本文通过拉格朗日方程描述物体运动, 其关键因素在于物体的动能、势能及其它它们之间的转换关系。在推导关系中考虑机器人各部件如何影响能量使用, 例如转动惯量和质量分布等, 提出一种优化转速能效策略。优化转速能效策略针对特定任务需求, 制定梯度转速计划。该计划预计算不同转速下各轴段的能耗, 构建起一张详尽的“转速-能耗”对照表。利用这一数据集合, 能够筛选出总体能耗最低的转速选项, 在维持作业性能的前提下实现, 削减能源消耗。实时反馈控制环节将“转速-能耗”对照表作为调整基准, 根据机器人作业实况, 动态调

节转速，确保了机器人操作在不同阶段都能够优先采用最节能的转速设置，从而有效降低不必要的能量消耗。经过一系列实验，对不同的转速规划和控制策略测试和评估，最终能够确定最优解决方案。优化转速能效策略不仅推进了机器人操作的能效优化，也增强了整体作业的能源可持续性，优化转速能效策略见图 2-18。本文识别并分析关键参数，发现转速作为主要影响因素，即制定转速规划策略。如果该策略应用到其他种类机器人，转速规划需要相应修改。

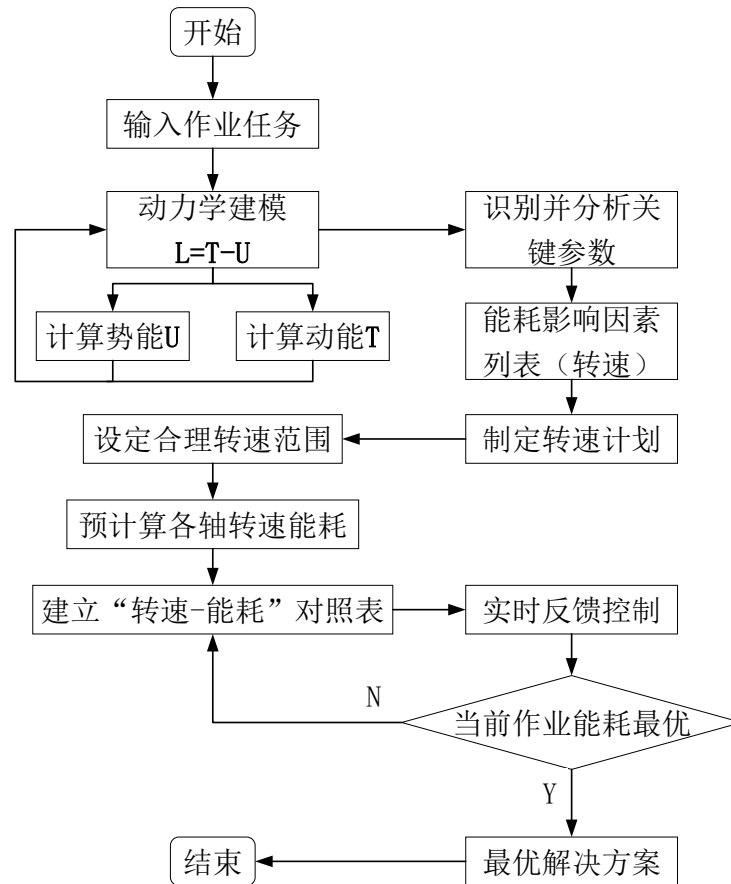


图 2-18 优化转速能效策略

在优化逆解能效策略中，各轴在恒定速度 $30^\circ/\text{S}$ 和 $60^\circ/\text{S}$ 的运行下，Q2 状态表现出显著的能效优势。在优化转速能效策略下，讨论各轴在不同转速方案下的能耗。由表 2-6 可知，Q2 状态下各轴转动角度是 $[0, -180, 0, 90, 0, 0]$ ，建立“转速-能耗”对照表如 2-10。

由表 2-10 计算出理论与实际总能耗的平均误差是 2.75%，实验数据分析揭示，在优化逆解的基础上，再通过具体作业场景下转速的调控，可以降低能耗。理想状态下，轴 2 和轴 4 都以 $60^\circ/\text{S}$ 速度作业，即能耗最少为 1080 J。若作业时规定轴 4 以 $15^\circ/\text{S}$ 运行，那么轴 2 的转速选择 $60^\circ/\text{S}$ 时能耗最低。上述结果证实了本文提出的优化逆解能效策略

的有效性。

表 2-10 “转速-能耗”对照表

J2 轴转速	J2 作业时间(S)	J4 轴转速	J4 作业时间(S)	理论总能耗(J)	实际总能耗(J)
15°/S	12	15°/S	6	4320	4253.2
		30°/S	3	3600	3491.7
		45°/S	2	3360	3453.9
		60°/S	1.5	3240	3219.6
30°/S	6	15°/S	6	2880	2843.1
		30°/S	3	2160	2236.4
		45°/S	2	1920	1798.6
		60°/S	1.5	1800	1768.7
45°/S	4	15°/S	6	2400	2451.8
		30°/S	3	1680	1564.5
		45°/S	2	1440	1439.2
		60°/S	1.5	1320	1299.7
60°/S	3	15°/S	6	2160	2154.2
		30°/S	3	1440	1429.8
		45°/S	2	1200	1293.1
		60°/S	1.5	1080	1105.7

2.5 工业机器人典型作业优化

工业机器人在执行不同的作业时，表现出特定的功能和能耗模式。为了有效地提升机器人的能源效率，首先需要深入分析不同作业场景的特点，并据此制定合适的能效优化策略。本文根据不同作业特点，将优化工作划分为两个层次，“任务级”和“过程级”。

(1) 任务级 (Task-Level, TL) 定义，任务级涉及机器人整体作业流程的优化，包括任务分配、路径规划、动作序列以及与作业效率和能耗相关的运动优化。在这个级别，重点提高整个作业流程的效率，并减少不必要的能量消耗。针对码垛作业，可能意味优化物品的抓取和放置顺序、减少无效移动，选择最优的搬运路径，调整操作节奏，降低能耗。

(2) 过程级 (Process-Level, PL) 定义，过程级关注单个工序或操作过程中的能量利用和运动控制，如焊接速度、热输入、焊缝跟踪等精细参数的控制。这个级别的优化目

的在于提升特定工序中的能量效率，并保证产品质量。对于焊接作业，优化焊枪的移动速度和路径，减少能耗。

任务级和过程级的优化都利用逆解和转速的优化实现能耗最优，但具体的优化策略和目标根据作业的特点有所不同。例如，在码垛作业中，任务级优化可能会更多地关注物品的整体搬运和放置策略，而过程级优化可能会关注抓取和放置动作的细节和精度。而在焊接作业中，任务级优化可能会关注焊接的顺序和路径，过程级优化则会关注焊接的具体速度和质量控制。

2.5.1 TL-机器人码垛作业

码垛作业是工业自动化领域典型应用场景，广泛应用于工厂车间、生产线、仓库和码头等场合。主要功能是有序且稳固的方式堆叠物品，例如，图 2-19 装配工艺中的工件搬运。由于工件搬运精度和重复性要求高，采用机器人码垛作业可提升作业效率，同时降低人力成本，提高作业环境安全性。在典型的码垛流程中，工业机器人执行一系列动作。首先，机器人的末端执行器（抓取装置）必须准确定位并牢固抓取目标物品；然后，通过协调各个关节的运动，机器人将物品提升并平移至预定位置；最终，执行器释放工件，确保其安全放置在托盘或存储区域上。此过程涉及到精确的同步和力控制，特别是在抓取和放置阶段避免物品损坏或错位。从能耗的角度分析，码垛机器人运行时，有明显的能源消耗。主要能耗集中在驱动关节的电机和执行器，而在作业周期中，搬运（主要是平移）占据了大部分的时间，这期间的能耗相对平稳。相比之下，在物品抓取和放置的过程中，由于需要较高的力矩和精准的控制，电机的能耗可能会出现短时的峰值。

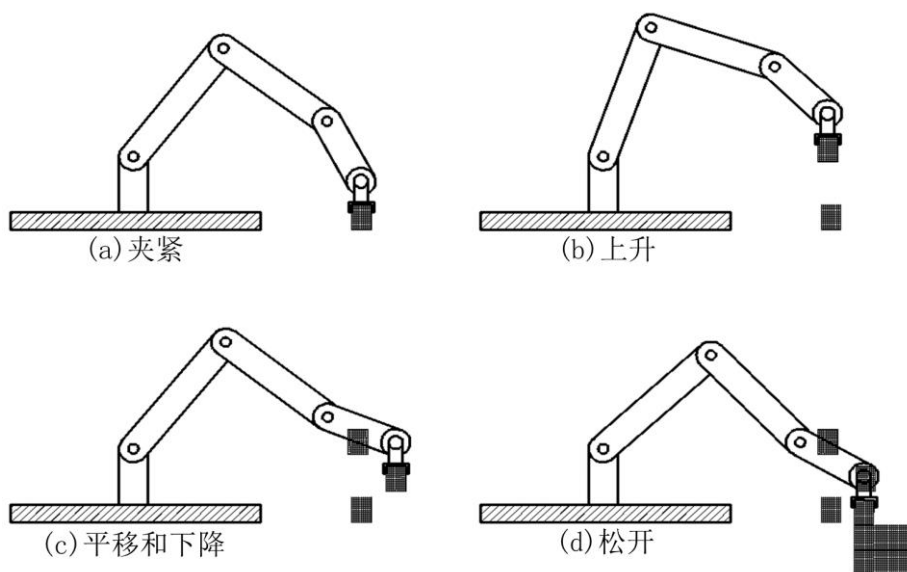


图 2-19 码垛作业流程简图

2.5.2 PL-机器人焊接作业

焊接作为工业制造领域的核心工艺之一，承担着连接金属零件的重要任务。焊接作业通过熔化材料或加入填充材料，形成坚固的接缝，从而确保产品的结构完整性和功能性，见图 2-20。在自动化焊接过程中，工业机器人因其卓越的精准性和重复性而成为首选设备，能够提高焊接效率、保证接缝质量，并降低人工操作的风险。在执行焊接任务时，焊接机器人必须沿着预定的焊缝路径精确移动焊枪，同时协调控制各种焊接参数，如电流、电压以及行进速度。这些参数直接影响到焊缝成形质量，因此机器人需要具备极高的运动精度和稳定性，才能满足要求。从能耗的角度分析，焊接过程的能量消耗主要集中在两个部分，焊接电源和机器人的伺服电机。焊接电源负责提供熔化焊接材料所需的高能量，而伺服电机则确保机器人焊枪的精确移动和位置控制。尽管电源消耗是主要部分，但优化机器人的运动和控制策略可显著降低能耗。为了实现能效最优化，转速优化策略对焊接机器人尤为关键。适当的焊接速度不仅能够保证优良的焊缝质量，还能避免过度的能量输入，从而节省能量。此外，实时监控焊接速度和焊缝形成过程，动态调整操作，以最小的能量投入达到最佳的焊接效果。

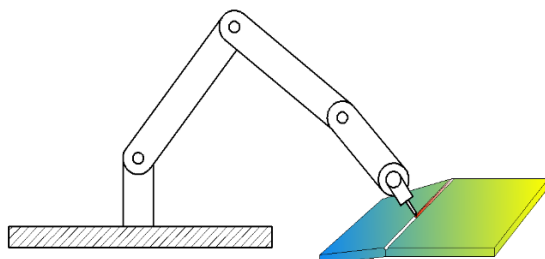


图 2-20 焊接作业简图

2.6 本章小结

本章综合分析工业机器人作业过程中的能耗，确定了影响能耗主要因素。建立运动学和动力学模型，分析了机器人作业能耗特性，为能耗优化研究提供了坚实的理论支撑。基于运动学逆解原理，提出了一种策略，通过降低高功率电机使用频次，保持部分关节静止，减少整体能耗。此举不仅降低了运行成本，也有助于延长机器人的使用寿命。借助“转速-能耗”对照表的优化转速策略，实时调整机器人转速，实现了能量输入的精准控制和能效的提升。案例分析表明，在不同作业场景中均能有效优化能耗。分析典型作业特点，根据总任务分配和单工序作业对能耗影响，提出了能耗优化分为任务级和过程级两个层面。

第3章 工业机器人码垛作业能耗优化

3.1 引言

在工业自动化领域，码垛作业是至关重要的一环，它不仅直接关系到生产效率、产品质量，还影响着人工成本。如同第 2.5.1 节所述，该作业对机器人的精确性和一致性提出了严格要求。物品必须被精确抓取并有序放置，这不仅考验了机器人在动作协调、力量控制和运动同步方面的能力，也暴露了其在能耗管理方面的不足。本章将在前述分析的基础上，深入讨论“门”字形轨迹与最短路径轨迹在码垛作业中的能耗优化问题。研究如何在确保操作精度和一致性的前提下，通过优化轨迹设计降低能耗，从而为工业生产提供更加环保、经济的解决方案。比较分析两种轨迹的能耗，优化节能路径，实现生产过程的绿色化和可持续发展。

3.2 优化逆解能效策略在码垛中的应用

3.2.1 “门”字型轨迹作业

在码垛作业的能耗特性分析中，能耗主要集中于机器人驱动关节的电机负载。在“门”字形作业周期内，机器人的平移运动虽然在时间上占据了较大比例，但其能耗水平相对较低，不是能耗的主要贡献因素。相比之下，物品的抓取与放置阶段，力矩控制显著增加，电机负载增大，导致能耗出现短时高峰。

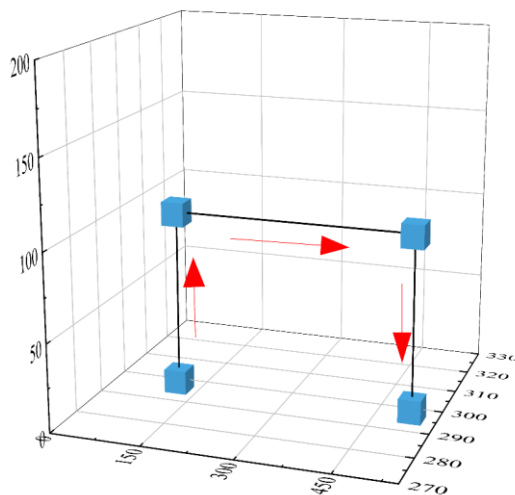


图 3-1 “门”字形轨迹

在本研究中，将 ER10-1600 机器人抽象为一个开链式四杆机构，利用优化的逆运动学理论，系统地探讨电机运行数量与能耗之间的关系。利用 CAD 软件绘制简图，按照

1:1 的比例, 精确绘制机器人各部件的位置关系, 直观地展示并分析能量消耗。本研究运用第 2.4.3 节中电机损耗数学模型, 深入分析能量消耗。尽管庾军波等人已经研究工业机器人在静态、动态运行时的基本动作和能耗特性, 但并未充分考虑伺服电机的功率因数和能量效率, 可能导致能耗计算模型存在偏差。因此, 为了更准确地测量实际能耗, 本研究利用 ServoITE 机器人控制器调试软件, 建立能耗测量实验台, 对比文献中的电机损耗数学模型与实验测量得到的实际能耗数据, 验证所提出模型的准确性和实用性^[44]。本文利用开链式四杆机构简化 ER10-1600 机器人的结构, 其中 a 杆代表腰部, b 杆代表大臂, c 杆代表小臂, d 杆代表腕部。图 3-2 表示机器人作业的初始位置。

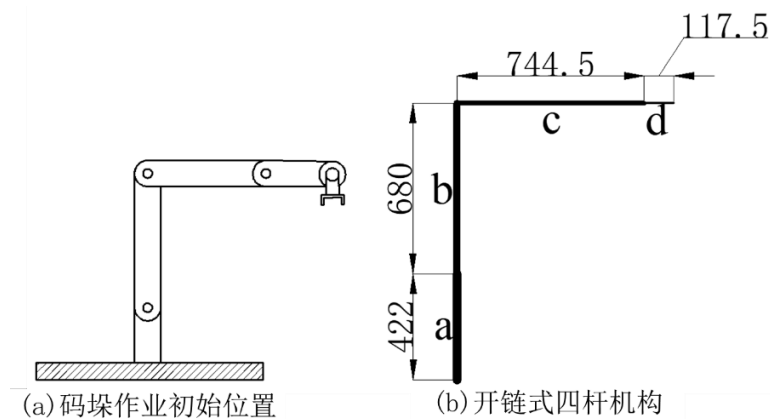


图 3-2 开链式四杆机构简图

在工作空间内, 以机器人腰部底部为参考点, 建立了一个 XOY 平面直角坐标系。在此坐标系中, 执行搬运任务, 将一边长为 100 毫米的物体移动到指定位置。选取物体左前下方的顶点作为参照点, 初始位置坐标设为 (500,0)。随后, 物体被搬运并放置到坐标为 (800,100) 的空白方格盒内, 具体过程如图 3-3。

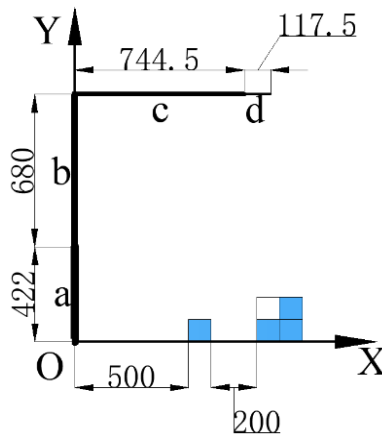


图 3-3 码垛作业初始位置

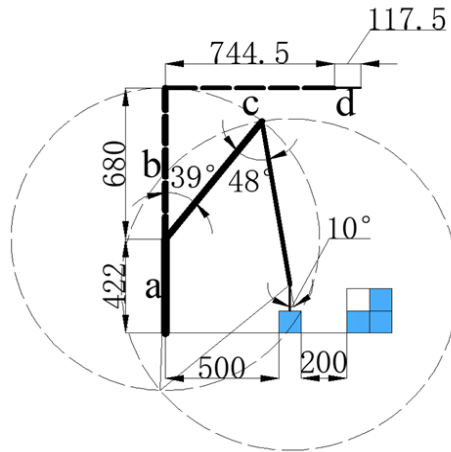
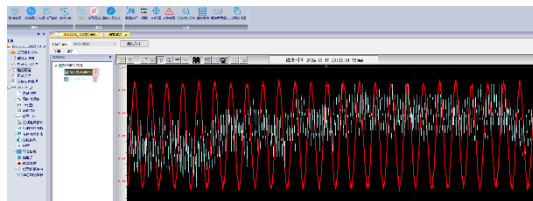


图 3-4 抓取阶段

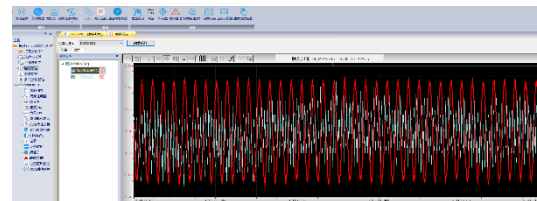
在抓取阶段，机器人各关节轴以恒定速度 $3^\circ/\text{S}$ 运动，腕部维持垂直姿态，拿取物体。此时大臂和小臂的位置如图 3-4。第 2 轴、第 3 轴和第 5 轴的电机分别旋转 39° 、 42° 和 10° 。根据本文提出的理论总能耗模型 $E' = PT \cdot \cos \alpha \cdot \eta$ ，其运行电机的能耗见表 3-1，图 3-5 表示实验测得电机作业的电压(蓝色线)、电流(红色线)。

表 3-1 抓取阶段电机能耗

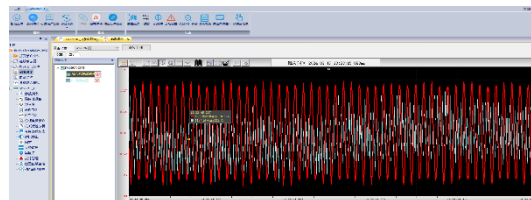
各轴电机	时间(S)	理论总能耗(J)	实际总能耗(J)	文献[44]能耗模型(J)
J2	13	3120	3387.4	5200
J3	14	8400	9062.1	14000
J5	3.4	816	756.9	1360



(a) J2 电机电流及电压



(b) J3 电机电流及电压



(c) J5 电机电流及电压

图 3-5 实测抓取电流及电压

抓取阶段的理论总能耗表示为

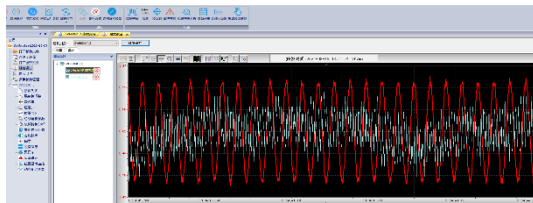
$$E'_{(\text{“门”抓取})} = E_{(J1)} + E_{(J2)} + E_{(J3)} = 12336(J) \quad (3-1)$$

在提升阶段，机器人沿“门”字型轨迹操作，各关节轴继续以 $3^\circ/\text{S}$ 的恒速运动，将物体垂直提升至坐标 $(500, 200)$ 的位置，详细动作如图 3-7。在此过程中，第 2 轴、

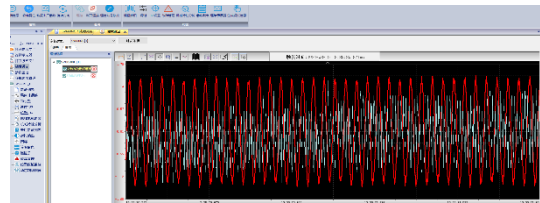
第 3 轴和第 5 轴的电机分别旋转了 22°、3°和 18°。相关电机的能耗数据列于表 3-2，图 3-6 表示实验测得电机作业的电压(蓝色线)、电流(红色线)。

表 3-2 “门”字型轨迹提升阶段电机能耗

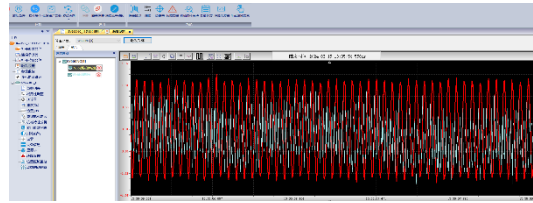
各轴电机	时间(S)	理论总能耗(J)	实际总能耗(J)	文献[44]能耗模型(J)
J2	7.3	1752	1589.6	2920
J3	1	600	408.3	1000
J5	6	1440	1578.2	2400



(a) J2 电机电流及电压



(b) J3 电机电流及电压



(c) J5 电机电流及电压

图 3-6 实测提升电流及电压

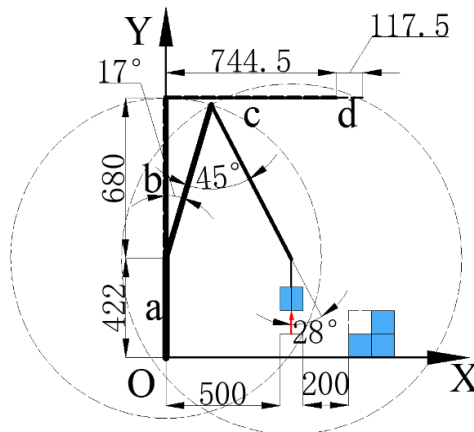


图 3-7 “门”字形轨迹提升阶段

“门”字型轨迹抓取阶段理论总能耗为

$$E'_{(\text{“门”提升})} = E_{(J1)} + E_{(J2)} + E_{(J3)} = 3792(J) \quad (3-2)$$

在平移阶段，遵循“门”字型轨迹，机器人以 3°/S 的恒速移动物体至坐标(800,200)，具体过程如图 3-8。此时，第 2 轴、第 3 轴和第 5 轴的电机相对于前一动作分别额外旋转了 16°、28°和 12°。电机能耗情况汇总在表 3-3 中，图 3-9 表示了实验测得电机作业的电压(蓝色线)、电流(红色线)。

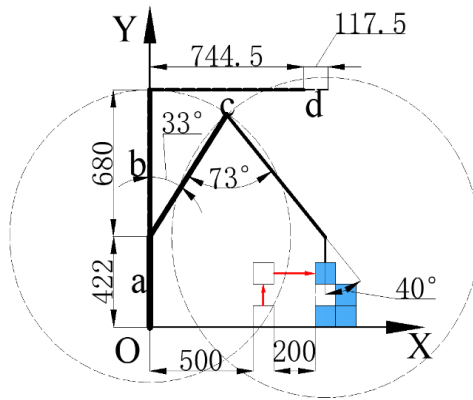
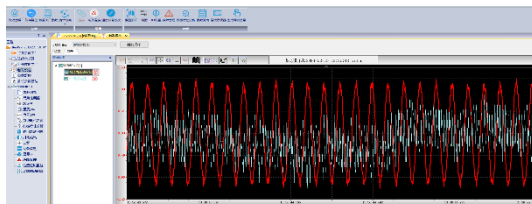


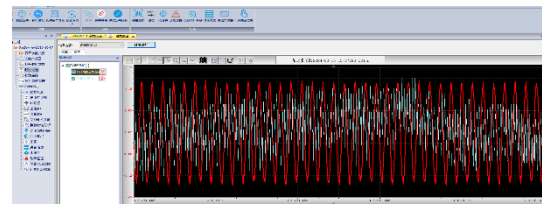
图 3-8 “门”字形轨迹平移阶段

表 3-3 “门”字型轨迹平移阶段电机能耗

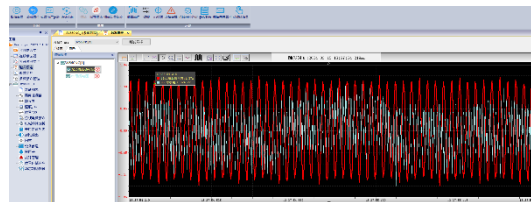
各轴电机	时间(S)	理论总能耗(J)	实际总能耗(J)	文献[44]能耗模型(J)
J2	5.3	1272	1385.4	2120
J3	9.3	5580	6126.4	9300
J5	4	960	1048.6	1600



(a) J2 电机电流及电压



(b) J3 电机电流及电压



(c) J5 电机电流及电压

图 3-9 实测平移电流及电压

“门”字型轨迹平移阶段理论总能耗为

$$E'_{(\text{“门”平移})} = E_{(J1)} + E_{(J2)} + E_{(J3)} = 7782(J) \quad (3-3)$$

在下降阶段，机器人按照“门”字型轨迹操作，各关节轴以 3°/S 的恒速运动，物体平移至坐标 (800,100)，详细过程如图 3-10。此时，第 2 轴、第 3 轴和第 5 轴的电机相对于前一动作分别旋转了 7°、1°和 7°。电机的能耗数据见表 3-4。图 3-11 表示了实验测得电机作业电压(蓝色线)、电流(红色线)。

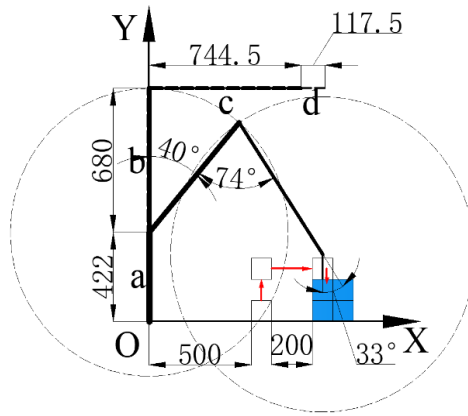
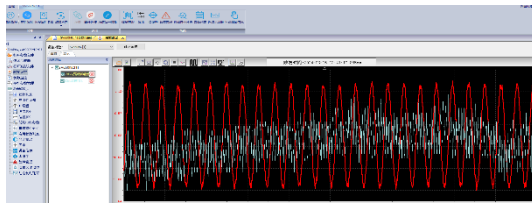


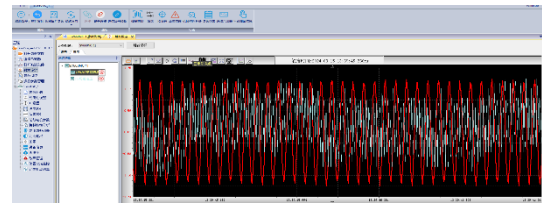
图 3-10 “门”字形轨迹下降阶段

表 3-4 “门”字型轨迹平移阶段电机能耗

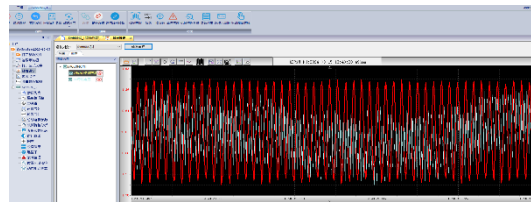
各轴电机	时间(S)	理论总能耗(J)	实际总能耗(J)	文献[44]能耗模型(J)
J2	2.3	552	698.7	920
J3	0.3	180	204.6	250
J5	2.3	552	654.3	920



(a) J2 电机电流及电压



(b) J3 电机电流及电压



(c) J5 电机电流及电压

图 3-11 实测下降电流及电压

“门”字型轨迹下降阶段理论总能耗为

$$E_{(\text{“门”下降})} = E_{(J1)} + E_{(J2)} + E_{(J3)} = 1284(J) \quad (3-4)$$

因此，“门”字型轨迹作业时，ER10-1600 机器人作业的理论总能耗为

$$E'_{(\text{“门”})} = E'_{(\text{“门”抓取})} + E'_{(\text{“门”提升})} + E_{(\text{“门”平移})} + E'_{(\text{“门”下降})} = 25194(J) \quad (3-5)$$

3.2.2 最短路径轨迹作业

在采用最短路径轨迹策略下，机器人的移动效率得到了显著提升。轨迹的优化，机器人避免了不必要的平移步骤，实现从起始位置直接向目标抓取点的快速转移，从而大幅缩减了整体移动距离。尽管这种路径调整可能会对整个动作序列中的能耗分布

造成影响——特别是在涉及提升动作的阶段，这可能在缺乏额外平移缓冲的情况下，机器人需施加更大的力矩来完成指定的动作。

简而言之，最短距离轨迹作业的核心优势在于其点对点的直接转移特性，缩短了路径长度，时间效率上也显著提升。若机器人的初始位置与图 3-3 所展示的一致，那么在执行最短距离轨迹作业的抓取阶段时，其能耗表现与执行“门”字型作业轨迹时相似。因此，得出最短距离轨迹作业的抓取能耗如下

$$E'_{(\text{“短”抓取})} = E'_{(\text{“门”抓取})} = 12336(J) \quad (3-6)$$

在执行提升物体的任务时，最短路径轨迹与经典的“门”字型作业轨迹存在差异。当机器人沿最短路径提升物体，且各关节轴以恒定速度 $3^\circ/\text{S}$ 运动时，最终目标位置坐标设为 $(800,200)$ 。具体的动作过程和位置关系如图 3-12。在此过程中，第 2 轴、第 3 轴以及第 5 轴的电机，分别旋转了 6° 、 25° 和 30° 。关于这些运行电机的能耗数据，在表 3-5 中汇总，图 3-13 表示了实验测得电机作业的电压(蓝色线)、电流(红色线)。

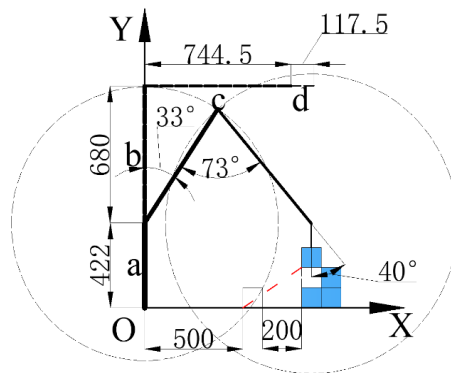
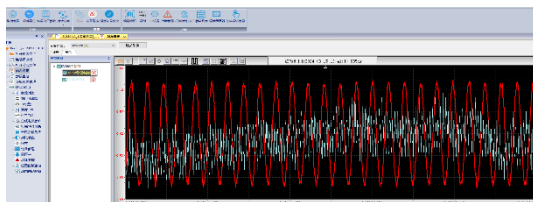


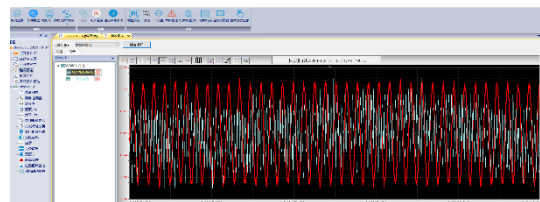
图 3-12 最短路径轨迹提升阶段

表 3-5 最短路径轨迹提升阶段电机能耗

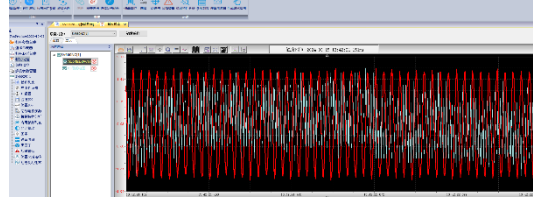
各轴电机	时间(S)	理论总能耗(J)	实际总能耗(J)	文献[44]能耗模型(J)
J2	2	480	478.6	800
J3	8.3	4980	5032.7	8300
J5	10	2400	2413.4	4000



(a) J2 电机电流及电压



(b) J3 电机电流及电压



(c) J5 电机电流及电压

图 3-13 实测短距离提升电流及电压

最短路径轨迹抓取阶段理论总能耗为

$$E'_{(\text{"短"提升})} = E_{(J1)} + E_{(J2)} + E_{(J3)} = 7860(J) \quad (3-7)$$

在物体被抓取并直接定位于放置区域的正上方之后，省去了任何平移步骤，机器人接着执行下降动作。此时，下降阶段的运动轨迹与“门”字型作业的下降路径相同，从坐标（800,200）垂直下降至（800,100），正如图 3-14。

在这两种情况中，由于运动轨迹的一致性，下降阶段的能耗也保持相同，即

$$E_{(\text{"短"下降})} = E_{(\text{"门"下降})} = 1284(J) \quad (3-8)$$

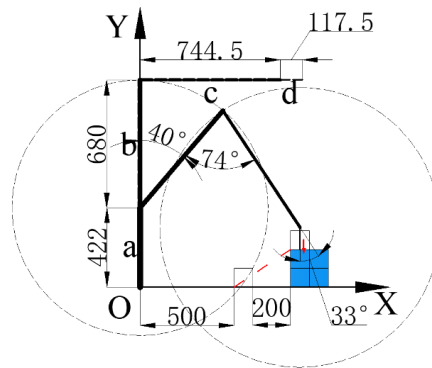


图 3-14 最短路径轨迹下降阶段

最短路径轨迹抓取阶段理论总能耗表示为

$$E'_{(\text{"短"})} = E'_{(\text{"短"抓取})} + E'_{(\text{"短"提升})} + E'_{(\text{"短"下降})} = 21480(J) \quad (3-9)$$

3.3 结果分析

依据 3.2.1 节中对“门”字型轨迹作业分析，J2、J3、J5 关节的旋转角度和相应能耗详见图 3-15。

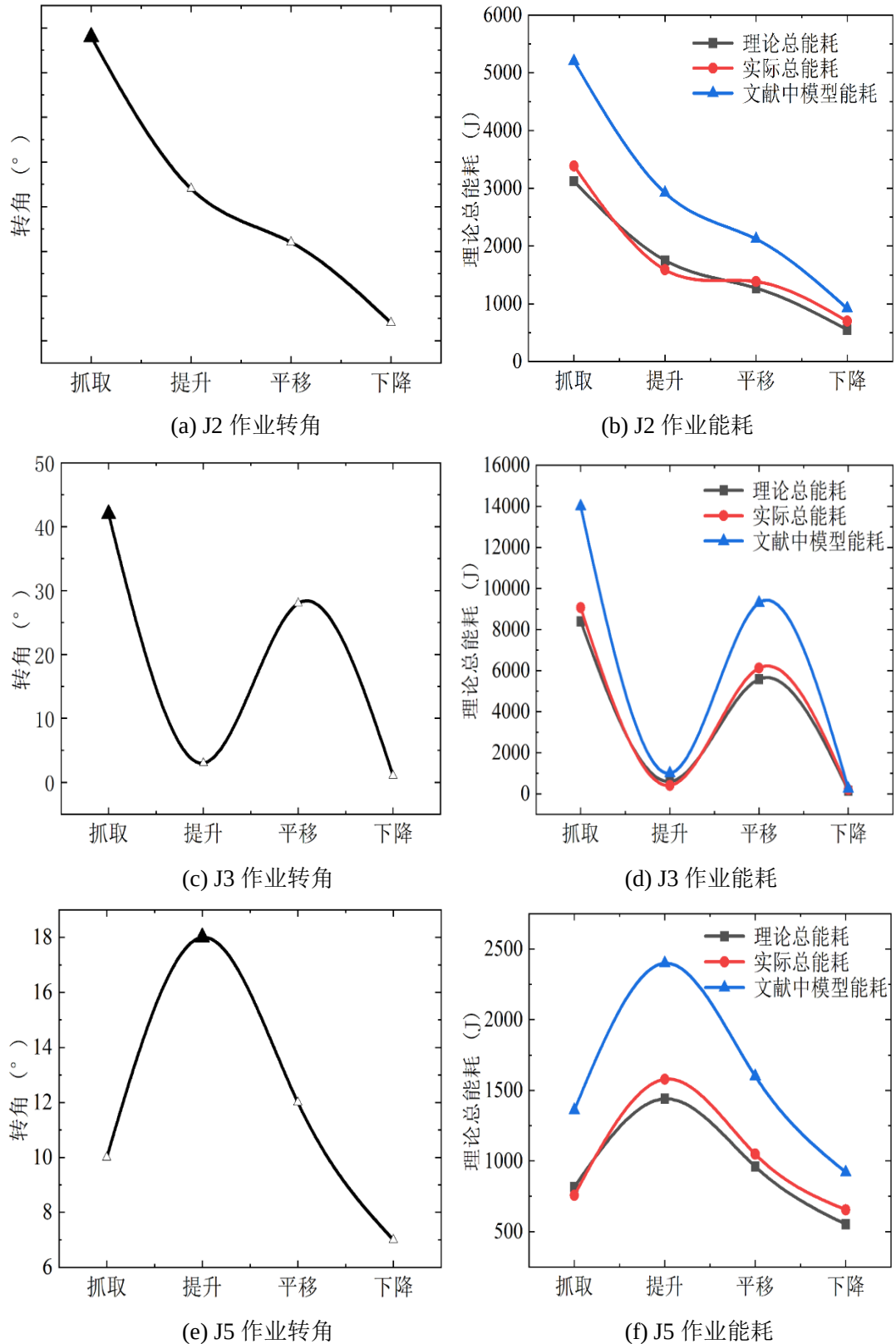


图 3-15 “门”字型作业轨迹转角与能耗对比

本文提出的电机能耗模型理论与文献^[44]中的模型相比较,分析各轴理论总能耗与实际总能耗的平均误差,结果显示,本文提出的电机能耗模型理论具有更高的准确性和更小的误差,详见表 3-6。

表 3-6 不同能耗模型的误差分析

	J2 平均误差	J3 平均误差	J5 平均误差	总能耗误差
本文方法	11.25%	15%	10%	6%
文献[44]方法	35%	44.25%	28.75%	36%

表 3-6 的结果表明，机器人各关节的转动角度与能耗之间存在正比关系。换言之，转角越大，电机运行时间越长，能耗也随之增加。因此，在确保完成任务的前提下，让部分关节保持静止状态是降低能耗的有效策略。特别是在某些关节在特定作业中无需活动的情况下，保持这些关节的静止不仅可减少能耗，还能提高整体作业效率。

根据第 3.2.1 节分析最短路径轨迹作业任务，在提升物体时，最短路径轨迹与传统的“门”字型作业轨迹之间存在显著差异。这种差异主要体现在两种轨迹下机器人关节的转角大小和能耗。具体的转角和能耗对比见图 3-16。

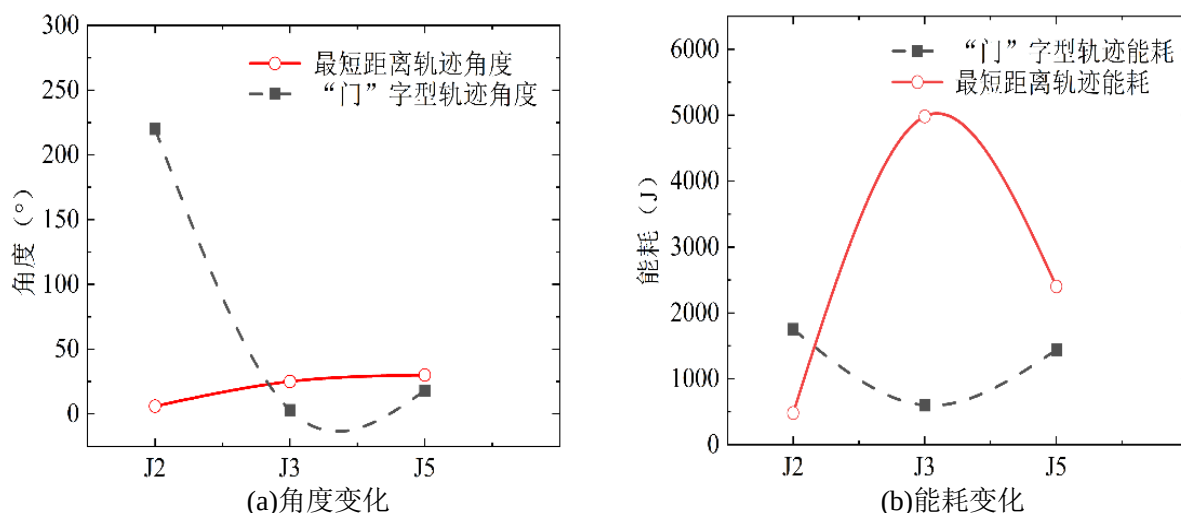


图 3-16 “门”字型与最短路径轨迹提升作业对比

图 3-16 揭示了 J2 和 J3 电机角度与能耗之间的关系。尽管 J2 电机的角度变化较大，但由于其功率较低，因此两种轨迹下的能耗差异并不显著。相反，J3 电机虽然角度变化较小，但由于其功率高达 600 W，能耗显著，呈现出“抛物线”式的增长趋势。因此，为了优化能耗，应当尽量减少高功率电机的运动量，将更多的运动任务分配给功率较小的电机，这样不仅可以降低能耗，还能促进整个系统功率消耗的平衡。

3.4 本章小结

本章剖析工业机器人码垛作业中的能耗优化问题，着重分析了机器人关节电机负载的能耗特性。在相同作业任务下，利用理论公式计算与实际测量，分别对比“门”字形轨迹和最短路径轨迹各阶段电机能耗，揭示了最短路径轨迹作业时能耗最优，并证

实了优化逆解策略在能效提升方面的可行性。在不影响任务完成的情况下，保持部分关节静止能有效降低能耗的策略。此外，应尽量减少高功率电机的运动量，将更多的运动任务分配给功率较小的电机，可降低整体能耗并平衡系统的功率消耗。上述结论为工业机器人的能效管理提供了宝贵的指导。

第 4 章 工业机器人焊接作业能耗优化

4.1 引言

焊接作业是制造业的典型工艺，焊接作业轨迹规划是影响产品质量和生产效率的重要因素。正如 2.5.2 节所述，机器人焊接需要极高的精度和稳定性，涉及到末端执行器沿复杂路径的精确移动以及严格的焊接参数控制。然而，不当的作业规划导致大量的能源消耗，特别是在末端执行器电源和伺服电机精确控制方面。随着能效要求的提高和成本压力的增加，优化焊接作业能耗变得尤为重要。有效的能耗优化不仅可以降低生产成本，还减轻环境负担。因此，在保持焊接质量的同时应尽量减少能量浪费，提升焊接生产线的整体能效。

4.2 焊接作业速度与能耗耦合分析

在工业焊接领域，激光焊接相较于电弧焊、激光-电弧焊能量消耗更大，优化激光焊接已成为提高竞争力与可持续发展的核心。邵浩然^[45,46]分析六自由度焊接机器人运动学、动力学，结构优化和轨迹规划。运用 D-H 法建立运动学模型并推导正逆解方程，使用牛顿-欧拉法建立动力学模型，并利用 ADAMS 软件仿真分析以验证模型准确性，优化杆件参数对动力学性能的影响，实现降低驱动力矩峰值和作业能耗。激光焊接作业能耗主要分布在工业机器人伺服电机和激光器，伺服电机确保焊枪的精准操控，激光器负责提供熔化焊料所需的能量。在焊接过程中，能量消耗与焊缝品质均受制于加工变量的决策框架，并受众多工艺参数的制约，导致能量消耗与焊缝品质之间形成了复杂的耦合联系，并通过工艺参数的相互作用表现。在工业机器人激光焊接时，需针对作业任务复杂程度适配选取激光器，避免高功率和无用功。除此之外，工业机器人伺服电机运行状况对能耗影响尤为明显。

前面章节分析可知，电机运行时间越长，能耗越大，如果一味地缩短运行时间，焊接速度必受影响，导致焊接质量差、焊缝评估不合格。本节在研究焊接作业速度与能耗之间的耦合关系时，引入比能耗(Specific Energy Consumption, SEC)概念。比能耗(SEC)是一个衡量能源效率的重要指标，通常用来描述单位产品或服务所消耗的能源量。用于理解在生产过程中每单位产出所需的能量，从而评估能源使用的有效性。在不同领域和行业中，比能耗的概念和计算方式可能会不同，但核心思想一致，即以最少的能源投入达到预期的生产或服务效果。例如，Lunetto、Paul 等人评估增材制造过程和激光烧结工

艺的能耗^[47,48]、潘安大、尹晖、徐敬通等人评估数控机床加工作业的能耗^[49-51]，均采用 SEC 衡量能源效率。本文焊接作业 SEC 指焊接作业的总能耗与焊接成形体积(V)之比，SEC 越小则能源利用率越高。据前面分析，焊接作业的总能耗主要包含激光器和伺服电机，因此得出相应的计算公式如下。

$$SEC = \frac{E_{laser} + E_{smotor}}{V} \quad (4-1)$$

其中， E_{laser} 表示激光器能耗， E_{smotor} 表示伺服电机能耗， V 表示焊接形成的焊缝体积。

激光焊接作业的质量取决于焊接速度，速度的精确控制依赖于工业机器人电机的调控。根据第三章的研究，最短路径原则指导电机运行能有效优化能源消耗，这一策略同样适用于激光焊接。在实际应用中，焊接通常涉及两种情况，操作在同一平面或相邻两平面间，见图 4-1。无论哪种场景，采用最优路径规划对于减少不必要的能耗，提高焊接效率，确保作业质量都至关重要。将优化问题描述如下

$$\begin{cases} \min L(x) \\ \min E(x) \end{cases} \quad (4-2)$$

其中， x 表示焊接路径各点的位置， $L(x)$ 表示路径长度， $E(x)$ 表示焊接能耗。

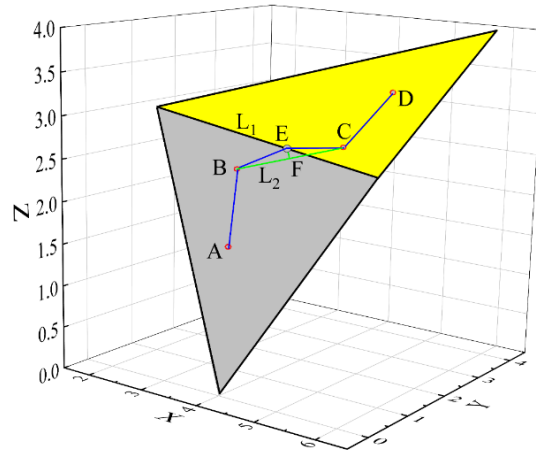


图 4-1 带焊点的工件加工面

图 4-1 同一平面两点 A 和 B（或 C 和 D），最短距离则是两点之间连线的长度。运用欧几里德距离公式计算，即

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (4-3)$$

其中，A 点坐标是 (x_1, y_1) ，B 点坐标是 (x_2, y_2) ， d 是 A 与 B 点之间的最短距离。

焊点位于相邻平面上，如图 4-1 中直线 $\overline{AB}$ 与直线 $\overline{CD}$ 。长度最短的路径从起点开

始，经过两个平面交线 L_1 上的过渡点 E ，到达终点。过渡点就是两平面交线与直线 $\overline{BE}$ 和 $\overline{CE}$ 共同垂线的交点 E 。若 L_1 有两个点坐标 (X_a, Y_a, Z_a) ， (X_b, Y_b, Z_b) ， L_2 有两个点坐标 (X_c, Y_c, Z_c) ， (X_d, Y_d, Z_d) 。 L_1 和 L_2 的方程表示如下

$$L_1: \frac{X - X_a}{X_b - X_a} = \frac{Y - Y_a}{Y_b - Y_a} = \frac{Z - Z_a}{Z_b - Z_a} \quad (4-4)$$

$$L_2: \frac{X - X_c}{X_d - X_c} = \frac{Y - Y_c}{Y_d - Y_c} = \frac{Z - Z_c}{Z_d - Z_c} \quad (4-5)$$

假设不同平面上直线的公共垂线的向量为 (E, F, G) 。因为公共垂线与两条直线正交，所以得到式(4-6)。

$$\begin{vmatrix} E & F & G \\ X_b - X_a & Y_b - Y_a & Z_b - Z_a \\ X_d - X_c & Y_d - Y_c & Z_d - Z_c \end{vmatrix} = 0 \quad (4-6)$$

$$\text{因此, } E = \begin{vmatrix} Y_b - Y_a & Z_b - Z_a \\ Y_d - Y_c & Z_d - Z_c \end{vmatrix}, F = \begin{vmatrix} Z_b - Z_a & X_b - X_a \\ Z_d - Z_c & X_d - X_c \end{vmatrix}, G = \begin{vmatrix} X_b - X_a & Y_b - Y_a \\ X_d - X_c & Y_d - Y_c \end{vmatrix}.$$

根据直线 L_1 和共同垂线确定的平面 β 定义为

$$\begin{vmatrix} X - X_a & Y - Y_a & Z - Z_a \\ X_b - X_a & Y_b - Y_a & Z_b - Z_a \\ E & F & G \end{vmatrix} = 0 \quad (4-7)$$

将 $X_b - X_a$ 记为 H ， $Y_b - Y_a$ 记为 I ， $Z_b - Z_a$ 记为 J ， $X - X_a$ 记为 K ， $Y - Y_a$ 记为 L ， $Z - Z_a$ 记为 M 。

$$H \times I \times J - I^2 \times K - J^2 \times K + H \times J \times M = N \quad (4-8)$$

$$H^2 \times L - H \times I \times K - I \times J \times M + J^2 \times L = O \quad (4-9)$$

$$H \times J \times K - H^2 \times M - I^2 \times M + I \times J \times L = P \quad (4-10)$$

$$-X_a \times N + Y_a \times O - Z_a \times P = Q \quad (4-11)$$

那么，平面 β 表示为

$$N \times x - O \times y + P \times z + Q = 0 \quad (4-12)$$

联立式(4-5)和式(4-12)可得

$$\begin{cases} x = K \times k + X_c \\ y = L \times k + Y_c \\ z = M \times k + Z_c \end{cases} \quad (4-13)$$

$$\text{其中, } k = \frac{O \times Y_c - N \times X_c - P \times Z_c - Q}{N \times K - O \times L + P \times M}。$$

求得交点 E 的坐标为 $(K \times k + X_c, L \times k + Y_c, M \times k + Z_c)$ 。即可将相邻平面的最短距离转化为同一平面求解。如果遇到复杂的曲面即不相邻面间焊缝, 利用泛函计算求其变分极值, 得到最短距离。在最优路径下, 讨论焊接作业速度与能耗的关系, 进一步缩减不必要的能量消耗, 具体的“速度-能耗”耦合优化方案流程如图 4-2。

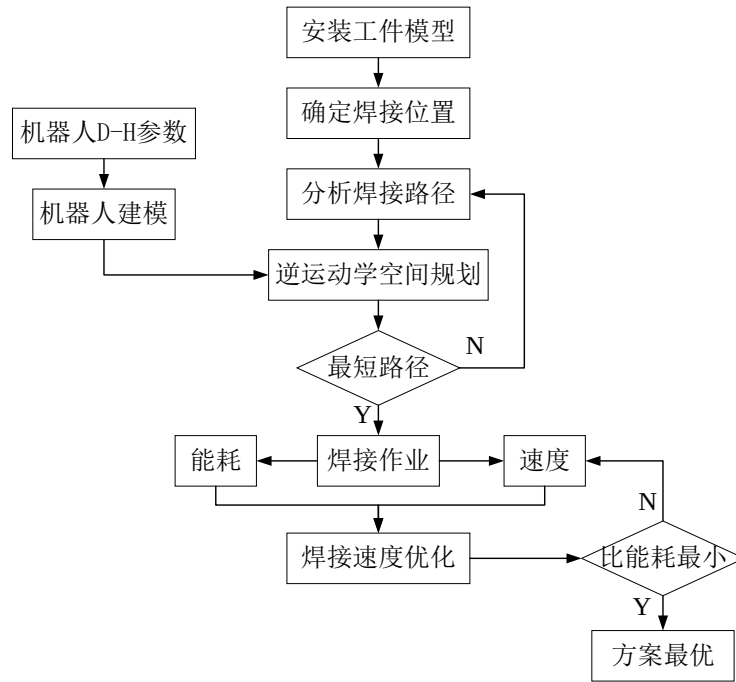


图 4-2 “速度-能耗”耦合优化方案

4.3 转速优化能效策略在焊接中的应用

结合上述分析, 不在同一平面内的焊接问题转化为相邻两点间最短距离。因此, 本节仅设计直线型焊缝实验, 在不同作业速度下, 探究其能耗大小。同时, 将 ER10-1600 机器人抽象为一个开链式四杆机构, 在 CAD 软件绘制简图, 按照 1:1 的比例精确绘制机器人各部件的位置关系, 直观地展示并分析能量消耗。焊接作业机器人与工件的相对位置简图如图 4-3, 且焊缝在同一平面内。

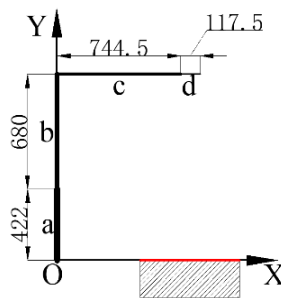


图 4-3 焊接作业相对位置简图

焊接时保持末端与工件夹角 45° ，即保持 J5 与工件加工面夹角为 45° 。选用不同焊接速度，多次实验，并记录数据，具体流程如图 4-4 所示。

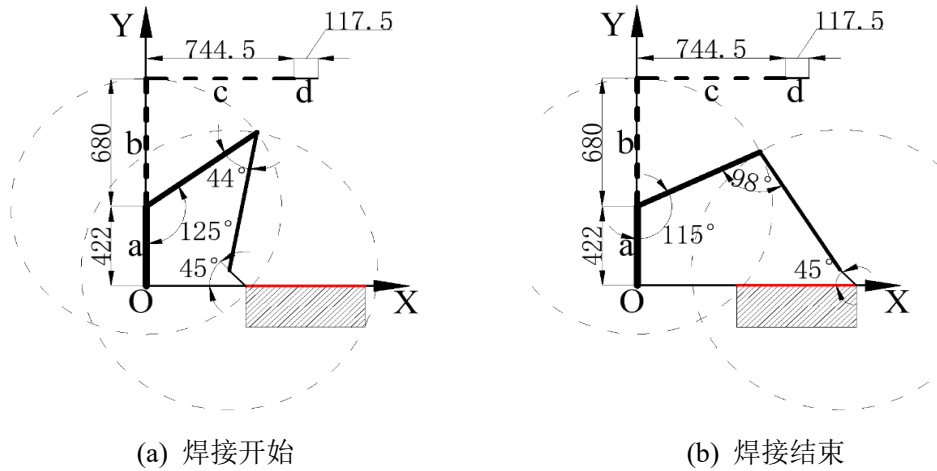


图 4-4 焊接作业流程简图

为确保实验的准确性和效果，本章选用具有高强度特性的铝合金材料作为实验样品。在实验开始前，工件待加工表细致打磨和抛光预处理，获取更加光滑均匀的基面，确保激光加工的质量和准确性。实验中，分别设定 2600 W、2700 W 和 2800 W 三种不同的激光功率，并调整相应的作业速度，探究不同功率对加工效果的影响。实验结果如表 4-1 所示，详细列出了各功率下的比能耗与速度。

表 4-1 “速度-比能耗”对照表实验结果

实验次序	激光功率(W)	焊接速度(mm/S)	比能耗(J/mm ³)
1	2600	32	83.042
2	2600	35	84.55
3	2600	38	93.979
4	2700	32	85.895
5	2700	35	78.703
6	2700	38	80.865
7	2800	32	80.456
8	2800	35	60.695
9	2800	38	73.841

在实验过程中，选择电气仪表测量电压、电流等数据，测算能量消耗，结合实际焊接质量，计算比能耗。图 4-5 列出功率在 2800 W 时不同焊接速度下的电流和电压数据图，测得电机作业电压(蓝色线)、电流(红色线)。

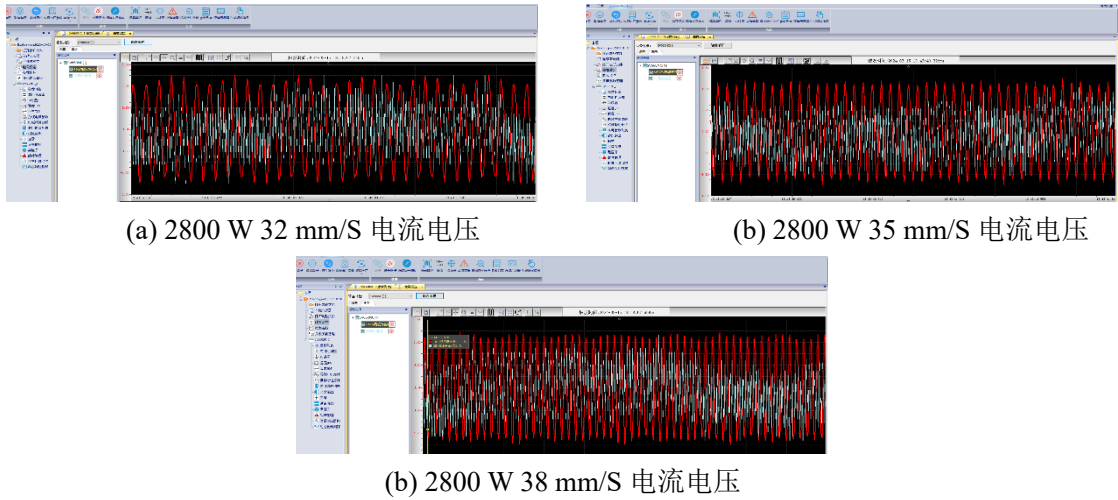


图 4-5 2800 W 不同速度的电流电压波动

4.4 结果分析

在探讨工业机器人焊接作业的能耗优化策略时，通过实验对比了三种不同激光功率水平下的作业速度与比能耗之间的关系。分析图 4-6 所示的数据，得出以下分析结果。

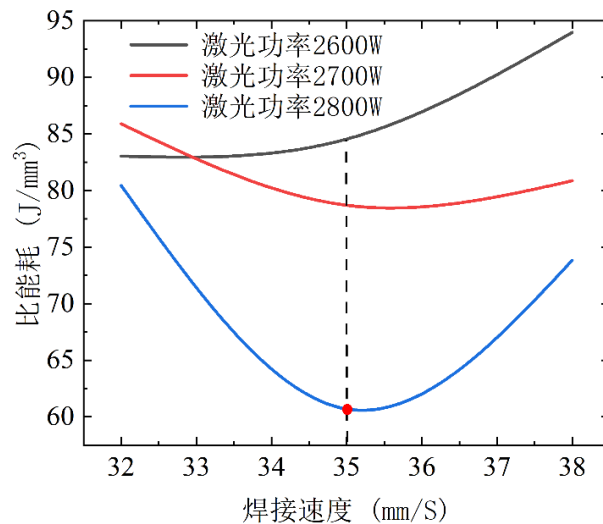


图 4-6 不同功率比能耗与速度关系

保持激光功率不变，观察到增加焊接速度会导致比能耗的上升。例如，在 2600 W 的功率水平下，当焊接速度从 32 mm/s 增至 38 mm/s 时，比能耗相应升高，表明更高的焊接速度可能降低能量利用效率。当改变激光功率时，比能耗并未呈现一致的增加或减少趋势。以 35 mm/s 的恒定速度为例，随着激光功率从 2600 W 逐步提高至 2700 W 再到 2800 W，比能耗反而呈现下降趋势，暗示存在一个最合适的功率和速度组合。在所有的实验配置中，2800 W 的激光功率结合 35 mm/s 的焊接速度达到了最优的比能耗值 (60.695 J/mm^3)，确立了这一组合作为当前实验条件下的最优能效操作点。虽然初看之下选择较低功率的激光似乎更为节能，实验结果却表明焊接速度的选择同样至关重要。

在某些情况下，适当提升激光功率并配合合适的焊接速度，反而获得更优的比能耗。

4.5 本章小结

本章深入探讨了工业机器人焊接作业的能耗优化问题。在激光焊接中，能耗优化尤为关键，直接影响企业的竞争力和绿色制造。本研究采用了比能耗指标评估能效，揭示焊接速度与能耗复杂的耦合关系。实验证明，在不同的操作条件下，速度显著影响了能耗。低功率激光并非更节能；恰当的功率和速度组合才能实现最佳能效，验证了优化转速能效策略的可行性和有效性。

第5章 基于层次分析法的工业机器人作业能耗模糊综合评价

5.1 引言

随着工业机器人在制造业的广泛应用，其能源消耗问题已经成为制约行业可持续发展的关键挑战。除了前面章节所述的能耗评价外，针对工业机器人作业能耗构成复杂、评价指标不全面以及评价结果不准确的问题，本章提出一种基于层次分析法和模糊综合评价法的能耗综合评价方法。根据第二章关于工业机器人作业能耗的构成，建立工业机器人能耗评价指标体系。利用层次分析法赋权各项指标，使用权重相乘法计算综合权重，分析作业能耗的关键因素；采用模糊综合评价法确定当前作业能耗层级，构建隶属度矩阵，计算隶属值，根据最大隶属度原则，评价工业机器人能耗级别。

5.2 工业机器人作业能耗评价流程及方案

工业机器人作业能耗评价是一个多维度问题，涉及机械、电气、作业对象等多个模糊变量。单一维度的评价和优化难以应对复杂的作业过程。因此，在现有研究成果的基础上，本文专注于构建一个综合评价指标体系和模糊综合评价方法，图 5-1 详细列出了能耗评价流程及实施方案。

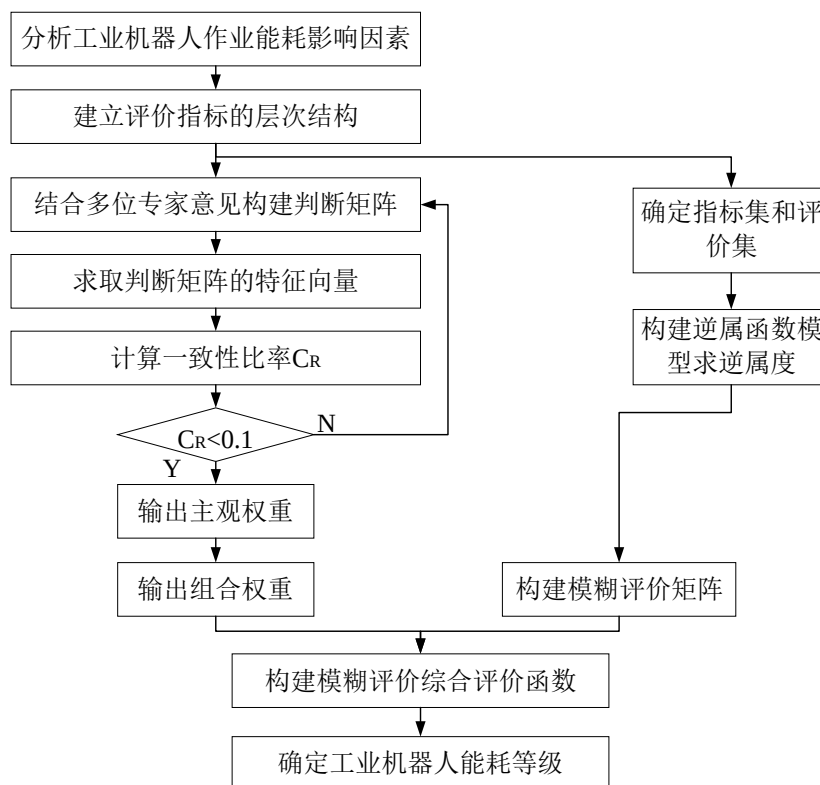


图 5-1 工业机器人作业能耗评价流程及方案

首先，分析工业机器人能耗的组成关键部分，并按照能量流动逻辑顺序，设计三级评价指标的评价框架。构建电机损耗、系统配套设备能耗、机械损耗、相关电路能耗、末端执行器能耗以及废弃物处理能耗等六个二级指标层；铁损、定子转子绕组损耗等二级指标的子指标，即 22 个三级指标。利用层次分析法计算各层级的权重，并最终得出能耗影响因素的综合权重。考虑到评价过程中涉及众多模糊因素，采用了模糊综合评价法，构建了相应的隶属函数，并计算出了综合评价指数，据此评价工业机器人当前作业能耗级别。本章提出的工业机器人作业评价方法为机器人能效管理提供一种新的视角和方法。

5.3 基于层次分析法的指标组合赋权

5.3.1 基于层次分析法的工业机器人作业能耗评价

层次分析法（AHP）由 T.L.Saaty 教授提出，是运筹学中常用的一种决策技术，通过建立层次模型和成对比较，确定因素的权重，提升了决策的逻辑性和透明度^[52-61]。参照图 2-5，本研究构建了如图 5-2 所示的能耗评价指标体系，该体系将作业能耗这一复杂问题细化为三个不同层次的指标因素。在这一体系中， C_1 至 C_{22} 被定义为二级指标的子指标，并与二级能耗因素的子构成相对应。对于各个层次的指标，构建了式(5-1)所示的判断矩阵，用于比较两个指标间相对重要性。通过征询专家意见或发放调查问卷的方式，采用一个从 1 到 9 的标度表示指标间的相对权重，其中“1”代表两者同等重要，“3”表示一方比另一方稍微重要，“7”意味着一方显著重要，而“9”则代表一方极为重要。运用层次分析法中的特征向量法，按照式(5-2)和(5-3)计算每个层级指标的权重向量以及特征值。随后，将特征向量归一化处理后得到权重。判断矩阵经过一致性检验，如式(5-4)和(5-5)；如果一致性比率（CR）小于 0.1，则判断矩阵通过一致性检验，这确保了专家评判的一致性和可接受性。倘若一致性比率未达到可接受的标准，判断矩阵则需要调整。层次分析法用于计算能耗权重的具体流程见图 5-3。

$$U = \begin{bmatrix} U_{11} & \cdots & U_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ U_{n1} & \cdots & U_{nm} \end{bmatrix} \quad (5-1)$$

式中， U_{ij} 表示两元素 U_i 和 U_j 的相对重要程度。

$$UW = \lambda_{\max} W \quad (5-2)$$

$$W'_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n U_{ij}} / \sum_{i=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n U_{ij}} \quad (5-3)$$

式中， W 表示特征矩阵， $\lambda_{\max}$ 表示判断矩阵 U 的最大特征值， W'_i 表示层次分析法中各指标权重。

$$CR = CI / RI \quad (5-4)$$

式中， CR 表示一致性比例， CI 表示一致性指标， RI 表示随机性指标，根据矩阵阶数取值。

$$CI = \lambda_{\max} - n / n - 1 \quad (5-5)$$

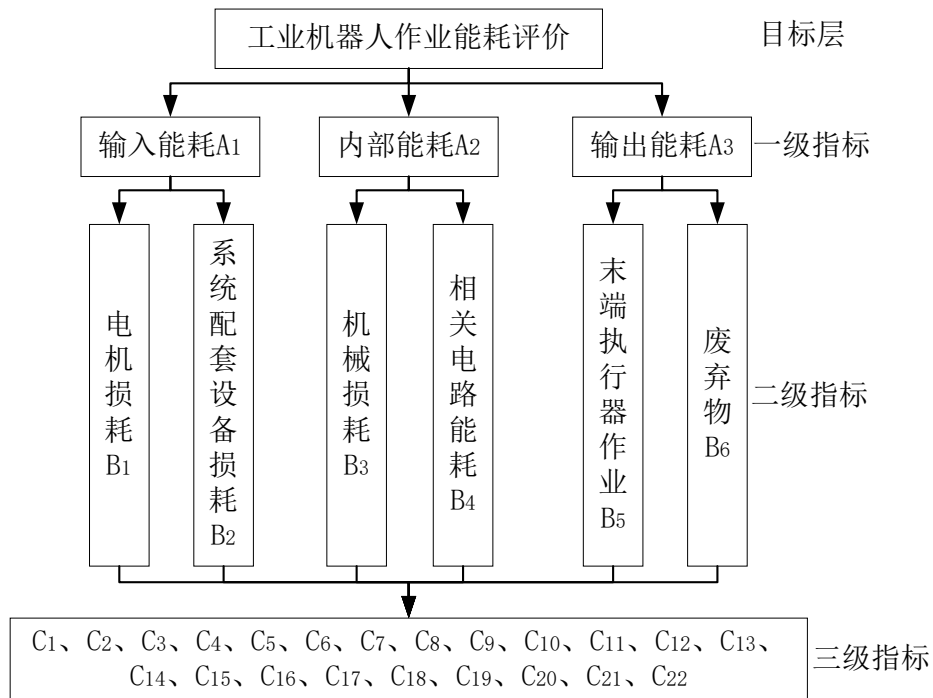


图 5-2 机器人作业能耗评价指标体系

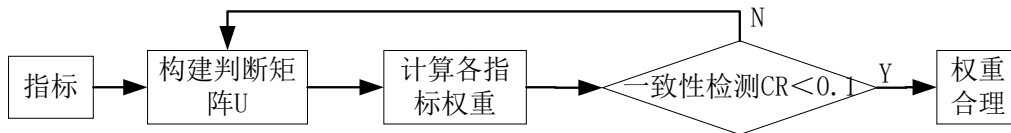


图 5-3 层次分析法计算准则层和指标层能耗权重

根据上述方法，本节运用层次分析法计算三级指标层的指标权重。为了确保评估的客观性，邀请某机器人产业技术研究院五名专家对关键评价指标打分排序，提升评价体系的科学性和信度，确保指标重要性得到准确反映，一、二级指标层次分析判断矩阵及一致性检验结果列表 5-1。基于 MATLAB 软件计算各层次权重值，一级指标层次分析结果见表 5-2，二级指标层次分析结果见表 5-3。

表 5-1 一、二级指标层次分析判断矩阵及一致性检验结果

层次模型		判断矩阵			一致性检验
一级指标		A ₁	A ₂	A ₃	
	A ₁	1	7.69	6.67	$\lambda_{\max} = 3.008$
	A ₂	0.13	1	0.67	CI = 0.004
	A ₃	0.15	1.50	1	CR = 0.007
二级指标		B ₁	B ₂		$\lambda_{\max} = 2$
	B ₁	1	5.88		CI = 0
	B ₂	0.17	1		CR = 0
		B ₃	B ₄		$\lambda_{\max} = 2$
	B ₃	1	0.13		CI = 0
	B ₄	7.5	1		CR = 0
		B ₅	B ₆		$\lambda_{\max} = 2$
	B ₅	1	4		CI = 0
	B ₆	0.25	1		CR = 0

表 5-2 一级指标结果分析

项	特征向量	权重值	最大特征值	CI 值
输入能耗 A ₁	2.336	77.866%		
内部能耗 A ₂	0.280	9.323%	3.008	0.004
输出能耗 A ₃	0.384	12.812%		

表 5-3 二级指标结果分析

项	二级指标	特征向量	权重值	最大特征值	CI 值
A ₁	电机损耗 B ₁	1.709	85.470%	2	0
	系统配套设备损耗 B ₂	0.291	14.530%		
A ₂	机械损耗 B ₃	0.235	11.765	2	0
	相关电路能耗 B ₄	1.765	88.235%		
A ₃	末端执行器作业 B ₅	1.600	80%	2	0
	废弃物 B ₆	0.400	20%		

运用表 5-2 的数据，使用层次分析法构建了一个 3 阶判断矩阵，用于研究输入能耗 A₁、内部能耗 A₂ 和输出能耗 A₃。利用和积法计算，得到特征向量为(2.336, 0.280, 0.384)。

这三项的权重值分别为 77.866%，9.323%和 12.812%。为了检验其一致性，首先计算出最大特征根为 3.00。然后，利用最大特征根值计算 CI 值（一致性指标），结果为 0.004。接下来，查找随机一致性 RI 表格，找到 3 阶矩阵的 RI 值为 0.52。因此，计算得到的 CR 值（一致性比率）为 0.007，小于 0.1。计算结果表明，本次研究的判断矩阵满足一致性检验要求，计算所得的权重具有一致性。

运用层次分析法(AHP) 分析表 5-3 数据,针对电机损耗 B_1 和系统配套设备损耗 B_2 ，构建了 2 阶判断矩阵（采用和积法）。得到特征向量为(1.709, 0.291)，对应权重分别为 85.470%和 14.530%。最大特征根为 2.000，一致性指标 CI 为 0.000，由于是 2 阶矩阵，RI 值亦为 0.000，因此无法计算 CR 值，但二阶矩阵默认满足一致性。对于机械损耗 B_3 和相关电路损耗 B_4 ，构建的 2 阶判断矩阵产生特征向量(0.235, 1.765)，对应权重为 11.765%和 88.235%。最大特征根为 2.000，CI 为 0.000，RI 值为 0.000，同样无法计算 CR 值，但数据符合一致性要求。末端执行器作业 B_5 与废弃物 B_6 构成的 2 阶判断矩阵，得到特征向量为(1.600, 0.400)，权重分别是 80.000%和 20.000%。最大特征根为 2.000，CI 为 0.000，RI 值为 0.000，不计算 CR 值，该矩阵也满足一致性检验。因此，所有构建的 2 阶判断矩阵均显示出良好的一致性，所得权重有效。

在使用层次分析法决策时，面对二级指标下的 22 个三级指标，首先需要构建与每个二级指标（ B_1 至 B_6 ）相关子指标的判断矩阵，形成 6 个判断矩阵，分别对应于 B_1 至 B_6 的下属指标，见式(5-1)。分别比较各子指标相对重要性，填写每一个判断矩阵。其中，T1 表示 $C_1 \sim C_5$ 的判断矩阵，T2 表示 $C_6 \sim C_8$ 的判断矩阵，T3 表示 $C_9 \sim C_{10}$ 的判断矩阵，T4 表示 $C_{11} \sim C_{13}$ 的判断矩阵，T5 表示 $C_{14} \sim C_{19}$ 的判断矩阵，T6 表示 $C_{20} \sim C_{22}$ 的判断矩阵。由上述 6 个判断矩阵，运用特征值法计算每个判断矩阵的特征向量，特征向量代表子指标在其父指标中的相对权重。层次分析法计算详细结果，见表 5-4。

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0.22 & 2 & 4.55 & 0.17 \\ 4.5 & 1 & 7.69 & 7.69 & 0.67 \\ 0.5 & 0.13 & 1 & 1.49 & 0.13 \\ 0.2 & 0.13 & 0.67 & 1 & 0.12 \\ 6 & 1.5 & 8 & 8.5 & 1 \end{bmatrix}, T_2 = \begin{bmatrix} 1 & 2.94 & 5.56 \\ 0.34 & 1 & 2.22 \\ 0.18 & 0.45 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-6)$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 7.14 \\ 0.14 & 1 \end{bmatrix}, T_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0.35 & 0.12 \\ 2.89 & 1 & 0.13 \\ 8.59 & 7.48 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-7)$$

$$T_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0.17 & 0.13 & 0.22 & 0.33 & 0.67 \\ 6 & 1 & 0.62 & 1.49 & 2.94 & 4.54 \\ 7.5 & 1.62 & 1 & 2.94 & 4.55 & 5.88 \\ 4.5 & 0.67 & 0.34 & 1 & 4.76 & 3.23 \\ 3 & 0.34 & 0.22 & 0.21 & 1 & 6.67 \\ 1.5 & 0.22 & 0.17 & 0.31 & 0.15 & 1 \end{bmatrix}, T_6 = \begin{bmatrix} 1 & 7.14 & 3.45 \\ 0.14 & 1 & 0.22 \\ 0.29 & 4.49 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-8)$$

表 5-4 三级指标结果分析

矩阵	三级指标	特征向量	权重值	最大特征值	CI 值	RI 值	CR 值
T ₁	C ₁	0.536	10.712%	5.134	0.034	1.12	0.03<0.1 (一致性检验通过)
	C ₂	1.753	35.062%				
	C ₃	0.261	5.212%				
	C ₄	0.196	3.918%				
	C ₅	2.255	45.095%				
T ₂	C ₆	1.961	65.353%	3.003	0.001	0.52	0.003<0.01 (一致性检验通过)
	C ₇	0.705	23.486%				
	C ₈	0.335	11.161%				
T ₃	C ₉	1.754	87.719%	2	0	0	0<0.01 (一致性检验通过)
	C ₁₀	0.246	12.281%				
T ₄	C ₁₁	0.212	7.082%	3.098	0.049	0.52	0.094<0.01 (一致性检验通过)
	C ₁₂	0.452	15.060%				
	C ₁₃	2.336	77.858%				
T ₅	C ₁₄	0.228	3.806%	6.522	0.104	1.26	0.083<0.01 (一致性检验通过)
	C ₁₅	1.416	23.595%				
	C ₁₆	2.200	36.673%				
	C ₁₇	1.151	19.179%				
	C ₁₈	0.711	11.851%				
	C ₁₉	0.294	4.896%				
T ₆	C ₂₀	2.003	66.765%	3.068	0.034	0.520	0.065<0.01 (一致性检验通过)
	C ₂₁	0.225	7.491%				
	C ₂₂	0.772	25.744%				

5.3.2 指标综合权重

为了计算综合权重，本文综合表 5-2、表 5-3 和表 5-4，利用层次分析法得到各级指标权重，采用多种方法计算综合权重，包括权重相乘法^[62]、几何平均法^[63-65]和算术平均法^[66-68]，以适应不同的决策侧重点和权重平衡需求。当需要在决策中特别强调某些级别的权重，使其具有更大的影响力时，倾向于使用权重相乘法，经过连乘运算，增强因素在决策过程中的级别影响。如果目标在各级别间需更均衡的权重分配，那么几何平均法或算术平均法更为合适。几何平均法计算所有权重值连乘结果的 n 次方根（ n 代表权重数量），实现了权重的均衡化。而算术平均法则简单地计算了所有权重的平均值，达到平衡不同级别权重的效果。本文采用权重相乘法计算综合能耗权重。其中，表 5-5 列出了应用权重相乘法得出的综合能耗权重。

表 5-5 权重相乘法能耗综合权重

一级指标	权重	二级指标	权重	三级指标	权重	综合权重
A ₁	77.866%	B ₁	85.470%	C ₁	10.712%	7.13%
				C ₂	35.062%	23.33%
				C ₃	5.212%	3.47%
				C ₄	3.918%	2.61%
				C ₅	45.095%	30.01%
		B ₂	14.530%	C ₆	65.353%	7.39%
				C ₇	23.486%	2.66%
				C ₈	11.161%	1.26%
A ₂	9.323%	B ₃	11.765%	C ₉	87.719%	0.96%
				C ₁₀	12.281%	0.13%
		B ₄	88.235%	C ₁₁	7.082%	0.58%
				C ₁₂	15.060%	1.24%
				C ₁₃	77.858%	6.4%
A ₃	12.812%	B ₅	80%	C ₁₄	3.806%	0.39%
				C ₁₅	23.595%	2.42%
				C ₁₆	36.673%	3.76%
				C ₁₇	19.179%	1.97%
				C ₁₈	11.851%	1.21%
		B ₆	20%	C ₁₉	4.896%	5.0%
				C ₂₀	66.765%	1.71%
				C ₂₁	7.491%	0.19%
				C ₂₂	25.744%	0.66%

由上表可知,电机运行数量 C_5 、定子转子绕组 C_2 、计算机及其显示器 C_6 、铁损 C_1 、逆变器能耗 C_{13} 、协同作业程度 C_{19} 的综合权重较高,对工业机器人作业能耗影响较大,综合权重值分别为 30.01%、23.33%、7.39%、7.13%、6.4%、5%。其中,电机运行数量 C_5 影响因素最大。因此,本文根据工业机器人动力学特征,提出了优化逆解和优化转速的能效策略,优化和调整机器人伺服电机数量和运行状态,解决工业机器人能耗的第一大影响因素,有效减少工业机器人能耗问题。

5.3 模糊综合评价模型

基于模糊综合评价法的工业机器人作业能耗等级计算是转化多个指标的评价结果为综合能耗等级,实现能源消耗的综合评估,模糊综合评价流程如图 5-4。

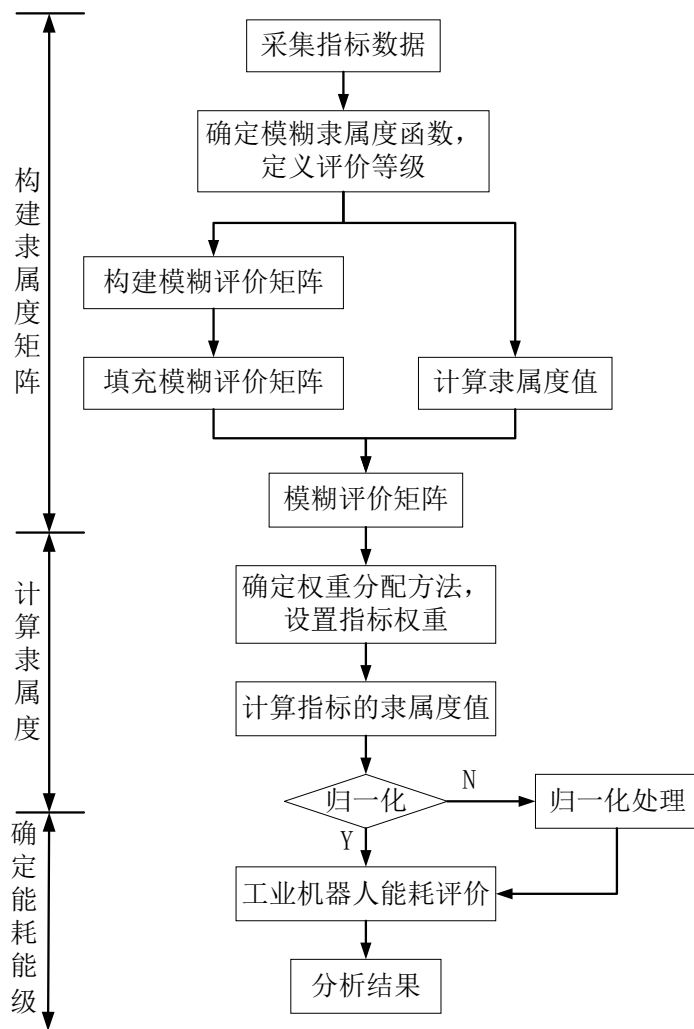


图 5-4 模糊综合评价流程

各个指标评价结果模糊化处理过程,是将数值转化为模糊数,包括隶属度函数,表示不同程度的隶属关系。运用模糊化处理后的指标评价结果,构建模糊评价矩阵。矩阵

包括不同指标和其对应的模糊数，反映了各个指标在能耗评价中的隶属关系和模糊性。利用专家意见和统计数据等方式分配各个指标权重。权重分配考虑不同指标间相对重要性，以及其在综合评价中的影响程度。通过权重和模糊评价矩阵，计算综合评价指数 (Comprehensive Evaluation Index, CEI)，得到综合评价的模糊数。解模糊化处理转化为具体的评价等级，得到工业机器人作业能耗的综合等级评价。

5.3.1 构建隶属度矩阵

隶属度函数确定一个指标在不同评价等级下的隶属程度，采用三角形或梯形隶属度函数。表示为

$$r_{low} = x - a / b - a \quad (5-9)$$

$$r_{med} = x - b / c - b \quad (5-10)$$

$$r_{high} = d - x / d - c \quad (5-11)$$

式中，(a,b) 表示低能耗界限，x 是实际能耗消耗值，(b,c) 表示中等能耗界限，x 是实际能耗消耗值，(c,d) 表示高能耗界限，x 是实际能耗消耗值。

隶属度矩阵为 n 行 m 列，其中 n 是评价等级的数量，m 是不同的指标数量。每个元素表示某个指标在某个评价等级下的隶属度，隶属度矩阵如式(5-13)。

$$R = (r_{jk})_{mn} = U = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (5-12)$$

在评估工业机器人能源效率水平时，本文设计四个等级的评价体系，低能耗、一般能耗、中等能耗和高能耗。邀请了来自芜湖某机器人研究院的十位领域专家，深入分析和赋分表 5-5 中六项关键能耗指标。基于这些专业评分，构建了一个隶属度矩阵 R，可精确衡量和比较机器人作业能耗性能。

$$R = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.1 & 0.3 & 0.5 \\ 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.4 \\ 0.2 & 0.2 & 0.3 & 0.3 \\ 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 \\ 0.5 & 0.3 & 0.1 & 0.1 \\ 0.6 & 0.2 & 0.1 & 0.1 \end{bmatrix} \quad (5-13)$$

5.3.2 计算隶属度

计算各个指标的隶属度，计算方法主要有加权平均算子、几何平均算子、单因素取

小算子、单因素取大算子和乘法有界算子等^[69-70]。本文采用乘法有界算子计算隶属度值，乘法有界算子的特点是在合成时，将各个因素的隶属度相乘，但乘积的结果不会超过任何一个因子的原始隶属度。这种算子在模糊综合评价中非常实用，它能够综合考虑所有因素对评价结果的影响，同时避免个别因素隶属度过高而导致的评价结果失真。乘法有界算子的计算方式如下。

设有两个模糊集合 A 和 B，隶属度分别为 $\mu A_{(x)}$ 和 $\mu B_{(x)}$ ，则乘法有界算子的定义表示为

$$\mu A \cap B_{(x)} = \min \{ \mu A_{(x)} + \mu B_{(x)}, 1 \} \quad (5-14)$$

其中，min 表示取最小值，这个公式确保了合成后的隶属度不会超过 1，即不会超过任何原始隶属度的上限。

由式(5-12)可知

$$\begin{aligned} A \times R &= [0.3, 0.23, 0.074, 0.071, 0.064, 0.05] \begin{bmatrix} 0.1 & 0.1 & 0.3 & 0.5 \\ 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.4 \\ 0.2 & 0.2 & 0.3 & 0.3 \\ 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 \\ 0.5 & 0.3 & 0.1 & 0.1 \\ 0.6 & 0.2 & 0.1 & 0.1 \end{bmatrix} \\ &= [0.192, 0.188, 0.262, 0.358] \end{aligned} \quad (5-15)$$

隶属度需归一化处理后，不同量纲的数据转换为无量纲数据、突出指标间的相对差异性，简化了计算过程，提高评价的准确性、合理性和可靠性，最终结果如表 5-6 所示。

表 5-6 权重计算结果

	低能耗	一般能耗	中等能耗	高能耗
隶属度	0.192	0.188	0.262	0.358
隶属度归一化	0.192	0.188	0.262	0.358

上表，利用 6 个指标，4 个评语集模糊综合评价，使用乘法有界算子研究，4 个评语集中能耗权重值最高 0.358，结合最大隶属度法则可知，最终综合评价结果为高能耗。因此，判断当前工业机器人作业能耗较大，需要及时调整作业方案，具体优化方案可依据第二章优化逆解和转速能效策略。

5.4 本章小结

在评估工业机器人工作效能时，作业能耗最优化是重要的衡量指标。本章引入了层

次分析法与模糊评价法，全面分析和评估工业机器人作业能耗。在第二章能耗构成深入探讨的基础上，运用评价指标细分为三个不同的层级，采用层次分析法确定各层级指标的权重值，并运用权重乘法计算综合权重值。运用模糊评价法将能耗指标划分为低能耗、一般能耗、中等能耗和高能耗四个级别，并构建相应的隶属度矩阵，得到各项指标的隶属度值。依据最大隶属度原则，最终综合评价机器人作业能耗水平，分析结果能真实反映能耗状态。针对高能耗工况，可采用第二章优化逆解算法和转速控制策略优化能耗。

第6章 总结与展望

6.1 总结

制造业作为全球经济的重要支柱，能源消耗占据了全球能源消费的大部分。绿色转型和智能制造成为时代发展的主题。其中，工业机器人能耗问题愈发关注。本文研究工作得到国家自然科学基金，基于感知交互的步态康复机器人痉挛在线测评及其防范控制研究(61741101)和工业机器人3D全结构刚柔耦合交互特性视觉测量方法研究(52005003)；安徽高校协同创新项目，面向老年人和半失能患者的智能召唤自主循迹座便器研发(GXXT2023076)等资助。针对工业机器人作业规划不当引发效率低下和能耗过高问题，结合机器人学、层次分析法和模糊综合评价法等相关知识，开展工业机器人动力学建模和能耗评价研究。分析工业机器人系统组成，构建影响作业能耗的构成体系；建立机器人运动学和动力学模型，分析工业机器人本质属性，提出优化逆解和转速能效策略；基于作业流程分配和单工序对能耗影响，定义“任务级”和“过程级”优化层次，结合码垛和焊接典型作业，利用优化逆解和转速能效策略，优化作业任务；针对能耗的诸多因素，提出层次分析法和模糊评价法的综合能耗评价方法，确定当前作业能耗级别。本文主要研究内容如下。

(1) 利用运动学和动力学模型，揭示机器人作业能耗优化规律。建立运动学模型，推导逆运动学的解，对比各解能耗值大小。结果表明，尽量减少高功率电机的运动量，或在满足任务要求的情况下，尽可能地保持部分关节静止，可有效减少能量损耗。建立动力学模型，推导动力学方程，分析速度对动力学特性的影响。结果表明，通过预计算不同转速对应的能耗，构建“转速-能耗”对照表，优选能耗低的转速项，也可有效减少能量损耗。基于优化逆解和转速能效策略两种优化策略，根据作业流程分配和单工序对能耗的影响，定义“任务级”和“过程级”优化层次。

(2) 采用优化逆解能效策略，优化码垛作业路径。分析了机器人关节电机负载的能耗特性，通过理论计算与实际测量，对比分析了“门”字形轨迹与最短路径轨迹在完成相同作业任务的各个阶段中，各电机的能耗情况，揭示了最短路径轨迹能耗最优，并证实了优化逆解策略在能效提升方面的可行性。研究得出，分配和优化六关节机器人电机的运行，实现关节动态管理、精细调优，可有效降低机器人能耗。

(3) 采用优化转速能效策略，优化焊接作业路径。分析了作业速度影响焊接质量的

主要因素，引入比能耗衡量能源效率，设计焊接实验，对比不同功率不同作业速度比能耗值大小。结果表明，增加焊接速度会导致比能耗上升，降低能量利用效率。类比“速度-能耗”对照表，适当提升激光功率并配合合适的焊接速度，反而获得更低的比能耗。

(4) 采用层次分析法和模糊评价法，评价工业机器人作业能耗级别。基于能耗构成，细分三级评价指标，采用层次分析法确定各层级指标的权重值，利用权重乘法计算综合权重值。运用模糊评价法将能耗指标划分为低能耗、一般能耗、中等能耗和高能耗四个级别，并构建相应的隶属度矩阵，计算各项指标的隶属度值。

6.2 展望

本文提出了优化逆解和转速能效策略，基于机器人运动学和动力学，探讨能耗优化可能性，但还存在以下问题待进一步研究。

(1) 增设作业场景，优化运行轨迹。“任务级”优化时，本文选用码垛作业场景，研究了“门”字型和最短路径两种轨迹，验证了优化逆解能效策略有效性。后续研究可从其他作业场景、轨迹方向研究，分析作业特征，测算能耗数值，应用优化策略，验证策略有效性和可行性。

(2) 增加工序考量，提高能耗精度。“过程级”优化时，本文选用焊接作业场景，在“任务级”优化基础上，分析了同一平面和相邻平面最短路径两种工况，对比分析运行速度与比能耗关系。后续研究增加不相邻平面最短路径工况，运用泛函理论，求解极值，得到最短路径。其中，若“转速-能耗”对照表中参数量大，可采用智能算法优选出最优能耗转速，提高选配转速的效率。

(3) 引入熵权评价，平衡主客因素。工业机器人作业能耗由众多重要因素构成，本文采用层次分析法和模糊评价法计算权重，结果偏向主观因素。后续研究运用熵权法，综合计算各层级权重，增加影响能耗的客观因素，综合评价工业机器人作业能耗等级。

参考文献

- [1] Energy Information Administration. Annual Energy Outlook 2019 [EB/OL].2019-09-17
- [2] 我国制造业增加值占全球比重约 30%，连续 14 年位居全球首位[EB/OL]. 2024-02-23
- [3] 刘竹著.全球近实时二氧化碳排放报告[D]. 清华大学碳中和研究院,2023
- [4] 2023 世界机器人报告[EB/OL]. 2023.12.28
- [5] 市场规模稳居世界第一工业机器人彰显智造魅力[EB/OL]. 2023.08.30
- [6] BP.世界能源展望: 2020 年版[EB/OL]. 2020
- [7] 周进.基于时间尺度函数的工业机器人加工系统节能优化方法与典型应用研究[D].重庆大学.2022.000828
- [8] 兰运坤.基于时间缩放的工业机器人能耗优化方法研究[D].重庆大学.2022.001971
- [9] 吴勇强.工业机器人运行能耗建模及轨迹优化[D].重庆大学.2020.001548
- [10]李园明.工业机器人制造系统能耗特性分析与建模研究[D].武汉理工大学,2016
- [11]刘欢.工业机器人本体能耗特性分析与动态建模研究[D].武汉理工大学,2017
- [12]徐威.工业机器人装备能量有效平滑运行控制研究[D].武汉理工大学,2018
- [13]颜克.物理模型驱动的工业机器人能耗数字建模研究[D].武汉理工大学.2019.000192
- [14]周博.面向时间与能耗的工业机器人运动参数优化研究[D].武汉科技大学,2019
- [15]李昊天.基于能耗优化及时间优化综合评估的工业机器人轨迹规划研究[D].浙江大学.2020.003982
- [16]徐政.基于工业机器人的生产线性性能优化关键技术研究[D].浙江大学.2021.002372
- [17]谭颖.面向机器人实训的能耗离线预测研究[D].浙江大学, 2023
- [18]吕宁波.高速运行机械臂动力学分析及最优能量规划[D].宁夏大学.2020.000252
- [19]罗正平.基于能量最优的工业机器人运动轨迹规划方法研究[D].湖南大学,2015
- [20]贺莹.高速重载码垛机器人低能耗集成优化研究[D].天津大学,2018
- [21]张世杰.高速重载码垛机器人能耗最优轨迹规划和控制研究[D].哈尔滨工业大学, 2016
- [22]操鹏飞.作业机器人工作过程中能耗评价方法的研究[D].安徽工程大学, 2016
- [23]Oliva E, Berselli G, Pellicciari M, et al. An engineering method for the power flow assessment in servo-actuated automated machinery: Mechatronic modeling and experimental evaluation[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 38:

31-41

- [24]Um J, Stroud I A, Park Y. Deep learning approach of energy estimation model of remote laser welding[J]. *Energies*, 2019, 12(9): 1799
- [25]Meike D, Ribickis L. Energy efficient use of robotics in the automobile industry[C]//2011 15th international conference on advanced robotics (ICAR). IEEE, 2011: 507-511
- [26]Meike D, Ribickis L. Recuperated energy savings potential and approaches in industrial robotics[C]//2011 IEEE international conference on automation science and engineering. IEEE, 2011: 299-303
- [27]Rassõlkin A, Hõimoja H, Teemets R. Energy saving possibilities in the industrial robot IRB 1600 control[C]//2011 7th International Conference-Workshop Compatibility and Power Electronics (CPE). IEEE, 2011: 226-229
- [28]Sinaga N, Paryanto P, Widyanto S A, et al. An analysis of the effect of gravitational load on the energy consumption of industrial robots[J]. *Procedia CIRP*, 2018, 78: 8-12
- [29]Brossog M, Kohl J, Merhof J, et al. Energy consumption and dynamic behavior analysis of a six-axis industrial robot in an assembly system[J]. *Procedia Cirp*, 2014, 23: 131-136
- [30]Fysikopoulos A, Pastras G, Stavridis J, et al. On the performance evaluation of remote laser welding process: an automotive case study[J]. *Procedia Cirp*, 2016, 41: 969-974
- [31]Pastras G, Fysikopoulos A, Chryssolouris G. A theoretical investigation on the potential energy savings by optimization of the robotic motion profiles[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2019, 58: 55-68
- [32]Kurilova-Palisaitiene J, Permin E, Mannheim T, et al. Industrial energy efficiency potentials: An assessment of three different robot concepts[J]. *International Journal of Sustainable Engineering*, 2017, 10(3): 185-196
- [33]Garcia R R, Bittencourt A C, Villani E. Relevant factors for the energy consumption of industrial robots[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2018, 40: 1-15
- [34]Stuhlenmiller F, Jungblut J, Clever D, et al. Combined analysis of energy consumption and expected service life of a robotic system[C]//2020 6th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering (ICMRE). IEEE, 2020: 53-57
- [35]Hansen, Christian, et al. Enhanced approach for energy-efficient trajectory generation of industrial robots. 2012 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). IEEE, 2012
- [36]Riazi S, Wigström O, Bengtsson K, et al. Energy and peak power optimization of time-bounded robot trajectories[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*,

- 2017, 14(2): 646-657
- [37]Glorieux E, Riazi S, Lennartson B. Productivity/energy optimisation of trajectories and coordination for cyclic multi-robot systems[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 49: 152-161
- [38]Vergnano A, Thorstensson C, Lennartson B, et al. Embedding detailed robot energy optimization into high-level scheduling[C]//2010 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering. IEEE, 2010: 386-392
- [39]Shi H, Mei S, Sun Y, et al. Energy Efficiency Evaluation of Industrial Users Based on AHP-Entropy Weight Method[C]//2022 9th International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEEA). IEEE, 2022: 691-695
- [40]Othman A, Belda K, Burget P. Physical modelling of energy consumption of industrial articulated robots[C]//2015 15th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). IEEE, 2015: 784-789
- [41]王国顺.基于数字孪生的小型制造系统的能效分析与优化[D].天津职业技术师范大学, 2023
- [42]熊有伦.机器人技术基础[M].华中理工大学出版社,2002:20-35
- [43]蔡自兴.机器人学[M]. 清华大学出版社,2002:42-57
- [44]庾军波,彭秋媛,张贤明等.工业机器人能耗预测研究[J].中国机械工程,2022,33(22)
- [45]邵浩然,卢剑伟,苏雨等.六自由度关节型工业机器人动力学优化[J].合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42 (05): 590-594+600
- [46]邵浩然.六自由度焊接机器人工作性能评价分析及轨迹规划研究[D].合肥工业大学, 2018
- [47] Lunetto, Vincenzo, et al. On the correlation between process parameters and specific energy consumption in fused deposition modelling. Journal of Manufacturing Processes 56 (2020): 1039-1049
- [48] Paul, Ratnadeep, and Sam Anand. Process energy analysis and optimization in selective laser sintering. Journal of manufacturing systems 31.4 (2012): 429-437
- [49]潘安大.数控机床切削过程能耗建模及工艺参数优化研究[D].重庆理工大学, 2019
- [50]尹晖,邓朝晖,张华等.典型机床关键零部件切削/磨削比能数据库系统研发[J].金刚石与磨料磨具工程, 2017, 37 (04): 73-78+85
- [51]徐敬通.数控机床能耗建模与切削参数节能优化研究[D].连理工大学, 2016
- [52] Saaty T L.How to handle dependence with the analytic hierarchy process[J].Mathematical

- Modelling,1987,9(3):369-376.
- [53]沈薛耀,梁在鹏.基于 AHP 层次分析法的电商主图设计路径探究[J].商场现代化,2024,(10): 50-52
- [54]杨朋涛,吴沙沙.基于 AHP 层次分析法的河南省通村客运综合风险评估指标体系研究[J].中国储运,2024,(05): 130-131
- [55]王琦,陈绪新.基于模糊层次分析法的再生水厂基坑施工风险评价[J].特种结构,2024,41(02):82-86
- [56]杨连超.基于层次分析法和熵权法的油田开发方案优选[J].石化技术,2024,31(04):248-251+247
- [57]何钰江,刘会灯,向尧,等.基于改进模糊层次分析法的新型电力系统建设成效评估方法研究[J].吉林电力,2024,52(02): 10-14
- [58]林芳,钟震驱.基于层次分析法的快运分拣中心物流装备选用[J].装备机械,2023,(04):24-29+51
- [59]李国贤,张秀芬.基于层次分析法的增材制造路径选择方法[J].机床与液压,2023,51(24):48-53
- [60]田晓璇,刘立营,张辉,等.基于模糊层次分析法的风电叶片制造质量评价方法[J].设备监理,2023,(06):11-14+18
- [61]邵斌.层次分析法对配电网线损全周期精益化管理的影响[J].自动化应用,2023,64(S2):187-189
- [62]刘洋恺,孙伟卿,刘唯.基于 AHP 和 TOPSIS-模糊综合评价的多场景储能选型方法[J].储能科学与技术,2024,13(02):691-701
- [63]陈鹏宇.多指标综合评价方法中的指标互补性研究[J].统计与决策,2021,37(22):22-26
- [64]俞立平,琚春华.一种兼顾协调发展的学术期刊评价方法——因子几何平均法[J].情报杂志,2019,38(01):194-199+170
- [65]寇瑞雄,李仲勤,刘龙龙,等.加权几何平均法在桥梁墩台沉降预测中的应用[J].施工技术,2018,47(S1):1117-1120
- [66]刘庆虹.GR 公司产业投资基金业务风险管理研究[D].广东财经大学,2022
- [67]裴发根,杜炳锐,张小博,等.基于模糊数学法与算术平均法评价东北地区深层地热有利区[J].地质论评,2023,69(S1):539-540
- [68]韦正峥,黄炳昭,蒋玉丹,等.算术平均法、百分位数法和滑动平均法空气质量评价对比

分析及其揭示的信息[J].环境与可持续发展, 2020, 45(02):123-133

[69]韩利,梅强,陆玉梅,等.AHP-模糊综合评价方法的分析与研究[J].中国安全科学学报, 2004, (07): 89-92+3

[70]金菊良,魏一鸣,丁晶.基于改进层次分析法的模糊综合评价模型[J].水利学报,2004, (03):65-70

攻读硕士期间学术成果

- [1] 欧阳俊祎, 许德章. 基于 Unity3D 的工业机器人本体虚拟拆装系统[J].安徽工程大学学报 (已录用)
- [2] 欧阳俊祎, 许德章. Research on Virtual Assembly System for Industrial Robots Based on Unity3D [J/OL].Journal of Harbin Institute of Technology(New series) (已录用)
- [3] 欧阳俊祎, 许德章. 基于非极小值抑制的双目视觉测量优化方法[J].东莞理工学院学报 (已录用)
- [4] 欧阳俊祎, 许德章. 基于层次分析法和熵权法的工业机器人作业能耗评价[C].第十六届中国智能机器人大会电子论文集 (已录用)
- [5] 欧阳俊祎, 许德章. 一种基于数字孪生的工业机器人寿命预测系统及其运维方法[P] (实质审查)

致谢

随着初夏的微风轻拂，三年的硕士生涯即将落下帷幕。从金秋到盛夏，时间匆匆流逝。站在毕业的门槛上，我沉浸于过去的记忆，心中充满了喜悦与哀愁。“滴水穿石，非力敌也，锲而不舍，金石可镂”，三年经历让我深刻理解了毅力的价值，体会到“千淘万漉虽辛苦，吹尽狂沙始到金”的道理。现在，当我准备结束这段旅程时，我想向所有给予我温暖、指引和力量的人致以深深的感激。

我要特别感谢我的导师许德章教授，他不只是我在学术道路上的向导，更是生活中的贵人和终身学习的典范。他的热忱和勤奋超乎寻常，对学术和工作的投入达到了令人敬佩的程度。如果要用标签来描述他，那么“诲人不倦”的师者、“大道至简”的思想、“五加二、白加黑”的敬业、“亲力亲为”的作风以及“工程+艺术”的创新等，都难以完全概括他对我的影响，无一不让我膜拜、致敬。在论文研究和大赛指导等多个方面，许老师不仅传授宝贵的知识和方法，还给予无限的鼓励和支持。同时，感谢李公文高工和梁利东教授在学业和专业研究领域给予的宝贵指导和帮助。

其次，感谢同门方庆、赵剑飞和陈清清在论文撰写和生活陪伴方面给予的支持，感谢相互帮助、相互激励；感谢师兄李阅文、郭雨、刘声中、朱磊、朱超和程万里在实习开始阶段的指导和帮助；感谢学弟乐亮在求学期间的陪伴、互助和勉励；感谢室友高传康、张文轩和吴文专在求学期间共同度过的美好时光。同时，感谢在安普机器人产业技术研究院有限公司实习期间的每位同仁，公司的团队精神、做事风格和处世之道是我人生路上不可或缺的财富。特别是古宏程工程师，在我实验困惑时伸出援手，让实验探究更加准确高效。

最后，特别感谢我的女朋友陈瑶，过去三年多的时间里陪我共同成长、共同前进，她的陪伴让我的硕士生涯充满了色彩和活力。衷心感激我的家人，他们不仅在物质上给予我坚定的支持，更在精神上为我提供了无尽的鼓励和动力。正是他们的支持，使我得以顺利完成硕士研究生学业。

研究生三年的学习即将结束，我深刻铭记“尚德敏学，唯实惟新”的校训，激励我不断探索和创新。携带这份信念，继续追求卓越。展望未来，我怀着热情和梦想，不负韶华，不忘初心，继续向前翻越山头。不甘于平庸，还在为梦想奋斗。

欧阳俊祎

2024年5月20日

尚德敏学 唯实惟新

