

分类号: TG242.6

学校代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2210120132



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 基于能量储备方法的灵巧臂重力
平衡机构设计与研究

论 文 作 者 徐腾

校 内 导 师 汪步云（副教授）

校 外 导 师 杨鸥（高级工程师）

专业学位类别 机械

研究方向（领域） 智能机器人

论文提交日期: 2024 年 06 月 01 日

分类号：TP242.6

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2210120132

基于能量储备方法的灵巧臂重力平衡机构设计与研究

DESIGN AND RESEARCH OF A DEXTEROUS ARM GRAVITY BALANCE MECHANISM BASED ON ENERGY STORAGE METHOD

学 生 姓 名 : 徐 腾

校 内 导 师 : 汪步云(副教授)

校 外 导 师 : 杨鸥(高级工程师)

专 业 : 机 械

研 究 方 向 : 智能机器人

论文答辩日期: 2024年05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：徐腾

日期：2024年5月30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。

本学位论文属于

保密 ☐，在 ____ 年解密后适用本版权书。

不保密 ☒。

学位论文作者签名：

徐腾

日期：2024年5月30日

指导教师签名：

汪青松

日期：2024年5月30日

基于能量储备方法的灵巧臂重力平衡机构设计与研究

摘要

如今，以智能制造为核心的智能技术正推动我国制造业向高水平发展。其中移动灵巧臂机器人作为自主运动和智能感知的代表，正在为实现高度自动化的生产环境开辟新的可能。针对灵巧臂在面对负载作业时，关节电机在负载和自身重力力矩作用下，灵巧臂的负载能力较弱，并且末端运动稳定性较差而且能耗会大幅增加。基于灵巧臂运动模型对重力平衡机构运动机理进行分析，建立灵巧臂重力平衡机构动力学模型，并通过动力学模型提取出机构优化的关键特性参数。提出一种基于随机游走策略的自适应NSGA-II算法，并通过仿真实验研究与实物实验研究，验证重力平衡机构对关节重力力矩的平衡效果，降低关节能耗，提高了灵巧臂在各种工作环境下的稳定性和可靠性。具体研究内容如下：

(1) 灵巧臂重力平衡机构机理研究。分析了灵巧臂关节重力平衡的补偿机理，并针对实际应用中灵巧臂大臂关节负载能力较差以及关节能耗过高的问题，设计了一种重力平衡机构来补偿关节重力力矩。通过建立被重力平衡关节的关节角度与机构的几何关系，实现了实验平台的搭建，为后续灵巧臂重力平衡机构理论实验的验证提供了物理基础。

(2) 灵巧臂重力平衡机构特性参数建立与优化研究。推导出了灵巧臂

重力平衡机构的简化三关节动力学模型，并通过对比未加入平衡机构的简化三关节机械臂和安装了重力平衡机构的三关节动力学的差异，揭示了添加重力平衡机构对机器人动力学性能的改善效果。最后，利用拉格朗日能量法得到了关节特性参数，并提出了随机游走策略的自适应 NSGA-II 优化算法，通过对比算法改进前后的参数优化结果，得出改进算法优化的重力平衡机构对灵巧臂关节重力力矩平衡的有益性，为后续灵巧臂抓取实验的验证奠定基础。

(3) 重力平衡机构与灵巧臂特性参数优化融合实验研究。围绕重力平衡机构和灵巧臂相融性问题设计了空载工况、额定负载工况以及极限负载工况的仿真实验。通过对比参数优化前后机器人的扭矩减小比和不平衡力矩波动，验证了动力学模型的正确性以及重力平衡机构参数优化的有效性。随后，进行了实物工况实验，并加入了工况轨迹能耗实验，实验结果验证了加入重力平衡机构的灵巧臂关节能耗降低的效果，进一步证实了仿真实验的正确性。这些研究成果实现了重力平衡机构与灵巧臂关节的良好相融，增强了灵巧臂关节的负载能力并降低了关节能耗，具有重要的工程应用意义。

综上所述，以灵巧臂为研究对象，通过分析重力平衡机构与灵巧臂融合的机理，设计出重力平衡机构，针对传统算法 NSGA-II 优化重力平衡机构的缺点，提出一种改进算法，并通过改进后的算法优化重力平衡结构的特性参数，解决了关节重力力矩的问题。通过抓取实验验证了重力平衡机构对灵巧臂关节的重力平衡效果，为后续人形灵巧臂的研究提供了丰富的

技术手段，完善了重力平衡机构方案。

关键词：灵巧臂，重力平衡机构，能量储备，NSGA-II优化算法，实验研究

DESIGN AND RESEARCH ON DEXTEROUS ARM GRAVITY BALANCING MECHANISM BASED ON ENERGY STORAGE METHOD

ABSTRACT

The mobile dexterous arm robot has made significant progress and commercial applications in various fields, but energy consumption remains a key issue. Particularly, significant energy is required when the dexterous arm moves heavy objects. Employing a gravity balance mechanism can effectively address this issue by compensating for the gravitational torque caused by the mass of the dexterous arm joints, thus significantly reducing the torque required by the arm. The gravity balance mechanism is not only closely related to the dynamic balance and operational sensitivity of the dexterous arm but also integrates the dynamic characteristics of the entire dexterous arm, improving the stability and reliability of the robotic arm in various working environments. Therefore, regarding the optimization of dynamic characteristic parameters between the gravity balance mechanism and the dexterous arm, the specific research content is as follows:

1. Research on the mechanism of the gravity balance system for dexterous arms. The compensation mechanism of gravity balance for dexterous arm joints is analyzed. In response to the issues of poor load capacity and high energy consumption of the dexterous arm shoulder joints in practical applications, a

gravity balance mechanism is designed to compensate for the joint gravitational torque. By establishing the geometric relationship between the joint angle and the mechanism of the gravity-balanced joint, the construction of an experimental platform is achieved, providing a physical basis for the subsequent theoretical experiments on gravity balance mechanisms for dexterous arms.

2. Research on the establishment and optimization of characteristic parameters of the gravity balance mechanism for dexterous arms. A simplified three-joint dynamic model of the dexterous arm's gravity balance mechanism is derived. By comparing the differences between the simplified three-joint mechanical arm without the balance mechanism and the three-joint dynamics with the gravity balance mechanism installed, the improvement effect of adding the gravity balance mechanism on the robot's dynamic performance is revealed. Finally, the joint characteristic parameters are obtained using the Lagrangian energy method, and an adaptive NSGA-II optimization algorithm with a random walk strategy is proposed. By comparing the optimization results before and after algorithm improvement, the beneficial effects of the improved algorithm optimization on the gravitational torque balance of the dexterous arm joints are determined, laying the foundation for subsequent experimental verification of dexterous arm grasping.

3. Experimental research on the integration of gravity balance mechanism and characteristic parameter optimization of dexterous arms. Simulation experiments were designed for unloaded, rated load, and extreme load conditions to address the compatibility issues between the gravity balance mechanism and dexterous arms. By comparing the reduction in torque and the fluctuation of imbalance torque before and after parameter optimization, the correctness of the dynamic model and the effectiveness of gravity balance mechanism parameter optimization were verified. Subsequently, physical condition experiments were conducted, including trajectory energy consumption

experiments, validating the reduction in energy consumption of dexterous arm joints with the addition of the gravity balance mechanism, further confirming the correctness of simulation experiments. These research findings achieved good integration between the gravity balance mechanism and dexterous arm joints, enhancing the load capacity of the dexterous arm joints and reducing joint energy consumption, which has significant engineering application implications.

In summary, focusing on dexterous arms as the research subject, a gravity balance mechanism was designed by analyzing the integration mechanism between the gravity balance mechanism and dexterous arms. In response to the shortcomings of the traditional NSGA-II algorithm in optimizing the gravity balance mechanism, an improved algorithm was proposed. Through the optimization of the characteristic parameters of the gravity balance structure using the improved algorithm, the problem of joint gravitational torque was addressed. The effectiveness of the gravity balance mechanism on dexterous arm joint gravity balance was verified through grasping experiments, providing rich technical means for the subsequent research on humanoid dexterous arms and refining the gravity balance mechanism design.

KEY WORDS: dexterous arm, gravity balance mechanism, energy storage, NSGA-II optimization algorithm, experimental research

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	IV
第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题研究背景及意义.....	1
1.2 国内外发展及研究现状.....	3
1.2.1 重力平衡机构研究现状.....	3
1.2.2 重力平衡机构优化算法研究现状.....	7
1.3 主要研究内容及章节安排.....	9
1.3.1 研究内容.....	9
1.3.2 章节安排.....	11
第 2 章 重力平衡机构机理分析及结构设计.....	12
2.1 引言.....	12
2.2 灵巧臂重力平衡机构机理分析.....	12
2.2.1 灵巧臂重力平衡机构运动分析.....	12
2.2.2 灵巧臂重力平衡机构特性参数分析.....	16
2.3 重力平衡机构结构设计.....	21
2.3.1 重力平衡机构总体结构设计.....	21
2.3.2 机构特性参数分析.....	23
2.4 本章小结.....	25
第 3 章 灵巧臂重力平衡机构运动学及动力学分析.....	27
3.1 引言.....	27
3.2 机构运动学分析与建模.....	27
3.2.1 基本假设与部分参数的定义.....	27
3.2.2 重力平衡机构运动学建模.....	27

3.3 灵巧臂重力平衡机构动力学模型建立	29
3.3.1 灵巧臂动力学分析	29
3.3.2 重力平衡灵巧臂动力学分析	35
3.3.3 参数验证	37
3.4 本章小结	38
第 4 章 灵巧臂重力平衡机构特性参数优化研究	40
4.1 引言	40
4.2 重力平衡机构特性参数优化	40
4.2.1 优化目标分析与函数建立	40
4.2.2 基于随机游走策略的 INSGA-II 算法设计	41
4.3 特性参数协调优化结果与分析	46
4.3.1 特征分析	46
4.3.2 算法最优解对比与分析	48
4.4 本章小结	50
第 5 章 灵巧臂重力平衡抓取作业实验研究	51
5.1 引言	51
5.2 仿真抓取工况实验研究与分析	51
5.2.1 重力平衡机构仿真抓取工况设计	51
5.2.2 灵巧臂负载仿真抓取实验与分析	54
5.3 抓取实验研究与分析	56
5.3.1 抓取实验方案设计	56
5.3.2 抓取实验结果分析	60
5.4 本章小结	66
第 6 章 总结与展望	67
6.1 论文总结	67
6.2 研究展望	68
参考文献	69
附录 1 机械臂重力平衡机构的实验数据(部分)	74

附录 2 优化算法 MATLAB 程序(部分)	80
附录 3 动力学模型 MATLAB 程序(部分)	83
攻读硕士专业学位期间学术成果	85
致谢	86

第 1 章 绪论

1.1 课题研究背景及意义

近年来, 电池供电的移动机器人手臂在多个领域得到了广泛发展和商业化^[1-5], 然而, 由于采用大容量电机以实现高负载, 导致功耗巨大, 再加上电池容量的限制, 机器人的运行时间显著缩短。此外, 移动机械臂的有效载荷通常较小, 难以承担较大重量的任务。随着协作机器人产业的成熟, 机械臂的负载能力得到了显著提升, 这些协作机器人与人类工人共享工作空间, 通常采用高功率电机和谐波减速器以提高重量和有效载荷比^[6-8]。然而, 这增大灵巧臂的运动惯性, 使用这些高功率电机可能会造成严重的伤害。因此, 迫切需要寻找一种既能降低关节电机功耗又能提高负载能力的方法。

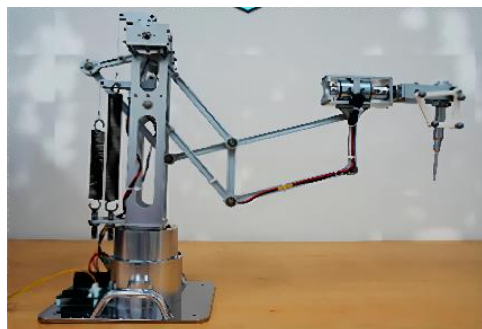
重力平衡机构是一种利用被动能量元件来完全或部分抵消重力对机构执行关节的影响技术。随着重力扭矩的减少, 重力平衡机构可以减少所需的致动器扭矩和能耗, 并提高机构的安全性、位置精度和运动可靠性^[9-11]。完美的重力平衡机构能够在没有外力的情况下保持在任何配置, 因为其总势能保持不变^[12-16]。重力补偿已被用于构建各种机械和机器人系统, 如机器人操纵器^[17, 18]、手术装置^[18, 19]和外骨骼^[20-22]。如图 1-1-(a)所示为上肢重力平衡支架, 用于促进手臂的功能性运动。与使用重力平衡臂支架相关的主要人群是患有神经肌肉疾病的人^[12]。在医疗领域, 如图 1-1-(b)所示为外科手术操作平台, 手术台上进行高精度外科手术, 重力平衡机构通过降低关节扭矩, 使得关节运动的稳定性提高^[23]。如图 1-1-(c)所示为搭载中重力平衡机构的移动抓取机器人, 通过搭载重力平衡机构, 可以有效的减小关节电机能耗, 从而提高机器人工作时长和续航能力^[24]。如图 1-1-(d)所示为搭载了重力平衡机构的机械臂, 通过将弹簧连接到两个连接的滑轮上, 实现了一种特殊的非线性弹簧特性。降低了重复任务时关节电机的能量消耗^[25]。

灵巧臂的运动必须受到精确的控制, 而重力对机械臂的影响可能引起不稳定性或者增大能耗。机械臂在执行任务时常常需要携带不同的负载, 这导致机

机械臂所受重力也在不断变化。为了确保灵巧臂作业时能适应各种工作负载而不失去准确性，需要一种机制来平衡这种重力。通过引入重力平衡机构，可以降低机械臂的自重，减轻电机的负担，延长其寿命，从而提高系统的能源效率。一些机械臂由多个关节组成，形成复杂的结构。这些关节之间的相互作用和对各个关节的影响可能导致非常复杂的动力学问题。重力平衡机构的研究旨在解决这些问题，提高机械臂的整体性能。



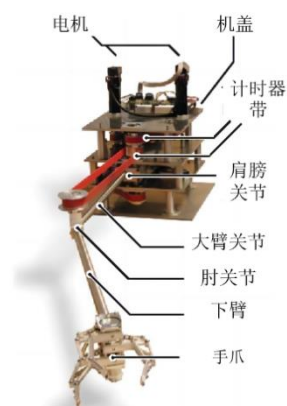
(a) 弯曲弹簧重力平衡外骨骼机器人^[12]



(b) 变载荷重力平衡手术平台^[23]



(c) 移动抓取机器人^[24]



(d) 带有重力平衡的灵巧臂^[25]

图 1-1 重力平衡机构的应用

论文课题来源于安徽省重点研究与开发计划：基于生机多模态信息共融的助力行走型下肢外骨骼机器人产品研发(202004a05020013)、安徽省属公办普通本科高校领军骨干人才项目(青年皖江学者)、产学研合作项目(横向项目)：搬运型 AGV 运动控制及作业调度系统研发，徐州徐工特种工程机械有限公司。

1.2 国内外发展及研究现状

1.2.1 重力平衡机构研究现状

近年来，国内外学者已经开展了大量关于灵巧臂重力平衡机构的相关研究。重力平衡方法大致可分为两类。在串联机器人中，被动重力平衡方法主要有配重法和弹簧机构法；弹簧机构法又可细分：悬挂弹簧法、连杆弹簧法、内置弹簧法、辅助弹簧法等^[26]。

配重法是使用额外质量的分布来在操作过程中将机构的总质心保持在特定位置^[18, 27-30]，通过添加相等的配重，保持机械臂的质心位置不变，实现灵巧臂的重力平衡。配重法在机器人自重较大时需要添加较大的配重。这种方法为直接配重法，大大增加了系统的总重量和惯性力，增加了机械臂作业时的危险性，这限制了它们在许多情况下的使用^[31, 32]。因此，对于自重较大的机器人，配重法可能不是最理想的选择。所以许多工业机器人在设计时为了减少额外增加的配重，比如库卡 R360（图 1-2-a）和 PUMA200（图 1-2-b），通常会采用电机的质量作为配重，以实现更有效的重力补偿，这种方法为直接配重法。

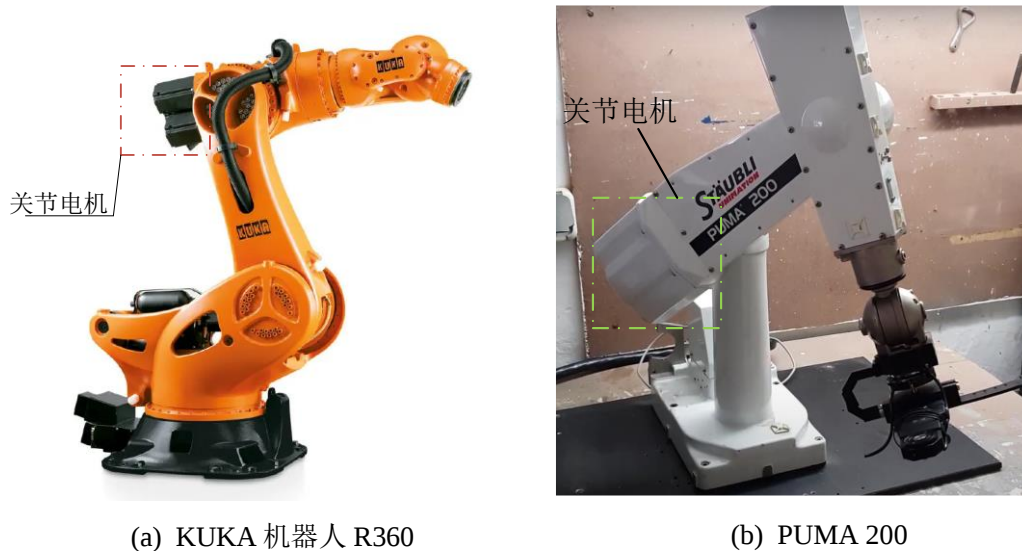


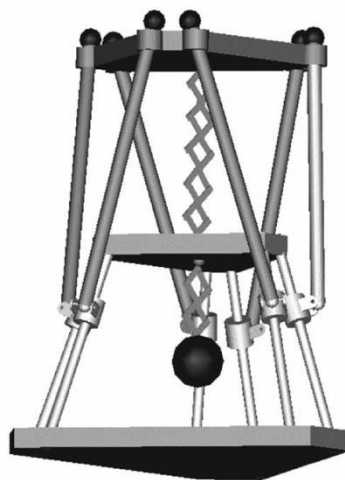
图 1-2 直接配重法应用

如图 1-3-(a)所示，连接到基座的执行器使用电缆和弹簧主动完成大部分工作时，连接到连杆的轻便紧凑的执行器产生精确的运动。该方法可以有效的补偿重力力矩^[33]。如图 1-3-(b)所示的六自由度并联机器人采用智能设计的受电弓，

利用配重实现机构平衡。通过这种设计，可以获得任何构型的机械臂的恒定全局质心^[34]。



(a) 串联机械臂间接配重法^[33]



(b) 并联机械臂间接配重法

图 1-3 间接配重法应用

随着 20 世纪 30 年代 Anglepoise 台灯问世，标志着弹簧机构法的兴起^[35]。这个创新设计展示了弹簧机构在平衡系统中的应用。弹簧机构法相比较于传统的配重法，在机器人设计中具有显著的优势。弹簧机构可以嵌入进机械臂内部，不仅避免了增加机器人自身负荷，而且具有紧凑的结构和强大的稳定性。

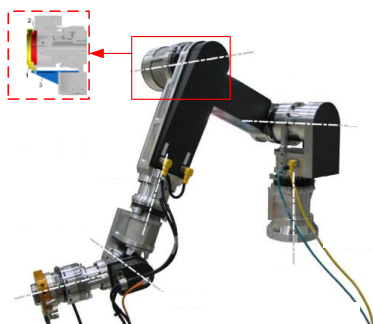


图 1-4 Halbach 圆柱体重力平衡机构^[36]

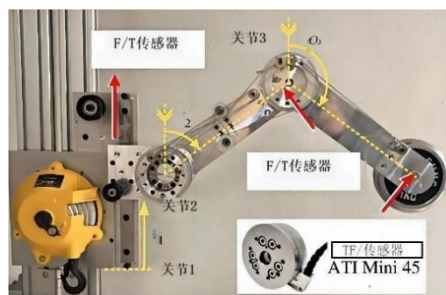


图 1-5 卷簧重力平衡机构^[37]

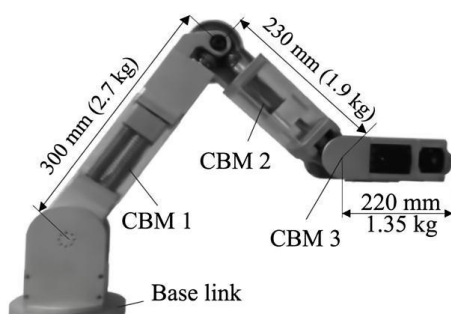


图 1-6 曲柄滑块和弹锥齿轮重力平衡机构^[38]

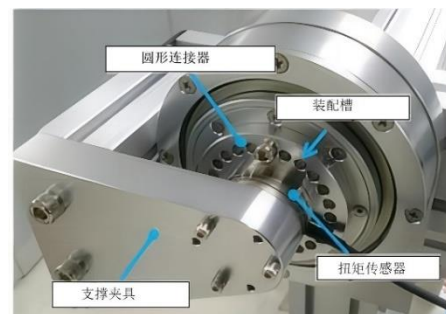


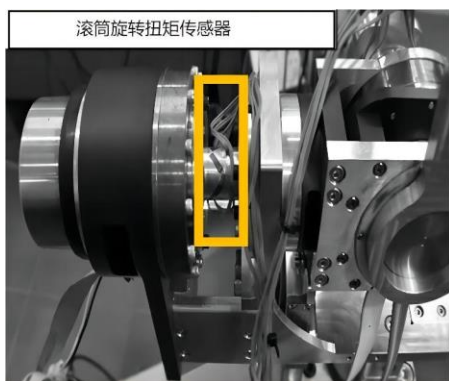
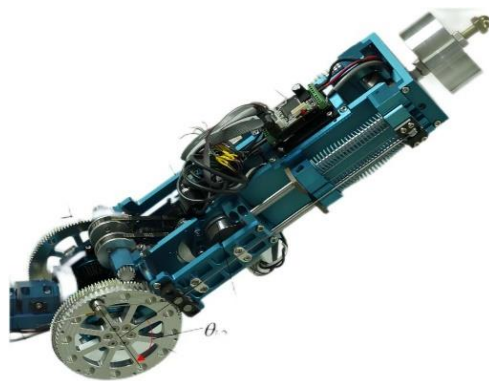
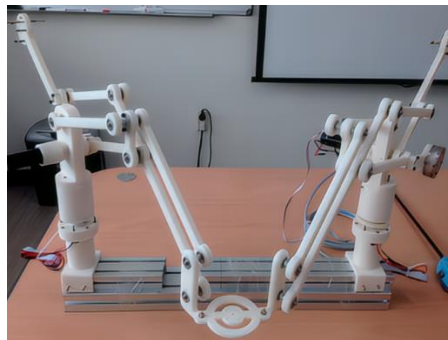
图 1-7 凸轮机构和压缩弹簧重力平衡机构^[39]

配重法的限制缺陷可以通过弹簧方法^[40-45]来缓解。在这些情况下,利用特定的结构(或运动/力传递)将弹簧的线性弹性力转换为非线性扭矩,以对抗机构的重力扭矩^[3, 46]。针对弹簧机构法,Julien Boisclair 等人提出 Halbach 圆柱体的同心运动来产生关节扭矩(图 1-4),该扭矩精确补偿旋转关节完整旋转过程中重力载荷产生的扭矩,虽然磁相互作用是一种很有前途的重力补偿方法,但最终的原型重量过大,关节运动惯性较大^[36]。Won-Bum Lee 等人提出一款新的 3 自由度重力平衡机构机械手臂(图 1-5),该重力平衡机构可以仅使用安装在底座上的一个弹簧平衡器来平衡具有棱柱-俯仰-俯仰关节的机器人,但关节灵活度较差,仅能在一个平面内运动^[37]。

Hwi-Su Kim 提出一款曲柄滑块机构和锥齿轮结合的弹簧重力平衡机构(图 1-6),还提出了对基于弹簧和金属丝的重力平衡机构的扩展,该扩展使用双平行四边形单元为机械臂的每个关节提供平衡扭矩,可以有效的补偿重力力矩,但四杆机构存在死点,因此在机械臂运动过程中,容易发生安全隐患^[38]。针对此问题,Giuk Lee 提出一种利用凸轮机构和压缩弹簧组合来补偿目标结构的重力平衡机构(图 1-7),该机构结构紧凑,无需大量制造和重新设计过程,但体积和质量较大且只能补偿单个旋转关节。Sang-Duck Lee 提出了一种配备多自由度重力平衡机构的六自由度协作机器人。

六自由度重力平衡机构采用双行四边形连杆和曲柄滑块机构进行紧凑耐用的设计,可以很好的弥补关节死点问题,还可以有效地抑制噪声。Koser 提出了一种通过合并凸轮机构和线性弹簧的重力补偿器^[47]。Franchetti D 提出了一种通过滑块、滑轮和配重的变重力补偿机构^[48]。Fedorov 和 Birglen 使用了一对带有恒定长度缆索和线性弹簧的差动非圆形滑轮^[49]。Arakelian 和 Zhang 采用了带线性弹簧的倒滑块曲柄机构^[50]。Nguyen 等人介绍了一种带有线性弹簧的齿轮五杆机构^[51]。Bijlsma 等人使用了带有非圆形齿轮和扭杆的同轴齿轮系^[52]。Kuo 和 Wu 展示了一种基于带线性弹簧的直线齿轮机构的重力补偿器^[53]。Kim 等人采用凸轮和杠杆机构来构建紧凑型重力补偿器^[54],对机械臂末端有较大负载时也具有补偿效果。对于提高机械臂的载荷能力以及减小能源消耗具有重要意义。

灵巧臂的运动必须受到精确的控制,而重力对机械臂的影响可能引起不稳定性。机械臂在执行任务时常常需要携带不同的负载,这导致机械臂所受重力也在不断变化。为了提高灵巧臂作业时工作负载能力而不失去准确性,需要一种机制来平衡这种重力。

图 1-8 平面关节式静平衡机械手^[55]图 1-9 人形机器人肩关节重力平衡机构^[56]图 1-10 付小月柔性板簧机构^[57]图 1-11 龙康重力平衡 3T1R 并联机构^[58]

李璟提出了平面关节式静平衡重力补偿机构(图 1-8), 该机构利用凸轮机构和压缩弹簧的组合来补偿目标结构的重力扭矩, 从而提高了能量效率^[59]。上海理工大学刘兵和崔建昆等人发表的一种凸轮弹簧重力平衡机构, 但凸轮的轮廓曲线公式推导较为复杂且凸轮长时间使用容易磨损, 补偿效果变差^[60]。哈尔滨理工大学梁艺等人发表的一款前列腺放射性粒子植入机器人可变重力矩补偿机构, 可以根据末端负载的不同, 提供不同的补偿力矩, 改善了驱动扭矩幅值的波动^[61]。昌运町等人提出一种用于滚轮俯仰旋转的 2 自由度重力补偿器(图 1-9), 可以有效地平衡了重力力矩, 但有效载荷的影响对重力力矩至关重要, 无法承受大重量的末端负载^[56]。龙康等人提出一种 3TLR 并联机构, 使用配重和弹簧的重力平衡设计(图 1-11), 结构简单便捷, 但采用较大的输出旋转角时, 关节运动存在奇异点^[58]。北京航空航天大学付小月提出了一种以板簧为弹性元件、螺旋盘的变刚度关节驱动重力补偿器(图 1-10) ^[57], 可以在关节处补偿重力。

综上，虽然诸多研究者们采用弹簧与其他机构巧妙结合来平衡重力对关节产生的力矩，但结构仍存在机构死点、体积重量过大、机构安装影响机械臂自由度的问题。

1.2.2 重力平衡机构优化算法研究现状

灵巧臂重力平衡机构的设计与优化面临着诸多挑战。由于灵巧臂的自重相对较大，为了确保其稳定运动和精准操作，需要采取重力平衡措施。因此，机构优化问题成为当前研究的一个重要课题。尽管遗传算法已成功应用于多种问题的解决，但在大规模优化问题上使用遗传算法可能会非常昂贵。这是因为它需要大量的函数评估步骤才能达到收敛，从而导致了计算成本的大幅增加，即便使用目前最佳的计算设施也是如此。

综合考虑粒子群算法、NSGA-II和 PSO 算法的优势，并将它们结合到一个新的优化算法中，可以提供更好的平衡性能，从而在大规模优化问题中取得更佳的结果。这种合理结合的方法可以帮助克服传统遗传算法在大规模问题上的局限性，并提高优化算法的效率和性能，这种综合方法可以通过在算法中引入多样性维护机制和自适应策略来平衡全局搜索和局部收敛。通过灵活地调整算法的参数和操作概率，该算法可以在搜索过程中自适应地调整策略，以适应不同的问题特征和搜索需求。

国内外众多学者针对此问题进行了大量研究，李剑锋等就针对上肢外骨骼中添加零初长弹簧单元，以势能波动为最小目标，对弹簧进行了优化设计^[62]。同样的，戴等提出一种具有重力平衡装置的并联机器人，用于回收和利用重力势能，以降低功耗和节能，并利用免疫遗传算法对机器人结构尺寸和相关参数进行了优化^[63]。孙通过驱动力、速度和功率对高速 6-PSS 并联机构的尺寸参数进行了优化^[64]。丁使用遗传算法来优化无德尔塔自由度并联机构的条件数、刚度和速度极值。丁渊明等以增大工作空间和降低能量消耗为优化目标，利用遗传算法完成结构参数优化，从而增强机械臂结构性能，达到降低能耗的效果^[65]。刘磊对增加弹簧加载平衡系统的五自由度铰接重型机器人建立优化目标的函数并通过 MATLAB 对弹簧的参数进行优化，得到了最优平衡系统^[66]。

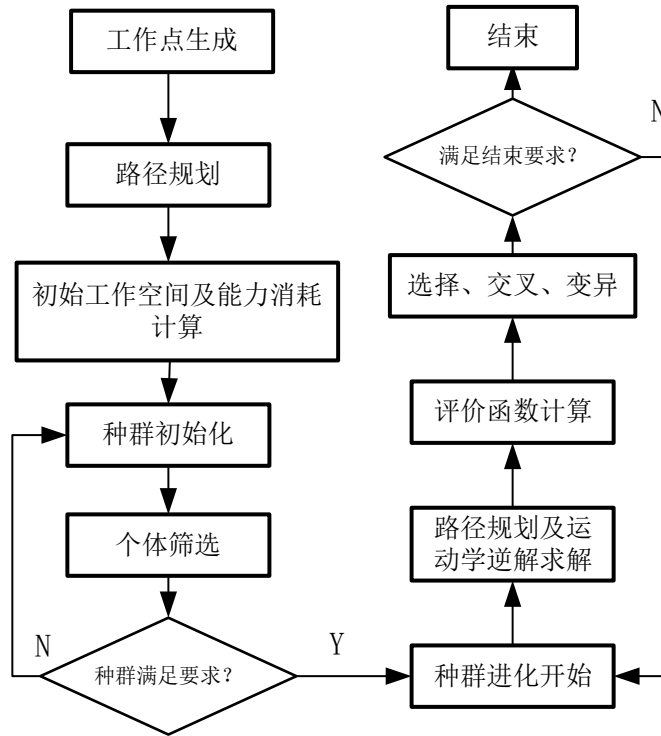


图 1-12 丁渊明遗传算法优化机构流程图^[65]

在进行与工程优化设计相关的研究时，特别是在涉及重力平衡机构的优化设计方向，研究者普遍采用了 NSGA-II 算法及其相关的衍生算法。例如，沈阳理工大学的杜天野运用 NSGA-II 算法对六自由度协作机器人进行了多目标结构优化。通过这一优化计算方法，成功避免了人为选择帕累托边界中的最优值，最终获得了一组符合多目标优化目标的最佳结构尺寸^[67]。此外，安徽工程大学的何文鹏采用了改进的自适应 NSGA-II 算法，通过优化减震器阻尼系数和弹性刚度，成功减小了车身不平衡力矩，提高了车体在不同地形下的运动稳定性。改善车辆性能。通过算法优化，成功实现了对减震器参数的调整^[68]。S Segla 提出将重力平衡机构寻找合适的设计变量的问题转化为一个优化问题，并使用遗传算法给出更好更快的结果^[69]。R Rajendra 对七自由度双足机器人在双支撑阶段上下楼梯时步态规划的多目标优化问题，分别使用遗传算法和粒子群优化算法获得了 Pareto 最优前沿^[70]。R Saravana 针对工业机器人 APR20 的弹簧平衡机构，建立并求解了一个新的改进优化模型，该模型适用于寻找合适的设计变量。在传统算法和进化算法的基础上，提出了 GA、NSGA-II、NM、CGM 和 DE 五种设计优化方法并选择最佳的优化方法^[71]。Nguyen 以弹簧四杆机构作为重力

补偿器进行了实例，研究通过采用遗传算法的多个适应度函数的 Pareto 前沿来求解^[10]。Montazeri 以七自由度液压机械手的动力学建模和参数估计问题。开发的算法利用多目标遗传算法^[72]。

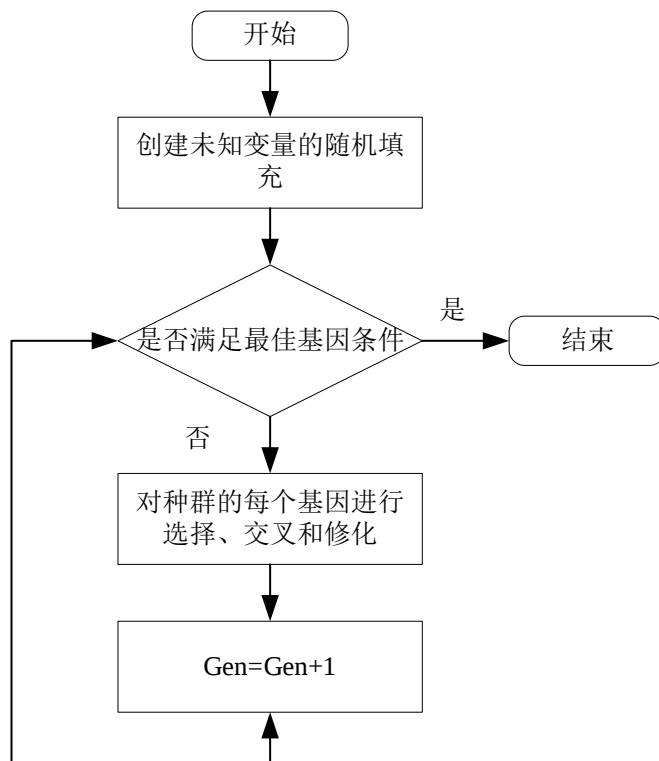


图 1-13 R Saravana 算法优化机构流程图^[71]

在工程优化设计领域，尤其是在涉及重力平衡机构的优化设计方向，研究者普遍采用 NSGA-II 算法及其相关的衍生算法。尽管 NSGA-II 算法在多目标优化问题上表现出色，但也存在一些缺点：在处理复杂问题时可能需要较长的时间才能达到收敛，特别是在面对高维度问题时表现不佳。对于大规模优化问题，NSGA-II 算法的计算复杂度较高，可能会导致算法难以收敛或者需要大量的计算资源。因此，针对传统 NSGA-II 算法进行改进也是当前研究中需要解决的问题。

1.3 主要研究内容及章节安排

1.3.1 研究内容

论文以装配有重力平衡机构机械臂关节为研究对象主要研究内容如下：

第 1 章 绪论。首先阐明了研究背景及其在工程领域中的重要意义。随后，详细介绍了当前灵巧臂重力平衡机构研究的现状。同时，对机构优化算法的现状进行了概述，强调了在重力平衡机构设计中运用优化算法的必要性与重要性。本章最后，给出了论文的研究内容和章节布局，为读者勾画了明确的研究框架和前景。

第 2 章 重力平衡机构结构设计及机理分析。本章通过分析灵巧臂的重力平衡机理，得出灵巧臂关节力矩平衡的需求。针对此需求，设计了重力平衡机构，并建立了灵巧臂重力平衡机构的等效模型，以清晰阐明重力平衡机构引入的关节扭矩降低问题。

第 3 章 灵巧臂重力平衡机构运动学及动力学分析，首先对重力平衡机构的运动学进行了深入分析和建模，考虑特性参数对机构运动的影响，随后，根据灵巧臂重力平衡机构参数的几何关系，建立灵巧臂动力学模型，通过比较未平衡三关节机械臂与安装了重力平衡机构的三关节动力学之间的差异，揭示了添加重力平衡机构对灵巧臂动力学性能的改善效果，以及调整不同参数对重力平衡效果的影响。最后，利用拉格朗日能量法推导出灵巧臂重力平衡机构的势能和动能，并获取重力平衡机构的特性参数。最后，对参数进行分析与计算，验证了动力学模型的正确性，并确定了优化融合的关键特性参数。

第 4 章 灵巧臂与重力平衡机构特性参数优化研究。针对传统自适应 NSGA-II 算法在机构优化中存在的缺点和不足，提出了基于随机游走策略的自适应 NSGA-II 算法。该算法旨在优化关键特性参数，以确保灵巧臂重力平衡机构的动力学表现达到最优。围绕灵巧臂重力平衡机构特性参数优化的问题，搭建了双目标优化模型来优化特性参数。最后，通过对算法生成的优质解进行计算和对比，得出了最优结果，为灵巧臂重力平衡机构的设计和优化提供了有效的解决方案。

第 5 章 灵巧臂重力平衡工况实验研究。首先设计了试验方案，其中包括仿真抓取实验，旨在验证动力学建模的准确性。随后，进行了实物实验，涵盖了空载、额定载荷、极限载荷以及能耗等试验。通过对比分析了关节转矩和能耗

的优化效果，验证了仿真实验的准确性。最终得出结论：经过优化设计后，灵巧臂重力平衡机构的性能得到了改善。

第 6 章 总结与展望。回顾了研究的主要内容和结果，并对当前研究工作的局限性和不足之处的讨论，并提出了未来研究可以扩展的方向和改进方法。

1.3.2 章节安排

首先，本文分析了重力平衡机构对关节力矩的补偿机理问题，并根据重力平衡机理设计了相应的重力平衡机构。其次，基于灵巧臂重力平衡机构，建立了三关节动力学模型。通过对比安装重力平衡机构的模型与未安装的动力学模型的差异，获取了灵巧臂重力平衡机构的特性参数。随后，针对传统算法存在的缺点和不足，提出了一种改进的 NSGA-II 算法来优化机构平衡效果。最后，利用该算法求得的最优特性参数进行了灵巧臂和重力平衡机构特性参数优化问题的验证实验。通过比较传统算法和改进算法在补偿效果上的差异，验证了算法改进的增益效果。

第 2 章 重力平衡机构机理分析及结构设计

2.1 引言

近年来，电池供电的移动机器人手臂多种发展和商业化，然而，由于采用大容量电机以实现高负载，使得功耗巨大，但电池容量的限制，显著缩短了机器人的运行时间。并且由于移动机械臂的有效载荷相对较小，因此难以胜任较大重量的任务。

为了满足上述要求，提出了一种采用绳索驱动的重力补偿机构，安装在灵巧臂关节处，来减小关节电机运动惯量的方法。通过压缩弹簧将机器人与负载的重力势能转化为弹性势能进行能量储备，以减小驱动机器人关节电机的扭矩，从而降低机器人功耗。这一创新性的方案有望在提高机器人性能的同时，有效应对能耗和安全性的挑战。

2.2 灵巧臂重力平衡机构机理分析

2.2.1 灵巧臂重力平衡机构运动分析

由于灵巧臂的复杂几何形状，因此需要在灵巧臂的每个关节处设置一个连杆坐标系，通过描述连杆坐标系之间的关系来表示灵巧臂的运动关系。

RM65-B 关节旋转式机器人，如图 2-1 示为 RM65-B 的坐标系统图，具体参数值如表所示，相邻连杆之间都是通过旋转关节连接。从灵巧臂的固定基座开始为连杆进行编号，称固定基座为连杆 0，第一个可动连杆为连杆 1，以此类推，各个连杆参数定义如下：

连杆长度 a_i ：关节轴 i 和关节轴 $i+1$ 之间公垂线的长度。

连杆扭转角 α_i ：关节轴 i 和关节轴 $i+1$ 之间的夹角；

连杆偏距 d_i ：两相邻连杆公共轴线方向的距离；

关节转角 θ_i ：两相邻连杆绕公共轴线旋转的夹角；

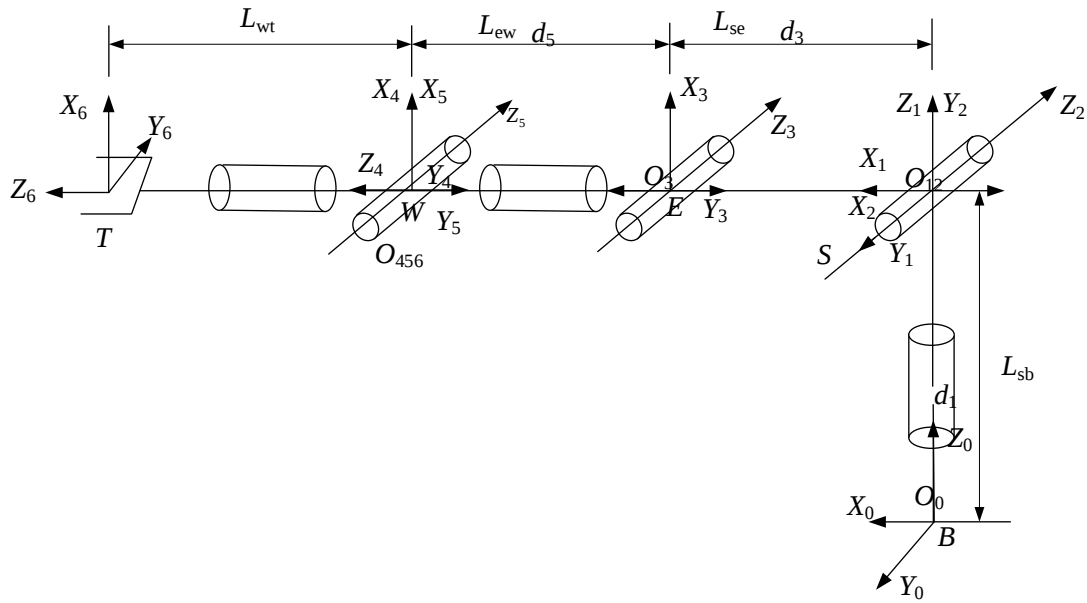


图 2-1 机械臂坐标系图

如果已经定义了连杆坐标系和相应的连杆参数，就能直接建立运动学方程。由连杆参数值，将表 2-1 带入计算出各个连杆的变换矩阵。

表 2-1 D-H 参数表

关节编号(i)	杆长 $a_i(\text{mm})$	连杆转角 $\alpha_i(^{\circ})$	$d_i(\text{mm})$	关节角 $\theta_i(^{\circ})$	变量范围
1	0	0	240.5	$\theta_1(0)$	$\pm 178^{\circ}$
2	0	90	0	$\theta_2(90)$	$\pm 130^{\circ}$
3	256	0	0	$\theta_3(90)$	$\pm 135^{\circ}$
4	0	90	210	$\theta_4(0)$	$\pm 178^{\circ}$
5	0	-90	0	$\theta_5(0)$	$\pm 128^{\circ}$
6	0	90	144	$\theta_6(0)$	$\pm 360^{\circ}$

如图 2-2 所示，研究对象为睿尔曼协作型灵巧臂 RM65-B。关节 1、4、6 的力矩作用可以通过灵巧臂机构本身来平衡，从而在电机转动不会受到附加力和力矩影响。因此，在关节平衡时，无需考虑关节 1、4、6。在实际操作过程中发现，关节 2 不仅在进行关节运动时承受其他关节的重力矩，而且在末端负载的情况下还需承担末端负载的重力矩，当机械臂承载极限载荷时，关节电机 2 会存在负载过大导致电机过载使得机械臂过载保护断电，这种现象存在极大的

安全隐患，因此将关节 2 成为主要的研究对象，旨在解决此问题，降低关节扭矩以及关节能耗，提高操作的安全性。



图 2-2 灵巧臂关节运动示意图

重力平衡机构基本上是从弹簧的恢复力产生平衡扭矩。重力平衡机构的操作使得产生的平衡扭矩在大小上总是与任何机器人配置所需的重力扭矩相同。重力平衡机构的机理是采用重力补偿装置来抵消机械臂的重力。这些装置可以是气缸、弹簧、液压缸或电机等，通过施加适当的力或扭矩来平衡机械臂的重力作用，但结构复杂并且采用气缸、液压或是电机进行重力平衡时需要复杂的控制策略，补偿机制较为复杂，增大了研发成本。本文所提出的机构如图 2-3 所示，由弹簧、卡箍、绳索、滑轮、同步带轮组成。采用绳索的优点是重量轻、结构简单、运动惯量小。安装该机构的灵巧臂可以储存能量并用于补偿关节处的扭矩。

由于灵巧臂在初始姿态为竖直状态，不需要补偿扭矩，因此在 0° 时弹簧没有压缩。灵巧臂关节开始运动时，关节电机需要产生反向扭矩来克服灵巧臂的重力。而增加了能量储备机构可以将部分重力做功使弹簧压缩的能量存储起

来，在灵巧臂关节恢复竖直状态时释放能量补偿电机扭矩。当灵巧臂关节运动到 90° 时，重力力矩达到最大，此时压缩弹簧存储的能量达到最大。

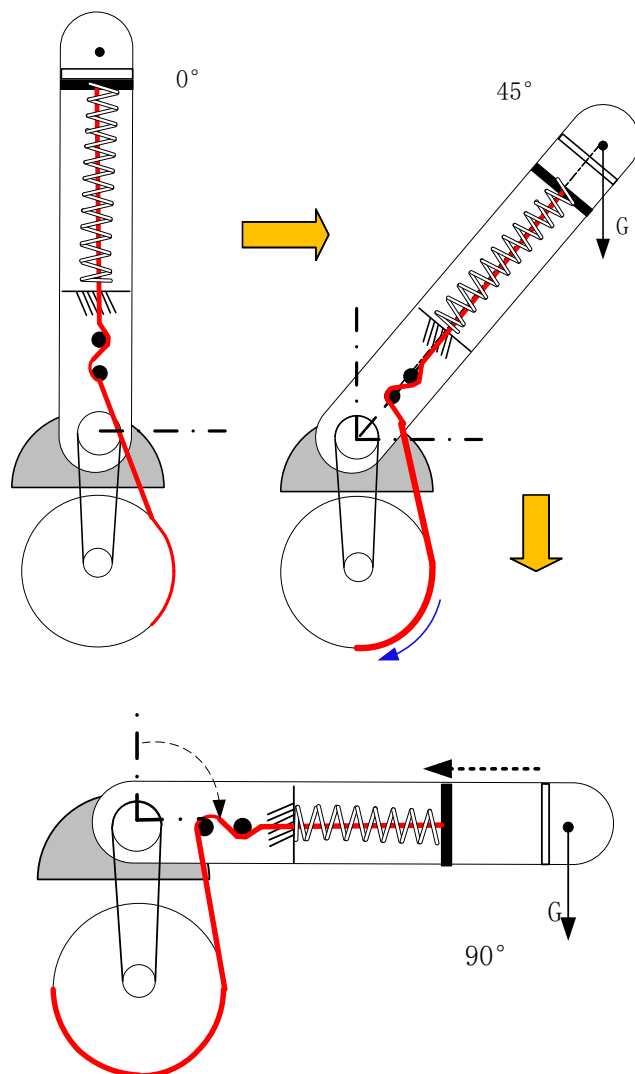


图 2-3 灵巧臂重力平衡机构关节运动简图

大多数传统的机械臂安装有昂贵的减速机和高性能电机，从而产生更大的扭矩，使得手臂能够承受来自自身重量以及运动产生的负载，价格低廉的电机和减速机难以提供足够的扭矩来支撑机械臂的重量并使其加速。因此，需要创新性的策略来降低机械臂所需扭矩，使得在使用廉价部件的情况下也能实现高性能，降低机械臂的开发成本。

2.2.2 灵巧臂重力平衡机构特性参数分析

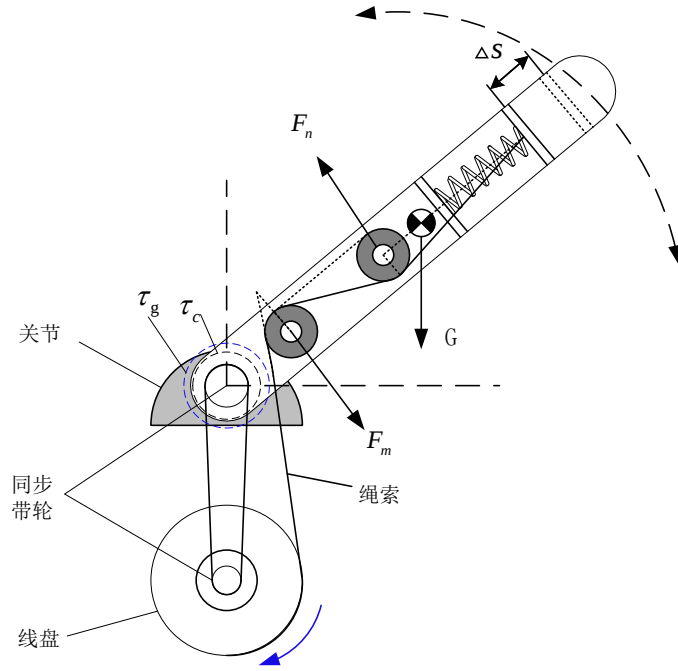


图 2-4 静态分析模拟图

灵巧臂关节运动所需的最大力矩是重力力矩和惯性力矩。科里奥利效应和离心效应并不大，除非机器人高速移动。只要机器人以合理的速度和加速度运动，机器人加速或者减速的惯性通常情况下很小。重力力矩是机器人和有效载荷的质量引起的，因此平衡由机器人和有效载荷引起的重力扭矩可以使得关节所需的扭矩最小。灵巧臂关节 2 由初始位姿绕转动到达定位姿态时如图 2-4 所示，大臂重力产生的扭矩为

$$\tau_g = mgl_c \sin \theta \quad (0-1)$$

式中， m 是大臂质量； l_c 是大臂重心到转轴中心的距离， g 是重力加速度。当灵巧臂关节开始运动时，绳索随着灵巧臂关节运动收缩绳索，拉动弹簧压缩，为了更好的解释机理在这里假设绳索受力后无弹性形变，则弹簧产生的压缩力为

$$F_s = k(\Delta s + s_0) \quad (2-1)$$

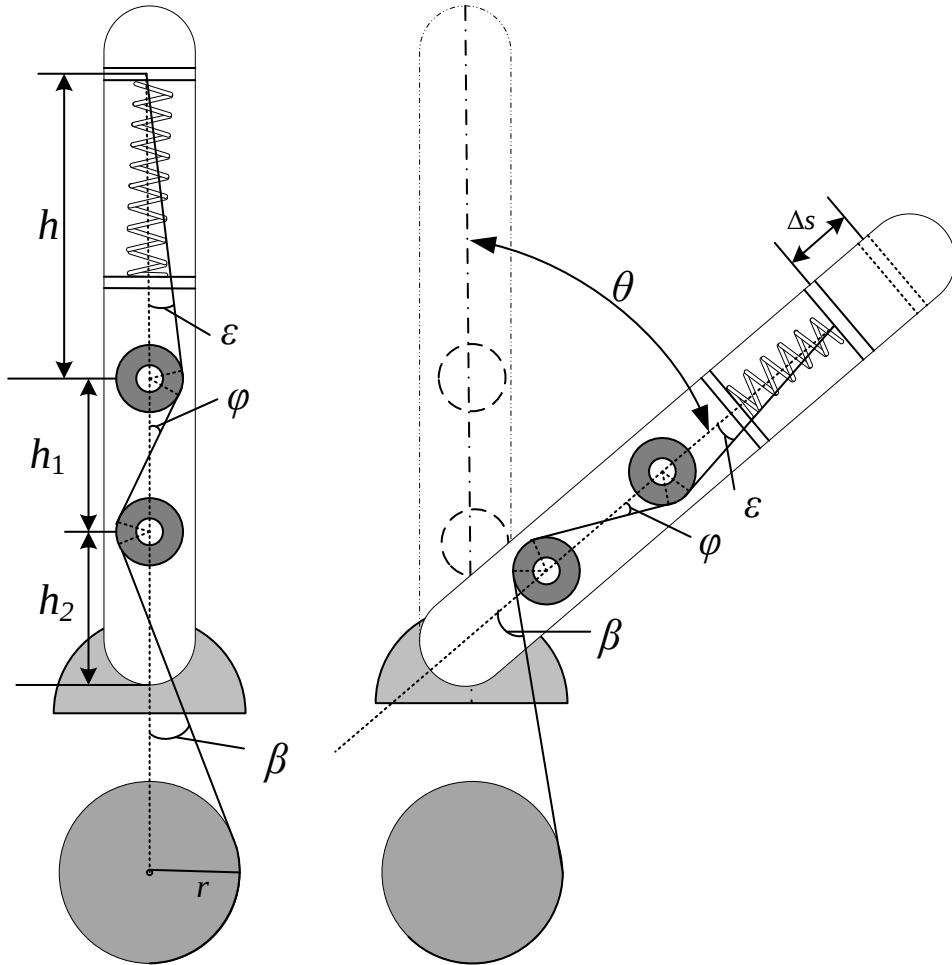
其中 k 是弹簧刚度， Δs 是弹簧的初始压缩长度， s_0 是与同步带轮同轴的线盘转动的弧长即绳索收缩的长度，设同步带轮齿数比值为，则灵巧臂关节转动角度为 θ 时，线盘转动角度为 φ ，因此，其中 r 为线盘半径，此时同步带轮上压缩力产生的扭矩定义如下

$$\tau_s = rF_s \quad (2-2)$$

同步带轮扭矩的传递公式为：

$$\tau_c = \frac{d\tau_s}{D} \quad (2-3)$$

其中 d 为与滑轮同轴的同步带轮半径， D 为关节上的同步带轮半径为传递到同步带轮上的扭矩大小。为了增大补偿效果，在机构上增加两个定滑轮，绳索以 s 型穿过两个定滑轮，在绳索受力时，施加在两个定滑轮上的张力对关节会产生一个适当的补偿力。



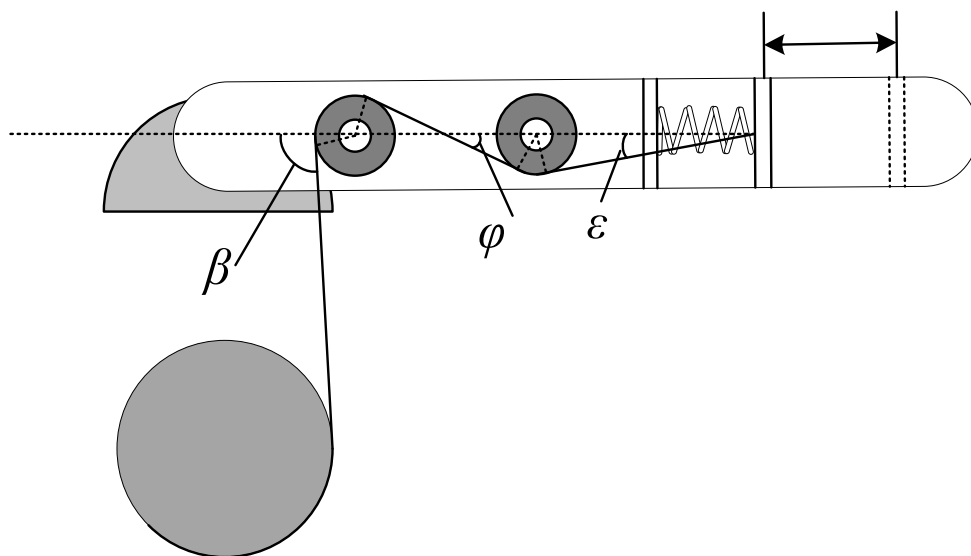
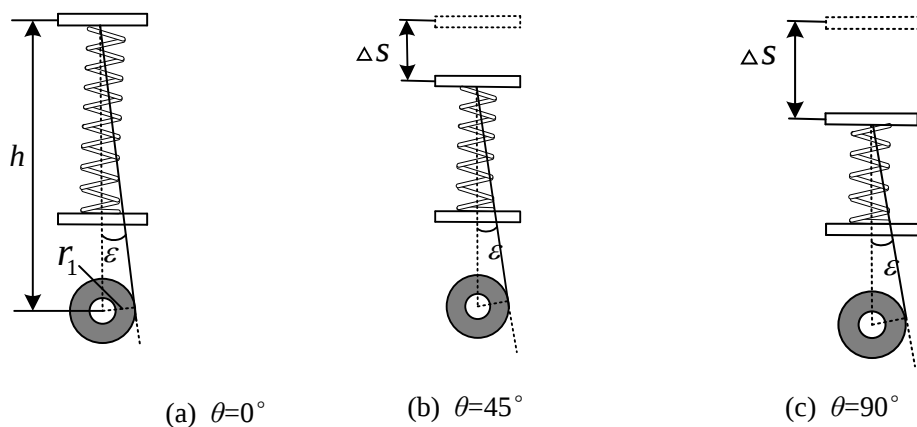


图 2-5 灵巧臂关节运动关系示意图

图 2-5 所示为加装重力平衡机构灵巧臂关节运动的内部机构关系示意。其中滑块距离上方定滑轮的距离为 h ，两个定滑轮之间的距离为 h_1 ，下方滑轮到关节电机中心位置的距离为 h_2 ，连接滑块的绳索与上方定滑轮的夹角为 ε ，上方滑轮与连接下方滑轮的夹角为 φ ，下方滑轮与绳索的夹角为 β 。


 图 2-6 夹角 θ 与 ε 关系图

如图 2-6 所示为弹簧随关节运动角度转动而压缩示意图，可知夹角 ε ：

(2-4)

$$\varepsilon = \arcsin\left(\frac{r_1}{h - \Delta S - s_0}\right) \quad (2-5)$$

其中 r_1 滑轮半径。

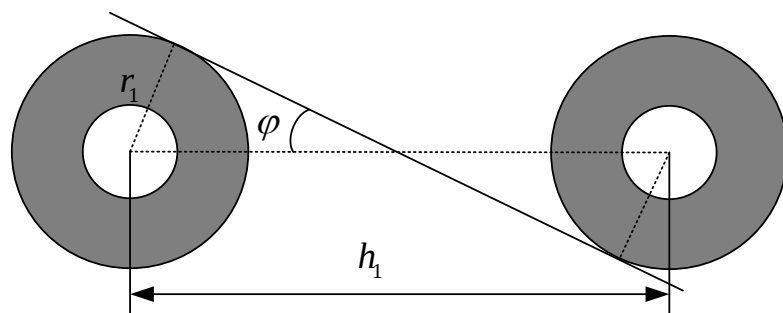


图 2-7 滑轮关系示意图

如图 2-7 所示为两个滑轮的关系示意图，两定滑轮之间不存在相对位移，其中两个滑轮之间的距离为 h ，可知夹角 φ ：

$$\varphi = \arcsin \frac{2r_1}{h_1} \quad (2-6)$$

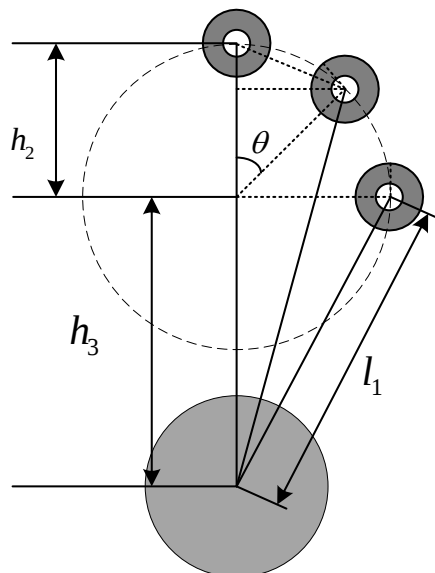


图 2-8 滑轮与线盘的位置关系示意图

如图 2-8 所示为滑轮与线盘之间运动关系的结构简图，线盘中心到定滑轮中心的距离 l_1 ：

$$l_1 = \sqrt{h_2^2 + h_3^2 + 2h_2h_3 \cos \theta} \quad (2-7)$$

其中 h_2 为滑轮中心到大臂关节中心的距离， h_3 为大臂关节中心与线盘中心的距离，由勾股定理得出。

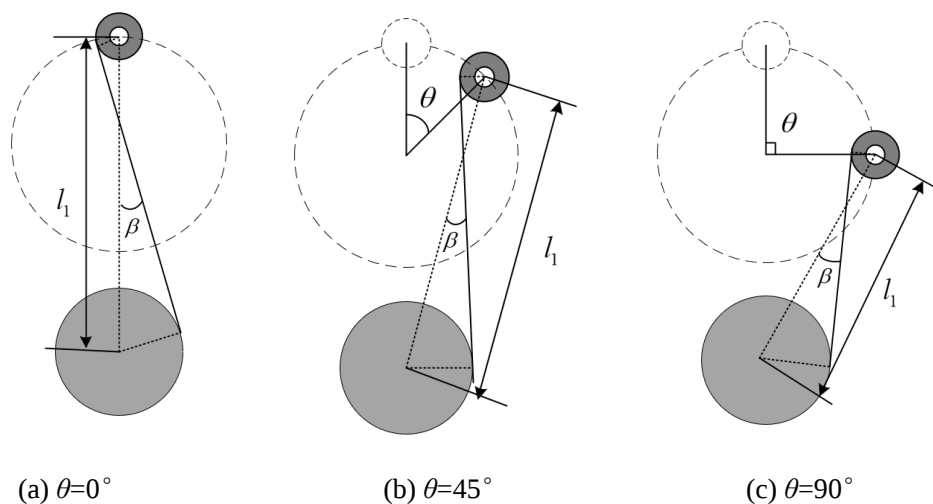


图 2-9 θ 与 β 角度关系图

如图 2-9 所示为 θ 与 β 角度关系图，由式(2-7)中线盘中心到定滑轮中心的距离 l_1 ，可得夹角 β 。

$$\beta = \arcsin \frac{r_1 + r}{\sqrt{h_2^2 + h_3^2 + 2h_2h_3 \cos \theta}} \quad (2-8)$$

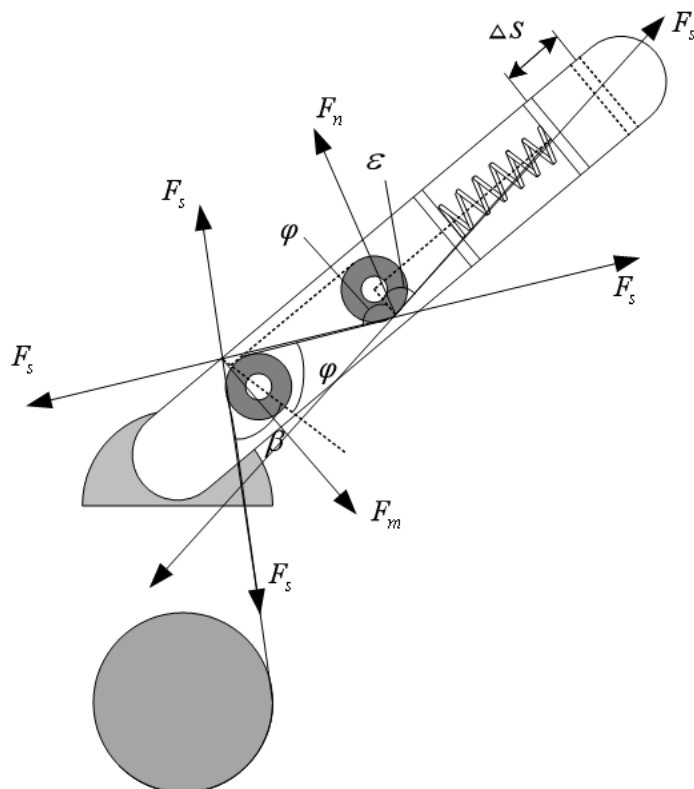


图 2-10 F_n 与 F_m 力矩关系示意图

如图 2-10 所示, 此时绳索上的拉力为 F_s , 绳索张紧后两个滑轮对连杆产生两个力 F_n 和 F_m 分别为:

$$\begin{cases} F_n = k(\Delta s + s_0) \sqrt{2 + 2 \cos \left[\arcsin \left(\frac{r_1}{h - \Delta s - s_0} \right) + \arcsin \frac{2r_1}{h_1} \right]} \\ F_m = k(\Delta s + s_0) \sqrt{2 + 2 \cos \left[\arcsin \frac{2r_1}{h_1} + \arcsin \frac{r_1 + r}{\sqrt{h_2^2 + h_3^2 + 2h_2h_3 \cos \theta}} \right]} \end{cases} \quad (2-9)$$

为了有效地补偿重力力矩, 补偿力矩 τ_s 具有等轴向力, 转矩之差计算如下:

$$mgl_c \sin \theta - F_n(h_2 + h_3) + F_m h_2 - \frac{drF_s}{D} = 0 \quad (2-10)$$

在该方程中, 除 k 外, 其余参数均为已知值。按如下方式排列以求出 k :

$$k = \frac{mgl_c \sin \theta}{(\Delta s + s_0) \left[(h_2 + h_3) \sqrt{2 + 2 \cos(\varphi + \varepsilon)} - h_2 \sqrt{2 + 2 \cos(\varphi + \beta)} + \frac{dr}{D} \right]} \quad (2-11)$$

其中各项参数名称如表 2-2 所示

表 2-2 灵巧臂重力平衡机构受力参数表

符号	名称	符号	名称
k	弹性刚度系数	β	滑轮轮盘间绕绳夹角
θ	关节 2 运动角度	φ	两滑轮间绕绳夹角
ε	滑轮与弹簧间绕绳夹角	F_s	绳索拉力
F_z	绳索作用滑轮张力	F_m	绳索张力力矩
F_n	绳索张力力矩	l_1	线盘与定滑轮间距
s_0	弹簧预紧量	Δs	弹簧压缩量
r	线盘半径	r_1	滑轮半径
h	滑块与滑轮的间距	h_1	两个滑轮之间的距离
h_2	滑轮到关节 2 的距离	h_3	关节 2 到线盘的距离

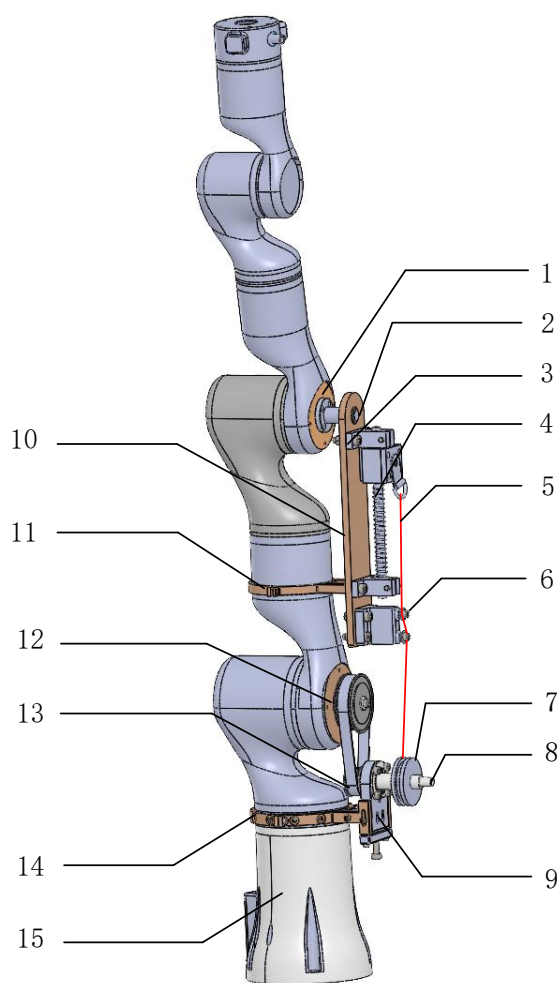
2.3 重力平衡机构结构设计

2.3.1 重力平衡机构总体结构设计

本文的重力平衡设计方案如下图 2-11 所示, 该机构由轴承底座、大臂卡箍、轴、收缩轮、同步带轮、弹簧、滑块等零件组成。此平衡原理是通过将灵巧臂

关节的重力势能转化为弹簧的弹性势能，通过大臂关机转动带动收缩轮收缩绳索，从而带动绳索末端滑块向下运动压缩弹簧，将能量储存，减小关节扭矩。

轴承底座上设置有张紧装置，保证同步带轮和绳索能够张紧，小臂法兰轴与底板之间有衬套，能够保证关节能够旋转，并且不影响机械臂基本功能。定滑轮能够起到限制绳索位置，并通过绳子的张紧力来给予机械臂补偿效果，并通过同步带轮将力矩传递到关节处，提供与关节电机旋转方向相反的扭矩，从而达到平衡效果。



1. 小臂法兰轴 2. 轴承衬套 3. 滑轨支架 4. 弹簧 5. 绳索
6. 滑轮 7. 收缩轮 8. 轴 9. 轴承底座
10. 底板 11. 大臂卡箍 12. 大臂同步带轮
13. 小臂同步带轮 14. 小臂卡箍 15. 灵巧臂本体

图 2-11 灵巧臂重力平衡机构三维图

2.3.2 机构特性参数分析

(1) 关节转角

关节转动角度 $\theta \in [-90^\circ, 90^\circ]$ ，由于灵巧臂运动在 $[0^\circ, 90^\circ]$ 和 $[-90^\circ, 0^\circ]$ 的运动时运动模型相同，因此为了便于研究，取关节转动角度 θ 在 $\in [0^\circ, 90^\circ]$ 范围内运动来研究灵巧臂重力平衡机构。

(2) 弹簧初始压缩长度

弹簧初始压缩长度 s_0 即为弹簧预紧力，受到弹簧的最大压缩长度以及滑轨长度的限制， s_0 的取值范围为 $0\text{mm} \leq s_0 \leq 45\text{mm}$ 。

(3) 弹簧刚度 k

通过(2-11)推导出灵巧臂关节在任意角度下所需的弹簧刚度：

$$k = \frac{mgl_c \sin \theta_1}{(\Delta s + s_0) \left[(h_2 + h_3) \sqrt{2 + 2 \cos(\varphi + \varepsilon)} - h_2 \sqrt{2 + 2 \cos(\varphi + \beta)} + \frac{dr}{D} \right]} \quad (2-12)$$

通过设置不同的弹簧初始量 $s_0=0\text{mm}$ 。 θ 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的范围内变化时，弹簧刚度 k 随之变化的情况如图 2-12 所示。随着关节转角的增大，弹簧刚度 k 先增加后减少。弹簧预压缩量 s 越小，弹簧刚度 k 的变化越平缓，并且随着弹簧初始压缩长度 s 的增加而减小。

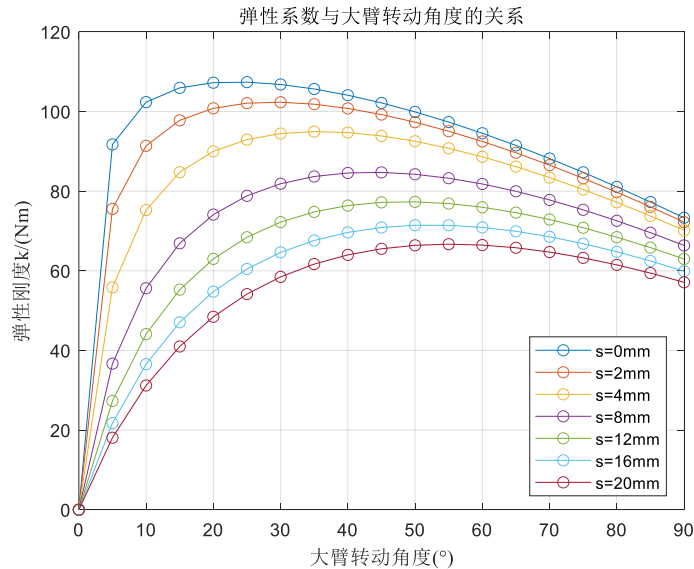


图 2-12 所需弹簧刚度 k 随大臂转角的变换情况

由于受滑轨长度的限制，弹簧预拉伸量 Δs 不能大于弹簧拉伸极限， $\Delta s_{\max}$ 即 $\Delta s \leq \Delta s_{\max}$ 。因此，由图 2-12、图 2-13 可得 $50\text{N/m} < k \leq 110\text{N/m}$ 、 $0\text{mm} < \Delta s \leq 32\text{mm}$ 。

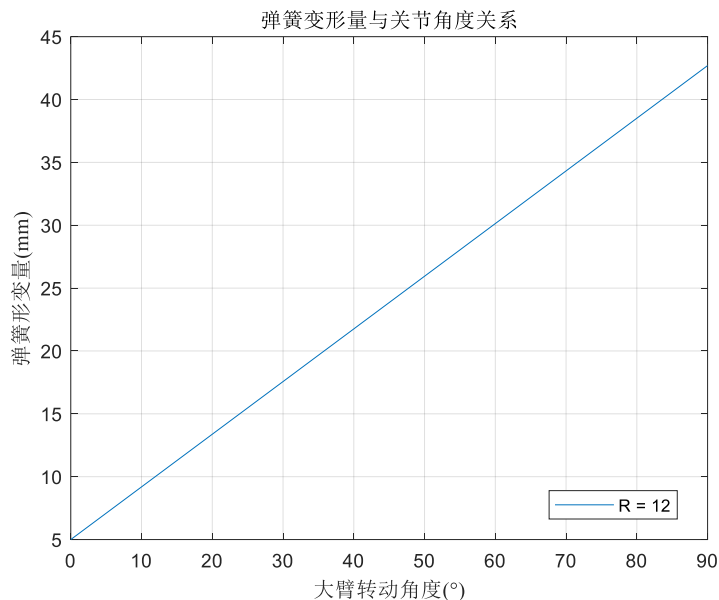


图 2-13 弹簧形变量与关节转角关系

(4) 绳索截面直径

机构绳索选用高强度聚乙烯编织绳。进行了绳索拉伸仿真实验得到绳索的拉伸强度，绳索的各项物理参数如表 2-3

表 2-3 绳索物理参数表

序号	物理性能	参数范围
1	断裂强度 (g/d)	30-45
2	模量 (g/d)	1000-1350
3	伸长量 (%)	3.5-4.0
4	密度 D (g/cm ³)	0.97

通过 MATLAB 模拟了高分子聚乙烯纤维的拉伸实验，通过定义实验参数和构建应变范围，然后使用非线性本构模型模拟了拉力位移曲线。

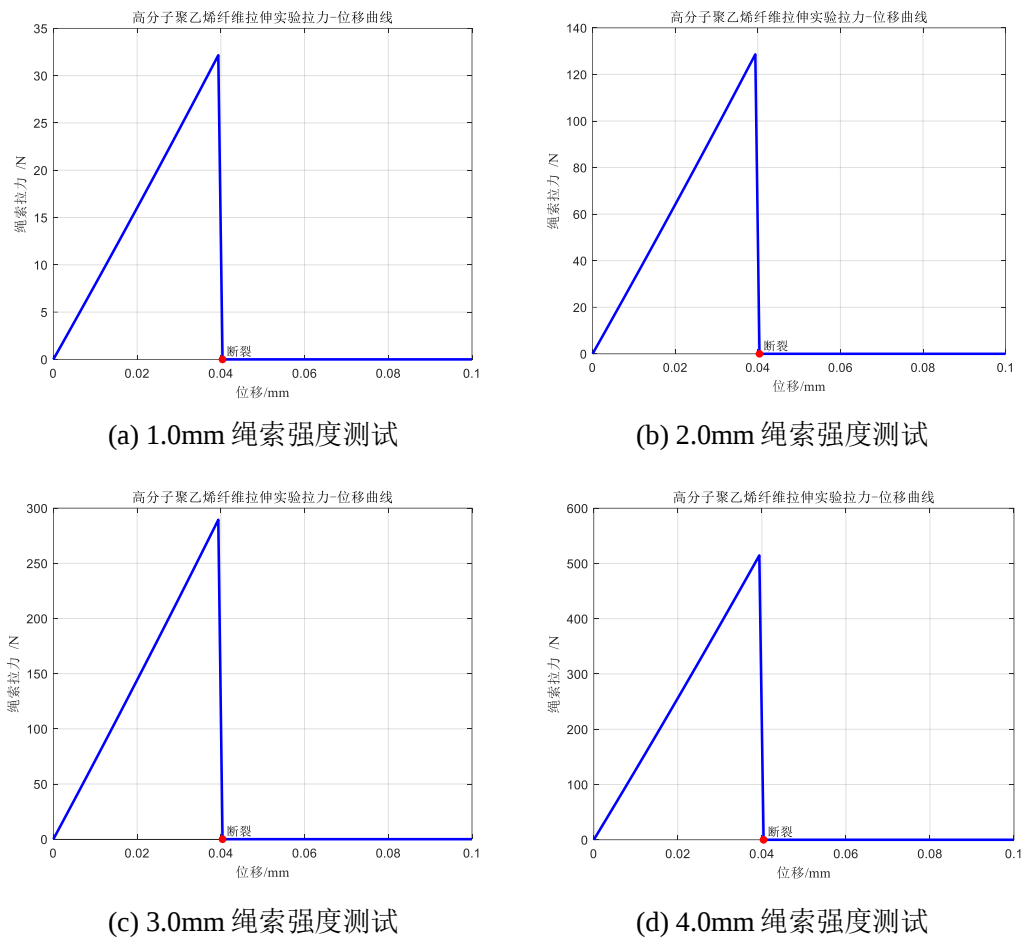


图 2-14 绳索拉伸实验图

实验结果在图 2-14 中，展示了绳索拉伸测试的结果。从图中可以观察到，直径为 4.0mm 的编织绳具有较大的极限载荷，实验结果分析如表 2-4 所示。

表 2-4 实验载荷表

绳索直径/mm	1.0mm	2.0mm	3.0mm	4.0mm
测试样本有效长度/mm	350	350	350	350
极限载荷/N	32.17	128.68	287.91	527.32

通过选择极限拉力明显高于实验要求的绳索，要确保在实验过程的安全性，因此绳索受力不能超过其极限载荷的 80%，4mm 绳索满足设计需求。

2.4 本章小结

本章详细分析了重力平衡机制的成因。在灵巧臂在执行任务时，其自身重力需要额外克服，影响机械臂的负载能力。因此，在灵巧臂的重力平衡机构设

计中，充分考虑了这一问题，深入分析了重力平衡的结构机理，并建立了相应的重力平衡机理模型。进一步介绍了一种绳索驱动的重力平衡机构的全过程设计，包括对绳索和绳索张紧装置的细致考虑、整体结构设计以及详尽的分析。最后，针对重力平衡机构进行了绳索选型，为随后的机械臂与重力平衡机构融合的运动学和动力学建模提供了指导。

第3章 灵巧臂重力平衡机构运动学及动力学分析

3.1 引言

通过第二章的重力平衡机构本体设计以及机理分析，本章聚焦于灵巧臂重力平衡机构的运动学和动力学分析。首先，对绳索的运动学进行了深入分析和建模，包括对一些基本假设和参数的定义，以及绳索运动学建模的过程。接着，进行了灵巧臂的运动学建模，包括正向和逆向运动学分析。随后，建立了灵巧臂的动力学模型，对比了未平衡三关节机械臂和安装了重力平衡机构的三关节动力学的差异。揭示了添加弹簧对机器人动力学性能的改善效果，并探讨了调整不同参数对重力平衡效果的影响。最后，利用拉格朗日能量法推导出整体的势能和动能，并获取重力平衡机构的特性参数，为后续章节对特性参数的优化提供了基础。通过本章的研究，将为灵巧臂重力平衡机构的设计和性能优化提供重要的理论基础。

3.2 机构运动学分析与建模

3.2.1 基本假设与部分参数的定义

由于绳索是柔性体，所以其在运动过程中只能受到拉力而不能受到压力。在本文中均假设绳索满足以下条件：

假设 1：假设绳索在运动过程中不会出现松弛，以维持系统的稳定性，绳索始终处于张紧状态。

假设 2：假设绳索和线盘、绳索和定滑轮接触表面之间没有摩擦滑动，简化了摩擦力的计算。

3.2.2 重力平衡机构运动学建模

重力平衡机构中利用绳索传递关节扭矩。在重力平衡机构的运动学建模中，对绳索的分析与建模主要体现在两方面。第一点是绳索收到张力产生形，第二点是绳索自身重力会导致绳索存在悬链效应。并且这两个因素相互影响。

通过对绳索悬链效应的研究表明^[73, 74]，由于绳索线密度很小，所以对于绳索长度较短时候，自重产生的影响很小。采用高强度聚乙烯编制绳，且作业过程中施加绳索较大预紧力确保绳索张紧。因此，绳索张力和形变量存在以下关系

$$F_z = G\chi = AE\chi \quad (3-1)$$

式中 F_z ——绳索所受张力(N)；

A ——绳索横截面积(m^2)；

E ——绳索的弹性模量(Pa)；

G ——绳索的刚度模量(N)；

χ ——绳索单位形变量，也称应变，无量纲；

绳索的单位形变量 χ 与绳索的原始长度 L 有直接关系。单位形变量定义为绳索长度的变化量与原始长度的比值。具体来说，如果绳索原始长度为 L ，在外力作用下长度变化了 ΔL (可能是伸长或缩短)，那么单位形变量 χ 可以表示为：

$$\chi = \frac{\Delta L}{L} \quad (3-2)$$

这个关系说明，单位形变量是一个无量纲的相对量，它表示长度变化与原始长度的比例，而不是一个绝对的长度变化量。因此，即使两根不同长度的绳索经历了相同的绝对长度变化 ΔL ，它们的单位形变量也可能不同，因为它们的原始长度 L 不同，本文中为方便在不同的条件和应用中评估和预测材料的行为，假设任何原始长度下的单位形变量均相同。

在第二章的机理分析中，基于理想情况下进行了结构机理分析。然而，在实际应用中，随着绳索受到拉力的增加，绳索会发生一定程度的弹性形变。因此，在建模过程中，必须考虑到绳索的形变情况。由式(2-2)可知绳索上的拉力为 F_s ，在重力平衡机构运动时，绳索在拉力作用下发生形变，绳索形变一定程度上会影响到弹簧的压缩量，这种情况需要考虑绳索的形变对弹簧的影响。

已知线盘半径 r ，若忽略绳索的弹性形变，则理论上绳索的张力即弹簧的压缩量或者是线盘的收缩量有：

$$F'_s = k \frac{\pi r \theta}{180^\circ} \quad (3-3)$$

若考虑绳索的弹性形变，则实际上弹簧的压缩量为绳索收缩量减去绳索的弹性，于是实际绳索张力为

$$F'_s = k \left(\frac{\pi r \theta}{180^\circ} - \Delta L \right) \quad (3-4)$$

由于绳索的形变量与拉力有关，由式(3-1)可知绳索弹性形变量与单位形变量之间的关系，为了便于计算研究假设绳索的形变量为受到张力 F'_s ，因此可以得到绳索的弹性形变量 ΔL 为

$$\Delta L = \frac{F'_s}{AE} = \frac{\pi r \theta k}{AE 180^\circ} \quad (3-5)$$

从而可以推导出张力 F_z ：

$$F_z = k \left(\frac{\pi r \theta}{180^\circ} - k \frac{\pi r \theta}{180^\circ AE} \right) = \frac{\pi r \theta}{180^\circ} \left(k - \frac{k^2}{AE} \right) \quad (3-6)$$

于是式子(2-9)写为：

$$\begin{cases} F_n = \left[\frac{2\pi r \theta}{360^\circ} \left(k - \frac{k^2}{AE} \right) \right] \sqrt{2 + 2 \cos(\arcsin \frac{2r_1}{h_1} + \arcsin(\frac{r_1}{h - \frac{\pi r \theta}{360^\circ} (1 - \frac{k}{AE}) - s_0}))} \\ F_m = \left[\frac{2\pi r \theta}{360^\circ} \left(k - \frac{k^2}{AE} \right) \right] \sqrt{2 + 2 \cos(\arcsin \frac{2r_1}{h_1} + \arcsin \frac{r_1 + r}{\sqrt{h_2^2 + h_3^2 + 2h_2 h_3 \cos \theta}})} \end{cases} \quad (3-7)$$

从而可以得到新的平衡公式：

$$mgl_c \sin \theta - F_n (h_2 + h_3) + F_m h_2 - \frac{dr F_z}{D} = 0 \quad (3-8)$$

3.3 灵巧臂重力平衡机构动力学模型建立

3.3.1 灵巧臂动力学分析

机械臂的动力学模型描述了机械臂在运动过程中所受到的力和力矩之间的关系。下面将通过分析未平衡的灵巧臂与有重力平衡灵巧臂之间的动力学性能差异来探讨重力平衡机构对机械臂动力学性能的影响。如图 3-1 是为 6 自由度协作机器人的关节杆件简图。

图 3-1 中，关节 A、C、F 通过自身机械结构的平衡可以抵消所受的倾覆力矩作用。在关节平衡时，不必考虑关节 A，因为它不会对电机转动产生额外的力和力矩影响。关节 B 在进行关节运动时承担了整体大部分的重量，因此将关节 B 作为主要的研究对象，因此均不考虑其关节的重力平衡，将 F 关节简化成为机械臂末端。

30

其中，杆件 1 长度、杆件 2 和杆件 3 长度分别用 l_1 、 l_2 和 l_3 表示。杆件 1 质心位置、杆件 2 质心位置和杆件 3 质心位置分别用 l_{c1} 、 l_{c2} 和 l_{c3} 表示。杆件 1、杆件 2 和杆件 3 对质心转动惯量分别用 I'_1 、 I'_2 和 I'_3 表示。B 关节电机转矩、C 关节电机转矩和 E 关节电机转矩分别用 τ_1 、 τ_2 和 τ_3 表示。杆件 1 与 Y 轴的夹角用 θ_1 表示，杆件 1 的延长线与杆件 2 之间的夹角用 θ_2 表示，杆件 2 的延长线与杆件 3 之间用 θ_3 表示。杆 1 对关节 B 转动惯量用 I_1 、杆 2 对关节 C 转动惯量用 I_2 、杆 3 对关节 E 转动惯量用 I_3 表示。

表 3-1 三关节杆件参数表

标号	名称	参数
l_1	杆 1 长度	102mm
l_2	杆 2 长度	256mm
l_3	杆 3 长度	210mm
θ_1	杆 1 与竖直夹角	$\pm 130^\circ$
θ_2	杆 2 与竖直夹角	$\pm 135^\circ$
θ_3	杆 3 与竖直夹角	$\pm 128^\circ$
l_{c1}	杆 1 质心位置	51mm
l_{c2}	杆 2 质心位置	128mm
l_{c3}	杆 3 质心位置	105mm

杆 1 的质心坐标 (x_1, y_1) 、杆 2 质心坐标 (x_2, y_2) 和杆 3 的质心坐标 (x_3, y_3) 为：

$$\begin{cases} x_1 = l_{c1} \sin \theta_1 \\ y_1 = l_{c1} \cos \theta_1 \end{cases} \quad (3-9)$$

$$\begin{cases} x_2 = l_1 \sin \theta_1 + l_{c2} \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ y_2 = l_1 \cos \theta_1 + l_{c2} \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{cases} \quad (3-10)$$

$$\begin{cases} x_3 = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_{c3} \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ y_3 = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_{c3} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \end{cases} \quad (3-11)$$

通过对式 (3-9)、(3-10)、(3-11) 分别进行求导，可得各个杆件质心运动速度为：

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = l_{c1} \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 \\ \dot{y}_1 = -l_{c1} \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 \\ v_1^2 = \dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2 = l_{c1}^2 \dot{\theta}_1^2 \end{cases} \quad (3-12)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = l_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 + l_{c2} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ \dot{y}_2 = l_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 + l_{c2} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ v_2^2 = \dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2 = (l_1^2 + l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2} \cos \theta_2) \dot{\theta}_1^2 + l_{c2}^2 \dot{\theta}_2^2 + (2l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2}) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \end{cases} \quad (3-13)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_3 = l_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 + l_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_{c3} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ \dot{y}_3 = l_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 + l_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_{c3} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ v_3^2 = \dot{x}_3^2 + \dot{y}_3^2 = l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + l_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + l_{c3}^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2 + 2l_1 l_2 \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos \theta_2 \\ + 2l_1 l_{c3} \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \cos(\theta_2 + \theta_3) + 2l_2 l_{c3} (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \cos \theta_3 \end{cases} \quad (3-14)$$

得到杆件 1、2 和 3 的速度后，可得：

$$\begin{cases} E_{k1} = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} I_1' \dot{\theta}_1^2 \\ E_{k2} = \frac{1}{2} m_2 v_2^2 + \frac{1}{2} I_2' \dot{\theta}_2^2 \\ E_{k3} = \frac{1}{2} m_3 v_3^2 + \frac{1}{2} I_3' \dot{\theta}_3^2 \end{cases} \quad (3-15)$$

其中，动能包括质心运动产生的动能和两杆质心转动所生的动能，转动惯量转换关系为： $I_1 = I_1' + m_1 l_{c1}^2$ 、 $I_2 = I_2' + m_2 l_{c2}^2$ 和 $I_3 = I_3' + m_3 l_{c3}^2$ 。由式子 (3-12)、(3-13)、(3-14)、(3-15) 可得三关节杆件的动能分别为

$$\begin{cases} E_{k1} = \frac{1}{2} m_1 l_{c1}^2 \dot{\theta}_1^2 \\ E_{k2} = \frac{1}{2} m_2 \left[(l_1^2 + l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2} \cos \theta_2) \dot{\theta}_1^2 + l_{c2}^2 \dot{\theta}_2^2 + (2l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2} \cos \theta_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \right] \\ = \frac{1}{2} m_2 (l_1^2 + l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2} \cos \theta_2) + \frac{1}{2} m_2 l_{c2}^2 \dot{\theta}_2^2 + (2m_2 l_{c2}^2 + 2m_2 l_1 l_{c2} \cos \theta_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ E_{k3} = \frac{1}{2} m_3 \left[l_1^2 + l_2^2 + l_{c3}^2 + 2l_1 l_{c2} \cos \theta_2 + 2l_1 l_{c3} \cos(\theta_2 + \theta_3) \right] \dot{\theta}_1^2 + (l_2^2 + l_{c3}^2 + l_2 l_{c3} \cos \theta_3) \dot{\theta}_2^2 \\ + (l_{c3}^2 + l_2 l_{c3} \cos \theta_3) \dot{\theta}_3^2 + \left[2l_2^2 + 2l_{c3}^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta_2 + 2l_1 l_{c3} \cos(\theta_2 + \theta_3) \right] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ + \left[2l_{c3}^2 + 4l_1 l_{c3} \cos(\theta_2 + \theta_3) \right] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + 4l_2 l_{c3} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 \cos \theta_3 \end{cases} \quad (3-16)$$

由 (3-16) 可得总动能 K 为

$$\begin{aligned}
 K = E_{k1} + E_{k2} + E_{k3} = & \frac{1}{2} \left[I_1 + I_2 + I_3 + m_3 l_1^2 + m_3 l_2^2 + m_2 l_1^2 + 2m_2 l_1 l_{c2} \cos \theta_2 + 2m_3 l_1 l_{c2} \cos \theta_2 \right] \dot{\theta}_1^2 \\
 & + \frac{1}{2} (I_3 + I_2 m_3 l_2^2 + m_3 l_2 l_{c3} \cos \theta_3) \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} (I_3 + m_3 l_2 l_{c3} \cos \theta_3) \dot{\theta}_3^2 \\
 & + \frac{1}{2} [2m_3 l_2^2 + 2m_3 l_{c3}^2 + 2m_3 l_1 l_2 \cos \theta_2 + 2m_3 l_1 l_{c3} \cos(\theta_2 + \theta_3) + (2l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2} \cos \theta_2) m_2] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\
 & + \frac{1}{2} [2m_3 l_{c3}^2 + 4m_3 l_1 l_{c3} \cos(\theta_2 + \theta_3)] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + 2m_3 l_2 l_{c3} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 \cos \theta_3
 \end{aligned} \quad (3-17)$$

其中三关节杆件的重力势能分别为

$$\begin{cases} E_{P1} = m_1 g l_{c1} \sin \theta_1 \\ E_{P2} = m_2 g (l_1 \sin \theta_1 + l_{c2} \sin(\theta_1 + \theta_2)) \\ E_{P3} = m_3 g (l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 + l_{c3} \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)) \end{cases} \quad (3-18)$$

从而得到三关节杆件的总势能:

$$\begin{aligned}
 P = E_{P1} + E_{P2} + E_{P3} = & m_1 g l_{c1} \sin \theta_1 + m_2 g (l_1 \sin \theta_1 + l_{c2} \sin(\theta_1 + \theta_2)) \\
 & + m_3 g (l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 + l_{c3} \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3))
 \end{aligned} \quad (3-19)$$

结合 (3-18) 和 (3-19)，得到三关节杆件的拉格朗日函数为:

$$L = K - P \quad (3-20)$$

进而得到三关节杆件拉格朗日方程为

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial L}{\partial \theta} = \tau \quad (3-21)$$

其中

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_1} = m_1 g l_{c1} \sin \theta_1 + m_2 g (l_1 \sin \theta_1 + l_{c2} \sin(\theta_1 + \theta_2)) + m_3 g (l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 + l_{c3} \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)) \quad (3-22)$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} = & [I_1 + I_2 + I_3 + m_3 l_1^2 + m_3 l_2^2 + m_2 l_1^2 + 2m_2 l_1 l_{c2} \cos \theta_2 + 2m_3 l_1 l_{c2} \cos \theta_2 + 2m_3 l_1 l_{c3} \cos(\theta_2 + \theta_3)] \dot{\theta}_1 \\
 & + (m_3 l_2^2 + m_3 l_{c3}^2 + m_3 l_1 l_2 \cos \theta_2 + m_3 l_1 l_{c3} \cos(\theta_2 + \theta_3) + (l_{c2}^2 + l_1 l_{c2} \cos \theta_2) m_2) \dot{\theta}_2 + [I_3 + 2m_3 l_1 l_{c3} \cos(\theta_2 + \theta_3)] \dot{\theta}_3
 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_2} = -[m_2 l_1 l_{c2} \sin \theta_2 + m_3 l_1 l_{c2} \sin \theta_2 + m_3 l_1 l_{c3} \sin(\theta_2 + \theta_3)] \dot{\theta}_1^2 \quad (3-23)$$

$$- [m_3 l_1 l_2 \sin \theta_2 + m_3 l_1 l_{c3} \sin(\theta_2 + \theta_3) + l_1 l_{c2} \sin \theta_2 m_2] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - 2m_3 l_1 l_{c3} \sin(\theta_2 + \theta_3)$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} = & (I_3 + I_2 m_3 l_2^2 + m_3 l_2 l_{c3} \cos \theta_3) \dot{\theta}_2 + [m_3 l_2^2 + m_3 l_{c3}^2 + m_3 l_1 l_2 \cos \theta_2 + m_3 l_1 l_{c3} \cos(\theta_2 + \theta_3) + (l_{c2}^2 + l_1 l_{c2} \cos \theta_2) m_2] \dot{\theta}_1 \\
 & + 2m_3 l_2 l_{c3} \dot{\theta}_3 \cos \theta_3
 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_3} = - \left[\frac{1}{2} m_3 l_2 l_{c3} \sin \theta_3 + \frac{1}{2} m_3 l_2 l_{c3} \sin \theta_3 \dot{\theta}_3^2 + 2m_3 l_1 l_{c3} \sin(\theta_2 + \theta_3) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + 2m_3 l_2 l_{c3} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 \sin \theta_3 \right] \quad (3-24)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_3} = (I_3 + m_3 l_2 l_{c3} \cos \theta_3) \dot{\theta}_3 + [m_3 l_{c3}^2 + 2m_3 l_1 l_{c3} \cos(\theta_2 + \theta_3)] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + 2m_3 l_2 l_{c3} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 \cos \theta_3$$

通过将 (3-16) 和 (3-17) 代入 (3-18)，整理得到三关节杆件的电机转矩:

$$\begin{aligned}
 \tau_1 = & \left[I_1 + I_2 + I_3 + m_3 l_1^2 + m_3 l_2^2 + m_2 l_1^2 + 2m_2 l_1 l_{c2} \cos \theta_2 + 2m_3 l_1 l_{c2} \cos \theta_2 + 2m_3 l_1 l_{c3} \cos(\theta_2 + \theta_3) \right] \ddot{\theta}_1 \\
 & + \left(m_3 l_2^2 + m_3 l_{c3}^2 + m_3 l_1 l_2 \cos \theta_2 + m_3 l_1 l_{c3} \cos(\theta_2 + \theta_3) + (l_{c2}^2 + l_1 l_{c2} \cos \theta_2) m_2 \right) \ddot{\theta}_2 \\
 & + \left[I_3 + 2m_3 l_1 l_{c3} \cos(\theta_2 + \theta_3) \right] \ddot{\theta}_3 \\
 & - 2m_2 l_1 l_{c2} \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - 2m_3 l_1 l_{c2} \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - m_3 l_1 l_2 \sin \theta_2 \dot{\theta}_2^2 \\
 & + m_1 g l_{c1} \sin \theta_1 + m_2 g (l_1 \sin \theta_1 + l_{c2} \sin(\theta_1 + \theta_2)) + m_3 g (l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 + l_{c3} \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3))
 \end{aligned} \tag{3-25}$$

$$\begin{aligned}
 \tau_2 = & (I_3 + I_2 m_3 l_2^2 + m_3 l_2 l_{c3} \cos \theta_3) \ddot{\theta}_2 + \\
 & \left[m_3 l_2^2 + m_3 l_{c3}^2 + m_3 l_1 l_2 \cos \theta_2 + m_3 l_1 l_{c3} \cos(\theta_2 + \theta_3) + (l_{c2}^2 + l_1 l_{c2} \cos \theta_2) m_2 \right] \ddot{\theta}_1 \\
 & + 2m_3 l_2 l_{c3} \ddot{\theta}_3 \cos \theta_3 - m_3 l_2 l_{c3} \sin \theta_3 \dot{\theta}_2 \\
 & - \left[m_2 l_1 l_{c2} \cos \theta_2 + m_3 l_1 l_2 \sin \theta_2 + m_3 l_1 l_{c3} \sin(\theta_2 + \theta_3) (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \right] \dot{\theta}_1 - 2m_3 l_2 l_{c3} \dot{\theta}_3^2 \sin \theta_3
 \end{aligned} \tag{3-26}$$

$$\begin{aligned}
 \tau_3 = & (I_3 + m_3 l_2 l_{c3} \cos \theta_3) \ddot{\theta}_3 + \left[m_3 l_{c3}^2 + 2m_3 l_1 l_{c3} \cos(\theta_2 + \theta_3) \right] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 \\
 & - 2m_3 l_2 l_{c3} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3^2 \sin \theta_3 - 2m_3 l_1 l_{c3} \sin(\theta_2 + \theta_3) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)
 \end{aligned} \tag{3-27}$$

为了便于系统性能的研究分析，将运动方程简化为矩阵形式：

$$\mathbf{M}(\theta) \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \mathbf{C}(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \mathbf{G}(\theta) = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \tag{3-28}$$

$$\mathbf{M}(\theta) = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{11} & \mathbf{M}_{12} & \mathbf{M}_{13} \\ \mathbf{M}_{21} & \mathbf{M}_{22} & \mathbf{M}_{23} \\ \mathbf{M}_{31} & \mathbf{M}_{32} & \mathbf{M}_{33} \end{bmatrix} \tag{3-29}$$

其中各项元素分别为：

$$\begin{cases} \mathbf{M}_{11} = I_1 + I_2 + I_3 + m_3 l_1^2 + m_3 l_2^2 + m_2 l_1^2 + 2m_2 l_1 l_{c2} \cos \theta_2 + 2m_3 l_1 l_{c2} \cos \theta_2 + 2m_3 l_1 l_{c3} \cos(\theta_2 + \theta_3) \\ \mathbf{M}_{12} = 2m_3 l_2^2 + 2m_3 l_{c3}^2 + 2m_3 l_1 l_2 \cos \theta_2 + 2m_3 l_1 l_{c3} \cos(\theta_2 + \theta_3) + (2l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2} \cos \theta_2) m_2 \\ \mathbf{M}_{13} = 2m_3 l_{c3}^2 + 4m_3 l_1 l_{c3} \cos(\theta_2 + \theta_3) \\ \mathbf{M}_{21} = 2m_3 l_2^2 + 2m_3 l_{c3}^2 + 2m_3 l_1 l_2 \cos \theta_2 + 2m_3 l_1 l_{c3} \cos(\theta_2 + \theta_3) + (2l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2} \cos \theta_2) m_2 \\ \mathbf{M}_{22} = I_3 + I_2 m_3 l_2^2 + m_3 l_2 l_{c3} \cos \theta_3 \\ \mathbf{M}_{23} = 2m_3 l_2 l_{c3} \cos \theta_3 \\ \mathbf{M}_{31} = m_3 l_{c3}^2 + 2m_3 l_1 l_{c3} \cos(\theta_2 + \theta_3) \\ \mathbf{M}_{32} = 2m_3 l_2 l_{c3} \cos \theta_3 \\ \mathbf{M}_{33} = I_3 + m_3 l_2 l_{c3} \cos \theta_3 \end{cases} \tag{3-30}$$

其中，惯性矩阵为：

$$\mathbf{C}(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{11} & \mathbf{C}_{12} & \mathbf{C}_{13} \\ \mathbf{C}_{21} & \mathbf{C}_{22} & \mathbf{C}_{23} \\ \mathbf{C}_{31} & \mathbf{C}_{32} & \mathbf{C}_{33} \end{bmatrix} \tag{3-31}$$

其中各项元素分别为：

$$\begin{cases} C_{11} = -2[l_1 l_{c2} \dot{\theta}_1 (m_2 + m_3) \sin \theta_2 + m_3 l_1 l_{c3} \dot{\theta}_1 \sin(\theta_2 + \theta_3)] \\ C_{12} = -m_3 l_1 l_2 \sin \theta_2 \dot{\theta}_2 - 2m_3 l_1 l_{c3} \dot{\theta}_2 \sin(\theta_2 + \theta_3) - 2m_2 l_1 l_{c2} \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \\ C_{13} = -4m_3 l_1 l_{c3} \sin(\theta_2 + \theta_3) \dot{\theta}_3 \\ C_{21} = -m_3 l_1 l_2 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 - 2m_3 l_1 l_{c3} \dot{\theta}_1 \sin(\theta_2 + \theta_3) + 2m_2 l_1 l_{c2} \dot{\theta}_1 \sin \theta_2 \\ C_{22} = -m_3 l_2 l_{c3} \dot{\theta}_2 \sin \theta_3 \\ C_{23} = -2m_3 l_2 l_{c3} \dot{\theta}_3 \sin \theta_3 \\ C_{31} = -2m_3 l_1 l_{c3} \dot{\theta}_1 \sin(\theta_2 + \theta_3) \\ C_{32} = -2m_3 l_2 l_{c3} \dot{\theta}_2 \sin \theta_3 \\ C_{33} = -m_3 l_2 l_{c3} \dot{\theta}_3 \sin \theta_3 \end{cases} \quad (3-32)$$

重力项矩阵为:

$$G(\theta) = \begin{bmatrix} m_1 g l_{c1} \cos \theta_1 + m_2 g (l_1 \cos \theta_1 + l_{c2} \cos(\theta_1 + \theta_2)) + m_3 g (l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 + l_{c3} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)) \\ m_2 g (l_1 \cos \theta_1 + l_{c2} \cos(\theta_1 + \theta_2)) + m_3 g (l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 + l_{c3} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)) \\ m_3 g (l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 + l_{c3} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)) \end{bmatrix} \quad (3-33)$$

综上所述, 通过分析三关节杆件动力学表明, 杆件的重力力矩直接影响关节电机的转矩。通过重力平衡机构抵消杆件的重重力力矩, 可以减小电机转矩, 从而提高机器人系统性能。

3.3.2 重力平衡灵巧臂动力学分析

重力平衡机构是指通过在所需补偿关节, 安装同步带轮带动滑轮转动, 收缩绳索拉动滑轨上的滑块压缩弹簧, 从而产生与关节 B 转动相反的扭矩。如图 3-3 所示的重力平衡机构三关节模型, 研究其动力学特性, 弹簧刚度用 k 表示。

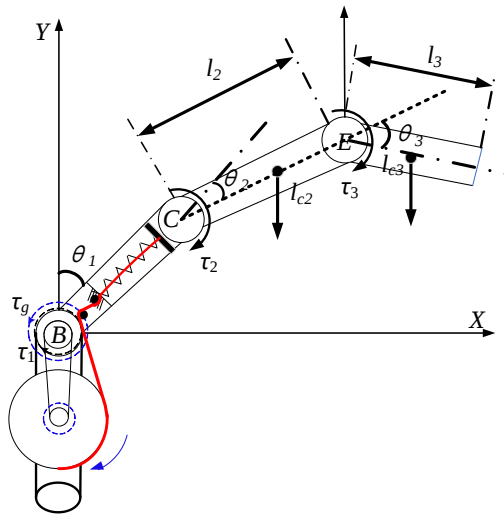


图 3-3 重力平衡机构三关节杆件简图

在加入重力平衡机构后，机械臂的质心位置与未添加平衡机构时保持一致，并且灵巧臂的动能并未增加。然而，随着重力平衡机构的引入，势能发生了变化，需要考虑弹簧的弹性势能和绳索的弹性模量。由式(3-4)可以得到绳索的弹性形变量 $\Delta L = \frac{\pi r \theta k}{AE180^\circ}$ ，由此可以得到弹簧的弹性势能：

$$E_{pk1} = \frac{1}{2} k \left(\frac{\theta_1 n \pi r}{180^\circ} - \Delta L \right)^2 \quad (3-34)$$

绳索的弹性系数通常是根椐材料的弹性特性和几何形状来确定的。对于绳索的弹性系数，一般需要考虑到两个方面：一般使用杨氏模量（Young's modulus）来描述，杨氏模量表示了单位面积内材料受力时的应变（形变）与受力之间的关系。对于绳索材料，通常采用其纵向（拉伸方向）的杨氏模量。另一个需要考虑的因素是绳索的截面面积。截面面积表示绳索截面的横截面积，它直接影响了受力面积，从而影响了绳索的弹性特性。因此绳索的弹性模量 k_s 可以通过以下公式计算：

$$k_s = \frac{EA}{L} \quad (3-35)$$

其中 E 是弹性模量； A 是绳索截面面积； L 是绳索的初始长度，由此可以得出绳索的弹性势能为：

$$E_{pk2} = \frac{1}{2} k_s \Delta L^2 \quad (3-36)$$

重力平衡机构机械臂的总势能为

$$\begin{aligned} E = & m_1 g l_{c1} \sin \theta_1 + m_2 g (l_1 \sin \theta_1 + l_{c2} \sin(\theta_1 + \theta_2)) \\ & + m_3 g (l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 + l_{c3} \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)) + \frac{1}{2} k \left(\frac{\theta_1 n \pi r}{180^\circ} - \Delta L \right)^2 + \frac{1}{2} k_s \Delta L^2 \end{aligned} \quad (3-37)$$

基于重力平衡机构的三关节机械臂列出拉格朗日函数，并通过拉格朗日函数得到三关节拉格朗日运动方程，将运动方程简化为与式(3-28)相同的格式：

$$M(\theta) \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} + C(\theta, \dot{\theta}) \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} + G(\theta) - \tau_s(\theta) = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \quad (3-38)$$

其中，重力平衡机构三关节机械臂与未平衡三关节机械臂动力学方程的惯性力项矩阵 $M(\theta)$ 、科式力与向心力项矩阵 $C(\theta, \dot{\theta})$ 、重力项矩阵 $G(\theta)$ 矩阵相同。其中弹性项矩阵为：

$$\tau_s(\theta) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}k\left(\frac{\theta_1 n \pi r}{180^\circ} - \Delta L\right)^2 + \frac{1}{2}k_s \Delta L^2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-39)$$

由此可得，弹簧刚度 k 、绳索弹性模量 E 、大臂转动角度 θ 各项参数的函数为：

$$\tau_s(\theta) = f(k, E, \theta_1) \quad (3-40)$$

通过选择合适的弹性刚度和模量，可平衡灵巧臂运动方程中的重力力矩，从而减少灵巧臂的关节扭矩，提升灵巧臂的负载能力，降低作业能耗。

3.3.3 参数验证

根据 3.2.2 节中对重力平衡机构三关节进行动力学建模，在本节中通过 MATLAB 计算模型可以得到仿真结果，具体代码见附录 3。

表 3-2 系统仿真基本参数表

参数	数值	参数	数值
关节质量(kg) m	5.0	重力加速度 $g(m/s^2)$	10.0
关节质心与关节的距离 $l_c(m)$	0.305	滑轮与关节 2 的距离 $h_2(m)$	0.63
关节 2 与线盘的距离 $h_3(m)$	0.7	滑轮半径 $r_1(m)$	0.02
滑块与滑轮之间的距离 $h(m)$	0.111	线盘半径 $r(m)$	0.3
滑轮间距 $h_1(m)$	0.008	绳索线径 $r_2(m)$	0.004
弹簧弹性系数 $k(N \cdot m)$	50	绳索弹性模量 $E(Pa)$	1350
弹簧初始压缩量 $s_0(m)$	0.004	同步带轮比值	2

为验证理论模型的正确性，将表 3-2 所示的基本参数带入 MATLAB 程序，可以得出灵巧臂重力平衡机构关节力矩随关节转动角度变化响应曲线如图 3-4 所示。

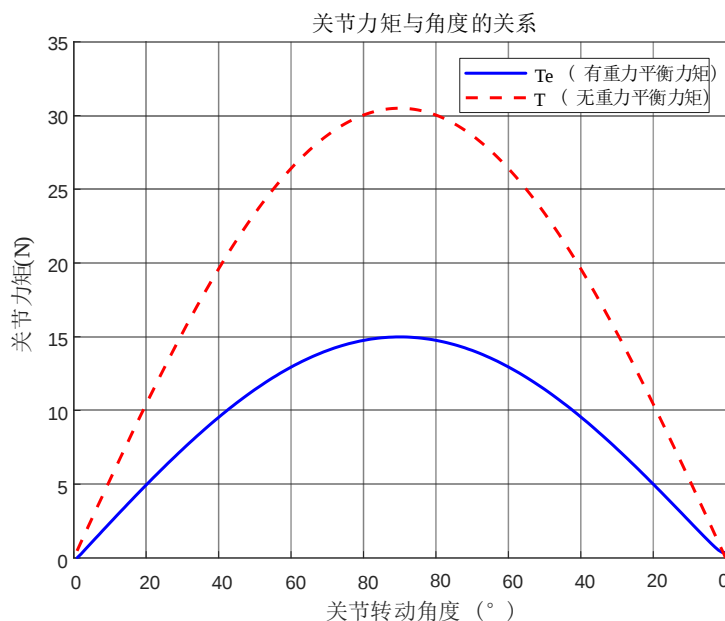


图 3-4 MATLAB 仿真计算图

从图 3-4 分析得出有重力平衡机构的机械臂关节力矩要低于无重力平衡机构的，具体动力学性能如表 3-3 所示

表 3-3 机械臂重力平衡机构实验数据分析

参数	无重力平衡机构	有重力平衡机构	优化量
关节扭矩峰值 (N · m)	30.43	14.97	49.19%

通过增设重力平衡机构得到的关节 2 扭矩峰值减小了 49.19%，从关节 2 扭矩峰值优化量和不平衡力矩波动优化量的兼容性考虑，论文提出重力平衡机构达到了平衡重力力矩的作用，也验证了上文重力平衡机构三关节动力学建模的正确性。

3.4 本章小结

本章主要围绕灵巧臂重力平衡机构的运动学及动力学分析展开。首先，针对重力平衡机构运动学模型进行建立，包括对于一些问题的基本假设与参数定义。接着，建立了灵巧臂的动力学模型，比较了未平衡三关节机械臂和安装了重力平衡机构的三关节动力学的差异，揭示了添加弹簧对机器人动力学性能的改善效果，以及调整不同参数对重力平衡效果的影响。随后，利用拉格朗日能

力法推导出了总势能和总动能，最后将动力学模型在 MATLAB 中进行计算，验证了动力学模型的正确性，为后续章节对关键特性参数的优化提供了基础。

第 4 章 灵巧臂重力平衡机构特性参数优化研究

4.1 引言

机构优化是实现灵巧臂关节重力力矩平衡的关键。本章对第三章得到的函数中的各项参数作为改进目标，构建了一个多目标优化模型。考虑到该优化设计问题是一个多目标问题，现有的多目标优化算法各有其优缺点。在本章中，我们针对传统的非支配排序遗传算法存在的两个缺陷进行了改进，以提高算法的收敛速度和寻优能力，并对改进前后算法的特性参数进行了协调优化结果的分析。通过计算对比，确定了最终的优质解集分布，为后续章节中的仿真和实物实验验证奠定了基础。

4.2 重力平衡机构特性参数优化

4.2.1 优化目标分析与函数建立

以睿尔曼 RM65-B 型机械臂为实例进行重力平衡机构的优化设计方法，结构简图如图 4-1 所示，

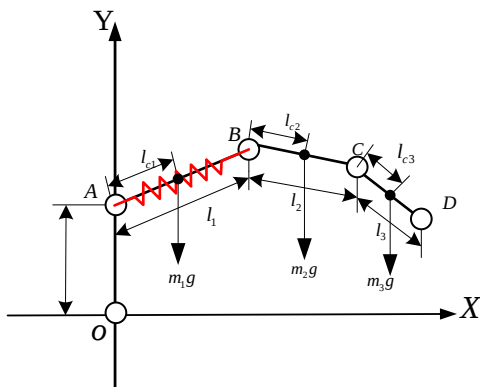


图 4-1 重力平衡灵巧臂结构简图

设计重力平衡机构的目的在于平衡机械臂关节所受重力产生的重力矩，从而降低机械臂关节电机的负荷。为了提高重力平衡机构的表现能力，采用算法计算得到最佳设计参数。这一步骤能够最大程度地减小关节的不平衡力矩，同时降低关节电机电流的波动，从而提高灵巧臂的负载能力，降低关节能耗。

因此，在第三章中对绳索进行建模并引入弹性模量 E 的概念(3-7)可以得出未补偿和补偿转矩(T_e , T_{es})表示为

$$T_e = f_e(\theta) = mgl_c \sin \theta - F_n(h_2 + h_3) + F_m h_2 - \frac{drF_z}{D} \quad (4-1)$$

$$T_{es} = f_{es}(\theta, c) = \frac{drF_z}{D} + F_n(h_2 + h_3) - F_m h_2 \quad (4-2)$$

其中 f_e 和 f_{es} 分别表示与未补偿扭矩和补偿扭矩相关联的参数的函数； θ 为旋转连杆的关节角度； $c = (c_1, c_1, \dots, c_n)$ 重力补偿器的变量向量，其中 n 是变量的数量。注意，可变设计矢量 c 影响补偿扭矩 T_{es} 。

设 t 表示在关节角度范围内($\theta_{\min}$, $\theta_{\max}$)，最大补偿扭矩与最大的未补偿扭矩的比值。根据等式(4-1)和(4-2)，扭矩减小比 η_t 公式为

$$\eta_t(\theta, c)|_{(\theta_{\min}, \theta_{\max})} = \frac{\max \{ f_{es}(\theta, c)|_{(\theta_{\min}, \theta_{\max})} \}}{\max \{ f_e(\theta)|_{(\theta_{\min}, \theta_{\max})} \}} \quad (4-3)$$

当且仅当补偿的扭矩 T_{es} 对于任何关节角 $\theta = (\theta_{\min}, \theta_{\max})$ 为零时，可以实现完美的重力补偿（当重力扭矩完全抵消时）。

通过比较方程(4-3)在完全重力补偿的情况下，扭矩减小比 η_t 始终等于零。因此，优化问题的第一个目标是最小化方程中的扭矩减小比 η_t 。

优化问题的第二个目标即为关节不平衡力矩波动 F_j 尽可能小

$$F_j(\theta, c) = T_{e\max} - T_{e\min} \quad (4-4)$$

对于满足重力平衡力矩所需要满足的约束条件如表 4-1 所示

表 4-1 参数约束表

设计变量	弹簧刚度系数 $k(N/m)$	绳索弹性模量 $E(pa)$
上限	110	1350
下限	30	1000

4.2.2 基于随机游走策略的 INSGA-II 算法设计

优化设计领域中，NSGA-II 通过非支配排序和拥挤度分配，能够快速收敛到 Pareto 前沿，能够快速找到全局最优解或其近似解，并且通过维护种群中的

多样性，确保了搜索过程的广度和深度，避免过早陷入局部最优解。但也存在一些缺点^[48-50]，如下所述。

问题 1：初始种群的质量会对算法的性能优化产生重要影响。

问题 2：由于使用了低效的模拟二进制交叉算法，NSGA-II的收敛速度较慢。在解决复杂问题时，它的收敛速度和寻优能力较差。恒定的遗传参数导致算法在迭代过程中移动空间较小，无法充分探索解的空间，搜索性能较差。导致 NSGA-II算法陷入局部最优解的问题。

(1) 初始化种群预处理策略

NSGA-II 的初始种群质量直接影响了算法的收敛速度。如果初始种群质量较差，可能会导致算法陷入局部最优解或需要更多的迭代次数才能找到较优解。当初始种群质量较差时，NSGA-II 可能更容易陷入局部最优解，特别是在处理复杂的多模态问题时，这可能导致算法无法找到全局最优解或者较优解。为解决 4.2.2 问题 1，改善算法的收敛速度和提高性能，提高初始种群的质量。因此，可以利用粒子群算法的全局搜索能力来初始化 NSGA-II算法的种群。粒子群算法可以帮助快速地探索整个搜索空间，为遗传算法提供一个更好的初始种群，从而加快算法的收敛速度。粒子群算法流程与原理如下图 4-2 所示。

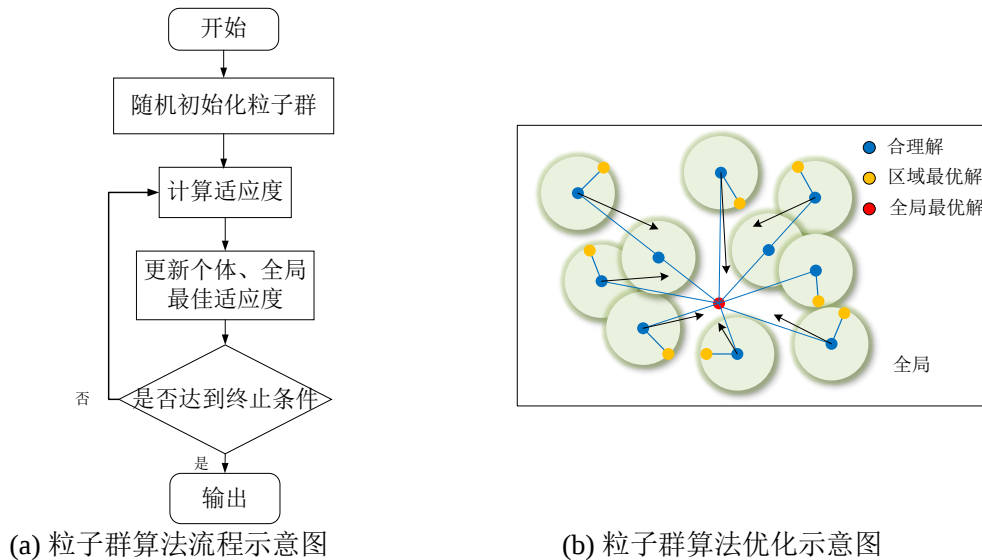


图 4-2 粒子群算法(PSO)算法原理简介

通过粒子群算法对种群进行初始化处理的优势为：NSGA-II算法在初始化种群通常是随机生成的个体集合。而结合粒子群算法(PSO)改进 NSGA-II算法时，可以利用 PSO 的全局搜索特性来更智能地初始化种群。使用粒子群算法的思想

来初始化一部分种群。PSO 中的每个粒子都代表一个潜在解，其位置表示解的位置，速度表示搜索的方向。通过在问题空间中随机生成一定数量的粒子，可以形成 PSO 的初始群体。将 PSO 初始化得到的粒子和 NSGA-II 算法初始化得到的个体合并成完整的种群。这个种群将作为算法的起始点，开始进行迭代搜索。对整个初始化的种群进行适应度评估。根据问题的优化目标，计算每个个体的适应度值，这可以通过将个体的解代入问题的目标函数中来实现。通过结合 PSO 和 NSGA-II 的初始化策略，可以更有效地找到问题的优秀解，可以帮助 NSGA-II 算法更快地找到一组较好的初始解，并加速优化过程的收敛速度。

(2) 局部搜索的随机游走策略

针对问题 2，研究者们提出了改进交叉算子、自适应参数调整^[54-59]，但自适应参数调整可能会引入新的问题，如参数震荡、过早收敛等。在某些情况下，它可能会导致算法更加敏感或不稳定，甚至可能使算法性能变得更差。因此研究如何提高算法性能是一个关键问题。通过使用自适应加权因子来平衡全局搜索和局部搜索能力，以加快收敛速度，同时通过随机游走策略增加局部搜索能力。具体改进如下。

采用混合变异和交叉的随机游走策略可增加种群多样性，防止陷入局部最优解，提升算法的局部搜索能力，并加速寻找最优解的速度。更新位置的随机行走公式：

$$x'_i(t) = x_i(t) \mathcal{G}(x'_j(t) - x_k(t)) \quad (4-5)$$

其中 $x_j(t)$ 和 $x_k(t)$ 是第 t 代中的两个随机解， $\mathcal{G}$ 是比例因子， $\mathcal{G} \in (0,1)$ 。

为了克服 NSGA-II 算法收敛缓慢和陷入局部最优^[75]的缺点，使用自适应加权因子^[76]来平衡全局搜索和局部搜索能力，以加快收敛速度。随机游动可以将搜索集中在空间中更容易出现最优解的位置，并使算法收敛到最优解。

在优化的早期阶段，个体应广泛分布于整个搜索空间，而在后期则收敛于全局最优。因此，在本研究中设计了一个自适应加权因子 C ，以平衡算法的前全局探索和后局部开发能力。

在迭代过程中， C 的值从 1 降低到 0.02。随着迭代次数的增加，算法逐渐从全局搜索切换到局部精确搜索，以提高整体收敛精度，计算如下：

$$C = 1 - G \left(\frac{0.98}{\text{Max}(G)} \right) \quad (4-6)$$

其中 G 是当前迭代次数， $\text{Max}(G)$ 是最大迭代次数。两个目标函数的最大迭代次数被设置为 200。(变量更换)

迭代中的后代种群个体由以下公式生成：

$$X(t+1) = C(X_t + \sigma \otimes \text{Levy}(\kappa)) \quad (4-7)$$

$$X(t+1) = (1-C)(X_t + \sigma \otimes \text{Guass}(\kappa)) \quad (4-8)$$

本文中的自适应权重因子 C 被认为是在权衡收敛速度和精度的平衡，同时也保证了该算法在后期的全局搜索迭代中具备一定的择优能力。直观的算法流程如图 4-3 所示。

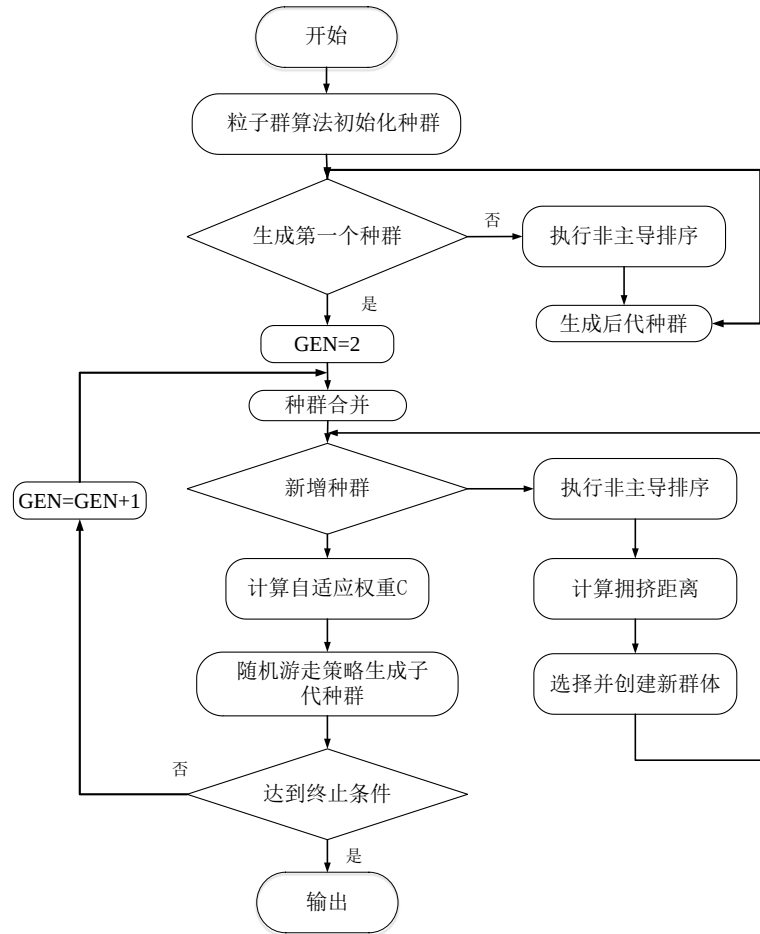


图 4-3 INSGA-II算法流程图

下式(4-9)是种群 G 和种群 F 之间种群距离 D 的计算方法^[77]:

$$D = \sum_{PG_g \in \Omega_G^{pos}} \text{sum} \left(\sum_{PF_f \in \Omega_F^{pos}} \min(ED(PF_g, PF_f)) \right) / NCH_G \quad (4-9)$$

其中 Ω 是具有 1 的非支配排序的群体 G 或 F 的解的集合。

G 和 F 分别是非支配排序为 1 的解。NCHG 是非显性排序为 1 的种群数量。
ED 是欧几里得距离。

当相邻代种群之间的距离小于可接受的阈值时，算法结果开始稳定。

INSGA-II 算法满足以下条件之一，则该算法收敛：

- 1、相邻世代的种群距离连续小于阈值；
- 2、迭代次数达到最大设置值。

INSGA-II 算法实现如下：

步骤 1：采用 PSO 算法筛选出均匀初始种群并设置进化代 Gen=1；

步骤 2：将亲本种群与后代种群组合以形成新的种群；

步骤 3：检查是否生成了新的父群体；如果没有，则计算新种群中个体的目标函数，并执行快速非支配排序、计算拥挤和精英策略等操作，生成新的亲本种群。如果已生成新的父群体，则转到步骤 3。

步骤 4：对生成的父种群进行自适应迭代运算，生成子种群；

步骤 5：在进化循环中的每代迭代后，对当前种群中的个体应用随机游走策略，以进一步调整其位置；

步骤 6：确定是否达到终止条件，如达到最大迭代次数或达到某个收敛条件。如果终止条件未满足，则将进化代 Gen 加 1，并返回到步骤 4。

算法程序初始化设置参数如表 4-2。

表 4-3 算法初始化变量表

符号名称	数值	符号名称	数值
种群数量 N	100	最大迭代次数 G_{max}	300
优化目标数量 M	2	优化维度 V	4
弹簧弹性系数 k	[50, 110]	绳索弹性模量 E	[1000,1350]

算法步骤的伪代码如下所示，见表 4-3。

表 4-3 INSGA-II算法伪代码步骤

基于随机游走策略的 INSGA-II算法伪代码步骤：

要求如下：定义算法参数，包括初始化种群大小 N 和最大代数 G_{max} 。最大代数

1: 设置种群代数 $Gen = 0$

2: 利用粒子群算法预筛选出大小为 N 的初代种群 P_0 并设置进化代 $Gen=1$ 。

3: 随机游走策略生成第一代子种群，使进化代 $Gen=2$

4: 将亲本种群与后代种群组合以形成新的种群；

5: if 判定是否生成新的父种群

6: 对生成的父种群进行自适应迭代运算，生成子种群

7: else

8: 对新一代种群的个体进行目标函数计算，进行快速非支配排序、拥挤度计算以及精英策略等步骤，以生成新的亲本种群。

9: end

10: if 判定 $Gen=G_{max}$

11: 返还种群 P_{i+1} 。

12: else

13: $Gen=Gen+1$ 并返回与后代种群组合以形成新的种群；

综上，主要针对传统自适应 NSGA-II算法的初始化种群质量以及局部最优的问题，提出了利用粒子群算法初始化种群以及随机游走策略提高局部搜索能力，并提供了相应的算法流程图、伪代码步骤表。具体 MATLAB 程序见附录 2。

4.3 特性参数协调优化结果与分析

4.3.1 特征分析

传统自适应 ANSGA-II算法与改进 IANSGA-II算法的 Pareto 前沿图如下。

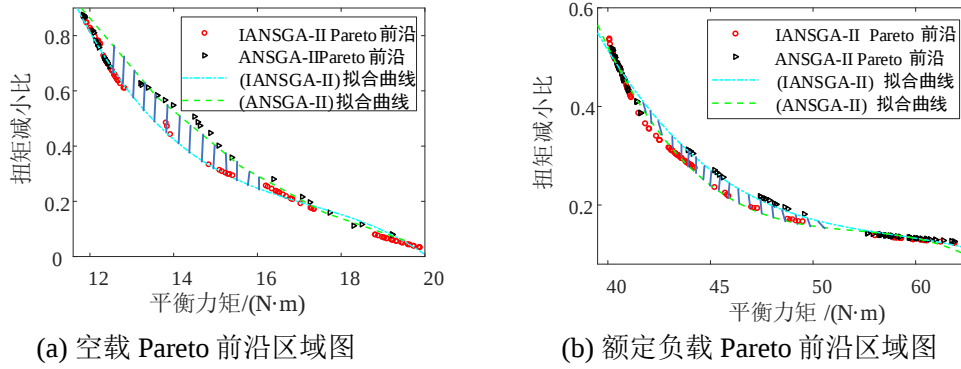


图 4-4 算法改进前后的 Pareto 前沿对比图

为了验证不同负载情况下法的优化效果，分别考虑空载和额定负载的情况下，如图 4-4(a)所示阴影部分代表了在空载工况下，算法改进前后所获得的 Pareto 前沿。其中横坐标为不平衡力矩波动，纵坐标为扭矩减小比；图 4-4(b)中的阴影区域表示的是额定负载下 Pareto 前沿的差值。通过对比可以得出空载情况下比额定负载情况下的阴影区域更大，这表明空载情况下，算法改进后的关节扭矩效果更好，在相同的旋转角度下，关节力矩平衡效果更佳，这一变化趋势可从图 4-5 中清晰展示出来。

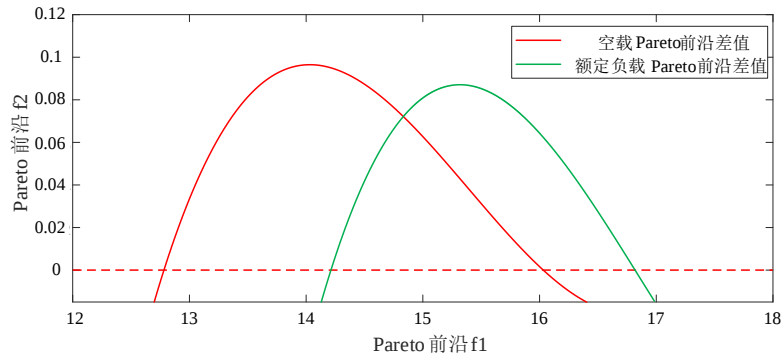


图 4-5 算法改进前后 Pareto 前沿差值

如图 4-5 所示为算法改进前后，空载情况下与额定负载情况下 Pareto 前沿差值。

从表 4-4 中可以得出：

(1) 在空载和额定负载工况下，改进算法 IANSGA-II与传统自适应 NSGA-II 算法的 Pareto 前沿线性度均在 0.99 以上，这意味着 Pareto 前沿上的点之间的关系非常接近线性关系。

(2)通过表 4-4 与图 4-5 可以得出，所提出的改进算法的 Pareto 前沿的差值更大，即 Pareto 前沿更突出，意味着这些点具有更高的目标函数值，在决策制定中更具有实际意义。

具体参数如表 4-4 所示。

表 4-4 优化算法改进前后 Pareto 前沿对比

参数	空载工况		额定负载工况	
	Pareto 前沿最大 差值	Pareto 前沿线性 度 R^2	Pareto 前沿最大 差值	Pareto 前沿线性 度 R^2
传统算法	0.0998	0.9927	0.0761	0.9931
改进算法		0.9951		0.9946

综上所述，改进后的自适应 NSGA-II算法产生的 Pareto 前沿更为凸出，这意味着在解集中，Pareto 前沿的形状更趋向于凸面，表明了更为明显的优越解集合。相较之下，传统自适应 NSGA-II算法经过迭代进化后，Pareto 前沿的分布主要聚集在两个极端，与双目标优化的原则不相符。这表明在 ANSGA-II中，可能存在着局部最优解的过度集中，而导致未能充分探索解集的其他区域。结合图 4-4(a)、图 4-4 (b)，可得出改进后的自适应 NSGA-II算法的 Pareto 前沿连续性更强，解集分布线性度更强，更适合重力平衡机构的设计要求。

4.3.2 算法最优解对比与分析

综合比较，改进算法提高了局部搜索能力，提高了解集质量。从图 4-6 中选取了三组高质量解进行比较，以便找到最佳解。

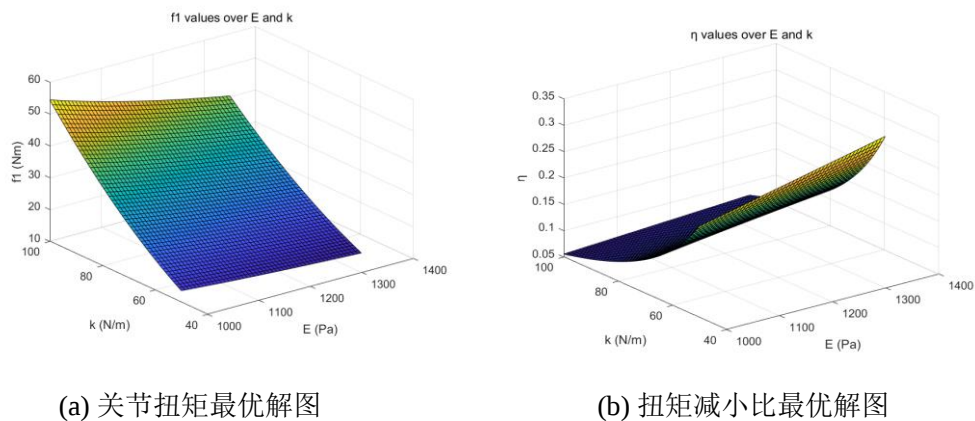


图 4-6 算法改进后最优解集图

根据综合适应度来看，组 2 的适应度最佳。因此，选择表 4-5 中的组 3 数据作为论文算法的最佳解。综合比较表明，对 NSGA-II 算法的改进在一定程度上提升了解集的质量。

表 4-5 特性参数最优解对比分析

序号 \ 参数	k	E	扭矩减小比	补偿力矩
组 1	59.1837	1171.43	0.19	18.50
组 2	71.4286	1301.46	0.23	21.37
组 3	64.08	1355.71	0.25	24.46

原始的与两种算法优化的决策变量如表 4-6 所列。

表 4-6 优化算法改进前后数据对比

参数	未优化	ANSGA-II优化	IANSGA-II优化
弹簧刚度	45.00 N/m	58.73N/m	64.08N/m
绳索弹性系数	1250Pa	1124.87Pa	1325.71Pa
扭矩减小比	0	0.11	0.25
关节不平衡力矩波动	-	9.91%	19.85%

从表 4-6 可得：

(1) 传统自适应算法(ANSGA-II)优化结果，相较于未优化的重力平衡机构，扭矩减小比提高了 0.11，关节不平衡力矩波动减小了 9.91%。

(2) 改进算法(IANSGA-II)优化效果较传统自适应算法(ANSGA-II)有所提升，相比于未优化的重力平衡机构，扭矩减小比提高了 0.25，关节不平衡力矩波动减小了 19.85%。

从关节力矩平衡效果来看，重力平衡机构更加符合改进的自适应算法的优化设计要求。总的来说，通过增设重力平衡机构，灵巧臂机器人能够有效减小关节驱动力矩，提高安全性，并实现功耗的优化。改进后的自适应 NSGA-II 算法克服了传统算法存在的局部最优和初始化种群质量较差的缺点，着重优化了重力平衡机构中的弹簧特性参数和绳索特性参数。这使得在额定负载工况下，灵巧臂关节能够同时提升负载能力并降低功耗，从而进一步增强了其性能表现。

4.4 本章小结

本章通过第 3 章的三关节杆件动力学模型，确定了需要进行优化的特性参数，并建立了以最小化关节力矩波动和最大化扭矩减小比为目标函数的优化模型。在确定了参数范围和优化设计模型的约束条件后，针对传统自适应 NSGA-II 算法在机构优化中初始种群质量较差以及容易陷入局部最优解的问题，提出了相应的初始化种群预处理策略和随机游走策略。这些策略旨在提高初始化种群的质量和增强局部搜索能力，以加快算法的收敛速度。通过比较改进前后算法的 Pareto 前沿拟合线性度和 Pareto 前沿最大差值等前沿分布特征，发现改进后的算法线性度更高，解集质量更好。通过计算最优解集的解，得出了最优特性参数。研究结果显示，改进算法显著提高了算法的求解效果，为后续的负载实验和功耗实验提供了重要的理论支持。

第 5 章灵巧臂重力平衡抓取作业实验研究

5.1 引言

在第四章中，针对自适应遗传算法 ANSGA-II 存在的问题，提出了基于随机游走策略的改进版本，并分别得到了两种算法所得到的最优特性参数。随后，在 ADAMS 仿真环境中，利用这两组最优特性参数进行了针对补偿效果和关节电机功耗的仿真实验，以验证这些参数对关节扭矩的降低效果，并验证动力学模型的准确性。

随后，根据最优特性参数，选取符合的弹簧弹性刚度和绳索的弹性模量，开展了实物抓取工况实验。实验包括三组对比：分别是无重力平衡机构情况下、有重力平衡机构但其参数使用传统算法优化的情况，以及有重力平衡机构且其参数使用改进后算法优化的情况。实验的评价指标包括灵巧臂关节扭矩减小比和关节不平衡力矩波动，用于比较不同组中灵巧臂的运动表现。通过对各组实验数据进行分析，最终确认了机构优化设计对于平衡关节重力矩具有显著的作用。

5.2 仿真抓取工况实验研究与分析

Adams 是一款由 MSC Software 开发的多体动力学仿真软件，它可以用于模拟和分析复杂的机械系统、运动装置和动力学行为。在设计重力平衡机构阶段就可以对模型进行相应的力学、运动学、动力学分析等。为了验证重力平衡装置是否可以平衡机械臂重力矩，基于 Adams 建立机械臂运动模型，模拟机械臂负载作业过程，分析在有重力平衡结构和无重力平衡机构时关节力矩的变化。

5.2.1 重力平衡机构仿真抓取工况设计

在上文第二章中，已经在 SolidWorks 软件中对机械臂以及重力平衡机构的整体结构进行了建模。因此，在进行 Adams 机器人建模分析时，只需在 SolidWorks 的 SolidWorks Motion 插件中创建一个空的运动学模型，然后将其导

入到 Adams 中。在 Adams 中，需要为机械臂的各个关节添加运动副、运动副驱动和补偿力矩。具体的步骤如下图 5-1 所示。

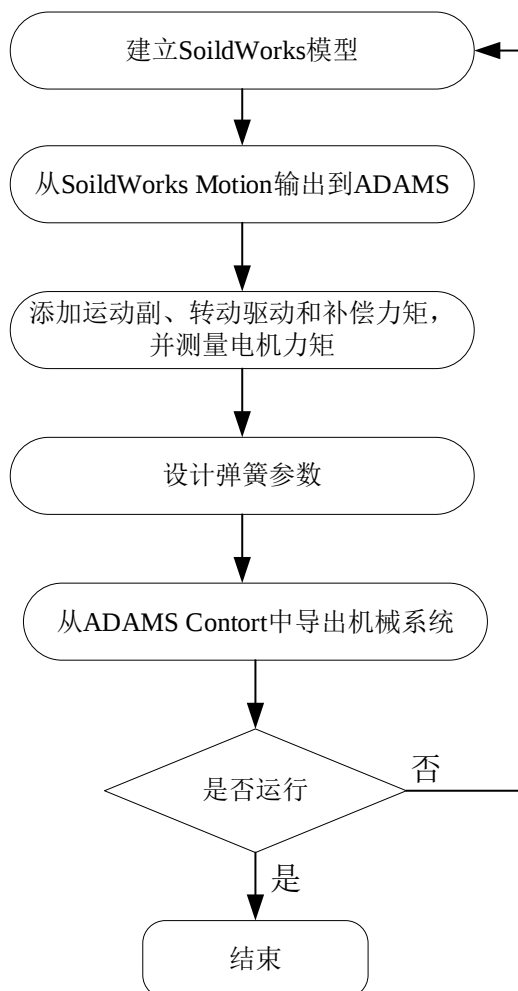
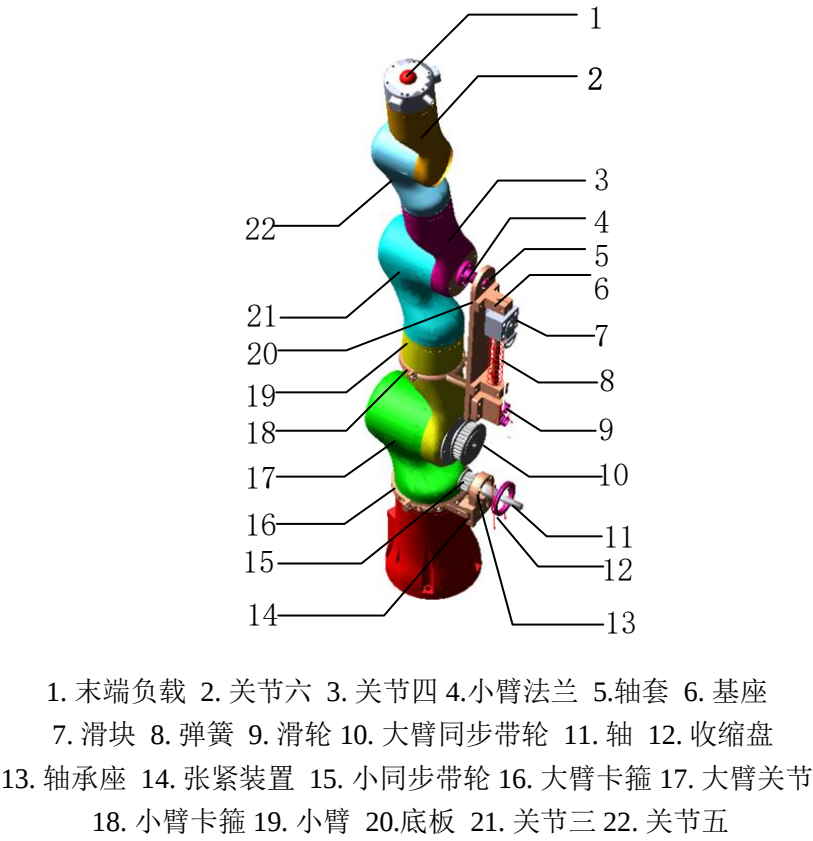


图 5-1 ADAMS 构建仿真模型流程图

将 SolidWorks 中建立的 sldasm 格式机器人模型转换成 xt 格式，再将其输入到 ADAMS 中，得到机器人在 ADAMS 界面中的模型，如图所示在同步带轮处添加同步运动，添加驱动绳索，在各个机械臂关节处添加转动副和转动驱动，测量大臂关节电机力矩，并添加对应的单元作为接口。



(a) ADAMS 初始状态图

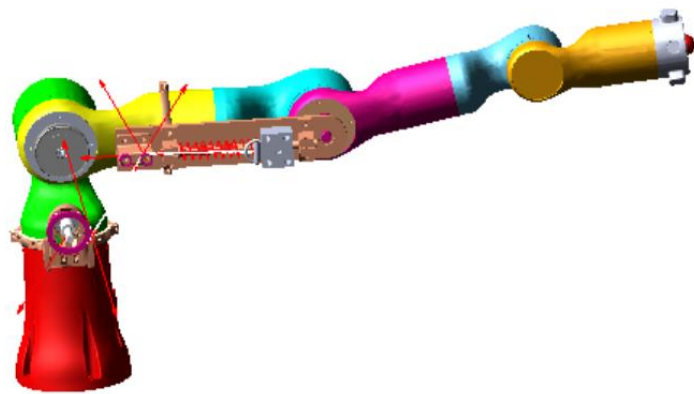


图 5-2 ADAMS 仿真模型运动图

仿真设置如表 5-2 所示，以机械臂关节 2 逆时针运动 90° 再恢复到 0° 的抓取工况为例，具体仿真参数如表 5-1 所示。

表 5-1 系统仿真基本参数表

参数	数值	参数	数值
(ANSKA-II)弹簧刚度系数	58.73	(IANSKA-II)弹簧刚度系数	64.08
$k/\text{N} \cdot \text{m}$		$k/\text{N} \cdot \text{m}$	
(初始)弹簧刚度系数 $k/\text{N} \cdot \text{mm}$	45.00	同步带轮 M_1 齿数	30
关节 3 质量 m_2/kg	1.1	同步带轮 M_2 齿数	15
关节 4 质量 m_3/kg	0.9	关节 2 转速/RPM	3
收线盘半径 r/mm	20	关节 2 质量 m_1/kg	1.6

5.2.2 灵巧臂负载仿真抓取实验与分析

通过上一步建立仿真模型，首先选择建立好的转动副选中 Joint Motion_2，设置方向为：Rotaional，运动函数为：STEP（TIME，0，0，5，-90D），（TIME，0，0，10，0D）即关节 2 运动 90° 再恢复到 0°。

(1) 灵巧臂空载分析

在灵巧臂空载情况下，分别对无重力平衡机构的情况和有重力平衡机构的情况进行运算。并将上述两种情况下的关节 2 力矩导出，并放入一张图中进行对比，关节 2 力矩变化如图 5-3 所示。

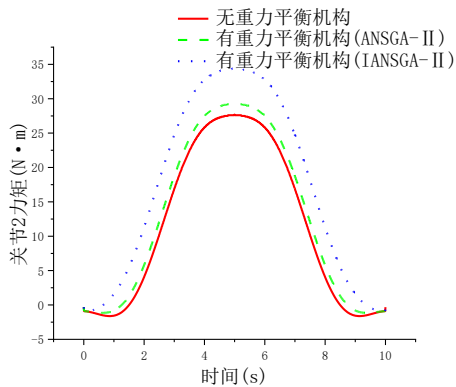


图 5-3 ADAMS 关节扭矩仿真数据图

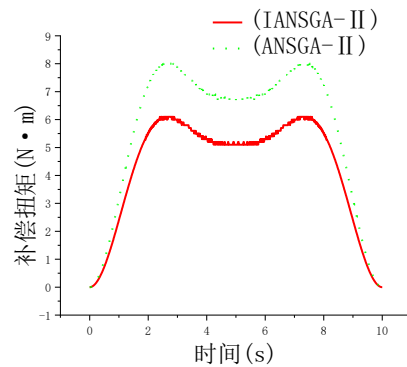


图 5-4 ADAMS 补偿扭矩仿真数据图

由图 5-3 可以看出，重力平衡机构对关节力矩有效的进行了补偿，补偿后的关节扭矩大幅减小，并且降低驱动力矩的波动，从而使机器人的关节运动更加稳定。并且有重力平衡机构的力矩曲线依旧光滑稳定，将图中数据采集并计算关节 2 在补偿后余补偿前的关节力矩插值，并将数值绘制在图 5-4 中。

表 5-2 机械臂空载重力平衡机构实验数据分析

参数	关节 2 扭矩峰值	补偿扭矩峰值	扭矩减小比	不平衡力矩波动 优化量
无重力平衡机构	34.4 N · m	-	-	-
有重力平衡机构 (传统算法)	29.3 N · m	6.1 N · m	14.82%	11.35%
有重力平衡机构 (改进算法)	27.7 N · m	8.0 N · m	19.48%	14.53%

根据表 5-2 的数据，可以得出以下结论：有重力平衡机构的灵巧臂关节性能优于无重力平衡机构的情况；相较于没有重力平衡机构的情况，传统算法优化得到的关节扭矩峰值减小了 14.82%，不平衡力矩波动减小了 11.35%；而提出的改进算法得到的关节扭矩峰值减小了 19.48%，不平衡力矩波动减小了 14.53%。此外，传统算法优化得到的补偿扭矩峰值为 6.1N·m，而改进算法得到的补偿扭矩峰值为 8.0N·m。因此，改进算法的补偿扭矩更高，关节力矩波动更小，这表明在相同工况下，改进算法优化的重力平衡机构更符合优化设计要求。

(2) 机械臂负载分析

为了更加全面的展现重力平衡机构对灵巧臂关节性能的提升，现在添加极限负载的工况下进一步的仿真实验分析。

极限负载工况下 ADAMS 仿真实验结构分析结果如图 5-5 以及 5-6 所示。

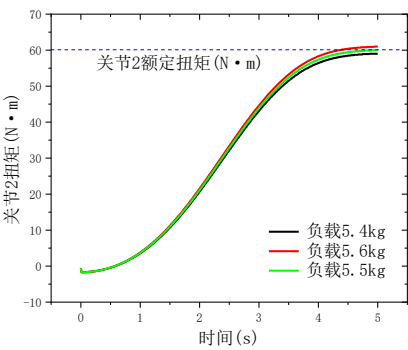


图 5-5 传统算法重力平衡机构仿真

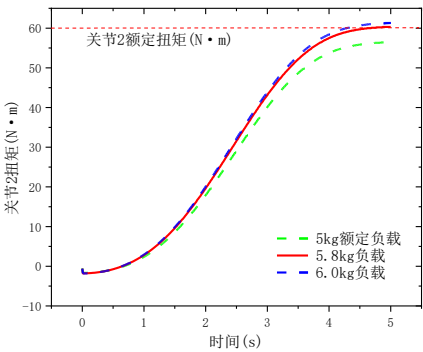


图 5-6 改进算法重力平衡机构仿真

以改进前后算法得到的特性参数分别进行仿真，在灵巧臂末端递增仿真负重，已知灵巧臂关节额定负载在 $50\text{N} \cdot \text{m}$ 。因此在仿真实验中，以额定负载作为灵巧臂的最大负载能力。在 ADAMS 中进行多组实验，得出表 5-3:

表 5-3 机械臂极限负载重力平衡机构实验数据分析

参数	无重力平衡机构	有重力平衡机构(传统算法)	有重力平衡机构(改进算法)
关节 2 极限扭矩负载能力	5kg	5.5kg	5.8kg
关节 2 负载优化量	-	9.10%	13.79%

(1) 传统算法进行极限载荷测试时，平稳运行的极限负载为 5.47kg ，相较于机械臂额定载荷提升了 9.10% 。

(2) 改进算法进行极限载荷测试时，平稳运行的极限负载为 5.78kg ，相较于机械臂额定载荷提升了 13.79% 。

综上所述改进后的算法相比改进前的算法有一定程度的优化。

5.3 抓取实验研究与分析

5.3.1 抓取实验方案设计

为验证仿真实验优化结果的正确性，体现灵巧臂重力平衡机构的效果，开展实物实验，具体实验方案以及流程如图 5-7 所示。

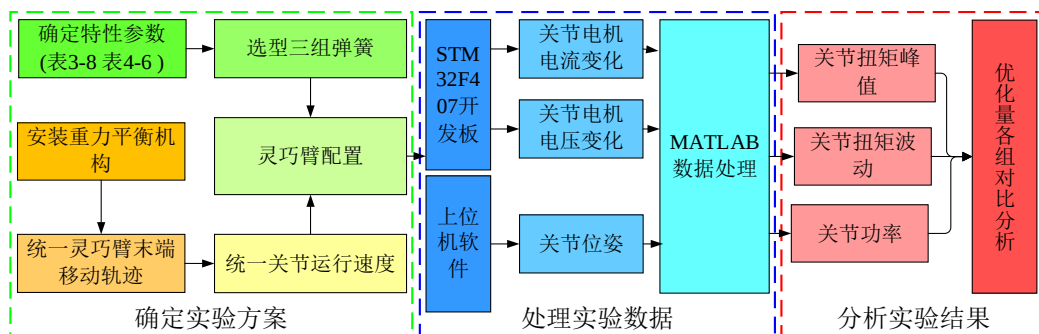


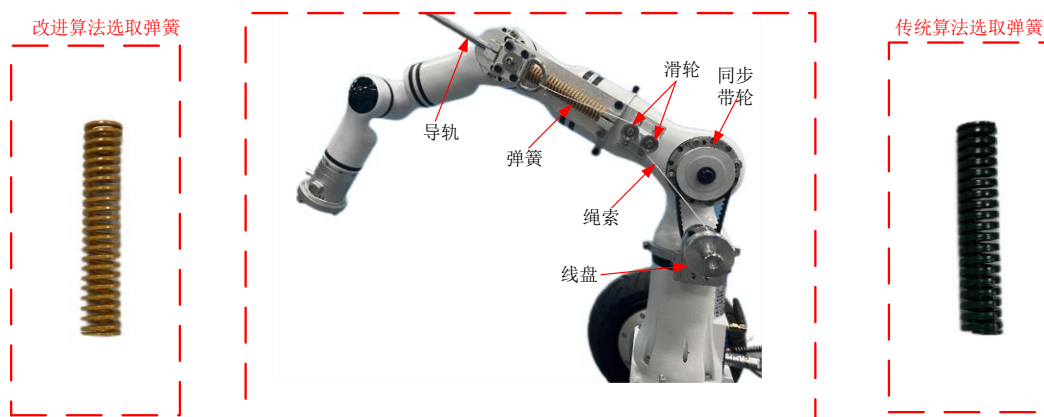
图 5-7 灵巧臂重力平衡机构实验流程图

首先，先根据机械臂作业工况，设定末端移动轨迹。其次，对重力平衡机构的弹簧进行选型和安装，并以此设计两个实验，实验一为测试灵巧臂在额定负载和空载下功耗、关节扭矩峰值以及关节扭矩波动情况，并进行三组对比实

验。实验二为灵巧臂极限载荷测试，测量机械臂极限载荷。实验三为灵巧臂关节能耗测试，通过上位机软件规划灵巧臂末端轨迹路线测试的能量存储效果，并设置三组对比实验，通过 STM32F407 嵌入式开发板获取关节电机电流以及电压变换以及上位机软件获取关节位姿，最好将数据汇总再通过 MATLAB 数据处理得到各个值的优化量大小分析优化效果，依次验证灵巧臂重力平衡机构优化的有效性。



(a) 未增设重力平衡机构



(b) 增设重力平衡机构

图 5-8 机械臂与重力平衡机构实物图

如上图 5-8 所示在不影响灵巧臂关节自由度的前提下，通过卡箍将重力平衡机构固定在机械臂关节上，在关节转动处，通过法兰将同步带轮固定在电机中心处与电机同轴转动。机械臂底座上通过卡箍，将轴承座安装固定，通过同

步带将转矩传递。关节 3 电机处安装有弹簧机构，其上端通过法兰固定，弹簧机构下端通过卡箍固定在关节上。弹簧机构包括导轨、弹簧、底板和滑轮。

为了实现实验数据的采集与分析，实验过程中 STM32F047 开发板通过 JSON 协议采集关节电机电流和电压信息，使用上位机软件下发作业指令并获取关节位姿信息。

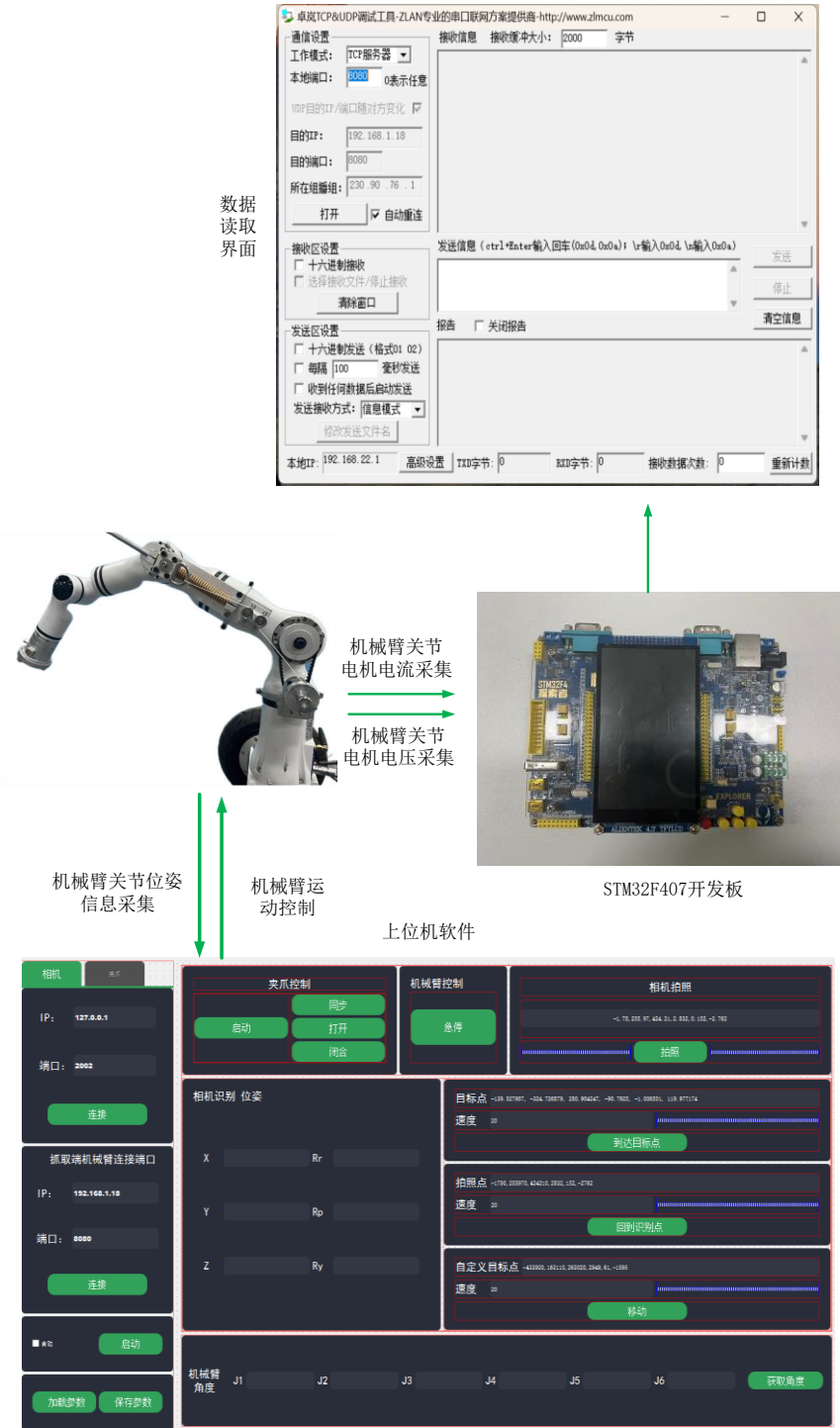


图 5-9 实验数据采集流程示意图

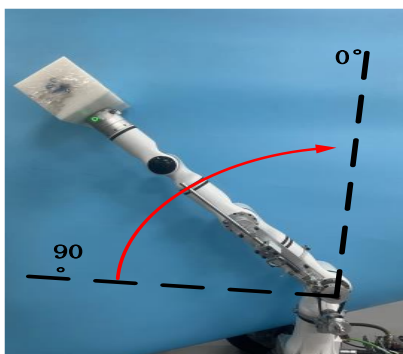
如上图 5-9 所示, 由 STM32F407 开发板监测机械臂关节电机的电流与电压, 由上位机软件发送控制指令, 控制灵巧臂运动, 并将灵巧臂关节位姿信息传回上位机软件并记录。为了确保重力平衡机构的普适性, 将分别对灵巧臂在空载、额定负载、极限负载情况下进行关节作业能力测试, 并对灵巧臂关节运动规划路径, 通过监测关节能耗来验证能量储备效果。工况作业如图 5-10(b)所示, 数据采集如图 5-10(d)所示。



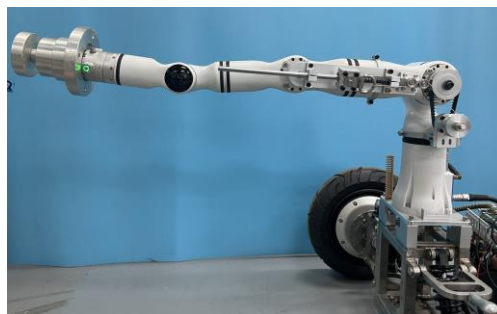
(a) 空载实验初始姿态



(b) 空载实验作业姿态



(c) 额定负载实验运动过程



(d) 额定负载实验作业姿态

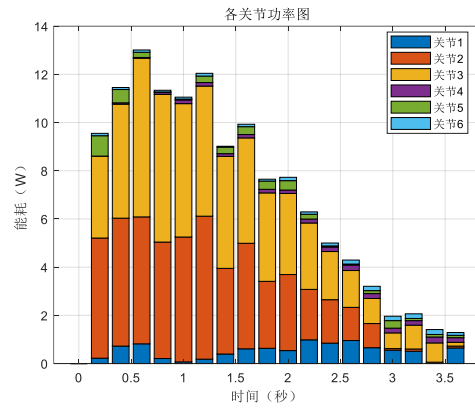
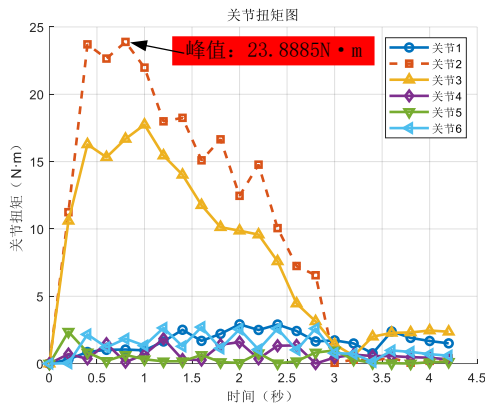
图 5-10 工况作业场景图

空载实验图 5-10(a)主要探究重力平衡机构对于补偿效果峰值以及关节扭矩波动的影响。额定载荷实验图 5-10(c)和极限载荷实验主要探究重力平衡机构对于灵巧臂极限复杂能力提升效果。能耗实验主要是针对机械臂作业情况下对能耗问题进行探究。

以灵巧臂重力平衡机构的关节性能为优化目标，以关节扭矩峰值和关节扭矩波动为评价算法优化的标准。为了更全面评估关节性能并考虑后续能耗实验，引入了关节能耗作为第三个评价标准，具体数据见附录 1。

5.3.2 抓取实验结果分析

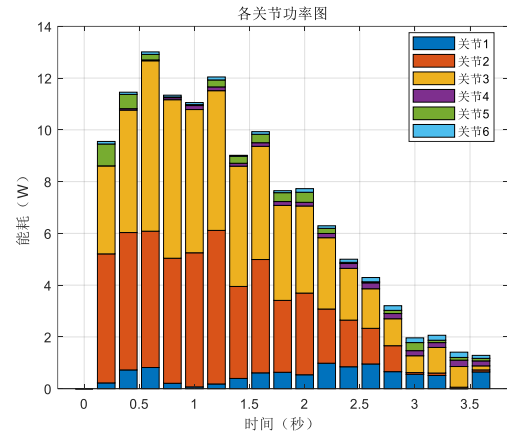
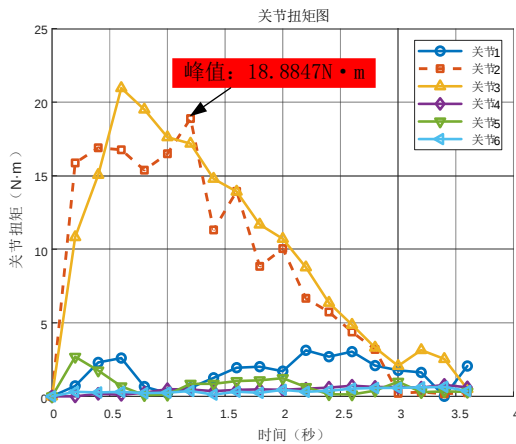
(1) 空载工况下关节扭矩与关节能耗



(a) 空载作业关节扭矩(无重力平衡机构)

(b) 空载作业关节能耗(无重力平衡机构)

图 5-11 空载作业实验



(a) 空载作业关节扭矩(传统算法优化)

(b) 空载作业关节能耗(传统算法优化)

图 5-12 传统算法机构作业实验

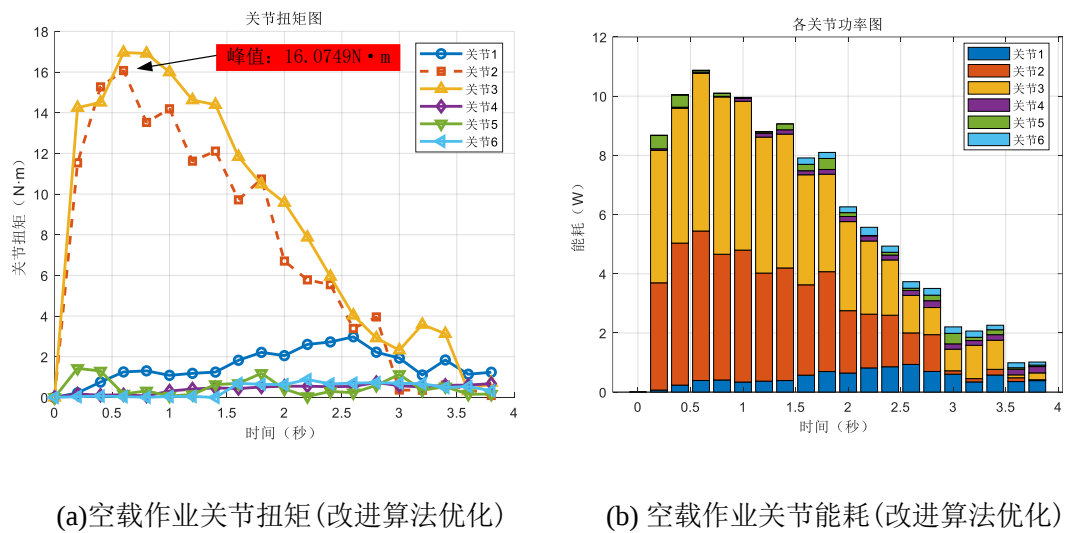


图 5-13 改进算法机构工况作业实验

各个关节扭矩变化规律如图 5-11、5-12 和 5-13 所示，数据分析如表 5-4 所示。

表 5-4 空载实验数据分析

参数	传统算法 优化	改进算法 优化	无力矩平 衡	传统算法 优化量	改进算法 优化量
弹簧刚度(N/m)	58.73	68.04	-	-	-
绳索弹性系数(Pa)	1124.87	1325.71	-	-	-
关节扭矩峰值(N·m)	188.847	160.749	238.885	20.95%	32.71%
关节扭矩波动(N·m)	183.04	155.02	234.378	21.90%	33.86%
功耗(W)	704.472	519.368	446.685	26.28%	36.59%

1、为验证算法优化后的重力平衡效果，对比分析无重力平衡机构、传统算法优化机构的重力平衡机构以及改进算法优化机构三组对照实验后发现：传统算法优化后重力平衡机构比无重力平衡机构的关节 2 扭矩峰值优化了 20.95%，改进算法优化后重力平衡机构比无重力平衡机构的关节 2 扭矩峰值优化了 32.71%。传统算法优化后重力平衡机构比无重力平衡机构的关节 2 扭矩波动优化了 21.90%，改进算法优化后重力平衡机构比无重力平衡机构的关节 2 扭矩峰值优化了 33.86%。

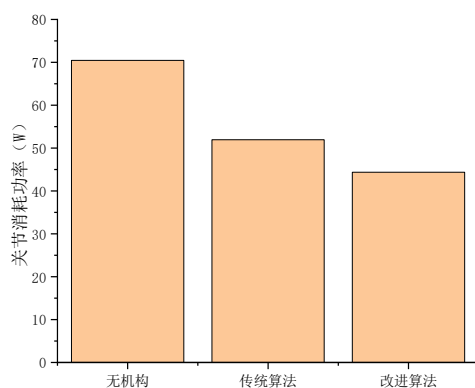
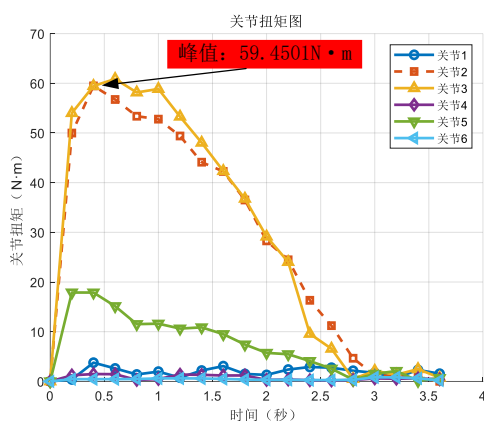


图 5-14 关节功率对比图

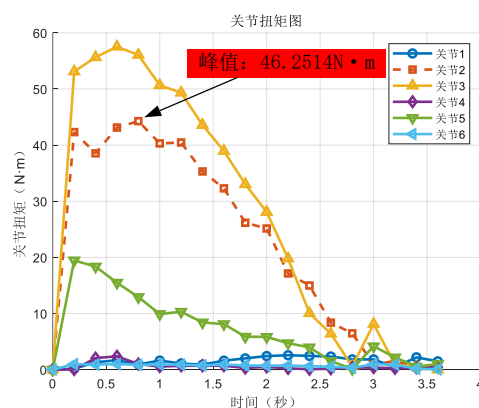
2、为验证算法优化的功耗情况，对比分析无重力平衡机构、传统算法优化机构的重力平衡机构以及改进算法优化机构三组对照实验后总结出图 5-14 并得出：传统算法优化后重力平衡机构比无重力平衡机构的关节 2 消耗功率降低了 26.28%，改进算法优化后重力平衡机构比无重力平衡机构的关节 2 消耗功率降低了 36.59%。

3、由结论 1 和 2 可得知，在抓取实验中，改进算法与传统算法相比，能够提供更多的关节重力力矩补偿，并且能够降低关节功耗。因此，改进算法的特性参数更为适宜。

(2) 额定负载工况下关节扭矩与关节能耗



(a) 无重力平衡机构负载 5kg



(b) 重力平衡机构负载 5kg(传统算法)

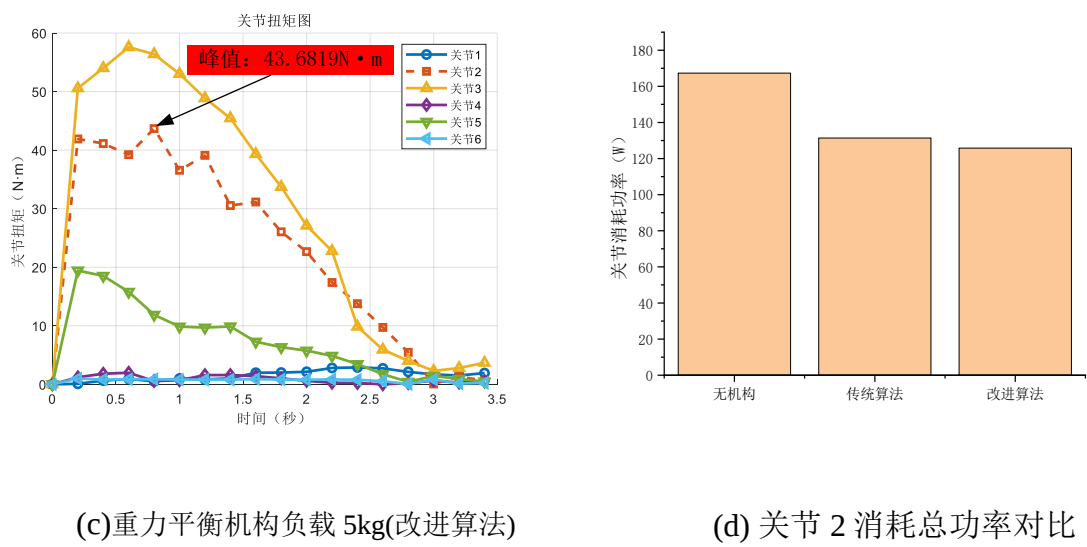


图 5- 15 实验结果分析图

各个关节扭矩变化规律如图 5-15 所示，数据分析如表 5-5 所示。

表 5-5 额定负载实验数据分析

参数	传统算法	改进算法	无力矩平 衡	传统算法	改进算法
	优化	优化		优化量	优化量
关节扭矩峰值(N • m)	462.514	436.819	594.501	22.21%	26.52%
关节扭矩波动(N • m)	454.263	428.568	579.528	21.62%	26.05%
极限负载能力 kg	5.428	5.816	5.000	7.89%	14.03%
功耗 W	2157.64	2095.71	2687.15	19.71%	22.01%

1、为验证算法优化后的重力平衡效果，对比分析了三组对照实验：无重力平衡机构、传统算法优化机构的重力平衡机构以及改进算法优化机构。结果显示，在负载为五公斤时，传统算法优化后的重力平衡机构相较于无重力平衡机构，关节 2 的扭矩峰值优化了 22.21%，而改进算法优化后的重力平衡机构优化了 26.52%。此外，传统算法优化后的重力平衡机构相较于无重力平衡机构，关节 2 的扭矩波动优化了 21.62%，而改进算法优化后的重力平衡机构优化了 26.05%。

2、为验证算法优化的功耗情况，进行了三组对照实验，分别对比了无重力

平衡机构、传统算法优化机构的重力平衡机构以及改进算法优化机构。在图 5-15(d)中, 总结得出: 传统算法优化后的重力平衡机构相较于无重力平衡机构, 关节 2 的消耗功率降低了 19.71%, 而改进算法优化后的重力平衡机构相较于无重力平衡机构, 关节 2 的消耗功率降低了 22.01%。

3、根据表 5-6 的数据, 采用传统算法优化的灵巧臂极限负载为 5.428kg, 而采用改进算法优化后的灵巧臂极限负载可达 5.816kg。因此, 传统算法提升了负载能力约 7.89%, 而改进算法提升了负载能力约 14.03%。

4、由结论 1、结论 2 和结论 3, 可以得出在额定负载下, 改进算法相比传统算法在抓取实验中的表现更优。

(3) 功耗实验测试

为了更好的测试灵巧臂能量储存效果, 设计如图 1-16 所示测试路径, 运动顺序为 B 点到 C 点到 D 点到 E 点最后回到 B 点。

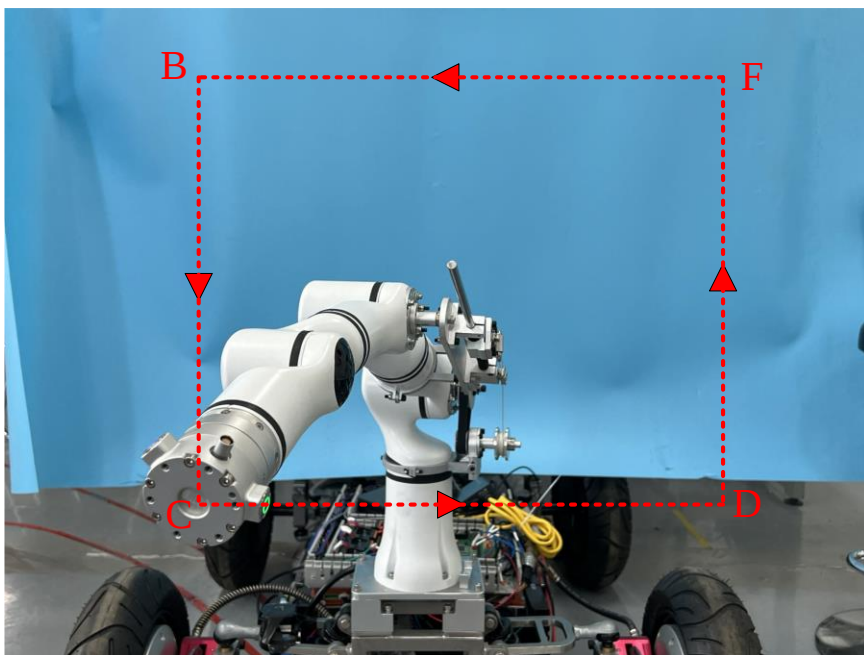
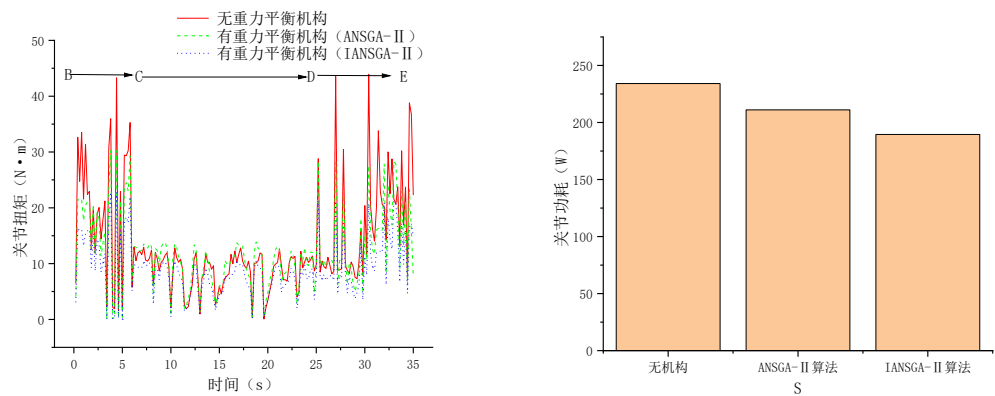


图 5-16 灵巧臂运动轨迹图

实验结果如图 5-17 所示。



(a) 轨迹运动关节扭矩对比 (b) 关节消耗功率对比

图 5-17 能耗实验结果分析图

轨迹运动实验数据如表 5-6 所示

表 5-6 额定负载实验数据分析

参数	传统算法 优化	改进算法 优化	无力矩平 衡	传统算法 优化量	改进算法 优化量
关节扭矩峰值 N·m	30.331	28.785	43.931	30.94%	38.13%
关节扭矩均值 N·m	12.06	9.12	13.38	9.84%	31.85%
功耗 W	211.0935	189.5558	234.1355	9.84%	18.99%

1、为验证算法优化前后的峰值扭矩降低效果，分析了传统算法优化平衡机构以及改进算法优化机构的实验结果。在实验中，传统算法优化后的效果为 30.94%，而改进算法优化后的效果为 38.13%。两种算法均表现出一定的优化效果，但传统算法在灵巧臂从 C 点运动到 D 点时的效果较差，导致关节扭矩大于未优化前的扭矩。为了验证算法优化前后的峰值扭矩降低效果，分析了传统算法优化平衡机构和改进算法优化机构的实验结果。结果显示，在两种算法下均取得了一定优化效果，传统算法优化效果为 30.94%，而改进算法为 38.13%。然而，传统算法在灵巧臂从 C 点移动到 D 点时的效果不佳，导致关节扭矩高于未优化前的水平。

2、为验证重力平衡机构优化后的节能效果，对比分析传统算法优化平衡机构以及改进算法优化机构实验，功耗分别减小了 9.84%、31.85%，在两种算法下均有一定优化效果。

3、通过结论 1 和 2 可以得出，改进算法相较于传统算法在功耗效果以及关节扭矩上，其求解的最佳特性参数的表现更佳。

5.4 本章小结

本章将改进后的算法生成的最优特性参数作为 ADAMS 中的仿真参数，进行了对关节 2 在空载、额定负载和极限负载三种实验工况的仿真实验。实验结果表明，所提出的改进策略相较于原始算法，在各项评价指标上均有一定提升，从而验证了第四章中对算法改进以及第三章动力学模型的正确性。在实物实验中，设计了三组对比试验，分别针对无力矩平衡机构、传统算法优化的机构和改进算法优化的机构。这些试验涵盖了空载、额定负载和极限负载工况下对关节负载能力的测试，并增加了能耗实验，以灵巧臂运动的实际作业末端轨迹作为测试轨迹，监测整个轨迹中关节 2 的能耗情况。通过采集关节的位姿、电流值和电压值数据，并对比分析三组实验数据，得出了关于灵巧臂重力平衡机构对关节性能提升的结论。

第 6 章 总结与展望

6.1 论文总结

近年来,随着几种协作机器人的开发和商用,人机协作变得越来越重要。这些协作机器人与人类共享工作空间,通常采用大功率电机和昂贵减速器(谐波驱动器)来提高重量与有效载荷的比值。为了满足上述要求的同时降低成本,本文通过灵巧臂关节负载情况,得出负载最大的关节,分析重力平衡机构机理,并设计一款重力平衡机构,并建立动力学模型得到影响重力平衡的特性参数。随后,分析传统 NSGA-II 优化机构的缺点,提出了一种改进的 NSGA-II 算法,大大提高了收敛速度,避免陷入局部最优。利用改进的 NSGA-II 算法优化了相关特性参数,最后通过仿真抓取实验验证了动力学模型的正确性,并通过实物抓取实验验证了仿真实验的正确性,以及改进 NSGA-II 算法优化设计的有益性。主要取得成果如下:

(1) 针对现有 RM65-B 灵巧臂关节负载能力的问题,设计研究了一种灵巧臂重力平衡机构。

首先,对灵巧臂各关节的负载能力进行了分析,确定了最大负载关节。随后,根据重力平衡机构的机理进行了设计,以实现负载的平衡。接着,建立了基于重力平衡机构的灵巧臂动力学模型,从中得出了影响重力平衡机构性能的关键特性参数,并确定了这些参数的取值范围。随后,构建了双目标优化模型,用于优化重力平衡机构,以提高其性能。完成了基于重力平衡机构特性参数的优化设计工作。

(2) 针对传统 NSGA-II 算法优化重力平衡机构的缺陷,提出了一种基于随机游走策略的改进 NSGA-II 算法。

通过对传统自适应 NSGA-II 算法在机构优化方面存在的问题进行分析,提出了一种改进方法,首先,使用粒子群算法初始化预筛选策略来提高种群初始化质量,其次,通过随机游走策略来提高局部搜索能力,防止陷入局部最优。然后,根据这一改进方法求解出新的双目标优化模型。接着,将两种算法下给

出的最优解应用于仿真抓取实验、实物抓取实验以及功耗实验。结果表明，在 IANSGA-II 优化下的重力平衡机构、在 ANSGA-II 优化下的重力平衡机构和无重力平衡机构的三组对照实验中，IANSGA-II 优化下的重力平衡机构对关节力矩平衡效果最佳。具体来说，该机构在关节力矩平衡方面效果最佳，同时关节能耗最小，符合设计需求。根据这一结果，能够证明提出的改进方法在机构优化中具有显著的效果，并能够有效提高机构性能，满足设计要求。

6.2 研究展望

论文设计了一款灵巧臂重力平衡机构，并通过改进传统算法的不足之处，提出了一种基于随机游走策略的自适应 NSGA-II 算法，对重力平衡机构的特性参数进行优化设计。在研究中取得了一些成果，但仍需在以下两个方面进行进一步的研究和改进。

(1) 灵巧臂重力平衡机构六关节动力学模型研究。在基于机构特征的动力学建模方面，对灵巧臂重力平衡机构中的六关节模型进行了简化，将其简化为三关节模型处理。然而，这种简化模型忽略了被简化的关节对重力平衡的影响，导致关节的运动与载荷状态无法真实反映。因此，动力学模型的建立与实际机构存在一定误差。为此，可以考虑安装更多的重力平衡机构，并建立更加全面的动力学模型，以进一步提高模型的准确性。

(2) 重力平衡机构控制系统设计研究。本文中设计的重力平衡机构为被动补偿结构，无法实时根据关节运动角度进行力矩补偿。未来的研究方向可以是在力矩平衡机构中加入小功率电机，并设计智能控制算法，以更加精准的方式主动调节关节力矩。从而提升灵巧臂的负载能力，同时降低关节能耗。

目前，机械臂已取得了一系列突破和进展。为了更好地满足特殊工况下使用者的需求，提升机械臂的有效载荷比值和降低能耗仍然是研究的重点。未来，随着减速机、伺服电机和精密减速器等相关技术的不断进步和完善，机械臂的动力学性能将会得到极大的提升。

参考文献

- [1] Hadisujoto B, Rabbani A N, Saptaji K, et al. Development of 3D Printed Autonomous Warehouse Robot Using Mecanum Wheel and Robot Arm [J]. Journal of Applied Sciences and Advanced Technology, 2024, 6(2): 57-64.
- [2] Bhattacharya R, Lindstrom J, Taka A, et al. FabRobotics: Fusing 3D Printing with Mobile Robots to Advance Fabrication, Robotics, and Interaction [C]. Proceedings of the Eighteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction. 2024: 1-13.
- [3] Lee D, Seo T. Lightweight multi-DOF manipulator with wire-driven gravity compensation mechanism [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(3): 1308-1314.
- [4] 姜建建, 黄志来, 周慧明, 等. 单自由度吊丝配重式重力补偿机构的精度分析 [J]. 河北工程大学学报(自然科学版). 2023, 40(01): 104-112.
- [5] 胡松华, 杨竣皓, 孙利雄, 等. 空间串联机构重力平衡设计方法与仿真分析 [J]. 机床与液压, 2024, 52(05): 66-73.
- [6] Kragic D, Gustafson J, Karaoguz H, et al. Interactive, Collaborative Robots: Challenges and Opportunities[C]. IJCAI. 2018: 18-25.
- [7] Riazi S, Bengtsson K, Wigström O, et al. Energy optimization of multi-robot systems[C]. 2015 IEEE international conference on automation science and engineering (case). IEEE, 2015: 1345-1350.
- [8] 陶广宏, 耿世雄, 姜春英, 等. 机器人俯仰关节能耗特性分析 [J]. 机器人, 2022, 44(04): 484-493.
- [9] Jin L, Zhu X, Huan J, et al. Passive Gravity Compensation for Parallel Mechanism with both Spatial Translations and Angular Orientations [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2024.
- [10] Nguyen V L. A Multi-Objective Optimal Design Method for Gravity Compensators With Consideration of Minimizing Joint Reaction Forces [J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2024, 16(8).
- [11] Juang C-W, Jhuang C-S, Chen D-Z. A novel spring gravity-balance method for spatial articulated manipulators without auxiliary links [J]. Mechanism and Machine Theory, 2024, 191: 105497.
- [12] Zhou L, Chen W, Chen W, et al. Design of a passive lower limb exoskeleton for walking assistance with gravity compensation [J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 150: 103840.
- [13] Kuo C H, Nguyen-Vu L, Chou L T. Static balancing of a reconfigurable linkage with switchable mobility by using a single counterweight[C]. 2018 International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots (ReMAR). IEEE, 2018: 1-6.
- [14] Peng Y, Bu W J M, Theory M. Design of gravity-balanced exoskeletons with linkage-belt hybrid transmissions [J]. 2022, 170: 104660.

- [15] Nguyen V L, Kuo C-H, Lin P T. Performance analysis of gravity-balanced serial robotic manipulators under dynamic loads [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2024, 191: 105519.
- [16] 王攀峰, 王星, 郭璠, 等. 丝传动 3-SR 并联机构运动学分析与力反馈控制 [J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2022, 55(02): 184-90.
- [17] Nguyen V L. Gravity Balancing Design of a 3-DOF Hybrid Robotic Manipulator With Variable Payloads; proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, F, 2021 [C]. American Society of Mechanical Engineers.
- [18] Kuo C-H, Lai S-J. Design of a novel statically balanced mechanism for laparoscope holders with decoupled positioning and orientating manipulation [J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2016, 8(1): 015001.
- [19] Kim C-K, Chung D G, Hwang M, et al. Three-degrees-of-freedom passive gravity compensation mechanism applicable to robotic arm with remote center of motion for minimally invasive surgery [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, 4(4): 3473-3480.
- [20] Vazzoler G, Bilancia P, Berselli G, et al. Analysis and preliminary design of a passive upper limb exoskeleton [J]. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, 2022, 4(3): 558-569.
- [21] Tschiersky M, Hekman E E, Brouwer D M, et al. Gravity balancing flexure springs for an assistive elbow orthosis [J]. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, 2019, 1(3): 177-188.
- [22] Hull J, Turner R, Asbeck A T. Design and preliminary evaluation of two tool support arm exoskeletons with gravity compensation [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2022, 172: 104802.
- [23] Woo J, Seo J-T, Yi B-J J A S. A static balancing method for variable payloads by combination of a counterweight and spring and its application as a surgical platform [J]. 2019, 9(19): 39-55.
- [24] Fukushima E F, Debenest P, Tojo Y, et al. Teleoperated buggy vehicle and weight balanced arm for mechanization of mine detection and clearance tasks [J]. 2005: 58-63.
- [25] Plooi M, Wisse M. A novel spring mechanism to reduce energy consumption of robotic arms; proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, F, 2012 [C]. IEEE.
- [26] 王耀. 基于刚度矩阵的串联机器人双关节被动重力平衡研究 [D], 2016.
- [27] van Der Wijk V. The Grand 4R Four-Bar Based Inherently Balanced Linkage Architecture for synthesis of shaking force balanced and gravity force balanced mechanisms [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2020, 150: 103815.
- [28] Audet J M, Gosselin C. Intuitive Physical Human–Robot Interaction Using an Underactuated Redundant Manipulator With Complete Spatial Rotational Capabilities [J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2022, 14(1): 011-017.

- [29] Audet J M, Gosselin C. Rotational low-impedance physical human-robot interaction using underactuated redundancy [J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2021, 13(1): 014503.
- [30] 冯江. 重载工业机器人平衡系统研究 [D], 2020.
- [31] Arakelian V. Gravity compensation in robotics [J]. *Advanced Robotics*, 2016, 30(2): 79-96.
- [32] Carricato M, Gosselin C. A statically balanced Gough/Stewart-type platform: conception, design, and simulation [J]. 2009.
- [33] Bulut Y, Conkur E S. A gravitational torque-compensated 2-DOF planar robotic arm design and its active control [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2021, 235(22): 6481-6495.
- [34] Russo A, Sinatra R, Xi F J M, et al. Static balancing of parallel robots [J]. 2005, 40(2): 191-202.
- [35] 张麟峰. 多关节机器人运动控制中的重力补偿研究 [D], 2020.
- [36] Boisclair J, Richard P-L, Laliberte T, et al. Gravity compensation of robotic manipulators using cylindrical Halbach arrays [J]. *Ieee/asme transactions on mechatronics*, 2016, 22(1): 457-464.
- [37] Lee W-B, Kim D-W, Song J-B. Novel 3-DOF counterbalance mechanism based on spring balancer for mobile robot arms [J]. *Mechatronics*, 2022, 82: 102734.
- [38] Kim H-S, Min J-K, Song J-B. Multiple-degree-of-freedom counterbalance robot arm based on slider-crank mechanism and bevel gear units [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2015, 32(1): 230-235.
- [39] Lee G, Lee D, Oh Y. One-piece gravity compensation mechanism using cam mechanism and compression spring [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2018, 5: 415-420.
- [40] Nguyen V L, Lin C-Y, Kuo C-H. Gravity compensation design of planar articulated robotic arms using the gear-spring modules [J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2020, 12(3): 031014.
- [41] Nguyen V L, Kuo C-H, Lin P T. Reliability-based analysis and optimization of the gravity balancing performance of spring-articulated serial robots with uncertainties [J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2022, 14(3): 031016.
- [42] Nguyen V L, Lin C-Y, Kuo C-H. Gravity compensation design of Delta parallel robots using gear-spring modules [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2020, 154: 104046.
- [43] Juang C-W, Chen D-Z. Spring configurations and attachment angles determination for statically balanced planar articulated manipulators [J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2022, 14(5): 054502.
- [44] Nguyen V L. Gravity balancing of a two-degree-of-freedom parallel robotic platform with variable payloads [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2023, 145(2): 024501.

- [45] Kim B, Deshpande A D. Design of nonlinear rotational stiffness using a noncircular pulley-spring mechanism [J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2014, 6(4): 041009.
- [46] Nguyen V L. Design of a compact gear-spring mechanism for static balancing of variable payloads [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2022, 144(12): 123301.
- [47] Koser K. A cam mechanism for gravity-balancing [J]. *Mechanics Research Communications*, 2009, 36(4): 523-530.
- [48] Franchetti D, Boschetti G, Lenzo B. Passive gravity balancing with a self-regulating mechanism for variable payload [J]. *Machines*, 2021, 9(8): 145.
- [49] Fedorov D, Birglen L. Differential noncircular pulleys for cable robots and static balancing [J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2018, 10(6): 061001.
- [50] Arakelian V, Zhang Y. An improved design of gravity compensators based on the inverted slider-crank mechanism [J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2019, 11(3): 034501.
- [51] Vu L N, Kuo C-H. A gear-slider gravity compensation mechanism: design and experimental study; proceedings of the International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, F, 2019 [C]. American Society of Mechanical Engineers.
- [52] Bijlsma B G, Radaelli G, Herder J L. Design of a compact gravity equilibrator with an unlimited range of motion [J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2017, 9(6): 061003.
- [53] Kuo C-H, Wu Y-X. Perfect static balancing using Cardan-gear spring mechanisms [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2023, 181: 105229.
- [54] Kim J, Moon J, Ryu J, et al. A novel energy-efficient actuator integrated with compact variable gravity compensation module [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2022, 177: 105031.
- [55] Lee, Giuk, Donggun, et al. One-piece gravity compensation mechanism using cam mechanism and compression spring [J]. 2018, 5(3): 415-420.
- [56] Cho C, Lee W, Lee J, et al. A 2-dof gravity compensator with bevel gears [J]. 2012, 26: 2913-2919.
- [57] 付小月, 王伟, 王雷, 等. 变刚度关节驱动器动力学特性的分析与研究 [J]. *机器人*, 2017, 39(04): 466-473.
- [58] Kang L, Oh S-M, Kim W, et al. Design of a new gravity balanced parallel mechanism with Schönflies motion [J]. 2016, 230(17): 3111-3134.
- [59] Lee, Giuk, Donggun, et al. One-Piece Gravity Compensation Mechanism Using Cam Mechanism and Compression Spring [J]. *International journal precision engineering manufacturing-green Technology*, 2018, 5(3): 415-420.
- [60] 刘兵, 崔建昆. 应用于机械臂的凸轮式重力补偿机构研究 [J]. *农业装备与车辆工程*, 2018, 56(03): 77-80.
- [61] 梁艺. 前列腺放射性粒子植入机器人关键技术研究 [D], 2017.
- [62] 李剑锋, 赵朋波, 张雷雨, 等. 一种新型自适应康复外骨骼机构及重力平衡优化 [J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(05): 263-270.

- [63] Dai X L, Long S, Wang P, et al. Multi-objective Optimization of Parallel Swaying Platform with Gravity Balance System; proceedings of the 2019 IEEE 9th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER), F, 2019 [C]. IEEE.
- [64] Sun X, Zheng B, Bao J, et al. Parameter optimization design of high-speed 6-PS parallel robot [J]. 2015.
- [65] 丁渊明, 王宣银. 串联机械臂结构优化方法 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(12): 2360-2364.
- [66] Liu L, Huang B, Zhu Y H, et al. Optimization Design of Gravity Compensation System for a 5-DOF Articulated Heavy-Duty Robot [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 556: 2359-2364.
- [67] 杜天野. 基于刚度建模的协作机器人结构优化 [D], 2023.
- [68] 何文鹏. 基于动力学特性的全地形移动机器人机构优化设计研究 [D], 2023.
- [69] Segla S, Kalker-Kalkman C, Schwab A. Statical balancing of a robot mechanism with the aid of a genetic algorithm [J]. Mechanism and machine theory, 1998, 33 (1-2): 163-174.
- [70] Rajendra R, Pratihara D K. Analysis of double support phase of biped robot and multi-objective optimization using genetic algorithm and particle swarm optimization algorithm [J]. Sadhana, 2015, 40: 549-575.
- [71] Saravanan R, Ramabalan S, Babu P D. Optimum static balancing of an industrial robot mechanism [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2008, 21(6): 824-834.
- [72] Montazeri A, West C, Monk S D, et al. Dynamic modelling and parameter estimation of a hydraulic robot manipulator using a multi-objective genetic algorithm [J]. International Journal of Control, 2017, 90(4): 661-683.
- [73] 何俊波. 绳索牵引并联机器人的动力学建模与控制研究 [D], 2020.
- [74] 邓槟槟. 考虑模型不确定性的绳索牵引并联机器人动力学控制研究 [D], 2022.
- [75] Elarbi M, Bechikh S, Gupta A, et al. A new decomposition-based NSGA-II for many-objective optimization [J]. 2017, 48(7): 1191-1210.
- [76] Li R, Gong W, Lu C J C, et al. Self-adaptive multi-objective evolutionary algorithm for flexible job shop scheduling with fuzzy processing time [J]. 2022, 168: 108-099.
- [77] 董晓红. 考虑交通行为的电动汽车快充站协同规划与时空引导策略 [D], 2019.

附录 1 机械臂重力平衡机构的实验数据(部分)

空载有重力平衡机构 (IANS-GA-II算法)					
关节 1 电流	关节 2 电流	关节 3 电流	关节 4 电流	关节 5 电流	关节 6 电流
(mA)	(mA)	(mA)	(mA)	(mA)	(mA)
-29000	-1510000	-1865000	22000	-187000	-5000
99000	-1999000	-1899000	14000	-170000	8000
164000	-2104000	-2220000	17000	22000	-5000
171000	-2104000	-2214000	-9000	42000	-1000
142000	-1858000	-2094000	-41000	-9000	-6000
155000	-1521000	-1914000	-54000	-19000	-6000
163000	-159000	-1884000	-61000	-83000	0
239000	-127000	-1549000	-57000	-90000	-90000
290000	-1406000	-1372000	-67000	-155000	-85000
269000	-878000	-1254000	-72000	-54000	-82000
341000	-757000	-1030000	-72000	-6000	-115000
357000	-726000	-778000	-69000	39000	-87000
390000	-444000	-528000	-71000	30000	-92000
291000	-518000	-382000	-96000	78000	-95000
253000	-48000	304000	-75000	148000	-91000
144000	46000	-469000	-67000	-46000	-88000
241000	80000	-410000	-78000	-69000	-64000
149000	53000	41000	-79000	-21000	-70000
-162000	-13000	96000	-89000	-21000	-43000
-162000	-13000	96000	-89000	-21000	-43000
-162000	-13000	96000	-89000	-21000	-43000

空载有重力平衡机构（ANSGA-II算法）

关节 1 电流	关节 2 电流	关节 3 电流	关节 4 电流	关节 5 电流	关节 6 电流
(mA)	(mA)	(mA)	(mA)	(mA)	(mA)
93000	-2077000	-1417000	0	-352000	41000
302000	-2212000	-1971000	23000	-230000	35000
341000	-2194000	-2743000	14000	-89000	40000
87000	-2194000	-2552000	-33000	-11000	29000
29000	-2159000	-2306000	-64000	-15000	33000
76000	-2472000	-2249000	-61000	-112000	48000
165000	-1824000	-1936000	-47000	-112000	-16000
255000	-1822000	-58000	-136000	-42000	
264000	-1157000	-1529000	-62000	-143000	-32000
224000	-1315000	-1402000	-59000	-162000	-58000
410000	-872100	-1148000	-68000	-83000	-41000
353000	-751000	-833000	-78000	-19000	-50000
398000	-574000	-637000	-95000	-17000	-69000
274000	-418000	-434000	-84000	51000	-75000
232000	27000	271000	-82000	130000	-76000
213000	39000	-412000	-78000	-38000	-80000
1000	23000	-333000	-102000	-44000	-85000
-270000	-32000	-65000	-80000	-41000	-48000

空载无重力平衡机构

关节 1 电流 (mA)	关节 2 电流 (mA)	关节 3 电流 (mA)	关节 4 电流 (mA)	关节 5 电流 (mA)	关节 6 电流 (mA)
41000	-1472000	-1388000	-93000	-310000	-4000
113000	-3103000	-2131000	47000	-109000	-284000
134000	-2965000	-2006000	194000	-26000	-158000
137000	-3127000	-2184000	15000	-85000	-242000
129000	-2877000	-2322000	-89000	-42000	-175000
215000	-2355000	-2022000	242000	-22000	-347000
329000	-2389000	-1835000	-40000	23000	-168000
221000	-1976000	-1540000	-35000	84000	-355000
289000	-2180000	-1326000	184000	15000	-148000
382000	-1631000	-1292000	209000	-7000	-334000
327000	-1934000	-1254000	47000	-101000	-137000
380000	-1317000	-994000	174000	-3000	-340000
317000	-949000	-584000	177000	23000	-133000
216000	-859000	-411000	1000	108000	-341000
226000	8000	187000	59000	128000	-102000
196000	38000	76000	87000	39000	95000
-100000	-34000	-262000	74000	-6000	17000
-313000	-52000	-299000	73000	-4000	-128000
-250000	9000	-303000	63000	1000	-114000
-220000	-27000	-322000	57000	-14000	-114001
-197000	-51000	-310000	41000	-17000	-114002

额定负载有重力平衡机构 (ANSGA-II算法)

关节 1 电流 (mA)	关节 2 电流 (mA)	关节 3 电流 (mA)	关节 4 电流 (mA)	关节 5 电流 (mA)	关节 6 电流 (mA)
24000	-5540000	-6953000	5000	-2548000	130000
172000	-5046000	-7285000	269000	-2403000	118000
220000	-5646000	-7531000	312000	-2028000	130000
123000	-5795000	-7340000	131000	-1693000	113000
211000	-5276000	-6632000	72000	-1297000	121000
145000	-5297000	-6458000	91000	-1350000	116000
116000	-462000	-5705000	90000	-1101000	99000
210000	-4228000	-5099000	93000	-1062000	120000
263000	-3426000	-4325000	39000	-769000	99000
317000	-3292000	-3676000	65000	-764000	93000
337000	-2244000	-2591000	30000	-618000	98000
321000	-1963000	-1316000	11000	-519000	81000
306000	-1097000	-838000	22000	-202000	68000
240000	-848000	-77000	-49000	-15000	45000
239000	122000	1066000	-49000	545000	-125000
-58000	201000	119000	32000	287000	-117000
-287000	48000	-68000	-43000	71000	22000
-194000	47000	0	-61000	131000	8000

额定负载有重力平衡机构（IANS-GA-II算法）

关节 1 电 (mA)	关节 1 电 (mA)	关节 1 电 (mA)	关节 1 电 (mA)	关节 1 电 (mA)	关节 1 电 流 (mA)
12000	12000	12000	12000	12000	12000
84000	84000	84000	84000	84000	84000
120000	120000	120000	120000	120000	120000
67000	67000	67000	67000	67000	67000
129000	129000	129000	129000	129000	129000
109000	109000	109000	109000	109000	109000
134000	134000	134000	134000	134000	134000
259000	259000	259000	259000	259000	259000
263000	263000	263000	263000	263000	263000
280000	280000	280000	280000	280000	280000
366000	366000	366000	366000	366000	366000
378000	378000	378000	378000	378000	378000
357000	357000	357000	357000	357000	357000
278000	278000	278000	278000	278000	278000
222000	222000	222000	222000	222000	222000
197000	197000	197000	197000	197000	197000
-252000	-252000	-252000	-252000	-252000	-252000

额定负载无重力平衡机构

关节 1 电流 (mA)	关节 1 电流 (mA)	关节 1 电流 (mA)	关节 1 电流 (mA)	关节 1 电流 (mA)	关节 1 电 流 (mA)
50000	50000	50000	50000	50000	50000
493000	493000	493000	493000	493000	493000
341000	341000	341000	341000	341000	341000
-182000	-182000	-182000	-182000	-182000	-182000
-257000	-257000	-257000	-257000	-257000	-257000
98000	98000	98000	98000	98000	98000
286000	286000	286000	286000	286000	286000
402000	402000	402000	402000	402000	402000
196000	196000	196000	196000	196000	196000
170000	170000	170000	170000	170000	170000
312000	312000	312000	312000	312000	312000
379000	379000	379000	379000	379000	379000
360000	360000	360000	360000	360000	360000
280000	280000	280000	280000	280000	280000
226000	226000	226000	226000	226000	226000
99000	99000	99000	99000	99000	99000
-301000	-301000	-301000	-301000	-301000	-301000

附录 2 优化算法 MATLAB 程序(部分)

```
% NSGA-II optimization algorithm with random walk strategy

maxgen = 100;           % 进化代数
sizepop = 200;          % 种群规模
pcross = 0.9;           % 交叉概率
pmutation = 0.2;        % 变异概率
lenchrom = [1 1];       % 变量字符串长度
bound = [35, 110; 1100, 13500]; % 变量范围
times = 4;
trace = [];
% 定义目标函数
fun = @(x) YourFunction(x);
for q = 1:times
    % 个体初始化
    individuals = struct('fitness', zeros(1, sizepop), 'chrom', []); % 种群结构体
    avgfitness = []; % 种群平均适应度
    bestfitness = []; % 种群最佳适应度
    bestchrom = []; % 适应度最好染色体
    % 初始化种群
    for i = 1:sizepop
        individuals.chrom(i,:) = Code(lenchrom, bound); % 随机产生个体
        x = individuals.chrom(i,:);
        individuals.fitness(i) = fun(x); % 个体适应度
    end
    % 找最好的染色体
    [bestfitness, bestindex] = max(individuals.fitness);
    bestchrom = individuals.chrom(bestindex,:); % 最好的染色体
```

```

    avgfitness = sum(individuals.fitness) / sizepop;           % 染色体的平均
适应度
    % 进化开始
    for i = 1:maxgen
        % 选择操作
        individuals = Select(individuals, sizepop);
        avgfitness = sum(individuals.fitness) / sizepop;
        % 交叉操作
        individuals.chrom = Cross(pcross, lenchrom, individuals.chrom, sizepop,
bound);
        % 变异操作
        individuals.chrom = Mutation(pmutation, lenchrom, individuals.chrom,
sizepop, [i maxgen], bound);
        % 计算适应度
        for j = 1:sizepop
            x = individuals.chrom(j,:);
            individuals.fitness(j) = fun(x);
        end
        % 找到最小和最大适应度的染色体及它们在种群中的位置
        [newbestfitness, newbestindex] = max(individuals.fitness);
        [worstfitness, worstindex] = min(individuals.fitness)
        % 代替上一次进化中最好的染色体
        if bestfitness < newbestfitness
            bestfitness = newbestfitness;
            bestchrom = individuals.chrom(newbestindex,:);
        end
        individuals.chrom(worstindex,:) = bestchrom;
        individuals.fitness(worstindex) = bestfitness;

```

```
% 记录每一代进化中最好的适应度和平均适应度  
trace = [trace; bestfitness avgfitness]  
end  
end
```

附录 3 动力学模型 MATLAB 程序(部分)

```

m = 5; g = 10; lc = 0.305; h2 = 0.063; h3 = 0.07; r1 = 0.002;
h = 0.111; h1 = 0.008; s0 = 0.004; d = 0.02; D = 0.04; r2 = 0.002;
A = pi * (r2)^2;
k = 50; % 弹簧常数
E = 1350; % 弹性模量
r = 0.15; % 张力计算中的 r 值
theta_range = 90:-1:0; % 角度范围从 90° 到 0°，步长为 -1
Te_values = zeros(size(theta_range)); % 存储不平衡力矩值
T2_values = zeros(size(theta_range)); % 存储 T2 力矩值

for i = 1:length(theta_range)
    theta = theta_range(i);

    % 弹簧压缩量的计算
    delta_s = (pi * r * theta / 360) * (1 - k / (A * E));

    % 绳索张力 Fz 的计算
    Fz = (k * ((pi * r * theta / 180) - (k * pi * theta * r) / (180 * A * E))) / ((pi * r * theta / 180)
    * (k - (k^2) / (A * E)));

    % 力 Fm 的计算
    Fm = Fz * sqrt(2 + 2 * cos(asin(2 * r1 / h1) + asin((r1 + r) / sqrt(h2^2 + h3^2 + 2 * h2 * h3
    * cos(deg2rad(theta))))));

    % 力 Fn 的计算
    Fn = Fz * sqrt(2 + 2 * cos(asin(2 * r1 / h1) + asin(r1 / (h - delta_s - s0))));

```

```
% 不平衡力矩 Te 的计算

Te = abs((m * g * lc * sin(deg2rad(theta)) - Fn * (h2 + h3) + Fm * h2 - d * r * Fz / D));

Te_values(i) = Te;


% T2 力矩的计算

T2 = 2*m * g * lc * sin(deg2rad(theta));

T2_values(i) = T2;

end
```

攻读硕士专业学位期间学术成果

参与项目：

- [1] 安徽省属公办普通本科高校领军骨干人才项目(青年皖江学者)
- [2] 安徽省重点研究与开发计划：基于生机多模态信息共融的助力行走型下肢外骨骼机器人产品研发(202004a05020013)
- [3] 产学研合作项目(横向项目)：搬运型 AGV 运动控制及作业调度系统研发，徐州徐工特种工程机械有限公司

论文发表情况：

- [1] 一种关节型协作机械臂力矩平衡机构及其控制方法 (已投稿；发明专利，导师一作，本人二作)。
- [2] Study on adaptive PD control of dexterous arm based on gravity compensation(EI收录； 本人一作)。

致谢

二十载求学路将尽，行文至此，我的研究生生涯即将画上一个句号。在研究和撰写本篇论文的过程中，我得到了许多人的支持和帮助，现在我想借此机会向他们表达最诚挚的感谢。

首先我想感谢我的导师汪步云教授，刚入学的我对本专业知识的认知十分浅薄有限，开头和过程都非常的不易，不懂如何选题和实验。汪老师对我论文的撰写和修改都给予了全面耐心的指导。

我的父母没有散文诗，他们的脸上都是岁月的痕迹，对于社会来说，他们都是非常平凡的人，但在我心中，他们是世界上最伟大的人，感谢父母的养育之恩，他们教会我成长，尊重我的选择，给予我无限的包容和关爱，感谢父母在我求学路途中给予的支持。

从校服到婚纱，你就是我的白月光，你是我心中的朱砂痣。感谢我的未婚妻侯雅林，在我求学之路上给予的关爱与支持。即将踏入社会，期待未来我们能携手共进，余生请多多指教。

感谢实验室的师兄弟们在学习中提的建议，感谢我的朋友和室友在生活中的包容和学业上的支持。再见之时，但愿听风起，不再见叶落，愿我们再见依旧如故，再见了，安徽工程大学。

尚德敏学 唯实惟新

