



汕 頭 大 學

SHANTOU UNIVERSITY

硕 士 学 位 论 文

题 目：基于约束多目标进化算法研究及其在机械
臂设计优化中的应用

英文题目：Research on constrained multi-objective
evolutionary algorithms and its application in
the design optimization of manipulator

姓 名 肖 杨 学 号 11409025

所在学院 工学院 导师姓名 范 衡

专 业 信息与通信工程

入学日期 2014 年 9 月 答辩日期 2017 年 5 月

学位论文原创性声明

本论文是我个人在导师指导下进行的工作研究及取得的研究成果。论文中除了特别加以标注和致谢的地方外，不包含其他人或其它机构已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在论文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律责任由本人承担。

作者签名： 肖杨 日期： 2017 年 6 月 1 日

学位论文使用授权声明

本人授权汕头大学保存本学位论文的电子和纸质文档，允许论文被查阅和借阅；学校可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、缩印或其它复制手段保存和汇编论文；学校可以向国家有关部门或机构送交论文并授权其保存、借阅或上网公布本学位论文的全部或部分内容。对于保密的论文，按照保密的有关规定和程序处理。

作者签名： 肖杨 导师签名： 范衡

日期： 2017 年 6 月 1 日 日期： 2017 年 6 月 1 日

摘要

国务院印发了《中国制造 2025》规划,根据规划,机器人将成为重点领域之一。规划指出,围绕工业机器人、特种机器人,服务机器人应用需求,积极研发新产品,促进机器人标准化、模块化发展,扩大市场应用。突破机器人本体、关键零部件及系统集成设计制造等技术瓶颈。制造大国转型升级成“智造”强国成为发展新趋势,毫无疑问工业机器人无疑是我国制造业改革的重点领域之一。本文要研究的一个重点就是利用智能进化算法对机械臂进行优化设计。结合机械臂结构特点,以机械臂运动学和动力学理论研究为基础,以机械臂几何参数和传动系统参数为研究变量,以可操作性和重量为优化目标,利用带约束的多目标进化算法对机械臂的结构以及传动系统进行优化设计。以实现了对现有机械臂轻质化和可操作性提高的目的。本文中用于研究对象的机械臂,一是 UR5 (Universal Robot 5) 机械臂,另一是实验室自主研发的机械臂,论文的主要研究工作如下:

(1) 针对 UR5 和自主研发的机械臂进行运动学建模。建立 D-H 坐标系及运动学方程,求解机械臂的正逆运动学。在机械臂正运动学方程的基础上,分别利用蒙特卡洛法和 MATLAB 机器人工具箱对机械臂的工作空间进行求解,得到机械臂工作空间三维云图,从两种方法的对比中,相互验证了求解结果的合理性。

(2) 对优化设计问题进行描述。在满足机械臂性能的前提下,希望得到质量更轻,可操作性更高的机械臂。结合机械臂的结构确定机械臂的几何参数以及传动系统中电机和减速器的型号作为设计变量。同时,在进行优化时必须满足机械臂的几何参数约束,以及传动系统中扭矩,转速的约束。

(3) 利用三种改进的约束多目标优化算法对机械臂的设计优化问题进行求出最优解。这三种算法分别是 MOEAD-CDP、MOEAD-ACDP、MOEAD-IEps。MOEAD-CDP 提出基于惩罚函数的一种约束处理方法,而不要任何惩罚参数。MOEAD-ACDP 提出基于角度的支配原则。MOEAD-IEps 提出一种改进的 ϵ 约束处理方法。

(4) 针对已优化出来的 Pareto 前沿上的解进行分析,研究最优解之间的关系。并利用 Solidworks 二次开发和最优解自动装配出具有最优设计变量的机械

臂模型。

关键词：约束多目标优化；机械臂；可操作性；轻质化。

Abstract

The State Council issued the "made in China 2025" plan. According to the plan, the robot will become one of the key areas in nowadays. Around industrial robots, special robots and service robot application's needs, the plan pointed out that it's necessary to actively develop new products, promote the standardization of robots, and modular development, and expand market applications. Break through the bottleneck of robot body, key components and system integration design and manufacture. Manufacturing transformation becomes a new trend of development. There is no doubt that industrial robots is undoubtedly one of the key areas of China's manufacturing sector reform. One of the key points of this paper is to use the intelligent evolutionary algorithm to optimize the manipulator. According to the mechanical arm structure and the manipulator kinematics and dynamics theory, we finally determine to use the manipulator geometry parameters and drive train parameters as the research variables, manipulability and weight as the optimization goal. And constrained multi-objective evolutionary algorithms will be used in manipulator optimization design. In order to realize the purpose of improving the light weight and manipulability of the existing manipulator. In this paper, there are two research object of the robot arm, one is UR5 (Universal Robot 5), and the other is the independent development robot arm, the main research work is as follows:

(1) Kinematics modeling for UR5 and independently developed manipulator. The D-H coordinates and kinematics equations are established to solve the forward and inverse kinematics of the manipulator. Based on the kinematics equations of the manipulator, using the Monte Carlo method and MATLAB robot toolkit to obtain the three-dimensional working space of the manipulator. Then comparing these two methods to solve the rationality of mutual authentication.

(2) Description of the optimization design problem. Under the premise of satisfying the performance of the mechanical arm, the mechanical arm with lighter weight and higher manipulability is expected to be obtained. According to the structure

of the manipulator, the geometric parameters and the type of the motor and reducer in the drive train system are taken as the design variables. At the same time, the optimization of the manipulator must meet the constraints of the geometric parameters of the manipulator, as well as the transmission system torque, speed constraints.

(3) The optimal solution of the manipulator's design optimization problem is obtained by using the three improved constrained multi-objective optimization algorithms. These three algorithms are MOEAD-CDP, MOEAD-ACDP, MOEAD-IEps. MOEAD-CDP proposes a constraint handling method based on penalty function without any penalty parameters. MOEAD-ACDP proposes a new constraint handling method named Angle-based Constrained Dominance Principle. MOEAD-IEps proposes an improved epsilon constraint handling method embedded in the multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition constraint handling method.

(4) The relationship between the optimal solutions at the optimized Pareto front will be studied. By using the Solidworks second development and the optimal solution, the manipulator model with optimal design variables is automatically assembled.

Keywords: constrained multi-objective optimization, manipulator, manipulability, light weight.

目 录

摘 要.....	I
Abstract	III
目 录.....	V
第 1 章 绪 论	1
1.1 机械臂优化的研究背景及意义	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 机械臂优化	3
1.3 机械臂优化国内外研究现状和发展趋势	4
1.5 本文的研究内容	6
第 2 章 串联机械臂运动学分析	8
2.1 引言	8
2.2 运动学基础	8
2.2.1 空间位置描述	8
2.2.2 旋转变换.....	9
2.2.3 刚体运动及其变换.....	11
2.3 正运动学分析	13
2.3.1 运动链	13
2.3.2 D-H 坐标系	14
2.4 逆运动学分析	16
2.4.1 机械臂逆运动问题	16
2.4.2 机械臂逆运动求解	16
2.5 机械臂运动学建模.....	18
2.5.1 UR5 机械臂运动学建模.....	18
2.5.2 自主研发机械臂运动学建模.....	22
2.6 机械臂工作空间及可操作性.....	25
2.6.1 工作空间定义	25
2.6.2 工作空间求解	25

2.7 可操作性	28
2.7.1 运动学奇异点	28
2.7.2 可操作性椭圆	29
第 3 章 机械臂优化问题描述	32
3.1 引言	32
3.2 设计变量	32
3.2.1 几何变量设计	33
3.2.2 传动系统参数设计	34
3.3 优化目标	35
3.3.1 重量最轻	35
3.3.2 可操作性最大	36
3.4 约束条件	37
3.4.1 传动系统建模	37
3.5 本章小结	39
第 4 章 约束多目标进化算法优化结果及分析	40
4.1 实验设计	40
4.2 MOEAD-CDP 优化	42
4.2.1 UR5 优化结果	43
4.2.2 自主研发机械臂优化结果	44
4.3 MOEAD-ACDP 优化	45
4.3.1 UR5 优化结果	45
4.3.2 自主研发机械臂优化结果	46
4.4 MOEAD-IEps 优化	47
4.4.1 UR5 优化结果	47
4.4.2 自主研发机械臂优化结果	48
4.5 实验结果分析	48
4.5 最优解的新机械臂设计	51
第 5 章 总结与展望	55
5.1 结论	55
5.2 展望	56
参考文献	58

致 谢	62
附 录	63
攻读硕士学位期间主要的工作成果	63

第1章 绪论

1.1 机械臂优化的研究背景及意义

1.1.1 研究背景

继德国提出工业 4.0 之后,世界制造业强国纷纷提出了自己在制造业方面的崭新构想。2015 年,中国提出了中国制造 2025,重点强调了用信息化和工业化两化深度融合来引领和带动整个制造业的发展。当前,全球制造业发展格局和我国经济发展环境发生重大变化,必须紧紧抓住当前难得的战略机遇,突出创新驱动,优化政策环境,发挥制度优势,实现中国制造向中国创造转变,中国速度向中国质量转变,中国产品向中国品牌转变。围绕这些目标,工业机器人的发展和应用,成为了中国制造业走向高端化和智能化的重中之重。

随着工业机器人向更深更广方向的发展以及机器人智能化水平的提高,机器人的应用范围还在不断地扩大,已从汽车制造业推广到其他制造业,进而推广到诸如采矿机器人、建筑业机器人以及水电系统维护维修机器人等各种非制造行业。此外,在国防军事、医疗卫生、生活服务等领域机器人的应用也越来越多。工业机器人和服务机器人的市场规模持续扩大。根据 IFR^[1] 最新数据统计,见图 1-1,2015 年全球工业机器人销量首次突破 25 万台,其中亚洲销量约占全球销量的 2/3。中国、韩国、日本、美国和德国的总销量占全球销量的 3/4。中国、美国、韩国、日本、德国、以色列等国是近年工业机器人技术、标准及市场发展较活跃的地区。1998-2014 年,全球工业机器人销量处于稳步增长态势;特别是 2005-2014 年间,工业机器人销量迅速增长,新装工业机器人年均增长速度约为 14%。图 1-2 显示近年来全球工业机器人销售量及未来几年的预测。

目前,世界著名工业机器人公司在我国市场分布主要可以分为:日系、欧系两种。日系中的著名品牌主要有安川、OTC、松下、发那科、川崎等公司的产品;欧系品牌主要有德国 KUKA、德国 CLOOS、瑞典 ABB、意大利 COMAU 及奥地利 IGM 公司。这些公司已经成为其产业部署所在地区的支柱性产业,不仅对于当地的制造业发展起到了重要的推动作用,也为中国工业机器人制造业的发展

起到了不可忽视的影响。受其影响和国家大政方针的指引，国内工业机器人产业虽然起步较晚，但增长的势头非常强劲。当前国产机器人著名品牌主要有广州启帆、沈阳新松、安徽埃夫特、广州数控、上海新时达等。

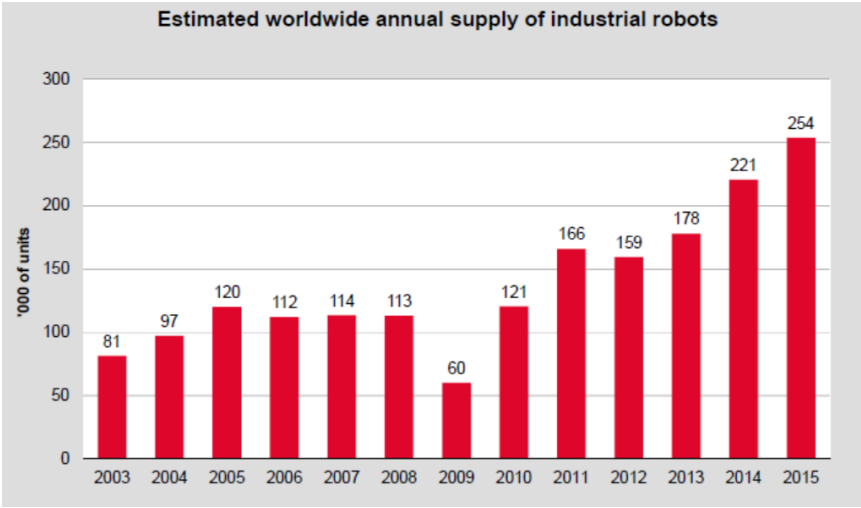


图 1-1 全球工业机器人历年销量

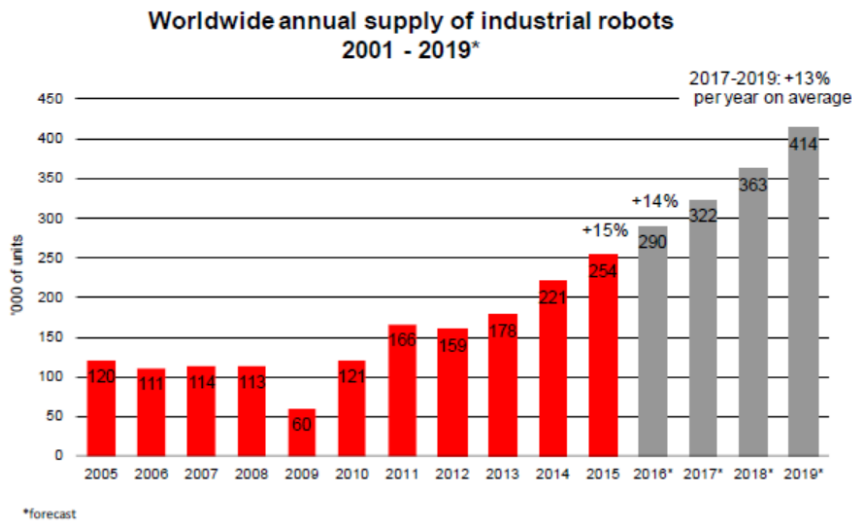


图 1-2 全球工业机器人销量预测

1.1.2 研究意义

如图 1-3，对比不同外资厂商 2015 年的销售情况，外资厂商仍以四大家族为首，即发那科、ABB、安川和库卡。四家厂商合计销售占外资品牌总销售量的比例超过 50%，发那科销售量最高，占比达到 15.5%。国产品牌目前只能在机器人性能和稳定性方面要求较低的行业分散发展。另外，中国劳动力价格上涨推高

生产成本。自 2008 年 1 月 1 日, 新劳动法实施以来, 中国各地上调了最低工资水平, 沿海地区劳动力成本不断攀升, 出现民工荒, 中国人口红利渐失。

可见, 对于机械臂的优化设计研究对于我国从制造大国向“智造”强国转型有着非常重要的意义。在中国甚至全球的工业机械臂市场占据一席之地。同时伴随着不断提高我国工业企业自动化水平的不断提高, 并且逐渐成为自动化生产线的方式。

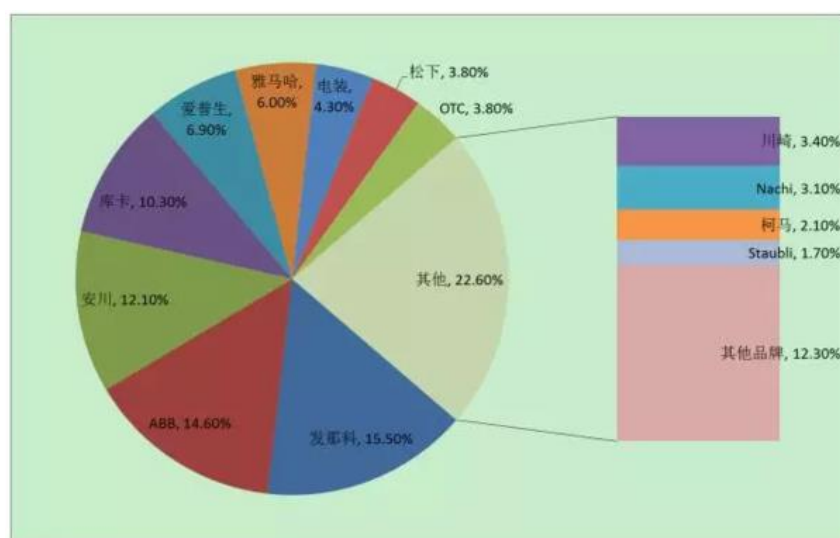


图 1-3 不同机械厂商在我国市场份额

1.2 机械臂优化

机器人是自动执行工作的机器装置。它既可以接受人类指挥, 又可以运行预先编排的程序, 也可以根据以人工智能技术制定的原则纲领行动, 主要用于协助或取代人类的部分工作, 在工业、医学、农业、建筑业甚至军事等领域中均有重要用途。机器人机制的选择取决于所需要完成的任务, 以及机器人的位置和它们的尺寸和结构。以往这些参数的选择是凭直觉和经验获得, 因此制定一套可用于机器人控制和路径规划的系统可操作能力测定方法是必不可少的。从这个角度出发, 提出了可操作性的概念’。优化过程中的一般任务是最大限度增加受益数量或者减小某些参数的不良效果。合理的问题定义, 配合适当的优化工具即可从经济技术角度显著提高产品的质量。优化方法用于机器人逆运动求解时, 不仅效率高, 还可获得误差很小的精确解。选择则函数进行优化, 可显著提高机器人末端执行

器的精密度与准确度。首先设定杆件长度的初始值,通过逆运动求解每个关节对应的角度,然后使用该函数改变杆件长度,不断进行优化。这种方法可同时优化杆件的长度与关节的夹角。这个优化过程的决定因素为可操作性指数,即机器人末端执行器的可操作性。此属性可用于获得更好的设计参数以及与计算出的关节角度相关的最佳姿态。

1.3 机械臂优化国内外研究现状和发展趋势

从国际机器人联合会的统计^[1],分析得出,自动化的趋势和广泛的应用使得工业机器人的需求大大增加。当前,机器人被认为是最具影响力的技术之一,全球多国将机器人技术列为国家重大计划。美国将机器人技术重要性等同于互联网技术。欧盟计划投入大量的资金来推动未来机器人的发展。日本将机器人产业也作为一个重点扶持的发展方向来对待。我国近年来在机器人的研发与推广中也进行了很大的努力,尤其在 2015 年 5 月国家颁布《中国制造 2025》文件,制造业成为国家强国战略重要一环,明确将机器人技术作为推动的重点进行说明,这为机器人技术的发展带来一个新的机遇。

在机械臂基础理论研究中,各国学者都取得了很多的成就,得了丰硕的成果和成功的应用案例。在机械臂优化设计方面,通常从轻质化、能耗、可操作性、灵巧性、运行周期时间等几个方面考虑,这些机械臂的优化设计问题得到了一定的解决,但迫切地需要探索更有效的机械臂设计优化方法。特别是,在机械臂设计过程中,如何确定要优化的目标,如何确定可被设定决策变量的参数,优化问题涉及到哪些约束条件,得到的最优解之间有何联系,仍然是以后研究的重点。现在来看看现有的国内外关于机械臂优化的工作。

关于机械臂轻量化的优化设计。一个著名的例子就是 DLR 机械臂臂^[2]被开发轻型的能在人类环境中进行人机交互的。机械臂的轻质化优化设计很大程度上与传动系统优化设计相关。Chedmail 和 Gautier^[3]提出了一种用于机器人关节执行器选择的最优化方法,该方法将所有驱动器的总质量最小作为优化目标。在参考文献[4]中提出了一种传动系设计优化方法,该方法可以最大限度地减少机器人的重量,同时选择最优的传动系统。Seo^[5]提出了机器人关节模块轴向磁通永磁无刷直流电机的设计方案,具有转矩密度高、成本低、结构紧凑等特点。为了

使机械臂更安全,更轻,应用于人机共存的环境, Park^[6] 提出了紧凑型传动系统的优化设计。Roos^[7] 提出了一种电机和减速器选型优化方法,优化目标是重量最小。Zhou^[8] 提出一种新的机械臂优化结构及传动系统设计方法,最小化机械臂的重量。

轻量级的优化设计可能会导致机械臂连杆刚度不够,这使得系统容易出现不良振动。因此,需要满足某些设计约束,因此就有了有限元分析用于机器人手臂的设计和结构优化^[9-11]。基于有限元分析的拓扑优化方法应用于机械臂结构优化^[12]。集成模块化设计、动力学仿真和有限元分析方法,设计一种轻质化、高刚度、紧凑型机械臂^[13-14]。

可操作性是机械臂在执行任务是一个重要指标。Yoshikawa 第一次在关节速度层面建立机械臂可操作性的定量计算^[15]。文献[22]中, K. Nagatani 等人在给定机械臂任务路径,利用冗余节点方法优化移动机械臂的可操作性。Ramírez Henao^[16] 等人将可操作性指数作为一个用于焊接的串联机器人轨迹规划的多目标优化方法的一个参数。文献^[21]中提出混合机械臂的多目标优化,其中涉及到不同类型的可操作性。特别地,一个重大的贡献是将可操作性的概念从单一机械臂扩展到多机械臂系统^[17],作者将双臂机械臂的可操作性椭圆近似为单臂机械臂可操作性椭圆的交叉。文献^[18]中的方法将可操作椭圆定义借助于一个闭环运动学分析扩展到多臂协同操作任务中。进一步的工作在^[19-20]中。文献^[21]提出了一种鲁棒多目标优化方法,该方法用于设计了一种平面五连杆并联机械臂,在这项工作中的鲁棒性是通过最小化机械臂性能指标(跟踪误差和可操作性)的敏感性来强调的。同时有许多研究移动平台搭载机械臂的运动规划优化^[22-24]。

机械臂能耗优化方面。在过去,众多的研究关注于关节执行器的能量优化^[25-26]。近年来文献开始对机器人的能耗有了一定的研究,如牛顿算法^[27],遗传算法^[28]和进化免疫克隆算法^[29]。Ming 提出了一个实数编码遗传算法,用于最小化因热量损失而造成的能耗^[30]。紧接着研究关注于基于交流电机的机器人能量优化问题。在文献[31-32]中,机器人的能耗优化问题是通过简化交流电机模型到直流电动机模型。Hansen^[33]考虑了电能的存储和转换。

拓扑结构优化方面。Simon Foucault^[34] 等人提出了一种新的方法用于 2 自由度机械臂的几何空间设计问题,该使用旋量参数法来描述 R-R 位移的运动学拓

扑关系。Ge^[35]等人提出了基于范例学习的遗传算法,并将该方法成功的用于连续体结构拓扑优化,取得了很好的效果。Zhang^[36]对硅片传输机器人手臂进行了拓扑优化设计,得到了刚度增加的手臂结构。Albert Albers^[37]等人结合拓扑优化理论,以 ARMAR III 型机器人的为研究对象,对其中一个手臂进行了优化设计。S. Sakata^[38] 等人讨论了基于位移的连续体拓扑优化的新方法,通过新的线性逼近法则和非线性逼近系数对优化算法的优化,减低了拓扑优化计算时的计算时间。

前面描述了机械臂优化的工作,值得一提的是如果实现自动设计优化,将是一个伟大的突破,实际上已经有了少量这方面的研究,未来极可能成为重点研究的领域。著名机器人公司 ABB 研发团队和瑞典林雪平大学 Peter Krus 教授小组,在机器人系统自动设计优化方面开展了深入的研究。在他们公开发表的论文中,就明确定义了设计自动化(Design Automation)的概念^[39]。在林雪平大学和 ABB 公司合作的研究项目中,设计自动化是以几何模型的设计自动化为中心展开的,主要采用经典的多目标进化算法作为优化方法来对机器人的设计进行优化^[40]。另一个代表性工作来自于 Hod Lipson 教授在 2000 年用进化计算的方法在计算机上自动设计出了一个可以移动的机器人系统^[41]。其后又在该方向做出了一些新的成果^[42]。Erik Goodman 教授所领导的小组也开始在机电系统设计自动化领域进行了开创性的研究。他们主要使用了一种结合基因编程和功率键合图 BGGP (Bond Graph & Genetic Programming) 的方法,对一类机电系统成功地进行了自动设计^[43]。

1.5 本文的研究内容

本文要研究的一个重点就是利用智能进化算法对机械臂进行优化设计。结合机械臂结构特点,以机械臂运动学和动力学理论研究为基础,以机械臂几何参数和传动系统参数为研究变量,以可操作性和重量为优化目标,利用带约束的多目标进化算法对机械臂的结构以及传动系统进行优化设计。以实现对现有机械臂轻质化和可操作性提高的目的。本文中用于研究对象的机械臂是 UR5 和实验室自主研发的机械臂,论文完成主要研究工作如下:

第二章针对 UR5 和自主研发的机械臂进行运动学建模。建立 D-H 坐标系及运动学方程,求解机械臂的正逆运动学。在机械臂正运动学方程的基础上,分别

利用蒙特卡洛法和 MATLAB 机器人工具箱对机械臂的工作空间进行求解，得到机械臂工作空间三维云图，从两种方法的对比。

第三章对优化设计问题进行描述。在满足机械臂性能的前提下，希望得到质量更轻，可操作性更高的机械臂。结合机械臂的结构确定机械臂的几何参数以及传动系统中电机和减速器的型号作为设计变量。同时，在进行优化时必须满足机械臂的几何参数约束，以及传动系统中扭矩，转速的约束。

第四章利用 MOEAD-CDP、MOEAD-ACDP、MOEAD-IEps 这三种改进的约束多目标优化算法对本文归结的机械臂的设计优化问题进行优化，设计了优化实验，分别求出 UR5 和自主研发机械臂的最优解，并对解进行了一定的分析，利用 Solidworks 二次开发和合理的最优解自动化设计出新的机械臂模型。

第 2 章 串联机械臂运动学分析

2.1 引言

运动学是机械臂优化研究的基础,它仅仅考虑机械臂的运动而不受其他力的影响。主要研究机械臂各连杆之间相互的运动关系。主要分析位置、速度和加速度和所有关于位置的高阶导数(相对于时间或者任何其他变量)^{[30][31]}。因此,运动学基本上是指几何和时间为基础的运动特性,我们称之为机械臂的位置和方向的运动特性。根机械臂的运动学分为正运动学及逆运动学。假设已知各关节的运动参数,求解机械臂末端的运动参数称为正运动学;反之,假设已知机械臂末端运动参数反推各关节的运动状态称为逆运动学。当前,针对运动学求解问题主要的方法有 D-H 法和旋量法^{[33][34]}。其中 D-H 方法是由 Denavit 和 Hartenberg^[35]提出,用于 D-H 坐标系的建立,以及运动学方程的构建。而旋量理论由 Murry 等以线性代数和矩阵理论为基础提出,用齐次坐标来表示刚体运动。两种方法各有优缺点,在本文描述的机械臂的优化工作中,采用 D-H 方法来进行运动学分析。

2.2 运动学基础

2.2.1 空间位置描述

刚体在空间中的位姿需要 6 个独立的变量来描述,在机器人的研究中通常是将空间位置 (x, y, z) 以及欧拉角 $(pitch, yaw, roll)$ 这 6 个变量来表示,本小节将描述空间位置的表示,欧拉角的描述在后面章节呈现,为了便于理解,这里用二维空间的位置来说明,如图 2.1 所示,在二维空间存在两个坐标系 $o_0x_0y_0$ 和 $o_1x_1y_1$,以及点 p ,我们可以相对于任何一个坐标来表示 p 点的坐标。例如在坐标系 $o_0x_0y_0$ 中表示为 $(1, 2)^T$,而在坐标系 $o_1x_1y_1$ 中表示为 $(-0.59, 1)^T$ 。

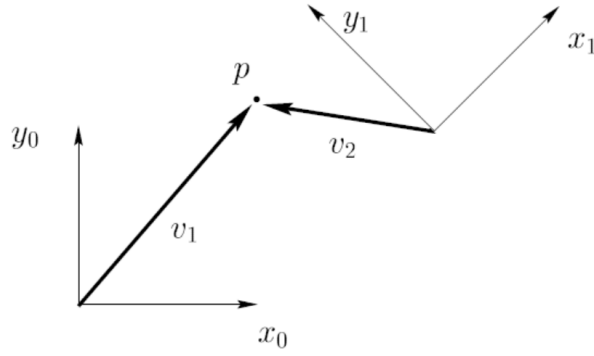


图 2-1 二维空间位置的描述

因此，对于空间中的一点在不同参考坐标系中的表示并不相同，为了区别，通常的做法是加入上标，还是如图 2.1， p 点在两个坐标系中的表示分别可以写成：

$$p^0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix}, p^1 = \begin{bmatrix} -0.59 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

同样的，坐标系 $o_1x_1y_1$ 的原点 o_1 在坐标系 $o_0x_0y_0$ 中的表示，以及坐标系 $o_0x_0y_0$ 的原点 o_0 在坐标系 $o_1x_1y_1$ 中的表示可分别写为：

$$o_1^0 = \begin{bmatrix} 1.41 \\ 1 \end{bmatrix}, o_0^1 = \begin{bmatrix} -2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

2.2.2 旋转变换

为了表示一个刚体相对于另一个刚体的相对位置和方向，可以在每个刚体上建立坐标系，然后指定这些坐标系之间的几何关系。其中包含坐标系的旋转变换和平移变换，在本小节中，主要说明从一个坐标系到另一个坐标系的旋转变换。开始同样还是在二维空间进行旋转，然后推广到三维空间。

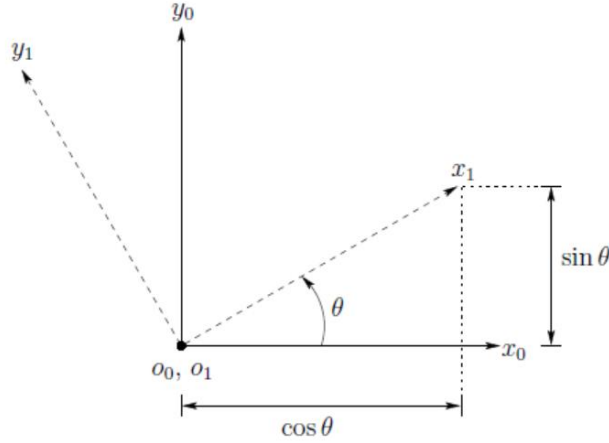


图 2-2 二维空间的坐标系旋转

图 2-2 显示的两个坐标系，其中坐标系 $o_1x_1y_1$ 是由坐标系 $o_0x_0y_0$ 绕原点逆时针旋转 θ 角度获得。通常用一种形式的矩阵来描述从坐标系 $o_0x_0y_0$ 到坐标系 $o_1x_1y_1$ 的相对变化，称为旋转矩阵（Rotation Matrix）。旋转矩阵有许多特殊性质，将在下面讨论。如图在二维的情况下，可以计算出完整的旋转矩阵如下：

$$R_1^0 = \begin{bmatrix} x_1 \cdot x_0 & y_1 \cdot x_0 \\ x_1 \cdot y_0 & y_1 \cdot y_0 \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

需要注意的是，这里同样用上标来表示参考坐标系，因此上式中的 R_1^0 的列向量（单位向量）表示坐标系 $o_1x_1y_1$ 的坐标轴在坐标系 $o_0x_0y_0$ 中的表示。又知道 $\cos\theta = x_1 \cdot x_0$ 等一系列条件，因此旋转矩阵可改写为：

$$R_1^0 = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

相反，如果想要得到从坐标系 $o_1x_1y_1$ 相对于坐标系 $o_0x_0y_0$ 的旋转矩阵，可以得到如下形式：

$$R_0^1 = \begin{bmatrix} x_0 \cdot x_1 & y_0 \cdot x_1 \\ x_0 \cdot y_1 & y_0 \cdot y_1 \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

上面所描述的投影技术可以很好地扩展到三维的情况下。例如在三维的情况下，坐标系 $o_1x_1y_1z_1$ 的相对于坐标系 $o_0x_0y_0z_0$ 的旋转矩阵可表示为：

$$R_1^0 = \begin{bmatrix} x_1 \cdot x_0 & y_1 \cdot x_0 & z_1 \cdot x_0 \\ x_1 \cdot y_0 & y_1 \cdot y_0 & z_1 \cdot y_0 \\ x_1 \cdot z_0 & y_1 \cdot z_0 & z_1 \cdot z_0 \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

在三维空间的旋转矩阵已经给出，那么可以推导出三个最基本的旋转矩阵，即对于坐标系 $o_0x_0y_0z_0$ 分别绕 x, y, z 三个轴旋转 θ 角度而得出的旋转矩阵如式 (2-7)，空间中所有两个矩阵的旋转矩阵都是由这三个基本旋转矩阵组合而

成。

$$R_{x,\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}, R_{y,\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}, R_{z,\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

旋转变换分为两种情况，第一种是相对于当前坐标系的旋转，在式(2-8)中的矩阵 R_1^0 代表坐标系 $o_0x_0y_0z_0$ 和 $o_1x_1y_1z_1$ 之间的旋转变换。假设现在多加一个坐标系旋转，即坐标系 $o_2x_2y_2z_2$ 是通过 $o_1x_1y_1z_1$ 绕着在自身坐标系中表示的固定轴旋转而得到，经过推导可以得出以下结论，从 $o_0x_0y_0z_0$ 到 $o_1x_2y_2z_2$ 的旋转变换可表示为：

$$R_2^0 = R_1^0 R_2^1 \quad (2-8)$$

第二种是相对于固定坐标系的旋转，例如坐标系 $o_0x_0y_0z_0$ 相对自身坐标系中表示的轴旋转后得到 $o_1x_1y_1z_1$ ，然后 $o_1x_1y_1z_1$ 仍然相对在 $o_0x_0y_0z_0$ 中表示的轴旋转后得到 $o_2x_2y_2z_2$ ，经过推导可以得出类似结论，从 $o_0x_0y_0z_0$ 到 $o_1x_2y_2z_2$ 的旋转变换可表示为：

$$R_2^0 = R_2^1 R_1^0 \quad (2-9)$$

2.2.3 刚体运动及其变换

前文中已经描述如何表示位置和方向。首先结合这两者来定义本小节中的刚体运动，然后，我们推导出一个高效的表示刚体运动的矩阵，即齐次变换矩阵。

刚体运动由纯平移和纯旋转组成。假设首先对坐标系 $o_0x_0y_0z_0$ 施加一个 R_1^0 旋转得到 $o_1x_1y_1z_1$ ，紧接着施加一个 d_1^0 的平移（相对于 $o_0x_0y_0z_0$ ）得到 $o_2x_2y_2z_2$ 。空间中一点 p 在坐标系 $o_0x_0y_0z_0$ 和 $o_1x_1y_1z_1$ 中的分别表示为：

$$p^0 = R_1^0 p^1 + d_1^0 \quad (2-10)$$

$$p^1 = R_2^1 p^2 + d_2^1 \quad (2-11)$$

对于将式(2-11)代入式(2-10)，可得：

$$p^0 = R_1^0 R_2^1 p^2 + R_1^0 d_2^1 + d_1^0 \quad (2-12)$$

由于 p^0 和 p^2 之间的关系也是一个刚体运动，我们同样可以描述为：

$$p^0 = R_2^0 p^2 + d_2^0 \quad (2-13)$$

比较式(2-12)和式(2-13)，可得到下式的关系：

$$R_2^0 = R_1^0 R_2^1 \quad (2-14)$$

$$d_2^0 = d_1^0 + R_1^0 d_2^1 \quad (2-15)$$

很容易发现，假设存在一长串的刚体运动序列，式(2-12)的计算将迅速变为非常棘手。下面，本小节将展示如何将刚体运动利用矩阵形式来表示以简化计算。

事实上，式(2-14)和式(2-15)等价于下面的矩阵恒等式：

$$\begin{bmatrix} R_1^0 & d_1^0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_2^1 & d_2^1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1^0 R_2^1 & R_1^0 d_2^1 + d_1^0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

其中 0 表示行向量 $(0,0,0)$ ，式(2-16)显示刚体运动可由下面的矩阵形式表示：

$$H = \begin{bmatrix} R & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; R \in SO(3), d \in \mathbb{R}^3 \quad (2-17)$$

其中 R 表示旋转矩阵， d 表示平移向量，我们知道在 2.2.2 节中给出三个基本的旋转矩阵，本小节继续给出关于三个坐标的旋转和平移，一共六个其次变换矩阵：

$$Trans_{x,a} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; Rot_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha & -s\alpha & 0 \\ 0 & s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-18)$$

$$Trans_{y,b} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; Rot_{y,\beta} = \begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-19)$$

$$Trans_{z,c} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; Rot_{z,\gamma} = \begin{bmatrix} c\gamma & -s\gamma & 0 & 0 \\ s\gamma & c\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-20)$$

同样的，对于 4×4 的其次转换矩阵与 3×3 的旋转矩阵具有类似的性质。即如果是相对于当前坐标系的刚体运动，那么满足：

$$H_2^0 = H_1^0 H_2^1 \quad (2-21)$$

如果是相对于固定坐标系的刚体运动，则满足：

$$H_2^0 = H_2^1 H_1^0 \quad (2-22)$$

2.3 正运动学分析

2.3.1 运动链

如图 2-3 所示，机械臂作为一种机械装置可被认为是一个动学链。在本文中要优化的机械臂对象是串联 6 自由度机械臂，各关节均为旋转关节，因此在本文中只考虑关节为旋转关节的情况，而不考虑平移关节。

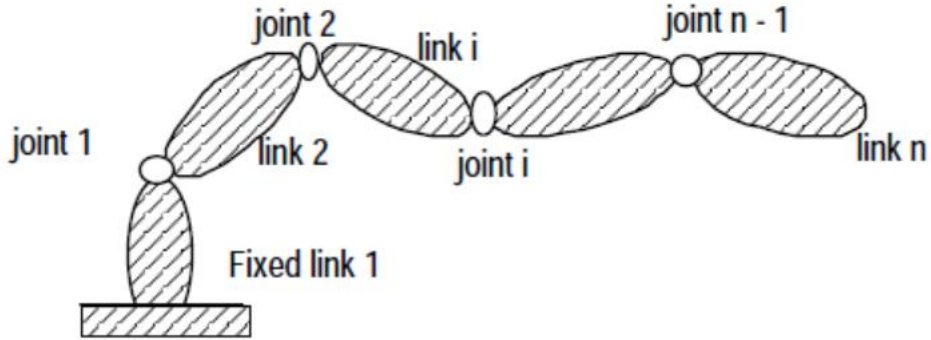


图 2-3 串联机械臂运动链

一个包含 n 个关节的串联机械臂有 $n + 1$ 个连杆，每个关节连接两个连杆。从基座 (Base) 开始标记关节序号为 $1, 2, \dots, n$ ，标记连杆序号为 $0, 1, \dots, n$ 。对于第 i 个关节，我们表示为一个关节变量 $q_i = \theta_i$ ，由于是旋转关节，因此 θ_i 表示第 i 个关节的角度值。现在假设 A_i 表示坐标系 $o_i x_i y_i z_i$ 相对于坐标系 $o_{i-1} x_{i-1} y_{i-1} z_{i-1}$ 的变换矩阵，因此 A_i 表示一个关于变量 q_i 的函数：

$$A_i = A_i(q_i) \quad (2-23)$$

假设用三维向量 o_n^0 表示机械臂末端 (End-effector) 相对于基座坐标系的位置和方向，用 3×3 矩阵 R_n^0 表示旋转矩阵，那么从 0 坐标系到 n 坐标系的齐次变换矩阵为 H ：

$$H = \begin{bmatrix} R_n^0 & o_n^0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-24)$$

$$H = T_n^0 = A_1(q_1) \dots A_n(q_n) \quad (2-25)$$

每一个其次变换矩阵 A_i 的形式为：

$$A_i = \begin{bmatrix} R_i^{i-1} & o_i^{i-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-26)$$

因此，

$$T_j^i = A_{i+1} \dots A_j = \begin{bmatrix} R_j^i & o_j^i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-27)$$

其中矩阵 R_j^i 表示坐标系 $o_j x_j y_j z_j$ 相对于坐标系 $o_i x_i y_i z_i$ 的旋转变换，并且有：

$$R_j^i = R_{i+1}^i \dots R_j^{j-1} \quad (2-28)$$

坐标向量 o_j^i 的形式为：

$$o_j^i = o_{j-1}^i + R_{j-1}^i o_j^{j-1} \quad (2-29)$$

2.3.2 D-H 坐标系

对于 $n - link$ 串联机械臂的运动学分析是非常复杂的，下面介绍的公约将大大简化分析过程。在机器人应用中一种用来选择参考坐标系的公约是 D-H(Denavit-Hartenberg)公约。

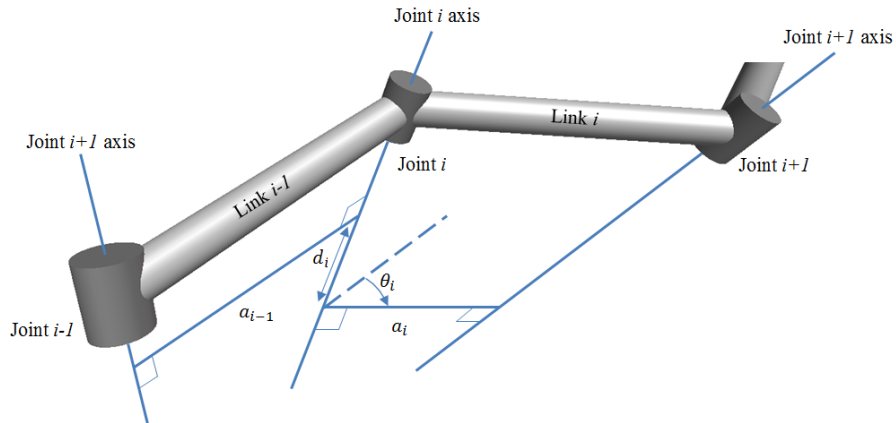


图 2-4 串联机械臂 D-H 描述

欧拉定理粗略地表明，在三维空间中的每个运动可以表示为围绕某个轴的旋转以及相对这个轴的平移的组合。这个定理使得对开环运动链的正运动学分析形成一些计算方法，D-H 方法就是其中一种。D-H 是基于数学归纳的思想，因此 D-H 法只能用于开环的运动链，对于机械臂每个关节 D-H 坐标系的建立，都要满足一定的规则，如图 2-4，对于第 i 个关节而言：

- ① 坐标系 i 的原点位于关节 $i+1$ 的轴线和关节 i 和 $i+1$ 轴线的公垂线的交点；
- ② 满足轴 z_i 与关节 $i+1$ 轴线共线前提下，轴正方向可以任意选取；

③ 轴 x_i 与和关节 i 和 $i+1$ 轴线的公垂线共线, 并且从关节 i 指向 $i+1$;

④ 使用右手定则确定轴 y_i 。

任意串联机械臂的每个连杆均可以由四个 D-H 参数来描述。无论实际中每个连杆链接两个关节的物理组成如何, 它们的相对位置都可以用两个参数 a_i 和 α_i 来描述, 同样的, 相邻两个两个连杆的相对位置可以用 d_i 和 θ_i 来描述:

① a_i : 关节 i 与 $i+1$ 轴线的公垂线长度, 通常是连杆的长度;

② α_i : 关节 i 与 $i+1$ 轴线相差的角度, 也被称为连杆间的扭曲角;

③ d_i : 关节 $i-1$ 与 i 轴线的公垂线和关节 i 与 $i+1$ 轴线的公垂线的偏移距离, 也被称为连杆间的偏移量。

④ θ_i : 关节 $i-1$ 与 i 轴线的公垂线和关节 i 与 $i+1$ 轴线的公垂线的夹角。这也被称为关节角度。

因此, 每个齐次变换矩阵 A_i 表示为由四个基本变换的结果:

$$\begin{aligned}
 A_i &= Rot_{z,\theta_i} Trans_{z,d_i} Trans_{x,a_i} Rot_{x,\alpha_i} \\
 &= \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & 0 \\ s\theta_i & c\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha_i & -s\alpha_i & 0 \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{2-30}$$

试想, 给出各关节的角度值, 就可以计算出全部的齐次变换矩阵 A_i , 这样末端坐标系相对基座坐标系的变换矩阵也可以得出:

$$T_n^0 = A_1 A_2 \dots A_n \tag{2-31}$$

假设 p^n 表示在基座坐标系中一点的坐标, 那么空间中这一点在世界坐标系, 也即基座坐标系中的表示为:

$$p^0 = T_n^0 p^n = A_1 A_2 \dots A_n p^n \tag{2-32}$$

2.4 逆运动学分析

2.4.1 机械臂逆运动问题

在本小节中，首先描述机械臂一般的逆运动学问题。之后，描述运动解耦的原则，以及如何利用它来简化机械臂逆运动学的计算。利用运动学解耦，我们可以独立地考虑位置和方向的问题。主要采用几何法来解决位置问题，而用欧拉角参数化解决方向问题。逆运动学问题的一般表述如下。给出了 4×4 齐次变换矩阵 H 代表我们希望得到的机械臂末端的位置和姿态：

$$H = \begin{bmatrix} R & o \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-33)$$

而逆运动学问题即下面方程求解出关节转角 $q = (q_1, \dots, q_n)^T$ 的一组或若干组解：

$$T_n^0(q_1, \dots, q_n) = A_1(q_1) \dots A_n(q_n) = H \quad (2-34)$$

2.4.2 机械臂逆运动求解

在求解逆运动学问题，我们最感兴趣的是找到一个闭环形式的解，而并非一个数值解。找到一个闭环形式的解意味着找到下式的一个明确关系：

$$q_i = f_i(h_{11}, \dots, h_{34}), i = 1, 2, \dots, n \quad (2-35)$$

如图 2-6 所示，以带有球形关节（腕关节）的六自由度机械臂为例，由于球形关节存在，针对该机械臂最后三个关节建立 D-H 坐标系，发现其原点相交于一点，因此可以对机械臂逆运动学问题解耦，分解为两个简单的问题，分别为逆位置运动学和逆方向运动学。换言之，即首先求解腕轴交点的位置的，称为手腕中心，然后求解手腕的方向。

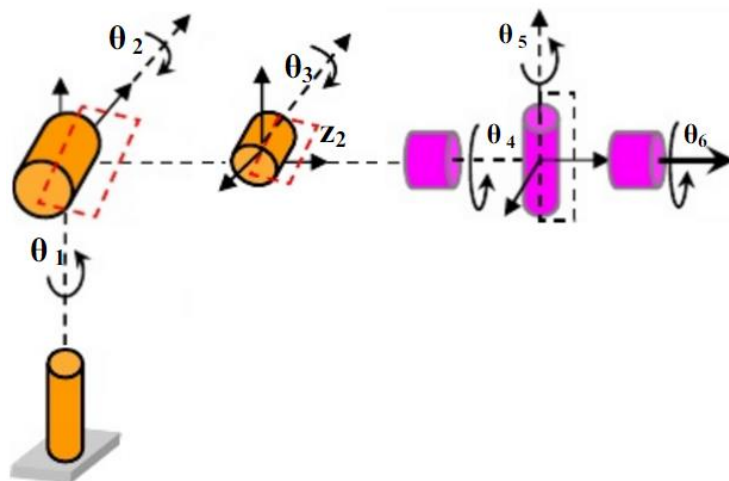


图 2-5 机械臂 D-H 坐标系建立

首先 2.5 小节中描述的 D-H 公约对图 2.5 中的机械臂建立 D-H 坐标系。D-H 参数如表 2.1 所示：

表 2-1 机械臂 D-H 参数表

Link	$a_i(m)$	$\alpha_i(rad)$	$d_i(m)$	$\theta_i(m)$
1	a_1	α_1	d_1	q_1
2	a_2	α_2	d_2	q_2
3	a_3	α_3	d_3	q_3
4	a_4	α_4	d_4	q_4
5	a_5	α_5	d_5	q_5
6	a_6	α_6	d_6	q_6

根据表 2-1 的 D-H 参数可以直接计算出齐次变换矩阵 A_i ，因为在逆运动学问题中唯一的变量就是关节角度 q ，为了简化表达，用 c_1 代表 $\cos q_1$ ，用 c_{12} 代表 $\cos(q_1 + q_2)$ ，其他符号有类似处理：

$$A_1 = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & -s_1 & 0 \\ s_1 & 0 & c_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; A_2 = \begin{bmatrix} c_2 & 0 & -s_2 & 0 \\ s_2 & 0 & c_2 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-36)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; A_4 = \begin{bmatrix} c_4 & 0 & -s_4 & 0 \\ s_4 & 0 & c_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-37)$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} c_5 & 0 & -s_5 & 0 \\ s_5 & 0 & c_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; A_6 = \begin{bmatrix} c_6 & -s_6 & 0 & 0 \\ s_6 & c_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-38)$$

齐次变换矩阵 $T_6^0 = A_1 \dots A_6$ 表示为:

$$T_6^0 = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & o_{3 \times 1} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & o_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & o_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & o_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-39)$$

机械臂末端的坐标为 $o = (o_x, o_y, o_z)^T$, 并且 $R = (r_{ij})$ 表示末端的姿态, 因此腕关节的中心坐标可以表示为:

$$o_c^0 = o - d_6 R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-40)$$

定位的框架相对于基座是由 R 和 d_6 组成的末端位置 (O) 表示 O 和手腕中心 OC 成分表示 X 然后方程 (2-41) 给出的关系:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_c - d_6 r_{13} \\ y_c - d_6 r_{23} \\ z_c - d_6 r_{33} \end{bmatrix} \quad (2-41)$$

逆运动学是由上述方程的封闭解的实现, 和旋转角度的一般解决方法如下:

$$\begin{cases} q_1 = \text{atan2}(x_c, y_c) \\ q_3 = \text{atan}(D, \pm \sqrt{1 - D^2}) \\ D = \frac{x_c^2 + y_c^2 - d^2 + (z_c - d_1)^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2a_3} \\ q_2 = \text{atan2}(\sqrt{x_c^2 + y_c^2 - d^2}, z_c - d_1) \\ q_4 = \text{atan2}(c_1c_{23}r_{13} + s_1c_{23}r_{23} + s_{23}r_{33}, -c_1s_{23}r_{13} + s_1s_{23}r_{23} + c_{23}r_{33}) \\ q_5 = \text{atan2}(s_1r_{13} - c_1r_{23}, \pm \sqrt{1 - (s_1r_{13} - c_1r_{23})^2}) \\ q_6 = \text{atan2}(-s_1r_{11} + c_1r_{21}, s_1r_{12} + c_1r_{22}) \end{cases} \quad (2-42)$$

2.5 机械臂运动学建模

2.5.1 UR5 机械臂运动学建模

如图 2-6 (a) 所示, 表示出 UR5 机械臂物理模型以及几何参数, 图 2-6 (b) 给出包含 UR5 关节和连杆定义的略缩图。该机械臂定义了 7 个连杆

$l_i: i \in \{0, \dots, 6\}$, 以及 6 个旋转关节 $j_i: i \in \{1, \dots, 6\}$, 每一个关节包含一个自由度, 因此 UR5 一共有 6 个自由度。推导运动学公式的第一步就是首先找到 D-H 参数。

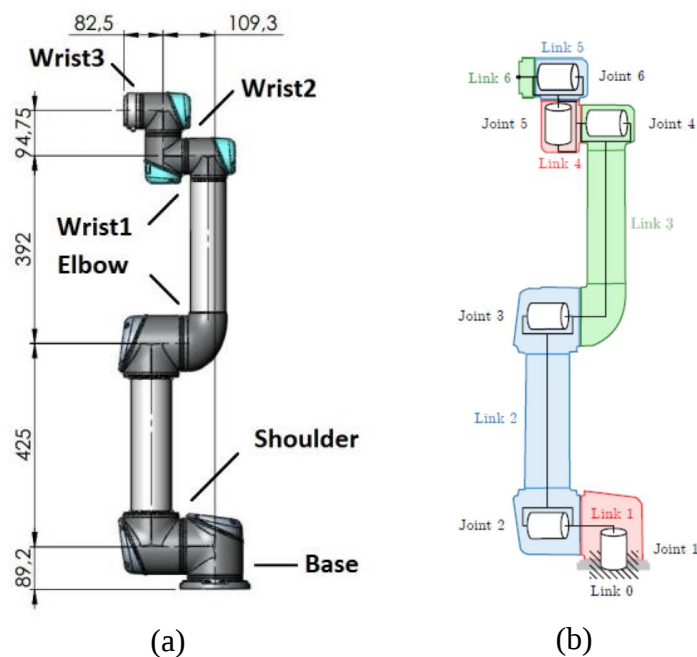


图 2-6 UR5 机械臂基本参数和结构

UR5 的 D-H 参数值推导参考前文中关于 D-H 公约的描述, 首先在满足 D-H 条件的前提下, 给 UR5 每个连杆建立坐标系, 如图 2-7 所示, 建立了坐标系 $o_i x_i y_i z_i, \forall i \in \{0, \dots, 6\}$, 然后表 2-2 就给出了 UR5 的 D-H 参数列表。

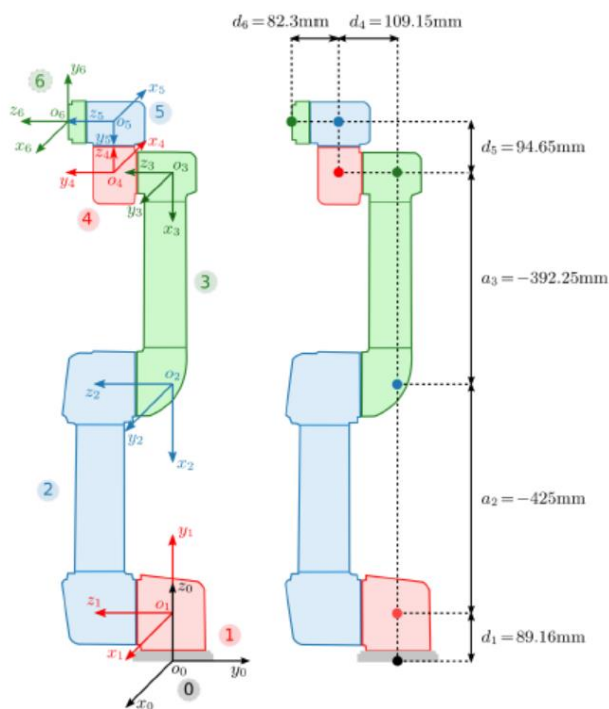


图 2-7 UR5 D-H 坐标系建立

表 2-2 UR5 D-H 参数列表

Link	$a_i(m)$	$\alpha_i(rad)$	$d_i(m)$	$\theta_i(m)$
1	0	$\pi/2$	0.0892	q_1
2	-0.425	0	0	q_2
3	-0.395	0	0	q_3
4	0	$\pi/2$	0.1093	q_4
5	0	$-\pi/2$	0.0948	q_5
6	0	0	0.0825	q_6

将表 2-2 中的参数带入式 (2-30) 可以得到 UR5 的齐次变换矩阵 $A_1, \dots, A_6$ 分别为:

$$A_1 = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & s_1 & 0 \\ s_1 & 0 & -c_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0.0892 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; A_2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & -0.425c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & -0.425s_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-43)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & -0.392c_3 \\ s_3 & c_3 & 0 & -0.392s_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; A_4 = \begin{bmatrix} c_4 & 0 & s_4 & 0 \\ s_4 & 0 & -c_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0.1092 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-44)$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} c_5 & 0 & -s_5 & 0 \\ s_5 & 0 & c_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0.0947 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; A_6 = \begin{bmatrix} c_6 & -s_6 & 0 & 0 \\ s_6 & c_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.0823 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-45)$$

这样用变换矩阵 T_6^0 描述正运动学:

$$T_6^0 = A_1 A_2 \dots A_6 = \begin{bmatrix} R_6^0 & o_6^0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-46)$$

下面推导 UR5 的速率运动学方程, 即雅可比, 首先计算角速度方面 J_ω , 这里需要计算轴 $z_0^0, \dots, z_5^0$, 分别如下:

$$z_0^0 = k$$

$$z_1^0 = R_1^0 k$$

$$z_2^0 = R_2^0 k = R_1^0 R_2^1 k$$

$$z_3^0 = R_3^0 k = R_1^0 R_2^1 R_3^2 k$$

$$z_4^0 = R_4^0 k = R_1^0 R_2^1 R_3^2 R_4^3 k$$

$$z_5^0 = R_5^0 k = R_1^0 R_2^1 R_3^2 R_4^3 R_5^4 k \quad (2-47)$$

其中 $k = [0,0,1]^T$ ，雅可比线速度方面 $J_{v_i} = \frac{\partial o_6^0}{\partial q_i}, i = 1, 2, \dots, 6$ ，因此 UR5 的雅可比矩阵可表示为：

$$J = \begin{bmatrix} J_v \\ J_\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial o_6^0}{\partial q_1} & \frac{\partial o_6^0}{\partial q_2} & \frac{\partial o_6^0}{\partial q_3} & \frac{\partial o_6^0}{\partial q_4} & \frac{\partial o_6^0}{\partial q_5} & \frac{\partial o_6^0}{\partial q_6} \\ z_0^0 & z_1^0 & z_2^0 & z_3^0 & z_4^0 & z_5^0 \end{bmatrix} \quad (2-48)$$

关于 UR5 运动学的公式已推导完毕，现在来关注动力学方面的内容，我们知道在推导动力学公式的时候会用到连杆的质量以及转动惯量，如图 2-8 (a) 显示了 UR5 各个连杆实际的质心，这样对于转动惯量的计算难度加大，为了简化计算现近似质心的位置就是在连杆的几何中心，如图 2-8 (b) 对质心的位置做了近似，同时，为了进一步简化质量和转动惯量的计算，我们将各连杆的形状近似为圆柱体。

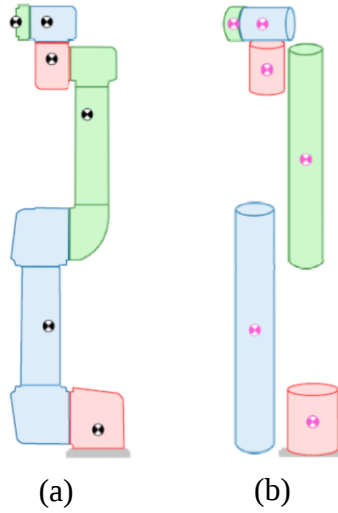


图 2-8 UR5 质心近似

做了上述的近似后，我们可以结合机械臂的几何参数计算出各连杆的质量和质心位置向量，如表 2-3 所示，需要注意的是表中表示的质心位置分别都是在自身坐标系中的表示的向量。

表 2-3 UR5 连杆质量和质心位置

Link	Weight(kg)	Mass center (mm)
1	3.7	$r_1^1 = [0,0,0]^T$
2	8.393	$r_2^2 = [212.5,0,135]^T$
3	2.275	$r_3^3 = [206.25,0,17.5]^T$
4	1.219	$r_4^4 = [0,0,-2.5]^T$
5	1.219	$r_5^5 = [0,0,-2.5]^T$
6	0.1879	$r_6^6 = [0,0,-17.5]^T$

进一步, 计算各连杆的转动惯量, 同样的它们的转动惯量也是在自身坐标系中的表示:

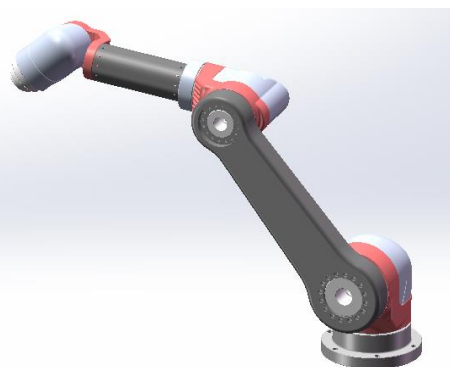
$$\begin{aligned}
 I_1 &= \begin{bmatrix} 0.0084 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0064 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0084 \end{bmatrix}, I_2 = \begin{bmatrix} 0.0078 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2100 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2100 \end{bmatrix} \\
 I_3 &= \begin{bmatrix} 0.0016 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0462 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0462 \end{bmatrix}, I_4 = \begin{bmatrix} 0.0016 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0016 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0009 \end{bmatrix} \\
 I_5 &= \begin{bmatrix} 0.0016 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0016 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0009 \end{bmatrix}, I_6 = \begin{bmatrix} 0.0001 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0001 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0001 \end{bmatrix} \quad (2-49)
 \end{aligned}$$

2.5.2 自主研发机械臂运动学建模

如图 2-9 所示, 分别为第一代实验室自主研发的机械臂实物图和 solidworks 三维模型。其形状与 UR5 机械臂差异很大, 但是其拓扑结构与 UR5 相同, 对其进行运动学建模与 UR5 非常类似, 本小节将忽略部分运动学公式的推导, 包括齐次变换矩阵, 雅可比矩阵, 与 UR5 不同处将会详细介绍。



实物图



模型图

图 2-9 自主研发机械臂

同样的，首先对该机械臂进行 D-H 分析，如图 2-10 所示，按照 D-H 公约建立了机械臂各连杆的坐标系，表 2-4 给出相对应的 D-H 参数。

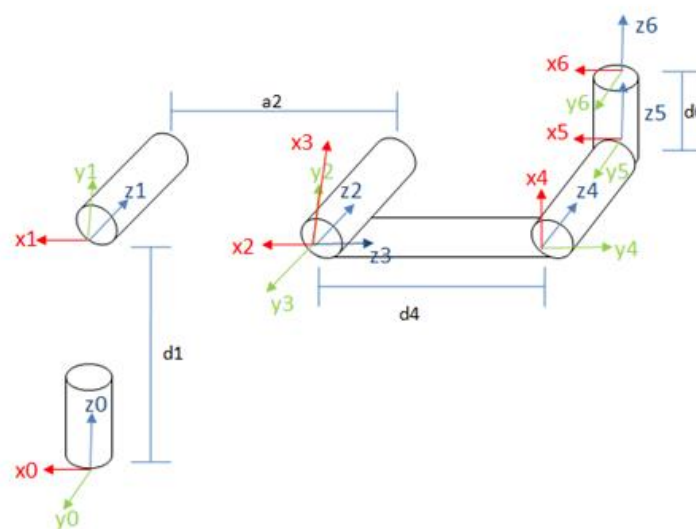


图 2-10 自主研发机械臂 D-H 坐标系建立

表 2-4 自主研发机械臂 D-H 参数

Link	$a_i(m)$	$\alpha_i(rad)$	$d_i(m)$	$\theta_i(m)$
1	0	$\pi/2$	0.1835	q_1
2	-0.43	0	0	q_2
3	0	$\pi/2$	0	q_3
4	0	$-\pi/2$	0.4253	q_4
5	0	$\pi/2$	0	q_5
6	0	0	0.114	q_6

得到了该机械臂的 D-H 参数,那么推导齐次变换矩阵以及雅可比矩阵的过程与 UR5 完全相同,这里不再赘述,直接计算机械臂各连杆的质量以及转动惯量。仍然将机械臂各连杆的几何中心近似为质心的位置,这样除去电机和减速器的质量后,可以计算出各连杆的质量如图 2-11 中的 $m_1, \dots, m_6$ 。表 2-5 给出了机械臂除去电机和减速器后的连杆质量以及各质心的位置向量。其中 **Weight** 的单位为 kg , **Mass center** 的单位为 mm 。

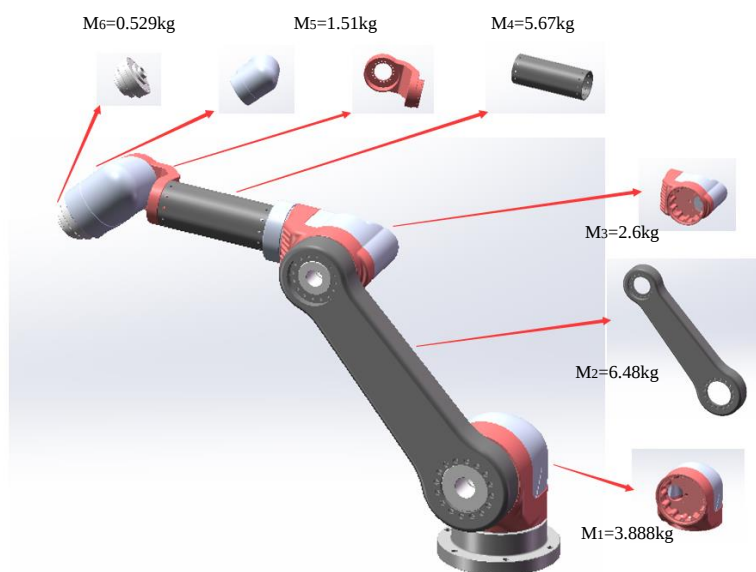


图 2-11 自主研发机械臂连杆质量

表 2-5 自主研发机械臂两岸质量和质心位置

Link	Weight(kg)	Mass center (mm)
1	3.888	$r_1^1 = [0,0,0]^T$
2	6.48	$r_2^2 = [215,0,175]^T$
3	2.6	$r_3^3 = [202,0,15]^T$
4	5.67	$r_4^4 = [0,0,-2.5]^T$
5	1.51	$r_5^5 = [0,0,-2]^T$
6	0.529	$r_6^6 = [0,0,-15.5]^T$

该机械臂关节 $j_1, \dots, j_4$ 用的是台达 ADS-AZ-0421, j_5, j_6 使用 ADS-AZ-0121, 机械臂连杆外壳质量加上电机和减速器的质量后总质量为 $M = 30.277kg$ 。

该机械臂的转动惯量计算出来是:

$$\begin{aligned}
I_1 &= \begin{bmatrix} 0.0121 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0074 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0121 \end{bmatrix}, I_2 = \begin{bmatrix} 0.0092 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3200 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3200 \end{bmatrix} \\
I_3 &= \begin{bmatrix} 0.0037 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0552 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0552 \end{bmatrix}, I_4 = \begin{bmatrix} 0.0018 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0018 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0011 \end{bmatrix} \\
I_5 &= \begin{bmatrix} 0.0018 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0018 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0011 \end{bmatrix}, I_6 = \begin{bmatrix} 0.0001 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0001 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0001 \end{bmatrix} \quad (2-50)
\end{aligned}$$

2.6 机械臂工作空间及可操作性

2.6.1 工作空间定义

对于给定的机械臂，机器人运动学的一个主要问题是计算其末端可以达到的所有位姿，这些所有位姿的集合通常被称为工作空间。大量的文献描述工作空间应用于机制设计、路径规划，机器人任务执行^{[2][9]}等研究方向。机械臂的工作范围即其末端可达的空间位置。假设 n 自由度机械臂工作空间用 $W(P)$ 标记，那么各关节变量 q_i 与工作空间的映射关系可表示为：

$$W(P) = \{P(q): q \in Q\} \quad (2-51)$$

式中 $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$ ， Q 为关节约束空间，根据机械臂自身结构、关节传动系统选择、工作环境以及应用场景的不同，各类机械臂的关节约束也不同：

$$Q = \{q | q_i^{min} \leq q_i \leq q_i^{max}, i = 1, 2, \dots, n\} \quad (2-52)$$

这里 q_i^{min} 和 q_i^{max} 分别表示第 i 个关节的最小和最大的角度值。已经知道机械臂末端所能达到的所有位姿即为工作空间，那么根据关节变量和末端的映射关系以及各关节的约束，可以将工作空间进一步表示为：

$$W(P) = \begin{cases} P_x(q_i) \\ P_y(q_i), q_i^{min} \leq q_i \leq q_i^{max}, i = 1, 2, \dots, n \\ P_z(q_i) \end{cases} \quad (2-53)$$

2.6.2 工作空间求解

工作区的求解非常重要，它直接影响到机械臂的运动和协作能力。精确的计算工作空间及其包络对于机械臂设计至关重要。工作空间的包络取决于关节的类

型、关节运动范围和连杆长度。具有旋转关节的机械臂在工作空间中心区域的运动通常比在边界的运动更为灵巧。下面分别用蒙特卡洛法和 MATLAB 机器人工具箱法来计算机械臂的工作空间。

蒙特卡洛方法是一个简单的数值方法,用于解决许多数学,物理和工程问题。它随机抽取系统的变量,并通过采样变量得到系统的输出。详细的描述和数学证明在以前的研究中给出。结合该方法计算速度快的特点,运用到串联型机械臂工作空间求解非常有效,对于关节角度的范围约束没有限制,其具体步骤如下:

① 给定初始参数,根据前文中提到的运动学方法,求出机械臂末端在基座坐标系中的位置向量。

② 随机采样。利用随机函数 $Rand(j)$ 产生 N 个 $(0-1)$ 之间的随机数,每次采样的步长也是随机的,由 $(q_i^{max} - q_i^{min})Rand(j)$ 决定,其中 q_i^{min} 和 q_i^{max} 分别为第 i 个关节的角度下限和上限,则每次抽样机械臂各关节的角度变量值为:

$$q_i = q_i^{min} + (q_i^{max} - q_i^{min})Rand(j), i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, N \quad (2-54)$$

③ 在第 ② 步中得到了 N 组机械臂角度变量值,将其带入正运动学方程中,求解出 N 组机械臂末端在基座坐标系中的位置向量 $(o_j^x, o_j^y, o_j^z)^T, N$ 的取值越大越能反应真实的工作空间。

④ 将第 ③ 步中得到的位置向量在三维坐标系中表示出来,就得到了工作空间点云图。

例如,以 UR5 为例,给出机械臂各关节变量的约束范围,如表 2-5 所示

表 2-6 UR5 关节约束

Joint	1	2	3	4	5	6
Range	$\pm 2\pi$	$\pm 2\pi$	$\pm 2\pi$	$\pm 2\pi$	$\pm 2\pi$	$\pm 2\pi$

利用蒙特卡洛法对其工作空间进行仿真求解,取 $N = 10000$,则求得的末端位置向量为 10000 个,可得该机械臂工作空间如图 2-12(a)所示,其中(b)(c)(d)分别为 xoy , $yozy$ 和 $xozy$ 平面上的投影。

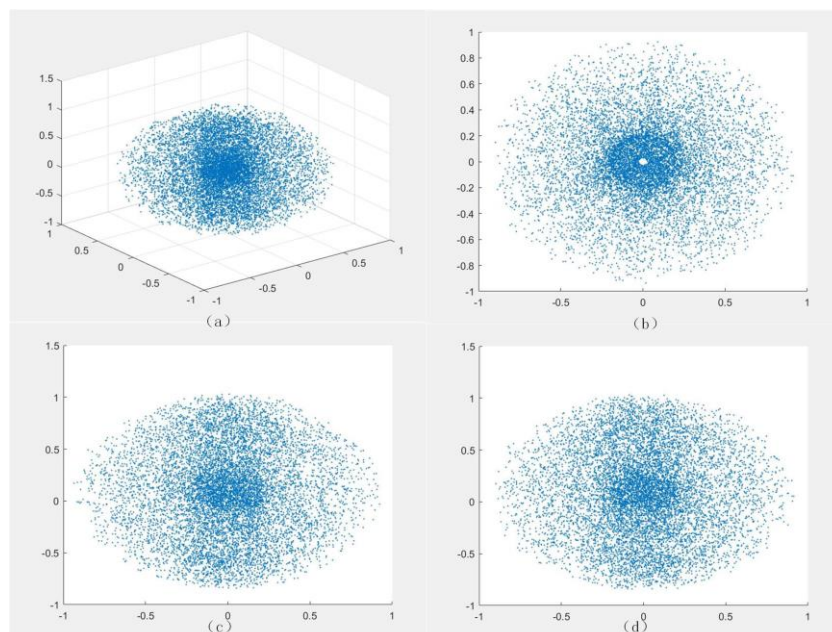


图 2-12 UR5 机械臂工作空间

接下来，利用第二种方法来获得机械臂工作空间，即机器人工具箱（RTB）法，首先对这个工具箱做一个简单的介绍，机器人工具箱是 MATLAB 工具箱软件^[14]，软件免费，但需要专有的 MATLAB 环境，提供了多种函数模拟移动机器人和机械臂。利用改工具包可以创建任意的串联机械臂，并使用工具箱提供正逆运动学函数和动力学函数。其中中包含操纵和转换数据类型，如向量、齐次变换、欧拉角表示以及单位四元数均是表示三维位置和方向的必须数据类型。

仍然以 UR5 为例，首先利用工具箱创建 UR5 机械臂模型，根据 D-H 参数定义机械臂的各连杆，利用 SerialLink 函数创建机械臂，如图 2-13(a)是 UR5 机械臂在某个姿态的三维显示。使用 fkine 正运动学函数求解机械臂末端的位置向量，可以画出机械臂的工作空间，然后利用 surf 函数画出工作空间的边界，如图 2-13(b)显示出机械臂工作空间的最里层和最外层。

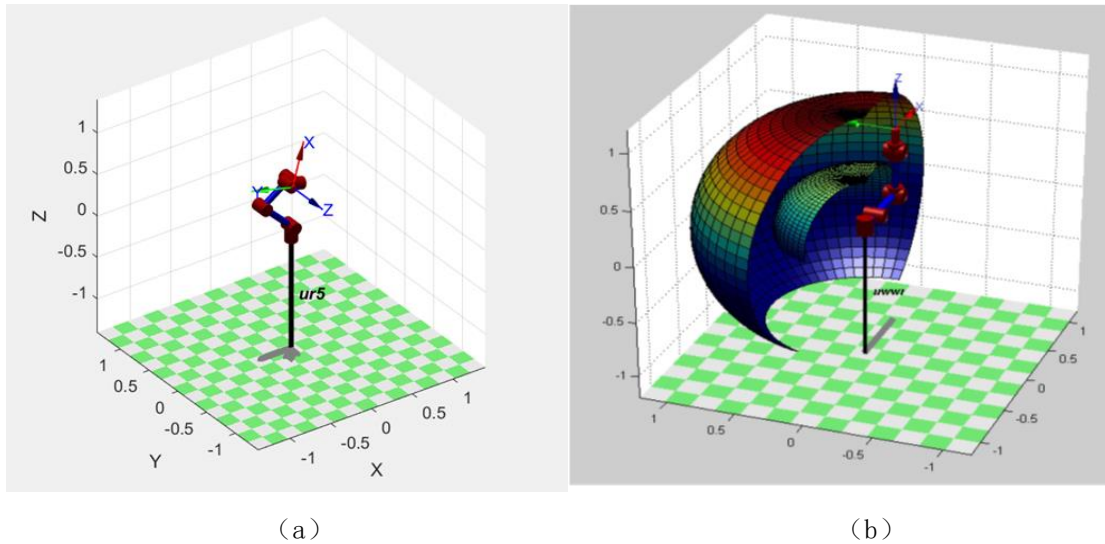


图 2-13 UR5 在机器人工具箱建模及工作空间

2.7 可操作性

如果一个设计师要研究机器人的运动学性能，那么可操作性的分析，是机械臂功能参数中必不可少的一个。事实上，可操作性的概念对于机械臂的设计产生重要的影响，因为它描述了机械臂的运动学性能指标，可以通过优化该指标来进一步优化机械臂的尺寸参数。

2.7.1 运动学奇异点

最早关于可操作性的描述是由一个重要的机器人专家 Tsuneo Yoshikawa 提出^[16]。Yoshikawa 的工作给对可操作性的了解提供了基础，并且留下了很多关于机器人不同可操作性指标经典文献。在描述如何计算可操作性值之前，首先来看看运动学奇异点。

在关节空间存在某些点，使得运动学雅可比 J 的秩降低。这些点被称为奇异点，并且运动被限制到更低维。例如对于一个平面机械臂的运动，在这些点会减少到只有一个维度。在奇异点附近时，末端在工作空间中一个小的速度会导致关节空间中非常大的速度^[15]，这在现实中是不可取的。前文中已经讨论了雅可比矩阵将关节空间的速度映射到末端笛卡尔空间的速度：

$$v = J(q)\dot{q} \quad (2-55)$$

其中 v 表示末端在笛卡尔空间中的速度， $\dot{q}$ 表示关节空间中的速度，假设雅可比矩阵 $J(q)$ 是可逆非奇异的，则式 (2-55) 可表示为：

$$\dot{q} = J(q)^{-1}v \quad (2-56)$$

将关节速度集归一化：

$$\dot{q}^T \dot{q} = 1 \quad (2-57)$$

上式方程实际上表示在关节空间中 n 维超球面的表面。可以进一步改写为：

$$v^T (J(q)J(q)^T)^{-1}v = 1 \quad (2-58)$$

式 (2-58) 的解表示在末端笛卡尔速度空间中 n 维椭球面上的点。如果这个椭球接近球形，如图 2-14 (a)，也就是说，它的半径是相同的量级，那么末端可以实现任意笛卡尔速度。然而，如果一个或多个半径是非常小的如图 2-14(b)，这表明末端执行器在那些小半径的方向不能实现想要达到的速度。

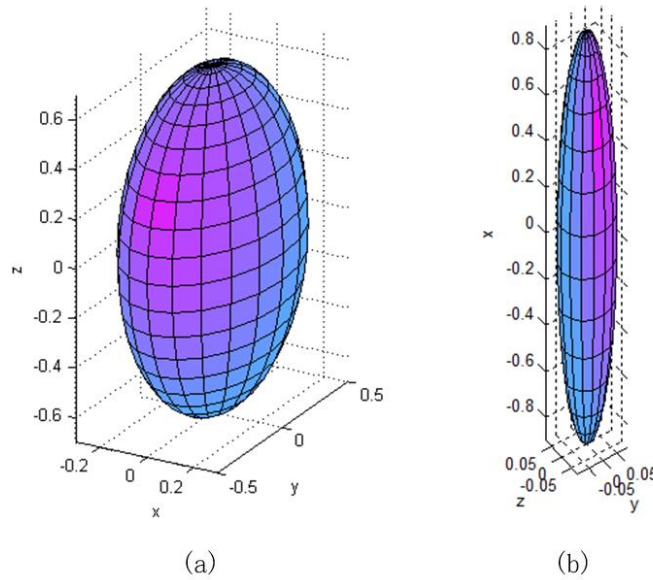


图 2-14 可操作性椭球

为了避免奇异点，我们希望椭球尽可能的接近球型。这时候就要引入可操作性的指标，下面小节将会详细介绍。

2.7.2 可操作性椭圆

可以使用不同观点解决可操作性研究，其中最常用的一种是考虑运动学可操作性和动力学可操作性。在本文中，主要讨论运动学部分。

可操作性可以被认为是求解在 n 维笛卡尔空间的椭球，其几何定义是求解

下面方程：

$$\sqrt{\dot{q}_1^2(t) + \dot{q}_2^2(t) + \dots + \dot{q}_n^2(t)} \leq 1 \quad (2-59)$$

这个方程表示每个关节可以达到的所有速度集，并且 $\dot{q}(t)$ 的二范数是不超过单位 1 的。这个初始的假设有助于建立一个度量的标准，使得各种机械臂可以相互比较了。从这个不等式可以观察到末端在椭圆的长轴方向具有更好的运动能力。此外，在短轴方向，末端具有较差的运动能力。这个椭球面象征着操作能力，如图 2-15。这个椭球被称为 Manipulability Ellipsoid。

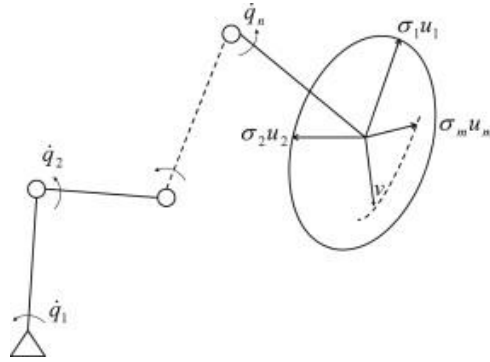


图 2-15 可操作性椭球

雅可比矩阵的一般形式表示：

$$v(t) = J(q)\dot{q}(t) \quad (2-60)$$

其中， $v(t) = [\dot{x}(t), \dot{y}(t), \dot{z}(t), \dot{\phi}(t), \dot{\theta}(t), \dot{\psi}(t)]$ 表示末端在笛卡尔空间的速度向量， $\omega(t) = [\dot{q}_1(t), \dot{q}_2(t), \dots, \dot{q}_n(t)]$ 表示关节空间的速度向量，运动学可操作性可以定义为满足下式的速度矢量：

$$v(t)^T J(q)^{-T} J(q)^{-1} v(t) \leq 1 \quad (2-61)$$

不难看出，要想满足上式，则雅可比矩阵 $J(q)$ 必须是可逆的方阵，假设机械臂的自由度小于六，那么上式不满足条件，这时候就有必要用伪逆的形式来描述。常用的是利用奇异值分解（SVD）来计算可操作性椭圆。式（2-62）是式（2-61）的一种替代来计算 $v(t)$ ，这是需要一种分解的雅可比矩阵形式，见式（2-63）：

$$U \cdot J(q)^{-T} \cdot \Sigma \cdot V^T \leq 1 \quad (2-62)$$

$$\begin{aligned} [U \ D \ V] &= SVD(A), A' = UDV^T \\ &= \begin{bmatrix} u_{11} & \dots & u_{1n} \\ u_{21} & \dots & u_{2n} \\ \vdots & & \vdots \\ u_{n1} & \dots & u_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{11} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & \dots & v_{2n} \\ \vdots & & \vdots \\ v_{n1} & \dots & v_{nn} \end{bmatrix}^T = \sum_{i=1}^n \sigma_i u_i v_i^T \end{aligned} \quad (2-63)$$

其中 D 是一个对角的方阵，对角线的 $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \dots, \sigma_{nn}$ 是非负实数，被称为矩阵的奇异值。可操作性椭圆的轴为 $\sigma_1 u_1, \sigma_2 u_2, \dots, \sigma_n u_n$ ，其中 u_i 表示 U 的第 i 个奇异向量，如图 2-16。

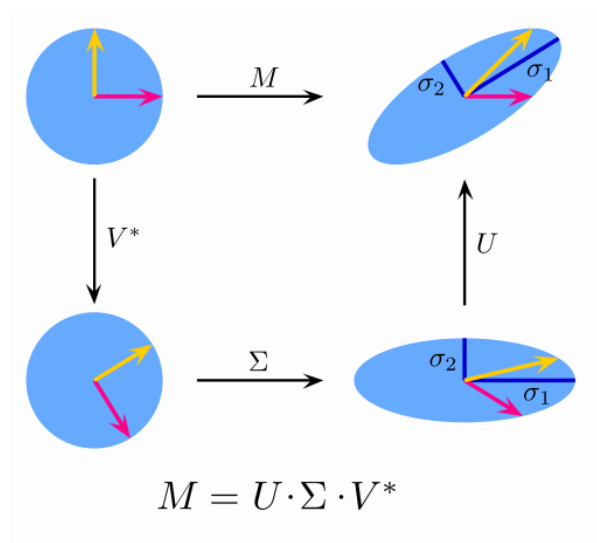


图 2-16 奇异值分解方法

第3章 机械臂优化问题描述

3.1 引言

机器人的优化设计与工业机器人紧密联系在一起,并在现实生活中的有许多应用。根据不同的应用场景,或者不同性能指标的机械臂而言,往往需要优化的目标也不相同,如何选择优化目标也成为机械臂优化研究非常重要的一环。对于机械臂的优化设计通常从能耗、重量、模块化、可操作性、灵巧性、末端精确度和准确度等几个方面考虑,这些优化目标有些是相互关联,有些是相互冲突,例如能耗和质量就一对相互冲突的目标。本文从机械臂运动学和动力学两个角度选择待优化的目标,即从正运动角度选取可操作性作为目标之一,从动力学角度选取机械臂总质量作为另一个目标。可操作性描述机械臂在工作空间中运动的流畅程度,而总质量影响机械臂各关节的扭矩。不难发现与这两个目标相关的机械臂变量为机械臂的几何参数变量以及关节传动系统参数变量,另外对于一个多目标的机器人优化设计问题往往伴随着若干的约束条件,在本文研究的内容中也不例外,如果选择可操作性和重量作为两个优化目标,则几何参数变量必须满足某些几何参数的约束,传动系统参数必须满足关节间扭矩转速等的约束,可见对于机械臂优化设计问题是由设计变量,目标函数和约束条件三个部分组成,在本节也是从这三个方面一一叙述,在下文中会将描述的问题转化为详细的数学表达式。

3.2 设计变量

对于常见的机械臂优化设计目标而言,几乎都与机械臂的结构和传动系统有关,而机械臂的结构可以理解为它的几何参数,传动系统由电机和减速器组成,而电机和减速器的型号决定了传动系统的参数。因此,本文就是从这两个方面来设计变量,选定机械臂几个关键的几何参数以及电机减速器的型号作为决策变量,下面将会有详细的描述。

3.2.1 几何变量设计

首先,设计机械臂几何参数。机械臂的结构参数经常会集成优化方法进行优化。对于 UR5 机械臂而言,发现连杆 $link_2$ 和 $link_3$ 的长度对于机械臂末端的空间影响最大,其长短很大程度影响了机械臂的工作空间,如图 3-1,连杆 2 和 3 的长度用 $length_1$ 和 $length_2$ 表示,另一方面连杆 2 和 3 的质量占机械臂总重量同样很重,假设在连杆材料密度一定时,满足机械臂性能情况下,希望连杆 2 和 3 的体积越小越好,一是节约成本,最重要的是符合轻质化设计的要求。要想体积更小,那就需要将连杆的内外径或者说壁厚设置为设计变量,为了减少决策变量的个数,这里选取壁厚作为变量,图 3-1 中连杆 2 和 3 的壁厚分别用 t_1 和 t_2 表示。为了满足装配关系,我们将 UR5 连杆 2 和 3 的外径设置为固定值,为 UR5 原有的尺寸。

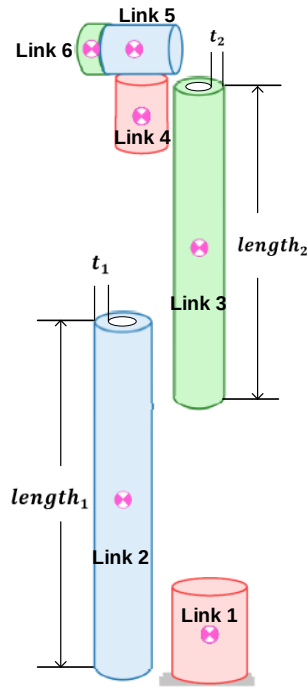


图 3-1 UR5 几何参数设置

若用 x_i 表示决策变量,则令:

$$x_1 = length_1, x_2 = length_2, x_3 = t_1, x_4 = t_2 \quad (3-1)$$

对于自主研发的机械臂而言,采用同样的办法进行几何变量设计,如图 4-2,该机械臂连杆形状与 UR5 有很大的差异,但是相同点在于,它的连杆 2 和 3 的几何参数对于机械臂的工作空间及总重量影响很大,因此仍然是将它的两

个主要连杆的几何参数作为决策变量，分别是连杆 2 和 3 的长度和壁厚，假设是对该机械臂进行优化设计时，同样决策变量：

$$x'_1 = length_1, x'_2 = length_2, x'_3 = t_1, x'_4 = t_2 \quad (3-2)$$

注意这里的决策变量加了上标，仅仅是为了区别与 UR5，在后面对两个机械的优化中，决策变量均是用 x_i 表示。

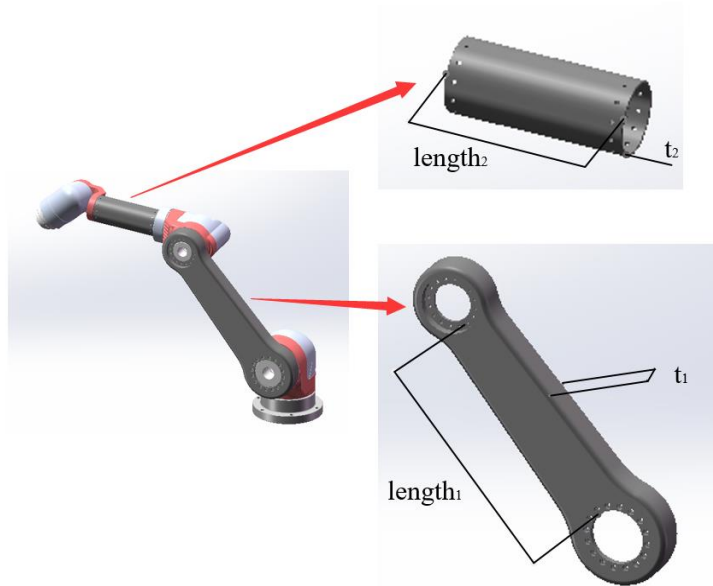


图 3-2 自主研发机械臂几何参数设置

3.2.2 传动系统参数设计

传统的机械臂设计中，设计者往往会根据经验来选择关节处的电机和减速器来满足机械臂的性能，例如机械臂末端负载，末端最大运动速度，关节最大运动速度等。通常是电机的质量越大，其可以提供的扭矩力，转速相应更大，因此，为了满足机械臂设计时的性能指标，不得不选取功率大，重量大的电机和减速器。试想，利用优化方法使得在满足性能指标的条件下选取更轻质的电机和减速器，无疑降低了设计成本以及满足了轻质化的需求。因此本文的研究将传动系统中电机和减速器的型号作为设计变量。无论是对于 UR5 还是自主研发的机械臂而言，传动系统都会被考虑，所以在这里不再分开列举各自关于电机和减速器的设计变量，而是综合在一起考虑。

在 4.2.1 中用 $x_1, \dots, x_4$ 表示了机械臂几何方面的设计变量，UR5 或者自主

研发的机械均是 6 自由度, 有 6 个旋转关节, 每个关节分别都包含一个电机和一个减速器, 如果是将电机或者减速器基本参数作为设计变量, 那么总的设计变量数非常多, 对于优化计算是一个不利的信息, 为了解决这个问题, 本文是将电机和减速器的型号作为设计变量, 因为一旦型号确定后, 那么电机或者减速器相对应的基本参数同样确定了。这样一共只需要 12 个变量来表示传动系统参数, 其中 6 个表示各关节电机的型号, 另外 6 个表示各关节减速器的型号。用 $x_5, \dots, x_{10}$ 分别表示从关节 j_1 到关节 j_6 的电机型号变量, 用 $x_{11}, \dots, x_{16}$ 分别表示从关节 j_1 到关节 j_6 的减速器型号变量。则有:

$$x_{i+4} = u_i^m, x_{i+10} = u_i^g, i = 1, 2, \dots, 6 \quad (3-3)$$

其中 u_i^m 和 u_i^g 分别表示第 i 个关节电机和减速器的型号。

3.3 优化目标

3.3.1 重量最轻

在不同的应用场景中, 对机械臂的性能有不同的要求, 但是都是要追求低功耗和较高的负载/自重比。如果在满足末端负载的情况下, 尽可能的减小机械臂自身结构重量无疑是更好的选择。近年来出现了许多机械臂加移动平台的研究及应用, 在这样的情况下, 需要电机功率要尽量小, 这样可以减小移动平台及机械臂的能耗, 有效降低运载成本, 且有利于提高机械臂的安全性。另外, 从控制角度分析, 机械臂在已知的环境中工作, 从事重复的操作, 只对其定位精度和重复定位精度有较高的要求, 假设需要在未知环境中作业, 无法获取相对的自身的精确定位, 这时不能仅仅依赖于高的定位精度, 轻型机械臂能更精细化的控制则体现出优势。从人机协作的角度分析, 机械臂需要与环境或者人发生交互作用, 对感知和控制能力有更高的要求。从以上描述的几个方面来看, 机械臂轻质化的研究非常必要。因此本文归结的一个重要的优化目标就是机械臂总的质量。

机械臂的总质量可以分为两个部分组成, 分别是连杆外壳的重量和关节处电机和减速器的重量, 这两者都占有非常大的比重。连杆外壳的重量根据机械臂结构参数和材料计算得出, 电机减速器重量根据选择的型号而确定。那么总质量优

化目标可表示为:

$$\min_x f_1(x) = m_{body} + \sum_{i=1}^6 \{m_m(u_i^m) + m_g(u_i^g)\} \quad (3-4)$$

其中 m_{body} 表示机械臂连杆外壳的总重量, 在上一小节中已经知道 u_i^m 和 u_i^g 分别表示第 i 个关节电机和减速器的型号, 这里 $m_m(u_i^m)$ 表示第 i 个关节对应型号的电机的质量, 同理 $m_g(u_i^g)$ 表示第 i 个关节对应型号的减速器的质量。

3.3.2 可操作性最大

随着机械臂的应用越来越广泛, 其任务要求不断提高, 为满足机械臂执行多任务的要求, 机械臂必须具有更好的通用性。而可操作性反映机器人在某位姿的灵活性的一个指标, 它可以恰当表达对于输出关节角度和姿态控制的灵敏度。如果一个设计师要研究机器人的运动学性能, 那么可操作性的分析显得尤为重要。因此, 本文选择可操作性作为机械臂优化设计第二个重要的优化目标。可操作性的计算是针对机械臂处在某个位姿的计算, 如果仅仅计算单一位姿时的可操作性, 因为这样体现不出机械臂在整个工作空间的灵活性。因此, 本文是从全局可操作性出发, 在整个机械臂工作空间内设置特定的末端轨迹, 使末端尽可能的在工作范围内运动, 在设定的轨迹上选择若干个位姿点, 计算每个点上的可操作性, 分析综合的可操作性, 详细介绍见下文。

可操作性的计算基于雅可比矩阵 $J(q)$, 具体如下:

$$\mu(q) = \sqrt{\det(J(q)J(q)^T)} \quad (3-5)$$

可操作性的值并非定值, 取决于其在工作空间内的具体位置。综合任务空间内所有局部可操作性才能得到需要的全局可操作性指数。首先定义整个工作空间内可操作性的均匀性:

$$U = \frac{\mu(q)_i}{\mu(q)_{max}}, i = 1, 2, \dots, M \quad (3-6)$$

其中 M 表示在任务路径上选取的位置点数, $\mu(q)_i$ 表示在第 i 个点时的可操作性数值, $\mu(q)_{max}$ 表示在 M 点上可操作性最大的值, 这样 U 就可以表示在整个任务空间中可操作性的均匀性。因此关于可操作性的全局性能指标可以表

示为:

$$f(q) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{\sqrt{\det(J_i(q)J_i(q)^T)}}{\mu(q)_{max}} \quad (3-7)$$

其中 $\mu(q)_{max}$ 为:

$$\mu(q)_{max} = \max(\sqrt{\det(J_1(q)J_1(q)^T)}, \dots, \sqrt{\det(J_M(q)J_M(q)^T)}) \quad (3-8)$$

全局可操作性指标 $f(q)$ 越大越好, 优化问题是对其的最大化, 为了与重量最小化问题相一致, 可以通过取反, 求其最小化问题, 综上所述, 关于可操作性的目标函数可以表示为:

$$\min_x f_2(x) = -\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{\sqrt{\det(J_i(x)J_i(x)^T)}}{\max(\sqrt{\det(J_1(x)J_1(x)^T)}, \dots, \sqrt{\det(J_M(x)J_M(x)^T)})} \quad (3-9)$$

3.4 约束条件

3.4.1 传动系统建模

机械臂设计优化中传动系统设计是一项复杂的任务。我们的目标推导出参数模型获得所有关心的属性的设计变量的函数。机械臂的优化工作中提出的一种方法是将机电一体化系统是作为一个整体, 并从所有涉及工程领域方面的考虑。在 3.2 节中已经讨论了将电机和减速器型号作为设计变量, 这恰好是离散的问题。对于串联型机械臂, 一个电机的质量特性直接影响扭矩要求, 连续的方法并不适合处理这类问题。为了使得我们的优化在达到优化目标的同时, 要满足机械臂各关节扭矩转速是符合现有电机和减速器的参数。这样的背景下, 我们将传动系统中的参数作为约束条件, 具体叙述如下。

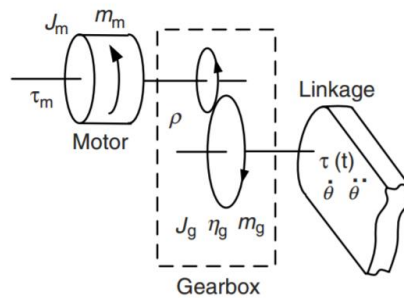


图 3-3 传动系统

为了确定传动系的组成部分，有必要分析减速器和电机上的扭矩。假设电机和减速器之间是刚性连接的，那么电机所需的转矩 T_m 可表示为：

$$T_m = (J_m + J_g + J_0)\ddot{q}_l \cdot \sigma + \frac{T_l}{\sigma} + T_{fric} \quad (3-10)$$

其中 J_m 表示电机转子的转动惯量， J_g 表示减速器的转动惯量， J_0 表示系统中其他的转动惯量， σ 表示传动比， $\ddot{q}_l$ 表示减速器输出的角加速度， T_l 是施加的负载扭矩， T_{fric} 是克服电机和减速器之间摩擦所需的扭矩。

对于电机必须要关注三个方面的标准。首先，需要持续的连续转矩要求，为了防止电枢在运行过程中烧毁。电机的连续转矩额定值必须高于工作周期内的均方根（rms）转矩。此外，负载曲线的最大转矩必须低于或等于电机的额定峰值扭矩。最后，关节的极限速度必须高于或等于负荷曲线所要求的最高速度。

电机所需转矩的均方根为：

$$T_{m,rms} = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^\tau T_m^2 dt} \quad (3-11)$$

其中 τ 表示完成负载周期的时间，将式（3-10）带入式（3-11）中得到了关于电机额定转矩的约束条件：

$$T_{m, rated} \geq \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left((J_m + J_g + J_0)\ddot{q}_l \cdot \sigma + \frac{T_l}{\sigma} + T_{fric} \right)^2 dt} \quad (3-12)$$

第二个约束是在负载周期时，最大转矩必须低于电机的峰值扭矩额定值 N_m^{max} ：

$$T_m^{max} \geq \left| (J_m + J_g + J_0)\ddot{q}_l \cdot \sigma + \frac{T_l}{\sigma} + T_{fric} \right| \quad (3-13)$$

此外，电机允许最大转速 N_m^{max} 必须高于或等于在负载周期内的最大转速：

$$N_m^{max} \geq \max\{2\pi|\dot{q}_l|\sigma\} \quad (3-14)$$

同样的，减速器允许最大输入转速 N_g^{max} 必须高于或等于在负载周期内的最大转速：

$$N_g^{max} \geq \max\{2\pi|\dot{q}_l|\sigma\} \quad (3-15)$$

分析了传动系统必须具备的关于转矩和转速的约束后，现在要设计机械臂优化的约束，对于6自由度的机械臂而言，其对应各关节处的约束条件为：

$$\begin{cases} T_{m,i} \geq \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left((J_m(x) + J_g(x)) \ddot{q}_i(x) \cdot \sigma + \frac{\tau(t,x)}{\sigma} \right)^2 dt} \\ T_{m,i}^{max} \geq \left| (J_m(x) + J_g(x)) \ddot{q}_i(x) \cdot \sigma + \frac{\tau(t,x)}{\sigma} \right| \\ N_{m,i}^{max} \geq \max\{2\pi|\dot{q}_i|\sigma\} \\ N_{g,i}^{max} \geq \max\{2\pi|\dot{q}_i|\sigma\} \end{cases} \quad (3-16)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, 6$, 分别代表机械臂的6个关节, 因此一共有24个约束条件。

3.5 本章小结

本章主要的任务是归结优化问题, 最终选取机械臂总重量和可操作性作为优化目标, 选取机械臂的几何参数变量个传动系统参数变量作为设计变量, 将传动系统转矩和转速等条件作为约束。最后本文研究的优化问题可以归结为:

$$\begin{cases} \min_x f_1(x) = m_{body} + \sum_{i=1}^6 \{m_m(u_i^m) + m_g(u_i^g)\} \\ \min_x f_2(x) = -\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{\sqrt{\det(J_i(x)J_i(x)^T)}}{\max(\sqrt{\det(J_1(x)J_1(x)^T)}, \dots, \sqrt{\det(J_M(x)J_M(x)^T)})} \\ x = [length_1, length_2, t_1, t_2, u_m, u_g] \\ S.T. \\ T_{m,i} \geq \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left((J_m(x) + J_g(x)) \ddot{q}_i(x) \cdot \sigma + \frac{\tau(t,x)}{\sigma} \right)^2 dt} \\ T_{m,i}^{max} \geq \left| (J_m(x) + J_g(x)) \ddot{q}_i(x) \cdot \sigma + \frac{\tau(t,x)}{\sigma} \right| \\ N_{m,i}^{max} \geq \max\{2\pi|\dot{q}_i|\sigma\} \\ N_{g,i}^{max} \geq \max\{2\pi|\dot{q}_i|\sigma\} \end{cases} \quad (3-17)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, 6$ 。

第 4 章 约束多目标进化算法优化结果及分析

4.1 实验设计

机械臂的设计优化问题是一个带约束的多目标优化问题, 本文将使用改进的约束多目标进化算法对于第三章中归结的优化问题进行优化, 分别采用 MOEAD-CDP、MOEAD-ACDP 和 MOEAD-IEps 对 UR5 和实验室自主研发的两个机械臂进行优化, 最后是对优化结果的分析, 以及利用最优解设计出新的机械臂模型。

接下来来设计实验, 第三章已经描述了本研究选择的两个目标函数分别是机械臂的总质量和可操作性。设计变量包括机械臂的基本几何尺寸和关节电机和减速器的型号。因此, 在实验之前要给出设计变量的变化范围, 为了保证机械臂的工作空间范围, 如图 3-1 中, 对于 UR5 的几何参数, 限定其范围为 $x_1 \in [0.3\text{m}, 0.8\text{m}]$, $x_2 \in [0.3\text{m}, 0.8\text{m}]$, $x_3 \in [0.01\text{m}, 0.1\text{m}]$, $x_4 \in [0.01\text{m}, 0.1\text{m}]$; 如图 3-2 中, 对于实验室自主研发的机械臂的几何参数, 限定其范围为 $x_1 \in [0.3\text{m}, 1\text{m}]$, $x_2 \in [0.3\text{m}, 1\text{m}]$, $x_3 \in [0.01\text{m}, 0.08\text{m}]$, $x_4 \in [0.01\text{m}, 0.1\text{m}]$; 对于两种机械臂的关节变量, 可以同意给定范围, 即同一候选电机和减速器型号范围, 最终选定为高精度 Maxon 电机^[44]和 Harmonic 减速器^[45], 即 $x_5, \dots, x_{10}$ 的取值范围见表 4-1 所示的候选电机, $x_{11}, \dots, x_{16}$ 的取值范围见表 4-2 所示的候选减速器, 其中 $T_m, T_m^{\max}, T_g, T_g^{\max}$ 的单位为 Nm , $N_m^{\max}$ 和 $N_g^{\max}$ 单位为 rpm , J_m 和 J_g 单位为 kgm^2 , m_m 和 m_g 单位为 kg 。

表 4-1 候选电机型号及参数

电机型号	T_m	T_m^{max}	N_m^{max}	J_m	m_m
<i>ECi 40</i>	0.0667	1.81	15000	2.42e-6	0.21
<i>EC 32</i>	0.0426	0353	25000	2e-6	0.27
<i>RE 35</i>	0.0965	0.967	12000	6.74e-6	0.34
<i>EC 40</i>	0.127	0.94	18000	8.5e-6	0.39
<i>E 40</i>	0.184	2.5	12000	1.38e-5	0.48
<i>EC 40</i>	0.165	2.66	18000	5.38e-6	0.58
<i>EC 52</i>	0.366	15	6000	1.41e-5	0.82
<i>EC 45</i>	0.186	0.872	15000	1.19e-5	0.85
<i>RE 50</i>	0.405	8.9	9500	5.60e-5	1.1
<i>DBL11X0010</i>	0.1	0.425	6000	0.06e-4	0.37
<i>DBL11X0020</i>	0.2	0.924	6000	0.12e-4	0.45
<i>DBL2H00040</i>	0.4	1.716	4500	0.08e-4	1.06
<i>DBL2H00060</i>	0.6	2.58	4500	0.11e-4	1.21
<i>DBL2H00080</i>	0.8	3.551	4500	0.13e-4	1.36
<i>DBL3H00065</i>	0.65	2.76	3000	0.5e-4	1.75
<i>DBL3H00130</i>	1.3	5.8656	3000	0.8e-4	2.25
<i>BDK4H00100</i>	1.0	5.94	3000	0.79e-4	2.6
<i>BDK4H00160</i>	1.6	10.033	3000	1.28e-4	2.6
<i>DBL3H00250</i>	2.5	10.79	3000	1.4e-4	3.2
<i>DBL4H0026</i>	2.6	15.687	3000	2.1e-4	4.5
<i>BDK5H00210</i>	2.1	9.412	3000	4.13e-4	5.0
<i>DBL4H00530</i>	5.3	32.39	3000	2.8e-4	5.6
<i>BDK5H00430</i>	4.3	21.58	3000	5.78e-4	6.8
<i>DBL4H00750</i>	7.5	45.152	3000	4.3e-4	7.7
<i>DBL5H01050</i>	10.5	52.614	3000	8.1e-4	10.0
<i>DBL5H01350</i>	13.5	67.47	3000	9.1e-4	11.2
<i>DBL5H01700</i>	17.0	85.002	3000	11.3e-4	13.7

表 4-2 候选减速器型号及参数

减速器型号	T_g	T_g^{max}	N_g^{max}	J_g	m_g
HFUS 14	11	54	8500	0.091e-4	0.71
HFUS 17	39	110	7300	0.193e-4	1.00
HFUS 20	49	147	6500	0.0404e-4	1.38
HFUS 25	108	284	5600	1.07e-4	2.1

另外，见式（3-17）中目标函数中可操作性的求解是从全局的角度来考虑，单一机械臂位姿的可操作性并不能说明机械臂在工作空间的灵活性，因此在本文中是在机械臂工作空间中设置一个末端圆周运动的轨迹，如图 4-1 中为 UR5 工作空间中选取了一条轨迹，轨迹可表示为：

$$\begin{cases} 0.36x - 0.58 - 0.14z - 0.008 = 0 \\ (x - 0.153)^2 + (x - 0.0771)^2 + (x - 0.0169)^2 = 0.5313^2 \end{cases} \quad (4-1)$$

之所以选取这样一个圆周，一方面是保证该轨迹在机械臂整个工作空间尽可能大运动范围，另一方面该轨迹均包含在 UR5 和实验室自主研发的机械臂的工作空间中。另外，设置两种机械臂末端经过一个圆周运动的时间为 $t = 3s$ ，然后在该轨迹中均匀地选取 M 个位姿点， M 的取值理论上是越大越好，但考虑到程序运算的时间，本文中设置 $M = 54$ 。

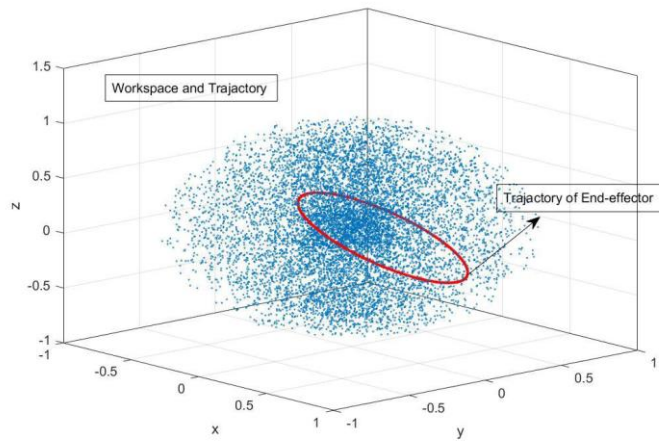


图 4-1 末端轨迹设置

4.2 MOEAD-CDP 优化

约束多目标优化问题（CMOPs）涉及多个相互冲突的目标的优化并且有多个

约束的同时要同时满足。实际上,大多数工程优化问题可以看作是一个约束多目标优化问题^[1]。一个这样的问题可以定义为如式(3-17)的形式。

MOEAD-CDP 算法是由 Deb 提出的^[46]。其约束处理方法定义是如果满足下列任何条件中的一个,则称解 x^i 是约束支配解 x^j 的:

- 1) x^i 是可行解, x^j 是不可行解;
- 2) x^i 和 x^j 都是不可行解,但 x^i 有一个较小的约束违反;
- 3) x^i 和 x^j 都是可行解,但 x^i 支配 x^j 。

这种约束支配原则的效果,任何可行的解决方案是优于任何不可行解决方案。

4.2.1 UR5 优化结果

根据式(3-17)中描述的约束多目标优化问题,利用 MOEAD-CDP 算法优化 UR5 机械臂,本实验中设置种群数量为 500,算法运行到 1500 代后,优化出来的 Pareto 前沿如图 4-2。算法运行到 1000 代左右就已经收敛,为了与另外两种算法占用相同的计算机资源,运行到了 1500。从 MOEAD-CDP 的最优解的分布情况发现本文确定的两个优化目标,总质量和可操作性确实是相互冲突的量,在同一个末端路径上的运动,机械臂总质量越大,则其可操作性的相反数越小,如果可操作性的相反数越大,则机械臂的总质量越小。

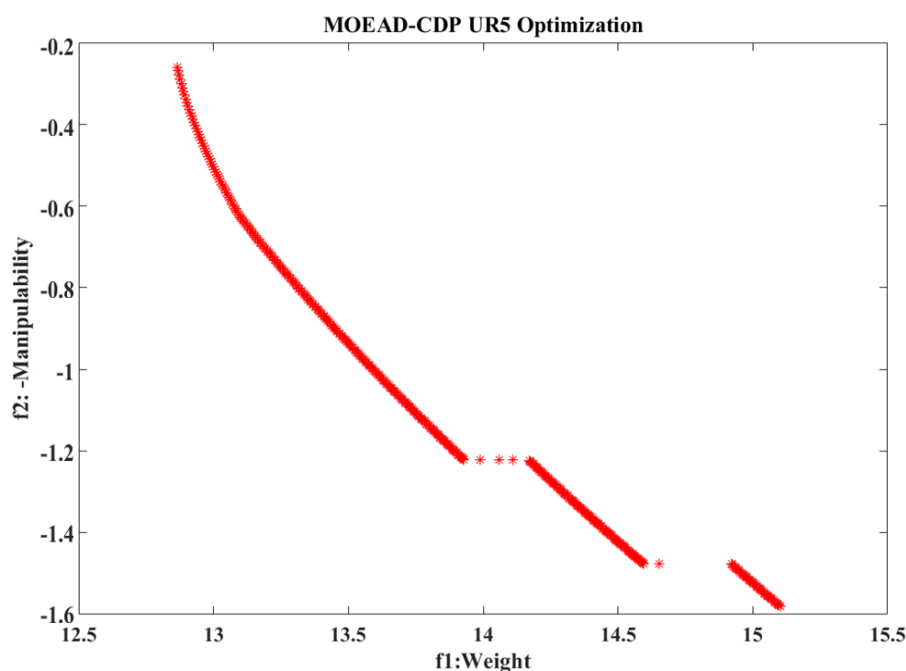


图 4-2 MOEAD-CDP UR5 优化结果

另外,从图 4-2 中可以明显地发现解的分布被分为 3 段,其中可操作性坐标轴的方向看跳跃不大,但是从重量坐标轴的方向发现解有两个大的跳跃,这个与实验的设计非常相关,在关节电机和减速器候选型号的设置中,因为电机和减速器的型号实际是离散的设计变量,部分型号的电机的参数,特别是质量参数有比较大的差距,而关节电机的质量在机械臂总质量的比重比较大,部分最优解选取了质量小的电机,另一部分解选取了质量跨度大的电机。从理论上来说, Pareto 前沿上的解全部都是互补支配的最优解,但是从工程角度考虑,这些最优解是否都符合现实,还需要进一步的分析,在 4.5 节中会有简要的描述。

4.2.2 自主研发机械臂优化结果

同样,根据式 (3-17) 中描述的约束多目标优化问题,利用 MOEAD-CDP 算法优化实验室自主研发的机械臂,在图 4-3 命名机械臂为 OUR,本实验中设置种群数量为 300,算法运行到 1500 代后,优化出来的 Pareto 前沿如图。

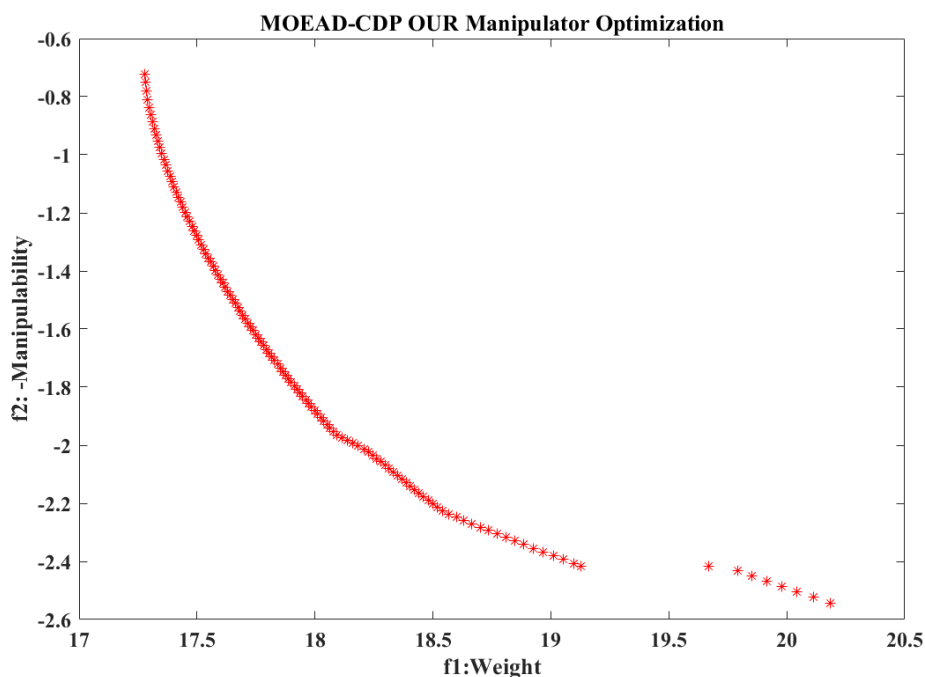


图 4-3 MOEAD-CDP 自主研发机械臂优化结果

另外,从图 4-2 中对于 UR5 机械臂的优化,可以明显地发现解的分布被分为 3 段,而在图 4-3 中对与 OUR 机械臂的优化解的分布大概被分为 2 段,还是从实验的设计的角度分析,因为电机和减速器的型号实际是离散的设计变量,在候选

电机型号中, 最优解中只选取了部分质量跨度太大的电机, 还有一些型号的电机的并没有出现在最优解中。

4.3 MOEAD-ACDP 优化

为了提高种群的多样性, 一个基于角距约束控制原理 ACDP 算法由 Zhun Fan 等人提出^[47]。该约束处理方法增加了一个角度约束到原来的 CDP 算法中。角度约束函数定义如下:

$$c(x^i, x^j) \equiv \arccos \frac{\bar{F}(x^i)^T \bar{F}(x^j)}{\|\bar{F}(x^i)\| \cdot \|\bar{F}(x^j)\|} - \theta_{i,j} \leq 0 \quad (4-2)$$

其中 $\bar{F}(x^i)$ 和 $\bar{F}(x^j)$ 分别是 x^i 和 x^j 的归一化目标向量; $\theta_{i,j}$ 是由用户定义的参数。第 k 个独立的目标函数被归一化为:

$$\bar{f}_k(x) \equiv \arccos \frac{f_k(x)}{\sum_{i=1}^m f_i(x)} \quad (4-3)$$

ACDP 算法对约束条件的处理方法可以定义为, 如果满足下列任意条件中一条, 则称解 x^i 是角度支配解 x^j 的:

- 1) x^i 是可行解, x^j 是不可行解, 他们满足式 (4-2) 的约束条件;
- 2) x^i 和 x^j 都是不可行解, 并且满足式 (4-2), 但 x^i 有一个较小的约束违反;
- 3) x^i 和 x^j 都是可行解, 但 x^i 支配 x^j 。

4.3.1 UR5 优化结果

根据式 (3-17) 中描述的约束多目标优化问题, 利用 MOEAD-ACDP 算法优化 UR5 机械臂, 本实验中设置种群数量为 500, 算法运行到 1500 代后, 优化出来的 Pareto 前沿如图 4-4。其中解的分布与算法 MOEAD-CDP 差不多一致, 间接说明第三章中优化问题的正确性, 解的分布唯一不同的是, 对于本文中的优化问题, CDP 算法在解的分布多样性上略微好一点, 例如 3 段片段的中间, ACDP 算法并没有出现最优解的分布, 但需要补充一点的是比较图 4-2 和图 4-4 看不出解的均匀性哪个更好, 从得到的第 1000 代的种群数据可以看出 ACDP 的最优解具有更好的均匀性。

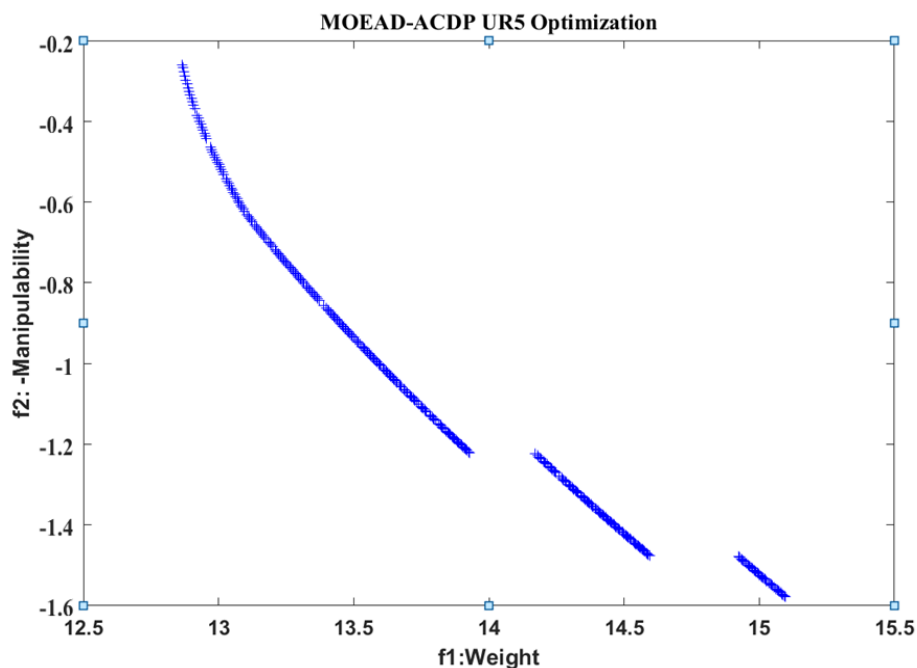


图 4-4 MOEAD-ACDP UR5 优化结果

4.3.2 自主研发机械臂优化结果

同样，根据式（3-17）中描述的约束多目标优化问题，利用 MOEAD-ACDP 算法优化实验室自主研发的机械臂，本实验中设置种群数量为 300，算法运行到 1500 代后，优化出来的 Pareto 前沿如图 4-5。

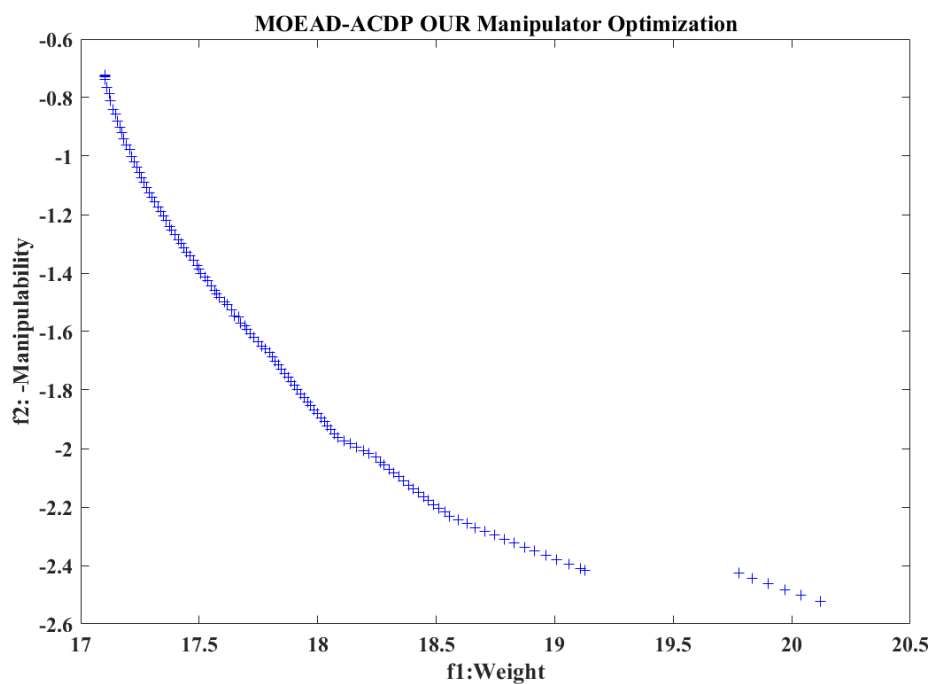


图 4-5 MOEAD-ACDP 自主研发机械臂优化结果

4.4 MOEAD-IEps 优化

文献^[40]提出 ε 约束处理方法来控制约束之间的关系, 文献^[48]提出一种基于多目标进化算法改进的 ε 约束方法 (MOEAD-IEps) 来处理约束多目标优化约束处理问题。更具体地说, 动态调整的 ε , 是根据在当前种群中可行解比例的一个关键参数。在测试问题 CMOP1-CMOP9 上, MOEAD-IEps 具有更好的收敛性和多样性的表现。

4.4.1 UR5 优化结果

同样, 根据式 (3-17) 中描述的约束多目标优化问题, 利用 MOEAD-IEps 算法优化 UR5 机械臂, 本实验中设置种群数量为 500, 算法运行到 1500 代后, 优化出来的 Pareto 前沿如图 4-6。其中解的分布与算法 MOEAD-ACDP 几乎一致, 与 MOEAD-CDP 算法也非常相近, 关于解分布的分析与上文类同。

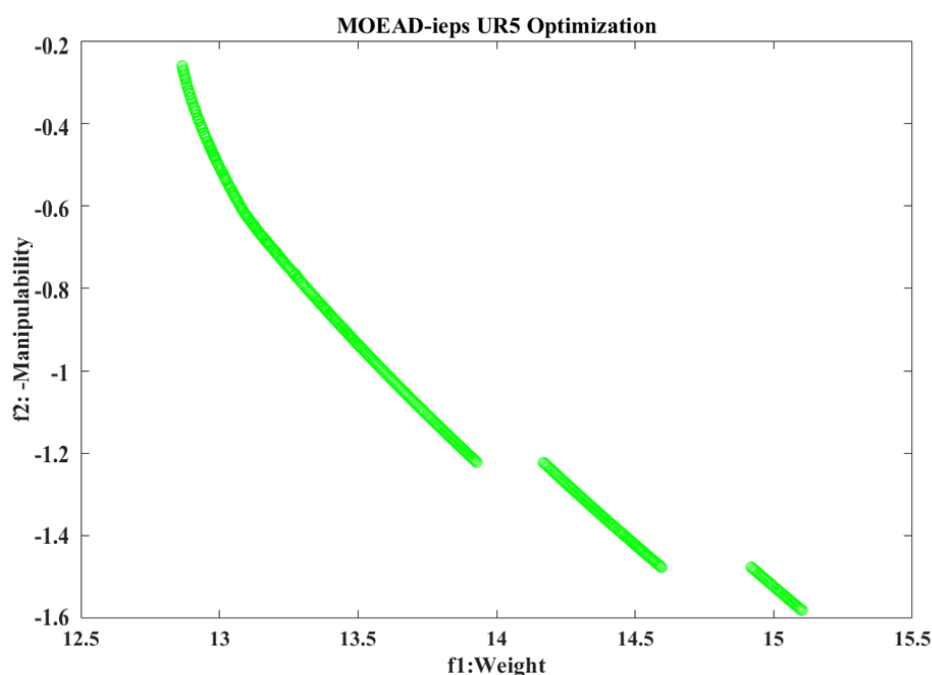


图 4-6 MOEAD-IEps UR5 优化结果

4.4.2 自主研发机械臂优化结果

最后, 根据式 (3-17) 中描述的约束多目标优化问题, 利用 MOEAD-IEps 算法优化实验室自主研发的机械臂, 本实验中设置种群数量为 300, 算法运行到 1500 代后, 优化出来的 Pareto 前沿如图 4-7。

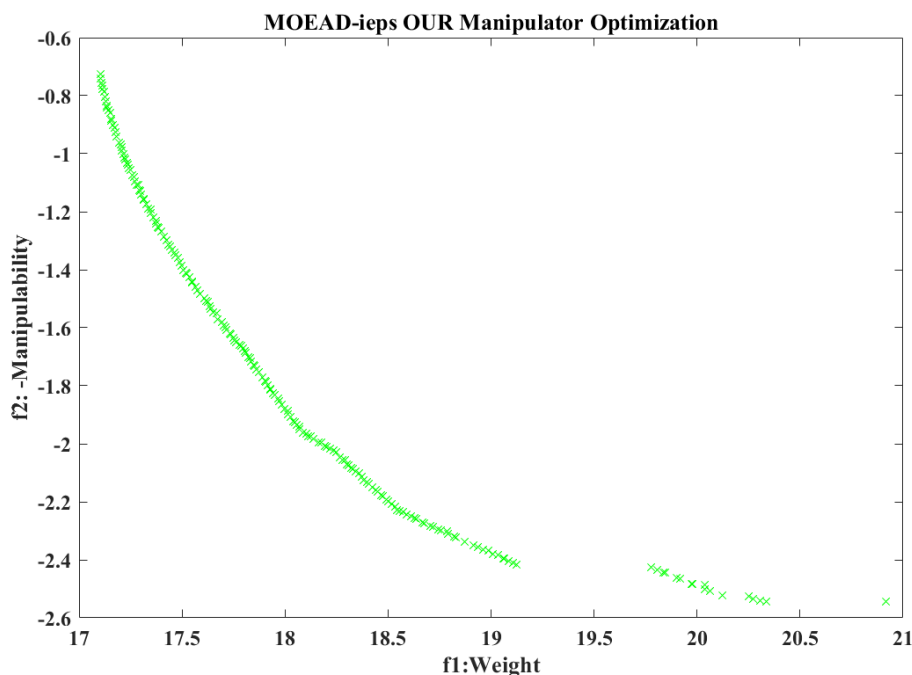


图 4-7 MOEAD-IEps 自主研发机械臂优化结果

4.5 实验结果分析

本研究主要是利用改进的约束多目标优化算法来解决机械臂优化设计的问题。第三章中详细描述了 UR5 机械臂和实验室自主研发的两种机械臂的优化问题。第四章前面的小节进行了实验设计, 并利用 MOEAD-CDP、MOEAD-ACDP 以及 MOEAD-IEps 三种约束多目标优化算法进行了优化, 最终均得出了相应优化问题的最优解, 如图 4-8 和 4-9 所示, 分别描述了三种进化算法对两种机械臂的优化结果, 图 4-8 对应 UR5 机械臂, 图 4-9 对应自主研发的机械臂。其中对于 UR5 的优化设置种群数量为 500, 迭代次数为 1500 代, 对于自主研发的机械臂种群数量设置为 300, 迭代次数为 1500 代。从两张图分析, 无论是对于 UR5 还是自主研发的机械臂而言, 可以看出优化的两个目标总质量和可操作性确实相互冲突的

两个量，并且从优化的结果的范围来看，例如，对于 UR5，三种算法的最优解中质量的范围为 12.7kg 到 15.2kg，可操作性的范围是 3.6 到 7。对于机械臂的优化设计而言这两项指标的变化范围比较宽，对于设计人员而言是非常有利的，因为根据机械臂不同的应用以及不同的性能指标，可以在范围宽的最优解中选取合理的解，加快机械臂的设计工作。

从图 4-8 和 4-9 可以看出三种进化算法优化出来的结果非常相似，一方面说明归结的优化问题的准确性，另一方面说明描述的问题过于简单，无法体现各个算法之间的优势，主要在于第三章中描述的优化问题的设计变量包含 4 个连续的变量，更多的是 12 个离散的设计变量，即关节的电机和减速器型号，而且这些离散变量的取值范围非常局限，综合导致三种算法优化出来的结果差别不太。另外，两图中可以明显地发现解的分布被分为 3 段，其中可操作性坐标轴的方向看跳跃不大，但是从重量坐标轴的方向发现解有较大的跳跃，这个与实验的设计非常相关，在关节电机和减速器候选型号的设置中，因为电机和减速器的型号实际是离散的设计变量，部分型号的电机的参数，特别是质量参数有比较大的差距，而关节电机的质量在机械臂总质量的比重比较大，部分最优解选取了质量小的电机，另一部分解选取了质量跨度大的电机。

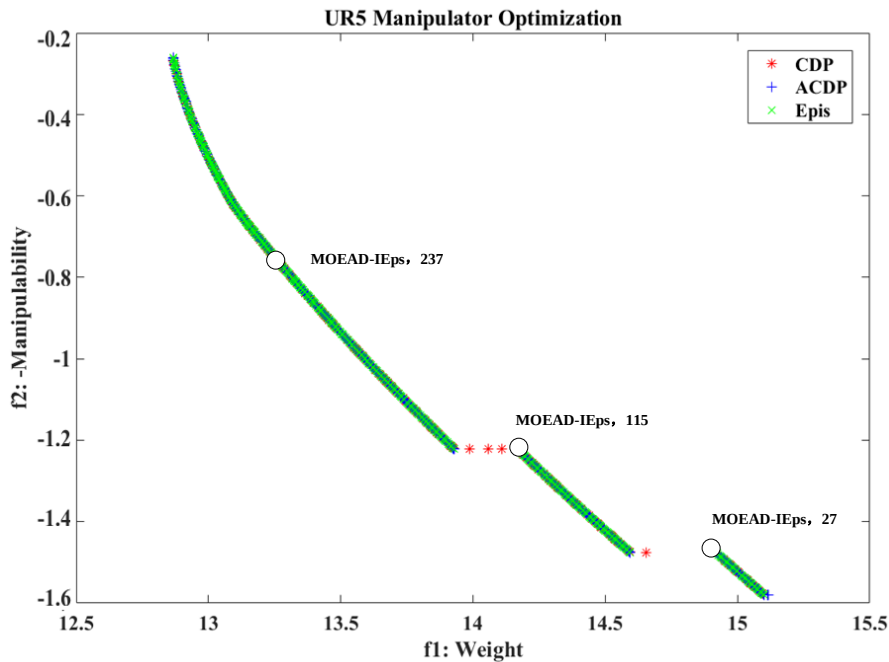


图 4-8 UR5 综合优化结果

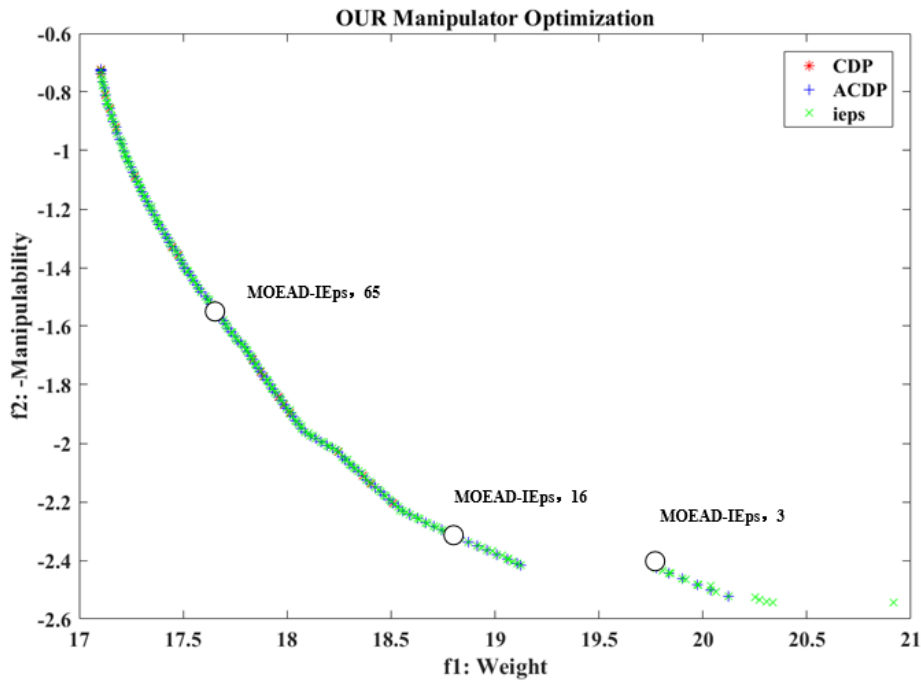


图 4-9 自主研发机械臂综合优化结果

综合，三种约束多目标优化算法最终解决了本文中描述的机械臂优化设计问题，在满足所有约束条件下，从总质量和可操作性两个方面得出了 UR5 机械臂以及自主研发机械臂更优化的设计解集，例如从图 4-8 中选取 MOEAD-IEps 收敛后的最优解集中的第 27，115，237 个个体，与原 UR5 模型参数进行对比，如表 4-3，明显的可以看出最优解中有部分解在总质量和可操作性两个方面更优于原 UR5 机械臂的设计，同样从图 4-9 中选取 MOEAD-IEps 收敛后的最优解集中的第 3，16，65 个个体，与原自主研发机械臂模型参数进行对比，见表 4-4。

表 4-3 UR5 机械臂与最优解对比

	$W = 18kg$	$M = 1$
	$x_1 = 0.425m, x_2 = 0.392m, x_3 = 0.05m, x_4 = 0.05m$	
原 UR5 机械臂	关节电机：定制电机 关节减速器：定制减速器	
	$W = 13.25kg$	$M = 0.75$
	$x_1 = 0.318m, x_2 = 0.283m, x_3 = 0.035m, x_4 = 0.04m$	
MOEAD-IEps 237 号个体	关节电机：EC32, DBL3H00080, DBL2H00060, EC32, EC32, EC32 减速器：HFUS14, HFUS17, HFUS14, HFUS17, HFUS14, HFUS14	
	$W = 14.2kg$	$M = 1.22$

115 号个体	$x_1 = 0.515m, x_2 = 0.28m, x_3 = 0.037m, x_4 = 0.04m$ 关节电机: EC32, DBL4H0026, DBL3H00250,, EC32, ECi40, ECi40 减速器: HFUS14, HFUS25, HFUS17, HFUS17, HFUS14, HFUS14
$W = 14.87kg$ $M = 1.49$	
MOEAD-IEps 27 号个体	$x_1 = 0.453m, x_2 = 0.389m, x_3 = 0.04m, x_4 = 0.044m$ 关节电机: EC32, BDK4H00160, DBL2H00040, DBL2H00080, EC32, ECi40 减速器: HFUS14, HFUS25, HFUS20, HFUS17, HFUS14, HFUS14

表 4-4 自主研发机械臂与最优解对比

自主研发 机械臂	$W = 30.277kg$ $M = 1.25$ $x_1 = 0.43m, x_2 = 0.42m, x_3 = 0.055m, x_4 = 0.06m$ 关节电机: ASD - A5 - 0421 (4 个) ASD - A2 - 0121 (2 个) 关节减速器: 台达减速器
MOEAD-IEps 65 号个体	$W = 17.7625kg$ $M = 1.165$ $x_1 = 0.40m, x_2 = 0.24m, x_3 = 0.03m, x_4 = 0.04m$ 关节电机: EC32, DBL3H00065, DBL2H00060, ECi40, EC32, ECi40 减速器: HFUS14, HFUS14, HFUS14, HFUS17, HFUS14, HFUS14
MOEAD-IEps 16 号个体	$W = 18.7855kg$ $M = 2.3378$ $x_1 = 0.42m, x_2 = 0.29m, x_3 = 0.032m, x_4 = 0.04m$ 关节电机: EC32, DBL3H00250, DBL2H00080, ECi40, ECi40, ECi40 减速器: HFUS14, HFUS25, HFUS17, HFUS17, HFUS14, HFUS14
MOEAD-IEps 3 号个体	$W = 19.9716kg$ $M = 2.4832$ $x_1 = 0.45m, x_2 = 0.26m, x_3 = 0.04m, x_4 = 0.044m$ 关节电机: EC32, DBL3H00130, DBL3H00065, ECi40, EC32, ECi40 减速器: HFUS14, HFUS20, HFUS17, HFUS17, HFUS14, HFUS14

4.5 最优解的新机械臂设计

前文中得到了本文优化问题的最优解, 知道在 Pareto 前沿上的所有解都是互不支配的, 那么是否意味着所有最优解都适用于机械臂的设计呢, 答案当然是否定的, 因为有些解对应的目标函数值确实是不被其他解支配, 但是这些解对应的设计变量却不一定符合实际, 比如说连杆的长度过长, 壁厚过薄, 实际不符合

现实。那么如何在这些最优解中选择比较合理的解呢，设计师通常是根据工作经验做出判断，或者是借助于一些机械臂运动学动力学仿真软件，比如说 ANSYS 和 ADAMS 等，对具有新参数的机械臂进行分析，看最优解是否合理。在本文的演研究内容中恰好缺少这一块的工作，希望在以后的工作中进一步补充。

现在暂且跳过这个比较重要的步骤，假设对于 UR5 机械臂而言，我们已经通过运动学动力学分析，得出了在最优解中存在一些合理的解，如图 4-8，或者表 4-3 中的 MOEAD-IEps 最优解集中的第 27, 115, 237 号个体。现在想要利用这些合理的最优解来设计出新的机械臂，在本文中是采用 Solidworks 二次开发的技术来自动的设计，这样的设计加速了机械臂模型的设计过程，实现的工具是 Visual Studio 2010 和 Solidworks 2013，具体的实现过程是：在 VS 编译环境中利用 Solidworks API 接口编写程序，该程序功能包括零件的创建、零件尺寸的修改，零件的装配等功能，程序运行后自动链接到 Solidworks 应用程序，并添加插件到软件，如图 4-10 添加了汕头大学插件，该插件程序能够创建一个 GUI 窗口如图 4-11，该窗口可以选择要优化的机械臂类型，并且可以导入合理的最优解集合。



图 4-10 添加汕头大学插件

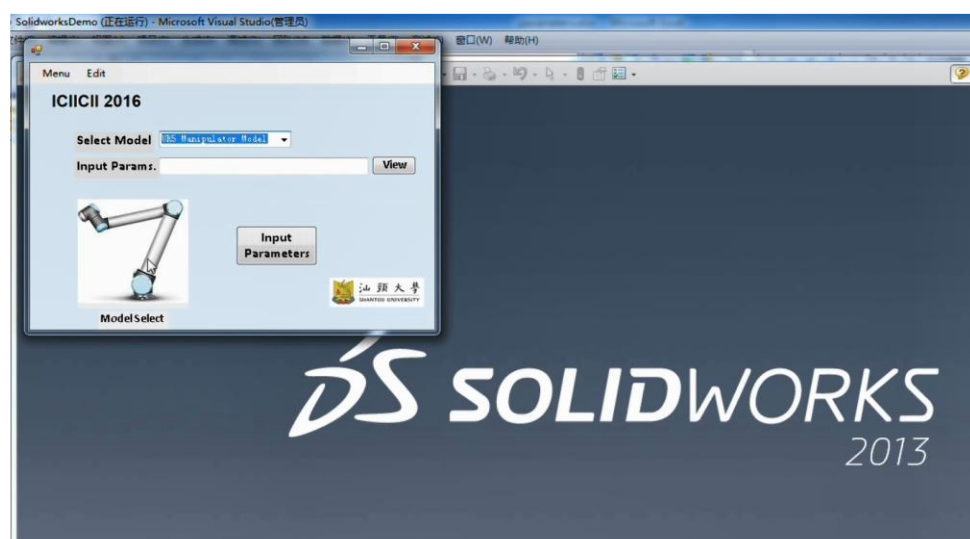


图 4-11 机械臂设计 GUI 窗口

导入了合理的最优解集合后,在 GUI 窗口就可以选择其中一个或者多个最优解来进行自动的设计机械臂,例如图 4-12 中选取了一个最优解后,软件自动导入事先设计好的所需的所有零件,并且按照最优解中对应设计变量的值来自动的更改各个零件的参数,当更新完所有零件的参数后,该插件程序同样能实现自动装配的功能,如图 4-13 所示,根据更新后的零件,软件自动组装成新的机械臂,该模型各方面的参数就有别与原 UR5 机械臂的设计。

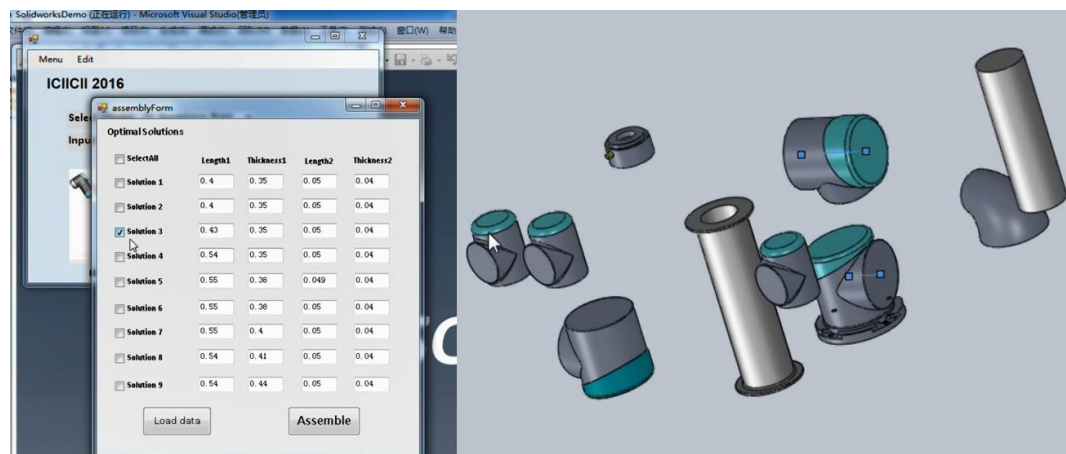


图 4-12 选择最优解自动设计

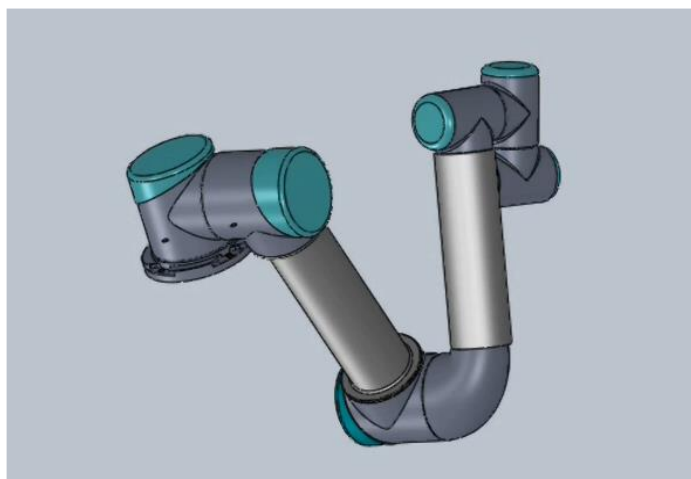


图 4-13 自动组装出新机械臂

再 GUI 界面导入进化算法优化出来的合理最优解后,可以选择其中一个解来自动设计新的机械臂,同样可以选择多个最优解同时自动的设计新的机械臂,例如图 4-8 中的 MOEAD-IEps 最优解集中的第 27, 115, 237 号个体。现根据最优解对应的设计变量参数,自动的更改各自的零件参数,并自动装配建出各个新的机械臂模型,如图 4-14 所示。

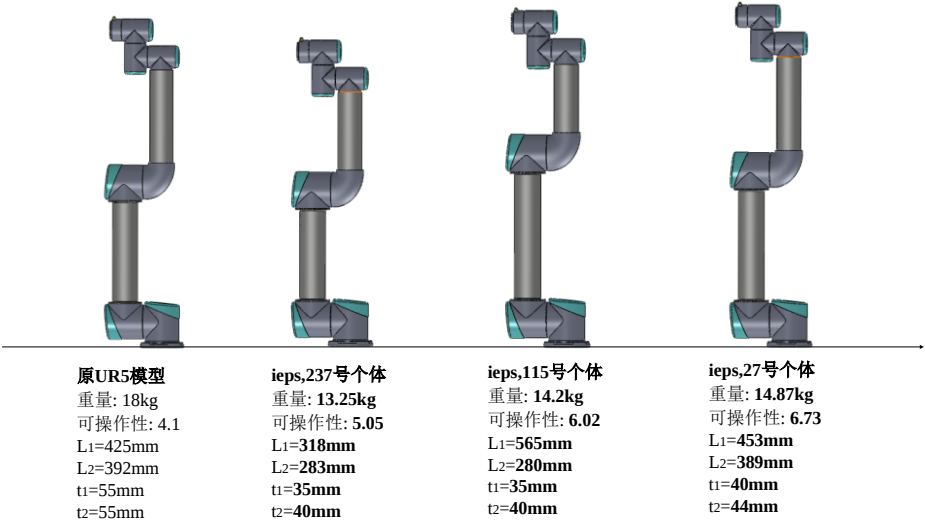


图 4-14 自动设计出最优解机械臂

第 5 章 总结与展望

5.1 结论

机器人的优化设计与工业机器人紧密联系在一起,并在现实生活中的有许多应用。根据不同的应用场景,或者不同性能指标的机械臂而言,往往需要优化的目标也不相同,如何选择优化目标也成为机械臂优化研究非常重要的一环。对于机械臂的优化设计通常从能耗、重量、模块化、可操作性、灵巧性、末端精确度和准确度等几个方面考虑。本文从机械臂运动学和动力学两个角度选择待优化的目标,即从正运动角度选取可操作性作为目标之一,从动力学角度选取机械臂总质量作为另一个目标。可操作性描述机械臂在工作空间中运动的流畅程度,而总质量则是描述机械臂安全,人机协作等综合方面的能力。

本文要研究的一个重点就是利用智能进化算法对机械臂进行优化设计。结合机械臂结构特点,以机械臂运动学和动力学理论研究为基础,以机械臂几何参数和传动系统参数为研究变量,以可操作性和重量为优化目标,利用带约束的多目标进化算法对机械臂的结构以及传动系统进行优化设计。以实现对现有机械臂轻质化和可操作性提高的目的。本文中用于研究对象的机械臂是 UR5 和实验室自主研发的机械臂,论文完成主要研究工作如下:

针对 UR5 和自主研发的机械臂进行运动学建模。建立 D-H 坐标系及运动学方程,求解机械臂的正逆运动学。在机械臂正运动学方程的基础上,分别利用蒙特卡洛法和 MATLAB 机器人工具箱对机械臂的工作空间进行求解,得到机械臂工作空间三维云图,从两种方法的对比。

对优化设计问题进行描述。在满足机械臂性能的前提下,希望得到质量更轻,可操作性更高的机械臂。结合机械臂的结构确定机械臂的几何参数以及传动系统中电机和减速器的型号作为设计变量。同时,在进行优化时必须满足机械臂的几何参数约束,以及传动系统中扭矩,转速的约束。

利用 MOEAD-CDP、MOEAD-ACDP、MOEAD-IEps 这三种改进的约束多目标优化算法对本文归结的机械臂的设计优化问题进行优化,设计了优化实验,分别求出 UR5 和自主研发机械臂的最优解,并对解进行了一定的分析,利用 Solidworks

二次开发和合理的最优解自动化设计出新的机械臂模型。

综上所述, 本文通过对机械臂运动学动力学和约束多目标优化算法的研究, 归结了一中机械臂设计优化的问题, 并利用当前流行的几种改进的约束多目标进化算法对该问题进行优化。通过最终的实验验证, 从两方面的优化目标来看, 优化的结果均好于机械臂最初的设计。

5.2 展望

虽然本文应用约束多目标进化算法到机械臂的优化设计问题中, 也初步达到了研究目的, 然而在这个过程中仍然存在许多不足和需要改进的地方, 例如说在第4章中的实验, 最后三种优化算法优化出来的结果非常接近, 原因在于设计的优化问题过于简单, 体现不出来各种算法之间的差异, 另外得出优化结果后, 缺少分析最优解与最优解之间的关系, 最后也缺少对最优解合理性更有力的探讨。因此, 根据上面描述的这些不足以及机械臂优化工作的发展趋势来描述一下未来的展望:

1) 复杂化机械臂优化问题, 可以从几个方面着手, 一是改进或者增加机械臂优化目标, 除了重量和可操作性外, 可以增加其他重要的优化目标, 比如说能耗、末端精度、运行周期、使用寿命等; 二是改进设计变量, 本文优化问题中连续的设计变量过少, 离散变量范围又有极限性, 可以改进设计变量的构成; 最后是增加约束条件, 可以从连杆刚度、末端负载、末端最大运行速度几个角度出发。

2) 分析最优解之间的联系, 优化后得到了大量的最优解数据, 如何从这些数据中获取有用的信息, 目前想到的办法是, 对数据进行分析, 并利用机器学习对这些数据进行挖掘, 获取最优解之间的联系。

3) 分析最优解的合理性, Pareto 前沿上的解互补支配, 但是并非代表所有的最优解都符合生活实际, 需要对优化出来的解进行合理性的分析, 可以从机械臂运动学动力学的角度着手, 利用最优解构建仿真模型进行运动学动力学仿真, 以获取各自的性能指标, 分析是否达到实际应用中的机械臂性能指标, 如果合理, 那么大大加速了机械臂的设计过程。

4) 机械臂的优化设计, 或者说机器人的优化设计以后的趋势会朝着自动优

化设计的方向发展,这样就需要考虑模块化机器人的零件库、零件间的装配条件库,机器人的装配模板库等,同时可能会涉及优化机器人的拓扑结构等。

5) 机械臂结合移动平台的应用越来越广,势必会导致移动机械臂优化设计工作越来越重要,可以从从机械臂和移动平台综合角度设计优化问题,或者分别设计机械臂和移动平台的优化问题,然后综合分析。

参考文献

- [1] International Federation of Robotics. Industrial robots: Statistics. <http://www.ifr.org>. Accessed May 18, 2015.
- [2] Albu-Schäffer, A., Haddadin, S., Ott, C., Stemmer, A., Wimböck, T., and Hirzinger, G., 2007, "The DLR Lightweight Robot: Design and Control Concepts for Robots in Human Environments," *Ind. Rob.*, 34(5), pp. 376–385.
- [3] Chedmail, P., and Gautier, M., 1990, "Optimum Choice of Robot Actuators," *ASME J. Manuf. Sci. Eng.*, 112(4), pp. 361–367.
- [4] Zhou, L., Bai, S., and Hansen, M. R., 2011, "Design Optimization on the Drive Train of a Light-Weight Robotic Arm," *Mechatronics*, 21(3), pp. 560–569.
- [5] J. M. Seo, S. H. Rhyu, J. H. Kim, J. H. Choi and I. S. Jung, "Design of axial flux permanent magnet brushless DC motor for robot joint module," The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA -, Sapporo, 2010, pp. 1336-1340.
- [6] C. Park, J. H. Kyung, T. Y. Choi, H. M. Do, B. I. Kim and S. H. Lee, "Design of an modular actuation module for a dual arm robot manipulator," 2012 9th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), Daejeon, 2012, pp. 623-624.
- [7] F. Roos, "Towards a methodology for integrated design of mechatronic servo systems," Doctoral dissertation, Dept. Mach. Des., Royal Inst. Technol., Stockholm, Sweden, Sep. 2007.
- [8] Zhou, L., Bai, S., and Hansen, M. R., "Design Optimization on the Drive Train of a Light-Weight Robotic Arm," *Mechatronics*, vol. 21, pp. 560-569, 2011.
- [9] Roy, J., and Whitcomb, L. L., 2004, "Comparative Structural Analysis of 2-DOF Semi-Direct-Drive Linkages for Robot Arms," *IEEE/ASME Trans. Mech.*, 4(1), pp. 82–86.
- [10] Pil, A., and Asada, H., 1995, "Rapid Recursive Structure Redesign for Improved Dynamics of a Single Link Robot," *ASME J. Dyn. Syst. Meas. Control*, 117(4), pp. 520–526.
- [11] Bai, S., and Zhou, L., 2011, "Design Optimization of a 5 Light-Weight Robotic Arm Under Structural Constraints," 24th Nordic Seminar on Computational Mechanics, Helsinki, Finland, Nov. 3–4, pp. 119–123.
- [12] A. Albers and J. Ottnad, "Integrated structural and controller optimization for lightweight robot design," 2009 9th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Paris, 2009, pp. 93-98.
- [13] W. Zhang, Q. Huang, D. Jia, H. Xin, M. Li and K. Li, "Mechanical design of a light weight and high stiffness humanoid arm of BHR-03," 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Guilin, 2009, pp. 1681-1686.

- [14] J. Li, Q. Huang, Z. Yu, W. Xu, X. Chen and G. Ma, "Design and workspace analysis of a light weight and high stiffness arm," 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Beijing, 2011, pp. 64-68.
- [15] T. Yoshikawa, "Manipulability of robotic mechanisms," *Int. J. Robot Res.*, vol. 4, no. 2, pp. 3-9, Jun. 1985.
- [16] J. C. Ramírez Henao, J. A. Jaramillo Garzón and L. Duque Muñoz, "Manipulability index study on the KUKA robot KR5 ARC HW," 2012 XVII Symposium of Image, Signal Processing, and Artificial Vision (STSIVA), Antioquia, 2012, pp. 72-77.
- [17] S. Lee, "Dual redundant arm configuration optimization with task-oriented dual arm manipulability," *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, vol. 5, pp. 78-97, 1989.
- [18] P. Chiacchio, S. Chiaverini, L. Sciavicco, and B. Siciliano, "Global task space manipulability ellipsoids for multiple-arm systems," *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, vol. 7, pp. 678-685, 1991.
- [19] A. Bicchi, C. Melchiorri, and D. Ballucchi, "On the mobility and manipulability of general multiple limb robots," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 11, pp. 215-228, 1995.
- [20] A. Bicchi and D. Prattichizzo, "Manipulability of cooperating robots with unactuated joints and closed-chain mechanisms," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 16, pp. 336-345, 2000.
- [21] M. G. Villarreal-Cervantes, C. A. Cruz-Villar, J. Alvarez-Gallegos, and E. A. Portilla-Flores, "Robust Structure-Control Design Approach for Mechatronic Systems," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 18, no.5, pp. 1592-1601 Oct. 2013
- [22] K. Nagatani, T. Hirayama, A. Gofuku and Y. Tanaka, "Motion Planning for Mobile Manipulator with Keeping Manipulability", in *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems*, EPFL, Lausanne, Switzerland, 2002.
- [23] S. Kim, J. Lee and H. Kim, "Singularity and Manipulability Analysis of a Planar Manipulator Mounted on a Wheeled Mobile Platform", in *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, Nevada, 2003.
- [24] X. Y. Yunong Zhang, W. Li, D. Guo and J. Li, "A Weighted Damping Coefficient Based Manipulability Maximizing Scheme for Coordinated Motion Planning of Wheeled Mobile Manipulator", in *Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Shenyang, China, 2014.
- [25] X. Luo, X. Fan, H. Zhang, T. Chen, "Integrated Optimization of Trajectory Planning for Robot Manipulators Based on Intensified Evolutionary Programming," in *proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 2004:546-551.
- [26] M. Aghanouri, A. Habibollahi, A. Esmacili, H. Faghihian, M. Koloushani, "Optimization of robotic manipulators parameters modeled with integrated equations of actuators and links," in

- proceedings of 3rd International Students Conference on Electrodynamics and Mechatronics, 2011: 31-36.
- [27] I. Duleba, J. Z. Sasiadek, "Nonholonomic motion planning based on Newton algorithm with energy optimization," IEEE Transactions on Control Systems Technology, 11(3): 355-363, 2003.
- [28] W. P. Bailon, E. B. Cardiel, I. J. Campos, A. R. Paz, "Mechanical energy optimization in trajectory planning for six DOF robot manipulators based on eighth-degree polynomial functions and a genetic algorithm," in proceedings of 7th International Conference on Electrical Engineering Computing Science and Automatic Control, 2010: 446-451.
- [29] H. Xu, J. Zhuang, S. Wang, Z. Zhu, "Global time-energy optimal planning of robot trajectories," in proceedings of International Conference on Mechatronics and Automation, 2009: 4034-4039.
- [30] M. Huang, Y. L. Hsu, R. F. Fung, "Minimum-Energy Point-to-Point Trajectory Planning for a Motor-Toggle Servomechanism," IEEE Transactions on Mechatronics, 17(2): 337-344, 2012.
- [31] O. Wigstrom, B. Lennartson, A. Vergnano, C. Breitholtz, "High-Level Scheduling of Energy Optimal Trajectories," IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 10(1): 57-64, 2013.
- [32] A. Vergnano, C. Thorstensson, B. Lennartson, P. Falkman, M. Pellicciari, F. Leali, S. Biller, "Modeling and Optimization of Energy Consumption in Cooperative Multi-Robot Systems," IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 9(2): 423-428, 2012.
- [33] C. Hansen, J. Kotlarski, T. Ortmaier, "Experimental validation of advanced minimum energy robot trajectory optimization," in proceedings of 16th International Conference on Advanced Robotics, 2013: 1-8.
- [34] Simon Foucault, Clément M. Gosselin. Synthesis, Design, and Prototyping of a Planar Three Degree-of-Freedom Reactionless Parallel Mechanism[J]. Transaction of the ASME, 2004(11) : 992 ~ 999.
- [35] 葛培明,陈虬,彭伟.基于范例学习的遗传算法在连续体结构拓扑优化中的应用[J]. 力学季刊, 2006(09) : 489 ~ 494.
- [36] 张传思.硅片传输机器人手臂的拓扑优化设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2007 : 3 ~ 11.
- [37] Albert Albers, Jens Ottnad. Integrated Structural and Controller Optimization in Dynamic Mechatronic Systems[J]. Journal of Mechanical Design, 2010(04) : 041008-1 ~ 041008-8.
- [38] S. Sakata, F. Ashida. Perturbation-based successive approximate topology optimization for a displacement minimization problem[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Volume 199, Issues 1-4, 2009(12): 148 ~ 157.
- [39] Mehdi Tarkian. Design automation for multidisciplinary optimization: A high level cad template approach. 2012.

- [40] Mehdi Tarkian. Design reuse and automation: On high level cad modeling for multidisciplinary design and optimization. 2009.
- [41] Hod Lipson and Jordan B Pollack. Automatic design and manufacture of robotic lifeforms. *Nature*, 406(6799):974–978, 2000.
- [42] Victor Zykov, Efstathios Mytilinaios, Bryant Adams, and Hod Lipson. Robotics: Self-reproducing machines. *Nature*, 435(7039):163–164, 2005.
- [43] Zhun Fan, Kisung Seo, Jianjun Hu, Erik D Goodman, and Ronald C Rosen- berg. A novel evolutionary engineering design approach for mixed-domain systems. *Engineering Optimization*, 36(2):127–147, 2004.
- [44] Maxon Motor products catalogue 10/11. <[www.maxonmotor.ch/e-paper/ blaetterkatalog/ pdf/ complete.pdf](http://www.maxonmotor.ch/e-paper/blaetterkatalog/pdf/complete.pdf)>.
- [45] Harmonic Drive technical data. <[www.harmonicdrive.de/cms/upload/ German/ B_Produnkte/ B_Units/kompl_Produktkapitel_CPU_D-E.pdf](http://www.harmonicdrive.de/cms/upload/German/B_Produnkte/B_Units/kompl_Produktkapitel_CPU_D-E.pdf)>.
- [46] K. Deb, “An efficient constraint handling method for genetic algorithms,” *Computer methods in applied mechanics and engineering*, vol. 186, no. 2, pp. 311–338, 2000.
- [47] Z. Fan, W. Li, X. Cai, K. Hu, H. Lin and H. Li, "Angle-based constrained dominance principle in MOEA/D for constrained multi-objective optimization problems," 2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), Vancouver, BC, 2016, pp. 460-467.
- [48] Z. Fan et al., "An improved epsilon constraint handling method embedded in MOEA/D for constrained multi-objective optimization problems," 2016 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI), Athens, 2016, pp. 1-8.

致 谢

光阴如梭，时光荏苒，又到了一年凤凰花盛开之际，花开花落，有得有失，不得不说不说在汕头大学三年研究生的生涯收获的更多，离别之际即将要告别这敬爱的母校以及亲爱的老师和同学们，心里满怀感恩之情。

难忘母校的培育之恩，汕大坚持“有志、有识、有恒、有为”的育人目标，坚持精英教育的宗旨，注重对每一位学生个人能力的培养，并为莘莘学子提供了广阔的平台和资源。优秀的师资为学子“传道、授业、解惑”，还有安静恬美的校园环境总是让人心旷神怡，良好的学习氛围催人上进。

难忘导师的教育之恩，在此要特别感谢我尊敬的导师范衡教授，是他引领我走向了学术的殿堂，接受更多的专业知识，并踏上了人工智能和机器人领域。在范衡老师的谆谆教诲之下，我丰富了专业知识，开阔了视野，领会了学术研究的价值。范衡老师同时是我人生的导师，他那对待学术严谨，对待学生严格，积极上进，是我人生道路中非常重要学习的榜样。每周的小组报告提高了我的逻辑思维能力，并让我学会了如何总结和提高自己的工作。同时感谢电子系其他老师们，他们的课程给我的研究提出了宝贵的意见及建议。

感谢我们团队的所有成员，在广东省图像数字信号处理重点实验室和人工智能和机器人实验室里的朝夕相处，大家彼此鼓励，互帮互助，让我学到了更多的知识，拓宽了我的思维，并形成了团结合作的良好学风，更在研究上给我极大的灵感与帮助，在此我要特别的感谢李文姬、李芳等师兄姐给我学术上的指导，和生活方面的帮助，感谢赵雷、谢红辉同门的合作和帮助，感谢陈燊、姚利等师弟对我的研究支持。虽然即将要分离，却留下了满满珍贵的回忆，永生难忘。

最后，深深感谢父母的养育之恩，非常感谢你们含辛茹苦把我养大，让我接受教育。即使你们自身没有接受高等教育，更不了解我的学术研究，但你们总是无条件的支持，给我很大的动力学习新的知识。同时感谢妹妹对我的鼓励和支持，促使我越来越上进。

我怀揣着深深的感激之情，感谢所有关心与帮助过我的人，谢谢你们！

肖杨

附 录

攻读硕士学位期间主要的工作成果

1、Y. Xiao, Z. Fan, W. Li, S. Chen, L. Zhao and H. Xie, "A Manipulator Design Optimization Based on Constrained Multi-objective Evolutionary Algorithms," 2016 International Conference on Industrial Informatics - Computing Technology, Intelligent Technology, Industrial Information Integration (ICIICII), Wuhan, 2016, pp. 199-205.

2、H. Xie, Z. Fan, W. Li, Y. Rong, Y. Xiao and L. Zhao, "Tobacco Plant Recognizing and Counting Based on SVM," 2016 International Conference on Industrial Informatics - Computing Technology, Intelligent Technology, Industrial Information Integration (ICIICII), Wuhan, 2016, pp. 109-113.

3、L. Zhao, Z. Fan, W. Li, H. Xie and Y. Xiao, "3D Indoor Map Building with Monte Carlo Localization in 2D Map," 2016 International Conference on Industrial Informatics - Computing Technology, Intelligent Technology, Industrial Information Integration (ICIICII), Wuhan, 2016, pp. 236-240.