

硕士学位论文

题 目 基于多目标进化算法的工业机器人减速器设计

Multiobjective Optimization of Industrial Robots 英文题目 Reducer Based on Evolutionary Algorithm

姓 名	王晟	学 号	11209009	_
所在学院	工学院	导师姓名	范街	
专 业		机械电子工程		
入学日期	2012年9月	答辩日期	2015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,不包含其他人或其他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。

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、 缩印或其他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: 王晟	导师签名:
日期:年5月_28日	日期: <u></u> 年5_月28_日

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,不包含其他人或其他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: _____ 日期: _____年___月___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、 缩印或其他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:			导师签名:				
日期:	年	月	日	日期:	年	月	E

摘要

随着中国经济的发展,传统制造业面临着向自动化转型,工业制造领域迫切希望提升生产 效率和制造质量,工业机器人的需求和应用越来越多。减速器作为工业机器人的核心部件之一, 对工业机器人的性能具有重要的影响。但是,工业机器人减速器被国外厂商垄断,制约了国产 工业机器人发展。因此工业机器人减速器的设计变得尤为关键。由于减速器涉及的参数比较多, 关系比较复杂,影响的因素也较多,这就给减速器的设计带来了一定的困难。现有的研究方法 尚存在一定的不足,目标函数单一,优化设计的精确性差。因此全面深入地研究工业机器人减 速器的设计优化问题,具有一定的实际意义。

多目标进化算法作为一种模拟自然进化过程的随机优化方法,采用群体搜索策略,有很强的全局优化能力。自然界"优胜劣汰"需要进化上亿年的时间,而借助于计算机我们可以把时间大大缩短。进化算法的出现为复杂优化问题的求解提供了新思路,已在各个领域得到了广泛的应用。为了解决减速器传动效率低结构、不够紧凑的问题,提高机器人的传动性能,本文以行星齿轮减速器、RV 减速器作为研究对象,从传动过程入手,综合考虑减速器应用过程中的参数因素,建立了以体积最小、效率最高为目标函数的多目标优化设计数学模型。采用多目标进化算法对模型进行优化求解。通过对模型的求解,并对仿真结果进行分析,验证了该方法的有效性,为减速器优化设计提供了一定的理论与方法。

关键词:工业机器人;减速器;进化算法;多目标优化

I

Abstract

With the rapid development of Chinese economy, the traditional manufacturing industry is facing transform and update to automation, and the industrial field is eager to enhance production efficiency and manufacturing quality, so the requirement and application of industrial robots is becoming more greater than ever. Industrial robots reducer, as one of the core components of industrial robots, has an important influence on the performance of industrial robots. However, the industrial robots reducer is monopolized by foreign manufactures, which has restricted the development of domestic industrial robots suppliers. Therefore the design of industrial robot reducer is very crucial. The robots reducer relates to many parameters and the relationship is more complex which brought certain difficulties to the design of robots reducer. The existing research methods still have some deficiencies, for example the objective function is single and the optimization design accuracy is poor. So in-depth study of the industrial robot reducer has certain practical significance.

As a stochastic optimization method simulating the natural evolutionary process, the evolutionary algorithm adopts the strategy of population search and has strong global optimization ability. The emergence of evolutionary algorithm provides a new idea for solving complex optimization problems, and has been widely used in various fields. In order to solve problems of the low transmission efficiency and structure is not compact enough, and improve the transmission performance of the robot, this paper takes the planetary gear reducer and RV Reducer as the research object, starting from the transmission process, consider the parameters factor in the application of reducer comprehensively, and establish multi-objective optimization design mathematical model taking the minimum volume and the highest efficiency as objective function. Then use multi-objective evolutionary algorithms to optimize model. By solving the model, and analyzing the simulation results, the effectiveness of the method is verified and provide certain theories and methods on the reducer optimal design.

Keywords: industrial robots, reducer, evolutionary algorithm, multi-objective optimization

	=
日	求

摘	要	I
Ab	strae	ct
目	录	
第	1章	绪论1
	1.1	课题研究背景及意义1
		1.1.1 研究背景1
		1.1.2 研究意义
	1.2	国内外研究现状
		1.2.1 多目标进化算法研究现状
		1.2.2 行星齿轮减速器研究现状5
		1.2.3 RV 减速器研究现状
	1.3	课题内容6
第	2章	多目标进化算法
	2.1	多目标进化算法的基本概念8
	2.2	经典多目标进化算法 NSGA-II 介绍10
		2.2.1 快速非支配排序10
		2.2.2 拥挤距离11
		2.2.3 子代种群的产生11
	2.3	经典多目标进化算法 MOEA/D 介绍12
		2.3.1 分解方法12
		2.3.2 邻居的概念
	2.4	多目标进化算法的约束处理方法13
		2.4.1 罚函数法
		2.4.2 排序法
		2.4.3 不可行解法14
		2.4.4 混合方法14

	2.5	多目标进化算法的评价指标	.14
		2.5.1 反向世代距离	.14
		2.5.2 超体积	.15
		2.5.1 Coverage 指标	.15
	2.6	改进 MOEA/D	.16
		2.6.1 约束违背值	.16
		2.6.2 约束支配原则 CDP	.16
		2.6.3 不可行解驱动 ID	.17
	2.7	本章小结	.20
第:	3章	RV 减速器多目标优化设计	.21
	3.1	RV 减速器简介	.21
	3.2	RV 减速器的工作原理	.22
	3.3	RV 减速器的特点	.23
	3.4	RV 减速器的传动比	.23
	3.5	RV 减速器的建模	.24
		3.5.1 目标函数	.25
		3.5.2 设计变量	.26
		3.5.3 约束条件	.26
	3.6	优化算法及实验环境	.29
	3.7	优化实例及结果分析	.29
		3.7.1 优化实例	.29
		3.7.2 结果分析	.30
	3.8	本章小结	.31
第4	1章	行星齿轮减速器优化设计	.32
	4.1	行星齿轮减速器	.32
		4.1.1 行星齿轮机构的分类	.32
		4.1.2 行星齿轮机构的设计准则	.33
	4.2	两级行星齿轮减速器多目标优化问题	.35
	4.3	行星齿轮减速器的建模	.36

	4	4.3.1 目标函数	36
	4	4.3.2 设计变量	37
	4	4.3.3 约束条件	38
4.	.4 兌	优化实例及结果分析	41
	4	4.4.1 实验平台	41
	4	4.4.2 实验结果	41
	4	4.4.3 实验分析与设计规律	42
4.	.5 Z	本章小结	45
第51	章	总结与展望	46
5.	.1 応	总结	46
5.	.2 展	展望	46
参考了	文献	t	48
致 谢			55
硕士其	期间]主要工作成果	56
个人简	節历	Ĵ	57

第1章 绪论

1.1 课题研究背景及意义

1.1.1 研究背景

工业机器人是一种带有执行装置与存储控制装置、能够代替人完成各种特定操作或工艺的 机器。通常用来代替工人完成对身体有害的恶劣环境下作业或者进行单调重复的劳动。工业机 器人的应用不仅可以提升企业的生产效率与产品质量,而且节省了企业的劳动力成本。

自从 1962 年世界上第一台工业机器人问世以来,工业机器人的发展经历了 50 多年时间, 在全球范围内得到广泛的关注和应用。美国是世界上最先研制成功工业机器人的国家,但是由 于美国对工业机器人的决策失误而失去了工业机器人工业的发展时机,反而为日本创造了工业 机器人的发展机会,日本在短短十几年内迅速发展成为机器人大国,装机量和销售量均居世界 第一,被称为"机器人王国"^[1]。



图 1.1 a) FANUC ARC Mate 100iC/6L



图 1.1 b) ABBIRB 1520ID



图 1.1 c)丹麦 UR5 图 1.1 d) KUKA KR 5-2 ARC HW 图 1.1 e) 史陶比尔 TX90

全球的工业机器人市场大部分被国际知名企业所占领,例如德国 KUKA,瑞士 ABB,日本 FANUC 等。图 1.1(a)所示为 FANUC 的弧焊机器人 ARC Mate 100iC/6L,图 1.1(b)所示为 ABB 中空轴弧焊机器人 IRB 1520ID,图 1.1(c)所示为丹麦优傲机器人 UR5,图 1.1(d)所示为 KUKA 弧焊机器人 KR 5-2 ARC HW,图 1.1(e)所示为史陶比尔六轴小型负载多功能机器人 TX90。

随着中国经济的发展,在长三角、珠三角等地区,"用工荒用工难"的问题越来越严重,企业的用工成本增加,传统制造业向自动化转型的要求越来越迫切。为了提升工业制造领域的生产效率与产品质量,工业机器人的需求和应用越来越多,工业机器人成为企业补充和替代劳动力的明智选择。

近年来,政府从战略角度出发,也在大力倡导产业转型升级,助推制造业数字化、网络 化、智能化。2015年的政府工作报告首次提出"中国制造 2025",即中国版"工业 4.0 规划", 其中"智能制造"占据重要位置,为中国工业发展指明了方向。目前,德国每万名工人机器人 拥有量为 273 台,日、韩则已超过了 300 台,中国仅为 23 台,机器人产业的发展潜力仍然很 大^[2]。我国 2014、2015 连续两年成为全球最大的机器人市场。随着工业机器人产量的增多, 作为工业机器人的核心部件,减速器的需求量也水涨船高^[3]。

1.1.2 研究意义

随着制造业的发展,对工业机器人的定位精度要求越来越高。因此,为了提高工业机器人的精度,工业机器人需要采用精密减速器,如RV减速器。采用精密减速器的另一个原因是输出更大的扭矩^[4]。当工作负载较大时,单纯依靠提高电机功率是很不划算的,可以通过减速器来提高输出扭矩。此外,在低频运转下伺服电机容易出现发热及低频振动等现象,对于从事长期循环工作的工业机器人,这些现象都不利于工业机器人精确可靠地运行。

目前成熟并标准化的减速器主要有以下几类:圆柱齿轮减速器、涡轮减速器、行星齿轮减速器、RV减速器、谐波减速器等。80-90年代以来,航空航天、机器人等新兴行业的发展推动 了精密减速器的研究,主要特点为结构简单紧凑、传动功率大、噪声低、传动平稳,因此RV减 速器越来越受到青睐。例如在工业机器人中,通常将RV减速器放置在机座、大臂等重负载的位 置;而将谐波减速器放置在小臂、腕部或手部;行星减速器一般用在直角坐标机器人上。

工业机器人的核心部件包括机器人本体、减速器、伺服系统、控制系统四部分,作为核心部件之一,高精度机器人减速器被日本的 Nabtesco 及 HarmonicDrive 两家公司垄断,包括

ABB、KUKA 等国际巨头的减速器均有上述两家公司提供。因此减速器的国产化已经迫在眉睫。如何对工业机器人减速器进行优化,探索出工业机器人减速器行之有效的设计方法,从 而提高工业机器人的性能指标,开发出具有自主知识产权与竞争力的工业机器人,已经成为 抵制国外工业机器人垄断的必由之路,具有非常重要的战略意义。

由于减速器的设计中,涉及到多个设计目标,设计变量较多,约束条件复杂,传统设计 方法较难实现。在本文中建立了行星齿轮减速器及 RV 减速器的数学模型,并采用多目标进 化算法对其优化,得到工业机器人减速器的最优设计方案。根据该设计方案在机器人仿真软 件上仿真验证,缩短了设计周期,对工业机器人的设计制造具有巨大的指导意义。

1.2 国内外研究现状

本节主要介绍与本课题相关的国内外研究现状,其中包括多目标进化算法研究现状、行星 齿轮减速器研究现状及 RV 减速器研究现状。

1.2.1 多目标进化算法研究现状

1. 第一阶段

Rosenberg于1967年在他的博士论文中最早提出使用进化搜索策略来处理多目标优化问题 的构想,但他并没有实现具体的多目标进化算法^[5]。此后,Schaffer对简单遗传算法进行扩充, 在1984年首先提出向量评估遗传算法VEGA(Vector Evaluated Genetic Algorithms)^[6],可以对 目标向量进行处理。1989年,David Goldberg提出在求解多目标优化问题时加入非支配排序和 小生境技术的新思路^[7],对后续多目标进化算法的研究起到了方向性的指导作用。20世纪90年 代以后,多目标优进化算法的研究得到了快速发展,相继出现了一批优秀的多目标进化算法, 这一阶段的代表性算法有MOGA(Multi-Objective Genetic Algorithm)^[8],NSGA(Nondominated Sorting Genetic Algorithm)^[9]及NPGA(Niched Pareto Genetic Algorithm)^[10]等算法。第一代多 目标进化算法主要关注算法的简单性,以基于非支配排序的选择和基于共享函数的多样性保持 为其主要特点,通过非支配排序和小生境技术来解决多目标优化问题。同时存在一些缺陷,例 如:需要确定小生境半径的先验信息;算法的计算复杂度大等^[11]。

2. 第二阶段

20世纪末,多目标进化算法发生了重大转变。1999年,Zitzler等人提出的SPEA(Strength Pareto Evolutionary Algorithm)^[12]创新性地引入了精英保留策略,即将进化过程中优秀的非支

配个体保留在一个外部种群中,成为了第二代多目标进化算法诞生的里程碑。随后产生的大多 算法一批优秀的算法,大部分都基于精英保留策略,主要有: 1999年Knowles和Corne提出的 PAES(Pareto Archived Evolution Strategy)^{[13][14][15]},2000年Corne等人提出的PESA(Pareto Envelope-based Selection Algorithm)^{[16}]及相应的改进版本PESA-II^[17],1999年Zitzler和Thiele提 出的SPEA(Strength Pareto Evolutionary Algorithm)^[12]及其改进版本SPEA2^[18],2002年Deb等人 对NSGA进行改进提出NSGA-II^{[19][20]}。这些算法均采用精英保留策略,而且在保持种群多样性 方面基本不再使用要求适应度共享的小生境技术,而是采用了一些更好的方法,例如基于拥挤 距离的方法、基于聚类的方法、基于空间超格的方法等^[11]。

3. 第三阶段

2003年以来,多目标进化算法的研究进入了蓬勃发展的阶段,一些新的概念相继被提出,同时不断引入一些新的范例求解多目标优化问题,如蚁群算法,粒子群优化算法,人工免疫算法等。同时高维的多目标优化问题也取得了可喜的进展,出现了多目标进化算法研究的新高潮。比较有代表性的有如下三种算法。2005年,Coello Coello等人提出的多目标粒子群算法MOPSO

(Multi-objective Particle Swarm Optimization)^[21],它是基于原来的PSO原理的经典算法之一。 MOPSO根据种群个体的Pareto支配关系进行比较,同时通过自适应网格机制来保存外部种群。 引入了新的变异策略来保证解集的多样性,即以与种群进化代数成比例的变异尺度对种群中的 粒子及其区中范围同时进行变异,取得了良好的效果。2008年,Jiao和Gong等人提出了非支配 邻域免疫算法NNIA(Non-dominated Neighbor-based Immune Algorithm)^{[22][23]}。该算法主要对 生物免疫系统中抗体的共生与激活现象进行模拟,每个种群个体对应免疫系统的抗体。首先根 据非支配邻域方法选择种群个体,然后按照种群个体的拥挤程度成比例地复制,最后采用一种 新型的交叉变异操作,该方法对于Pareto前沿面中较疏区域搜索能力突出。2007年,Zhang等人 将传统数学规划中的分解策略与进化算法完美结合,提出了一种新的基于分解的多目标进化算 法MOEA/D (Multi-objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition)^[24]。该算法通过传 统的多目标分解策略,如加权法^[25]、切比雪夫 (Tchebycheff) 法^[25]、边界交叉法等,将多目标 优化问题分成为一定数目的单目标优化问题,通过求解这些单目标优化问题得到原多目标优化 问题的Pareto最优解。同时该算法中存在一个内部进化种群和一个由每个子问题的当前最优解 组成的外部种群 EP (External Population)^[26],通过计算欧式距离得到距离每个子问题对应的权 重向量最近的邻居来完成进化更新操作,从而保证了种群的多样性。MOEA/D成为与NSGA-II 齐名的经典多目标进化算法,得到了学者们的广泛关注及进一步研究,在此基础上提出了一些

变种,如MOEA/D-ACO^[27],MOEA/D-AMS^[28],MOEA/D-DRA^[29]等。

由于目前的多目标优化算法一般涉及两或三个目标,而高于三个目标的优化问题较为复杂。随着多目标进化算法的发展,处理高维多目标 (Many-objective) 优化问题的需求越来越迫切^[32]。 2013年,Deb根据 NSGA-II 框架进行改进,提出了基于参考点的高维目标进化算法以用来解决 高维多目标优化问题,并称之为NSGA-III^{[30][31]},标志着在高维目标优化算法上取得了巨大的 突破。

1.2.2 行星齿轮减速器研究现状

行星齿轮减速器即若干行星轮围绕一个太阳轮旋转的减速器^[33]。由于行星齿轮减速器优 点较多,比如体积小、质量轻、承载能力强、使用寿命长、运转平稳,是一种用途广泛的工业 产品,欧美日等发达国家对行星齿轮减速器的研究、生产及应用都十分重视,在行星齿轮减速 器的各方面研究均处于领先水平。特别是关于行星传动动力学方面的研究发展较快,从80年代 末开始国际上对行星齿轮传动的弹性动力学理论进行研究,1994年以后在美国国家航空航天局、 美国军事研究中心以及福特汽车公司资助下,美国对行星齿轮传动弹性动力学的自由振动、动 态响应、均载、振动抑制、动态稳定性等很多方面进行了系统的研究^[35]。

由于我国对行星齿轮减速器的研究始于二十世纪六十年代,起步较晚,与国外存在较大差 距,总体水平处于落后状态。但是最近二十年以来,随着我国机械技术人员对引进技术的消化 吸收以及不断积累,在行星齿轮的理论研究与优化设计方面取得了很大的进步^[34],行星齿轮减 速器的应用日益广泛。国内关于行星齿轮减速器动力学方面的研究主要有航空行星减速器的振 动特性分析^[36],有行星齿轮传动非线性动力学模型与方程方面的研究^[37]。与此同时,随着其他 学科研究成果的出现,行星齿轮减速器优化设计研究也在不断进步,例如把遗传算法或模糊数 学应用在行星齿轮优化设计中^[38],将可靠性工程理论中的强度可靠性系数方程与行星齿轮减 速器设计相结合^[39],将MATLAB软件的优化函数工具箱应用于行星齿轮的优化设计中^[40],推 动了行星齿轮减速器设计理论的研究。

1.2.3 RV 减速器研究现状

RV (Rotate Vector) 减速器是在摆线针轮行星减速器的基础上发展起来的,其特征为具有中心圆盘支承及二级减速机构,通常用在工业机器人的底座或大臂上面。二十世纪八十年代初日本帝人株式会社率先提出"RV传动"的概念,当时随着市场对机器人精度的要求不断提高,

推动该公司开始着手研发用于提高机器人运动精度及使用性能的减速装置,称之为RV传动^[41]。 1986年,该公司对RV减速器的研究终于取得研究成果并开始投入市场,RV减速器具有传动比 大、高可靠性、高传动效率、高精度、振动较低等一系列优点,因此成为了机器人的"御用" 减速器。目前市场上日本帝人成为工业机器人RV减速器主要制造厂家之一。

我国从上世纪六十年代开始对RV传动进行研究,但大部分成功在"九五期间"。东北工学院 等高校在六十年代首先引进关于摆线针轮行星传动的基础知识;接着大连铁道学院的朱恒生教 授提出了在加工摆线轮时计算滚刀齿形的通用公式。郑州工学院与大连铁道学院先后对摆线针 轮行星减速器的实际受力情况进行了深入的分析,首次提出了一种符合共轭条件的修形方式, 提高了摆线轮承载能力,优化了齿形^{[42][43]};上海交大等院校开始研究摆线齿轮的加工原理及其 制造工艺;1978年,辽阳制药机械厂首次研制成功二齿差摆线针轮减速器。

"九五"期间,我国把关于RV传动的研究列为了关键技术攻关项目,上海减速器厂于1990 年研制成功了汽车专用的2K-V型RV减速器;刘继岩等人详细分析了RV传动的固有频率^[44]; 1997年,何卫东等依托国家863项目"机器人用新结构高精度摆线针轮传动设计理论与方法研 究",详细分析了RV传动的相关问题,例如其受力情况、传动效率及运动学分析等^[45]; 1999 年大连交通大学成功研制出了机器人专用RV-250A II 型高精度减速器样机^[46],经过测试,其主 要技术指标均达到了国际先进水平,但是与日本的同类最新产品相比仍存在不足之处。2002 年, 姚文席研究了RV传动中摆线轮的精度问题^[47];2004 年,严细海等提出了影响双曲柄 RV 减速 器一阶固有频率的主要因素^[48];2005年,关天民等关于摆线轮齿廓提出 "反弓"的概念并优 化了齿廓^[49]。在国家的大力支持下,国内高校与相关企业通力合作,在新型RV减速器研发方 面取得了巨大的进步,但是与国外先进水平仍存在差距,还需继续努力。

1.3 课题内容

为了提高机器人的传动性能,本文以行星齿轮减速器、RV 减速器作为研究对象,从传动 过程入手,建立了行星齿轮减速器及 RV 减速器多目标优化的数学模型,综合考虑减速器应用 过程中的参数因素,运用多目标进化算法对模型进行优化求解。通过对模型的求解,并对仿真 结果进行分析。具体内容如下:

第一章介绍课题的研究背景、研究意义、进化设计及减速器研究现状。

第二章主要讲述了多目标进化算法的一些基本概念、两种经典的多目标优化算法 NSGA-II 与 MOEA/D 的相关理论知识、多目标优化问题的约束条件处理方法、多目标进化算法的评

价指标,最后提出了一种新的算法 MOEA/D-CDP-ID。为后面减速器的优化设计奠定了基础。

第三章为 RV 减速器的多目标优化设计。首先对 RV 减速器进行介绍,讲述 RV 减速器的 结构及工作原理。然后分析了影响摆线针轮行星减速器的主要参数,对 RV 减速器中的摆线针 轮行星减速器结构建立多目标数学优化模型,包括目标函数、约束变量及约束条件,用 C++语 言编写了多目标优化算法程序对减速器进行优化设计,并对结果进行分析,给出结论。

第四章为行星齿轮减速器多目标优化设计。以两级行星齿轮减速器为例,基于问题建立 目标函数、设计变量并建立优化的约束条件,归纳为一个带约束的多目标优化问题。采用改 进后的多目标进化算法 MOEA/D-CDP-ID 求解该问题,并与改进之前的算法进行比较,验证 了改进后算法的性能。同时采用数据挖掘的方法,揭示出了设计变量与设计目标之间的规 律,反过来指导设计过程,对于两级行星齿轮减速器的设计具有指导性作用。

第五章为总结与展望。

第2章 多目标进化算法

工业机器人出现在上世纪六十年代,如今已广泛应用于工业领域。工业机器人,又称为机械臂或机械手,是在工业应用中用来完成各种指定的任务的操作机器,具有自动控制、可重复编程、多自由、多功能及多用途等特点^[50]。本章主要讲述了多目标进化算法的一些基本概念、两种经典的多目标优化算法 NSGA-II 与 MOEA/D 的相关理论知识、多目标进化算法的评价指标;工业机器人两种常用的减速器行星齿轮减速器与 RV 减速器的相关理论知识。

2.1 多目标进化算法的基本概念

按照优化问题中目标的数目,可以把优化问题分为单目标优化问题(Single-objective Optimization Problem)及多目标优化问题(Multi-objective Optimization Problem),有些文章也称 之为多标准优化问题 (Multi-criteria Optimization Problem)^[51]。同时,根据约束条件,可以把优 化问题分为无约束的优化问题及有约束的优化问题。因此,优化问题可以分为以下四种:无约 束的单目标优化问题,有约束的单目标优化问题,无约束的多目标优化问题,有约束的多目标

关于多目标优化算法一些定义如下[52]:

定义 2.1 多目标优化问题的数学描述:

假设存在 m 个目标函数,决策变量是 n 维的,不等式约束条件有 k 个,等式约束条件有 l 个,不失一般性,带约束的多目标优化问题描述如下:

$$\min F(x) = [f_1(x), f_2(x), ..., f_m(x)]^T$$
(2-1)

其中 $x = (x_1, x_2, ..., x_n)^T$ 为决策向量,它满足以下约束条件:

$$g_i(x) \ge 0 \quad i = 1, 2, ..., k$$
 (2-2)

$$h_i(x) = 0 \ i = 1, 2, ..., l$$
 (2-3)

寻求 x^{*} = (x₁^{*}, x₂^{*},..., x_n^{*})^T 使 f(x^{*})在满足约束(2-2)和(2-3)的同时达到最小值。对于最大化的带约 束多目标优化问题,可以取其相反值转化为最小化的带约束多目标优化问题。不等式条件若 是小于等于零,亦可通过变形转化为大于等于零。 决策向量 x 的集合组成决策空间,而目标向量的集合组成目标空间。目标函数 F(x)也可以看出从决策空间到目标空间的映射关系。以双目标优化问题为例,如下图 2-1 所示。



图 2-1 从决策空间到目标空间的映射关系

定义 2.2 可行解集与可行域

对于任一解 x, 满足约束条件(2-4)的决策向量 x 称为可行解, 可行解组成的集合称为可行解集。即

$$X_f = \{ x \in X \mid g(x) \ge 0 \cap h(x) = 0 \}$$
(2-4)

由决策空间中所有的可行解组成的集合称为该问题的可行域,可行域在决策空间的补集称为不可行域。

$$Y_{f} = f(X_{f}) = Y_{x \in X_{f}} \{ f(x) \}$$
(2-5)

定义 2.3 Pareto 支配关系

对于任意决策向量 x、y:

(1)Pareto 支配关系: $\forall x, y \in P, P$ 为多目标优化问题的解集。当且仅当 $\forall i \in \{1, 2, ..., M\}$,

 $f_i(x) \le f_i(y)$ 且∃ $j \in \{1, 2, ..., M\}$, $f_i(x) \le f_i(y)$, 则称x支配y, 表示为 $x \prec y$ 。也称x为非支配 解(non-dominated), y为支配解(dominated), 其中"≺"表示支配关系^[5]。

(2)不相关: $\forall x, y \in P$, 若解 x 与解 y 互不支配, 则称 x 与 y 不相关。

多目标优化问题相对于单目标优化问题具有很多不同,主要表现在:多目标优化问题的目

标函数是向量函数,而单目标优化问题的函数是标量函数;在单目标优化问题中,任一两个解 具有绝对的优劣关系(大于、等于或小于),而在多目标优化问题中任一两个解可能存在支配 关系,存在优劣之分,也有可能相互都不支配,无法比较好坏,比如对于双目标优化问题,解 A 的一个目标比解 B 好,而将 A 的另一个目标比解 B 差;此外,对于多目标优化问题,多个 目标之间通常是相互冲突的,一个目标变好可能会导致另外一个目标变差,因此所求得的解并 不是唯一的,而是在多个目标之间同时达到最优,是一组折衷解。

定义 2.4 Pareto 最优解

如果对于公式(2-1)不存在 $x \in \Omega$ 使得 F(x) 支配 $F(x^*)$,则称解 x^* 为 Pareto 最优解。或者说 不被其他任何解支配的解称为 Pareto 最优解。

定义 2.5 Pareto 前沿

由于目标函数 *F*(*x*)可以看成从决策空间到目标空间的映射。由所有 Pareto 最优解在目标 空间对应的 Pareto 最优目标向量组成的集合称为 Pareto 最优前沿 (Pareto Front, PF),也称 之为非支配前沿,如图 2-2 所示。



图 2-2 双目标优化问题 Pareto 前沿示意图

2.2 经典多目标进化算法 NSGA-II 介绍

2002 年, Deb 等人在 NSGA 的基础上,提出了改进版本 NSGA-II^[19]。NSGA-II 弥补了 NSGA 算法的不足,主要优点表现在:

2.2.1 快速非支配排序

设置进化群体为与构造集 P'。算法开始时将第一个个体放入构造集 P'中,依次将进化群体 P中的个体 $p(p \notin P')$ 取出并放入构造集 P'中,同时将当时放入 P'中的所有个体进行比较,

删除 P'中所有被 P 支配的个体,若个体 P 被 P'中任意一个个体所支配,则将 P 从 P'中删除。 这样所有的非支配个体均保留在 P'中,所在的层级为 n=1。为了找到其他非支配层级, P'中 的成员将不再被计入,在余下的种群中再重复上述的操作。

2.2.2 拥挤距离

为了使 Pareto 最优解能够沿着整个 Pareto 前沿面尽可能均匀地分布, NSGA-II 算法中涉 及到拥挤距离的概念。种群中某个个体的拥挤距离等于其相邻的两个个体在每个子目标上的距 离差之和,图 2-3 所示为双目标优化问题下种群个体的拥挤距离示意图,第*i*个种群个体的拥 挤距离等于与其相邻最近的两个点所组成的矩形的周长。拥挤距离反映了种群中个体的拥挤程 度。

需要说明的是,对于多目标优化问题的每个子目标最大值或最小值的个体被称为边界个体。 对每一目标函数,我们规定边界个体的拥挤距离设置为无穷大^[5]。



图 2-3 拥挤距离示意图

2.2.3 子代种群的产生

NSGA-II 采用精英选择策略,将那些优秀的种群个体保留到下一代种群中。具体操作如下:首先随机产生一个初始种群 *P_t*,对种群 *P_t*进行选择、交叉与变异策略得到一个子代种群 *Q_t*,父代种群 *P_t*与子代种群 *Q_t*的数目均为 *N*。将父代种群 *P_t*与子代种群 *Q_t*合并得到种群数 目为 2*N*的种群 *R_t*;然后对种群 *R_t*中的个体进行非支配排序,由优到劣取从种群 *R_t*中取 *N* 个种群个体记为下一代种群 *P_{t+1}*,种群 *R_t*中剩余的个体舍弃掉。这样就产生了下一代种群。在 该算法中通常采用锦标赛选择法^[53]进行选择操作,采用模拟二进制交叉算子^[54]及多项式变异 算子^[55]进行交叉与变异操作。

2.3 经典多目标进化算法 MOEA/D 介绍

2.3.1 分解方法

2007 年, Zhang 等人提出了 MOEA/D 算法(Multi-objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition)^[24]。MOEA/D 的核心思想是通过传统方法的分解策略,将一个多目标优化问题分解为一定数量的单目标优化子问题,再采用进化算法对这些单目标子问题同时进行优化,获得各个子问题的 Pareto 最优解。在 MOEA/D 中主要采用以下三种方法进行分解:

(1) 加权法(Weighted Sum Approach)

对于含有m个子目标的多目标优化问题,设权重向量为 $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)^T$,其中

 $\lambda_i ≥ 0$, *i*=1,2,...,*m*且 $\sum_{i=1}^{m} \lambda_i = 1$ 。不同的权重求和法通过对每个目标加权的方式将多目标优化问题转化为多个单目标子问题的和,数学表达式为:

$$\begin{cases} \text{minimize } g^{ws}(x|\lambda) = \sum_{i=1}^{m} \lambda_i f_i(x) \\ \text{subject to } x \in \Omega \end{cases}$$

$$(2-6)$$

其中 g^{ws}(x|λ)是单目标优化问题(2-8)的目标函数, x为自变量, λ为权重向量。在每一组 权重向量下,上述优化问题在的最优解即为多目标优化问题(2-1)的 Pareto 最优解。因此, 分别求解不同λ值下单目标优化问题(2-8),即可得到多目标优化问题的一组 Pareto 最优解 集。

(2) 切比雪夫法(Tchebycheff Approach)^{[25][56]}

切比雪夫法通过以下形式将多目标优化问题转化为多个单目标子问题:

$$\begin{cases} \text{minimize } g^{te}(x|\lambda, z^*) = \max\left\{\lambda_i \cdot \left|f_i(x) - z_i^*\right|\right\} \\ \text{subject to } x \in \Omega \end{cases}$$

$$(2-7)$$

其中 $z^* = (z_1^*, z_2^*, \dots, z_m^*)^T \mathbf{x} \in \Omega$, $\mathbf{z}^* = (\mathbf{z}_1^*, \dots, \mathbf{z}_i^*)^T$ 为参考点, 在问题(2-1)中, 可设 $z_i^* = \min\{f_i(\mathbf{x}) | \mathbf{x} \in \Omega\}$, $i = 1, 2, \dots, m$ 。m个不同的权重向量代表着从参考点出发不同的搜索 方向^[57]。如果目标函数是连续的且权重向量选取恰当的话, 那么最终 Pareto 前沿上解得分布 也会很均匀。

理论上,对于多目标优化问题(2-1)的每一个 Pareto 最优解 x^* ,一定存在这样一个权重

向量λ,使得*x**与分解后的单目标子问题(2-9)的一个最优解对应。反过来,单目标优化问题(2-9)的每个最优解也与多目标优化问题(2-1)的 Pareto 最优解。

2.3.2 邻居的概念

在 MOEA/D 中引入了邻居的概念。首先计算任意两个权重向量间的欧式距离,根据欧式 距离得到每个权重向量最近的*T* 个权重向量。对于每个*i*=1,…,*N*,假设 λ^{i} , λ^{i} ,…, λ^{i} 是距离 λ^{i} 最近的*T* 个权重向量,将这些权重向量的索引存入B(i)中,记为 $B(i) = \{i_{1}, i_{2}, ..., i_{T}\}$,即为 λ^{i} 的邻居。i = 1,...,N,令 B(i) = { $i_{1}, ..., i_{T}$ }

以切比雪夫法为例,对于连续目标函数,如果λⁱλ^j和λⁱ礼ⁱ相邻,那么g^{te}(x|λ^j,z^{*})和 g^{te}(x|λⁱ,z^{*})的值也应该非常接近。在 MOEA/D 中,与第*i*个子问题的相邻就是与所有带有λⁱ 的权重向量的子问题相邻。因此,其他任何g^{te}均可通过权重向量以及与λⁱ相关的信息来优化 g^{te}(x|λⁱ,z^{*})。利用相邻子问题的信息来相互协助进行优化是 MOEA/D 进化的主动力。

MOEA/D 在求解具有复杂 PF 的多目标优化问题时效果比 NSGA-II 出色许多^[56],因此非常适合应用到实际工程优化问题。

2.4 多目标进化算法的约束处理方法

近年来,如何处理约束问题成为了活跃的研究领域,提出了许多方法。通常使用的约束 处理方法主要如下:

2.4.1 罚函数法

罚函数法为最常用的约束处理方法之一^{[58][59]}。该方法使用约束违背值对不可行解施加惩罚。在该方法中,通过把解的约束违背值相加降低不可行解的适应值。罚函数法可能对某些约束处理问题较为有效,但是在施加罚函数的过程中需要引入额外的参数。因此,这些参数的选择对于约束优化问题中罚函数的效果起到了至关重要的作用。

2.4.2 排序法

为了避免上述方法中的惩罚参数,Runarsson 与 Yao^[58]引入了一种基于目标函数与约束违 背值随机排序的方法,该方法中采用了一个概率参数来决定是基于目标值还是约束违背值进 行比较。此外,还有基于可行解优先于不可行解的原则进行比较的方法。例如,Deb^{[19][60]}提 出了一种约束支配原则,也是一种比较个体的可行解驱动规则。

2.4.3 不可行解法

有些学者提出了进化过程中在种群中保持一定比例的不可行解的方法。对于单目标优化 问题,Coello Coello^[61]提出把种群分成许多子种群,每个子种群采用目标或者约束作为适应 值函数来增强种群的多样性。Mezura 与 Coello^[62]引入了一种不可行解存档机制,这种机制中 根据不可行解的目标函数值得到的最好的不可行解允许保留到下一代。Cai 与 Wang^[63]对他们 的方法进行了改进,对所有的解采用非支配排序。为了保留好的可行解以及约束边界的不可 行解,在研究约束边界时文献提出了不可行解驱动进化算法(IDEA)^[64]。不可行解驱动中用到 了约束违背值,首先根据每个解得约束违背值进行排序,然后把所有相关排序数的总和定义 为一个新的目标函数并进行进化;因此对于多目标权衡考虑得到较优的可行解以及约束边界 的不可行解。该方法增加了目标函数,因此也增加了目标空间的搜索难度。

2.4.4 混合方法

Wang 与 Cai^{[59][65]}提出了一种动态混合框架。提出的框架主要由两部分组成:全局搜索模型与局部搜索模型。采用差分进化作为搜索引擎^[56],基于 pareto 支配的概念进行个体的选择。基于在现有种群中可行解的比例,该框架具有动态实现全局与局部搜索的优点。

2.5 多目标进化算法的评价指标

多目标进化算法性能优劣主要包含以下四方面: 解集的收敛性、 解集的分布性、解集的 分布广度、算法运行的效率。在本文中,主要使用以下三种评价指标对算法所获得的 Pareto 最 优解集的分布性,收敛性及算法的运行效率等进行评估,进而反映算法的性能。

2.5.1 反向世代距离

反向世代距离 IGD (Inverted Generational Distance)^[66] 具体如下:

令 P^* 为理想 Pareto 前沿上均匀分布的 Pareto 最优集合, A 是通过多目标进化算法得到的

近似 Pareto 最优集合(如图 2-9 所示)。IGD 指标定义为 P^* 到 A 的距离,数学表示如下:

$$\begin{cases} IGD(P^*, A) = \frac{\sum_{y^* \in P^*} d(y^*, A)}{|P^*|} \\ d(y^*, A) = \min_{y \in A} \left\{ \sqrt{\sum_{i=1}^m (y_i^* - y_i)^2} \right\} \end{cases}$$
(2-8)

其中m为目标函数个数, $|P^*|$ 表示集合 P^* 中元素的个数, $d(y^*, A)$ 表示理想 Pareto 最优集中的解 y^* 到A的最小欧氏距离。IGD 指标越小越好,指标越小表明所求得的近似 Pareto 前沿越接近理想 Pareto 前沿,收敛性与分布性也越好。

2.5.2 超体积

超体积 HV (Hypervolume) ^[67]具体如下:

HV 指标也是一个能同时反映算法所得的 Pareto 前沿 *P* 的分布性与收敛性的指标。HV 指标定义为 Pareto 最优集 *P* 中的解与参考向量 $r = (r_1, r_2, \dots, r_m)^T$ 围成的超立方体的超体积之和 (如图 2-10 所示),数学表示如下:

$$HV(P) = \bigcup_{v \in P} vol(v)$$
(2-9)

式中vol(v)表示 Pareto 前沿 P 中的解v 与参考向量 $r = (r_1, r_2, \dots, r_m)^T$ 所围成的区域的超体积。

2.5.3 Coverage 指标

Coverage (C) 指标定义如下^[67]:

设 A 与 B 是不同的多目标进化算法得到的两组近似 Pareto 最优解集合, C 指标定义为两 组近似 Pareto 前沿之间的支配关系,即对算法直接比较优劣。数学表示如下:

$$C(A,B) = \frac{\left|\left\{u \in B \mid \exists v \in A : v \prec u\right\}\right|}{|B|}$$
(2-10)

其中|B|为集合B中元素的个数。

2.6 改进 MOEA/D

本节中,将不可行解驱动机制与约束支配原则嵌入到 MOEA/D 框架中,提出了一种新的 算法。该约束处理方法的本质为把约束违背值与聚合函数分别处理,在进化过程中在算法的探 索性 (exploration) 与利用性 (exploitation) 之间保持平衡。其中为了进化与升级种群子代,在 可行解中掺入一些不可行解。关于多目标进化算法的约束处理方法的内容参考第 2.4 部分的内 容。一些测试问题的实验结果表明对于包含约束的多目标优化问题中该方法与其他方法相比更 加有效并且计算效率更高。同时,实际工程中带约束的多目标优化问题 (即两级行星齿轮减速 器优化) 的实验结果也验证了算法的性能。

2.6.1 约束违背值

约束违背值为全部不等式与等式约束的违背值之和得到的标量值^[58]。如果约束违背值等 于零,则所有的解都是可行解。任一个种群个体对于第*j*个约束条件的约束违背程度定义如 下:

$$G_{j}(\vec{x}) = \begin{cases} \max\{0, g_{j}(\vec{x})\}, & 1 \le j \le l \\ \max\{0, |h_{j}(\vec{x})| - \delta\}, & l+1 \le j \le m \end{cases}$$
(2-11)

在本章所述的方法中,个体的约束违背值定义为:

$$G(\vec{x}) = \sum_{j=1}^{m} G_j(\vec{x}) / \max(G_j(\vec{x}))$$
(2-12)

2.6.2 约束支配原则 CDP

在处理约束问题时约束支配原则(CDP)定义了解之间的支配关系。如果下面任一条件成 立,则称解 A 约束支配解 B:

(1) 解 A 与解 B 都是可行解, 解 A 支配解 B。

(2) 解 A 与解 B 都是不可行解,但是解 A 总的约束违背值相对较小。

在提出的方法中,采用约束支配原则作为 MOEA/D 框架中种群升级的基本比较机制。约束支配原则的伪代码如下:

算法2.1: MOEA/D种群升级中的约束支配原则
1: if $G(x_{j}) = G(x_{j+1}) = 0$ then
2: if $f(x_j) > f(j+1)$ then
3: $swap(x_j, x_{j+1});$
4: end if
5: else
6: if $G(x_j) > G(x_{j+1})$ then
7: $swap(x_{j}, x_{j+1});$
8: end if
9: end if

算法1伪代码含义如下:如果两个解*x_j*与*x_{j+1}*的约束违背值均为零,即两个解都没有违 反约束条件为可行解,则比较两个解对应的目标值,并按目标值从优到劣进行非支配排序。 对于最小化问题,如果*x_j*的目标值大于的目标值,则将两个解*x_j*与*x_{j+1}进行互换;否则,比 较两个解的约束违背值。若解<i>x_i*的约束违背值大于解*x_{j+1}*得约束违背值,则将*x_i*与*x_{i+1}互换。*

2.6.3 不可行解驱动 ID

作为一种约束问题处理机制,不可行解驱动 (ID) 机制最初是在不可行解驱动进化算法 中提出的^[64]。首先采用不可行解驱动进化出子代种群,然后把父代种群与子代种群合并成为 新的拓展种群。然后根据约束违背值把合并的种群分为可行解集合与不可行解集合。在产生 下一代种群时,把一定比例的可行解与约束边界的不可行解组成新种群来进化。由于每个种 群中不可行解的存在,可以驱动子代种群往约束边界逼近,而通常最优解可能就存在于约束 边界,如图 2-4 所示。在不可行解驱动机制中,不可行解与可行解需要根据最初的目标值与 约束违背值进行排序。这种排序流程称为不可行解驱动排序。

如图 2-5 所示,在约束支配原则中可行解集合 P_i 与不可行解集合 Q_i 根据非支配拥挤距离 排序法进行排序。在此我们定义一个参数 α 用来表示种群中保持的不可行解比例。如果种群



图 2-4 不可行解驱动机制示意图

大小为*N*,种群中可行解与不可行解的数目分别记为 $(1-\alpha) \times N = \alpha \times N$ 。同时,最初选择的不可行解比可行解的排序等级高。值得注意的是在多目标进化算法中解得排序中存在一些特殊情况。例如,如果不可行解集合中解的数目少于 $\alpha \times N$,则选择所有的不可行解进入新集合,其余的解从可行解中根据非支配拥挤距离排序以后选择。如果可行解集合中解的数目少于 $(1-\alpha) \times N$,则所有的不可行解根据非支配拥挤距离法进行排序,并选择 $\alpha \times N$ 个不可行解。在该情况下,选择了所有的可行解,其余的从选择的不可行解中选择。



图 2-5 不可行解驱动排序

把不可行解驱动与约束支配原则组合起来嵌入到 MOEA/D 的框架中,得到一种处理带约 束的多目标优化的新算法 MOEA/D-CDP-ID。首先从父代中根据 MOEA/D-CDP 进化子种群 *Q*_t,其中约束支配原则用于 MOEA/D 种群升级中个体之间的成对比较。然后对组合的种群 采用不可行解驱动机制获得子代种群 *P*_{t+1}。MOEA/D-CDP-ID 的伪代码如算法 2 所示。

	昇法2.2:	MOEA/D-CDP-ID
Require:	N	{种群大小}
Require:	N _G >1	{进化代数}
Require:	0<α<1	{不可行解比例}
1: $N_{inf} = \alpha$	×N	
2: $N_f = N$	$= N_{inf}$	
3: pop ₁ =	Initialize()	
4: Evalua	te(pop ₁)	
5: for i	=2 to N _G do	
6: chi	ldpop _{i-1} = Eve	plve(pop _{i-1})
{N	/IOEA/D-CDF) 进化种群}
7: Eva	aluate(childpo	pp _{i-1})
8: (S _f	$S_{inf} = Split(p)$	op _{i-1} + childpop _{i-1})
9: Ra	$nk(S_{inf}, S_f)$	{不可行解驱动排序}
10: pop	$p_1 = S_{inf}(1:N_{inf})$	$)+S_{f}(1:N_{f})$
11: end for		

为了评估提出算法的性能,我们采用一些广泛使用的测试问题测试算法的性能。参数设 置如表 3-1 所示。

序号	参数名称	参数值
1	种群大小 (N)	100
2	最大代数	500
3	邻居大小 (T)	20
4	交叉率 (CR)	0.5
5	变异率 (F)	0.5
6	从邻居中选择交叉父代的概率	0.9
7	运行次数	30
8	不可行解比例 (α)	0.2
9	目标函数的最大评价次数 (FEmax)	50000

表	2-1	参数设置
· ~~		2 M M H

选择的测试问题的特征如表 3-2 所示。实验的目标为测试把不可行解驱动机制添加到 MOEA/D-CDP 或 NSGAII-CDP 中是否有效,是否有助于改善算法的性能。因此我们将

		衣 2-2 测试问题将征[10][0]		
测试问题 目标数/决策 变量的维数		搜索范围	约5 不等式约束数	束 等式约束数
CONSTR	2/2	[0.1,1],[0,5]	2	0
SRN	2/2	[-20,20], [-20,20]	2	0
OSY	2/6	[0,10], [0,10], [1,5] [0,6], [1,5], [0,10]	6	0

主 っ っ 海に子 に 雨柱 (7[68][69]

MOEA/D-CDP-ID 的性能与 MOEA/D-CDP、NSGAII-CDP-ID、NSGAII-CDP 进行比较。

在分析中,采用超体积来计算提出的算法 MOEA/D-CDP-ID 以及上述算法 MOEA/D-CDP、NSGAII-CDP-ID、NSGAII-CDP 的性能。超体积的平均值越大,获得的非支配解集合的质量越好。实验结果如表 3-3 所示,对于测试函数 OSY,当把不可行解驱动机制加入到 MOEA/D-CDP 及 NSGAII-CDP 中,得到的超体积平均值较大,其中所得超体积平均值最大 的算法为 MOEA/D-CDP-ID。

表 2-3 对测试问题应用四种算法得到的超体积平均值与标准差

超体积(运行	CONSTR(参考点[1,10])		SRN(参考	(300,150)	OSY(参考点[0,200])	
30次)	平均值	标准值	平均值	标准值	平均值	标准值
MOEA/D-CDP-ID	1.054e+1	3.95e-1	6.66e+5	1.07e+5	1.58e+5	1.15e+5
MOEA/D-CDP	1.049e+1	5.49e-3	3.48e+5	3.01e+4	7.42e+4	2.21e+4
NSGA II -CDP-ID	1.050e+1	5.34e-3	9.00e+5	9.46e+4	1.35e+5	6.29e+4
NSGA II -CDP	1.051e+1	2.881e-3	6.98e+5	7.09e+4	7.82e+4	7.42e+3

在测试函数 CONSTR 中, MOEA/D-CDP-ID 的超体积平均值比 MOEA/D-CDP 大, 而 NSGAII-CDP-ID 与 NSGAII-CDP 的超体积平均值大致相等。在该测试函数中,最大的超体积 平均值也是在 NSGAII-CDP-ID 中达到的。对于测试函数 SRN,当把不可行解驱动加入到 MOEA/D-CDP 及 NSGAII-CDP,超体积值也变大,即使该情况下最大的超体积平均值是在 NSGAII-CDP-ID 中达到的。基于上述结果,可以得出如下结论:不可行解驱动机制有助于带 约束的多目标优化算法达到更好的性能。此外,把不可行解驱动机制及约束支配原则嵌入到 MOEA/D 框架中得到的新算法对于处理带约束的多目标优化问题是有效的。

2.7 本章小结

本章主要讲述了多目标进化算法的一些基本概念、两种经典的多目标优化算法NSGA-II与 MOEA/D 的相关理论知识、多目标优化问题的约束条件处理方法、多目标进化算法的评价指标,最后提出了一种新的算法 MOEA/D-CDP-ID。为后面减速器的优化设计奠定了基础。

第3章 RV 减速器多目标优化设计

3.1 RV 减速器简介

随着工业技术的发展,工业机器人具有巨大的发展潜力。减速器作为工业机器人的核心部 件之一,对于工业机器人的性能影响不可忽视。随着对工业机器人传送系统要求的提高,普通 的减速器在精度、承载能力,体积小等方面难以满足设计要求,因此工业机器人传动系统需要 一种高精度、高承载能力且体积小的减速器。

上世纪 80 年代初,日本帝人公司就开始研究并开发了 2K-V 型摆线针轮行星减速器,并称之为 RV 传动(Rotate Vector)^[70]。该公司生产的 RV 减速器在进入市场后,由于其良好性能受到广泛好评。后来发展成完整的系列产品批量化生产并不断改进,主要产品有 RV, RVAII, RVE 系列等,依靠 RV 减速器,日本帝人成为了国际工业机器人巨头瑞典 ABB、德国 KUKA 及日本 FANUC 等广泛的主要供应商之一。图 3-1 为日本帝人公司生产的 RV 系列减速器半剖图。



图 3-1 日本帝人公司生产的 RV 系列减速器半剖图

RV 传动是由一个 2K-V 型行星齿轮传动机构与 K-H-V 型摆线针轮行星传动机构复合而成的。其核心为摆线传动机构,其机构如图 3-2 所示,主要分为以下四个部分:

1、转臂。转臂由输入轴1与双偏心套2组成,1为输入轴,2为固连在1上的双偏心 套,它们在一起构成行星传动的行星架。其相位应使两个偏心套中的偏心互相错开180°。

2、摆线轮。摆线轮的齿廓为延长外摆线的等距曲线^[70],双偏心套 2 与摆线轮 4 用两个转臂轴承 3 连接。摆线轮通过转臂轴承与曲柄轴相连,且两片摆线轮总是相差 180°的相位

- 角,即两片摆线轮总是对称分布,这样就可以起到平衡机构径向力与提高承载能力的作用。
 - 3、针轮。针齿为圆柱形,齿壳9上固定着针齿销5,为了减少摆线轮与针齿销之间的摩



1.输入轴 2.偏心套 3.偏心轴承 4.摆线轮 5.针齿销
 6.针齿套 7.销轴 8.柱销套 9.针齿壳 10.输出轴
 图 3-2 摆线行星针轮减速器的结构图

擦损失,将针齿套6套在针齿销5上。

4、输出机构。柱销7装在输出轴10上,摆线轮柱销孔中插着柱销套8。柱销套套在柱销上。

3.2 RV 减速器的工作原理

RV 传动机构简图如图 3-3 所示,它是由渐开线行星齿轮传动和摆线针轮行星传动两部分 组成。渐开线行星齿轮与曲柄轴连为一体,作为 RV 减速器的第一级传动。当渐开线太阳轮顺时针方向旋转时,渐开线行星齿轮在公转的同时逆时针方向自转,通过曲柄轴带动摆线轮作偏 心运动。此时,摆线轮因受与之啮合的针轮的约束,在其绕针轮轴线公转的同时并顺时针方向 自转。同时将顺时针方向转动通过曲柄轴传递给行星架输出机构,完成减速输出^[71]。



图 3-3 RV 传动机构简图

3.3 RV 减速器的特点

RV 传动作为一种机器人用高精度传动,具有一系列的优点,具体概括如下:

(1) RV 减速器的体积小,质量轻,承载能力强,约是其他减速器的 $\frac{1}{2} \sim \frac{2}{2}$;

(2) RV 减速器的传动平稳、噪音低,在两级减速机构第二级摆线针轮传动中,两片摆线轮呈 180°相位角对称分布,啮合齿数较多,曲柄轴与摆线轮之间通过滚动轴承接触,极大地增加了整个传动机构的稳定性^[72]。另外由于转臂轴承个数的增多,使得轴承内外环的相对转速下降,从而提高了轴承的使用寿命;

(3) 由于是二级减速,所以传动比范围大,N=31~171;其传动效率高达 85%~92%;

(4) 通过合理的设计方案以及适当的制造安装精度,可以实现较高的传动精度与较小的回差;

(5) 采用了行星架输出,行星架左端是刚性的大圆盘,其扭转刚度大,抗冲击性能强。

3.4 RV 减速器的传动比

RV 减速器属于封闭式差动轮系,其传动比可以通过基本的转化机构法求解^[73],行星架 用 C 来表示,假设给整个传动装置加上一个行星架的角速度"-w_c"后,相当于行星架固定 不动,这时的行星差动轮系就转化成为了定轴轮系,那么第一级的行星齿轮传动部分相对于 静止的行星架的传动比为:

$$i_{sp}^{c} = \frac{w_{s} - w_{c}}{w_{p} - w_{c}} = -\frac{Z_{p}}{Z_{s}}$$
(3-1)

其中, w_p 为行星轮的角速度, w_s 为太阳轮的角速度, Z_p 为行星轮的齿数, Z_s 为太阳轮的齿数。

对于第二级摆线针轮传动部分,行星轮的自转作为它的输入部分,而曲柄轴又与行星轮固连,那么同样利用转化机构法,假设曲柄轴固定不动(即行星轮固定不动),给第二级减速部分加上一个行星轮的自转角速度"-w_p",此时的第二级摆线针轮减速部分等效成了差动轮系,它的传动比为:

$$i_{dr}^{h} = \frac{w_{d} - w_{p}}{w_{r} - w_{p}} = -\frac{Z_{r}}{Z_{d}}$$
(3-2)

其中, w_d 为摆线轮的角速度, w_r 为针齿轮的角速度, Z_d 为摆线轮的齿数, Z_r 为针齿轮的齿数, 且 $Z_r = Z_d + 1$ 。

由于摆线轮的转速与行星架的转速一致,则有:

$$w_d = w_r \tag{3-3}$$

当针齿轮固定时,则有:

$$w_r = 0 \tag{3-4}$$

那么,此时太阳轮与行星轮的传动比为:

$$i_{sp} = \frac{w_p}{w_s} = -\frac{Z_d}{1 + (Z_d + 1)\frac{Z_p}{Z}}$$
(3-5)

RV 传动装置总的传动比为

$$N = \frac{-i_{sp}i_{dr}^{h}}{i_{dr}^{h} - 1} + 1 = 1 + \frac{Z_{p}}{Z_{s}}Z_{r}$$
(3-6)

3.5 RV 减速器的建模

RV 减速器具有体积小、质量轻、传动比范围大、刚度高、传动平稳等优点。但是,由于 摆线针轮减速器的针齿销为圆柱面,与之啮合的摆线轮为是延长外摆线的等距曲线,如果参 数选择不合理,容易产生啮合质量差、摆线轮齿廓尖角或"根切"等问题,影响齿轮的质量及 寿命。采用传统的设计方法,摆线针轮行星减速器的参数计算比较复杂,而且很难达到最佳 效果。因此摆线针轮行星减速器的多目标优化设计对于其设计具有重大意义。

3.5.1 目标函数

(1) 在假定了 RV 减速器的传动比及功率的情况下下,把最小化 RV 减速器的体积作为优化设计的第一个目标函数^[74],以保证减速器结构紧凑,降低成本,即

$$\min f_1(x) = \frac{\pi}{4} (D_Z + d'_z + 2\Delta_1)^2 (2B + \delta)$$
(3-7)

式中, Δ_1 为针齿套壁厚,一般取 Δ_1 =2-10mm; δ 为摆线轮之间的间隔。

(2)同时为了降低 RV 减速器的能耗,把 RV 减速器的效率作为第二个优化目标函数。 当针轮固定,转臂输入时,摆线针轮行星减速器的传动效率η可近似用下式计算^[75]:

$$\eta = \eta_{xc} \eta_B \eta_W {\eta'_B}^2 \tag{3-8}$$

式中,
$$\eta_{xc}$$
 为减速部分的啮合效率, $\eta_{xc} = \frac{1 - \frac{0.04}{\pi Z_c K_1} (1 - \frac{d'_z}{D_z})}{1 + \frac{0.04}{\pi K_1} (1 - \frac{d'_z}{D_z})};$

 η_{B} 为转臂轴承的效率,取值范围为 0.99-0.995;

$$\eta_w$$
为输出机构的效率, $\eta_w = 1 - \frac{0.08D_z K_1 d'_s}{\pi (D_z - d'_z - 2\Delta_1 - K_1 D_Z / Z_b + D_1)(d'_s + 2\Delta_2)};$

 η'_{B} 为输入或输出轴上的滚动轴承的啮合效率,取值范围为 0.99-0.999。

由文献[75]经整理后可得

$$\eta = \eta_B {\eta'_B}^2 \left(\frac{1 - \frac{0.04}{\pi Z_c K_1} (1 - \frac{d'_Z}{D_Z})}{1 + \frac{0.04}{\pi K_1} (1 - \frac{d'_Z}{D_Z})} \right) \left(1 - \frac{0.08 D_z K_1 d'_s}{\pi (D_z - d'_z - 2\Delta_1 - K_1 D_Z / Z_b + D_1) (d'_s + 2\Delta_2)} \right)$$
(3-9)

对η加负号,把效率最大值转换为最小值,则效率最大的目标函数为

$$\min f_2(x) = -\eta_B {\eta'_B}^2 \left(\frac{1 - \frac{0.04}{\pi Z_c K_1} (1 - \frac{d'_Z}{D_Z})}{1 + \frac{0.04}{\pi K_1} (1 - \frac{d'_Z}{D_Z})} \right) \left(1 - \frac{0.08 D_z K_1 d'_s}{\pi (D_z - d'_z - 2\Delta_1 - K_1 D_Z / Z_b + D_1) (d'_s + 2\Delta_2)} \right) (3-10)$$

式中, Δ_2 为柱销套壁厚,一般取 Δ_2 =2.5 - 5mm; Z_b 为针轮齿数, $Z_b = i+1$; Z_c 为摆线轮齿数, $Z_c = i$ 。

3.5.2 设计变量

对于一级摆线针轮行星减速器,取摆线针轮行星减速器的针轮分布圆直径 D_z 、针齿套直 径 d'_z 、摆线轮宽度B、短幅系数 K_1 、摆线轮内孔直径 D_1 、柱销直径 d'_s 作为设计变量。而偏 心距A、针齿套外径 d_z 、柱销套外径 d_s 、销轴孔直径 d_{sk} 均依赖于上述独立参数,为非独立 变量。故取设计变量

$$X = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)^T$$

= $(D_z, d'_z, B, K_1, D_1, d'_s)^T$ (3-11)

3.5.3 约束条件

(1) 摆线轮齿廓不根切的约束条件

为了避免发生尖角与根切现象,针齿套外径 d_z 与针轮分布圆直径 D_z 的比值应当小于理论齿廓最小曲率半径系数 α_{min} ^[76],即

$$d_z / D_z < \alpha_{\min}$$

= $(1 + K_1)^2 / (1 + K_1 + Z_c K_1)$

可得约束条件

$$g_1(X) = (x_2 + 2\Delta_1)(1 + x_4 + Z_c x_4) - x_1(1 + x_4)^2 \le 0$$
(3-12)

(2) 针齿分布约束条件

为了避免针齿相碰,针齿套半径 r_z 必须小于 $R_z \sin(\pi / z_b)^{[77]}$: 针径系数 $k_2 = [D_z \sin(\pi / z_b)]/d_z = 1.25 - 4$ 。 可得约束条件

$$g_2(X) = 1.25(x_2 + 2\Delta_1) - x_1 \sin(\pi / Z_b) \le 0$$
(3-13)

$$g_3(X) = x_1 \sin(\pi / Z_b) - 4(x_2 + 2\Delta_1) - \le 0$$
(3-14)

(3) 柱销孔最大直径的约束条件^[78]

为了保证摆线轮的强度,需在两销轴孔之间、销轴孔与摆线轮内孔之间留有一定的厚度 $\Delta', -般\Delta' = 0.03D_z$ 。得

$$D_{s} - d_{sk} - D_{1} \ge 2\Delta' (4-9)$$
$$D_{s} \sin \frac{\pi}{Z_{s}} - d_{sk} \ge \Delta' (4-10)$$

式中, D_s 为销轴孔中心分布圆直径, $D_s = \frac{d_{fc} + D_1}{2}$; d_{fc} 为摆线轮齿根圆直径,

 $\begin{aligned} d_{fc} &= D_z - (d'_z + 2\Delta_1) - 2K_1R_Z / Z_b, \text{ 所以 } D_s = [D_z - (d'_z + 2\Delta_1) - K_1D_Z / Z_b + D_1] / 2; d_{sk} \text{ 为销轴孔} \\ & \text{ 直径, } d_{sk} = d_s + 2A, d_s \text{ 为销轴套外径, } d_s = d'_s + 2\Delta_2, \text{ A 为偏心距 } A = K_1D_z / 2Z_b, \text{ 所以} \\ & d_{sk} = d'_s + 2\Delta_2 + K_1D_z / Z_b. \end{aligned}$

可得约束条件

$$g_4(X) = -0.44x_1 + 0.5x_2 + 0.5x_5 + x_6 + \Delta_1 + 2\Delta_2 + \frac{3x_1x_4}{2Z_b} \le 0$$
(3-15)

$$g_{5}(X) = 0.03x_{1} + x_{6} + 2\Delta_{2} + x_{1}x_{4} / Z_{b} + 0.5\sin\frac{\pi}{Z_{s}}[x_{2} + 2\Delta_{1} + x_{1}x_{4} / Z_{b} - x_{1} - x_{5}] \le 0$$
(3-16)

(4) 摆线轮与针齿的接触强度条件

摆线轮与的针齿接触可以看成两个圆柱体的瞬时接触,则接触强度

$$\sigma_{j} = \sqrt{\frac{3.3 \times 10^{6} M_{V}}{B R_{Z}^{2}}} Y_{2\text{max}} \cdot 0.0981 \le [\sigma_{j}]$$
(3-17)

式中, M_v 为输出轴阻力矩, $M_v = 9740_{z_c}P/n$ 。P为输入功率(kW); n为输入轴转速 (r/min)。 Y_{2max} 为最大接触应力出的位置系数,由文献[78]表 11 查取。 $[\sigma_j]$ 为许用接触应力 (MPa)。

$$g_6(X) = \frac{4 \times 3.3 \times 10^6 M_V}{B D_z^2} Y_{2\text{max}} \bullet 0.0981^2 - [\sigma_j]^2 \le 0$$
(3-18)

(5) 针齿销的弯曲强度条件

对于双支点针齿销的弯曲应力,由文献[78]推导整理得

 $\sigma_{w} = [4.316 \times 10^{3} M_{v} (0.5B + \delta + 0.5\Delta)(1.5B + \delta' + \delta + 0.5\Delta)] / [D_{z}d'_{z}{}^{3}K_{1}Z_{c}(2B + \delta' + 2\delta + \Delta)]$ (3-19) 可得约束条件

 $g_{7}(X) = [4.316 \times 10^{3} M_{V}(0.5x_{3} + \delta + 0.5\Delta)(1.5x_{3} + \delta' + \delta + 0.5\Delta)] / [x_{1}x_{2}^{3}x_{4}Z_{c}(2x_{3} + \delta' + 2\delta + \Delta)] - [\sigma_{W}]$ $\leq 0 \qquad (3-20)$

式中, $[\sigma_w]$ 为针齿销许用弯曲应力(MPa); δ' 为摆线轮和针齿壳侧面之间的间隙

(mm), 一般取 δ' =4mm; δ 为摆线轮间隔环的厚度(mm), Δ 为针齿壳侧面的壁厚(mm)。

(6) 柱销的弯曲强度条件

按悬臂梁计算柱销的最大弯曲应力,则

$$\sigma_{W_1} = \frac{9.4176 \times 10^3 M_V (1.5B + \delta)}{Z_s d_s'^3 (D_Z - d_Z' - 2\Delta_1 - K_1 D_Z / Z_b + D_1)}$$
(3-21)

可得约束条件

$$g_8(X) = \frac{9.4176 \times 10^3 M_V (1.5x_3 + \delta)}{Z_s x_6^3 (x_1 - x_2 + x_5 - 2\Delta_1 - x_1 x_4 / Z_b)} - [\sigma_{W_1}] \le 0$$
(3-22)

式中, $[\sigma_{w_i}]$ 为柱销许用弯曲接触应力(MPa)。

(7) 柱销和柱销孔接触强度约束条件

$$\sigma_{j} = 3 \sqrt{\frac{10^{5} K_{1} M_{V} R_{Z}}{Z_{s} R_{s} B(r_{s}^{2} Z_{b} + K_{1} R_{Z} r_{s})}} \le [\sigma_{j}]$$
(3-23)

(3-24)

式中, r_s 为柱销套半径, $r_s = d'_s / 2 + \Delta_2$ 。

可得约束条件

$$g_{9}(X) = 433M_{V}x_{1}x_{4} - \frac{10^{-4}}{16}[\sigma_{j}]^{2}Z_{s}x_{3}(x_{1} - x_{2} + x_{5} - \frac{x_{1}x_{4}}{Z_{b}} - 2\Delta_{1})[Z_{b}(x_{6} + 2\Delta_{2})^{2} + x_{1}x_{4}(x_{6} + 2\Delta_{2})] \le 0$$

(8) 短幅系数的界限

短幅系数是摆线针轮行星传动的重要参数, k₁的取值范围为 0.45 - 0.8。

$$g_{10}(X) = 0.45 - x_4 \le 0 \tag{3-25}$$

$$g_{11}(X) = x_4 - 0.8 \le 0 \tag{3-26}$$

(9) 摆线轮壁厚的约束条件

摆线轮的厚度一般为 $B = (0.05 - 0.1)D_z$,故

$$g_{12}(X) = 0.05x_1 - x_3 \le 0 \tag{3-27}$$

$$g_{13}(X) = x_3 - 0.1x_1 \le 0 \tag{3-28}$$

由上文可得, RV 减速器的数学模型为:

$$X = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)^T$$

= $(D_z, d'_z, B, K_1, D_1, d'_s)^T$
min $F(x) = [f_1(x), f_2(x)]$
s.t. $g_i(x) \le 0$ (i = 1, 2, ..., 13) (3-29)

3.6 优化算法及实验环境

在 2.6 节中对改进后的 MOEA/D-CDP-ID 算法机制进行了详细描述,并通过测试函数与 其他三种算法 MOEA/D-CDP、NSGAII-CDP-ID、NSGAII-CDP 进行比较。实验结果表明:不 可行解驱动机制有助于提高带约束的多目标优化算法的性能。本章所建立的摆线针轮行星减 速器的数学模型,目标与约束条件维数较多且复杂,因此,对于摆线针轮行星减速器的多目 标优化设计,本章采用仍采用 2.6 节所述算法 MOEA/D-CDP-ID。程序编译环境为 Microsoft Visual C++6.0,关于该算法的详细描述请参考上一章。

3.7 优化实例及结果分析

3.7.1 优化实例

以某公司生产的 B12 型减速机为设计实例,给定减速机的额定输入功率 $P_1 = 11$ kW,输入 轴转数 $n_1 = 1440$ r/min,传动比i = 29,输出机构销轴数 $Z_s = 10$,许用接触应力 $[\sigma_j] = 860$ MPa,针齿销许用弯曲应力 $[\sigma_w] = 150$ MPa。 摆线针轮行星减速器的相关参数设置如表 3-1 所示:

针齿套壁厚	柱销套壁厚	针齿壳侧面壁厚	摆线轮齿数	针轮齿数	摆线间隔厚度	挥线轮与针齿壳侧面的
$\Delta_1 (\text{mm})$	Δ_2 (mm)	Δ (mm)	Z_{c}	Z_b	δ (mm)	间隙 $\delta^{'}$ (mm)
3	4	12	29	30	15	2

表 3-1 摆线针轮行星减速器的相关参数

3.7.2 结果分析

采用 MOEA/D-CDP-ID 算法对摆线针轮行星减速器的模型进行优化,如图 3-4 所示:



图 3-4 C++文件程序

在 MOEA/D-CDP-ID 算法中设置种群大小为 100 个,进化 500 代,得到了该算法优化摆 线针轮行星减速器的实验结果。最终的 Pareto 最优边界如图 3-5 所示,优化结果如表 3-2 所示。



图 3-5 采用 MOEA/D-CDP-ID 算法对摆线针轮 行星减速器优化得到的最终 Pareto 最优边界比较结果

在 Pareto 最优边界上取一组数据点,与摆线针轮行星减速器的数据进行比较。在保证传动 元件设计要求的同时,体积减少了 4.6%,效率增加了 5.22%,计算结果表明:采用进化算法优 化设计要优于常规设计方法,本程序对摆线针形行星减速器的设计计算是有效的,采用进化算 法对 RV 减速器进行多目标设计可以缩短研发周期,提高产品的性能,降低制造成本。

参数								
设计方法	针轮齿分布圆	针齿销直径	摆线宽度	短幅系数	摆线轮内孔直	柱销直径	体积 V /mm ³	效率 <i>1</i>
	直径 $D_{\rm Z}$ /mm	d_Z^\prime /mm	$m{B}$ /mm	K_1	径 D_1 /mm	d_{s}^{\prime} /mm		
原始数据	258	7	6	0.5814	20	5.55	1091675	0.9245
优化数据	200	5.27	5	0.7315	20	5	1041910	0.9724
圆整后	200	6	5	0.7315	20	5	1053600	0.9728

表 3-2 摆线针轮行星减速器的优化结果

3.8 本章小结

本章分析了影响摆线针轮行星减速器的主要参数,建立了以体积最小和效率最高为优化设 计的目标函数,并系统地研究了优化的约束函数。用 C++语言编写了多目标优化算法程序对减 速器进行优化设计,在满足约束条件的前提下获得了比传统方法更好的结果,优化结果结构更 紧凑,传动效率更好。为工业机器人行星齿轮减速器的设计提供了理论支撑。

第4章 行星齿轮减速器多目标优化设计

4.1 行星齿轮减速器

图 4-1 所示为内外啮合的周转轮系。它的齿轮 1 和 3 以及构件 H 各绕固定的互相重合的几何轴线 O_1 、 O_3 及 O_H 转动,而齿轮 2 则松套在构件 H 的小轴上,因此它一方面绕自己的几何轴线 O_2 自转,同时又随构件 H 绕几何轴线 O_H 公转,其运动和天上行星的运动类似,故称为行星轮。支持行星轮的构件 H 称为行星架,而几何轴线固定的齿轮 1 和 3 称为中心轮或太阳轮。行星架绕之旋转的几何轴线 O_H 称为主轴线。



1 与 3.中心轮或太阳轮 2.行星轮 H.行星架(或系杆或转臂)

图 4-1 行星齿轮传动示意图

行星齿轮传动与定轴齿轮传动相比,具有体积小、传动比大、传动效率高、承载能力强、 传动平稳等优点。但是由于行星齿轮传动自身结构的原因,在设计时相对于定轴齿轮传动还有 很多额外要求必须要考虑^[34]。

4.1.1 行星齿轮机构的分类

实际机械中常常采用一系列相互啮合的齿轮将主动轴和从动轴连接起来,这种多齿轮的传动装置称为轮系^[79]。根据轮系运动时其各轮轴线的位置是否固定,可以将轮系分为定轴轮系与周转轮系。周转轮系按其自由度的数目又可分为差动轮系和行星轮系:1)差动轮系即具有两个自由度的周转轮系。2)行星轮系,即具有一个自由度的周转轮系,如图 4-2 所示。由于中心轮固定,因此只要知道构件1和H中任一构件的运动,就可求出另一构件的运动。



图 4-2 2K-H 行星齿轮减速器的结构示意图

所有承受外力矩且轴线与主轴线重合的构件称为基本构件。根据行星齿轮传动中基本构件的不同,采用机械设计中常用的库氏分类法进行分类,基本代号为:K-中心轮,H-转臂,V-输出轴,根据基本构件的不同加以分类,行星齿轮传动常见的类型有如下三种:1)2K-H型,由两个中心轮和一个行星架组成;2)3K型,由三个中心轮组成;3)K-H-V型,由一个中心轮、一个行星架和一个输出构件组成^[70]。

由于本章中所研究的工业机器人行星齿轮减速器具有两级结构,每级结构有两个中心轮和一个转臂,从结构上讲属于两级 2K-H 行星齿轮减速器,所以下面主要讲诉 2K-H 型行星齿轮 传动的基本特点与设计准则。

4.1.2 行星齿轮机构的设计准则

在行星齿轮传动中,各齿轮的齿数选择必须确保能够实现所给定的传动比*i*^[34],在 2K-H 型行星齿轮传动中,内齿轮固定不动,由太阳轮输入,转臂输出的传动比公式为:

$$i_{aH}^{b} = 1 + \frac{Z_{b}}{Z_{a}} \tag{4-1}$$

式中 Z_a 为中心轮 a 的齿数;

 Z_b ——内齿轮 b 的齿数;

 i_{eff}^{b} ——保持内齿轮 b 不动,从 a 轮输入,转臂 H 输出时的机构传动比;

(1) 邻接条件

在设计行星齿轮传动时,为了进行功率分流,提高承载能力,同时也是为了减少结构尺寸,

使结构紧凑,通常在太阳轮 a 与内齿轮 b 之间均匀的、对称地设置几个行星轮 c。为了使各行 星轮不产生碰撞,必须保证它们齿顶之间在其连心线上有一定的间隙,如图 4-3 所示。即两个 相邻行星轮齿顶圆半径之和应小于其中心矩,这就是邻接条件^[34]。



图 4-3 邻接条件

用公式表达即:

$$2r_{ac} < L_c \tag{4-2}$$

$$d_{ac} < 2a'_{ac} \sin\frac{\pi}{n} \tag{4-3}$$

式中r_{ac}——行星齿轮的齿顶圆半径;

d_{ac}——行星齿轮的齿顶圆直径;

a'ac ——齿轮啮合副的中心距;

n——行星轮个数;

(2) 同心条件

所谓同心条件即行星架的回转轴线应与中心轮的几何轴线相重合。对于行星齿轮减速器有 $a_{ac} = a_{bc}$,同心条件为:

$$Z_a + 2Z_c = Z_b \tag{4-4}$$

(3) 安装条件

设计行星轮系时,必须正确选择行星轮的数目与各轮齿数,否则无法安装。因为当第一个 行星轮装好后,中心轮之间的相对位置便确定了;同时各行星轮均匀分布也是确定的,所以在 一般情况下其余行星轮的齿有可能不能同时插入内、外中心轮的齿槽中,也就无法安装。安装 条件如下:

$$(Z_a + Z_b)/n = N \tag{4-5}$$

其中N为整数,行星轮系中两个中心轮的齿数之和为行星轮数的整数倍。

4.2 两级行星齿轮减速器多目标优化问题

多目标优化问题在现实世界中普遍存在^[24],而且优化问题的可行解必须满足一些相关的 等式与不等式约束。带约束的多目标优化问题表示如下:

$$\min F(\vec{x}) = [f_1(x), ..., f_m(x)]^i \quad \vec{x} \in \mathbb{R}^n$$
$$g_i(X) \le 0 \quad i = 1, 2, ..., p \tag{4-6}$$

$$h_i(X) = 0$$
 $j = p + 1, p + 2, ..., n$

式中 $\vec{x} = (x_1, x_2, ..., x_n)$ 为决策向量, $\vec{x} \in \Omega \subseteq R^n$, Ω 为满足p个不等式约束与(n-p)个等式约束的可行解集合, R^n 为由 \vec{x} 的上下边界定义的n维矩阵空间,即

$$l_k \le x_k \le u_k , \quad 1 \le k \le n \tag{4-7}$$

式中 u_k 与 l_k 分别为决策变量 x_k 的上下边界。通常,等式约束可以转换为如下形式的不等式约束:

$$\left|h_{j}\right| - \varepsilon \leq 0, \quad j = p+1, \dots, n \tag{4-8}$$

式中 ε 为允许的正差值。

与定轴齿轮传动相比,行星齿轮传动具有效率高、承载能力强、体积小等优点,因此被广 泛地应用于工业机器人减速器传动装置。现有关于行星齿轮减速器的研究中,对于实际应用中 常见的两级或多级行星齿轮减速器的研究很少。多级行星齿轮减速器的设计涉及的约束条件及 变量较多,不仅要考虑构件之间运动关系与几何尺寸,还要考虑其摩擦及动力学等问题^[38],通 常还要综合考虑多个设计目标,设计问题复杂。本章采用多目标进化算法,以两级行星齿轮减 速器为例,对工业机器人减速器进行数学建模与设计优化,得到了最优设计方案。

本节以优化 A^b_{a,H}, A^b_{a,H}, 型两级行星齿轮减速器为目的, 在指定了载荷、材料、工作条件等的

情况下,以体积最小、效率最高为优化目标,建立了数学模型。其结构简图如图 4-4 所示,其 中 a_1 、 a_2 为太阳轮, b_1 、 b_2 为内齿圈, c_1 、 c_2 为行星轮, H_1 、 H_2 为行星架。



图 4-4 两级行星齿轮减速器示意图

4.3 行星齿轮减速器的建模

两级行星齿轮减速器为十个变量以及两个目标的带约束的多目标优化问题^{[80][81]}。设计目标为最小化两级行星齿轮减速器的体积,同时最大化两级行星齿轮减速器的效率。体积越小意味着减速器的质量越小,惯性较小,因此生产成本低,动态性能好。同时最大化行星齿轮减速器的效率非常重要,因为减速器的传动效率越大意味着能量消耗越少,节约了相应的操作成本。

4.3.1 目标函数

(1) 体积

影响两级行星齿轮机构体积的参数主要有太阳轮的体积 V_{a_1} 、 V_{a_2} ,内齿圈的体积 V_{b_1} 、 V_{b_2} ,行星轮的体积 V_{c_1} 、 V_{c_2} ,则总体体积可表示为:

$$V_{s} = V_{a} + V_{a} + V_{b} + V_{b} + V_{b} + V_{a} + V_{a}$$

$$\approx \sum_{i=1}^{2} \frac{\pi}{4} B_{i} m_{i}^{2} (Z_{a}^{2} + n_{i}^{2} Z_{c}^{4}) - Z_{b}^{-3} 0.$$
(4-9)

式中 B_i 、 m_i 、 n_i 分别是两级齿轮的齿宽、模数和行星齿轮个数; Z_{a_i} 、 Z_{b_i} 、 Z_{c_i} 分别为各级太阳轮、内齿圈和行星轮的齿数。

(2) 效率

由于两级行星齿轮减速器是由两个2K-H型基本行星齿轮减速器串联而成,故其传动效率 η_p 通常由两个基本行星齿轮减速器效率 η_1 和 η_2 的乘积来确定,即 $\eta_p = \eta_1\eta_2$;其中 η_1 为高速级 的传动效率, η_2 为低速级的传动效率。因此本章所讨论的 $A_{a_1H_1}^{b_1}A_{a_2H_2}^{b_2}$ 型两级行星齿轮机构的传 动效率为 $\eta_{a_{1H_2}} = \eta_{a_{1H_1}}^{b_1}\eta_{a_{2H_2}}^{b_2}$,其中:

$$\eta_{a_1H_1}^{b_1} = 1 - \frac{p_1}{1 + p_1} \varphi^{H_1}$$
(4-10)

$$\eta_{a_2H_2}^{b_2} = 1 - \frac{p_2}{1 + p_2} \varphi^{H_2}$$
(4-11)

所以,其传动效率的计算公式为:

$$\eta_{a1H2} = \eta_{a1H1}^{b1} \eta_{a2H2}^{b2} = \left[1 - \frac{p_1}{1 + p_1} \varphi^{H1}\right] \left[1 - \frac{p_2}{1 + p_2} \varphi^{H2}\right]$$
(4-12)

式中: $p_1 \ p_2 \ \beta$ 别为两级行星齿轮机构的内传动比, $p_1 = Z_{b1} / Z_{a1}$, $p_2 = Z_{b2} / Z_{a2}$; $\varphi^{H_1} \ \varphi^{H_2} \ \beta$ 两级行星轮的损失系数, $\varphi^H = \varphi^H_{za} + \varphi^H_{zb} + \varphi^H_n$, 内、外啮合损失系数分别为 $\varphi^H_{za} = \frac{\pi}{2} \varepsilon f_k \left[\frac{1}{Z_a} + \frac{1}{Z_c} \right], \ \varphi^H_{zb} = \frac{\pi}{2} \varepsilon f_k \left[\frac{1}{Z_c} - \frac{1}{Z_b} \right]; \ \varepsilon$ 为重合度; f_k 为啮合摩擦因数; φ^H_n 为轴承 损失系数^[81]。

4.3.2 设计变量

由式(3-6)、式(3-9)可知两级行星齿轮减速器的效率与体积主要与结构参数有关。其中两级齿轮的齿数、模数、齿宽及行星轮的个数影响两级行星齿轮减速器体积。各级特性参数和损失系数影响减速器的效率。因此,选择*B*₁、*B*₂、*m*₁、*m*₂、*Z*_{a1}、*Z*_{b1}、*Z*_{c1}、*Z*_{a2}、 *Z*_{b2}、*Z*_{c2}参数作为优化设计变量,设计变量的取值范围如下:

两级齿轮的宽度: $0 \le B_1 \le 100$ $0 \le B_2 \le 180$

两级齿轮的模数: $2 \le m_1 \le 10$ $2 \le m_1 \le 10$

两级太阳轮的齿数: $14 \le Z_{a_1} \le 30$ $14 \le Z_{a_2} \le 30$ 两级内齿圈的齿数: $0 \le Z_{b_1} \le 160$ $0 \le Z_{b_2} \le 160$ 两级行星轮的齿数: $14 \le Z_{c_1} \le 50$ $14 \le Z_{c_2} \le 60$ 定义设计向量如下:

$$X = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8 \ x_9 \ x_{10}]^T$$

= $[B_1 \ B_2 \ m_1 \ m_2 \ Z_{a1} \ Z_{b1} \ Z_{c1} \ Z_{a2} \ Z_{b2} \ Z_{c2}]^T$ (4-13)

根据公式(4-1)(4-2)代入优化设计变量 X 及约束条件,优化问题表示如下:

Min.
$$f_1(x) = 0.7854(x_1x_3^2(x_5^2 + n_1x_7^2 + 9x_6 - 30.2) + x_2x_4^2(x_8^2 + n_2x_{10}^2 + 9x_9 - 30.2))$$
 (4-14)

$$Min. \ f_2(x) = -(1 - 0.1178x_6 \frac{\frac{1}{x_5} + \frac{2}{x_7} - \frac{1}{x_6}}{x_5 + x_6})(1 - 0.1178x_9 \frac{\frac{1}{x_8} + \frac{2}{x_{10}} - \frac{1}{x_9}}{x_8 + x_9})$$
(4-15)

s.t. $g_i(X), i = 1, 2, ..., 9$

$$g_i(X), j=10,11$$

$$X = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8 \ x_9 \ x_{10}]^T$$

值得注意的是,为了将最初的最大化目标转化为最小化目标,对第二个目标函数添加了 一个负号。

4.3.3 约束条件

两级行星齿轮减速器有许多约束条件,比如传动比条件、邻接条件、同心条件、装配条件、齿轮的接触与弯曲强度条件、外径尺寸条件等。由行星齿轮减速器各轮齿数分配关系以 及强度要求可得如下约束条件。

(1) 传动比条件

对于两级行星齿轮减速器,给定了传动比以后,可以得到:

$$\left| \frac{(Z_{a1} + Z_{b1})(Z_{a2} + Z_{b2})}{Z_{a1}Z_{a2}i_{p}} - 1 \right| < 4\%$$

$$\Rightarrow g_{1}(x) = \left| \frac{(x_{5} + x_{6})(x_{8} + x_{9})}{x_{5}x_{8}i_{p}} - 1 \right| - 4\% < 0$$
(4-16)

式中: i,为两级行星齿轮减速器的总传动比。

(2) 邻接条件

为了保证行星轮系能够运动,相邻两行星轮的齿顶圆不得相交,这个条件称为邻接条件[82]。

$$d_{ac} < 2a'_{ac} \sin \frac{\pi}{n}$$

$$2h_{a}^{*} + Z_{c1} < (Z_{a1} + Z_{c1}) \sin \frac{\pi}{n_{1}}$$

$$2h_{a}^{*} + Z_{c2} < (Z_{a2} + Z_{c2}) \sin \frac{\pi}{n_{2}}$$

$$\begin{cases} g_{2}(x) = 2h_{a}^{*} + x_{7} - (x_{5} + x_{7}) \sin \frac{\pi}{n_{1}} < 0 \\ g_{3}(x) = 2h_{a}^{*} + x_{10} - (x_{8} + x_{10}) \sin \frac{\pi}{n_{2}} < 0 \end{cases}$$
(4-17)

式中: d_{ac} 为行星轮的齿顶圆直径; a'_{ac} 为中心轮与行星轮啮合副的中心距; h^*_a 为齿顶高系数, n_i 为第i级行星轮的数目, 例如: $n_1 = n_2 = 3$ 。

(3) 接触强度条件

$$Z_{H}Z_{E}Z_{\varepsilon}\sqrt{\frac{F_{t1}}{d_{1}B_{1}n_{1}}}\frac{u_{1}-1}{u_{1}} - \sigma_{H0} \leq 0$$

$$Z_{H}Z_{E}Z_{\varepsilon}\sqrt{\frac{F_{t2}}{d_{2}B_{2}n_{2}}}\frac{u_{2}-1}{u_{2}} - \sigma_{H0} \leq 0$$

$$\begin{cases} g_{4}(x) = Z_{H}Z_{E}Z_{\varepsilon}\sqrt{\frac{2T_{1}}{x_{3}^{2}x_{5}^{2}x_{1}n_{1}}}\frac{x_{6}-x_{5}}{x_{6}} - \sigma_{H0} \leq 0$$

$$g_{5}(x) = Z_{H}Z_{E}Z_{\varepsilon}\sqrt{\frac{2T_{2}}{x_{4}^{2}x_{8}^{2}x_{2}n_{2}}}\frac{x_{9}-x_{8}}{x_{9}} - \sigma_{H0} \leq 0$$

$$(4-18)$$

式中: Z_H 为节点区域系数; Z_E 为弹性影响系数; Z_ε 为重合度系数; T_1 、 T_2 分别为两级小齿轮传递的转矩, $T_2 = T_1 u_1$; σ_{H0} 为许用接触应力; $F_{t_1} \propto F_{t_2}$ 分别为作用在两级齿轮上的切向力; $d_1 \propto d_2$ 为各级小齿轮分度圆直径; u_1 为高速级传动比; u_2 为低速级传动比。 (4)弯曲强度条件

$$\frac{F_{t1}Y_{Fa}Y_{Sa}Y_{\varepsilon}}{B_{1}m_{1}n_{1}} - \sigma_{F0} \leq 0 \\
= \frac{F_{t2}Y_{Fa}Y_{Sa}Y_{\varepsilon}}{B_{2}m_{2}n_{2}} - \sigma_{F0} \leq 0$$

$$\Rightarrow \begin{cases} g_{6}(x) = \frac{2T_{1}Y_{Fa}Y_{Sa}Y_{\varepsilon}}{x_{3}^{2}x_{5}x_{1}n_{1}} - \sigma_{F0} \leq 0 \\
g_{7}(x) = \frac{2T_{2}Y_{Fa}Y_{Sa}Y_{\varepsilon}}{x_{4}^{2}x_{8}x_{2}n_{2}} - \sigma_{F0} \leq 0 \end{cases}$$
(4-19)

式中: Y_{Fa} 为齿形系数; Y_{Sa} 为应力校正系数; Y_{s} 为重合度系数; σ_{F0} 为许用弯曲应力。 (5)外径尺寸条件

两级行星齿轮减速器的设计相对于单机行星齿轮减速器而言,出了考虑内齿圈、行星轮与 太阳轮的分度圆直径和齿宽等参数,还要使两个内齿圈的直径相近^[80]。两级行星齿轮减速器中 高速级与低速级内齿圈直径之间的比值用 C_0 来表示,即 $C_0 = d_1/d_2$,这里取 $0.8 \le C_0 \le 1.2$,则 有:

$$\begin{array}{c} 0.8 \le C_0 \le 1.2 \\ C_0 = \frac{d_1}{d_2} = \frac{m_1 Z_{b1}}{m_2 Z_{b2}} \end{array} \Longrightarrow \begin{cases} g_8(x) = 0.8 - \frac{x_3 x_6}{x_4 x_9} \le 0 \\ g_9(x) = \frac{x_3 x_6}{x_4 x_9} - 1.2 \le 0 \end{cases}$$
(4-20)

(6) 同心条件

同心条件是指行星架的回转轴线应该与中心轮的几何轴线相重合^[82]。

$$Z_{a1} + 2Z_{c1} = Z_{b1}$$

$$Z_{a2} + 2Z_{c2} = Z_{b2}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} h_{10}(x) = x_5 + 2x_7 - x_6 = 0\\ h_{11}(x) = x_8 + 2x_{10} - x_9 = 0 \end{cases}$$
(4-21)

(7) 装配条件

设计行星轮系时,其行星轮的数目和各轮的齿数必须正确选择,否则便装配不起来。因为 当第一个行星轮装好后,两个中心轮的相对位置便确定了;又因为均匀分布的各行星轮的中心 位置也是确定的,所以在一般情形下其余行星轮的齿便有可能不能同时插入内外两中心轮的齿 槽中,亦即可能无法装配起来。为了能够装配起来,设计时行星轮系两中心轮的齿数之和应为 行星轮数的整数倍。

$$\frac{Z_{a1} + Z_{b1}}{n_1} = C_1$$

$$\frac{Z_{a2} + Z_{b2}}{n_1} = C_2$$

$$\Rightarrow \begin{cases} h_{12}(x) = \frac{x_5 + x_6}{n_1} - C_1 = 0 \\ h_{13}(x) = \frac{x_8 + x_9}{n_2} - C_2 = 0 \end{cases}$$
(4-22)

式中: C_1 、 C_1 为正整数。

由上文可得,两级行星齿轮减速器的优化数学模型为:

$$\min F(X) = [f_1(X), f_2(X)]^T \quad X \in \mathbb{R}^n$$

$$g_i(X) \le 0 \quad i = 1, 2, ..., p \qquad (4-23)$$

$$h_i(X) = 0 \quad j = p+1, p+2, ..., n$$

4.4 优化实例及结果分析

4.4.1 实验平台

优化算法采用 2.6 所述的改进算法 MOEA/D-CDP-ID。程序编译环境为 Microsoft Visual C++6.0,数据分析与绘图软件为 OriginPro 8.5

4.4.2 实验结果

设置种群大小为 100 个,进化 500 代,对 MOEA/D-CDP 及 MOEA/D-CDP-ID 算法使用 相同的参数设置,得到了采用 MOEA/D-CDP-ID 优化两级行星齿轮减速器的实验结果。图 4-5 所示为算法运行后得到的代表性的最终 Pareto 最优边界,结果表明 MOEA/D-CDP-ID 优 于 MOEA/D-CDP。



图 4-5 采用 MOEA/D-CDP-ID 及 MOEA/D-CDP 对两级 行星齿轮减速器优化得到的最终非支配最优边界比较结果

为了确认实验结果将算法重复运行 30 次。本案例中,参考点设为 [5,5],它是通过在算法运行中估计每个目标的最大值得到的。如表 4-1 所示,MOEA/D-CDP-ID 相对于 MOEA/D-CDP 达到了较大的超体积值、较小的反向世代距离及平均豪斯多夫距离(Hausdorff distance,

△ P)^[83]。因为反向世代距离及平均豪斯多夫距离的值越小,算法的性能越好,我们可以得出 MOEA/D-CDP-ID 优于 MOEA/D-CDP。

两级行星齿轮减速器优化的半均值及标准差计昇值						
算法(运行 30 次)	超体积(参	考点[5,5])	IGD		△P (P=2)	
	平均值	标准值	平均值	标准值	平均值	标准值
MOEA/D-CDP-ID	5.63e+1	2.09e+1	2.87e-2	3.59e-2	1.07e-2	1.67e-2
MOEA/D-CDP	4.43e+1	1.66e+3	3.90e-2	8.83e-2	2.78e-2	6.94e-2

表 4-1 MOEA/D-CDP-ID 与 MOEA/D-CDP 算法得到的 西级行星步轮减速器优化的平均值及标准差计算值

4.4.3 实验分析与设计规律

在多目标优化问题求解完成之后,得到一组可以确定设计变量与设计目标的最优解集合。 如果这些最优解根据第一个优化目标(体积最小)从好到差进行排序,即体积从小到大排序, 则这些最优解也会以第二个目标(效率最高)从差到好进行排序,即效率从低到高。从此也可 以验证对于多目标优化问题,目标之间通常相互冲突,一个目标变好通常以另一个目标变差为 代价。相对于只有一个最优解,现在由于存在着各种各样的最优解,因此选择面更宽,决策过 程更加容易。由于存在如果多的最优选择方案,这使得设计者可以在更加广阔的视野中设计或 判断产品的性能及工艺,衡量产品的多个目标之间的得与失^[84]。通过一些基础的优化后研究可 以揭示一些有趣的设计经验,这些经验对于所有的或者其中一部分的折衷解都是通用的^[85]。 最初提出上述设计方法论时称之为"innovization",即通过优化进行创新性的设计^{[86][87]}。现在 该方法论被用于两级行星齿轮减速器的优化设计。

为了定量地揭示对于所有的或者其中一部分的折衷解通用的有趣的设计经验或规律,对于 行星齿轮减速器的设计,以第一个设计目标(减速器体积)作为 x 轴,按照减速器体积从小到 大进行排序分别画出每个设计参数的图形。从图 4-6 到图 4-10 可以发现一些设计参数中确实 存在一些通用的设计准则,同时设计参数中有一些过于分散,难以用定量的方法进行估计。

图 4-6 所示为按照减速器的 Pareto 最优体积从小到大排序之后设计变量 B₁与 B₂的分布图。 图中用黑色的虚线描绘了两级齿轮宽度 B₁与 B₂的变化趋势。后面各图采用相同的方法得到类 似的变化趋势。从图 4-6 中左边的图形可以看出,当行星齿轮减速器的体积大于9×10⁶ mm³ 以 后,行星齿轮减速器的体积与第一级齿轮的宽度呈线型关系。

图 4-7 所示为按照减速器的 Pareto 最优体积从小到大排序之后设计变量 m, 与m, 的分布图。

*m*₁与*m*₂分别为两级齿轮的模数。从图 3-6 中左边的图形可以看出,当行星齿轮减速器的体积 在7×10⁶*mm*³左右时,第一级行星齿轮减速器的模数最优值产生突变。而从图 4-7 中右边的图 形可以看出,当行星齿轮减速器的体积大于9×10⁶*mm*³以后,行星齿轮减速器的体积与第二级 行星齿轮减速器的模数呈线型关系。



图 4-6 按照 Pareto 最优减速器体积从小到大排序后设计变量 B_1 (mm)、 B_2 (mm)与体积之间的关系



图 4-7 按照 Pareto 最优减速器体积从小到大排序后设计变量 m_1 、 m_2 与体积之间的关系

图 4-8 所示为按照减速器的 Pareto 最优体积从小到大排序之后设计变量 $Z_{a1} = Z_{a2}$ 的分布 图。 $Z_{a1} = Z_{a2}$ 分别为两级太阳轮的齿数。图中用黑色的虚线描绘了两级太阳轮齿数 $Z_{a1} = Z_{a2}$ 的 变化趋势。值得注意的是,两级太阳轮的齿数必须取整数,因此两个设计变量时离散的。从图 3-7 中的图形可以看出,当行星齿轮减速器的体积大于 4×10⁶ mm³ 以后,两级太阳轮的齿数 Z_{a1}

与Z_{a2}分别沿着 25 与 30 分布。这个隐藏的规律对于行星齿轮减速器的设计人员至关重要,比如,由于所有这些折衷设计都是最优的,根据该规律使某些设计参数不变,可以设计出各种不同的最优方案并大规模生产,使用该方法仍然可以使产品的设计目标保持最优。



图 4-8 按照 Pareto 最优减速器体积从小到大排序后设计变量 Z_{a1}、 Z_{a2} 与体积之间的关系 图 4-9 所示为按照减速器的 Pareto 最优体积从小到大排序之后设计变量 Z_{b1} 与 Z_{b2} 的分布 图。Z_{b1} 与 Z_{b2} 分别为两级内齿圈的齿数。图中用黑色的虚线描绘了两级内齿圈齿数 Z_{b1} 与 Z_{b2} 的 变化趋势。同上,两级内齿圈的齿数必须取整数,因此两个设计变量时离散的。从图 4-9 中左 图可以看出,当行星齿轮减速器的体积大于 6×10⁶ mm³ 以后,第一级内齿圈的齿数 Z_{b1} 沿着 120 分布。而从图 4-9 中左图可以看出,当行星齿轮减速器的体积在 3×10⁶ mm³ 至 9×10⁶ mm³ 之间 时,第二级内齿圈的最优齿数 Z_{b1}先变小后变大。



图 4-9 按照 Pareto 最优减速器体积从小到大排序后设计变量 Z_{b1} 、 Z_{b2} 与体积之间的关系

图 4-10 所示为按照减速器的 Pareto 最优体积从小到大排序之后设计变量 $Z_{c1} = Z_{c2}$ 的分布 图。 $Z_{c1} = Z_{c2}$ 分别为两级行星轮的齿数。两级行星轮齿数 $Z_{c1} = Z_{c2}$ 的变化趋势如图 3-9 中黑色 虚线所示。同上,两级内齿圈的齿数必须取整数而且是离散的。从图 4-10 中的图形可以看出,当行星齿轮减速器的体积分别大于 $7 \times 10^6 mm^3 = 9 \times 10^6 mm^3$ 以后,两级行星轮的齿数 $Z_{c1} = Z_{c2}$ 分别沿着 47.5 与 45 分布(实际设计中必须取整)。

值得注意的是,通过目标值的地貌到设计空间的映射获得的这些隐藏的规律,不仅在两级行星齿轮减速器的设计中扮演着重要的角色,而且可以借鉴到工程应用的其他领域^[88]。对于复杂机电系统的多目标优化设计具有指导性的理论意义。



图 4-10 按照 Pareto 最优减速器体积从小到大排序后设计变量 Z_{c1} 、 Z_{c2} 与体积之间的关系

4.5 本章小结

工业机器人减速器是机器人的一个重要组成部分,减速器的性能与工业机器人的整体性 能息息相关。本章以两级行星齿轮减速器为例,对其进行数学建模,归纳为一个带约束的多 目标优化问题。多目标进化算法适用于解决复杂的带约束的多目标优化问题,本章中采用改 进后的多目标进化算法 MOEA/D-CDP-ID 求解该问题,并与改进之前的算法进行比较,验证 了改进后算法的性能。通过进化算法得到的两级行星齿轮减速器的 pareto 最优边界,设计者 可以根据不同设计需求选择不同的设计方案,并采用 CAD 工具绘制出相关的几何模型,大 大缩短了设计周期。同时采用数据挖掘的方法,揭示出了设计变量与设计目标之间的规律, 反过来指导设计过程,对于两级行星齿轮减速器的设计具有指导性作用。

第5章 总结与展望

5.1 总结

本文以工业机器人减速器的多目标优化为研究背景,具有重要的意义。现总结如下:

(1) RV 减速器的建模与多目标建模优化设计

工业机器人的传动系统是机器人的一个重要组成部分,传动系统的性能与工业机器人的整体性能息息相关。以摆线针轮行星减速器为例,分析了影响摆线针轮行星减速器的主要参数,建立了以体积最小和效率最高为优化设计的目标函数,并系统地研究了优化的约束函数。用 C++语言编写了多目标优化算法程序对减速器进行优化设计,在满足约束条件的前提下获得了 比传统方法更好的结果,优化结果结构更紧凑,传动效率更好。为工业机器人减速器的设计提 供了理论支撑。

(2) 行星齿轮减速器的多目标建模与优化设计

本章以两级行星齿轮减速器为例,分析了影响行星齿轮减速器的主要参数并对其进行数 学建模,归纳为一个带约束的多目标优化问题。多目标进化算法适用于解决复杂的带约束的 多目标优化问题,本章中采用改进后的多目标进化算法 MOEA/D-CDP-ID 求解该问题,并与 改进之前的算法进行比较,验证了改进后算法的性能。通过进化算法得到的两级行星齿轮减 速器的 pareto 最优边界,设计者可以根据不同设计需求选择不同的设计方案,并采用 CAD 工具绘制出相关的几何模型,大大缩短了设计周期。同时采用数据挖掘的方法,揭示出了设 计变量与设计目标之间的规律,反过来指导设计过程,对于两级行星齿轮减速器的设计具有 指导性作用,同时可以将该方法拓展到其他领域的优化设计。

5.2 展望

工业机器人是一个各子系统之间相互耦合的复杂机电系统,设计到多个学科,较为复杂。 同时存在多个目标以及约束条件,传统的设计方法难以解决该问题。本文基于多目标进化算法 的多目标优化融入到工业机器人的设计中,给出了可行的解决方案,但还需对以下几个方面做 进一步的研究:

(1)工业机器人的设计涉及到多个学科,作为一个复杂机电系统,相关的研究方法也可借鉴到工业机器人的研究上来,例如键合图的方法对工业机器人传动系统进行建模及分析。

(2)如何将工业机器人与现在的研究热点如大数据云平台等结合起来也是将来的研究方向之一。

(3) 机械系统通常都伴有误差,目前的优化均是在相对理想的情况下进行的,因此接下 来还应对误差分析进行研究。

(4)下一步可以把工业机器人减速器的固有特性与动态响应分析作为本研究的一部分工作。

参考文献

- [1] 季晨.工业机器人姿态规划及轨迹优化研究[D].哈尔滨工业大学硕士论文. 2013.
- [2] 毕胜.国内外工业机器人的发展现状[J].机械工程师, 2008(7): 5-7.
- [3] 王田苗.全力推进我国机器人技术[J].机器人技术与应用, 2007(2): 17-23.
- [4] 蔡自兴.机器人学[M].北京:清华大学出版社,2000.
- [5] 杨夏雯. 多目标进化算法的改进及其应用研究.南京: 南京航空航天大学学位论文, 2011.
- [6] Schaffer J.D. Multi objective optimization with vector evaluated genetic algorithms[J].
 Proceedings of the 1st International Conference on Genetic Algorithms, Lawrence Erlbaum, 1985, 93-100.
- [7] D.E.Goldberg. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning[J]. Addison-Wesley, Reading. Massachusetts. 1989.
- [8] Tadahiko Murata, Hisao Ishibuchi. MOGA: Multi-Objective Genetic Algorithms[J]. In Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Evolutionary Computing. Jan. 1995, 2(1): 289-294.
- [9] N.Srinivas, Kalyanmoy Deb. Multi-objective Optimization Using the Nondominated Sorting in Genetic Algorithms[J]. Evolutionary Computation. 1994, 3(2): 221-248.
- [10] J.Horn, N.Nafpliotis, D.E.Goldberg. A niched Pareto genetic algorithm for multi-objective optimization, in Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Intelligence. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1994, 1: 82-87.
- [11]公茂果, 焦李成, 杨咚咚等. 进化多目标优化算法研究[J]. 软件学报, 2009, 20(2): 271-289.
- [12]E.Zitzler, L.Thiele. Multi-objective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Evolutionary Algorithm. IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 1999, 3(4): 257-271.
- [13]J.Knowles,D.W.Corne. Local search, multi-objective optimization and the pareto achived evolutionary strategy. In Proceedings of the third Australia-Japan joint workshop on intelligent and evolutionary systems, 209-216.
- [14]J.Knowles,D.W.Corne, Approximating the non-dominated front using the pareto archived evolutionary strategy, Evolutionary Computation, 8(2): 149-172.

- [15] Joshua Knowles and David Corne. M-PAES: A Memetic Algorithm for Multi-objective Optimization. In Proceeding of IEEE Conference on Evolutionary Computation(CEC'2000), 2000: 325-332.
- [16] David W, Corne et al. The Pareto envelope-based selection algorithm for multi-objective optimization, In Lecture Notes in Computer Science, Eds. Vol.1917, Proc.Parallel Problem Solving for Nature-PPSN IV, 2000: 839-848.
- [17] D.W.Corne, N.R.Jerran, J.D.Knowles, M.J Oates. PESA-II: Region-based selection in evolutionary multi-objective optimization, In Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference(GECCO-2001), Morgan Kaufmann Publishers, 2001: 283-290.
- [18]E.Zitzler et al. SPEA2: Improving the strength pareto evolutionary algorithm for multi-objective optimization. Proc. EUROGEN 2001-Evolutionary Methods for Design. Optimization and Control with Applications to Industrial Problems, K.C.Giannakoglou et al. 2001: 95-100.
- [19] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A Fast and Elitist Multi-objective Genetic Algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [20] K Deb, S Agrawal, A Pratab, etc. A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA-II. IEEE Transactions on Evolutionary Computation. April 2002, 6(1): 182-185.
- [21]Sierra M R, Coello C A C. Improving PSO-based multi-objective optimization using crowding, mutation and ^E -dominance [C]// Evolutionary Multi-Criterion Optimization. Springer Berlin Heidelberg, 2005: 505-519.
- [22]谢克明,谢刚,郭红波等. 人工免疫系统及其算法[J].电子与信息学报, 2005, 27 (11): 1839-1844.
- [23]Gong MG, Jiao LC, Du HF, Bo LF. Multi-objective immune algorithm with non-dominated neighbor-based selection[J]. Evolutionary Computation2008, 16(2): 225-255.
- [24]Zhang Q, Li H. MOEA/D: A multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition [J].Evolutionary Computation, IEEE Transactions on, 2007, 11(6): 712-731.
- [25]K.Miettinen, Nonlinear Multi-objective Optimization. Kluwer Academic Publishers, 1999: 154-160.
- [26] P.A.N. Bosman and D.Thierens, "The balance between proximity and diversity in multiobjective

evolutionary algorithm," IEEE Trans. Evol. Comput., vol.7, no.2, pp.174-188, Apr.2003.

- [27]Liangjun Ke, Qingfu Zhang, MOEA/D-ACO:A Multiobjective Evolutionary Algorithm Using Decomposition and Ant Colony, IEEE Trans on cybernetics, vol.43, no.6, dec 2013.
- [28]Tsung-Che Chiang, Yung-Pin Lai, 2011 IEEE Congress of Evolutionary Computation, CEC 2011, p1473-1480.
- [29]Khan,W, Qingfu Zhang, MOEA/D-DRA with two crossover operators, 2010 UK Workshop on Computational Intelligence, pp.1,6, 8-10 Sept. 2010
- [30] Deb, K.; Jain, H., An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference-Point-Based Nondominated Sorting Approach, Part I: Solving Problems With Box Constraints, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol.18, no.4, pp.577-601, Aug. 2014
- [31] Jain, H.; Deb, K., An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference-Point Based Nondominated Sorting Approach, Part II: Handling Constraints and Extending to an Adaptive Approach, Evolutionary Computation, IEEE Transactions on , vol.18, no.4, pp.602-622, Aug. 2014
- [32]Zitzler Z, Künzli S. Indicator-based selection in multi-objective search [C]. Lecture Notes in Computer Science 3242: Parallel Problem Solving from Nature-PPSN VIII. Berlin: Springer-Verlag, 2004: 832-842.

[33] 饶振纲.行星齿轮传动设计[M].化学工业出版社, 2003: 1-20.

[34]张俊良,采煤机截割部行星齿轮减速器三维优化设计研究[D].哈尔滨理工大学硕士学位论 文,2007.6

[35]孙振中,并联HEV用差动轮系特性分析与试验研究[D].西安理工大学硕士学位论文,2010.6. [36]袁茹,纪明刚.航空行星减速器振动特性分析[J].航空动力学报,1995,1(4):395-398.

[37]孙涛,沈允文.行星齿轮传动非线性动力学模型与方程[J].机械工程学报,2002,38(2):6-9. [38]商桂芝,陈殿华.行星齿轮机构的多目标优化设计[J].机械设计与研究,2006,22(2):68-70. [39]张涵,官德娟.行星齿轮减速器多目标优化设计研究[J].电子机械工程,2006,22(3):13-16. [40]袁茹,王三民,沈允文.行星齿轮传动的功率分流动态均衡优化设计[J].航空动力学报,2000,

15(4): 410-412.

[41]严细海. 2K-V 型减速机的动力学特性研究. 天津大学硕士论文. 2003,12.

[42]肖君君. RV 减速器的动态特性理论分析. 大连交通大学硕士论文, 2008,6.

[43]于成国. 环板式针摆行星传动非线性动力学研究. 大连交通大学硕士论文, 2008,12.

[44]刘继岩,孙涛,戚厚军.RV 减速器的动力学模型与固有频率研究[J].中国机械工程.2004,

23(8): 381-386

[45]何卫东,李力行,徐永贤. 高精度 RV 传动的受力分析及传动效率. 机械工程学报. 1996,

(8): 104-110.

- [46]李力行.摆线针轮行星传动原理及论文[J].大连铁道学院齿轮教研室, 1978, 7:38-40.
- [47]姚文席, 覃月胜, 马蔚. 摆线齿轮精度分析[J]. 工具技术. 2002, 36(6): 41-43.
- [48] 严细海,张策,李充宁等. RV 减速机的扭转振动的固有频率及其主要影响因素[J]. 机械科 学与技术. 2004, 23(8): 991-994.
- [49]关天明,张东生. 摆线针轮行星传动中反弓齿廓研究及其优化设计[J]. 机械工程学报,2005, 34(1): 151-156.
- [50]李双双.工业机器人建模、运动仿真与轨迹优化[D]. 呼和浩特:内蒙古大学学位论文,2012.
- [51]A.Osyczka. Multi-criteria optimizationfor engineering design, InJohnS.Gero, editor, Design Optimization, Academic Press, 1985: 193-227.
- [52]郑金华. 多目标进化算法及其应用[M].北京: 科学出版社, 2010.
- [53] Horn J. Multi-criterion decision making. In: Back Ted. Handbook of Evolutionary Computation Oxford: Oxford University Press, 1997.
- [54] 蒋勇.单目标和多目标全局优化算法设计[D].西安:西安电子科技大学学位论文,2008.
- [55] Coello C A, Sierra M R. A Co-evolutionary Multi-objective Evolutionary Algorithm [A]. Proc of the 2003 Congress on Evolutionary Computation [C]. Australia: IEEE, 2003: 482-489.
- [56]Li H, Zhang Q. Multi-objective optimization problems with complicated Pareto sets, MOEA/D and NSGA-II [J]. Evolutionary Computation, IEEE Transactions on, 2009, 13(2): 284-302.
- [57] 辜方清. 多目标进化算法中多样性与均匀性策略研究[D]. 广州: 广东工业大学硕士学位 论文, 2011,5.
- [58]T. P. Runarsson, X. Yao. Stochastic ranking for constrained evolutionary optimization[J]. IEEE Trans. Evolutionary Computation, 2000, 4(3): 284-294.
- [59] Wang Y, Cai Z (2012a), "Combining multiobjective optimization with differential evolution to solve constrained optimization problems", IEEE Trans. Evolutionary Computation 16(1):117–134
- [60] K. Deb. An efficient constraint handling method for genetic algorithms[J].Computer. Meth. Appl.

Mech. Eng., 2000, 186: 311-338.

- [61]C. A. Coello Coello. Constraint-handling using an evolutionary multi-objective optimization technique[J]. Civil engineering and environmental systems, 2000, 4(17): 319-346.
- [62] S. B. Hamida, M. Schoenauer. An adaptive algorithm for constrained optimization problems[J]. In Proceedings of Parallel Problem Solving from Nature (PPSN-VI), Lecture notes in Computer Science 1917. Springer Berlin/Heidelberg, 2000: 529–538.
- [63]Z. Cai and Y. Wang, "A Multiobjective Optimization-Based Evolutionary Algorithm for Constrained Optimization,"IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 10, no. 6, pp. 658-675, 2006.
- [64] T. Ray, H. K. Singh, A. Isaacs, and W. Smith, "Infeasibility driven evolutionary algorithm for constrained optimization,"in Constraint-Handling in Evolutionary Optimization, ser. Studies in Computational Intelligence, E. Mezura-Montes, Ed.Springer Berlin Heidelberg, 2009, vol. 198, pp. 145–165.
- [65] Wang Y, Cai Z (2012b) , "A dynamic hybrid framework for constrained evolutionary optimization", IEEE Trans Syst Man Cybern Part B Cybern 42(1):203–217
- [66]Zitzler E, Thiele L, Laumanns M, et al. Performance assessment of multi-objective optimizers: an analysis and review [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2003, 7(2): 117-132.
- [67]Zitzler E, Thiele L. Multi-objective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach [J]. Evolutionary computation, IEEE transactions on, 1999, 3(4): 257-271.
- [68] Qu B Y. Constrained multi-objective optimization algorithm with diversity enhanced differential evolution[C].2010 IEEE Congress on Evolutionary Computation. Spain,2015:1-5.
- [69] Wong E Y C, Yeung H S C, Lau H Y K. Immunity-based hybrid evolutionary algorithm for multiobjective optimization in global container repositioning[J]. Engineering Application of Artifical Intelligence, 2009, 22(6):842-854.
- [70]赵铮.工业机器人减速器 RV320 的修形参数优化与工艺性研究[D].天津: 天津大学机械学院 学位论文, 2013: 11-13.
- [71]孙宇,摆线针轮行星减速器的有限元分析研究,硕士,西北农林科技大学,2008. [72]华成丽,齿轮传动误差等价模型研究[D].重庆:重庆大学学位论文,2013.

[73]机械设计手册编委会.机械设计手册新版(第3卷).北京:机械工业出版社,2004,17-6
[74]李力行,何卫东,王秀琦等,机器人用高精度 RV 传动研究,中国机械工程,1999,10(9).
[75]饶振纲.行星传动机构设计[M].北京:国防工业出版社,1994:74-88.

- [76]李蕾, 屈力刚, 苗卫东.建筑卷扬机摆线针轮行星减速器优化设计[J].沈阳航空工业学院学报, 2002 年第 3 期.
- [77]乐燕飞,调隙摆线针轮行星传动机构设计[D].重庆大学硕士论文,2010.

[78]郑州工学院机械原理及机械零件教研室. 摆线针轮行星传动[M]. 北京: 科学出版社,

1978:74-88.

[79] 邢金龙,冯帅将等.用于科普展品的机械传动机构开发[J].通用机械,2008.

- [80] 胡青春, 闵锐, 段福海.两级行星齿轮传动系统多目标优化设计研究[J]. 现代制造工程, 2008 (3) 98-101.
- [81] Jose M del Castillo. "The Analytical Expression of the Efficiency of Planetary Gear Trains". Mechanism and Machine Theory,2002(37):197-214.

[82] 刘广平,朱国牛,液压绞车行星传动系统的优化设计[J].液压与气动,2010,12.

- [83]O. Sch"utze, X. Esquivel, A. Lara, and C. A. C. Coello, "Using the averaged hausdorff distance as a performance measure in evolutionary multiobjective optimization," IEEE Trans. Evolutionary Computation, vol. 16, no. 4, pp. 504–522, 2012.
- [84]K. Deb, Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms.John Wiley and Sons, Ltd., Chichester, UK, 2002.
- [85]K. Deb, "Unveiling innovative design principles by means of multiple conflicting objectives," Engineering Optimization, vol. 35(5), pp. 445–470, 2003.
- [86]K. Deb, and A. Srinivasan, "Innovization: Innovating design principles through optimization," Proceedings of the 8th annual conference on Genetic and Evolutionary Computation (GECCO'06), New York, NY,USA: ACM, pp. 1629–1636, 2006.
- [87] S. Bandaru and K. Deb, "Automated Discovery of Vital Knowledge from Pareto-optimal Solutions: First Results from Engineering Design," In Proc. IEEE CEC 2010, Barcelona, Spain, pp. 1224-1231, 2010.
- [88]C. C. Tutum, K. Deb, and J. H. Hattel, "Hybrid Search for Faster Production and Safer Process Conditions in Friction Stir Welding," Proc. 8th Simulated Evolution and Learning (SEAL), Indian

Institute of Technology Kanpur, India, December 2010, Springer-Verlag, Lecture Note in Computer Science, 6457, pp. 603-612.

致 谢

充实而难忘的研究生生活即将结束,回首思量,感慨良多,在论文的最后,借此简短篇 幅,向曾经给予我殷切教导的老师、强大支持的家人、耐心帮助的同学和朋友,表达我最真 切的感激和谢意。

我的导师范衠老师,在我完成本论文的各个时期,给予我充分的指导、严格的督促和诚 挚的关怀,才使我能够顺利完成科研工作。研究生学习期间,导师其人,学术严谨,学识渊 博,作风唯实,待学生耐心之余,又严格要求,其永远以饱满的热情面对工作,其高屋建瓴 的学术眼光,更让我敬佩不已,受益终生。此外,还要感谢工学院的其他老师给予我的帮助 和指导。另外非常感谢所有在我攻读汕头大学硕士学位期间的任课老师对我的谆谆教导和培 养,他们严以律己、宽以待人、朴实无华、平易近人的崇高风范,无微不至、感人至深的人 文关怀,让学生沉浸在知识的海洋里如沐春风,为学生们营造了良好的精神家园。

感谢我的父亲、母亲,长期以来,他们为了整个家庭含辛茹苦地工作;感谢我的弟弟, 对我求学之路的关心与支持,以及女友王雅慧,对我的无私支持、对我的理解与关心。正是 你们无微不至的关爱,正是你们的鼓励和帮助才能让我顺利完成学业。

感谢同班同伴给我的帮助、对我的宽容,你们是我一生重要的财富;感谢汕大五人帮成员,309 宿舍成员给我的生活添加了五彩缤纷的颜色,共同陪我度过最美的校园时光;感谢 实验室所有的师兄、师姐、师弟、师妹,大家在同一个实验室大家庭中,相互学习、相互鼓励、相互帮助,是值得我铭记一生的时光。

最后,衷心感谢在百忙之中评阅论文和参加论文答辩的各位老师、专家、教授,请您不 吝赐教,提出宝贵的意见,谢谢!

硕士期间主要工作成果

1. Lin H, Fan Z, Wang S, et al. Hybridizing Infeasibility Driven and Constrained-Domination Principle with MOEA/D for Constrained Multiobjective Evolutionary Optimization[M]//Technologies and Applications of Artificial Intelligence. Springer International Publishing, 2014: 249-261.

2. Fan Z, Cai X, Wang S, et al. Evolutionary synthesis of dynamical systems: the past, current, and future[C]//Proceedings of the 2014 conference companion on Genetic and evolutionary computation companion. ACM, 2014: 1169-1174.

3.Li W, Fan Z, Wang S, et al. Design optimization of MEMS using constrained multi-objective evolutionary algorithm[C]//Proceedings of the 2014 conference companion on Genetic and evolutionary computation companion. ACM, 2014: 1175-1180.

4. 范衠,朱贵杰,王晟等. 基于改进微分进化算法的微机电系统组件的布局优化方法.中国,发明专利. 专利 申请号 201410072383.3.

5. 范衡,朱贵杰,王晟等.一种基于键合图和遗传编程的工程设计方法.中国,发明专利.专利申请号 201410078663.5.

个人简历

姓名	王晟	性别	男			
出生年月	1987年9月	籍贯	江苏・徐州			
政治面貌	共青团员	民族	汉			
专业	机械电子工程	学历	研究生			
研究方向	工业机器人的优化设计					
教育经历	2005.09~2009.07 河海大学・机电学院・机械制造及自动化(本科)					
17 H 21/1	2012.09~2015.07 汕头大学・工学院・机械电子工程(硕士)					