


进化算法与

混合动力系统优化

Evolutionary Algorithms and
Optimization of Hybrid System

李少波 杨观赐 © 著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

进化算法与混合动力 系统优化

李少波 杨观赐 著



机械工业出版社

混合动力系统的高效运行依赖于各部件的匹配及控制策略,其优化模型具有不可微、多维、带约束、非线性等特点,是典型的多目标优化问题。本书介绍了当前混合动力系统多目标优化方法及其不足,综述了进化算法及进化多目标优化算法的最新研究成果,研究了进化算法中的优秀基因模块挖掘与重用技术,介绍了混合动力系统建模方法及仿真软件。在建立带约束混合动力系统多目标优化数学模型的基础上,设计了基于 NSGA-II 的混合动力系统多目标优化算法、基于 Pareto 最优原理的混合动力汽车多目标优化进化算法。证明了划分模型抽中特定目标的概率恒大于不划分模型的概率,并以其为理论基础设计了基于决策空间划分模型的多目标进化算法,同时介绍了将算法应用于混合动力系统多目标优化的方法,且量化研究了控制策略参数对并联式混合动力汽车整车性能的影响。最后,针对混合动力挖掘机动力源输出功率耦合控制技术,研究了动力源输出功率匹配控制策略,建立电控仿真模型并分析与优化了某型产品。

本书内容深入浅出,具有很强的理论与实践指导作用,可作为车辆工程、机械工程、计算机科学等学科相关专业工程技术人员、科研人员的实用工具书,也可以作为高年级本科生、研究生的课程教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

进化算法与混合动力系统优化/李少波,杨观赐著. —北京:机械工业出版社,2013.6

ISBN 978-7-111-42535-9

I. ①进… II. ①李… ②杨… III. ①混合动力汽车-动力系统-仿真模型-研究 IV. ①U469.702

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 102299 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:黄丽梅 责任编辑:刘本明 版式设计:霍永明

责任校对:肖琳 封面设计:赵颖喆 责任印制:张楠

北京玥实印刷有限公司印刷

2013 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·17.75 印张·353 千字

0001—2000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-42535-9

定价:52.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

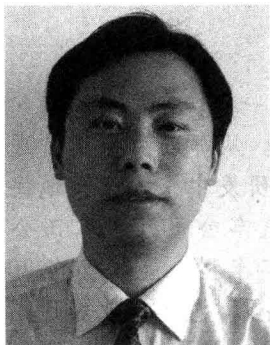
机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

策划编辑:(010) 88379770

封面防伪标均为盗版

作者简介



李少波，男，1973年11月生，贵州大学教授、博导，中国科学院成都计算机应用研究所兼职博导，教育部新世纪优秀人才计划培养对象，贵州省优秀青年科技人才培养对象，“西部之光”人才培养对象，国家科技部科技咨询与项目评审专家，贵州省制造业信息化专家组组长，贵州省省管专家，享受贵州省政府特殊津贴。于1996年获华中科技大学（原名华中理工大学）学士学位，2003年获中国科学院计算机软件与理论博士学位。现任贵州大学教育部现代制造技术重点实验室常务副主任、贵州大学机械工程学院副院长、贵州省现代制造技术重点实验室副主任、贵阳军民结合（装备制造）产业技术创新战略联盟副秘书长、贵州大学物联网产业研究发展中心主任、《计算机集成制造系统》理事会理事、《中国制造业信息化》理事会常务理事、贵州省计算机学会常务副会长、贵州省机械工业联合会常务理事、IEEE会员、CCF高级会员、中国机械工程学会高级会员、贵州大学学科学术带头人。近年主持国家科技支撑计划、国家自然科学基金、国家“863”计划、国家科技攻关计划、贵州省市科研项目40余项。已发表论文100余篇，出版专著1部，参与编写专著、教材2部，获省部级科技进步二等奖1次、三等奖2次，贵阳市科技进步特等奖1次、二等奖1次。在国内率先开展基于遗传编程与功率键合图的机电系统创新设计研究，目前主要研究方向为计算智能与智能系统、制造服务与制造物联、企业信息化等。



杨观赐，男，1983年10月生，贵州大学教育部现代制造技术重点实验室教师。现为IEEE会员、CCF会员、“贵州省百名教授、博士进企业活动”第五批入选对象、贵阳市科技特派员。主持国家科技支撑计划项目子课题、贵州省及贵阳市科技计划项目、企业委托项目近10项；主持研发的“继电仿真软件”在暖通空调节能控制产品上应用，作为主要架构者参与的“铁路建设工程信息管理系统”在武广线、深圳地铁等多个项目上使用。已发表学术论文40余篇，其中SCI/EI检索的学术论文近30篇，获软件著作权登记5项，获得贵州省科技进步三等奖1次。目前主要研究方向为计算智能与智能系统、复杂系统建模与多目标优化等。E-mail: guanci_yang@163.com。

前 言

世界上第一辆混合动力电动汽车诞生于19世纪最后一年，它由费迪南·保时捷所研制，该车驱动系统包括汽油机和电动机两部分。从那以后特别是进入21世纪以来，许多研究机构、企业投入到内燃机汽车的研发中来，极大地促进了混合动力汽车技术发展。在产业化方面，许多知名汽车公司（如本田公司等）投入大量资金研发实用的电动汽车、混合动力汽车车型，美国仅在2009年和2010年就研发投产了几十款混合动力汽车。当前，国际汽车产业界达成了电动汽车产业化战略共识：在技术路线上，近期（2010—2015年），在依靠传统内燃机汽车技术改进和推进车辆小型化实现降低排放的同时，为满足更为严格的节能减排要求，尽快推进混合动力技术的应用，并发展小型纯电动汽车和插电式混合动力电动车；中期（2015—2020年），在混合动力技术得到广泛应用的基础上，增加汽车动力系统电气化程度，加大小型纯电动汽车和插电式混合动力汽车推广力度；在2020年之后，纯电力驱动技术将逐步占据主导地位，通过发展纯电动汽车和燃料电池汽车，实现大幅度降低排放。在车型应用方面，纯电动、混合动力和燃料电池三种类型的电动汽车技术各自具有最优的适用车型。对短途出行需求，可采用小型纯电动汽车；对长途出行需求，主要采用混合动力汽车、插电式混合动力汽车或者燃料电池汽车。

我国高度重视电动汽车技术的发展，研究与开发工作可以追溯到“八五”期间，许多科研机构、国有企业、高校积极研发电动汽车与混合动力汽车技术，取得了丰硕的成果。在“十五”期间，国家通过制定并实施《汽车产业调整和振兴规划》，实施新能源汽车重大项目计划，批准立项了许多以开发混合动力汽车、新能源汽车、纯电动汽车等为重点的科技专项，设立了驱动电机、多能源动力总成、动力电池以及管理系统等一系列研究课题，突破了动力总成技术及许多关键零部件生产技术。刚刚结束的“十一五”期间，我国的混合动力与电动汽车产业化效果显著，建立起了“三纵三横”的布局，突破了纯电动汽车、燃料电池电动汽车、混合动力汽车三种整车技术，并在驱动电机、动力电池和多能源动力总成这三种关键技术方面取得了良好成果。“十二五”期间，国家科技计划加大力度持续支持电动汽车科技创新，把科技创新引领与战略性新兴产业培育相结合，组织实施电动汽车科技发展专项规划。经过“十五”、“十一五”两个五年计划的科技攻关以及奥运会、世博会、“十城千辆”等示范工程的实施，我国电动汽车从无到有，在关键零部件、整车集成技术以及技术

标准、测试技术、示范运行等方面都取得重大进展，初步建立了电动汽车技术体系，已申请专利 3000 余项，颁布电动汽车国家和行业标准 56 项，建成 30 多个新能源汽车技术创新平台。当前，我国电动汽车发展已进入关键时期，既面临重大的发展机遇，也面临着严峻的挑战。我国电动汽车发展中还存在很多需要解决的问题，例如核心技术还不具竞争优势、企业投入不足、政府的协调统筹潜力还没有充分发挥等。总体来看，虽然我国电动汽车研发起步较早，并得到了迅速发展，但是传统汽车及相关产业基础相对比较薄弱，与发达国家相比，特别是在中高端技术方面的资金投入和技术差距仍然存在。

《国家中长期科学和技术发展规划纲要》将“复杂系统的优化理论与方法”列入基础研究中的科学前沿问题，并指出这方面的基础科学研究对提升我国独立自主设计与制造能力和国际竞争力具有重要意义。与此同时，《电动汽车科技发展“十二五”专项规划》中指出：目前，我国是全球最大的汽车生产国，也是最大的汽车消费国，节能减排面临巨大压力，有着强烈的产业升级与技术转型需求。我国的汽车产量在 2006 年超过日本成为全球第二大汽车生产基地，2009 年超过美国成为第一大汽车生产和消费国家，2010 年、2011 年产销汽车均超过 1800 万辆，2012 年突破 1900 万辆。汽车保有量的不断快速增长，导致道路交通燃料消耗量持续攀升，造成我国石油对外依赖程度不断增大的局面。《规划》中指出：“为了使我国 2020 年乘用车燃油经济性达到国际同期水平，平均油耗应降至 5L/100km 以内，采用混合动力为代表的重大汽车节能技术势在必行。”对于已经成功实现产业化的混合动力汽车，提高 HEV 驱动系统的动力性能、降低混合动力汽车燃油消耗量、减少污染物排放量，对于混合动力汽车的推广与“节能减排”具有重要意义。

生物进化过程是自然的、并行发生的、鲁棒的优化过程，优化的目标是对环境的自适应。生物种群通过遗传复制和优胜劣汰的自然选择过程，使新生种群达到适应环境的最优状态，显示出对自然环境的自适应能力和自身结构的优化能力。受进化论和种群遗传学的启发，进化计算使用基于种群的搜索技术，通过对当前种群进行基因重组、变异和选择操作来生成新的种群，并逐步使种群进化到最优或近似最优的状态，从而实现全局优化的目的。当前，以不确定性、非线性、时间不可逆为内涵，以复杂问题为研究对象的科学新范式得到学术界的普遍认同。由于进化算法能有效地求解 NP 难解问题以及非线性、多峰函数优化和多目标优化问题，从而得到了多学科的广泛重视，并被称为 21 世纪的先进计算技术。进化计算的理论研究正在深入，应用日趋广泛，进化计算正在从单一的模拟进化的算法发展成为集生命科学、优化、统计学、人工智能和计算机科学于一体的交叉学科，其研究除了从原理上彻底认识算法的内部机制，为算法的改进和应用提供理论依据，还扩展进化算法的应用领域，使部分

研究成果呈现商品化的趋势。我国学者在进化计算和多目标进化计算的研究方面,呈现了欣欣向荣的良好势头,不少学者已站到了国际研究前沿。但当前的进化算法中,一方面,新生个体的产生方式充满了随意性,特别是通过随机生成的方式进入进化种群的个体;而通过交叉与变异操作产生的新个体,往往与父代个体的基因有很大的差异,这就导致了遗传信息继承不稳定的局面。另一方面,研究工作对决策变量映射到目标函数空间后的分布情况比较关注,而对如何有效利用决策空间中客观存在的最优解分布信息的方法研究较少。

考虑到混合动力系统的高效运行依赖于各部件的匹配及控制策略,其优化模型具有不可微、多维、带约束、非线性等特点,是典型的多目标优化问题。而当前基于进化算法的混合动力系统多目标优化研究,采用线性加权求和法或理想点法等,将多个目标函数转变成单目标函数后进行求解。但混合动力系统的多个目标函数间量纲不同且各参数存在耦合效应,将多目标单目标化的方法难以体现各目标的真实特性。本书研究基于进化的混合动力系统多目标优化算法,这种基于多目标进化算法的优化方法,可以减小混合动力系统创新过程中对人的依赖性,提高企业的创新设计能力与效率;可以避免个人偏好(即不需要将多个目标通过加权的方式单目标化)对优化结果的影响,在仿真平台上测试系统的性能,可以缩短实车调试时间,具有良好的应用价值。所提出的基于决策空间划分模型的多目标进化算法,为求解多目标优化问题提供了一种全新框架,所获得的决策空间划分抽样理论模型及算法,对于求解多目标优化问题、丰富多目标进化算法的理论具有较重要的科学意义和广泛的应用价值。

本书由贵州大学的李少波教授与杨观赐博士共同撰写。其中,杨观赐博士在李少波教授的统筹规划下完成了第3章、第5章、第6章、第7章及第8章的撰写工作,共计约22万字,并完成了全书的统稿与校对工作;李少波教授对全书进行了审阅。2009年,李少波教授入选教育部新世纪优秀人才支持计划,本研究课题得到了该计划的立项资助,在此特向教育部新世纪优秀人才支持计划表示感谢。此外,对支持本书相关研究工作的贵州省科学技术基金(资助课题编号:黔科合J字[2010]2095号)表示衷心的感谢。感谢贵州大学教育部现代制造技术重点实验室计算智能研究小组(<http://amt.gzu.edu.cn>)的璩晶磊、田月华、皮振超、于新宝、李琴、马鑫等研究生为本研究所做的许多工作,感谢书中引用文献作者的辛勤劳动。

限于作者的水平,书中难免有些错误与不足,殷切希望广大读者批评指正。

作者

目 录

作者简介

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 相关概念及定义	1
1.1.1 混合动力汽车	1
1.1.2 进化算法	2
1.1.3 多目标优化问题数学描述	4
1.2 混合动力汽车技术发展情况	6
1.2.1 国内外研究现状	6
1.2.2 混合动力汽车的关键技术	10
1.3 混合动力汽车总成模型	13
1.4 混合动力系统优化方法	18
1.4.1 基于序列二次规划法的混合动力汽车优化	19
1.4.2 基于 DIRECT 算法的混合动力汽车优化	22
1.4.3 基于模拟退火算法的混合动力汽车优化	24
1.4.4 基于神经网络的混合动力汽车优化	25
1.4.5 基于粒子群优化算法的混合动力汽车优化	27
1.4.6 基于进化算法的混合动力汽车优化	29
参考文献	31
第 2 章 进化算法与多目标优化	34
2.1 遗传算法	35
2.1.1 历史背景与研究现状	35
2.1.2 遗传算法的基本结构	36
2.1.3 遗传算法的数学机理	43
2.2 遗传编程	50
2.2.1 研究现状与应用领域	50
2.2.2 遗传编程的基本概念	52
2.2.3 算法的表示方式与主体流程	57
2.3 进化策略和进化规划	61
2.3.1 进化策略	61
2.3.2 进化规划	62
2.4 进化多目标优化	64

2.4.1 进化多目标优化算法综述	64
2.4.2 几种典型进化多目标优化算法	72
2.4.3 进化多目标优化算法性能评价指标	81
参考文献	83
第3章 进化算法中优秀基因模块挖掘与重用技术	90
3.1 重用最大频繁模式的可持续进化算法	90
3.1.1 相关定义	91
3.1.2 最大频繁序列模式挖掘算法	91
3.1.3 MFPEA 算法设计	92
3.1.4 算法性能测试与分析	93
3.1.5 小结	98
3.2 重用抗体优良片断的免疫进化算法	99
3.2.1 相关基础理论	99
3.2.2 改进方案	108
3.2.3 算法设计	110
3.2.4 测试与分析	111
3.2.5 小结	114
参考文献	117
第4章 混合动力系统建模及仿真	119
4.1 混合动力汽车仿真方法及仿真软件	119
4.1.1 前向仿真	119
4.1.2 后向仿真	120
4.1.3 前向仿真与后向仿真的选择	121
4.1.4 混合动力汽车仿真软件	121
4.2 混合动力汽车仿真模块建模与分析	129
4.2.1 发动机模块	129
4.2.2 驱动电机模块	133
4.2.3 蓄电池模块	136
4.2.4 变速器模块	140
4.2.5 主减速器模块	142
4.2.6 车轮模块	144
4.2.7 整车行驶模块	146
4.2.8 循环仿真工况模块	148
4.2.9 控制策略模块	150
4.3 基于 AMESim 的混合动力系统建模仿真简介	159
4.3.1 AMESim 软件概述	159
4.3.2 AMESim 使用入门	159
4.3.3 AMESim Rev 9 软件库简介	161

参考文献	162
第 5 章 基于 NSGA- II 的混合动力系统多目标优化方法	164
5.1 混合动力系统二目标优化数学模型	164
5.1.1 约束条件的确定	165
5.1.2 待优化参数	165
5.2 混合动力系统多目标优化算法	166
5.2.1 NSGA- II 算法主体流程	166
5.2.2 基于 NSGA- II 的优化算法设计	166
5.3 仿真实验	168
5.3.1 实验设置	168
5.3.2 结果与分析	169
参考文献	174
第 6 章 基于 Pareto 最优原理的 PHEV 控制策略与传动系统参数优化	176
6.1 混合动力系统三目标优化数学模型	176
6.2 基于 Pareto 最优原理的混合动力汽车多目标优化算法设计	177
6.3 仿真实验与分析	178
6.3.1 车型基本信息、优化参数及约束条件	178
6.3.2 优化结果与分析	180
参考文献	185
第 7 章 基于决策空间划分模型的混合动力系统多目标进化算法	186
7.1 定理证明: 决策空间划分模型的数学基础	186
7.2 基于决策空间划分模型的多目标进化算法设计	191
7.2.1 基于决策空间划分模型的多目标进化框架	191
7.2.2 决策空间划分策略与初始化超球模型方法	193
7.2.3 超球体内个体初始化	194
7.2.4 超球体质心和半径更新及超球体内个体调整	194
7.2.5 超球体间信息共享机制	195
7.2.6 计算复杂性分析	196
7.3 算法的数据结构设计及主体结构	196
7.3.1 数据结构定义	197
7.3.2 算法主体结构	198
7.4 针对函数优化问题的算法性能测试	200
7.4.1 测试问题与参数设置	200
7.4.2 性能指标	202
7.4.3 实验结果与分析	203
7.5 算法在混合动力系统多目标优化中的应用研究	213
7.5.1 仿真调用基础及接口	213
7.5.2 针对混合动力系统优化设计的函数实现及优化结果	216

参考文献	222
第 8 章 基于多指标正交试验与 MOEA 的 PHEV 控制策略参数优化	224
8.1 概述	224
8.2 并联混合动力汽车总成模型	225
8.3 控制策略参数的多指标正交试验设计及分析	225
8.4 基于 Pareto 最优原理的混合动力汽车多目标优化进化算法	229
8.5 仿真实验结果与分析	230
8.5.1 实验设置	230
8.5.2 实验结果与分析	231
8.6 小结	233
参考文献	235
第 9 章 混合动力挖掘机动力源输出功率匹配控制	236
9.1 混合动力挖掘机动力源输出功率匹配技术	236
9.1.1 挖掘机混合动力传动系统能量控制	236
9.1.2 混合动力挖掘机动力传动系统过渡品质控制	239
9.1.3 混合动力挖掘机负载功率匹配控制方案	242
9.1.4 混合动力挖掘机动力源功率匹配控制方案的研究与制订	248
9.2 混合动力挖掘机系统设计及参数确定	249
9.2.1 液压系统	249
9.2.2 燃油发动机	252
9.2.3 电机	252
9.3 混合动力挖掘机系统建模与分析	253
9.3.1 执行元件模型	254
9.3.2 液压系统模型	254
9.3.3 动力源模型	257
9.3.4 整机模型	262
9.4 某型号混合动力挖掘机动力源输出功率匹配控制及仿真	262
9.4.1 执行系统标准空载工况仿真分析	263
9.4.2 混合动力挖掘机动力源输出功率控制策略	265
9.4.3 混合动力挖掘机输出功率控制仿真分析	266
9.5 小结	271
参考文献	272

第 1 章 绪 论

1.1 相关概念及定义

1.1.1 混合动力汽车

世界上第一辆以汽油为燃料的汽车由德国人卡尔·本茨 (Karl Benz) 于 1885 年研制成功。自诞生 100 多年来, 内燃机汽车的发展速度不断加快, 是现代工业技术最重大的成就之一。迅速发展的汽车工业不仅在满足人们日常生活的许多需求上作出了重大贡献, 同时还与其他服务于它的工业一起, 构成了世界经济的支柱, 给人类带来了巨大的经济效益。汽车普及程度及技术水平已经成为衡量一个国家或地区经济发展程度的标志。但随之而来的是能源危机和严重的环境污染, 各国制定的汽车排放法规越来越严格, 使得开发新型低油耗、低排放汽车成为世界汽车工业发展的紧迫任务^[1]。

电动汽车因其在环保节能方面所具有的不可比拟的优势, 迅速成为各国政府和汽车行业的研发热点。电动汽车主要包括纯电动汽车 (Electric Vehicle, EV)、燃料电池汽车 (Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV) 和混合动力汽车 (Hybrid Electric Vehicle, HEV)。由于电池技术的限制, 融合了传统内燃机汽车和电动汽车优点的混合动力汽车, 因其低油耗、低排放、高性能、续航里程长等方面的综合优势, 成为全球范围内新型汽车的开发热点, 是解决当前能源和环境问题切实可行的过渡方案^[2]。

国际能源组织 (International Energy Agency, IEA) 曾对混合动力汽车作出定义, 即能量与功率传送路线具有如下特点的汽车称为混合动力汽车^[3]:

- 1) 传送到车轮推进车辆运动的能量, 至少来自两种不同的能量转换装置 (例如内燃机、燃气涡轮、斯特林发动机、电动机、液压马达、燃料电池);
- 2) 这些转换装置至少要从两种不同的能量存储装置 (例如燃油箱、蓄电池、飞轮、超级电容、高压储氢罐等) 吸取能量;
- 3) 从储能装置流向车轮的这些通道, 至少有一条是可逆的 (既可放出能量, 也可吸收能量), 并且至少还有一条是不可逆的;
- 4) 如果可逆的储能装置供应的是电能, 则称为混合动力电动车。

依据 IEA 的定义, 通过不同的组合方式, 可以得到各式各样的混合动力汽车,

但目前市场上所推出的混合动力汽车基本是以发动机作为不可逆储能装置，以蓄电池作为可逆储能装置的混合动力电动汽车。本研究所涉及的混合动力汽车均是指“油-电”混合动力电动汽车。

混合动力汽车采用发动机、蓄电池和电动机作为混合动力源，通过先进的控制策略，混合动力源得到有机的结合，使发动机尽可能工作在高效低排放区域。在汽车制动时，通过电机工作象限的调整回收部分整车制动能量，从而改善汽车在各种行驶工况下的燃油经济性、尾气排放以及其他使用性能。混合动力汽车克服了传统内燃机汽车和纯电动汽车的缺点，具有高性能、低能耗和低污染物排放的特点，在技术经济环境等方面有明显的优势。

我国高度重视混合动力技术的发展。“十五”期间，国家设立了“电动汽车重大科技专项”，确定了“三纵三横”的研发布局；“十一五”期间，设立“十一五”863节能与新能源汽车重大项目，重点对混合动力产业化技术进行支持；科技部发布的《电动汽车科技发展“十二五”专项规划（摘要）》中更提出：“为满足更为严格的节能减排法规目标要求，应尽快推进混合动力技术的应用。”

1.1.2 进化算法

生物进化过程是自然的、并行发生的、鲁棒的优化过程，优化的目标是对环境的自适应。生物种群通过遗传复制和优胜劣汰的自然选择过程，使新生种群达到适应环境的最优状态，显示出对自然环境的自适应能力和自身结构的优化能力。从19世纪50年代开始，研究者一直在追寻可持续的进化计算方法来解决复杂的问题。受进化论和种群遗传学的启发，进化计算使用基于种群的搜索技术，通过对当前种群进行基因重组、变异和选择操作来生成新的种群，并逐步使种群进化到最优或近似最优的状态，从而实现全局优化的目的^[4]。

1958年，Friedberg^[5]在自动程序设计研究项目中就提出了通过指令交换和指令变异使程序进化的设计思想。1962年，Bremermann^[6]首先将二进制编码、变异和重组技术应用到线性规划和凸规划问题中，并提出了估计最优变异概率和克服早熟收敛的必要性。同年，生物学家Frase^[7]在从事计算机模拟自然遗传系统的研究过程中，也提出了和现代遗传算法相似的概念和思想，但他并未认识到自然遗传系统可以转化为人工遗传算法。正如Bäck^[8]所指出，由于这些算法的设计缺陷和缺乏有效的计算平台，这些早期研究的思想 and 成果并未引起广泛关注，但这些基础研究使得科学家们提出了模拟人脑和生物种群的智能求解问题的思想。前者强调个体的智能，导致了人工神经网络和基于知识的经典人工智能的发展；后者则强调种群基因多样性、群体学习功能和自适应进化特点，模拟自然界生物进化智能，导致了以遗传算法（Genetic Algorithm, GA）、遗传编程（Genetic Programming, GP）、进

化策略 (Evolution Strategies, ES) 和进化规划 (Evolutionary Programming, EP) 为典型代表的进化算法的形成。

进化算法是以达尔文的进化论思想为基础, 通过模拟生物进化过程和进化机制求解问题的自组织、自适应人工智能技术, 是一种有启发性的反复搜索方法。该方法以体现群体搜索和群体中个体之间信息交换两大策略的交叉和变异算子为主, 为每个个体提供优化的机会, 从而使整个群体在优胜劣汰的选择机制下保证了进化的趋势^[9]。其优越性主要表现在: ①进化算法在搜索过程中不容易陷入局部最优, 即使在所定义的适应度函数是不连续、非规则或有噪声的情况下, 算法也能以很大的概率找到全局最优解; ②进化算法由于其固有的并行性, 非常适合于巨量并行机; ③进化算法采用自然进化机制来表现复杂的现象, 能够快速、可靠地解决非常困难的问题; ④由于进化算法容易介入到已有模型中并具有可扩展性, 以及易于结合其他技术等特点, 目前已经在最优化、机器学习和并行处理等领域得到了越来越广泛的应用。作为进化基础的普遍原则, 自然选择已经被充分地建立。自然进化过程的基本算法特征已经激发了进化计算的产生, 即设计人工进化算法。简言之, 所有的进化算法能用以下的算法结构概括:

```

begin
  初始化  $P(0)$ 
   $t \leftarrow 0$ 
  while(终止条件不满足) do
    评价  $P(t)$ 
     $P'(t) \leftarrow$  从  $P(t)$  中选择
     $P''(t) \leftarrow$  从  $P'(t)$  中选择
     $P(t+1) \leftarrow$  从  $P''(t)$  或  $P(t) \cup P''(t)$  中选择
     $t \leftarrow t+1$ 
  end
end
返回最优解

```

当前, 以不确定性、非线性、时间不可逆为内涵, 以复杂问题为研究对象的科学新范式得到学术界的普遍认同。由于进化算法能有效地求解 NP 难解问题以及非线性、多峰函数优化和多目标优化问题, 从而得到了科研工作者的广泛关注, 并被称为 21 世纪的先进计算技术。进化计算的理论研究正在深入, 应用日趋广泛, 进化计算正在从单一的模拟进化的算法发展成为集生命科学、优化、统计学、人工智能和计算机科学于一体的交叉学科, 其研究除了从原理上彻底认识算法的内部机制, 为算法的改进和应用提供理论依据, 还扩展进化算法的应用领域, 使部分研究成果呈现商品化的趋势。

1.1.3 多目标优化问题数学描述

科学研究与工程实践中的许多优化问题都可以归结为多目标优化 (Multiobjective Optimization, MO) 与决策问题, 例如, 混合动力系统的性能优化, 航天器有效射程、载荷、推力参数的综合优化, 桥梁质量和强度设计的综合, 投资组合中风险和效益的综合, 社会发展与国民经济的中长远发展计划的优化与决策问题等。

定义 1-1 多目标优化问题

对于一个最小化优化问题, 设 X 为 n 维的决策空间, Y 为 m 维的目标空间, 一个多目标优化问题 (Multi-objective Optimization Problem, MOP) 可表述为^[10]

$$\begin{cases} \min & \mathbf{y} = F(\mathbf{x}) \triangleq (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_m(\mathbf{x}))^T \\ \text{s. t.} & g_i(\mathbf{x}) \leq 0 (i = 1, 2, \dots, q_1), h_j(\mathbf{x}) = 0 (j = 1, 2, \dots, q_2) \end{cases}$$

式中, n 为决策变量个数; m 为优化目标函数数量; $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X \subset R^n$ 为决策向量; $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_m) \in Y \subset R^m$ 为目标向量。目标函数 $F(\mathbf{x})$ 表示 m 个映射函数 $f: X \rightarrow Y$, $g_i(\mathbf{x}) \leq 0 (i = 1, 2, \dots, q_1)$ 与 $h_j(\mathbf{x}) = 0 (j = 1, 2, \dots, q_2)$ 分别为目标函数 $F(\mathbf{x})$ 需要满足的 q_1 个不等式约束条件与 q_2 个等式约束条件。

对于一个多目标优化问题的求解, 要在充分收集资料和数据的基础上, 深入分析各种数量间的关系, 着重确定以下三要素:

- 1) 决策向量——确定一组恰当的向量, 把可供选择的方案表示出来。这组向量取不同的值对应不同的方案。
- 2) 目标函数——根据决策优化与决策目标, 对问题提出需要极大化或极小化的指标, 它们是决策向量的函数, 并组成一个向量目标函数。
- 3) 约束条件——寻找并建立决策向量必须满足的所有限制条件, 并且用含有决策向量的不等式或等式表示出来。

多目标优化问题涉及多个相互矛盾而且不可比较的优化目标, 通常搜索多目标优化问题的全局最优解的过程是 NP 完全问题。对于一个多目标优化问题^[11]:

- 1) 通常, 多目标优化问题的各目标间存在某种均衡或耦合, 优化结果难以使多个优化目标均达到最优状态。当使用某一种方案改善某一目标时, 有可能恶化其他目标。
- 2) 各优化目标间无法采用统一的衡量标准或计量单位, 目标间无法进行直接比较而区分出优劣。
- 3) 一个多目标优化问题存在一个或多个 Pareto 最优解, 不考虑偏好信息时, Pareto 最优解之间无优劣之分。

多目标优化在本质上是向量优化, 因此要想界定其解的概念, 必须先界定向量集的序关系。按照不同的序关系界定方法有绝对最优解、强有效解、较多有效解、Fuzzy 解、满意解、妥协解等多种解的概念。基于定义 1-1 的符号定义, 给出以下

几个重要概念^[10]：

定义 1-2 Pareto 占优

对任意向量 $u = (u_1, \dots, u_m) \in Y$, $v = (v_1, \dots, v_m) \in Y$, 当且仅当 $\forall i \in \{1, 2, \dots, m\} : u_i \geq v_i \wedge \exists i \in \{1, \dots, m\} : u_i > v_i$ 为真值时, 称 v 比 u 占优, 又称 v 支配 u , 记做 $u < v$ 。

图 1-1 为 2 维最小化优化问题的支配性图解, 假定实曲线上的点集为最优曲线。因目标向量 u_1 小于 u_2^* , 称 u_1 支配 (优于) u_2 , 或者 u_2 受支配于 (劣于) u_1 ; u_3 与 u_4 不可比较。

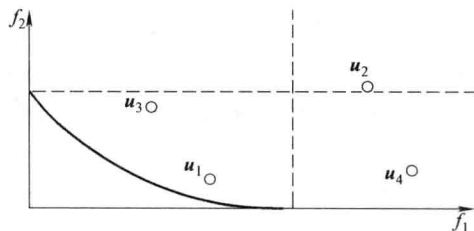


图 1-1 Pareto 支配性图解

定义 1-3 Pareto 最优解

$x \in X$ 被称为 Pareto 最优解

(或 Pareto 非支配解、非劣解), 当且仅当满足条件

$$\neg \exists x' \in X : F(x') = (f_1(x'), \dots, f_m(x')) < F(x) = (f_1(x), \dots, f_m(x))$$

定义 1-4 Pareto 最优解集

对于一个给定多目标优化问题, 记 Pareto 最优解集为 P^* , 其定义为

$$P^* \triangleq \{x \in X \mid \neg \exists x' \in X : F(x') < F(x)\}$$

定义 1-5 Pareto 前沿

给定一个多目标优化问题及其 Pareto 最优解集 P^* , 记 Pareto 前沿为 P_F^* , 其定义为

$$P_F^* \triangleq \{y = F(x) = (f_1(x), \dots, f_m(x)) \mid x \in P^*\}$$

为了叙述的方便与准确, 本研究特给出以下定义:

定义 1-6 真实 Pareto 最优解

给定一个多目标优化问题, 称其客观存在的 Pareto 最优解集为真实 Pareto 最优解, 简称真实 Pareto 解, 记为 P^{true} 。

定义 1-7 真实 Pareto 前沿

给定一个多目标优化问题及其真实 Pareto 最优解集 P^{true} , 记真实 Pareto 前沿为 P_F^{true} , 其定义为

$$P_F^{\text{true}} \triangleq \{y = F(x) = (f_1(x), \dots, f_m(x)) \mid x \in P^{\text{true}}\}$$

定义 1-8 n 维超球体

n 维超球体是决策空间 X 的子区域, 它由一个给定的质心 $c = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n$ 与半径 $r (r > 0)$ 确定, n 维超球体 (简称超球体) 定义为一个三元组 $S_p(c, r, n)$, 即

$$S_p(c, r, n) \triangleq \{ \sum_{i=1}^n (x'_i - x_i)^2 = r^2 \mid \forall c' = (x'_1, \dots, x'_n) \in X, r > 0, n > 1 \}$$

1.2 混合动力汽车技术发展情况

进入 21 世纪以来, 能源安全与气候变化成为国际社会关注的焦点。为实现交通领域的健康可持续发展, 世界主要汽车生产国正加快推动节能与新能源汽车的发展, 节能与新能源汽车将进入一个快速产业化发展的阶段。根据机电混合度的不同, 混合动力汽车与传统燃油汽车相比能够实现 10% ~ 40% 的节油效果, 常规排放物和 CO₂ 排放也显著降低, 并且性能稳定, 可靠性强, 不依赖于新建配套设施, 因此被认为是近中期比较现实和有效的新能源汽车产品, 未来成为汽车市场的主流竞争者。随着各国环境立法的日趋严厉, 电动汽车、混合动力汽车性能的日益提高以及其成本的不断降低, 混合动力汽车的市场份额逐渐增大, 已成为重点发展的新型汽车。

1.2.1 国内外研究现状

混合动力汽车作为一项崭新的技术, 已得到美、日及西欧许多发达国家的高度重视, 并已获得了一些重大的成果和进步。下面介绍当前世界各国的混合动力汽车的技术发展状况。

1. 美国

早在 1997 年, 美国政府主导的“新一代汽车合作伙伴计划”(PNGV) 就根据当时的进展情况, 筛选出压燃直喷(CIDI) 发动机、混合动力电驱动系统、燃料电池(含储能电池) 和轻质材料 4 项新技术, 组织和号召大家重点突破, 混合动力技术是重点之一。鉴于直喷柴油机也是一项重点, 为了容易达到 PNGV80MPG (33.78km/L) 的目标, 美国三大汽车公司都发展了柴油机电动机混合动力, 而且都按计划于 1999 年制造出柴油机混合动力轿车, 如戴姆勒-克莱斯勒公司的 Dodge ESX3 采用适度混合动力系统(mild hybrid), 福特公司的 Prodigy 采用低储能需求(LSR) 混合电驱动系统, 通用汽车公司的 Precept 采用双轴混合电驱动系统等^[12]。按照 PNGV 的时间表, 1999 年以前为浓缩并集中技术目标阶段, 1999 ~ 2001 年为生产概念车阶段, 2001 ~ 2005 年为生产样车阶段。在 2000 年年底特律国际汽车展上福特和通用汽车公司展示了其柴油混合动力概念车, 同年 2 月 22 日, 戴姆勒-克莱斯勒在华盛顿国家博物馆公布了其 PNGV 混合动力概念车。PNGV 计划在 2002 年被终止, 原因是 80MPG 的目标很高, 而研制的新车在成本上并未取得很好的成果, 不能满足用户在价格上的要求, 也就是说, 在短时期内不具有市场价值。更重要的是, PNGV 仍然局限于用石油作为基本能源, 因此要求新项目在这方面有新的突破, 而新一代汽车能源可能不囿于现有技术和当前燃料资源。但是 PNGV 起到了