

A Thesis in Control Theory and Control Engineering



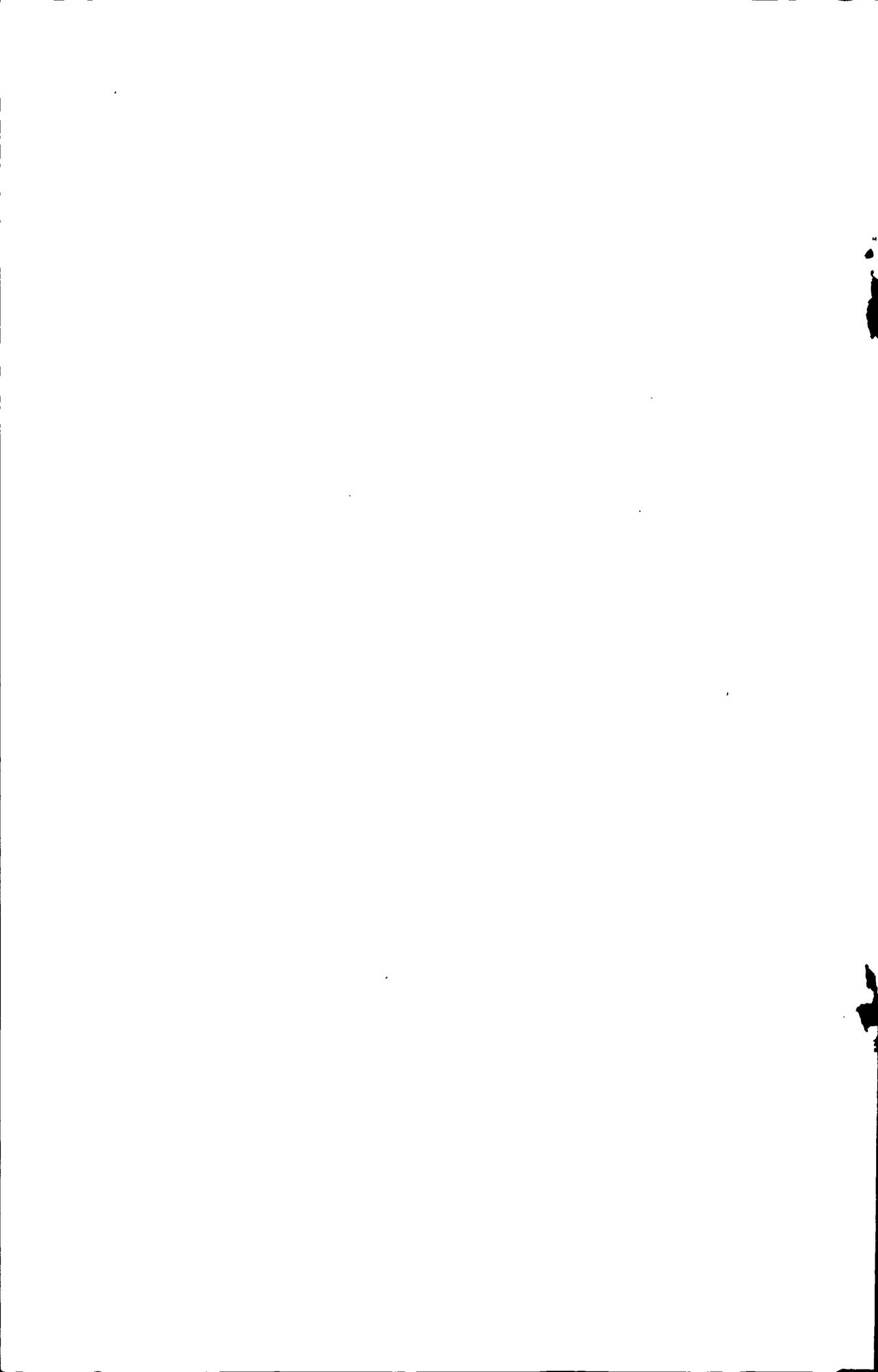
# **The Optimization of the Power Supply Curve for Electric Arc Furnace Based on Genetic Algorithm**

by Sun Mingqiang

Supervisor: Professor Mao Zhizhong

**Northeastern University**

**June 2008**



# 独创性声明

本人声明，所呈交的学位论文是在导师的指导下完成的。论文中取得的研究成果除加以标注和致谢的地方外，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得其他学位而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名： 孙小明强

日期： 2008.7.4

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解东北大学有关保留、使用学位论文的规定：即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人同意东北大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流。

作者和导师同意网上交流的时间为作者获得学位后：

半年 一年 一年半 两年

学位论文作者签名： 孙小明强 导师签名： 刘光远

签字日期： 2008.7.4 签字日期： 2008.7.4



# 基于遗传算法的电弧炉供电曲线的优化

## 摘 要

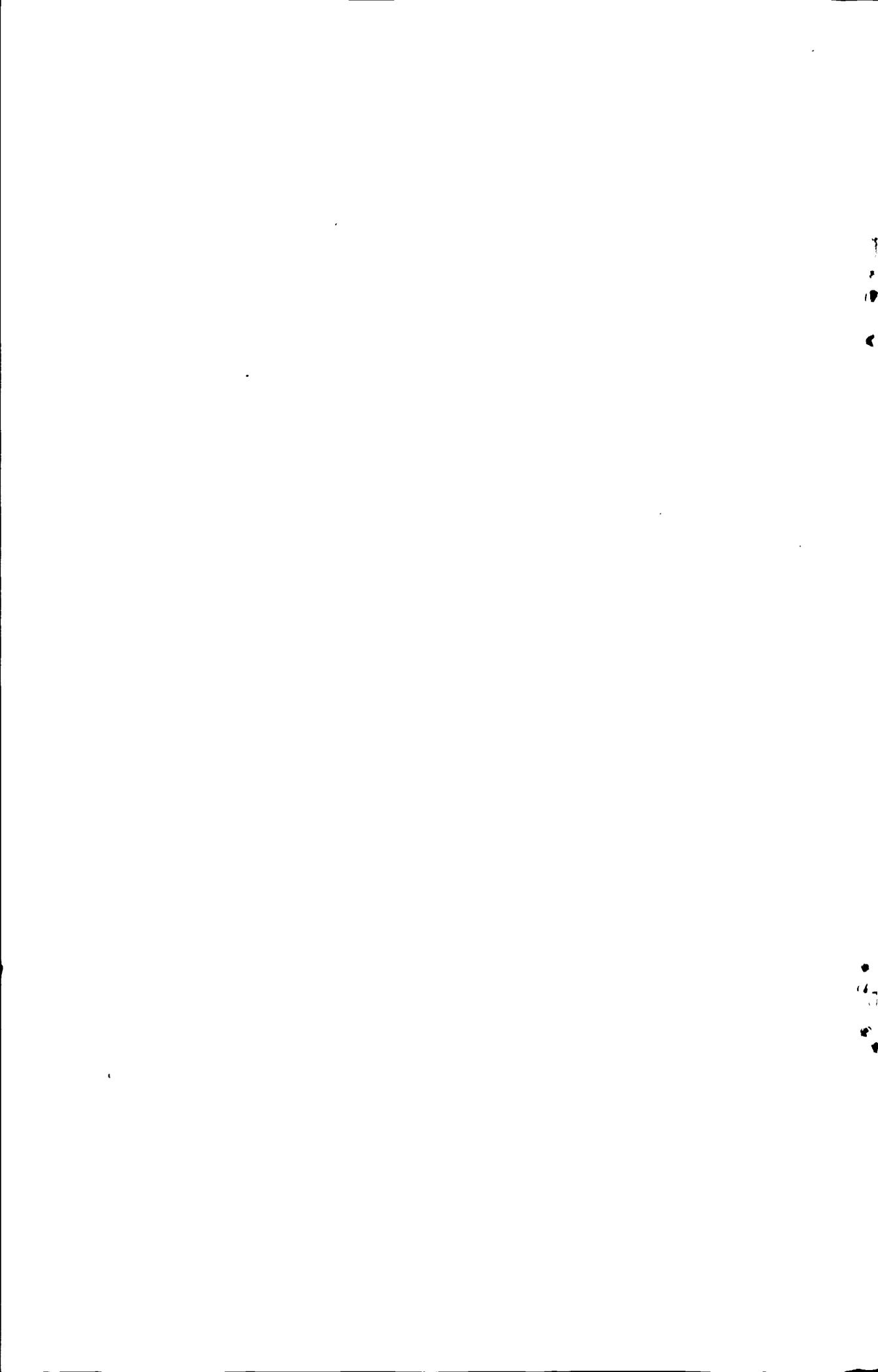
在电弧炉炼钢过程中，合理的供电策略不仅能保证操作顺利进行，而且有助于降低电耗、电极损耗和炉壁侵蚀，缩短冶炼周期，带来良好的经济效益。

本文在查阅了大量国内外相关文献的基础上，结合现代电弧炉的电气特性，根据现场数据对非线性电抗模型进行了回归分析，并在深入研究电弧炉电热特性和冶炼过程能量守恒的基础上，建立了基于经济指标的电弧炉供电模型，该模型以吨钢电耗最小、冶炼时间最短和电极消耗最少为目标，实现了电弧炉供电制度的整体优化。

基于经济指标的电弧炉供电模型是一个带约束的多目标混合整数非线性规划问题，对比传统优化方法和遗传算法求解此类问题的优势和不足，本文提出了面向约束处理的遗传算法和混合编码的 NSGA-II 算法，面向约束处理的遗传算法主要解决了约束难以处理的问题，而混合编码的 NSGA-II 算法解决了混合整数变量和多目标的问题。接着用 C++ 实现了这两种算法。

最后以上海某钢厂 3# 电弧炉为背景，应用面向约束处理的遗传算法和混合编码的 NSGA-II 算法实现了对电弧炉供电模型的求解，并对仿真结果进行了分析，制定了合理的供电曲线。此外，为了把优化算法应用到实际中，本文还根据电弧炉控制系统的体系结构设计了电弧炉供电曲线优化软件。

**关键词：**电弧炉；供电曲线；遗传算法；约束处理；混合编码



# The Optimization of the Power Supply Curve for Electric Arc Furnace Based on Genetic Algorithm

## Abstract

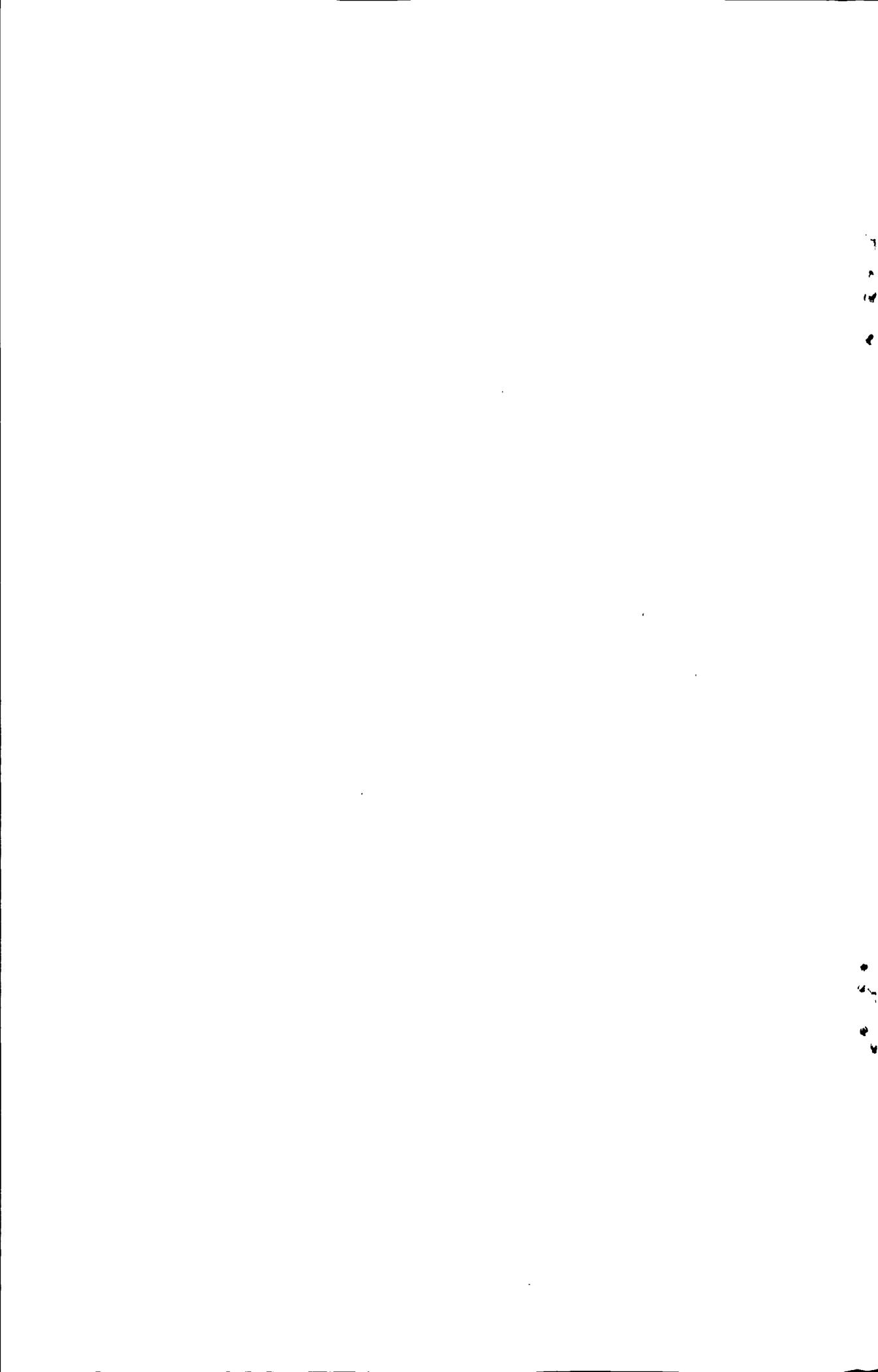
In steel-making process with Electric Arc Furnace (EAF), effective power supply strategy will not only ensure smooth operation, but also help reduce power consumption, electrode loss, furnace wall corrosion and shorten tap-to-tap cycle, which will bring in great profits.

On the basis of consulting large amount of literatures on relative subjects at home and abroad, with the electrical characteristics of modern EAF, its non-linear reactance model is regressed and analyzed according to field data. And by in-depth research on electrical and thermal characteristics and energy balance of the smelting process of EAF, a power supply model based on economic indices of EAF is established, whose target is to minimize power consumption, tap-to-tap cycle and electrode loss, achieving power supply strategy optimization as a whole.

The power supply model based on economic indices of EAF is a complicated multi-objective mixed integer nonlinear problem with constraints. In solving this kind of problems, strengths and weaknesses of traditional methods and genetic algorithms are compared. Then aiming at constraint handling Constraint Handling Genetic Algorithm is brought forward. And for dealing with mixed integer variables and multi-objective a Mixed Coding NSGA-II is formed. Then they are both implemented by C++.

Taking the No.3 EAF of some steelmaking plant in Shanghai for example, Constraint Handling Genetic Algorithm and Mixed Coding NSGA-II are applied to solve the power supply model of EAF and the simulation results are analyzed and reasonable power supply curve is established. In addition, in order to apply theory to practice, power supply curve optimizing software for EAF is designed according to the actual architecture of control system.

**Key words:** Electric Arc Furnace; power supply curve; genetic algorithm; constraint handling; mixed coding



# 目 录

声明.....	I
中文摘要.....	II
ABSTRACT.....	III
<b>第 1 章 绪论</b> .....	<b>1</b>
1.1 课题背景及意义.....	1
1.2 电弧炉炼钢简介.....	1
1.2.1 电弧炉炼钢历史及发展.....	1
1.2.2 电弧炉炼钢工艺.....	3
1.2.3 电弧炉炼钢设备.....	5
1.2.4 电弧炉炼钢特点.....	7
1.3 问题的提出及国内外研究现状.....	8
1.4 本文主要工作.....	8
<b>第 2 章 电弧炉电气系统分析</b> .....	<b>9</b>
2.1 电弧炉主回路构成.....	9
2.2 电弧炉主回路电气特性的理论分析.....	10
2.3 电弧炉运行电抗模型的回归.....	13
2.3.1 运行电抗与短路电抗.....	14
2.3.2 影响运行电抗大小的因素.....	14
2.3.3 运行电抗模型.....	14
2.3.4 运行电抗模型的回归分析.....	15
<b>第 3 章 基于经济指标的电弧炉供电模型的建立</b> .....	<b>17</b>
3.1 电弧炉炼钢主要经济指标.....	17
3.2 传统供电策略.....	17
3.3 分段供电模型.....	19
3.4 电弧炉电热特性分析.....	21

3.4.1 能量的来源.....	21
3.4.2 能量的支出.....	21
3.4.3 热平衡方程.....	23
3.5 基于经济指标的供电模型的建立.....	25
3.5.1 模型的目标.....	25
3.5.2 模型的约束条件.....	26
3.5.3 模型的确定.....	27
3.6 本章小结.....	28
<b>第 4 章 电弧炉供电模型的求解.....</b>	<b>29</b>
4.1 供电模型求解需要解决的问题.....	29
4.2 一种面向约束处理的遗传算法.....	30
4.2.1 遗传算法的产生及其基本原理.....	30
4.2.2 面向约束处理的遗传算法的提出.....	32
4.2.3 面向约束处理的遗传算法的实现.....	34
4.3 多目标规划问题的引入.....	39
4.3.1 数学描述.....	39
4.3.2 Pareto 支配关系.....	40
4.3.3 Pareto 最优.....	40
4.3.4 传统方法求解多目标规划问题.....	40
4.4 基于混合编码的 NSGA-II 算法.....	41
4.4.1 NSGA-II 算法发展历程.....	41
4.4.2 混合编码 NSGA-II 算法的提出.....	44
4.4.3 混合编码 NSGA-II 算法的实现.....	45
4.5 本章小结.....	48
<b>第 5 章 电弧炉供电曲线的制定及应用.....</b>	<b>49</b>
5.1 运行参数.....	49
5.2 优化程序的实现.....	50
5.2.1 类的实现.....	50
5.2.2 类关系.....	52

5.3 优化结果对比分析 .....	52
5.3.1 面向约束处理的遗传算法求解 .....	52
5.3.2 混合编码的 NSGA-II 求解 .....	55
5.3.3 结果对比分析 .....	57
5.4 优化软件的设计 .....	57
5.4.1 控制系统结构 .....	58
5.4.2 软件功能实现 .....	58
5.5 本章小结 .....	59
<b>第 6 章 总结与展望 .....</b>	<b>61</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>63</b>
<b>致谢 .....</b>	<b>67</b>

7



# 第1章 绪论

## 1.1 课题背景及意义

电弧炉炼钢是用来生产特殊钢和高合金钢的主要方法,其生产的特殊耐高温,耐腐蚀和抗拉强度特高的材料以及轴承钢、高级变压器硅钢、高电阻合金、磁性合金、高速工业钢等被广泛应用于航空、航天、军工、核电、能源、化工、电子学等领域。由于废钢铁是电弧炉的主要原料,故电弧炉相当于钢铁工业的回收工具,有效地解决了废钢污染问题和铁矿石为原料炼钢带来的各种环境污染问题。同转炉炼钢相比较,电弧炉具有钢液温度能灵活掌握、热效率高、炉内气氛可以控制、设备简单、工艺流程短等优点,再加上充足的废钢资源以及环保意识的加强,因而世界各国都在稳步发展电弧炉炼钢。

根据国际钢铁协会统计数据,2007年世界粗钢产量为13亿吨,同比增长7.5%;中国粗钢产量4.89亿吨,增长15.7%,占全球产量36.4%,2006年这一比例为33.8%,2005年为31%,2004年为26.2%,呈现逐年递增趋势。其中,世界电弧炉钢产量所占份额已超过33%,而中国这一比例只在20%左右。由于采用废钢做原料的电弧炉所用能源仅为新矿石炼钢的1/3,因此,在能源供应日益紧张的中国应该多发展电弧炉炼钢。

低成本的运行对钢铁工业是至关重要的。而有效地操作可以在原有设备基础上通过优化设定或改变设备运行参数达到节能降耗、提高企业经济效益的目的。并且这种方法比一味追求新设备效率高的多。因此在炼钢设备(电弧炉)的工艺环境一定的条件下,如何发挥优化设定在冶炼过程的作用,是提高企业竞争力的关键。对电弧炉炼钢经济指标进行优化,进而实现钢铁生产全流程的经济指标优化,是钢铁企业迫切需要解决的重要问题,也是提高企业经济效益和国际竞争力的重要途径。目前,国外发达国家如日本、美国、德国的炼钢电弧炉都配备了先进的过程优化系统,并开发了智能电弧炉(IAF),进一步提高了产量和产品质量、扩大了品种、节约了能源和降低了成本。

我国钢铁公司已经认识到电弧炉优化的重要性并开始大力发展此项技术,然而由于电弧炉模型的复杂性和缺乏有效的优化算法,大部分电弧炉并没有从优化中得到好处。因此研究电弧炉供电模型并找到合适的优化算法成为亟待解决的问题。

## 1.2 电弧炉炼钢简介

### 1.2.1 电弧炉炼钢历史及发展

电弧炉炼钢是靠电极和炉料间放电产生电弧,从而使电能弧光中转变为热能,并

借助辐射和电弧的直接作用加热并熔化金属和炉渣,炼出各种成分的合金钢一种炼钢方法。

电弧炉炼钢至今已有 100 多年的历史,大致可分为传统电弧炉炼钢和现代电弧炉炼钢两个时期。从 1879 年制造电弧炉到 20 世纪 70 年代为传统电弧炉炼钢时期,20 世纪 80 年代至今为现代电弧炉炼钢时期<sup>[1]</sup>。

1879 年,Willian Siemens 研究制造了利用碳极电弧的直接电弧和间接电弧的炉子,并取得了专利。但由于当时电力价格昂贵,还有碳素电极等问题,所以其发展受到了限制,没能发展起来。

1885 年世界上最初的直流(DC)电弧炉由 ASEA(现为 ABB)设计出来并有间接加热和直接加热两种方式。

1887 年 Heroult 发明的电炉应用于铝工业,后经历了碳化钙的制造,1899 年开始用于炼钢。在 Heroult 的专利中表达为“包括用单相及多相电流,在钢液和电极之间发生电弧的电气炉”,是广义的直接电弧炉,然而这已拉开了将成为主流的炼钢用三相交流电弧炉的序幕。

1906 年,德国人林登堡(R. Lindenberg)进行了第一炉钢水的铸锭,开创了电弧炉炼钢的先河。

1909~1910 年德国和美国分别首次建成 6 吨和 5 吨炼钢三相交流电弧炉并首次把继电器与接触式调节器用于电弧炉的电极升降系统。

1920 年杠杆平衡式调节器用于电弧炉提高了电极升降速度。

1926 年德国制造了两台炉盖开出式电弧炉炉料从炉顶加入。

1927 年美国蒂姆肯公司一台 100 吨电弧炉投产。

1930 年出现炉体开出式电弧炉。

1936 年德国制作了 18 吨炉盖旋转式电弧炉进一步缩短了加料时间提高了热效率。

至此普通三相交流电弧炉已基本成形。之后电弧炉的结构、工艺逐渐完善炉子容量进一步扩大炼钢生产率逐渐提高炼钢成本逐渐降低。到 20 世纪 50 年代传统电弧炉炼钢技术达到了成熟阶段,以“熔氧合并、薄渣吹氧、缩短还原期”为技术特点。

1960 年在 W.E.schwabe 等人发表超高功率(Ultra High Power, UHP)作业概念的同时, North Western Steel and Wire Co.证实增大输入功率可以带来生产率的提高。UHP 的一系列技术立刻引起世界关注,从此美国的平炉完全被淘汰。

1964 年美国在两台 135 吨电弧炉上进行 UHP 深入的试验并取得很好的效果。

UHP 炉迅速在全世界普及,但输入功率等级的增大导致产生强烈的炉壁热点。作为其对策,进行了低电压、大电流作业,而且使三相阻抗平衡,但炉壁热点仍然是 UHP 作业上的重大障碍,而且大电流作业使电极单耗增加。于是提出了水冷壁和氧的大量使

用,炉壁热点问题几乎完全解决。UHP作业(后来转向高电压作业)、水冷壁和氧的大量使用构筑了AC电弧炉的全盛时代。

1970年二次精炼技术已经产生。但是由于电弧炉仍然为倾动炉体还原渣出钢,所以直到70年代仍处于传统电弧炉炼钢的成熟期。

1982年偏心炉底出钢技术及LF炉的诞生标志着电弧炉炼钢技术进入现代电弧炉炼钢技术发展阶段。

1989年美国纽柯公司第一条电炉—CSP生产线的投产,标志着现代电弧炉炼钢技术开始进入成熟阶段。

在此阶段,现代电弧炉炼钢技术的主要发展是:(a)化学能和物理能成为现代电弧炉炼钢中3个主要能源中的两个。而且,这两种能耗量占电弧炉冶炼总能耗的50%以上;(b)重视电弧炉炼钢的环境保护问题,并在对环境友好的基础上,开发了主要以废钢为原料、提高氧气利用率以增加化学热和物理热的技术。这对现阶段不兑铁水的电弧炉冶炼以及未来废钢将成为唯一炉料的电弧炉冶炼具有十分重要的意义;(c)提出了“电弧炉冶炼周期的综合控制理论”。

在这一阶段,中国冶金工作者起了主要作用,所以电弧炉兑入部分铁水冶炼是中国冶金工作者对电弧炉炼钢技术发展的一项创造性的贡献。

现代电弧炉炼钢技术的成熟期可能会经历一个较长的阶段。即使由于矿石、焦煤等资源枯竭,废钢成为唯一原料,现代电弧炉炼钢技术也不会回到传统技术即所谓电炉技术主要是供电技术上去。未来的电弧炉炼钢技术仍然具有现代电弧炉炼钢技术的特点。但是,到那时化学热和物理热的利用、电弧炉炼钢对环境友好、绿色制造会更成熟,过程理论及流程工程科学会更趋于完美,表现在:(a)电弧炉冶炼过程中仍然是物理能、化学能和电能这3种能源,而且物理能和化学能的利用率将继续提高,电耗占总能耗的比例还会下降,例如降至30%,氧气利用率将进一步提高;(b)电弧炉冶炼过程仍然是高配碳、在线炉外精炼,还原期仍在炉外进行;(c)在原料方面,仍然是铁素材料加碳素材料,废钢成为唯一的铁素原料,碳素原料不会以生铁的形式加入,而是喷粉;(d)产品仍然主要是连铸坯,不会是模铸小钢锭;(e)电弧炉炼钢环保技术会更加完善。

## 1.2.2 电弧炉炼钢工艺

电弧炉炼钢的工艺方法归纳起来有三种,即氧化法、不氧化法和返回吹氧法。氧化法是电弧炉炼钢工艺的最基本的方法,不氧化法和返回吹氧法都是在氧化法的基础上发展起来的。

传统的氧化法冶炼工艺由补炉、装料、熔化期、氧化期、还原期和出钢六个阶段组成。在炉内既要完成熔化、脱磷、脱碳、升温,又要进行脱氧、脱硫、去气、去除夹杂

物、合金化以及温度、成分的调整，因而冶炼周期很长。这既难保证对钢材越来越严格的质量要求，又限制了电弧炉生产率的提高。

现代工艺只在电弧炉中保留了熔化、升温 and 必要的精炼，如脱磷、脱碳，而把其余的精炼过程移到钢包二次精炼炉中进行。工艺上的这种改进大大提高了电弧炉设备能力，使其能够以尽可能大的功率进行熔化、升温操作，而把那些只需要较低功率的操作转移到钢包精炼炉内进行。并且越来越完善的电弧技术能进一步满足钢液纯度和严格的成分、温度控制的要求。同时，在现代电弧炉炼钢工艺中，在熔化中期就是对炉内进行吹氧，因此熔化期和氧化期已无明显的区分，所以现代电弧炉炼钢工艺包括补炉、装料、熔化期和出钢四个阶段<sup>[2]</sup>。

#### (1) 冶炼前的工艺准备包括配料、装料以及补炉。

**配料：**炼钢的基本炉料是废钢、生铁、返回料以及部分合金料。根据现有原材料的实际情况按照所炼钢种的技术标准及工艺要求、出钢量等约束条件以缩短冶炼时间、降低冶炼成本为目标按一定优化算法计算出各种炉料的添加量。科学合理的配料能明显提高电弧炉的各项经济技术指标。

**装料：**主要是指将废钢装入炉膛。目前多数电弧炉采用炉盖上升炉体开出或者炉盖升起旋开用吊车吊起事先装在料罐里炉料加入炉膛内。

**补炉：**补炉是指对炉体损坏的部位进行维修以保证下一炉钢的正常冶炼。在炼钢过程中由于电弧辐射和高温钢水化学作用的侵蚀炉衬必然要有不同程度的损坏。为了保证炼钢的正常进行及延长炉衬的使用寿命在每一炉开始炼钢之前应进行补炉，补炉材料通常为石灰和萤石。

#### (2) 熔化期：是指从通电开始到炉料全部熔清这段时间。包括起弧阶段、穿井阶段、电极上升阶段和熔化末了阶段。

**起弧阶段：**是指炉膛内装满炉料电弧炉通电炼钢的初始阶段。这段时间比较短，一般不超过3分钟。电弧距离炉顶很近如果输入功率过大，炉顶容易被烧坏，所以一般以输入变压器额定功率的2/3左右供电。如果在炉料的上部装有相当数量的轻废钢也可以一开始就采用最大功率送电。这段时间由于炉温较低、大多为轻薄料电弧燃烧不稳定噪声很大。

**穿井阶段：**是指电弧稳定后电极开始下降直到炉底的这段时间。由于电弧四周的炉料迅速熔化在电极自动调节器的作用下电极始终要和炉料保持一定的距离电极随着炉料的熔化不断下降在炉料中打出3个洞，类似打井所以称为“穿井”。这一阶段电弧完全被炉料包围热量几乎全部被吸收不会烧坏炉衬通常采用最大功率供电。

**电极上升阶段：**穿井到底后炉底形成熔池炉底石灰及部分元素氧化使得在钢水液面上形成一层熔渣。炉料在高温下逐渐熔化电极随着钢水液面的上升缓慢上升。此时电弧

在熔池面上平稳燃烧周围仍然有部分未熔化的炉料对炉衬的损坏很小仍然采用最大功率电。

熔化末了阶段：此时炉内大部分炉料已经熔化只有远离电极的零星炉料还未熔化。炉料已经不能完全包围电弧长时间最大功率供电会损坏炉盖及炉衬此时应适当减小功率供电并且进行吹氧助熔加速炉料熔化增加钢水稳温度。

(3) 氧化期：指熔化期到出钢之前的熔炼过程。氧化期主要任务是最大限度的降低钢液中的磷含量去除钢中的气体和夹杂物将钢液温度加热到高于出钢温度 10~20℃。为了加速熔化和节约电能在氧化期一般采用吹氧助熔。

(4) 出钢：是指把化学成分和温度符合要求的钢水倒入钢包的过程。出钢钢水要求无渣，无渣出钢必然使炉内留有一部分钢水和几乎全部炉渣，炉渣过多时必须进行出渣操作。留钢量约为 6~8 吨既可使炉底的耐火材料免受电弧和炉渣侵蚀还可为下一炉炼钢创造条件。

由此可见，电弧炉炼钢通电阶段主要集中在熔化期，所谓电弧炉优化供电曲线也是主要针对这个阶段而给出的，本文将着重研究电弧炉炼钢熔化期优化供电。

### 1.2.3 电弧炉炼钢设备

电弧炉的炼钢设备主要由炼钢工艺决定并且与电弧炉的容量大小、装料方式、传动方式等有关。现在的电弧炉大多采用炉体倾动出钢方式、炉盖旋开装料方式、液压驱动活动立柱电极升降方式。电弧炉的炼钢设备主要有机械设备和电气设备两部分构成<sup>[2]</sup>。

#### (1) 电弧炉的机械设备

电弧炉的主要机械设备包括炉体、电极夹持器、电极升降装置、炉体倾动装置、炉盖提升、旋转装置和炉顶装料装置等，以及液压系统、水冷系统等辅助系统的设备。

炉体是电弧炉的主要装置是用来熔化炉料和进行各种化学反应的容器。电弧炉的炉体由金属构件和耐火材料砌筑成的炉衬两部分组成。电弧炉的金属构件包括炉壳、炉门、出钢槽、炉盖圈和电极密封圈。炉壳由钢板焊成上部有加固圈。

炉门可以用来观测炉内情况及进行扒渣等操作。炉盖的上方有三个呈正三角形的电极孔在孔与电极之间设有电极密封圈。炉壳的上部、炉盖和电极密封圈都通水冷却炉壳内部、炉盖及出钢槽内部都是用耐火砖砌成的。

电极夹持器及电极升降装置。电极夹持器可以用来夹紧和放松电极还可以把电流传送到电极上。在熔炼过程中由于炉料不断熔化不同的熔炼阶段要求给出不同的电能，同时电极自身的长度也会存在自消耗，因此需要随时升降电极以调整电弧的长度。电极通过电极夹持器固定在电极升降装置上。电极升降装置由导电横臂、立柱和传动装置组成。导电横臂由铜钢复合板制成，作为支持用的机械结构部分，用来固定电极夹头。立柱和

导电横臂连接成“T”形支架一起在固定的框架内升降框架固定在炉体的摇架上框架内装有滚轮立柱沿滚轮升降。

炉体倾动装置为底倾机构，传动形式为液压传动。炉子装在专门的摇架上，摇架两侧的扇形板支撑在底座上，倾动时摇架的扇形板沿底座摆动。出钢槽末端的运动轨迹为摆线。倾动时工作液进入液压缸使液压活塞杆推动摇架，摇架沿水平底座滚动带动炉体倾动。

炉盖提升及旋转装置。该机构包括炉盖旋转架、炉盖提升缸、提升连杆机构、炉盖旋转机构及锁定机构等。旋转架通过旋转轴承连接在倾动摇架平台上。当固定在平台上的液压缸活塞杆伸出时可使炉盖旋开。液压缸活塞杆缩回时炉盖即可复位。旋转架伸出臂下部通水冷却以防止高温变形。

液压系统。液压系统包括液压泵、液压阀组、蓄液箱、蓄能器、加热器、冷却器等。液压站有三台恒压变量泵并配备一定数量的蓄能器来保证事故状态的应急操作。电极升降采用比例阀来保证电极调节的灵敏度以及在不同情况下对电极速度的不同要求。炉体倾动采用比例阀，使倾动速度可调，以满足出钢和快速回倾的要求。炉盖旋转采用比例阀控制以保证在旋转过程平稳、快速。

水冷系统。为了延长电弧炉的使用寿命以及改善炉前操作条件，电弧炉的许多部位通水冷却，如炉盖、炉壳等。

## (2) 电弧炉的电气设备。

电弧炉炼钢是靠电能转变为热能使炉料熔化并进行冶炼的，而完成这个能量转变的设备就是电弧炉的电气设备。电弧炉的电气设备分为两部分，即主电路和电极升降自动调节系统。主电路的任务是将高压电转变为低压大电流，作为电源输给电弧炉，并以电弧的形式将电能转变为热能。电极升降自动调节系统的任务是根据冶炼要求，通过调整电极和炉料之间的电弧长度，调节电弧电流和电压的大小。

电弧炉使用的是三相交流电。通常电流沿架空高压线输入变电所的配电装置，再沿高压电缆经配电装置输入电炉变压器。由高压电缆至电极的电路称为电弧炉的主电路。主电路主要由高压系统、电弧炉变压器、电抗器、短网和低压供电系统。

高压系统：一般由35kV电经高压隔离开关、高压真空断路器、电抗器送至电弧炉变压器在高压供电系统中设有氧化锌避雷器、阻容吸收器作为电压吸收装置吸收操作过电压和浪涌过电压以保证变压器正常运行。高压测二次计量回路设有高压侧电压、高压侧电流、功率因数、有功功率、有功电度及无功电度的计量二次保护回路设有过电流保护、欠压保护、缺相保护、变压器温度保护、变压器瓦斯保护及冷却器保护等完善的保护回路。

电炉变压器：采用电弧炉专用变压器，变压器采用有载电动调压，低压二次侧采用

铜管侧出线、内封口采用强迫油循环水冷却器进行冷却。变压器配套强迫油循环冷却器及其电气控制台。

电抗器：电抗器为外附电抗器无载调节可连续过载 20%配有隔离开关接地开关。

短网：也称大电流线路是指从电弧炉变压器低压出线到电极(包括电极)之间的各种形式导体的总和。

低压供电系统：电源来自车间低压配电室，进线电压 380/220V 三相四线制。主要是给液压站、高压配电柜、加热器、分合闸整流电源、电炉变压器调压控制器、油水冷却器、仪表电源、控制电源、稳压电源等供电。

电弧炉输入的功率是随着电弧长度的变化而改变的。冶炼过程中由于炉料的熔化塌料、钢水沸腾等原因，电极与炉料之间的电弧长度不断变化。特别是熔化期电弧极不稳定，经常发生断弧和短路现象，不利于电炉的正常工作，为了保证按规定的电力制度供电，就必须保持稳定的电弧长度。电极升降调节装置的作用就是保持电弧长度恒定不变，从而稳定电弧电流和电压，使输入的功率保持一定值。当长度变化时，能迅速提升或下降电极，准确地控制电极的位置。因此电极调节装置应反应灵敏，电极升降速度快，稳定性好，以避免断路器的频繁跳闸和电流电压的大波动，从而可缩短电炉冶炼时间，降低电耗。

#### 1.2.4 电弧炉炼钢特点

电弧炉是利用电弧的能量来熔炼金属的一种电炉，同平炉，转炉炼钢相比较具有很多优点<sup>[3]</sup>：

(1) 能灵活掌握温度。电弧炉中电弧区温度高达 4000℃ 以上，远远高于炼钢所需的温度，因而可以熔化各种高熔点的合金，通过电弧加热，钢液的温度可达 1600℃ 以上。在冶炼过程中通过对电流和电压的控制，可以灵活掌握冶炼温度，以满足不同钢种冶炼的需要。

(2) 热效率高。电弧炉炼钢没有大量高温炉气带走的热损失，因而热效率高，一般可达 60% 以上，比平炉炼钢和转炉炼钢的热效率高。

(3) 炉内气氛可以控制。氧气转炉吹入大量氧气是熔炼得以进行的必要条件，平炉熔炼过程中为了保证燃料(煤气或重油)完全燃烧，必须在熔炼室中保持一定的过剩空气系数，因而在这些炉子中，熔炼自始至终是在不同程度的氧化性气氛下进行的。在电弧炉中没有可燃气体，根据工艺要求，既可造成炉内的氧化性气氛，也可造成还原性气氛，这是平炉和转炉无法达到的。因而在电弧炉炼钢过程中能够大量地去除钢中的磷、硫、氧和其他杂质，提高钢的质量，合金的回收率高且稳定，钢的化学成份比较容易控制，冶炼的钢种也较多。

(4) 设备简单, 工艺流程短。电弧炉的主要设备为变压器和炉体两大部分, 因而基建费用低, 投产快。电弧炉以废钢为原料, 不像转炉那样以铁水为原料, 所以不需要一套庞大的炼铁和炼焦系统, 因而流程短。

### 1.3 问题的提出及国内外研究现状

现代电弧炉供电曲线的优化涉及到两方面的问题, 首先是供电系统的建模, 其次是对模型的优化求解。供电系统的建模是根据电弧炉的电气特性热工特性等找到可调量和优化目标的对应关系<sup>[4]</sup>。可调量是变压器档位、电抗器档位以及电弧电流, 而供电曲线优化的目标是用尽可能短的时间、尽可能少的电能和尽可能低的电极损耗产生最大的经济效益。换句话说, 电弧炉供电曲线优化的任务是找到合适的可调量使电弧炉在现有设备条件下极大化炼钢的经济效益。模型的优化求解就是找到适合供电模型的优化算法从而快速有效的得到问题的最优解。

现阶段最流行的供电模型是分阶段供电模型<sup>[5]</sup>, 各个阶段是根据电弧炉冶炼工艺划分的。模型的目标是最小化吨钢电耗和冶炼时间, 而把设备的限制归结为模型的约束条件。总之最后得到的模型是一个单目标的混合整数非线性规划问题。然后按照各个阶段约束条件的不同分别对模型进行求解。优化算法采用的是传统优化方法。模型的缺点是需要计算多次最后才能得到整个过程的优化结果, 并且分阶段的最优有时候并不代表总体的最优。优化算法也过于复杂, 需要深入剖析目标函数和约束函数的特性。

### 1.4 本文主要工作

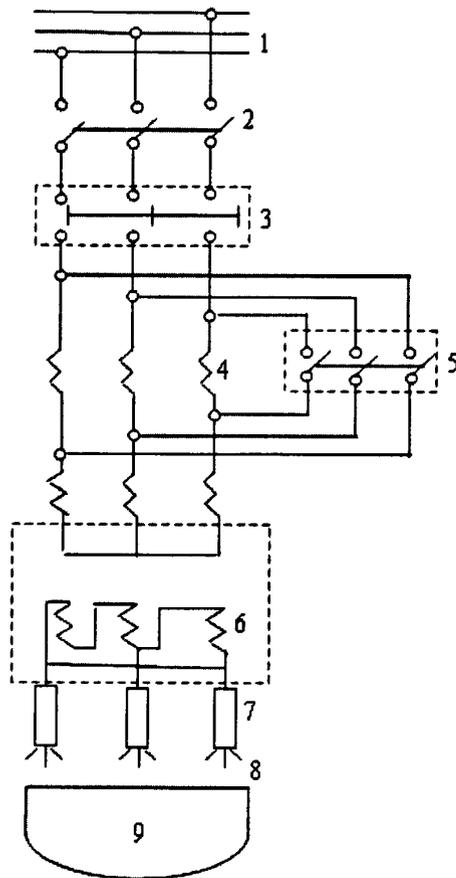
本文主要是针对电弧炉供电系统进行建模以及优化的研究, 并以某钢厂电弧炉为具体对象, 进行了仿真分析, 主要工作有:

- (1) 根据现场采集的数据对电弧炉非线性电抗模型进行回归分析;
- (2) 根据电弧炉电热特性和冶炼过程能量收支状况, 建立基于经济指标的电弧炉供电模型;
- (3) 基于经济指标的电弧炉供电模型是带约束的多目标混合整数非线性规划问题, 针对求解此类问题存在的难点, 提出面向约束处理的遗传算法和混合编码的 NSGA-II 算法;
- (4) 在 Microsoft Visual studio 2008 编译环境下用 C++ 实现面向约束处理的遗传算法和混合编码的 NSGA-II 算法;
- (5) 对比分析优化结果, 设计实现电弧炉供电曲线优化软件。

## 第2章 电弧炉电气系统分析

### 2.1 电弧炉主回路构成

电弧炉主回路(如图 2.1 所示)是指从电炉变电所的进线,经隔离开关、高压断路器、电抗器、电炉变压器、水冷电缆、导电横臂到电极的一段电路。其主要特点是高压部分电压高,低压部分电流大,负载变化大,电压电流波动大。



1—高压电缆; 2—隔离开关; 3—高压断路器; 4—电抗器; 5—电抗器短路开关;

6—电炉变压器; 7—电极; 8—电弧; 9—金属

图 2.1 AC 电弧炉主回路构成示意图

Fig. 2.1 main circuit of 3-phase AC EAF

隔离开关和高压断路器一般在高压控制柜内,和继电保护装置一起负责接通、切断主回路。高压断路器进线端和出线端各有一个隔离开关,考虑到检修人员的安全,也有在变压器室内电抗器前端加装一个隔离开关的情况。由于电炉炼钢的特点,断路器要求能频繁通断、动作灵敏、过载能力强。

电炉变压器是电弧炉的主要电气设备之一，其作用是把一次侧的高电压低电流转变成二次侧的低电压大电流，供给电弧，使电能转化为热能，达到熔炼金属的目的。在电炉冶炼的熔化期内，负载的波动很大，特别是在电弧刚刚点燃的瞬间，会产生较大的冲击电流，因此要求变压器有20%的过载能力。电炉冶炼的特殊性所决定了电炉变压器过载能力大、机械强度高特点。电炉变压器的一次侧既可接成三角形，也能切换到星形，而二次侧都采用三角形，因为采用三角形电路的短路电流分布在变压器的两个相内，这样可以减少线圈所受的机械应力，并降低它的发热程度。

从变压器二次侧出线端，经水冷电缆、导电横臂到电极的这段电路，由于距离较短、阻抗较低、电流较大，通常称其为短网。由于变压器二次侧电流极大，特别是经常性的短路冲击电流，使短网要承受高达数以万计的强大电流。因此，短网的合理设计和运行对电弧炉的正常运行和提高电炉的技术经济指标非常重要。

电抗器连接在电炉变压器的一次侧(高压侧)，一般使用在高功率、超高功率电弧炉上。高功率、超高功率电弧炉大多采用高电压低电流(与普通电弧炉相比)新工艺，短网布置更加合理，短网电抗进一步减小，为了限制短路电流、降低功率因数稳定电弧，在变压器回路中串联电抗器。由于变压器二次侧电流太大、电抗器制作工艺的原因，不宜在二次侧串联电抗器。在炼钢过程中，变压器的档位电压和设定电流不断调整，要求电抗器的电抗值发生相应变化，来保证电炉工作在较优的状态。电抗器具有很小的电阻和很大的感抗，能在有功功率损失很小的情况下限制短路电流和稳定电弧。但是，因为它的电感量大，使无功功率消耗增加，降低了功率因数，从而影响了变压器的输出功率。因此要很好掌握电抗器的接入电感量。

## 2.2 电弧炉主回路电气特性的理论分析

分析电弧炉主回路电气特性时，通常把所有主回路阻抗值折算到变压器二次侧，根据电弧炉二次侧等效电路来分析。一般以电弧电流为自变量，来分析有功功率、无功功率、电弧功率、功率因数、电弧电压等参数。电弧炉二次侧三相等效电路如图2.2所示。

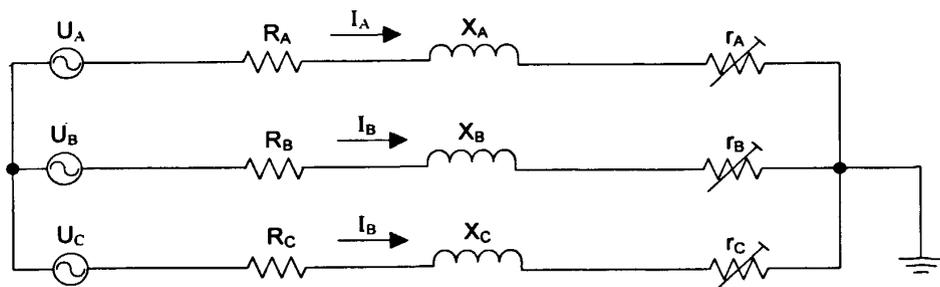


图 2.2 三相交流电弧炉的等效电路

Fig. 2.2 Equivalent circuit of 3-phase AC EAF

其中： $U_A, U_B, U_C$  分别为变压器二次侧 A, B, C 三相空载相电压有效值；  
 $R_A, R_B, R_C$  分别为所有线路折算到变压器二次侧后的 A, B, C 三相电阻；  
 $X_A, X_B, X_C$  分别为所有线路折算到变压器二次侧后的 A, B, C 三相电抗；  
 $r_A, r_B, r_C$  分别为 A, B, C 三相电弧电阻；  
 $I_A, I_B, I_C$  分别为 A, B, C 三相电流有效值。

一般认为变压器三相阻抗均衡，电抗器三相阻抗均衡，短网三相阻抗均衡，则有  $U_A=U_B=U_C, R_A=R_B=R_C, X_A=X_B=X_C$ 。

一般情况下，电弧炉炼钢时三相设定电流相同，实际电极电流在设定值左右波动。通常假设三相电路处于平衡状态，以一相等值电路来分析系统性能，这样能更加清晰的得出电弧炉各种参数之间的关系。如图 2.3 所示。

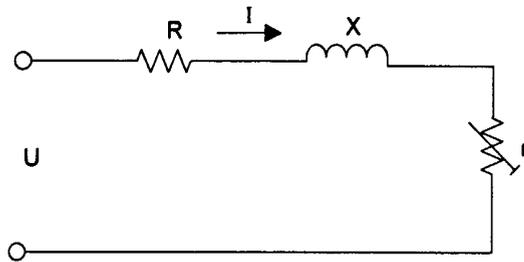


图 2.3 单相等效电路

Fig. 2.3 Equivalent circuit of single-phase

$U$  为变压器二次侧空载相电压有效值， $r$  为一相电弧电阻， $R$  为所有线路折算到变压器二次侧的一相等效电阻， $X$  为所有线路折算到变压器二次侧的一相等效电抗， $I$  为电弧电流有效值，用以下符号代表三项电路的各变量：

$S$  代表视在功率， $Q$  代表无功功率， $P$  代表有功功率， $Pl$  代表有功损耗， $Pa$  代表电弧功率， $\eta$  代表电效率， $\cos\varphi$  代表功率因数， $Ua$  代表电弧电压。

以电弧电流有效值  $I$  为自变量，根据电路基本定律可以得知：

视在功率：

$$S = 3UI \tag{2.1}$$

有功损耗：

$$Pl = 3I^2R \tag{2.2}$$

电弧电压：

$$Ua = \sqrt{U^2 - (IX)^2} - IR \tag{2.3}$$

功率因数：

$$\cos\phi = \frac{P}{S} = \sqrt{1 - \left(\frac{IX}{U}\right)^2} \quad (2.4)$$

有功功率:

$$P = 3I\sqrt{U^2 - (IX)^2} \quad (2.5)$$

无功功率:

$$Q = 3I^2X \quad (2.6)$$

电弧功率:

$$Pa = 3I\left(\sqrt{U^2 - (IX)^2} - IR\right) \quad (2.7)$$

电效率:

$$\eta = \frac{Pa}{P} = \frac{\sqrt{U^2 - (IX)^2} - IR}{\sqrt{U^2 - (IX)^2}} \quad (2.8)$$

下面以一组实际数据来绘制  $S$ 、 $Q$ 、 $P$ 、 $Pa$ 、 $\eta$ 、 $\cos\phi$  的电气特性曲线, 如图 2.4 所示。实际数据:  $U=346V$ ,  $R=0.5m\Omega$ ,  $X=4.0m\Omega$ 。

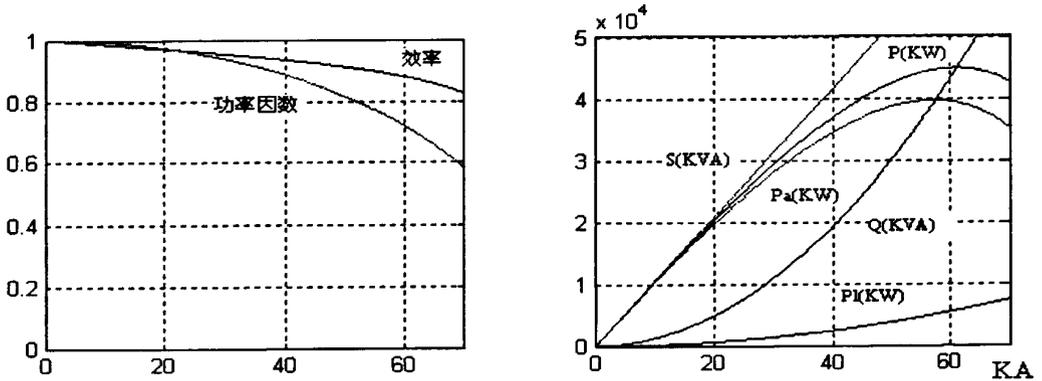


图 2.4 电气特性曲线

Fig. 2.4 electric characteristics curve

通过以上公式和曲线分析, 可得出如下结论:

- (1) 视在功率随着电弧电流的增加而增加;
- (2) 无功功率随着电弧电流的增加而增加;
- (3) 有功损耗随着电弧电流的增加而增加;
- (4) 功率因数随着电弧电流的增加而减小;
- (5) 电效率随着电弧电流的增加而减小;
- (6) 有功功率随着电弧电流的增加, 先增加, 后减小; 存在一个特定电流使有功功率最大;

(7) 电弧功率随着电弧电流的增加,先增加,后减小;存在一个特定电流值使电弧功率最大。

高阻抗电弧炉与普遍阻抗电弧炉相比,其电气运行特性的不同之处主要在于以下几点:

#### (1) 二次电压和电极电流

系统电抗和二次电压是高阻抗电弧炉的两个重要参数,它们之间是否匹配关系着高阻抗电弧炉能否顺行。通常高阻抗电弧炉的二次电压要比相同线路电抗时的普通电弧炉的二次电压要高,这是由于和电抗器相配合的缘故。与较高的二次电压相对应的是低的电极电流。提高二次电压需要一系列技术的配合,如泡沫渣、水冷炉壁等,但高压、长弧操作带来的好处是显而易见的。高的二次电压需要电抗器的配合。国外有报道最高的二次电压达1500伏,但是过高的二次电压也会带来一系列的问题,如对炉壁的热辐射增加了,对泡沫渣操作更严格,还有绝缘和安全问题等等。至于二次电压最高能允许达到多少,目前还没有明确的理论指导。

#### (2) 电弧燃烧的稳定性

由于高阻抗电弧炉串入了电抗器,感抗的增大使低电流、长电弧操作成为可能,因而即使不增大电流也易于创造出低功率因数作业的条件,而低功率因数作业使电弧的稳定性提高。

#### (3) 电极消耗

电极消耗对炼钢成本的影响仅次于电力成本,因此电弧炉工作者多年来一直努力降低电极消耗。B.Bowman对电极消耗的研究表明,电极消耗分为尖端消耗和侧面消耗,尖端消耗速度与电流的平方成正比,且与尖端直径有关;侧面消耗与电极的炉内表面积成正比。高阻抗电弧炉采用低电流操作,这对电极消耗的降低是很明显的。

#### (4) 对电网的干扰

电弧炉熔化废钢时,由于废钢坍塌会使电弧短路,或熔清消失,会使电弧炉开路,电弧由于三相间电动力遭受外吹效应,这些都使电弧长度发生变化,因而使电弧电流发生变化,这是引起电压闪烁和高次谐波的根源。高阻抗电弧炉以高电压、长电弧运行,电弧区废钢变动引起的电弧长度变化的相对量较小,使闪变超限的电弧炉降到标准之内。

## 2.3 电弧炉运行电抗模型的回归

三相交流电弧炉电弧供电回路上的电抗几乎影响电路上所有的电气参量,对电弧稳定燃烧非常重要。由于电弧的非正弦电气特性,引起的高次谐波会使得电弧电路的运行电抗比短路测试的要高。

### 2.3.1 运行电抗与短路电抗

对于运行中的电弧炉而言,通常采用短路试验的办法来确定其电抗。在短路试验时,由于电极插入钢液中,石墨电极与钢液发生短路而使电弧消失,因此短路试验时主电路中流过的是正弦交流电流。电弧炉在正常工作时有电弧存在,而电弧是非线性的,主电路中有高次谐波存在,流过的是非正弦电流,因而电弧炉短路试验所得到的电抗值(称为短路电抗)与电弧炉实际运行时的电抗值(称为运行电抗)有很大的不同,经验与国内外的研究均表明,运行电抗与短路电抗有很大差异<sup>[6]</sup>。

### 2.3.2 影响运行电抗大小的因素

电弧炉的运行电抗与冶炼工艺、炉子结构、短网结构、调节器等相关。影响运行电抗的诸因素可以归纳为以下几个方面:

(a) 装入废钢类型; (b) 炉渣类型与数量; (c) 电极横臂与立柱的稳定性; (d) 电极调节系统; (e) 三相不对称; (f) 炉内熔化过程的不稳定性及产生的波动; (g) 熔化过程中电极位置的变化与波动造成的电流变化; (h) 电弧的非线性。

### 2.3.3 运行电抗模型

电弧炉的运行电抗虽然与诸多因素有关,但对于运行中的电弧炉,当冶炼工艺、废钢原材料、产品、炉子结构、调节器一定时,电弧炉的运行电抗就与配电操作有关。因此常把运行电抗表述为以下几种模型:

(1) 运行电抗  $X_{op}$  归纳为工作电流  $I$  的函数,表达式为

$$X_{op} = aI^2 + bI + c \quad (2.9)$$

式中:  $I$  为电弧电流,  $a, b, c$  为待定系数。

(2) 运行电抗归纳为功率因数的函数,表达式为

$$X_{op} = X_d \times e^{c \cos \phi} \quad (2.10)$$

式中:  $X_{op}$ 、 $\cos \phi$ 、 $X_d$  分别为运行电抗、功率因数和短路电抗;  $c$  为系数。

(3) 运行电抗  $X_{op}$  归纳为工作电流  $I$  和短路电抗  $X_d$  的函数,表达式为

$$X_{op} = X_d \times \left( \frac{\alpha}{(I/I_d)^2} + \beta \right) \quad (2.11)$$

其中： $I$ 为电弧电流， $I_d$ 为短路电流， $X_d$ 为短路电抗， $\alpha$ 、 $\beta$ 是待定系数。

对上述三种方法进行分析，可以发现：

方法(1)为抛物线形式，是电弧电流的函数，有三个待定系数。此式待定系数多；电弧炉短路电抗改变后，三个系数需要重新确定，无法表示运行电抗和短路电抗的关系。

方法(2)为指数形式，是功率因数和短路电抗的函数。式中隐含着运行电抗与工作电流和电抗的关系。在实际优化计算时，由于功率因数的计算又和运行电抗有关，使上世成为了迭代式，计算不方便。

方法(3)为双曲线形式，是电弧电流、短路电抗、短路电流的函数，待定系数有两个。但是此公式的缺点是：当电流很小时，导致运行电抗无穷大，这与实际严重不符。

### 2.3.4 运行电抗模型的回归分析

三种运行电抗模型各有优缺点，下面根据现场采集的数据对模型进行回归分析。数据取自某钢厂 3#电弧炉，数据中包含了经常使用的电压电抗档位信息，本文从中随机选取了连续的 1000 组数据进行模型的回归。对于方法(2)，由于在优化中时功率因数的计算与运行电抗有关，而此式还是功率因数的函数，所以这里对方法(2)做以下改动，使用 Matlab 自带的曲线拟合工具箱中的形如  $y = (a \cdot e^{bx} + c \cdot e^{-bx})$  的函数，此式中的  $x$  代表电流， $y$  因变量代表运行电抗与短路电抗的比值，此式也包含了  $e$  指数的关系，并且此式的图形正好也是类似双曲的形式。在 Matlab R2008a 的 curve fitting 工具箱中的拟合结果如下：

(1) 曲线拟合模型(2.9)： $X_{op} = aI^2 + bI + c$ ,

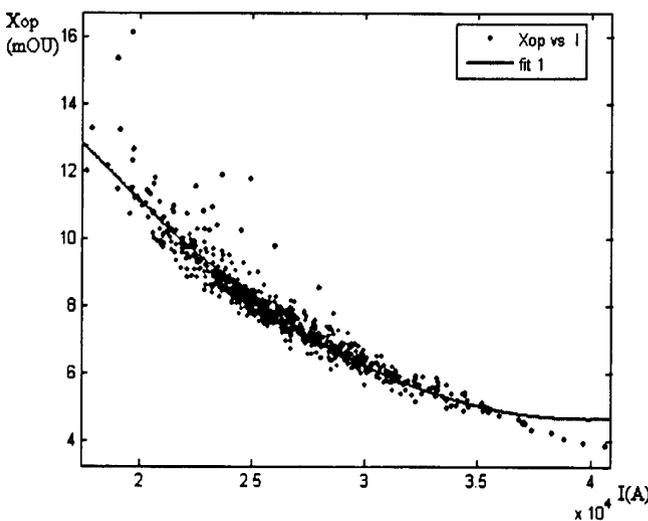


图 2.5 曲线拟合

Fig. 2.5 curve fitting

其中 $a=1.645e-008$ ,  $b=-0.001312$ ,  $c=30.79$ , 误差平方和  $SSE=195.3$ 。

(2) 曲线拟合模型(2.10):  $X_{op} = X_d \cdot (a \cdot e^{bl} + c \cdot e^{dl})$

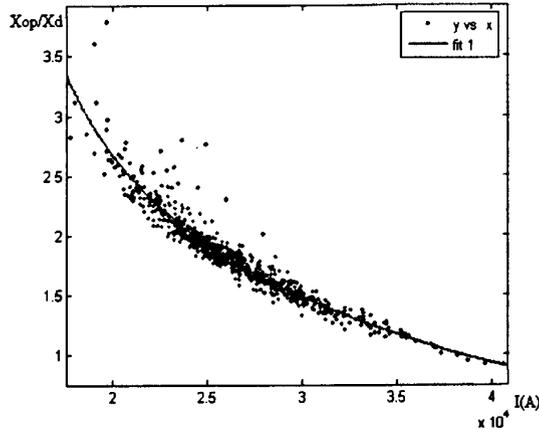


图 2.6 曲线拟合

Fig. 2.6 curve fitting

其中 $a=121.8$ ,  $b=-0.0002911$ ,  $c=5.699$ ,  $d=-4.519e-005$ , 误差平方和  $SSE=9.843$ 。

(3) 曲线拟合模型(2.11):  $X_{op} = X_d \times (\alpha / (I/I_d)^2 + \beta)$

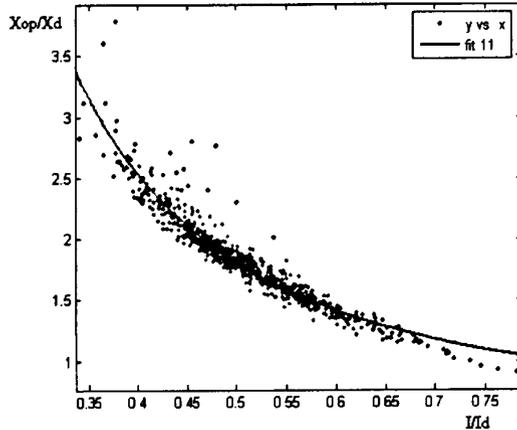


图 2.7 曲线拟合

Fig. 2.7 curve fitting

其中 $\alpha=0.3233$ ,  $\beta=0.5162$ , 误差平方和  $SSE=10.25$ 。

比较三种方法回归出来的函数, 误差平方和最小的是方法(2), 方法(1)误差比较大, 方法(3)由于在电流变小时运行电抗有不符合实际的情况出现, 所以本文采用第二种运行电抗模型。即

$$X_{op} = X_d \cdot (121.8 \cdot e^{-0.0002911I} + 5.699 \cdot e^{-4.519e-005I}) \quad (2.12)$$

## 第3章 基于经济指标的电弧炉供电模型的建立

电弧炉供电技术是电弧炉炼钢最基本的保障，它关系到冶炼工艺、原料、电气、设备等诸多方面的问题，直接影响电弧炉炼钢生产的各项经济指标。合理的供电制度，不仅对操作顺利进行是必要的，而且有助于降低电耗、电极损耗和耐火材料侵蚀，缩短冶炼周期，带来良好的经济效果。下面首先介绍一下电弧炉炼钢的主要经济指标。

### 3.1 电弧炉炼钢主要经济指标

(1) 合格钢产量(t)

实际合格钢产量=实际检验产量-废品量

(2) 利用系数( $t/(MV \cdot A \cdot d)$ )。利用系数是指一昼夜(24 小时)每  $1 MV \cdot A$  变压器生产的合格钢产量(t)，计算方法为：

利用系数=合格钢产量/(变压器容量\*日历昼夜)

(3) 冶炼时间(min/炉)。冶炼时间指冶炼每炉钢所需时间，计算方法为：

平均每炉冶炼时间=实际冶炼时间总和/实际出钢炉数

(4) 吨钢电耗( $KW \cdot h/t$ )。吨钢电耗指生产 1 吨合格钢所消耗的电能，计算方法为：

吨钢电耗=电弧炉用电量/合格钢产量

(5) 电极消耗( $kg/t$ )。电极消耗指生产 1 吨合格钢所消耗的电极量，计算方法为：

电极消耗=电极用量/合格钢产量

制定电弧炉供电策略就是为了提高变压器利用系数、降低冶炼时间以及减少吨钢电耗和电极消耗。

### 3.2 传统供电策略

在以往的研究中，供电策略转化为如何确定工作电流，即在满足电炉现行工艺要求及不影响炉衬寿命的条件下选择合适的工作电流。

(1) 最大有功功率法

把有功功率最大时的电流作为供电电流。公式  $P = 3I\sqrt{U^2 - (IX)^2}$  对电流 I 求导并令其为零，可得到有功功率最大时的电流：

$$I = \frac{U}{\sqrt{2}X} \tag{3.1}$$

## (2) 最大电弧功率法

最大电弧功率法通常称为“最佳电流”法。

公式  $Pa = 3I(\sqrt{U^2 - (IX)^2} - IR)$  对电流  $I$  求导并令其为零, 可得到电弧功率最大时的电流:

$$I = \frac{U}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{R^2 + X^2 + R \cdot \sqrt{R^2 + X^2}}} \quad (3.2)$$

## (3) 经验法

根据经验公式来选择其工作电流。

$$I_b = KI_{a\max} \quad (3.3)$$

$$I_{a\max} = \frac{U}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{R^2 + X^2 + R \cdot \sqrt{R^2 + X^2}}} \quad (3.4)$$

式中:  $I_b$  为工作电流,  $I_{a\max}$  为电弧功率最大时的电流,  $K$  为电弧炉的工作点系数, 此处  $K$  往往与多种因素相关, 难以从理论上定量描述, 存在着很大的局限性。

## (4) “经济电流”法

当电流由接近零开始增大时, 电弧功率  $Pa$  和损失功率  $P_l$  都随电流的增加而增加, 但增加的速率不同。当电流小于某一电流  $I_0$  时, 电弧功率  $Pa$  增大的速率大于损失功率  $P_l$  增加的速率; 电流大于  $I_0$  时, 电弧功率  $Pa$  增加的速率小于损失功率  $P_l$  增加的速率。当电弧功率  $Pa$  的增加量与损失功率  $P_l$  的增加量相等时所对应的电流  $I_0$  称为“经济电流”。

损失功率:

$$Pl = 3I^2R = \frac{3U^2R}{X^2 + (R+r)^2} \quad (3.5)$$

电弧功率:

$$Pa = 3I^2r = \frac{3U^2r}{X^2 + (R+r)^2} \quad (3.6)$$

当电弧功率  $Pa$  的增加量与损失功率  $Pl$  的增加量相等时,

$$\frac{dPa}{dr} = \frac{dPl}{dr} \quad (3.7)$$

$$\frac{dPl}{dr} = \frac{-6U^2R(R+r)}{[(R+r)^2 + X^2]^2} \quad (3.8)$$

$$\frac{dPa}{dr} = \frac{3U^2[(R+r)^2 + X^2 - 2r(R+r)]}{[(R+r)^2 + X^2]^2} \quad (3.9)$$

由式(3.7)、(3.8)和(3.9)可计算出：

$$r = R + \sqrt{4R^2 + X^2} \quad (3.10)$$

则可以计算出“经济电流”：

$$I_0 = \frac{U}{\sqrt{2X}} \sqrt{1 - \frac{2R}{\sqrt{4R^2 + X^2}}} \quad (3.11)$$

上述几种传统供电策略只是把确定电弧电流作为目标，容易实现。其中最大弧功率电流和经济电流是采用最多的两种电流，最大弧功率电流能够保证钢铁料最快速度熔化，然而当电弧炉在此电流下运行时，由于功率因数和热效率较低，功率损失较大。另一方面，由于熔化期电弧波动较大，在此电流下工作可能导致工作电流增大，反而降低了电弧功率，而此时的损失功率反而增大，因此最大弧功率电流并不是电弧炉工作时的最为合理的电流。而经济电流可以节省能源，然而是以降低电弧功率为代价，因而增大了冶炼时间。以上两种电流仅考虑电弧功率和电损失两方面的经济电流概念，而不考虑炉子的热工特性具有一定的局限性。除此之外，由于现代电弧炉附加了电抗器，并且变压器也存在多个档位供选择，所以传统供电策略已无法满足要求。

### 3.3 分段供电模型

随着电弧炉炼钢的发展，人们逐渐认识到仅仅确定供电电流是无法达到操作最优的，于是一些优化模型逐渐涌现出来，这些模型的共同点就是改正了传统供电策略中的缺点，考虑了电弧炉熔化期的阶段特性，把炉子的供电优化分为三个阶段进行，分别进行优化，并且把变压器、电抗器的档位选择也考虑了进来<sup>[5]</sup>。由于考虑到了各阶段的约束条件，所以这些模型都已经成为了数学规划的范畴，即带约束的优化问题，典型的分阶段模型为：

$$\begin{aligned} & \text{Min } b(u, i, x) \cdot T(u, i, x) \\ & \text{s.t. } \cos \phi \leq PF \\ & \quad ABI \leq Re \\ & \quad u \in \{U_1, U_2, \dots, U_n\} \\ & \quad x \in \{X_1, X_2, \dots, X_m\} \\ & \quad u = U_j \text{ 时, } 0 \leq i \leq P \cdot I_e^j, \quad j = 1, 2, \dots, n \\ & \quad I_e \in \{I_e^1, I_e^2, \dots, I_e^n\} \end{aligned} \quad (3.12)$$

分阶段模型的目标是吨钢电耗和冶炼通电时间的乘积，这个模型被称为 MINLP 问

题，即混合整数非线性规划问题，把两个矛盾的目标乘积当成一个目标，然后用规划方法求解。然后根据优化结果画出供电曲线。供电曲线是指在冶炼过程中的某一时刻炉子的电气运行工作点或是冶炼过程中炉子的电气工作点随时间的变化曲线。典型的供电曲线如下<sup>[7]</sup>：

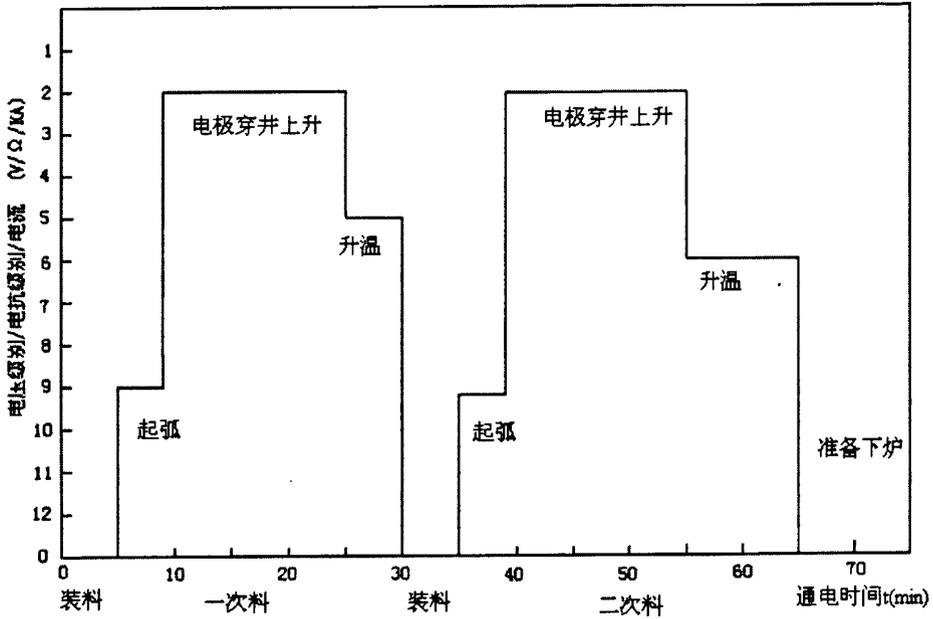


图 3.1 典型的供电曲线

Fig. 3.1 Typical power supply curve

分阶段供电模型的缺点：

(1) 模型的目标是吨钢电耗和冶炼时间，是反应整个冶炼过程的量，而优化的约束却是分阶段的量，而且从吨钢电耗和冶炼时间的表达式可以看出这两个量的求解过程用到了整个冶炼过程，所以这两个量的计算存在一些误差；

(2) 没有考虑运行电抗的影响。电抗对电弧炉电气特性的影响很大，决定着电路的功率因数，而功率因数又是分段供电模型的一个约束，所以不考虑运行电抗就会影响结果的可操作性；

(3) 无法估计各个阶段的时间，无法指导何时切换阶段；

(4) 对于两次加料就是简单的把一次料优化结果放到二次料上，没有体现两次加料的不同，事实上，对于二次料，由于钢包中已经有一部分钢水，直接影响到各个阶段的时间；

(5) 分阶段最优不代表整体最优。

为了改进分阶段供电模型的缺点，本文提出了基于经济指标的电弧炉综合供电模型，从整个冶炼过程的角度分析供电策略，进而建立综合供电模型。首先分析一下电弧炉的电热特性，求出电弧炉炼钢最重要的三个经济指标吨钢电耗、冶炼时间和电极消耗

的表达式, 然后建立综合供电模型。

### 3.4 电弧炉电热特性分析

前面提到, 制定电弧炉供电策略就是为了提高变压器利用系数、降低冶炼时间以及减少吨钢电耗和电极消耗。可传统供电策略和分段供电模型因为考虑因素不够, 无法满足现代电弧炉炼钢需要。所以建立现代供电模型的原则是优化电弧炉经济指标。而要想优化这些指标应该对电弧炉的能量转移情况有一个基本的了解, 下面将从能量守恒的观点分析电弧炉的热工特性<sup>[8-10]</sup>。

#### 3.4.1 能量的来源

(1) 电能转化为热能。电弧炉的电能是通过电弧转化为热能, 能量的多少决定于变压器的功率大小。也就是说, 决定于变压器使用电压和电流值的大小。它是电弧炉炼钢最主要的来源, 约占总热量来源的80%以上。

(2) 化学反应热。炼钢过程中有些化学反应属于放热反应。例如: 向熔池吹氧氧化和助熔时, 钢中碳、锰、硅、磷、铁、铝、铬等元素, 就被氧化而放出化学反应热, 促使钢液快速升温。因此, 氧化上述元素愈多, 钢液升温快, 吹氧氧化所产生的化学反应热的能量约占总能量来源的10%~15%。化学反应热主要由吹入的氧量、元素氧化的数量及其热效应所决定。

(3) 炉料物理热。炉料物理热是指热的铁合金及造渣材料带入炉内的热量。炉料物理热的大小决定于炉前各项材料加热的温度和热容(热容是物体升高1℃时所需要的热量, 通常等于比热乘以物体的质量)。对于一般碳素钢及低合金钢, 因为加入的铁合金数量不多, 所以物理热的数值不大; 而高合金钢的物理热数值就比较大。

(4) 其他辅助热源。这方面的热量来源于多方面, 如注余钢水及余渣倒回炉、铁水或废钢的热装、煤气、重油助熔等。其值的大小随着余钢倒回炉的热量、热装比例、助熔时间的长短等因素变化, 波动幅度较大。

#### 3.4.2 能量的支出

##### 3.4.2.1 有用能

有用能即每吨钢所必需的能量, 包括:

(1) 熔化废钢并加热钢液所需要的能量。这部分所需能量的大小决定于炉料的化学成分和钢液的过热温度。因为炉料化学成分不同, 钢的熔点也就不一样。为了使钢渣界面化学反应能顺利进行, 钢液应具有一定的流动性, 以满足出钢时的温度要求, 钢液应

有一定的过热温度。而熔点的大小和过热温度多少，就决定着所需能量的数值。

(2) 熔化渣料并加热到反应温度所需的能量。这部分能量的大小取决于造渣材料的成分和渣量，其计算原则与熔化废钢和钢液过热所需热量计算相同。一般认为每吨钢加入1%的渣料需电能  $5.8 \text{ KW} \cdot \text{h}$ 。

(3) 冶金过程吸热反应所需要的能量。在炼钢过程中，除了加铁矿石外，大都是都是放热反应。因为在采用矿石进行氧化时，钢液中的碳和炉渣的氧化亚铁反应是一个吸热反应。

#### 3.4.2.2 电损失能量

电弧炉炼钢所需的电能，从高压电缆经过电弧炉变压器降压成二次侧电压、电流，通过短网送到电极下端，在这一线路中损失的电能称为电损失。线路中的电阻越大，电损失就越大。电损失一般占输入电能的7%~14%。其中短网中的电损失是较大的，采用合理的布线能减少电损失。

#### 3.4.2.3 热损失能量

(1) 炉衬热损失。炉底、炉端、炉盖的内表面温度很高，接近于熔池温度，热量通过传导、对流、辐射等形式向外散失，炉衬的热损失与散热面积、各层耐火材料的厚度及导热系数有关。通常炉盖热损失约占冶炼每吨钢电耗的4%~8%，炉底占1%~2%，炉墙占2%~4%，小炉子炉衬比大炉子炉衬的热损失比例更大些。

(2) 水冷系统热损失。这部分热损失是通过冷却水带出炉外的。它损失的大小与水冷构件的受热面积、冷却水的流量及进出水温度的高低有关。水冷损失一般占冶炼每吨电耗的3%~8%。

(3) 补炉和装料造成的热损失。这部分热损失主要是由于炉外的冷空气进入炉内及炽热炉衬对外辐射造成的。出钢后炉膛的温度比较高，应最有效地加以利用，尽量减少补炉和装料时的热损失。这项热损失大小与散热面积、炉衬内表面温度及散热时间有关。补炉和装料时的热损失约占冶炼每吨钢电能消耗的2%~3%。

(4) 开口辐射热损失。电极孔、炉门等处是形成开口辐射热损失的主要部位，这方面的辐射热损失大小与开口面积的大小、炉门开启时间的长短及电极密封的程度有关。因此，在操作中，要勤关炉门和加强电极孔的密封。这方面的热损失约占冶炼每吨钢电耗的1%~2%。

(5) 高温炉气带走的热损失。这部分的热损失与炉气的压力、炉气的温度和电极孔的大小有关。此项热损失约占冶炼每吨钢电耗的2%~3%。

(6) 电磁辐射热损失。暴露在炉盖外部的电极向空间辐射、对流而散失的热量与电极的直径和长度有关，一般占每吨钢电耗的1%~3%。

归纳能量收入和能量支出的项目如下<sup>[11-12]</sup>：

表 3.1 电弧炉熔化期热平衡表

Table 3.1 The heat balance of melting period of AC EAF

能量来源	能量支出
电能转化为热能 $Q_1$	熔化废钢并加热钢液所需能量 $Q_1'$
化学反应热 $Q_2$	熔化渣料并加热到反应温度所需的能量 $Q_2'$
炉料物理热 $Q_3$	冶金过程吸热反应所需的能量 $Q_3'$
其他辅助热源 $Q_4$	电损失 $Q_4'$
	炉衬热损失 $Q_5'$
	水冷系统热损失 $Q_6'$
	补炉和装料造成的热损失 $Q_7'$
	开口辐射热损失 $Q_8'$
	高温炉气带走的热量损失 $Q_9'$
	电极辐射的热损失 $Q_{10}'$

### 3.4.3 热平衡方程

以电弧炉炉子系统为热平衡研究对象，电弧炉熔化期热平衡表如表 3.1，根据能量平衡列出等式：

$$\sum_{i=1}^4 Q_i = \sum_{j=1}^{10} Q_j' \tag{3.13}$$

电热量  $Q_1$  与电损失热  $Q_4'$  之差为电弧产生的热量，设电弧功率为  $P_a$ ，则

$$Q_1 - Q_4' = \int_0^T P_a(t) \cdot dt \tag{3.14}$$

其中， $T$  为熔化期的通电时间。

炉衬热损失  $Q_5'$ 、水冷系统热损失  $Q_6'$  以及开口辐射热损失  $Q_8'$ 、电极辐射的热损失  $Q_{10}'$  在工艺一定、结构一定条件下，其热量损失与熔化时间成正比，其热损失功率近似为一常数，称为固定热损失功率  $P_g$ ，那么

$$Q_5' + Q_6' + Q_8' + Q_{10}' = P_g \cdot T \quad (3.15)$$

熔化废钢并加热钢液所需能量  $Q_1'$ 、熔化渣料并加热到反应温度所需的能量  $Q_2'$ 、冶金过程吸热反应所需的能量  $Q_3'$ 、补炉和装料造成的热损失  $Q_7'$ 、高温炉气带走的热量损失  $Q_9'$ 、化学反应热  $Q_2$ 、炉料物理热  $Q_3$ 、其他辅助热源  $Q_4$ ，在工艺一定的情况下均与钢水产量  $M$  成正比，因此

$$Q_1' + Q_2' + Q_3' + Q_7' + Q_9' - Q_2 - Q_3 - Q_4 = K \cdot M \quad (3.16)$$

则由式(3.13)、(3.14)、(3.15)和(3.16)可得：

$$\int_0^T [Pa(t) - P_g] dt = K \cdot M \quad (3.17)$$

由于研究对象电弧炉分为两次加料，而每次加料熔化期又分为三个阶段，两次加料中间还有一段是装料阶段，此阶段虽然没有通电，但炉子中的钢水仍有热损失，而每个阶段功率是一定的，所以得到：

$$\sum_{i=1}^7 \int_{t_{i-1}}^{t_i} [Pa_i(t) - P_g] dt = K \cdot M \quad (3.18)$$

其中， $t_0$  到  $t_7$  分别为七个阶段的起始和终点时刻。K 为熔化期工艺热耗，kWh/t；M 为钢水产量，单位是吨。对于装料阶段从  $t_3$  到  $t_4$ ，由于没有通电所以  $Pa_4 = 0$ 。

设  $t_i - t_{i-1} = \Delta t_i, i = 1, \dots, 7$ ，则：

$$\sum_{i=1, i \neq 4}^7 (Pa_i - P_g) \cdot \Delta t_i - P_g \cdot \Delta t_4 = K \cdot M \quad (3.19)$$

$\Delta t_i$  代表各个阶段所用时间。则总的熔化期通电时间  $t$  和吨钢电耗  $b$  为：

$$\begin{aligned} t &= \sum_{i=1, i \neq 4}^7 \Delta t_i \quad (3.20) \\ b &= \frac{\int_0^T P(t) dt}{M} = \frac{\sum_{i=1}^7 \int_{t_{i-1}}^{t_i} [Pa_i(t) + Pl_i(t)] dt}{M} \\ &= \frac{\sum_{i=1, i \neq 4}^7 (Pa_i + Pl_i) \cdot \Delta t_i}{M} \quad (3.21) \end{aligned}$$

其中  $Pa_i$  为电弧功率， $Pl_i$  为损失功率， $i = 1, \dots, 7, i \neq 4$ ，单位都是  $KW \cdot h$ 。

电弧炉经济指标两个最重要的冶炼时间  $t$  和吨钢电耗  $b$  都已经有了具体的数量表示, 供电优化的目标就是缩短冶炼时间, 降低吨钢电耗, 达到节能增产的目的。从上面的公示亦可以看出增大电弧功率和减少损失功率就可以达到目的, 电弧功率的大小取决于变压器、电抗器等电路参数, 同时变压器的额定功率是一定的, 我们的目标就是找到在不超出变压器等设备的工作范围的情况下最大限度的节能增产。

### 3.5 基于经济指标的供电模型的建立

#### 3.5.1 模型的目标

电弧炉炼钢最重要的经济指标就是吨钢电耗、冶炼时间和电极消耗, 所以优化的目标就是降低吨钢电耗、减少冶炼时间、减少电极消耗。其中吨钢电耗和冶炼时间由式(3.20)和式(3.21)给出, 而电极消耗将由下式给出。

电极消耗分为两部分:

- (1) 端部消耗。它与电极电流的二次方成正比, 与通电时间成正比;
- (2) 侧面消耗。它取决于出钢至送电的间歇时间和炉子废气中的氧含量。

为了简化计算通常认为电极总消耗是电极端部消耗的倍数, 计算公式如下<sup>[13]</sup>:

$$ec_{tip} = f_{tip} \cdot ec_{total} \tag{3.22}$$

$$ec_{tip} = K \cdot I^2 \tag{3.23}$$

由式(3.22)和(3.23)推导出总的电极消耗为:

$$ec_{total} = \frac{1}{f_{tip}} \cdot K \cdot I^2 \tag{3.24}$$

$ec_{total}$  为电极总消耗,  $ec_{tip}$  为电极端部消耗,  $f_{tip}$  为端部消耗与总消耗之间关系系数,

对于交流电弧炉  $f_{tip} = 0.5$ ,  $K$  为常数,  $I$  为电极电流。

定义整个冶炼过程的电极消耗  $ec$  为:

$$ec = \frac{\sum_{i=1, i \neq 4}^7 ec_i \cdot \Delta t_i}{\sum_{i=1, i \neq 4}^7 \Delta t_i} \tag{3.25}$$

其中  $ec_i$  为各个阶段的电极消耗,  $i = 1, \dots, 7, i \neq 4$ 。

### 3.5.2 模型的约束条件

电弧炉炼钢电流、变压器电压和电抗器档位的选择应满足以下约束条件:

#### (1) 变压器约束

电炉冶炼中, 变压器作为电能源的提供者, 对输出功率、二次电压和电弧电流都有限制, 具体表现为: 视在功率不能超过变压器的额定容量的相应倍数, 二次电压只能是额定二次电压中的一个, 电弧电流不能超过额定电流的相应倍数, 三者只要满足其中两个即可。

$$S = 3ui < P \cdot S_e \quad (3.26)$$

$$u \in \{U_1, U_2, \dots, U_n\} \quad (3.27)$$

$$u = U_j \text{ 时, } 0 \leq i \leq P \cdot I_e^j, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad I_e \in \{I_e^1, I_e^2, \dots, I_e^n\} \quad (3.28)$$

其中:  $S$  为视在功率,  $S_e$  为变压器的容量,  $U_n$  为变压器第  $n$  档二次电压;

$n$  为变压器档位数;  $I_e^n$  为变压器第  $n$  档的二次额定电流,  $P$  为允许电流倍数。

#### (2) 电抗器档位约束

电抗器档位是个离散值, 只能从中选一个, 对应的电抗值直接影响电路的各参数。

可用以下公式来描述:

$$x \in \{X_1, X_2, \dots, X_m\} \quad (3.29)$$

其中:  $X_n$  为电抗器第  $n$  档电抗值。

#### (3) 电弧稳定燃烧约束

由于交流电的特性, 电弧稳定要求电路中必须具有一定量的电抗, 表现在电弧的稳定性与功率因数相关, 为了使电弧稳定的燃烧, 电弧炉的功率因数应该小于等于 0.866。

$$\cos \phi \leq 0.866 \quad (3.30)$$

#### (4) 炉衬侵蚀指数 $Re$ 约束

炉衬侵蚀指数  $Re$  是一个用来反映电弧炉的供电制度和电极与炉衬间的几何尺寸对炉衬侵蚀影响的参数。  $Re$  越大, 炉衬侵蚀的越严重, 炉衬的寿命就越短。反之亦然。

为提高炉盖、炉衬耐火材料的使用寿命, 要求电弧的燃烧指数  $ABI$  满足:

$$ABI = \frac{PaUa}{L^2} \leq Re \quad (3.31)$$

其中:  $Pa$  为电弧功率,  $L$  为电极侧面到炉壁的最短距离,  $Ua$  为电弧电压,  $Re$  为工艺允许的最大电弧燃烧指数。

电弧炉不同冶炼阶段对  $Re$  的要求不同。启弧阶段由于电弧裸露在钢铁料外部、距离炉盖很近，为减少对炉盖的烧损，要求  $Re \in [300, 350]$ ；穿井阶段、电极上升阶段由于电弧被钢铁料包围，对炉盖和炉衬烧损可以忽略， $Re$  不受限制；熔化末了阶段由于钢铁料大部分已熔化，应考虑对炉衬的烧损，要求  $Re \in [400, 450]$ 。

(5) 熔化期各个阶段所需最小能量约束

此约束主要从工艺角度考虑的。电弧炉熔化期阶段的划分取决于废钢熔化程度，一般来说，起弧阶段需要能量很少，能量主要消耗在穿井上升以及熔化末了阶段。这里就把各阶段所需最少能量看成是总能量的百分比。

$$[Pa_i - Pg] \cdot \Delta t_i \geq K_i \cdot M, i = 1, \dots, 7, i \neq 4 \tag{3.32}$$

### 3.5.3 模型的确定

经过上面的分析，我们知道供电模型的目标就是优化电弧炉经济指标，而通过改变变压器档位  $u_i$ 、电抗器档位  $x_i$  以及电弧电流  $i_i$  就可以达到此目的，即决策变量是  $u_i, i_i, x_i$ ，所以基于电热特性的电弧炉供电模型如下：

$$\begin{aligned} \text{Min } t &= \sum_{i=1, i \neq 4}^7 \Delta t_i \\ \text{Min } b &= \frac{\sum_{i=1, i \neq 4}^7 (Pa_i + Pl_i) \cdot \Delta t_i}{M} \\ \text{Min } ec &= \frac{\sum_{i=1, i \neq 4}^7 ec_i \cdot \Delta t_i}{\sum_{i=1, i \neq 4}^7 \Delta t_i} \\ \text{s.t. } \cos \phi_i(u_i, i_i, x_i) &\leq PF, i = 1, 2, 3, 5, 6, 7 \\ ABI_i(u_i, i_i, x_i) &\leq Re, i = 1, 3, 5, 7 \\ \sum_{i=1, i \neq 4}^7 (Pa_i - Pg) \cdot \Delta t_i - Pg \cdot \Delta t_4 &= K \cdot M \\ [Pa_i(u_i, i_i, x_i) - Pg] \cdot \Delta t_i &\geq K_i \cdot M, i = 1, 2, 3, 5, 6, 7 \\ u_i &\in \{U_1, U_2, \dots, U_n\}, i = 1, 2, 3, 5, 6, 7 \\ x_i &\in \{X_1, X_2, \dots, X_k\}, i = 1, 2, 3, 5, 6, 7 \\ u_k = U_j \text{ 时}, 0 \leq i_k &\leq I_e^j, j = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, 3, 5, 6, 7 \\ I_e &\in \{I_e^1, I_e^2, \dots, I_e^n\} \end{aligned} \tag{3.33}$$

基于经济指标的供电模型的优点：

(1) 真正做到了整体优化。把电弧炉熔化期看成一个整体来优化经济指标比分阶段优化更合理；

(2) 此模型将把第二章回归出来的运行电抗模型考虑在内, 从实际生产数据得到的电抗模型再运用到优化中起到相得益彰的作用;

(3) 考虑了电极消耗。实际上电极消耗是除了电能消耗之外的最大一笔开支, 石墨电极的价格大概在一万元左右一吨, 是电价的 20 倍左右, 所以应该把电极消耗考虑在内。

### 3.6 本章小结

本章首先分析了传统供电策略和分阶段供电模型的局限性, 然后根据电弧炉的电路特性、热工特性和能量守恒原理建立了基于经济指标的供电模型, 把设备的限制归结为约束条件。和分阶段供电模型的区别在于此模型代表了整个冶炼过程的供电特性, 是从全局出发的优化模型。

## 第4章 电弧炉供电模型的求解

基于经济指标的电弧炉供电模型是一个带约束的多目标混合整数非线性规划模型,对于此类问题的求解,目前尚无快速有效的算法。但基本求解思路分为两种:一是传统优化方法;二是进化算法。传统优化方法对模型的可微性及凸性有一定要求,而进化算法是随机搜索的思想<sup>[14]</sup>,所以没有这方面的要求。本章首先分析供电模型的特点,然后针对这些特点找到适合的求解算法。

### 4.1 供电模型求解需要解决的问题

(1) 整数变量的处理。整数规划是专门针对离散变量的,但是如果既有离散又有连续变量的话,传统优化方法处理起来就比较困难,一种方法是取整,把一个区间的变量值都当成一个整型变量的值,此方法的合理性有待验证。遗传算法中处理离散变量是采用二进制编码的方式,对于连续变量采用实数编码<sup>[15]</sup>。

(2) 约束的处理。罚函数法处理约束是经典的方法,无论是应用到传统优化方法还是遗传算法都是比较有效的,但是罚因子的选取又给人们出了一道难题,不同问题罚因子的选取有很大差别,而且无规律可寻,只有凭借经验或实验。遗传算法中还有一些处理约束的策略如拒绝策略、修复策略等,但都不是很有效。

(3) 多目标的处理。无论对于传统优化方法还是进化方法处理多目标都不是容易的事。而且进化方法处理多目标还是直接借鉴自传统方法的。直到近十几年来,遗传算法处理多目标才有了自己的机制,并且也取得了一些成果<sup>[16]</sup>。

(4) 非线性的处理。对于传统优化方法,非线性处理是个棘手的问题,因为需要验证是否满足库恩-塔克(Kuhn-Tucker)条件<sup>[17]</sup>,这里就涉及到求一阶和二阶导数的问题,而这不是很容易的。而对遗传算法来说,处理非线性很容易,这是由它的机制决定的<sup>[18]</sup>。

以上从四个方面对比了传统优化方法和遗传算法,可以看到,遗传算法在求解带约束的多目标混合离散非线性规划问题上很大的优势,尤其在非线性处理和离散变量处理上,所以本文就以基本遗传算法为蓝本找到适合求解电弧炉供电模型的方法。

遗传算法求解电弧炉供电模型分为两种思路:一种是通过把多目标整合成单个目标然后求解单目标约束优化问题,这种方法是最常用的;另一种是直接求解多目标规划问题。这种方法是最近十几年来才出现的<sup>[19]</sup>。根据这两种思路,本文提出了求解单目标约束规划问题的面向约束处理的遗传算法和求解多目标规划的混合编码的NSGA-II算法。

## 4.2 一种面向约束处理的遗传算法

### 4.2.1 遗传算法的产生及其基本原理

人类在适应自然与改造自然的过程中,也不断地从自然界吸取养分,充实和丰富自己的智慧。无数的革新与创造都源于大自然赋予科学家的灵感,如将生物提供解决问题的方法应用于人类实际问题已经形成一个专门的学科——仿生学。本世纪五十年代中期创立的仿生学在很多领域已成为人类提出某些复杂问题的解决方法的理论基石。大自然的成功创造已在漫长的历史过程中得到印证,人类根据自然法则及自然界的方式,将自然界的方法重现于人类的目的和领域取得了较为满意的成果。关于自然界生物演变与进化的巨作——达尔文的《进化论》,以适者生存理论揭示了生物进化的奥密。生物通过进化不断完善自己、增强对自然的适应能力,从而达到生存与发展的目的;同时通过遗传学规律将这个过程代代相继。遗传算法作为一种著名的优化算法正是根据生物的遗传进化规律,模拟生物经遗传进化改良物种的优化过程创造出来的<sup>[20]</sup>。

遗传算法(Genetic Algorithms, GA)<sup>[21]</sup>研究的历史比较短,20世纪60年代末期到70年代初期,主要由美国Michigan大学的John Holland与其同事、学生研究形成了一个较完整的理论和方法,从试图解释自然系统中生物的复杂适应过程入手,模拟生物进化的机制来构造系统的模型。随后经过20余年的发展,取得了丰硕的成果,特别是近年来世界范围形成的进化计算热潮,使遗传算法受到广泛的关注。

遗传算法适用于最优化问题,归功于Holland的学生De Jong,他于1975年发表了题为“An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems”的学位论文,用五个性能各异的测试函数得到了一些重要意义的方法和结论。而Grefenstette开发了第一个遗传算法软件——GENESIS,为遗传算法的推广起了重要作用。1992年,Michalewicz出版了“Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs”,对遗传算法应用于最优化问题起到了推波助澜的作用。

遗传算法是一种基于生物自然选择与遗传机理的随机搜索算法,与传统搜索算法不同,遗传算法从一组随机产生的称为“种群(population)”的初始解开始搜索过程。种群的每一个个体是问题的解,称为“染色体(chromosome)”。染色体是一串符号,随“编码(encoding)”方式的不同而有所不同。这些染色体在后代迭代中不断进化,称为遗传。在每一代中用“适应度值(fitness)”衡量染色体的好坏,并由此“选择(select)”部分个体作为父个体,淘汰一些适应度值低的个体,并且保持“种群大小(population size)”不变。后代是由前一代被选择出的父个体通过“交叉(crossover)”和“变异(mutation)”运算形

成的。在选择过程中，适应度值高的个体被选中的概率较高，这样，经过若干代后，算法收敛于最好的染色体，它很可能就是问题的最优解或次优解。末代种群中的最优个体，可以作为问题的近似最优解。遗传算法示意图如下：

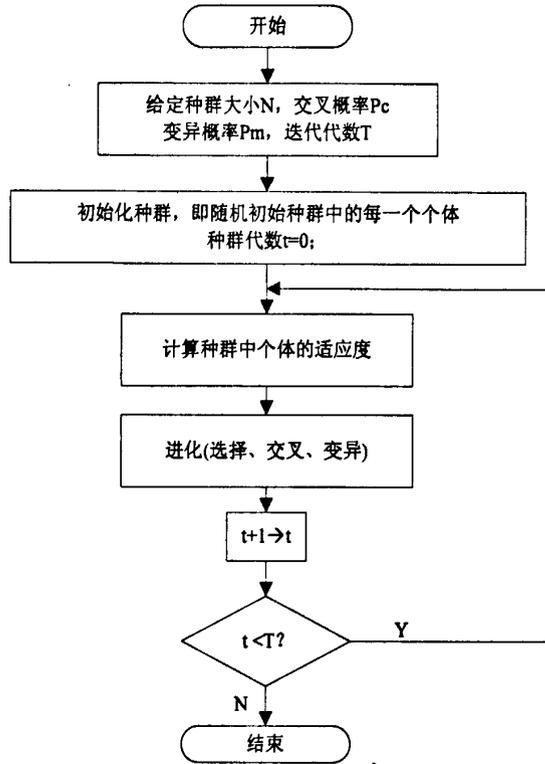


图 4.1 遗传算法流程图

Fig. 4.1 flow chart of genetic algorithm

表 4.1 生物遗传学的基本概念和遗传算法中的对比

Table 4.1 contrast between genetics and genetic algorithms

生物遗传学的基本概念	遗传算法中的含义
个体(individual)	解向量
基因(gene)	解向量的分量
染色体(chromosome)	解向量的编码
种群(population)	解向量组
适应度(fitness)	适应度函数
优胜劣汰(survival of the fittest)	选择适应度高的个体，淘汰适应度低的个体
杂交(crossover)	两个解向量交换部分分量
变异(mutation)	一个解向量的某一分量发生变化
进化(evolution)	从一个解向量组到另一个更好的解向量组

#### 4.2.2 面向约束处理的遗传算法的提出

约束处理是遗传算法解决非线性优化问题所需的重要技术,近年提出了几类在遗传算法应用中解决约束问题的策略:

(1) 拒绝策略。即抛弃所有进化过程中产生的不可行解。这种方法在可行的搜索空间连续且为凸时是有效的。然而这种对解的严格限制,大大降低了算法的搜索效率,有时甚至找不到最优解;

(2) 修复策略。通过特殊的修复算法将产生的不可行解修复成可行解。然而该策略并无统一的修复算法(其依赖于所要求解的问题),对于某些复杂的优化问题,设计相应的修复算法是比较困难的;

(3) 改进遗传算子策略。通过采用特殊的遗传算子使个体在这些遗传算子作用下产生的后代均为可行解。但是这种方法仅能处理线性约束的问题,对于非线性约束就无能为力了;

(4) 惩罚函数策略。通过对不可行解施加某种惩罚,经过不断的迭代,使种群逐渐收敛于可行的极值点。这一策略允许在一定的不可行域中搜索,比将搜索限制在可行域内的方法更快得到最优解或得到更好的最终解。目前惩罚函数法是遗传算法求解非线性约束优化问题的一种常用方法。惩罚策略的主要问题是设计一个惩罚因子。惩罚函数过大就相当于拒绝策略了;过小算法容易陷入局优,收敛速度慢,有时可能不收敛。

上述处理约束的惩罚函数策略相对而言是最常用的,但是它的目的是把约束通过惩罚因子整合到目标中,而各约束之间、约束和目标之间的数值大小级别大部分情况下是不同并且是变化的,惩罚因子如果是静态的,就会造成一部分个体的损失,如果是动态的,其变化规律又不好确定,针对惩罚函数的缺点,本文提出了约束处理的遗传算法。基本原理如下:

不再把约束和目标整合到一起组成一个函数计算个体适应度,而是约束和目标分别对待。根据约束和目标对种群中的个体排序,个体在此排序中的序号值代表个体适应度的大小,原则是满足约束的个体的序号值一定大于不满足约束的个体的序号值。满足约束的个体序号值的大小取决于目标函数的大小,对于最小化问题,目标函数越小序号值越大,即按从大到小排序;不满足约束的个体序号值的大小取决于约束的违反程度。违反程度越大,序号值越小。

对于最小化问题(4.1)

$$\begin{cases} \text{Min } f(\mathbf{x}) \\ \text{s.t. } \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0} \end{cases} \quad (4.1)$$

$f(\mathbf{x})$  为目标函数,  $\mathbf{g}(\mathbf{x}) = (g_1(\mathbf{x}), g_2(\mathbf{x}), \dots, g_m(\mathbf{x}))^T$  为  $m$  维不等式约束(这里认为已经把等式约束转化成了不等式约束),  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$  为  $n$  维决策变量。定义约束违反程度:

$$G_i = \sum_{k=1}^m \frac{\text{Max}[0, g_k(\mathbf{x})]}{g_{k\max} - g_{k\min}} \quad (4.2)$$

用  $F_i$  表示第  $i$  个个体的适应度, 即第  $i$  个个体的目标函数值,  $S_i$  表示第  $i$  个个体的排序序号值。根据约束处理原则,  $S_i$  的值如下表(假设种群规模(population size)是 4, 个体的适应度和约束违反程度是随便给定的):

表 4.2 个体排序

Table 4.2 sorting of individuals

	目标函数值 $F_i$	约束违反程度 $G_i$	排序序号值 $S_i$
个体 1	10	7	1
个体 2	4	0	4
个体 3	25	0	3
个体 4	50	5	2

排序号后的  $S_i$  值可以直接代表个体的适应度, 也可以进行一下适应度变换以改善种群的选择压力。适应度变换的方法如下几种:

(a) 线性尺度变换。线性尺度变换的公式如下:

$$F' = a \cdot F + b \quad (4.3)$$

式中  $F$  为原适应度;  $F'$  为尺度变换后的新适应度;  $a$  和  $b$  为系数。由上式知系数  $a$  和  $b$  直接影响到这个尺度变换的大小, 所以对其选择有一定的要求, 一般希望它满足下面两个条件: ① 尺度变换后全部个体的新适应度的平均值要等于原适应度平均值; ② 尺度变换后群体中新的最大适应度要等于其原平均适应度的指定倍数。

(b) 乘幂尺度变换。乘幂尺度变换的公式为

$$F' = F^k \quad (4.4)$$

即新的适应度是原有适应度的某个指定乘幂。幂指数  $k$  与所求解的问题有关, 并且在算法的执行过程中需要不断对其进行修正才能使尺度变换满足一定的伸缩要求。

(c) 指数尺度变换。指数尺度变换的公式为:

$$F' = e^{-\beta \cdot F} \quad (4.5)$$

即新的适应度是原有适应度的某个指数。式中系数  $\beta$  决定了选择的强制性,  $\beta$  越小, 原有适应度较高的个体的新适应度就越与其他个体的新适应度相差较大, 亦即越增加了选择该个体的强制性。

把约束和目标分开然后进行排序得到个体的适应度避开了惩罚因子的选取, 并且可以通过适应度的尺度变换得到合适的选择压力。

### 4.2.3 面向约束处理的遗传算法的实现

除了个体适应度的计算有所不同外, 其它遗传算子和基本遗传算法类似。下面一一介绍并编程实现。

#### 4.2.3.1 编码

解向量中各分量的组织形式称为编码(encoding)。下面介绍几种常用的编码形式<sup>[22]</sup>。

##### (1) 二进制编码

遗传算法中常用的编码方式是二进制编码, 它将问题空间的参数用字符集{0, 1}构成染色体位串, 符合最小字符集原则, 便于用模式定理分析, 但存在映射误差。

对于  $n(n \geq 1)$  维连续函数  $f(\bar{x})$ ,  $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ ,  $x_i \in [u_i, v_i]$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  采用定长二进制编码, 建立位串空间, 各维变量的二进制空间编长为  $l_i$ , 那么  $\bar{x}$  的编码从左到右依次

构成总长度为  $L = \sum_{i=1}^n l_i$  的二进制编码位串。则相应的二进制编码空间

$$S^L = \{ \{x_1^1, x_1^2, \dots, x_1^{l_1}\}, \{x_2^1, x_2^2, \dots, x_2^{l_2}\}, \dots, \{x_n^1, x_n^2, \dots, x_n^{l_n}\} \}, x_i^j \in \{0, 1\} \quad (4.6)$$

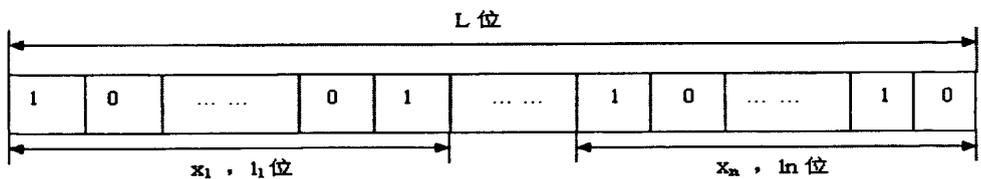


图 4.2 二进制编码的位串空间

Fig. 4.2 space of binary coding

编码空间和解空间能够相互转化, 设  $b_i = x_i^1 x_i^2 \dots x_i^{l_i}$ , 即  $b_i$  是二进制串  $x_i^1 x_i^2 \dots x_i^{l_i}$  的值, 则  $x_i = u_i + \frac{v_i - u_i}{2^{l_i} - 1} \cdot b_i$ 。例如, 对于  $x \in [0, 1023]$ , 若用 10 位二进制串来表示该变量, 则  $b = 0010101111$  表示  $x = 175$ 。

(2) 格雷码编码

格雷码编码是二进制编码的一种变形，格雷码连续两个整数对应的编码值之间只有一位编码不同，增强了遗传算法的局部搜索能力，便于连续函数的局部空间搜索。

二进制编码和格雷码编码可以相互转化，假设有一个二进制编码为  $b = b_m \dots b_2 b_1$ ，其对应的格雷码为  $g = g_m \dots g_2 g_1$ 。由二进制到格雷码的转化公式为：

$$\begin{aligned} g_m &= b_m \\ g_i &= b_{i+1} \oplus b_i, i = m-1, m-2, \dots, 1 \end{aligned} \tag{4.7}$$

由格雷码到二进制的转化公式为：

$$\begin{aligned} b_m &= g_m \\ b_i &= b_{i+1} \oplus g_i, i = m-1, m-2, \dots, 1 \end{aligned} \tag{4.8}$$

其中“ $\oplus$ ”表示异或运算。

(3) 实数编码

实数编码<sup>[23]</sup>是指个体的每个基因值用某一范围内的一个实数来表示，个体的编码长度等于其解向量中分量的个数。因为这种编码方法使用的是向量的真实值，所以也叫真值编码方法。实数编码是遗传算法中在解决连续参数优化问题时经常使用的一种编码方式，有以下优点：

- (a) 适合于在遗传算法中表示范围较大的数；
- (b) 适合于精度要求较高的遗传算法；
- (c) 便于较大空间的遗传搜索；
- (d) 改善了遗传算法的计算复杂性，提高了运算效率；
- (e) 便于遗传算法与经典优化方法的混合使用；
- (f) 便于设计针对问题的专门知识的知识型遗传算子；
- (g) 便于处理复杂的决策变量约束条件。

此外还有符号编码、排列编码、二倍体编码、DNA 编码、混合编码或多参数编码、二维染色体编码或矩阵编码、自适应编码、树结构编码等。

4.2.3.2 选择算子

遗传算法的原理从本质上来说是基于达尔文的自然选择学说，选择提供了遗传算法种群进化的驱动力，实现了对种群中个体进行优胜劣汰的操作。选择操作建立在对个体的适应度进行评价的基础之上。下面介绍几种常用的选择算子。

(1) 轮盘赌选择(roulette wheel selection)。这是一种最基本、最常用的选择机制。在

这种选择机制下,个体每次被选中的概率与其在整个种群中的相对适应度成正比,故又称适应度比例选择法。设种群大小为  $n$ , 其中个体  $i$  的适应度为  $F_i$ , 则  $i$  被选择的概率

为  $P_i = F_i / \sum_{j=1}^n F_j$ 。可见个体适应度越大被选择的概率就越高。

(2) 锦标赛选择(tournament selection)。选择时,先随机地在群体中选择  $k$  个个体进行比较,适应值最好的个体被选择作为生成下一代的父体,参数  $k$  称为竞赛规模。显然,这种选择方式也使得适应值好的个体具有较大的生存机会,同时,它只使用适应值的相对值作为选择的标准,而与适应值的数值大小不成正比。从而它也能避免超级个体的影响,在一定程度上,避免过早收敛现象和停滞现象的发生。

(3) 精英保留选择机制(elitism selection)。由于选择、交叉、变异等遗传操作的随机性,它有可能破坏群体在进化过程中产生的优良个体,这样会降低群体的平均适应度,并且对遗传算法的运行效率、收敛性都有不利的影响。为此我们采取精英保留选择机制,使当前群体中适应度最高的个体不参与交叉运算和变异运算,而是用他替换掉本代群体中经过交叉、变异等操作后产生的适应度最低的个体。此方法一般与其它选择方法结合使用。

此外还有排序选择、期望值选择、 $(\mu + \lambda)$  选择、截断选择等。

#### 4.2.3.3 交叉算子

交叉操作是完成两个个体基因交换的操作方法,即两个个体经过交叉操作,产生两个新的个体,以替代原来的两个个体。对于实数型遗传算法,由于对个体未进行编码,其交叉操作的方法比较灵活。

假设参与交叉的两个父个体为:  $I_1 = (I_1^1, I_1^2, \dots, I_1^n)$ ,  $I_2 = (I_2^1, I_2^2, \dots, I_2^n)$

常用的交叉算子为:

(1) 简单交叉(Simple Crossover) 首先随机产生一个交叉位置  $i, i \in \{1, 2, \dots, n-1\}$ , 然后按下述方式产生两个子个体  $C_1$  和  $C_2$ :

$$\begin{aligned} C_1 &= (I_1^1, I_1^2, \dots, I_1^i, I_2^{i+1}, \dots, I_2^n) \\ C_2 &= (I_2^1, I_2^2, \dots, I_2^i, I_1^{i+1}, \dots, I_1^n) \end{aligned} \tag{4.9}$$

(2) 算术交叉(Arithmetical Crossover) 通过此方法产生的子个体  $C_1$  和  $C_2$  如下:

$$\begin{aligned} C_1 &= (C_1^1, C_1^2, \dots, C_1^n) \\ C_2 &= (C_2^1, C_2^2, \dots, C_2^n) \end{aligned} \quad (4.10)$$

其中  $C_1^i = \lambda I_1^i + (1-\lambda)I_2^i$ ,  $C_2^i = \lambda I_2^i + (1-\lambda)I_1^i$ 。

$\lambda$  可以是常量, 此时成为均匀算术交叉(Uniform Arithmetical Crossover), 也可以随着世代数而变化, 称为非均匀算术交叉(Non-Uniform Arithmetical Crossover)。

(3) 线性交叉(Linear Crossover) 首先产生三个新的子代个体  $C_1$ 、 $C_2$  和  $C_3$ ,

$$C_k = (C_k^1, C_k^2, \dots, C_k^n), \quad k=1,2,3 \quad (4.11)$$

其中  $C_1^i = \frac{1}{2}I_1^i + \frac{1}{2}I_2^i$ ,  $C_2^i = \frac{3}{2}I_1^i - \frac{1}{2}I_2^i$ ,  $C_3^i = -\frac{1}{2}I_1^i + \frac{3}{2}I_2^i$ ,  $i \in \{1,2,\dots,n\}$ 。

然后选择两个最好的个体作为子个体。

(4) 模拟二进制交叉(Simulated Binary Crossover, SBX)<sup>[24]</sup>

先通过下式计算父个体相应分量的  $\beta_{qi}$  值:

$$\beta_{qi} = \begin{cases} (2u_i)^{\frac{1}{\eta_c+1}}, & u_i \leq 0.5 \\ \frac{1}{2(1-u_i)^{\frac{1}{\eta_c+1}}}, & u_i > 0.5 \end{cases} \quad (4.12)$$

其中  $u_i$  为一 0 和 1 之间的随机数,  $\eta_c$  为用户确定的分布指数, 可为任意非负实数,

$\eta_c$  较大时, 产生的后代离父代较近的概率较高, 反之  $\eta_c$  较小时离父代较远的概率较大。

子代个体相应基因由下式得出:

$$\begin{aligned} c_i^1 &= 0.5[(1+\beta_{qi}) \cdot p_i^1 + (1-\beta_{qi}) \cdot p_i^2] \\ c_i^2 &= 0.5[(1-\beta_{qi}) \cdot p_i^1 + (1+\beta_{qi}) \cdot p_i^2] \end{aligned} \quad (4.13)$$

对于二进制编码, 常用的交叉算子有单切点交叉和双切点交叉, 基本思想是随机产生一个或两个切点, 然后交换两个个体的相应的基因。

#### 4.2.3.4 变异算子

变异算子<sup>[25]</sup>是个体向不同领域搜索的一种重要途径, 能使个体随机的产生一定变化, 当然, 这种变化不一定是朝着最优的方向发展, 但却拓展了算法的搜索空间, 就像生物进化一样, 可能会产生好的基因。

对实数编码来说, 常用变异算子如下:

假设拟变异的个体表示为:  $I = (I^1, I^2, \dots, I^n)$ , 拟变异的基因表示为  $c_i$ ,  $c_i \in [a_i, b_i]$ ,

变异后的基因表示为  $c_i'$ 。

(1) 均匀变异(Uniform Mutation) 从区间  $[a_i, b_i]$  随机均匀选取。

(2) 非均匀变异(Non-Uniform Mutation) 设  $random$  为一 0 或 1 随机数,

$$c_i' = \begin{cases} c_i + \Delta(t, b_i - c_i), & random = 0 \\ c_i - \Delta(t, c_i - a_i), & random = 1 \end{cases} \quad (4.14)$$

函数  $\Delta(t, y) = y(1 - r^{(1-t/T)^b})$ , 其中,  $r$  是  $[0, 1]$  区间的随机数,  $t$  为群体的当时代龄,  $T$  为最大进化代数,  $b$  是参数。

(3) 非均匀算术变异(Non-Uniform Arithmetical Mutation)

$$c_i' = \alpha c_i + (1 - \alpha) random \quad (4.15)$$

其中  $random$  是从  $[a_i, b_i]$  区间产生的一个均匀随机数,  $\alpha$  是一个参数。

(4) 模拟二进制变异(Simulated Binary Mutation)<sup>[24]</sup>

和模拟二进制交叉相似, 首先产生一个  $[0, 1]$  区间的随机数  $u_i$ , 根据  $u_i$  的大小计算  $\delta$ ,

$$\delta = \begin{cases} (2u_i)^{\frac{1}{\eta_m+1}} - 1, & u_i < 0.5 \\ 1 - [2(1-u_i)]^{\frac{1}{\eta_m+1}}, & u_i \geq 0.5 \end{cases} \quad (4.16)$$

$\eta_m$  为分布指数, 由用户确定, 代表了离原来基因的远近概率。变异后的基因用下式表达:  $c_i' = c_i + \delta \cdot \Delta$ ,  $\Delta$  为此基因最大值与最小值之差。

对于二进制编码, 变异算子比较简单, 按照变异概率  $p_m$  随机选取若干位基因改变位值使  $0 \rightarrow 1$  或  $1 \rightarrow 0$ , 往往产生意想不到的效果。

#### 4.2.3.5 基本运行参数

遗传算法中需要选择的运行参数主要有个体编码串的长度  $l$ 、群体大小  $M$ 、交叉概率  $p_c$ 、变异概率  $p_m$ 、终止代数  $T$ 。这些参数对遗传算法的运行性能影响较大, 需认真选取。

(1) 编码串的长度  $l$ 。使用二进制编码来表示个体时, 编码串长度  $l$  与问题所要求的精度有关; 浮点数编码时, 编码串长度  $l$  与决策变量的个数相等; 使用符号编码时, 编码串的长度  $l$  由问题的编码方式来确定; 另外, 也可使用变长度的编码来表示个体。

(2) 群体大小  $M$ 。群体大小  $M$  表示群体中所含个体的数量。当  $M$  取值较小时, 可提高遗传算法的运算速度, 但降低了群体的多样性, 有可能引起早熟现象; 而当  $M$  取值较大时, 又会使得遗传算法的效率降低。一般建议的取值范围是 20~100。

(3) 交叉概率  $p_c$ 。交叉操作是遗传算法中产生新个体的主要方法, 所以交叉概率一般应取较大值。但过大, 又会破坏群体中的优良模式, 对进化运算反而产生不利影响; 过小, 产生新个体的速度又较慢。 $p_c$  一般设为定值, 也可以使用自适应的思想来确定交叉概率  $p_c$ 。

(4) 变异概率  $p_m$ 。若变异概率  $p_m$  取值较大, 虽然可以产生较多的新个体, 但也有可能破坏很多较好的模式, 使得遗传算法的性能近乎随机搜索; 若过小, 则变异操作产生新个体的能力和抑制早熟的能力就会较差。 $p_m$  一般设为定值, 也可使用自适应的思想来确定变异概率  $p_m$ 。

(5) 终止代数  $T$ 。终止代数  $T$  是表示遗传算法运行结束条件的一个参数, 一般建议的取值范围是 50~1000。至于遗传算法的终止条件, 还可以利用某种判定准则, 当判定出群体已经进化成熟且不再有进化趋势时就可终止运行。常用的判定准则有下面两种: 连续几代个体平均适应度的差异小于某一个极小的阈值; 群体中所有个体适应度的方差小于某一个极小的阈值。

#### 4.2.3.6 实现过程

- (1) 确定基本运行参数, 产生初始种群;
- (2) 对种群中个体进行排序, 得到个体的适应度;
- (3) 选择交叉变异产生子个体;
- (4) 检验收敛条件, 未满足则跳转到(2)继续循环, 否则计算终止。

### 4.3 多目标规划问题的引入

#### 4.3.1 数学描述

工程中经常会遇到多准则或多设计目标下的设计和决策问题, 这些目标往往是相悖的, 要找到满足这些目标的最佳设计方案, 就要解决多目标和多约束问题, 即多目标优化(Multiobjective Optimization)问题。多目标优化就是找到决策变量  $\mathbf{x}^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)^T$

使其满足(对于最小化问题来说):

$$\begin{aligned} & \text{Min } \mathbf{f}(\mathbf{x}) \\ & \text{s.t. } \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0} \end{aligned} \quad (4.17)$$

其中  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$  为  $n$  维决策变量,  $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x}))^T$  为  $k$  维目标函数,  $\mathbf{g}(\mathbf{x}) = (g_1(\mathbf{x}), g_2(\mathbf{x}), \dots, g_m(\mathbf{x}))^T$  为  $m$  维不等式约束(这里认为已经把等式约束转化成了不等式约束)。一般来说, 找到一个解同时使所有的目标函数值都最小的可能性很小, 否则就可以求  $k$  个单目标优化问题了。所以多目标优化就是寻找一些妥协解(trade-offs), 从这个意义上, 最优的概念与单目标优化是不同的。

### 4.3.2 Pareto 支配关系

对于最小化问题, 设有两个解向量  $\mathbf{x}_1$  和  $\mathbf{x}_2$ , 如果  $f_i(\mathbf{x}_1) \leq f_i(\mathbf{x}_2)$  对于所有的  $i = 1, \dots, k$ , 成立, 并且至少存在一个  $j \in \{1, 2, \dots, k\}$  使得  $f_j(\mathbf{x}_1) < f_j(\mathbf{x}_2)$ , 则说  $\mathbf{x}_1$  支配(dominates)  $\mathbf{x}_2$ , 记为  $\mathbf{x}_1 \prec \mathbf{x}_2$ 。

### 4.3.3 Pareto 最优

最优的概念最先是由 Francis Ysidro Edgeworth 提出的, 后来法国经济学家 Pareto(帕累托)在 1896 年使其一般化。对于  $\mathbf{x}^* \in S$  ( $S$  代表可行域), 若不存在  $\mathbf{x} \in S, \mathbf{x} \neq \mathbf{x}^*$  使  $\mathbf{x} \prec \mathbf{x}^*$ , 则  $\mathbf{x}^*$  称为 Pareto 最优解(Pareto Optimum)或非支配解(Non-dominated Solution)或非劣解。用通俗的话说就是无法在改进任何目标函数的同时不削弱至少一个其他目标函数。

多目标问题的复杂性在于存在多个 Pareto 最优解, 多个 Pareto 最优解组成的集合称为 Pareto 解集。理论上来说, 我们的目的是找到所有的 Pareto 最优解, 但实际上决策者往往需要一个最终解直接指导生产, 从 Pareto 解集中产生一个最终解的过程称为决策(Decision Making), 做出决策的人称为决策者(Decision Maker)。

### 4.3.4 传统方法求解多目标规划问题

产生 Pareto 最优解集的经典方法将多个目标合成一个单独的, 带有参数的目标函数类似于在搜索前决策。在不同参数设置下的多次优化运行可以获得一个解集, 它近似于

Pareto 最优解集。这个过程独立于所用的优化算法。这一类技术中最有代表性的是加权方法，约束方法，目标规划，最小最大方法。下面我们主要讨论前两种方法。

#### 4.3.4.1 加权方法

最开始的多目标优化方法是将多个目标线性组合从而转化成单目标优化问题：

$$\begin{aligned} \text{Min } f(\mathbf{x}) &= \sum_{i=1}^k w_i \cdot f_i(\mathbf{x}) \\ \text{s.t. } \mathbf{x} &\in S \end{aligned} \quad (4.18)$$

$w_i$  是权值，满足  $\sum_{i=1}^k w_i = 1$ 。在不同权值组合下求解这个单目标优化问题就可以得到

一个解集。这种方法的缺点有两个：

- (1) 对于非凸 Pareto 面，它不能找到所有的 Pareto 最优解；
- (2) 需要计算多次，每次只能找到一个 Pareto 最优解。

#### 4.3.4.2 约束方法

这种方法对于凸的 Pareto 最优阵面，它将  $k$  个目标中的  $k-1$  个转化成约束。剩下的目标可以任意选择，这样也就转化成单目标优化问题。

$$\begin{aligned} \text{Min } f(\mathbf{x}) &= f_h(\mathbf{x}) \\ \text{s.t. } \mathbf{x} &\in S \\ e_i(\mathbf{x}) &= f_i(\mathbf{x}) \leq \varepsilon_i, i=1,2,\dots,k, i \neq h \end{aligned} \quad (4.19)$$

这种方法求出的解并不是真正意义上的 Pareto 最优解，取决于  $\varepsilon_i$  的取值，往往和实际问题有关。如果  $\varepsilon_i$  取得不合理可能得不到一个解。

求解多目标规划问题有好多种方法，但这些方法由于其自身的局限性使其应用效果不是很好，19 世纪 60 年代，Rosenberg 意识到进化算法求解多目标规划问题的优势，后来随着遗传算法的发展，遗传算法求解多目标规划问题受到越来越多的重视，出版刊物多达好几百种。进化算法特别适用于求解多目标规划问题，因为它的每次计算都能得到多个解，而不必计算多次。而且进化算法对 Pareto 解集的形状没有任何要求，完全弥补了传统方法的缺陷。

### 4.4 基于混合编码的 NSGA-II 算法

#### 4.4.1 NSGA-II 算法发展历程

遗传算法求解多目标规划问题最早追溯到 1984 年，David Schaffer 为了解决机器学

习的问题时提出了向量评估遗传算法(Vector Evaluated Genetic Algorithm, VEGA)<sup>[26]</sup>。

VEGA 是一种修改了选择机制的简单 GA。在每一代, 根据各个目标函数按比例完成选择, 生成多个子种群, 并在子种群上使用通常的交叉和变异操作, 然后将这些种群混合在一起, 形成新的种群。这种将所有个体混合起来的做法等价于将适应度函数线性加权求和, 只不过权重取决于当前世代; 同时, VEGA 也无法保证优良个体遗传到下一代。

1989 年, David Goldenberg 在分析了 VEGA 之后提出使用非劣最优排序(sorting)和选择机制使种群向多目标优化问题的 Pareto 前沿移动, 其思想是首先找出种群中非劣的解集, 赋予它们最高的秩(rank), 并将它们从下种群中删除; 再从剩余的种群中找出下一个非劣的解集, 并赋予它们次高的秩; 这一过程继续下去, 直到确定种群所有个体的秩才结束。Goldberg 也建议使用小生境(niche)技巧以防止收敛到单个 Pareto 解, 例如适应度共享方法(sharing method)允许 EA 个体都分布在 Pareto 前沿。尽管 Goldberg 没有实现实际的算法过程, 但后来建立的算法都受到这种思想的影响。

1993 年, 在 Goldenberg 理论的指导下, Carlos M. Fonseca 和 Peter J. Fleming 提出了多目标遗传算法(Multi-objective GA, MOGA)<sup>[27]</sup>。在 MOGA 中, 一个个体的秩等于当前种群中支配它的染色体数目, 所有非劣个体的秩均为 1(所有这样的个体适应度都相同, 以便能以相同的概率被选择使用), 而被支配的个体依据属于它们所在区域的种群密度被惩罚(适应度共享用于验证个体区域的拥挤程度)。适应度的分配方式如下: (a) 基于个体的秩将种群排序; (b) 利用线性或非线性的插值方法在最低序号(非劣最优个体)与最高序号( $\leq N$ )之间进行插值; (c) 具有相同序号的个体的适应值共享, 即通过除以相同序号的个体数得到新的适应值; 可以给不同序号的个体分配固定不变的适应值。MOGA 算法的主要优点是算法执行相对容易且效率高, 缺点是算法易受小生境大小影响, 但值得一提的是 Fonseca 与 Fleming 已经从理论上解决了小生境的大小的计算问题。

1994 年, Srinivas 和 Deb 提出了非劣排序遗传算法(Non-dominated sorting GA, NSGA)<sup>[28]</sup>。NSGA 基于 Goldberg 的建议对个体分类, 形成多个层次。在选择操作之前, 个体基于非劣最优进行排序。所有非劣的个体分为一类, 并引进决策向量空间的共享函数法, 保持种群的多样性。然后忽略这些已经分类的个体, 考虑另一层非劣的个体。这个过程一直持续, 直到将所有个体分类。由于在第一个 Pareto 前沿中的个体有最大的适应度, 因此它们被复制的机会更多。NSGA 的优点是优化目标个数任选, 非劣最优解分布均匀, 允许存在多个不同等效解; 缺点是由于 Pareto 排序要重复多次, 计算效率低, 计算复杂度为  $O(MN^3)$ (其中  $M$  为目标数量,  $N$  为种群大小), 而且共享参数  $\sigma_{share}$  需要预先确定, 还没有什么规律。

1995年, Horn, Nafploitis 和 Goldberg 提出了小生境遗传算法(Niched Pareto GA, NPGA)<sup>[29]</sup>。使用基于 Pareto 支配的锦标赛选择模式。算法的基本思想非常巧妙: 随机选择两个个体, 与来自种群的一个子集比较(典型地, 子集占整个种群的 10%), 若其中一个个体支配子集, 而另一个个体被子集支配, 则非劣个体获胜; 所有其它情况被视为平局(tie, 即互不支配)。当有平局存在时, 通过适应度共享确定锦标赛结果。因为该算法的非劣最优解选择是基于种群的部分而非全体, 所以其优点是能很快找到一些好的非劣最优解域, 并能维持一个较长的种群更新期; 缺点是除需要设置共享参数外, 还需要选择一个适当的锦标赛规模, 因而限制了该算法的实际应用效果。

1998, Zitzler and Thiele 提出 SPEA(Strength Pareto Evolutionary Algorithm)<sup>[30]</sup>, 首次提出并实现了精英保留策略。借助外部种群实现精英保留策略。在每一代, 将非劣个体复制到外部种群, 然后计算外部种群中每个个体的强度。这个强度值与支配个体的染色体数目成比例, 类似于 MOGA 中的排序值。在 SPEA 中, 当前种群个体的适应度值是按照外部种群中支配它的非劣解的强度之和计算的, 适应度值的计算同时考虑了接近真正 Pareto 前沿的程度和解的分布。SPEA 使用基于距离的小生境半径和 Pareto 支配, 确保解沿着 Pareto 前沿分布。但其效率依赖于外部种群非劣解的多少。事实上, 由于外部种群非劣解参与到了 SPEA 的选择过程中, 若其规模太大, 就会减小选择压力, 放慢收敛速度。作者采用了聚类技巧删除其中的个体, 从而使其大小限制在一定的门限之内。然而, SPEA 也有其不足之处, 具体表现是: 在选择压力非常低时, SPEA 几乎变成随机搜索; SPEA 使用聚类删除外部种群个体, 有可能丢失外部种群中的非劣解。

1999年, Joshua D. Knoweles 和 David W. Cone 提出 PAES(Pareto Archived Evolution Strategy)<sup>[31]</sup>。PAES 也采取了精英保留策略, 由 1+1 策略和历史档案组成, 后者记录了以前找到的那些非劣解。这个集合用作参考集合, 以便每个变异的个体与之比较。然而, 此算法一个有意义的方面是其通过排挤过程维持多样性的方法。排挤过程将目标空间以迭代方式划分, 每个解基于其目标值被放置在一个格子位置。因为这个过程是自适应的, 故不需要附加参数, 算法的计算复杂度为  $O(aMN)$ , 其中  $a$  为档案长度,  $M$  为目标数目,  $N$  为种群大小。

2002年, K. Deb 提出了 NSGA-II<sup>[32]</sup>, 是 NSGA 的改进版本。在 NSGA-II 中, 对每个解来说, 需要确定多少解支配它和它支配的解集。NSGA-II 需要估计围绕着种群中一个特定解的解拥挤度, 即沿着问题的每个目标计算两个解之间的平均距离, 这个值被称为拥挤度(crowding distance)。在选择期间, NSGA-II 密集比较算子既考虑种群中个体的非劣解秩, 也考虑拥挤度。也就是说, 优先选择非劣解; 但当两个解具有相同的非劣

解秩时,则选择那个不处于拥挤距离区域内的解。与前面那些算法的精英保留策略使用外部种群不同,NSGA-II的精英保留策略使用 $(\mu+\lambda)$ 选择,包含了最好的父代和子代个体。正是这种机制使新一代种群比前一代种群更有效,效果更好,是现在应用效果最好的算法,并成为许多其他MOEA的比较对象。

非劣排序和精英保留策略使多目标遗传算法前进了一大步,但是仍有一些问题亟需解决,包括:

- (a) 各种多目标遗传算法的对比分析;
- (b) 收敛到 Pareto 前沿的理论分析;
- (c) 两个种群对比的度量;
- (d) 如何构造测试函数或发展理论证明有效性;
- (e) 如何有效应用到实际当中。

迄今为止,印度学者 K. Deb 的 NSGA-II 算法应用是最成功的,不仅经过了很多复杂测试函数的测试<sup>[33]</sup>,而且在同其它算法的对比中表现出优秀的快速收敛性和多样性。首先详细介绍一下 NSGA-II 的思想和实现方法。NSGA-II 是针对 NSGA 的三个缺点改进的,NSGA 的缺点:

- (a) 计算复杂度较高,为  $O(MN^3)$ ( $M$  为目标函数个数,  $N$  为种群大小),所以当种群较大时,计算相当耗时;
- (b) 没有精英保留策略;
- (c) 需要指定共享半径  $\sigma_{share}$ 。

NSGA-II 提出了:

- (a) 提出了快速非支配排序法,降低了算法的计算复杂度。由原来的  $O(MN^3)$  降到  $O(MN^2)$ ;
- (b) 提出了拥挤度和拥挤度比较算子,代替了需要指定共享半径的适应度共享策略,并在快速排序后的同级比较中作为胜出标准,使准 Pareto 域中的个体能扩展到整个 Pareto 域,并均匀分布,保持了种群的多样性;
- (c) 引入精英保留策略,扩大采样空间。将父代种群与其产生的子代种群组合,共同竞争产生下一代种群,有利于保持父代中的优良个体进入下一代,并通过对种群中所有个体的分层存放,使得最佳个体不会丢失,迅速提高种群水平。

#### 4.4.2 混合编码 NSGA-II 算法的提出

NSGA-II 算法经受了太多测试函数的考验,被证明是有效的。但是这些测试函数都

是连续空间的,并没有涉及到混合离散空间,而基于经济指标的电弧炉供电模型决策变量中既有连续的也有离散的,如何把成功的算法经过适当的调整从而应用到电弧炉模型中是本节的任务。

既然遗传算法有二进制编码处理离散变量,实数编码处理连续变量<sup>[34]</sup>,就可以使用混合编码同时处理离散变量和连续变量<sup>[35]</sup>,混合编码 NSGA-II 算法就是使用混合编码的 NSGA-II 算法。混合编码的编码空间包括两部分,一部分为实数编码空间,一部分为二进制编码空间,设决策变量为  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_i, x_{i+1}, \dots, x_n)^T$ , 其中前  $i$  个分量为连续的,从第  $i+1$  到最后为离散变量。则

实数编码空间为:

$$S_r = (x_1, \dots, x_i) \tag{4.20}$$

二进制编码空间为:

$$S_l = \{\{x_{i+1}^1, x_{i+1}^2, \dots, x_{i+1}^l\}, \{x_{i+2}^1, x_{i+2}^2, \dots, x_{i+2}^l\}, \dots, \{x_n^1, x_n^2, \dots, x_n^l\}\}, x_k^j \in \{0, 1\} \tag{4.21}$$

二进制编码长度为  $L = \sum_{i=1}^n l_i$ , 其中每一个离散变量的编码长度  $l_i$  取决与变量的范围。

选择、交叉和变异算子分别在实数编码空间和二进制编码空间进行。

### 4.4.3 混合编码 NSGA-II 算法的实现

#### (1) 快速非支配排序(Fast Non-dominated Sorting)

对于种群  $P$  中每个个体  $i$  都设有以下两个参数  $n$  和  $S$ ,  $n$  为在种群中支配个体  $i$  的解个体的数量,  $S$  为被个体  $i$  所支配的解个体下标的集合。首先,找到种群中所有  $n_i = 0$  的个体,将它们存入当前集合  $F_1$ , 然后对于  $F_1$  中的每个个体  $j$ , 考察他所支配的个体集合  $S_j$ , 将集合  $S_j$  中的每个个体  $k$  的  $n_k$  减 1, 即支配个体  $k$  的解个体数减 1(因为支配个体  $k$  的个体  $j$  已经存入当前集  $F_1$ ), 如果  $n_k - 1 = 0$  则将个体  $k$  存入另一个集合  $F_2$ , 一直进行下去直到所有的个体的  $n = 0$ , 这时  $F_1$  构成第一级非支配个体集合,  $F_2$  构成第二级非支配个体集合, 以此类推。最后赋予每个个体一个秩  $rank$ , 其值大小为个体集合  $F$  的下标。

算法伪码如下: `fast_non_dominated_sort(P)`

```

for each  $p \in P$ 
     $S_p = \phi$ 
     $n_p = 0$ 
    for each  $q \in P$ 
        if ( $p < q$ ) then
             $S_p = S_p \cup \{q\}$ 
        else if ( $q < p$ ) then
             $n_p = n_p + 1$ 
    if  $n_p = 0$  then
         $p_{rank} = 1$ 
         $F_1 = F_1 \cup \{p\}$ 
 $i = 1$ 
while  $F_i \neq \phi$ 
     $Q = \phi$ 
    for each  $p \in F_i$ 
        for each  $q \in S_p$ 
             $n_q = n_q - 1$ 
            if  $n_q = 0$  then
                 $p_{rank} = i + 1$ 
                 $Q = Q \cup \{q\}$ 
     $i = i + 1$ 
     $F_i = Q$ 
    
```

(2) 确定拥挤度(Crowding Distance Assignment)

种群中第  $i$  个个体的拥挤度用  $i_{distance}$  表示, 是一个反应个体分布密度的量。计算方法:

```

crowding_distance_assignment( $I$ )
 $l = size(I)$ 
for each  $i$ , set  $I[i]_{distance} = 0$ 
for each objective  $m$ 
     $I = sort(I, m)$ 
     $I[0]_{distance} = I[l-1]_{distance} = \infty$ 
    for  $i = 1$  to  $l-2$ 
         $I[i]_{distance} = I[i]_{distance} + (I[i+1].m - I[i-1].m) / (f_m^{max} - f_m^{min})$ 
    
```

其中  $I$  表示秩相同的个体的集合,  $I[i].m$  表示集合  $I$  中的第  $i$  个个体的第  $m$  目标函数的值。  $f_m^{max}$  和  $f_m^{min}$  表示第  $m$  目标函数的最大值和最小值。此算法的复杂度取决于排序算法的  $sort(I, m)$  的复杂度, 所以此算法的复杂度为  $O(MN \log_2 N)$ 。

(3) 拥挤度比较算子

拥挤度比较算子( $\prec_n$ )引导着遗传算法的选择进程,用来比较两个个体的优劣,对于个体  $p$  和  $q$  定义  $p \prec_n q$  为:  $\{p_{rank} < q_{rank} \cup (p_{rank} = q_{rank} \cap p_{distance} > q_{distance})\}$ 。

NSGA-II 通过定义个体的秩和拥挤度来比较任意两个个体,可以有效指导遗传算法的选择算子(由于 NSGA-II 使用锦标赛选择,所以只需知道任意两个个体的优劣即可)。

(4) 算法主流程

首先随机初始化种群  $P_0$ , 并对其快速非支配排序, 确定每个个体的秩和拥挤度, 然后采用规模为 2 的锦标赛选择, 模拟二进制交叉和模拟二进制变异产生子代  $Q_0$ , 之后采用精英保留策略产生下一代种群  $P_1$ , 以此类推直到进化完成。

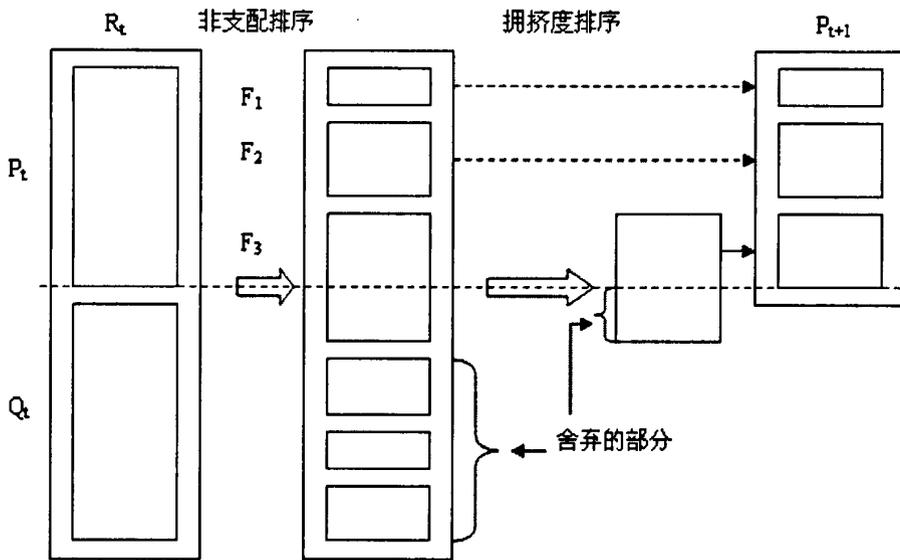


图 4.3 NSGA-II 流程

Fig. 4.3 NSGA-II procedure

由上图还可以看出精英保留策略的实现过程。通过父代和子代一起排序然后选择实现了精英保留策略。

(5) 约束处理机制

定义个体  $p$  的约束违反度  $p_{cons\_viol}$  为:

$$p_{cons\_viol} = \sum_{i=1}^m \frac{Max[0, g_i(\mathbf{x})]}{g_{i,max} - g_{i,min}} \tag{4.22}$$

对约束的处理主要影响到个体的比较, 由于 NSGA-II 采用竞赛规模为 2 的锦标赛选

择,所以只要在定义在约束框架下个体的比较运算即可。

定义个体 $p$ 约束支配个体 $q$ ,当满足下面任何一个条件时:(a)个体 $p$ 在可行域中,个体 $q$ 不在可行域中;(b)个体 $p$ 和个体 $q$ 都不在可行域中,但个体 $p$ 有更小的约束违反度;(c)个体 $p$ 和个体 $q$ 都在可行域中, $p \prec_n q$ 。

## 4.5 本章小结

本章针对电弧炉供电模型求解难点提出了面向约束处理的遗传算法和混合编码的NSGA-II算法,详细介绍了两种算法的原理和实现过程,为电弧炉供电曲线的优化做好了准备。

## 第5章 电弧炉供电曲线的制定及应用

本章以上海某钢厂 3#电弧炉为例,首先应用面向约束处理的遗传算法和混合编码的 NSGA-II 算法求解基于经济指标的电弧炉供电模型, 然后进行仿真结果对比分析, 证明模型和算法的有效性, 最后针对现场电弧炉控制系统结构设计实现优化软件。

### 5.1 运行参数

表 5.1 3# 电弧炉变压器参数

Table 5.1 The transformer parameters of No.3 EAF

变压器档位	一次侧电压 kV	一次电流 A	二次电压 V	二次电流 A	负载损耗 (KW)	短路阻抗 %
1	35	412	570	25320	198.000	7.520
2	35	412	550	26245	206.125	8.190
3	35	412	530	27235	214.250	8.860
4	35	412	510	28300	222.375	9.530
5	35	412	490	29455	230.500	10.200
6	35	412	470	30710	228.550	11.192
7	35	412	450	32075	226.600	12.184
8	35	412	430	33565	224.650	13.176
9	35	393	410	33565	222.700	14.168
10	35	374	390	33565	220.750	15.160
11	35	355	370	33565	218.800	16.152
12	35	336	350	33565	216.850	17.144

表 5.2 3# 电弧炉电抗器参数

Table 5.2 The reactor parameters of No.3 EAF

额定容量		5600Kvar			
额定电流		412.4A			
电抗器总损耗		48KW			
档位	1	2	3	4	5
压降(V)	4666	4172	3400	2573	0

表 5.3 3# 电弧炉技术资料

Table 5.3 Technical data of No.3 EAF

短网电阻	0.7mΩ	钢水重量	40t	
短网电抗	1.84 mΩ	固定热损失	3.2MW	
电极侧面到炉壁 最短距离	100cm	工艺热耗	300KW·h/t	
最大允许功率因数	0.866	最大侵蚀指数 Re kW.V/cm <sup>2</sup>	点弧期	末期
二次料装料时间	10 分钟		350	450

运行电抗模型采用式(2.12):  $X_{op} = X_d \cdot (121.8 \cdot e^{-0.0002911I} + 5.699 \cdot e^{-4.519e-005I})$ ;

表 5.4 遗传算法运行参数

Table 5.4 parameters of GA

参数	面向约束处理的遗传算法	混合编码的 NSGA-II
种群规模 M	50	50
交叉概率 p <sub>c</sub>	0.9	0.9
变异概率 p <sub>m</sub>	0.01	0.01
进化代数 T	300	300
编码	实数编码	混合编码
选择算子	轮盘赌选择	竞赛规模为 2 的锦标赛选择
交叉算子	算术交叉	模拟二进制交叉 η <sub>c</sub> =20
变异算子	非均匀算术变异	模拟二进制变异 η <sub>m</sub> =20

## 5.2 优化程序的实现

优化程序由 C++语言实现, 在 Microsoft Visual Studio2008 环境下编译通过, 输出各代数数据到记事本中, 然后通过 Matlab 2008Ra 画图。

### 5.2.1 类的实现

考虑到程序的可扩展性和易维护性, 从功能上分为四个类:

#### (1) 电弧炉类(CEAF)

负责电弧炉参数的输入以及运行电气特性的计算。根据物理电弧炉电气特性, CEAF 包括的类属性有变压器(transformer)、电抗器(reactor)、短网(circuit)、电极(electrode)和

工艺参数(technics),这五大部分的数据类型都是自定义的结构体,结构体的成员反应实际的物理组成。类成员函数包括计算电弧功率(ArcPower)、功率损失(PowerLoss)、功率因数(PowerFactor)、炉衬侵蚀指数(ABI)、运行电抗(OperationImpedance)等一些在第二章提及的电气特性。总之 CEAF 是把电弧炉的电气特性做了封装,类属性是不可见的,而用户只能调用成员函数,优点是修改方便和封装性带来的安全。

### (2) 环境类(CEnvironment)

负责遗传算法运行参数的输入和随机数的产生。是遗传算法运行环境的模拟。包括的类属性有种群规模(pop\_size)、交叉概率(p\_crossover)、变异概率(p\_mutation)、目标函数的个数(n\_objective)、约束的个数(n\_constraint)、变量的个数(n\_variable)等。类成员函数包括产生随机数(Rand)、计算目标函数值(ObjectiveFunction)、计算约束值(ConstraintFunction)。CEnvironment 的名字和它的功能是一致的,是遗传进化的环境,遗传算法只有在此环境下才能一代一代的进化,就像人与自然、鱼与水的关系一样。

### (3) 个体类(CIndividual)

负责遗传算法中个体行为的描述。从遗传算法的理论抽象出个体的行为,包括编码、基因值、适应度等。类属性包括实数编码(x\_val)、二进制编码(genes)、约束(cons\_val)、秩(rank)、约束违反程度(cons\_viol)、拥挤度(crowd\_dist)等。类成员函数包括判断是否满足约束(IsFeasible)、比较大小(CrowdedComparison)、计算约束违反度(CalculateConstraintViolation)等。个体只有在种群中才有意义,有些量比如秩和拥挤度只有在种群中才能计算其大小。

### (4) 种群类(CPopulation)

负责遗传算法群体行为的描述。由多个个体组成,可以看成是一个个体向量,实际上,算法中也是这么实现的。类属性包括一个个体的向量 indi,是向量型的 vector<CIndividual>。类成员函数包括初始化种群(ComeIntoBeing)、选择(selection)、交叉(crossover)、变异(mutation)、排序(FastNondominatedSort)、计算拥挤度(CrowdingDistanceAssignment)等。有些方法是重载的,像交叉变异,因为实际中有好多交叉变异的方法。

### (5) 主函数

类的对象交互作用的地方,主要是种群类对象和环境类对象,因为种群中的个体需要不断调用目标函数和约束函数得到基因值。而环境类对象仅保存了目标和约束的指针,所以最终调用的是电弧炉类对象的方法。还有一部分功能就是输出遗传算法运行数据到文件中,用来在 Matlab 环境下画出直观的进化趋势图。

### 5.2.2 类关系

类之间的关系越简单越好，使程序的维护性和可修改性增强，而且可以对每个类单独测试。所以设计的四个类中，有三对关系如图(5.1)：

(1) 环境类对电弧炉类的依赖关系，用带箭头的虚线表示。环境中的成员函数计算目标值和约束值用到了电弧炉类的成员函数。而电弧炉类是独立的，不依赖于别的类而存在；

(2) 种群类对个体类的包容关系，用实心菱形加实线表示。表示种群是由个体组成的，同时个体不能脱离种群而存在，是一对多的关系。犹如人不能脱离自然而存在，鱼不能脱离水而存在。同时个体是组成种群的因素；

(3) 种群类对环境类的依赖关系，用带箭头的虚线表示。种群进化的参数和随机数的产生都是从环境类中得到的。

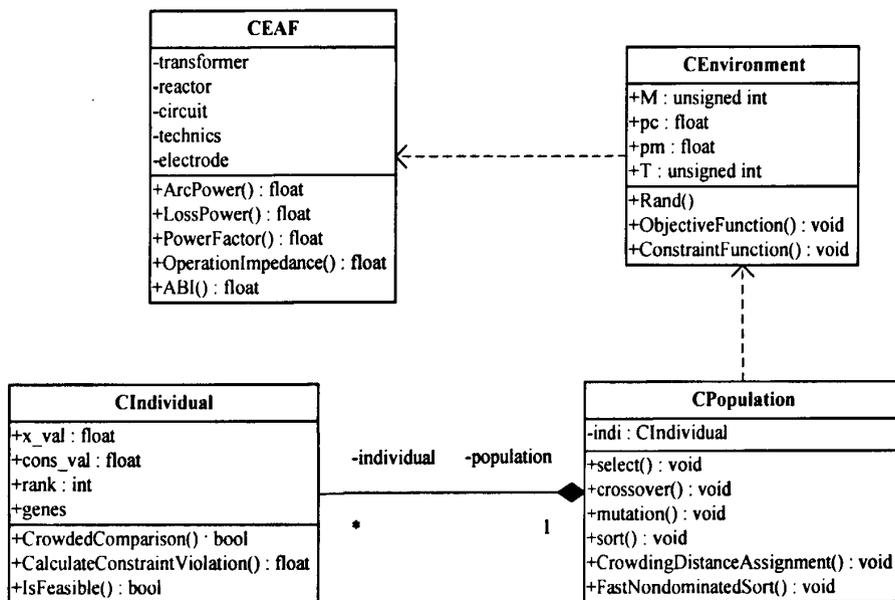


图 5.1 类关系

Fig. 5.1 relationship between classes

## 5.3 优化结果对比分析

### 5.3.1 面向约束处理的遗传算法求解

把模型(3.33)的三个目标变为单目标  $Min J = (b + p_{ec} / p_e \cdot ec) \cdot t$ ，其中  $p_e$  代表电能的价格， $p_{ec}$  代表石墨电极的价格，这里取  $p_{ec} / p_e = 20$ 。约束不变，用面向约束处理的遗

传算法求解，遗传算法运行参数如表 5.4。结果如下：

表 5.5 CHGA 优化结果(第一次加料)

Table 5.5 Results of CHGA (the first charging)

阶段	变压器档 位	电抗器档 位	工作电流 (A)	电弧功率 (KW)	功率因数	侵蚀指数	持续时间 (min)
点弧	9	2	26764	15566	0.86	282	4.4
穿井上升	4	1	25319	19814	0.86	495	32.5
熔化末了	7	1	24581	17084	0.86	342	10.4

表 5.6 CHGA 优化结果(第二次加料)

Table 5.6 Results of CHGA(the second charging)

阶段	变压器档 位	电抗器档 位	工作电流 (A)	电弧功率 (KW)	功率因数	侵蚀指数	持续时间 (min)
点弧	10	1	30175	13998	0.86	241	1.7
穿井上升	2	1	30235	21592	0.86	525	9.8
熔化末了	7	2	31889	18156	0.84	352	9.6

三个目标值随着进化的进行有逐渐减小的趋势，变化规律图为：

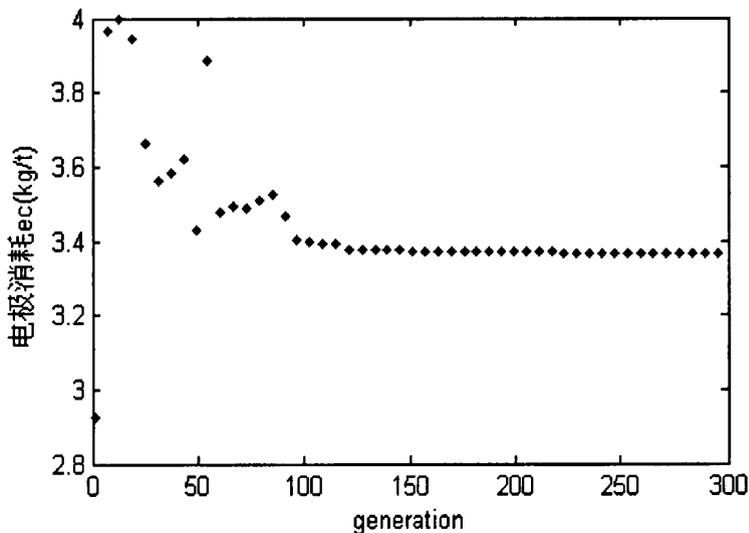


图 5.2 电极消耗和进化代数的关系

Fig. 5.2 relationship between electrode consumption and evolution generation

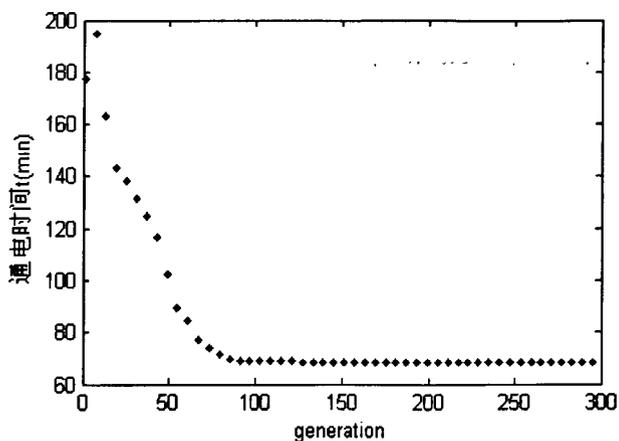


图 5.3 通电时间和进化代数的关系

Fig. 5.3 relationship between smelting time and evolution generation

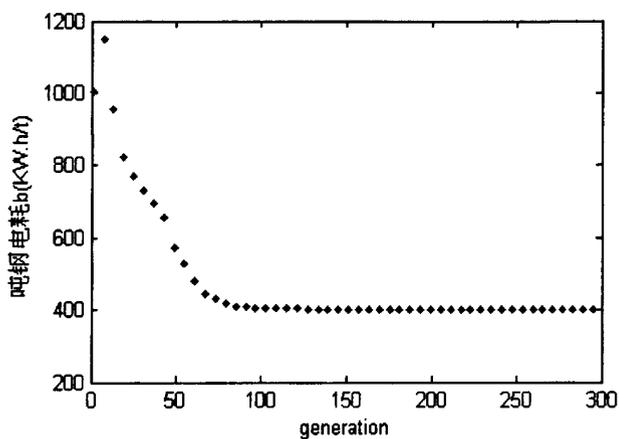


图 5.4 吨钢电耗和进化代数的关系

Fig. 5.4 relationship between power consumption per ton steel and evolution generation

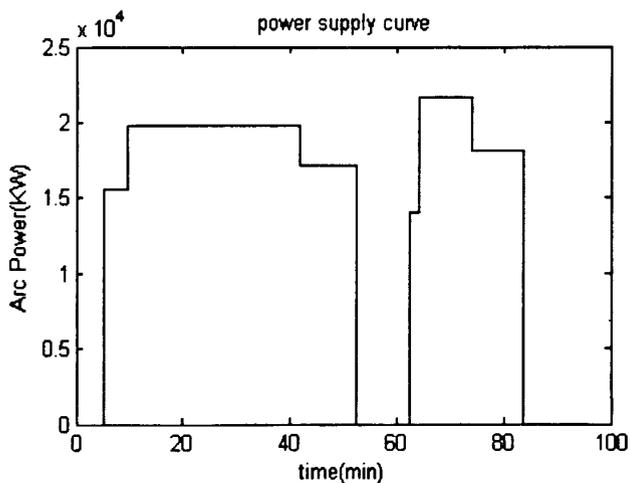


图 5.5 供电曲线

Fig. 5.5 power supply curve

图 5.5 为最后得到的供电曲线,总的通电时间  $t=68.4$  分钟,吨钢电耗  $b=399.4\text{KW}\cdot\text{h}/\text{t}$ ,电极消耗  $ec=3.37\text{kg}/\text{t}$ 。

### 5.3.2 混合编码的 NSGA-II 求解

直接用混合编码的 NSGA-II 算法求解模型(3.33),运行参数如表 5.4。多目标解法和单目标解法有一点不同就是多目标求出来有多个协调解,各个协调解之间无法比较优劣,只能通过决策者决定,取决于决策者更偏重于那个目标。取进化最后一代的个体画图如下:

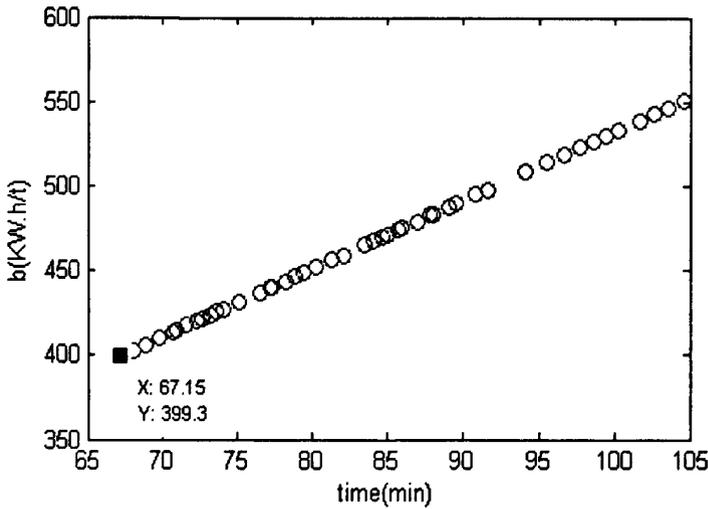


图 5.6 吨钢电耗和通电时间

Fig. 5.6 relationship between power consumption per ton steel and smelting time

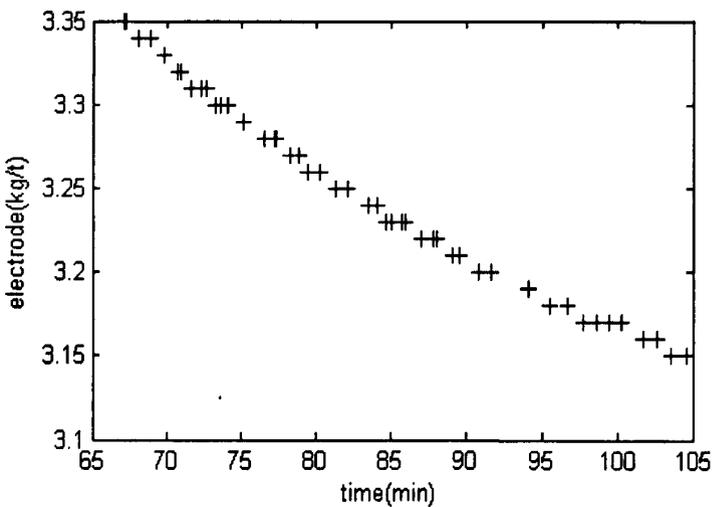


图 5.7 通电时间和电极消耗

Fig. 5.7 relationship between smelting time and electrode consumption

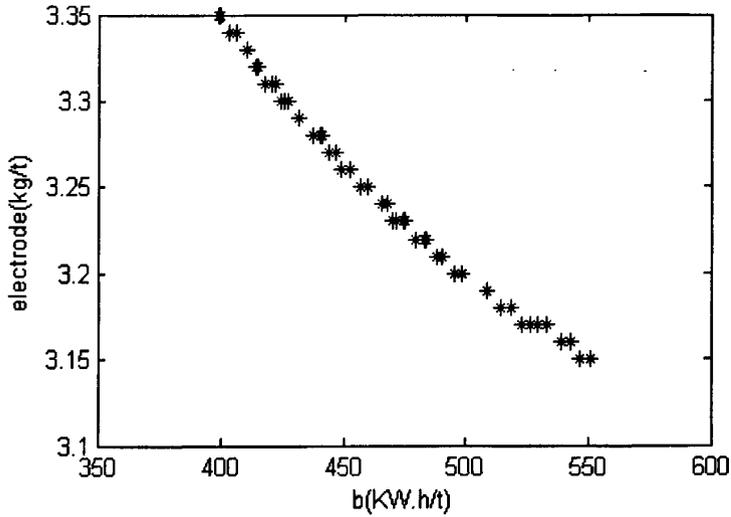


图 5.8 吨钢电耗和电极消耗

Fig. 5.8 relationship between power consumption per ton and electrode consumption

决策者可以根据实际情况从 Pareto 解集中选取最优解，这里取冶炼时间和吨钢电耗最小为最优解，得到：

表 5.7 混合编码 NSGA-II 优化结果(第一次加料)

Table 5.7 Results of mixed coded NSGA-II(the first charging)

阶段	变压器档 位	电抗器档 位	工作电流 (A)	电弧功率 (KW)	功率因数	损蚀指数	持续时间 (min)
点弧	11	1	26414	12932	0.86	211	5.7
穿井上升	3	1	28787	20691	0.85	495	30.9
熔化未了	7	2	29484	17705	0.85	354	10.2

表 5.8 混合编码 NSGA-II 优化结果(第二次加料)

Table 5.8 Results of mixed coded NSGA-II (the second charging)

阶段	变压器档 位	电抗器档 位	工作电流 (A)	电弧功率 (KW)	功率因数	损蚀指数	持续时间 (min)
点弧	9	2	28936	15639	0.86	281	1.5
穿进上升	3	2	30352	21691	0.85	517	9.7
熔化未了	5	1	28801	18982	0.84	417	9.2

供电曲线为：

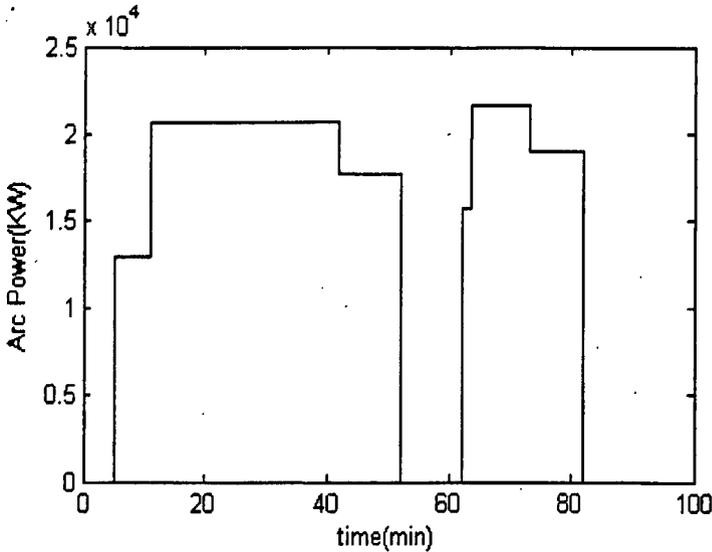


图 5.9 供电曲线

Fig. 5.9 power supply curve

总时间  $t=67.2$  分钟, 吨钢电耗  $b=399.3\text{KW}\cdot\text{h}/\text{t}$ , 电极消耗  $e_c=3.35\text{kg}/\text{t}$ 。

### 5.3.3 结果对比分析

面向约束处理的遗传算法求解供电模型得到唯一最优解, 而混合编码的 NSGA-II 算法得到了多个 Pareto 解, 第一种方法实质是求解单目标问题, 求解之前需要把多目标化为单目标, 对于能简单加权的多目标问题, 需要确定加权因子, 而对于不能简单加权的目标处理起来比较困难; 而第二种方法是完全针对多目标的优化算法, 不需要对目标进行处理, 不需要确定加权因子, 所以使用起来更方便。

同传统的分段供电模型制定供电曲线相比, 基于经济指标的电弧炉综合供电模型增加了决策变量的维数, 一定程度上增加了算法的执行时间, 但是只需要一次计算便可得到整个冶炼过程的变压器档位、电抗器档位和电弧电流, 还计算出了各个阶段进行的时间, 所以总的来说执行时间的延长是可以接受的。

基于经济指标的电弧炉供电模型充分考虑了冶炼的整体过程, 两次加料的可调量也有所不同, 而分段模型两次加料的供电策略是一样的, 从这个意义上看, 分阶段最优的确不代表整体最优, 而把分阶段最优直接应用到整个过程可能会造成一定的偏差。所以总的来说本文的综合供电模型更接近实际的生产过程。

## 5.4 优化软件的设计

优化软件的作用是把优化算法应用到电弧炉冶炼过程中, 指导实际生产。为了把本

文实现的电弧炉供电优化算法应用到实际中需要设计实现优化软件。从结构上说，优化软件除了实现优化计算的功能外，还要实现和画面机数据的传送和接收、现场数据的采集、运行电抗模型的回归以及用户参数的设定等人机交互功能。

### 5.4.1 控制系统结构

优化功能的实现是和整个控制系统的结构分不开的，控制系统包括电弧炉炼钢的底层控制、电极控制、画面监控、优化设定、传送数据。典型的系统结构如图 5.10 所示。两台画面机的作用是监控 PLC 的运行状态，优化机是实现优化功能，三级服务器是用来接收生产数据的。

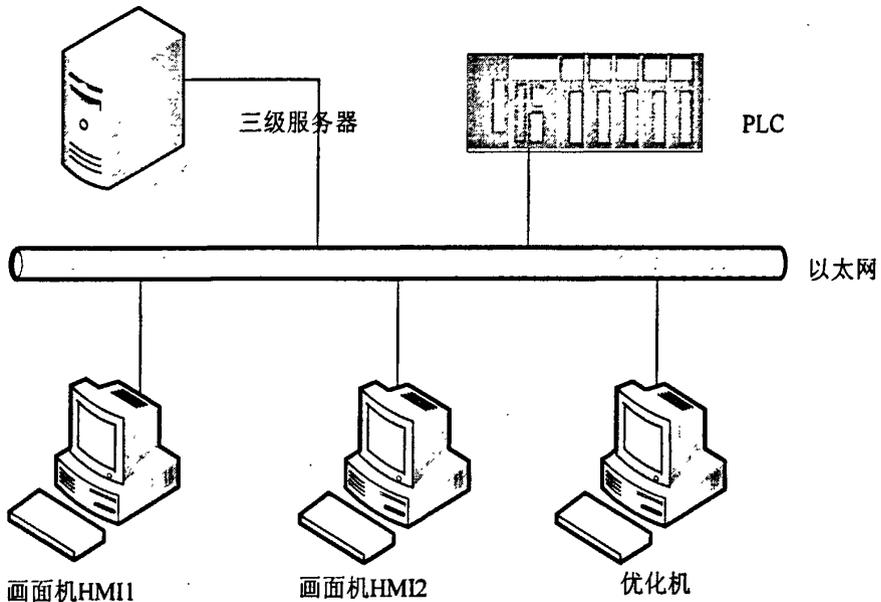


图 5.10 系统结构

Fig. 5.10 Architecture of control system

### 5.4.2 软件功能实现

优化软件根据功能分为五个子模块，如图 5.11 所示，箭头代表数据流向。

(1) 数据传送模块。优化算法的计算结果通过以太网传送到画面机上，画面机根据设定来控制 PLC 运行。这里画面的监控程序使用 WinCC 实现的，而第三方软件同 WinCC 的通信一般采用 OPC 的方式；

(2) 数据接收模块。接收来自画面机的运行数据，进而可以回归电抗模型；

(3) 优化计算模块。采用优化算法计算结果；

(4) 参数输入模块。输入变压器电抗器等参数供优化模块使用；

(5) 数据存储模块。负责参数数据的存取以及一些过程运行数据、报表数据的存取。

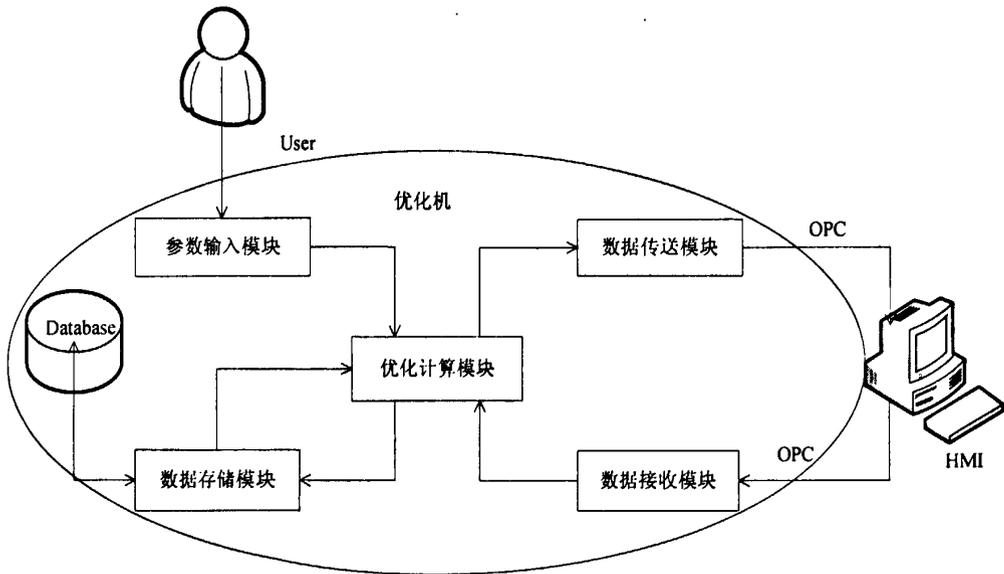


图 5.11 优化软件数据流向

Fig. 5.11 Data flow of optimization software

## 5.5 本章小结

本章以上海某钢厂电弧炉为例，结合第二章回归出来的运行电抗模型运用面向约束处理的遗传算法和混合编码的 NSGA-II 算法对基于经济指标的电弧炉供电模型进行了优化求解。

面向约束处理的遗传算法把焦点放到了对约束的处理上，而对模型的多目标采用化为单一经济效益目标的方法。由于化为了单目标问题优化所以得到了单一的解。而混合编码的 NSGA-II 算法是一种直接求解多目标规划问题的算法，不需要把多目标化为单目标，优化结果得到了 Pareto 解集，包含多个 Pareto 解。剩下的任务需要决策者从 Pareto 解集中挑选一个最适合生产实际的解，也就是说，决策者需要权衡各个目标的重要性进而得到单一的指导实际生产的设定值。

同分阶段供电模型优化得到的结果相比，优化基于经济指标的电弧炉供电模型只需计算一次便得到了各个阶段的可调量，而且也得到了各个阶段的时间。

优化软件是连接理论和实践的桥梁，不仅可以验证模型和算法的有效性而且可以真正把实验室的想法应用到工业实际中提高生产效率。反过来，随着优化软件在工业中的重要性日益提高才会进一步激励算法的研究。本章根据实际控制系统体系结构设计实现了优化软件，拉近了理论和实践的距离。

之所以尝试采用多目标求解的算法，是因为随着工业实际过程的复杂程度越来越

高，很多过程优化都归结为多目标优化，而许多问题的目标不能简单的通过某种方式而组合成单目标优化问题，所以把 NSGA-II 算法应用到工程实际当中具有重要的意义。

## 第6章 总结与展望

本文研究了电弧炉供电模型以及优化求解的问题,旨在应用现代优化理论与方法解决工程中的实际问题,为缩短理论研究与工程实践的差距做了一些有益的尝试。主要成果归纳如下:

### (1) 回归了电弧炉非线性电抗模型。

由于电弧的非线性特性导致电弧炉主电路的电抗和短路试验所得到的电抗存在一定的差别,原则上应该充分考虑电弧的机理模型进而得到整个主回路的电抗模型,但电弧是一种等离子体现象,其本身的机理复杂,学术界仍没有一个定论,现存的电弧模型由于过于复杂使其应用受到限制。为了简化问题,本文根据现场数据对常用的非线性电抗回归模型进行了回归分析,虽然和机理模型有一定差别但由于其原理简单应用起来会很方便。

### (2) 建立了基于经济指标的电弧炉供电模型。

电弧炉供电优化的目的就是提高电弧炉炼钢的经济效益,所以建立优化目标和决策变量的关系是优化模型的根本。依据电弧炉炼钢过程电热特性和能量流动规律导出了决策变量和优化目标的关系,把炼钢设备的限制归结为优化模型的约束条件,从而形成了基于经济指标的电弧炉供电模型。与目前流行的分段供电模型的相比,本文所建立的模型代表整个冶炼过程的能量需求,把炼钢工艺中的各阶段统一起来,同时可以得到各阶段所用时间,理论上说分阶段最优不一定代表整体最优,所以本文的优化模型具有一定的理论意义。

### (3) 提出了面向约束处理的遗传算法和混合编码的 NSGA-II 算法。

针对供电模型的多目标、非线性、混合整数性、带约束等难点,充分考虑了传统优化方法和遗传算法求解此类问题的优势和不足,本文认为遗传算法更有优越性,在基本遗传算法的框架下,提出了面向约束处理的遗传算法和混合编码的 NSGA-II 算法对模型进行优化求解。两种方法分别从不同方面解决了求解模型的难点,前者注重对约束的处理,而后者把中心放在对多目标和混合整数变量的处理上。

### (4) 用 C++ 实现了优化算法。

高级语言在实现底层优化算法时具有很大的优越性和灵活性,所以本文采用当今流行 C++ 语言来实现面向约束处理的遗传算法和混合编码的 NSGA-II 算法,所用的编译环境是 Microsoft Visual Studio 2008。详细介绍了类的设计实现过程和类之间的关系。

### (5) 设计实现了优化软件。

如何把算法应用到实践中是提高效益的关键，在电弧炉控制系统的基础上，设计了优化软件的功能结构。

虽然本文在电弧炉供电优化上做了一些有益的尝试，但由于对电弧炉工艺过程的了解有限，电弧炉的供电模型无法有效的和工艺过程结合，造成了理论和实际应用的脱节，在以后的研究中，应该在满足工艺的前提下建立供电模型并优化求解。在求解算法上，遗传算法被证明是有效的，然而其所用时间也应该考虑在内，如何缩短算法的求解时间也是一个值得研究的方向。

有理由相信，在专家学者的不懈努力下，随着理论研究和生产实践的不断深入，电弧炉供电优化必定能为企业带来巨大的经济效益，为国家节约大量能源。

## 参考文献

1. 傅杰. 电弧炉炼钢技术发展历史分期问题[J], 钢铁研究学报, 2006, 18(5): 1-4.
2. 沈才芳, 孙社成, 陈建斌. 电弧炉炼钢工艺与设备[M], 北京: 冶金工业出版社, 2005, 16-86.
3. 袁平. 电弧炉冶炼过程先进控制方法的研究与应用[D], 辽宁沈阳: 东北大学, 2005.
4. 刘冰, 曹立国, 孙彦辉等. 高阻抗电弧炉合理供电技术研究[J], 钢铁, 2005, 40(10): 35-37.
5. 袁平, 王福利, 毛志忠. SR 电弧炉熔化期供电优化模型[J], 东北大学学报(自然科学版), 2005, 26(10): 930-933.
6. 李京社, 武骏, 李士琦等. 交流电弧炉的工作电抗模型与电气运行合理化[J], 炼钢, 1999, 15(6): 40-43.
7. 李晓妍. 电弧炉最佳供电曲线的制定与优化[D], 辽宁沈阳: 东北大学, 2005.
8. 徐迎铁, 王新江, 傅杰. 现代电弧炉冶炼能量结构模型[J], 钢铁, 2005, 40(4): 35-38.
9. 秦勤. 电弧炉电能单耗分析[J], 工业加热, 2004, 33(2): 12-15.
10. 高荣庆. 莱钢 50t UHP 电弧炉能量平衡分析[J], 特殊钢, 2003, 24(1): 51-52.
11. U. Camdli, M. Tunc, A. Karakas. Second law analysis of thermodynamics in the electric arc furnace at a steel producing company [J], Energy Conversion and Management, 2003, 44: 961-973.
12. I. Ekmekci, Y. Yetisken, U. Camdali. Mass balance modeling for electric arc furnace and ladle furnace system in steelmaking facility in Turkey [J], Journal of Iron and Steel Research, 2007, 14(5): 1-6.
13. 花皑, 吴培珍. 高阻抗电弧炉主电路的设计[J], 工业加热, 2005, 34(6): 38-39.
14. M. F. Yeo, E. O. Agyei. Optimizing engineering problems using genetic algorithms [J], Engineering Computations, 1998, 15(2): 268-280.
15. 王登刚, 刘迎曦, 李守巨. 求解一类非线性规划问题的混合遗传算法[J], 上海交通大学学报, 2003, 37(12): 1953-1956.
16. Thomas Hanne. Global Multiobjective Optimization Using Evolutionary Algorithms [J],

- Journal of Heuristics, 2000, 6: 347-360.
17. Mohan C Joshi, Kannan M Moudgalya. Optimization Theory and Practice [M], Harrow, U.K.: Alpha Science International Ltd., 2004, 188-189.
  18. 唐加福, 汪定伟. 一种求解非线性规划问题的改进遗传算法[J], 东北大学学报(自然科学版), 1997, 18(5): 490-493.
  19. 王跃宣, 刘连臣, 牟盛静, 吴澄. 处理带约束的多目标优化进化算法[J], 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(1): 103-106.
  20. 何大阔. 精苯精馏过程稳态建模及塔系操作优化的研究[D], 辽宁沈阳: 东北大学, 2002.
  21. 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现[M], 陕西西安: 西安交通大学出版社, 2004, 1-3.
  22. 余有明, 刘玉树, 阎光伟. 遗传算法的编码理论与应用[J], 计算机工程与应用, 2006: 86-89.
  23. 张丽. 实数性遗传算法的研究[J], 森林工程, 2005, 21(6): 50-52.
  24. K. Deb, R. Afrawal. Simulated binary crossover for continuous search space [J], Complex system, 1995, 9: 115-148.
  25. 王秀峰. 实数编码的遗传算法及其在逆变器馈电交流电机中的应用[J], 自动化学报, 1998, 24(2): 250-253.
  26. Carlos A. Coello Coello. Guest editorial: Special issue on evolutionary multiobjective optimization [J], IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2003, 7(2): 97-98.
  27. C. Fonseca, P. Fleming. Genetic algorithms for multi-objective optimization: Formulation, discussion and generalization [J], Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms, Morgan Kauffman, San Mateo, California, 1993, 416-423.
  28. N. Srinivas, K. Deb. Multiobjective function optimization using nondominated sorting genetic algorithms [J], Evolutionary Computation, 1995, 2(3): 221-248.
  29. J. Horn, N. Nafpliotis, D. Goldberg. A niched pareto genetic algorithm for multiobjective optimization [J], In Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Intelligence, Piscataway, NJ, 1994, 1: 82-87.

30. E. Zitzler, L. Thiele. Multiobjective evolutionary algorithms: A comparative case study and the strength pareto approach [J], IEEE Transactions on evolutionary computation, 1999, 3(4): 257-271.
31. J. Knowles, D. Corne. The pareto archived evolution strategy: A New baseline algorithm for pareto multiobjective optimization [J], In Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation, Piscataway, NJ: IEEE Press, 1999: 98-105.
32. K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J], IEEE Transactions on evolutionary computation, 2002, 6(2): 182-197.
33. K. Deb, A. Pratap, T. Meyarivan. Constrained test problems for multi-objective evolutionary optimization [J], First International Conference, Evolutionary Multi-Criterion Optimization, Zurich, Switzerland, 2001, 284-291.
34. 周育人, 李元香, 王勇. 一种有效的实数编码遗传算法[J], 武汉大学学报(理学版), 2003, 49(1): 39-43.
35. 周育人. 一种求解整数非线性规划问题的演化算法[J], 系统工程, 2005, 23(9): 24-26.
36. 谭浩强. C 程序设计[M], 北京: 清华大学出版社, 2002.
37. 袁海宁, 华飞君. C++语言程序设计[M], 北京: 清华大学出版社, 2004.



## 致 谢

两年的硕士生活转瞬即逝，而走过的点点滴滴，至今依然历历在目。在此论文付梓之际，向所有关心和帮助过我的人致以真诚的谢意！

本文是在尊敬的毛志忠教授和贾明兴、袁平老师的悉心指导下完成的。他们渊博的学识、活跃的学术思想、兢兢业业的科研精神、精深的学术造诣、与时俱进的工作作风、和蔼可亲的为人，深深地感染了我，为学生树立了工作、学习和做人的榜样，令学生敬佩不已，也使学生受益匪浅。三位老师忘我的工作精神、正直开朗、乐观豁达的人格魅力给我留下了深刻的印象，并将在今后的学习工作的道路上深深影响和激励着我。在此谨向三位老师致以崇高的敬意和衷心的感谢！

感谢东北大学自动化研究所的各位老师，在我攻读硕士期间，得到了各位老师的热情指导和关怀。同时感谢研究所为我们提供的一流的科研、学习环境以及参加实际项目的机会，使我能够有机会得到更多的锻炼，对于我论文的完成和科研能力的提高起到了很大的帮助。

感谢我的同窗和好友在我学习期间给予的关怀与帮助，难忘记他们陪我度过的所有快乐与不快乐的日子，从他们那里我学到了很多使我终生受益的东西。正是他们的帮助与协作，才使我的论文能够顺利完成，在此向他们表示衷心的感谢。

特别感谢在背后默默支持我的亲爱的父母和李艳同学，总是在我失意的时候站出来鼓励我，让我走出困境，寻找更好的解决问题的方法，使我愉快地完成了毕业设计工作，我惟有努力学习工作，才不会辜负他们的殷殷期望。

衷心感谢参加我论文评审及答辩的教授和老师，你们的意见和建议将对我以后的学习和工作大有裨益。

最后，诚挚的感谢所有帮助过我的善良的人们，让好人一生平安！

