

华北电力大学

硕士学位论文

垃圾焚烧发电过程污染物排放控制研究

Study on the Control of Pollutants Emissions of Waste Incineration Power Generation Process

唐影

2015年3月

国内图书分类号: TK6

国际图书分类号: 621.1

学校代码: 10079

密级: 公开

硕士学位论文

垃圾焚烧发电过程污染物排放控制研究

硕士研究生: 唐影

导师: 李大中教授

申请学位: 工学硕士

学科: 控制科学与工程

专业: 检测技术与自动化装置

所在学院: 控制与计算机工程学院

答辩日期: 2015 年 3 月

授予学位单位: 华北电力大学

Classified Index: TK6

U.D.C: 621.1

Thesis for the Master Degree
**Study on the Control of Pollutants Emissions of Waste
Incineration Power Generation Process**

Candidate:	Tang Ying
Supervisor:	Prof.Li Dazhong
School:	School of Control and Computer Engineering
Date of Defence:	March, 2015
Degree-Conferring-Institution:	North China Electric Power University

华北电力大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《垃圾焚烧发电过程污染物排放控制研究》，是本人在导师指导下，在华北电力大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签名：唐影

日期：2015 年 3 月 13 日

华北电力大学硕士学位论文使用授权书

《垃圾焚烧发电过程污染物排放控制研究》系本人在华北电力大学攻读硕士学位期间在导师指导下完成的硕士学位论文。本论文的研究成果归华北电力大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解华北电力大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权华北电力大学，可以采用影印、缩印或其它复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。

本学位论文属于（请在以下相应方框内打“√”）：

保密□，在 年解密后适用本授权书

不保密☒

作者签名：唐影

日期：2015 年 3 月 13 日

导师签名：李坤

日期：2015 年 3 月 13 日

摘 要

垃圾焚烧技术是处理城市生活垃圾的有效手段之一，能够实现垃圾的无害化、减量化和资源化。但由于我国城市生活垃圾成分的多样性、复杂性和不均匀性，在垃圾焚烧的过程中会发生很多不同的、复杂的化学反应。这些化学反应会产生对人体和环境有危害的物质即焚烧气体污染物。尤其是剧毒二噁英，使垃圾焚烧处理技术的发展受到了阻碍。

本文对垃圾焚烧发电过程产生的污染物做了详细地介绍，对国内外垃圾焚烧发电过程中二次污染物的排放及控制方面的有关文献资料研究结果等做了深入的研究，从垃圾源头、炉内过程和炉外过程三个方面阐述了控制垃圾焚烧污染物的方法，并分析了影响污染物排放的相关因素。

在对垃圾焚烧污染物的产生、特性、脱除方法等深入分析的基础上，基于一种融入灰色关联度分析（GRA）的最小二乘支持向量机（LSSVM）建模方法，通过对实验数据的灰色关联度分析确定各影响因素对输出因素的重要程度，赋予其相应的权重系数。基于相关文献实验数据，建立了垃圾与棉杆混燃过程、污染物排放过程和二噁英净化过程 LSSVM 模型。验证结果表明，经过灰色关联度分析之后的 LSSVM 模型具有更好的拟合效果和泛化能力。

依据所建立的三个模型，分别设计了垃圾与棉杆混燃过程、污染物排放过程、二噁英净化过程多目标优化函数，并通过并列遗传算法寻优得到了垃圾与棉杆混燃过程、污染物排放过程、二噁英净化过程 Pareto 最优解集。寻优结果表明，在 Pareto 最优解集工况条件下，垃圾与棉杆混燃时炉膛温度达到 920℃，污染物排放值明显小于实际值，优化结果整体优于实际值，二噁英净化过程中二噁英去除效率达到 98.9%。寻优结果验证了本文方法可行、有效，可为实际垃圾焚烧过程污染物排放优化控制提供参考，说明在垃圾焚烧过程中合理调整各变量的目标值对于污染物排放指标控制具有重要作用。

关键词：垃圾焚烧；污染物排放；灰色关联度分析；建模；控制

Abstract

Waste incineration technology is an effective means to achieve harmless, minimization and resource-oriented of living garbage .However, due to the diversity, complexity and unevenness of MSW components, there will be a lot different, complex chemical reactions in the waste incineration process . These chemical reactions produce harmful ingredient for humans and the environment ,that is burning gaseous pollutants. Especially the toxic dioxin, so waste incineration technology's development is hampered.

This paper makes a detailed introduction to the pollutants generated during waste incineration power generation. This paper does in-depth research to the relevant domestic and international literature about secondary pollutants emissions and control. From the source, in the furnace process and outside the furnace process describe the methods how to control waste incineration pollutants, and analyze the relevant factors affecting the emission of pollutants.

On the basis of in-depth analysis to pollutant generation, characteristics, removal methods, this paper proposes a gray correlation analysis (GRA) into the least squares support vector machine (LSSVM) modeling method,the experimental data the gray correlation analysis to determine the importance of each factor on the output factors, given its corresponding weight coefficient. Based on the experimental data of the literature , LSSVM model of waste and cotton stalks co-combustion process、 pollutants emissions process、 dioxins purification process are established.Verification results show that compared to simple LSSVM model, integration of GRA in the LSSVM model has better fitting results and generalization ability.

Based on three established LSSVM model, multi-objective optimization functions are designed ,and their Pareto optimal solution set are got through the parallel genetic algorithm optimization.Optimization results show that when the working conditions is in the Pareto optimal solution set, the furnace temperature of waste and cotton stalks's co-combustion reaches 920℃, pollutants emission values significantly less than the experiment value, the overall optimizing result is better than the experiment value, dioxin cleanup process dioxin removal efficiency reached 98.9%. Optimization results show that the proposed method is feasible and effective, can provide a reference for the optimal control of the actual pollutant waste incineration process.It is important to adjust the value of each variable for the control of pollutants reasonably .

Keywords:waste incineration; pollutants emissions ; grey relational analysis; modeling; control

目 录

摘 要	I
Abstract	II
第 1 章 绪论	1
1.1 国内外城市生活垃圾处理技术	1
1.1.1 卫生填埋技术	1
1.1.2 堆肥技术	1
1.1.3 焚烧技术	1
1.1.4 综合利用	2
1.2 国内外城市生活垃圾焚烧处理技术现状	2
1.3 垃圾焚烧处理过程污染物的产生与排放	2
1.3.1 二噁英	3
1.3.2 HCl 和 Cl ₂	5
1.3.3 硫氧化物	5
1.3.4 氮氧化物	5
1.3.5 CO	6
1.3.6 颗粒物	6
1.3.7 重金属	6
1.4 本文研究的意义及主要内容	9
第 2 章 垃圾焚烧发电过程二噁英与污染物排放控制方法及影响因素	8
2.1 垃圾焚烧发电过程二噁英排放控制方法	8
2.1.1 源头控制	8
2.1.2 炉内控制	8
2.1.3 炉外净化	10
2.2 污染物控制方法	10
2.3 垃圾焚烧发电过程污染物排放影响因素	11
2.3.1 垃圾性质	11
2.3.2 垃圾运动速度	11
2.3.3 垃圾焚烧处理量	12
2.3.4 炉膛温度	12

2.3.5 碱性吸附剂	12
2.3.6 过剩空气系数	12
2.3.7 停留时间	13
2.3.8 总风量	13
2.3.9 一、二次风比率	13
2.3.10 湍流度	14
2.3.11 活性炭	14
2.4 本章小结	14
第 3 章 垃圾焚烧发电污染物排放过程模型建立	15
3.1 建模方法	15
3.1.1 数据预处理	15
3.1.2 灰色关联度分析	16
3.1.3 最小二乘支持向量机模型	18
3.2 模型建立及验证	21
3.2.1 垃圾与棉杆混燃过程模型建立及验证	21
3.2.2 污染物排放过程模型建立及验证	26
3.2.3 垃圾焚烧二噁英净化过程模型建立及验证	29
3.3 本章小结	31
第 4 章 垃圾焚烧发电污染物排放过程工况优化	32
4.1 多目标优化算法	32
4.1.1 多目标优化数学模型	32
4.1.2 传统多目标优化算法	33
4.1.3 多目标遗传算法	33
4.2 垃圾与棉杆混燃过程工况优化	34
4.2.1 优化方案	34
4.2.2 优化目标函数	35
4.2.3 优化计算	35
4.3 垃圾焚烧发电污染物排放过程工况优化	36
4.3.1 优化方案	36
4.3.2 优化目标函数	36
4.3.3 优化计算	37
4.4 二噁英净化过程工况优化	38

4.4.1 优化方案	38
4.4.2 优化目标函数及计算	38
4.5 本章小结	39
第 5 章 结论与展望	40
5.1 结论	40
5.2 展望	40
参考文献	42
攻读硕士学位期间发表的论文情况	46
致谢	47

第 1 章 绪论

1.1 国内外城市生活垃圾处理技术

1.1.1 卫生填埋技术

填埋技术能够处理不同的垃圾，操作简单，但需要占用很多土地，存在严重的二次污染。主要污染有：垃圾在堆放的过程中产生的臭气，污染场地周边的空气；垃圾在发酵过程中会产生甲烷气体，可能会引起火灾及爆炸，排放到大气中会产生温室效应；垃圾产生的渗出液会严重污染地下水及土壤。如果使用良好的防渗系统和先进的污水收集系统，可以减小对环境的污染^[1]。近年来，随着各国对环境质量的要求不断提高，合适的填埋场地已越来越难找到，填埋成本也不断提高。

1.1.2 堆肥技术

堆肥是利用微生物的分解作用，在缺氧或供氧的状况下使生活垃圾中有机组份降解为稳定物质的处理技术，实现垃圾无害化^[2]。堆肥技术操作简单，其主要影响因素为生活垃圾的组成、需氧量、混合程度、PH 值和温度。我国现代化堆肥技术从 80 年代开始，现在已经具有完善的工艺系统和成套设备，但由于我国城市生活垃圾热值低、水分大、养分含量低、杂质多，垃圾中含有大量玻璃、塑料、金属等，导致垃圾处理效率和减量化效果低，堆肥质量不佳，使销路受到限制。近年来，随着填埋场地的减少和填埋费用的增加以及人类环保意识的不断增强，堆肥呈现上升的趋势。

1.1.3 焚烧技术

垃圾焚烧技术能够实现对生活垃圾的高温热化学处理。高温条件下，垃圾焚烧炉中可燃组分与氧发生反应，生成高温气体和少量固体残渣。高温气体具有热能，可以回收利用，性质稳定的残渣能够作建材使用或填埋。当生活垃圾的热值较高时，不需要提供辅助燃料就可以稳定燃烧。垃圾焚烧处理能够使生活垃圾体积减少约 80-90%，重量减少约 70-80%^[3]。经过几十年的监测，国外研究单位表明焚烧对环境带来的污染仅仅是填埋场所造成污染的 1/20。近些年兴起的封闭式焚烧厂还可以将垃圾在集料坑中产生的有害、有毒气体送入炉内高温燃烧去除。

1.1.4 综合利用

实现垃圾资源化、减量化的途径是垃圾的再生利用。综合利用主要有四种形式:1)回收再利用; 2)化学再利用; 3)原料再利用; 4)热综合利用。在垃圾处理过程中, 尽量采取废物综合利用方法, 可以同时达到保护环境、垃圾减量化、节约资源的目的。

1.2 国内外城市生活垃圾焚烧处理技术现状

焚烧是一种热处理的形式^[4]。作为一种有效的垃圾处理手段, 焚烧可以将垃圾的重量减少约 70-80%, 体积减少约 80-90%^[3]。1864 年, 世界第一台垃圾焚烧炉在英国的曼彻斯特诞生。德国、法国、瑞士先后于 1896 年、1898 年和 1904 年建立了生活垃圾焚烧厂, 将垃圾焚烧技术应用于工程中。瑞士的垃圾 80%为焚烧^[5]。截止 2007 年, 德国有 67 座垃圾焚烧处理厂, 每年垃圾处理量达到 1780 万吨。近 40 年德国仍不断建设垃圾焚烧处理厂, 增大垃圾处理量。2006 年, 美国有 140 多座生活垃圾焚烧厂, 其中有 89 座焚烧发电厂, 年焚烧处理量已达到 3140 万吨, 居世界第二位。20 世纪 90 年代中期, 日本约有 2000 座垃圾焚烧厂, 垃圾焚烧比例达到 75%。1975-2006 年, 连续式的大规模垃圾焚烧厂约增加 400 座, 非连续式的小规模垃圾焚烧厂约减少 1000 座^[6]。到 80 年代末, 垃圾焚烧厂产生的二噁英曾造成严重的污染。日本通过改进焚烧技术, 加强污染物的净化处理, 1997-2003 年间二噁英的排放削减率达到 95%^[7]。

自从第一座垃圾焚烧厂在深圳建成投产, 我国开始重视垃圾焚烧处理技术。在我国已有 50 多座大型的垃圾焚烧发电厂建成并投入运行。其中大型垃圾焚烧处理厂的垃圾处理能力均在 1000 吨/日以上, 例如上海浦西江桥垃圾焚烧厂、浦东新区垃圾发电厂、深圳南山区垃圾发电厂、广州垃圾发电厂。“十一五”期间, 我国将计划再建设 82 座大型的垃圾焚烧处理厂^[8]。根据《城市建设统计年鉴(2012 年)》, 我国有 138 座垃圾焚烧厂, 日焚烧处理能力达到 12.26 万吨。其中大部分垃圾焚烧厂采用炉排炉和流化床炉。在欧盟、日本、北美等国, 90%以上的垃圾焚烧厂都使用炉排炉。因此炉排炉仍然是生活垃圾焚烧处理的首选技术炉型。

1.3 垃圾焚烧处理过程污染物的产生与排放

垃圾焚烧法虽然具有减量化显著, 资源化利用程度高, 无害化彻底的优点, 但由于城市生活垃圾成分的多样性、复杂性和不均匀性, 在垃圾焚烧的过程中会发生

很多复杂的化学反应。这些化学反应会产生对人体和环境有危害的物质即焚烧气体污染物。根据污染物的不同性质，将其分为酸性气体、颗粒物、重金属和有机污染物等几类，如表 1-1 所示。

表 1-1 生活垃圾焚烧污染控制标准^[9]

序号	类别	污染物名称	表示符号	最高限值	单位	含义
1	烟尘	颗粒物	无	80	mg/m ³	测定均值
		一氧化碳	CO	150	mg/m ³	小时均值
		氮氧化物	NO _x	400	mg/m ³	小时均值
2	酸性气体	二氧化硫	SO ₂	260	mg/m ³	小时均值
		氯化氢	HCl	75	mg/m ³	小时均值
		氯气	Cl ₂	无	无	小时均值
		镉及其化合物	Cd 和 Cd ²⁺	0.1	mg/m ³	测定均值
3	重金属类	铅及其化合物	Pb 和 Pb ²⁺	1.6	mg/m ³	测定均值
		汞及其化合物	Hg 和 Hg ²⁺	0.2	mg/m ³	测定均值
4	有机类	二噁英	PCDDs	1.0	ng-TEQ/m ³	测定均值
		呋喃	PCDFs	1.0	ng-TEQ/m ³	测定均值

垃圾焚烧厂在烧掉垃圾的同时应该高度重视垃圾焚烧二次污染物的防治问题，否则，二次污染给人类带来的危害比垃圾本身对人类的危害要大得多。尤其是在雾霾压力之下，将严格控制生活垃圾焚烧污染物的排放。2014 年环保部常务会议指出将重新修订《生活垃圾焚烧污染控制标准》，修订后的《生活垃圾焚烧污染控制标准》严格了生活垃圾焚烧厂二氧化硫、氯化氢、氮氧化物、重金属和二噁英类等污染物排放标准。透彻了解和研究垃圾焚烧污染物的形成机制能够有效的掌握二次污染防治技术，并促进其技术的发展。

1.3.1 二噁英

1977 年，Oilie 等人在垃圾焚烧产生的飞灰中检测到二噁英^[10]，从此之后，人们一直关注垃圾焚烧产生的二噁英污染问题，国内外的学者对垃圾焚烧炉的二噁英产生、排放、迁移及控制机理做出了许多研究工作，取得了丰硕的成果。

通常人们所说的二噁英(PCDD/Fs)包括多氯代二苯并二噁英(polychlorinated dibenzo-p-dioxins, PCDDs)和多氯代二苯并呋喃(polychlorinated dibenzo furans, PCDFs)二类物质，有时也将毒性与二噁英相似、呈平面结构的共面多氯联苯(coplanar polychlorinated biphenyls, Co-PCBs)包括在内。二噁英结构示意图如图 1-1 所示。二噁英的挥发性低，熔点和沸点高。在常温下为白色晶体，可溶于大部分有机溶剂，极难溶于水，亲脂性极强。随着氯取代数的增加，相对分子质量和溶沸点

也随之上升，但在水中的溶解度却随之下降，挥发性也降低^[11]。

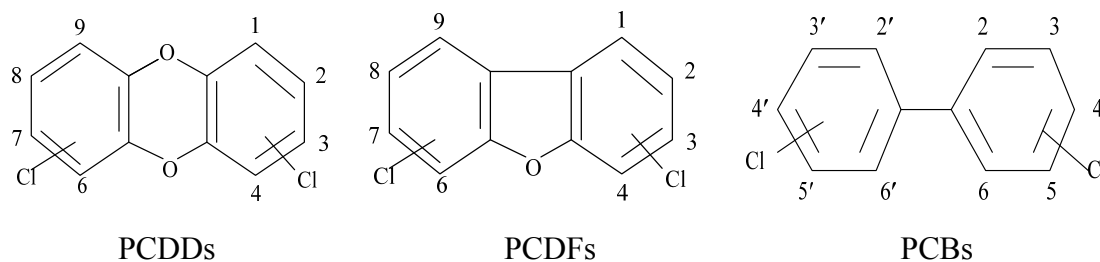


图 1-1 二噁英类分子结构示意图

有关二噁英的形成机理相当复杂，初步研究表明二噁英主要通过以下三类反应途径生成：

(1) 由热分解反应生成。高分子化合物（含苯环结构）在加热过程中发生分解生成 PCDD/Fs。如甲苯在高温下分解可生成大量 PCDD/Fs^[12]。

(2) 由气相前驱物^[13]生成。不完全燃烧和飞灰表面的不均催化反应可以生成二噁英气相前驱物，如多氯酚、聚氯乙烯、氯苯等，这些前驱物在高温气相中反应生成 PCDD/Fs。

(3) 由“从头合成”(denovo)反应生成。Vogg 等人最早提出 denovo 机理，他们认为 denovo 反应（碳、氢、氧、氯等元素反应生成二噁英）是垃圾焚烧后低温区形成二噁英的重要途径^[14]。实际上是飞灰中残留碳的氧化反应的副反应。大量的试验结果表明 denovo 生成的二噁英量与温度、含氧量、催化剂、氯源以及水分^[15]等参数密切相关。

根据氯原子取代位置和数目的不同，二噁英类污染物的毒性有着较大的差异。为评价这些物质的毒性及对人体健康的潜在效应，提出了毒性当量(Toxic Equivalent Quantity, TEQ)的概念，并通过毒性当量系数 (Toxicity Equivalency Factor, TEF) 来折算。以毒性最强的 2, 3, 7, 8-氯代二噁英 (TCDD) 的毒性当量系数为 1，其他同系物的毒性换算成相对 2, 3, 7, 8-TCDD 的毒性强度^[3]。国际上以 2, 3, 7, 8-TCDD 的毒性为标准，规定了 17 种有毒二噁英的国际毒性当量系数，如表 1-2 所示。

1994 年美国环保署发表的报告中指出二噁英的毒性相当于砒霜的 900 倍，氰化钾的 1000 倍，称为“世纪之毒”。表 1-2 中的 17 种物质毒性大，2001 年 5 月 23 日已被列入《关于持久性有机污染物(POPs)的斯德哥尔摩公约》首批受控的 12 种 POPs 清单中^[17,18]。二噁英对人体的影响包括：体重减轻、免疫系统受损、氯痤疮及皮肤改变、组织发育不正常、内分泌紊乱、致畸等。二噁英类污染物对人类的危害可能具有跨世代的效应。

表 1-2 17 种有毒二噁英的毒性当量系数^[16]

PCDDs 类	I-TEF	PCDFs 类	I-TEF
2,3,7,8-TCDD	1.0	2,3,7,8-TCDF	0.1
1,2,3,7,8-P ₅ CDD	0.5	2,3,7,8-P ₅ CDF	0.5
1,2,3,4,7,8-H ₆ CDD	0.1	1,2,3,7,8-P ₃ CDF	0.05
1,2,3,6,7,8-H ₆ CDD	0.1	1,2,3,4,7,8-H ₆ CDF	0.1
1,2,3,7,8,9-H ₆ CDD	0.1	1,2,3,7,8,9-H ₆ CDF	0.1
1,2,3,4,6,7,8-H ₇ CDD	0.01	1,2,3,6,7,8-H ₆ CDF	0.1
OCDD	0.001	2,3,4,6,7,8-H ₆ CDF	0.1
		1,2,3,4,6,7,8-H ₇ CDF	0.01
		1,2,3,4,7,8-H ₇ CDF	0.01
		OCDF	0.001

1.3.2 HCl 和 Cl₂

垃圾中含氯物质的分解会产生大量 HCl 和 Cl₂。塑料瓶、人造革、发泡包装、快餐饭盒和防震包装材料中含氯量很大。另外，垃圾中的无机氯如 NaCl 在焚烧过程中也能产生大量 HCl 和 Cl₂。垃圾焚烧时产生较多的 HCl 气体，较少的 Cl₂，因此一般只考虑 HCl。HCl 排入大气中形成酸雨，能损坏多数器物，还会为二噁英类有机污染物提供氯源，形成二次污染，危害人类健康；在流化床锅炉中 HCl 还会腐蚀管壁。

1.3.3 硫氧化物

含硫垃圾在高温氧化过程中将产生 SO_x，主要包括 SO₃ 和 SO₂。垃圾焚烧时产生的硫氧化物绝大部分以 SO₂ 的形式存在，SO₃ 极少。城市生活垃圾热值较低，为了保证燃烧的稳定性和效率，垃圾焚烧过程中有时须掺入生物质或者助燃煤，而助燃煤将产生较多的 SO₂^[1]。生物质中包含的硫主要是蛋白质、氨基酸等有机硫，以及以硫酸盐形式存在的无机硫^[19]。煤中的可燃硫包括黄铁矿硫和有机硫^[20,21]，有机硫在热解过程中易于氧化，而硫酸盐可能挥发或包含在灰里。

1.3.4 氮氧化物

NO_x 是垃圾焚烧时产生的主要污染物之一，包括 NO 和 NO₂。垃圾焚烧产生的 NO_x 主要有二个来源：一是 N₂ 和 O₂ 高温条件下发生反应生成热氮氧化物。二是垃圾中的含氮氧化物转化成 NO_x，称为燃料氮转化氮氧化物。燃料 NO_x 中的 NO 所占比例高达 95%。NO_x 经过太阳照射后，与碳氢化合物结合，生成一种毒性更强的光化学烟雾，对人体产生更大的危害；此外，NO_x 也是酸雨的重要来源^[22-24]。

1.3.5 CO

CO 是碳氢燃料与氧发生化学反应的中间产物。垃圾燃烧时可燃物中的碳元素在温度较低或炉膛供氧不足的情况下就会产生 CO。由于烟气中的 CO 在有机污染物再合成过程中具有催化作用,所以要适时调节一、二次风量,严格控制 CO 气体浓度处于较低的水平,保证烟气含氧量在 6%以上。有研究表明,在垃圾焚烧过程中生成的 PCDD/Fs 和 CO 的浓度大小存在一定的关联,通过 CO 的浓度指标能够大致控制监测 PCDD/Fs 的浓度。

1.3.6 颗粒物

生活垃圾在破碎、高温热分解和氧化的过程中体积和粒度都会减小。垃圾在炉膛内燃烧的过程中一部分质轻体小的物质在气流和热泳力的作用下从锅炉出口排出。不可燃物则大部分以炉渣的形式排出。烟气中颗粒物的毒性随着其粒径的减小而增大。实验结果表明,小于 1.1 μm 的颗粒很容易进入肺泡,称为可入肺颗粒。细颗粒上的有害物质能够被人体吸收,导致心血管等疾病。

1.3.7 重金属

生活垃圾中所含的重金属及其化合物在垃圾焚烧过程中会发生不同程度的挥发和迁移,生成重金属类污染物,其存在于焚烧处理后的飞灰和烟气中。重金属及其化合物毒性极强,主要包括 Cd、Hg、Cu、Sn、Ni、Pb、Zn 等。在高温条件下,重金属可以吸附在颗粒物上或者以气态形式存在于烟气中。重金属能在生物体内富集且无法被生物分解,通过食物链对人体造成危害。城市垃圾中垃圾成分复杂,含有很多重金属,利用垃圾的预处理挑拣出其中主要的重金属污染源,例如垃圾中含有的废旧电池、重金属废料和废旧电子元件,具有重要的意义。

1.4 本文研究的意义及主要内容

垃圾焚烧是实现城市生活垃圾无害化、资源化、减容化的重要方式之一,而垃圾焚烧发电的总目标是得到资源再利用的同时尽最大可能减小二次污染。要想达到这个目标就必须对垃圾焚烧发电产生的污染物进行净化。

本文的核心内容主要为:

(1)对垃圾焚烧发电过程污染物的产生、特性、脱除方法等进行深入分析。在此基础上,结合炉内燃烧过程、炉外净化过程,基于一种融入灰色关联度分析的最小二乘支持向量机建模方法,建立了垃圾与棉杆混燃过程、污染物排放过程、二噁英

净化过程 LSSVM 模型。并验证了模型的拟合效果和泛化能力。

(2)在所建立的模型之上，设计了垃圾与棉杆混燃过程和污染物排放过程、二噁英净化过程多目标优化函数，并利用并列遗传算法进行工况优化，得到 Pareto 最优解集，希望为实际垃圾焚烧过程污染物排放优化控制提供参考。

第 2 章垃圾焚烧发电过程二噁英与污染物排放控制方法及影响因素

2.1 垃圾焚烧发电过程二噁英排放控制方法

2.1.1 源头控制

学术界普遍认为氯源对二噁英的生成有重要影响, Buekens 等人指出, 将原生垃圾分类加工, 降低重金属和含氯物质的含量, 能够极大降低二噁英的生成率^[25]。李建新等人对模拟垃圾成分进行燃烧试验, 验证了烟气中的氯化物是合成二噁英的主要氯源^[26]。Wang 等人提出为了减少二噁英的产生, 垃圾中氯元素含量的阈值应控制在 0.8-1.1%^[27]。王永生提出为了能够从源头减少二噁英生成所需的氯源, 应该严格控制入厂的工业废料, 减少含氯有机物的数量^[28]。垃圾中包含大量的氯化物, 常见的包括聚氯乙烯、聚苯乙烯、NaCl、KCl 等。所以, 对垃圾进行分类收集, 资源回收利用, 然后利用垃圾焚烧预处理设备, 除去垃圾中含氯成分高的物质和金属催化剂, 能够减少二噁英的生成。

2.1.2 炉内控制

2.1.2.1 炉膛结构的选择

国内采用的焚烧炉型有循环流化床炉、机械炉排炉、回转窑炉及气化热解炉, 主要采用循环流化床和炉排炉。流化床锅炉对垃圾适应性好, 传热传质优良, 床内颗粒扰动剧烈, 低热值高水分的垃圾也能够充分燃烧, 降低了烟气污染物的产生, 现在很多垃圾处理厂都选择流化床锅炉。但是, 流化床要求严格控制入炉垃圾颗粒的大小和质量, 垃圾必须进行预处理, 一般需添加辅助燃料, 增加了运行费用。炉排炉有着成熟的运行经验, 具有高燃烧率, 适合焚烧热值较高的垃圾和大型垃圾焚烧厂。但该炉型前期投资大, 燃烧条件难控制, 无法控制二噁英完全分解, 因此该炉型须配备烟气净化设备。气化热解炉根据燃烧控制理论, 使垃圾在一定条件下分解成可燃性气体, 可燃气体在高温室充分燃烧, 通过余热锅炉回收利用热量。该炉生成的污染物较少。

陈彤、李晓东、杨志军等人分别报道了流化床焚烧炉飞灰中二噁英含量要低于炉排炉^[29-31]。诸冠华认为将锅炉炉膛高度在原基础上增加 5 米以上, 烟气在 850℃ 以上的停留时间将提高到 3s 以上, 若同时具有二次风扰动, 则垃圾中的二噁英可以

得到有效分解^[32]。日本等国家已采用的气化熔融技术^[33]，在焚烧温度大于 1300℃ 时，不但能有效分解二噁英及其前驱物，还能杜绝飞灰在下游设备上重新再合成二噁英。

2.1.2.2 炉内抑制剂的添加

在垃圾焚烧炉内，能抑制二噁英的产生的添加剂主要有三类，第一类是能够减少 Cl_2 形成，使重金属催化剂中毒的硫及硫化物^[34]。Griffin 等人最先提出了煤中含有的硫能够使煤燃烧时产生较少的二噁英^[35]，Hiroshi Ogawa 等人根据 Griffin 的理论，在小型流化床燃烧器中进行了添加硫对二噁英生成的抑制作用的实验，分别添加气体 SO_2 、含硫煤、煤和硫，实验结果表明，煤和元素硫的添加减少了二噁英的生成，但与含硫煤的添加相比，其效果不明显^[36]。浙江大学热能工程研究所研究表明，将煤与生活垃圾以 1:4 的比例混合在流化床上燃烧时，二噁英的排放浓度远低于国内排放标准^[37]。

第二类是 SNCR 脱硝反应衍生功能的氮化物，氮能同时控制 NO_x 和 HCl ，减少参与反应的氯源，从而降低二噁英的合成。M.Aatamila 等人研究了尿素对飞灰中 PCDD/Fs 含量的影响，当烟气中分别喷入浓度为 31ppm、151ppm、302ppm 尿素时，气相当中的二噁英生成量减少了 11-29%，而固相飞灰中二噁英则减少了 53~80%，烟气和飞灰中的二噁英总量下降了 49-74%，其中 151ppm 尿素喷入时抑制二噁英生成的效果最明显^[38]。P.Ruokojarvi 等人研究了 670℃ 和 410℃ 烟温处喷入 SO_2 、氨气、二甲胺、甲基硫醇等四种物质时对二噁英生成的影响，发现在烟气中喷入 SO_2 、氨气时，氯酚没有减少，而喷入二甲胺、甲基硫醇时氯酚减少了 11-53%。喷入上述物质时，烟气中 PCDD/Fs 总量下降了 42-78%，固相飞灰中的二噁英排放降低了 98%^[39]。

第三类是碱性化合物。碱性化合物能够控制酸性气体排放，显著抑制炉内二噁英的排放。常用的有 CaO 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 CaCO_3 、 CaSO_4 、 MgO 、 MgCO_3 、 MgSO_4 。碱性吸附剂能与烟气中的酸性气体发生反应，进而减少二噁英的排放。Gullett 等人发现，当炉膛温度大于 800℃ 时喷入 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 能够有效降低烟气中二噁英的含量，280℃ 以上时在烟气中喷入 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，可以吸附烟气中大量 HCl ，从而使烟气中二噁英的生成减少^[40]。

2.1.2.3 燃烧工况的控制

生活垃圾的组成成分和焚烧工况的控制能够影响锅炉出口污染物的浓度。如果垃圾里包含较多经高温焚烧能生成相应污染物的物质，在同样的焚烧条件下锅炉出

口处烟气中污染物的浓度就越高。在生活垃圾没有实现彻底分类收集时,只能通过控制焚烧工况降低锅炉出口烟气污染物的浓度。目前,普遍认为当炉膛温度大于 850°C , 停留时间达到 2s, 高温区送入二次空气, 即“3T”焚烧技术, 能够改善燃烧工况, 使垃圾燃烧彻底, 完全氧化分解废物及垃圾中原有的二噁英, 减少不完全燃烧产物、CO 和前驱物的生成量, 从而抑制前驱物合成 PCDD/Fs。在实际运行中炉膛燃烧温度一般控制在 $850\text{-}950^{\circ}\text{C}$ ^[41]。

2.1.3 炉外净化

采用正确的尾部烟气净化技术, 能够有效降低二次污染物的排放。垃圾焚烧炉排出的尾部烟气中主要含有 SO_x 、HCl、HF 等酸性气体、飞灰和飞灰表面的重金属和 PCDD/Fs 有机物。因此, 烟气净化分为两部分, 第一步除去酸性气体; 第二步除尘, 收集飞灰、重金属和 PCDD/Fs 有机物。现阶段锅炉尾气除尘技术主要有静电除尘和袋式除尘, 但静电除尘的效果不如袋式除尘好, 且静电除尘器最佳工作温度也是 PCDD/Fs 合成的最佳温度, 所以垃圾焚烧发电时污染物的净化装置一定要采用袋式除尘器。现在经常使用的工艺为烟气冷却加上石灰中和, 同时用布袋除尘器加上喷活性炭的组合工艺, 达到脱酸、除尘和吸附重金属及二噁英类有毒物质的目的。由于二噁英再合成温度为 $250\text{-}300^{\circ}\text{C}$, 为避开此段温度, 余热锅炉出来的烟气, 在减温塔中需将温度急剧降至 $170\text{-}180^{\circ}\text{C}$ 之间。同时在减温塔中喷入脱酸剂, 中和烟气中大量的酸性气体。在减温塔和除尘器之间喷入活性炭, 吸附重金属和二噁英类物质。袋式除尘器不但可以收捕一般颗粒物和直径小于等于 $0.5\mu\text{m}$ 的气溶胶, 同时还能收捕吸附在其他污染物上的二噁英类污染物。

2.2 污染物控制方法

垃圾焚烧发电过程除了会产生剧毒二噁英外, 还会生成酸性气体、颗粒物、重金属等污染物, 其中颗粒物和重金属的去除较简单。除了源头控制减少重金属物质的含量, 垃圾焚烧要求烟气尾部净化装置必须配备袋式除尘器。而袋式除尘器对于小于 1mm 的细小颗粒物除尘效率超过 99%。袋式除尘器运行温度低, 尾气中的重金属达到饱和凝结成细颗粒被滤布吸附去除。若在袋式除尘器之前喷入活性炭能够进一步脱出尾气中的重金属。而尾气中 SO_2 、HCl 等酸性气体的脱除国际上普遍采用干法、半干法和湿法三种技术。

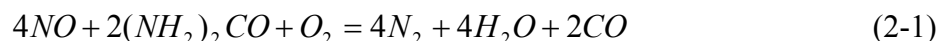
(1) 干法洗气法利用压缩空气将碱性固体粉末喷入烟道或烟道上的反应器内, 碱性粉末在气流的带动下与酸性气体充分接触, 同时与酸性气体发生中和反应, 去

除酸性气体。干法技术不排放污水，但脱除效率仅能达到 60-70%，无法达到环保标准。

(2)半干式洗气法将 CaO 制成粉状 Ca(OH)_2 后与少量的水充分混合，然后将熟石灰浆喷入塔内，烟气与石灰浆充分接触并发生中和作用。半干式洗气法气、液接触面积大，能够有效中和酸性气体，由于熟石灰泥浆中的水分能够在塔内完全蒸发，因此不产生废水。半干法技术药品用量少，脱除效率可以达到 90%左右，是烟气脱酸的主要适用技术。

(3)湿式洗气法是建造填料吸收塔，烟气在塔内与碱性溶液（常用氢氧化钠溶液或石灰溶液）对流，充分接触并反应，吸收尾气中的酸性气体。湿式洗气法具有较高的脱酸效率，对 SO_2 和 HCl 的去除率分别能达到 90 %和 98 %以上，但是有大量污水排出，造成再次污染，且投资及运行费用高。

垃圾焚烧控制 NO_x 产生的方法有燃烧控制法、触媒脱氮法和无触媒脱氮法^[42,43]。燃烧控制法通过控制炉内过剩空气量抑制 NO_x 的生成。但氧浓度不宜过低，否则将造成不完全燃烧，为二噁英的生成提供条件。触媒脱氮法将氨水与烟气中的 NO_x 反应，在活性炭的催化下，生成氮气和水， NO_x 能够减少 90 %以上，具有较好的脱硝效果。无触媒脱氮法则通过下列途径分解 NO_x ：



2.3 垃圾焚烧发电过程污染物排放影响因素

垃圾焚烧发电污染物排放过程不仅与垃圾的性质、垃圾运动速度、垃圾焚烧的处理量有关，还与炉膛温度、炉内添加剂、过量空气系数、烟气停留的时间、总风量、一二次风比率、炉内气体的湍流度、活性炭等参数密切相关。

2.3.1 垃圾性质

生活垃圾的性质包括组成成分和热值、颗粒度等指标。生活垃圾组成成分中含水率和灰分含量越高，在焚烧过程中越易发生不完全燃烧；相反低含水量和含灰量的垃圾更易于完全燃烧。垃圾热值越高，焚烧效果越好；垃圾颗粒的尺寸越小，焚烧时传热和传质效果越好，但垃圾颗粒也不能过小，过小的颗粒容易导致垃圾灰分化，影响焚烧效果。

2.3.2 垃圾运动速度

垃圾在炉内的运动速度会影响垃圾的焚烧效果。垃圾运动速度过慢会造成焚烧

温度和烟气温度过高，引起重金属气化挥发以游离气态进入烟气；垃圾运动速度过快将会引起垃圾燃烧不充分，热效率降低，烟气温度无法到达设定值。

2.3.3 垃圾焚烧处理量

《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB18485—2001)中根据焚烧炉每日的垃圾处理量规定了烟囱的最低允许高度^[9]。并规定垃圾日处理量 $>300\text{t} \cdot \text{d}^{-1}$ 的定义为大型炉，处理量 $<100\text{t} \cdot \text{d}^{-1}$ 的焚烧炉为小型炉，处理量在 $100\text{t} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间的为中型炉。任玥等人研究了垃圾焚烧炉废气中二噁英污染物排放浓度与垃圾处理量之间的联系，认为中、小型焚烧炉废气的二噁英类排放浓度普遍高于大型焚烧炉^[44]。因此认为，生活垃圾焚烧炉二噁英类污染物的生成量与垃圾处理量之间具有较明显的相关联性。

2.3.4 炉膛温度

提高炉膛温度能够使垃圾充分燃烧，不但能够分解和破坏垃圾中有机毒物质，还可以抑制黑烟的产生。但过高的炉膛温度会增加燃料消耗量和有毒物质的挥发量，引起二次污染。因此不要随意提高焚烧温度，一般控制在 $850\text{--}950^\circ\text{C}$ 。

2.3.5 碱性吸附剂

碱性物质可以吸收酸性气体，显著抑制二噁英的生成。常用的有： CaO 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 CaCO_3 、 CaSO_4 、 MgO 、 MgCO_3 、 MgSO_4 。将这些碱性吸附剂喷入炉膛或者尾部反应塔对烟气中的 HBr 、 HCl 、 HF 、 SO_2 具有较好的控制效果，进而减少二噁英的排放。

2.3.6 过剩空气系数

为了垃圾完全燃烧，在实际的燃烧系统中，需要提供比理论空气量更多的助燃空气，以保证垃圾和空气能完全混合。因此垃圾焚烧时实际需要的空气量包括理论空气量和过剩空气量两部分。空气供应量是否充足直接影响垃圾焚烧是否完全。过剩空气系数 n 表示实际空气量与理论空气量的比值，定义为：

$$n = \frac{C}{C_0} \quad (2-2)$$

式(2-2)中， C —理论空气量； C_0 —实际供应空气量。

增大过剩空气系数可以提供足够的氧气，有利于垃圾完全燃烧。但过大的过剩空气系数可能会降低炉膛内的温度，降低燃烧效率，增加燃烧系统热损失。相反，过剩空气系数过小则会引起垃圾燃烧不完全、烟气中 CO 浓度偏高、有害物质焚烧

不彻底，冒黑烟等不利后果。因此合理选取过剩空气系数对垃圾焚烧的影响至关重要。

2.3.7 停留时间

停留时间的长短决定了垃圾是否完全燃烧，而停留时间对有害物质的破坏作用与燃烧温度相反。若燃烧温度低，破坏有害物质需要的停留时间就长；相反，所需要的停留时间就短。研究表明，烟气在燃烧室的停留时间越长，越有利于破坏烟气中的二噁英^[45]。但为保证经济性，停留时间不宜过长。垃圾焚烧时，若温度维持在850-950℃之间，同时充分搅拌，则气体在燃烧室内的停留时间约为2s。同时，大量实验表明，固体废弃物在焚烧过程中，二噁英一般在低温区生成。因此应尽量减少烟气在适宜二噁英从头合成条件下的停留时间。

2.3.8 总风量

总风量是影响垃圾焚烧锅炉效率的关键因素。总风量过大使排烟量增加，从而使排烟热损失增大、锅炉效率降低；总风量过小使炉膛烟气温度过高以及垃圾燃烧不充分，从而使得排烟热损失和固体未完全燃烧热损失增加、锅炉效率降低。由此可见，总风量的合理调整是提高垃圾焚烧锅炉效率的一项重要措施。

2.3.9 一、二次风比率

垃圾焚烧时一次风从炉排下方空气室吹入，穿过垃圾层与垃圾发生反应。一次风的作用主要有：

(1) 为焚烧炉炉排上的垃圾提供燃烧所需的氧气，维持炉内过量空气系数在正常范围内；

(2) 冷却炉排。

锅炉一次风对炉膛温度影响很大，在垃圾进料量保持稳定时，增加一次风量会显著提高炉排上方燃烧区域的过量空气系数，加强炉排上垃圾的燃烧，使炉膛温度显著上升。

二次风从炉排上方风管吹入，其主要作用有：

(1) 为焚烧炉内垃圾的完全燃烧提供所用的空气。

(2) 加强了炉内烟气的扰动，使炉内烟气的温度场和动力场更加均匀，避免产生较大的热偏差。

二次风流量的调整效果主要表现为调节锅炉氧量，保证炉膛内的过量空气系数，同时加强焚烧炉炉膛内的气流扰动，促进炉内未燃尽的可燃气体和可燃物料的

完全燃烧。当氧量值较低或炉膛内燃烧工况较差时,加大二次风机出力,能显著降低烟气中 CO 的含量,并能在一定程度上提高炉膛温度。

2.3.10 湍流度

湍流度可以反映垃圾与空气混合的程度。空气与垃圾充分接触、混合可以保证垃圾完全燃烧,并减少污染物的形成。增大湍流度可以促使垃圾和空气充分混合,保证可燃物及时得到燃烧所需要的氧气。当焚烧炉一定时,增加空气量能够提高湍流度,在一定程度上改善了传热传质效果,有利于垃圾充分燃烧。

2.3.11 活性炭

活性炭对烟气中污染物的吸附有显著的影响。喷入活性炭能达到脱硫、脱硝、脱重金属及二噁英等多方面效果。Hajime Tejima 等人研究了活性炭和布袋除尘器联用方式对 PCDD/Fs 的脱除效率的影响。当活性炭喷入量为 $100\text{mg}/\text{Nm}^3$ 时,布袋出口温度越低,布袋除尘器出口 PCDD/Fs 浓度越低。当布袋出口温度为 160°C 时,PCDD/Fs 浓度为 $0.5\text{ng-TEQ}/\text{Nm}^3$ 。同时指出通常活性炭的喷入量为 $50\text{-}100\text{mg}/\text{Nm}^3$ 时,PCDD/Fs 的脱除效率可达 99% 以上^[46]。B.Brown 等人认为喷入 $50\text{-}100\text{mg}/\text{Nm}^3$ 活性炭时,PCDD/Fs 的脱除效率可达到 99%。采用 SDA(Spray dryer absorber)系统并喷入活性炭时,活性炭的喷入量和系统进出口温度等会影响对 PCDD/Fs 的吸附效率。采用 SDA 系统喷射活性炭粉末,适当的系统温度有利于减少活性炭粉末用量和提高二噁英的脱除效率^[47]。

2.4 本章小结

(1) 总结了垃圾焚烧发电过程二噁英、酸性气体、颗粒物、重金属排放的控制方法。控制二噁英排放包括源头控制、炉内控制和炉外净化三个方面。其中炉内控制包括炉膛结构的选择、炉内抑制剂的添加和燃烧工况的控制。炉外净化现在经常使用烟气冷却加上石灰中和,同时用布袋除尘器加上喷活性炭的组合工艺。此工艺可同时去除颗粒物和重金属,酸性气体的去除有干法、半干法和湿法三种技术。

(2) 着重介绍了影响垃圾焚烧发电污染物排放的各种因素,包括垃圾的性质、垃圾运动速度、垃圾焚烧的处理量、炉膛温度、炉内添加剂、过量空气系数、烟气停留的时间、总风量、一二次风比率、炉内气体的湍流度、活性炭等参数。分析了各因素对污染物产生的影响。

第3章垃圾焚烧发电污染物排放过程模型建立

为了减少垃圾焚烧过程污染物的排放量，需要对垃圾焚烧时炉内燃烧过程、炉外净化过程各运行条件进行控制。但垃圾焚烧发电污染物排放过程是一个多输入多输出的复杂系统，很难通过简单的分析调整好各环节的运行参数，减少污染物的排放量。要想利用控制理论的知识来解决现场的实际问题，做到理论与实际相结合就必须建立较为精确的数学模型。为此本章基于一种融入灰色关联度分析（GRA）的最小二乘支持向量机（LSSVM）建模方法，通过对实验数据的灰色关联度分析确定各影响因素对输出因素的重要程度，赋予其相应的权重系数。基于相关文献实验数据，建立了垃圾与棉杆混燃过程、污染物排放过程和二噁英净化过程 LSSVM 模型。通过对模型进行验证分析，为工况优化提供了准确的模型，进而控制污染物的排放。

3.1 建模方法

最小二乘支持向量机（Least Squares Support Vector Machine, LSSVM）属于一种智能建模方法。最小二乘支持向量机模型能够克服传统方法对大样本数据的依赖，全局搜索能力强，处理非线性问题能力强、收敛速度快，非常适合灰色系统小样本数据的建模。

在建立模型前，对样本数据进行数据预处理和灰色关联度分析，不但可以有效地剔除异常数据，避免数据本身带来的误差，还能够根据灰色关联度值确定各因素的权重系数，并筛选出对输出变量影响较大的输入变量，提高模型精度，减少模型的复杂度。

3.1.1 数据预处理

数据预处理是灰色关联度分析和模型建立的第一步。来源于实验测量或各种资料的原始数据一般具有以下特点：

- 1)量纲不同或数量级可能相差悬殊；
- 2)数据大小参差不齐，具有明显的随机性；
- 3)出现短缺、虚假等现象。

若直接用这些数据进行灰色关联度分析与建模，定会造成不良的后果，如计算结果失真等。为了保证模型质量和结果的可靠性，使用数学方法和手段对原始数据进行变换，称为数据预处理。下面简单介绍两种数据预处理方法：

- （1）缺失数据处理方法

若采样系统因突发情况无法有效地采集到垃圾焚烧发电污染物排放过程相关数据时, 就会造成数据的缺失。当整体样本数据和缺失数据较少时不可以忽视缺失数据。可以参照文献[48]给出的缺失数据处理方法进行填补处理, 如(3-1)所示:

$$d(k) = \lambda_1 d(k-1) + \lambda_2 d(k+1) \quad (3-1)$$

式(3-1)中, $d(k)$ 代表第 k 时刻的数据, 表示缺失数据, $d(k-1)$ 代表第 $k-1$ 时刻的数据, $d(k+1)$ 代表第 $k+1$ 时刻的数据。 λ_1 、 λ_2 为权重值。

(2) 异常数据处理方法

试验时会因为操作失误造成试验异常数据, 如果将这样的数据应用于灰色关联度分析、建模、工况优化过程中, 显然会造成样本数据噪声过大, 影响模型精度以致影响后面的优化工作, 因此需要及时排除异常数据。

本文根据拉依达准则剔除样本中的异常数据, 方法如下:

设每一个过程参数样本数据为 x_1, x_2, \dots, x_n , 平均值为 \bar{x} , 偏差为 $v_i = x_i - \bar{x} (i=1, 2, \dots, n)$ 。依据贝塞尔公式计算出标准偏差:

$$S = \sigma = \left[\frac{1}{n-1} \sum v_i^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3-2)$$

如果某一样本数据 x_i 的偏差 v_i 满足 $|v_i| \geq 3\sigma$, 则认为 x_i 是异常数据, 应剔除。

3.1.2 灰色关联度分析

1982 年 3 月, 我国学者邓聚龙教授在《系统与控制通讯》(Systems & Control Letters) 上发表了第一篇英文灰色系统论文“灰色系统的控制问题”(The Control Problems of Grey Systems)^[49]; 1982 年 6 月, 邓聚龙教授在《华中工学院学报》(现为《华中科技大学学报》)发表了第一篇中文灰色系统论文“灰色控制系统”^[50]。灰色系统理论(Grey System Theory) 是以“小样本”、“贫信息”作为研究对象, 通过对“部分”已知信息的处理和数据挖掘, 提取有价值的信息, 从而实现对系统运行的有效控制。

系统是由一系列因素相互作用的结果, 对于系统最终的发展趋势, 人们是不可能完全分清哪些因素关系密切, 哪些因素关系不密切, 即难以发现影响事物发展的主要矛盾和次要矛盾。为此, 灰色系统理论提出了灰色关联度分析(Grey Relational Analysis, GRA) 的方法。它的基本原理是通过设定参考数列和比较数列的指标, 对反映各因素变化特性的数据序列进行集合比较, 得到各个因素对考察对象的关联性量度的大小。分析出系统中各因素间的主要关系, 找出影响系统最重要的因素, 找到影响事物发展的主要矛盾, 把握矛盾的主要方面, 从而有效地控制整个系统的

运行。灰色关联度分析相较于其他数理统计方法而言，具有操作简便，计算精准，打破了传统的数学模型中对数据严格而精准的要求，其适用于解决多变量的综合问题。

在建立模型前，应用灰色关联度分析方法对大量的输入变量进行处理，选取对输出较有影响的变量因素，不但可以减少模型的复杂度和计算运行时间，提高模型精度，还避免了主观筛选，增强了模型的适应能力。

灰色关联度分析的计算步骤如下：

(1) 确定参考序列和比较序列

通过对研究问题的初步定性分析确定多个自变量因素和一个因变量因素。若因变量数据设为参考序列 X_0' ，各自变量数据为比较序列 $X_i'(i=1,2,\dots,n)$ ， $n+1$ 个数据序列构成矩阵 $(X_0', X_1', \dots, X_n')$ ，其中， $X_i'=(x_i'(1), x_i'(2), \dots, x_i'(N))^T$ ， $i=1,2,\dots,n$ ； N 为变量序列的长度。

(2) 变量序列的无量纲化处理

一般情况下，为了消除量纲的影响，需要对变量序列进行无量纲化处理。本文采用均值法进行转换，公式如式(3-3)， $i=1,2,\dots,n$ ， $k=1,2,\dots,N$ 。

$$x_i(k) = \frac{x_i'(k)}{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_i'(k)} \quad (3-3)$$

无量纲化处理后各因素序列形成无量纲化矩阵 (X_0, X_1, \dots, X_n) 。

(3) 求差序列、最小差和最大差

计算无量纲化矩阵中参考序列与各比较序列中对应元素的绝对差值，形成如下矩阵：

$$\begin{pmatrix} \Delta_{01}(1) & \Delta_{02}(1) & \cdots & \Delta_{0n}(1) \\ \Delta_{01}(2) & \Delta_{02}(2) & \cdots & \Delta_{0n}(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta_{01}(N) & \Delta_{02}(N) & \cdots & \Delta_{0n}(N) \end{pmatrix}_{N \times n} \quad (3-4)$$

式(3-4)中， $\Delta_{0i}(k)=|x_0(k)-x_i(k)|$ ； $i=1,2,\dots,n$ ； $k=1,2,\dots,N$ ；绝对差值阵中最小数和最大数即为最小差和最大差： $\Delta(\min)$ 和 $\Delta(\max)$ 。

(4) 计算关联系数

对绝对差值矩阵中元素进行如下变换：

$$\xi_{0i}(k) = \frac{\Delta(\min) + \rho \Delta(\max)}{\Delta_{0i}(k) + \rho \Delta(\max)} \quad (3-5)$$

得到关联系数矩阵：

$$\begin{pmatrix} \xi_{01}(1) & \xi_{02}(1) & \cdots & \xi_{0n}(1) \\ \xi_{01}(2) & \xi_{02}(2) & \cdots & \xi_{0n}(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \xi_{01}(N) & \xi_{02}(N) & \cdots & \xi_{0n}(N) \end{pmatrix}_{N \times n} \quad (3-6)$$

式 (3-5) 中 ρ 为分辨系数，取值范围在 (0,1) 内， ρ 越小，分辨力越大，通常取 $\rho=0.5$ 。

(5) 计算关联度

关联系数阵中第 i 列反映比较序列 X_i 与参考序列 X_0 的关联程度，将其求平均得到 X_i 与 X_0 的关联度：

$$R_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi_{0i}(k) \quad (3-7)$$

求出关联度后，由大到小进行排序，关联度越大，说明该比较序列是影响参考序列发展的主要因素。

(6) 各变量权重系数的确定

根据灰色关联度值可知各变量对参考序列变量的影响是不同的，因此可以确定各变量的权重系数。将求得的权重系数乘以相应的变量作为模型的输入能够更好地表现出该变量对参考序列变量的影响。权重系数的确定方法为：

$$A_i = R_i / \sum_{i=1}^N R_i \quad (3-8)$$

3.1.3 最小二乘支持向量机模型

支持向量机(Support Vector Machine, SVM)有标准 SVM、V-SVM、LS-SVM 等，其中比较成功的是 LS-SVM。Suykens 等人提出最小二乘支持向量机方法，它是标准支持向量机的扩展^[51-53]。其算法是最小二乘法，优化指标采用平方项，并且使用等式约束代替不等式约束，从而将二次规划问题转化为求解线性方程组，提高了收敛精度和求解速度。

设训练样本集为 (x_i, y_i) , $i=1, 2, \cdots, n$, $x_i \in \mathbb{R}^N$ 为输入量, $y_i \in \mathbb{R}^N$ 为目标值, n 为训练样本个数, N 为数据向量空间的维数, 在特征空间中最小二乘支持向量机模型采用如下决策函数：

$$y(x) = \omega^T \phi(x) + b \quad (3-9)$$

非线性映射函数 ϕ 把输入样本从原空间 \mathbb{R}^N 映射到高维线性特征空间, ω 为权值

向量, b 为偏差。利用结构风险最小化原则, 构造如下最小化问题:

$$\begin{aligned} \min J(\omega, b, \varepsilon_i) &= \frac{1}{2} \omega^T \omega + \frac{1}{2} C \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \\ \text{s.t. } y_i &= \omega^T \phi(x_i) + b + \varepsilon_i, \quad i=1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (3-10)$$

式(3-10)中, $\omega^T \omega$ 控制模型复杂度, ε_i 是误差项, C 为惩罚参数, 且 $C > 0$ 。为求解这个最优化问题, 引入拉格朗日函数:

$$L(\omega, b, \varepsilon_i, a_i) = J(\omega, b, \varepsilon_i) - \sum_{i=1}^n a_i \{ \omega^T \phi(x_i) + b + \varepsilon_i - y_i \} \quad (3-11)$$

式(3-11)中, $a_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为拉格朗日乘子, 根据如下优化条件:

$$\begin{cases} \omega = \sum_{i=1}^n a_i \phi(x_i) \\ \sum_{i=1}^n a_i = 0 \\ a_i = C \varepsilon_i \\ y_i = \omega^T \phi(x_i) + b + \varepsilon_i \end{cases} \quad (3-12)$$

将式(3-12)中 ω 、 ε_i 消去, 优化问题转化为求解如下 线性方程组:

$$\begin{bmatrix} 0 & \eta \\ \eta^T & K + C^{-1}I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ Y \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

式(3-13)中, $\eta = [1, 1, \dots, 1]_{1 \times n}$, I 为单位阵。 $a = [a_1, a_2, \dots, a_n]^T$, $Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$ 。解出系数 a_i 和偏差 b , 得到 LSSVM 函数为:

$$y(x) = \sum_{i=1}^n a_i K(x, x_i) + b \quad (3-14)$$

(2) 核函数和模型参数优化算法

最小二乘支持向量机建模主要是选择核函数和惩罚度参数。使用支持向量机时需要将原模式空间映射到高维特征空间中, 但在解决具体的实际问题时较难知道这种映射的具体形式。通过使用核函数能够实现在高维特征空间中样本的线性分类, 并不需要知道具体的非线性映像。常用的核函数有:

①线性核函数:

$$K(x, x^T) = (x, x^T) \quad (3-15)$$

②多项式核函数:

$$K(x, x^T) = [(x, x^T) + 1]^d \quad (3-16)$$

③高斯径向基(Radial Basis Function, RBF)函数:

$$K(x, x^T) = \exp[-\|x - x^T\|^2 / (2\sigma^2)] \quad (3-17)$$

式(3-17)中, σ 为核函数的宽度系数。与传统的径向基函数方法相比, 这里每个基函数的中心点都与支持向量机的一个支持向量相对应, 其中心点本身和输出权值都是由支持向量机的学习算法来自动确定的。

④多层感知机函数(Sigmoid 函数):

$$K(x, x^T) = \tanh[\rho(x, x^T) + b] \quad (3-18)$$

⑤样条函数:

$$K(x, x^T) = 1 + (x, x^T) + 1/2(x, x^T) \min(x, x^T) - 1/6 \min(x, x^T)^3 \quad (3-19)$$

⑥傅立叶级数:

$$K(x, x^T) = \frac{\sin(N + 1/2)(x - x^T)}{\sin(1/2)(x - x^T)} \quad (3-20)$$

⑦神经网络核函数:

$$K(x, x^T) = \frac{1}{1 + \exp[(v(x, x^T) - a)]} \quad (3-21)$$

式(3-21)中, v 和 a 均为常数。

不同类型的核函数对应不同的学习机器, 针对某一问题并没有统一的标准规定选择何种核函数比较好。RBF 核函数因其良好的特性得到了广泛的应用, 所以本文也采用 RBF 核函数。核函数确定以后, 就可以利用优化算法选择合适的模型参数。不同的参数对模型的推广能力具有极大的影响。常用方法有经验选择法、网格搜索法和遗传算法等。经验选择法依赖人的主观判断, 且缺乏理论基础, 会出现误差较大的情况; 网格搜索法需要大量的计算, 会出现结果不收敛的情况; 遗传算法操作简单、全局搜索能力强, 在最优化理论中应用较成熟^[54], 因此本文利用遗传算法对模型参数进行寻优。参数寻优流程如图 3-1 所示。

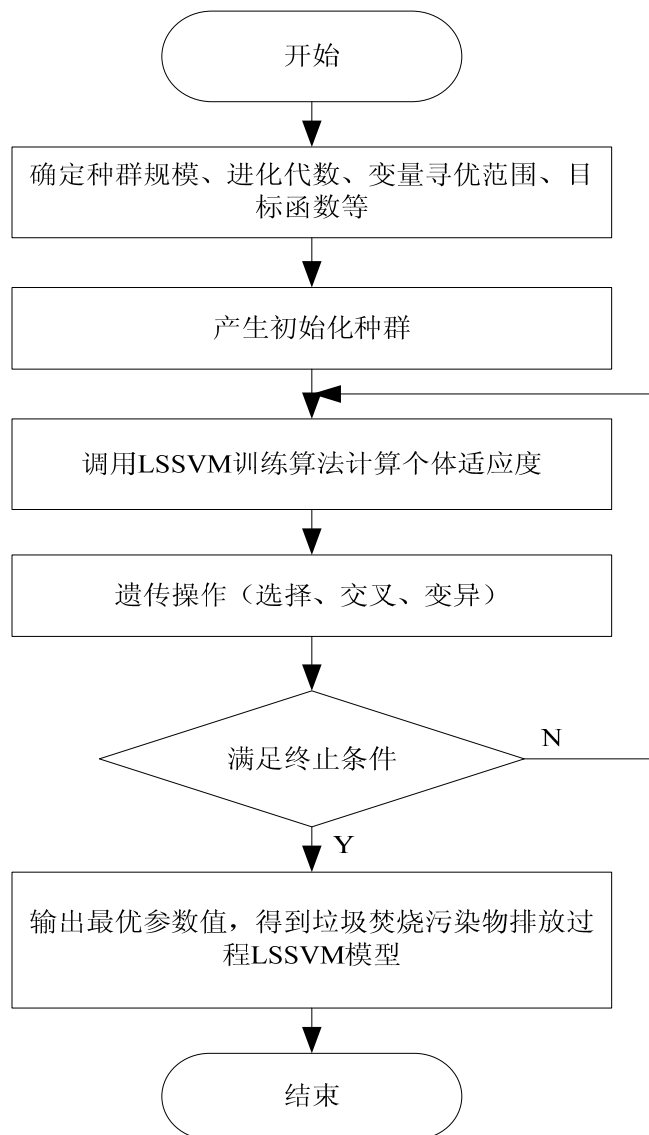


图 3-1 遗传算法参数寻优流程

3.2 模型建立及验证

3.2.1 垃圾与棉杆混燃过程模型建立及验证

前文已经介绍了影响污染物排放的因素，其中炉膛温度在污染物的排放过程中起着至关重要的作用。控制好炉膛温度，不但可以提高燃烧效率，保持燃烧的稳定性，还可以减少污染物的排放，尤其是剧毒二噁英在 850℃ 以上分解率会大大提高。因此本文首先根据华北某垃圾焚烧发电厂以城市生活垃圾为主要燃料，掺烧棉花杆进行的实验，研究一次风率（一次风与总风量之比），棉杆掺混质量百分含量，过量空气系数和进料量对炉膛温度的影响。实验数据如表 3-1 所示。

表 3-1 垃圾与棉杆混燃过程实验数据^[55]

编号	一次风率	棉杆掺混质量百分含量	过量空气系数	进料量/t·h ⁻¹	炉膛温度/℃
1	65	0	1.70	16	698
2	70	0	1.70	16	701
3	75	0	1.70	16	710
4	80	0	1.70	16	715
5	65	15	1.70	16	830
6	70	15	1.70	16	840
7	80	15	1.70	16	880
8	75	0	1.60	16	790
9	75	0	1.65	16	710
10	75	0	1.75	16	695
11	75	15	1.60	16	910
12	75	15	1.65	16	900
13	75	15	1.75	16	850
14	75	5	1.70	16	750
15	75	10	1.70	16	860
16	75	0	1.70	13	680
17	75	0	1.70	14	700
18	75	0	1.70	15	705
19	75	15	1.70	13	850
20	75	15	1.70	14	858
21	75	15	1.70	15	880
22	75	15	1.70	16	890

(1)数据预处理

在建立模型前根据拉依达准则对原始数据进行预处理，检验是否存在由于粗大误差而带来的“坏值”。经检验表 3-1 中没有异常数据。

(2)灰色关联度分析

根据灰关联理论，针对本例中垃圾焚烧炉内垃圾与棉杆混燃过程试验数据，以炉膛温度为参考序列，其余输入因素为比较序列，根据式(3-3)对数据作初始化变换，根据式(3-5)计算灰色关联度系数，根据式(3-7)计算灰色关联度。根据式(3-8)计算各变量权重系数。各因素对炉膛温度的灰色关联度值和权重系数如表 3-2 所示。

表 3-2 各影响因素对炉膛温度的灰色关联度值及权重系数

	一次风率	棉杆掺混质量百分含量	过量空气系数	进料量/t·h ⁻¹
灰色关联值	0.404	0.400	0.623	0.500
权重系数	0.210	0.208	0.323	0.259

(3)LSSVM 建模

将得到的各变量权重系数乘以相应的变量作为模型输入条件建立垃圾与棉杆混燃过程 LSSVM 模型，如图 3-2 所示。表 3-1 中，前 18 组数据作为模型的训练样本，对模型进行训练；19-22 组数据作为模型测试样本，用以检验模型准确性。选用高斯径向基函数作为核函数，因为这种核函数训练后的模型具有比其他核函数更好的总体性能^[56]。

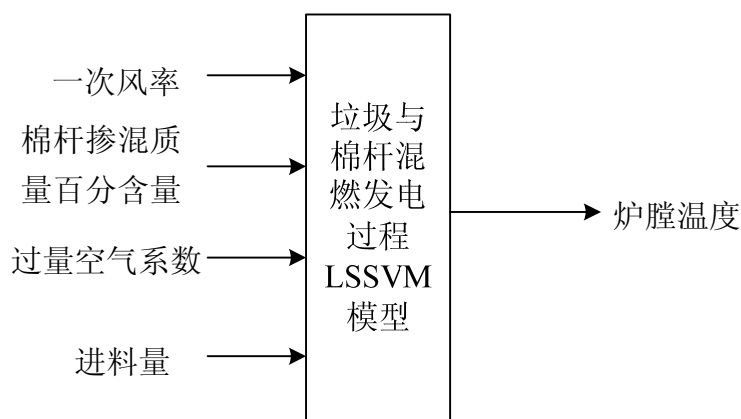


图 3-2 垃圾与棉杆混燃发电过程 LS-SVM 模型

建模的过程就是寻找合适的惩罚度参数 C 和核宽度 σ ，对模型进行训练，得出一个能较好模拟垃圾与棉杆混燃过程的数学模型的过程。本文选择遗传算法对参数 C 与 σ^2 寻优。选择遗传代数为 200，初始种群规模为 50，参数 C 和 σ^2 寻优范围^[47]为 $C \in [1, 1000]$ ， $\sigma^2 \in [1, 10]$ 。目标函数为模型预测值与期望值相对误差的平方和的平均值^[48]，即

$$Q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right)^2 \quad (3-22)$$

式(3-22)中， n 为训练样本， y_i 为第 i 个样本的期望输出， \hat{y}_i 为模型的预测输出。寻优过程的个体适应度函数为： $f=1/(Q+m)$ ， m 是避免分母为零所加的一个正数，这里取为 1。初始化工作后，经过选择、交叉、变异等遗传操作实现对参数 C 与 σ^2 的寻优，确定决策函数 $y(x)$ 即垃圾与棉杆混燃过程 LSSVM 模型，参数寻优过程流程如图 3-4 所示。模型参数寻优结果为 $C=600.7960$ ， $\sigma^2=1.6064$ 。从而确定垃圾与棉杆混燃过程模型为：

$$y = \sum_{i=1}^l a_i k(x, x_i) + b \quad (3-23)$$

$$a = \begin{bmatrix} -0.6937 \\ -0.4849 \\ -66.8794 \\ -0.6757 \\ 0.6289 \\ 0.0396 \\ 0.9164 \\ 321.4771 \\ -173.061 \\ -73.55 \\ 76.5677 \\ 75.3453 \\ -151.5261 \\ -0.6241 \\ 0.9772 \\ -14.7576 \\ 31.1867 \\ -24.8865 \end{bmatrix}$$

$$b=[0.001]$$

(4)模型拟合效果和泛化能力验证

根据已建立的 LSSVM 模型和测试样本集，求得垃圾与棉杆混燃过程相关性能指标的模型预测值。用平均绝对百分误差（Mean Absolute Percentage Error, *MAPE*）作为模型预测结果的评价标准，对训练样本预测后得到的 *MAPE* 称为拟合误差，反映模型的拟合能力；对测试样本预测后得到的 *MAPE* 为外推误差，反映模型的泛化能力^[57]。

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (3-24)$$

式(3-24)中， n 为预测样本个数， y_i 为第 i 个样本的期望值， \hat{y}_i 为模型预测值。

表 3-3 给出了 GRA-LSSVM 模型对炉膛温度的预测结果；表 3-4 给出了 GRA-LSSVM 模型和 LSSVM 模型所得的平均绝对百分误差(MAPE)；图 3-3 给出了 GRA-LSSVM 模型和 LSSVM 模型对炉膛温度的预测曲线。

表 3-3 模型预测值与实验值的比较

编号	炉膛	温度/℃	相对 误差/%
	实验值	预测值	
1	698	698.0924	0.01
2	701	701.0646	0.01
3	710	718.9051	1.25
4	715	715.0900	0.01
5	830	829.9163	0.01
6	840	839.9147	0.01
7	880	879.8780	0.01
8	790	747.1946	5.42
9	710	733.0435	3.25
10	695	704.7933	1.41
11	910	899.8048	1.12
12	900	889.9676	1.10
13	850	870.1760	2.37
14	750	750.0831	0.01
15	860	859.8699	0.02
16	680	681.9650	0.29
17	700	695.8474	0.59
18	705	708.3137	0.47
19	850	846.6268	0.40
20	858	863.6474	0.66
21	880	875.7078	0.49
22	890	880.0881	1.11

表 3-4 GRA-LSSVM 模型与 LSSVM 模型的比较

算法	拟合 MAPE/%	外推 MAPE/%
GRA-LSSVM 模型	0.96	0.67
LSSVM 模型	1.84	4.38

由表 3-3、表 3-4 可知, 本文所用的建模方法模型预测值与实验值的最大相对误差为 5.42%, 模型拟合 MAPE 为 0.96%, 外推 MAPE 为 0.67%, 均小于单纯 LSSVM 模型的 MAPE。本文所采用的融入 GRA 和权重系数的 LSSVM 建模方法比单纯 LSSVM 方法具有更好的拟合效果和泛化能力。

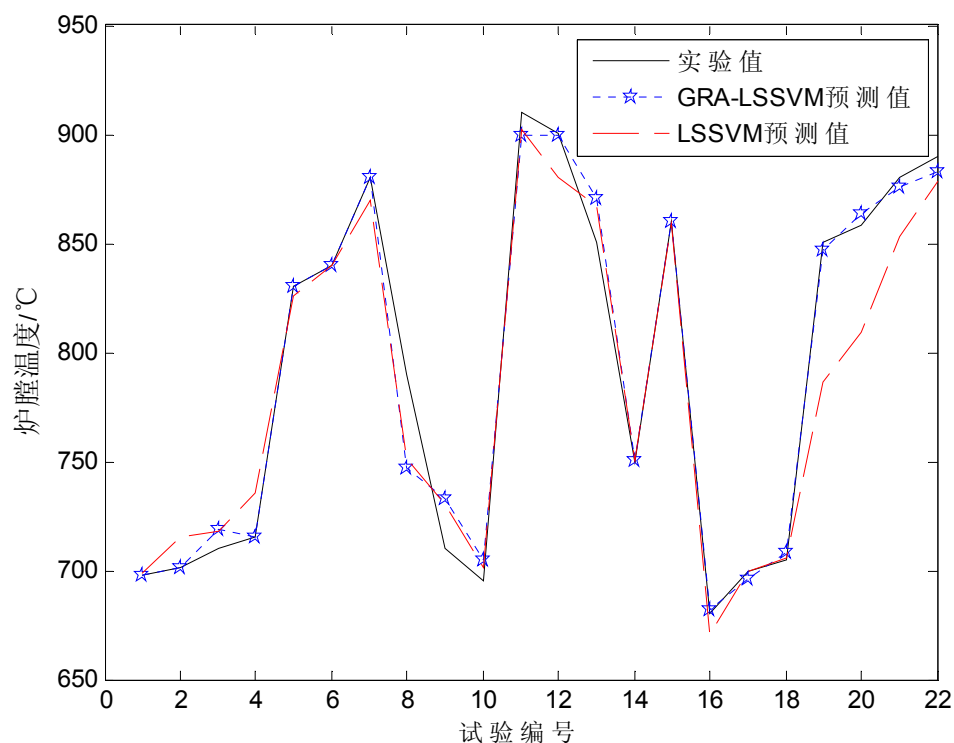


图 3-3 GRA-LSSVM 模型与 LSSVM 模型对炉膛温度的预测曲线

由图 3-3 可知，GRA-LSSVM 模型预测值较单纯 LSSVM 模型预测值更接近实验值，能够紧跟数据的变化趋势。因此，可以看出，灰色关联度分析和权重系数的融入有效地提高了垃圾与棉杆混燃过程模型的准确性和稳定性。

3.2.2 污染物排放过程模型建立及验证

本文以流化床垃圾焚烧炉在总风量、配风比（二、一次风比率）、炉膛温度、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 NH_3 不同的情况下生成的二噁英、 CO 、 NO_x 实验值为基础，通过数据预处理、灰色关联度分析选取合适的变量建立垃圾焚烧发电过程污染物排放模型。垃圾焚烧发电厂炉内工况及污染物排放值如表 3-5 所示。

表 3-5 垃圾焚烧发电厂炉内工况及污染物排放值^[58]

编号	总风量 /Nm ³ /h	配风 比	炉膛温度 /°C	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ /kg/h	NH_3 /m ³ /h	二噁英 /ng-TEQ/Nm ³	CO /mg/m ³	NO_x /mg/m ³
1	36250	2.31	866	150	6.0	11.49	3.75	190.65
2	33580	2.04	864	154	2.8	7.08	5.13	219.35
3	32740	1.98	840	53	2.7	11.00	6.38	196.80
4	32100	1.79	858	46	1.5	18.15	3.25	241.90

表 3-5 (续表)

5	31800	1.65	746	50	3.4	14.98	24.88	266.50
6	31800	1.77	876	40	1.9	8.89	5.38	252.15
7	31500	1.63	783	30	3.4	29.53	10.63	237.80
8	31500	1.76	874	40	2.6	6.61	13.00	301.35
9	31270	1.82	861	50	2.2	14.00	7.88	205.00
10	29800	1.48	845	30	3.4	13.70	2.13	207.05
11	29600	1.47	858	30	1.7	20.12	2.13	188.60
12	29110	1.64	915	80	2.2	5.20	1.25	262.40
13	27700	1.5	961	128	1.5	30.41	1.75	231.65
14	26790	1.23	930	128	2.0	25.78	1.63	274.70
15	26780	1.23	930	128	2.0	26.38	0.88	270.60
16	26500	1.39	948	128	3.0	31.27	2.00	190.65

(1) 数据预处理

经检验, 编号为 1、5、15 的数据为“坏值”数据, 应剔除。对预处理后的 13 组数据按原顺序重新编号为 1-13。

(2) 样本数据的灰色关联度分析

根据灰关联理论, 针对表 3-5 中预处理后数据, 分别以二噁英、CO、NO_x 为参考序列, 其余输入因素为比较序列, 计算灰色关联度。各因素对二噁英、CO、NO_x 的灰色关联度值如表 3-6 所示。

表 3-6 各影响因素对二噁英、CO、NO_x 的灰色关联度值

污染物	总风量	配风比	炉膛温度	Ca(OH) ₂	NH ₃
二噁英	0.3546	0.3666	0.4893	0.5816	0.4811
CO	0.4992	0.5172	0.5095	0.4614	0.5124
NO _x	0.4861	0.5124	0.5896	0.4169	0.4255

由灰色关联度值可以看出: 总风量、配风比对二噁英的影响较小。但对 CO、NO_x 均有较大影响; Ca(OH)₂、NH₃ 对 NO_x 的影响较小, 但对二噁英、CO 均有较大影响; 炉膛温度对二噁英、CO、NO_x 均有较大影响。各因素对二噁英、CO、NO_x 的影响程度是不同的, 无法给与一个特定的权重系数, 因此选取总风量、配风比、炉膛温度、Ca(OH)₂、NH₃ 为垃圾焚烧污染物排放过程影响因素, 作为模型输入量。

(3) 模型建立

垃圾焚烧发电污染物排放过程 LSSVM 模型如图 3-4 所示。

以对表 3-5 数据经过预处理后的前 11 组数据作为模型的训练样本, 12、13 组数据作为模型测试样本。利用遗传算法对模型参数 C 与 σ^2 寻优, 模型参数优化流程如图 3-1 所示。选择遗传代数为 200, 初始种群规模为 50, 参数寻优范围为

$C \in [1, 1000]$, $\sigma^2 \in [0.1, 100]$, 得出模型参数寻优结果为 $C=854.5035$, $\sigma^2=5.8612$ 。根据得到的参数 C 与 σ^2 对 LS-SVM 模型进行训练。

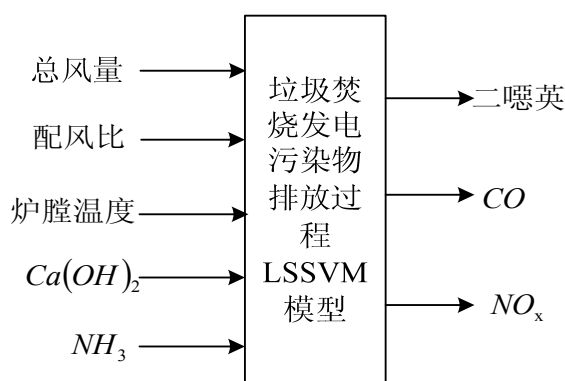


图 3-4 垃圾焚烧发电污染物排放过程 LSSVM 模型

(4)模型的拟合效果和泛化能力验证

表 3-7 给出了本文模型对二噁英、CO、NO_x 的预测结果。1-11 组数据为模型训练数据，根据式 3-24 得到拟合 MAPE。12-13 组数据为模型验证数据，根据式 3-24 可得到外推 MAPE。表 3-8 给出了本文模型所得的 MAPE。

由表 3-7、3-8 可知模型具有较好的拟合效果和泛化能力。模型预测值与实验值的最大相对误差为 7.8%，模型拟合 MAPE 最大为 4.67%，外推 MAPE 最大为 3.98%，满足工程预测的要求^[57]。

表 3-7 模型预测值与实验值的比较

编号	二噁英/ng-TEQ/Nm ³		相对误差/%	CO/mg/m ³		相对误差/%	NO _x /mg/m ³		相对误差/%
	实验值	预测值		实验值	预测值		实验值	预测值	
1	7.08	7.32	3.39	5.13	4.73	7.80	219.35	216.99	2.00
2	11.00	11.38	3.45	6.38	6.61	3.53	196.80	199.34	1.29
3	18.15	17.55	3.32	3.25	3.10	4.62	241.90	236.41	2.27
4	8.89	9.08	2.14	5.38	5.63	4.65	252.15	257.77	2.23
5	29.53	29.05	1.63	10.63	10.30	3.06	237.80	233.37	1.86
6	6.61	6.35	3.93	13.00	12.50	3.85	301.35	290.18	3.71
7	14.00	13.55	3.21	7.88	7.53	4.44	205.00	213.45	4.12
8	13.70	14.05	2.58	2.13	2.26	6.47	207.05	210.90	1.86
9	20.12	19.26	4.28	2.13	2.23	4.71	188.60	193.21	2.45
10	5.20	5.45	4.81	1.25	1.33	6.00	262.40	258.01	1.67
11	30.41	29.22	3.91	1.75	1.64	6.43	231.65	226.96	2.03
12	25.78	25.19	2.29	1.63	1.56	3.85	274.70	266.75	2.90
13	31.27	32.37	3.52	2.00	1.74	1.30	190.65	198.24	3.98

表 3-8 本文模型拟合 MAPE 和外推 MAPE

算法	拟合 MAPE/%			外推 MAPE/%		
	二噁英	CO	NO _x	二噁英	CO	NO _x
本文模型	3.28	4.67	2.49	2.33	3.98	1.35

3.2.3 垃圾焚烧二噁英净化过程模型建立及验证

二噁英的去除效率随着活性炭喷入量的增加而增加，活性炭粉末的喷入量随着烟气中的二噁英浓度的变化而变化。文献[59]中指出当活性炭浓度小于 $65\text{mg}/\text{Nm}^3$ 时，二噁英的去除效率与其接近线性关系，然而当活性炭浓度大于 $150\text{mg}/\text{Nm}^3$ 时，二噁英的去除效率变化不明显。本文研究二噁英净化过程中活性炭浓度和 ACI 入口二噁英的浓度对二噁英去除效率的影响，旨在寻找当二噁英去除效率达到最大时，活性炭的浓度和 ACI 入口烟气中二噁英的浓度。实验数据如表 3-9 所示。

表 3-9 二噁英去除效率实验数据^[59]

编号	活性炭浓度/ mg/Nm^3	ACI 入口烟气中二噁英浓度/ $\text{ng-TEQ}/\text{Nm}^3$	去除效率/%
1	10	0.1129	7.5
2	20	0.3200	12.3
3	25	0.3285	21.0
4	30	0.7152	18.9
5	35	0.549	24.7
6	40	0.3356	55.3
7	55	0.3381	71.9
8	60	0.9386	66.0
9	66	0.6144	79.5
10	70	0.3856	88.9
11	80	0.242	87.6
12	91	0.5725	95.0
13	100	1.0359	92.4
14	105	0.7496	95.5
15	110	0.6479	97.2
16	120	0.3780	96.9
17	150	0.2656	94.5
18	160	1.2925	98.2
19	185	0.6213	97.7
20	198	0.3346	96.5
21	200	1.9405	98.9
22	250	0.2876	98.0
23	300	0.4009	99.0

(1)数据预处理和灰色关联度分析

在建立模型前根据拉依达准则对原始数据进行预处理，检验是否有“坏值”。经过检验表 3-9 中没有异常数据。因为本例中模型的输入变量只有两个，所以不进行灰色关联度分析计算。

(2)模型的建立

垃圾焚烧二噁英净化过程 LSSVM 模型如图 3-5 所示。

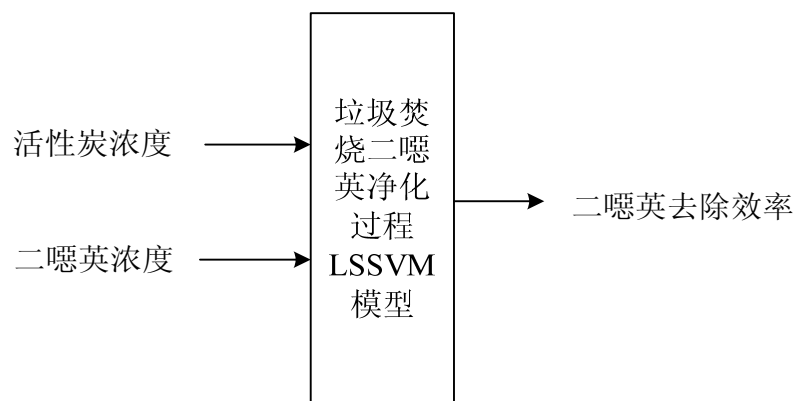


图 3-5 垃圾焚烧二噁英净化过程 LSSVM 模型

本文采用 MATLAB 语言进行编程，以对表 3-9 前 20 组数据作为模型的训练样本，20-23 组数据作为模型测试样本。利用遗传算法对模型参数 C 与 σ^2 寻优。选择遗传代数 200，初始种群规模为 50，参数寻优范围为 $C \in [1, 1000]$ ， $\sigma^2 \in [0.1, 100]$ ，得出模型参数寻优结果为 $C=731.5856$ ， $\sigma^2=6.8880$ 。根据得到的最优化的参数 C 与 σ^2 对 LS-SVM 模型进行训练。

表 3-10 给出了本文模型对二噁英去除效率的预测结果，模型预测值与实验值的最大相对误差为 8.1%，根据式(3-24)得到拟合 MAPE 为 2.6%，外推 MAPE 为 5.3%，模型具有较好的拟合效果和泛化能力，满足工程预测的要求^[57]。

表 3-10 模型预测值与实验值的比较

编号	去除效率/%		相对误差/%
	实验值	预测值	
1	7.5	7.7	2.6
2	12.3	13.2	7.3
3	21.0	22.7	8.1
4	18.9	17.5	7.4
5	24.7	25.8	4.5
6	55.3	53.6	3.1
7	71.9	71.1	1.1

表 3-10 (续表)

8	66.0	66.1	0.2
9	79.5	76.0	4.4
10	88.9	86.0	3.2
11	87.6	90.7	3.5
12	95.0	95.4	0.4
13	92.4	92.4	0.0
14	95.5	95.8	0.2
15	97.2	98.2	1.1
16	96.9	99.4	2.6
17	94.5	92.5	2.1
18	98.2	98.1	0.1
19	97.7	97.1	0.5
20	96.5	96.9	0.4
21	98.9	91.5	7.5
22	98.0	103.6	5.7
23	99.0	96.4	2.6

3.3 本章小结

(1)基于一种融入灰色关联度分析的最小二乘支持向量机建模方法建立了垃圾与棉杆混燃过程 GRA-LSSVM 模型。验证结果表明,经过灰色关联度分析的最小二乘支持向量机模型具有更好的拟合效果和泛化能力,模型结果验证了模型的稳定性和稳定性。

(2)垃圾焚烧污染物排放过程数据经过灰色关联度分析后无法确定各因素的权重系数,垃圾焚烧二噁英净化过程为两个输入因素,不适合进行灰色关联度分析确定权重系数,因此建立垃圾焚烧污染物排放过程和垃圾焚烧二噁英净化过程 LSSVM 模型。验证结果表明模型具有较好的拟合效果和泛化能力,可以满足工程预测要求。

第4章垃圾焚烧发电污染物排放过程工况优化

建立准确的模型是为后续过程工况优化做准备，垃圾焚烧发电污染物排放过程工况优化目的在于得到最佳的运行工况使污染物的排放量降到最低，满足国家排放要求，最终为实际垃圾焚烧过程污染物的优化控制提供参考。本章依据 3.2 节所建立的模型，分别设计了垃圾与棉杆混燃过程、污染物排放过程、二噁英净化过程多目标优化函数，并通过并列遗传算法寻优得到了垃圾与棉杆混燃过程、污染物排放过程、二噁英净化过程 Pareto 最优解集。

4.1 多目标优化算法

融入灰色关联度分析的最小二乘支持向量机建模方法为垃圾焚烧发电污染物排放过程提供了准确、有效的模型支持。在此模型的基础之上，分别对垃圾与棉杆混燃过程、垃圾焚烧发电污染物排放过程、二噁英净化过程各运行条件进行优化。垃圾与棉杆混燃过程、二噁英净化过程的目标值只有一个，是单目标优化问题。垃圾焚烧发电污染物排放过程的目标值有二噁英、CO、NO_x三个目标值，是多目标优化问题。单目标优化问题的最优解只有一个。但多目标优化问题的解却是存在一个最优解集合，这是与单目标优化问题的本质区别。最优解集合中的元素称为Pareto最优，解集中的元素是彼此不可比较的，都是非劣最优解。单目标优化问题可以看做是特殊的多目标优化问题，为使本文优化方法统一，全部模型采用多目标优化算法进行优化。

生活中的大部分问题都可以归为多目标的最优化问题。因为其广泛性和求解的困难性，近30年迅速发展成为国内和国际许多学者关注和重视的问题。但近年来多目标优化理论和方法一直充满挑战。由于遗传算法具有多方向和全局搜索的特点，将遗传算法应用于多目标优化问题一直是研究的热点方向。

4.1.1 多目标优化问题的数学模型

一般的多目标优化问题 (Multi-objective Optimization Problem, MOP) 由一组目标函数和一些相关的约束构成，可下所述：

$$\min_{X \in \Omega} F(X) = \{f_1(X), f_2(X), \dots, f_m(X)\} \quad (4-1)$$

$$X \in \Omega \subset R^n$$

$$\text{s.t. } g_i(X) \leq 0, i=1, 2, \dots, p$$

其中, $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 是 R^n 中的 n 维向量, 称 X 的所在空间 D 为决策空间。 $f_i(X)$, $i=1, 2, \dots, m$ 为问题的子目标函数, 彼此之间相互冲突, 即不存在 $X \in \Omega$ 使 $f_1(X), f_2(X), \dots, f_m(X)$ 在 X 处同时取最小值, $\{f_1(X), f_2(X), \dots, f_m(X)\}$ 所在的空间称为问题的目标空间, $g_i(X) \leq 0$, $i=1, 2, \dots, p$, 为约束函数。

4.1.2 传统的多目标优化算法

传统的多目标优化方法是将多目标问题转化为单目标问题, 这样就可以利用现有求解单目标优化问题的方法求解多目标优化问题。传统的多目标优化方法有:

(1)约束法: 选择多目标中的任意一个目标为基本目标, 将其它目标化为不等式约束, 不断变换约束水平, 生成多目标问题的非劣解集。

(2)权重法: 此方法由 Zadeh 最先提出, 为每个目标函数赋予一定的权重, 构成一个单目标的优化问题, 改变每个目标的权值, 生成多目标优化问题的非劣解集^[60]。

(3)拉格朗日乘子法: 与权重法差别较小, 但它主要涉及驻点与鞍点的概念, 也是一种将向量问题转化为标量问题的方法。

此外, 还有权重范数、最小最大法、权重与约束混合法等。

4.1.3 多目标遗传算法

随着各种复杂决策理论和大系统数学模型的出现, 传统的方法很难处理大规模问题。而多目标遗传算法除了能够处理大规模问题, 最主要的是不受问题性质的限制, 搜索到问题的全局最优解。1967 年, Rosenberg 将遗传算法思想与多目标优化问题相结合, 开创了遗传算法在多目标优化领域的研究^[61]。此后, 许多的研究人员开始对此产生兴趣。目前针对如何求解多目标优化问题已经有多种基于遗传算法的求解方法, 下面介绍几种常用的遗传算法:

(1)并列选择遗传算法

Schaffer 提出的“向量评估多目标遗传算法”是第一个寻找非劣解的多目标遗传算法^[62]。并列选择法是单目标遗传算法的直接扩充, 是最简单的多目标遗传算法。此方法根据子目标函数的个数将种群中个体均分成若干子种群, 并分配其一个子目标函数, 每个子目标函数在其所在的群体中进行选择操作, 然后再成立一个新子种群, 最后把生成的所有子种群合为完整群体进行交叉、变异操作, 如此循环, 得到问题的 Pareto 最优解。图 4-1 给出了多目标并列选择遗传算法示意图。

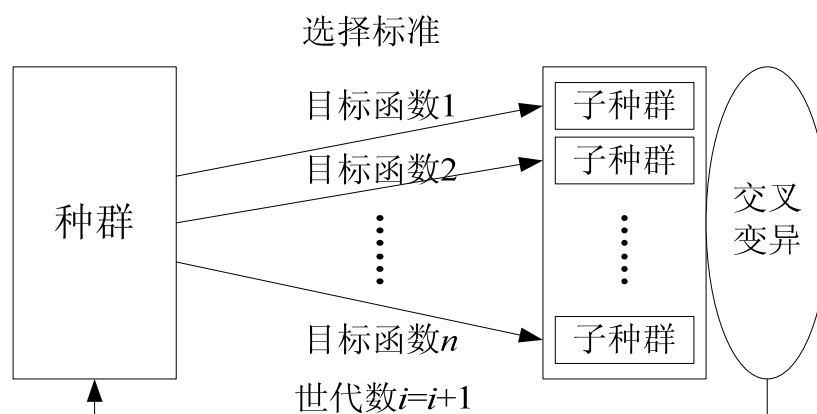


图 4-1 并列选择遗传算法示意图

(2) 微遗传算法(Micro-Genetic Algorithm, Micro-GA)

2001 年, Coello 和 Toscano Pulido 提出一种含小的种群和重新初始化过程的微遗传算法^[63]。其过程如下: 首先生成随机种群, 将其放入种群内存里, 种群内存包括不可替代部分和可替代部分。不可替代部分在整个过程中只提供算法的多样性。可替代部分随着算法的运行而变化。在每一轮运行开始, Micro-GA 的种群需要从可替代部分选择出进化个体, 不可替代部分选择出随机生成的个体。Micro-GA 使用传统的遗传操作; 然后, 选择两个非劣向量与外部种群中的向量比较, 如果两个全部非劣, 则将其放入外部种群, 同时将外部种群中所有被它支配的个体删除。

(3) 非劣分层遗传算法(NSGA)

Deb 和 Srinivas 于 1994 年提出非劣分层遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm), 该算法是一种基于 Pareto 最优概念的多目标演化算法^[64]。其过程如下: 首先把最高序号给当代种群中的非劣解, 赋给总体适应值。为了保持解的多样性, 该层所有非劣解共享此总体适应值。此后, 不再考虑该层非劣解集。然后, 继续搜索下一层非劣解集, 并将该非劣解集称为第二层, 分配排列序号、并赋给总体适应值, 同样实行适应值共享。一直重复直到此种群中全部个体都被赋予适应度值。

此外, 还有基于模糊决策、邻近约束的多目标遗传算法, 多目标粒子群算法等多目标优化算法。多目标遗传算法包括六个基本要素, 分别为参数的编码, 生成初始种群, 设定适应度函数, 设计遗传操作、设定控制参数和算法终止条件。

4.2 垃圾与棉杆混燃过程工况优化

4.2.1 优化方案

基于 3.2.1 节所建立的垃圾与棉杆混燃过程 LSSVM 模型, 寻求当一次风率、棉杆掺混质量百分含量、过量空气系数和进料量分别满足某种条件时, 使得垃圾焚烧炉炉膛温度达到正常工作的要求。由于此过程的目标值只有一个即炉膛温度, 所以可以把它当做是多目标优化的特例, 仍用并列选择遗传算法进行求解。

基于文献[55]的试验工况确定待优化变量取值范围: ①一次风率: 60-80%; ②棉杆掺混质量百分含量: 0-20%; ③过量空气系数: 1.6-1.8; ④进料量 13-16 t/h。

4.2.2 优化目标函数

在垃圾焚烧过程中, 希望炉膛温度尽可能高, 以使垃圾能够充分的燃烧, 保证燃烧效率, 同时达到彻底分解有毒物质, 减少污染物排放的目的。因此, 垃圾焚烧炉炉膛内的温度应大于 850℃。多目标优化函数为:

$$\begin{aligned} & \text{Max } \{y_l(X)\} \\ & \text{s.t. } y_l(X) > 850^\circ\text{C} \\ & 60\% < x_1 < 80\% \\ & 0 < x_2 < 20\% \\ & 1.6 < x_3 < 1.8 \\ & 13\text{t/h} < x_4 < 16\text{t/h} \end{aligned} \quad (4-1)$$

式(4-1)中, $X=(x_1, x_2, x_3, x_4)^T$, x_1 为一次风率, x_2 为棉杆掺混质量百分含量, x_3 为过量空气系数, x_4 为进料量; $y_l(X)$ 为炉膛温度。

4.2.3 优化计算

针对所建立的多目标优化函数, 采用并列选择遗传算法进行参数寻优, 流程如图 4-2 所示。优化结果为当一次风率为 77.8, 棉杆掺混质量百分含量为 16.5, 过量空气系数为 1.73, 进料量为 15.8t/h, 炉膛温度达到最大值为 920℃。由优化结果可以看出炉膛温度明显高于文献[55]中数值。因此在垃圾焚烧过程中合理调整各变量目标值对于提高炉膛温度具有重要作用。

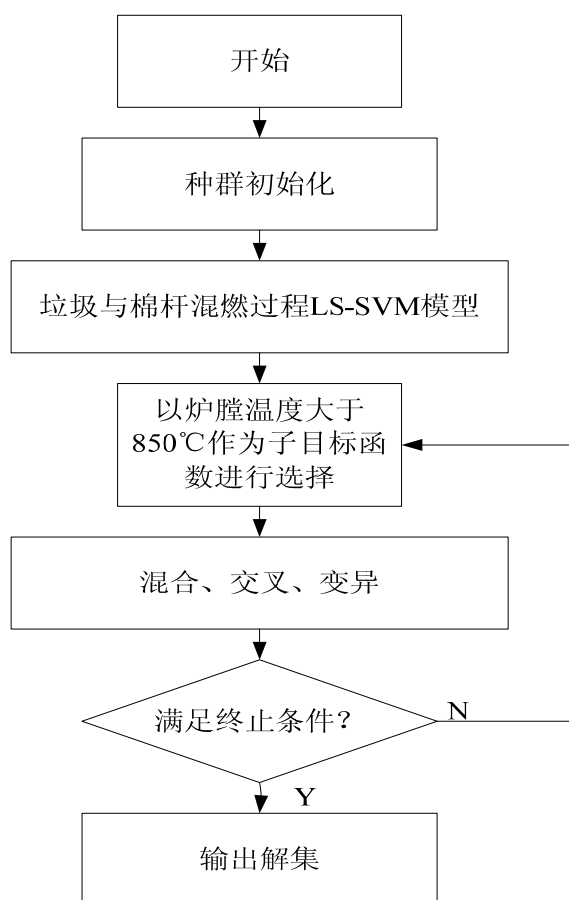


图 4-2 垃圾与棉秆混燃过程工况优化流程

4.3 垃圾焚烧发电污染物排放过程工况优化

4.3.1 优化方案

基于 3.2.2 节所建的垃圾焚烧发电污染物排放过程 LSSVM 模型, 采用并列遗传算法对垃圾焚烧过程污染物排放进行优化, 即寻求当二噁英、CO、NO_x 分别达到最优值时, 总风量、配风比、炉膛温度、Ca(OH)₂ 添加量、NH₃ 添加量应满足的目标值。

随着垃圾进给量的不同, 总风量、配风比、炉膛温度、Ca(OH)₂ 和 NH₃ 添加量都会不同, 因此本文根据表 3-5 预处理后数据确定待寻优参量的变化范围: 总风量: 25000-35000 Nm³/h; 配风比: 1.2-2.4; 炉膛温度: 780-970℃; Ca(OH)₂ 添加量: 30-160kg/h; NH₃ 添加量: 1.5-4m³/h。

4.3.2 优化目标函数

依据上述条件, 本文建立的多目标优化模型为:

$$\begin{aligned} & \text{Min} \{y_1(X), y_2(X), y_3(X)\} \\ & \text{S.t. } 25000\text{Nm}^3/\text{h} < x_1 < 35000\text{Nm}^3/\text{h} \\ & \quad 1.2 < x_2 < 2.4 \\ & \quad 780^\circ\text{C} < x_3 < 970^\circ\text{C} \\ & \quad 30\text{kg}/\text{h} < x_4 < 160\text{kg}/\text{h} \\ & \quad 1.5\text{m}^3/\text{h} < x_5 < 4\text{m}^3/\text{h} \end{aligned} \quad (4-2)$$

式(4-2)中: $x=(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)^T$, $y_1(X)$ 为二噁英排放值, ng-TEQ/Nm³; $y_2(X)$ 为 CO 排放值, mg/m³; $y_3(X)$ 为 NO_x 排放值, mg/m³; x_1 为总风量, Nm³/h; x_2 为配风比; x_3 为炉膛温度, °C; x_4 为 Ca(OH)₂ 添加量, kg/h; x_5 为 NH₃ 添加量, m³/h。

4.3.3 优化计算

垃圾焚烧发电污染物排放过程优化目标函数有三个优化目标, 分别为二噁英排放值 $y_1(X)$ 、CO 排放值 $y_2(X)$ 和 NO_x 排放值 $y_3(X)$, 仍采用并列选择遗传算法进行工况参数优化, 算法流程如图 4-3 所示。

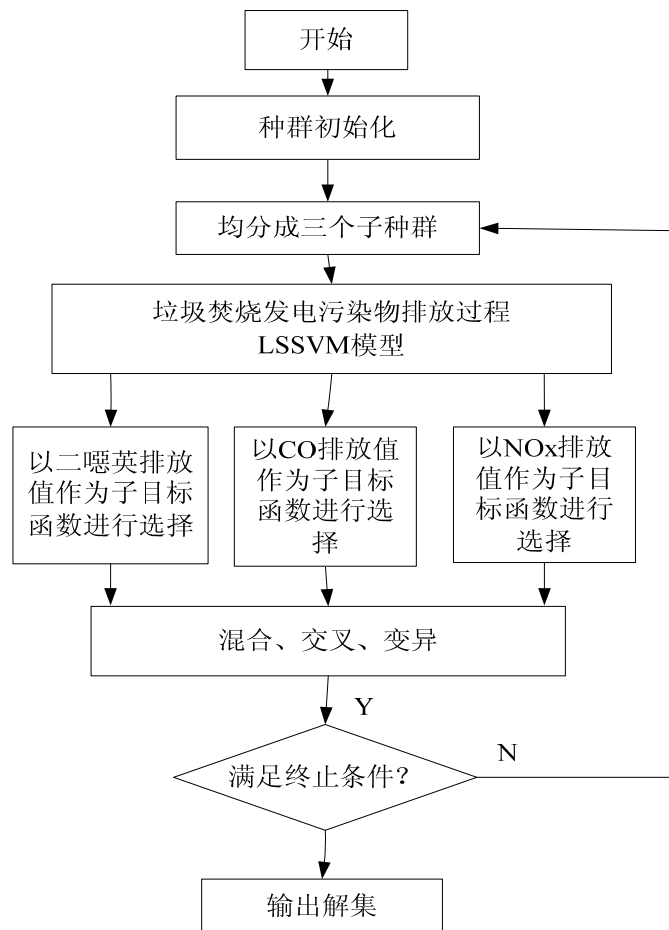


图 4-3 垃圾焚烧发电污染物排放过程工况优化流程

4.3.4 优化结果分析

本文以二噁英排放值为主要评价指标，从 Pareto 最优解集合中选取二噁英排放值较低的最优解子集，如表 4-1 所示。由表 4-1 优化结果可以看出，优化后的污染物排放值明显小于实际值，优化结果整体优于文献[57]实际值。验证了本文方法可行、有效，可为实际垃圾焚烧过程污染物排放优化控制提供参考。

表 4-1 垃圾焚烧发电过程污染物排放 Pareto 最优解子集

编号	总风量 /Nm ³ /h	配风 比	炉膛温度 /℃	Ca(OH) ₂ /kg/h	NH ₃ /m ³ /h	二噁英 /ng-TEQ/Nm ³	CO /mg/m ³	NO _x /mg/m ³
1	33000	1.9	819	118	3.1	3.4	4.88	200.90
2	32857	2.1	795	62	3.3	6.4	5.00	182.45
3	32753	2.2	854	124	2.8	5.1	5.25	225.50
4	32369	2.1	925	108	3.4	0.9	4.63	246.00
5	31285	2.0	912	79	3.5	1.5	6.38	211.15
6	31064	1.6	900	96	3.8	5.1	4.38	235.75
7	27714	1.8	933	143	2.7	2.7	2.38	217.30
8	26714	1.3	800	149	2.0	4.9	2.25	223.45

4.4 二噁英净化过程工况优化

4.4.1 优化方案

基于 3.2.3 节所建的二噁英净化过程 LSSVM 模型，对垃圾焚烧二噁英净化过程进行优化，即找出二噁英去除过程中二噁英去除率达到最高时的最优输入参量：活性炭浓度和 ACI 入口烟气中二噁英浓度。

依据文献[58]，当活性炭的浓度小于 65mg/Nm³ 时，二噁英的去除效率与其接近线性关系，然而当活性炭浓度大于 150mg/Nm³ 时，二噁英的去除效率变化不明显。选取活性炭浓度的范围 10-150mg/Nm³。Tejima 等人^[46]的研究表明，只有当 ACI + BF 系统入口二噁英浓度不大于 5 ng-TEQ/Nm³ 时，其出口浓度才能够满足 0.1 ng-TEQ/Nm³ 的排放标准。假设 ACI + BF 入口烟气中气相部分二噁英所占的比例大约是 50%^[8]，则 ACI + BF 系统入口的气相部分二噁英的浓度应不高于 2.5 ng-TEQ/Nm³。结合文献[58]具体实验数据选取 ACI 入口二噁英浓度范围 0-2ng-TEQ/Nm³。

4.4.2 优化目标函数

依据上述条件，本文建立的多目标优化模型为：

$$\begin{aligned}
 & \text{Min} \{y_1(X), y_2(X)\} \\
 & \text{S.t. } 0 < x_1 < 2 \text{ ng-TEQ/Nm}^3 \\
 & 10 < x_2 < 150 \text{ mg/Nm}^3
 \end{aligned}
 \tag{4-3}$$

式(4-2)中: $x=(x_1, x_2)^T$, $y_1(X)$ 为 ACI 入口二噁英浓度, ng-TEQ/Nm^3 ; $y_2(X)$ 为活性炭浓度, mg/Nm^3 ;

基于上述优化目标函数模型, 采用并列选择遗传算法进行优化。得到优化结果为当活性炭浓度为 120 mg/Nm^3 , ACI 入口烟气中二噁英浓度为 0.62 ng-TEQ/Nm^3 时, 得到最大二噁英去除效率为 98.9%。活性炭的价格较贵, 过多的使用不但会造成成本过高, 还会给污染的活性炭的处理带来困难。因此用少量的活性炭得到较高的净化效率是很重要的。但是这仍需要很多工况的相互调节, 本文由于数据的单一性和局限性, 仅提供一种方法, 希望可以为以后垃圾焚烧污染物的净化提供理论参考和指导作用。

4.5 本章小结

本章设计了垃圾与棉杆混燃过程、垃圾焚烧污染物排放过程和垃圾焚烧二噁英净化过程模多目标优化函数。并通过寻优计算得到了最优工况下控制参数和目标评价值的 Pareto 最优解集, 寻优结果表明, 在 Pareto 最优解集工况条件下, 垃圾与棉杆混燃时炉膛温度达到 920°C ; 污染物排放值明显小于实验值, 优化结果整体优于实验值; 二噁英净化过程中二噁英去除效率达到 98.9%。寻优结果验证了本文方法可行、有效, 可为实际垃圾焚烧过程污染物的优化控制提供参考, 说明在垃圾焚烧过程中合理调整各变量的目标值对于污染物的控制具有重要作用。

第5章 结论与展望

垃圾焚烧技术能够有效的处理垃圾，但是垃圾焚烧产生的二次污染，特别是剧毒二噁英使垃圾焚烧处理技术的发展受到了阻碍。本文以垃圾焚烧发电污染物排放过程的研究为重点，从垃圾源头、炉内过程和炉外过程三个方面阐述了控制垃圾焚烧污染物的方法，并分析了影响污染物排放的相关因素，希望为垃圾焚烧发电污染物排放过程的分析与控制提供参考。

5.1 结论

(1) 本文对垃圾焚烧发电过程产生的污染物做了详细地介绍，对国内外垃圾焚烧发电过程中二次污染物的排放，控制方面的有关文献资料研究结果等做了深入的研究，从源头过程、炉内过程和炉外过程三个方面阐述了控制垃圾焚烧污染物的方法，并分析了影响污染物排放的相关因素。

(2) 在对污染物的产生、特性、脱除方法等深入分析的基础上，基于一种融入灰色关联度分析的最小二乘支持向量机建模方法，建立了垃圾与棉杆混燃过程、污染物排放过程、二噁英净化过程模型。并验证了模型拟合效果和泛化能力。验证结果表明，模型拟合误差和外推误差均可以满足工程预测要求。

(3) 设计了垃圾与棉杆混燃过程、垃圾焚烧污染物排放过程和垃圾焚烧二噁英净化过程模多目标优化函数。并通过寻优计算得到了最优工况下控制参数和目标评价值的 Pareto 最优解集，寻优结果表明，在 Pareto 最优解集工况条件下，垃圾与棉杆混燃时炉膛温度达到 920℃；污染物排放值明显小于实验值，优化结果整体优于实验值；二噁英净化过程中二噁英去除效率达到 98.9%。寻优结果验证了本文方法可行、有效，可为实际垃圾焚烧过程污染物的优化控制提供参考，说明在垃圾焚烧过程中合理调整各变量的目标值对于污染物的排放控制具有重要作用。

5.2 展望

由于时间和条件所限，本文的研究成果还需要补充和拓展。主要包含以下几个方面：

(1) 目前，虽已知垃圾焚烧发电过程产生的污染物的种类，但仍没有一整套关于某种典型垃圾焚烧炉污染物从源头到烟囱排放过程的相关数据和相应影响因素的数据。加强这一领域的试验研究仍是垃圾焚烧发电污染物排放过程的重点方

向。

(2) 融入灰色关联度的最小二乘支持向量机建模方法具有一定的局限性。建模及优化控制中输入、输出变量的研究领域有待拓宽。具体包括：生物质种类不同、催化剂种类不同、污染物的种类不同、布袋除尘器入口温度不同等输入变量对模型的影响。

(3) 本文的研究内容是从优化控制的角度为垃圾焚烧发电污染物排放控制领域的研究提供一种参考，在实际应用中，还需要考虑系统的其他可靠性和复杂性等因素，这是今后垃圾焚烧发电污染物排放控制研究应用领域的一个研究方向。

参考文献

- [1]张东平.城市生活垃圾流化床焚烧过程酸性气体排放及其人工神经网络预测[D].浙江:浙江大学,2003
- [2]昌鹏.垃圾焚烧稳定性自适应控制研究[D].武汉:华中科技大学, 2004
- [3]石德智.基于新型分类收集系统的生活垃圾焚烧过程污染物控制及其机理研究[D].浙江: 浙江大学,2009
- [4]韩光福,黄刚飙等.城市固体废弃物——生活垃圾处理技术发展方向[J].东南大学学报. 2001, 11(3),119-121
- [5]武松龙.国内外垃圾焚烧处理设备的现状[J].矿山机械,1998,10:52-54
- [6]徐海云.生活垃圾焚烧处理技术发展分析[J].中国环保产业,2010,9:10-15
- [7]HIDETO Y, KAZUAKI T, NOBUO T, et al. Japan's waste management policies f o r Dioxins and polychlorinated biphenyls[J]. J Mater Cycles Waste Manag, 2009, 11(3): 229-243
- [8]NieY.F.Development and Prospeet sof munieipal solid waste(MSW)ineineration in China.Frontiers of environmental Science&Engineering in China.2008,2(1):1-7
- [9]GB18485—2001.生活垃圾焚烧污染控制标准[S].北京:中国环境科学出版社,2002
- [10]Olie K., Vermeulen P.L., Hutzinger, O., Chlorodibenzo-p-PCDD/Fs and chlorodibenzofurans are trace compounds of fly ash and flue gas of some municipal incinerators in the Notherlands, Chemophere, 1977, 6(8):445-459
- [11]孙宏.生活垃圾焚烧过程中二噁英的生成及控制[J].环境卫生工程,2006,14(2): 12-14
- [12]刘征涛.持续性有机污染物的主要特征及研究进展[J].环境科学研 2005,3(18):94-100
- [13]春福,姜欣.二噁英的形成机理及分析方法[J].皮革与化工,2009,26(1):37-39
- [14]Cleverly D, Schaum J, Schweer G, et al. The congener profiles of anthropogenic sources of Chlorinated dibenzo-p-dioxins and chlorinated dibenzofurans in the United States[J]. Organohalogen Compounds,1997,32:430-435
- [15]严密,李晓东,张晓翔,等.水对前驱物催化合成二噁英的影响[J].化工学报,2010, 61(1): 86 -90
- [16]Giesy J P, Kannan K. Dioxin-like and non-dioxin-like toxic effects of polychlorinated biphenyls (PCBs): implications for risk accessment [J]. Critical reviews in toxicology,1998,28(6):511-569
- [17]邓浩,易松,徐兆发,等.二噁英对免疫及内分泌系统的影响[J].医学研究生学报, 2010,23(1):86-89
- [18]赵树青,黄文雄,谢力.我国生活垃圾焚烧行业二噁英排放现状及趋势[J].城市管理技术,2009 ,2:58-59
- [19]刘豪,邱建荣,吴昊,董学文.生物质和煤混合燃烧污染物排放特性研究[J].环境科学学报,2002, 22(4):484-488
- [20]于洪观,刘泽常,王力,吴峻青.煤燃烧过程中各形态硫析出规律的研究[J].煤炭转

- 化, 1999, 1999,22(3):53-57
- [21]徐秀峰,顾永达,陈诵英.煤燃烧过程中 SO_2 、 NO 的逸出规律研究[J].燃料化学学报, 1998,26(4):356-361
- [22]Guilin Piao,Shige Aono,Motoehiro kondoh. Combustion test of refues derived fuel, Waste Management ,2000,20:443-447
- [23]郭小汾,杨雪莲,李海滨,陈勇,谢克昌.钙化物对 HCl 的脱除动力学研究[J].中国环境科学,2000,20(3):211-214
- [24]K.Liu,W.RPan,J.T.Riley.A study of ehlorine behavior in a simulated fluidized bed combustion system.Fuel,2000,79:1115-1124
- [25]Buekens A.Huang H.Comparative evaluation of techniques for controlling the Formation and emission of chlorinated dioxins / furans in municipal waste incineration[J].Journal of Hazardous Materials,1998, 62: 1- 33
- [26]李建新,严建华,池涌,等.垃圾焚烧氯对重金属迁移特性的影响[J].燃料化学学报, 2003,31 (6) :579-581
- [27]Wang L.C.,Lee W.J.,Lee W.S.,Chang-Chien G.P.,Tsai P.J.Effect of chlorine content in feeding wastes of incineration on the emission of polychorinate dibenzo-p-dioxins/dibenzo- furans.Science of the Total Environment.2003,302:185-198
- [28]王永生.生活垃圾焚烧处理与二噁英控制.第六届海峡两岸热电联产/汽电共生学术交流会议[C].北京,2010:426 - 431
- [29]陈彤,李晓东,严建华,等.垃圾焚烧炉飞灰中二噁英的分布特性[J]. 燃料化学学报, 2004,32 (1) :6—36
- [30]李晓东,杨忠灿,陆胜勇,等.城市生活垃圾含氯量的测定[J].燃料化学学报, 2002,30(6):563- 568
- [31]杨志军,倪余文,张青,等.垃圾焚烧飞灰或炉渣中二噁英的分布特征[J].中国环境科学,2004,24(5) : 524—527
- [32]诸冠华,蔡银科. 垃圾焚烧中二噁英的减排措施——应对欧盟标准[J].城乡与环境,2011,1:78-79
- [33]胡建杭,王华,刘慧利,等.城市生活垃圾气化熔融焚烧技术[J].环境科学与技术,2008,31(11): 78 -81
- [34]Stanmore B R.The formation of dioxins in combustion systems[J].Combustion and Flame,2004 ,136: 398-427
- [35]Griffin R.D.,A new theory of dioxin fonnation in municipal solid waste combustion. Chemosphere,1986,15,1987-1990
- [36]Hiroshi Ogawa;Norihiko Orita;Mitsuhiro Horaguehi;Takumi Suzuki;Mitsuhiro Okada;ShizuoYasuda.Dioxin Reduction by Sulfur Component Addition.Chemoshere. 1996,32,151 -157
- [37]李永华,胡小翠,郭建,等.垃圾电厂二噁英的生成及控制技术[J].锅炉技术,2011,42 (1): 70-77
- [38]M.Aatamila.K.Tuppurainen,J.Ruuskanen.Effect of urea on fly ash PCDD/F

- concentration in different particle sizes, *Chemosphere*, 2001, 43, 757-762
- [39] P. Ruokojarvi, I. Halonen, K. Tuppurainen, J. Tarhanen, J. Ruuskanen, Effect of gaseous inhibitors on PCDD/F formation, *Environ. Sci. Technol.*, 1998, 32: 3099-3103
- [40] Brian K. Gullet and Paul M. Lemieux, Role of Combustion and Sorbent Parameters in Prevention of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxin and Polychlorinated Dibenzofuran Formation during Waste Combustion, *Environmental Science Technology*, 1994, 28, 107-118
- [41] 丁历威, 李凤瑞. 城市垃圾焚烧发电技术及其污染物控制策略[J]. *浙江电力*, 2010, 29(2): 55-58
- [42] 王莹, 李红彪, 周春林. 垃圾焚烧污染物的形成机理及控制[J]. *电站系统工程*, 2004, 20(3): 33-34
- [43] 王绍文, 梁富智, 王纪增. 固体废弃物资源化技术与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003
- [44] 任玥, 田洪海, 李楠, 等. 利用层次分析法探讨生活垃圾焚烧设施二噁英类排放的影响因素[J]. *环境化学*, 2011, 30(1): 391-398
- [45] 李蕾, 潘秀艳, 胡文清, 等. 垃圾焚烧过程中二恶英的生成与减量化[J]. *北方环境*, 2004, 29(4): 24-26
- [46] Tejima H, Nakagawa I, Shinoda T, et al. PCDDs/PCDFs reduction by good combustion technology and fabric filter with/without activated carbon injection[J]. *Chemosphere*, 1996, 32 (1): 169-175
- [47] Brown B., Felsvang K.S., Control of mercury and dioxin emissions from united states and European municipal solid waste incinerators by spray dryer absorption systems [J]. *Chemosphere*, 1999, 30 (1): 179-185
- [48] 陈乐. 基于加权相似度和加权支持向量机的短期电力负荷预测研究[D]. 广东: 华南理工大学, 2012: 34-39
- [49] Deng Julong. The Control Problem of Grey Systems [J]. *Systems & Control Letter*. 1982, 1(5): 288-294
- [50] 邓聚龙. 灰色控制系统[J]. *华中工学院学报*. 1982(6): 9-18
- [51] Suykens J A K, Vandewalle J. Least squares support vector machine classifier[J]. *Neural Processing Letter*, 1999, 9(3): 293-300
- [52] Suykens J A K, Vandewalle J, De Moor B. Optimal control by least squares support vector Machines[J]. *Neural Networks*, 2001, 14(1): 23-35
- [53] Suykens J A K, De Brabanter, Lukas L, et al. Weighted least squares support vector machines: robustness and sparse approximation [J]. *Neurocomputing*, 2002, 48(1): 85-105
- [54] Fonseca C.M., Fleming P.J.. Genetic algorithms for multiobjective optimization: formulation, discussion and generation[C]. In: *Proceedings of 5th International Conference on Genetic Algorithms*, San Mateo, California, 1993: 416-423
- [55] 解海卫. 城市生活垃圾与生物质混烧发电及烟气净化的研究[D]. 天津: 天津大学, 2007

- [56]荣海娜, 张葛祥, 金伟东. 系统辨识中支持向量机核函数及其参数的研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(11): 3204-3208
- [57]司马莉萍, 舒乃秋, 左婧等. 基于灰关联和模糊支持向量机的变压器油中溶解气体浓度的预测[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 41-46
- [58]Ishikawa R,Buekens A,Huang H,Watanabe K. Influence of combustion condition on dioxin in an industrial-scale fluidized-bed incinerator:experimental study and statistical modeling,Chemosphere,1997,35(30):465-477
- [59]Chang Y, Hung C.Chen J, et al. Minimum feeding rate of activated carbon to control dioxin emissions from a large-scale municipal solid waste incinerator[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009,161(2-3):1436-1443
- [60]Romero C. Handbook of Critical Issues in Goal Programming. Oxford,UK:Pergamon Press: 1991
- [61] Marglin S. Public Investment Criteria. MIT Press, Cambridge, Massachusetts:1967
- [62]Schaffer J. D. Multiple Objective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms. Ph. D. Thesis, Nashville, TN: Vanderbilt University, 1984
- [63]Coello, Pulido. A Micro-Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization. First International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization:2001,126-140
- [64]Srinivas N, Deb K. Multi-objective function optimization using non-dominated Sorting in Genetic Algorithms. Evolutionary Computation 1994,2(3): 221-248

攻读硕士学位期间发表的论文情况

- [1] 李大中，唐影. 垃圾焚烧发电污染物排放过程建模与优化[J]. 可再生能源, 2015, 33(1): 118-123
- [2] 李大中，唐影. 基于灰色关联度的垃圾与棉杆混燃过程建模[J]. 电力建设, 2015, 36(2): 126-130

致谢

本人在完成项目和论文工作的过程中受到了老师和同学的多方面的帮助。首先感谢我敬爱的硕士研究生导师李大中教授，他在课题的选取、资料收集以及现场数据调取和论文撰写过程中给予了我许多技术指导；在读研究生的近三年时光里衷心的感谢李老师对我的精心指导，无论在生活中还是在学习上李老师的悉心教导使我在这三年中受益匪浅。李老师严谨的学术作风为我树立了人生奋斗的榜样。在此特别向李老师致以最深厚的敬意。

其次，感谢师兄弟和宿舍的小伙伴们，我们互相学习，不仅我论文撰写过程中给予了帮助，在生活中陪伴我走过了欢乐的研究生生活。还要感谢我的亲人，无论我遇到怎样的困难，有着怎样的压力，他们一直在默默的支持我。感谢本论文中参考文献的作者！

最后，感谢为评阅本论文付出辛勤劳动的专家和老师们。