

分类号: TP273

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2220320138



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

目 录 基于智能解耦控制的新风
系统研究

论 文 作 者 陈单单

校 内 导 师 孙瑞霞 教授

校 外 导 师 王宗刚

专业学位类别 电子信息

研究方向 (领域) 控制工程

论文提交日期: 2025 年 5 月 19 日

分类号：TP273

密 级：公开

单位代码：10363

学 号：2220320138

题 目 基于智能解耦控制的新风系统研究

题 目 Research on fresh air system based on intelligent decoupling control

学生姓名： 陈单单

校内导师： 孙瑞霞

校外导师： 王宗刚

专业学位类别： 电子信息

研究方向（领域）： 控制工程

论文答辩日期： 2025 年 5 月 11 日

二、安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：陈单单

日期：2025 年 5 月 11 日

三、安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 _____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：陈单单

指导教师签名：孙御辰

日期：2025 年 5 月 11 日

日期：2025 年 5 月 11 日

基于智能解耦控制的新风系统研究

摘 要

随着社会的不断发展和科技的持续进步,人们越来越关注室内的空气质量,新风系统的应用已经成为了常态。虽然新风系统可以改善室内的空气质量,但由于室内温度、湿度以及总挥发性有机化合物(Total Volatile Organic Compounds, TVOC)之间存在着紧密的耦合关系,新风系统在控制室内温度、湿度和空气质量方面仍然面临着挑战。本文针对室内温度、湿度和 TVOC 浓度等关键指标的耦合问题展开深入研究,提出一种新颖的解耦控制方法对三者之间的耦合模型进行解耦控制,从而提高新风系统的控制效果。本文主要工作内容和创新点如下:

(1) 对室内的温度、湿度和 TVOC 浓度之间存在的耦合问题,本文采用了基于 PID 神经网络的解耦控制方法。为了提高 PID 神经网络的控制性能,通过增加动量项和变学习速率的方法来改进 PID 神经网络,仿真结果表明可以较大提高 PID 神经网络的解耦控制效果。

(2) 针对一般的 PID 神经网络算法学习效率低以及初始权值随机得到等问题,本文采用一种改进的冠豪猪算法(Improved Crested Porcupine Optimizer, ICPO)来优化 PID 神经网络算法。传统的冠豪猪算法在优化过程中往往容易受到局部最优解的问题。为此,本文通过引入惯性权重、levy 飞行策略、螺旋更新策略对冠豪猪算法进行改进,提高冠豪猪种群的搜索能力,从而提高冠豪猪算法的收敛性和收敛速度。仿真结果表明,采用 ICPO 优化后的 PID 神经网络在温度、湿度和 TVOC 浓度耦合模型中具有更好的解耦效果。

(3) 为了实现对室内环境参数的实时监控与智能调节,本文设计了新风控制系统人机界面。通过温湿度传感器和 TVOC 浓度传感器,新风控制系统能够实时采集室内的温度、湿度、TVOC 浓度等数据,通过 S7-1200 系列 PLC 实现所采集数据的实时更新,并通过 PLC 的触摸屏界面清晰直观地掌握新风系统的运行状态。

关键词: PID 神经网络, 解耦控制, 新风系统, 冠豪猪算法, PLC

RESEARCH ON FRESH AIR SYSTEM BASED ON INTELLIGENT DECOUPLING CONTROL

ABSTRACT

With the continuous development of society and the continuous progress of science and technology, people are paying more and more attention to indoor air quality, and the application of fresh air system has become the norm. Although fresh air systems can improve indoor air quality, they still face challenges in controlling indoor temperature, humidity and air quality due to the tight coupling between indoor temperature, humidity and Total Volatile Organic Compounds (TVOC). In this paper, the coupling problem of key indicators such as indoor temperature, humidity and TVOC concentration is studied in depth, and a novel decoupling control method is proposed to decouple the coupling model between the three to improve the control effect of the fresh air system. The main work content and innovation points of this paper are as follows:

(1) To solve the coupling problem between indoor temperature, humidity and TVOC concentration, a decoupling control method based on PID neural network is adopted. In order to improve the control performance of PID neural network, the PID neural

network is improved by increasing the momentum term and variable learning rate, and the simulation results show that the decoupling control effect of PID neural network can be greatly improved.

(2) In order to solve the problems of low learning efficiency and random initial weights of general PID neural network algorithms, an improved Crested Porcupine Optimizer (ICPO) algorithm is used to optimize the PID neural algorithm. The traditional crown porcupine algorithm is often susceptible to the problem of local optimal solution in the optimization process. Therefore, this paper improves the crown porcupine algorithm by introducing inertia weight, levy flight strategy and spiral update strategy, so as to improve the search ability of the crown porcupine population, so as to improve the convergence and convergence speed of the crown porcupine algorithm. The simulation results show that the PID neural network optimized by ICPO has a better decoupling effect in the coupled model of temperature, humidity and TVOC concentration.

(3) In order to realize the real-time monitoring and intelligent adjustment of indoor environmental parameters, the human-machine interface of the fresh air control system is designed in this paper. Through the temperature and humidity

sensor and TVOC concentration sensing, the fresh air control system can collect indoor temperature, humidity, TVOC concentration and other data in real time, realize the real-time update of the collected data through the S7-1200 series PLC, and clearly and intuitively grasp the operation status of the fresh air system through the touch screen interface of the PLC.

Keywords: PID neural network, decoupled control, fresh air system, crown porcupine algorithm, PLC

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 课题的研究背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	1
1.3 本文主要内容	9
第 2 章 PID 神经网络在新风系统中的应用	11
2.1 PID 控制算法	11
2.2 神经网络	12
2.2.1 神经元的模型	12
2.2.2 神经网络的特点	12
2.2.3 神经网络的应用场景	13
2.3 PID 神经网络	14
2.3.1 控制律计算	15
2.3.2 权值修正	16
2.3.3 改进 PID 神经网络	17
2.4 仿真分析	18
2.5 本章小结	21
第 3 章 新风系统解耦控制算法研究	22
3.1 冠豪猪优化算法	22
3.1.1 冠豪猪优化算法概述	22
3.1.2 循环种群减少策略	23
3.1.3 冠豪猪优化算法原理	23
3.2 改进冠豪猪优化算法	26
3.2.1 惯性权重的改进	27
3.2.2 levy 飞行策略	27
3.2.3 螺旋更新策略	28
3.3 算法测试及分析	29
3.3.1 测试函数	29
3.3.2 测试结果分析	30
3.4 改进冠豪猪算法优化 PID 神经网络	34
3.5 本章小结	36
第 4 章 新风控制系统设计	38
4.1 新风系统总体设计	38
4.1.1 新风系统介绍	38
4.1.2 新风系统的控制	39
4.1.3 新风控制系统构建	41
4.1.4 电气原理图设计	42
4.2 硬件选型	43
4.2.1 S7-1200 系列 PLC	43

4.2.2 温湿度传感器.....	43
4.2.3 TVOC 浓度传感器.....	44
4.3 Modbus 通讯协议	45
4.4 采集程序设计.....	45
4.4.1 TVOC 采集程序.....	45
4.4.2 温湿度采集程序.....	46
4.5 系统组态界面设计.....	48
4.5.1 HMI 概述.....	48
4.5.2 新风系统 HMI 界面.....	48
4.6 本章小结	48
第 5 章 结论与展望	50
5.1 本文工作总结.....	50
5.2 展望.....	51
参考文献.....	52
攻读学位期间发表的学术论文目录.....	59
致谢.....	60

第 1 章 绪论

1.1 课题的研究背景与意义

随着社会的发展与科学技术的进步，人们的生活质量有了显著提升，人们对室内空气质量的关注度也日益增加。自然的开窗通风已不能满足人们日益增长的健康和舒适需求。

新风系统的引入为改善室内的空气质量提供了一种方法。新风系统的原理是通过新风风机将室外的新鲜空气引入室内并排出室内的污浊空气，降低室内空气的污染物浓度，同时调节室内环境的温度和湿度从而提高室内环境的舒适度。与传统的自然通风相比，新风系统能够更加稳定和高效地控制室内空气的温度、湿度以及污染物浓度，尤其在控制 TVOC 浓度方面具有显著效果，并且新风系统还可以预热或预冷从室外进入室内的空气，从而提供更加舒适和健康的室内环境。

随着物联网、人工智能等技术的快速发展，智能控制技术在新风系统中的应用逐渐普及，通过一些传感器对室内温度、湿度及 TVOC 等环境参数进行实时采集，并结合智能算法对新风系统进行动态优化，可以显著提升新风系统的运行效率和控制性能。新风控制系统能够在保证室内舒适性的同时，最大限度地提高能源利用率，符合节能减排的全球趋势。因此，全面深入地研究新风控制系统的原理和提高新风控制系统的性能，具有重要的学术和现实意义。

1.2 国内外研究现状

(1) 新风系统研究现状

虽然新风系统能够改善室内的空气质量，但是控制效果不是很理想，为此国内外一些学者在提高新风系统的控制性能方面展开了大量研究。Wang Lili^[1]等提出了一种具有相变蓄热功能的太阳能新风系统，并根据热力学定律推导出了空调房间的数学模型。通过自整定模糊 PID 控制器来调节导热液体的流量以控制新风温度。通过仿真和实验，验证了所提出的控制器与传统的 PID 控制器相比，具有更高的控制精度、更快的响应速度和更强的鲁棒性，从而提供更优越的控制性能。Wang Xuejin^[2]等提出了利用太阳能与热回收相结合的住宅建筑换气通风方

案设计,这种方式可以降低新风能耗,而且设备简单,操作方便。实验结果表明住宅建筑节能新风系统设计方案能满足新风系统的要求,不仅能改善室内空气质量,还能为绿色住宅设计提供技术支持。Wang Gang^[3]等通过 CFD(计算流体力学)模拟和实验方法,分析了三种不同新风模式对室内污染物扩散的影响,新风模式包括自然通风、混合通风和带全热交换器的机械通风。考虑到新风量、冷热负荷和室外空气参数等因素,对新风模式的性能进行了比较,还对比研究了系统运行状态下不同新风量和控制模式下的通风性能。结果表明,新风量是减小污染物浓度的关键因素,而热回收对提高能源利用效率至关重要。Cui Yingying^[4]等提出了一种新风空调控制系统,并设计了一种新风空调系统的控制器,该控制器由传感器模块、显示模块和单元控制模块组成,使用 STC89C51 微控制器。通过判断二氧化碳的浓度来控制新风阀从而控制新风量,并且传感器模块还将收集温度和湿度数据。实验表明通过该控制器新风空调系统可以更好地监测和控制室内空气质量。He Dasi^[5]等根据室内人员密度的变化,提出一种控制方法在线改变新风率。仿真结果表明,动态估计室内占用率的方法可以获得良好的室内空气质量,并降低新风空调系统的能耗。Li Peng^[6]等搭建了新风空调系统实验平台,根据大量实验得出的不同测量端口的温度数据,总结出运行模式和控制特性,并设计了模糊逻辑控制器,利用自适应模糊控制算法实现了新风空调系统的自动控制。Maduri Praveen Kumar^[7]等为了保持室内的空气质量指数,设计一种中央新风净化系统。该系统采用机器学习技术,系统首先会监测房间的占用情况,在室内有人存在的情况下,根据室内空气质量指数的大小决定是否运行新风净化程序。实验表明该新风净化系统具有自动、高效和先进的特点。Souifi Haifa^[8]等提出了一个基于物联网的平台,用于实验评估热回收通风机系统在热回收和改善室内空气质量方面的性能。实验表明所提出的物联网方法成功地收集 TVOC 和 CO₂ 的浓度值,以及用于评估该系统显热回收能力的相关温度、湿度和压力等数据,并且在收集实时数据方面具有高效的优点和能够改善室内的空气质量。Mammadov Nurmammad^[9]等设计了一种中央新风空调系统,空气在中央空调装置进行处理后,将所有处理过的空气分配到两个通道中,并在这两个通道中分别安装了空气加热器和空气冷却器,通过将加热空气和冷却空气按预定比例混合,以达到所需的送风温度,从而确保房间内保持设定的空气温度。实验表明通过该中央新风空调系

统可以单独调节不同房间的温度，并提高房间内的舒适度。

(2)室内温湿度和 TVOC 解耦研究现状

室内的温度、湿度与 TVOC 彼此之间存在复杂而密切的耦合关系。TVOC 主要来源于建筑材料、家具等，温度的升高提升了室内空气中分子的运动速率与扩散速率，从而增强了 TVOC 在室内的总体浓度。湿度较高的环境可能使家具、墙纸等吸湿膨胀或孔隙结构变化，改变其内部的扩散特性，间接影响有机物的释放。最为重要的是，温度与湿度之间并非独立变量，而是在多数情况下共同作用于 TVOC 的释放过程，两者的耦合作用体现在：高温通常伴随空气中饱和水汽压的升高，从而使得相对湿度降低；相反，当温度降低时，室内的相对湿度增加。国外学者在温湿度解耦控制方面进行了广泛而深入的研究，并且取得了很多重要的理论和实验成果。针对温湿度强耦合系统的复杂性，国外学者提出了多种智能解耦控制策略，包括模糊控制、神经网络、自适应控制等解耦算法，这些方法有效解决了传统控制算法在非线性、大时滞以及强耦合系统中的局限性，为实现更高效和更精准的温湿度调节与控制奠定了理论基础。Altayeva Aigerim^[10]等分析并建立了一个温度、湿度和空气质量的交互式非线性数学模型，并介绍了传统 PID 控制器、结合解耦控制的 PID 控制器、基于模糊逻辑原理的自整定参数 PID 控制器。在 Matlab 中采用模糊 PID 控制器对系统进行解耦，结果表明可以获得高精度的舒适度参数控制，控制系统可以快速响应。Rentel-Gomez C^[11]等开发了一种非线性非交互控制系统，用于控制由可变风量（VAV）供暖、通风和空调（HVAC）系统调节的热空间中的温度和相对湿度，利用具有两个回路的多变量级联控制来实现温度和相对湿度的解耦控制，内环是用于解耦的非交互控制法，外环是用于稳定和控制的 PD 控制器。仿真结果证明了所提控制器的有效性，该控制器可对 VAV-HVAC 系统中的温度和相对湿度进行解耦控制。Gurban Eugen Horatiu^[12]等提出了一种基于反馈-前馈补偿技术的等效温室气候模型，用于温室复杂模型的线性化、解耦和干扰补偿，在该等效模型的基础上，将其简化为积分加死区时间解耦过程，并通过仿真对采用不同调整技术的相关 PI/PID 控制器进行了比较研究。仿真结果表明，所提出的解耦补偿器能很好地抑制干扰。Semsar E^[13]等提出了用于非线性多输入多输出系统干扰解耦的混合算法，将其用于暖通空调系统的多输入多输出非线性模型。为了实现干扰解耦和非线性模型线性化，通过引入状态和

干扰反馈的反馈线性化方法,将非线性模型转换为线性模型,并将可测量的状态和干扰进行非线性反馈,然后通过后退步法设计新系统中的状态反馈,最后将混合控制法应用于原始系统。仿真结果表明此算法达到了输出调节和干扰解耦预先设定的设计目标。Sharma Adit^[14]等提出了一种分布式控制架构,用于开发和实施优化目标,以最大限度地降低大型居住建筑中与舒适度相关的能耗,第一级架构通过优化能源负荷和将舒适指数保持在用户指定值来确定设定点(温度、湿度和风速),第二层结构使用解耦 PI 控制器在三个指定的设定点控制 MIMO 系统。仿真结果表明,通过该控制架构三个设定点的独立控制效果良好。Gouadria Faten^[15]等采用 PSO-PI 算法对温室模型中的温度和湿度进行解耦控制。仿真结果表明,所提出的 PSO-PI 解耦算法在满足温室气候控制的设定点跟踪和干扰抑制要求非常有效,所提出的算法在上升时间、超调量和稳定时间等方面表现更好。Arvanitis Konstantinos^[16]等提出了自适应非线性 PI 控制算法,用于在夏季和冬季同时控制牲畜建筑的温度和湿度。实验表明提出的自适应非线性 PI 控制方法对于满足动物建筑气候控制的要求是非常有效的,所提出的控制器实现了全局输入和输出解耦,还可以对输出偏差进行鲁棒非线性补偿。Woldea-manuel Lamrot Hailemichael^[17]等采用 MATLAB 软件对新生儿培养箱进行模拟仿真,为了减少系统回路之间的相互作用,采用了前馈解耦方法。仿真结果表明使用前馈解耦和顺序闭环调节方法的 PID 控制器能够减少系统的过冲,能够更好的控制新生儿培养箱的温度和湿度。Zermani M A^[18]等提出了基于解耦预测控制的多变量控制算法,将其用于新生儿培养箱湿度和温度的控制策略中。将温度和湿度控制系统分解为四个独立的回路,采用解耦控制器来消除输出之间的耦合作用。仿真结果表明广义预测解耦控制具有更好的有效性,所提出的算法具有更好的解耦性能。

国内学者也在温湿度解耦控制领域也进行了深入研究,并且取得了许多具有理论价值和实际意义的成果。针对温湿度系统中非线性、时变性以及强耦合特性的问题,国内学者提出了多种自适应能力强的解耦控制方法,例如基于模糊逻辑的解耦控制和基于神经网络的自适应控制,以及将粒子群优化算法与传统 PID 控制相结合的智能控制策略。Zhao Xianmei^[19]等为了解决中央空调变露点控制系统中温湿度耦合问题,提出了一种温湿度解耦控制方法。把绝对湿度作为中间变量可以将系统的温度和湿度进行解耦,通过理论分析与实验数据分析相结合,建立

了二输入二输出传递函数模型，并且提出了 PID 控制算法和前馈补偿解耦算法相结合的控制算法。MATLAB 仿真软件结果表明，所提出的控制系统对中央空调变露点系统温湿度解耦是有效的。Yin He^[20]等为了实现空调的高精度恒温恒湿控制，设计了各环节的解耦控制器，并进一步提出了一种分离补偿算法，以消除耦合带来的不利影响。MATLAB 仿真结果表明，该设计可以大大提高温湿度解耦控制的动态响应性能。Wei Long^[21]等提出了一种基于数据融合和模糊解耦的控制策略，以解决孵化温湿度控制系统中传感器和温湿度耦合可靠性低的问题。通过模糊解耦控制算法对温湿度调节设备的启停时间进行补偿。实验结果表明，该系统具有可控集成、可靠性高、稳定性好等特点。Li Rui^[22]等针对传统 PID 控制算法控制效果差、难以满足长储存环境下温湿度控制精度的问题，提出一种基于模拟退火优化的粒子群 PID 控制方法，以实现対大时延非线性系统的有效控制。仿真结果表明，所提出的 PSO-PID 控制算法具有一定的先进性和较好的鲁棒性。Li Manman^[23]等提出了一种基于自适应模糊 PID 和前馈补偿解耦算法的解耦控制器，可对焓差实验室中温湿度耦合系统进行解耦控制。仿真结果表明，该解耦控制器实现了温湿度的完全解耦，缩短了调节时间，提高了该系统的稳定性和效率。Liu Zichen^[24]等提出了一种基于模糊控制的温湿度解耦方法。通过机理分析，建立了室内供暖通风的数学模型，以室内温度和湿度为输入，供暖和通风量为输出，采用对角矩阵法在输入输出之间增加辅助矩阵，达到解耦目的。在 Matlab 软件中对该模糊解耦系统进行仿真分析，并与传统的 PID 解耦控制进行比较，结果表明，模糊解耦控制算法在响应速度、过冲和鲁棒性方面优于传统的 PID 解耦控制系统。Zeng Xiaochen^[25]等提出了一种利用多变量 IMC-PID 控制器控制空调房间温度和相对湿度的方法，以解决中央空调系统在大滞后和温度与相对湿度电路耦合的情况下无法稳定运行的问题。MATLAB 仿真结果表明，该方法能解决温度和相对湿度耦合的问题，并将 IMC-PID 控制器与 Z-N PID 控制器进行了比较，结果表明，IMC-PID 控制器具有更好的稳定性和可靠性。Cui Shigang^[26]等提出了神经网络 PID 解耦控制算法。将经典的 PID 控制算法和神经网络相结合应用于温湿度耦合系统，并通过 MATLAB 软件进行了系统仿真。仿真结果表明，神经网络 PID 解耦控制算法具有更好的解耦控制效果，温度和湿度控制通道之间的耦合作用不再明显，系统具有响应快、稳定性高的特点。Zhang Wei^[27]等提出了一种用于肉类制造中干

燥室系统的模糊 PID 解耦控制方法,该解耦算法可以有效解决肉类干燥室温度和相对湿度之间的耦合问题,并且解决了传统的 PID 控制算法不能对温度和相对湿度的耦合系统进行较好的控制等问题。仿真结果表明模糊 PID 解耦控制算法具有更好的控制精度。Liu Jiayao^[28]等在传统的温湿度控制系统的基础上,设计了一种基于自适应神经模糊推理的温湿度解耦控制系统。该控制系统可以实时测量工厂内的温度和湿度。通过采用基于自适应神经模糊推理的输入输出模型对模糊系统的隶属度函数进行了优化,使控制系统更加稳定,控制速度更加灵敏。将实验结果与传统的模糊控制器进行了比较,结果表明自适应神经模糊推理模型可以使系统获得更好的解耦性能。Gao Huixiu^[29]等采用前馈补偿解耦的方法对新风空调系统的温度和湿度进行解耦。仿真结果表明,新风空调系统可以通过前馈补偿策略进行解耦,从而达到更好的控制效果。Gao Yuxian^[30]等针对温室中的温湿度非线性强耦合问题,提出了温室气候控制的反馈前馈线性化解耦算法,将非线性多输入多输出(MIMO)系统转化为两个独立的单输入单输出(SISO)一阶线性系统,消除了温度和湿度之间的强耦合。实验结果表明,所提出的算法可以解决温度和湿度之间的强耦合。Tu Jun^[31]等针对猪圈温湿度控制系统存在的时滞、强耦合等问题,设计了一种多参数双模糊解耦 PID 算法,该算法将原本耦合的温湿度变量等效为两个独立的温湿度控制子系统,从而解决了温湿度强耦合的问题。仿真结果表明,双模糊解耦 PID 算法比传统的 PID 算法具有更好的控制效果。Ji Xinyang^[32]等针对变风量空调系统(VAV)的每个回路中都存在耦合、控制相互干扰和影响系统的稳定性等问题,提出了基于小波神经网络的解耦控制算法,通过训练 PID 系数和在线调整神经网络权值,消除了 VAV 系统中温度控制回路和湿度控制回路之间的耦合。仿真结果表明,采用小波神经网络解耦控制算法,可以是系统快速实现控制,超调量和振荡现象明显减少,温度和湿度控制达到解耦效果,具有较高的准确性和鲁棒性。

(3)多变量系统解耦研究现状

随着现代工业、智能建筑、以及自动化控制系统的不断发展,多变量系统的耦合问题成为了控制工程领域中的一个重要研究方向。在多变量系统中,变量之间的相互耦合作用往往导致系统性能的降低,尤其在多输入多输出(MIMO)系统中,如何实现对各个变量的独立控制,避免互相干扰,已成为多变量控制系统

中的关键问题。国外学者在多变量解耦控制领域开展了大量的研究工作，并取得了诸多理论和实践成果。Dasgupta Sudeshna^[33]等提出了一种采用内部模型控制（IMC）结构的多变量时延系统解耦控制器，通过一个具有多重时间延迟的工业蒸馏塔高度耦合 2×2 方形系统，证明了该控制器的解耦性能。Hernandez Perez Miguel Angel^[34]等针对静态输出反馈的扰动解耦问题，提出了在线性定常系统中对扰动进行解耦的方法，这种方法是基于一个极点放置策略，在一些可控性或可观测性假设下，扰动抑制固定极点的优先计算，解决了一般多输入多输出情况下的一些特殊问题。Ulemj Damiran^[35]等针对基准锅炉控制问题设计了带前馈补偿的多变量 PID 控制器。仿真结果表明，所提出的控制器在非线性锅炉系统中表现良好，减少了相互作用，实现了零跟踪误差，并能在很宽的运行范围内良好运行，与基准锅炉的控制器相比，所提出的控制器实现了更好的性能指标。Fu Y^[36]等针对具有强耦合和不确定性的非线性多变量双速率系统，提出了一种具有非线性补偿的双速率自适应解耦控制器，采用多项式变换技术导出双速率模型，根据现有的双速率数据识别未知参数矩阵，利用识别误差补偿未知非线性项，然后根据双速率模型设计自适应解耦控制器，通过对双水箱水位级联控制系统进行了仿真，验证了所提方法的有效性。Villafañe Angela^[37]等提出了基于多变量系统控制的直接解耦方法，该直接解耦方法可以消除或减少多变量系统回路之间的相互作用。通过使用内部模型控制（IMC）策略，为此解耦系统设计了 PID 控制器，并分析了每个输出中 λ 参数的影响，比较了集中式控制器与分散式控制器在外部干扰情况下的运行情况。结果表明，集中式控制器的性能优于分散式控制器，并且误差指数值和输出变化都较低。Khandelwal Shubham^[38]等提出了基于解耦的简化控制设计方法，用于多变量系统的解耦控制。利用了去耦过程的有效传递函数模型表示法，并且由于增益和相位裕度方法简单和稳定的特点，采用了该方法来调整 PI 控制器，通过对各种基准多变量系统进行仿真研究，验证了所提方法的性能。

随着国内工业自动化水平的不断提升以及智能制造和节能环保等领域的不断发展，多变量耦合问题是一个重要的研究方向，尤其在多输入多输出（MIMO）系统中，如何有效消除不同变量之间的相互影响，已经成为提升多变量控制系统的稳定性和响应速度的核心问题。国内学者在多变量解耦控制领域也开展了大量

的研究,并且取得了丰硕的成果。Liang Meihui^[39]等针对在温室系统中采用 PID 控制算法不能缓解 CO₂ 浓度、温度和湿度之间的耦合关系,设计了一种反馈线性化解耦方法,将温室系统模型转化为仿射非线性模型,通过坐标变换和非线性状态反馈对原系统进行精确的线性化,从而减小了 CO₂ 浓度、温度和湿度之间的耦合关系,并使用三个 PID 控制器来控制该解耦系统,使状态变量能够很好地跟踪设定点。仿真结果表明,CO₂ 浓度、温度和湿度之间的耦合被解除,实现了独立控制,三个状态变量可以分别获得更好的跟踪效果。Li Pengwei^[40]等为了解决多变量工业系统中的参数不确定性和耦合效应,提出了一种基于共轭因式分解理论和混合灵敏度函数法的同步鲁棒解耦控制方法,基于所需的控制性能指标,将闭环多变量系统的传递函数配置为非奇异对角矩阵,利用互质分解理论,选择加权函数,设计并计算参数化矩阵和控制器,以实现同时考虑参数不确定性的鲁棒解耦控制,在热轧带钢轧机工艺中使用冠厚 MIMO 系统证明了所提出的解耦控制方法的性能和有效性。Zhang Zhihui^[41]等针对三自由度直升机系统的输入输出能量解耦问题,提出了一种新的三自由度直升机系统输入输出能量解耦条件,以往的方法可以在整个频率范围内实现输入输出能量去耦,但往往需要附加条件,这并不完全适用于实际情况,将该输入输出能量解耦条件作为线性矩阵不等式(LMI)描述的有限维凸优化问题,并将该算法应用于三自由度直升机系统。仿真结果表明所提出的新解耦方法具有更好的解耦效果。Qian Kun^[42]等提出了一种基于动态神经网络识别器(NNI)的新型 PID 解耦策略,并将其应用于涡扇发动机多变量转速控制系统。每个动态神经网络用于在线识别 PID 解耦控制器的相关比例系数 k_p 、微分系数 k_d 和积分系数 k_i 。仿真结果表明,该算法对航空发动机模型的不确定性具有很强的鲁棒性,与传统的 PID 解耦控制器相比,它为控制回路提供了更好的抗干扰和自适应能力。Hao Lijun^[43]等分析了二氧化硫转化器运行过程中各变量之间的耦合关系。在传统 PID 控制的基础上,根据非线性和多变量的特点,设计了 BP 神经网络控制算法,进而构成了具有解耦能力的智能控制器。仿真结果表明,该算法具有良好的控制效果,通过神经网络的自我训练和学习,可以使调节器和被控对象同时解耦,从而基本消除变量间的耦合效应,与传统的 PID 解耦控制器相比,基于 BP 神经网络的解耦控制器具有自适应能力强的优点,具有更好的控制效果。Wen Dingdu^[44]等针对工业过程中具有非线性多变量、强耦

合特性的复杂系统,提出了基于 DRNN 神经网络的 PID 解耦控制方法,该控制方法不依赖对象的数学模型,适用于线性 and 非线性多变量系统。实验结果表明,基于 DRNN 神经网络的 PID 解耦控制算法比传统的 PID 解耦控制算法具有稳定性强和系统鲁棒性高等特点,能有效改善系统的动态性能,并且学习时间短、参数收敛快,该控制器对多变量非线性系统具有良好的控制效果。Shao Keyong^[45]等针对工业生产过程中的多变量耦合系统不能取得良好控制效果的问题,提出了基于遗传算法的 RBF 神经网络 PID 控制器。实验结果表明,基于遗传算法的 RBF 神经网络 PID 控制器消解决了变量间的耦合问题。Ding Jie^[46]等提出了一种改进的甲虫群优化算法来优化 PIDNN 的最优初始权值,该算法以非线性方式更新惯性权值,并加入突变因子帮助甲虫摆脱局部最优陷阱,提高算法的优化能力。采用温室系统验证了所提方法的有效性,实验结果表明,该方法具有响应速度快、精度高、解耦效果理想的特点。Tsai Ching Chih^[47]等提出了塑料注塑过程中挤压筒的自适应解耦温度控制方法。基于广义预测性能准则的最小化,提出了解耦控制策略,通过对准则函数中的调优参数进行适当的调整,可以提高该方法的设定点跟踪、干扰抑制和鲁棒性能力。实验结果表明,该方法在设定点变化、负荷干扰和参数变化下具有强大的性能,该控制策略的计算性较小,并且比单回路温度区控制策略更有效。

1.3 本文主要内容

本文研究了室内的温度、湿度和 TVOC 浓度三者之间的耦合问题。由于室内的温度、湿度和 TVOC 浓度互相影响,传统的控制方法往往无法实现三者的独立调节与控制。为此,本文提出了一种结合 PID 控制和神经网络的解耦控制策略,旨在通过 PID 神经网络解耦控制器有效减小室内的温度、湿度和 TVOC 浓度之间的耦合效应。该控制器通过神经网络能够实现对各种复杂非线性关系的逼近,使得新风系统在调节室内的温度、湿度和 TVOC 浓度时三者之间不再互相影响,从而提高新风系统的控制效果,主要的研究内容如下:

第 1 章:对新风系统的研究背景和意义进行了介绍,简述了新风系统、室内的温湿度和 TVOC 解耦及多变量系统解耦国内外研究现状。

第 2 章:介绍传统的 PID 控制算法、神经网络算法理论和多变量系统 PID

神经网络控制算法，通过增加动量项和变学习速率的方法改进 PID 神经网络算法，提高 PID 神经网络的学习速率和解耦性能。

第 3 章：研究了一种新型的生物种群算法，即冠豪猪优化算法（Crested Porcupine Optimizer, CPO），通过惯性权重、levy 飞行策略和螺旋更新策略来改进 CPO 算法，采用 ICPO-PIDNN 算法对室内的温度、湿度和 TVOC 浓度耦合模型进行解耦控制。

第 4 章：对新风控制系统的人机界面进行了设计，通过西门子 S7-1200 系列的 PLC 实时读取室内的温度、湿度和 TVOC 浓度等数据。设计了系统软件界面，展示了界面的布局、功能按钮、数据显示等，以满足新风控制系统操作与监控的需求。

第 5 章：总结与展望，根据本文研究内容对新风控制系统的未来发展做出了展望。

第 2 章 PID 神经网络在新风系统中的应用

由于室内的温度、湿度和 TVOC 浓度三者之间具有强耦合和非线性的特点，可以通过 PID 神经网络具有逼近非线性的能力来对三者间的耦合模型进行解耦控制。

2.1 PID 控制算法

PID 控制算法是通过比例、积分、微分三个环节的作用，控制被控对象。传统的 PID 控制因其算法结构简单、实现方便且具有较强的鲁棒性与较高的可靠性，已成为工业控制领域中的一种经典且广泛应用的控制策略。PID 控制算法的基本原理是通过对设定值与实际输出值之间的误差进行实时监测，并对该误差信号进行比例、积分和微分三项运算，从而调节控制信号，以实现对被控对象的精确调节与稳定控制^[48]。

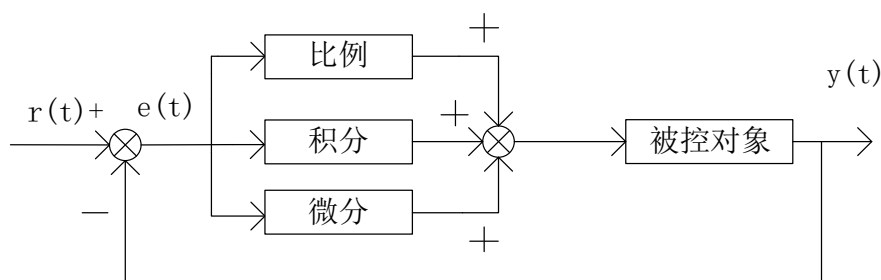


图 2-1 PID 控制算法原理

PID 控制规律如下：

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^T e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2-1)$$

式中， $e(t)$ 是误差信号， K_P 是比例系数， K_I 是积分系数， K_D 是微分系数。

PID 控制算法中各环节作用如下：

比例环节：根据当前误差 $e(t)$ 生成与之成正比的控制信号，直接调整系统的输出。

积分环节：对存在的误差进行累加，确保控制器在稳态下能够完全消除误差，通过对误差历史的累积分析，积分环节能够使系统实现更高的稳态精度。

微分环节：通过对误差的变化率进行计算，预测误差的趋势并生成控制信号，

对误差的变化提供提前调节，有助于减少超调并提高系统的动态性能。微分环节通过对误差变化的预测抑制系统的剧烈波动，从而提升系统的稳定性。

PID 控制算法的比例、积分和微分环节分别针对误差的当前值、累积值 and 变化趋势进行调节，三者共同作用，实现了高效、精准的系统控制。

2.2 神经网络

2.2.1 神经元的模型

神经网络由多个神经元（Neuron）和层（Layer）组成，其典型结构包括输入层、隐含层和输出层，输入层负责接受原始数据，输入节点的数量等于数据的特征维度，每个节点仅传递数据而不执行计算。隐含层对输入数据进行特征提取与非线性变换，由若干神经元构成。隐含层的数量及每层神经元的数量对模型的表达能力有重要影响，输出层生成网络的结果^[49]。单神经元模型如图 2-2 所示：

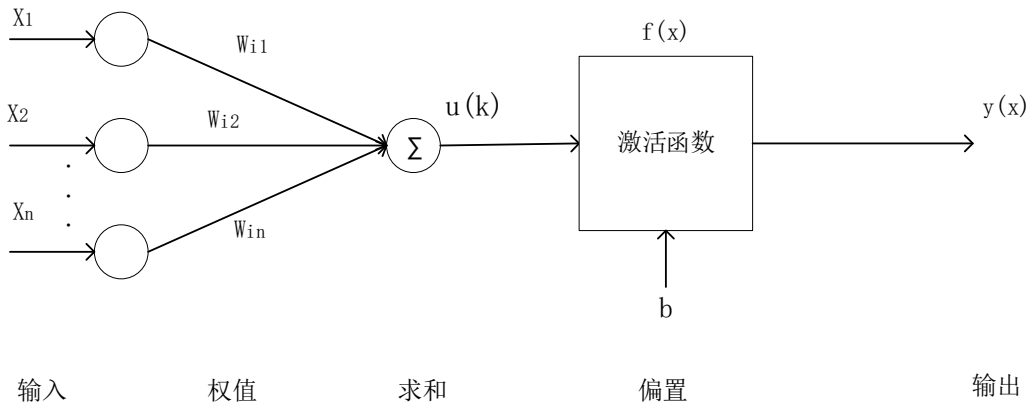


图 2-2 单神经元模型

输出 $y(x)$ 为：

$$y(x) = f[u(k) + b] \quad (2-2)$$

2.2.2 神经网络的特点

神经网络凭借其独特的网络结构和学习机制，在解决复杂非线性问题中具有明显优势。与传统的算法模型相比，神经网络具有一系列的特点，主要特点如下：

（1）神经网络通常由输入层、隐含层和输出层组成，具有多层次的拓扑结构。隐含层通过逐层学习，能够从低级到高级逐步提取数据的特征。例如，在计

计算机视觉领域中，前几层可以识别边缘和纹理等基础信息，而后几层则能够识别更高层次的物体信息，这种逐层识别的方式，使得神经网络在处理复杂问题时具有明显的优势。

(2) 神经网络通过引入 ReLU、Sigmoid 或 Tanh 等非线性激活函数，使得网络能够将输入映射为高度非线性的输出。这一特点使得神经网络能够识别到复杂的数据分布和非线性关系，与传统的模型相比，神经网络能够更好的处理复杂的输入输出关系。

(3) 神经网络的学习过程依赖于一些可调整的参数，包括权重和偏置。通过反向传播算法 (Back Propagation) 和梯度下降等优化方法，神经网络能够逐步调整这些参数，使得网络输出逐渐逼近期望的结果。反向传播通过计算误差的梯度，并将其反向传播至每一层，从而更新权重和偏置，确保网络在训练过程中不断优化，提高其对数据的拟合能力，这一学习机制使得神经网络能够处理各种复杂任务。

(4) 神经网络在处理高维输入数据 (如图像、语音和文本等) 方面具有很好的优势。通过特定的网络结构，神经网络能够针对不同类型的输入数据进行优化处理。例如，在图像处理方面，卷积神经网络 (CNN) 能够有效提取局部特征并进行全局特征融合，广泛应用于物体识别和图像分类等，而循环神经网络 (RNN) 则能够处理序列数据，如语音和文本，通过捕捉时间依赖关系来提升对时序数据的处理能力。

2.2.3 神经网络的应用场景

神经网络以其强大的非线性映射能力和对高维复杂数据的处理能力以及对多任务的适应性，已在多个领域中得到了广泛应用，包括智能制造、气象预测、路径规划等领域。主要应用领域如下：

(1) 神经网络在智能制造领域的应用日益广泛。通过对复杂制造系统的建模，神经网络能够深入分析并优化生产流程，准确识别生产效率较低的环节，从而优化生产流程，提高生产效率。神经网络还可以通过对实时生产数据进行分析，对生产线的各个环节进行动态调整，以实现精确的生产调度，提高能源利用率，从而提高生产效率。

(2) 神经网络在气象领域的应用也非常广泛，通过分析历史气象数据，神

神经网络能够预测未来天气趋势和气候变化，这为气象预警系统提供了重要的技术支持，帮助预防自然灾害。

(3) 神经网络能够结合传感器数据（如激光雷达、摄像头等），实现对动态环境中目标的精确识别与检测。在自动驾驶和机器人领域中，神经网络结合自学习策略，能够在复杂的动态环境中进行路径规划和实时调整控制策略，进而优化行驶路径。

2.3 PID 神经网络

PID 神经网络^[50]从结构上可以分为输入层、隐含层和输出层三层， n 个控制量的 PID 神经元网络包含 n 个并列的相同子网络，各子网络间既相互独立，又通过网络连接权值相互联系。每个子网络的输入层包含两个神经元，分别接收控制量的目标值和当前值。其隐含层由比例元、积分元和微分元构成，分别对应 PID 控制器中的比例、积分和微分控制部分。根据被控系统控制量的数量，PID 神经元网络可以分为单控制量神经元网络和多控制量神经元网络。单控制量神经元网络是 PID 神经元网络的基本形式，而多控制量神经元网络则视为多个单控制量神经元网络的组合^{[51][52][53]}。

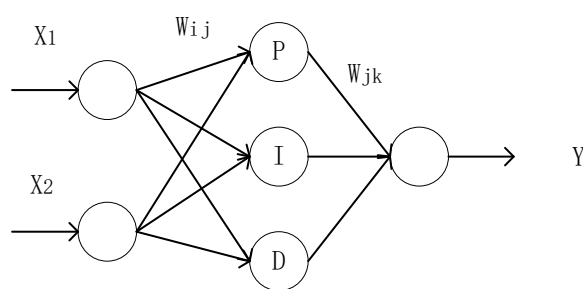


图 2-3 单控制量神经网络拓扑结构

在图 2-3 中， X_1 代表控制量的控制目标， X_2 是控制量的当前值， Y 是通过神经网络计算得到的控制律， W_{ij} 和 W_{jk} 分别是网络中的权值。从图中可以看出，单控制量神经元网络是一个三层前馈神经网络，网络结构为 2-3-1，其中隐含层包含了比例元、积分元和微分元三个神经元。多控制量神经元网络则视为多个单控制量神经网络的并联组合，其拓扑结构如图 2-4 所示^{[54][55]}。

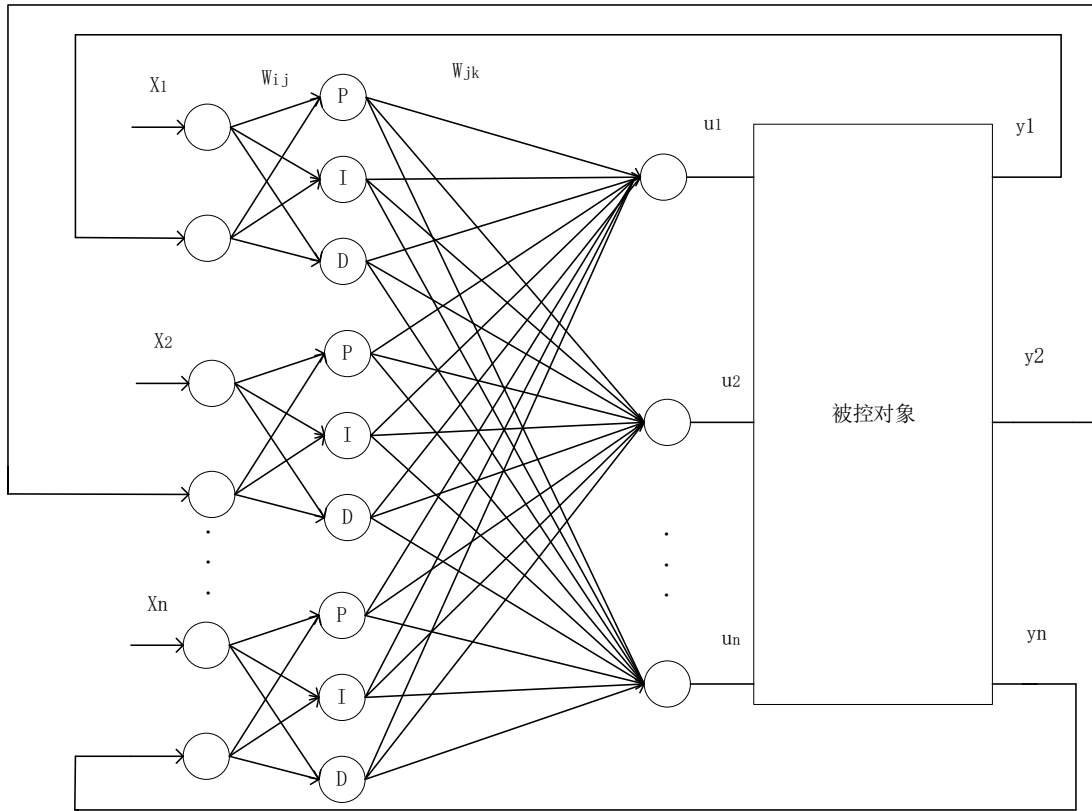


图 2-4 多控制量 PID 神经网络结构

在图 2-4 中， $X_1, X_2, \dots, X_n$ 表示控制量的控制目标； $u_1, u_2, \dots, u_n$ 是多控制量神经网络计算得出的控制律； $y_1, y_2, \dots, y_n$ 则是各个控制量的当前值； W_{ij} 和 W_{jk} 分别为网络中的权重值。

2.3.1 控制律计算

PID 神经网络分为输入层、隐含层和输出层，网络输入量为控制量当前值和控制目标，输出量为控制律，各层输入输出计算公式如下^{[56][57]}：

(1) 输入层

输入层中包含 $2n$ 个神经元，输出数据 x_{si} 等于输入数据 X_{si} ，计算公式为：

$$x_{si}(k) = X_{si}(k) \quad (2-3)$$

(2) 隐含层

隐含层有 $3n$ 个神经元，包括 n 个比例神经元， n 个积分神经元和 n 个微分神经元。这些神经元的输入值相同，计算公式为：

$$net_{sj}(k) = \sum_{i=1}^2 \omega_{ij} x_{si}(k) \quad j = 1, 2, 3 \quad (2-4)$$

隐含层各神经元输出的计算公式如下：

比例神经元

$$u_{s1}(k) = net_{s1}(k) \quad (2-5)$$

积分神经元

$$u_{s2}(k) = net_{s2}(k) + u_{s2}(k-1) \quad (2-6)$$

微分神经元

$$u_{s3}(k) = net_{s3}(k) - net_{s3}(k-1) \quad (2-7)$$

式中，s 为并联子网络的序号；j 为子网络中隐含层神经元序号； $x_{si}(k)$ 为各子网络输入层神经元的输出值； ω_{ij} 为各子网络输入层至隐含层的连接权重值。

(3) 输出层

输出层有 n 个神经元，构成 n 维输出量，输出层的输出为隐含层全部神经元的输出值加权，计算公式如下：

$$y_h(k) = \sum_{s=1}^n \sum_{j=1}^3 \omega_{jk} u_{sj}(k) \quad (2-8)$$

式中，h 为输出层神经元序号；s 为子网的序号；j 为子网的隐含层神经元序号； $u_{sj}(k)$ 为隐含层各神经元输出值； ω_{jk} 为隐含层至输出层的连接权重值。

2.3.2 权值修正

PID 神经网络在控制的过程中根据控制量误差按照梯度修正法修正网络权值，使得控制量不断接近控制目标值；权值修正的公式如下。

误差计算公式如下：

$$J = \sum E = \sum_{k=1}^n [y_h(k) - r(k)]^2 \quad (2-9)$$

式中，n 为输出节点个数； $y_h(k)$ 为预测输出； $r(k)$ 为控制目标。

PID 神经网络权值的修正公式如下：

(1) 输出层到隐含层：

$$\omega_{jk}(k+1) = \omega_{jk}(k) - \eta \frac{\partial J}{\partial \omega_{jk}} \quad (2-10)$$

(2) 输入层到输出层：

$$\omega_{ij}(k+1) = \omega_{ij}(k) - \eta \frac{\partial J}{\partial \omega_{ij}} \quad (2-11)$$

式中， η 为学习速率。

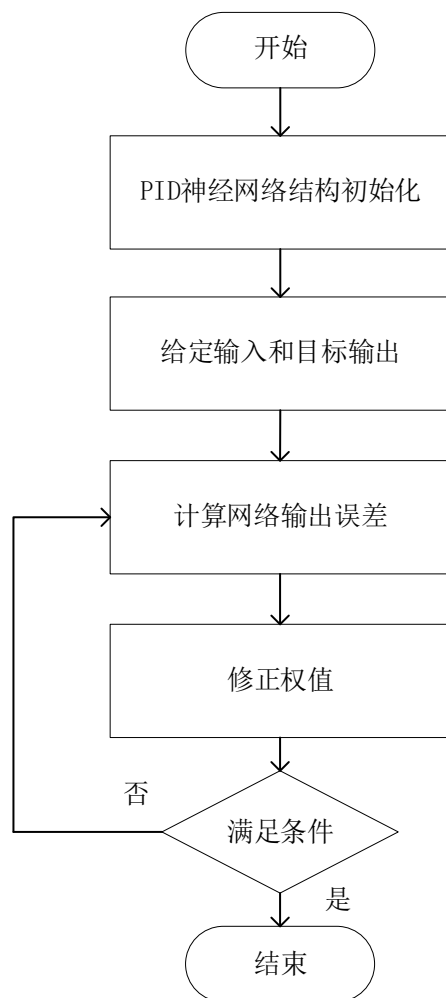


图 2-5 PID 神经网络算法流程

2.3.3 改进 PID 神经网络

针对 PID 神经网络算法存在收敛速度较慢、易陷入局部最优等问题，本文通过附加动量项法和变学习速率法改进 PID 神经网络来提高 PID 神经网络的学习效率与控制性能。附加动量项法能够在 PID 神经网络优化过程中增强算法的动态稳定性，从而减少陷入局部极值的可能性；而变学习速率法则通过动态调整学习速率适应不同的优化阶段，提高了 PID 神经网络的训练效率。综合运用这两种方法，旨在增强 PID 神经网络的解耦控制性能。

(1) 附加动量项法

PID 神经网络的权值一般通过梯度学习法进行更新,但这种方法修正速度较慢,且容易陷入局部最优。动量项的引入为解决这些问题提供了一种有效的方法。其核心思想是利用历史梯度信息,增强梯度下降的惯性,从而加速优化过程并抑制梯度振荡,动量因子的引入能够使权值更新方向平滑变化,避免因目标函数局部波动导致的梯度振荡。通过附加动量项,使得 PID 神经网络在优化过程中提高了收敛速度和全局搜索能力。

权值调整公式为:

$$\omega_{jk}(k+1) = \omega_{jk}(k) - \eta \frac{\partial J}{\partial \omega_{jk}} + \eta_1 [\omega_{jk}(k) + \omega_{jk}(k-1)] \quad (2-12)$$

$$\omega_{ij}(k+1) = \omega_{ij}(k) - \eta \frac{\partial J}{\partial \omega_{ij}} + \eta_1 [\omega_{ij}(k) + \omega_{ij}(k-1)] \quad (2-13)$$

式中, ω_{jk} 表示隐含层到输出层的权值, ω_{ij} 表示输入层到隐含层间的权值, J 为控制误差; η , η_1 为学习速率。

(2) 变学习速率法

神经网络的训练过程通常依赖于梯度下降法,而学习率是其中的关键参数,学习率过大会引发震荡甚至发散,而学习率过小则可能导致训练速度缓慢。本文通过变学习速率法来改进神经网络,动态调整学习率能够提高神经网络的全局搜索能力,使神经网络更容易跳出局部最优。通过学习率的自适应调整能够有效抑制梯度下降过程中的震荡现象,提高了 PID 神经网络算法的稳定性和鲁棒性。

变学习速率公式如下:

$$\eta(k) = \begin{cases} m * \eta(k-1) & E(k-1) < E(k) \\ n * \eta(k-1) & E(k-1) \geq E(k) \end{cases} \quad (2-14)$$

式中, k 为迭代次数, $\eta(k)$ 为第 k 次迭代的学习速率; 参数 m 、 n 的值为: $m=1.25$, $n=0.75$ 。

2.4 仿真分析

由于室内温湿度和 TVOC 浓度之间具有很强的耦合性和非线性特征,其相

互作用对室内空气质量具有重要影响。本文采用式（2-15）三输入三输出的耦合模型作为室内的温度、湿度和 TVOC 浓度三者之间的耦合模型^[58]。本实验使用的 CPU 型号为 intel(R) Core(TM) i5-9300H CPU @ 2.40GHz，使用的显卡型号为 NVIDIA GeForce GTX 1650(4GB)，MATLAB 版本为 R2023a。

$$\begin{cases} y_1(k) = 0.3 * y_1(k-1) + u_1(k-1)/[1 + u_1(k-1)]^2 + 0.4 \\ \quad * u_1(k-1)^3 + 0.4 * u_2(k-1) + 0.3 * y_2(k-1) \\ y_2(k) = 0.4 * y_2(k-1) + u_2(k-1)/[1 + u_2(k-1)]^2 + 0.3 \\ \quad * u_2(k-1)^3 + 0.2 * u_1(k-1) + 0.4 * y_3(k-1) \\ y_3(k) = 0.3 * y_3(k-1) + u_3(k-1)/[1 + u_3(k-1)]^2 + 0.2 \\ \quad * u_3(k-1)^3 + 0.3 * u_2(k-1) + 0.3 * y_1(k-1) \end{cases} \quad (2-15)$$

从式（2-15）可以看出该耦合模型的三个控制量之间相互耦合，传统的控制方法难以取得良好的控制效果，可通过 PID 神经网络算法对该模型进行解耦控制，使得三个控制量之间不在互相影响。PID 神经网络和被控对象构成的闭环控制系统如图 2-6 所示。

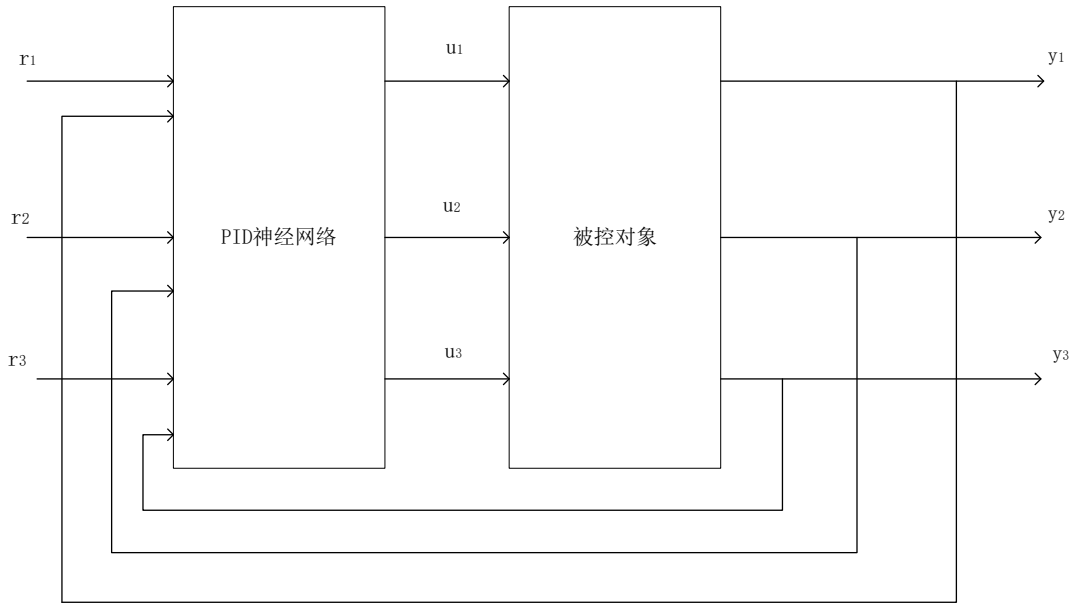


图 2-6 PID 神经网络闭环控制系统

在图 2-6 中， r_1 ， r_2 和 r_3 是控制量控制目标， u_1 ， u_2 和 u_3 为控制器控制律， y_1 ， y_2 和 y_3 为控制量当前值。网络权值随机初始化，控制量初始值设置为 $[0, 0, 0]$ ，控制目标设置为 $[0.8, 0.7, 0.7]$ ，控制时间间隔设置为 $0.001s$ ，仿真结果如图 2-7 和图 2-8 所示。

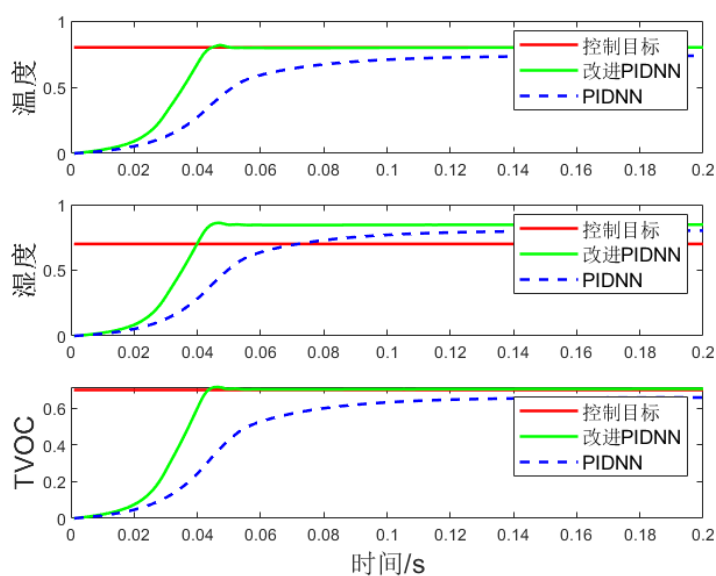


图 2-7 改进 PIDNN 解耦控制输出结果图

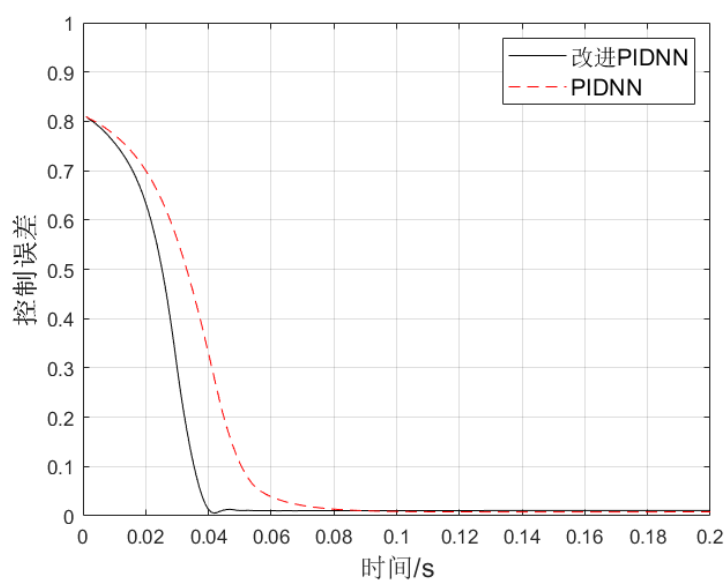


图 2-8 控制误差曲线

表 2-1 不同控制器的追踪时间

控制器	PIDNN	改进 PIDNN
追踪时间	t(s)	
温度	0.1s	0.05s
湿度	0.12s	0.049s
TVOC	0.14s	0.055s

图 2-7 可以看出 PIDNN 和改进后的 PIDNN 都展现了有效的解耦控制能力，

改进后的 PIDNN 跟踪时间更短,动态控制指标更加优越,但是在湿度控制方面,控制误差较大,为了达到更好的解耦效果,本文采用冠豪猪算法优化改进后的 PIDNN。图 2-8 清楚地表明改进后的 PIDNN 的收敛速度更快、控制误差更小以及达到稳定状态所需时间更短。

2.5 本章小结

本章针对室内温度、湿度和 TVOC 浓度之间存在的强耦合问题,提出采用 PID 神经网络算法对三者之间的耦合模型进行解耦控制。为了进一步提升 PID 神经网络在解耦控制中的性能,尤其是提高其学习速率和全局搜索能力,本文引入了附加动量项法与变学习速率法对 PID 神经网络算法进行了改进。实验结果表明,通过以上策略改进后的 PID 神经网络算法,在室内温度、湿度和 TVOC 浓度解耦控制中表现出显著的优势,其解耦性能比传统 PID 神经网络显著提高,解耦控制的响应时间更短,且稳态误差大幅降低。

第 3 章 新风系统解耦控制算法研究

冠豪猪算法是一种新型的智能优化算法，其原理是通过模拟冠豪猪的四种防御策略进行参数寻优，将冠豪猪算法与 PID 神经网络算法相结合来提高 PID 神经网络的解耦性能，仿真结果证明了所提出算法的优越解耦性能。

3.1 冠豪猪优化算法

3.1.1 冠豪猪优化算法概述

冠豪猪优化算法(Crested Porcupine Optimizer, CPO)是一种新型的智能优化算法，由 Abdel-Basset Mohamed^[59]等于 2024 年提出，该算法模拟冠豪猪的四种不同保护机制：视觉、听觉、嗅觉和物理攻击，这些策略从最不激进到最激进排序，视觉和听觉反映了冠豪猪的探索性行为，嗅觉和物理攻击反映了冠豪猪的剥削性行为。

在 CPO 中^[60]，可视化搜索空间，如图 3-1 所示；A 代表第一防御区域，表示 CP 远离捕食者，用于执行第一防御策略。B 代表第二防御区域，表示在捕食者不畏惧第一防御机制并朝捕食者接近时，启动第二防御策略。C 代表第三防御区域，用于实施第三防御策略，当捕食者不惧怕第二和第三防御机制，并继续向 CP 靠近时，该策略会被启动。D 代表最后一个防御区域，用于实施最后一个防守策略。

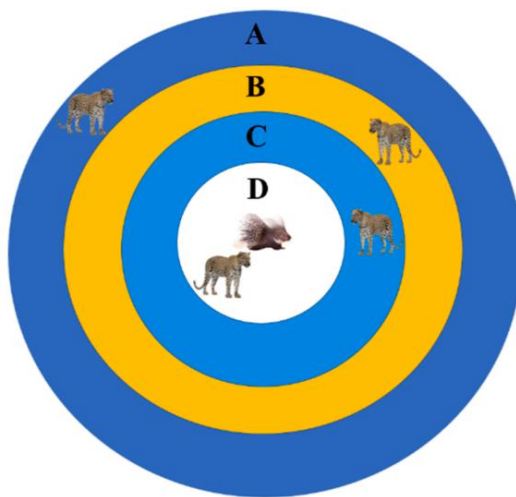


图 3-1 冠豪猪防御策略

3.1.2 循环种群减少策略

为了加速收敛速度并保持种群的多样性，CPO 算法采用了循环种群减少策略（cyclic population reduction technique, CPR）^[61]，即并不是所有冠豪猪都激活防御机制，而是仅有那些受到威胁的冠豪猪会启动防御机制。因此，在该策略中，通过在优化过程中从种群中选取部分 CP，以加速收敛速度，并将其重新引入到种群中，从而提高种群多样性，避免陷入局部极小值。该循环过程依赖于循环变量 T ，用于确定在优化过程中执行该操作的次数。循环种群减少策略的数学模型如下：

$$N = N_{min} + (N' - N_{min}) \times \left(1 - \left(\frac{t \% \frac{T_{max}}{T}}{\frac{T_{max}}{T}} \right) \right) \quad (3-1)$$

式中， T 为确定循环次数的变量， t 是当前函数评估， T_{max} 是函数评估的最大值， $\%$ 表示余数或模运算符， N_{min} 是新生成的种群中个体的最小值，因此种群大小不能小于 N_{min} 。

3.1.3 冠豪猪优化算法原理

（1）种群初始化

与其它基于种群的元启发式算法类似，CPO 算法从初始个体集（即候选解决方案）开始进行搜索过程^{[62][63][64]}。

$$\vec{X}_l = \vec{L} + \vec{r} \times (\vec{U} - \vec{L}) | l = 1, 2, \dots, N' \quad (3-2)$$

式中， N' 表示个体数量（种群大小）； $\vec{X}_l$ 表示搜索空间中的第 l 个候选解； $\vec{L}$ 和 $\vec{U}$ 分别为搜索范围的下限和上限； $\vec{r}$ 是在 0 和 1 之间的随机向量。

（2）第一防御策略

当 CP 感知到捕食者威胁时，它会展示第一种防御姿态，通过竖起刺毛来增大自身的视觉体积，从而让捕食者产生错觉。此时，捕食者的选择仅限于靠近或远离冠豪猪。这种行为的数学模型如下：

$$\overrightarrow{x_l^{t+1}} = \overrightarrow{x_l^t} + \tau_1 \times |2 \times \tau_2 \times \overrightarrow{x_{CP}^t} - \overrightarrow{y_l^t}| \quad \overrightarrow{y_l^t} = \frac{\overrightarrow{x_l^t} + \overrightarrow{x_r^t}}{2} \quad (3-3)$$

式中, $\overrightarrow{x_{CP}^t}$ 是函数评估 t 的最优解, $\overrightarrow{y_l^t}$ 是在当前 CP 和从种群中随机选择的 CP 之间生成的向量, 用于表示捕食者在迭代 t 时的位置, τ_1 是基于正态分布的随机数, τ_2 是区间 $[0,1]$ 中的随机数, r 是 $[1, N]$ 之间的随机数。

(3) 第二防御策略

在第二防御策略中, CP 通过发出声音来制造噪音, 从而威胁捕食者。当捕食者接近 CP 时, CP 的声音会变得更加响亮。数学模型如下:

$$\overrightarrow{x_l^{t+1}} = (1 - \overline{U_1}) \times \overrightarrow{x_l^t} + \overline{U_1} \times (\overrightarrow{y} + \tau_3 \times (\overrightarrow{x_{r_1}^t} - \overrightarrow{x_{r_2}^t})) \quad (3-4)$$

式中, r_1 和 r_2 是 $[1,N]$ 之间的两个随机整数, τ_3 是 0 和 1 之间生成的随机值。

(4) 第三防御策略

在第三防御策略中, CP 会分泌恶臭, 并在周围区域传播, 以防止捕食者靠近它。其数学模型如下:

$$\overrightarrow{x_l^{t+1}} = (1 - \overline{U_1}) \times \overrightarrow{x_l^t} + \overline{U_1} \times (\overrightarrow{x_{r_1}^t} + S_l^t \times (\overrightarrow{x_{r_2}^t} - \overrightarrow{x_{r_3}^t}) - \tau_3 \times \vec{\delta} \times \gamma_t \times S_l^t) \quad (3-5)$$

式中, $\overrightarrow{x_l^t}$ 是迭代 t 时第 l 个个体的位置, r_3 是 $[1,N]$ 之间的随机数, δ 是用于控制搜索方向的参数, 并使用等式 (3-6) 定义。 γ_t 是使用等式 (3-7) 定义的防御因子。 τ_3 是区间 $[0,1]$ 内的随机值, S_l^t 是使用 (3-8) 等式定义的气味扩散因子。如下所示:

$$\vec{\delta} = \begin{cases} +1, & \text{if } \overline{rand} \leq 0.5 \\ -1, & \text{Else} \end{cases} \quad (3-6)$$

$$\gamma_t = 2 \times rand \times \left(1 - \frac{t}{t_{\max}}\right)^{\frac{t}{t_{\max}}} \quad (3-7)$$

$$S_l^t = \exp\left(\frac{f(x_l^t)}{\sum_{k=1}^N f(x_k^t) + \varepsilon}\right) \quad (3-8)$$

式中, $f(x_l^t)$ 表示迭代 t 时第 l 个个体的目标函数值, ε 是避免被零除的小值, $\overline{rand}$ 是包括在 0 和 1 之间随机生成的数值的向量, $rand$ 是包括在 1 和 0 之间随机生成数字的变量, N 是种群数量, t 是当前迭代的次数, $t_{\max}$ 是最大迭代次数。 $\overline{U_1}$ 量用于模拟该策略中可能出现的三种情况:

第一种情况: 当 $\overline{U_1}$ 等于 0 时, 由于捕食者因为害怕 CP 而停止移动, CP 会停止气味的扩散, 从而保持捕食者与 CP 之间的距离不变;

第二种情况：当 $\overrightarrow{U_1}$ 等于 1 时，由于捕食者的存在，CP 会显著释放气味；

第三种情况：当 $\overrightarrow{U_1}$ 是 0 和 1 的组合，由于捕食者与 CP 保持安全距离，因此不需要大范围地释放气味。

(5) 第四防御策略

当捕食者离 CP 很近时，CP 会采取物理攻击并用短而厚的羽毛攻击捕食者。为了用数学公式表达其物理攻击行为，提出了以下公式：

$$\overrightarrow{x_l^{t+1}} = \overrightarrow{x_{CP}^t} + (\alpha(1 - \tau_4) + \tau_4) \times (\delta \times \overrightarrow{x_{CP}^t} - \overrightarrow{x_l^t}) - \tau_5 \times \delta \times \gamma_l \times \overrightarrow{F_l^t} \quad (3-9)$$

式中， $\overrightarrow{x_{CP}^t}$ 是获得的最佳解，表示 $\overrightarrow{x_{CP}^t}$ 在迭代 t 时第 l 个个体的位置， $\overrightarrow{x_l^t}$ 表示该位置的捕食者， α 是收敛速度因子， τ_4 是区间[0,1]内的随机值， $\overrightarrow{F_l^t}$ 是影响第 l 个捕食者的 CP 的平均力。它由非弹性碰撞定律提供并由公式(3-10)定义：

$$\overrightarrow{F_l^t} = \overrightarrow{\tau_6} \times \frac{m_l \times (\overrightarrow{v_l^{t+1}} - \overrightarrow{v_l^t})}{\Delta t} \quad (3-10)$$

$$m_l = e^{\frac{f(\overrightarrow{x_l^t})}{\sum_{k=1}^N f(\overrightarrow{x_k^t}) + \epsilon}} \quad (3-11)$$

$$\overrightarrow{v_l^t} = \overrightarrow{x_l^t} \quad (3-12)$$

$$\overrightarrow{v_l^{t+1}} = \overrightarrow{x_r^t} \quad (3-13)$$

其中， $\overrightarrow{v_l^{t+1}}$ 是第 l 个个体在下次迭代 t+1 时的最终速度， $\overrightarrow{v_l^t}$ 是迭代 t 时第 l 个个体的初始速度， m_l 是迭代 t 时第 l 个个体（捕食者）的质量， $f(\cdot)$ 表示目标函数，并基于从当前总体中选择随机解进行分配， Δt 表示当前迭代次数， $\overrightarrow{\tau_6}$ 表示在 0 和 1 之间生成的随机向量。在公式（3-10）中，基于分子除以当前迭代次数来计算 CP 的平均力，当前迭代次数在优化过程中线性增加。因此，CP 的平均力的影响逐渐减小。事实上，这个因子的小值对 CPO 的性能并不重要，因为它们可能不利于利用迄今为止最优解周围的各个区域来寻找更好的解。因此，我们通过删除分子并且只依赖分母来更新方程，如公式（3-14）所示。这种方法将有助于在搜索空间内创建广泛的值，从而对迄今为止最好的解决方案周围的区域进行更全面的检查。

$$\vec{F}_l^t = \vec{\tau}_6 \times m_l \times (\vec{v}_l^{t+1} - \vec{v}_l^t) \quad (3-14)$$

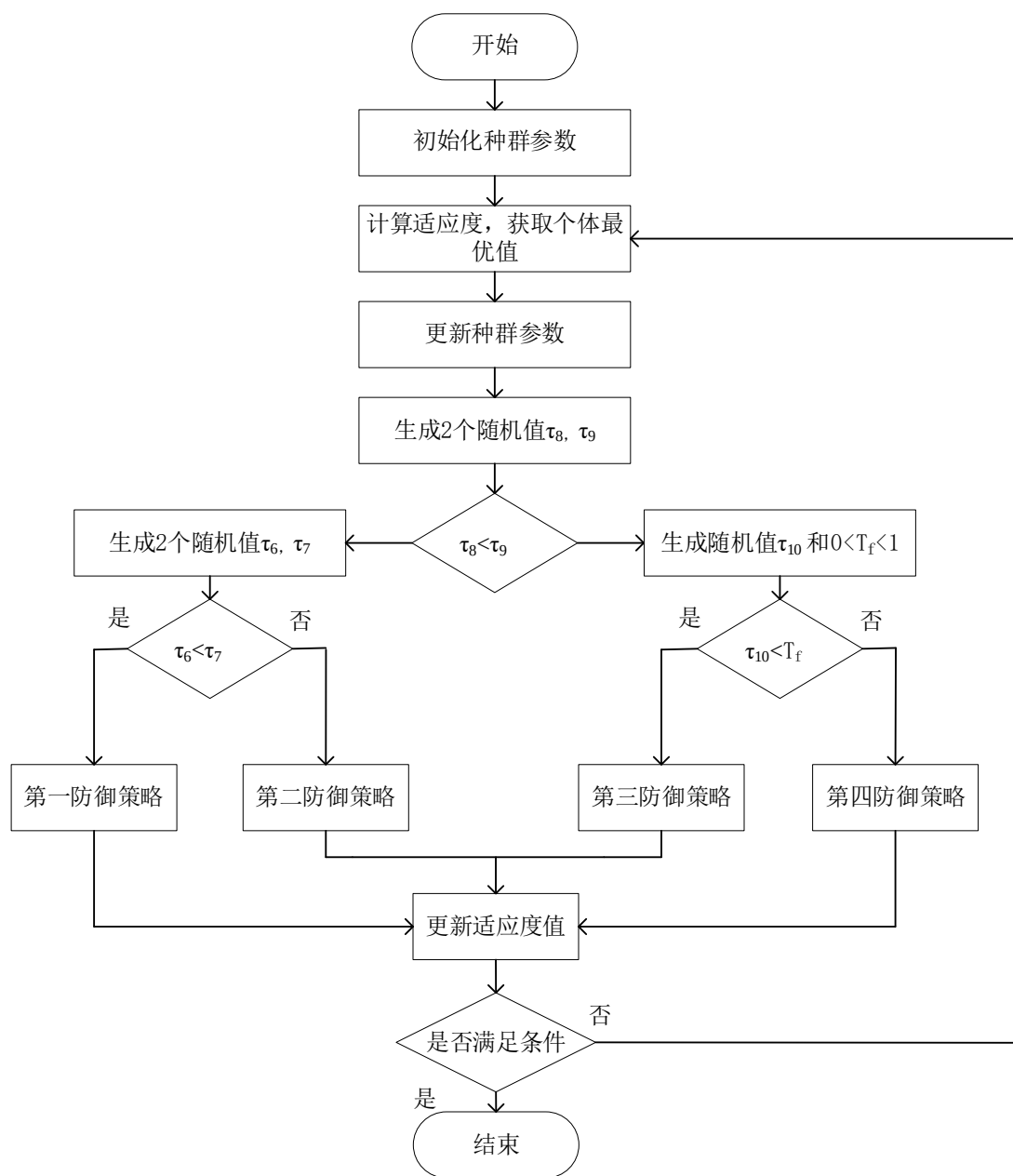


图 3-2 CPO 算法流程

3.2 改进冠豪猪优化算法

由于冠豪猪优化算法在优化过程中可能出现早熟收敛、全局搜索能力不足或陷入局部最优的问题, 本文通过将惯性权重因子, levy 飞行策略, 螺旋更新策略和 CPO 相结合, 以增强其全局搜索能力, 提高 CPO 算法的收敛性和收敛速度,

避免陷入局部最优。

3.2.1 惯性权重的改进

惯性权重因子通过在位置更新策略中引入动态调节参数,使得算法能够在迭代过程中自适应调整个体的搜索步长,通过引入惯性权重因子,CPO 在更新个体位置时结合了全局信息与局部信息,使得搜索路径更加多样化,同时增强了算法的性能,惯性权重因子的动态特性使 CPO 能够在搜索的不同阶段表现出更好的适应性:在初期阶段,惯性权重因子放大 CP 个体的步长变化范围,增强全局探索能力;在后期阶段,惯性权重因子通过减小 CP 个体的步长变化范围,使得算法聚焦于最优解的区域。

改进后的第一防御策略公式如下:

$$\overrightarrow{x}_i^{t+1} = h_{max} - \left(\frac{t}{T_{max}}\right) * (h_{max} - v_{min}) * \overrightarrow{x}_i^t + \tau_1 \times \left| 2 \times \tau_2 \times \overrightarrow{x}_{CP}^t - \frac{\overrightarrow{x}_i^t + \overrightarrow{x}_r^t}{2} \right| \quad (3-15)$$

式中, h_{max} 是惯性权重最大值,其值为 0.9, v_{min} 是惯性权重最小值,其值为 0.4, t 是当前迭代次数, T_{max} 是最大迭代次数。

改进后的第二防御策略公式如下:

$$\overrightarrow{x}_i^{t+1} = \left(1 - \frac{t}{T_{max}}\right) \times \overrightarrow{x}_i^t + \left(\vec{y} + \tau_3 \times (\overrightarrow{x}_{r1}^t - \overrightarrow{x}_{r2}^t)\right) \quad (3-16)$$

式中, t 是当前迭代次数, T_{max} 是最大迭代次数。

3.2.2 levy 飞行策略

levy 飞行策略是一种基于 levy 分布的随机步长策略,其特点是通过结合大量的小步长搜索和少量的大步长跳跃搜索,实现全局探索与局部搜索的平衡。其数学特性可表示为:

$$Levy = \frac{u}{|v|^{1/\beta}} \quad (3-17)$$

$$\begin{cases} u \sim N(0, \sigma_u^2) \\ v \sim N(0, \sigma_v^2) \end{cases} \quad (3-18)$$

$$\sigma_u = \left[\frac{\Gamma(1+\beta) \times \sin \frac{\pi\beta}{2}}{\Gamma((1+\beta)/2) \times \mu \times 2^{\frac{\beta-1}{2}}} \right]^{1/\beta} \quad (3-19)$$

$$\sigma_v = 1 \quad (3-20)$$

式中, β 为 1.5, u 和 v 服从正态分布。

改进后的第三防御策略公式为:

$$\overrightarrow{x_i^{t+1}} = \overrightarrow{x_i^t} \oplus Levy(d) \quad (3-21)$$

式中, $\oplus$ 为点乘, $levy(d)$ 表示符合 $levy$ 分布。

$levy$ 飞行策略通过随机跳跃机制能够增强 CPO 算法的全局搜索能力, 使得 CP 个体能够跳出局部最优区域, 尤其在算法初期表现出强大的全局搜索能力, 从而在搜索过程中能够产生多样化的路径, 能够提高算法的鲁棒性, 增加了 CP 个体探索全局最优解的能力。通过将 $levy$ 飞行策略引入个体更新公式中, 增强了 CP 个体搜索策略的灵活性, 实现了算法在不同优化阶段的自适应搜索能力, 使得 CPO 算法具有更高的寻优精度和更快的收敛速度。

3.2.3 螺旋更新策略

螺旋更新策略起源于鲸鱼搜索算法^[65], 基于鲸鱼在觅食或迁徙过程中采用的螺旋轨迹运动模式。螺旋更新策略通过在个体位置更新中加入螺旋函数, 使得 CP 个体在更新过程中沿螺旋路径运动, 在算法初期, 较大的螺旋幅度和多样化的方向角度使 CP 个体能够进行广泛的全局探索, 在算法后期, 螺旋轨迹幅度逐步减小, 使得 CP 个体集中于最优解附近区域, 螺旋更新策略作为 CPO 算法的一部分, 进一步提升了算法的稳定性和鲁棒性。

改进后的第四防御策略公式如下:

$$\overrightarrow{x_i^{t+1}} = k * \overrightarrow{x_{CP}^t} + (\alpha(1 - \tau_4) + \tau_4) \times (\delta \times \overrightarrow{x_{CP}^t} - \overrightarrow{x_i^t}) - \tau_5 \times \delta \times \gamma_l \times \overrightarrow{F_i^t} \quad (3-22)$$

$$k = e^{b \times h} * \cos(2\pi h) \quad (3-23)$$

式中, 参数 b 为常数 1, 用于定义螺旋的形状, 随机参数 $h \in [-1, 1]$ 。

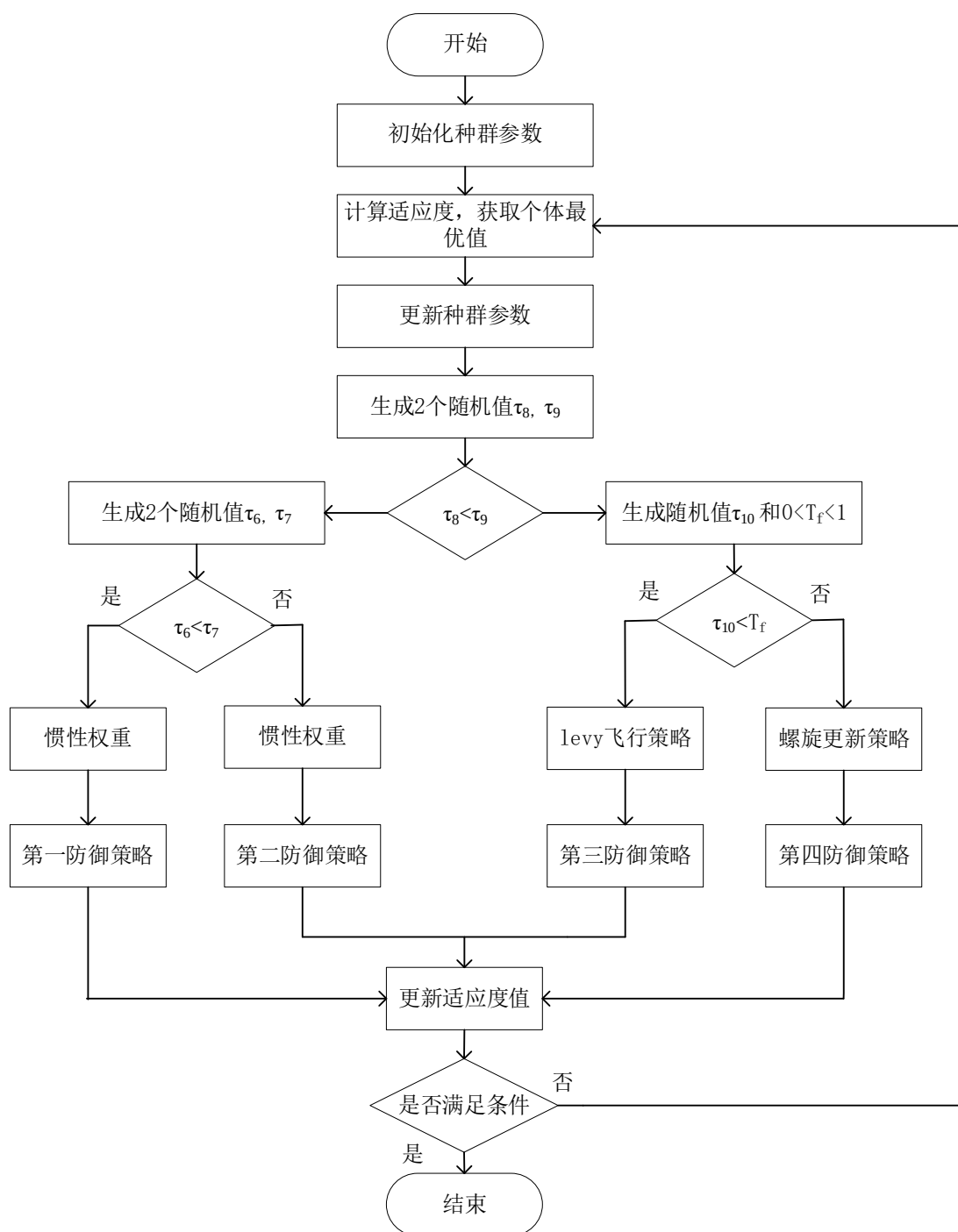


图 3-3 ICPO 算法流程

3.3 算法测试及分析

3.3.1 测试函数

为了验证 ICPO 算法的收敛速度和性能, 采用以下函数进行收敛测试并与 GWO、SSA 和 PSO 等算法进行对比。

表 3-1 基准测试函数

Test function	S	$f_{\min}$
$f_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	$[-100,100]^n$	0
$f_2(x) = \sum_{i=1}^n x_i + \prod_{i=1}^n x_i $	$[-10,10]^n$	0
$f_3(x) = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n x_j \right)^2$	$[-100,100]^n$	0
$f_4(x) = \max_i \{ x_i , 1 \leq i \leq n\}$	$[-100,100]^n$	0
$f_5(x) = \sum_{i=1}^{n-1} [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2]$	$[-30,30]^n$	0
$f_6(x) = \sum_{i=1}^n i x_i^4 + \text{random}[0,1]$	$[-1.28,1.28]^n$	0
$f_7(x) = \sum_{i=1}^n -x_i \sin(\sqrt{ x_i })$	$[-500,500]^n$	-12569.5
$f_8(x) = \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10]$	$[-5.12,5.12]^n$	0
$f_9(x) = -20 \exp \left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \right) - \exp \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos 2\pi x_i \right) + 20 + e$	$[-32,32]^n$	0
$f_{10}(x) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos \left(\frac{x_i}{\sqrt{i}} \right) + 1$	$[-600,600]^n$	0
$f_{11}(x) = - \sum_{i=1}^{10} [(x - a_i)(x - a_i)^T + c_i]^{-1}$	$[0,10]^n$	-10

3.3.2 测试结果分析

ICPO、CPO、SSA、GWO 和 PSO 算法对各测试函数寻找最优解的收敛

曲线如图 3-4、图 3-5、图 3-6 和图 3-7 所示。

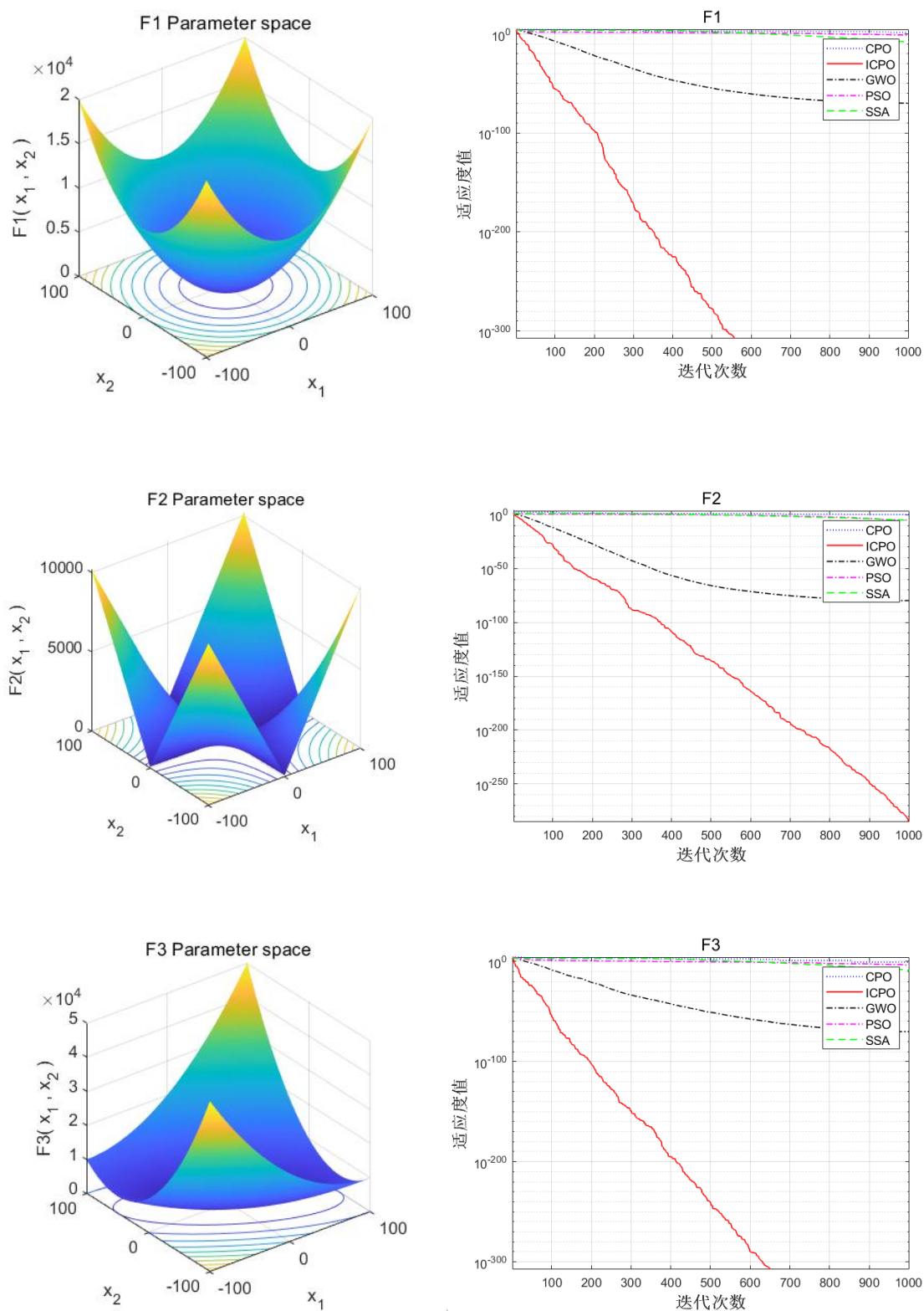


图 3-4 各函数图像及收敛曲线

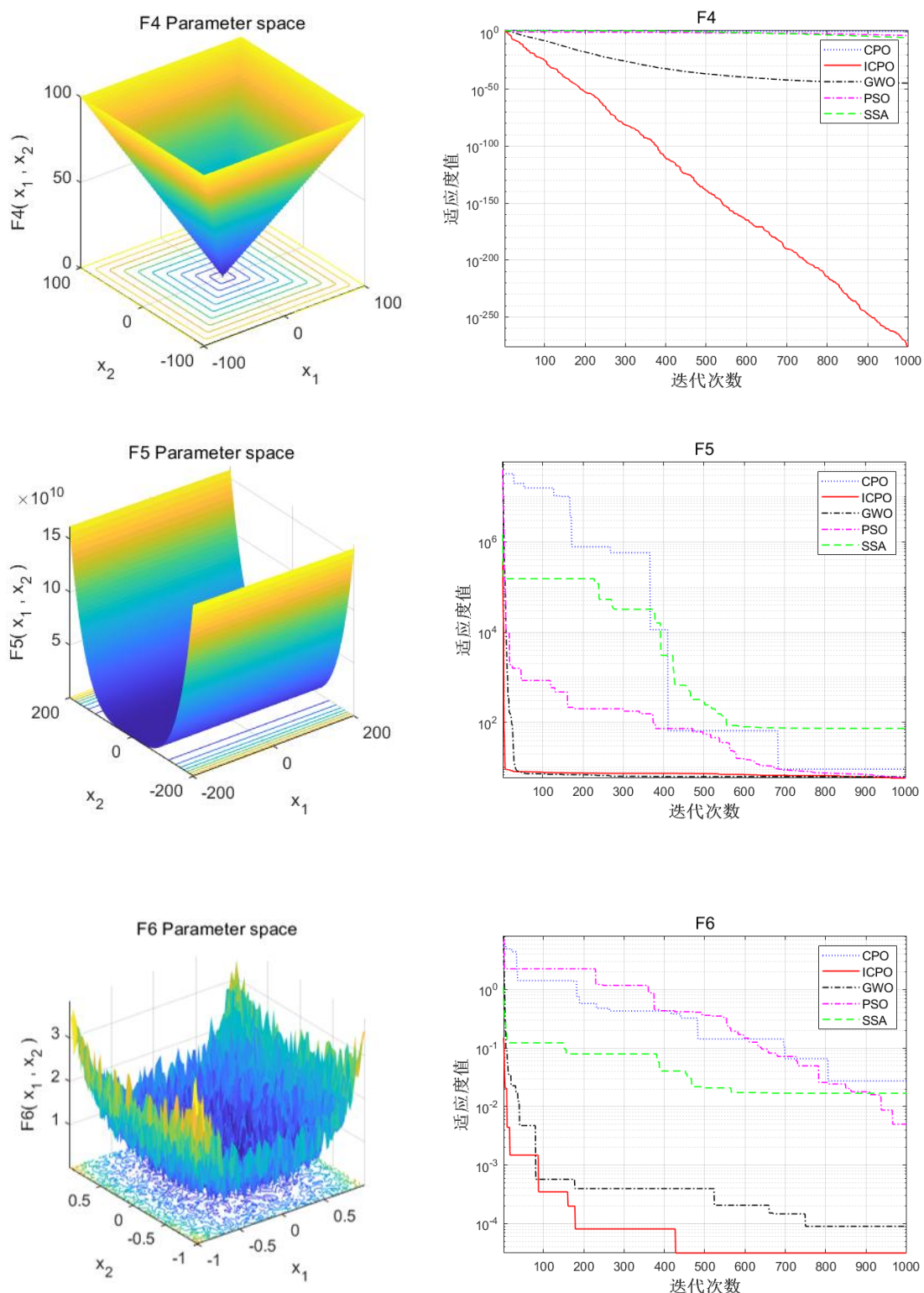


图 3-5 各函数图像及收敛曲线

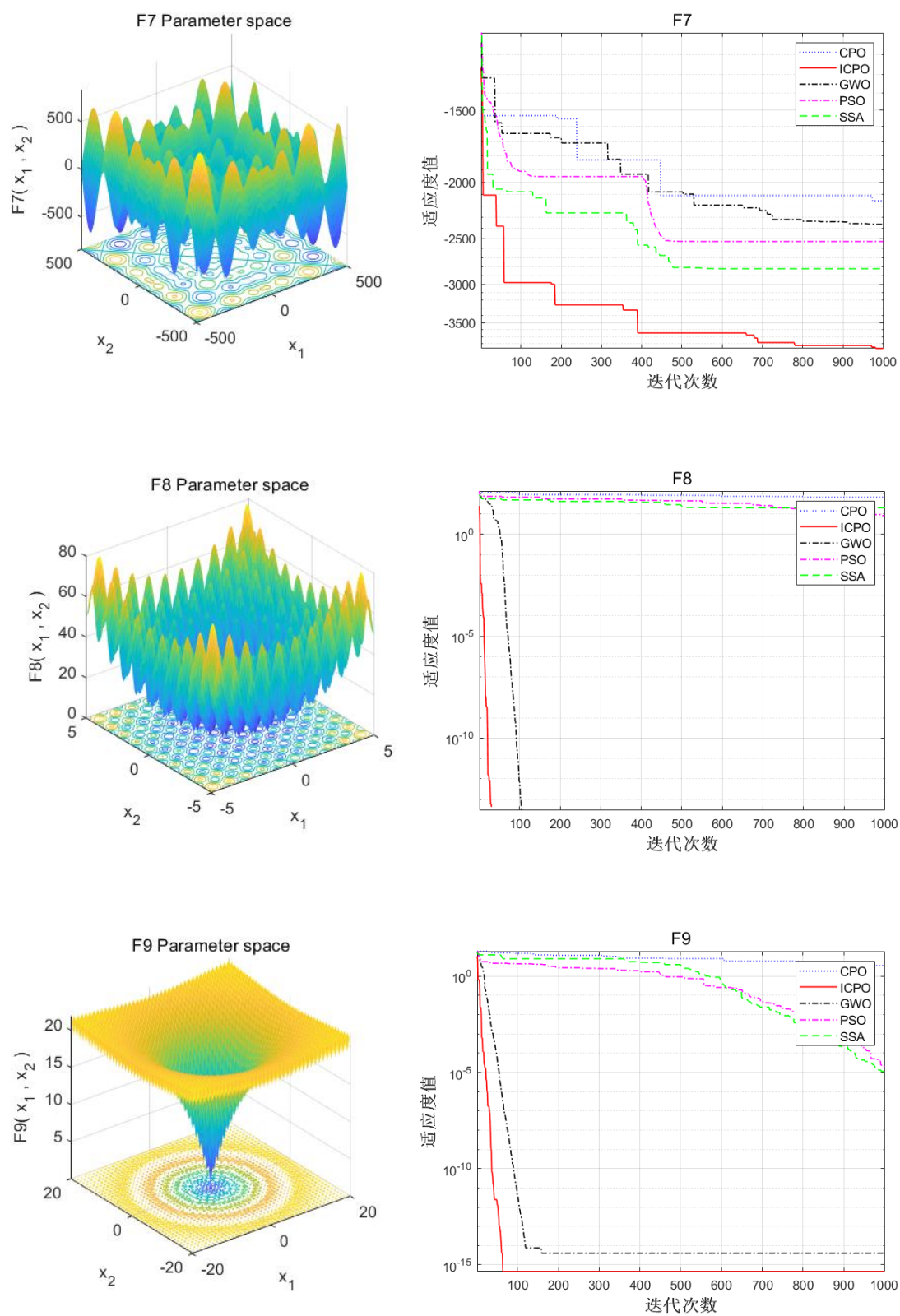


图 3-6 各函数图像及收敛曲线

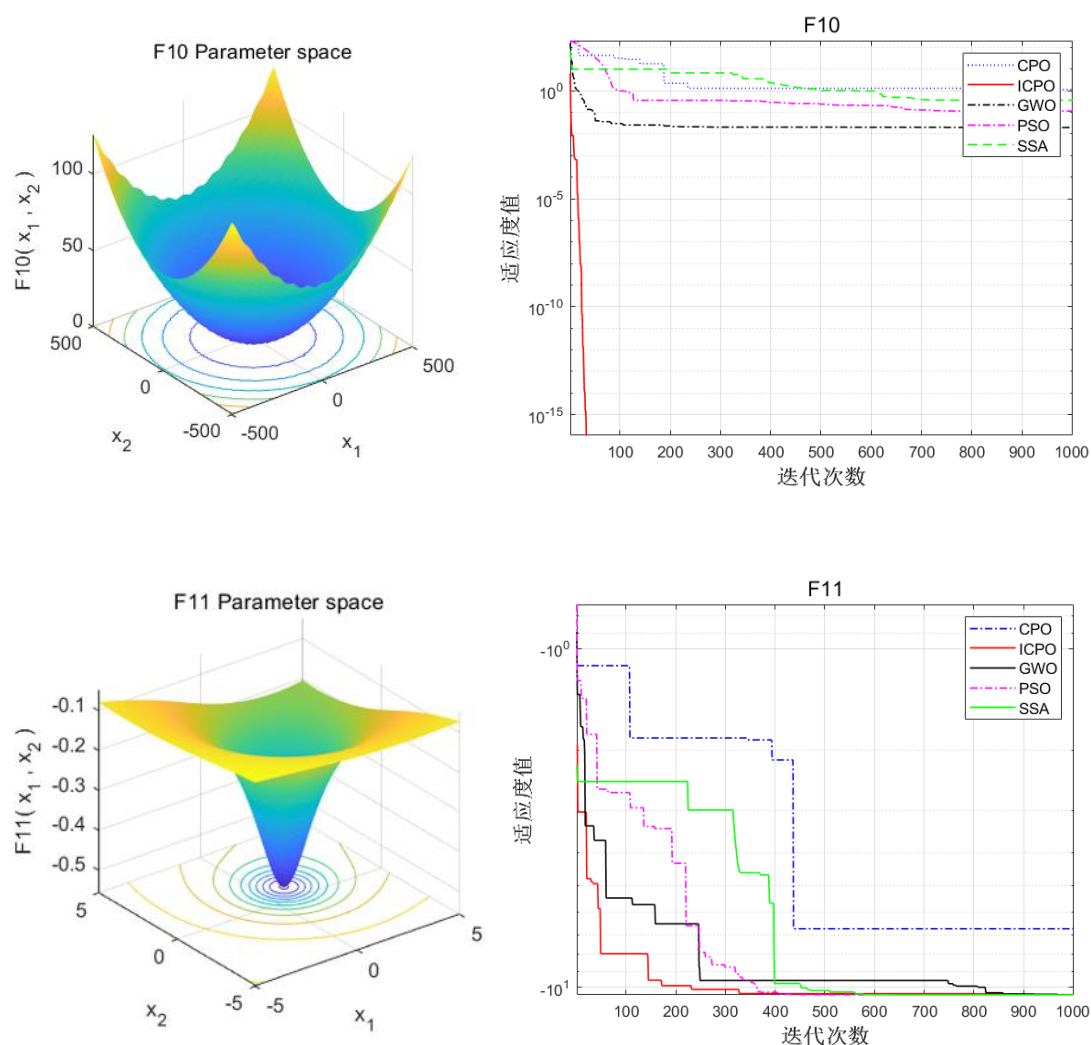


图 3-7 各函数图像及收敛曲线

仿真结果表明,在所提出的测试函数上,ICPO 算法相较于传统的 SSA、GWO 和 PSO 等优化算法表现出了显著的优势。ICPO 算法具有更好的收敛性和收敛速度,能够以较少的迭代次数搜索到全局最优解,同时其优化性能在多种复杂环境下均表现出更高的稳定性和准确性,这表明 ICPO 算法具有较强的搜索能力,实验结果进一步验证了所提出方法的有效性。

3.4 改进冠豪猪算法优化 PID 神经网络

通过惯性权重、levy 飞行策略和螺旋更新策略改进 CPO 算法,测试函数结果表明所提出的改进策略的有效性,本文对室内温度、湿度以及 TVOC 浓度之

间的耦合关系进行深入研究，分析了控制输入与控制输出之间复杂的耦合关系，采用改进的冠豪猪算法优化改进后的 PID 神经网络（ICPO-PIDNN）对第二章所提到的室内的温度、湿度和 TVOC 浓度耦合模型进行解耦控制。冠豪猪种群数量设置为 50，迭代次数设置为 100，仿真结果如图 3-8 所示：

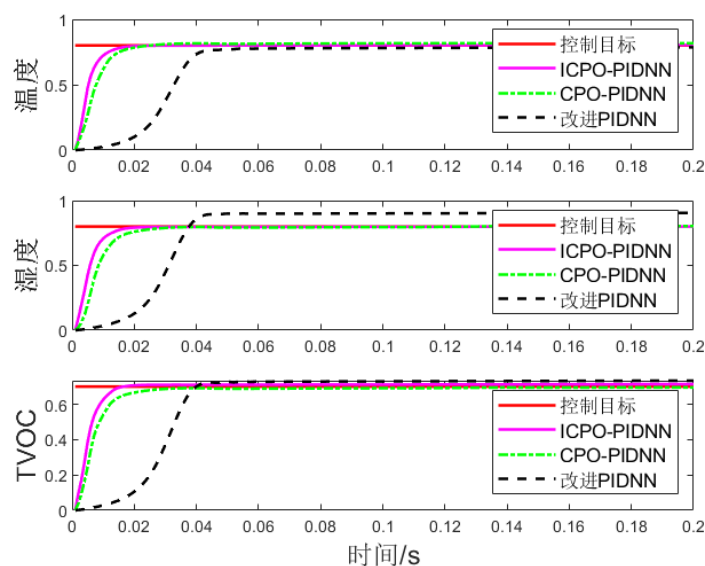


图 3-8 ICPO-PIDNN 控制输出

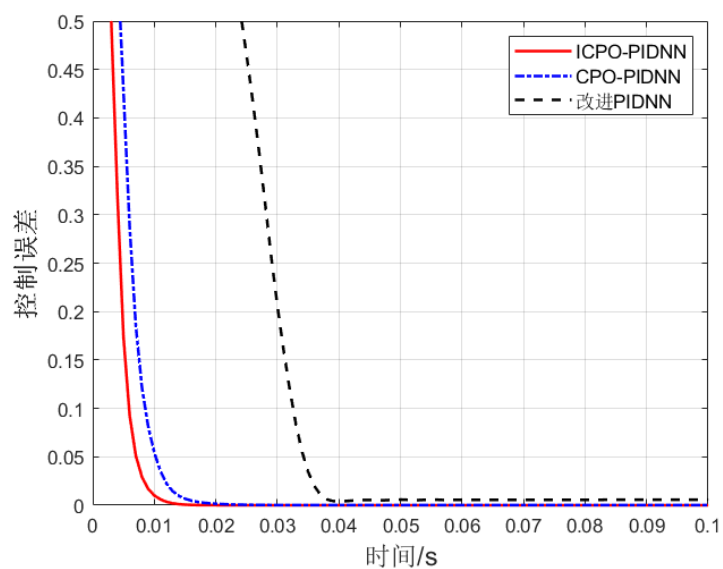


图 3-9 控制误差曲线

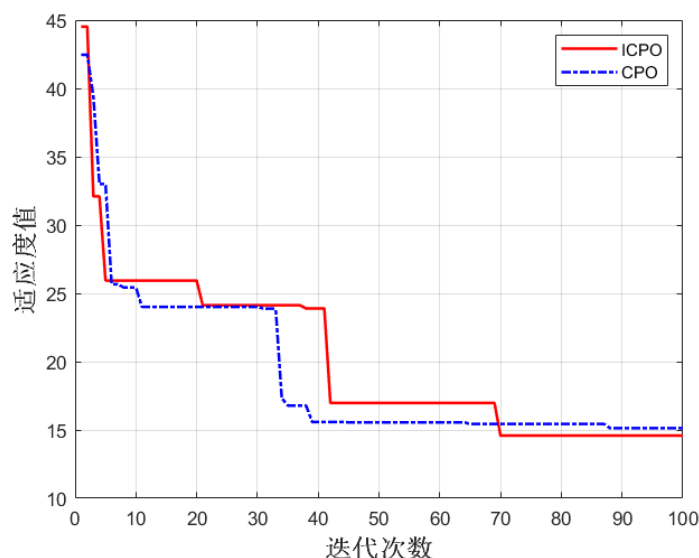


图 3-10 适应度变化曲线

表 3-2 不同控制器的追踪时间

控制器	改进 PIDNN	CPO-PIDNN	ICPO-PIDNN
追踪时间	t(s)		
温度	0.05s	0.035s	0.019s
湿度	0.049s	0.033s	0.02s
TVOC	0.055s	0.034s	0.024s

图 3-8 实验结果表明，所提出的算法在室内的温度、湿度以及 TVOC 浓度三者间的耦合模型中得以有效解耦，但是改进后的 PIDNN 控制算法在湿度控制方面表现出较大的误差，且系统响应速度相对较慢，需要较长时间才能实现对目标值的追踪与控制，相比之下，ICPO-PIDNN 控制算法展现了显著的优势，其系统响应速度明显快于改进后的 PIDNN 算法，能够更快速地实现对目标值的追踪与控制。从图 3-9 的实验结果可以看出，ICPO-PIDNN 控制算法的控制误差最小，充分说明了其在控制精度方面的优越性，ICPO-PIDNN 在动态响应速度、稳态误差以及抗干扰能力等方面均有显著提升，实验结果验证了所提出算法的有效性。

3.5 本章小结

本章通过惯性权重、levy 飞行策略和螺旋更新策略改进 CPO 算法，并通过测试函数与 GWO、SSA 和 PSO 等算法进行对比，结果表明 ICPO 算法具有更好

的收敛性和收敛速度。采用 ICPO-PIDNN 算法对温度、湿度和 TVOC 的耦合模型进行解耦控制，仿真结果表明 ICPO-PIDNN 算法能够很好对此耦合模型进行解耦，能够最快的速度达到追踪目标，具有更小的误差和最快的响应速度。

第 4 章 新风控制系统设计

为了实时了解室内的环境情况，设计了新风控制系统，通过相关传感器可以实时读取室内的温度、湿度和 TVOC 浓度，通过新风控制系统从而对室内的空气质量进行实时调节，为人们提供更加舒适的室内环境。

4.1 新风系统总体设计

4.1.1 新风系统介绍

新风系统在改善和调节室内空气质量方面发挥着重要作用，其示意图如图 4-1 所示：

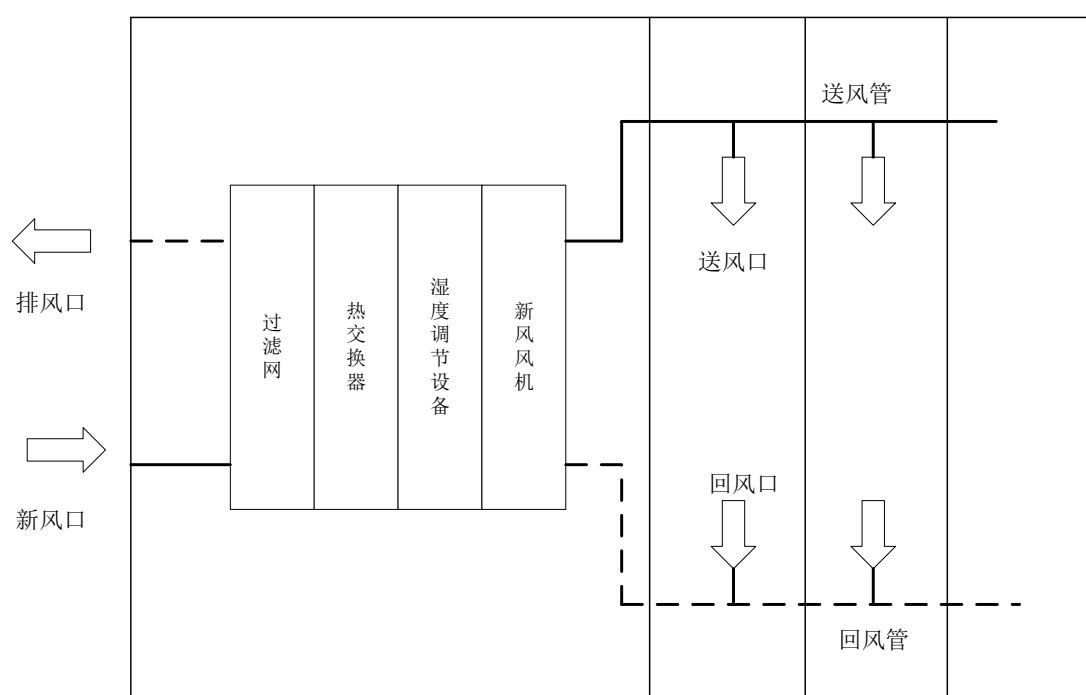


图 4-1 新风控制系统示意图

新风控制系统作为室内空气质量调节的重要控制系统，其基本架构由送风系统与排风系统构成，二者在功能上既相互独立又密切配合，共同实现室内外空气的高效置换。其中，送风系统主要包括新风管、送风管以及送风阀等关键设备；而排风系统则由回风管、回风阀与排风管构成，这种结构设计不仅保证了新风传

输的高效性，同时也为后续的室内环境的调节提供了物理基础。在新风系统的运行过程中，设置有空气过滤网，室外的新鲜空气经过高效过滤网处理后，可有效去除悬浮颗粒及部分有害气体，为后续的温度与湿度调节奠定了良好基础。新风系统通过控制热交换器的工作状态，使得进入室内的空气能够在温度上达到所设定的目标值。同时，新风系统还具有湿度调节设备，通过该设备可以精确控制室内的湿度，进一步提升了室内的空气质量和居住舒适度。新风控制系统采用置换通风的方式，确保室外经过处理后的新鲜空气经由新风口均匀送入室内，在这一过程中，送风系统与排风系统构成了一个完整的空气循环网络，经过处理后的新风，由风机带动，通过送风管道和送风口迅速进入室内，与此同时，室内污浊空气则通过室内设置的回风口集中进入回风管道，并在风机作用下迅速排出室外。此外，为了提高新风控制系统的运行效率，新风机均采用变频风机技术。变频风机能够根据实时空气质量及室内外环境条件进行动态调节，使得新风控制系统提升了运行效率并且降低了能源消耗，同时也确保了新风控制系统的运行稳定性从而满足人们对室内空气质量的高要求。

4.1.2 新风系统的控制

在现代控制领域中，可编程逻辑控制器（PLC）与单片机（MCU）是两种常见的自动化控制方案。传统单片机控制系统因其成本低廉、体积小巧而被广泛应用于简单的控制任务中，但在新风控制系统这一对环境适应性、实时性和稳定性要求较高的领域中，单片机系统的局限性逐渐显现。PLC 控制系统则具有工业级的可靠性和抗干扰能力，其采用模块化结构设计，使得系统集成、维护以及故障诊断方面有很大优势，因此，在新风系统的控制中，PLC 相较于单片机具有诸多显著优势，这些优势体现在系统的稳定性、扩展性、编程便捷性、抗干扰能力、实时性等多个方面，其优势如下：

（1）PLC 在稳定性方面表现更加优异。由于 PLC 广泛应用于工业控制领域，其硬件设计和软件架构满足工业要求，具备较高的可靠性和稳定性，而单片机通常应用于小型控制系统中，在复杂环境下可能因电磁干扰、温度变化等因素导致运行不稳定，而 PLC 系统能够通过隔离技术和抗干扰设计，有效降低信号噪声对控制精度的影响。PLC 还具有自诊断功能和故障报警机制，能够及时发现并处理系统异常，减少因控制系统故障导致的新风系统停机风险。

(2) 在系统扩展性方面, PLC 比单片机更具优势。PLC 系统采用模块化设计, 可以根据实际应用需求配置各类输入输出模块。相比之下, 单片机控制系统在硬件扩展上较为受限, 不易实现多设备协同工作。PLC 通常支持多种通信协议, 如 Modbus、Profibus 和 Ethernet/IP 等, 能够方便地与各种传感器和上位机等设备进行数据交互, 实现远程监控与集中管理, 而单片机在通信能力上较为受限, 通常需要额外的外围电路来实现类似的功能。新风控制系统通常需要实时采集多种数据, 通过 PLC 的高效数据处理能力, 新风系统可以精确调控室内空气质量和提高舒适度, 确保新风系统运行的高效性与稳定性。

(3) 在编程方面, PLC 有更好的优势, PLC 采用梯形图(Ladder Diagram)、功能块图(Function Block Diagram)、结构化文本(Structured Text)等多种编程语言, 便于开发和调试, 且具有较高的可读性和可维护性。相较之下, 单片机的编程通常采用 C 语言或汇编语言, 开发难度较大, 代码逻辑较为复杂, 维护成本较高。

(4) PLC 系统通常具有人机界面(HMI)和上位机监控软件, 便于进行参数设置、实时监测和故障诊断, 而单片机系统往往缺乏直观的可视化界面, 需要额外设计外部显示与交互模块。同时, PLC 的实时操作系统能够确保新风控制系统的温湿度调节、风量控制等功能能够高效、精准地运行, 而单片机的实时性依赖于程序的优化和外部时钟源的精度, 难以达到工业级要求。

PLC 控制是在传统顺序控制的根基上, 融合了通信技术、计算机技术, 以及自动控制等技术而形成的, 实现了对工业自动化过程更加灵活、高效且可靠的控制。PLC 基本构成图如图 4-2 所示:

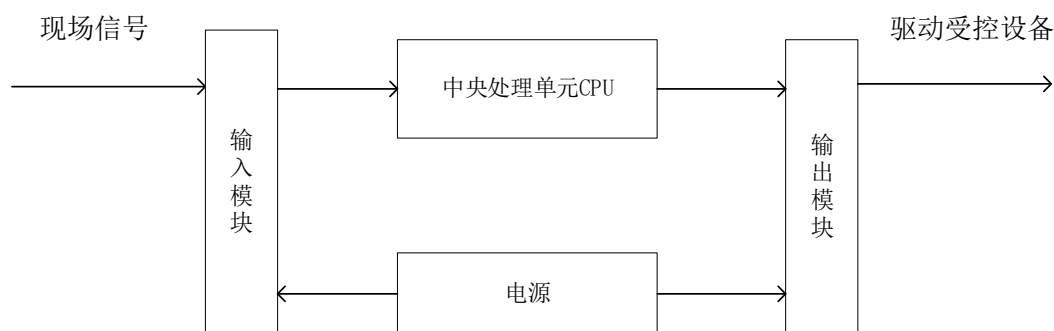


图 4-2 PLC 构成图

综上所述，在新风系统的控制中，PLC 相较于单片机在稳定性、扩展性、编程便捷性、抗干扰能力和实时性等方面均表现出明显的优势，这使得 PLC 成为新风系统的理想控制方案。

4.1.3 新风控制系统构建

新风控制系统是一个集成多种功能模块和关键设备的综合控制系统，该系统的硬件组成包括 PLC、触摸屏、温湿度传感器、TVOC 传感器、风机、加湿器、除湿器以及热交换器等多个核心设备，各设备协同运行以完成新风系统的控制目标。其中，西门子 S7-1200 系列的 PLC，具有高可靠性和较强的扩展性，主要承担室内环境数据采集与分析、信号处理及逻辑控制等功能。触摸屏作为新风控制系统的人机交互界面，具备实时数据显示的功能，可通过触摸屏直观地了解新风系统的运行状态，包括室内的温湿度和 TVOC 浓度以及各设备的工作状态。同时，还可以通过该触摸屏界面灵活调整设定值和控制策略，进一步提高新风系统的控制性能。通过软硬件的共同工作，提高了新风控制系统的运行效率，从而改善室内的空气质量。

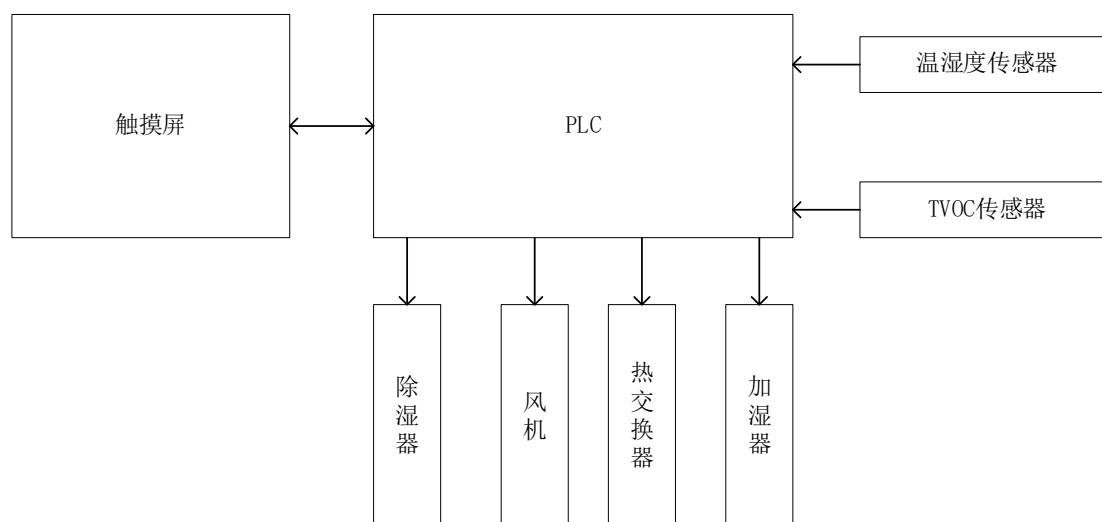


图 4-3 新风控制系统结构

新风控制系统以西门子 S7-1200 系列的 PLC 作为核心控制单元，其运行流程可分为多个阶段，以确保对室内环境参数的精确监控和动态调节。首先，新风控制系统通过温湿度传感器和 TVOC 浓度传感器对室内的环境参数进行实时采集，这些传感器输出的信号为标准化的 4~20mA 模拟量信号，采集到的模拟信号

- #### 4.1.4 电气原理图设计

EPLAN Electric P8 软件是由德国 EPLAN 公司开发的一款先进的电气设计与自动化工程工具。该软件广泛应用于电气控制系统的设计、项目管理及文档生成，具有高度的专业化与模块化特点。本实验使用的软件版本为 EPLAN Electric P8 2.9，新风系统的电气原理图如图 4-4 所示。

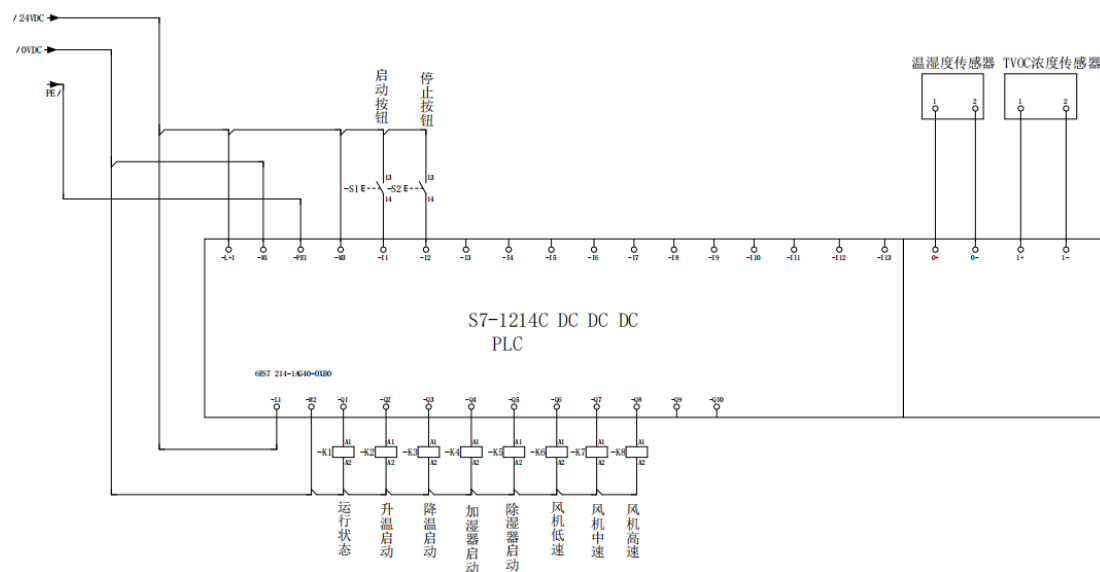


图 4-4 新风系统的电气原理图

4.2 硬件选型

4.2.1 S7-1200 系列 PLC

西门子 S7-1200 系列 PLC 具有高度集成化、灵活性和高性能的特点，该控制器采用紧凑型设计，支持多种通信协议，适用于广泛的工业控制场景，包括机械制造、自动化和过程控制等领域。从硬件架构来看，S7-1200 系列 PLC 由中央处理单元（CPU）、扩展模块和通信模块组成，其 CPU 模块集成了处理器、内存和 I/O 接口，支持数字量、模拟量及高速计数等多种输入输出功能。可以根据实际应用需求，通过添加信号模块、通信模块或功能模块来扩展其性能，实现灵活的系统配置。此外，S7-1200 系列 PLC 还支持 Profinet 工业以太网协议，能够与其他设备实现高速、稳定的数据通信。S7-1200 系列的 PLC 的核心优势在于其强大的计算能力和集成化设计，其 CPU 具备快速的逻辑运算处理能力，支持浮点运算，并内置了丰富的功能指令集，以满足复杂控制逻辑的编程需求。与 TIA Portal（博途）编程软件相结合，能够通过直观的图形化界面快速完成程序设计、调试与优化，显著提高开发效率^{[67][68]}。

4.2.2 温湿度传感器

温湿度传感器作为一种广泛应用于环境监测领域的关键设备，能够实现对室内环境温度和湿度的实时测量与显示，并通过 RS485 通信接口输出测量数据^[69]，其各项参数如表 4-1 所示。

表 4-1 温湿度传感器参数

供电电源	5-24V DC	
工作精度范围	湿度	±3%RH（25℃）
	温度	±0.5℃（25℃）
内部电路工作范围	-20℃~+60℃，0%RH~80%RH	
通讯协议	Modbus 协议 RS485 接口	
数据刷新率	1s	
开孔尺寸	60mm	

该温湿度传感器采用高灵敏度数字探头, 凭借其良好的信号稳定性和高精度测量能力, 在数据采集的准确性和可靠性方面表现出显著优势, 这种设计使得传感器能够在复杂的环境中保持稳定性能, 为室内环境监测的精确性提供了有力保障。此外, 该传感器具有多项显著优点, 包括宽广的测量范围和良好的线性度, 使其能够适应多种环境条件下的温湿度变化。同时, 其结构设计兼具使用方便和安装便捷的特点, 降低了操作复杂性。ModBus-RTU 通信协议的采用进一步延长了传输距离。此外, 该传感器配备了高清液晶屏幕, 可实时直观显示测量结果。通过高精度的数据监测与稳定的信号输出, 该温湿度传感器提升了环境参数监控的精确性。

4.2.3 TVOC 浓度传感器

TVOC 是指在室温条件下, 其饱和蒸气压超过 133.32 Pa, 沸点介于 50℃至 250℃之间的有机物。这类物质能够在常温下以蒸发的形式释放到空气中, 其各项参数如表 4-2 所示。

表 4-2 TVOC 传感器参数表

直流供电 (默认)	DC 10-30V
最大功耗	0.5W
工作环境	-40℃~+85℃, 0%RH~95%RH
TVOC 测量量程	0~60000ppb
TVOC 显示分辨率	1ppb
数据刷新时间	1s
TVOC 测量精度	典型精度: 8%FS(@C ₂ H ₆ O, 0.5ppm, 25℃, 50%RH)
输出信号	RS485(ModBus 协议)

为实现对室内 TVOC 浓度的精确测量和有效监控, 该传感器采用了高灵敏度气体检测探头作为核心感知单元, 结合成熟的检测技术和高性能信号采集电路, 确保信号的稳定性与测量数据的准确性。其测量范围广, 覆盖 0 至 60000 ppb, 能够满足多种复杂环境下的监测需求。同时, 该设备采用 RS485 通信接口, 并支持标准的 ModBus-RTU 通信协议, 具备改变通信地址和更改波特率的特点, 支持最长 2000 米的远距离通信, 为数据的远程传输与系统集成提供了极大的灵活性和便利性。该设备采用壁挂式防水外壳, 安装便捷, 且具有较高的防护等级,

能够在多种环境条件下稳定运行，尤其适合于潮湿或具有一定腐蚀性的场所。该传感器不仅在技术性能上表现优异，而且在安装与使用上更加便利。

4.3 Modbus 通讯协议

Modbus 协议由 Modicon 公司于 1979 年提出，用于可编程逻辑控制器(PLC)之间的数据通信。随着工业控制系统的发展，Modbus 已成为一种国际化的工业通讯标准，其设计目标为提供一种轻量、高效的通信方式，用于在控制设备和终端设备之间传输数据，因此 Modbus 是一种广泛应用于工业自动化领域的通讯协议，其因简单性、开放性和跨平台兼容性被广泛采用。

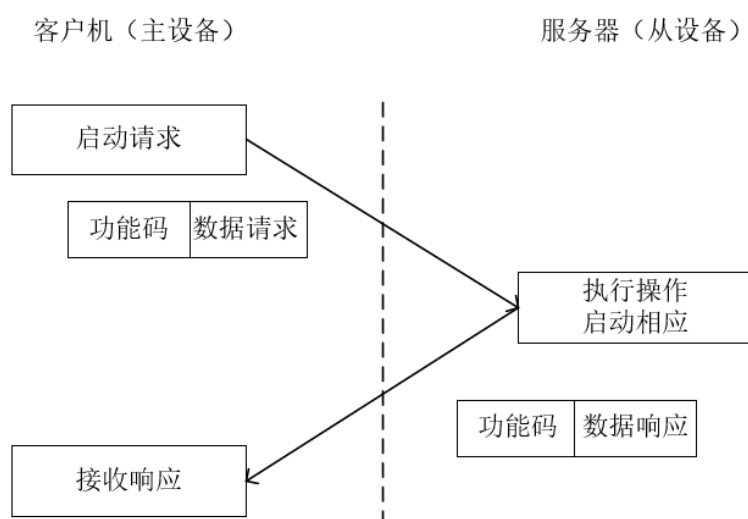


图 4-5 主机/从机事物处理过程

4.4 采集程序设计

由于温湿度传感器和 TVOC 传感器输出的是模拟量信号，需要进行模数转换，对温湿度和 TVOC 浓度传感器采集到的模拟量数据进行处理，是实现室内环境监测与控制系统精确运行的重要步骤。为了将传感器的模拟信号转换为可在新风控制系统中进一步处理的标准化数据，本文采用 PLC 内置的 NORM_X（标准化）和 SCALE_X（缩放）功能模块。

4.4.1 TVOC 采集程序

PLC 与 TVOC 传感器通信和读取室内的 TVOC 浓度程序如图 4-6 和图 4-7 所示：

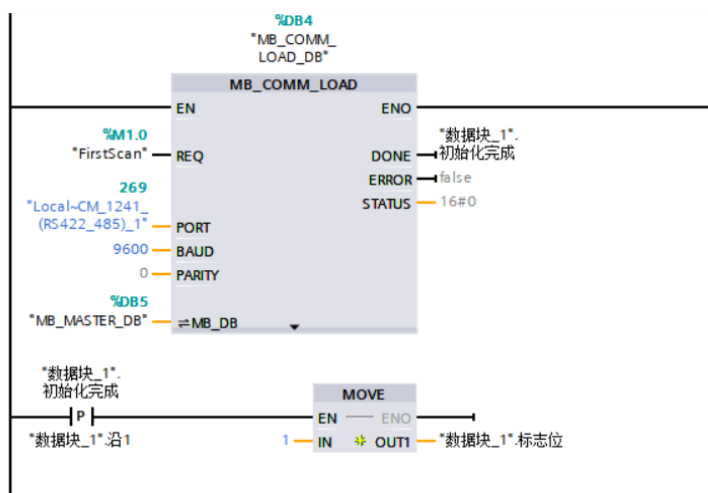


图 4-6 modbus 通讯初始化

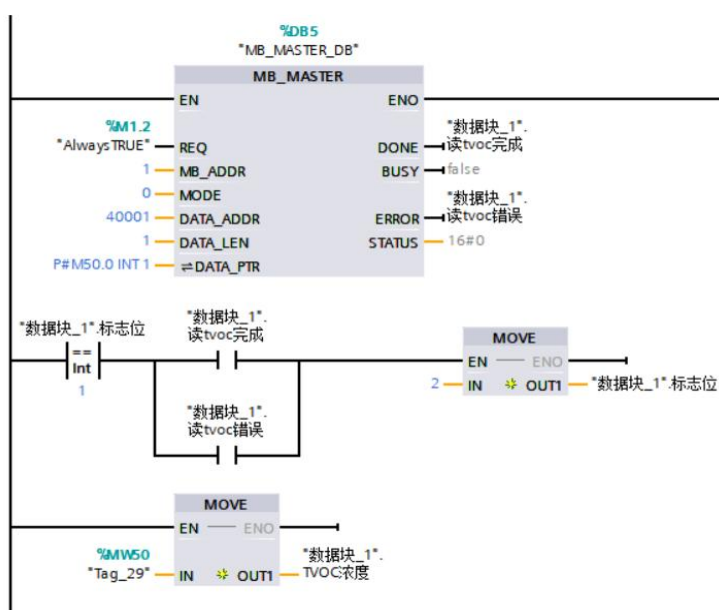


图 4-7 TVOC 浓度读取程序

4.4.2 温湿度采集程序

PLC 与温湿度传感器通信和读取室内的温度和湿度程序如图 4-8 和图 4-9 所示:

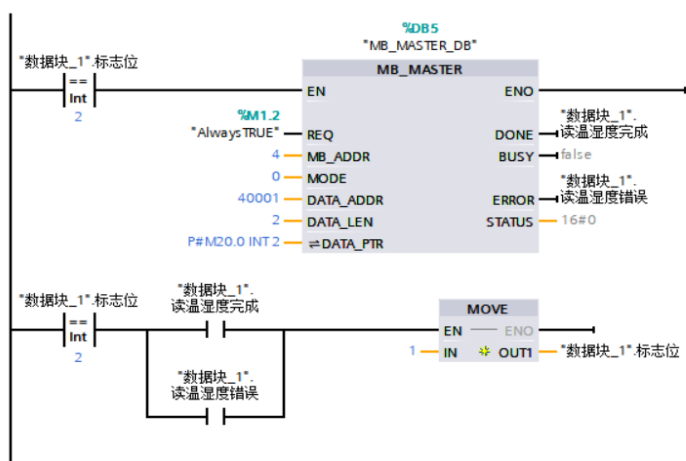
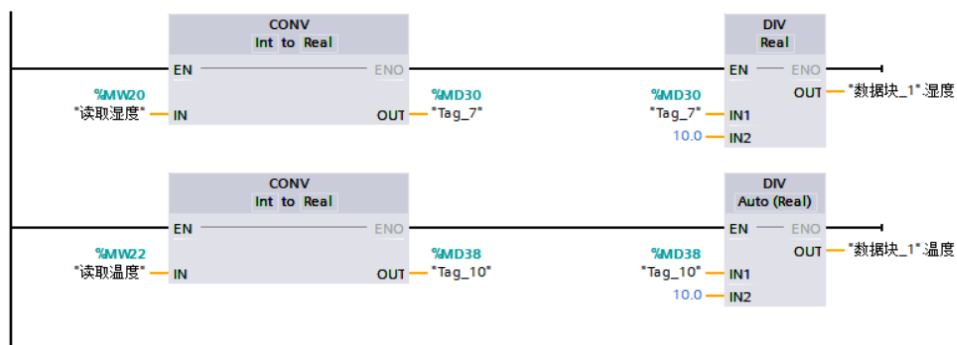


图 4-8 温湿度读取程序



4-9 温湿度转换程序



图 4-10 PLC 与电脑通信

4.5 系统组态界面设计

4.5.1 HMI 概述

PLC 是工业自动化领域中核心的控制设备，而人机界面（Human-Machine Interface, HMI）作为 PLC 与人们之间的重要交互桥梁，在提高生产效率、简化操作流程及优化控制系统方面发挥着关键作用。HMI 作为 PLC 系统的重要组成部分，通过提供直观的操作界面和高效的信息传递机制，实现了设备与人之间的有效沟通。

4.5.2 新风系统 HMI 界面

采用博途编程软件设计的新风控制系统的人机界面具有很好的直观性，能够实时呈现新风控制系统中各设备的运行状态和室内的温湿度以及 TVOC 浓度等参数。新风控制系统的 HMI 界面不仅使得设备状态的监控更加简便高效，还为新风控制系统运行控制策略的优化与分析提供了有力的支持。通过可视化界面，可以迅速获得系统的关键信息，从而能够及时做出精准的调整和优化决策。

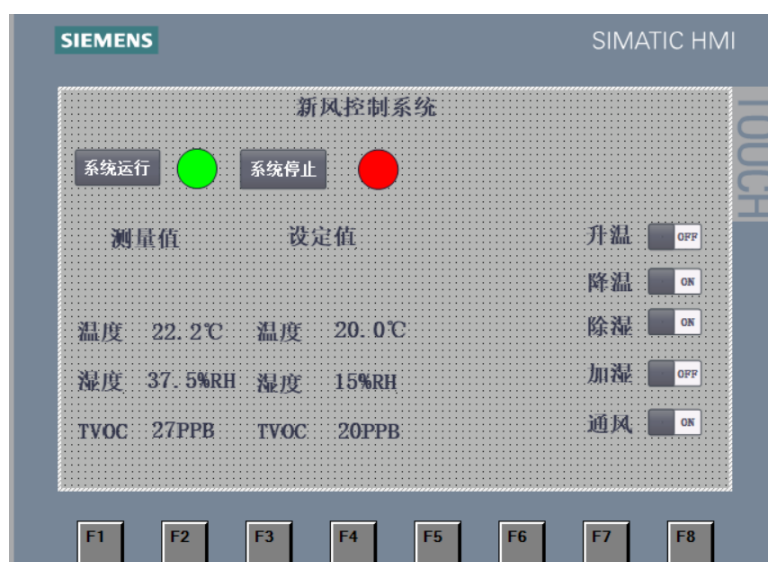


图 4-11 新风控制系统 HMI 界面

4.6 本章小结

本章设计了新风控制系统，通过温湿度传感器和 TVOC 浓度传感器

可以实时读取室内的环境参数数据并通过 Modbus 协议将这些数据发送给西门子 PLC，还设计了新风控制系统的 HMI 界面，通过该界面可以实时了解新风系统的运行状态和室内环境的空气质量，从而提高新风控制系统的运行效率。

第 5 章 结论与展望

5.1 本文工作总结

由于室内的温度、湿度和 TVOC 浓度三者之间存在一定的耦合效应，导致新风控制系统难以高效、精确地调节各项参数，本文针对这一问题提出了 ICPO-PIDNN 解耦控制方法。该方法能够有效克服不同控制变量之间的相互干扰，实现对室内温度、湿度和 TVOC 浓度的解耦控制。通过 ICPO-PIDNN 解耦算法，本文在增强控制精度的同时，也提高了新风系统的整体运行效率。本文的主要研究内容包括以下几个方面：

（1）通过对当前室内的温湿度和 TVOC 浓度解耦及多变量解耦领域的研究现状进行系统分析，本文确定了 PID 神经网络算法对室内温度、湿度与 TVOC 浓度三者之间的耦合模型进行解耦控制。为了进一步提升 PID 神经网络算法的解耦效果，本文通过引入动量项和变学习速率的方法改进 PID 神经网络。

（2）针对 PID 神经网络在优化过程中容易陷入局部最优解及收敛速度较慢等问题，本文提出了一种改进的冠豪猪算法来优化改进后的 PID 神经网络的初始权值。通过增加惯性权重、levy 飞行策略以及螺旋更新策略，对冠豪猪算法进行了改进以提升算法的全局搜索能力和收敛速度。为验证改进算法的有效性，本文将 ICPO 与其他几种常用优化算法，如灰狼优化算法（GWO）、麻群搜索算法（SSA）以及粒子群优化算法（PSO）进行了对比实验。通过测试函数的实验结果表明，ICPO 在收敛性和收敛速度上均表现出明显的优势，ICPO 能够有效避免陷入局部最优解，并且在较短的迭代次数内寻到全局最优解。

（3）通过采用 ICPO-PIDNN 算法对温度、湿度和 TVOC 浓度的耦合模型进行解耦控制，本文在 MATLAB 软件环境中开展了相关仿真实验。仿真结果表明，ICPO-PIDNN 算法在解耦控制过程中能够显著提升温度、湿度与 TVOC 浓度的控制效果，尤其在系统响应速度和稳定性方面表现优异。与改进后的 PIDNN 控制算法相比，ICPO-PIDNN 算法能够在最短的时间内迅速达到控制要求，具有更好的解耦性能。

(4) 本文设计了基于 PLC 的新风系统控制界面。该界面通过与 PLC 的通信接口能够实时采集并显示室内的温度、湿度及 TVOC 浓度等关键参数。通过该界面的数据交互,能够实时监控新风系统的运行状态。此外,还可以通过该界面灵活调整系统设置,进行温度、湿度和 TVOC 浓度的目标值设定,所设计的新风系统控制界面不仅提升了系统的可操作性和监控效率,而且进一步增强了新风系统的稳定性与可靠性。

5.2 展望

本文研究新风系统中的温度、湿度和 TVOC 浓度耦合问题,个人水平有限以下方面还需完善:

(1) 本文采用 ICPO-PIDNN 算法对室内的温度、湿度与 TVOC 浓度进行解耦控制,该算法表现出了较为显著的优势,能够有效地克服各控制变量之间的耦合效应。本文未对 ICPO 算法与其他智能优化算法的结合进行深入研究。不同的算法在不同控制问题中的表现各有优劣,相互融合可以充分发挥各自的长处,从而更好地解决多变量耦合控制问题。

(2) 在实际室内环境中,多种因素会和室内空气的温湿度具有强耦合作用,本文只考虑到 TVOC 浓度,还应该考虑到 CO_2 、CO、甲醛等对室内的空气产生的耦合现象。

参考文献

- [1] Wang L L, Zhang T, Ding N X. Modeling and optimized control algorithm for a solar fresh air heating system[C]//Proceedings of the 27th Chinese Control and Decision Conference(CCDC). Qingdao, China, 2015: 5096-5100.
- [2] Wang X J, Zhang Z H, Pan Z X. The design scheme analysis of energy efficiency fresh air system for residential building[C]//Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology. Harbin, China, 2011: 3723-3726.
- [3] Wang G, Zheng X F, Hu S T. Study on Effect of Fresh Air Mode on Indoor Pollutant Dispersion[C]//2009 International Conference on Energy and Environment Technology. Guilin, China, 2009: 115 - 118.
- [4] Cui Y Y, Xie X Y, Wang M, etc. Design of a control system for a fresh air conditioner[C]//The 27th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Qingdao, China, 2015: 5670-5675.
- [5] He D S, Fan X W, Chai D S. On-line control strategy of fresh air to meet the requirement of IAQ in office buildings[C]//Proceedings of the 2010 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Taichung, Taiwan, 2010: 845-848.
- [6] Li P, Yang J, Zhou X G, etc. Fuzzy-control design and realization of fresh air conditioning system[C]//Proceedings of the 2010 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE). Chengdu, China, 2010: V4-535-V4-538.
- [7] Maduri P K, Nigam R, Sharma P. Centralized air purification system using AI[C]//Proceedings of the 2021 3rd International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICAC3N). Greater Noida, India, 2021: 884-888.
- [8] Souifi H, Bouslimani Y, Ghribi M. IoT-based platform for an air-to-air heat exchanger evaluation[C]//Proceedings of the 2021 IEEE 3rd Eurasia Conference on

IOT, Communication and Engineering (ECICE). Yunlin, Taiwan, 2021: 157-162.

[9] Mammadov N, Feyziyeva G, Akbarova S, etc. Analysis of the comfort of modern buildings considering energy conservation[C]//Proceedings of the 2024 11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE). Marmaris, Turkiye, 2024: 205-208.

[10] Altayeva A, Omarov B, Cho Y I. Towards Smart City Platform Intelligence: PI Decoupling Math Model for Temperature and Humidity Control[C]//2018 IEEE International Conference on Big Data and Smart Computing (BigComp). Shanghai, China, 2018: 693-696.

[11] Rentel-Gomez C, Velez-Reyes M. Decoupled control of temperature and relative humidity using a variable-air-volume HVAC system and non-interacting control[C]//Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Control Applications (CCA'01). Mexico City, Mexico, 2001: 1147-1151.

[12] Gurban E H, Andreescu G D. Comparison study of PID controller tuning for greenhouse climate with feedback-feedforward linearization and decoupling[C]//2012 16th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC). Sinaia, Romania, 2012: 1-6.

[13] Semsar E, Yazdanpanah M J, Lucas C. Nonlinear control and disturbance decoupling of an HVAC system via feedback linearization and back-stepping[C]//Proceedings of 2003 IEEE Conference on Control Applications. Istanbul, Turkey, 2003, 1: 646-650.

[14] Sharma A, Gudi R, Samavedham L. An energy efficient approach to thermal comfort control in a VAV HVAC system[C]//2022 IEEE International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes (AdCONIP). Vancouver, BC, Canada, 2022: 114-119.

[15] Gouadria F, Sbita L, Sigrimis N. A greenhouse system control based on a PSO tuned PI regulator[C]//2017 International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS). Hammamet, Tunisia, 2017: 1-5.

[16] Arvanitis K, Pasgianos G, Daskalov P, etc. A nonlinear PI controller for climate control of animal buildings[C]//2007 European Control Conference (ECC).

Kos, Greece, 2007: 5851-5857.

[17] Woldeamanuel L H, Ramaveerapathiran A. Design of multivariable PID control scheme for humidity and temperature control of neonatal incubator[J]. IEEE Access, 2024, 12: 6051-6062.

[18] Zermani M A, Feki E, Mami A. Multivariable control applied to temperature and humidity case study: Neonate incubator[C]//2012 20th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED). Barcelona, Spain, 2012: 1440-1445.

[19] Zhao X, Tang J, Chen D X. Research of temperature and humidity decoupling control for central air-conditioning system[C]//2009 International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics. Hangzhou, China, 2009: 404-408.

[20] Yin H, Hu W, Jiang J W. Research on temperature and humidity decoupling control of process air conditioning in cigarette factory[C]//2022 IEEE 6th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). Chongqing, China, 2022: 1062-1066.

[21] Wei L, Li F G, Luo L, etc. The design of temperature and humidity control system for incubation based on data fusion and fuzzy decoupling[C]//2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). Beijing, China, 2015: 386-391.

[22] Li R, Kong Q F, Ma J, etc. Decoupling control method of temperature and humidity in long storage environment based on particle swarm optimization PID algorithm[C]//2023 International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA). Dalian, China, 2023: 902-907.

[23] Li M M, Wei J, Shen T. Temperature and humidity decoupling control for enthalpy difference laboratory[C]//2018 Chinese Automation Congress (CAC). Xi'an, China, 2018: 1174-1178.

[24] Liu Z Z, Cen H L, Cai Q, etc. Design of a fuzzy decoupling control system for indoor environments[C]//2023 24th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT). Shihezi City, China, 2023: 1-5.

[25] Zeng X C, Yu C X. Multivariable IMC-PID within air-conditioned room

temperature and relative humidity control system[C]//Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference. Nanjing, China, 2014: 3609-3613.

[26] Cui S G, Chen M, Zhang Y, etc. Study on decoupling control system of temperature and humidity in intelligent plant factory[C]//2020 IEEE 9th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC). Chongqing, China, 2020: 2160-2163.

[27] Zhang W, Ma H, Yang X M, etc. Decoupling control and energy efficient system for meat drying processing based on fuzzy-PID approaches[C]//2015 IEEE 7th International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM). Siem Reap, Cambodia, 2015: 75-80.

[28] Liu J Y, Guo X K, Liu Y, etc. Study on temperature and humidity coupling control of plant factory based on ANFIS[C]//2022 IEEE 24th International Conference on High Performance Computing & Communications; 8th International Conference on Data Science & Systems; 20th International Conference on Smart City; 8th International Conference on Dependability in Sensor, Cloud & Big Data Systems & Application (HPCC/DSS/SmartCity/DependSys). Hainan, China, 2022: 1869-1874.

[29] Gao H X, Wei J. Design and simulation of fresh air conditioning control system based on feedforward compensation decoupling[C]//2020 39th Chinese Control Conference (CCC). Shenyang, China, 2020: 6077-6081.

[30] Gao Y X, Song X L, Liu C Y, etc. Feedback feed-forward linearization and decoupling for greenhouse environment control[C]//2014 International Conference on Mechatronics and Control (ICMC). Jinzhou, China, 2014: 179-183.

[31] Tu J, Liu B, Wang H J. The multiple parameters double fuzzy decoupling PID algorithm for pig breeding system[C]//2019 6th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI). Shanghai, China, 2019: 649-654.

[32] Ji X Y, Li J J, Gao T H. Research on wavelet neural network decoupling control of variable-air-volume air-conditioning system[C]//2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC). Shenyang, China, 2018: 1848-1853.

[33] Dasgupta S, Sadhu S. Decoupling controller design for a multivariable time

delay system[C]//2020 IEEE 1st International Conference for Convergence in Engineering (ICCE). Kolkata, India, 2020: 189-194.

[34] Hernandez Perez M A, del Muro Cuellar B, Casas Gonzales R. Disturbance decoupling for multivariable linear systems by static output feedback[C]//2011 8th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control. Merida City, Mexico, 2011: 1-6.

[35] Ulemj D, Fu C, Tan W. Multivariable decoupling control for a benchmark boiler[C]//The 26th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Changsha, China, 2014: 1233-1237.

[36] Fu Y, Du Q, Zhou X J, etc. Dual-rate adaptive decoupling controller and its application to a dual-tank water system[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2020, 28(6): 2515-2522.

[37] Villafañe A, Ángel L. Design of a multivariable decoupling control system with IMC/PID controller[C]//2021 IEEE 5th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC). Ibagué, Colombia, 2021: 244-249.

[38] Khandelwal S, Aldhandi S, Detroja K P. Decoupling control with ETF based GPM tuning for multivariable processes[C]//2019 Fifth Indian Control Conference (ICC). New Delhi, India, 2019: 63-67.

[39] Liang M H, Du S F, Chen Li J, etc. Greenhouse multi-variables control by using feedback linearization decoupling method[C]//2017 Chinese Automation Congress (CAC). Jinan, China, 2017: 604-608.

[40] Li P W, Xu Y, Shardt Y A W. Simultaneous robust, decoupled output feedback control for multivariate industrial systems[J]. IEEE Access, 2018, 6: 6777-6782.

[41] Zhang Z H, Jiu X D, Yang G H. Input-output energy decoupling for 3DOF helicopter system by using generalized KYP synthesis[C]//2013 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Guiyang, China, 2013: 5103-5108.

[42] Qian K, Pang X P, Xie S S, etc. Aeroengine PID multi-variable decoupling control system based on dynamic NNI[C]//2007 IEEE International Conference on Control and Automation. Guangzhou, China, 2007: 2685-2689.

[43] Hao L J, Wang Z H, Xue Z T, etc. The study of BP neural network decoupling control in sulfur dioxide converter[C]//2009 International Conference on Mechatronics and Automation. Changchun, China, 2009: 3102-3106.

[44] Wen D D . Decoupling control of electric heating furnace temperature based on DRNN neural network[C]//2010 2nd International Conference on Electronic Computer Technology. Kuala Lumpur, Malaysia, 2010: 261-264.

[45] Shao K Y, Wang S Y, Wang X G. Multivariate decoupling control based on neural network[C]//2012 Second International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application. Sanya, China, 2012: 388-391.

[46] Ding J, Wu M, Ma Z B. Improved beetle swarm optimization algorithm based PID neural network for decoupling control[C]//2022 34th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Hefei, China, 2022: 5299-5304..

[47] Tsai C C, Lu C H . Adaptive decoupling predictive temperature control for an extrusion barrel in a plastic injection molding process[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001, 48(5): 968-975.

[48] 任玉成.中央新风系统自动控制研究[D].华北电力大学,2016.

[49] 汪圣祥.基于 BP 神经网络的 PID 研究和改进[D].广东工业大学,2017.

[50] 郑安平.基于 PID 神经网络的三自由度飞行器模型控制研究[D].南京理工大学,2008.

[51] 周晶,宋辉,张翼飞.基于 PID 神经元网络的水面舰艇减摇方法[J].计算机与数字工程,2011,39(08):18-20+68.

[52] 马翔宇,罗天洪,周小勇,等.重载精密机械手末端误差的多目标优化[J].机械科学与技术,2018,37(05):715-720.

[53] 张彦清.基于反馈神经网络的 CO₂ 压缩机动态模型研究[D].宁夏大学,2016.

[54] 吴敏.基于智能 PID 神经网络的多变量系统解耦控制研究[D].南京邮电大学,2023.

[55] 王九洲.多变量系统 PID 智能控制算法及其泛化能力的研究[D].沈阳工业大学,2021.

- [56] 杨远星.基于神经网络的压缩式制冷系统 TITO 自适应控制策略[D].山东建筑大学,2024.
- [57] 张梦茹.BP 神经网络在换热站自动控制系统中的应用研究[D].河北建筑工程学院,2023.
- [58] 俞凯耀, 席东民. 人工鱼群算法优化的 PID 神经网络解耦控制[J]. 计算机仿真, 2014, 31(10):350-353.
- [59] Abdel-Basset M, Mohamed R, Abouhawwash M. Crested porcupine optimizer: a new nature-inspired metaheuristic[J]. Knowledge-Based Systems, 2024, 284: 111257.
- [60] 任孝通.基于 Swin Transformer 的异步电机故障诊断研究[D].武汉科技大学,2024.
- [61] 蒋兴涛.机载分布式雷达杂波抑制与运动目标积累检测方法[D].电子科技大学,2024.
- [62] 彭猛.基于数字孪生的掘进机截割头故障诊断[D].安徽理工大学,2024.
- [63] 董学琴,罗奕,文渊,等.基于改进冠豪猪算法的主动配电网故障定位[J].桂林电子科技大学学报,2025:1-10.
- [64] 张家琛,邱楠,刘浩.基于混沌自适应冠豪猪优化算法的永磁同步电机 PI 控制[J].微纳电子与智能制造,2024,6(02):57-61.
- [65] Mirjalili S, Lewis A. The whale optimization algorithm[J]. Advances in Engineering Software, 2016, 95: 51-67.
- [66] 杨可.除湿热泵的 PLC 控制系统设计[D].青岛大学,2016.
- [67] 张佑俊.VOCs 末端治理在线监测与控制系统集成[D].合肥工业大学,2019.
- [68] 兰永平.基于 S7-1500PLC 的矿井提升机控制系统的优化设计[D].北方民族大学,2024.
- [69] 康承祥.海带多能干燥控制系统优化研究[D].大连海洋大学,2024.

攻读学位期间发表的学术论文目录

- [1] Chen D D, Sun R X, Chen L, etc. Research on Fresh Air System Based on Improved Sparrow Search Algorithm Optimized Fuzzy PID Control[C]//2024 36th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Xi'an, China, 2024: 5455-5459.

致谢

时光飞逝，转眼间研究生的生涯即将结束。在这段充实的历程中，我经历了无数的挑战与磨砺，感受到了成长的酸甜苦辣。从初入研究生阶段的迷茫与不安，到逐渐成熟并完成学业的那一刻，我深深体会到每一次坚持与突破所带来的成就感与满足感。通过这三年的学习和研究给我留下了宝贵的经验，让我收获了人生中许多重要的财富。

首先，我要感谢我的导师，她以渊博的知识、严谨的教学态度和悉心的指导，使我在研究过程中不断拓宽视野、提高学习能力。导师在学术上的精益求精和对我个人成长的关怀，使我受益匪浅。

其次，我要感谢我的家人，感谢他们在我的研究生期间给予的无私支持与鼓舞，家人的理解与支持是我前行的最大动力。无论我遇到怎样的困难，你们始终在我身后默默鼓励，给予我无尽的关怀与力量。正是你们的支持，使我能够全身心地投入到学术研究中。

同时，我也要感谢实验室的各位同学和朋友，在研究过程中，大家相互交流、共同探讨，提供了很多宝贵的意见和建议，你们的帮助使我的研究工作更加顺利，也让我在学术道路上感受到温暖和力量。

最后，感谢所有在论文写作过程给予我帮助的老师 and 同学，无论是知识上的启迪，还是生活中的关心，都是我完成这篇论文的重要动力，衷心感谢所有给予我帮助的人，硕士阶段的学习不仅让我在专业知识上有所收获，更让我学会了坚持、合作与感恩。