

分类号: TP273

密 级: 公开

UDC:           

单位代码: 10142

沈阳工业大学  
硕士学位论文

基于人工鱼群优化算法中央空调制冷系统优化研究



学 号: 2011446

作 者: 王亮

学 科 名 称: 系统工程

2014年5月29日

## 独创性说明

本人郑重声明：所提交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得沈阳工业大学或其他教育机构的学位或证书所使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

签名： 王亮 日期： 2014.5.29

## 关于学位论文使用授权的说明

本学位论文作者和指导教师完全了解沈阳工业大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权沈阳工业大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。

(保密的论文在解密后应遵循此规定)

签名： 王亮 导师签名： 李彬 日期： 2014.5.29



## 摘要

近年来，随着中国对节能减排的重视，提高能源利用率，成为人们的共识，建筑能耗成为我国主要能源消耗领域之一，而中央空调是建筑能耗的最主要环节，减少中央空调系统的能耗，提高空调系统的能效比，成为一个关键性的课题。

首先，综述了中央空调系统节能技术的发展和研究现状。分析了中央空调系统制冷系统的结构与工艺原理，它是在蒸发器内被气化的制冷剂流经制冷机组的压缩机时被压缩成高压高温的气体，当高温高压的制冷剂流经冷凝器时候被来自冷却塔的冷却水冷却成低温高压的气体，低温高压的制冷剂通过膨胀阀后重新变成了低温低压的液体，而后再在蒸发器内气化，完成一次能量循环。将能量守恒定律和热传导作为依据，针对中央空调制冷系统各环节的能耗特点的主要工艺流程，分析制冷设备的特点，运用最小二乘法建立了关于制冷系统中能耗设备（制冷机、冷却水泵和冷却塔风扇）的静态模型。对中央空调制冷系统的非线性、对变量系统特性，确定了制冷系统的优化目标和约束条件。其次，分析了多目标多约束条件的智能优化算法--遗传算法、粒子群算法、蚁群算法和基本种群算法特点，针对常用的智能优化算法缺点和中央空调制冷系统的运行特点，提出了改进鱼群算法，利用改进的人工鱼群优化算法求解中央空调制冷系统的最小功率。

通过改变算法中的人工鱼群的视野与步长的大小，提出了视步系数，克服了基本人工鱼群优化算法的收敛速度慢，收敛精度低，出现局部最优，提高了优化算法的搜索速度和精度，为中央空调制冷系统的节能优化提供了一种新的有效方法。

最后，通过 MATLAB 仿真程序，对中央空调制冷系在不同外界环境条件下，分别用基本和改进后的人工鱼群优化算法进行了仿真实验，从仿真图可知改进后的人工鱼群优化算法明显提高了收敛速度，同时也提高了收敛精度。

**关键词：**中央空调，制冷系统，改进人工鱼群优化算法，节能优化

the condenser, cooling water from the cooling tower cooling into a high-pressure gas at low temperature, low temperature and high pressure refrigerant after expansion valve back into the liquid, then within the evaporator gasification, complete an energy cycle. In this paper, the law of energy conservation and heat transfer as a basis, in view of the energy consumption of central air conditioning refrigeration system, each work link features of main technological process, establish the corresponding mathematical model, using the least square method is established on the refrigeration system in energy consumption (chillers, cooling water pumps and cooling tower fan) as the static model. Then according to the practical running characteristics of central air-conditioning refrigeration system, this paper puts forward the optimization objectives and constraint conditions of cooling system. For central air-conditioning refrigeration system of nonlinear, big lag, disturbance of the system characteristics, this paper proposes an improved artificial fish optimization algorithm for the optimization. By using the improved artificial fish optimization algorithm to solve the minimum power of the central air conditioning refrigeration system.

In this thesis, by changing the algorithm of artificial fish in vision and step size, proposes the apparent step coefficient, overcome the basic easy low convergence precision of artificial fish optimization algorithm, a local optimum, and the number of iterations too

much phenomenon, improve the search speed and precision of the optimization algorithm, for the central air conditioning energy saving optimization of cooling system provides a new effective method.

Finally, based on the MATLAB simulation program, toward the central air-conditioning refrigeration system under different external environment with basic and improved artificial fish optimization algorithm to optimize the simulation, the simulation diagram shows the improved artificial fish algorithm significantly improves the convergence speed, convergence accuracy are improved.

**Key Words:** Central Air-conditioning, Refrigeration System, Improved Artificial Fish Optimization Algorithm, Energy Saving

获取更多资料

微信搜索 蓝领星球

## 目录

摘要	I
Abstract	II
第 1 章 绪论	1
1.1 课题的研究背景及意义	1
1.2 中央空调制冷系统优化研究现状	1
1.3 课题的主要研究内容	4
第 2 章 中央空调制冷系统原理与数学模型	5
2.1 中央空调制冷系统的构成	5
2.2 制冷机多项式模型	6
2.2.1 最小二程法	6
2.2.2 多项式能耗模型	6
2.3 冷却塔数学模型	7
2.3.1 冷却塔数学模型的建立	7
2.3.2 冷却塔数学模型参数的确定	8
2.4 冷却水泵及风扇的数学模型	8
2.5 本章小结	9
第 3 章 智能优化算法分析	10
3.1 智能优化算法	10
3.2 遗传算法	11
3.3 粒子群算法	15
3.4 蚁群算法	19
3.5 本章小结	21
第 4 章 基于人工鱼群算法中央空调制冷系统优化	22
4.1 基本人工鱼群算法	22
4.1.1 人工鱼的结构模型	22
4.1.2 人工鱼的视野与步长	22
4.1.3 人工鱼的基本行为	23

4.1.4 人工鱼群算法的收敛基础.....	24
4.1.5 人工鱼群算法特点.....	25
4.2 基于改进人工鱼群算法优化中央空调制冷系统.....	26
4.2.1 人工鱼群算法特点.....	27
4.2.2 自适应视野和步长的实现.....	27
4.2.3 基于平均距离视觉的自适应人工鱼群算法 (AAFSA).....	28
4.2.4 参数对优化的影响.....	29
4.3 求解制冷系统的优化变量.....	30
4.3.1 空调制冷系统模型.....	30
4.3.2 求解优化变量.....	31
4.4 本章小结.....	32
第5章 制冷系统仿真结果与分析.....	33
5.1 实验环境.....	33
5.2 基本鱼群算法与改进鱼群算法的比较.....	36
5.3 改进鱼群算法与改进粒子群算法的比较.....	40
5.4 本章小结.....	41
第6章 结论.....	42
参考文献.....	43
在学研究成果.....	46
致谢.....	47



## 第 1 章 绪论

### 1.1 课题研究的背景及意义

2013 年 1 月 1 日，国务院正式印发能源发展“十二五”规划，纲要明确指出坚持节约优先，实施能源消费强度和消费总量双控制，努力构建节能型生产消费体系，促进经济发展方式和生活消费模式转变，加快构建节能型国家和节约型社会，单位国内生产总值能耗比 2010 年下降 16%，能源综合效率提高到 38%，推进能源高效利用率<sup>[1]</sup>。

其中，建筑消耗占社会消耗的 33%—55%，我国的建筑能耗至今，占社会总消耗的 38%左右，其中中央空调系统能耗占建筑能耗一半以上，中央空调制冷系统的能耗约占空调系统总能耗的一半，所以中央空调制冷系统的能耗约占建筑能耗的 30%，因此中央空调制冷系统的优化研究是中央空调系统优化研究的主要方面，而且目前社会上的空调制冷系统大部分的工作状态时间都低于额定容量的工作状态下运行，因此会造成空调制冷系统中的压缩机工作在低冷量转化率工作状态下，这时的热效率远低于额定负荷下的运行效率，因此会浪费很多能量<sup>[2]</sup>。据实际案例调查研究发现，中央空调系统运行负荷在 40%—60%之间并且运行效率低，制冷效率下降，能耗浪费较大，其中具体表现为系统在大质量流量小温度差的条件下运行，过渡季节新风利用差，从而能源浪费<sup>[3]</sup>。据统计发现 12 幢大楼中，仅 2 幢运行状态良好，能耗浪费较低。现在能源紧张，空调耗能在社会总能耗中比重大，从而研究中央空调制冷系统的优化技术，使制冷系统在各种负荷下，环境条件下，都可以以最低能耗运行，并且达到最好的控制效果。

### 1.2 中央空调制冷系统优化控制研究现状

国内外的一些专家们在中央空调的优化、控制和管理这三个实现运行节能的最主要因素的节能方法上进行了许多比较深入的研究。经过科研工作者的努力，在国内外中央空调系统优化、控制和能量管理技术等方面得到了飞速的发展。

传统对空调制冷系统中的制冷机采用的是固定速度压缩机起停的控制方法，并且结合电子膨胀阀对变化的外界环境因素下的过热度控制来实现的<sup>[4]</sup>，虽然这种方法简

便方便,但是存在着弊端,会使空调制冷系统中的冷却水和冷冻水供水温度上下浮动大,控制效果差,能耗消耗较大。

近年来,中央空调系统的优化控制问题受到了广泛的关注。ItoYasuyuk<sup>[1]</sup>等人设计出了新的空调系统,运用空气处理和可变线圈来控制空调的送风量和冷却水温度。根据变化的外界条件环境因素来控制空调制冷系统中的送风量,根据空调制冷系统的冷负荷需求来控制系统中冷却水供水温度和冷却水的质量流量,实现能耗的降低能源的节约。Komareji Mohanunadi<sup>[2]</sup>等人提出了空调系统新模型,模型有两个热交换器,实验显示,新的控制器和控制方法具有节能效果。Komareji Mohammad<sup>[3]</sup>提出了空调最优设定点算法,从而实现空调系统的节能效果。Hong li Lv<sup>[4]</sup>等人把非线性控制器施加在空调系统中,用来控制温度。试验显示,此控制器的控制效果理想,与常规控制器比较,具有控制算法简单,收敛速度快等优点。

曾昭向<sup>[5]</sup>等人对制冷机控制,采用 ABBAC700DCS 作为控制平台,实现对制冷系统控制,通过空调系统实验平台,实现联机,以显示空调水系统的工况,对各设备远程控制,控制准确、自动化程度高。因为中央空调制冷系统是一个多变量,非线性等特点,并且对精度极速度要求较高,采用 DCS 对中央空调系统进行控制,提高控制效果,完成空调系统的控制及良好的稳定性<sup>[6]</sup>。吴俊峰<sup>[7]</sup>等人通过对中央空调系统能耗的研究分析并在对实际中的空调系统节能改造工程中的经验总结和归纳出针对近几年空调系统的能耗改造的方法,以某学院空调实验室为平台,针对空调系统提出了控制系统以达到节能的效果,提出了节能设计思路与创新方法。采用组态软件,设置人机监控界面,对人机界面进行组态分析与控制。

邓寿禄<sup>[8]</sup>等人对中央空调风系统的能耗进行了分析,提出了模糊控制器的设计方法,中央空调风系统的能耗模型,解决了中央空调风系统大时滞、参数不确定的惯性,弥补了常规 PID 控制方法控制效果不佳的问题。根据中央空调风系统的能耗具体案例分析,基于系统的供冷周期长、冷量传递困难的特性,给出了降低中央空调风系统的能耗的途径,使冷量传递更加效率降低能耗的损失和浪费,分析空调实际冷负荷随外界因素的变化规律<sup>[9]</sup>,建立了区域供冷系统冷量输送动态过程中冷量输送与冷量波动方程、区域供冷系统冷负荷增量模型,为实现系统的节能优化运行提供依据。于秋红<sup>[10]</sup>等人将模糊控制和 PID 算法相结合,在空调控制系统中,运用了参数自整定,提高温度调节及系统可靠性,稳态误差小。

法、人工鱼群算法等群智能优化算法，针对中央空调系统的多变量，非线性，并且对精度极速度要求较高等特点，对中央空调系统进行优化成为研究的热点。李月海<sup>[27]</sup>基于节能减排的目的，分析了中央空调水系统的研究现状，阐述了中央空调水系统的结构与工作原理，提出了一种优化控制方法，建立了空调水系统优化控制的框架。采用 PLC 与变频器相结合的方法对中央空调水系统进行优化控制，进行了参数设置，进行了节能分析，有很好的实用价值。文献[18]以某实际空调项目的空调水系统为研究对象，通过该空调水系统的历史数据，建立了其自适应优化数学模型，并对该模型在几种外界工况环境下工作的数据进行了分析，并且分别对粒子群优化算法和蚁群优化算法基于该两种全局优化算法进行研究。陈文勇<sup>[29]</sup>等人将遗传算法用于蒸发器过热度控制，比较遗传算法模糊控制与 PI 控制差别。朱瑞琪<sup>[20-21]</sup>等人通过对空调系统仿真，优化了遗传算法对蒸发器控制的隶属度函数，提出三角形隶属度函数的解决方案。陈姝姝<sup>[22]</sup>等人采用遗传算法与复合型法结合对空调系统优化。采用进化规划和遗传算法能够较好的处理空调系统的优化问题，但是也存在缺陷，进化规划中变异算子的确定困难。Zaheer-Uddin<sup>[31]</sup>和 Patel 以及 MacArthur 和 Woessner<sup>[24]</sup>对空调制冷系统原理的介绍，提出与空调制冷系统传统的优化效果相比，优化控制方法加快了空调制冷系统的反应和减少空调系统的能耗。Houseetal<sup>[25]</sup>研究了空调系统的优化与控制，对于建筑能耗的多优化目标提出了新的优化方法，不仅节能而且提高了居住性。Zheng 和

Zaheer-Uddin<sup>[26]</sup>提出了基于空调系统模型的优化算法。根据模型的关系，模拟了风系统的响应。Austin<sup>[27]</sup>提出了对空调系统的优化，根据实验结果提出了结论，但其不可以将此优化控制运用到其他空调系统中。Nassifetal<sup>[28]</sup>总结了空调系统的监控、空调系统的模型建立及参数确定和将优化算法向其他系统进行扩展。

### 1.3 课题的主要研究内容

(1) 概括了空调制冷系统原理和过程，得到空调制冷系统的耗能部件制冷机、冷却水泵、冷却塔风机的模型及其特性，提出了优化系统的工作设定点的优化算法，大大提高空调制冷系统的能耗。

(2) 详细阐述了新型优化算法—人工鱼群优化算法的原理，人工鱼群算法的特点及与其他算法的比较，分析了人工群算法的改进方法。

(3) 将改进的人工鱼群优化算法用于中央空调制冷系统，用 MATLAB 软件仿真求出在一定环境下中央空调制冷系统的最小能耗值。

## 第 2 章 中央空调制冷系统原理与数学模型

中央空调系统由制冷和空气处理两大系统组成，而空调制冷系统是中央空调的核心部分。根据热量转移方式，可把制冷系统的工作方式分为：蒸汽压缩式制冷、吸收式制冷，目前应用最广泛的是蒸汽压缩式制冷技术。

### 2.1 中央空调制冷系统的构成

空调制冷系统主要由制冷机制、冷却水泵、冷却塔等组成。本课题中研究对象是广泛应用的是蒸汽压缩式制冷模式，气态制冷工质（如氟利昂、共沸混合工质、碳氢化合物等）经压缩机变为高温高压气体进入冷凝器，进行热量传递，变成低温高压液态，进入膨胀阀节流减压，变成低温低压液态，在蒸发器内气化。气化过程要吸收热量，而压力不同，饱和温度不同，完成一次卡诺循环。本课题采用的是水冷式如图 2.1 所示。

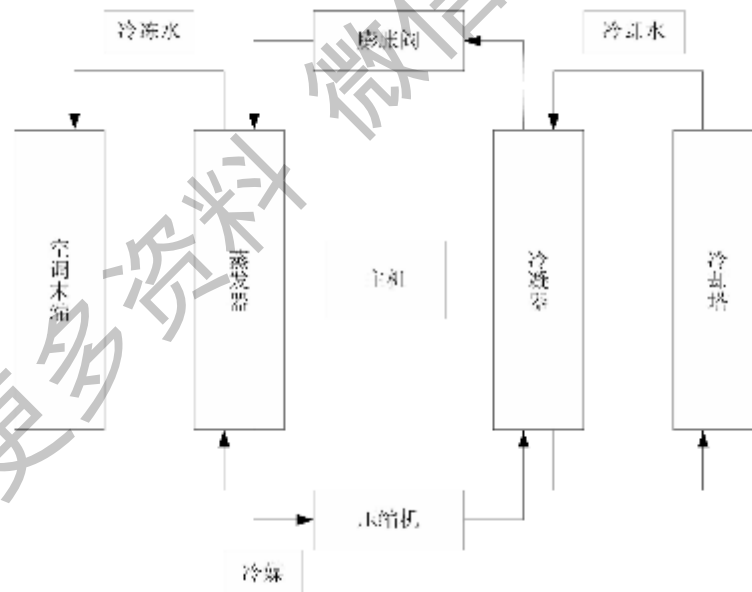


图 2.1 水冷式制冷原理

Fig.2.1 Water-cooled refrigeration principle

## 2.2 制冷机多项式模型

通过分析空调制冷系统的主要能耗设备制冷机的能耗特点和工作原理及额定制冷功率的条件,可以看出,影响制冷的效率的主要因素有:冷冻水供回水温度和流量,冷却水的供回水温度和流量,根据文献<sup>[20]</sup>本方也采用最小二乘法来建立制冷机的能耗模型。

### 2.2.1 最小二乘法

最小二乘法,把最小化误差的平方与欲求数据的最佳函数匹配。利用最小二乘法可以简便地求得未知的数据,并使得这些求得的数据与实际数据之间误差的平方和为最小。最小二乘法的基本原理:

$$P(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n \quad (2.1)$$

适当选取  $a_0, a_1, \dots, a_n$ , 使得

$$Y(a_0, a_1, \dots, a_n) = \sum_{j=1}^n [P(X_j) - Y_j]^2 \quad (2.2)$$

为最小值。

### 2.2.2 多项式能耗模型

根据文献<sup>[21]</sup>,把影响制冷机效率的因素的变量与额定制冷条件下的各变量关系及部分负荷系数,作为变量,建立制冷机电机功率与冷冻水供回水温度、冷却水供回水温度、冷却水泵流量和冷却塔风扇流量的能耗模型。

运用最小二乘法辨识出的模型的参数,其能耗模型表达式如公式(2.3)所示:

$$\begin{aligned} P_{chiller} = Q_{cap} \cdot COP_{nom} & (a_0 + a_1 T_{chws} + a_2 T_{chws}^2 + a_3 T_{chw} + a_4 T_{chw}^2 - a_5 (\frac{Q}{Q_{cap}}) \\ & + a_6 T_{chws} T_{chw} + a_7 (\frac{Q}{Q_{cap}}) T_{chws} + a_8 (\frac{Q}{Q_{cap}}) T_{chws}^2 + a_9 (\frac{Q}{Q_{cap}}) T_{chw} \\ & + a_{10} (\frac{Q}{Q_{cap}}) T_{chw}^2 - a_{11} (\frac{Q}{Q_{cap}}) T_{chws} T_{chw} + a_{12} (\frac{Q}{Q_{cap}})^2 - a_{13} (\frac{Q}{Q_{cap}})^2 T_{chws} \\ & + a_{14} (\frac{Q}{Q_{cap}})^2 T_{chws}^2 + a_{15} (\frac{Q}{Q_{cap}})^2 T_{chw} + a_{16} (\frac{Q}{Q_{cap}})^2 T_{chws}^2 + a_{17} (\frac{Q}{Q_{cap}})^2 T_{chws} T_{chw}) \end{aligned} \quad (2.3)$$

其中,  $P_{chiller}$  为制冷机功率,  $Q_{cap}$  为制冷机的额定制冷量,  $COP_{nom}$  为制冷机的额定制冷效率,  $Q$  为制冷机的制冷量,  $T_{chws}$  为冷冻水供水温度,  $T_{chw}$  为冷却水供水温度,  $a_0, a_1, \dots, a_{17}$  为制冷机能耗模型系数。

## 2.3 冷却塔数学模型

早在1925年, Merkel首次阐述了冷却塔的运行机理, 并成为大多数人分析冷却塔运行的理论基础。但是在分析中 Merkel忽略了水分蒸发。在空调系统优化研究中, 大家普遍采用的是 Braun于1989年提出的基于部件的冷却塔模型, 该表达式非常复杂。

### 2.3.1 冷却塔数学模型的建立

下面我们将模型简化。通过能量守恒定律, 可以得到冷却塔的两个热交换等式:

$$Q_{ry} = m_{cw} C_{pw} (T_{cws} - T_{cwe}) \quad (2.4)$$

$$Q_{ry} = m_a (h_{a,s} - h_{a,e}) \quad (2.5)$$

上述等式描述了冷却水回路的通过冷却塔内的空气所带走的热损失。通过热力学原理, 可以得到冷却塔内的热损失率为:

$$\begin{aligned} Q_{wy} &= \int_m^{wy} K_w \cdot a \cdot V \cdot (h_s - h) \cdot dT_s \\ &= K_w \cdot a \cdot V \cdot \int_m^{wy} (h_s - h) \cdot dT_s \end{aligned} \quad (2.6)$$

式中的 $h, h_s$ 是关于塔内不同进出口温度 $T$ 的函数。

在冷却水泵和风扇的作用下, 冷却塔中的水和空气在冷却塔中相对运动, 因此冷却塔的热阻包括冷却水的热阻和空气的热阻, 如公式(2.7)表示:

$$R = R_w + R_a \quad (2.7)$$

根据张相对流理论, 可得:

$$\frac{1}{R} = C \left( \frac{D \cdot v}{\mu} \right)^e \left( \frac{C_{pw} H}{k} \right)^f \cdot \frac{k}{D} \quad (2.8)$$

$$m_{cw} = v \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot \rho \quad (2.9)$$

$C, D, e$ 和 $f$ 都是常量。常数 $C$ , 指数 $e$ 和 $f$ 很难确定, 目前一般都是采用经验值,  $C = 0.023, e = 0.8, f = 0.4$ 。

通过公式(2.6), (2.7), (2.8), (2.9)可推导出冷却塔的散热模型:

$$Q_w = \frac{b_1 m_{cw}^e \cdot b_2 m_a^e}{b_1 m_{cw}^e + b_2 m_a^e} (T_{cwx} - T_{wx}) - \frac{C^{*2} m_{cw}^{(2)}}{1 + C^{*2} (\frac{m_{cw}}{m_a})} (T_{cwx} - T_{wb}) \quad (2.10)$$

其中参数  $C_1, C_2, C_3$  需要根据实际情况，针对某一个特定的对象求其参数。

### 2.3.2 冷却塔模型参数确定

可以看出冷却塔模型是一个非线性模型，在此处我还将采用在第二章第二节中用过的最小二乘法，对参数  $c_1, c_2$  进行确定，将公式 (2.10) 转化成：

$$f(c) = \sum_{i=1}^m r_i^2(c) = \sum_{i=1}^m \left( \frac{c_1 m_a^e}{1 + c_2 (\frac{m_{cw}}{m_a})} (T_a - T_{cwx}) - Q_i \right)^2 \quad (2.11)$$

其中： $f(c)$  是估计值与实验值的差的平方和。 $c = [c_1, c_2, e]$  未知数向量。 $r(c)$ ：估计值与实验值之差。 $m$ ：参与参数估计的实验数组数。 $Q_i$ ：冷负荷实测数据。

## 2.4 冷却水泵及风扇数学模型

在中央空调制冷系统中，除了主要的制冷机能耗外，还有两个耗能设备那就是冷却水泵及冷却塔风扇，对于冷却水泵和风扇来说，冷却水泵输出功率与冷却水质量流量之间具有严格的单调性，冷却塔风扇输出功率与空气质量流量之间也具有严格的单调性。所以本课题采用多项式逼近法建立它们的模型。

由于冷却水泵和冷却塔风扇都工作在开区间的情况下，所以模型结构和参数相同<sup>[11]</sup>。建立的模型具体表达式分别为：

$$P_{pump} = P_{pump-nom} (d_0 + d_1 (\frac{m_w}{m_{w-nom}}) + d_2 (\frac{m_w}{m_{w-nom}})^2 + d_3 (\frac{m_w}{m_{w-nom}})^3) \quad (2.12)$$

$$P_{fan} = P_{fan-nom} (e_0 + e_1 (\frac{m_a}{m_{a-nom}}) + e_2 (\frac{m_a}{m_{a-nom}})^2 + e_3 (\frac{m_a}{m_{a-nom}})^3) \quad (2.13)$$

其中： $P_{pump}$  为冷却水泵的能耗， $P_{fan}$  为冷却塔风扇的能耗， $P_{pump-nom}$  为冷却水泵在满负荷状态的额定能耗值， $m_{w-nom}$  为冷却水泵在满负荷状态冷冻水供水的额定流量值， $P_{fan-nom}$  为冷却塔风扇在满负荷状态下的额定能耗值， $m_{a-nom}$  为冷却塔风扇在满负荷状态下空气的额定流量值， $m_w$  为冷却水泵运行时的实际冷冻水供水质量流量， $m_a$  为冷却塔风扇运行时的实际空气质量流量。 $d_0, d_1, d_2, d_3$  为冷却水泵部分负荷状态时的常系数， $e_0, e_1, e_2, e_3$  为冷却塔风扇部分负荷状态运行时的常系数。



## 2.5 本章小结

本章介绍了中央空调制冷系统的组成部分，分析了中央空调制冷系统的工作原理，并且分别的对中央空调制冷系统中的制冷机、冷却塔、冷却水泵和冷却塔风扇进行建模，利用最小二乘法对模型的未知参数进行辨识。为接下来的对中央空调制冷系统优化做了充分的准备。

获取更多资料 微信搜索蓝领星球

## 第3章 智能优化算法分析

优化技术在管理科学、计算机科学、生物学、电子工程、系统控制、人工智能、模式识别、生产调度、VLSI技术、通信系统、信号处理等领域都存在着大量复杂的优化问题。本章通过分析各优化方法的优缺点，为适合制冷系统优化选取，做好基础。

### 3.1 群智能优化算法

群(体)智能是指由简单的自然个体所组成的群体所涌现出来的群体智能。自治体就是一个与它所在的环境进行交互作用的子系统，并且可能再由他们组成另外一级自治体，但是自治体之间的行为都是相互独立的。这些自治体本身缺少领导者，也没有全局的计划。虽然迄今为止对群智能的研究已有的很多，但还没有统用的标准来对群智能系统的性能就行评估。群智能具有如下一些基本要素<sup>[3]</sup>。

(1) 接近度：群体能够进行简单的空间和时间计算，包括自身的位置，速度，方向等。

(2) 品质：群体能够响应环境中的品质因子，向群体中高品质的个体学习或是靠拢。

(3) 多样性响应：群体的行为范围不应太窄，群体中个体的行为方式多样化，感知多样化。

(4) 适应性：在代价不高的情况下，群体中的个体可以根据自身的实际周围的环境条件在适当时候改变自身的状态或行为。

(5) 稳定性：为了避免系统发散不稳定保证系统的收敛性，群体中的每个个体不应该在每次外界环境变化时都改变自身的状态或行为，稳定性是群的一个基本属性，稳定性表征了群系统在运行中的内聚性。

与传统的大多数基于梯度的优化算法不同，智能优化算法是依靠概率搜索，概率搜索一般计算比较简单但是计算次数比较大，但是现在电脑计算速度很快，不会影响算法的计算时间，虽然概率搜索通常要采用较多的评价函数且评价函数的建立有时会比较困难，但是与传统的基于导数的优化算法相比其优点还是比较显著的，况且群智能优化算法可以解决传统优化算法不能解决的问题。群智能优化算法的优点主要表现在以下七个方面：

(1) 群体中个体是相互作用的，但是不存在直接约束，不会因为个别个体状态的错误而导致整个群体出现错误，避免个别个体的错误影响整个全局的求解，增强了系统鲁棒性，确保系统的正确性。

(2) 群体中个体间直接用于相互沟通，比较，协作的信息较小，以间接沟通，比较，协作的信息实现个体协作，节省了系统的有效及通畅性，确保了系统的扩散性。

(3) 并行分布式模型可以利用多个处理器，每个处理器有自己特定处理的问题，每个处理器负责处理一个问题，加快了系统的处理问题的能力和节省了算法的计算时间。

(4) 群智能优化算法对问题定义及目标函数和约束条件的连续性无特殊要求，可以是非线性，多变量的，多个等式不等式约束条件。

(5) 群体中的每个个体只能感知自身周围有限的局部信息和状态，个体的行为及感知能力简单，不需要很强的数学基础支撑，个体之间的沟通协作也非常简单，所以群体智能优化容易算法实现。

(6) 具有自组织性，群体行为表现出来的复杂性是通过群体中每个简单个体的之间相互作用相互影响从而凝聚在一起表现出来的出高度的智能化。

(7) 群智能优化算法都是根据现实中群聚生物的生态特性和习性观察总结出来的，需要将生物生态和行为转化成简单的数学基本算法。

## 3.2 遗传算法

遗传算法实质是一种繁衍、检测和评价的迭代算法。遗传算法一般分为以下几个步骤：对问题的解进行编码，即用染色体表示问题的潜在解，生成经过编码的初始种群；根据优化问题的目标函数选择适应度函数，并根据适应度大小挑选个体就行遗传操作；按照适者生存优胜劣汰的原理逐代演化，进而得到问题最优解或近似解。每个个体在种群演化过程中都被评价优劣并得到其适应度值。此优化算法被人们广泛地应用于组合优化、机器学习、信号处理、自适应控制和人工生命等领域。它是现代有关智能计算中的关键技术<sup>[34]</sup>。

编码就是用一种码来表示优化问题的解，从而使遗传算法的码空间和问题的状态空间对应起来，在很大程度上依赖于优化问题的性质，并将极大的影响遗传操作的设计。遗传算法的一个显著特点就是它在编码空间和解空间中交替的工作，在编码空间对染色体进行遗传运算，而它在解空间则对解进行适应度评估和选择。由此可以看出

遗传算法的优化过程不是直接问题参数本身产生作用,而是在一定编码机制所对应的码空间上进行的,因此编码的选择会对算法性能和效率产生重要影响。

#### (1) 二进制编码

二进制编码是将原问题的解表示成一个二进制的 0~1 字符串形式,然后在位串空间上进行迭代遗传操作,得到的结果再通过解码过程还原成其解空间的解,然后进行适应度函数计算,例如,(0, 1, 1, 0, 1, )就是一个长度为 6 的二进制编码染色体。

#### (2) 十进制编码

十进制编码的将问题的解用一个 0~9 的十进制字符串中表示。例如,(1, 3, 5, 7, 8, 9, )就是一个长度为 6 的十进制编码染色体。

#### (3) 实数编码

实数编码是将问题的解用一个实数来表示,实数编码不同于上述两种编码,它直接在解的表现型上进行遗传操作,在执行上,遗传空间就是问题解空间,染色体将直接反应优化问题的规律和特性。

适应度函数是对遗传算法中解的好坏就行度量的一种指标,它的设计要结合求解问题的本身要求未定,一般是以目标函数或费用函数或其他方法来表示或确定,解的适应度函数值是遗传过程中的进行选择操作的主要依据。

选择操作的目的是从当前群体中选出优良的个体,让他们作为父代直接遗传到下一代,或者通过配对交叉产生新的个体的方式再遗传到下一代,选择操作算子的作用是判断个体是否优良,判断的标准就是个体各自的适应度值大小,个体的适应度函数值越大,它被选中进行遗传操作的机会就越大,否则个体适应值越小,它被选中的机会就越小,优胜劣汰的选择机制使得较高的存活率,这也是遗传算法区别于传统算法的显著区别之一。

遗传算法中的交叉操作是指两个将相配对的个体按照某种方式相互交换各自的部分基因,从而形成两个新个体,从实际交叉就是在两个染色体之间随机地交换信息,从而形成两个新的个体,下面以二进制编码为例,介绍常用的几种基本交叉方法:

#### (1) 单点交叉

单点交叉是在个体串中随机地设定一个交叉点,进行交叉时,两个个体的点前或点后的部分结构进行互换,从而生成两个新的个体,设有染色体 X1, X2:

X1: 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0

X2: 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1

↓ 单点交叉 (设随机位置为 5)

X1': 1, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 1

X2': 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0

#### (2) 两点交叉

两点交叉的操作方法与单点交叉相类似, 只是将单点交叉中的随机设定一个交叉点改为随机设定两个交叉点, 然后将两个交叉点之间的个体结构进行互换, 设有染色体 X1, X2:

X1: 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0

X2: 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1

↓            ↓ 两点交叉 (设随机位置取 2, 6)

X1': 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0

X2': 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0

#### (3) 多点交叉

单点交叉 (设随机位置为 5) 将上述两种交叉方法加以推广就可得到多点交叉的概念, 多点交叉是指染色体的编码串中的随机设置多个交叉点, 然后进行基因互换, 多点交叉又称广义交叉。

#### (4) 一致交叉

一致交叉指通过设定屏蔽字来决定新个体中的基因是继承两个旧个体中的哪个个体所对应基因, 一致交叉的操作过程如下所述, 当屏蔽字中的位为 0 时, 新个体 X1' 要继承旧个体 X1 中所对应的基因, 当屏蔽字为 1 时, 新个体 X1' 要继承旧个体 X2 中所对应的基因, 这样就可生成一个完整的新个体 X1'; 反之, 就可以生成一个新个体 X2', 如下:

X1: 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0  
 X2: 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1  
屏蔽字: 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1  
 X1': 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1  
 X2': 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0

变异操作指将个体的染色体编码串中的某些基因座上的基因值用该基因座的其他等位基因来替换，从而形成一个新个体的过程，以 0~1 二进制编码串为例，变异操作就是把某些基因座上得基因值取反，及 0 变成 1 或 1 变成 0，变异操作能够在一定程度上克服交叉过程中产生的早熟收敛现象，增加遗传种群的多样性，下面以二进制位例介绍几种常用的变异算子：

### (1) 基本变异算子

基本变异算子指对种群中个体的染色体编码串随机的挑选一个或多个基因座，将这些基因座对应的基因以变异概率  $P_m$  来做变动，0~1 二进制编码串中的基本变异操作如下所示：

X1: 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0  
 ↓ 基本变异 (变异基因座取 2 和 6)

X1': 1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 0

### (2) 逆转变异算子

逆转算子可以说是变异算子的一种特殊形式，它的基本操作内容为：在个体的染色体编码串中随机地挑选两个逆转点，然后将这两个逆转点之间的基本值以逆转概率  $P_r$  进行逆向排序。0~1 二进制编码串的逆转操作如下：

X1: 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0  
 ↓ 逆转变异 (逆转变异点为 4, 8)

X1': 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1

### (3) 自适应变异算子

自适应变异算子和基本变异算子的操作过程类似，唯一不同是，变异概率不是固定不变的，而是随着种群个体的多样性程度来进行自适应调整，一般是根据交叉操作得到两个新个体之间海明距离进行变化，海明距离越小，变异概率越大；海明距离越大，则变异概率越小<sup>[35]</sup>。

基本遗传算法的流程如图 3.1 所示：

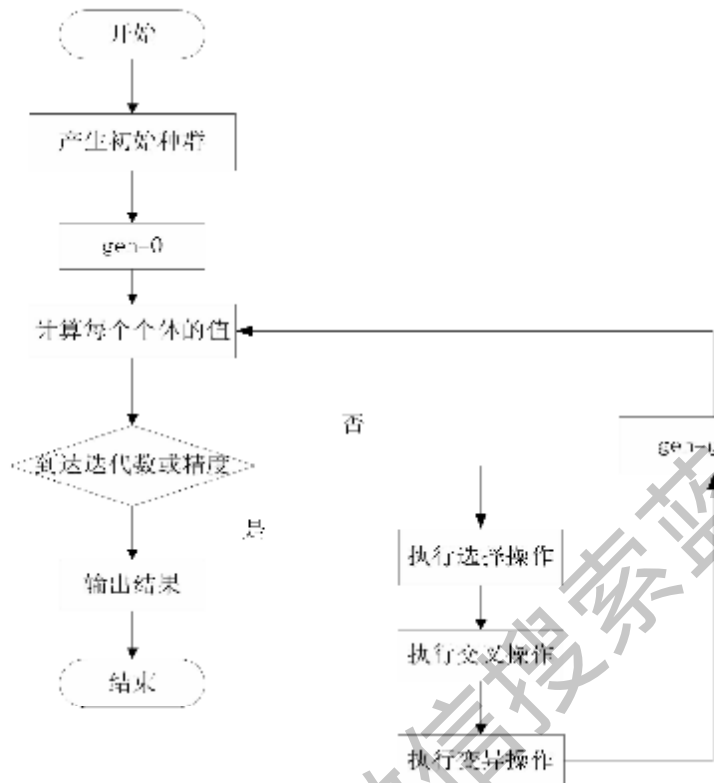


图 3.1 基本遗传算法的流程图

Fig. 3.1 The basic flow chart of genetic algorithm

遗传算法直接把目标函数值作为搜索信息，具有较高的鲁棒性，因此在许多优化问题中得到了极为成功的应用，但是，它存在一些不足，如遗传算法的布局搜索能力很差，并且极容易出现早熟现象，从而导致算法的收敛性能降低，极大的影响了算法的搜索效率，这些缺点阻碍了遗传算法的进一步应用<sup>[36-37]</sup>。

### 3.3 粒子群算法

粒子群算法源于对自然界中鸟群集体觅食行为的观察研究，发现鸟群在飞行过程中经常是群体行动，在某个时刻会突然改变方向超各自的方向飞，也会分散的鸟往一起聚拢飞行，个别个体还会掉队，其行为不可预知，不确定，但是整个鸟群的总体一般保持一致的，同时超着一个方向飞行，基本每个鸟的个体与个体之间也保持着一个特定的距离，以免鸟群个体之间相互碰撞，通过对类似生物群体行为的研究概括总结，人们发现实际生物群体中都会存在一种群体的信息共享机制，此信息共享机制为生物

群体的进化演化提供了一种优势,使生物种群在社会生物链中更好的发展成长,此思想信息机制也是粒子群优化算法的基础。粒子群优化算法的搜索思想是:相对较优粒子的感知邻域的范围内有目标函数的解的概率就越大,因此在群最优粒子的感知邻域内分配更多粒子个体从而增强算法更快的搜索到全局最优解的效率,同时,每个粒子个体也根据周围的环境外界因素信息使粒子个体逃离局部最优解。由于粒子群算法采用了不同于遗传算法的随机搜索策略,因此在解决某些问题时显现出更优的搜索效能[38]。

### (1) PSO 算法设计原则

1) PSO 算法匹配性, PSO 算法对所优化的目标函数要求不高,根据目标函数的特点,找出对目标函数具有良好性能的 PSO 算法,从而提高 PSO 优化速度和 PSO 优化精度。

2) PSO 算法可靠性, PSO 算法是一种概率型优化算法,算法不具备一定能找到目标函数的最优值,甚至有找到的最优值是慢的。在算法的设计之初,要考虑算法的稳定性。

3) PSO 算法的收敛性,对不同特点目标函数, PSO 算法的收敛速度可能会不同,若 PSO 算法的参数选取不当,可能会使 PSO 算法不收敛。

### (2) PSO 算法基本原理

设目标函数的搜索空间为  $D$  维, PSO 算法中粒子的规模为  $m$ , 则第  $i$  个粒子的状态用一个  $D$  维的向量表示  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})^T$ , 其中  $i = 1, 2, \dots, m$ , 粒子的速度用  $D$  维向量表示  $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})^T$ , 在 PSO 算法中,粒子的状态就是目标函数的解,把  $x_i$  带到目标函数里,则求得该粒子的目标函数值,计算每一次迭代后的适应值,通过比较来判定好坏。每个粒子的状态更新公式如下,见公式 (3.1)、(3.2):

$$V_{id}(t+1) = W \times V_{id}(t) + c_1 r_1 (P_{id} - X_{id}(t)) + c_2 r_2 (P_{gd} - X_{id}(t)) \quad (3.1)$$

$$X_{id}(t+1) = X_{id}(t) + V_{id}(t+1) \quad (3.2)$$

其中,  $V_{id}(t)$  是粒子  $i$  在第  $t$  次迭代中第  $d$  维的速度;  $X_{id}(t)$  是粒子  $i$  在第  $t$  次迭代中第  $d$  维的当前位置;  $w$  为每代粒子自身速度权重;  $c_1$  是全局最优解的算子,  $c_2$  是当代个体最优解的算子,  $r_1$  和  $r_2$  为两个相互独立的随机分布函数,服从  $[0, 1]$  上的均匀分布。  $P_{id}$  为此时粒子的最优状态,随机数  $r_1$  决定了该部分对整体速度影响,  $P_{gd}$  为粒子群的全局最优状态,  $r_2$  决定全局最优状态对该粒子的影响[39]。



### (3) PSO 算法参数的选择

PSO 算法参数有：种群数量，惯性系数  $w$ ， $r$  和  $r_2$  算子，最大速度  $V_{\max}$ 。通过采样、讨论 PSO 算法的可靠性和参数选取；介绍参数对 PSO 算法的影响<sup>[1]</sup>。

#### 1) 惯性因子

惯性因子决定前一代与后一代速度的比值，决定了粒子移动方向。参数里， $w$  决定了粒子搜索能力，假如惯性因子较大，则粒子速度对飞行影响一直很大，飞行方向很难被改变，若  $w$  值较小，则粒子的速度由剩下部分影响，则粒子会一直向全局最优点搜索。

#### 2) 收敛因子

在 PSO 算法中，一般忽略  $\omega$  和  $V_{\max}$ ，第  $i$  个粒子在第  $d$  维速度更新公式，如公式 (3.3)、(3.4)：

$$V_{ij}(t+1) = \chi[V_{ij}(t) + c_1 r_1 [P_{ij}(t) - X_{ij}(t)] + c_2 r_2 [P_{ij} - X_{ij}(t)]] \quad (3.3)$$

$$X_{ij}(t+1) = X_{ij}(t) + V_{ij}(t+1) \quad (3.4)$$

$$(1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq d)$$

其中，收敛因子  $\chi = \frac{2}{2 - \phi - \sqrt{|\phi^2 - 4\phi|}}$ ， $\phi = c_1 + c_2, \phi > 4$ 。通常  $\phi$  取值为 4.1，收敛因子  $\chi = 0.729$ 。

#### 3) 最大速度

最大速度  $V_{\max}$  决定粒子飞行的最大幅度， $V_{\max}$  越大，粒子飞行距离就越大。从公式可以看出，一个粒子都向全局最优位置飞行，可是速度一直在增加，有可能会超出搜索范围，避免此现象发生，在 PSO 群算法对  $V_{\max}$  加以限制。

#### 4) 群体规模

在 PSO 群算法中，种群数量不确定，准确的种群数量可以使资源利用率最高，提高算法的收敛速度和精度，假如目标函数式一个多峰值函数，则种群规模也应该较大，不然会出现局部收敛。

#### 5) 加速因子

PSO 算法中，加速因子  $c_1$  和  $c_2$ ，决定了粒子最优与全局最优的速度比值。下面介绍  $c_1$  和  $c_2$  的作用。

令  $c_1 = 0$ ，公式 (3.5)：

$$V_y(t+1) = wV_y(t) + c_2r_2[P_y - X_y(t)] \quad (3.5)$$

通过公式可知 PSO 算法不会自我反省，提高 PSO 算法收敛速度，可是易落入局部最优值。

若令  $c_2=0$ ，公式 (3.6)：

$$V_y(t+1) = wV_y(t) + c_1r_1[P_y(t) - X_y(t)] \quad (3.6)$$

通过公式可知，降低了 PSO 群算法收敛速度和精度<sup>[41]</sup>。

#### 6) 算法流程

下面给出 PSO 算法流程的操作步骤：

- ① 确定种群规模和记忆库规模，种群初始化。
- ② 评价种群中粒子的适应值，记录每个粒子的个体极值。
- ③ 比较目标函数值，选取较大的适应值为最优值，更新粒子的状态位置信息。
- ④ 根据速度公式 (3.1) 和位置 (3.2) 更新方程对粒子的速度和位置进行更新。
- ⑤ 更新种群中每个粒子的个体极值。
- ⑥ 判断迭代是否终止，如果达到终止条件，则迭代终止，输出算法的优化结果；

如果没有达到终止条件，则继续计算<sup>[42]</sup>。PSO 算法的流程图如图 3.2 所示。

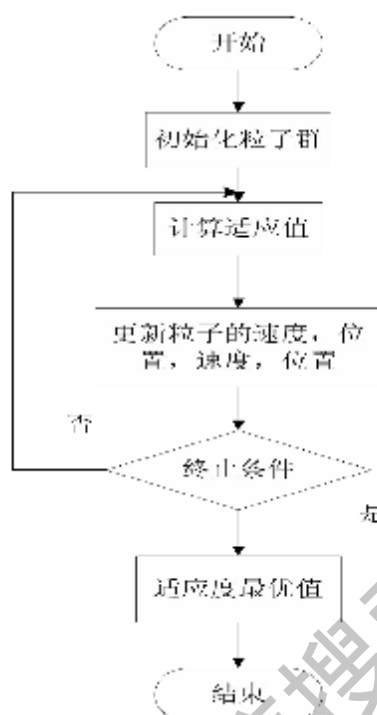


图 3.2 粒子群算法的流程图

Fig.3.2 The flow chart of particle swarm algorithm

### 3.4 蚁群算法

蚁群算法是由意大利学者 Dorigo 等于 20 世纪 90 年代初提出的一种新型的模拟生物进化演变的优化算法, 它通过模拟自然界蚂蚁寻食过程中通过释放一种特殊的分泌物—信息素的相互交流从而找到蚁巢至食物的最短路径的现象, 提出了一种基于信息正反馈原理的蚁群优化算法<sup>[3]</sup>。

该优化算法是对实际生活中真实的蚁群协作过程的模拟, 每只蚂蚁个体在候选解空间中各自独立搜索可行解, 并在搜索过程中留下一定的信息素。搜索到的解的性能越好, 则该蚂蚁在此路径留下的信息素的浓度就越多, 信息素浓度越多的解接下来被选择的可能性就越大。在算法开始, 所有解的信息量是相同的, 随着算法的推进, 较优解上的信息量不断增加, 算法最终收敛到最优解或近似最优解。

当某一条蚂蚁个体走过的路径上留下的信息素浓度较大时, 后来的蚂蚁个体选择该路径的概率就越大, 从而增加该路径的信息素浓度, 这种选择过程称为蚂蚁的自催化过程, 其原理是一种正反馈机制, 所以蚂蚁系统也称为增强型学习系统<sup>[4]</sup>。

由此可以得到, 蚁群优化算法中的几个算法策略, 简要概括为:

(1) 选择策略：选择策略是根据前个体留下的信息素浓度来判断的是否选择该路径，信息素浓度越大则该路径被选择的概率就越大。

(2) 更新策略：更新策略是路径上个体留下的信息素浓度会变化，经过的蚂蚁越多信息素浓度就越大，信息素浓度会随时间变化，随时间的消逝信息素浓度逐渐减小。

(3) 协同策略：协同策略时蚂蚁个体之间通过信息素浓度来达到个体与个体之间的间接互相感知，沟通交流，通信、相互影响。协同策略使得蚁群优化算法在初始解的基础上经过一段时间后能够发现其中的最优解<sup>[45]</sup>。

#### 人工蚁群算法描述

蚁群算法是解空间参数化概率分布模型的一种群智能优化算法。在蚁群算法中，参数化概率和参数则可以被替代成信息素，参数模型则是信息素模型。在解元素对解的质量总结出来的一种算法，通过解构成元素的最佳组合来构造出高质量的解<sup>[46]</sup>。

用 TSP 问题来描述基本蚁群算法，设有  $m$  只蚂蚁在  $n$  个城市之间移动，第  $k$  只蚂蚁 ( $k=1, 2, \dots, m$ ) 根据路径中信息素的大小来判断下一步如何转移，状态转移概率可以表示为：

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{s \in \text{allowed}_k} [\tau_{is}(t)]^\alpha [\eta_{is}(t)]^\beta}, & j \notin \text{tabu}_k \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.1)$$

式 4.1 称作构造路径。其中， $p_{ij}^k(t)$  表示在  $t$  时刻蚂蚁  $k$  处于变量  $m_i$  的城市  $i$  选择城市  $j$  做为下一个要访问目标的概率。 $\eta_{ij}$  表示启发式的参量，也就是  $i$  到  $j$  的期望度，在普遍蚁群算法的搜索过程中这一项是不变的。 $\text{tabu}_k$  表示蚂蚁  $k$  已经访问过的城市列表，而  $\text{allowed}_k = \{n - \text{tabu}_k\}$  表示蚂蚁  $k$  即将搜索的城市集合，也就是还未访问的城市集合。 $\alpha$  是调节信息素强度的因子， $\beta$  是调节期望度的因子。通过一些学者们大量的实验证明，可将上述参数初始为： $\alpha=1$ ， $\beta=2-5$ ， $\tau_0=m/C$ 。

信息素更新方式如下：

$$\begin{aligned} \tau_{ij}(t+n) &= (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \\ \Delta\tau_{ij}(t) &= \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k \end{aligned} \quad (4.2)$$

$1-\rho$  表示对应的信息素消减的程度； $\Delta\tau_{ij}$  表示所有蚂蚁在本次循环迭代中留在  $x_i$  变量第  $i$  区间与  $x_j$  变量第  $j$  区间所组成的路径上的相对信息素； $\rho$  表示搜索强度的持

久性系数，其作用是避免信息素的无限累积，并使算法“忘记”之前选用的较差路径，且 $\rho \in [0.4, 0.8]$ 中的某一个值。 $L_k$ 表示第 $k$ 只蚂蚁在本次循环迭代中所经过路径的总长度； $Q$ 为正常数。 $N$ 为变量数。

#### 蚁群算法的特点

从蚁群算法可知，蚁群的觅食行为是一种协同优化行为。通过对最优路径的搜索，蚂蚁种群采用了彼此之间的一种交流，使蚂蚁个体决定接下来的路径。

#### 概括蚁群算法的特点：

(1) 蚁群算法是一种自组织的算法，人工蚂蚁间接通过信息素的作用自发的想最优解寻找的一个从无序到有序的过程。

(2) 采用分布式控制，不存在中心控制。

(3) 蚁群算法是一种本质上并行的算法，其搜索过程不是从一点出发，而是从多点同时进行，每只蚂蚁搜索的过程彼此独立，仅仅通过信息素进行通信。

(4) 蚁群算法是一种正反馈算法，通过不断强化最优解的信息素，加快算法的收敛速度。

(5) 蚁群算法具有较强的鲁棒性。

(6) 蚁群算法很容易与多种启发式算法相结合，以改善算法的性能<sup>[47]</sup>。

经过以上分析可得：遗传算法具有编码不准确，不规范，易陷于局部收敛；粒子群搜索效率和收敛率低，精度不高；蚁群算法需要较长的搜索时间，蚂蚁易出现早熟停滞现象，而中央空调制冷系统是一个非线性多变量对收敛速度和精度要求较高的系统，室外天气的突变，对冷冻水的供水温度精度要求高，以上优化算法不足以满足对系统的优化。

### 3.5 本章小结

本章简要分别介绍了遗传、粒子群和蚁群三种群智能优化算法的原理、流程及特点，遗传算法具有编码不准确，不规范，易陷于局部收敛；粒子群搜索效率和收敛率低，精度不高；蚁群算法需要较长的搜索时间，蚂蚁易出现早熟停滞现象，而中央空调制冷系统是一个非线性，多变量，对收敛速度和精度要求较高的系统，不足以满足对制冷系统的优化。

## 第 4 章 基于人工鱼群算法中央空调制冷系统的优化

在第三章分析得遗传算法具有编码不准确，不规范，易陷于局部收敛；粒子群搜索效率和收敛率低，精度不高；蚁群算法需要较长的搜索时间，蚂蚁易出现早熟停滞现象的特点，在 2003 年由李晓磊<sup>[8]</sup>等人首次提出人工鱼群算法。人工鱼群算法具有解决非线性，收敛速度快，收敛精度高，易实现的特点。本文将采用改进的人工鱼群算法对中央空调制冷系统进行优化，可以达到收敛速度快，收敛精度高的特点。

### 4.1 人工鱼群算法

#### 4.1.1 人工鱼模型

人工鱼是一个虚拟体，用面向对象的分析方法，把人工鱼假象为一个有信息的实体，可以感受外界环境的状态，并针对外界因素做出动作。人工鱼的环境包括解和其它人工鱼的状态，下一刻自身信息和外界环境信息，对外界环境是相互影响的，包括的信息有人工鱼群个体数  $N$ ，人工鱼的初始位置  $X_i$ 、人工鱼移动的最大步长  $Step$ 、人工鱼的视野  $Visual$ 、重试次数  $Try\_number$  和拥挤度因子  $\lambda$ 。

#### 4.1.2 人工鱼视觉和步长

人工鱼对外界的感知是靠视觉来实现的，生物的视觉是极其复杂的，为了实施的简单和有效，在人工鱼的模型中应用如下方法实现虚拟人工鱼的视觉。

如图 4.1 所示，人工鱼的状态为  $X$ ， $Visual$  为其视野， $X_v$  是某时刻视点的位置信息，前进一步，则到达下一刻状态  $X_{next}$ ，假如  $X_v$  位置信息不比现在状态好，则搜索其他位置信息，寻找次数多则越了解周围环境，则可以很好的决定下一步的走向。

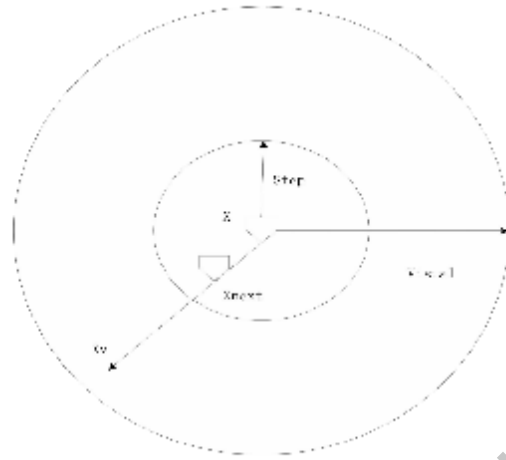


图 4.1 人工鱼的视野与步长

Fig.4.1 Vision and step of artificial fish

其中, 状态  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 状态  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ , 则该过程可以表示如下:

$$X_i = X + \text{Visual} \cdot \text{Rand}() \quad (4.1)$$

$$X_{\text{new}} = X + \frac{X_j - X_i}{\|X_j - X_i\|} \cdot \text{Step} \cdot \text{Rand}() \quad (4.2)$$

$\text{Rand}()$  为 0~1 的随机函数,  $\text{Step}$  为最大步长。

#### 4.1.3 人工鱼四种基本行为

鱼没有推理能力和判断能力, 鱼的目标意向简单行为显露出来的, 往往种群的行为最能反映出鱼的目的。

##### (1) 觅食行为

行为描述: 设  $X_i$  为当前状态位置信息,  $X_j$  为视点所在的位置的状态,

$$X_j = X_i + \text{Visual} \cdot \text{Rand}() \quad (4.3)$$

求极大时,  $X_i < X_j$ , 向视点所在的位置方向前进。

$$X_i^{\text{new}} = X_i + \frac{X_j - X_i}{\|X_j - X_i\|} \cdot \text{Step} \cdot \text{Rand}() \quad (4.4)$$

如果  $X_i > X_j$ , 再判断  $X_j$  位置信息, 直到符合条件后向该方向前进一步, 假如尝试  $\text{try\_number}$  次后, 还是不满足条件, 则随机前进一步。

##### (2) 聚群行为

$X_i$  为当前位置信息, 邻域内 ( $d_j < \text{Visual}$ ) 的伙伴数目  $n_j$  及中心位置  $X_c$ 。若

$Y_c / n_c > \lambda Y_c$ , 说明中心位置  $X_c$  处食物富裕且不拥挤, 则向  $X_c$  方向移动一步。

$$X_i^{t+1} = X_i^t + \frac{X_c - X_i^t}{\|X_c - X_i^t\|} \cdot \text{Step} \cdot \text{Rand}() \quad (4.6)$$

否则执行觅食行为。

### (3) 追尾行为

$X_i$  为当前位置信息, 邻域内 ( $d_{ij} < \text{Visual}$ ) 中, 最大值得伙伴  $X_j$ 。若  $Y_i / n_i > \lambda Y_j$ , 则  $X_j$  有充足的食物且不拥挤, 则向  $X_j$  方向移动一步。

$$X_i^{t+1} = X_i^t + \frac{X_j - X_i^t}{\|X_j - X_i^t\|} \cdot \text{Step} \cdot \text{Rand}() \quad (4.7)$$

否则执行觅食行为。

### (4) 随机行为

随机行为简单, 即视野范围内随机一个位置, 向这个位置前进一步。

### (5) 迭代终止条件

算法的终止一般是判断连续多次所得值得均方差小于允许的误差, 或是限制最大迭代次数等等。若满足终止条件, 则输出公告牌的最优记录, 否则继续迭代<sup>[49]</sup>。

(6) 人工鱼群算法的步骤如下:

- 1) 初始化各个参数,  $N, X_i, \text{Step}, \text{Visual}, \text{Try number}, \lambda$ 。
- 2) 计算每条人工鱼的适应度值, 并记录全局最优的人工鱼状态。
- 3) 对每条人工鱼评价, 选择四种行为中最优的一种行为并执行此行为。
- 4) 更新每条人工鱼的状态, 并计算适应度值即目标函数值。
- 5) 更新全局最优人工鱼的位置信息。
- 6) 若满足条件, 则输出结果, 否则到步骤②继续迭代。

#### 4.1.1 人工鱼群算法收敛性分析

人工鱼群算法中, 觅食行保证了人工鱼群算法是收敛的, 聚群行为使鱼群算法更加稳定, 追尾行为加速了鱼群算法的收敛速度。影响鱼群算法收敛寻优有以下几点<sup>[50]</sup>:

(1) 当尝试次数少时, 则人工鱼有更多的随机行为, 这样人工鱼会很好的逃离局部极值点。

(2) 当人工鱼在寻优的过程中, 可能会向局部极值点前进, 可是是一个鱼群整体向全局最优值方向前进的可能性更大。



(3) 拥挤度因子可以防止人工鱼全部聚集于某一个局部极值点, 使得人工鱼在全域内寻优。

#### 4.1.5 人工鱼群算法的特点

概括人工鱼群算法的特点:

(1) 聚群行为避免人工鱼群算法陷入局部极值点, 而且最大程度的寻找到全局最优值。

(2) 追尾行为加快了人工鱼群算法。

(3) 自适应性: 人工鱼群算法在对聚群行为、追尾行为、觅食行为进行评价后, 自动选择合适的行为, 从而形成了一种高效快速的寻优策略, 并对搜索空间具有一定的自适应能力。算法中虽然有一定的随机因素, 一般会觉得这将造成算法收敛效率的降低, 但实际上群效应使得算法整体结果是在快速向极值域收敛的, 随机性的存在使得寻优活动更加全面的展开, 总体是在步步向最优搜索的, 从而实现全局的最优。

(4) 并行性: 多条人工鱼并行的进行搜索。

(5) 简单性: 算法中仅使用了目标问题的函数值, 不需要建立问题的严格模型, 甚至不需要问题的精确描述, 使得它的适用范围得以延伸。

(6) 跟踪性: 随着工作状况或其他因素的变更造成的极值点的漂移, 鱼群算法具有快速跟踪变化的能力。

(7) 敏感性: 算法的敏感性低, 算法中参数的选择要求不高, 参数的变动对其有快速跟踪变化的能力。

(8) 全局性: 算法具有很强的跳出局部极值的能力。

(9) 具有较快的收敛速度, 可用于解决实时性要求的问题, 但算法获取的仅仅是系统的满意解域, 对于一些精度要求不高的场合, 可以用它得到一个可行解, 对于精确解的获取还需进行适当的改进。

(10) 灵活性: 有多种行为组合可以选取, 以得到较好的优化性能, 这是遗传算法, 粒子群算法等优化算法不具备的优点。例如, 可以采用觅食行为, 或先执行追尾行为, 找到若干个局部极值点, 再执行聚群行为收敛到全局极值点等<sup>[54]</sup>。

其不足之处主要表现在以下几个方面:

(1) 当寻优的域较大或处于平坦的区域时, 收敛到全局最优解的速度减慢, 搜索性能劣化。算法一般在优化初期有较快的收敛速度, 但后期往往收敛速度放慢。当

鱼群数量较少时,由于人工鱼个体的行为都是局部寻优行为,所以难以避免个体趋同、早熟现象,从而易陷入局部极优。

(2) 参数设置要求较散,一般根据实际问题确定,算法的寻优能力和效率与鱼群模式中视野内的邻域搜索有很大的关系,需要研究更加有效的邻域搜索方法。

(3) 视野和步长的随机性及随机行为的存在,使得寻优难以得到很高的精度。

(4) 随着人工鱼数目的增长,将会需要更多的存储空间,也会造成计算量大幅增加。

(5) 在寻优过程中,由于算法随机进行觅食行为,因此存在迂回搜索的问题,导致无效的计算。

中央空调制冷系统是个多变量构成,并且制冷系统的冷冻水的出水温度,一般比较低(5-9℃),相差0.1℃对制冷系统的能耗影响就很大,因此精度对整个系统的节能起非常关键作用,基本人工鱼群算法的收敛精度并不高,所以本文针对此缺点对基本人工鱼群加以改进,从而提高算法的收敛速度和精度。

## 4.2 基于改进人工鱼群算法优化中央空调制冷系统

人工鱼群算法作为一种随机搜索算法,具有对初始值要求不高、全局收敛性好、鲁棒性强、简单易实现的优点,但也存在着寻优精度不高,后期收敛速度慢的缺陷,部分原因是视野和步长都是固定,由于中央空调制冷系统中制冷机是主要的能耗设备,冷却水的供水温度为制冷机的优化变量,0.1℃对制冷机的能耗就会影响很大,所以对制冷机的优化精度要求较高,针对此特点对基本鱼群算法进行改进,增加算法的收敛速度与精度。

在基本人工鱼群算法中,视野和步长是固定值,视野确定了人工鱼的搜索范围,步长大小决定了收敛速度和寻优精度。

人工鱼的移动公式为:

$$X_{new} = X_i + \text{Rand}() \cdot \text{Step} \cdot \frac{X_i - X_i'}{|X_i - X_i'|} \quad (4.8)$$

由公式(4.8)可以看出,Step较大时,人工鱼移动的范围大,收敛速度快,Step较小时,人工鱼移动的范围小,收敛速度慢。在收敛后期,人工鱼聚集在极值点周围,但此时每移动一步都在较大范围内变化,不可避免会出现人工鱼在最优值附近来回振荡。人工鱼受视野范围的限制,使得局部极值附近的人工鱼无法看到全局极值,只能在邻近范围内做无意义的搜索,造成不必要的浪费。这种收敛速度与寻优精度的矛盾

冲突在定义域较大或多维的情况下将更加突出。 $X_{i,t+1}$ 为下一时刻人工鱼的状态,位置信息,即下一时刻的冷却水供水温度、冷却水泵流量和冷却塔风扇流量的值, $X_{i,t}(T_{cws}, m_w, m_f)$ , $X$ 为上一时刻人工鱼的冷却水供水温度、冷却水泵流量和冷却塔风扇流量信息。

#### 4.2.1 自适应视野和步长的实现

在对人工鱼群算法的缺陷进行深入分析的基础上,冷却水的供水温度实际环境下的值为(27-35℃)之间,范围较大,因此要求算法的收敛速度要快,而冷冻水的出水温度要求精度较高,提出了自适应人工鱼群算法,基于平均距离视野的自适应人工鱼群算法(AAFSA)。通过赋予人工鱼个体更多的智能,使它可以随着优化的进行,根据鱼群整体状态的不断变化适时的调整自身的视野和步长,从而使算法得到了有效改善。冷却水的供水温度实际环境下的值为(27-35℃)之间,范围较大,因此要求算法的收敛速度要快,而冷冻水的出水温度要求精度较高,其改进思路如下:

(1) 每次迭代后,人工鱼都将自身的状态冷却水供水温度、冷却水泵流量和冷却塔风扇流量的值和系统的能耗值写入公告牌。

(2) 人工鱼根据鱼群的状态智能的获取视野 Visual。

(3) 确定一个视步系数  $a$  ( $0 < a < 1$ ), 将  $Step = a * Visual$  作为人工鱼的最大步长,在前期,由于人工鱼的分布范围较大,因此人工鱼的视野及步长较大,加快了在前期的搜索范围和速度,人工鱼很快的向制冷系统的最优点聚集,当人工鱼聚集在制冷系统最优点邻域附近时,视野及步长就会响应的减小。

(4) 忽略拥挤的因素,在执行追尾行为和聚群行为时,只要视野范围内的最优人工鱼和中心位置优于当前位置,就以  $Step * Rand()$  向移动。

优化变量冷却水供水温度  $T_{cws}$  的实际工作范围在 27-35℃ 之间,冷却水泵  $m_w$  的实际工作范围在 0-60% $m_{w,max}$  Kg/s, 冷却塔风扇  $m_f$  的实际工作范围在 0-60% $m_{f,max}$  Kg/s。

#### 4.2.2 基于平均距离视觉的自适应人工鱼群算法(AAFSA)

每次迭代前,每条人工鱼都要对其他人工鱼到自身的距离进行测算,并计算出平均值,将其作为自身的视野 Visual。

如图 4.2 所示,设定义域 S 内有五条人工鱼 F0、F1、F2、F3、F4。其中, F0 到 F1、F2、F3、F4 的距离分别是 R1、R2、R3、R4, 则此时人工鱼 F0 的视野

$Visual=(R1+R2+R3+R4)/4$ ，步长  $Step=a*Visual$ ；其他人工鱼视野和步长的确定方法同上。

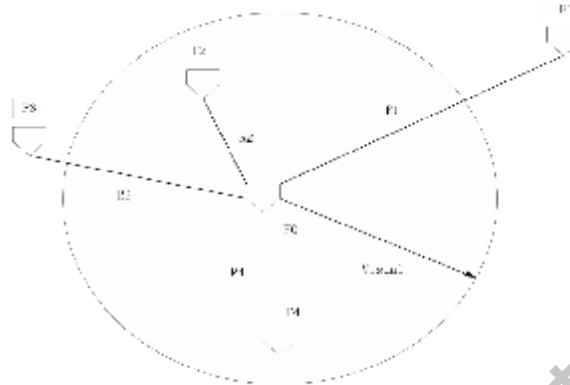


图 4.2 平均距离视觉

Fig.4.2 The average distance of visual

这样的设计思想是：改进后的人工鱼群算法在优化中央空调制冷系统时，在前期，由于人工鱼的分布范围较大，因此人工鱼的视野及步长较大，加快了在前期的搜索范围和速度，人工鱼很快的向制冷系统的最优点聚集，当人工鱼聚集在制冷系统最优点邻域附近时，视野及步长就会响应的减小，这样增加了搜索精度。这样对中央空调制冷系统中的冷却水供水温度、冷却水泵流量和冷却塔风扇流量三个优化变量更好的优化。

#### 4.2.3 改进后人工鱼群算法的特点

(1) 视野由人工鱼根据鱼群的分布情况动态生成，并通过视步系数（视野和步长的联合系数简称视步系数）对步长进行调节，从而设计参数时只需要输入视步系数，而不需要考虑如何选择视野和步长。

(2) 不考虑拥挤的因素，仅通过视步系数和尝试次数对优化进行调节和控制。这样改进后，基本参数由五个减少到四个，只需考虑人工鱼总数  $N$ 、迭代次数  $IT$ 、视步系数  $a$  和尝试次数  $Try\_number$ ，使算法更具有操作性。

(3) 在收敛初期，人工鱼拥有相对较大的视野和步长，能有效克服局部极值的影响，并快速向最优值聚集，随着优化的进行，人工鱼逐渐聚集，视野和步长越来越小，寻优精度越来越高。

(4) 改进算法中不考虑拥挤的因素,省去了拥挤度的判定,在一定程度上降低了算法复杂性,但增加了平均距离的计算,使算法复杂度上在整体上略有增加。

由于中央空调制冷系统具有非线性,对变量,对收敛速度和精度要求较高,因此改进人工鱼群算法会对精度要求较高的冷却水供水温度更好的优化,从而解决中央空调制冷系统的能耗问题。

#### 4.2.4 参数对优化的影响

为了验证改进算法中的人工鱼个数与视步系数对收敛的影响,选取了下列函数进行试验。

Schaffer, s 函数表达式为:

$$\min f(x,y) = (x^2 + y^2)^{0.25} \{ \sin^2 [50(x^2 + y^2)^{0.5}] + 1.0 \} \quad (4.9)$$

$$-10 < x, y < 10$$

该函数全局最小值为 0, 有无穷多个局部极小值。

基本人工鱼群算法参数: IT=60; 拥挤度因子为 1, 视野为 10, 步长为 8, 尝试次数为 1。

改进人工鱼群算法参数: IT=60; 尝试次数为 1, 其他参数如表 4.1 所示。

选取不同的人工鱼数和不同的视步系数连续进行 10 次试验。结果如表 4.1 所示。

表 4.1 改进前与改进后不同参数的比较

Table 4.1 Comparison with different parameters improved and before

算法	参数	迭代次数	最优值
AFSA	N=10	62	0.12898
	N=20	57	0.18356
AAFS	N=10, a=0.5	78	0.00805
	N=10, a=1	25	0.00652
	N=20, a=0.5	72	0.00736
	N=20, a=1	18	0.00105

参数影响分析：人工鱼总数：人工鱼通过自适应调整视野和步长，提高了个体的利用效率，增加了人工鱼总数，将使算法整体寻优能力得到很大的提高，但是算法运算量的增加也是比较快的。

视步系数：即步长与视野之比，理论上取  $0 < a < 1$ 。设计该参数的目的是为了抑制人工鱼的收敛速度，防止人工鱼过早聚集在极大值点附近或是局部极值， $a$  越大，收敛速度越快， $a$  越小，收敛速度越慢。一般情况下，取  $a$  等于 1 或略小于 1，可以保证算法快速收敛和达到较高的精度。在局部极值突出或函数变化非常平缓的情况下，应适当减小  $a$  的取值，这需要根据所优化问题的具体情况而定。

### 4.3 求解制冷系统的优化变量

在前面对空调制冷系统模型建立的过程中发现主要能耗设备是制冷机、冷却水泵和冷却塔风扇，由于制冷机的能耗主要受冷冻水供水温度，冷却水泵的能耗会受到冷却水流量的影响，冷却塔风扇的能耗会受到空气流量的影响，因此，影响空调制冷系统总能耗的三个关键变量就是进入制冷机的冷却水的供水温度，冷却水流量和冷却塔风量。为了充分验证改进后的人工鱼群算法的可行性，将上一节分析过的改进人工鱼群算法思想应用于中央空调制冷系统的节能优化中。

#### 4.3.1 空调制冷系统模型

$$\min P_{total} = P_{chiller} + P_{pump} + P_{fan} \quad (4.10)$$

$$\text{St. (1)} \quad m_{w, \min} \leq m_w \leq m_{w, \max} \quad (4.11)$$

$$(2) \quad m_{air, \min} \leq m_a \leq m_{a, \max} \quad (4.12)$$

$$(3) \quad T_{CRWS, \min} < T_{CRS} < T_{CRWS, \max} \quad (4.13)$$

$$(4) \quad T_{CRWS, \min} < T_{CRS} < T_{CRFS, \max} \quad (4.14)$$

$$(5) \quad Q = m_{CRW} C_{me} (T_{CRWS} - T_{CRS}) \quad (4.15)$$

$$(6) \quad Q - P_{chiller} = m_w C_{pw} (T_{CRS} - T_{CRW}) \quad (4.16)$$

$$(7) \quad Q - P_{chiller} = Q_{reg} \quad (4.17)$$

其中,约束(1)~(4)是对所有变量的运行范围加以限定,约束(5)为计算系统的冷负荷计算,并用到约束(6)和(7)。约束(6)限定冷凝器要传递相应的热量到冷却塔,约束(7)表示冷却塔将热量完全散发到环境中。

#### 4.3.2 求解优化变量

四个优化变量为冷却水供水温度 $T_{cws}$ ,冷冻水供水温度 $T_{fws}$ ,冷却水质量流量 $m_c$ 和冷却塔风扇质量流量 $m_f$ ,模型中还设计其他很多变量按实际工况赋予实际工作范围给定,则人工鱼的状态设为, $X=(m_w, m_a, T_{cws}, T_{fws})$ ,经过多次试验后,将人工鱼群算法的参数设为:人工鱼数目 $N$ 为10,尝试次数 $Try\_number$ 为10,迭代次数 $n$ 为60,程序流程图如图4.3:

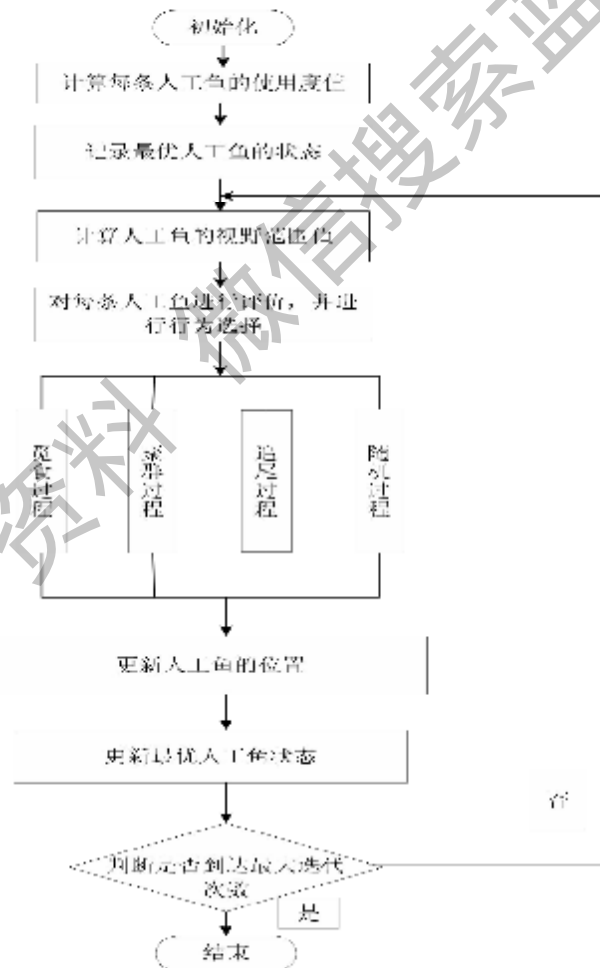


图4.3 改进人工鱼群算法流程图

Fig.4.3 Flow chart of improved artificial fish algorithm

#### 4.4 本章小结

通过对新型群体智能算法—人工鱼群算法进行分析, 鉴于人工鱼群算法寻优速度慢收敛精度低, 全局搜索能力差等缺陷, 提出了改进人工算法的观点。同时利用改进的人工鱼群算法对中央空调制冷系统模型进行优化的前期工作, 为最终的实验打下基础。

获取更多资料 微信搜索蓝领星球



## 第 5 章 制冷系统仿真结果与分析

### 5.1 试验环境

本课题中中央空调制冷系统的建模是针对实验室的小型中央空调制冷系统的建模，设备如图 5.1 所示。



图 5.1 中央空调实验装置

Fig.5.1 the central air conditioning experiment device

中央空调制冷系统由一台制冷机、一台冷却水泵和一台冷却塔构成，设备规格型号如下：

(1) 制冷机：制冷机在冷冻水供水温度为 7 摄氏度，冷却水温度为 30 摄氏度的条件下的额定制冷量为 2Ton，额定功率为 1.6KW；

(2) 冷却水泵：冷却水泵的额定功率为 0.265KW，额定流量为 0.5kg/s；

(3) 冷却塔风扇：冷却塔风扇额定功率为 0.125KW，额定流量为 0.5kg/s；

制冷机、冷却水泵和冷却塔风扇均配有变频器，调速范围分别为额定转速的 35%-65%，0-50%，0-50%。系统的控制框图如图 5.2 所示：

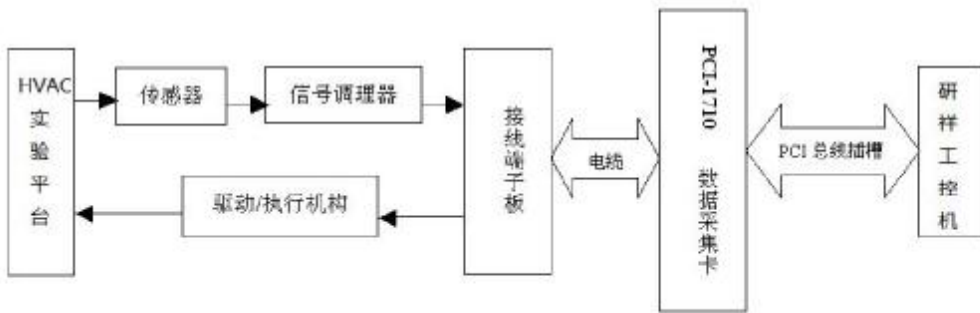


图 5.2 基于 PCI-1710 板卡的控制系统框图  
Fig.5.2 System chart of PCI-1710 system

由于实验平台提供的工控机是研华系列，该系列是可以与 Matlab 软件兼容并行的。然而由于 Matlab 中的 Real-Time-Windows-target 工具箱里的 Real-Time kernel 是可以保证在实时模式下对系统信息采集与传输控制。因此可以利用它对输入信号进行实时采集、并可运行程序做得对系统的实时控制以及在线实现调试。选用 Real-Time-Windows-target 工具箱和研华 PCI1710 数据采集板卡同时完成对暖通空调系统实验平台的实验数据的实时的采集以及制冷系统的控制。

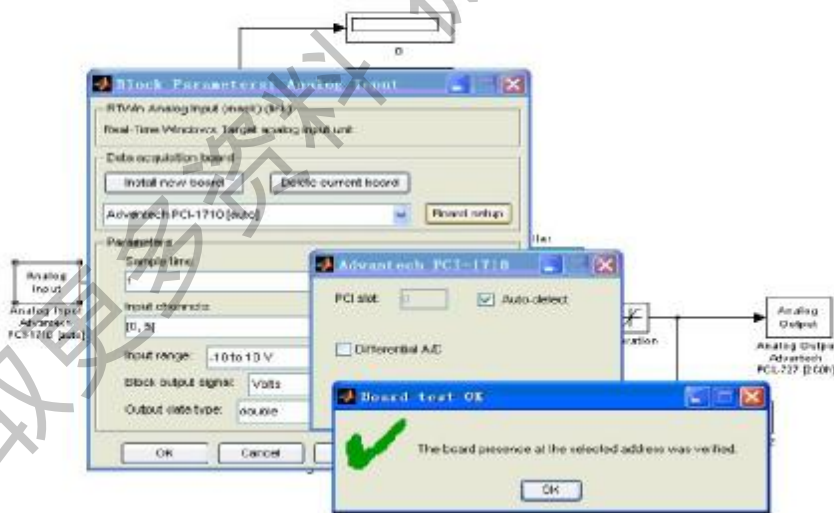


图 5.3 多功能板卡 PCI-1710 的安装与设置  
Fig.5.3 Multifunctional Card PCI-1710 Install and Setting

为将 matlab 与研华系统兼容使用，需要按照以下图示对仿真的参数进行设置。修改工具栏中“Simulation”项，选择“Configuration Parameters”选项，并将对话框

选择到 Solver 栏下把“Solver options”中的 Type 更改为 Fixed-step（如图 5.4）。然后将“Hardware Implement”选项中的“Device type”选为“32-bit Real-Time Windows Target”（如图 5.5）。

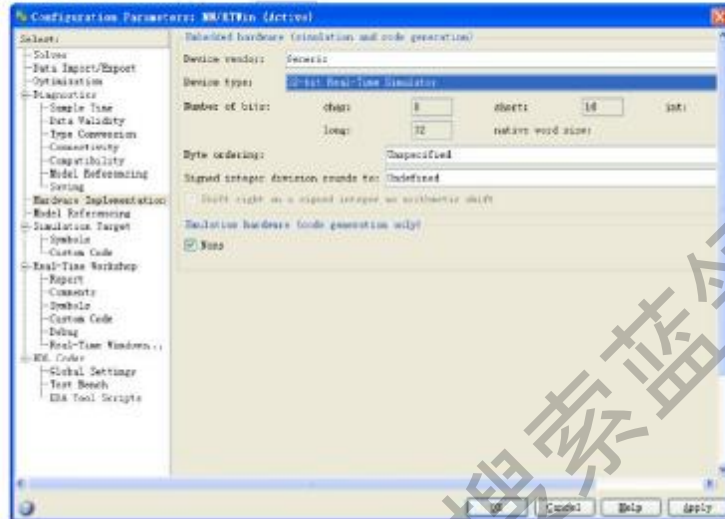


图 5.4 参数设置 (a)

Fig. 5.4 Parameter Setting (a)

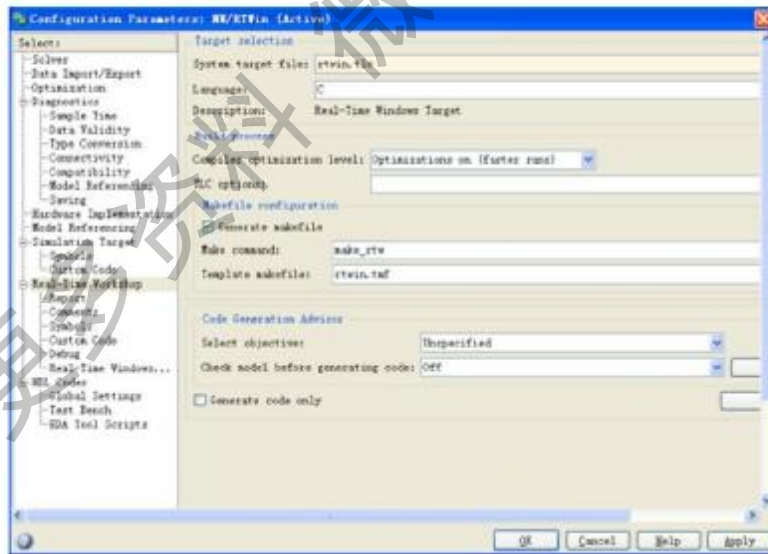


图 5.5 参数设置 (b)

Fig. 5.5 Parameter Setting (b)

## 5.2 基本鱼群算法与改进鱼群算法的比较

中央空调制冷系统的能耗与冷负荷，冷冻水供水温度和环境湿球温度有关。环境湿球温度对冷却塔的散热效率具有较大的影响，同时冷冻水供水温度的变化会改变制冷机的制冷效率。下面将分别以炎热的夏天、人体感觉舒适的夏天和凉爽的夏天三种情况对中央空调制冷系统进行优化。

(1) 首先模拟炎热的夏天，冷负荷为额定负荷的 60%，环境湿球温度为 26℃时，分别用基本人工鱼群算法和改进后的人工鱼群算法对中央空调制冷系统进行优化，如图 5.6，5.7 所示。

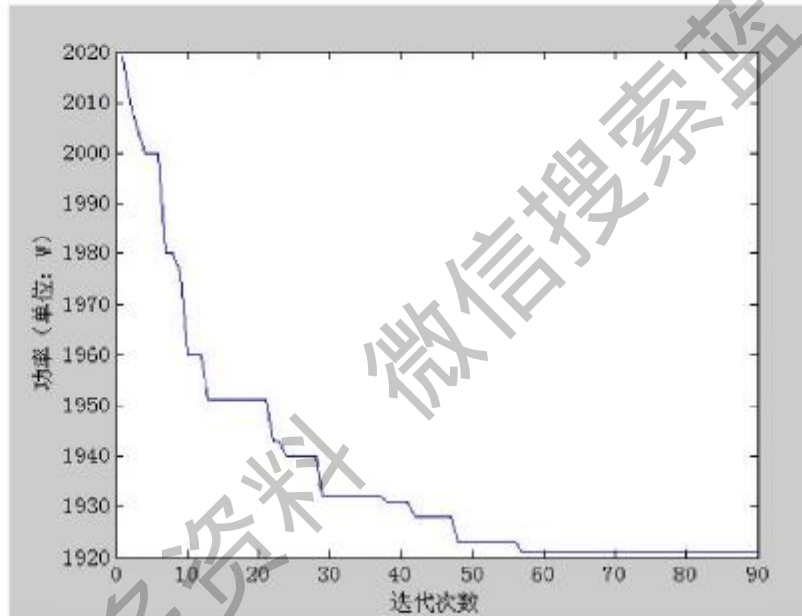


图 5.6 情况 (1) 下基本人工鱼群算法功率优化曲线

Fig 5.6 Power optimization curve of basic artificial fish algorithm condition (1)

由图 5.6 可知基本人工鱼群算法在第 57 次迭代后达到了稳定值，即最优值 1921W。

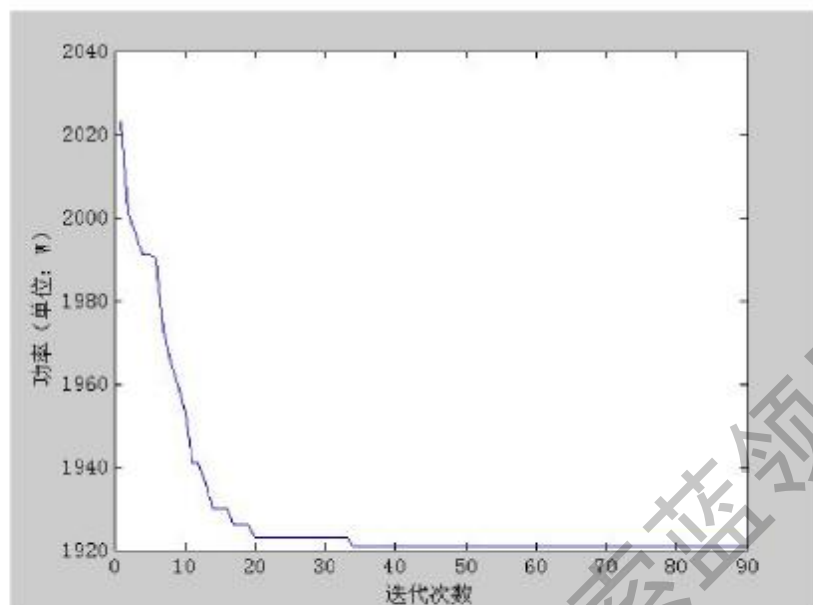


图 5.7 情况 (1) 下改进人工鱼群算法功率优化曲线

Fig.5.7 Power optimization curve of improved artificial fish school algorithm condition (1)

由图 5.7 可知改进人工鱼群算法在第 33 次迭代后达到稳定, 即最优值为 1921W。

图 5.6 与图 5.7 比较可得, 改进的人工鱼群算法比基本的人工鱼群收敛速度快, 精度高, 当冷负荷为额定负荷的 60%, 环境湿球温度为 26℃时, 中央空调制冷系统的最低能耗值为 1921W, 此时的冷却水的供水温度为 39.3℃, 冷却水的供水温度为 7.4℃, 冷却水泵的流量为 0.34Kg/s, 冷却塔风扇流量为 0.36Kg/s。

(2) 其次模拟舒适的夏天, 冷负荷为额定负荷的 50%, 环境湿球温度为 24℃时, 分别用基本人工鱼群算法和改进后的人工鱼群算法对中央空调制冷系统进行优化, 如图 5.8, 5.9 所示。

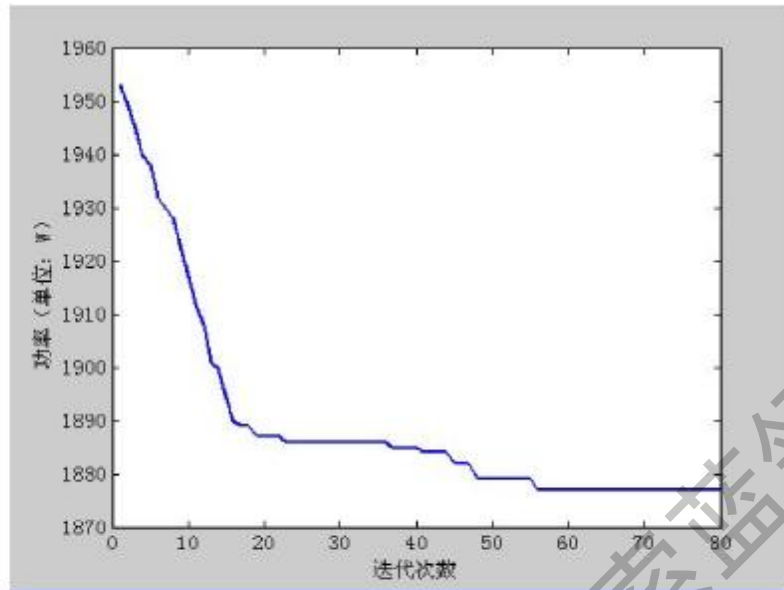


图 5.8 条件 (2) 下基本人工鱼群算法功率优化曲线

Fig 5.8 Power optimization curve of basic artificial fish algorithm condition (2)

由图 5.8 可知基本人工鱼群算法在第 56 次迭代后达到了稳定值，即最优值 1877W。

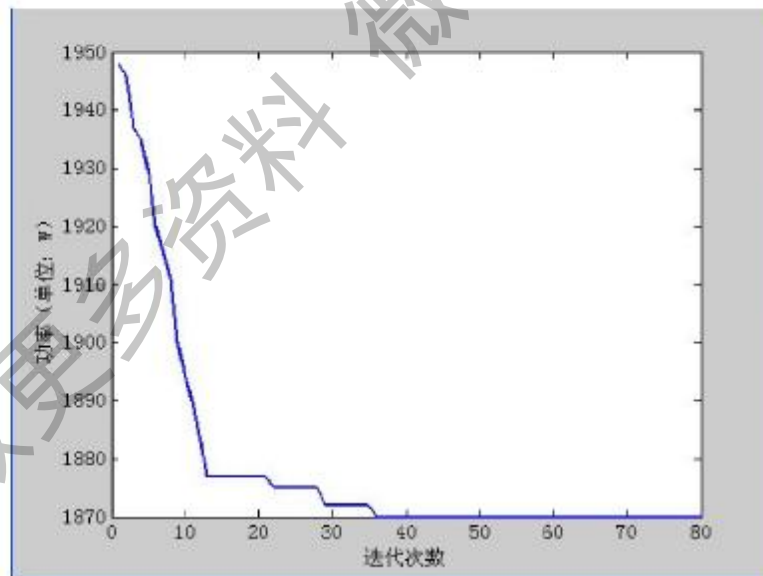


图 5.9 条件 (2) 下改进的人工鱼群算法功率优化曲线

Fig.5.9 Power optimization curve of improved artificial fish school algorithm condition (2)

图 5.8 与图 5.9 比较可得,改进的人工鱼群算法比基本的人工鱼群收敛速度快,精度高,当冷负荷为额定负荷的 50%,环境湿球温度为 24℃时,中央空调制冷系统的最低能耗值为 1870W,此时的冷却水的供水温度为 35.7℃,冷冻水供水温度为 7.9℃,冷却水泵的流量为 0.21Kg/s,冷却塔风扇流量为 0.33Kg/s。

(3) 再次模拟凉爽的夏天,冷负荷为额定负荷的 40%,环境湿球温度为 22℃时,分别用基本人工鱼群算法和改进后的人工鱼群算法对中央空调制冷系统进行优化,如图 5.10, 5.11 所示。

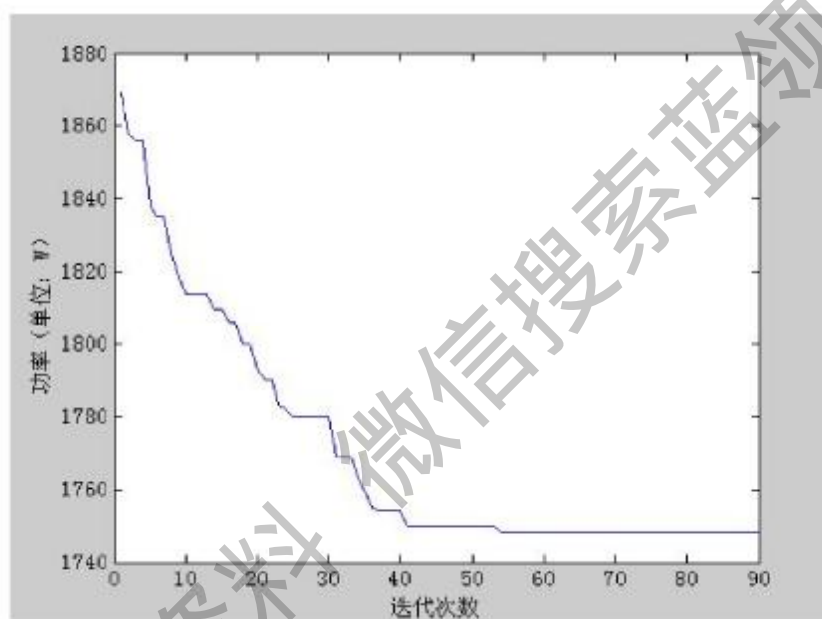


图 5.10 条件 (3) 下基本鱼群算法功率优化曲线

Fig. 5.10 Power optimization curve of improved artificial fish school algorithm condition (3)

由图 5.10 可知基本鱼群算法在第 53 次迭代后达到稳定,即最优值为 1744W。

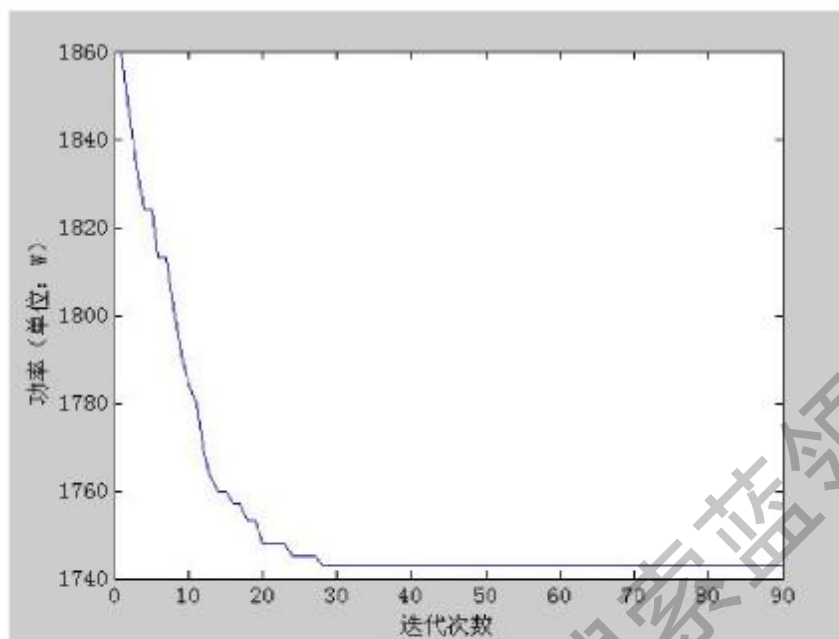


图 5.11 条件 (3) 下改进人工鱼群算法功率优化曲线

Fig.5.11 Power optimization curve of improved artificial fish school algorithm condition (3)

由图 5.11 可知改进人工鱼群算法在第 28 次迭代后达到稳定, 即最优值为 1742W。图 5.10 与图 5.11 比较可得, 改进的人工鱼群算法比基本的人工鱼群收敛速度快, 精度高, 当冷负荷为额定负荷的 40%, 环境湿球温度为 22℃时, 中央空调制冷系统的最低能耗值为 1742W, 此时的冷却水的供水温度为 28.4℃, 冷冻水供水温度为 8.6℃, 冷却水泵的流量为 0.13Kg/s, 冷却塔风扇流量为 0.27Kg/s。

### 5.3 改进鱼群算法与改进粒子群算法的比较

下面将分别不同环境对中央空调制冷系统进行优化, 改进的粒子群算法的数据是来自前几届师兄的课题中, 数据对比见表格 5.1。



表 5.1 算法对比

Table 5.1 Comparing algorithm

工况	算法	迭代次数	最优值 (W)
Q=60%Q <sub>can</sub> , $T_{cws}=7.3$ $T_{ws}=26$	改进鱼群	30	1921
	改进粒子群	38	1921
Q=60%Q <sub>can</sub> , $T_{cws}=7.1$ $T_{ws}=26$	改进鱼群	33	1913
	改进粒子群	35	1921
Q=40%Q <sub>can</sub> , $T_{cws}=8.5$ $T_{ws}=22$	改进鱼群	27	1755
	改进粒子群	31	1744
Q=40%Q <sub>can</sub> , $T_{cws}=8.6$ $T_{ws}=22$	改进鱼群	28	1742
	改进粒子群	32	1744

由表 5.1 可知改进人工鱼群算法的收敛速度明显比改进的粒子群算法快, 并且对冷冻水的供水温度收敛精度比改进的粒子群算法要好。

#### 5.4 本章小结

本章将改进人工鱼群优化算法通过 MATLAB 仿真程序实现了对中央空调制冷系统的优化, 通过对不同外界环境情况下分别对中央空调制冷系统能耗进行分析, 由仿真后得出的结果图可以看出, 运用改进人工鱼群优化算法优化中央空调制冷系统相比基本人工鱼群优化效果更加明显, 节约时间且节省了大量的能量。

## 第 6 章 结论

近年来,随着中国对节能减排以及环保的重视,人们不断的加深了对能源危机的了解和认识,低碳已经逐渐成为国家生产和人民日常生活的关键词。随着全世界各种能源的紧缺、环境的日渐恶化以及国内中央空调使用量的增加,降低中央空调的能耗成为楼宇节能的一个至关重要的课题。由此可见中央空调的节能对于推动“低碳化”进程的重要性。

本文通过了解中央空调制冷系统基本工艺流程,掌握制冷系统各个关键设备的耗能特性,以此确定影响制冷系统能量消耗的关键变量,然后利用最小二乘法建立了制冷系统以及与其相关的制冷机、冷却水泵和冷却塔风扇的静态模型,最后确定了制冷系统的能耗优化目标,通过对目标函数约束条件的规范,能够满足实际情况的要求。

对于基本人工鱼群算法无法直接应用到优化连续目标函数且极易陷入局部最优的缺点,提出了改进的人工鱼群优化算法,主要改变了视野与步长的大小,成功避免了搜索过程中出现停滞现象,加快了收敛速度和收敛精度。解决了中央空调制冷系统各个关键变量的优化问题。

此外,本文根据实验室制冷系统设备所建立的数字模型,基于 MATLAB 进行了仿真实验,为了证实算法的高效性,在不同环境条件和负荷条件下,进行了仿真分析,同时将改进人工鱼群优化算法与基本的人工鱼群优化算法进行比较,并且将改进人工鱼群算法与改进粒子群算法比较,实验结果证明,本文改进后的人工鱼群优化算法在搜索速度和精度上有了很大程度上的提升,成功地避免了容易产生陷入局部极值点,收敛速度慢收敛精度低的缺点,得到了非常令人满意的结果,用实验数据说明了此算法具有实际的工程意义。

## 参考文献

- [1] 国务院《能源发展“十二五”规划》，2013。
- [2] 孙成. 制冷与可持续发展[J]. 制冷学报, 2003, (01): 22-26.
- [3] 沈和荣. 中央空调水系统变流量节能控制技术[C]. 全国暖通空调制冷 2000 年学术年会资料集, 2000. 10.
- [4] Moreira V D, Do A, Wagner C. A new approach for robust model Predictive control with an application to an air-conditioning system Mechanical Engineering[J].ACC,2005, (2): 37-44
- [5] Ito Y M, Yoshikieta B F. Next generation HVAC system. Proceeding of the SICE Annual Conference[J], Proceeding of SICE Annual Conference 2008, International Conference on Instrumentation, Control and Information Technology. 2008, 4(3): 2223-2228
- [6] Komareji M K. Optimal model-based control in HVAC system[J].Proceedings of the American Control Conference, 2008 American Control Conference, 2008, 6(5): 1443-1448.
- [7] Komareji K R. Optimal set-point synthesis in HVAC system[J].Proceedings of the American Control Conference, Proceedings of the 2007 American Control Conference, 2007, 4(3): 5076-5081.
- [8] Lv H L., Juan P Y., Jia L. One novel fuzzy controller design for HVAC system[J]. Chinese Control and Decision Control, , 2008, 2(5): 2071-2076.
- [9] 曾韶向. 中央空调节能技术分析探讨[J]. 制冷与空调(四川), 2013, 15(01): 45-48.
- [10] Dong L, Yan J D, Yong L, Tian S G, Xu Z W. Study on a novel thermally driven air conditioning system with desiccant dehumidification and regenerative evaporative cooling[J].Building and Environment, 2010,2(4): 2473-2484.
- [11] 吴俊峰. 中央空调系统节能测量与验证方法分析[J]. 制冷与空调, 2013, 7(09): 78-83.
- [12] 邓禄寿. 中央空调风系统节能研究[J]. 制冷与空调(四川), 2013, 12(03): 244-248.
- [13] Stefano B A. Performance analysis of a liquid desiccant and membrane contactor hybrid air-conditioning system [J].Energy and Buildings, 2010, 6(7): 1976-1986.
- [14] 于秋红. 中央空调变流量节能控制系统研究[J]. 制冷与空调, 2012, 21(04): 33-39.
- [15] Mohamed E. H, Abdulla K. N. A Simulation Model to Determine Energy Savings in an Air Conditioning Office Building Procedia Engineering[J].ACC. 2011,3(10): 298-304.
- [16] 马志龙. 中央空调全局能耗优化控制研究[J]. 现代建筑电气, 2012, 7(08): 62-68.
- [17] 李明海. 中央空调水系统的优化控制设计[J]. 电机与控制应用, 2012, 17(05): 54-57.
- [18] Ji F J, Jiang P O, Zhi J O. Development and validation of a microchannel evaporator model for a CO<sub>2</sub> air-conditioning system Applied Thermal Engineering[J].CDCC,2011,14(10): 137-146.
- [19] 陈文勇. 基于粒子群优化算法的复杂大群体评价方法[J]. 系统工程, 2003, 22(04): 67-71.
- [20] 朱瑞琪, 杨亮, 景茂杰. 以压缩机排气温度为控制参数的电子膨胀阀流量控制系统研究[C]. 中国制冷学会、中国制冷空调工业协会. 第九届全国冷水机组与热泵技术学术会议论文集, 中国制冷学会、中国制冷空调工业协会, 1999: 4.

- [21] Zhao T Y, Zhang J L, Ma L D. On-line optimization control method based on extreme value analysis for parallel variable-frequency hydraulic pumps in central air-conditioning systems [J]. Building and Environment, 2012, 03(11): 330-338.
- [22] 陈姗姗. 中央空调水系统节能设计[J]. 现代建筑电气, 2011, 19(10): 88-94.
- [23] Zaheer G M, Patel. The design and simulation of a sub-optimal controller for space heating[J]. ASHRAE Transaction, 1993, 98(1): 1024-1031.
- [24] MacArthur J W, Woessner M A. Receding horizon control: A model-based policy for HVAC applications[J]. ASHRAE Transactions, 1993, 99(1): 139-148.
- [25] House J M, Smith T E, Arora J S. Optimal control of a thermal system[J]. ASHRAE Transactions, 1991, 97(2): 991-1001.
- [26] Zheng G R, Zaheer G M. Optimization of thermal processes in a variable air volume HVAC system Energy[J]. ACC, 1996, 21(5): 107-120.
- [27] Austin S B. Chilled water system system optimization[J]. ASHRAE Journal, 1993, 35(7): 50-56.
- [28] Nassif N, Kaji S, Sabourin R. Optimization of HVAC control system strategy using two-objective genetic gorilhm[J]. HVAC&R Research, 2005, 11(3): 495-486.
- [29] 杨风久. 中央空调冷却塔循环水系统的优化控制[J]. 节能, 2010, 9(03): 15-19.
- [30] 冯志龙. 中央空调全局能耗优化控制研究[J]. 现代建筑电气, 2013, 12(08): 62-68.
- [31] 张长兴. 逆流式冷却塔换热性能的影响因素[J]. 能源工程, 2013, 9(01): 17-20.
- [32] 侯雪梅. 基于群智能的模糊多目标软件可靠性冗余分析[J]. 计算机应用, 2013, 10(04): 1142-1145.
- [33] 苗良东. 一种群模式全局搜索算法[J]. 模式识别与人工智能, 2011, 7(05): 592-597.
- [34] 梅小华. 利用改进的遗传算法优化产品性能参数模型[J]. 自动化仪表, 2013, 5(03): 17-20.
- [35] 边霞. 遗传算法理论及其研究进展. 计算机应用研究[J], 2010, 9(07): 2425-2429-2434.
- [36] 徐定杰. 基于自适应遗传算法的DGPS 整周模糊度快速解算[J]. 航空学报, 2013, 4(02): 371-377.
- [37] 姜代红. 改进的遗传算法在多目标物流配送路径中的应用[J]. 科学技术与工程, 2013, 14(03): 762-765.
- [38] 李学, 张超, 徐银明. 基于专用遗传算法和改进粒子群算法的移动机器人路径规划[C]. 中国自动化学会控制理论专业委员会、中国系统工程学会第三十一届中国控制会议论文集D卷, 中国自动化学会控制理论专业委员会 (Technical Committee on Control Theory, Chinese Association of Automation)、中国系统工程学会 (Systems Engineering Society of China): 2012: 6.
- [39] 李学, 张超, 陈鹏, 尹怡欣. 一种基于粒子群参数优化的改进蚁群算法[J]. 控制与决策, 2013, 14(06): 873-878+883.
- [40] 陈志敏. 基于自适应粒子群优化的新型粒子滤波在目标跟踪中的应用[J]. 控制与决策, 2013, 16(02): 193-200.
- [41] 刘宝宁. 一种改进的多目标粒子群优化算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 10(04): 458-462+473.
- [42] 卢锦玲. 基于改进多目标粒子群算法的含风电场电力系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 9(17): 25-31.

- [43] 倪春波. 粒子群优化及其在多机器人系统中的应用展望[C]. 中国自动化学会智能自动化专业委员会, 2013 年中国智能自动化学术会议论文集(第五分册). 中国自动化学会智能自动化专业委员会: 2013: 7.
- [44] 宋锦娟. 基于改进蚁群算法的最短路径问题研究及应用[J]. 数学的实践与认识, 2013, 6(03): 156-164.
- [45] 申该京. 求解 TSP 问题的快速蚁群算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2013, 3(01): 147-151.
- [46] 曹庆奎. 基于遗传蚁群算法的港口集卡路径优化[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 1(07): 1820-1828.
- [47] 童孟军, 关华丞. 基于蚁群算法的能量均衡多路径路由算法的研究[J]. 传感技术学报, 2013, 5(06): 425-434.
- [48] 李晓磊. 一种新型的智能优化方法-人工鱼群算法[J]. 浙江: 浙江大学, 2003.
- [49] 彭懿, 李丽娟. 人工鱼群算法用于桁架结构优化设计[C]. 中国土木工程学会桥梁及结构工程分会空间结构委员会. 第十四届空间结构学术会议论文集. 中国土木工程学会桥梁及结构工程分会空间结构委员会: 2012: 5.
- [50] 杨景明, 许爽, 车海军, 赵志伟. 基于改进人工鱼群算法的地铁轻轨制式优化[C]. 中国自动化学会控制理论专业委员会、中国系统工程学会. 第三届中国控制会议论文集(B卷). 中国自动化学会控制理论专业委员会、中国系统工程学会: 2013: 6.
- [51] 彭勇. 基于改进人工鱼群算法的梯级水库优化调度[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 8(06): 1118-1125.

## 在学研究成果

[1] 王亮, 李树江, 王向东. 基于人工鱼群优化算法的中央空调制冷系统优化研究. 电气开关, (已录用待发表). 属于论文第四部分内容

获取更多资料 微信搜索蓝领星球

## 致谢

本课题是在李树江院长和王向东教授的悉心指导和大力帮助下完成的。在整个课题的研究设计期间，王老师每周至少给我们开一次讨论会，虽然李院长工作繁忙，但还是时刻了解帮助我们解决在课题研究阶段遇到的各种问题。李院长和王老师学识渊博、治学严谨，在学术探讨时一直都是耐心、认真听取我们的想法、思路，不断纠正我们错误观点，鼓励创新想法，带领我们一起进步。整个研究生期间，李院长和王老师以下直、认真、负责的态度深深地影响着我，不仅是我研究生阶段的老师，更是我人生不断学习的榜样。

我还要特别感谢李树江院长，为我提供了特别好的出差时间机会，不仅让我学到了颇多的程实践经验还学到了为人处事，为我的以后生活奠定了坚实的基础使得研究生生活更加充实。还要感谢所有自动控制与系统工程教研室老师王艳红老师、于红霞老师、陈丽老师、张全老师、孙平老师、崔宝霞老师。

感谢所有为我提供过帮助，伴随我开心度过研究生两年半时光的实验室小伙伴们，谢谢你们，为我营造了良好的学习氛围，我们一同探讨问题，相互鼓励，共同进步着。有了你们，让我的生活如此充实、美好。

我还要感谢我的父母以及家人，感谢他们这么多年来对我的支持鼓励、默默奉献，让我一步一步成长、成熟，更加从容自信乐观地面对明天。谢谢你们！

我还想感谢国明师兄在研究生期间对我工作的支持和帮助，祝你早生贵子，家庭幸福。感谢肖薇同学在研究生期间对我学习的帮助与鼓励，祝你早日结婚，身体健康。同时还要感谢我的师弟李明烨同学，希望你再接再厉，在工作和学习上更上一层楼。

最后向所有关心我给过我帮助的人致以真诚地谢意！