

分类号: TP273

密 级: 公开

UDC: _____

单位代码: 10142

信阳工业大学

硕士学位论文

论文题目: 中央空调制冷系统的优化及软件开发



学 号: 2006377

作 者: 孟明

学 科 名 称: 系统工程

2008年12月15日

沈阳工业大学硕士学位论文

论文题目： 中央空调制冷系统的优化及软件开发

作者： 孟明

指导教师： 李树江 教授 单位： 沈阳工业大学

协助指导教师： _____ 单位： _____

_____ 单位： _____

论文提交日期： 2008 年 12 月 15 日

学位授予单位： 沈阳工业大学

获取更多资料 微信搜索 蓝领星球

A Dissertation Submitted to Shenyang University of Technology for
the Master Degree

**OPTIMIZATION CONTROL SOFTWARE
DEVELOPMENT FOR HEATING VENTILATING
AND AIR-CONDITIONING SYSTEM**

Author: Meng Ming

Major: Systems Engineering

Supervisor: Professor Li Shujiang

School of Information Science and Engineering

Shenyang University of Technology

Shenyang, P.R.China

December 15, 2008

独创性说明

本人郑重声明：所呈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： 孟明 日期： 2009.2.25

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： 孟明 导师签名： 李林 日期： 2009.2.25

摘 要

建筑能耗已与工业能耗、交通能耗并列,成为我国能源消耗的三大“耗能大户”。建筑能耗约占全社会总能耗的 30%,其中暖通空调系统能耗占建筑能耗的 60%左右。由于暖通空调系统是按照能够满足用户额定负荷设计的,按额定负荷设计的定工作点运行方式,是造成空调系统能效比低的关键问题,因此对于暖通空调系统的优化研究具有重要意义。

制冷机是由冷却水回路和冷冻水回路通过压缩机和冷媒回路卡诺循环,构成的复杂热交换系统,是空调系统最大能耗设备,约占系统能耗的 50%,如何使制冷能力与实时变化的负荷最佳匹配是节能的关键问题。

本文通过分析空调制冷系统运行的工艺过程及主要能耗设备制冷机的能耗和不同应用对象特性,分别采用最小二乘法和网格建模法,根据冷冻水供水温度和冷却水供水温度及冷负荷,建立制冷机的能耗模型;根据网格搜索寻优法、多项式法及改进的粒子群算法,针对不同能耗模型和应用特点,及暖通空调整个系统优化要求的冷冻水的温度和负荷的约束条件,完成了对具有非线性、多变量、强耦合特性的空调制冷系统的优化,解决了制冷系统控制回路工作点在线优化设定问题。在此基础上,基于 Visual C++ 及 SQL Server 2000 数据库技术,开发出了在线优化中央空调制冷系统工作设定点的软件包。

通过实验数据验证,结果表明:运用上述两种建模方法建立的制冷机能耗模型都能较好的反映制冷机的能耗特性;同时系统在不同负荷、运行工况及初始条件下,运用上述三种优化方法都能实现对冷却水供水温度、冷却水流量和冷却塔空气流量的在线优化,使制冷能力与负荷得到最佳的匹配,实现制冷系统的节能。

关键词: 中央空调, 优化, 粒子群算法, 软件开发

Optimization Control Software Development for Heating Ventilating and Air-conditioning System

Abstract

At present, the building energy consumption, along with industrial energy consumption and transport energy consumption, has become the energy consumption of the top three "energy-hungry". The building energy consumption accounts for about 30% of total energy consumption, of which HVAC energy consumption accounts for about 60%. In general, the design of HVAC system is based on the assumption that the system works on the rated loads which satisfies the rated load of the customers. The operation mode of fixed-point of work which is designed by the rated load is the key problem of causing the low EER (Ratio of Energy and Efficiency) of HVAC. It was a major problem about how to optimize HVAC system.

Chiller is a complex heat exchange system, which is composed by the chilled water loop and cooling water loop through the Carnot cycle of compressor and Refrigerant circuit. The energy consumption of the chiller is the largest energy consumption equipment of HVAC, which is about 50 percent of the whole system. The key problem of reducing energy consumption is how to make the refrigeration capacity and the load of real-time changes match the best.

In this paper, according to the operating process, the chiller's characteristics of energy consumption of various devices, the characteristics of different application object, chilled water supply temperature, cooling water supply temperature and cooling load, the energy consumption model of chiller are set up with the Least Square Method and the Grid modeling method. According to the different characteristics of energy consumption model and the application, chilled water temperature and load constraints for the HVAC, the optimization problem of HVAC refrigeration system with characteristics of non-linear, multivariable and strong coupling is completed by the grid search optimization method, polynomial method and the improved particle swarm optimization, which solves the optimization problem of work point. The software of optimize and control the work point of HVAC refrigeration on-line is developed on the basis of Visual C++ and SQL technology.

Through verifying by the actual data, the experimental results show that the above two models can reveal the characteristics of energy consumption of chiller clearly. at the

same time, all of the above three methods can achieve the objective that the work point optimization of condenser supply water temperature, condenser water supply flow, and cooling tower air flow on-line on HVAC refrigeration system at different loads, operating conditions and initial conditions. It achieves the goal of the refrigeration capacity and the load of real-time changes match the best, and the goal of reducing the energy consumption of HVAC refrigeration system.

Key Words: HVAC, Optimation, Particle Swarm Optimization, Software Development

获取更多资料 微信搜索 蓝领星球

目 录

摘 要	I
Abstract	II
第一章 绪论	1
1.1 课题研究的背景和意义	1
1.2 中央空调系统的原理及空调制冷系统运行工艺过程	1
1.2.1 中央空调系统的原理	2
1.2.2 空调制冷系统运行的工艺过程	3
1.3 国内外研究现状	4
1.4 本文研究的内容和方法	7
第二章 粒子群优化算法	9
2.1 粒子群算法思想的起源	9
2.2 原始粒子群优化算法	10
2.2.1 算法原理	10
2.2.2 算法的数学描述	11
2.2.3 算法参数	12
2.2.4 算法流程	12
2.3 粒子群算法的特点及与其他算法的比较	13
2.4 粒子群算法的改进	14
2.5 本章小结	16
第三章 VC++6.0 及数据库技术	17
3.1 VC++6.0 技术	17
3.2 数据库技术	18
3.2.1 关于 SQL 数据库	19
3.2.2 SQL Server 2000 的特点	19
3.2.3 数据库的连接	20
3.3 Visual C++6.0 开发数据库	21
3.3.1 Visual C++6.0 开发数据库技术的特点	21
3.3.2 用 MFC 来创建 ODBC	22
3.4 本章小结	23

第四章 空调制冷系统优化方法的研究及优化软件的开发	24
4.1 空调制冷系统的建模	24
4.1.1 制冷机多项式能耗模型	24
4.1.2 制冷机网络能耗模型	25
4.2 空调制冷系统优化方法的研究	27
4.2.1 多项式优化方法	27
4.2.2 网格搜索寻优法	29
4.2.3 死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的优化方法	30
4.3 空调制冷系统优化软件的开发	32
4.3.3 制冷系统建模模块软件开发	32
4.3.4 制冷系统优化模块	36
4.3.5 优化结果图形显示模块软件开发	40
4.4 本章小结	41
第五章 实验与分析	42
5.1 空调制冷系统优化结果比较	43
5.1.1 环境湿球温度发生改变	43
5.1.2 冷冻水供水温度发生改变	53
5.1.3 冷负荷发生改变	62
5.2 一个制冷周期的能耗比较	72
5.3 本章小结	74
第六章 结论	75
参考文献	77
在学研究成果	80
致 谢	81

第一章 绪论

1.1 课题研究的背景和意义

制冷技术的发展水平是衡量一个国家国民经济和人民生活水平的重要标志之一。随着科学技术的飞速发展，工农业生产水平的提高，人民生活的改善，制冷行业获得了极其迅猛的发展。但长期以来我国经济增长仍然是以高消耗和高污染为代价的粗放型经济增长模式为主。以往资料表明，我国总能源利用率仅为 40%，这相当于欧美日发达国家六、七十年代的水平。制冷行业是国民经济中几大能耗行业之一，制冷装置的能耗在我国总能耗中的比重还在逐年上升^[1]。

目前，建筑能耗已与工业能耗、交通能耗并列，成为我国能源消耗的三大“耗能大户”。建筑能耗约占全社会总能耗 30%，其中暖通空调系统能耗占建筑能耗的 60%。又中央空调制冷系统的能耗约占空调系统总能耗的 50%，且空调系统是按最大负荷设计的，但实际空调系统在全年的绝大多数时间是在部分负荷下运行，即空调制冷系统大部分时间都在低于额定容量的工作状态下运行，这时的热效率远低于额定负荷下的运行效率，致使大量的能源被浪费掉^[2]。因此，降低中央空调制冷系统的能耗已经成为缓解我国能源紧张的一个重要途径^[3]，同时也是实施我国经济和社会可持续发展战略的一项重要内容^[4]，也是摆在从事制冷行业这一工作人员面前的一个重大课题。

本课题根据沈阳市科技局攻关计划《暖通空调优化控制技术节能产品开发》(编号: 1053084-2-05) 研究中央空调制冷系统的优化及软件开发，寻找出中央空调制冷系统合适的建模和优化方法，对制冷系统进行优化，并运用 VC++ 和 SQL 数据库技术进行空调制冷系统优化软件的开发。

1.2 中央空调系统的原理及空调制冷系统运行工艺过程

随着我国经济的不断发展，中央空调系统的广泛应用，在为人们提供舒适生活环境的同时，空调能耗也成为建筑能耗的大户。据统计，空调制冷系统的能耗约占空调总能耗的 50%，空调制冷系统的低效运行是系统高能耗、缺乏经济性的主要原因。因

此，本章将详细分析空调制冷系统运行的机理，寻找提高制冷系统运行效率的方法。

1.2.1 中央空调系统的原理

本课题研究的中央空调系统的原理如图 1.1 所示，该系统是应用最广的、热效率最高的、以水作为载冷剂的、冷源为冷水机组的中央空调系统。其中该系统中的空调制冷系统主要由制冷机组、冷冻水泵、冷却水泵和冷却塔等组成。该系统的工作原理是制冷剂在制冷机组的蒸发器中气化吸收冷冻水的热量，从而使载冷剂——冷冻水的温度降低，然后，在蒸发器中被气化的制冷剂经制冷机组的压缩机时被压缩成高温高压的气体，当高温高压的制冷剂流经冷凝器时被来自冷却塔的冷却水冷却变成低温高压的气体，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，而后再在蒸发器中气化，完成一次卡诺循环。通过不断的卡诺循环，制冷剂不断的输送冷量到空气处理单元，同时，制冷机组产生的热量不断的被冷却水带走，在流经冷却塔时散发到环境的空气中。

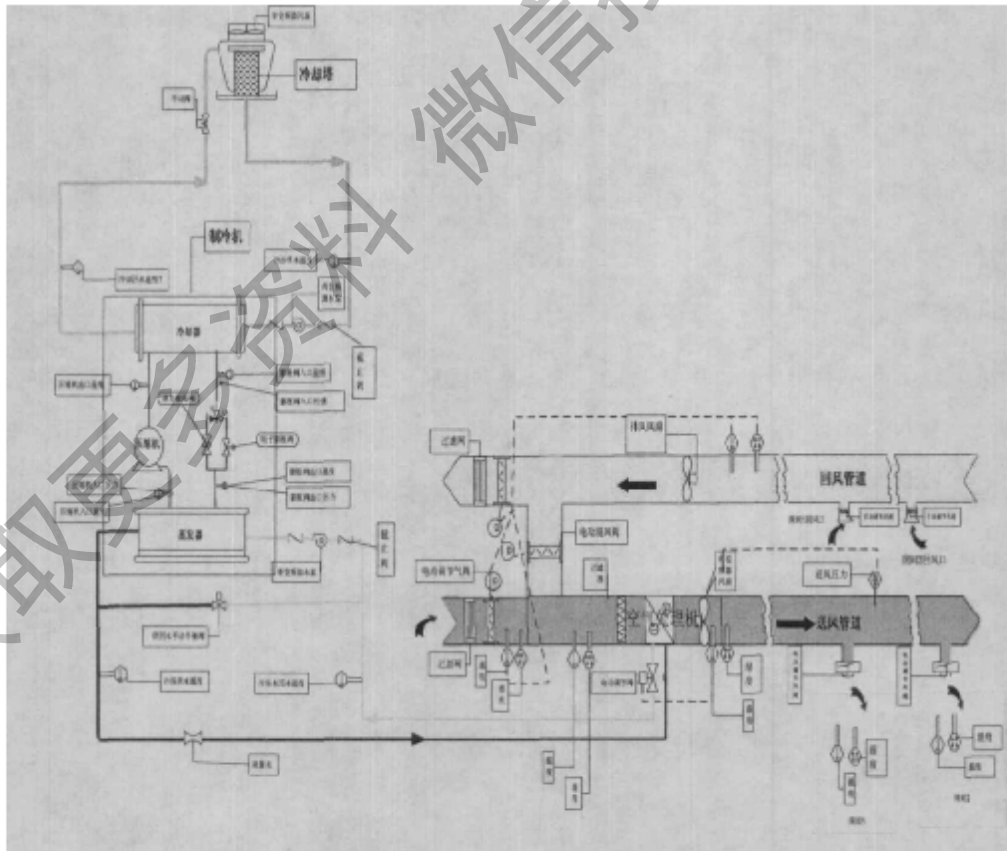


图 1.1 中央空调系统原理

Fig.1.1 Principle of HVAC system

1.2.2 空调制冷系统运行的工艺过程

(1) 冷却塔散热过程

冷却塔的热量与质量传递如图 1.2 所示:

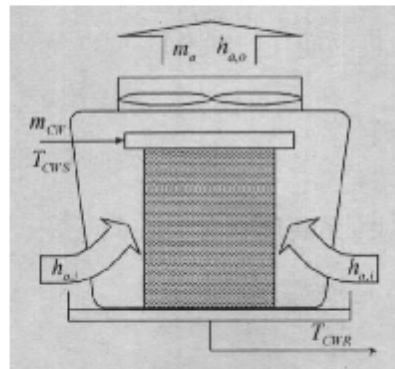


图 1.2 冷却塔中的热量和质量传递

Fig. 1.2 Heat and mass transfer of cooling tower

通过对冷却塔的工作原理及其传热机理进行了分析, 得到了适于工程应用的模型:

$$Q_{rej} = \frac{a_1 m_a^{a_1}}{1 + a_2 \left(\frac{m_w}{m_a} \right)^{a_2}} (T_{cws} - T_{wb}) \quad (1.1)$$

由(1.1)式可知, 影响冷却塔散热量(Q_{rej})的因素有: 空气的质量流量(m_a), 冷却水的质量流量(m_w), 冷却水供水温度(T_{cws}), 环境湿球温度(T_{wb})。将冷却水的供水温度和环境湿球温度看作常量, 在散热量一定的情况下, 减小空气质量流量可以降低风扇的能耗, 但水泵能耗随之增加; 反之, 风扇能耗增加。可见, 在散热量一定的情况下, 一定存在一个使得风扇和水泵能耗最小的最优工作点。若环境湿球温度变化, 冷却塔的散热能力也随之变化, 这会引起空气和冷却水的质量流量配合的变化, 进而使系统达到新的最优运行工作点。

(2) 冷却水循环系统

通过冷却水循环系统实现了制冷机和冷却塔之间相互影响。制冷机的能耗模型如下式:

$$P_{chiller} = \sum_i Q_{cap} \cdot COP_{nom} \cdot (PLR_{adj}) \cdot (Temp_{adj}) \quad (1.2)$$

这里,

$$PLR_{adj} = b_0 + b_1 \left(\frac{Q}{Q_{cap}} \right) + b_2 \left(\frac{Q}{Q_{cap}} \right)^2 \quad (1.3)$$

$$Temp_{adj} = c_0 + c_1 T_{CHWS} + c_2 T_{CHWS}^2 + c_3 T_{CWS} + c_4 T_{CWS}^2 + c_5 T_{CHWS} T_{CWS} \quad (1.4)$$

从模型可以看出, 制冷机的能耗与制冷量 (Q) 和冷冻水供水温度 (T_{CHWS}) 及冷却水供水温度 (T_{CWS}) 有关。可以通过降低冷却水供水温度来降低制冷机的能耗, 但此时增加了冷却塔的能耗。可见, 一定存在一个能使得制冷机和冷却塔能耗之和最小的最优运行工作点。空调制冷系统的优化是在满足空调风系统要求的制冷量的条件下, 系统能工作在能耗最小的最优工作点上。

1.3 国内外研究现状

(1) 空调制冷系统节能方法研究

空调制冷系统的节能研究方向有很多, 空调制冷系统节能的方法主要在以下几个方面进行:

1) 在建造方面采用合理的设计方案并正确的进行安装^[5], 以降低建筑物冷负荷的需求^[6]。

2) 采用变流量的空调制冷系统。由于空调水系统绝大部分时间内在部分负荷下运行, 空调制冷系统的冷冻水、冷却水变流量系统可使冷水机组在部分负荷下运行下带来显著的节能效果^[7]。

3) 提高空调制冷机组的工作效率^[8]。根据空调系统应用的实际的物理环境, 选择合适的制冷机组, 达到节能的目的。此外, 控制蒸发温度和冷凝温度也可以降低空调制冷系统的能耗^[9]。

4) 空调制冷系统及其部件的优化控制——即本文研究的方法。实际空调负荷在全年的绝大部分时间内远比设计负荷低, 绝大多数时间是在部分负荷下运行, 而且负荷率在 50% 以下的运行时间要占一半以上。可以通过改变系统的工作设定点而达到整个空调制冷系统运行的效率最高的目的, 实现空调制冷系统的节能。

5) 保证空调制冷系统的稳定性。制冷系统振荡对系统运行的经济性和安全性都是不利的, 所以保证制冷系统稳定性是系统配置和控制的必要条件^[10]。空调制冷系统

稳定性也是研究的一个方向。

6) 太阳能的应用。随着空调能耗的日益增大,太阳能在空调制冷领域的应用已成为现代空调制冷技术研究的热点和重要发展方向,在空调制冷领域将有广阔的应用前景^[11]。

7) 在大型中央空调系统中,采用多元化能源,可以减少用电负荷、平衡天然气的冬季用气负荷、减少污染、净化环境,降低系统的日常运行费用,具有显著的社会效益和经济效益^[12]。

8) 采用变流量压差控制的空调系统。采用基于阀门开度的变压差控制能最大限度地降低压差设定值,从而减少阀门的节流损失,因而具有更好的节能效果^[13]。

9) 采用冰蓄冷技术进行节能。方法是:在夜间电价低的情况下用电制冰,在白天利用冰溶解吸热的原理产生所需要的冷负荷,在不能满足冷负荷的需求时,利用制冷机组产生需要的冷负荷,即运用了用电高峰和用电低谷的电价差额来节约空调系统的运行费用。

(2) 中央空调系统优化控制的研究现状

早期中央空调系统中的控制主要用于满足负荷需要,而能耗是次要问题,因此那时的控制根本谈不上优化,比如冷机的启/停、性能调节等基本是手动的,也有气动装置。例如用手动或气动恒温器来保持冷却水的供水温度于某一特定温度范围内^[14]。二十世纪70年代的能源危机,使空调控制在满足负荷、保证系统稳定性的条件下开始注意节能,这时的空调控制也逐步开始向优化方向发展,比如,在系统中安装冷水温度设定重调装置、尽可能地提高冷冻水供水温度设定值以提高冷机效率^[15]。

从Braun88年以后,比较注重建模和参数辨识的方法研究,力求提高优化控制的稳定性和精度。B.A.Flake^[16]采用Braun的二次模型对某空调冷却系统进行优化控制研究,对模型中的参数预测方法进行了详细分析,分别采用一般最小二乘法、权重最小二乘法及Bayesian预测理对所有模型参数进行预测,并对预测结果给出评价,最后,文章作者采用退火法进行寻优计算,得出在折合费用最低时各控制变量的优化设定值。但文章作者没有考虑各部件的动态运行特性。Wang^[17]采用自适应性控制理论对某海水冷却空调系统进行了优化控制研究,采用基于物理模型的简单系统预测性数学模型和“带指数遗忘的小步长最小二乘法”参数辨识方法,进行能耗预测分析,取得较好效

果。随着直接数字控制器(DDC)、特别是能源管理控制系统(EMCS)的日益广泛化,优化控制得到了飞速发展。当今大型中央空调系统的控制通常由EMCS来完成,它包括低层次的局部控制和高层次的全局性控制。前者一般通过反馈控制(PID控制器)来实现和维持预先给定的各种设定值;而后者按照使整个系统运行能耗最低的目标来优化各控制变量、给出设定值及各种时变运行模式^[18-20]。

近年来,中央空调系统的优化控制问题受到了广泛的关注。Ito Yasuyuk^[21]等人提出了新一代的中央空调系统(Air-Water cooperation system)。本系统分别采用双线圈的空气处理单元和可变线圈来控制系统的送风和冷却水供水温度。系统能够根据天气状况和空调系统的负荷来改变系统的送风和冷却水温度,实现能源的节约。Komareji Mohammad^[22]等人建立了中央空调系统新的控制模型。这种控制模型由两个热交换器:空对空热交换器和水空热交换器组成。运用将中央空调分成两个子系统,为每个子系统选择合适的工作设定点和适当的成本函数的最优控制策略来实现系统的节能。实验结果表明,运用上述控制器和控制策略实现了系统节能的目标。Komareji Mohammad^[23]提出了中央空调最佳设定点合成的方法,实现了系统的节能。HongliLv^[24]等人提出将非线性模糊控制器应用于温度控制的HVAC系统。仿真实验结果表明,该模糊控制器是有效的;与常规PID控制相比,具有控制算法简单,收敛时间短和鲁棒性强等优点。

(3) 中央空调系统优化方法的研究现状

空调系统的优化方法的研究是系统优化重要方面。传统的优化方法一般分为解析法、搜索法及解析与数值计算相结合的方法。解析法是在判定了目标函数存在极小值的条件下,求其解析解的方法。这种方法的实用性不高,它要求目标函数具有简单明确的数学表达式,甚至要求目标函数一阶、二阶可导。搜索法是一种数值解法,它的基本思想是给定初始点,经过一系列的迭代以产生逐步接近最优点的点的序列(简称点列)。搜索法可以分为函数逼近法,区间消去法和爬山法等方法。主要有菲波纳奇法,黄金分割法、变量轮转法,步长加速法,方向加速法,单纯形法和随机搜索等。除此之外还有以梯度法为基础的数值计算法,即一种解析与数值计算相结合的方法。在所有需要计算梯度的优化方法中,最速下降法是最简单的,但在实际计算中收敛速度慢,易出现锯齿现象。运用传统优化算法解决空调制冷系统这样的复杂系统的全局

优化问题的求解,存在收敛速度慢,易陷于局部最优,且优化结果依赖于初始点的选取等缺点。

运用新型优化算法(遗传算法、进化规划算法、粒子群算法等)对中央空调系统进行优化成为研究的热点,K.F.Fong采用进化规划的方法对中央空调系统的优化进行研究^[25],LuLu运用遗传算法对中央空调水系统进行优化^[26]等。何厚键提出了采用遗传算法与复合型法相结合的混合遗传算法对中央空调系统进行优化^[27]。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:进化规划算法中选择变异算子较为困难;遗传算法在处理不同的最优化问题时,需要把“交叉”、“变异”重新设计,甚至开发新的进化操作并存在比较复杂,不易理解,效率较低的缺点。

PSO算法^[28]是最近出现的一种基于概率搜索的启发式优化算法,它属于群体智能类算法,因其简单有效,鲁棒性好,目前已成为优化算法的研究热点和前沿。与遗传算法和进化规划算法相比,PSO的优势在于简单容易实现同时又有深刻的智能背景,既适合科学研究,又特别适合工程应用。因此,粒子群算法值得我们引入具有高度非线性、部件之间有强烈的耦合关系的暖通系统的最优化控制研究中。

综上所述,前人在中央空调系统的优化控制的研究方面做出了很大的贡献。可以说在一定程度上克服了传统优化算法的缺点,其具有应用的通用性、非线性性及全局的优化性,可以引用这些方法对空调制冷系统进行优化控制。但是也存在着一一些问题:在空调制冷系统优化方法的选取上,目前所选用的算法具有收敛性差、寻优速度慢的缺点;对中央空调制冷系统优化控制的研究主要集中在系统仿真阶段,而没有开发出优化中央空调制冷系统的软件。

1.4 本文研究的内容和方法

从上述研究状况可知,我们对中央空调制冷系统节能优化的研究的主要工作在系统优化方法的选取上。在此之前,通过对中央空调制冷系统的分析,根据系统各个部分的能耗特性,需要建立能较好的反应空调系统各个设备的能耗模型。本文分别运用最小二乘法和网络建模方法建立了空调制冷系统主要能耗设备制冷机的能耗模型。同时采用了适于工程应用的网格搜索寻优方法和多项式法对空调制冷系统进行了优化。但是,传统的优化方法在解决中央空调制冷系统这种非线性、强耦合的复杂问题时,存在收敛速度慢、易陷入局部最优的缺点,这给中央空调制冷系统的优化带来了较大

的困难。新型优化算法的迅速发展,尤其是结构简单,收敛速度快的粒子群算法的出现为中央空调制冷系统的在线优化提供了算法支持,只要能够根据中央空调系统的能耗特点构造出合适的优化算法就能够解决中央空调制冷系统工作设定点的在线优化问题,从而使中央空调制冷系统节约了大量的能量。

本文研究的内容如下:

(1) 详细分析了中央空调制冷系统运行的工艺过程,进而得到了中央空调制冷系统的主要能耗设备——制冷机的能耗模型及其设备运行的能耗特性,提出了在线优化系统的工作设定点的控制方法可以大量节约中央空调制冷系统的能量消耗。

(2) 详细阐述了新型优化算法——粒子群算法的原理,粒子群算法的特点及与其他算法的比较;分析了几种粒子群算法的改进方法;并分析了 VC++ 技术及 SQL 数据库技术的特点,及其运用 Visual C++ 6.0 开发数据库技术的特点。

(3) 针对中央空调制冷系统的运行特点,分别采用了多项式法和网格搜索寻优方法对系统进行了优化,达到了节能的效果,但通过分析多项式法和网格搜索寻优方法在解决此类问题上的不足,提出了采用死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的方法对空调制冷系统进行优化计算,寻找使得系统能耗最小的运行工作点,并开发出了相应的优化软件包。

(4) 为了验证多项式法、网格搜索寻优方法及死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的算法优化中央空调制冷系统的节能效果,运用从实验室中的实际中央空调系统采集到的数据,进行研究。结果表明,无论在何种工况下,采用上述三种方法都能实现对中央空调制冷系统运行工作点的在线优化及实现系统的节能,且运用死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的算法在线优化中央空调制冷系统工作设定点的运行方式比其余两种方法的节能效果要好,即节约的能量最多。

第二章 粒子群优化算法

粒子群优化 (Particle Swarm Optimization, PSO) 算法是一种基于概率搜索的启发式优化算法, 源于对鸟群捕食行为的简化社会模型的模拟, 于 1995 年由 Kenndy 和 Eberhart 等人提出^[29], 其基本思想源于鸟类和鱼类等群体的捕食行为, 即群体中的成员通过学习自身及群体中其余成员的信息来决定下面的动作。种群中的粒子通过不断的迭代来改变自身状态, 直到得到全局最优解或达到终止条件或达到一种平衡状态。粒子群优化方法是群智能方法中能较有效解决全局优化问题的一种方法, 现已被列为“国际进化计算会议”的一个讨论专题。PSO 算法是一种群智能算法, 有多条搜索轨道, 显示出较好的并行性。与遗传算法不同的是, 粒子群算法是通过个体的相互协作来寻找最优解, 其最优解的搜索主要依赖于它的记忆能力和粒子间的信息共享机制。与其他进化算法相比, PSO 的优点为结构简单, 容易实现, 又有深刻的智能背景, 既适合科学研究, 又适于工程应用。PSO 算法提出后, 立刻引起了智能计算领域的广大学者的广泛关注, 并提出了多种改进算法, 且广泛应用于神经网络训练、模糊系统控制、函数优化、模式分类及其他应用领域。

2.1 粒子群算法思想的起源

自然界中各种生物都具有一定的群体行为, 而人工生命的研究领域之一是探索自然界生物的群体行为, 进而在计算机上构建其群体模型。科学家一直关注着自然界中的鸟群和鱼群的群体行为, 1987 年生物学家 Craig Reynolds 提出了一个鸟群聚集模型^[29], 在他的仿真模型中, 每一个个体遵循:

- (1) 避免与相邻的鸟相冲撞;
- (2) 尽量匹配邻域个体的速度;
- (3) 尽量试图飞向自己所认为的鸟群中心;

且整个群体飞向目标。在仿真中, 仅利用上面的三条简单规则, 就非常接近的模拟出了鸟群飞行的现象。生物学家 Frank Heppner 于 1990 年提出了鸟类模型^[31], 不同点

为：鸟类被吸引飞到了栖息地。在仿真开始阶段，每一只鸟都没有特定的飞行目标，仅是通过简单的规则来确定自己的飞行方向和速度（每一只鸟都试图留在群中而又不发生碰撞），当有一只鸟到达栖息地后，它周围的鸟就会跟着飞向栖息地，通过这样的方式使整个鸟群落在栖息地。

美国社会心理学家 James Kennedy 和电气工程师 Russell Eberhart 在 1995 年共同提出了粒子群算法，其基本思想是受对鸟类群体行为进行建模与仿真的研究结果的启发。其模型和仿真算法主要是修正了 Frank Heppner 的模型，使得粒子飞向解空间并在最优解处降落。Kennedy^[32]在他的书中精辟的描述了粒子群算法思想的起源：

自 20 世纪 30 年代以来，社会心理学的发展揭示：我们都是鱼群或鸟群聚集行为的遵循者。在人们的不断交互过程中，由于相互的影响和模仿，他们总会变得更相似，结果就形成了规范和文明。人类的自然行为和鱼群及鸟群并不类似，而人类在高维认知空间中的思维轨迹却与之非常类似。思维背后的社会现象远比鱼群和鸟群聚集过程中的优美动作复杂的多；首先，思维发生在信念空间，其维数远远高于 3；其次，当两种思想在认知空间会聚于同一点时，我们称其一致，而不是发生冲突。

2.2 原始粒子群优化算法

2.2.1 算法原理

粒子群优化算法源于对鸟群捕食行为的研究。一群鸟在随机搜寻食物，如果在这个区域里只有一块食物，那么找到食物的最简单有效的策略就是搜寻目前离食物最近的鸟的周围区域。PSO 算法就从这种生物种群行为特性中得到启发并用于求解优化问题。在 PSO 中，每个优化问题的潜在解都可以想象成 D 维搜索空间上的一个点，我们称之为“粒子” (Particle)。粒子在搜索空间中以一定的速度飞行，这个速度根据它本身的飞行经验和同伴的飞行经验来动态调整。所有的粒子都有一个被目标函数决定的适应值(fitness value)，并且知道自己到目前为止发现的最好位置(Particle best, 记为 P_{best})和当前的位置。这个可以看作是粒子自己的飞行经验。除此之外，每个粒子还知道到目前为止整个群体中所有粒子发现的最好位置(global best, 记为 g_{best}) (g_{best} 是在 P_{best} 中的最好值)，这个可以看作是粒子同伴的经验。每个粒子使用下列信息改变自己的当前位置：1) 当前位置；2) 当前速度；3) 当前位置与自己最好位置之间的距离；4) 当前位置与群体最好位置之间的距离。优化搜索正是在由这样一群随机初

始化形成的粒子而组成的一个种群中，以迭代的方式进行的。

2.2.2 算法的数学描述

设在一个 D 维的搜索空间中，有 m 个粒子组成一个群体，以一定的速度飞行，每个粒子在搜索时，考虑自己搜索到的历史最优点和群体内(或邻域内)其他粒子的历史最优点，在此基础上进行位置(即解)的变化。

第 i 个粒子的位置表示为： $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$

第 i 个粒子的速度表示为： $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ ， $1 \leq i \leq m$ ， $1 \leq d \leq D$

第 i 个粒子经历过的最优点为： $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$

种群内所有粒子经历过的历史最优点为： $p_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$

采用如下公式更新粒子的速度和位置：

$$v_{id}^{k+1} = v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (p_{gd}^k - x_{id}^k) \quad (2.1)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (2.2)$$

其中， c_1 和 c_2 称为学习因子，是非负常数。 $r_1, r_2 \in U[0,1]$ ，均为 $[0,1]$ 范围内均匀分布的随机数。且粒子的速度被限制在一个速度范围内，即 $v_{id} \in [V_{\min}, V_{\max}]$ 。 V_{\max} 为常数，其值根据具体优化问题来设定。迭代的终止条件一般设为最大迭代次数或粒子群到目前为止寻找到的最好位置。

迭代终止条件根据具体问题设定，一般选则预定最大迭代次数或粒子群目前为止搜索到的最优位置。

(2.1)式的第一部分为粒子先前的速度；第二部分为“认知”部分，表示粒子本身的思考；第三部分为“社会”部分，表示粒子间的信息共享与相互合作。“认知”部分可解释为一个得到加强的随机行为在将来更有可能出现。“社会”部分可解释为粒子本身是被其他粒子所模仿，即作为一个种群中粒子运动的参考。

PSO 算法的这些心理学假设是合理的。在寻求一致的认知过程中，个体往往记住它们自己的信念，同时也考虑同事们的信念，当个体察觉同事的信念较好时，它将进行适应性地调整。

2.2.3 算法参数

PSO 算法一个最大的优点就是不需要调节太多的参数,但是算法中的少数几个参数却直接影响着算法的性能以及收敛性。目前, PSO 算法的理论研究尚属初级阶段,所以算法参数设置在很大程度上还依赖于经验^[33]。下面是 PSO 算法中一些参数的作用及其设置经验:

(1) 粒子数目: 一般取值 20-40。试验表明, 对于大多数问题来说, 30 个粒子就可以取得很好的结果, 不过对于比较难的问题或者特殊类别的问题, 粒子数目可以取到 100 或 200。另外, 粒子数目越多, 算法搜索的空间范围就越大, 也就更容易发现全局最优解。当然, 算法运行的时间也较长。

(2) 粒子长度: 粒子长度就是问题的长度, 它由具体优化问题确定。

(3) 粒子范围: 粒子范围由具体优化问题决定, 通常问题的参数取值范围设置为粒子的范围。另外, 粒子每一维可以设置不同的范围。

(4) 粒子最大速率: 粒子最大速率决定粒子在一次飞行中可以移动的最大距离。我们必须限制粒子最大的速率, 否则粒子就可能跑出搜索空间。粒子最大的速率通常设定为粒子范围的宽度。

(5) 加速常数: 加速常数 c_1 和 c_2 是固定常数, 一般都取值为 2。

(6) 算法终止条件: 一般可以设置为达到最大迭代次数或者满足一定的误差准则。

(7) 适应度函数: 通常可以直接把目标函数作为适应度函数。当然, 也可以对目标函数进行变换。

2.2.4 算法流程

PSO 算法主要计算步骤如下:

(1) 初始化, 设定加速常数 c_1 和 c_2 , 最大进化代数 T_{max} , 将当前进化代数置为 $t=1$, 在定义空间 R^n 中随机产生 m 个粒子 x_1, x_2, \dots, x_m , 组成初始种群 $X(t)$; 随机产生各粒子初始位移变化 v_1, v_2, \dots, v_m , 组成位移变化矩阵 $V(t)$ 。

(2) 评价种群 $X(t)$, 计算每个粒子在每一维空间的适应值。

(3) 比较粒子的适应值和自身最优值。如果当前值 p_{best} 更优, 则置 p_{best} 为当前值, 并设 p_{best} 位置为 n 维空间中的当前位置。

(4) 比较粒子适应值与种群最优值。如果当前值比 g_{best} 更优, 则置 g_{best} 为当前粒子的矩阵下标和适应值。

(5) 按式(2.1)和(2.2)对粒子的速度和位置进行更新, 产生新种群 $X(t+1)$ 。

(6) 检查结束条件, 若满足, 则结束寻优; 否则, $t=t+1$, 转至(2)。结束条件为寻优达到最大进化代数 T_{max} , 或评价值小于给定精度 ε 。

2.3 粒子群算法的特点及与其他算法的比较

粒子群算法的主要优点为其原理简单, 设置参数少, 收敛速度快。粒子群算法已被证明能很好地解决许多全局优化问题。粒子群算法与其他进化算法有许多相似之处^[34]。首先, 粒子群算法和其它进化算法相同, 都使用“种群”概念, 用于表示一组解空间中的个体集合。下面以遗传算法为例进行比较。

粒子群算法和遗传算法都随机初始化种群, 而且都使用适应度值来评价系统, 而且都根据适应度值来进行一定的随机搜索, 两个系统都不能保证一定找到最优解。如果将粒子所持有的最好位置也看作种群的组成部分, 则粒子群的每一步迭代都可以看作是一种弱化的选择机制。在遗传算法中存在着交叉(*crossover*)和变异(*mutation*)操作, 粒子群算法中虽然在表面上不具备这样的操作, 但在本质上却有相通之处。粒子群算法的速度更新方程与实数编码的遗传算法的算术交叉算子很类似。通常, 算术交叉算子由两个父代个体的线性组合产生两个子代个体, 而在 PSO 算法的速度更新方程中, 如果不考虑第一项, 也就是带惯性权重的速度项, 就可以将方程理解成由两个父代个体产生一个子代个体的算术交叉运算。从另一个角度上看, 同样不考虑第一项, 速度更新方程也可以看作是一个变异算子, 其变异的强度大小取决于个体最好位置和全局最好位置之间的距离, 可以把个体最好位置和全局最好位置看作父代, 变异就可以看作是由两个父代到子代的变异。至于前面略去的惯性速度项, 也可以理解为一种变异的形式, 其变异的大小与速度相乘的惯性因子相关, 惯性因子越接近 1, 则变异强度越小; 越远离 1, 则变异强度越大。通常在进化算法的分析中, 人们习惯于将每一步进化迭代理解为用新个体代替旧个体的过程。与遗传算法等其它进化算法比较, PSO 的具有独特的信息共享机制。在遗传算法中, 染色体互相共享信息, 所以整个种群的移动是比较均匀的向最优区域移动。在 PSO 中, 只有自身最优和全局最优提供信息给其他的粒子, 这是单向的信息流动。整个搜索更新过程是跟随当前最优解的过

程。与遗传算法比较,所有的粒子很可能更快的收敛于最优解。

PSO 算法与其它进化算法另一个重要不同点在于它在进化过程中同时保留和利用位置与速度信息,而其它进化算法仅保留和利用位置信息。从以上分析中看,基本 PSO 算法与其他进化算法有相似之处,但同时也具备其它算法不具备的特性,特别是 PSO 算法同时将粒子的位置与速度模型化,并给出了它们的进化方程。当然,PSO 算法也和其它全局优化算法一样,有易陷入局部最优,收敛精度不高,后期收敛速度慢等缺点。

2.4 粒子群算法的改进

粒子群算法因其计算形式简单,参数设置较少并具有良好的算法收敛性,引起了广大学者的注意。但它同样具有几乎所有随机算法的弊病——易产生早熟收敛,局部寻优能力差等。但是梯度法、爬山法、直接搜索法、模拟退火算法等一些优化算法却具有很强的局部搜索能力,而另一些含有问题域的相关知识的启发式算法的运行效率也比较高。可以说,大多数优化方法的全局搜索能力和局部搜索能力单靠一种算法往往无法得到有效利用与平衡,从而影响了算法的求解精度和效率。自然地,人们想到了混合两种算法或者多种算法在一个模型当中,尽量发挥各个算法的优点,从而形成了一个研究混合算法的方向。因此,在 PSO 算法搜索过程中融合其他优化方法的思想,构成混合 PSO 算法,成为 PSO 算法改进的一个重要的思路。对 PSO 算法的改进可以归结为以下几种目的:增强收敛性的改进、增加种群多样性的改进、加强局部搜索的改进、与全局优化算法相结合、与确定性的局部优化算法融合等。以上所述的是对于算法改进的目的讨论的,实际改进中应用的办法有基于参数的改进,即对 PSO 算法的迭代公式的形式上作改进;还有从粒子的行为模式进行改进,即粒子之间的信息交流方式,如拓扑结构的改进、全局模式与局部模式相结合的改进等;还有基于算法融合的粒子群算法的改进,算法融合可以引入其他算法的优点来弥补 PSO 算法的缺点,设计出更适合问题求解的优化算法。下面主要介绍几种具有代表性的改进 PSO 算法。

(1) 标准粒子群算法

最初提出的粒子群算法是没有权值 ω 这一项的,在 1998 年的 IEEE 国际计算学术会议 Y.Shi 和 R.C.Eberhart 发表了题为“A Modified Particle Swarm Optimizer”的

论文,首次在速度进化方程中加入了惯性权重,如公式(2.3)所示。由于改进后的粒子群算法具有更优的收敛性能,人们就把改进后的权重粒子群算法称为标准粒子群算法。而 Eberhart 和 Kennedy 提出的粒子群算法可以看作当权重 ω 为 1 的时候的特殊情况。在标准粒子群算法中,惯性因子是动态调整的。对于不同问题惯性因子的选取也不是一样的,一般来说在惯性因子较大时加快搜索速度,但容易陷入局部最优;而当惯性因子较小时,搜索速度较慢,不利于全局收敛。因此选取惯性因子的时候往往以递减的形式选择,使搜索在初期速度不至于较慢,后期也不至于陷于局部最优。另外惯性因子调整也有人提出了用模糊系统来动态调整^[35]。

$$v_y(t+1) = \omega v_y(t) + c_1 r_{1j}(t)(p_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + c_2 r_{2j}(t)(p_{gy}(t) - x_{ij}(t)) \quad (2.3)$$

(2) 压缩因子的粒子群算法

PSO 算法来源于模拟社会系统,算法本身缺乏坚实的数学基础。直到最近几年才开始尝试建立算法的数学基础。Clerc 对算法的数学研究证明,提出了压缩因子 (constriction factor) 的概念^[36]。该方法描述了一种选择 χ 和 c_1 、 c_2 的方法,以保证算法收敛。

算式如下:

$$v_{id}(t+1) = \chi(v_{id}(t) + c_1 r_{1j}(t)(p_{id}(t) - x_{id}(t)) + c_2 r_{2j}(t)(p_{gd}(t) - x_{id}(t))) \quad (2.4)$$

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1) \quad (2.5)$$

其中, $\chi = \frac{2}{|2-l-\sqrt{l^2-4l}|}$ 为压缩因子, $l = c_1 + c_2 > 4$, χ 的作用与 V_{max} 的作用

类似,用来控制与约束粒子的飞行速度,同时增强算法的局部搜索能力。shi 和 Eberhart^[37]将惯性权重 PSO 模型和带收敛因子 PSO 模型进行了比较,通过对 Sphere, Rosenbroek, Rastrigrin, Griewank 和 Schaffer F6 等五个测试函数的实验后指出,当将 V_{max} 限定为 X_{max} 时,收敛因子 PSO 模型的计算结果好于惯性权重 PSO 模型的计算结果。因而压缩因子方法控制群体行为最终收敛,且可以有效搜索不同的区域,该法能得到高质量的解,较好的克服 PSO 算法的早熟收敛。

(3) 基于动态邻域的微粒群算法

P.N.S.uganthan^[38]提出了一种基于邻域思想的微粒群算法。其基本思想是在算法

初期, 每个个体以自身邻域为界, 速度更新公式社会部分用领域内的最优值取代。改进后的速度更新公式如(2.6), 各参数的调整如公式(2.7)。从公式中我们可以看出, 领域的范围随着代数的增加, 最终将扩充至整个种群。

$$v_y(t+1) = \omega v_y(t) + c_1 r_{1,t}(t)(PBEST - x_y(t)) + c_2 r_{2,t}(t)(LBEST - x_y(t)) \quad (2.6)$$

$$\begin{cases} \omega(t) = \omega^s + (\omega^0 - \omega^s) \left[1 - \frac{t}{k} \right] \\ C_1^t = C_1^s + (C_1^0 - C_1^s) \left[1 - \frac{t}{k} \right] \\ C_2^t = C_2^s + (C_2^0 - C_2^s) \left[1 - \frac{t}{k} \right] \end{cases} \quad (2.7)$$

除了上述几种改进算法外, J.Riget 提出了一种保证种群多样性的微粒群算法 (Attractive and Repulsive Particle Swarm Optimizer, 简称 ARPSO)^[39]。F.vanden Bergh 提出了具有局部收敛性能的改进粒子群算法 GCPSO (Guaranteed Convergence Particle Swarm Optimizer)^[40]。H.Yoshida 在 1999 年, Y.Fukuyama 在 2001 年分别提出了混合编码的粒子群算法。国内这几年来对粒子群算法的改进也有不少成果, 如文献[41]提出了一种自适应扩展的粒子群算法, 文献[42][43]提出了基于拓扑结构的改进粒子群算法, 文献[44]提出了基于聚类的 PSO 算法, 文献[45]将混沌变异的小生境应用到了粒子群算法中。

2.5 本章小结

本章介绍了粒子群算法的原理和运算过程, 粒子群算法的特点及与其他算法进行了比较。针对粒子群算法局部搜索能力差的缺点, 介绍了粒子群算法的几种改进方法, 进而提高了算法的收敛速度和收敛精度。通过分析粒子群算法的优缺点及算法特性可知, 该算法比较适合对中央空调制冷系统进行优化。

第三章 VC++6.0 及数据库技术

本章主要阐述运用 VC++ 6.0 编程语言及 SQL 数据库技术开发中央空调制冷系统的优化软件。中央空调制冷系统由制冷机建模模块和优化模块组成，是一个复杂的非线性多变量强耦合的系统，可见选择系统优化技术是研究的重点之一。通过对编程语言的分析可知，Visual C++ 6.0，功能非常强大，支持面向对象编程、模块化、代码可重用、组件共享等技术，可以大大提高软件系统的设计、管理和开发的速度。因此本文选用 VC++ 6.0 技术来开发中央空调制冷系统优化软件的各个模块，利用基于对话框模式建立整个软件的界面环境，并利用面向对象（MFC）的编程方法，编写各模块相应的程序代码，并通过建立大量的基本模块来共同组成整个空调制冷系统的优化软件。

3.1 VC++6.0 技术

Visual C++ 6.0 是一个功能强大的可视化应用程序开发工具，用于 Windows 环境下 32 位的应用程序的开发，是计算机世界公认的最优秀的应用开发工具之一。在提供可视化编程方式的同时，Visual C++ 6.0 也适用编写直接对系统进行底层操作的程序，生成代码的质量也优于其它的开发工具。在 Visual C++ 6.0 环境下，利用 Microsoft 的基本类库 MFC(Microsoft Foundation Class Library)，可以使用完全面向对象的方法来进行 Windows 应用程序的开发，使得 Windows 程序员从大量的复杂劳动中解救出来，体会到真正的程序语言的强大功能和良好的灵活性。

Visual C++ 6.0 的优势有以下几点：

(1) 面向对象的程序设计方法的使用

Visual C++ 6.0 编程是采用了面向对象的程序设计方法(Object-Oriented Programming, OOP)，同传统的结构设计方法相比，它缩短了软件开发的周期，提高了软件的开发效率，使程序员可以更好地理解和管理庞大且复杂的程序。

(2) 强大的 MFC 优势

如果使用传统的 Windows 编程方法开发应用程序，即使是一个简单的 Windows 应用程序也需要对 Windows 的编程原理有很深刻的认识，还要手工编写很多代码，程序的出错率也是随着代码长度的增加而呈几何级数增长的，这样一方面增加了调试工作的困难，另一方面也增加了应用程序的不稳定性，所以传统的 Windows 编程需要具有丰富的编程经验。MFC 以 Visual C++ 6.0 形式封装了大部分的 Windows API 来表示框架、窗口、对话框、设备上下文、公共 GDI 对象和其它标准的 Windows 部件。这些类提供了一个面向 Windows 结构的简单的 C++ 成员函数的接口。

应用 MFC 编程有下列优点：

1) MFC 提供了一个标准化的结构，使得编程时极少需要关心对象方法的实现细节，节省了大量的时间，提高了程序开发的效率。

2) MFC 类库中的各种对象所提供的强大功能可以完成程序中的绝大部分所需功能，这样程序员所需要编写的代码大为减少，保证了程序具有良好的可调试性，使应用程序在功能和性能两个方面满足要求。

3) MFC 完全支持 Windows 所有的函数、控件、消息、GDI 基本图形函数、菜单及对话框。

4) 使用 MFC 易学易用，开发出的应用程序具有标准的、熟悉的 Windows 界面，还支持所有标准 Windows 特性。MFC 类库的可靠性很高，不会影响所开发程序的可靠性和正确性。

(3) 丰富的技术资源

Visual C++6.0 中集成了大量的最新技术，如 Activex、COM 等技术，程序开发人员可以紧紧地把握住软件开发技术发展的方向，开发出功能强大的应用程序。

3.2 数据库技术

通过对中央空调制冷系统的优化过程分析可知，需采集系统当前运行状态下的实际数据，将其储存到数据库中，运行优化软件时，需到数据库相应的表中读取动态数据，进而实现对系统运行工作点的在线优化。本文选用的数据库类型为关系数据库——围绕一些基本的数据类型来组织，并且不允许用户创建新的数据类型，这是因为关系数据库的稳定性强，存储量大，易于开发出相应的应用程序，进而在开发空调制冷系统优化软件时，方便对数据库进行管理和操作，并增强了系统的稳定性。

3.2.1 关于 SQL 数据库

SQL 数据库是 Microsoft 开发的关系型数据库，其主要面向大中数据库应用。考虑到大多数 PC 机运行的都是 Microsoft 公司 Windows 系列操作系统，本课题选用 Microsoft 公司的 SQL Server 2000。SQL Server 的常用版本有：企业版、标准版、个人版、开发版。企业版是专为拥有大量用户以及实时应用系统而设计的，可以在对称处理器或者集群计算机等高端计算环境下进行安装。标准版包括所有数据库功能并且只能在 Windows NT/2000 上运行。个人版是针对移动电脑或者少量数据库用户(一般为 50 个左右)使用。开发版是用于开发 SQL Server 2000 数据库应用程序的编程环境，它只是一个开发环境，不能用于实用生产系统来使用。考虑实际应用情况，我们选择 SQL Server 2000 企业版来完成我们的数据库系统。

Microsoft SQL Server 2000 是 Microsoft 公司开发的数据库管理系统，是一个功能强大的关系型数据库管理系统。Microsoft SQL Server 2000 作为一种关系数据库管理系统是在成熟和强大的关系模型中建立的，关系模型是当前最受欢迎的数据存储和数据检索模型。在系统中成功安装 SQL Server 2000 后，可以利用 SQL Server 中的企业管理器设计实现本课题的数据库。整个实施过程为：建立数据库、在已建立的数据库中完成各表的设计、设置好数据库的关系。

3.2.2 SQL Server 2000 的特点

SQL Server 2000 是一个杰出的数据库管理系统，它在 7.0 版本的基础上，又增加了很多新的特性，具有高性能、高可靠性和可扩充性的特点，可用于大型联机事务处理、数据仓库及电子商务等领域中。

SQL Server 2000 的主要特点如下：

- (1) 真正的客户机/服务器体系结构。
- (2) 与 Windows NT 完全集成，利用了 NT 的许多功能。
- (3) 具有很好的伸缩性，使用的操作系统可从 Windows 95/98 到 Windows 2000 Advanced Server 等。
- (4) 对 Web 技术的支持，使用户能够很容易的将数据库中的数据发布到 Web 页面上。
- (5) SQL Server 提供数据仓库功能，这个功能只在大型数据库管理系统中才具备。

(6) 可在同一台计算机上安装多个 SQL Server 实例。每一个实例有自己的一套系统和用户数据库。

(7) 引入了三种新的数据类型。bigint 是 8B 整型；sql_variant 类型允许存储不同类型的数据值；table 类型可以将一个数据表中的数据进行存储。

(8) 支持 XML(Extensive Markup Language, 可扩展标记语言)。SQL Server 2000 具有完全的 Web 功能, 支持 XML 语言, 可以检索、编写 XML 数据。

3.2.3 数据库的连接

数据库系统是指在计算机系统中引入数据库后的系统, 一般由数据库、数据库管理系统 (及其开发工具)、应用系统、数据库管理员和用户构成。数据库的建立、使用和维护等工作只靠一个 DBMS (DataBase Management System, DBMS) 远远不够, 还要有专门的人员来完成, 这些人被称为数据库管理人员 (DataBase Administrator, 简称 DBA)。数据库系统的特点如下:

(1) 数据机构化

在文件系统中, 相互独立的文件记录内部是有结构的, 但记录之间没有联系。数据库系统实现整体数据的结构化, 是数据库的主要特征之一, 也是数据库系统与文件系统的本质区别。

(2) 数据共享性高、冗余度低、易扩充

数据库从整体角度看待和描述数据, 数据不再面向某个应用而是面向整个系统, 因此数据可以被多个用户、多个应用共享使用。数据共享可以减少数据冗余, 节约存储空间。

数据共享还能够避免数据之间的不相容性与不一致性。所谓数据的不一致性是指同一数据不同拷贝的值不一样。人工管理和文件管理由于数据被重复存储, 当不同的应用使用和修改不同的拷贝时就很容易造成数据的不一致性。

数据库系统弹性大, 易于扩充。

(3) 数据独立性高

数据独立性是数据库领域中的一个常用术语, 包括数据的物理独立性和逻辑独立性。

物理独立性是指用户的应用程序与存储在磁盘数据库中的数据是相互独立的。也

就是说，数据在磁盘上的数据库中怎样存储是有 DBMS 管理的，用户程序不需要了解，应用程序要处理的只是数据的逻辑结构，这样当数据的物理存储改变时，应用程序不用改变。

逻辑独立性是指用户的应用程序与数据库的逻辑结构是相互独立的，也就是说，数据的逻辑结构改变了，用户程序也可以不变。

数据独立性是由 DBMS 的二级映像功能来保证的。

(4) 数据由 DBMS 统一管理和控制

数据库的共享是并发的共享，即多个用户可以同时存取数据库中的数据甚至可以同时存取数据库中同一数据。为此，DBMS 还必须提供以下几方面的数据控制功能。

1) 数据的安全性保护：数据的安全性是指保护数据以防止不合法的使用造成数据的泄密和损坏。使每个用户只能按规定，对某些数据以某些方式使用和处理。

2) 数据的完整性检查：数据的完整性指数据的正确性、有效性和相容性。

3) 并发控制：当多个用户的并发进程同时存取、修改数据库时，可能会发生相互干扰而得到错误的结果或使得数据库的完整性遭到破坏，因此必须对多用户的并发操作加以控制和协调。

3.3 Visual C++6.0 开发数据库

由于本文选用了 VC++ 6.0 技术开发系统的优化软件，对该软件包来说，最适合的数据库为 SQL Server，运用 VC++ 6.0 可供用户方便、快捷地开发新的 SQL Server 应用程序。

3.3.1 Visual C++6.0 开发数据库技术的特点

VC++ 提供了多种多样的数据库访问技术——ODBC API、MFC ODBC、DAO、OLE DB 和 ADO 等。这些技术各有自己的特点，提供了简单、灵活、访问快速、扩展性好的服务特性。

(1) 简单性：Visual C++ 中提供了 MFC 类库、ATL 模板类以及 AppWizard、ClassWizard 等一系列的 Wizard 工具用于帮助用户快速的建立自己的应用程序，大大简化了应用程序的设计。使用这些技术，开发者编写很少的代码或不编写代码就可以开发出一个数据库应用程序。

(2) 灵活性：Visual C++ 提供的开发环境，可以是开发者根据自己大的需要设计

应用程序的界面和功能，而且，Visual C++提供了丰富的类库和方法，可以使开发者根据自己的需求进行设计。

(3) 访问速度快：为了解决 ODBC 开发的数据库应用程序访问数据库速度慢的问题，Visual C++提供了新的访问技术——OLE DB 和 ADO。OLE DB 和 ADO 都是基于 COM 接口的技术，使用这种技术可以直接对数据库的驱动程序进行访问，大大提高了访问速度。

(4) 可扩展性：Visual C++提供了 OLE 技术和 ActiveX 技术，这种技术可以增强应用程序的能力。通过 OLE 技术和 ActiveX 技术，可以使开发者利用 Visual C++中提供的各种组件、控件、以及第三方开发者提供的组件来创建自己的程序，从而实现应用程序的组件化。

(5) 访问不同种类数据源：传统的 ODBC 技术只能访问关系型数据库，在 Visual C++中，提供了 OLE DB 访问技术，不仅可以访问关系型数据库，还可以访问非关系型数据库。

3.3.2 用 MFC 来创建 ODBC

从功能简单的数据库(如 Jet Engine)到复杂的大型数据库系统(如 Oracle), VC++ 6.0 都提供了编程接口，例如：ODBC API、MFC ODBC 类、MFC DAO 类(数据访问对象)、MFC 的 OLE DB 和 ActiveX 数据对象(ADO)。本课题选用 MFC 来创建 ODBC 的应用程序，下面介绍 ODBC 数据源及数据库的连接与访问技术。

(1) ODBC 数据源的定义

ODBC (Open DataBase Connectivity) 是客户应用程序访问关系数据库时提供一个统一的接口，对于不同的数据库，ODBC 提供了一套统一的 API，使应用程序可以应用所提供的 API 来访问任何提供了 ODBC 驱动的数据库，并且，ODBC 已经成为一种标准，目前所有的关系数据库都提供了 ODBC 驱动程序，这使 ODBC 的应用非常广泛，基本上可用于所有的关系数据库。但由于 ODBC 只能用于关系数据库，使得利用 ODBC 很难访问对象数据库及其他非关系数据库。

由于 ODBC 是一种底层的访问技术，因此，ODBC API 可以使客户应用程序能够从底层设置和控制数据库，完成一些高层数据库技术无法完成的功能。从计算机控制面板里的管理工具进入 ODBC 数据源管理器，在数据源管理器中定义用户 DSN，

添加数据源的驱动程序，然后将已经创建的数据源添加到管理器的用户数据源列表中，ODBC 数据源就被定义好了，于是用户就可以在程序中访问到此数据源。

(2) 数据库的连接与访问

利用 MFC AppWizard(exe)来创建支持数据库的应用程序 SDI，在创建向导的第二步中选择好已经创建好的数据源表，于是就可以创建一个访问数据库的应用程序。

在 CRecordSet 类中定义了一个成员变量 m_pDatabase: CDatabase*m_pDatabase，它是指向对象数据库类的指针。如果在 CRecordSet 类对象调用 Open()函数之前，将一个已经打开的 CDatabase 类对象指针传给 m_pDatabase，就能共享相同的 CDatabase 类对象。

查询记录：查询记录使用 CRecordSet::Open()和 CRecordSet::Requery()成员函数。

增加记录：增加记录使用 AddNew()函数，要求数据库必须是以允许增加的方式打开。

删除记录：直接使用 Delete()函数，并且在调用 Delete()函数之后不需调用 Update()函数。

修改记录：修改记录使用 Edit()函数。

MFC 数据库类成员函数都能抛出 CDBException 类型的异常，所以在代码对数据库进行操作后监测异常是正确的做法。MFC ODBC 类在实际开发中应用最广，因为它功能丰富，操作相对简便。

3.4 本章小结

本章介绍了 Visual C++6.0 技术及数据库技术的特点，及运用 Visual C++6.0 开发数据库的特点。通过分析可知，运用上述两种技术能够开发出功能强大、运行稳定的中央空调制冷系统优化控制的软件。

第四章 空调制冷系统优化方法的研究及优化软件的开发

中央空调制冷系统是多维非线性约束优化问题,通过分析空调制冷系统运行的工艺流程及其主要能耗设备的能耗特性,本课题采用了适于工程应用的多项式优化方法、网格搜索寻优法对空调制冷系统进行了优化,并开发出了相应的优化软件,取得了较好的优化效果。然而上述两种方法都存在着固有的缺点:多项式法优化空调制冷系统存在收敛速度慢、容易陷入局部最优点,且寻优过程依赖于初始点选取;网格搜索寻优法在优化空调制冷系统上虽然比较简单,适于工程应用,但优化精度较低。因此提出了采用死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法相结合的算法来解决空调制冷系统的优化问题,对中央空调制冷系统的工作点进行在线优化,即寻找在满足负荷条件下,使得系统能耗最小的工作设定点。

4.1 空调制冷系统的建模

4.1.1 制冷机多项式能耗模型

通过分析空调制冷系统的主要能耗设备制冷机的能耗模型,提出了采用最小二乘法来建立制冷机的能耗模型。

(1) 最小二乘法简介

最小二乘法总体趋势能很好的反映被逼近函数的特性,逼近函数与已给的函数偏差按某种方法度量能达到最小。

最小二乘法的基本原理:

$$P(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_mx^m \quad (4.1)$$

适当选取 a_0, a_1, \dots, a_m , 使得

$$\varphi(a_0, a_1, \dots, a_m) = \sum_{j=1}^n [P(x_j) - y_j]^2 \quad (4.2)$$

为最小值。

(2) 多项式能耗模型

运用最小二乘法辨识出模型的参数，其能耗模型表达式如式(4.3)所示：

$$\begin{aligned}
 P_{chiller} = & Q_{cap} \cdot COP_{nom} \left(a_0 + a_1 T_{CHWS} + a_2 T_{CHWS}^2 + a_3 T_{CWS} + a_4 T_{CWS}^2 + a_5 \left(\frac{Q}{Q_{cap}} \right) + a_6 T_{CHWS} \right. \\
 & T_{CWS} a_7 \left(\frac{Q}{Q_{cap}} \right) T_{CHWS} + a_8 \left(\frac{Q}{Q_{cap}} \right) T_{CHWS}^2 + a_9 \left(\frac{Q}{Q_{cap}} \right) T_{CWS} + a_{10} \left(\frac{Q}{Q_{cap}} \right) T_{CWS}^2 + a_{11} \left(\frac{Q}{Q_{cap}} \right) \\
 & T_{CHWS} T_{CWS} + a_{12} \left(\frac{Q}{Q_{cap}} \right)^2 + a_{13} \left(\frac{Q}{Q_{cap}} \right)^2 T_{CHWS} + a_{14} \left(\frac{Q}{Q_{cap}} \right)^2 T_{CHWS}^2 + a_{15} \left(\frac{Q}{Q_{cap}} \right)^2 T_{CWS} + a_{16} \\
 & \left. \left(\frac{Q}{Q_{cap}} \right)^2 T_{CWS}^2 + a_{17} \left(\frac{Q}{Q_{cap}} \right)^2 T_{CHWS} T_{CWS} \right) \quad (4.3)
 \end{aligned}$$

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_{CWS} 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。

4.1.2 制冷机网格能耗模型

制冷机的能耗模型如式(4.3)所示，可见其能耗($P_{chiller}$)与制冷量(Q)，冷冻水供水温度(T_{CHWS})及冷却水供水温度(T_{CWS})有关。其建模思想为：将制冷机能耗的自变量 Q, T_{CHWS}, T_{CWS} 分档，然后建立能够反映制冷机能耗模型的模型表，并运用实验数据填写模型表（表 4.1），进从而完成制冷机的建模。

(1) 自变量 $T_{CHWS}, T_{CWS}, Q_{chiller}$ 和因变量 $P_{chiller}$ 的限制：

变量分档数：A=8; B=8; C=10

T_{CHWS} (冷冻水供水温度)：给定 $T_{CHWS,min}$ （冷冻水最低供水温度）和 $T_{CHWS,max}$ （冷冻水最高供水温度）的值；

T_{CWS} (冷却水供水温度)：给定 $T_{CWS,min}$ （冷却水最低供水温度）和 $T_{CWS,max}$ （冷却水最高供水温度）的值；

$Q_{chiller}$ (制冷机的制冷量)： $Q_{chiller,min}=20\%$ 冷负荷； $Q_{chiller,max}=100\%$ 冷负荷，20%-

100% 为冷负荷的输入值,

$P_{chiller}$ (制冷机功率): 功率的单位是 KWh , 值为 $[KWh(k)-KWh(k-1)]$ /更新时间。

(2) 模型表

$$a = Round\left(\frac{A(T_{CHWS} - T_{CHWS,min})}{T_{CHWS,max} - T_{CHWS,min}}\right) \quad \text{这里 } a=1,2,\dots,(A+1)$$

表格中的值 $a(A-1) < a \leq a(A)$;

$$b = Round\left(\frac{B(T_{CWS} - T_{CWS,min})}{T_{CWS,max} - T_{CWS,min}}\right) \quad \text{这里 } b=1,2,\dots,(B+1)$$

表格中的值 $a(B-1) < a \leq a(B)$;

$$c = Round\left(\frac{C(Q_{chiller} - Q_{chiller,min})}{Q_{chiller,max} - Q_{chiller,min}}\right) \quad \text{这里 } c=1,2,\dots,(C+1)$$

表格中的值 $a(C-1) < a \leq a(C)$;

表 4.1 制冷机模型表

Table 4.1 Modeling Table of Chiller

序号	排序规则 (a,b,c)	冷负荷 $Q_{chiller}$	冷冻水供水 温度 T_{CHWS}	冷却水供水 温度 T_{CWS}	制冷机功 率 $P_{chiller}$
1	(1,1,1)				
2	(1,1,2)				
3	(1,1,3)				
4	(1,1,4)				
5	(1,1,5)				
6	(1,1,6)				
7	(1,1,7)				
8	(1,1,8)				
9	(1,2,1)				
...	...				
639	(10,8,7)				
640	(10,8,8)				

(3) 建模过程:

Step 1. 读取数据库动态表中的实际数据, 计算实际冷负荷 $Q_{chiller}$ 的值:

$$Q_{chiller} = m_{CHW} c_{pw} (T_{CHWR} - T_{CHWS}) \quad (4.4)$$

Step 2. 根据分档情况, 判断实际数据冷冻水供水温度 (T_{CHWS})、冷却水供水温度 (T_{CWS})、冷负荷 ($Q_{chiller}$) 属于哪一档:

Step 3. 计算该组数据应填入模型表的行号, 若该行没有数据, 则将该组数据写入模型表对应的行; 若该行已存在数据, 则放弃该组数据:

Step 4. 若已读取动态表中所有数据或模型表已被填满, 则结束建模程序; 否则, 转回 Step 1.

4.2 空调制冷系统优化方法的研究

中央空调制冷系统是非线性多变量的复杂系统, 各部件之间存在着强耦合的特性, 需选用合适、有效的优化方法对空调制冷系统进行优化。根据系统的固有特性及工程实现的方便性、可靠性, 提出了运用多项式法和网格搜索寻优法对系统进行了优化, 取得了较好的优化效果。上述两种方法有较强的工程应用性, 但在优化过程中存在着一定缺陷: 多项式法易陷于局部最优, 且收敛速度较慢; 网格法虽建模、优化都比较简单, 但其精度不高。因此本文又选用了改进的粒子群优化算法对中央空调制冷系统进行了优化, 其优化效果显著, 且该方法的收敛速度较快, 全局搜索能力较强, 收敛精度较高。下面分别介绍适于工程应用的多项式优化方法和网格搜索寻优法, 及取得了较好优化效果的死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的算法。

4.2.1 多项式优化方法

采用的多项式优化方法为罚函数法, 又称序列无约束极小化方法对空调制冷系统进行优化。罚函数法是一种将约束优化问题转化为一系列无约束优化问题的间接解法。其基本思想是, 将约束优化问题中的目标函数加上反映全部约束函数的对应项(惩罚项), 构成一个无约束的新目标函数, 即罚函数。罚函数可以定义在可行域的外部, 逐渐逼近原约束优化问题最优解。该方法允许初始点不在可行域内, 也可用于等式约束。但迭代过程中的点是不可行的, 只有迭代过程完成才收敛于最优解。鉴于这种方法具有方法简单, 程序易于编制, 且对目标函数和约束函数要求不高, 适用范围较广

等优点。在处理空调制冷系统这样的约束优化问题方面，虽然此方法为传统的优化方法，但其更适于工程应用，即有较强的实际应用价值。因此，本课题选用了此方法来对制冷系统进行在线优化，用以寻找在满足制冷量和冷冻水供水温度一定的条件下，使得系统能耗最小的工作设定点。

(1) 多项式法在空调制冷系统优化中的实现

罚函数法的计算步骤：

① 选取 $M_1 > 0$ ，精度 $\varepsilon > 0, c \geq 2$ ，初始点 $x^{(0)}$ ，令 $k = 1$ ；

② 以 $x^{(k-1)}$ 为初始点，求解无约束优化问题

$$\min F(x, M) = f(x) + M_k \sum_{i=1}^l g_i^+(x) \quad (4.5)$$

设其最优解为 $x^{(k)} = x(M_k)$ ，其中 $f(x)$ 为空调制冷系统的能耗；

③ 令 $\tau_1 = \max_{1 \leq i \leq p} \{h_i(x^{(k)})\}$ ， $\tau_2 = \max_{1 \leq i \leq m} \{g_i(x^{(k)})\}$ ， $\tau = \max\{\tau_1, \tau_2\}$ ；

④ 若 $\tau < \varepsilon$ ，则迭代结束，取 $x^* = x^{(k)}$ ；否则令 $M_{k+1} = cM_k$ ， $k = k + 1$ ，转回第②步。

在罚函数的计算过程中需要求解无约束问题，综合比较常用的无约束优化问题的求解方法，这里采用了 Powell 算法，求解无约束问题。

(2) Powell 算法

Powell 算法又叫方向加速法，它不需要计算目标函数的导数，使用起来准备时间少，且具有较快的收敛速度。在不依赖于目标函数的导数的所有直接法中，它是最有效的一个方法。

Powell 方法的计算步骤：

① 给定初始点 $x^{(0)}$ ，计算精度 $\varepsilon > 0$ ， n 个初始的线性无关的搜索方向（一般取为 n 个坐标轴方向）为 e_1, e_2, \dots, e_n 。令

$$s_j = e_{j+1}, j = 0, 1, \dots, n-1, k = 0$$

② 进行一维搜索，决定 λ_k ，使得

$$f(x^{(k)} + \lambda_k S_k) = \min f(x^{(k)} + \lambda S_k) \quad (4.6)$$

令 $x^{(k+1)} = x^{(k)} + \lambda_k S_k$, 若 $k < n$, 令 $k = k + 1$, 转向②; 否则转向③;

③若 $\|x^{(n)} - x^{(0)}\| < \varepsilon$, 计算结束, 取 $x^* \approx x^{(n)}$; 否则求整数 $j (0 \leq j \leq n - 1)$, 使

$$\Delta = f(x^{(j)}) - f(x^{(j+1)}) = \max_{0 \leq i \leq n-1} [f(x^{(i)}) - f(x^{(i+1)})];$$

④令 $f_1 = f(x^{(0)})$, $f_2 = f(x^{(n)})$, $f_3 = f(2x^{(n)} - x^{(0)})$, 若 $2\Delta < f_1 - 2f_2 + f_3$, 则

方向 s_0, s_1, \dots, s_{n-1} 不变, 令 $x^{(0)} = x^{(n)}$, $k = 0$, 返回②; 否则令

$$s_n = \frac{x^{(n)} - x^{(0)}}{\|x^{(n)} - x^{(0)}\|}, \quad s_i = s_{i+1}, i = j, j+1, \dots, n-1, \text{ 转向⑤};$$

⑤求 λ_n , 使得

$$f(x^{(n)} + \lambda_n s_n) = \min f(x^{(n)} + \lambda s_n)$$

令 $x^{(0)} = x^{(n)} + \lambda_n s_n$, $k = 0$, 返回②。

在 Powell 方法中, 用到了一维搜索, 这里采用的是不用导数的布伦特 (Brent) 法。该方法联合使用反抛物内插法和黄金分割法求一维优化问题, 且适用于函数有较好解析性质的情形, 它仅需用函数值且它兼有黄金分割和反二次插值的优点。

(3) 优化程序流程图如图 4.1 所示。

4.2.2 网格搜索寻优法

通过分析空调制冷系统制冷机和冷却塔的网格能耗模型可知: 制冷机能耗模型由以下几个变量: 能耗 ($P_{chiller}$), 制冷量 ($Q_{chiller}$), 冷冻水供水温度 (T_{CWS}), 冷却水供水温度 (T_{CWS}) 组成; 冷却塔能耗模型由以下几个变量: 温差 ($DiffTemp$), 冷却水质量流量 (m_w), 冷却塔空气质量流量 (m_a) 组成。其中, 温差 ($DiffTemp$) = 冷却水供水温度 (T_{CWS}) - 环境湿球温度 (T_{wb}) 组成。网格搜索寻优法的基本思想是: 在满足冷负荷和冷冻水供水温度条件下, 通过查找模型表找到使得系统能耗最小的运行工作点。

网格搜索寻优法的算法流程如下:

Step1 计算系统的实际冷负荷 ($Q_{chiller}$) 和环境湿球温度 (T_{wb}) 及给定冷冻水供水温

度(T_{CHWS}):

Step2 在制冷机模型表中, 选取满足冷负荷和冷冻水供水温度的行, 得到相应的冷却水供水温度(T_{CWS}), 并记录相应的制冷机功率;

Step3 计算温差($DiffTemp$)及冷却塔散热量($LoadCT$), 在冷却塔模型表中, 选取满足上述温差和冷却塔散热量的行, 求得其各行功率(冷却水泵功率、冷却塔风扇功率与制冷机功率)之和的最小值。

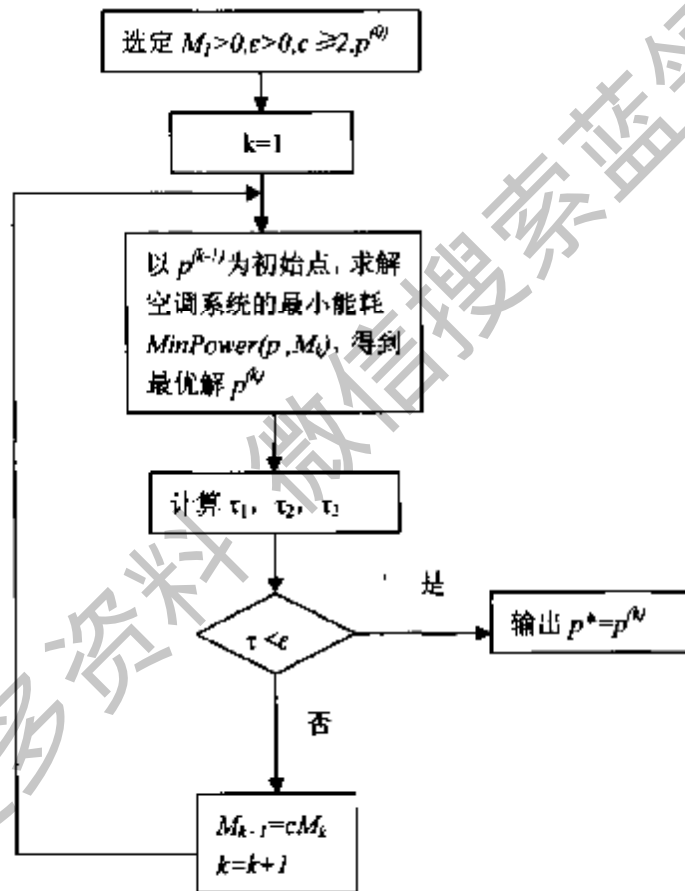


图 4.1 多项式法程序流程图

Fig.4.1 Program flow chart of polynomial

4.2.3 死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的优化方法

(1) 死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法在空调制冷系统中的实现

粒子群算法同遗传算法类似, 它是不依赖于目标函数的解析性质, 同时又能以较大的概率收敛于全局最优解的一种解决全局优化问题的有效方法^[62], 但比遗传算法简

单, 易实现, 因此运用此方法可以较好的解决空调制冷系统这样的多变量非线性的约束优化问题。但是选用此方法对空调制冷系统进行优化也存在缺陷: 易产生早熟收敛, 且到收敛后期收敛速度慢等。为较好的解决此问题, 对基本粒子群算法进行了改进, 选用压缩因子的粒子群算法能较好的克服 PSO 算法的早熟收敛, 进而得到高质量的解。

罚函数法能够较有效的处理空调制冷系统这样的约束优化问题, 又其包括静态罚函数、动态罚函数、退火罚函数、分化罚函数等。其中的死亡罚函数法 (Death Penalty, DP) 将非可行解直接丢弃, 处理约束简单高效。因此采用了死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法相结合的算法来解决空调制冷系统的优化问题。

通过分析空调制冷系统运行的工艺过程, 可知空调系统的能耗设备包括: 制冷机, 冷却水泵和冷却塔风扇。中央空调优化的目的在于在满足冷负荷的情况下, 系统的能耗最小, 因此系统的目标函数为制冷系统各个耗能部件的功率之和:

$$\min P_{total} = P_{chiller} + P_{pump} + P_{fan} \quad (4.7)$$

$$\text{st. (1)} \quad m_{wmin} \leq m_w \leq m_{wmax};$$

$$m_{amin} \leq m_a \leq m_{amax};$$

$$T_{CHWSmin} \leq T_{CHWS} \leq T_{CHWSmax} \quad (4.7a)$$

$$(2) \quad Q = m_{CHW} C_{pw} (T_{CHWR} - T_{CHWS}) \quad (4.7b)$$

$$(3) \quad Q + P_{chiller} = m_w C_{pw} (T_{CWR} - T_{LWS}) \quad (4.7c)$$

$$(4) \quad Q + P_{chiller} = Q_{ref} \quad (4.7d)$$

其中, 约束(1)是对所有变量的运行范围加以限定。约束(2)为计算系统的冷负荷计算, 并用到约束(3)和(4)。约束(3)限定冷凝器要传递相应的热量到冷却塔。约束(4)表示冷却塔将热量完全散发到环境中。

本文所构造的广义目标函数形式如下:

$$F(x) = \begin{cases} f(x) & x \in \Omega \\ f(x) + n \cdot N & x \notin \Omega \end{cases} \quad (4.8)$$

其中 $f(x)$ 代表空调制冷系统的总能耗; n 为该粒子不满足约束的个数, N 是

个大正数。此算法运用惩罚项将搜索空间 S 内的非可行域变成“山峰”，然后用 PSO 全局搜索算法对转化后的无约束问题进行求解。

(2) 算法流程如下：

① 初始化中央空调制冷系统待优化变量（冷却水供水温度、冷却水流量、冷却塔风扇流量）组成的粒子群，设定群体中粒子的个数 m ，给定加速常数 c_1 、 c_2 的值，最大进化代数 T_{max} 。且随机产生每个粒子的位置 X_i 和速度 V_i ，设每个粒子的初始位置为粒子的个体极值 p_{best} ，取 p_{best} 中的最优值记为 g_{best} ；

② 通过式(4.8)计算每个粒子的适应值（即空调制冷系统的能耗） $fitness$ ，若其值小于 p_{best} 则替换 p_{best} ，若 p_{best} 中有小于 g_{best} 的则替换 g_{best} ；

③ 根据公式(2.4)、(2.5)来更新每个粒子的位置和速度；

④ 如果取得中央空调制冷系统的最小能耗或迭代次数达到设定的最大迭代次数，则停止迭代，输出优化得到的最优值（中央空调制冷系统的最小能耗及优化得到的工作设定点，设定点包括：冷冻水供水温度、冷却水流量、冷却塔空气质量流量）否则转到步骤②。

算法流程图如图 4.2 所示。

4.3 空调制冷系统优化软件的开发

本课题主要研究空调制冷系统的优化软件开发问题，进而开发出了对空调制冷系统工作点在线优化的软件，达到了使制冷系统能耗最小的目标。本课题主要开发出了如下几个模块：系统建模模块，系统优化模块，优化结果图形显示模块。

4.3.3 制冷系统建模模块软件开发

(1) 建模模块初始化

在对空调制冷系统建模，即运行建模软件之前，需要录入制冷机的一般参数，如：制冷机的额定制冷能力，冷却水的额定质量流量，冷凝水的额定质量流量，制冷机的额定制冷效率及制冷机的额定能耗。上述变量用以描述空调制冷系统的性能的，称其为制冷系统的静态量。对于不同的空调制冷系统，其值是不同的，因此在运行建模之前，要录入系统的静态量的值，并将其值存入数据库存储制冷机静态量值的静态表

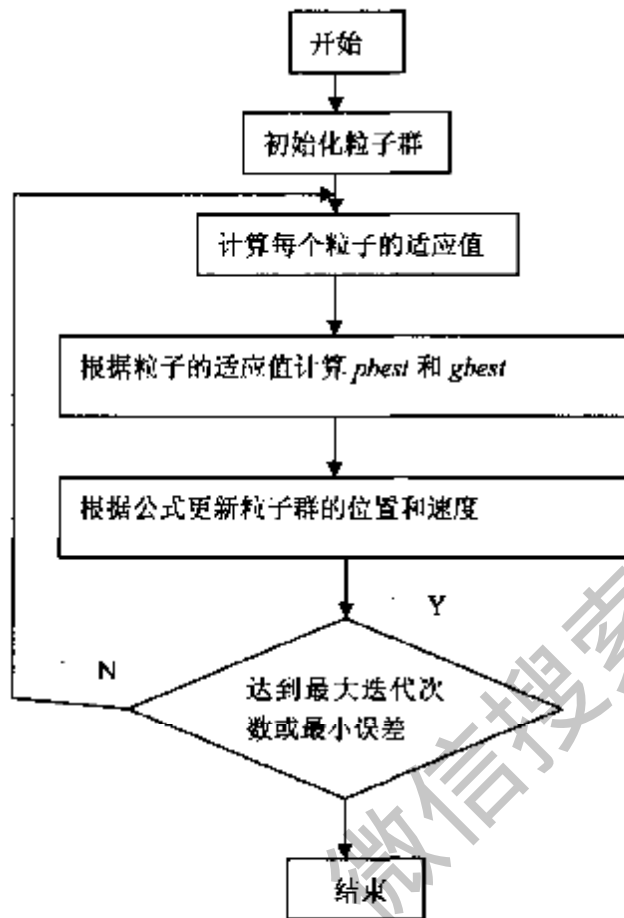


图 4.2 粒子群优化流程图

Fig.4.2 Program flow chart of PSO

Chiller_S 中。程序运行过程为：首先，运行程序，得到暖通空调优化控制软件的总体界面，然后选择其菜单栏中的设备—冷冻机系统—冷冻机，然后单击冷冻机菜单项，弹出制冷机参数录入界面，其实现的主要功能包括：录入制冷机的名称和地址和能够描述制冷系统性能的制冷机一般参数，单击保存按钮后将此数据存入数据库的静态表 Chiller_S 中，并实现了对静态表 Chiller_S 中的数据记录进行查找，增加，删除的操作。空调制冷系统建模模块初始化运行界面如图 4.3 所示。

(2) 制冷机多项式模型

通过对制冷机的能耗特性进行分析，可知制冷机的能耗模型如式(4.3)所示。本模块实现了建立制冷机多项式能耗模型的功能，即辨识出了式(4.3)中制冷机模型的系数 a_0, a_1, \dots, a_7 ，建模软件运行界面如图 4.4 所示。

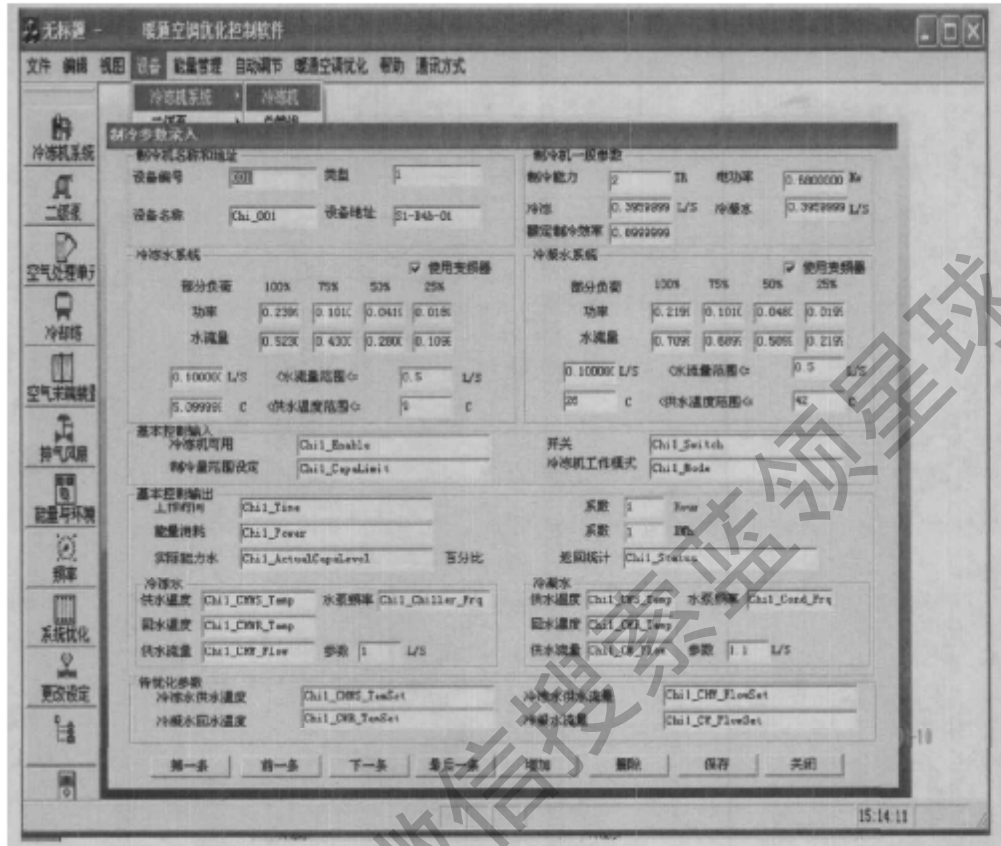


图 4.3 建模模块初始化界面

Fig.4.3 Initialization interface of modeling module

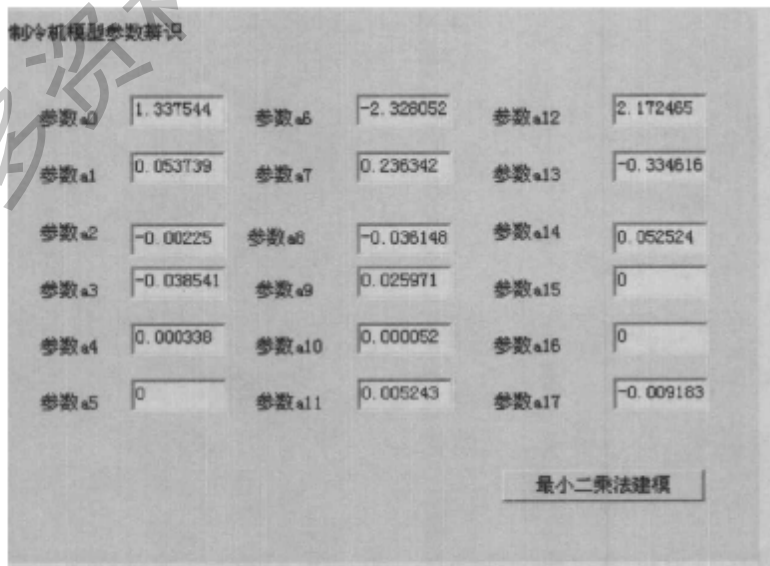


图 4.4 制冷机能耗模型系数

Fig.4.4 Coefficient of chiller energy consumption module

运用实际的实验数据，对建立的制冷机多项式能耗模型进行仿真输出，并与制冷机的实际输出进行线性回归，所得的回归结果如图 4.5 所示。

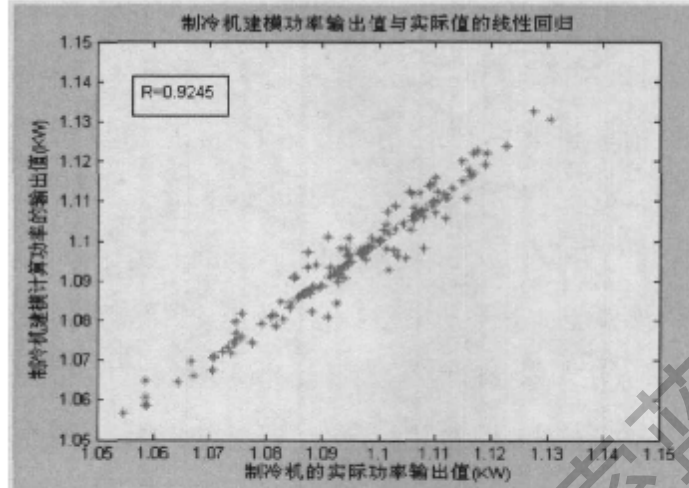


图 4.5 多项式模型制冷机功率输出值与实际值的线性回归

Fig.4.5 Linear regression of chiller output power of polynomial model

制冷机能耗线性回归的相关系数 R 为 0.9245, 可以看出制冷机多项式模型的输出与系统的实际输出拟合程度较好。鉴于制冷机的能耗模型比较复杂, 而且选择的建模数据也不能完全反映制冷机所有运行工况内各个工作点的能耗特性, 通过最小二乘法建立的制冷机的多项式能耗模型可以作为空调制冷系统优化控制的模型进行优化运算。

在本模块的软件开发中, 添加了 CChillerModelPara 类, 其功能为建立制冷机的多项式能耗模型, 包含的主要函数及函数功能如下:

- 1) float CChillerModelPara::com(), 其功能为计算方程组的系数矩阵。
- 2) float CChillerModelPara::com1(), 其功能为计算方程组的常数项。
- 3) void CChillerModelPara::process(), 其功能为计算制冷机多项式能耗模型的系数。

在基于对话框类的 Chiller_Tab 类的 OnModeling() 函数中调用上述 process() 函数, 得到图 4.4 的运行界面, 即完成了制冷机模型的软件开发工作。

(3) 制冷机网络能耗模型

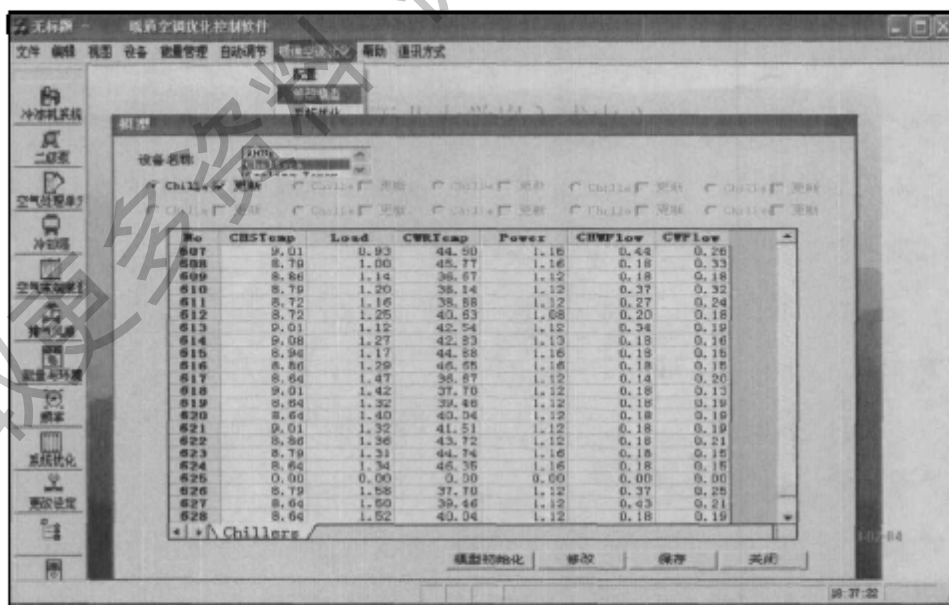
制冷机的网络能耗模型基本思想: 将制冷机能耗的自变量 Q , T_{CHWS} , T_{CWS} 分档, 然后将各个分档数据进行组合, 建立能够反映制冷机能耗模型的模型表, 并运用实际

数据填写模型表。本模块的功能为建立制冷机的网络能耗模型，在设置了制冷机的静态参数后，选择暖通空调优化控制软件的总体界面菜单栏中的暖通空调优化菜单项，单击此项后选择修改模型菜单项，在建立制冷机的网络模型时，需选择设备名称 Chillers，双击后进入制冷机模型界面。建立制冷机模型时，需选择制冷机类型并同时选择更新按钮。在本模块中，模型初始化按钮实现了建模功能，并能对模型进行修改和保存。制冷机的网络建模模块运行界面如图 4.6 所示。

在本模块的软件开发中，在 CModelling_Chiller 类中添加 OnBUTTONModel Initial()函数，其功能为建立制冷机的网络能耗模型，实现模型初始化的功能。从制冷机网络模型的建模方法和建模过程可以看出，此模型能够有效的表达出制冷机的各个运行状态，并根据实际的实验数据进行建模，即模型中系统的各个状态都为系统实际运行时的状态，进而说明了制冷机的网络模型能够较好的反应制冷机的能耗特性，且建模过程简单，利于工程实现。

4.3.4 制冷系统优化模块

制冷系统的优化模块实现的功能为在满足制冷量和冷冻水供水温度条件下，在线优化控制空调制冷系统运行的工作设定点，达到系统能耗最小的目标。



No	ChlTemp	Load	CWRTemp	Power	ChWFlow	CWFlow
807	8.01	0.93	44.50	1.16	0.44	0.26
808	8.79	1.00	45.77	1.16	0.18	0.33
809	8.86	1.14	38.67	1.12	0.18	0.18
810	8.79	1.30	38.14	1.12	0.37	0.32
811	8.72	1.16	38.88	1.12	0.27	0.24
812	8.72	1.25	40.63	1.08	0.20	0.18
813	8.01	1.12	42.54	1.12	0.34	0.19
814	8.08	1.27	42.83	1.13	0.19	0.16
815	8.94	1.17	44.88	1.16	0.19	0.15
816	8.86	1.29	46.65	1.16	0.18	0.18
817	8.64	1.47	38.87	1.12	0.14	0.20
818	8.01	1.42	37.70	1.12	0.18	0.13
819	8.64	1.32	39.46	1.12	0.18	0.19
820	8.64	1.40	43.94	1.12	0.18	0.19
821	8.01	1.32	41.51	1.12	0.18	0.19
822	8.86	1.36	43.72	1.12	0.18	0.21
823	8.79	1.31	44.74	1.16	0.18	0.15
824	8.64	1.34	45.35	1.16	0.18	0.15
825	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
826	8.79	1.58	37.70	1.12	0.37	0.28
827	8.64	1.50	39.46	1.12	0.43	0.21
828	8.64	1.52	43.94	1.12	0.18	0.19

图 4.6 制冷机网络建模模块运行界面

Fig.4.6 Running interface of chiller grid modeling module

(1) 优化软件初始化

对空调制冷系统进行优化,即在运行优化软件模块之前,要根据当前系统的实际特性确定系统动态量值的范围,如:冷冻水供水温度范围,冷却水供水温度范围,冷冻水供水流量范围,冷却水供水流量范围,冷却塔的空气质量的范围。运行程序,打开制冷机参数录入界面,查找制冷机的名称和地址后,录入相对应的系统动态量值的范围,单击保存按钮后,将其值存入静态表 Chiller_S 中,并实现了对 Chiller_S 表中记录的查找、增加、删除操作。优化程序运行过程为:运行程序,选择菜单栏中的暖通空调优化—系统优化菜单项,单击系统优化菜单项后,弹出空调系统优化部分选择界面,选择制冷系统优化菜单项,单击开始按钮,弹出优化方法选择界面所示,选定所选择的优化方法,并输入优化运行条件冷冻水供水温度的值,单击确定按钮后,弹出开始优化的提示框,单击确定按钮后,优化程序开始运行,运行结果为优化后的冷却水供水温度,冷却水泵质量流量,冷却塔空气质量流量,并显示优化后的系统能耗值及实际系统能耗值与优化后系统能耗值的差,进而完成了空调制冷系统的优化,此时开始按钮变为停止按钮。优化软件上述运行界面如图 4.7 所示。结束优化程序时,需单击停止按钮,弹出停止优化的提示框,单击确定按钮后,优化程序停止,停止按钮还原为开始按钮,优化结果运行界面如图 4.8 所示。若要退出空调制冷系统优化的模块,需单击优化结果显示界面的退出按钮,此时空调制冷系统的优化程序结束。

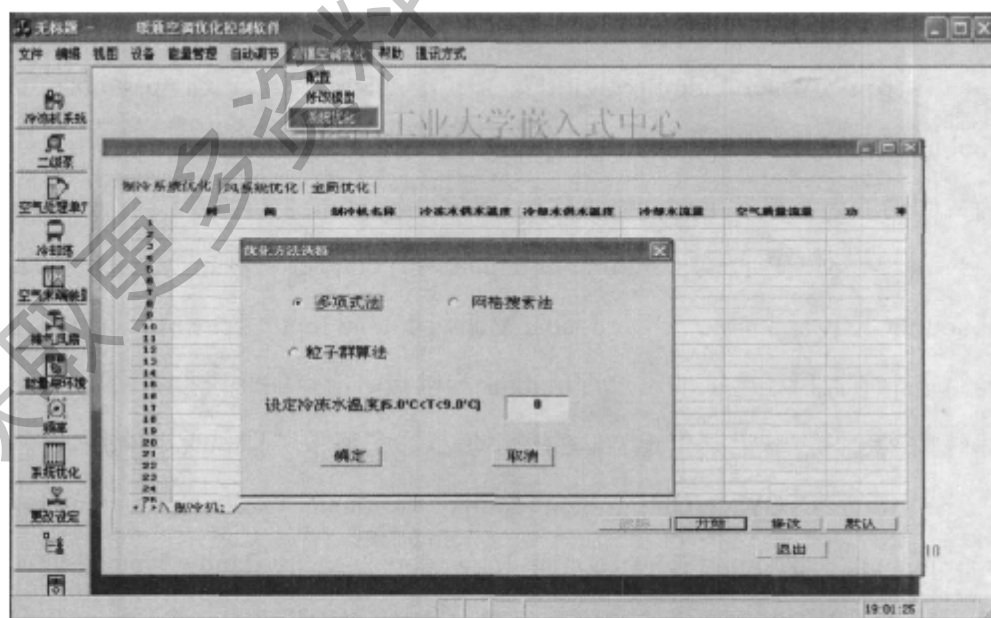


图 4.7 优化软件运行界面

Fig.4.7 Running interface of optimization software

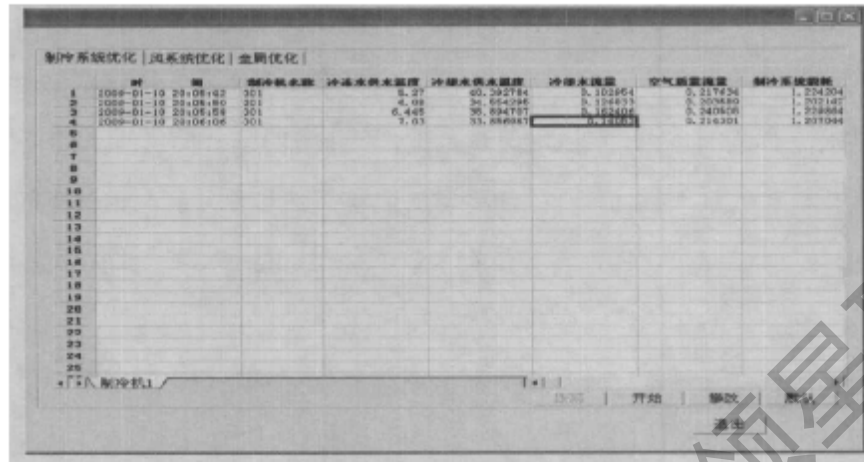


图 4.8 优化结果显示界面

Fig.4.6 Display interface of optimization result

(2) 多项式法优化软件的开发

本模块采用了适于工程应用的传统的多项式方法来开发空调制冷系统的优化软件。在本模块的开发中，添加了实现多项式优化方法的 CWaterOptim 类，其中包含的主要函数及功能如下：

1) double CWaterOptim::process(double &fret, double p[5], double Tchws, double Tchwr, double Mchw, double Input_Tchws), 函数的功能为采用多项式法优化空调制冷系统，取到使得系统能耗最小的工作点及能耗最小值。

2) void CWaterOptim::powell(double p[], double xi[], int n, int np, double ftol, int &iter, double &fret, double m, double Tchws, double Tchwr, double Mchw, double Input_Tchws), 函数的功能为计算多维无约束优化问题目标函数的极小值点和极小值。

3) void CWaterOptim::linmin(double p[], double xi[], int n, double &fret, double m, double Tchws, double Tchwr, double Mchw, double Input_Tchws), 函数的功能为通过调用极小值点所在区间的子过程 mnbrak 和求极小值点的一维搜索函数过程 brent 求目标函数从起始点 p 沿某指定方向的极小值点，它被子过程 powell 调用。

4) double CWaterOptim::brent(double ax, double bx, double cx, double tol, double &xmin, double m, double Tchws, double Tchwr, double Mchw, double Input_Tchws), 函数功能为联合使用反抛物内插法和黄金分割法求一维优化问题。

5) void CWaterOptim::mnbrak(double &ax, double &bx, double &cx, double &fa,

`double &fb, double &fc, double m, double Tchws, double Tchwr, double Mchw, double Input_Tchws)`, 函数功能为利用黄金比率和二次插值确定函数的极小值点所在区间。

6) `double CWaterOptim::golden(double ax, double bx, double cx, double tol, double &xmin, double m, double Tchws, double Tchwr, double Mchw, double Input_Tchws)`, 函数功能为用黄金分割法求一元函数的极小值, 此时要求目标函数是一元函数, 且已确定了极小值点所在的区间。

上述函数实现了运用多项式法对空调制冷系统优化的功能, 在基类为 `CDialog` 类的 `Chiller_Tab` 的 `OnTimer()` 函数中, 实现功能如下: 读取空调制冷系统动态变量的值, 如: 冷冻水供回水温度, 冷冻水质量流量, 冷却水供回水温度, 冷却水质量流量, 冷却塔风扇的空气质量流量及环境的干球温度和相对湿度; 调用 `Process()` 函数实现系统的优化, 并将优化值显示在优化结果运行界面上, 并通过调用函数: `void CChiller_Tab::UpdateValue(double chtemp, double ctemp, double chflow, double cflow, double dfret)` 将优化值结果存入 `chiller_d` 表中。至此, 完成了空调制冷系统的多项式法优化软件开发工作。

(3) 网格搜索寻优算法优化软件的开发

本模块采用了适于工程应用的网格搜索寻优方法来开发空调制冷系统的优化软件。在本模块的开发中, 添加了实现网格搜索寻优方法的 `CInterWaterOptim` 类, 其中的函数 `Optimization_Water_System()` 实现了优化过程。同多项式法类似, 在基类为 `CDialog` 类的 `Chiller_Tab` 的 `OnTimer()` 函数中, 实现功能如下: 调用 `Optimization_Water_System()` 函数实现系统的优化, 并将优化值显示在优化结果运行界面上。运行此模块后, 得到了优化后空调制冷系统的运行工作点: 冷冻水供水温度, 冷却水供水温度, 冷却水流量及冷却塔空气质量流量, 并得到了系统的最小能耗。至此, 完成了空调制冷系统网格搜索寻优方法优化软件的开发工作。

(4) 粒子群算法优化软件的开发

本模块提出了运用新型优化算法——死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的算法来处理非线性多变量的空调制冷系统约束优化问题, 此方法的收敛速度快, 全局搜索能力强。在制冷系统优化模块中, 添加了实现死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的算法的 `CPSOOptim` 类, 包含的主要函数及函数功能如下:

1) void CPSOOptim::initiate(), 函数功能为: 初始化粒子群, 随机产生每个粒子的随机产生每个粒子的位置和速度, 并设定每个粒子的局部极值及整个群体的全局极值。

2) void CPSOOptim::calculation(int number), 函数功能为计算各个粒子的适应值。

3) void CPSOOptim::localbest(int number), 函数功能为根据粒子的适应值计算粒子的个体极值。

4) void CPSOOptim::globalbest(int number), 函数功能为根据粒子的适应值计算粒子的全局极值。

5) void CPSOOptim::generate(int num), 函数功能为根据压缩因子粒子群算法的速度和位置更新公式 (公式(2.4)、(2.5)) 来更新粒子群中粒子的速度和位置。

6) void CPSOOptim::psoptim(int number), 函数功能为采用死亡罚函数和压缩因子的粒子群算法优化空调制冷系统, 进而取到使系统能耗最小的工作点及能耗最小值。

通过调用上述函数, 实现了运用死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的算法优化空调制冷系统的功能。同多项式法类似, 在基类为 CDialog 类的 Chiller_Tab 的 OnTimer() 函数中, 实现功能如下: 读取空调制冷系统动态变量的值, 如: 冷冻水供回水温度, 冷冻水质量流量, 冷却水供回水温度, 冷却水质量流量, 冷却塔风扇的空气质量流量及环境的干球温度和相对湿度; 调用 psoptim() 函数实现系统的优化, 并将优化值显示在优化结果运行界面上, 并通过调用函数: void CChiller_Tab::UpdateValues() 将优化值结果存入 chiller_d 表中。至此, 完成了空调制冷系统的粒子群算法优化软件开发工作。

4.3.5 优化结果图形显示模块软件开发

优化结果图形显示模块实现的功能为用图形显示优化空调制冷系统的运行工作点的结果及优化前后系统的能耗。在选定优化方法后, 得到如图 4.13 所示的系统优化运行界面, 且跟踪按钮被激活, 点击跟踪按钮后, 弹出开始跟踪的提示框, 点击确定按钮, 进而实现了显示优化结果图形界面的功能。

在本模块的软件开发中, 添加了 CChillerTraceDialog 类, 其功能为显示优化空调制冷系统的优化结果, 包含的主要函数及功能如下:

1) void CChillerTraceDialog::DrawAxis (int x,int y,int xlong,int ylong,int xnum,int ynum), 函数功能为画坐标轴。

2) void CChillerTraceDialog::DrawScale (int x,int y,int ystep,int ynum,float ymax), 函数功能为画 Y 轴刻度。

3) void CChillerTraceDialog::DrawLine (int x,double *y,int n,int step), 函数功能为画线。

在 CChillerTraceDialog 类的 OnInitDialog()函数中设定优化结果图形显示界面中各个坐标轴的原点、坐标轴长度;在 CChillerTraceDialog 类的 OnPaint()函数中调用上述函数,实现了图形显示模块的绘图功能。

4.4 本章小结

本章详细介绍了优化控制中央空调制冷系统的多项式法、网格搜索寻优方法的原理和运算过程,并提出了运用粒子群算法来优化空调制冷系统。针对粒子群算法局部搜索能力差的缺点及罚函数法局部搜索能力强的特性,提出了死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的算法来对中央空调制冷系统进行优化。同时,编写了上述三种方法的优化程序,并开发出了优化控制中央空调制冷系统的软件。

第五章 实验与分析

空调制冷系统的功能为实现对系统运行工作点的在线优化。为验证空调制冷系统优化软件的节能效果，对实验室的小型中央空调系统进行了优化。实验设备如图 5.1 所示。

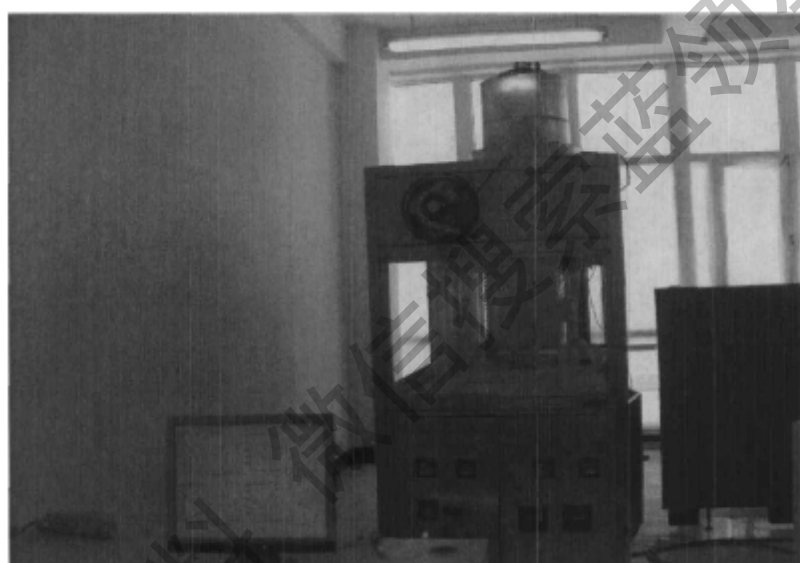


图 5.1 中央空调实验系统实验装置

Fig.5.1 Equipment of HVAC system

中央空调制冷系统由一台制冷机，一台冷却水泵，一台冷却塔构成。设备规格如下：

- 1) 制冷机：制冷机在冷冻水供水温度为 7°C ，冷却水供水温度为 30°C 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 0.265 KW，额定流量为 0.5kg/s；
- 3) 冷却塔风扇：冷却塔风扇额定功率为 0.125 KW，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%。本系统基于 Lonworks 技术采集动态数据，硬件为温度传感器、湿度传感器、流量传感器、变送器测量设备。

下面在不同工况和不同外部环境条件下，将优化方法与系统的实际能耗进行对

比,说明了优化方法在中央空调制冷系统优化控制中的作用及开发在线优化空调制冷系统运行工作点优化软件可以达到节能的目的。

5.1 空调制冷系统优化结果比较

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。所以,在不同的冷负荷,冷冻水供水温度和环境湿球温度条件下,系统的能耗特性是不同的,下面将根据各种不同的工况进行比较。

5.1.1 环境湿球温度发生改变

在冷负荷和冷冻水供水温度一定,环境湿球温度改变的条件下,分别采用多项式法、网格搜索寻优方法和死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的算法对系统进行优化,下面给出在不同冷负荷和冷冻水供水温度条件下的优化结果。

(1) 冷负荷为额定负荷的 60%, 冷冻水供水温度为 7℃时

中央空调制冷系统在冷负荷为额定负荷的 60%, 冷冻水供水温度为 7℃的情况下,采用三种优化方法对系统进行优化,并将优化结果进行比较,所得到的工作设定点和系统能耗情况如图 5.2~图 5.5 所示:

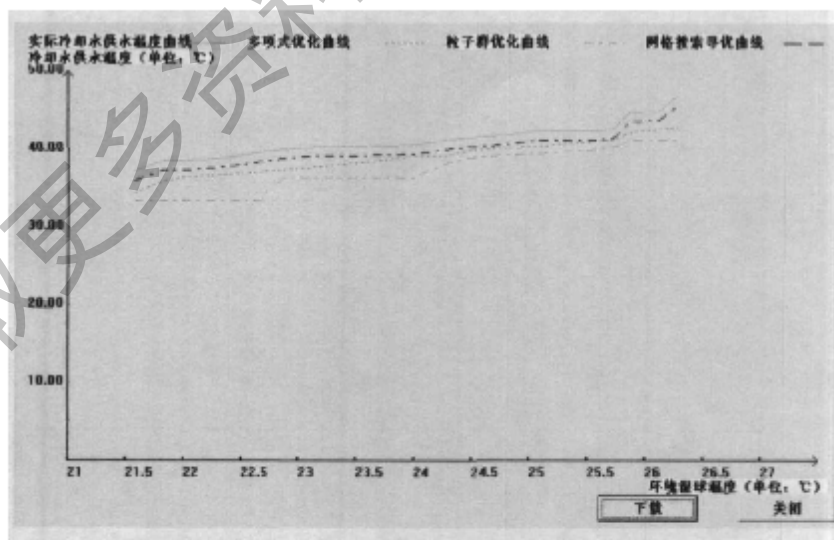


图 5.2 60%冷负荷, 冷冻水供水温度为 7℃下冷却水供水温度设定点的优化

Fig.5.2 60 percent of cooling load, chilled water supply temperature 7℃,
the setpoint optimization of cooling water supply temperature

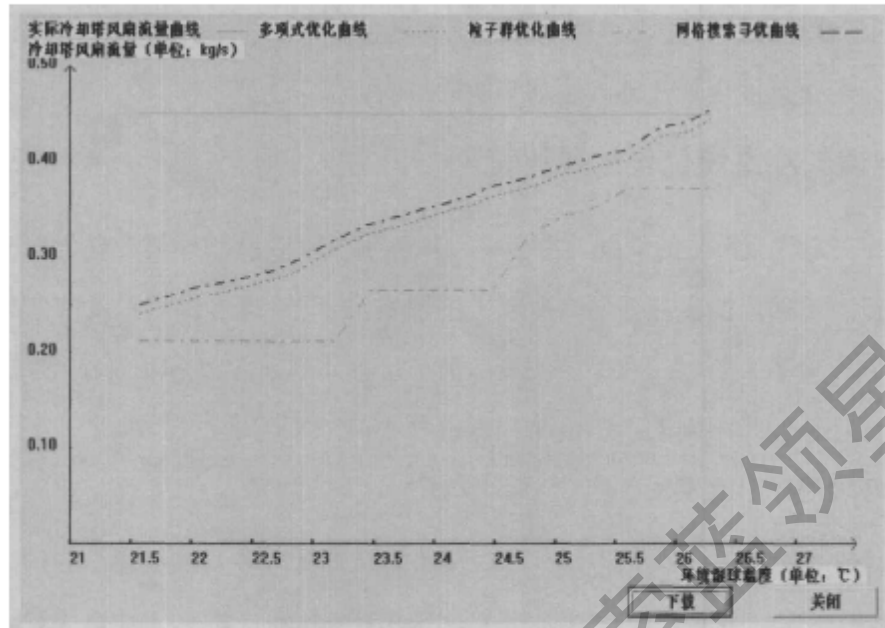


图 5.3 60%冷负荷，冷冻水供水温度为 7℃下冷却塔空气质量流量设定点的优化

Fig.5.3 60 percent of cooling load, chilled water supply temperature 7℃,
the setpoint optimization of cooling tower air flow

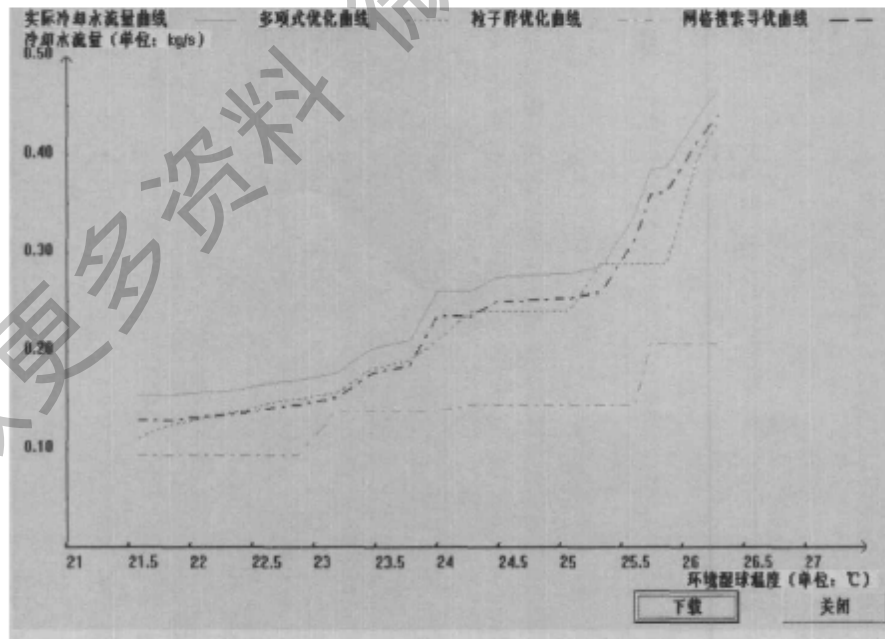


图 5.4 60%冷负荷，冷冻水供水温度为 7℃下冷却水质量流量设定点的优化

Fig.5.4 60 percent of cooling load, chilled water supply temperature 7℃,
the setpoint optimization of cooling water flow

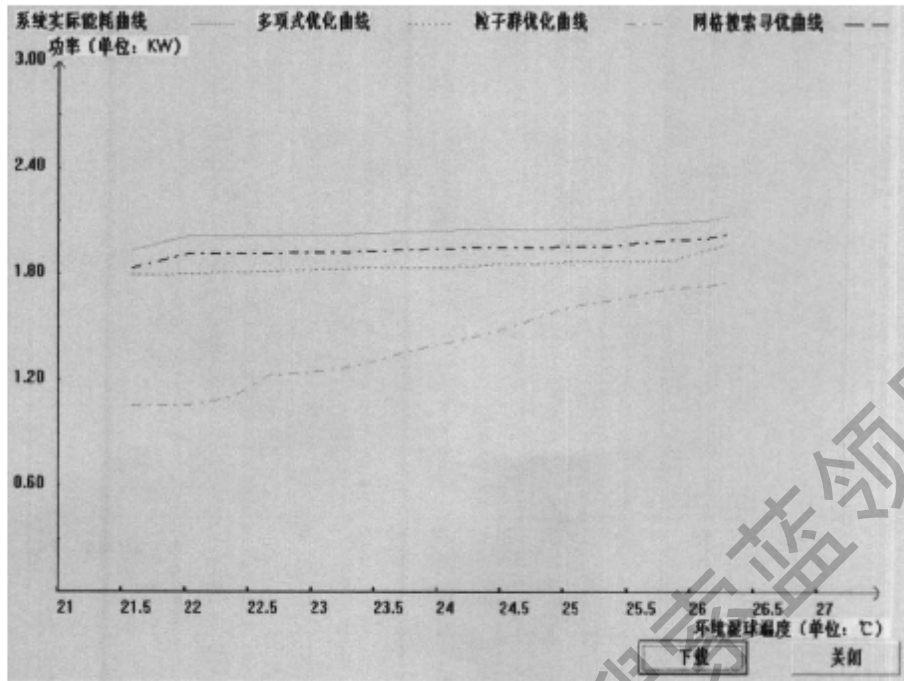


图 5.5 60%冷负荷，冷冻水供水温度为 7℃下空调制冷系统的能耗比较

Fig.5.5 60 percent of cooling load, chilled water supply temperature 7℃,
the energy consumption compare of HVAC refrigeration system

在中央空调制冷系统的实际冷负荷为额定冷负荷的 60%，冷冻水供水温度为 7℃的条件下，采用多项式优化方法、网格搜索寻优方法及死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的优化方法对系统进行优化，将系统的实际能耗、各个工作设定点和优化后的系统能耗和各个工作设定点的值进行比较，结果分别由图 5.2~图 5.5 画出。可以看出，采用上述三种优化方法都达到了系统节能的目标并且系统的各个工作设定点随着环境湿球温度的变化也随之变化，其中采用死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的优化方法的节能效果最好；本文选用的粒子群优化方法在环境湿球温度较低的情况下节能能力强，随着环境湿球温度的升高，节能能力降低，这是因为在环境湿球温度较低的情况下节约的冷却水泵和冷却塔风扇的能耗较多。

(2) 冷负荷为额定负荷的 60%，冷冻水供水温度为 9℃时

在冷负荷为额定负荷的 60%，冷冻水供水温度为 9℃的情况下，分别采用三种优化方法对空调制冷系统进行优化，并将优化结果进行比较，所得到的工作设定点和系统能耗情况如图 5.6~图 5.9 所示：

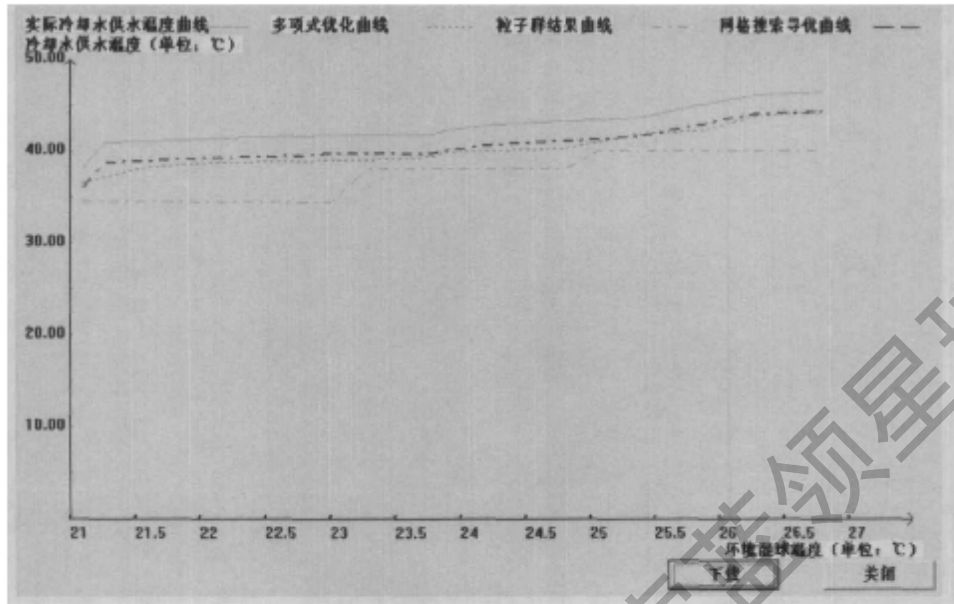


图 5.6 60%冷负荷, 冷冻水供水温度为 9℃下冷却水供水温度设定点的优化

Fig.5.6 60 percent of cooling load, chilled water supply temperature 9℃,
the setpoint optimization of cooling water supply temperature

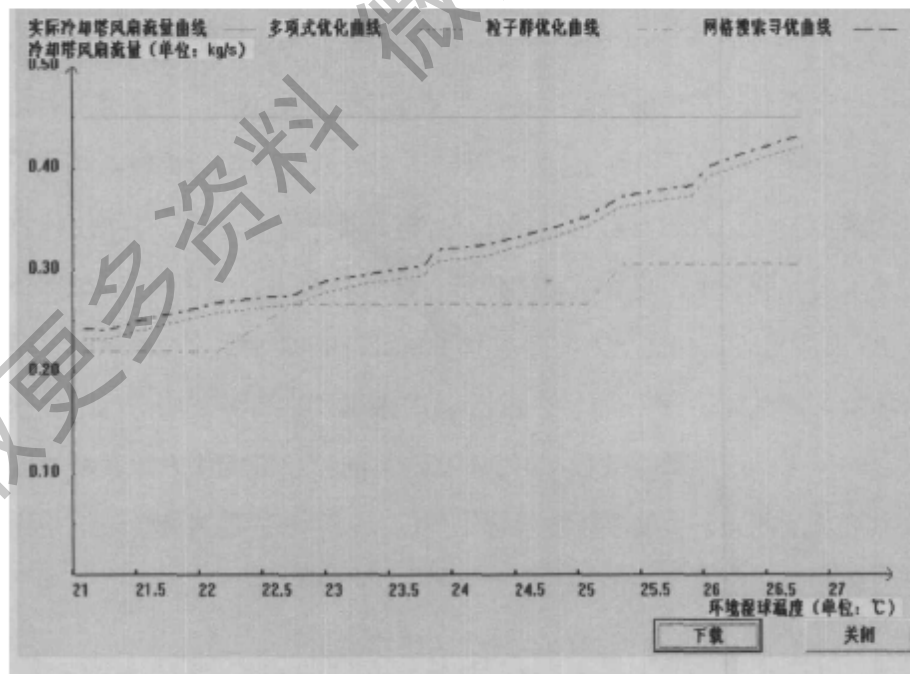


图 5.7 60%冷负荷, 冷冻水供水温度为 9℃下冷却塔空气质量流量设定点的优化

Fig.5.7 60 Percent of cooling Load, chilled water supply temperature 9℃,
the setpoint optimization of cooling tower air flow

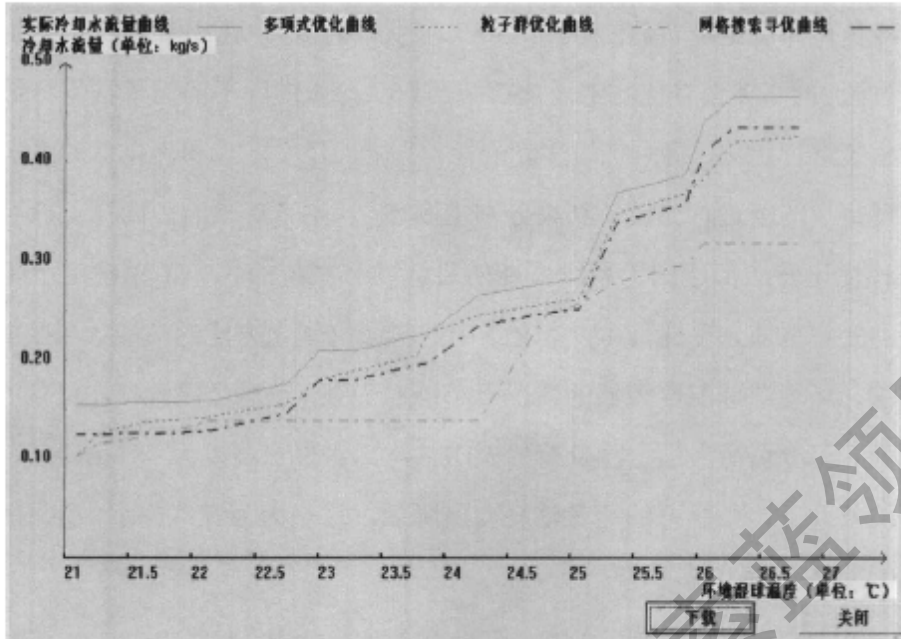


图 5.8 60%冷负荷，冷冻水供水温度为 9℃ 下冷却水质量流量设定点的优化

Fig.5.8 60 percent of cooling load, chilled water supply temperature 9℃,
the setpoint optimization of cooling water flow

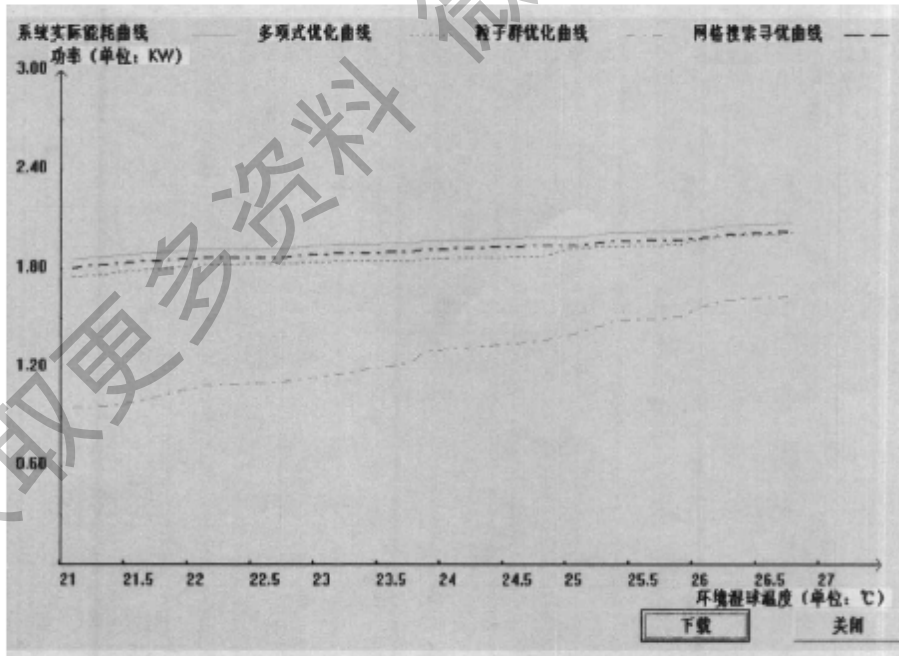


图 5.9 60%冷负荷，冷冻水供水温度为 9℃ 下空调制冷系统的能耗比较

Fig.5.9 60 percent of cooling load, chilled water supply temperature 9℃,
the energy consumption compare of HVAC refrigeration system

在冷负荷为额定冷负荷的 60%，冷冻水供水温度为 9℃的条件下，分别采用多项式优化方法、网格搜索寻优方法及死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的优化方法对系统进行优化，将系统的实际能耗、各个工作设定点和优化后的系统能耗和各个工作设定点的值进行比较，结果分别由图 5.6~图 5.9 画出。同样可以看出，采用上述三种优化方法都达到了系统节能的目标并且系统的各个工作设定点随着环境湿球温度的变化也随之变化，其中本文选用的粒子群优化方法的节能效果最好；粒子群优化方法在环境湿球温度较低的情况下节能能力强，随着环境湿球温度的升高，节能能力降低。和冷负荷为额定冷负荷的 60%，冷冻水供水温度为 7℃相比，在相同的湿球温度的条件下，系统总的能量消耗有所降低，这是因为在冷冻水供水温度升高时，制冷机的能耗有所下降。

(3) 冷负荷为额定负荷的 40%，冷冻水供水温度为 7℃时

在冷负荷为额定负荷的 40%，冷冻水供水温度为 7℃的情况下，采用三种优化方法对系统进行优化，并将优化结果进行比较，所得到的工作设定点和系统能耗情况如图 5.10~图 5.13 所示：

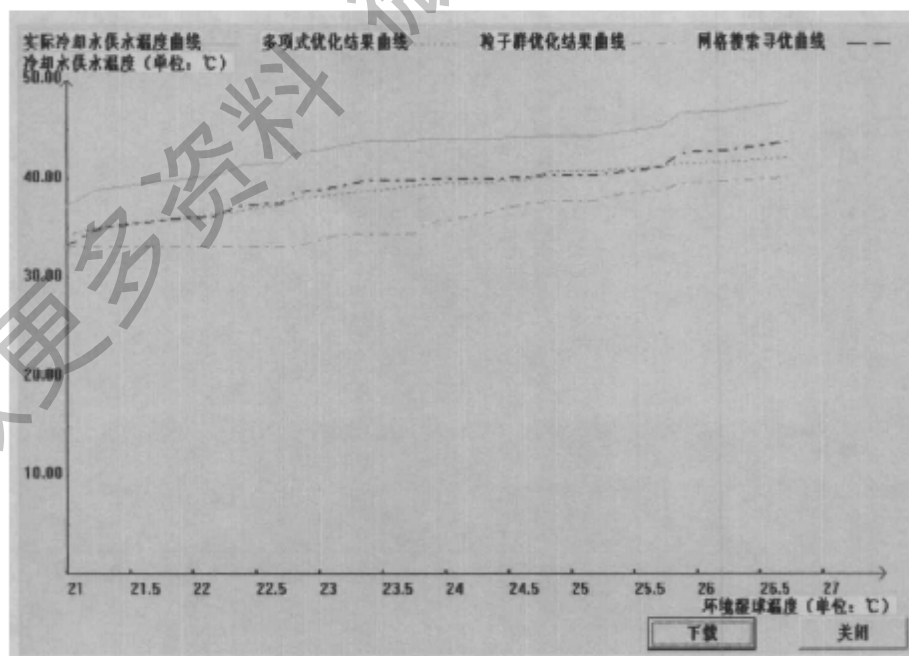


图 5.10 40%冷负荷，冷冻水供水温度为 7℃下冷却水供水温度设定点的优化

Fig.5.10 40 percent of cooling load, chilled water supply temperature 7℃,
the setpoint optimization of cooling water supply temperature

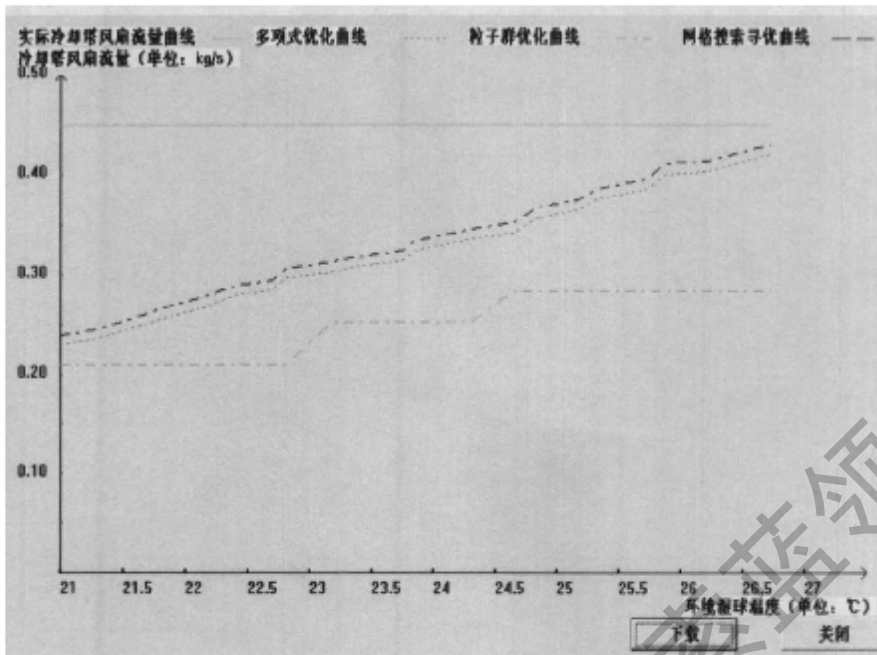


图 5.11 40%冷负荷, 冷冻水供水温度为7°C下冷却塔空气质量流量设定点的优化

Fig.5.11 40 percent of cooling load, chilled water supply temperature 7°C,
the setpoint optimization of cooling tower air flow

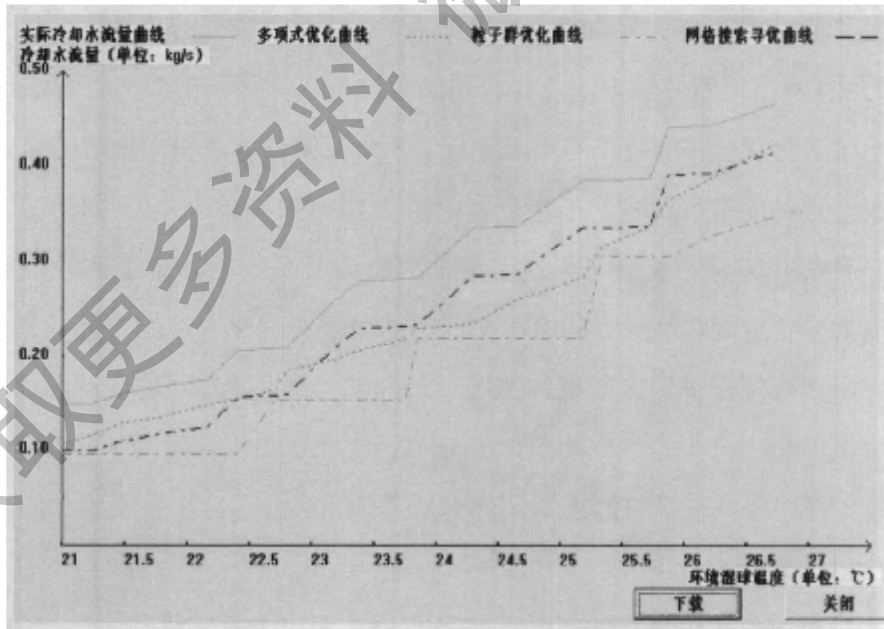


图 5.12 40%冷负荷, 冷冻水供水温度为7°C下冷却水质量流量设定点的优化

Fig.5.12 40 percent of cooling load, chilled water supply temperature 7°C,
the setpoint optimization of cooling water flow

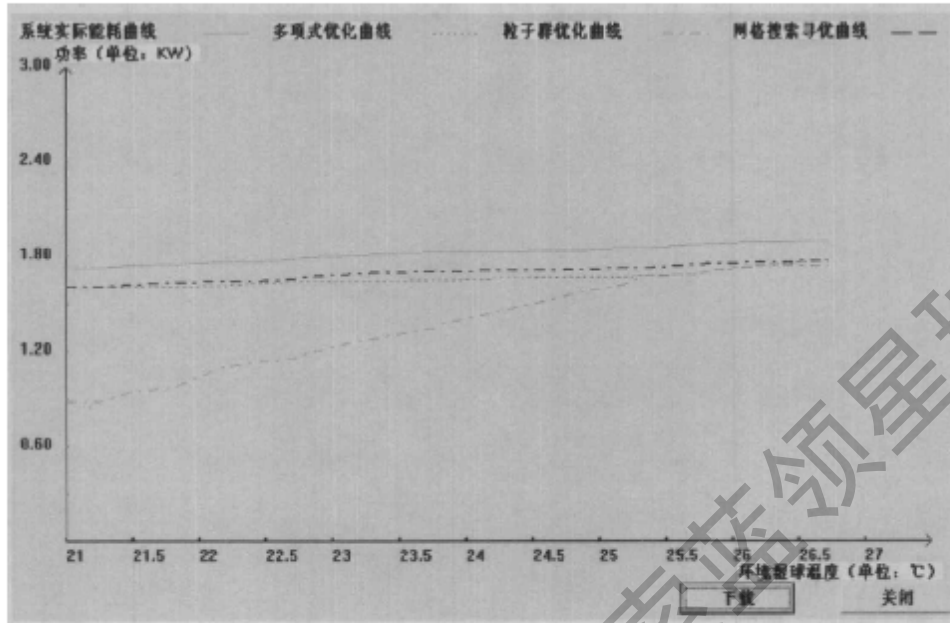


图 5.13 40%冷负荷，冷冻水供水温度为 7℃下空调制冷系统的能耗比较

Fig.5.13 40 percent of cooling load, chilled water supply temperature 7℃,
the energy consumption compare of HVAC refrigeration system

在冷负荷为额定冷负荷的 40%，冷冻水供水温度为 7℃的条件下，分别采用多项式优化方法、网格搜索寻优方法及死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的优化方法对系统进行优化，将系统的实际能耗、各个工作设定点和优化后的系统能耗和各个工作设定点的值进行比较，结果分别由图 5.10~图 5.13 画出。同样可以看出，采用上述三种优化方法都达到了系统节能的目标并且系统的各个工作设定点随着环境湿球温度的变化也随之变化，其中本文选用的粒子群优化方法的节能效果最好；粒子群优化方法在环境湿球温度较低的情况下节能能力强，随着环境湿球温度的升高，节能能力降低。和冷负荷为额定冷负荷的 60%，冷冻水供水温度为 7℃相比，在相同的湿球温度的条件下，系统总的能量消耗有所降低，这是因为在系统要求的冷负荷降低时，制冷机的能耗有所下降。

(4) 冷负荷为额定负荷的 40%，冷冻水供水温度为 9℃时

在冷负荷为额定负荷的 40%，冷冻水供水温度为 9℃的情况下，采用三种优化方法对系统进行优化，并将优化结果进行比较，所得到的工作设定点和系统能耗情况如图 5.14~图 5.17 所示：

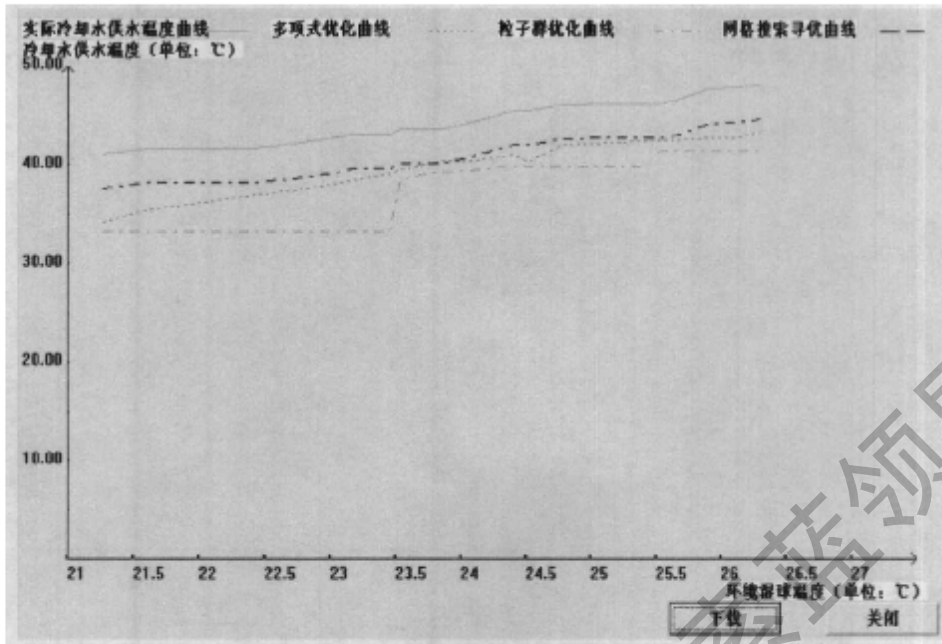


图 5.14 40%冷负荷，冷冻水供水温度为 9℃ 下冷却水供水温度设定点的优化

Fig.5.14 40 percent of cooling load, chilled water supply temperature 9℃,
the setpoint optimization of cooling water supply temperature

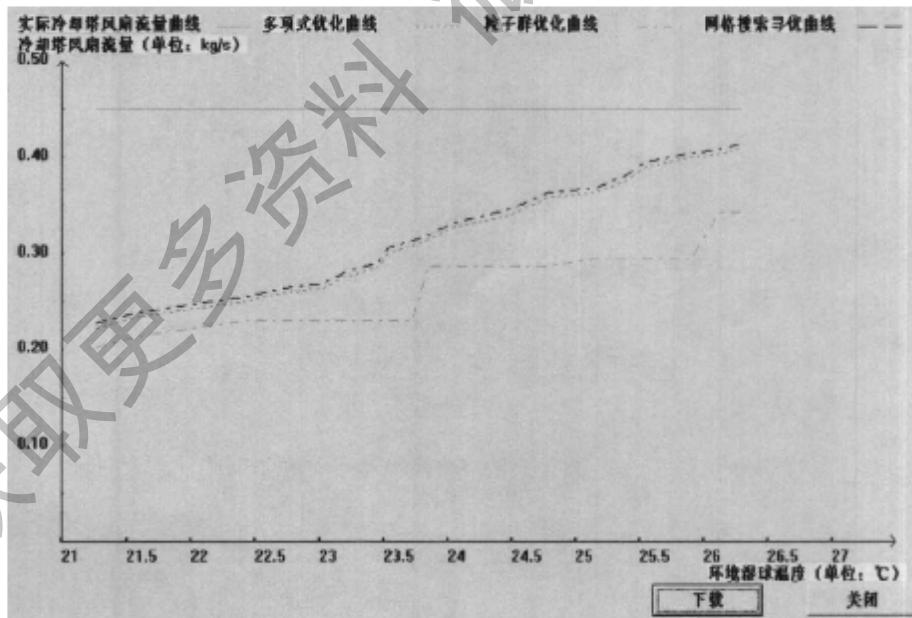


图 5.15 40%冷负荷，冷冻水供水温度为 9℃ 下冷却塔空气质量流量设定点的优化

Fig.5.15 40 percent of cooling load, chilled water supply temperature 9℃,
the setpoint optimization of cooling tower air flow

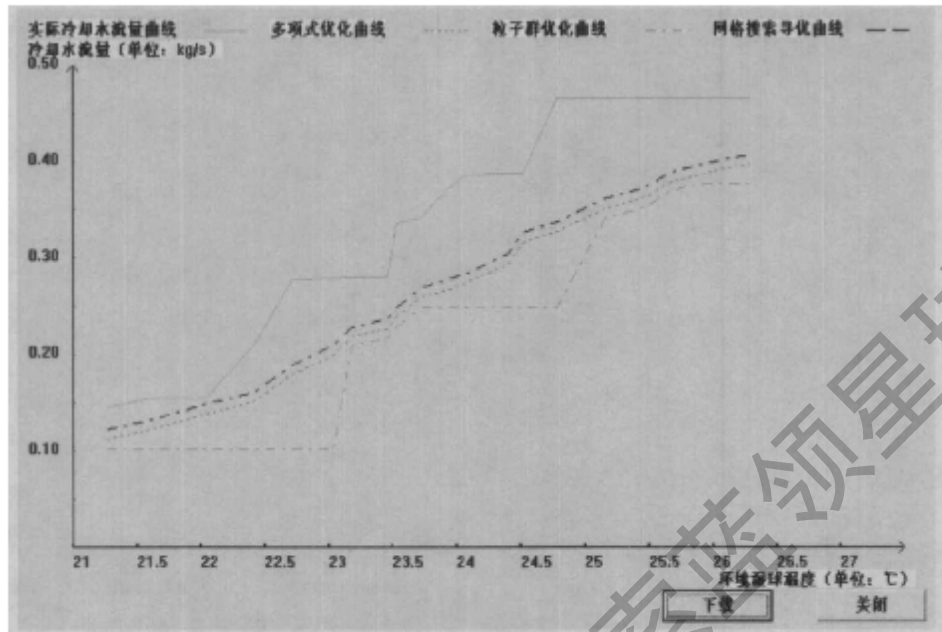


图 5.16 40%冷负荷，冷冻水供水温度为 9℃ 下冷却水质量流量设定点的优化

Fig.5.16 40 percent of cooling load, chilled water supply temperature 9℃, the setpoint optimization of cooling water flow

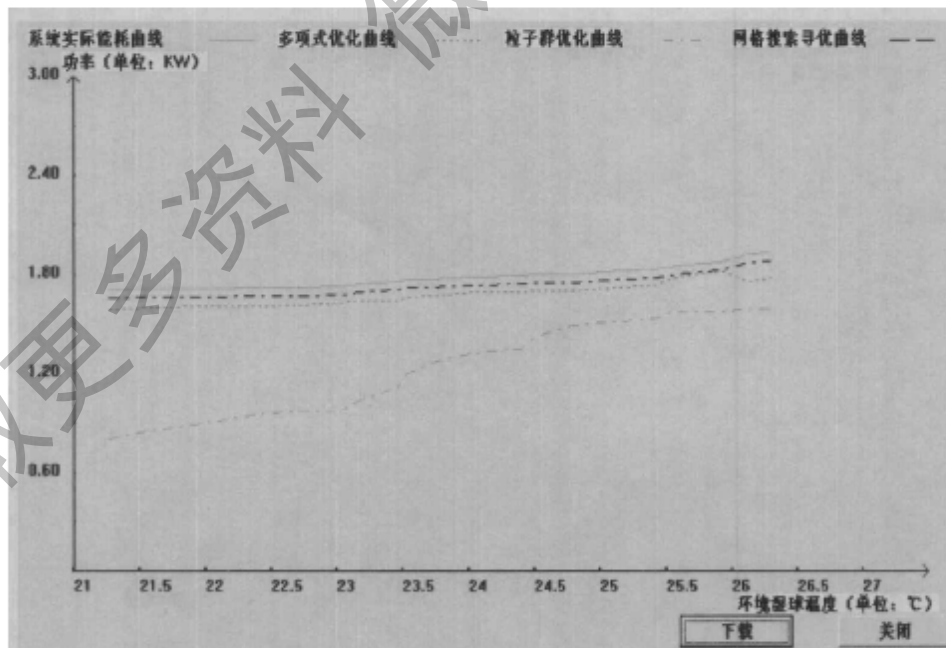


图 5.17 40%冷负荷，冷冻水供水温度为 9℃ 下空调制冷系统的能耗比较

Fig.5.17 40 percent of cooling load, chilled water supply temperature 9℃, the energy consumption compare of HVAC refrigeration system

在冷负荷为额定冷负荷的 40%，冷冻水供水温度为 9℃的条件下，分别采用多项式优化方法、网格搜索寻优方法及死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的优化方法对系统进行优化，将系统的实际能耗、各个工作设定点和优化后的系统能耗和各个工作设定点的值进行比较，结果分别由图 5.14~图 5.17 画出。同样可以看出，采用上述三种优化方法都达到了系统节能的目标并且系统的各个工作设定点随着环境湿球温度的变化也随之变化，其中本文选用的粒子群优化方法的节能效果最好；粒子群优化方法在环境湿球温度较低的情况下节能能力强，随着环境湿球温度的升高，节能能力降低。和冷负荷为额定冷负荷的 60%，冷冻水供水温度为 9℃相比，在相同的湿球温度的条件下，系统总的能量消耗有所降低，这是因为在系统要求的冷负荷降低时，制冷机的能耗有所下降；和冷负荷为额定冷负荷的 40%，冷冻水供水温度为 7℃相比，在相同的湿球温度的条件下，系统总的能量消耗有所降低，这是因为在冷冻水供水温度升高时，制冷机的能耗有所下降。

5.1.2 冷冻水供水温度发生改变

在冷负荷和环境湿球温度一定，冷冻水供水温度改变的条件下，分别采用多项式法、网格搜索寻优方法和死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的算法对系统进行优化，下面给出在不同冷负荷和环境湿球温度条件下的优化结果。

(1) 冷负荷为额定负荷的 60%，环境湿球温度为 25℃

在冷负荷为额定负荷的 60%，环境湿球温度为 25℃的情况下，采用三种优化方法对系统进行优化，并将优化结果进行比较，所得到的工作设定点和系统能耗情况如图 5.18~图 5.21 所示：

在冷负荷为额定冷负荷的 60%，环境湿球温度为 25℃的条件下，采用多项式优化方法、网格搜索寻优方法及死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的优化方法对系统进行优化，将系统的实际能耗、各个工作设定点和优化后的系统能耗和各个工作设定点的值进行比较，结果分别由图 5.18~图 5.21 画出。可以看出，采用上述三种优化方法都达到了系统节能的目标，并且系统的各个工作设定点随着冷冻水供水温度的变化而变化，其中采用死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的优化方法的节能效果最好。在此条件下，可以看出冷冻水的供水温度越低，中央空调制冷系统总的能耗越高，这是因为，冷冻水供水温度越低，需要制冷机增加出力，在相同的环境

湿球温度和冷负荷条件下，空调系统的总能耗有所增加。

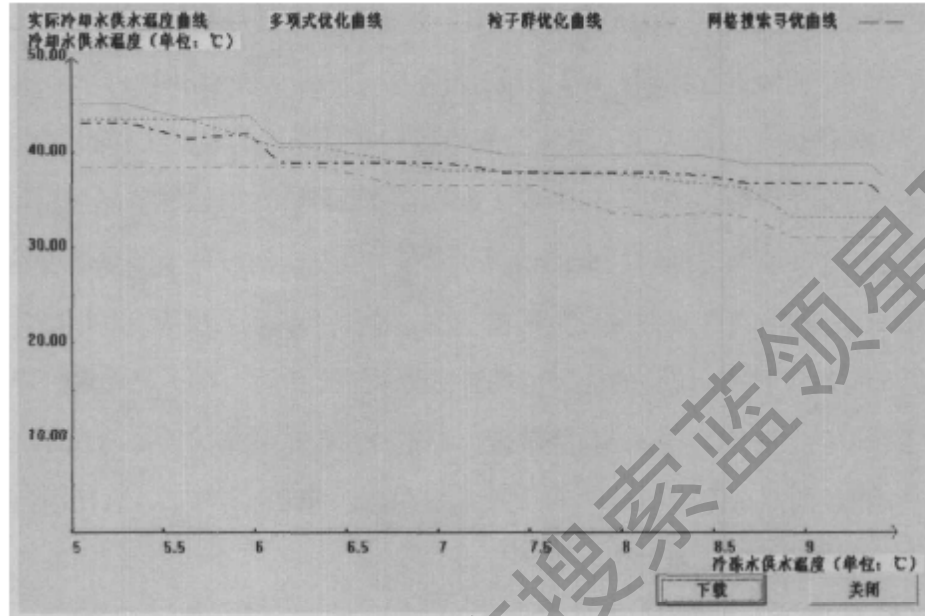


图 5.18 60%冷负荷，环境湿球温度为 25℃ 下冷却水供水温度设定点的优化

Fig.5.18 60 percent of cooling load, environment humidity ball temperature 25℃,

the setpoint optimization of cooling water supply temperature

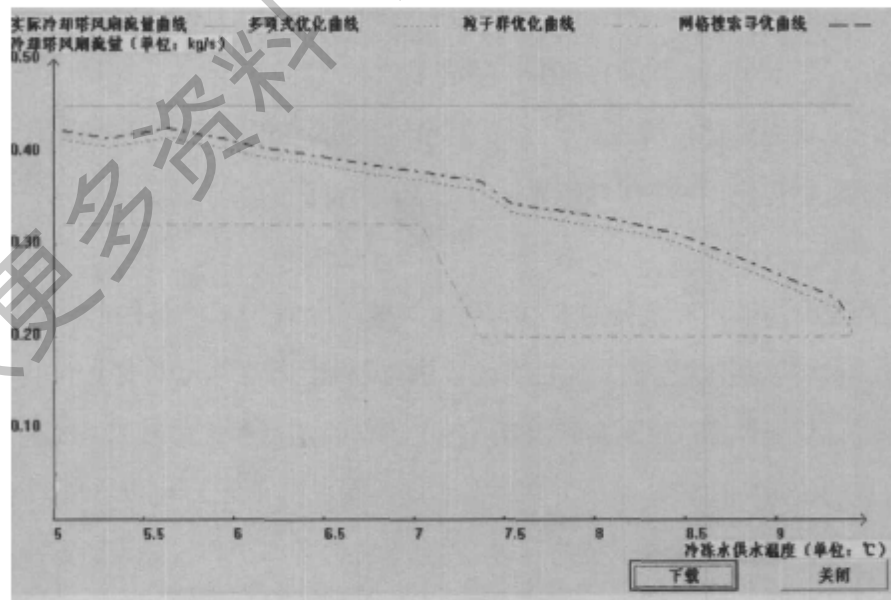


图 5.19 60%冷负荷，环境湿球温度为 25℃ 下冷却塔空气质量流量设定点的优化

Fig.5.19 60 percent of cooling load, environment humidity ball temperature 25℃,

the setpoint optimization of cooling tower air flow

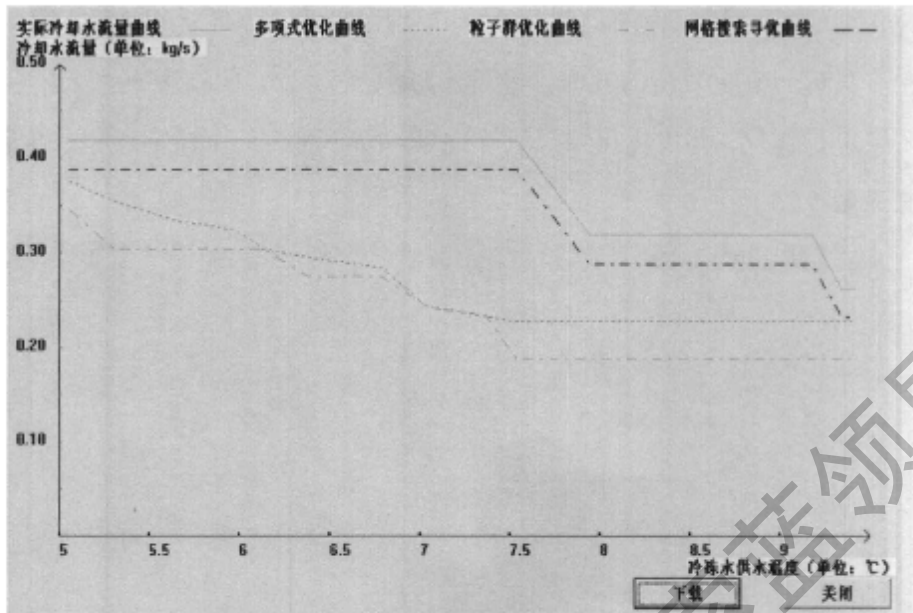


图 5.20 60%冷负荷, 环境湿球温度为 25℃下冷却水质量流量设定点的优化
 Fig.5.20 60 percent of cooling load, environment humid ball temperature 25℃,
 the setpoint optimization of cooling water flow

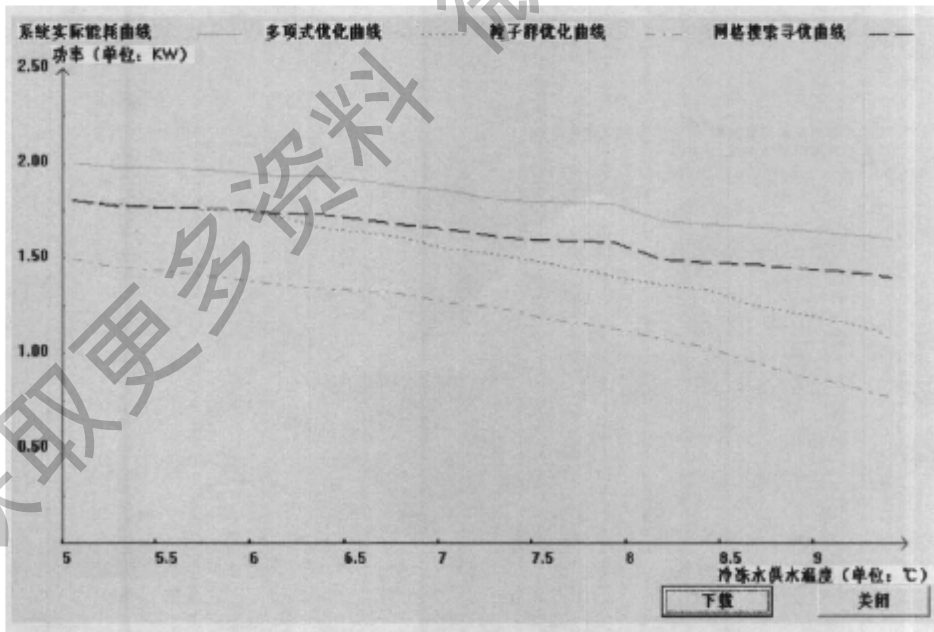


图 5.21 60%冷负荷, 环境湿球温度为 25℃下空调制冷系统的能耗
 Fig.5.21 60 percent of cooling load, environment humid ball temperature 25℃,
 the energy consumption compare of HVAC refrigeration system

(2) 冷负荷为额定负荷的 60%，环境湿球温度为 22℃

在冷负荷为额定负荷的 60%，环境湿球温度为 22℃的情况下，采用三种优化方法对系统进行优化，并将优化结果进行比较，所得到的工作设定点和系统能耗情况如图 5.22~图 5.25 所示：

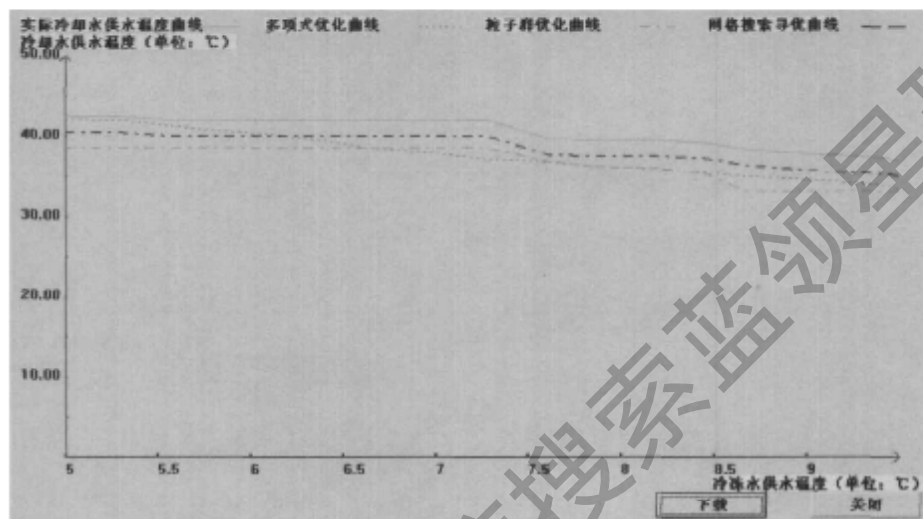


图 5.22 60%冷负荷，环境湿球温度为 22℃下冷却水供水温度设定点的优化

Fig.5.22 60 percent of cooling load, environment humid ball temperature 22℃, the setpoint optimization of cooling water supply temperature

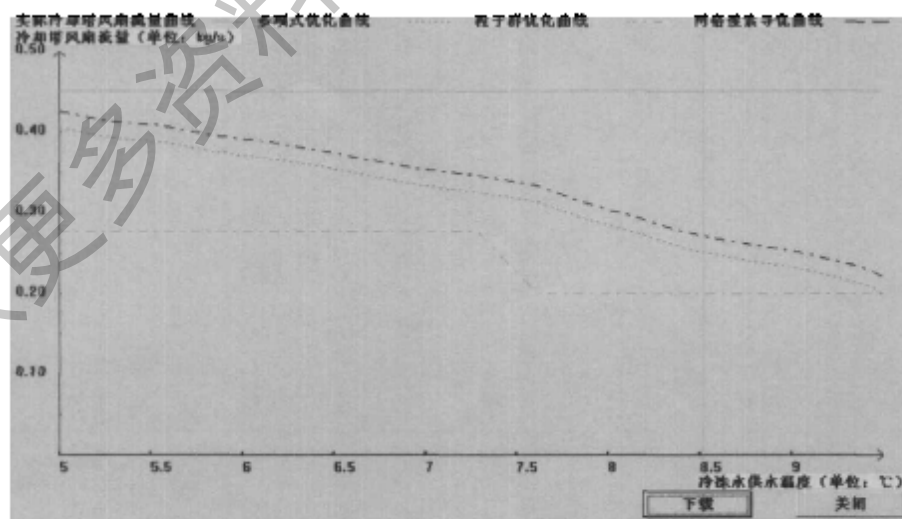


图 5.23 60%冷负荷，环境湿球温度为 22℃下冷却塔空气质量流量设定点的优化

Fig.5.23 60 percent of cooling load, environment humid ball temperature 22℃, the setpoint optimization of cooling tower air flow

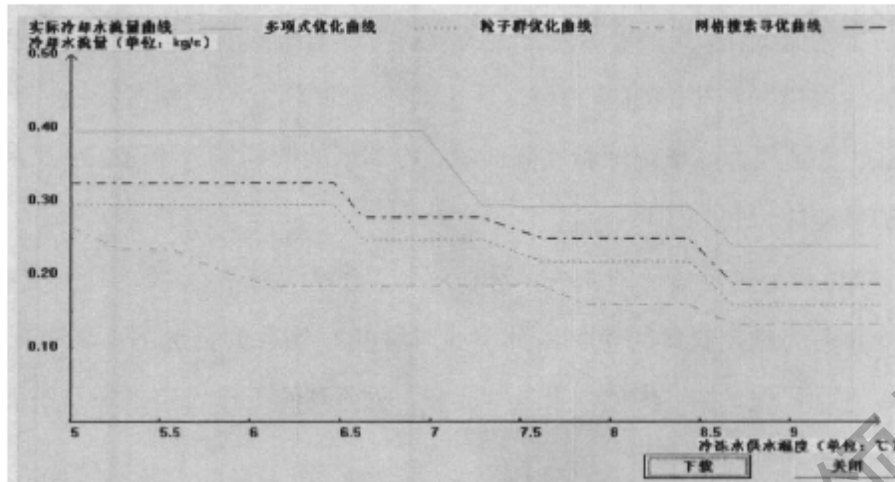


图 5.24 60%冷负荷，环境湿球温度为 22℃下冷却水质量流量设定点的优化

Fig.5.24 60 percent of cooling load, environment humid ball temperature 22℃, the setpoint optimization of cooling water flow

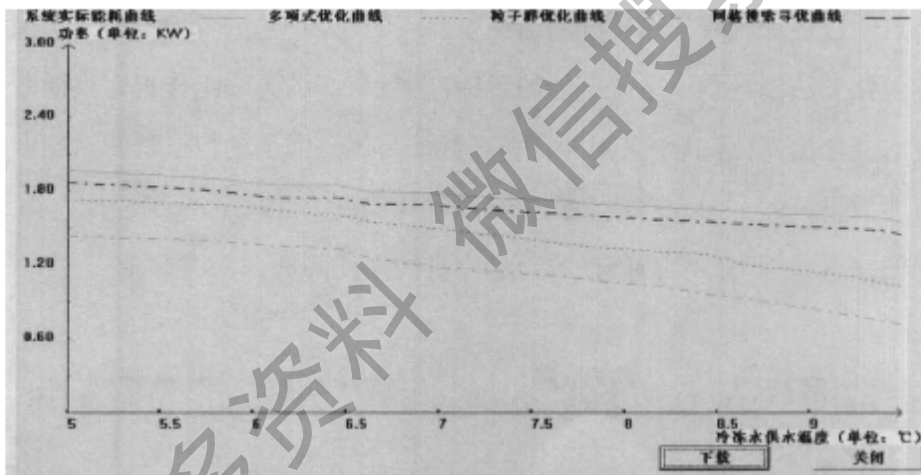


图 5.25 60%冷负荷，环境湿球温度为 22℃下空调制冷系统的能耗

Fig.5.25 60 percent of cooling load, environment humid ball temperature 22℃, the energy consumption compare of HVAC refrigeration system

在冷负荷为额定冷负荷的 60%，环境湿球温度为 22℃的条件下，采用多项式优化方法、网格搜索寻优方法及死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的优化方法对系统进行优化，将系统的实际能耗、各个工作设定点和优化后的系统能耗和各个工作设定点的值进行比较，结果分别由图 5.22~图 5.25 画出。同样可以看出，采用上述三种优化方法都达到了系统节能的目标，并且系统的各个工作设定点随着冷冻水供

水温度的变化而变化,其中采用死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的优化方法的节能效果最好。与 60%冷负荷,环境湿球温度为 25℃的情况相比,系统的能耗有所降低,这是因为环境湿球温度降低时,冷却塔的散热能力增强,冷却水泵和冷却塔风扇的节能能力得到了增强。

(3) 冷负荷为额定负荷的 40%,环境湿球温度为 25℃

在冷负荷为额定负荷的 40%,环境湿球温度为 25℃的情况下,采用三种优化方法对系统进行优化,并将优化结果进行比较,所得到的工作设定点和系统能耗情况如图 5.26~图 5.29 所示:

在冷负荷为额定冷负荷的 40%,环境湿球温度为 25℃的条件下,采用多项式优化方法、网格搜索寻优方法及死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的优化方法对系统进行优化,将系统的实际能耗、各个工作设定点和优化后的系统能耗和各个工作设定点的值进行比较,结果分别由图 5.26~图 5.29 画出。同样可以看出,采用上述三种优化方法都达到了系统节能的目标,并且系统的各个工作设定点随着冷冻水供水温度的变化而变化,其中采用死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的优化方法的节能效果最好。与 60%冷负荷,环境湿球温度为 25℃的情况相比,系统的能耗有所降低,这是因为冷负荷降低时,制冷机的能耗降低。

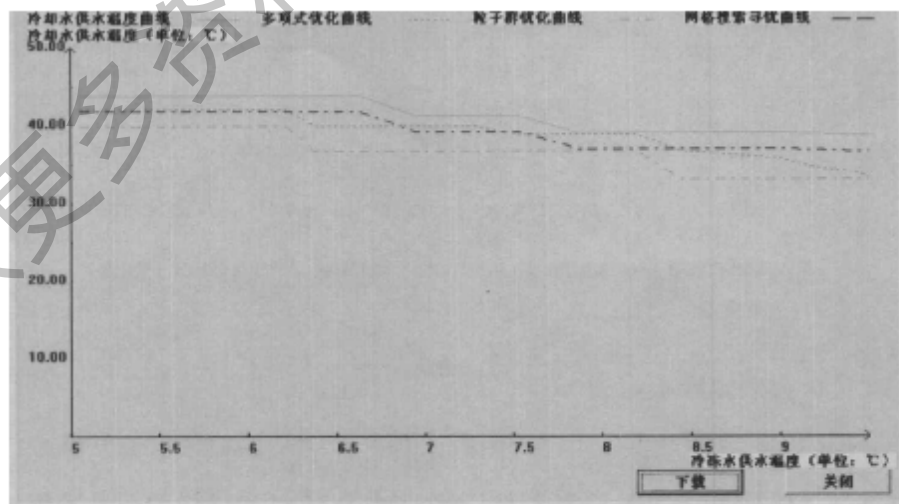


图 5.26 40%冷负荷,环境湿球温度为 25℃下冷却水供水温度设定点的优化

Fig.5.26 40 percent of cooling load, environment humid ball temperature 25℃,

the setpoint optimization of cooling water supply temperature

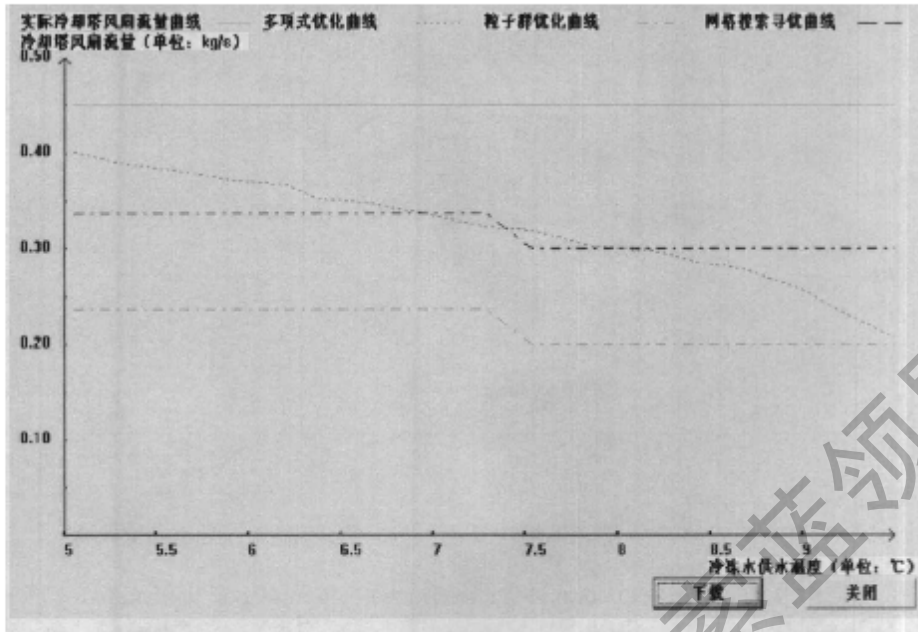


图 5.27 40%冷负荷，环境湿球温度为 25℃下冷却塔空气质量流量设定点的优化

Fig.5.27 40 percent of cooling load, environment humidity ball temperature 25℃,
the setpoint optimization of cooling tower air flow

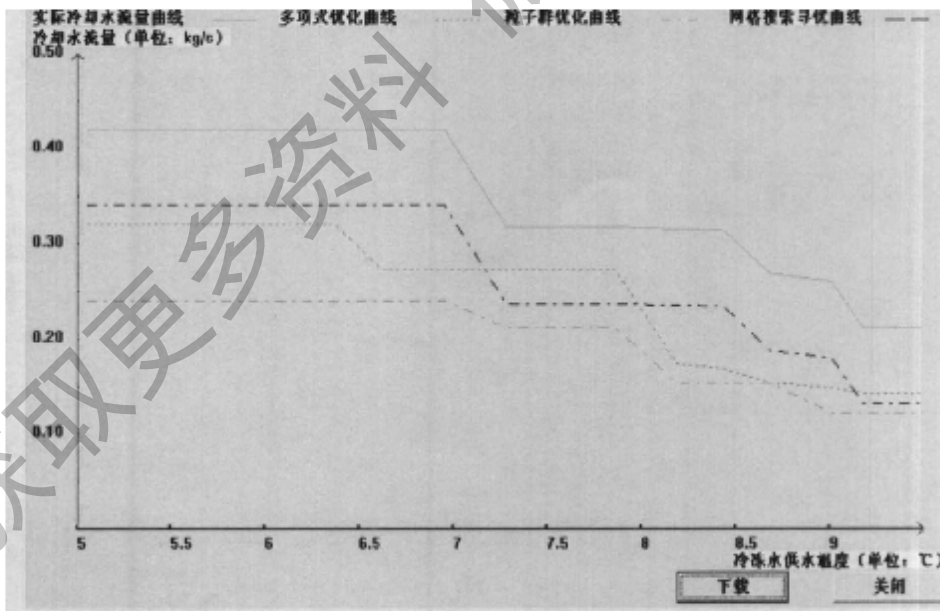


图 5.28 40%冷负荷，环境湿球温度为 25℃下冷却水质量流量设定点的优化

Fig.5.28 40 percent of cooling load, environment humidity ball temperature 25℃,
the setpoint optimization of cooling water flow

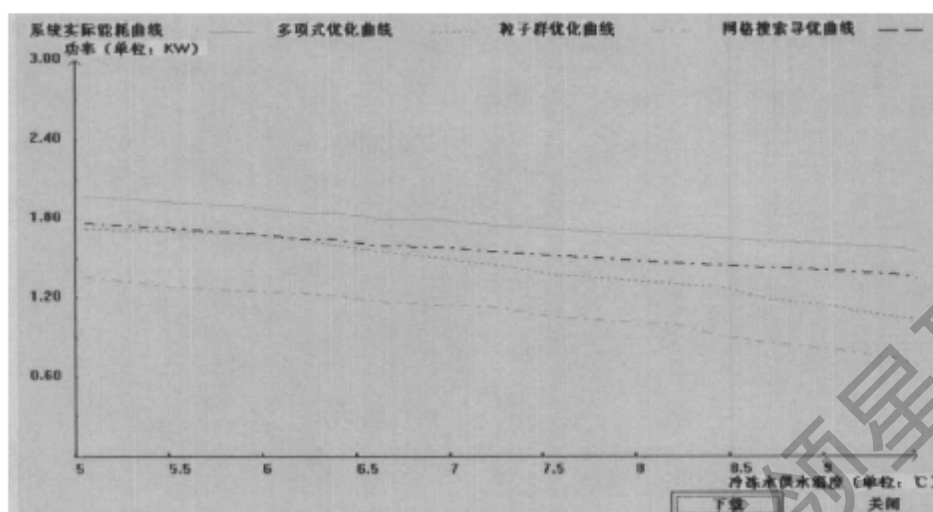


图 5.29 40%冷负荷，环境湿球温度为 25℃下空调制冷系统的能耗

Fig.5.29 40 percent of cooling load, environment humid ball temperature 25℃, the energy consumption compare of HVAC refrigeration system

(4) 冷负荷为额定负荷的 40%，环境湿球温度为 22℃

在冷负荷为额定负荷的 40%，环境湿球温度为 22℃的情况下，采用三种优化方法对系统进行优化，并将优化结果进行比较，所得到的工作设定点和系统能耗情况如图 5.30~图 5.33 所示：

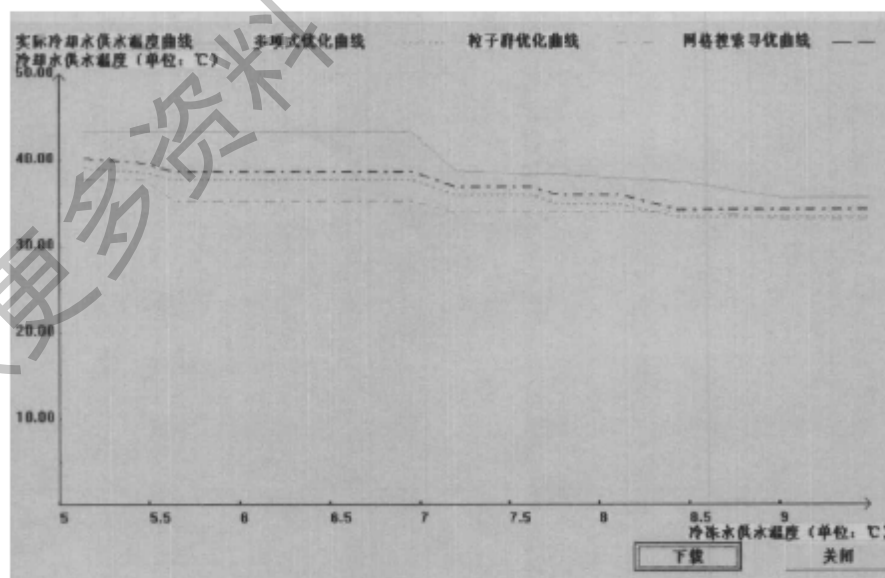


图 5.30 40%冷负荷，环境湿球温度为 22℃下冷却水供水温度设定点的优化

Fig.5.30 40 percent of cooling load, environment humid ball temperature 22℃, the setpoint optimization of cooling water supply temperature

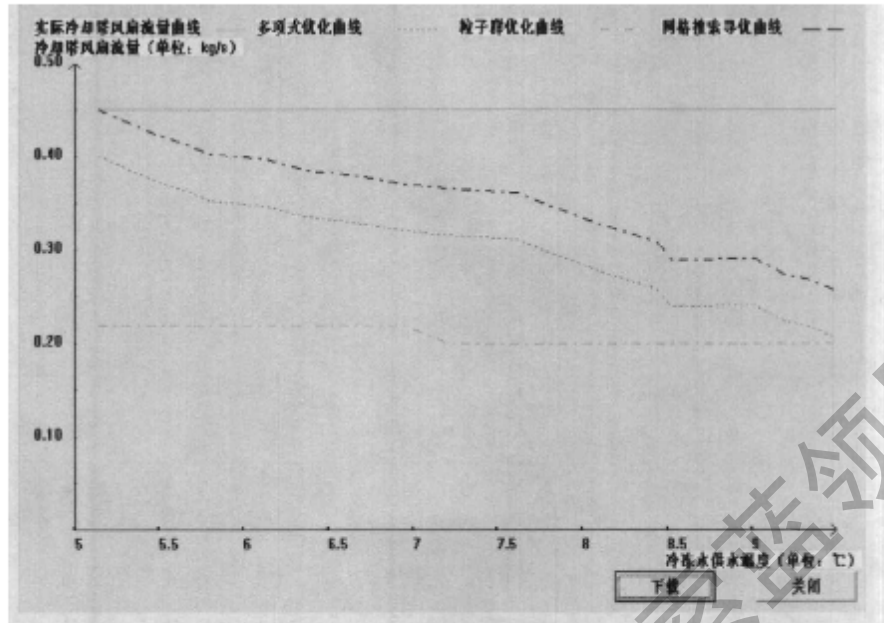


图 5.31 40%冷负荷，环境湿球温度为 22℃下冷却塔空气质量流量设定点的优化

Fig.5.31 40 percent of cooling load, environment humidity ball temperature 22℃,
the setpoint optimization of cooling tower air flow

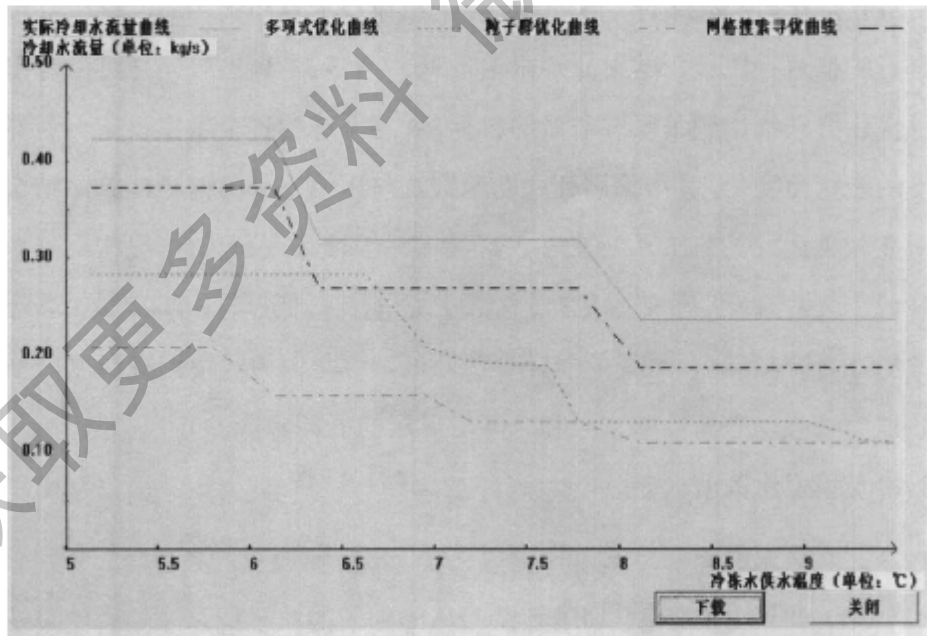


图 5.32 40%冷负荷，环境湿球温度为 22℃下冷却水质量流量设定点的优化

Fig.5.32 40 percent of cooling load, environment humidity ball temperature 22℃,
the setpoint optimization of cooling water flow

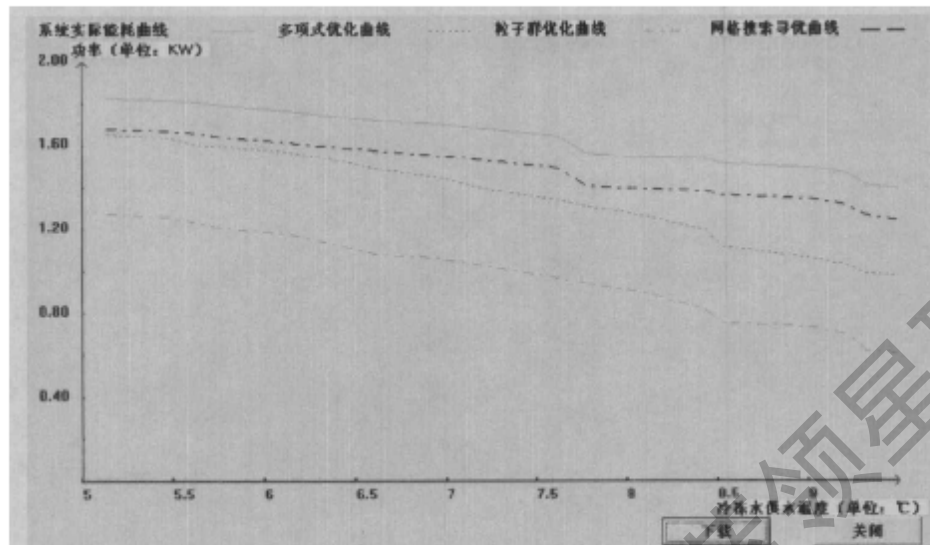


图 5.33 40%冷负荷，环境湿球温度为 22℃ 下空调制冷系统的能耗

Fig.5.33 40 percent of cooling load, environment humidly ball temperature 22°C,
the energy consumption compare of HVAC refrigeration system

在冷负荷为额定冷负荷的 40%，环境湿球温度为 22℃ 的条件下，采用多项式优化方法、网格搜索寻优方法及死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的优化方法对系统进行优化，将系统的实际能耗、各个工作设定点和优化后的系统能耗和各个工作设定点的值进行比较，结果分别由图 5.30~图 5.33 画出。同样可以看出，采用上述三种优化方法都达到了系统节能的目标，并且系统的各个工作设定点随着冷冻水供水温度的变化而变化，其中采用死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的优化方法的节能效果最好。与 60%冷负荷，环境湿球温度为 22℃ 的情况相比，系统的能耗有所降低，这是因为冷负荷降低时，制冷机的能耗降低；与 40%冷负荷，环境湿球温度为 25℃ 的情况相比，系统的能耗有所降低，这是因为环境湿球温度降低时，冷却塔散热能力增强，进而冷却水泵和冷却塔风扇的能耗降低。

5.1.3 冷负荷发生改变

在冷冻水供水温度和环境湿球温度一定，冷负荷改变的条件下，分别采用多项式法、网格搜索寻优方法和死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的算法对系统进行优化，下面给出在不同冷冻水供水温度和环境湿球温度条件下的优化结果。

(1) 冷冻水供水温度为 7℃，环境湿球温度为 22℃

在冷冻水供水温度为 7℃，环境湿球温度为 22℃ 的情况下，采用三种优化方法对

系统进行优化，并将优化结果进行比较，所得到的工作设定点和系统能耗情况如图 5.34~图 5.37 所示：

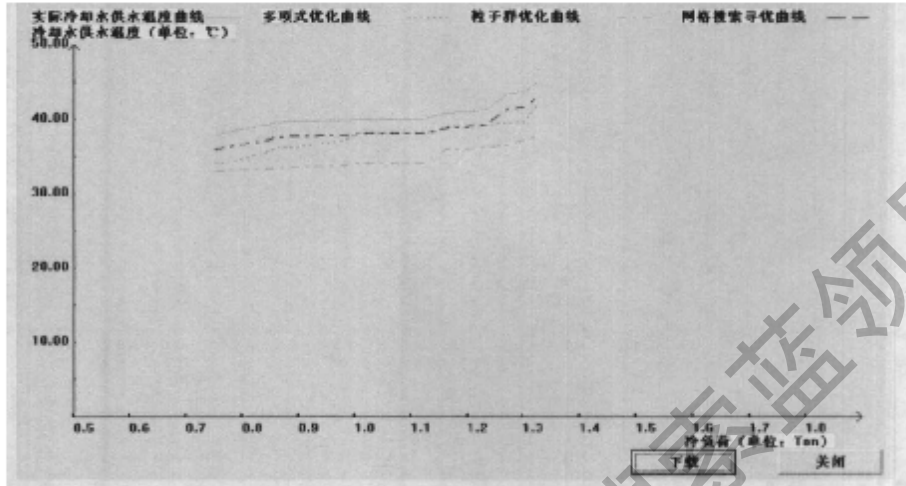


图 5.34 冷冻水供水温度为 7℃，环境湿球温度为 22℃下
冷却水供水温度设定点的优化

Fig.5.34 Chilled water supply temperature 7℃, environment humidity ball temperature 22℃,
the setpoint optimization of cooling water supply temperature

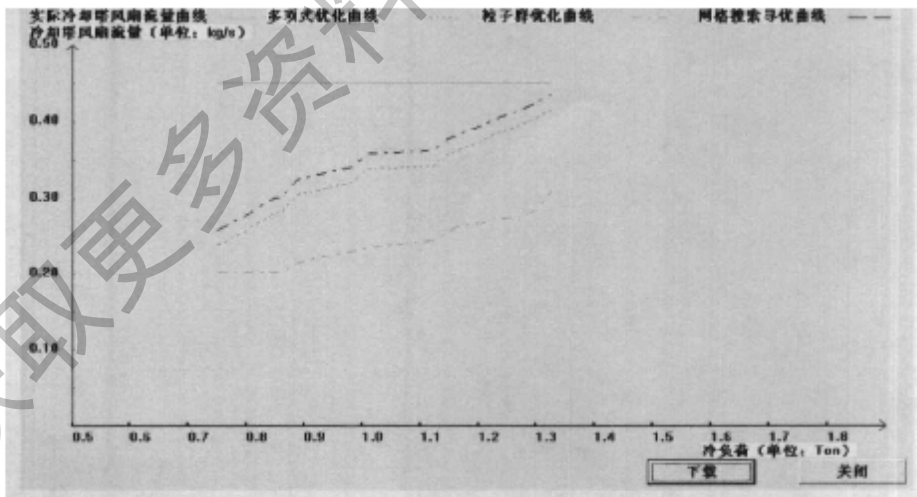


图 5.35 冷冻水供水温度为 7℃，环境湿球温度为 22℃下
冷却塔空气质量流量设定点的优化

Fig.5.35 Chilled water supply temperature 7℃, environment humidity ball temperature 22℃,
the setpoint optimization of cooling tower air flow

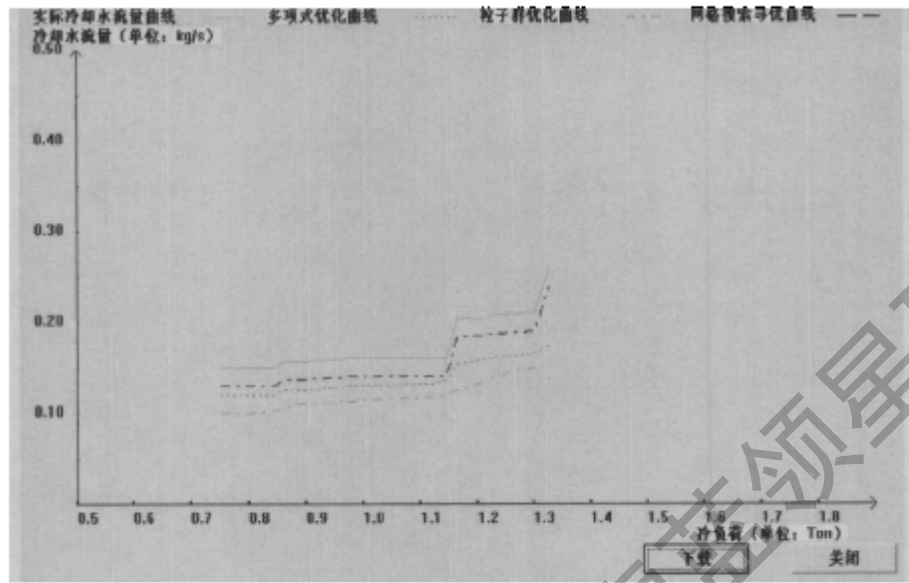


图 5.36 冷冻水供水温度为 7℃，环境湿球温度为 22℃下
冷却水质量流量设定点的优化

Fig.5.36 Chilled water supply temperature 7℃, environment humid ball temperature 22℃,
the setpoint optimization of cooling water flow

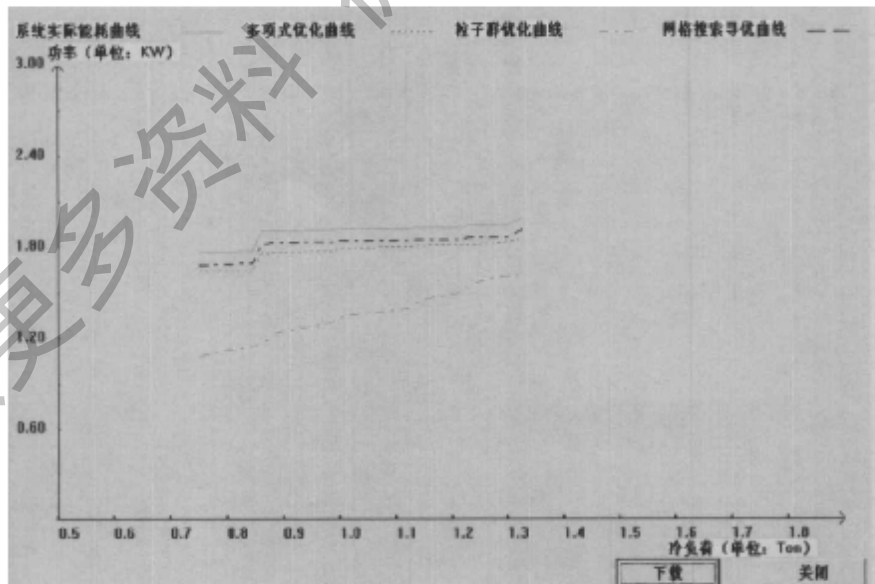


图 5.37 冷冻水供水温度为 7℃，环境湿球温度为 22℃下空调制冷系统的能耗的比较
Fig.5.37 Chilled water supply temperature 7℃, environment humid ball temperature 22℃,
the energy consumption compare of HVAC refrigeration system

在冷冻水供水温度为 7°C ，环境湿球温度为 22°C 的条件下，采用多项式优化方法、网格搜索寻优方法及死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的优化方法对系统进行优化，将系统的实际能耗、各个工作设定点和优化后的系统能耗和各个工作设定点的值进行比较，结果分别由图 5.34~图 5.37 画出。可以看出，采用上述三种优化方法都达到了系统节能的目标，并且系统的各个工作设定点随着冷冻水供水温度的变化而变化，其中采用死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的优化方法的节能效果最好。在此条件下，可以看出冷负荷越大，中央空调制冷系统总的能耗越高。

(2) 冷冻水供水温度为 7°C ，环境湿球温度为 25°C

在冷冻水供水温度为 7°C ，环境湿球温度为 25°C 的情况下，采用三种优化方法对系统进行优化，并将优化结果进行比较，所得到的工作设定点和系统能耗情况如图 5.38~图 5.41 所示：

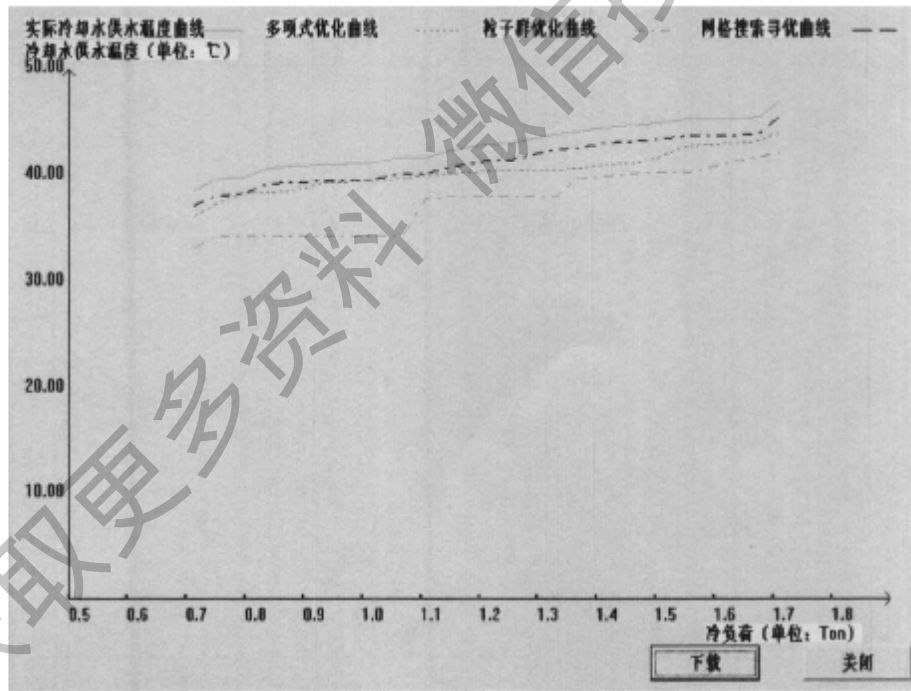


图 5.38 冷冻水供水温度为 7°C ，环境湿球温度为 25°C 下
冷却水供水温度设定点的优化

Fig.5.38 Chilled water supply temperature 7°C , environment humidity ball temperature 25°C ,
the setpoint optimization of cooling water supply temperature

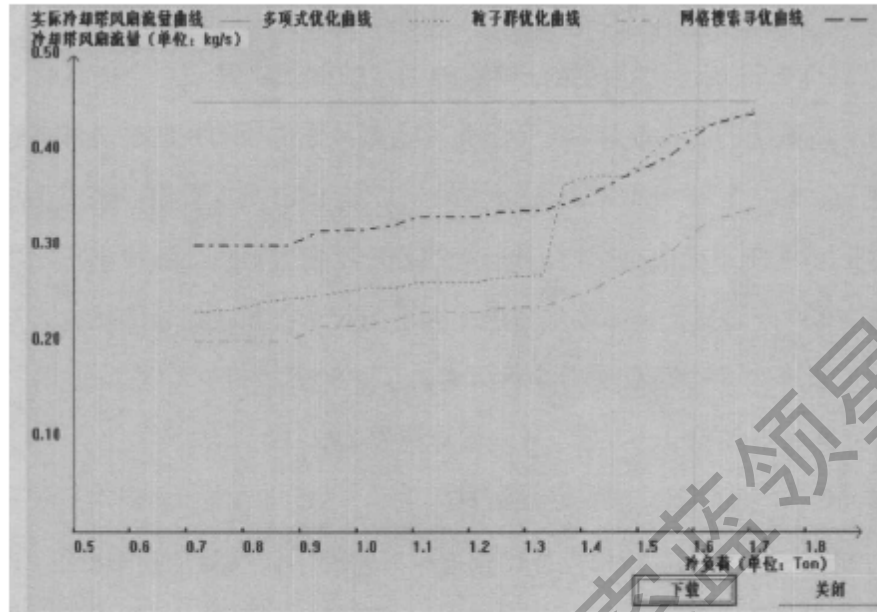


图 5.39 冷冻水供水温度为 7℃，环境湿球温度为 25℃下
冷却塔空气质量流量设定点的优化

Fig.5.39 Chilled water supply temperature 7℃, environment humid ball temperature 25℃,
the setpoint optimization of cooling tower air flow

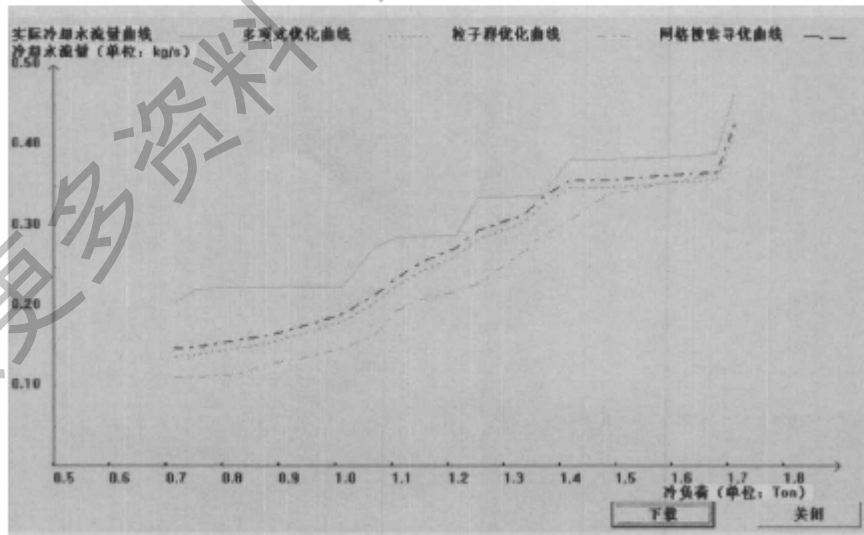


图 5.40 冷冻水供水温度为 7℃，环境湿球温度为 25℃下
冷却水质量流量设定点的优化

Fig.5.40 Chilled water supply temperature 7℃, environment humid ball temperature 25℃,
the setpoint optimization of cooling water flow

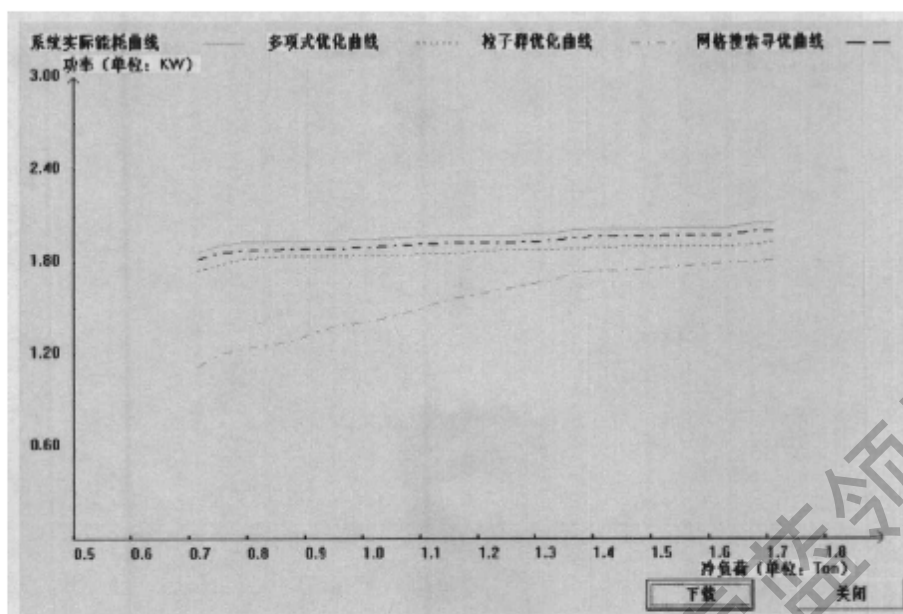


图 5.41 冷冻水供水温度为 7℃，环境湿球温度为 25℃下

空调制冷系统的能耗

Fig.5.41 Chilled water supply temperature 7℃, environment humidity ball temperature 25℃,
the energy consumption compare of HVAC refrigeration system

在冷冻水供水温度为 7℃，环境湿球温度为 25℃的条件下，采用多项式优化方法、网格搜索寻优方法及死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的优化方法对系统进行优化，将系统的实际能耗、各个工作设定点和优化后的系统能耗和各个工作设定点的值进行比较，结果分别由图 5.38~图 5.41 画出。可以看出，采用上述三种优化方法都达到了系统节能的目标，并且系统的各个工作设定点随着冷冻水供水温度的变化而变化，其中采用死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的优化方法的节能效果最好。与冷冻水供水温度为 7℃，环境湿球温度为 22℃的情况相比，系统的能耗有所增加，这是因为随着环境湿球温度的升高，冷却塔的散热能力降低，从而冷却水泵和冷却塔风扇的能耗有所增加。

(3) 冷冻水供水温度为 9℃，环境湿球温度为 22℃

在冷冻水供水温度为 9℃，环境湿球温度为 22℃的情况下，采用三种优化方法对系统进行优化，并将优化结果进行比较，所得到的工作设定点和系统能耗情况如图 5.42~图 5.45 所示：

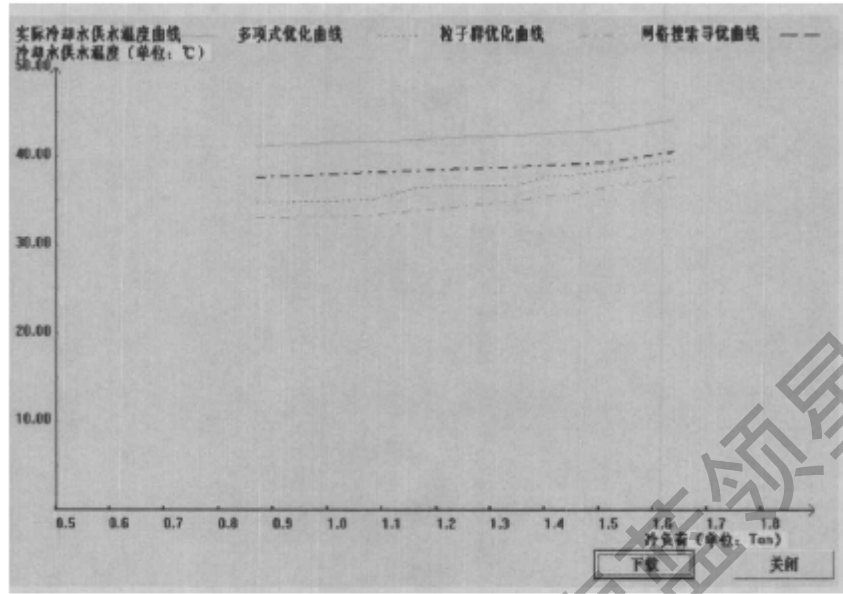


图 5.42 冷冻水供水温度为 9℃，环境湿球温度为 22℃下
冷却水供水温度设定点的优化

Fig.5.42 Chilled water supply temperature 9℃, environment humid ball temperature 22℃,
the setpoint optimization of cooling water supply temperature

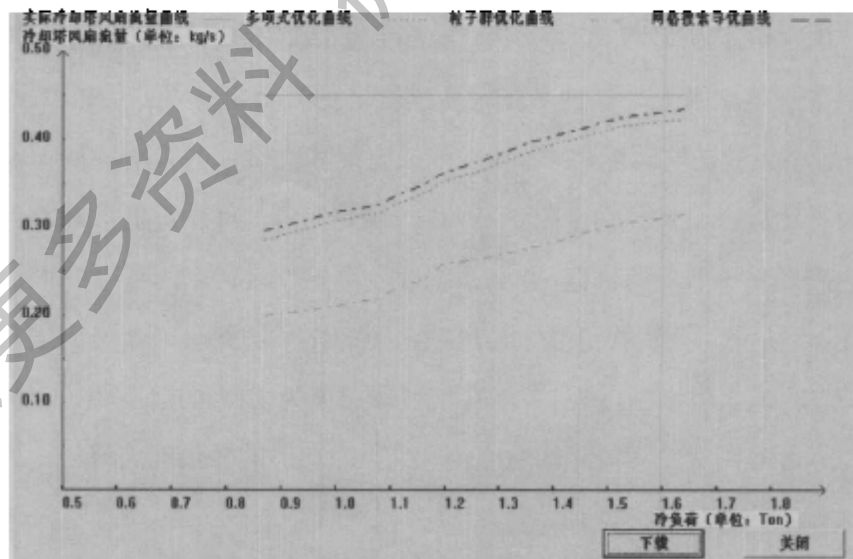


图 5.43 冷冻水供水温度为 9℃，环境湿球温度为 22℃下
冷却塔空气质量流量设定点的优化

Fig.5.43 Chilled water supply temperature 9℃, environment humid ball temperature 22℃,
the setpoint optimization of cooling tower air flow

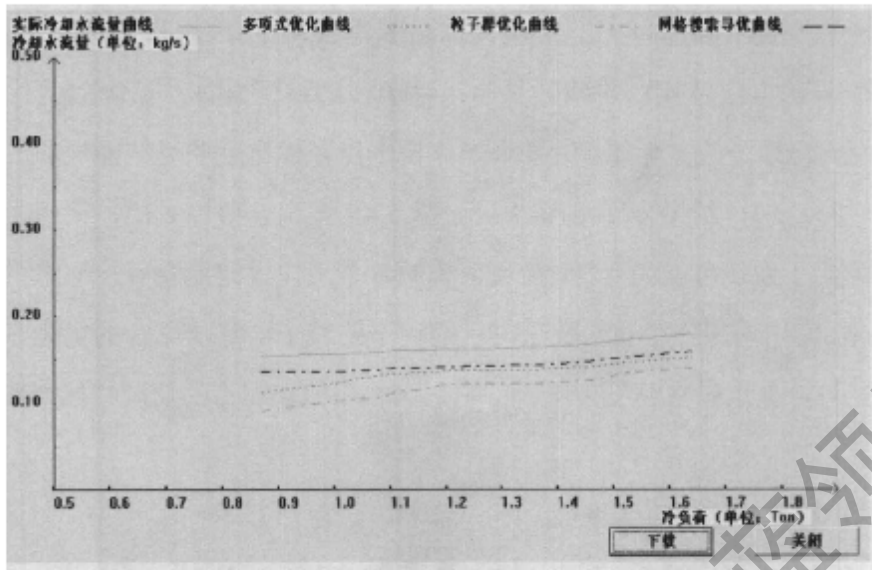


图 5.44 冷冻水供水温度为 9℃，环境湿球温度为 22℃下

冷却水质量流量设定点的优化

Fig.5.44 Chilled water supply temperature 9℃, environment humidity ball temperature 22℃,
the setpoint optimization of cooling water flow

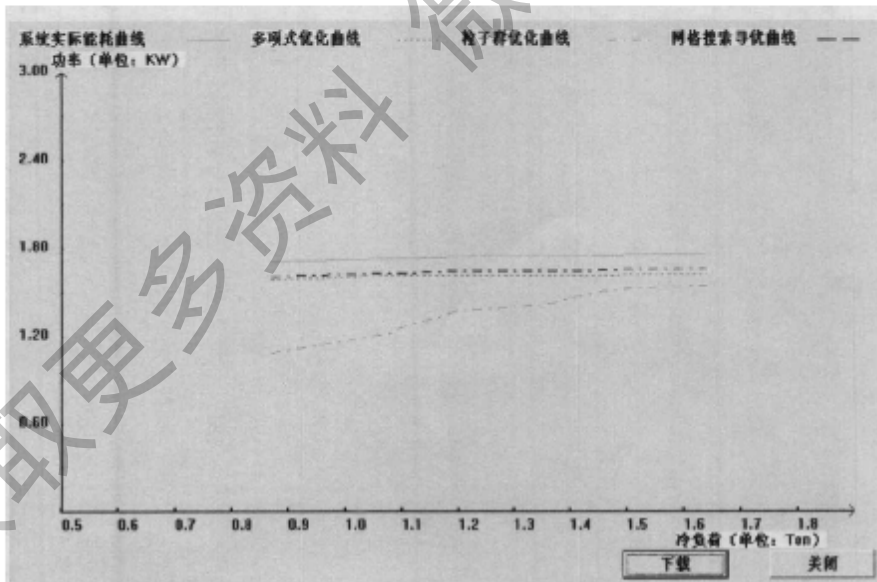


图 5.45 冷冻水供水温度为 9℃，环境湿球温度为 22℃下

空调制冷系统的能耗

Fig.5.45 Chilled water supply temperature 7℃, environment humidity ball temperature 25℃,
the energy consumption compare of HVAC refrigeration system

在冷冻水供水温度为 9℃，环境湿球温度为 22℃的条件下，采用多项式优化方法、网格搜索寻优方法及死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的优化方法对系统进行优化，将系统的实际能耗、各个工作设定点和优化后的系统能耗和各个工作设定点的值进行比较，结果分别由图 5.42~图 5.45 画出。可以看出，采用上述三种优化方法都达到了系统节能的目标，并且系统的各个工作设定点随着冷冻水供水温度的变化而变化，其中采用死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的优化方法的节能效果最好。与冷冻水供水温度为 7℃，环境湿球温度为 22℃的情况相比，系统的能耗有所降低。

(4) 冷冻水供水温度为 9℃，环境湿球温度为 25℃

在冷冻水供水温度为 9℃，环境湿球温度为 25℃的情况下，采用三种优化方法对系统进行优化，并将优化结果进行比较，所得到的工作设定点和系统能耗情况如图 5.46~图 5.49 所示：

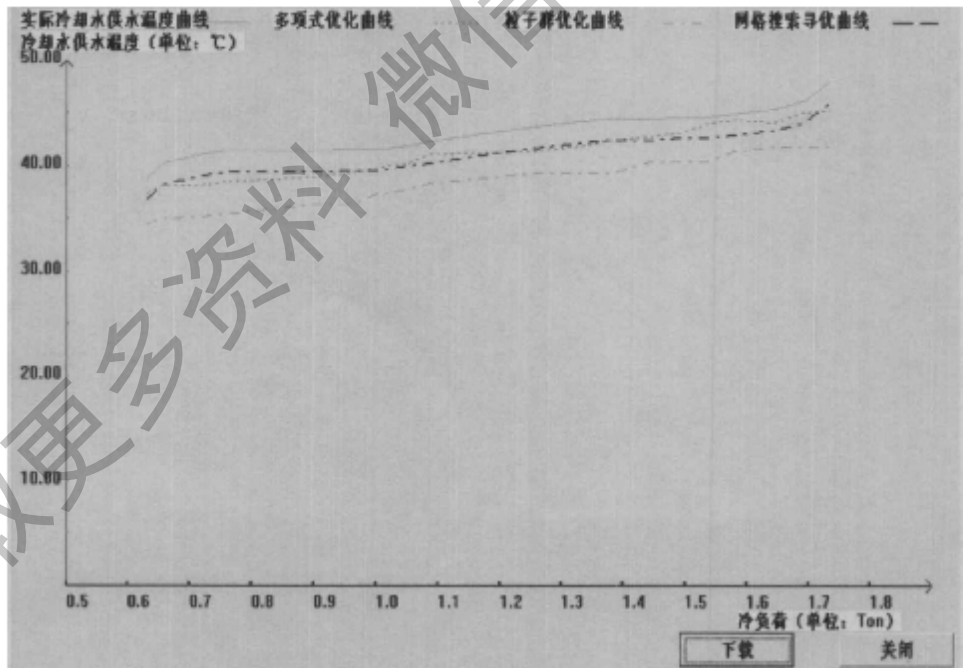


图 5.46 冷冻水供水温度为 9℃，环境湿球温度为 25℃下

冷却水供水温度设定点的优化

Fig.5.46 Chilled water supply temperature 9℃, environment humid ball temperature 25℃, the setpoint optimization of cooling water supply temperature

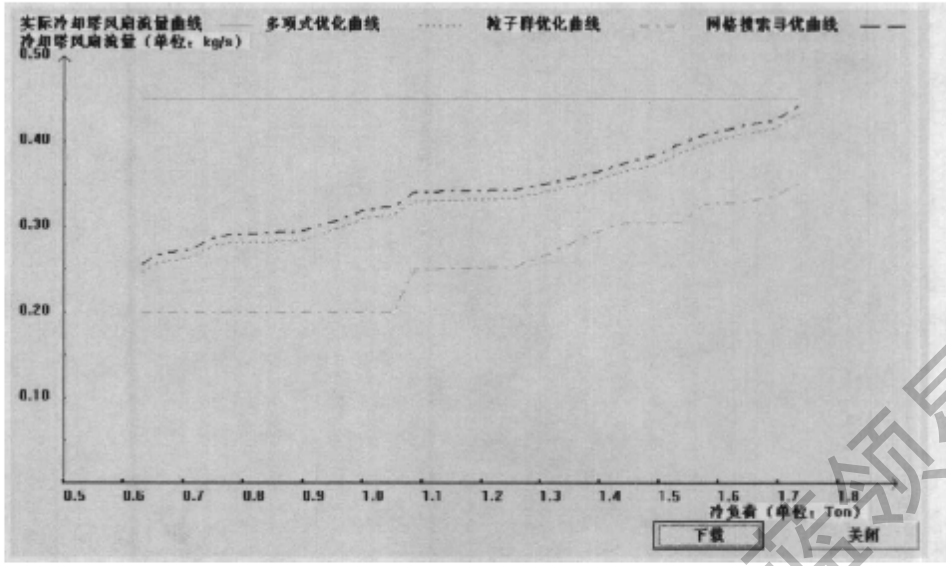


图 5.47 冷冻水供水温度为 9℃，环境湿球温度为 25℃下

冷却塔空气质量流量设定点的优化

Fig.5.47 Chilled water supply temperature 9℃, environment humid ball temperature 25℃,

the setpoint optimization of cooling tower air flow

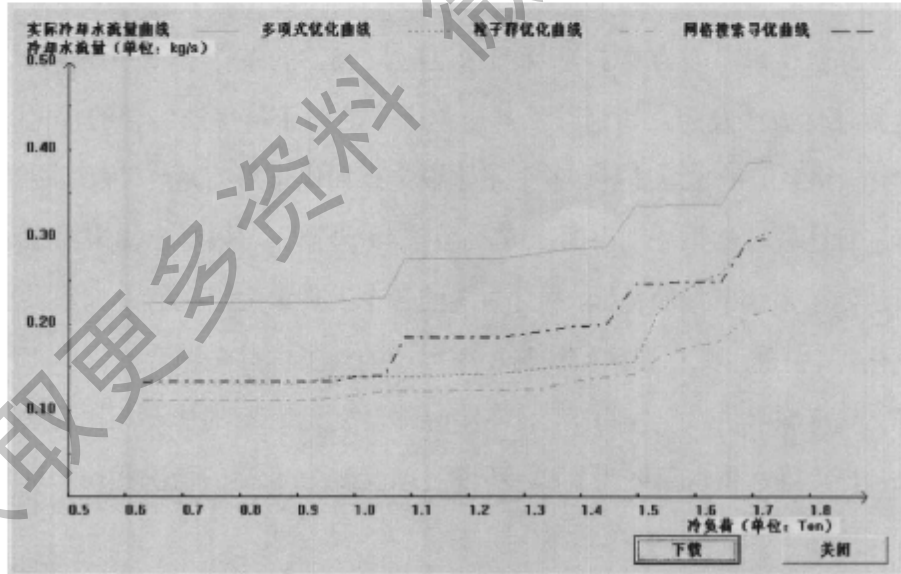


图 5.48 冷冻水供水温度为 9℃，环境湿球温度为 25℃下

冷却水质量流量设定点的优化

Fig.5.48 Chilled water supply temperature 9℃, environment humid ball temperature 25℃,

the setpoint optimization of cooling water flow

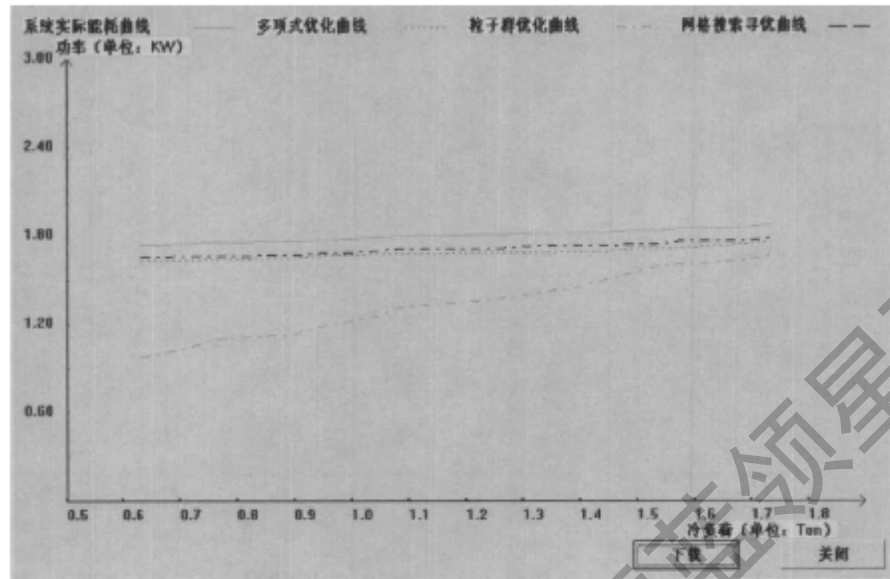


图 5.49 冷冻水供水温度为 9℃，环境湿球温度为 25℃下
空调制冷系统的能耗

Fig.5.49 Chilled water supply temperature 9℃, environment humid ball temperature 25℃,
the energy consumption compare of HVAC refrigeration system

在冷冻水供水温度为 9℃，环境湿球温度为 25℃的条件下，采用多项式优化方法、网格搜索寻优方法及死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的优化方法对系统进行优化，将系统的实际能耗、各个工作设定点和优化后的系统能耗和各个工作设定点的值进行比较，结果分别由图 5.46~图 5.49 画出。可以看出，采用上述三种优化方法都达到了系统节能的目标，并且系统的各个工作设定点随着冷冻水供水温度的变化而变化，其中采用死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的优化方法的节能效果最好。与冷冻水供水温度为 7℃，环境湿球温度为 25℃的情况相比，系统的能耗有所降低；与冷冻水供水温度为 9℃，环境湿球温度为 22℃的情况相比，系统的能耗增加。

5.2 一个制冷周期的能耗比较

在一个制冷周期中，建筑物所需的冷负荷和环境湿球温度是不断变化的，中央空调制冷系统的工作设定点及系统能耗也应该有相应的改变。通过改变空调制冷的冷负荷和外部环境温湿度来模拟空调 24 小时内的工作状态，分别采用多项式优化方法、

网格搜索寻优方法及死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的优化方法对系统进行优化，并将三种方法的优化结果进行了比较。

一天中要求的冷负荷及环境湿球温度的变化情况分别由图 5.50 和图 5.51 给出：

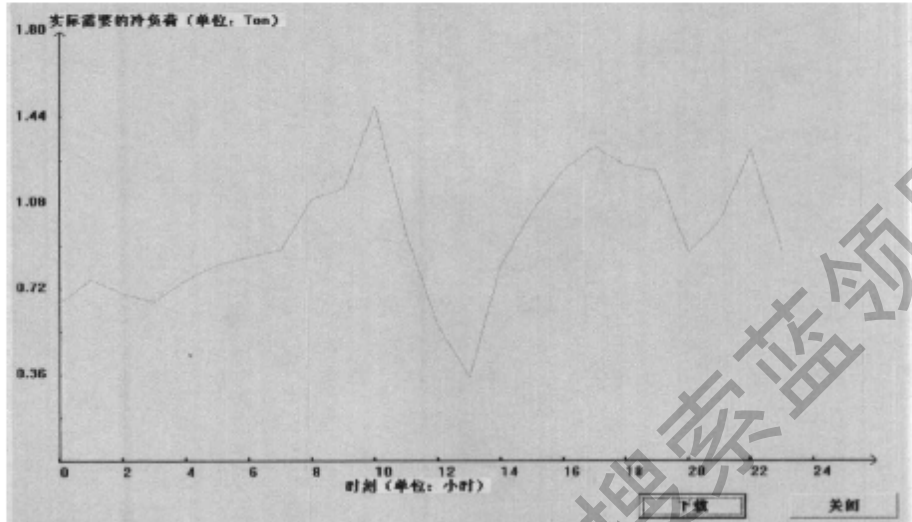


图 5.50 全天要求的冷负荷曲线

Fig.5.50 Cooling load curve of the whole day request

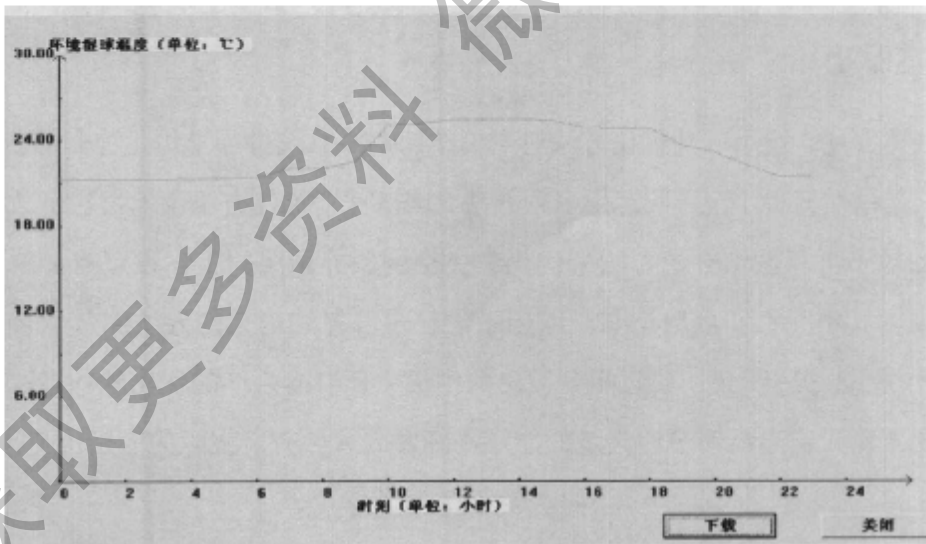


图 5.51 全天湿球温度变化曲线

Fig.5.51 Environment humid ball temperature change curve of the whole day

分别采用上述三种优化方法对空调制冷系统进行优化，优化结果如图 5.52 所示。可以看出三种优化方法都达到了系统节能的目标，其中本文选用的粒子群优化方法的节能效果最明显；并且冷负荷越小时系统的节能潜力越大，因为此时可以明显的降低

冷却塔风扇和冷却水泵的能耗。

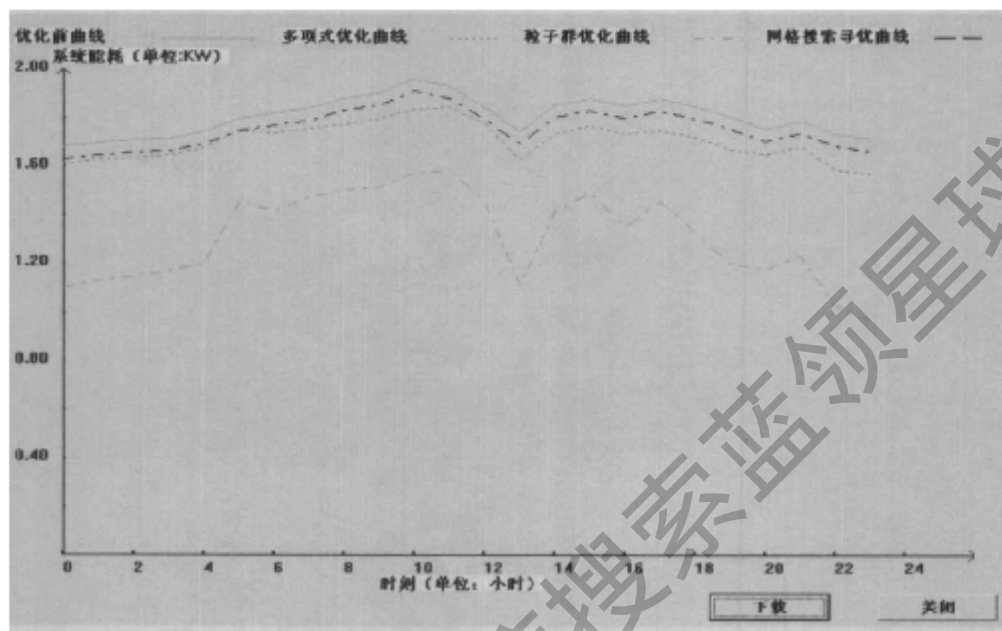


图 5.52 优化后的系统能耗与实际能耗的比较

Fig.5.52 Compar of the optimization energy consumption and practicality energy consumption

5.3 本章小结

在本章中，运用三种优化方法对中央空调制冷系统进行了优化控制的研究。可以看出，无论在何种工况下，运用多项式法、网格搜索寻优方法及死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的方法来优化中央空调制冷系统的工作设定点都能达到节能的效果，其中死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的方法的节能效果更为明显。通过以上实验，说明了运用开发出的中央空调制冷系统的优化软件来在线优化控制系统工作设定点能够节约大量的能量，开发此软件有着实际的应用价值。

第六章 结论

开发中央空调制冷系统的优化软件,实现了对中央空调制冷系统运行工作点的在线优化,达到了节能的目的。本文通过分析中央空调制冷系统运行的工艺过程及主要能耗设备的能耗特性,提出了在线优化控制中央空调制冷系统的工作设定点的方法来实现节能。

在空调制冷系统的主要能耗设备制冷机的建模方面,运用最小二乘法和网格建模方法建立其能耗模型。并运用实验数据对模型进行了验证,可以看出上述两模型都能够较好的反映制冷机的能耗特性。在空调制冷系统的优化方面,首先提出了采用适于工程应用的多项式法和网格搜索寻优方法对系统的运行工作点进行优化,从实验结果可以看出,运用以上两种方法都能实现对空调制冷系统运行工作点的在线优化,实现节约系统能耗的目标。但上述两种算法在优化具有非线性、多变量、强耦合特性的空调制冷系统时都存在着固有的缺陷:多项式法,其收敛速度慢、容易陷入局部最优点,且寻优过程依赖于待优化变量的初始点的值;网格搜索寻优方法虽然比较简单、高效,但优化精度较低。针对上述上述缺点,本文提出了采用粒子群算法来优化空调制冷系统,因为粒子群算法有着结构简单,容易实现的优点,它有着深刻的智能背景,既适合科学研究,又适于工程应用。但是选用此方法对空调制冷系统进行优化也存在缺陷:易产生早熟收敛,且到收敛后期收敛速度慢等。为较好的解决此问题,本文选用死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的算法来优化空调制冷系统,此方法能较好的克服 PSO 算法的早熟收敛,进而得到高质量的解。

对于上述所研究的建模和优化方法,基于 Visual C++ 6.0 及 SQL 技术开发中央空调制冷系统的优化软件。该软件由空调制冷系统建模模块、空调制冷系统优化模块及优化结果图形显示模块组成。空调制冷系统建模模块中,建立了制冷机制冷机的多项式能耗模型和网格能耗模型;空调制冷系统优化模块中,提供了三种优化方法:多项式方法、网格搜索寻优方法及死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的算法;优化结果图形显示模块中,可以实时显示系统的实际数据及在线优化控制空调制冷系统

的优化结果,包括:冷却水供水温度、冷却水流量及冷却塔空气质量流量。运用实际的实验数据,分别运用上述三种优化方法对空调制冷系统进行了优化。实验结果表明,

在空调制冷系统的不同负荷、运行工况及初始条件下,上述三种优化方法都实现了对冷却水供水温度、冷却水流量及冷却塔空气流量的在线优化,其中死亡罚函数法与压缩因子的粒子群算法结合的算法的节能效果最好,即说明了运用开发出的中央空调制冷系统的优化软件来在线优化控制系统工作设定点能够节约大量的能量,此软件有着实际应用的价值。

本文待改进之处:

1. 针对不同系统、使用人群及三种优化方法的特点,选用合适的优化方法对空调制冷系统进行优化。
2. 由于实验条件有限,本文是通过实验室中的小型中央空调系统对中央空调制冷系统优化软件进行验证的,希望进一步在实际的工程应用中得到验证。

参考文献

- [1] 王中存, 孟磊. 制冷系统的运行调整与节能技术. 医药工程设计, 2007, 28(3): 49-52.
- [2] Dr. F. Billiard. 制冷与可持续发展. 制冷学报, 2003, 3(1): 22-26.
- [3] 李建华, 康相玖, 陶海田等. 变频控制在中央空调系统的节能可行性分析. 制冷与空调, 2003, 3(1): 44-47.
- [4] 姚国琦. 我国家用中央空调现状与前景. 制冷与空调, 2002, 2(5): 6-9.
- [5] 龚明启, 冀兆良. 空调水系统节能技术分析. 制冷, 2005 年增刊: 65-71.
- [6] NSTAR. HVAC: Centrifugal Chillers. www.nstaronline.com. 2002.
- [7] 成开发. 变频调速技术在中央空调系统改造中的应用和节能效果分析. 盐城工学院学报, 2001, 14(3): 30.
- [8] Kwok Tai Chan and Fu Wing Yu. How Chillers React to Building Loads. ASHRAE Journal, 2004, 46(8): 52-58.
- [9] 王中存, 孟磊. 制冷系统的运行调节与节能技术. 医药工程设计, 2007, 28(3): 49-52.
- [10] 马善伟. 制冷系统稳定性研究综述: 上海第二工业大学学报(硕士学位论文). 上海: 上海工业大学, 2004.
- [11] 赵运超, 丁云飞, 冀兆良. 太阳能在空调制冷系统中的研究现状及应用前景. 2007, 26(1): 34-39.
- [12] 姚国梁. 试论我国能源现状与空调冷热源的选择. 浙江建筑, 2006, 24(3): 65-68.
- [13] 李彬, 肖勇全, 王士兵等. 变流量压差控制的节能分析与探讨. 制冷空调与电力机械, 2006, 5(21): 21-24.
- [14] Liptak B. G. Optimizing plant chiller systems. Instrumentation Technology, 1977, 9(2): 65-72.
- [15] Cooper K. W., R. A. Erth. Centrifugal water chilling systems focus on off-design performance. Heating Piping Air Conditioning, 1978, 50(1): 63-67.
- [16] B. A. Flake. Parameter estimation for multiresponse nonlinear chilled water plant models. ASHRAE Transactions, 1997, 4(2): 26-29.
- [17] ALBERT T. P. SO et al. New HVAC control by system identification. Building and Environment, 1995, Vol. 30: 349-357.
- [18] House J. M., T. F. Smith. A system approach to optimal control for HVAC and building systems. ASHRAE Transactions, 1995, 101(2): 77-96.
- [19] Shengwei Wang, Xinqiao Jin. Model-based optimal control of VAV air conditioning system using genetic algorithm. Building and Environment, 2000, 35(4): 471-487.
- [20] B. C. Ahn, et al. Optimal control development for chilled water plants using a quadratic representation. Energy and Buildings, 2001, 33(7): 371-378.
- [21] Ito, Yasuyuki, Murakami, Yoshiki et al. Next generation HVAC system. Proceedings of the SICE Annual Conference, Proceedings of SICE Annual Conference 2008 International Conference on Instrumentation, Control and Information Technology, 2008, 4(3): 2223-2228.
- [22] Komareji, Mohammad, Stousteup et al. Optimal model-based control in HVAC systems. Proceedin-

- gs of the American Control Conference, 2008 American Control Conference, ACC, 2008,6(5): 1443-1448.
- [23] Komareji, Stoustrup, Rasmussen et al. Optimal set-point synthesis in HVAC systems. Proceedings of the American Control Conference, Proceedings of the 2007 American Control Conference, ACC, 2007,4(3): p5076-5081.
- [24] Lv Hongli, Duan Peiyong, Jia Lei. One novel fuzzy controller design for HVAC systems. Chinese Control and Decision Conference,CCDC,2008,2(5): p2071-2076.
- [25] K.F. Fong, V.I. Hanby, T.T. Chwa. HVAC system optimization for energy management by evolutionary programming. Energy and Buildings, 2006,38(7):220-231.
- [26] Lu Lu, Cai Wenjian, Li Shujiang et al. HVAC System Optimization Condenser Water Loop. School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University Nanyang Avenue, Singapore 63(4):97-98.
- [27] 何厚键. 中央空调水系统建模与优化研究: 沈阳工业大学(硕士学位论文). 沈阳: 沈阳工业大学信息科学与工程学院. 2005.
- [28] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization. Proc IEEE Int Conf on Neural Networks. Perth, 1995,8(10):1942-1948.
- [29] Kennedy J and Eberhart R C. Particle swarm optimization. Proc. IEEE Int. Conf. on Neural Networks. Perth, Australia, 1995,23(12):1942-1948.
- [30] Reynolds C W. Flocks, Herds and schools: A distributed behavioral model. Computer Graphics, 1987,21(4): 25-34.
- [31] Hepper F, U Grenander. A stochastic nonlinear model for coordinated bird flocks. The Ubiquity of Chaos, Washington DC, AAAS Publications, 1990,42(1):66-77.
- [32] Kennedy J and Eberhart R.C.. Swarm Intelligence. Morgan Kaufmann Academic Press, 2001, 42(2): 123-134.
- [33] Trelea C. The particle swarm optimization algorithm: convergence analysis and parameter selection. Information Processing Letters, 2003, 85(6):317-325.
- [34] Van den Bergh F, Engelbrecht A P and Kourie D G. A convergence proof for the particle swarm optimizer. IEEE Transactions on Evolutionary Computation. Submitted September 2001,47:142-154.
- [35] Shi Y, Eberhart R C. Fuzzy Adaptive Particle Swarm Optimization. Proc Congress on Evolutionary Computation 2001, Seoul, Korea, IEEE Service, 2001,42(3):1243-1356.
- [36] Clerc M. The Swarm and the Queen: Towards a Deterministic and Adaptive Particle swarm Optimization. Proc CEC, 1999,42(7):1951-1957.
- [37] Shi Y H, Eberhart R C. Comparing inertia weights and constriction factors in Particle swarm Optimization. Proceedings of 2000 Congress on Evolutionary Computation, California, 2000,34(2):84-88.
- [38] Suganthan P N. Particle Swarm Optimizer with Neighbourhood Operator. Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation, Piscataway, NJ, IEEE Service Center, 1999,34(8):1958-1962.
- [39] Jacques Riger, Jakob S. Vesterstr. A Diversity-guided Particle Swarm Optimizer, ARPSO, 2005,7(1)14-17.
- [40] Van den Bergh, Engelbrecht A. A New Locally Convergent Particle Swarm Optimizer. 2002 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2002,3(4):97-99.

参考文献

- [41] 高鹰. 一种自适应扩展粒子群算法. 计算机工程与应用, 2006, 15(4):12-15.
- [42] 方峻, 唐普英, 任诚. 一种基于加权有向拓扑的改进粒子群算法. 计算机技术与发展, 2006, 16(8):62-65.
- [43] 王雪飞, 王芳, 邱玉辉. 一种具有动态拓扑结构的粒子群算法研究. 计算机科学与应用, 2007, 13(7):205-207.
- [44] 高鹰, 谢胜利, 许若宁等. 基于聚类的多子群粒子群优化算法. 计算机应用研究, 4(3):40-41.
- [45] 贾东立, 张家树. 基于混沌变异的小生境粒子群算法. 控制与决策, 2007, 22(1), 117-120.
- [46] Conlomi A, Dorigo M, Maniezzo V. Distributed optimization by ant colonies. In Proceedings of 1st European Conferenc on Artificial life, Paris, France; Elsevier Publishing, 1991, 5(4):134-142.

获取更多资料 微信搜索 蓝领星球

在学研究成果

- [1] 李树江, 孟明. 《基于粒子群算法的中央空调水系统优化》. 2009年《沈阳工业大学学报》. 已投稿.

获取更多资料 微信搜索蓝领星球

致 谢

在本文结束之际，首先要感谢我的导师李树江教授，并表达我崇高的敬意。在学习和生活上，李老师都给了我很大的帮助，更重要的是李老师渊博的知识、严谨的治学作风和强烈的责任感，对我的学习、工作和生活的态度有了很大的影响，给我树立了学习的榜样。在这两年的研究生生活中，我学到了很多的东西，也进步了很多，这其中无不凝聚着老师的心血。在此，还要感谢张学文、潘洪亮、刘平、王文情等同学在软件实现方面给予我的帮助。