

· 专论 ·

# 中央空调水系统优化控制研究的发展及现状

孟华<sup>☆</sup> 龙惟定 王盛卫  
(同济大学) (香港理工大学)

[摘要] 概述了国内外在中央空调水系统优化控制领域的研究成果,总结了以往研究的特点,分析了今后的研究方向。

[关键词] 优化控制 中央空调 水系统 节能

中央空调在为人们营造舒适环境的同时也带来了能耗问题,如何既满足空调舒适度、又最大限度地节约能源,日益为人们所关注。在影响空调系统能耗的诸多因素中,空调系统的优化控制是很重要的方面。

## 1 优化控制的发展历程

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<sup>[1]</sup>。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<sup>[2]</sup>。近年来,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。因此,如何优化各控制变量、以使整个系统运行能耗最低已成为当今空调优化控制领域的研究热点<sup>[3,5]</sup>。

在典型水冷式二级泵中央空调系统中,当负荷不断变化时,水系统(水侧)的控制变量主要有:

(1) 冷冻水出水温度——通过调节冷机出力来维持。对于离心机可调节入口导叶;往复机可采用多缸卸载或制冷剂旁通形式;螺杆机可调节滑阀位置;吸收式可调节蒸气、热水或气体的混合比等。对于有变频器的冷机可调节其频率。

(2) 冷却水供水温度——通过调节冷却塔风扇转速来维

持;有时也可选取冷却水供水温度与周围空气湿球温度之差为控制变量。

(3) AHU送风温度——通过调节流入盘管的冷冻水阀门开度来维持。

(4) 冷冻水二级泵前后压差——通过调节变频泵转速来维持。

以上皆为连续型控制变量。此外,空调水系统中通常还有离散型控制变量,如冷机台数、冷却塔台数及水泵台数等,是指在部分负荷及不同运行模式下这些空调部件的台数优化控制。系统的这些控制变量往往是相互联系相互影响的,其中某个控制变量的改变和调整,不仅影响该变量所在的局部能耗,而且还将影响整个系统的能耗。因此,空调水系统真正意义上的优化,是在使整个系统总能耗为最小的前提下各控制变量的优化,同时还要考虑负荷、周围空气温度、显热比等非控制变量的影响。

## 2 优化控制基本思想

要对空调系统进行优化控制,首先应明确优化目标。若针对空调风系统,应考虑在满足舒适度的前提下尽量省能;若考虑水系统,则优化目标应该是节能。系统层次上的优化控制,通常是从系统全局出发,基于某个目标函数,该函数的最终值(能耗或折合费用)往往由前述的各种控制变量及非控制变量(负荷、周围空气温度)等因素决定。

设某空调系统中几个部件相互联系,并组成一完整的空调系统,如图1。假设该空调系统具有n个耗能部件,则在 $t_0$ 到 $t_f$ 时间间隔内,系统总能耗为:

$$J = \sum_{i=1}^n \int_{t_0}^{t_f} k_i(t) p_i(x_i(t), y_i(t), f_i(t), m_i(t), u_i(t), \beta_i(t)) dt$$

其约束条件为:

$$0 \leq g_i(x_i(t), y_i(t), f_i(t), m_i(t), u_i(t), \beta_i(t))$$

式中  $x_i$ ——部件输入矢量;

- $y_i$ ——部件输出矢量;
- $f_i$ ——空调系统中的非控制变量;
- $m_i$ ——空调系统中的连续型变量;
- $u_i$ ——空调系统中的离散型变量;
- $\beta_i$ ——空调系统中部件参数;
- $k_i$ ——单位时间步长内的系统总能耗;
- $p_i$ ——单位时间步长内系统部件能耗;
- $J$ ——预测时间段内的系统总能耗。

根据上述目标函数及约束条件,选取合适的优化算法计算出使目标函数达到极值的最优控制变量值  $m_i$  和  $u_i$ , 这也就是各 PID 控制中需要给定的最佳控制变量设定值。在这个优化过程中,系统部件参数如何获得也是很重要。近年来,这方面研究倾向于采用动态的、不断刷洗的参数辨识方法,再结合最佳优化方法,以取得实时在线的最佳优化控制效果<sup>[4,20]</sup>。

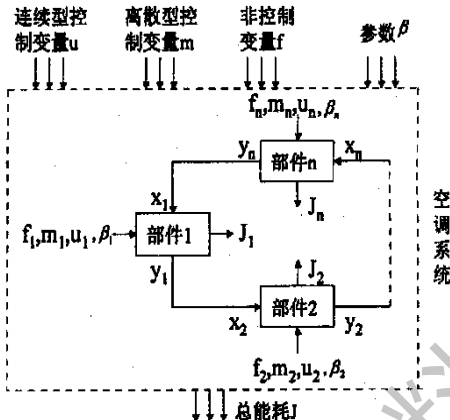


图1 各部件组成的空调系统图

### 3 优化控制研究概述

笔者试图将前人在空调水系统优化控制方面所做的研究工作按时间分为两个阶段加以概述。

#### 3.1 早期研究

空调水系统的优化控制研究最早出现于70年代中,现将70年代中到80年代末划分为早期研究阶段,因为这个期间的研究更注重优化控制的最终量值结果,即最终可省多少能、可省多少钱?而不注重模型的方法研究,系统参数也大都通过直接测量或离线(off-line)回归的方式获取,由于测量范围广、工作量大,致使结果误差较大。

Zimmer<sup>[6]</sup>采用二次模型对冷机系统进行了优化控制研究,给定负荷运算控制区间,采用Nelder-Mead<sup>[14]</sup>优化算法,这是下山寻优中适于多变量单目标函数的一种优化方法。优化结果使该系统的年预测能耗值较原来减少1~3%。但文章作者没有考虑冷机的启/停状态;也未考虑冷凝温度对系统总能耗的影响。

Chun和Norden<sup>[7]</sup>对一大型纺织厂的空调冷水系统进行了优化控制研究,模型中考虑了冷冻水供水温度等控制变

量,并在约束条件中引入“惩罚因子”概念,采用Nelder-Mead优化算法。其年预测能耗较原来减少12.5%。但文章作者没有对冷机运行台数进行优化控制。

Entedine<sup>[8]</sup>采用多维优化方法对空调系统的各组成部件分别进行了优化控制研究,将冷机和冷冻水泵能耗之和J作为目标函数,利用在线方法测绘出能耗J随冷冻水供水温度的变化关系图,由此获取所需参数。但文章作者没有考虑整个系统各组成部件的相互关系,同时参数的获取较复杂。

Lau<sup>[9]</sup>对一大型商业建筑的空调系统进行了优化控制研究,考虑到湿球温度、冷水负荷、冷却塔风扇转速、冷却泵流量、冷机运行台数等变量,采用实测数据获取参数。该优化策略比原来节能1.4%。

此外,Thielman<sup>[10]</sup>、Hackner<sup>[11]</sup>、Johnson<sup>[12]</sup>、Spetham<sup>[13]</sup>等人也都在空调水系统优化控制方面作了大量工作。

#### 3.2 近期研究

从Braun88年看研究工作开始迄今,现将其划分为水系统优化控制的近期研究阶段,因为这时的研究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。

Braun<sup>[15]</sup>认为建模的最终目的对所建模型的种类及特点起决定性作用。他分别采用基于部件的(component-based)和基于系统的(system-based)两种模型,对某飞机场的空调系统进行了优化控制研究。在前一模型中,考虑到建模的目的主要用于模拟整个系统,以对系统的整体结构特性或不同优化控制策略的效果作出评价,也可作为其他简化模型的基础。因此采用较复杂的数学物理关系,将系统总能耗表示为各控制变量及输出变量及输出变量的二次函数,并分别针对线性和非线性约束条件下的线性输出和准线性输出进行了优化计算。模型需要对其中每个部件都进行测量,以辨识模型参数。Braun在此基础上又开始了准优化控制模型,文章作者着重对其中的参数辨识方法进行研究,提出“递归最小二乘”参数辨识法。由于该模型是在前种模型的基础上简化而得,故既能描述物理特性,同时又具有测试范围小、需待定参数少等优点,适于在线优化控制。

Olson<sup>[16]</sup>采用混合集成非线性问题(mix-integer nonlinear programming problem, MINLP)的方法,对具有多台冷机和多台冷却塔的空调系统进行了优化控制研究,模型中考虑冷冻水供水温度、冷却水回水温度、冷机的开/关、冷却塔风扇转速(高/中/低)等因素,利用冷机和风机能耗的经验关系式,采用SQP(sequential quadratic programming)法进行优化计算。但文章作者未考虑冷机运行模式中满功率和部分功率等不同的运行特性。

MacArthur<sup>[17]</sup>采用动态预测性模型对制冷系统进行优化控制研究,开发多变量控制预测器。“自动回归”参数,利用receding horizon control(RHC)寻优。文章作者的研究结果表明,RHC在动态预测模型中的寻优效果较好,但在稳态模型

中效果不详。

Curtiss<sup>[18]</sup> 利用人工神经网络技术对某空调系统进行了优化控制研究,其模型包括两个神经网络,第一个由各控制变量及非控制变量的矢量形式组成,起下位控制器的作用,用于预测实际系统的能耗;而第二个神经网络则描述了系统能耗与控制变量之间的关系,使用回归方法获得所需参数,采用最速下降法进行寻优。神经网络模型比传统的二次模型更具灵活性,但因其不能微分而致使可选用的优化计算方法受到限制。

B. A. Flake<sup>[19]</sup> 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<sup>[23]</sup> 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。文章[7]中采用相似的系统模型对空调系统的空气侧进行了优化控制研究,采用基因遗传优化算法,结果表明该法不受小量干扰信号影响,适于在线优化控制。

此外, RICK<sup>[21]</sup>、Keeney<sup>[23]</sup>、Hartman<sup>[23]</sup>、Austin<sup>[24]</sup> 等等,也都在空调水系统优化控制方面进行了大量研究工作。

#### 4 分析及结论

通过对现有文献资料的综述和分析,可以看出前人对空调水系统优化控制的研究主要集中在模型的建立、参数辨识和优化方法的选取三方面,事实上,此三者是紧密联系不可分隔的,如果脱离优化控制的具体要求而仅就单一的参数辨识和优化方法进行研究,则很难得出规律性结论。因为参数辨识的实质本来也是一种优化计算,若单纯从数学角度看,视问题是动态还是静态、是否有约束、维数如何、是否线性化、对优化结果的误差要求如何等等情况的不同,可以有多种优化方法的选择方案。因此,必须针对空调优化控制问题的具体特点,建立准确而高效的数学模型,在建模的同时就应该考虑到参数是否容易获得、如何获得,同时也要考虑就所建立的模型采用何种优化算法较好。总结前人的研究成果,可以得出以下结论:

(1)在空调水系统优化控制研究中,数学模型的建立至关重要。考察现有的模型诸如二次模型、准优化控制模型、人工神经网络模型、黑箱模型、自适应控制模型等等,尽管在形式上多种多样,但概括起来无外两类:一是以描述物理特性为主的模型,如二次模型等,它是基于较详细的物理概念或设备性能而得,模型精度较高,但需待定的参数量大,许多

甚至难以获得,因此这种模型不适于实际系统中的优化控制。二是基于统计原理或系统辨识等所建立的模型,其特点是基本不涉及实际系统的物理特性,而通过对大量实测数据进行学习、辨识和训练以获得最优化控制量,这样的模型形式简单,但测试及参数训练量大,成本高,因此在实际优化控制中也不适用。自适应控制模型是将此二者结合起来,当前看来控制效果较好的模型,它基于简单物理特性,参数训练量小,精度高,不失为发展前途看好的模型。

(2)在优化控制研究中,模型参数辨识对最终的控制结果也起到举足轻重的作用。通过对现有文献的分析可以看出,以往的学者通常将系统参数的获取方法(参数辨识)与求解最佳控制变量的寻优计算(优化方法)割裂开来分别研究,当建立起了某空调系统模型后,先根据一定量的实测数据获得所需要的各参数,然后利用优化方法求解最佳控制变量。但真正的系统参数在系统实际运行中是呈动态趋势不断变化的,因此应该采用动态的参数辨识方法,以求现实时的最佳优化控制效果<sup>[4,20]</sup>。

(3)在优化控制研究中,优化算法也是很重要的方面。对于像空调系统这种多变量非线性优化问题,可采用共轭梯度、SQP 等方法进行求解,但这些方法具有计算收敛速度强烈取决于初始点选取方式,无法排除信号干扰等明显缺陷。而基因遗传算法以其抗小量干扰信号能力强、可快速获得稳定可靠准优化解等优势,日益为学者所看好。

(4)纵观空调水系统优化控制研究的发展历程,其中模型的发展呈现“简—繁—精”的变化趋势:在优化控制研究初期,由于工作量过大的优化计算无法实现,因此那时的模型大都很简单,虽然所需参数较易获取,也可以通过一定的优化计算得出结果,但由于模型中所描述的物理特性过于粗糙而致使控制结果稳定度低、误差大;随着计算机技术的飞速发展,大量的优化计算得以实现,模型中对物理特性的描述也逐步细致,致使这时的模型很复杂,但是由于受具体设备测试条件手段的限制,许多所需的参数无法获得,对优化控制结果的影响同样很大;近年来,笔者认为模型正向着简而精的方向发展,即从形式上看并不复杂,但在模型中对主要物理特性的描述仍很细致,这个发展趋势是兼顾参数辨识和优化方法的必然结果。

由于空调水系统优化控制的复杂性,加之对该领域的研究历史较短,尚有许多研究工作有待加强,笔者认为主要包括以下几方面:

①加强实验模型的理论研究。目前对空调水系统优化控制的研究工作主要集中在:利用已有的实验模型进行局部修改,以系统模拟为基础,侧重应用,实施各种优化控制策略并对其作出评价。而就实验模型本身的研究则较薄弱,故今后可从一定理论深度加强模型开发实验验证等方面的研究工作。

②加强对下位控制器的研究。如前所述,目前优化控制

的研究多半集中在全局性优化方面,即以动态的、实时的、在线的高效模型来追踪整个系统的变化,从而给出最佳优化控制变量以给下位控制器。而对下位器本身的研究则较少,往往采用传统的PID控制器,它一般具有较优良的控制性能,但不足之处是每用于一个不同的系统中事先都需要整定参数。因此应不断开发控制性能优越、对大参数变化系统能普遍适用的新型下位控制器,尽管这方面工作已经开始<sup>[2]</sup>,但发展缓慢。

③加强其他学科方法在优化控制领域的应用尝试。比如自适应控制技术最早是用于飞机自动驾驶控制的设计工作,但将其基本思路用于空调系统的优化控制方面,形成自适应控制模型,较好地实现了实时在线地确定和调整系统过程参数的目标。再比如基因遗传本来是生物学概念,但恰当地被用于空调系统的寻优计算,也取得了令人满意的效果。

BEE

## 参 考 文 献

- Liptak B.G., Optimizing plant chiller systems, Instrumentation Technology Sep. P65—72 1977.
- Cooper K.W., R.A. Erth, Centrifugal water chilling systems; focus on off—design performance, Heating/Piping/Air Conditioning Jan/P63—67 1978.
- House J.M., T. F. Smith, A system approach to optimal control for HVAC and building systems. ASHRAE Transactions 1995.
- Shengwei Wang Xinqiao Jin, Model—based optimal control of VAV air—conditioning system using genetic algorithm, Building and Environment 35 (2000)471—487.
- B. C. Ahn, et al, Optimal control development for chilled water plants using a quadratic representation, Energy and Buildings 33(2001)371—378.
- H. Zimmer, Chiller control using on—line allocation for energy conservation, ISA Annual Conference Proceedings, No. 522, 1976.
- C. Chun and N. Norden, Computer optimization of refrigeration systems in a textile plant; a case history, Automation, 18(6), 1982.
- L. E. Enterline, A. Sommer and A. Kaya, Chiller optimization by distributed control to save energy, ISA Transactions, 23(2), 1984.
- A. Lau, W. Beckman et al, Development of computerized control strategies for a large chilled water plant, ASHRAE Transactions 91(2), 1985.
- D. Thielman, Chiller optimization by energy management control systems, ASHRAE Journal, Nov. 1983.
- R. Hackner, J. Mitchell, HVAC system dynamics and energy use in buildings—part II, ASHRAE Transactions, 91(1), 1985.
- G. Johnson, Optimization techniques for a centrifugal chiller plant using a programmable controller, ASHRAE Transactions, 91(2), 1985.
- P. Spethmann, Optimized control of multiple chillers, ASHRAE Transactions, 91(2), 1985.
- J. Nelder and R. Mead, A simplex method for functional minimization, Computer Journal, Vol. 7, 1965.
- J. E. Braun et al, Methodologies for optimal control of chilled water systems without storage, 89—6—5(RP—539).
- R. Olson and J. Liebman, Optimization of a chilled water plant using sequential quadratic programming, Engineering Optimization, Vol. 15 1990.
- J. MacArthur, A novel predictive strategy for cost—optimal control in buildings, ASHRAE Transactions, 99(1), 1993.
- Curtiss P. S., Artificial neural networks for use in building systems control and energy management, Ph. D. Dissertation, University of Colorado—Boulder, Joint center for energy management, 1992.
- B. A. Flake, Parameter estimation for multiresponse nonlinear chilled—water plant models, ASHRAE Transactions Symposia PH—97—4—2.
- Shengwei Wang, et al, Online adaptive control for optimizing variable—speed pumps of indirect water—cooled chilling systems Applied Thermal Engineering 00(2000)000—000.
- RICK T. OLSON, A dynamic procedure for the optimal sequencing for plant equipment part II: Validation and sensitivity analysis, Engineering Optimization, 1994 Vol. 22.
- Keeney, Kevin R., Application of building precooling to reduce peak cooling requirements, ASHRAE Transactions v 103n 1 jan26—29, 1997.
- Hartman, Thomas B., Global optimization strategies for high—performance controls, ASHRAE Transactions 101 Pt 2 Jun—24—28 1995.
- Austin, S. B., Chilled water system optimization, ASHRAE Journal v 35 n 7 jul 1993.
- ALBERT T. P. SO et al, New HVAC control by system identification, Building and Environment, Vol. 30, 349—357, 1995.

## Development and Present Status of The Research on Optimal Control of Chilled Water Systems in Central Air—Conditioning

By Meng Hua, Long Weiding and Wang Shengwei

**Abstract** This paper carried out a survey of researches on optimal control of chilled water systems in central air—conditioning, and also summarized its research characteristics. Consequently, the problems to be studied in the future are analyzed.

**Keywords** optimal control, central air—conditioning; chilled water systems; energy saving