

基于改进模拟退火算法的多台冷水机组负荷优化分配*

张 军¹ 张侃谕¹ 周 强²

(1. 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072; 2. 上海可控环境农业工程技术研究中心, 上海 201516)

【摘要】 将标准模拟退火算法的随机搜索策略改为混沌遍历搜索策略,采取一种特殊的算法确定初始温度以减少冗余迭代次数,增加方差判定准则作为搜索停止的条件,以多台冷水机组总能耗最小为目标,建立最优负荷分配模型,将改进的模拟退火算法应用于多台冷水机组的负荷最优分配。理论分析计算及实际结果均表明,可以实现节能,与通常的负荷分配策略相比,节能4%~11%。

关键词: 环境控制 冷水机组 负荷分配 混沌 模拟退火算法

中图分类号: S210.4; S11⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)03-0187-06

Improved Simulated Annealing Algorithm in Optimal Load Distribution of Multiple Chillers for Energy Conservation

Zhang Jun¹ Zhang Kanyu¹ Zhou Qiang²

(1. School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China

2. Shanghai Engineering Research Center of Controlled Environment Agriculture, Shanghai 201516, China)

Abstract

The random search strategy was substituted by the chaotic traveling strategy in standard simulated annealing algorithm, variance evaluation criteria was appended as a condition to stop searching, a special method was adopted to determine the initial temperature in order to reduce redundant iterations, the improved stimulated annealing algorithm was applied to minimize the total power consumption of the multiple chiller water units which connected in parallel to achieve the purpose of energy saving. The mathematical model of the multiple chiller water units and the energy-saving methods by means of the improved simulated annealing were established. Both the theoretical analysis and the actual results indicated that the energy savings could be realized, and the total energy consumption of all the chillers was reduced by 4% to 11% compared with the usual load distribution strategy.

Key words Environmental control, Chiller, Load distribution, Chaos, Simulated annealing

引言

可控环境农业工程的规模和范围在不断扩大,其对环境参数控制的要求也越来越高,需要越来越多的设备才能满足要求。多台冷热源设备组成的系统能耗相当可观,据统计,冷水机组的能耗占中央空调系统总能耗的40%~60%。目前空调系统都至少采用2台冷水机组联合运行,并且冷水机组容量按照最大负荷设计。然而,冷水机组在绝大部分时间里都运行在部分负荷工况下。因此,冷水机组的

能耗主要是其运行在部分负荷工况下的能耗。多台冷水机组的总能耗不仅与冷水机组的开启台数及其功率有关,而且还与设备本身的能耗特性密切相关,即与冷水机组满负荷性能和部分负荷性能有关。特别需要强调的是,多台冷水机组的总能耗还同时与部分负荷下各设备之间的负荷分配方案密切相关。因此,对冷水机组在部分负荷工况下的能耗进行分析,必须考虑各机组应承担的负荷,根据其部分负荷的能耗特性,寻找可行的节能优化控制方案。

设备购置之后,设备的能耗特性也随之确定且

收稿日期: 2011-10-21 修回日期: 2011-12-01

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2006AA10A311)和上海市科委重点科技攻关项目(10dz2212300)

作者简介: 张军,博士生,主要从事模式识别与智能控制、综合节能研究, E-mail: tshzhangjun@tsinghua.org.cn

不可更改,如何在多个冷热源设备之间进行负荷分配,以便使每个设备都工作于能效系数尽可能大的工况,同时使设备的总能耗最小,最大限度地降低运行能耗,便成为系统运行过程中节能的关键。现今应用于多台冷水机组负荷分配的优化控制策略都是基于传统的优化控制方法^[1~10]。传统优化算法基本上有完善的数学理论,大多数方法都能找到问题的局部最优解。然而许多工程实际问题最终都归结为全局最优化问题,全局最优化方法一直是优化理论的热点和难点问题^[11]。

与传统的优化方法相比,智能优化算法对目标函数和约束函数的要求更为宽松。将智能优化算法应用于多台冷水机组的负荷分配方面的研究鲜见报道^[12~15]。本文针对冷水机组的部分负荷特性,以多台冷水机组的总能耗最小为控制目标,建立与机组类型无关的负荷分配优化模型,根据被控对象的具体特性,将一种改进的模拟退火算法应用于解决多台冷水机组之间的负荷优化分配。

1 控制对象描述

图 1 是被控对象的结构示意图,采用二级冷水泵供水。用户端 AHU(空气处理单元)设备对水量的要求通过恒压控制实现。在冷水侧的初级和二级冷水回路之间安装旁通阀,通过恒压控制调节旁通水量以保持冷水机组蒸发器的水流量恒定。冷却水侧的混水阀是用来防止出现过低的冷却水温度。每台冷水机组的出水温度都可以由出水温度控制器控制。AHU 的送风温度由送风温度控制器控制。

2 冷水机组部分负荷特性的获取

由于通过冷水机组蒸发器的水流量是固定的,因而,在确定的周围环境湿球温度的情况下,冷水机组的负荷分配优化控制策略是容易实现的^[2]。

冷水机组所消耗的输入电功率可通过功率表测得;每台冷水机组承担的负荷可通过测量冷水机组提供的流量以及其供、回水温度计算得到;系统总负荷可通过测量负荷侧主管道的流量以及主管道供、回水温度计算得到。

计算公式为

$$Q = fc(T_{chr} - T_{chs})/1\,000 \tag{1}$$

式中 Q ——机组制冷量,kW
 f ——冷水的流量,kg/s
 c ——水的比热容,J/(kg·K)
 T_{chr} ——冷水回水温度,K
 T_{chs} ——冷水供水温度,K

通过计算出的输出制冷量和制冷机即时消耗的

电功率数据进行回归分析,得到制冷机输入电功率和部分负荷率的关系曲线(采取模拟退火算法的函数优化方法)或关系图表(采用模拟退火算法的组合优化方法)。在关系曲线或者关系图表的基础上,利用优化算法寻找在满足总制冷需求情况下的最小输入电功率。

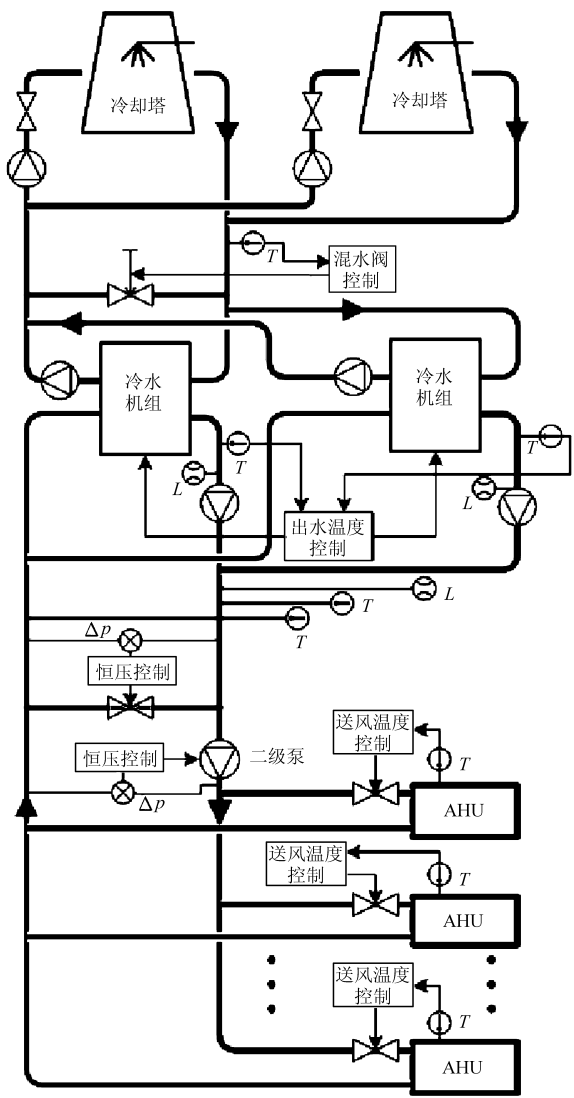


图 1 被控制对象结构示意图
Fig.1 Scheme of the controlled chillers systems

3 冷水机组能耗及负荷分配模型

系统总能耗是系统中所有冷水机组的能耗之和,即

$$P = \sum_{i=1}^N \frac{Q_L r_i}{C_i} \tag{2}$$

约束条件

$$\begin{cases} 0 \leq r_i \leq 1 \\ Q_L r_i \leq q_{ir} + \Delta q_{ir} \\ \sum_{i=1}^N r_i = 1 \end{cases}$$

式中 N ——机组台数 i ——机组编号
 Q_L ——系统的总负荷
 r_i ——第 i 台机组制冷量与系统总负荷比值
 q_{ir} ——第 i 台机组的额定制冷量
 C_i ——第 i 台机组的能效系数
 Δq_{ir} ——第 i 台冷水机组的冷量裕度

对于以上模型,应用改进模拟退火算法,实时得到多台冷水机组的动态最优负荷分配策略,从而使系统总的能效系数一直处于最大值,以便达到节能的目的。

4 多台冷水机组最优负荷分配

模拟退火算法(simulated annealing,简称 SA)是一种通用的随机搜索算法,是对局部搜索算法进行了扩展^[16],基于蒙特卡洛迭代算法求解的一种启发式随机搜索算法。SA 由某一高温开始,利用具有概率突变特性的 Metropolis 抽样策略,在解空间随机搜索,随着温度不断下降,重复搜索过程,最终得到问题的全局最优解。SA 与通常的局部搜索算法相比,其最大的特点是,以一定的概率选择领域中目标值相对较大(对于最小值问题)的状态,这一点使 SA 成为一种理论上的全局最优算法。SA 在初始温度足够高、温度下降足够慢的条件下,能以概率 1 收敛到全局最优点。

模拟退火算法寻优速度的关键是随机搜索变量的产生方式、初始温度、终止温度的选取及温度的下降策略。

本文对标准模拟退火算法进行改进:由混沌遍历搜索确定初始温度,以便消除高温阶段的冗余迭代;由一维 logistic 混沌遍历搜索代替随机搜索;增设方差判定作为搜索终止准则,以便消除低温阶段的冗余迭代。

4.1 基于混沌的温度初值选取

初始温度一般给得足够高,以便最初的随机搜索很充分,而实际上这样会产生很多冗余迭代。为消除冗余迭代,采用如下算法确定初始温度:将混沌遍历映射到冷水机组负荷分配的状态空间 S ,在 S 内进行混沌遍历,找到评价函数的最大值点 $f_{\max}$ 和最小值点 $f_{\min}$,设开始阶段评价函数值较低的点的概率为 p_0 。

依据 Metropolis 法则,有
$$p_0 = e^{-\frac{\Delta f}{T_0}}$$
式中 T_0 ——初始温度
由 $\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$,解得
$$T_0 = \frac{f_{\min} - f_{\max}}{\ln p_0} \tag{3}$$

根据此式即可确定初始温度 T_0 。

4.2 基于混沌的遍历搜索

混沌具有初值敏感性、遍历性及貌似随机的规律性,混沌作为搜索机制,效率高,还可有效避免陷入局部最优。

本文用一维 logistic 映射产生混沌变量,即
$$x_{k+1} = \mu x_k (1 - x_k) \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \tag{4}$$
这是一个非线性动力系统, μ 为混沌控制参数,当 $\mu = 4$ 时,该系统没有稳定解,解为 $[0, 1]$ 区间的满映射,表现出完全的混沌状态。

用线性变换将 logistic 产生的混沌向量映射到冷水机组负荷分配的状态空间 S ,在 S 内进行混沌遍历搜索,作为标准模拟退火算法中的搜索策略。

4.3 基于方差准则的终止搜索策略

随着退火温度的逐渐降低,搜索的范围也越来越小。当温度比较低时,SA 将进行邻域搜索,根据冷水机组部分负荷的实际工况可知,本问题只有一个最小值点,所以,当温度比较低时,SA 进行的邻域搜索就是最小能耗邻域。为此,当到达此最小能耗邻域之后,为了消除冗余搜索和迭代,引进了方差判定准则

$$\sum_{i=k-n}^k D(X_i) < \varepsilon \tag{5}$$

式中 $D(X_i)$ ——方差
 X_i —— S 中的搜索向量
 k ——迭代指标
 n ——参与判断的搜索向量数量
 ε ——方差评价指标
 n 和 ε 应根据系统的实际情况仔细甄选。
如果式(5)成立,则跳出循环,停止搜索。

4.4 改进的模拟退火算法计算步骤

如前所述,冷水机组的输入功率与部分负荷率之间的关系,既可以用回归分析得到的曲线表示,也可以用一组数据来表示。为了减少处理数据的工作量,用一组实时实测数据来描述冷水机组部分负荷与输入能耗之间的关系。

冷水机组在运行季节能耗计算表达式为
$$W = \sum_i p_i h_i \tag{6}$$
式中 W ——总能耗
 p_i ——冷水机组在某部分负荷时的输入功率
 h_i ——冷水机组在某部分负荷时的运行时间
此能耗计算表达式即为算法的评价函数。
冷水机组最优负荷分配的目标函数为
$$\min W(m) \quad (m \in S) \tag{7}$$
这种基于混沌搜索、方差终止的模拟退火算法

的计算流程如下：

(1) 由 logistic 映射产生的混沌系列经线性变换后遍历 S ,按照 4.1 节中所述方法及式(3)确定初始温度 T_0 。

(2) 根据冷水机组对象的实际情况,任选一个状态空间内的初始解,给定终止温度 T_f ,令迭代指标 $k = 0, T_k = T_0$ 。

(3) 按照 logistic 混沌搜索策略产生一个 m 的邻域解 u ,计算目标函数增量 $\Delta p = p(u) - p(m)$ 。

(4) 如果 $\Delta p < 0$,令 $m = u$,转至步骤(5);否则产生 $\xi = U(0,1)$,如果 $e^{-\frac{\Delta p}{T_k}} > \xi$,则令 $m = u$ 。

(5) 如果达到了热平衡,即内循环次数大于 $f(T_k)$,转至步骤(6);否则,转至步骤(3)。

(6) 计算式(5)是否成立。若式(5)成立,则跳出循环,终止搜索。

(7) 降低 $T_k, k = k + 1$,若 $T_k < T_f$,则算法停止;否则转至步骤(3)。

5 优化结果及分析

对改进的模拟退火算法与标准模拟退火算法寻优效率加以比较,以及由这种改进的模拟退火算法得到的多台冷水机组负荷分配策略与通常的冷水机组负荷分配策略的节能效果加以比较。不同路径 3 种算法迭代次数的比较如表 1 所示。

表 1 标准模拟退火算法与改进算法的迭代次数			
Tab.1 Iterations of standard SA and the proposed SA			
路径	原始算法	混沌遍历算法	混沌遍历 + 方差判定算法
1	8 109	4 612	1 660
2	8 109	2 975	1 320
3	8 109	1 422	99
4	8 109	4 726	1 071
5	8 109	127	103
6	8 109	6 331	965
7	8 109	228	58
8	8 109	4 098	1 063

比较表中数据可以发现,改进算法的寻优迭代次数减少了,搜索寻优效率提高了。

图 1 所示系统的有关数据如表 2、3 所示。表 2 是冷水机组的部分负荷与其输入功率的实测数据,表 3 是冷水机组一年当中不同负荷率下的累积运行时间。

通过控制每台机组冷水出水温度,可实现冷水机组负荷的调节,从而实现冷水机组负荷的自由控制,进而实现每台冷水机组负荷的优化分配^[8]。

表 2 某冷水机组输入功率与部分负荷率的关系											
Tab.2 Data of chiller between input power and part load-rate											
部分负荷率/%	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
输入功率/kW	17	22	29	38	45	53	60	77	112	128	
部分负荷/kW	90	180	270	360	450	540	630	720	810	900	

表 3 冷水机组不同负荷率下的运行时间											
Tab.3 Run-time under different load-rates of chiller											
部分负荷率/%	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
运行时间/h	150	170	170	280	260	260	300	280	260	270	

对于螺杆式冷水机组,还可以通过改变滑阀的位置,实现螺杆式制冷压缩机在 10% ~ 100% 范围内的能量调节^[4~5]。在 30% ~ 100% 的能量范围内,螺杆式压缩机效率较高,在 30% 以下时,效率急剧下降^[4~5]。

现代冷水机组非常容易实现负荷的任意分配。其上有一个控制面板,冷水机组的容量可以通过这个控制面板手动或自动调节。因而,通过优化算法得到负荷分配策略之后,可直接由控制器输出调整冷水机组部分负荷率的指令,而无需人工设置^[2]。

鉴于冷水机组的上述负载特性,当系统采用两台相同容量的冷水机组并联运行时,在部分负荷状态下系统的负荷分配方案通常有负荷等额分配控制和区间负荷比例分配控制两种。

(1) 负荷等额分配控制。当系统的负荷低于 50% 时,一台机组承担全部负荷,另一台停机;当系统的负荷在 50% 以上时,2 台机组都投入运行,各承担 50% 的负荷。

(2) 区间负荷比例分配控制。当系统负荷在 50% 以下时,一台承担全部负荷,另一台停止运行;当系统负荷在 50% 以上时,一台机组满负荷运行,另一台机组承担负荷余下的部分。

上述两种负荷分配方案是以系统负荷的 50% 作为切换点实施不同的分配策略。为寻求能耗更低的负荷分配,将改进的模拟退火算法应用于冷水机组的负荷分配当中。为了对采用模拟退火算法进行负荷分配的策略与前述的两种策略进行比较和评价,在冷水机组的部分负荷特性、部分负荷运行时间等所有条件都相同的情况下,负荷等额分配控制、区间负荷比例分配控制、基于模拟退火算法的负荷分配策略 3 种方案的控制策略数据、能耗结果数据如表 4、5 所示。

从上述数据可以看出,区间负荷比例分配控制的全年总能耗是 362 098. 68 kW·h,负荷等额分配控

制的全年总能耗是 336 249 kW·h,采用模拟退火算法的方案全年能耗是 322 245 kW·h。采用改进的模拟退火算法的方案与区间负荷比例分配控制相比,节能率为 11.01%;与负荷等额分配控制相比,节能率为 4.16%。

在 3 种负荷分配方案中,机组 1 的全年能耗依

次下降;机组 2 的全年能耗依次上升,但这并不意味着不节能。控制的目标是使系统的总能耗降低。节能,要在满足冷负荷需求的前提下实行,不能为了节能而不满足冷负荷需求,这就是前述的约束条件。控制算法的目标函数是系统的总能耗,而非某一台具体机组的能耗。

表 4 两种常用方案的负荷分配及其能耗数据

参数		数值									
系统总负荷状况	系统实际负荷/kW	180	360	540	720	900	1 080	1 260	1 440	1 620	1 800
	系统总负荷百分比/%	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
区间负荷比例分配控制	机组 1 负荷/kW	180	360	540	720	900	900	900	900	900	900
	机组 1 负荷率/%	20	40	60	80	100	100	100	100	100	100
	机组 1 能耗/kW·h	3 740	10 640	13 780	21 560	34 560	34 560	34 560	34 560	34 560	34 560
	机组 2 负荷/kW	0	0	0	0	0	180	360	540	720	900
	机组 2 负荷率/%	0	0	0	0	0	20	40	60	80	100
	机组 2 能耗/kW·h	0	0	0	0	0	3 740	10 640	13 780	21 560	34 560
	全年总能耗/kW·h	362 098.68(其中,机组 1 全年能耗 272 761.88,机组 2 全年能耗 89 336.8)									
负荷等额分配控制	机组 1 负荷/kW	180	360	540	720	900	540	630	720	810	900
	机组 1 负荷率/%	20	40	60	80	100	60	70	80	90	100
	机组 1 能耗/kW·h	3740	10 640	13 780	21 560	34 560	13 780	18 000	21 560	29 120	34 560
	机组 2 负荷/kW	0	0	0	0	0	540	630	720	810	900
	机组 2 负荷率/%	0	0	0	0	0	60	70	80	90	100
	机组 2 能耗/kW·h	0	0	0	0	0	13 780	18 000	21 560	29 120	34 560
	全年总能耗/kW·h	336 249(其中,机组 1 全年能耗 213 378,机组 2 全年能耗 122 871)									

表 5 基于改进模拟退火算法的冷水机组负荷分配方案及能耗数据

参数		数值									
机组 1 负荷/kW	180	360	540	360	450	630	630	720	720	900	
机组 1 负荷率/%	20	40	60	40	50	70	70	80	80	100	
机组 1 能耗/kW·h	3 740	10 640	13 780	10 640	11 700	18 000	18 000	21 560	21 560	34 560	
机组 2 负荷/kW	0	0	0	360	450	450	630	720	900	900	
机组 2 负荷率/%	0	0	0	40	50	50	70	80	100	100	
机组 2 能耗/kW·h	0	0	0	10 640	11 700	11 700	18 000	21 560	34 560	34 560	
全年总能耗/kW·h	322 245(其中,机组 1 全年能耗 172 389,机组 2 全年能耗 149 856)										

上述数据是某阶段的试验数据。年份不同,时段不同,气象环境也会不同,对象的冷热负荷也会经常变化,冷水机组的性能也会不断改变,所以,实际能耗数据会经常变化,但基于这种改进的模拟退火算法总的节能特性不会改变,节能效果一般维持在 10% 左右。

冷水机组实际工作中,受机组自身性能、冷负荷的随时变化、气象条件的变化以及其他外部多种因素的影响,运行工况与标准工况会有很大的不同。因而,机组的部分负荷性能也会不断发生变化,于是,上述的负荷分配策略也会随着内部及外部多种条件的不断变化而随时发生相应的变化,进行动态

调整。

本文所述的基于混沌遍历方差判定 SA 算法的多台冷水机组负荷分配控制策略具备这种实时调控的功能。以冷水机组标准工况下的部分负荷性能参数为基础,对部分负荷性能参数进行实时监测和更新,在此基础上利用 SA 算法动态确定负荷分配策略,动态确定每台机组应承担的负荷,使系统在满足供冷负荷的前提下,总是运行在最节能的状态。

系统实际的总冷负荷、每台机组在不同的冷水温度下的性能参数、每台机组的部分负荷率性能参数都可以通过相应的冷水供、回水管道上的温度传感器和流量传感器提供的实时数据计算得到。

6 结束语

应用改进的模拟退火算法对多台冷水机组的负荷进行动态的适时调配,与通常的冷水机组部分负荷分配策略相比较,具有更好的节能效果。目前实际应用中的负荷分配算法都是基于传统的优化算

法,传统优化方法的局限性使基于传统优化算法的负荷分配策略也遗传了相应的局限性,而基于智能优化算法的负荷分配策略则可以克服这类局限性。本文提出的基于改进 SA 算法的负荷优化分配策略具有通用性,且与冷水机组的其他参数无关,与机型无关。

参 考 文 献

1 Manske K A, Klein S A, Reindl D T. Load sharing strategies in multiple compressor refrigeration systems [J]. ASHRAE Transactions Summer, 2002, 108: 327 ~ 333.

2 Chang Yung-Chung, Tu Hung-Chiu. An effective method for reducing power consumption-optimal chiller load distribution[C] //Proceedings of 2002 International Conference on Power System Technology, 2002, 2: 1 169 ~ 1 172.

3 Yu F W, Chan K T. Optimum load sharing strategy for multiple chiller systems serving air-conditioned buildings [J]. Building and Environment, 2007, 42(4): 1 581 ~ 1 593.

4 施灵. 多台冷水机组空调系统的优化控制[J]. 暖通空调, 2005, 35(5): 79 ~ 81.
Shi Ling. Optimization control strategy in air conditioning system with multi water chillers [J]. HV & AC, 2005, 35(5): 79 ~ 81. (in Chinese)

5 施志钢,胡松涛,李安桂. 多台冷水机组的负荷最优化分配策略[J]. 建筑科学, 2007, 23(10): 36 ~ 39.
Shi Zhigang, Hu Songtao, Li Angui. Optimal load distribution strategy for multiple chiller water units [J]. Building Science, 2007, 23(10): 36 ~ 39. (in Chinese)

6 闫秀英,孟庆龙,任庆昌,等. 联合运行冷水机组负荷优化分配及仿真研究[J]. 暖通空调, 2007, 37(11): 18 ~ 21.
Yan Xiuying, Meng Qinglong, Ren Qingchang, et al. Optimal load sharing strategy for multiple-chiller systems and its simulation [J]. HV & AC, 2007, 37(11): 18 ~ 21. (in Chinese)

7 陈丹丹,晋欣桥,杜志敏,等. 多台冷水机组联合运行系统的最佳性能系数(COP)[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(8): 1 325 ~ 1 328, 1 332.
Chen Dandan, Jin Xinqiao, Du Zhimin, et al. The optimal control strategy for the operation of multiple chillers system based on coefficient of performance (COP) optimization [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(8): 1 325 ~ 1 328, 1 332. (in Chinese)

8 陈丹丹,晋欣桥,杜志敏,等. 多台冷水机组联合运行空调系统的负荷优化分配[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(6): 974 ~ 977.
Chen Dandan, Jin Xinqiao, Du Zhimin, et al. The optimal loading strategy of multiple chillers in HVAC systems [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 41(6): 974 ~ 977. (in Chinese)

9 丁云飞. 部分负荷性能对冷水机组运行能耗的影响评价[J]. 节能, 2000(1): 3 ~ 5.

10 蒋小强,龙惟定,李敏. 部分负荷下冷水机组运行方案的优化[J]. 制冷与空调, 2009, 9(3): 96 ~ 97.
Jiang Xiaoqiang, Long Weiding, Li Min. Optimization of operation scheme for chiller under part load [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2009, 9(3): 96 ~ 97. (in Chinese)

11 张可村,李换琴. 工程优化方法极其应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.

12 Zhang Jun, Zhang Kanyu. Application of tabu search heuristic algorithms for the purpose of energy saving in optimal load distribution strategy for multiple chiller water units[C] //2010 IEEE International Conference on Progress in Informatics and Computing, 2010, 1: 303 ~ 307.

13 Zhang Jun, Zhang Kanyu. Predatory search strategy for load distribution of multiple chiller water units for the purpose of energy saving[C] //Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control, 2010, 4: 380 ~ 383.

14 Zhang Jun, Zhang Kanyu. Optimal load distribution strategy for multiple chiller water units based on adaptive genetic algorithms[C] //2010 2nd WRI Global Congress on Intelligent Systems, 2010, 2: 5 ~ 8.

15 Zhang Jun, Zhang Kanyu. A particle swarm optimization approach for optimal design of PID controller for temperature control in HVAC[C] //2011 IEEE 3rd International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2011, 1: 230 ~ 233.

16 汪定伟,汪俊伟,王洪峰,等. 智能优化方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.