

中央空调系统二级最优控制等式更新法的研究*

邝小磊

(佛山建筑规划设计院, 广东 佛山 528000)

摘要: 针对中央空调系统的二级最优控制, 通过对未协调系统与已协调系统的比较, 导出适于中央空调系统的二级控制用的等式更新法。此法算法简单, 计算时间短, 适用于空调负荷变化较快的过程。对子系统具有线性二次型凸性质的最优化问题, 可以得到实际上的全局最优解。

关键词: 中央空调系统; 最优控制; 等式更新法

中图分类号: TB657.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579(2009)03-0133-03

The Study on Equality-Renew Method for Two-level Optimal Control of Central Air-Conditioning System

KUANG Xiaolei

(Foshan Construction Project Institute, Foshan 528000, China)

Abstract: The equality-renew method suitable for two-level optimal control of central air-conditioning system is conducted for the uncoordinated system compared with the coordinated system. It applies to faster changing process of air-conditioning load because of simple algorithm and short calculation time. As the sub-systems possess the property of linear quadric form convex, it results a practicable global optimal solutions.

Key words: central air-conditioning system; optimal control; equality-renew method

对中央空调系统进行节能技术改造的目标之一, 是对整体系统施行最优控制, 使在满足约束条件下, 制冷量尽可能大, 电能消耗尽可能小; 在技术手段上要求控制方案不宜过于复杂, 计算任务较轻、时间短, 以满足在线控制和低成本要求^[1-4]。文[5]提出了采用分解与协调方法, 即将空调整体过程分解为若干子过程, 各子过程由其局部控制器所控制的, 组成下级; 然后, 在上级用一个协调控制器, 通过一个协调变量对各局部控制器进行协调, 组成了一个二级控制结构的总体架构, 但没有具体实现。作者利用 Lagrange 对偶函数法, 通过迭代计算得到了二级控制系统全局最优解, 并理论分析了其收敛性^[6]。但此法有其不足之处, 即对一个子系统而言, 在寻优过程中的每一步, 只有到迭

代结束, 才能得到有物理意义的可行解。因此, 计算时间长, 只适于负荷变化慢的过程。然而, 空调负荷是随机变化的, 很可能迭代还未完毕, 新的负荷变化又开始了, 新的迭代过程是在不满足约束条件状态下开始的, 结果势必加长了过程的寻优时间, 这必须采用高速计算机才能解决。

本文采用的等式更新法能克服文[6]的对偶函数法的缺点。在上级采用两个协调参量, 虽协调参量多了一个, 但因用简单的等式来更新协调参量值, 总的计算量及时间反而大为节省。更重要的是, 因不需在对偶问题上运算, 在每一迭代步都可得到有物理意义的可行解(或称次最优解), 且新的迭代过程是在满足约束条件状态下开始的, 故适用于负荷变化快过程的实际优化控制需要。

* 收稿日期: 2008-10-18

基金项目: 建设部科学项目规划资助项目(06-K5-30); 广东省自然科学基金资助项目(05001893)

作者简介: 邝小磊(1961年生), 女, 副教授/高级工程师; E-mail: fullwit@126.com

1 线性二次型凸优化

1.1 系统线性二次型最优化模型 所谓线性二次型是指,用偏差的平方积分来表示系统的控制质量,即目标函数积分号内的是状态和控制的二次函数;描述系统运动特性的状态方程是线性的。根据文[6],当整体系统分解为冷冻水、冷却水、风机三个可控关联子系统时,各子系统间的关联方程也是线性的。设关联子系统的两相邻目标之间不存在矛盾,或只存在微小而可忽略的矛盾,整体目标函数可写成三个分离目标函数之和。对第 i 子系统最优化模型是:

$$J_i = \min \frac{1}{2} \int_0^T [\|x_i - x_{0i}\|_{Q_i}^2 + \|u_i\|_{R_i}^2] dt \quad (\text{目标函数})$$

$$\text{S. t. } \dot{x}_i = A_i x_i + B_i u_i + z_i \quad (\text{动态约束})$$

$$z_i = x_{i-1} \quad (\text{关联约束})$$

$$x_i \in M, i = 1, 2, 3, \quad (\text{集约束})$$

式中, x_{0i} 为状态量目标值。回水温度 T_h 为 12°C , 出水温度 T_c 为 37°C , 进水温度 T_j 为 32°C [3-4]; Q_i, R_i 为设计者规定的加权矩阵。 Q_i 为半正定, R_i 为正定;积分号内第一项表示状态对目标值的偏离程度,第二项反映了投入控制作用能量大小,希望两项综合指标为最小;温度状态变化时受到状态方程所约束,子系统间受到关联方程所约束,这两约束是线性等式约束,因此是凸的;状态变化时的取值还受到边界范围所约束。当限定动态超调 $\leq 30\%$ 时,可求得约束集 M , 因此, M 是个有界闭凸集。以上构成了一个凸最优化问题。各子过程的参数如时间常数、放大系数和 PID 控制器参数如比例、积分常数等均是时不变的集中参数,因此,模型转换后的 A, B 均是常数矩阵。为简洁起见,假定系统是完全可以观测的。

1.2 最优化问题解法 用最优化理论中的最大值原理[9],可解上节的最优化问题。设取 Q 为单位阵, $R=1$ 。将约束归并到目标函数中,写出第 i 子系统的 Hamilton (哈密顿) 函数为

$$H_i = \frac{1}{2} [(x_i - x_{0i})^2 + u_i^2] + \lambda_i^T (z_i - x_{i-1}) + \rho_i^T (A_i x_i + B_i u_i + z_i)$$

ρ 为与状态量 x 对应的共态量, λ 为与关联约束相联系的拉格朗日乘子。按最优性必要条件得:

$$\frac{\partial H_i}{\partial x_i} = -\rho_i = x_i - x_{0i} + A_i^T \rho_i - \lambda_{i-1},$$

$$\rho_i(t_f) = \rho_{if} \quad (\text{共态方程})$$

$$\frac{\partial H_i}{\partial \rho_i} = \dot{x} = A_i x_i + B_i u_i + z_i, x_i(t_0) = x_{i0} \quad (\text{状态方程})$$

$$\frac{\partial H_i}{\partial u_i} = 0, u_i = -B_i^T \rho_i$$

状态、共态两方程构成了一个两点边界值问题。在上级给定协调参量 λ 和 z 情况下,这问题可解。解之,求出 x 和 ρ ,进而求出控制 u ,解法参见文[9]。由此可见,解子系统最优化问题关键是解两点边值问题。这只能用计算机编程来解。

2 等式更新法求解

前面的两点边值问题显然对应于已协调系统。因为已经加入了上级来的协调参量处理了关联约束。对于未协调系统,子系统间的关联虽已列出,但仍未加入协调参量以处理关联。这时的哈密顿函数和两点边值问题为:

$$H_i = \frac{1}{2} [(x_i - x_{0i})^2 + u_i^2] + \rho_i^T (A_i x_i + B_i u_i + x_{i-1})$$

$$-\rho_i = x_i - x_{0i} + A_i^T \rho_i - \rho_{i-1}, \rho_i(t_f) = \rho_{if} \quad (\text{共态方程})$$

$$\dot{x} = A_i x_i + B_i u_i + x_{i-1}, x_i(t_0) = x_{i0} \quad (\text{状态方程})$$

如果对未协调系统已协调完毕,这两组边值问题的方程应相等。即有如下两等式:

$$z_i = x_{i-1}, \quad \lambda_{i-1} = -\rho_{i-1}$$

换下标,得

$$\lambda_i = -\rho_i$$

可是,在协调过程中两式不相等。这样可令等式右边代表未协调系统,迭代的第 k 次值, x^k, ρ^k , 令等式左边代表已协调系统,迭代的第 $k+1$ 次值, z^{k+1}, λ^{k+1} 。即得协调量更新式:

$$z_i^{k+1} = x_{i-1}^k, \quad \lambda_i^{k+1} = -\rho_i^k$$

迭代计算直到等式成立。

3 控制结构模型

中央空调系统是个串联动态系统,在控制结构上是个二级系统。结构模型如图 1 所示[6]。

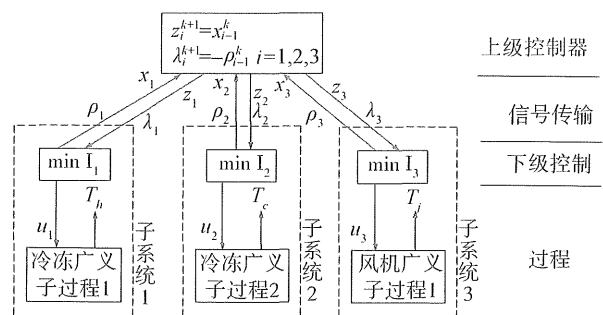


图 1 等式更新法的串联动态二级系统控制结构图

Fig. 1 Serial dynamical two-level system control structure chart of equality-renew method

图中,最顶层是协调控制级(上级),通常是一台计算机,或是计算机的一部分功能;往下是信

号传输线;再下是局部控制级(下级,又叫过程控制级);最下层是广义子过程(包括PID控制器、变频器、执行器、被控对象)。各子系统间有连线关联着。扰动是个恒量, x 为状态量。为了严格把迭代计算过程中的 x 与迭代结束后输出的状态解区别开来,前者用 x ,后者用 T_h, T_c, T_j ;下级控制器与广义子过程构成子系统。于是广义子过程等效于在 u 控制下的开环系统^[10]。

4 二级迭代算法步骤

第一步,在上级,任选一组初始协调参量 λ_i^1, z_i^1 作为协调参数送至下级进行迭代计算。设已迭代到第 k 次;

第二步,下级求解子最优化问题,即解两点边值问题。求得 $\rho_i^k(\lambda^k, z_i^k)$ 和 $x_i^k(\lambda^k, z_i^k)$,送至上级;

第三步,在上级,把 $\rho_i^k(\lambda^k, z_i^k)$ 和 $x_i^k(\lambda^k, z_i^k)$ 用于下二式确定第 $k+1$ 步迭代的新的协调量

$$\begin{aligned} z_i^{k+1} &= x_{i-1}^k(\lambda^k, z_i^k), \\ \lambda_i^{k+1} &= -\rho_i^k(\lambda^k, z_i^k). \end{aligned}$$

代入误差检验式 $\sqrt{\int_0^T (\lambda_i^{k+1} - \lambda_i^k) dt} < \varepsilon, i = 1, 2, 3$

$$\sqrt{\int_0^T (z_i^{k+1} - z_i^k) dt} < \varepsilon$$

ε 为确定精度的小正数。看是否二式同时满足?若满足,迭代可停止,最优解 x_i^*, ρ_i^* 已经找到。转第四步。否则,转回第二步;

第四步,求 $u_i^*(x_i^*, \rho_i^*)$ 。将求得的 u_i^* 经编码和D/A转换器,其输出标准电压(0~10V)接于广义过程输入端上,与PID给定值叠加后作用于广义过程上,求得实际的过程状态 T_h^*, T_c^*, T_j^* ,再代入文[3]的 Q_0, N_0 模型,求出 Q_0^*, N_0^* 。

等式更新迭代算法是收敛的,证明见文[9]。

5 结论

本文的目的在于把大规模系统理论中的多级理论引入到中央空调系统最优控制的研究和设计之中,为系统的节能技术改造提供一种可供选择的有效手段。等式更新法是1965年日本人高原康彦(Takahara)提出的。由于上级算法十分简单,计算时间短,适于中央空调系统的串联动态过程,特别是负荷变化快的过程。即使迭代未完成而新的负荷又到来了,仍然得到有意义的次最优解,即所得的解总处在界约束集之内。

参考文献:

- [1] WANG S W, JIN X Q. Model-based optimal control of VAV air-conditioning system using genetic algorithm[J]. Building and Environment, 2000, 35(6): 161-175.
- [2] SEMIH S S. Energy efficiency assessment for the antalya region hotels in turkey [J]. Energy & Buildings, 2006, 38(8): 964-971.
- [3] WDLDE P de, VOORDEN M van der. Providing computational support for the selection of energy saving building components [J]. Energy and Buildings Volume, 2004, 36(8): 749-758.
- [4] BALARAS C A, DROUTSA K, ARGIRIOU A A, Asimakopoulous D N. Potential for energy conservation in apartment buildings [J]. Energy and Buildings, 2000, 31(2): 143-154.
- [5] 唐军,肖丽萍,陈代杰. 中央空调系统全局寻优节能控制原理[J]. 贵州科学, 2007, 25(4): 81-84.
TANG Jun, XI Liping, CHEN Daijie. The principle of global optimizing economize energy control for central air-conditioning system [J]. Guizhou Science, 2007, 25(4): 81-84.
- [6] 聂玉强. 中央空调系统的二级最优控制方法及其理论分析[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2008, 47(3): 57-61.
NIE Yqiang. Two-level optimal control method and its theory analysis for central air-conditioning system [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2008, 47(3): 57-61.
- [7] 聂玉强,李安桂. 中央空调系统高效节能技术分析与应用[J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(1): 85-89.
NIE Yqiang, LI Angui. Analysis and application high-efficiency saving energy technique of central air-conditioning system [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2007, 29(1): 85-89.
- [8] 籍建才,刘树岭,戈振海. 中央空调经济运行工况分析[J]. 河北建筑工程学院学报, 2006, 6: 24.
JI Jiancai, LIU Shuling, GE Zenhai. The central air-conditioning economical operation condition analysis [J]. Journal of Hebei Construction Engineering Institute, 2006, 6: 24.
- [9] 秦寿康. 最优化理论与方法[M]. 北京: 电子工业出版社, 1986.
- [10] 李枚安. 大系统的动态递阶控制[M]. 邱硕, 译. 北京: 科学出版社, 1983.