

建筑内人工冷源变容量多变量解耦控制系统研究

天津大学 中国电子工程设计院 徐晓丽[☆]

天津大学 杨 昭

摘要 分析了人工冷源中的多变量控制过程,从机理和实验建模出发,利用易于实现的前馈解耦控制策略对变容量多变量人工冷源系统进行控制。Simulink 仿真表明该策略切实可行。同时,从实验的角度进一步证明了该策略的可靠性和合理性。

关键词 人工冷源 变容量 多变量 解耦 前馈

Multivariable decoupling control system of artificial cold source with variable volume in buildings

By Xu Xiaoli[★] and Yang Zhao

Abstract Starting from mechanism research and experiment modelling, analyses the multivariable control system, in which the feedforward decoupling control strategy is used for it for easier realization. The simulation results by Simulink show that the strategy is practicable. Also validates the strategy's reliability and rationality with experiment results.

Keywords artificial cold source, variable volume, multivariable, decoupling, feedforward

[★] Tianjin University, Tianjin, China

①

人工冷源系统是一个典型的多输入、多输出的非线性复杂系统,理想的控制策略应是多变量间的协同控制^[1-5]。本文以人工冷源中的风冷制冷机组为例,采用前馈解耦策略设计多变量解耦控制系统并对其稳定性进行分析。

1 人工冷源的前馈解耦控制策略理论分析

风冷制冷机组中包含压缩机、蒸发器、冷凝器、电子膨胀阀、风机等部件。理想的控制是以室内空气温度、流速为控制目标,通过变频器控制压缩机和风机的转速,电子膨胀阀控制制冷剂流量,组成如图 1 所示的 3 个闭环反馈控制回路。显然,对整个机组而言,控制变量间存在强耦合关系。如果不进行解耦控制,很难取得高品质的控制效果。而且,这种多变量解耦控制一直是控制领域的难点问题。考虑到 PLC 的可实现性,本控制器设计时,选用前馈补偿法对系统进行解耦控制。前馈补偿原理是针对反馈控制的缺点——控制具有滞后于扰动的不及时性而提出的^[6-8]。采用前馈补偿后的解耦控制框图如图 2 所示。其中, $\mathbf{X}_{in} = [t_{lab} \quad t_{sup}]$

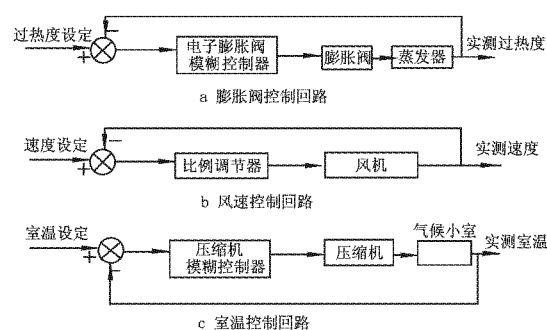


图 1 人工冷源内的 3 个闭环反馈控制系统

$v]$ 为系统设定值向量(分别表示室内温度、蒸发器过热度、室内风速); $\mathbf{Y}_{out} = [t_{lab} \quad t_{sup} \quad v]$ 为系统反馈值向量; $\mathbf{U} = [n_{com} \quad h \quad n_{fan}]$ 为输入向量(分别表示压缩机频率、膨胀阀步进电动机步数、风机频率);

①[☆] 徐晓丽,女,1975 年 8 月生,博士,工程师
100036 北京市丰台区金家村 288 号华信大厦综合楼 1 层
(010) 88252678
E-mail: lxuxiaoli2000@163.com
收稿日期:2008-01-23
一次修回:2008-06-12
二次修回:2009-11-10

$W(s)$ 为控制器传递函数矩阵; $W_{FF}(s)$ 为解耦矩阵; $W_0(s)$ 为输入、输出量间的传递函数矩阵。由于人工冷源系统具有非线性、时变、时滞、强耦合的特点, 建立精确的控制系统数学模型很困难, 故在本控制系统中采用理论分析和实验辨识相结合的方法求取 $W_0(s)$ 。实验中采用阶跃响应法, 当压缩机变频器所接收的 PLC 输出模拟信号由 1 V 升高到 7 V 时, 室内温度变化响应曲线如图 3 所示; 当电子膨胀阀开度由 103 步变为 113 步时, 过热度变化曲线如图 4 所示。

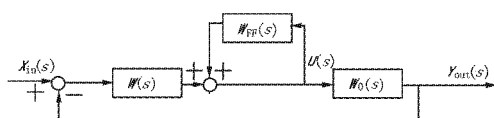


图2 带有前馈解耦环节的人工冷源多变量控制系统

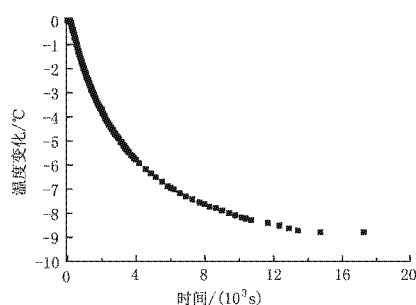


图3 气候小室室温阶跃响应曲线

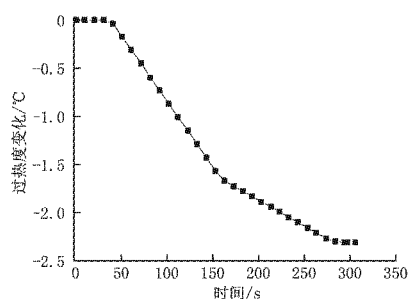


图4 电子膨胀阀动态阶跃响应曲线

取延迟时间为采样周期的整数倍, 经辨识得到的控制回路的传递函数(室内风速环路视为一阶比例环节) $W_{com}(s)$ (压缩机回路)、 $W_{EEV}(s)$ (电子膨胀阀回路) 分别为

$$W_{com}(s) = \frac{-1.467}{3.346s + 1} e^{-110s} \quad (1)$$

$$W_{EEV}(s) = \frac{-0.2462}{(34.7s + 1)^4} \quad (2)$$

由于对高阶模型的分析存在一定的困难, 采用基于平衡实现的方法对电子膨胀阀的传递函

数进行降阶处理^[9]。首先将该传递函数模型转换为状态空间模型, 利用 Matlab 工具箱中的 balreal(a,b,c) 函数求取低阶模型。在平衡实现中, 通过矩阵的等效变换获得可控、可观测的对角矩阵 G_r , 其对角线值在运行结果中以 G 向量表示。由此可以直观得到哪些状态变量是主要的, 哪些是次要的可以忽略, 进而降低模型的阶数。本函数运行结果显示: 第一个变量起主要作用, 后 3 个状态变量与第一个状态变量的比值分别为 0.33, 0.05, 0.003 3, 故可以截取掉后 3 个状态变量。同时文献[10~12]指出, 过热度对蒸发器进口流量的变化响应可以看作是一阶惯性环节。而电子膨胀阀控制蒸发器流量近似呈线性关系, 因此蒸发器出口过热度对电子膨胀阀开度的响应可近似为一阶惯性环节。采用最小二乘法进行模型辨识, 可得

$$W_{EEV}(s) = \frac{-0.2462}{137s + 1} e^{-50s} \quad (3)$$

开环系统下, 分别做风机频率、压缩机频率、电子膨胀阀阶跃扰动实验, 结果见图 5~8。

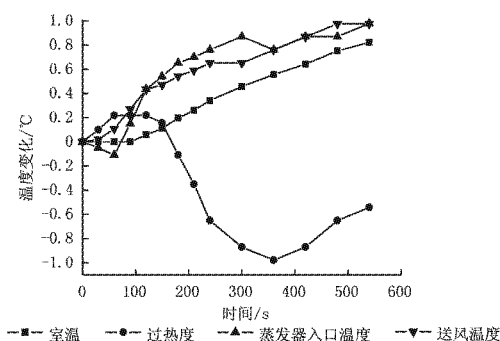


图5 压缩机频率由 32 Hz 变为 25 Hz 时的系统响应

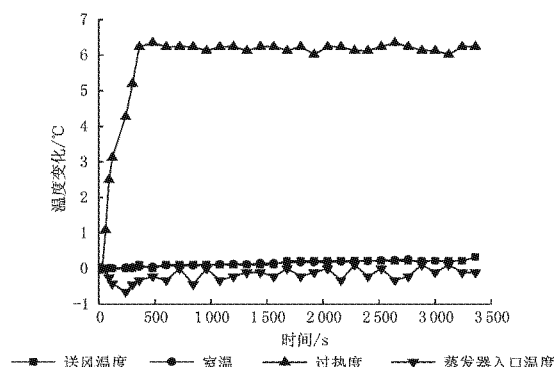


图6 膨胀阀开度由 91 步变为 58 步时的系统响应

将各个扰量的传递函数近似地用一阶惯性加延迟环节表示, 据前馈解耦原理, 可得到输入输出量间的传递函数矩阵 $W_0(s)$ 和解耦矩阵 $W_{FF}(s)$ (矩

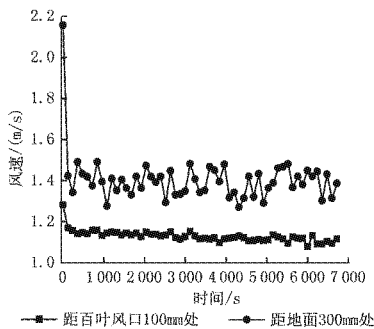


图7 风机频率由 50 Hz 变为 35 Hz 时的风速变化

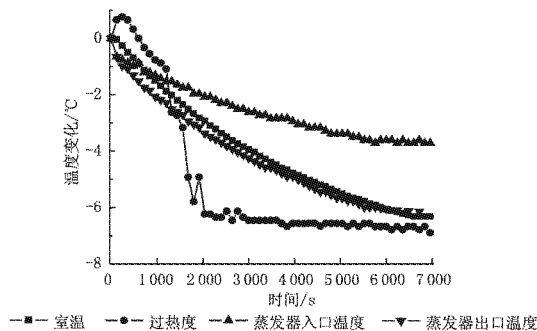


图8 风机频率由 50 Hz 变为 35 Hz 时的系统响应

阵中“—”代表解耦控制函数不存在)。

$$W_0(s) = \begin{bmatrix} \frac{-1.467}{3346s+1}e^{-110s} & \frac{-0.077}{57s+1}e^{-180s} & 0 \\ \frac{-0.0075}{3346s+1}e^{-40s} & \frac{-0.1887}{137s+1}e^{-30s} & 0 \\ \frac{0.47}{3986s+1}e^{-120s} & \frac{-0.043}{78s+1}e^{-30s} & 0.046 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$W_{IF}(s) = - \begin{bmatrix} - & W_{12}/W_{22} & W_{13}/W_{33} \\ W_{21}/W_{11} & - & W_{23}/W_{33} \\ W_{31}/W_{11} & W_{32}/W_{22} & - \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} - & \frac{-0.077}{57s+1}e^{-180s} & - \\ \frac{0.47}{3986s+1}e^{-120s} & \frac{-0.043}{78s+1}e^{-30s} & - \\ \frac{1.467}{3346s+1}e^{-110s} & \frac{0.1887}{137s+1}e^{-30s} & - \end{bmatrix} \quad (5)$$

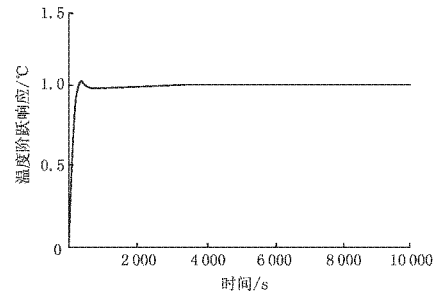
根据文献[10]中介绍的前馈模型选择原则,在确定前馈模型时,需要对扰量传递函数和主控回路的传递函数的时间常数(T_0 , T_f)和延迟时间(τ_0 , τ_f)进行分析比较:当 $\tau_0 > \tau_f$ 时,前馈调节器有纯超前环节,这是做不到的,因此不可以采用前馈控制。当 $T_0 > T_f$ 时,可采用动态前馈-反馈控制;当 $T_0 =$

T_f 时,只要采用静态前馈-反馈控制即可改善控制品质。显然,对于室温控制回路不应加入对电子膨胀阀扰动的前馈控制。

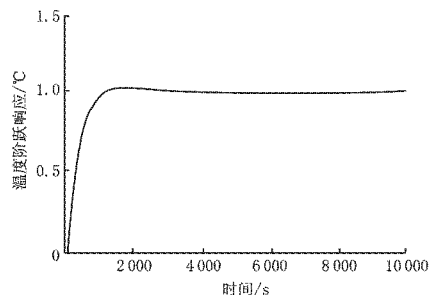
由于本系统过程控制通道和扰动通道均具有自平衡能力,所以构成的前馈控制系统也是一个稳定的系统^[10]。故不再进行相关的稳定性分析。

2 人工冷源多变量前馈解耦控制的 Simulink 仿真

应用上述的理论解耦分析结果,采用混合系统建模思想对系统进行了仿真。当风机频率变化量为 15 Hz 时,各环路在阶跃信号下的控制结果见图 9,可以看出,在该复合解耦控制策略下,有效地克服了各环路间的干扰,系统控制品质较高。进而从理论



a 过热度单位阶跃响应曲线



b 室温单位阶跃响应曲线

图9 前馈解耦控制策略下各环路温度单位阶跃响应曲线

上证实了该控制模型的正确性。本控制器设计中,压缩机和电子膨胀阀主控反馈回路均采用模糊控制策略,风机采用 PID 控制。限于篇幅,文中只对压缩机回路的模糊控制器设计作一介绍,其余略。

压缩机变频模糊控制器输入量为室内温度偏差 e 和温度偏差变化率 ec ,输出 u 为压缩机频率变化量。 e 和 ec 选用的语言变量为 {PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB}, u 值的语言变量为 {PL, PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB, NL}。其中,PL=正很大;PB=正大;PM=正中;PS=正小;ZO=零;NS=负小;NM=负中;NB=负大;NL=负很大。 e, ec, u 的物理论域分别为: $-1 \sim +1$ °C; $-0.3 \sim +0.3$ °C/min; $-3 \sim +3$ r/s。温度偏差 E 及偏差

变化率 EC 的基本论域均设定为 $[-6, +6]$, 压缩机频率变化 U 的基本论域为 $[-9, +9]$ 。隶属度函数选择梯形和三角形相结合型。通过实验分析和机理研究, 制定类似如下的模糊规则: “如果小室温度高于设定值很多, 并且还有继续上升的势头, 则需加大压缩机频率”等。模糊推理和清晰化利用 Matlab 提供的 M 函数实现。根据模糊控制规则, 利用 Marndani 的 $\max$ - $\min$ 法进行推理, 清晰化过程选用最大隶属度法。为了使制冷系统实现快速响应, 本控制器采用了变结构设计模式, 将温度偏差的变化范围分为 3 个子集。即: $E \in [-6, +6]$, 进入模糊控制器; $E > 6$, 压缩机以最高频率运行; $E < -6$, 压缩机以最低频率运行, 如果呈继续下降趋势, 则压缩机停机。

3 人工冷源系统解耦协同控制实验研究

考虑到主控参数与扰量作用的传递函数的时间常数相差不大, 在本机组的 PLC 控制程序中采用静态解耦函数。即只选用上面计算得出的解耦函数中的静态部分。即 $(0.47/1.467, 0.043/0.1887, 0.077/0.1887)$ 。实际中, 根据实验结果对静态解耦函数进行了适度的微调。控制策略采用一维模糊控制。由于控制规则较简单, 故本文略去了具体设计过程。实验结果见图 10~12。

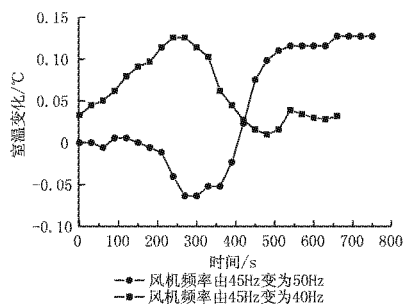


图 10 解耦后加入风机频率变化扰动后室温模糊控制结果

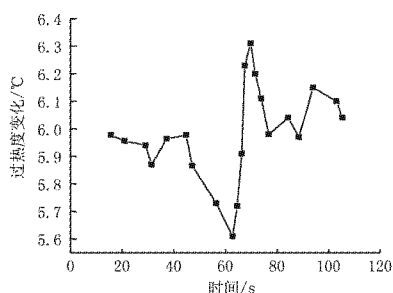


图 11 解耦后加入风机频率变化扰动后过热度变化

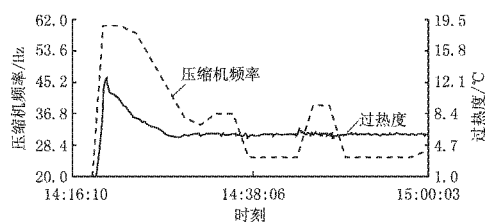


图 12 电子膨胀阀压缩机协同控制下过热度响应

图 10 是在系统中加入风机频率变化扰动后在 180 s 处激活解耦控制功能块后测得的室温变化曲线。可以看到, 系统超调量均小于 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 且调节很迅速, 在 8 min 后即可达到新的稳态, 确保了系统的稳定运行。不过, 可以看到风机频率由 45 Hz 变为 50 Hz 时, 系统存在静差。总体看来, 变化均处于控制精度范围内, 调节效果良好。图 11 显示了风机频率由 45 Hz 变为 50 Hz 时过热度的解耦调节特性。可以看出, 超调量小于 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 且在 100 s 后进入稳态。图 12 为压缩机频率变化对过热度的影响。从图中可以看出, 当压缩机频率由 25 Hz 变到 37 Hz, 稳定后再由 37 Hz 变为 25 Hz 时, 过热度的最大波动值为 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 而且 45 s 后即可进入稳态。

可见, 实验结果与仿真结果很吻合, 进一步证明了解耦策略的正确性。

4 结论

4.1 变容量人工冷源的多变量控制中, 由于存在强耦合性, 如果不进行正确的解耦处理, 势必影响控制品质和制冷系统的协同运作, 目前大多数控制是针对一个或两个环路进行的。本文通过采用前馈-反馈复合控制, 对人工冷源中的压缩机、电子膨胀阀、风机三个控制环路进行了解耦控制, 控制效果良好。

4.2 与其他解耦方法相比较, 前馈解耦具有简单且易于实现的特点。但是, 实际中一定要对扰量传递函数和控制过程传递函数进行细致的分析, 对扰量传递函数和主控回路的传递函数的时间常数 (T_0) 和延迟时间 (τ_f) 进行分析比较, 避免出现纯超前的调节环节。

4.3 由于较难对高阶模型进行分析, 可采用基于平衡实现的降阶处理, 以一阶惯性环节模型对控制对象进行分析。

参考文献:

- [1] 周永明, 陈芝久, 孙文哲. 面向多变量控制的制冷系统性能分析[J]. 流体机械, 1999, 27(4): 46-49
- [2] 谢家泽. 制冷系统多输入多输出模型及解耦控制

- [D]. 西安:西安交通大学,2001
- [3] 王军,王雁,邵惠鹤. 前馈补偿法在空调系统控制中的应用[J]. 上海交通大学学报,2005,39(2):242-246
- [4] 李绪泉. 轿车空调系统多变量控制特性及其实时控制的研究[D]. 上海:上海交通大学,2004
- [5] 田健,朱瑞琪,冯全科. 风冷制冷机组的多变量模糊控制研究[J]. 西安交通大学学报,2006,40(5):514-517
- [6] 孙志毅,李虹,陈志梅,等. 控制工程基础[J]. 北京:机械工业出版社,2004
- [7] 梅晓榕. 自动控制原理[M]. 北京:科学出版社,2002
- [8] 邵裕森. 过程控制及仪表[M]. 上海:上海交通大学出版社,1997

- [9] 吴桂涛,尹自斌,孙培廷. 主机缸套冷却水出水温度控制方法[J]. 交通运输工程学报,2005,3(4):35-38
- [10] 薛定宇. 控制系统仿真与计算机辅助设计[M]. 北京:机械工业出版社,2005
- [11] Pettit N B O L, Willatzen M, Ploug-Sørensen L. A general dynamic simulation model for evaporators and condensers in refrigeration. part II: simulation and control of an evaporator[J]. Int J Refrig, 1998, 21(5):404-414
- [12] Pega S H, Mark A S, Todd M L, et al. Detection of liquid mass fraction at the evaporator exit of refrigeration systems[J]. Int J Therm Sci, 2001, 40(8):773-786

• 简讯 •

供热计量专业委员会在京成立

2009年11月25日,全国供热计量专业委员会成立大会暨供热计量与节能技术研讨会在京举行。住房和城乡建设部领导刘贺明副司长出席并作了重要讲话,国务院机关事务管理局、住房和城乡建设部机关服务中心、城市供热管理机构、中国建筑科学研究院、中国建筑业协会建筑节能分会、中国城镇供热协会等相关部门领导出席会议,全国供热计量专业委员会会员单位代表、特邀嘉宾共计80余人参加了会议。

会议由中国建筑科学研究院建筑环境与节能研究院邹瑜副院长主持。中国建筑业协会建筑节能分会副会长宣读了《关于成立供热计量专业委员会的文件》以及全国供热计量专业委员会会员单位及代表名单;大会选举产生了全国供热计量专业委员会第一届主任委员、副主任委员,确定了以主任委员徐伟、秘书长宋波等人的执行机构,并通过了技术顾问组成人员名单。表决通过了《中国建筑业协会建筑

节能分会供热计量专业委员会工作办法》等有关事项。随即会同中国暖通空调分会采暖学组对供热计量与节能技术组织了研讨会。

供热计量专业委员会作为全国首个针对供热计量的社会团体,成立后将为全国从事供热计量、室内温度调控和供热系统调控领域的科研、设计、生产制造、施工安装、热力公司、房地产、物业管理、政府机关等相关单位提供一个沟通、合作的平台,这个平台有利于促进企业和政府之间的沟通与联系,有利于促进企业与企业、企业与高校及科研院所之间的交流与合作。对全国供热计量改革的推进,供热计量行业的健康发展,提高供热计量产品的质量,促进技术进步,加强交流合作,提升行业整体素质,营造良好的发展氛围,促进资源共享,实现供热系统可调控、可计量,推进按用热量收费有着积极重要的作用和意义。

(本刊)

• 会讯 •

2009年江苏省暖通空调制冷学术年会在徐州召开

由江苏省土木建筑学会暖通空调热能动力专业委员会、江苏省制冷学会空调热泵专业委员会、中国勘察设计协会建筑环境与设备专业委员会江苏省委员会联合主办,徐州市土木建筑学会暖通空调委员会、徐州市制冷学会承办的2009年江苏省暖通空调制冷学术年会于2009年10月29日至30日在徐州市举行。参加这次学术年会的有来自江苏省13个省辖市的代表共257人,省内外企业共29家,汇编论文共75篇。

大会开幕式后,安排了3个主题报告:中国建筑设计研究院潘云钢总工作了《多联分体空调系统的应用探讨》的报告,江苏省土木建筑学会暖通空调热能动力专业委员会主任夏卓平作了《江苏省公共建筑节能设计标准》(送审稿)的报告,江苏省制冷学会空调热泵专业委员会主任张建忠作

了《江苏省地源热泵系统工程技术规程》(送审稿)的报告。随后大会安排了5个专题讨论会场:1)变水量技术、变风量技术、变制冷剂流量技术、低温送风、水系统与风系统设计;2)空调负荷计算软件、能耗与节能计算、计算机数值模拟技术、暖通空调绘图软件、消防通风设计、独立新风空调系统;3)空调冷热源与设计、地源热泵、蓄能空调;4)太阳能利用、设备研制、交叉学科与技术研究;5)施工图审查问题探讨。

本次年会对于总结两年来江苏省暖通空调技术的发展,加强制造企业与科研设计研究单位的联系,提高企业产品的节能技术水平,增进设计研究单位的技术交流将产生积极的推动作用。

(本刊特约通讯员 夏卓平)