1989年9月 重庆大学学报 Vol.12,No.5
第12卷第5期 JOURNAL OF CHONGQING UNIVERSITY Sept.1989

冷库的预测智能控制

PREDICTIVE INTELLIGENT CONTROL OF THE COLD STORAGE

曹长修 王万良*

Cao Changxiu Wang WanLiang

（重庆大学自动化系） （郑州轻工业学院控制系）

摘 要 本文基于切比雪夫正交多项式数值逼近方法，提出预测智能控制算法。该方法对于目前广泛采用电磁阀的大中型冷库控制具有重要的价值，并容易推广到其它行业类似系统。

关键词 预测控制；切比雪夫多项式；冷藏库/智能控制

中国图书资料分类法分类号 $TP11$；$TP13$

ABSTRACT The predictive intelligent control scheme is proposed, which is based on approximation theory and numerical method of Chebyshev orthogonal polynomial. It has the practical value to the cold storge using widely electromagnetic valve and can be also applied similar systems in orther area.

KEY WORDS predictive control; Chebyshev polynomial; cold storage/intellgent control

一、引 言

近年来，世界各国的冷库数量急剧增加。一些发达国家已经实现了制冷机组自动化，目前已进入应用微型计算机控制技术，推进节能和进一步实现冷库综合自动化时代。我国虽然起步较晚，但已有一些冷库开始采用微机控制与管理。如何充分发挥微机的功能，提高冷藏质量，降低能耗，实现优化控制与管理，无疑是具有重要实际价值的课题。

本文提出冷库预测智能控制方法。该方法利用库温的测量数据预测未来库温值及变化趋势，按冷库优化控制规则控制供液电磁阀的开闭，在此基础上实现整个系统的最优决策与控制。

下文首先分析了冷库预测和控制的特点，基于数值逼近原理提出两种数字外推预测算

本文于1988年12月6日收到

此系国家“七、五”科技攻关项目75-53-01-09/02.

* 重庆大学自动化系访问学者.

法。然后根据专家智能控制的基本思想，给出冷库优化运行控制规则。最后给出实验和仿真结果。

二、冷库库温预测和控制特点

在通常的预测控制算法[1]中，控制变量都是连续变化的，根据各种性能指标比较容易推导出满足所给约束条件的控制律，而控制冷库制冷剂流量的电磁阀门只有“开”、“关”两个状态。因此，我们只有在电磁阀的最优开、关规律上考虑：根据预测得到的库温信息，按优化运行规则适时地切换电磁阀开、闭状态，从而控制库温，以提高制冷效率。

冷库温度波动是影响冷藏食品质量的重要因素。例如温度波动过大，会造成肉体组织内冰晶体融化和再结晶，且增加干耗损失和加速脂肪酸败[3]。

电磁阀开、关时冷库库温变化如图1所示。

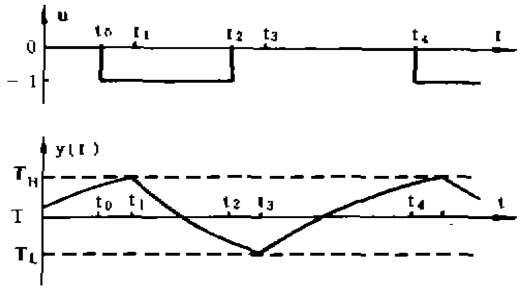

图 1

假定 t_0 时电磁阀切换到“开”状态($u=-1$)，由于时滞的存在，至t_1时库温才开始下降，现在的问题是如何确定电磁阀切换到关闭状态($u=0$)的时刻 t_2。预测控制方法是，当库温下降一段时间后，例如当$y(k)\leqslant T_0$时，向前作几步预测，若预测值高于下限温度T_L，则继续制冷，到下个采样时刻再预测。如此循环，直到某个时刻（如图中t_2）预测出的几步后的库温低于T_L时，切换到$u=0$状态。阀门开启时，预测中的样本应在$t\in(t_1,t_2)$区间选取，即在阀门开启(t_1-t_0)时刻之后以避开峰值。同理，阀门关闭时应在区间$t\in(t_2,t_4)$选取样本，确定下次切换时间t_4。

冷库预测控制的关键是，选择恰当的预报样本，给出精确的预报算法。本文提出两种预测算法如下。

三、基于切比雪夫正交多项式的预测算法

由于切比雪夫多项式具有一系列优良性质，因此，近来在控制界引起许多学者的重视[2]。

（一）移位切比雪夫多项式

标准区间上的（第一类）切比雪夫多项式定义为

$$\widetilde{T}_i(x)=\mathrm{Cos}(i\,\mathrm{Cos}^{-1}x)\qquad x\in[-1,\ 1]\qquad(1)$$
$$i=0,\ 1,\ 2,\ \cdots$$

通过线性变换

$$x=\frac{2t-b-a}{b-a}\qquad(2)$$

可将标准区间变换到任意区间[a, b]。为了本文后面的需要，取$a=(k-N)T$，$b=(k+N)T$，N为正整数。

在区间[$(k-N)T$，$(k+N)T$]的移位切比雪夫多项式定义为

$$T_i(t)=\mathrm{Cos}\left(i\mathrm{Cos}^{-1}\frac{t-kT}{NT}\right)\qquad t\in[(k-N)T,\ (k+N)T]$$

$$i=0,\ 1,\ 2,\ \cdots \tag{3}$$

容易证明，切比雪夫多项式序列存在下列递推关系

$$T_{i+1}(t)=2\frac{t-kT}{NT}T_i(t)-T_{i-1}(t)\qquad i\geqslant 1 \tag{4}$$

$$T_1(t)=\frac{t-kT}{NT} \tag{5}$$

$$T_0(t)=1 \tag{6}$$

（二） 函数的切比雪夫展开和逼近

在区间[a, b]上绝对可积的函数$f(t)$，可按切比雪夫多项式展开为

$$f(t)=\sum_{i=0}^{\infty}a_iT_i(t) \tag{7}$$

用式(7)中前n项逼近$f(t)$，即

$$f(t)\approx\sum_{i=0}^{n-1}a_iT_i(t) \tag{8}$$

式(8)称为$f(t)$的切比雪夫逼近，记为向量形式

$$f(t)\approx A^T\cdot T(t) \tag{9}$$

式中

$A=[a_0\ \ a_1\ \cdots\ a_{n-1}]^T$称为切比雪夫系数分量，

$T(t)=[T_0(t)\ \ T_1(t)\cdots T_{n-1}(t)]^T$称为切比雪夫矢量。

切比雪夫展开式的收敛速度快，有最经济展开的称号[4]，n较小也可达到较高的精度。

（三） 预测算法

在$t=kT$及其前N个时刻的输出测量数据为

$$\{y(kT),\ y[(k-1)T],\ \cdots,\ y[(k-N)T]\}$$

由式(8)，在区间[$(k-N)T$, kT]输出$y(t)$的切比雪夫逼近为

$$y(t)=\sum_{i=0}^{n-1}a_iT_i(t)+\varepsilon(t) \tag{10}$$

式中$\varepsilon(t)$为逼近误差和测量噪声。

$$y(jT)=\sum_{i=0}^{n-1}a_iT_i(jT)+\varepsilon(jT)=T^T(jT)A+\varepsilon(jT) \tag{11}$$

$$j=k,\ k-1,\ \cdots,\ k-N$$

写成矩阵形式为

$$Y_N=T_NA+\Sigma_N \tag{12}$$

式中

$$Y_N=\begin{bmatrix} y(kT)\\ y[(k-1)T]\\ \vdots\\ y[(k-N)T]\end{bmatrix},\qquad T_N=\begin{bmatrix} T^T(kT)\\ T^T[(k-1)T]\\ \vdots\\ T^T[(k-N)T]\end{bmatrix},$$

$$\Sigma_N=\begin{bmatrix} \varepsilon(kT)\\ \varepsilon[(k-1(T]\\ \vdots\\ \varepsilon[(k-N)T]\end{bmatrix},\qquad A=\begin{bmatrix} a_0\\ a_1\\ \vdots\\ a_{n-1}\end{bmatrix}$$

选择切比雪夫系数矢量A，使

$$J=\sum_{i=0}^{N}\{r_i\varepsilon[(k-i)T]\}^2=\Sigma_N^TR_N\Sigma_N\Rightarrow min \tag{13}$$

式中 $$R_N=diag[r_0\ \ r_1\cdots r_N] \tag{14}$$

为逼近误差加权矩阵。

由最小二乘算法得

$$\widehat{A}=(T_N^TR_NT_N)^{-1}T_N^TR_NY_N \tag{15}$$

令

$$K_N\overset{\Delta}{=}(T_N^TR_NT_N)^{-1}T_N^TR_N \tag{16}$$

得

$$\widehat{A}=K_NY_N \tag{17}$$

系统输出的滤波和预测模型为

$$\widehat{y}(t)=T^T(t)\widehat{A}=T^T(t)K_NY_N \tag{18}$$

在$t=kT$时刻向前各步预测值为

$$y(k+l\mid k)=T^T[(k+l)T]K_NY_N \tag{19}$$

$$l=1,\ 2,\ \cdots$$

式(19)中，当N确定后K_N是与k无关的常数值；当向前预测步数确定后，$T^T[(k+l)T]$为与k无关的常数行向量。因此，$T^T[(k+l)T]K_N$是与k无关的常数向量，可以由式(4)离线求出。在线预测只要进行向量点积运算。例如，取$N=3$，$n=3$时，

$$\begin{aligned} y(k+1\mid k)&=[3\ \ -3\ \ 1]\cdot[y(kT)\ \ y[(k-1)T]\ \ y[(k-2)T]]^T\\ &=3y(kT)-3y[(k-1)T]+y[(k-2)T] \end{aligned} \tag{20}$$

实际预测时需将样本数据进行滤波，减弱随机噪声的影响。例如将样本分为N段，求其重心值。

四、基于指数逼近的预测算法

冷库库温测量数据经过滤波处理后，具有明显的指数变化特点。因此用指数逼近模型预测是合理的。

容易推导出逼近当前时刻及前两个时刻输出值的指数方程为

$$y(t)=\frac{y(k)y(k-2)-y^2(k-1)}{y(k)+y(k-2)-2y(k-1)}=\frac{[y(k)-y(k-1)]^2}{y(k)+y(k-2)-2y(k-1)}\cdot\left[\frac{y(k)-y(k-1)}{y(k-1)-y(k-2)}\right]^{t-k} \tag{21}$$

向前 l 步预测值为

$$y(k+l)=\frac{y(k)y(k-2)-y^2(k-1)}{y(k)+y(k-2)-2y(k-1)}+\frac{[y(k)-y(k-1)]^2}{y(k)+y(k-2)-2y(k-1)}\cdot\left[\frac{y(k)-y(k-1)}{y(k-1)-y(k-2)}\right]^l \tag{22}$$

当$y(k)+y(k-2)-2y(k-1)=0$时，由线性外推预测

$$y(k+l)=y(k)+[y(k)-y(k-1)]\,l \tag{23}$$

五、冷库优化运行控制规则

本文利用预测信息，将智能控制的基本思想应用于冷库控制。专家知识采用下列规则描述

N：IF 〈当前状况和变化趋势〉

　$THEN$ 〈控制策略〉

其中N为规则编号，当前状况和变化趋势由预测得到。

冷库优化运行专家知识总结为下列规则

1：IF　$y(k)\in(T_H,\ +\infty)$　$THEN$　$u(k)=1$

2：IF　$y(k)\in(-\infty,\ T_L)$　$THEN$　$u(k)=0$

3：IF　$y(k)\in[T_L,\ T_H]$

　and　$\left|\frac{dy}{dt}\right|\in[D_1,\ D_2]$

　and　$y(k+l|k)\in[T_L,\ T_H]$

$THEN$　$u(k)=u(k-1)$

4：IF　$y(k)\in[T_L,\ T_H]$

　and　$\left|\frac{dy}{dt}\right|\in[D_1,\ D_2]$

　and　$y(k+l|k)\notin[T_L,\ T_H]$

$THEN$　$u(k)\neq u(k-1)$

5：*IF* $y(k)\in[T_L,\ T_H]$

and $\left|\frac{dy}{dt}\right|\in[D_2,\ +\infty)$

and $u(k-1)=1$

and $y(k+l+d_1|k)\in(-\infty,\ T_L)$

THEN $u(k)=0$

6：*IF* $y(k)\in[T_L,\ T_H]$

and $\left|\frac{dy}{dt}\right|\in[D_2,\ +\infty)$

and $u(k-1)=0$

and $y(k+l+d_1|k)\in[T_H,\ +\infty)$

THEN $u(k)=1$

7：*IF* $y(k)\in[T_L,\ T_H]$

and $\left|\frac{dy}{dt}\right|\in[D_2,\ +\infty)$

and $y(k+l+d_1|k)\in[T_L,\ T_H]$

THEN $u(k)=u(k-1)$

8：*IF* $y(k)\in[T_L,\ T_H]$

and $\left|\frac{dy}{dt}\right|\in[0,\ D_1]$

and $u(k-1)=1$

and $y(k+l+d_2|k)\in[T_L,\ T_H]$　　$(d_2>d_1)$

THEN $u(k)=0$

上述规则{1、2}表示当前温度若在允许范围以外，则无条件控制到允许范围以内；规则{3，4}表示正常热负荷下的预测控制策略，以克服大时滞的影响；规则{5，6，7}防止热负荷急剧增大或减小时产生过大的超调；规则{8}防止制冷机低效率运转。因为这时由于冷风机结霜等因素使冷却能力下降，造成降温迟缓，若这时库温已在允许范围内，但再运行较长时间也不能达到下限，则关闭阀门以节省电力。

六、实验和仿真结果

（一）库温预测实验

表1是某肉联厂115、116、117号冷库降温实测数据。将样本每半小时分为一段，各段重心值如表2所示。由前三段数据预测半小时后即第四段的温度值，预测值及相对误差如表3。

笔者处理了若干历史数据，均能得到较好的预测结果。

表 1

库号 \ 库温 \ 时间	19:40′	19:50′	20:00′	20:10′	20:20′	20:30′	20:40′	20:50′	21:00′	21:10′	21:20′	21:30′
115	-13.2	-13.6	-13.8	-13.8	-14.9	-14.0	-14.2	-14.7	-15.0	-15.0	-15.1	-15.3
116	-15.9	-16.1	-16.2	-16.6	-17.0	-17.1	-17.1	-17.6	-18.0	-18.0	-18.1	-18.3
117	-13.9	-14.0	-14.0	-14.0	-14.1	-14.1	-14.1	-14.2	-14.2	-14.5	-14.5	-14.6

表 2

库号 \ 库温 \ 段号	一	二	三	四
115	-13.53	-13.9	-14.6	-15.13
116	-16.97	-16.9	-17.57	-18.13
117	-13.97	-14.07	-14.17	-14.53

表 3

方法 \ 预测值 \ 库号	115		116		117	
切比雪夫	-15.63	3.3%	-18.08	0.28%	-14.27	1.79%
指数逼近	-15.92	5.2%	-18.11	0.11%	-14.27	1.79%

（二） 预测的控制仿真

冷库仿真模型取为

$$y(k+L+1)=0.9994y(k+L)+0.03u(k)+0.03f_1(k)+0.006RND(k)$$

式中$y(k)$为库温；$L=6$为时滞；$u(k)$为控制量，取-1和0两个值，分别表示电磁阀开、关两个状态；$f_1(k)$模拟热负荷变化，如图2(a)所示。$f_1(k)=0.2, k\in[50, 150]$模拟较大的热负荷，$f_1(k)=0.5, k\in[300, 350]$模拟短时间的大干扰，如进出库等，$f_1(k)=-0.15, k\in[400, 450]$模拟轻载工况。$RND(k)$为$[0, 1]$之间变化的随机变化，模拟随机干扰。

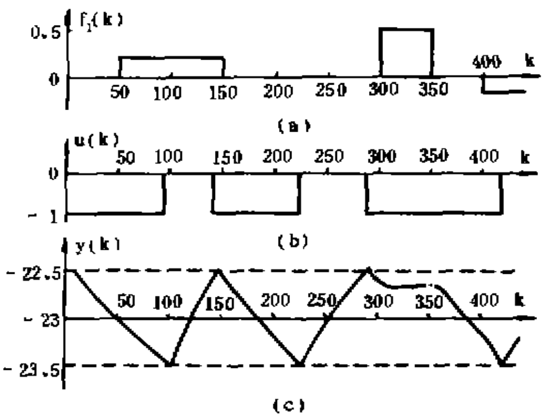

图 2

预测算式简单地取式(20)。取$T_0=23$℃，$T_H=-22.5$℃，$T_L=-23.5$℃。电磁阀状态和库温变化曲线如图2(b)、(c)所示。

若用双位式控制将产生51.6%的超调。

参 考 文 献

〔1〕 席裕庚、张钟俊，一类新型计算机控制算法：预测控制算法，控制理论与应用，1985，2(3)：1—9

〔2〕 曹长修、周锋，利用切比雪夫级数辩识线性分布参数系统，自动化学报，1989，15(2)：178—181

〔3〕 刘学浩：食品冷加工工艺，北京，中国展望出版社，1983

〔4〕 黄友谦，李岳生：数值逼近，北京，高等教育出版社，1987