

#1701

# 2008 年 第一届“数学中国杯”

## 数学建模网络挑战赛

### 承 诺 书

我们仔细阅读了首届“数学中国杯”数学建模网络挑战赛的竞赛规则。

我们完全明白，在竞赛开始后参赛队员不能以任何方式（包括电话、电子邮件、网上咨询等）与队外的任何人（包括指导教师）研究、讨论与赛题有关的问题。

我们知道，抄袭别人的成果是违反竞赛规则的，如果引用别人的成果或其他公开的资料（包括网上查到的资料），必须按照规定的参考文献的表述方式在正文引用处和参考文献中明确列出。

我们郑重承诺，严格遵守竞赛规则，以保证竞赛的公正、公平性。如有违反竞赛规则的行为，我们将受到严肃处理。

我们允许数学中国网站([www.madio.net](http://www.madio.net))公布论文，以供网友之间学习交流，数学中国网站以非商业目的的论文交流不需要提前取得我们的同意。

我们的参赛报名号为：1701

参赛队员（签名）：

队员 1：

队员 2：

队员 3：

参赛队教练员（签名）：

参赛队伍组别：研究生组

#1701

# 2008 年 第一届“数学中国杯”

## 数学建模网络挑战赛

### 编 号 专 用 页

参赛队伍的参赛号码：（请各个参赛队提前填写好）：

1701

竞赛统一编号（由竞赛组委会送至评委团前编号）：

---

竞赛评阅编号（由竞赛评委团评阅前进行编号）：

#1701

# 2008 年第一届“数学中国杯” 数学建模网络挑战赛

题 目 基于预估模糊控制的温度控制系统关 键 词 预估模糊 制冷系统 辅助控制 建模 仿真

## 摘 要：

本题的主要工作是冷库对象模型的建立和温度控制器的设计。

本文首先根据能量守恒定律，列出了冷藏间温度变化与热量流入流出之间的关系式。再进行物理公式推导，建立表达式，最后时频变换，得到了对象模型的传递函数。

该模型描述了输出（温度）对于输入（制冷系统功率）的响应情况。

由此可知该对象为具有纯滞后的一阶惯性环节，传统的控制器会产生较大超调量和稳态误差，同时，当冷间内货物的存储情况发生变化时，系统的传递函数也会相应的发生变化。

根据上述特点，本文针对问题一，设计了预估模糊控制器，能够有效解决被控对象纯滞后性质造成的影响，明显地减小超调量，加速调节过程。同时，控制器不需要知道对被控对象的精确模型，在被控对象传函发生变化时仍然有很好的控制效果。

在问题一的基础上，本文针对问题二，设计了预估模糊辅助控制器，该控制器能够根据不同情况在一定范围内自动调整自己并发运行中的作用的大小，在不过度干预人的操作的前提下，有效解决了操作员对时滞估计不足引起的超调和振荡。

本文结合冷库项目中的实际数据，用 SIMULINK 对问题一、问题二设计的不同控制器分别建立了冷库系统仿真模型并对系统进行仿真研究。从仿真结果的比较可以看出使用预估模糊控制器以及辅助控制器的系统各项动态性能指标都比较优越。

参赛队号 1701所选题目 A 题自适应温控系统

参赛密码 <u>                    </u> (由组委会填写)
--

# 基于预估模糊控制的温度控制系统

## 1 问题重述

在现实生活中，很多领域里都需要对温度进行实时控制。本文假设有一个的冷库模型，在冷库中，利用温度传感器给备用制冷系统传递温度信息，使其在常规制冷系统失效，而温度显著超过警戒值的时候自动启动，让冷库中的温度恢复到规定值。冷库的规定温度是  $180K$ ，备用制冷系统自动启动的触发温度是  $230K$ 。

问题一：因为冷库的具体环境以及存放物品多少的不同，事先人们并不清楚备用制冷系统以多大功率工作可以使温度恢复到规定温度。因此我们需要设计一个算法，使控制器能够自动地调节备用制冷系统的功率，使备用制冷系统启动后，冷库的温度能尽快调整到规定值。此外由于温度传感器和冷库的具体环境以及物品数量的不同造成的制冷系统延时无从事先知道，因此算法必须自动地适应不同的情况，尽快使冷库里的温度恢复到规定值，并且尽量减少温度的波动，以在尽可能的时间内达到精确的温控效果。

问题二：计算机并不能完全取代人进行独立控制，往往只能起到辅助控制的作用。控制员虽然经过严格的训练，但由于突发事件带来的情绪紧张，会造成对时滞估计不足，引起超调和振荡的产生。设计一个辅助控制器，在不过度干预人的操作的前提下，自动地检测并控制备用制冷系统来压制振荡的产生。

## 2 问题分析

在分析问题之前，我们首先要建立起冷库冷藏间的对象模型。因为冷库是一个复杂的系统，影响其冷藏间内部热量变化的因素有很多，比如：

- (1) 由于屋顶内外存在温差和外墙、屋顶受太阳辐射热作用，通过冷库的墙体、地面、楼板、屋顶传入。
- (2) 由于货物和冷空气之间存在温差，因此会在冷却过程中向冷库内散发热量。
- (3) 由于冷间内贮存货物（如水果，蔬菜，鲜蛋）需要新鲜空气或冷间内操作人员呼吸需要进行通风换气时，由室外新鲜空气带入热量。
- (4) 库门开启换热、操作人员散热和冷间内照明、动力设备运行产生的热量而引起的经营操作热流量。

因此，如何基于以上因素建立冷藏间模型成为解题的难点。在此，我们可以从与影响冷藏间内部热量的有关物理量及有关物理学定律（比如能量守恒定律）作为切入口，建立起该系统的微分方程模型。

建立起冷藏间的模型后，我们来分别分析要解决的两个问题。

### 2.1 问题一的分析

问题一需要解决的问题是设计一种计算方法，使其能自动调节备用制冷系统的功率，并且在尽可能短时间内达到精确的温控效果。在此，为了将其抽象为一个具有自适应能力的全自动控制系统。

# 1701

一旦当模型建立起来后, 如何对系统进行控制就显得尤为重要。这也是本文的重点。在冷库系统中, 制冷系统由压缩机、冷凝器、蒸发器和管道构成, 但是前三者之间由较长的管道连接, 会导致整个制冷系统有极大的滞后。根据控制理论, 当控制过程对象的滞后时间  $\tau$  与对象的主导时间常数  $T$  之比大于 0.3 时, 过程对象称为大滞后现象。因此, 本文的研究问题可以被抽象成对大滞后控制系统的研究问题。其控制系统如图 2.1 所示。 $R(s)$  表示控制系统的输入,  $C(s)$  为被控对象输出,  $D(s)$  为控制器的传递函数,  $Gp(s)e^{-\tau s}$  为被控对象的传递函数。在  $Gp(s)e^{-\tau s}$  中,  $Gp(s)$  为被控对象不含滞后的传递函数,  $e^{-\tau s}$  为被控对象纯滞后的传递函数。

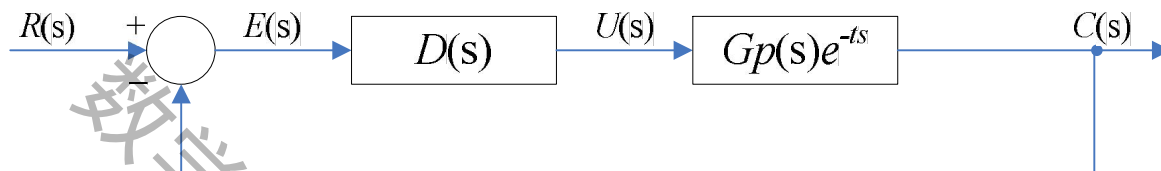


图 2.1 带纯滞后环节的控制系统

此外, 当冷库的物品发生存入和取出时, 会发生重大扰动, 并且改变系统的传递函数, 因此必须予以分析和考虑, 见图 2.2。其中  $F$  为系统外的干扰。

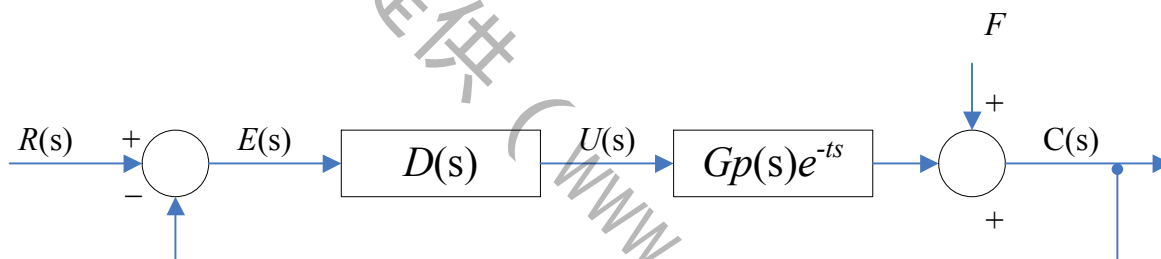


图 2.2 加扰动后的纯滞后环节的控制系统

从图 2.2 可以得出, 一般温控系统的闭环传递函数为

$$G(s) = \frac{D(s)Gp(s)e^{-\tau s}}{1 + D(s)Gp(s)e^{-\tau s}} \quad (2.1)$$

由 (2.1) 式可以看出, 特征方程  $1 + D(s)Gp(s)e^{-\tau s}$  里含有的  $e^{-\tau s}$  项, 这对控制系统稳定性极其不利; 若  $\tau$  足够大, 系统就很难稳定; 而且由于系统中含有纯滞后环节, 使系统的设计变得复杂。

综上所述, 系统存在的两大问题:

- (1) 系统存在着大时滞现象;
- (2) 由于要对冷库进行开库门存取货物等经营性操作, 因此系统存在着明显的随机扰动现象, 每次扰动都会对系统造成较大的干扰。

如何处理上述两个问题将是我们解决问题一的出发点。

## 2.2 问题二的分析

问题二是在问题一基础上的扩展, 要求设计一个控制器, 辅助冷库工作人员手工操作。与问题一不同的是, 这个系统采取的是手动操作与辅助控制器并行控制。如何解决手动操作出现误差和失误时, 对系统造成的超调和振荡问题成为我们研究这个问题的重点。

# 1701

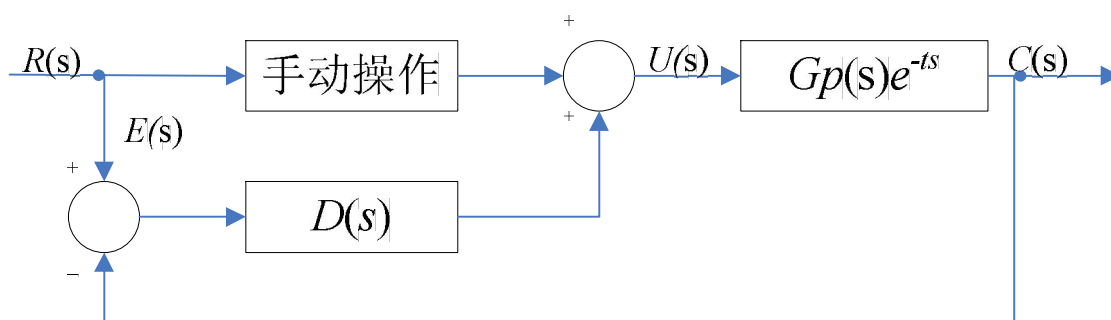


图 2.3 并行控制控制系统

同理，当冷库的物品发生存入和取出时，会发生重大扰动，因此必须予以分析和考虑，见图 2.4。其中  $F$  为系统外的干扰。

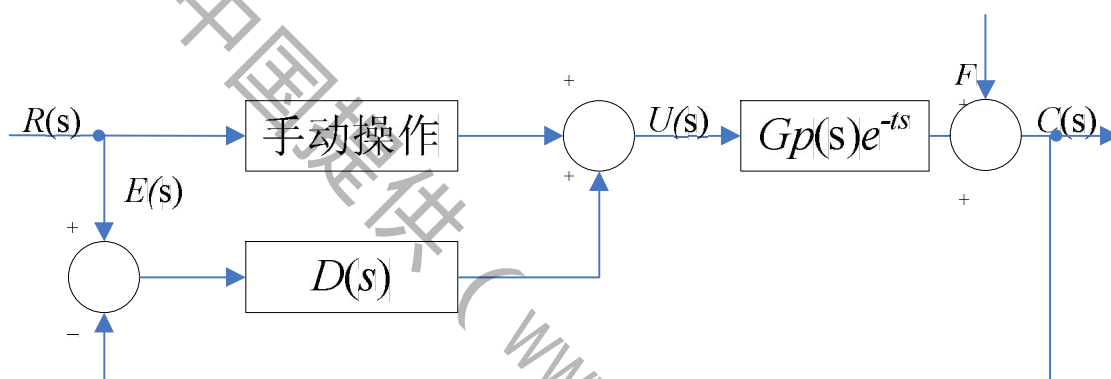


图 2.4 加扰动后的并行控制控制系统

在设计辅助控制器的时候，着重解决以下两个问题：

- (1) 操作员由于突发事件带来的情绪紧张，对时滞估计不足引起超调和振荡的产生；
- (2) 日常经营性操作，如冷库货物进出，使得控制对象系统传函发生改变从而引起冷库温度的变化；

### 3 模型假设

在对问题一进行研究之后，我们作出如下假设：

- (1) 冷间围护的热阻热容实际上是分布式的，但是在这里，我们把护围结构近似作为集中热阻和热容的对象进行处理。
- (2) 物体表面和冷间内空气密度和温度分布都是均匀的；且放入新货物时，原货物的温度为冷间内环境温度，而放入物体的温度为室外环境温度。
- (3) 经营操作传入的能量实际上是离散的。所以为了方便计算，本次建模将其视为一个连续且不变的热量流入。
- (4) 假设冷库内物品热交换的速率恒定，并且该速率已知。即物品冷却时间可知。
- (5) 制冷系统在管道中的延时已知。

#1701

(6)冷库地坪视作和墙体具有相同的传热特性和室外温度，并且用相同的修正系数进行修正。

(7)问题二中操作员的操作是合理且可知的。

## 4 主要变量表示

符号	意义	单位
$C_v$	空气比热容	$KJ/kg \cdot K$
$C_m$	物品比热容	$KJ/kg \cdot K$
$\rho_v$	空气密度	$kg/m^3$
$\rho_m$	物品的密度	$kg/m^3$
$V$	冷间的体积	$m^3$
$k$	围护结构的传热系数	$W/(m^2 \cdot K)$
$A$	冷间的传热面积	$m^2$
$G_1$	冷间的通风量	$m^3/h$
$G_2$	经营操作引起的通风量	$m^3/h$
$\theta_0$	围护结构外侧的温度	$K$
$\theta_n$	货物品进入冷间的初始温度	$K$
$\tau$	滞后时间	$h$
$T$	物体冷却时间	$h$
$T_0$	新物体放入冷库的时间	$h$
$\mu_m$	冷间中原来物品对于冷间空间的使用率	
$\mu_n$	冷库中放入的新物品的于冷间空间的使用率	
$\beta$	制冷效率系数	
$\alpha$	围护结构两侧温差修正系数	

## 5 对象模型建立

### 5.1 冷藏间的数学模型

根据上述分析，我们知道冷间温度的变化是由冷间内的能量变化引起的。利用能量守恒定律，在单位时间内，流入和流出冷库冷间的能量之差等于冷间的能量变化，则冷库冷藏间的能量守恒可用如下方程来表示<sup>[1]</sup>：

$$U = Q_i - Q_o \quad (5.1)$$

上式中， $U$ ——冷库冷间的蓄热量，单位  $KJ/h$ ，

$Q_i$ ——单位时间内进入冷间的热量，单位  $KJ/h$ ，

$Q_o$ ——单位时间内流出冷间的热量，单位  $KJ/h$ 。

冷库冷藏间的热交换主要有 5 种途径<sup>[2]</sup>。

#1701

- (1)由于屋顶内外存在温差和外墙、屋顶受太阳辐射热作用，通过冷间的墙体、地面、楼板、屋顶传入。
- (2)由于食品和冷空气之间存在温差，食品在冷却过程中向冷间内散发热量。
- (3)由于冷间内贮存食品（如水果，蔬菜，鲜蛋）需要新鲜空气或冷间内操作人员呼吸需要进行通风换气时，由室外新鲜空气带入热量。
- (4)库门开启换热、操作人员散热和冷间内照明、动力设备运行产生的热量而引起的经营操作热流量。
- (5)冷间中的蒸发器中的制冷剂蒸发带走热量。再由冷凝器将制冷剂气体液化，向外界排掉热量。

其中热量进入冷库主要依靠(1)~(4)；而热量流出冷库，主要依靠(5)。

上述情况均考虑在模型之中：

$$Q_i = Q_w + Q_n + Q_a + Q_d \quad (5.2)$$

$$Q_o = Q_b \quad (5.3)$$

上式中， $Q_i$ ——单位时间内进入冷间的热量，单位  $KJ/h$ ，

$Q_o$ ——单位时间内流出冷间的热量，单位  $KJ/h$ ，

$Q_w$ ——从护围结构传入的热量，单位  $KJ/h$ ，

$Q_n$ ——新放入冷间的物品所含有的热量，单位  $KJ/h$ ，

$Q_a$ ——冷间通风传入的热量，单位  $KJ/h$ ，

$Q_d$ ——因为经营操作而传入的热量，单位  $KJ/h$ ，

$Q_b$ ——冷库蒸发器带走的热量，单位  $KJ/h$ 。

冷间内的热量，主要由两部分组成：一部分是冷间内空气所含有的热量，另一部分是冷间内的物品含有的热量。由此得出下式：

$$U = [C_v \rho_v (1 - \mu_n - \mu_m) + C_m \rho_m \mu_m] V \theta(t) \quad (5.4)$$

将式(5.4)两边对  $t$  求导，得到下式：

$$\frac{dU}{dt} = [C_v \rho_v (1 - \mu_n - \mu_m) + C_m \rho_m \mu_m] V \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (5.5)$$

上式中， $C_v$  ——空气的比热容，单位  $KJ/h$ ，

$C_m$  ——冷间内物品的比热容，单位  $KJ/h$ ，

$\rho_v$  ——空气的密度，单位  $KG/m^2$ ，

$\rho_m$  ——物品的密度，单位  $KG/m^2$ ，

$\mu_n$  ——新放入冷间的物品的容积利用系数，

$\mu_m$  ——原来冷间内物品的容积利用系数，

$V$  ——冷间的公称容积，单位  $m^3$ ，

$\theta(t)$  ——冷间的温度，单位  $^{\circ}C$ 。

下面分别就在上文提到的冷藏间可能出现的热量变化的情况展开讨论。

- (1)由于屋顶内外存在温差和外墙、屋顶受太阳辐射热作用，通过冷间的墙体、地面、



#1701

楼板、屋顶传入的热量  $Q_w$  由下式计算：

$$Q_w = kA\alpha(\theta_o - \theta(t)) \quad (5.6)$$

式子中， $k$  ——围护结构的传热系数，单位  $W/(m^2 \cdot K)$ ，传热系数根据围护结构的具体构造和材料进行计算，

$A$  ——围护结构的传热面积，单位  $m^2$ ，

$\alpha$  ——围护结构两侧温差修正系数，

$\theta_o$  ——围护结构外侧的温度，单位  $K$ ，

$\theta(t)$  ——冷间内的温度，单位  $K$ 。

(2)新物体放入冷库所带入的热量，由下式计算：

$$Q_n = C_m \mu_n \rho_m V \frac{\theta_n - \theta(t)}{T} [\varepsilon(t - T_0) - \varepsilon(t - T_0 - T)] \quad (5.7)$$

式子中， $C_m$  ——冷间内物品的比热容，单位  $KJ/h$ ，

$\mu_n$  ——新放入冷间的物品的容积利用系数，

$\rho_m$  ——物品的密度，单位  $KG/m^3$ ，

$\theta_n$  ——货物品进入冷间的初始温度，单位  $K$ ，

$T_0$  ——新物体放入冷库的时间。这个量主要用于显示扰动的随机性，即任何时刻都可能新物品放进或者冷间内，

$T$  ——物体冷却时间。即新物体放到冷库后，与冷间内环境温度达到一致的时间长度，单位  $s$ ，

$\varepsilon(t)$  ——阶跃信号。

式(5.7)中巧妙地用  $\frac{\theta_n - \theta(t)}{T}$  近似描述了新放入冷间的物体在单位时间内放出的热量。物体经过时间  $T$ ，温度下降到与冷间环境温度一致。而  $[\varepsilon(t - T_0) - \varepsilon(t - T_0 - T)]$  则描述了随机扰动。新物品在  $T_0$  时刻放进冷间，从而产生一个阶跃的信号。并且经过时间  $T$  的，温度下降到与冷间环境温度一致，阶跃信号消失。

(3)由冷间贮存食品需要新鲜空气或冷间内操作人员呼吸需要进行通风换气时，由室外新鲜空气带入的热量由下式计算：

$$Q_a = G_1 C_v \rho_v (\theta_o - \theta(t)) \quad (5.8)$$

上式中， $\theta_o$  ——围护结构外侧的温度，单位  $K$ ，

$\rho_v$  ——空气的密度，单位  $KG/m^3$ ，

$G_1$  ——冷间的通风量，单位  $m^3/h$ ，

$C_v$  ——空气的比热容，单位  $KJ/h$ 。

(4)库门开启换热等经营操作引起的热流量由下式计算：

$$Q_d = G_2 C_v \rho_v (\theta_o - \theta(t)) \quad (5.9)$$

#1701

上式中,  $\theta_o$ ——围护结构外侧的温度, 单位  $K$ ,

$\rho_v$ ——空气的密度, 单位  $KG/m^3$ ,

$G_2$ ——经营操作引起的空气流动量的平均值, 单位  $m^3/h$ ,

$C_v$ ——空气的比热容, 单位  $KJ/h$ 。

(5)制冷系统从冷间带走的热量由下式计算:

$$Q_b = \beta P(t-\tau) \quad (5.10)$$

上式中,  $\beta$ ——制冷效率系数。即制冷系统功率与蒸发器从冷间带走热量的比值

$P(t-\tau)$ ——为经过  $\tau$  延迟的  $t$  时刻的冷库制冷系统功率, 单位  $W$ 。

综合(1)~(5)种热量交换情况, 把式(5.2),(5.4)~(5.10)代入式(5.1), 可得冷藏间温度的数学模型为:

$$\begin{aligned} [C_v \rho_v (1 - \mu_n - \mu_m) + C_m \rho_m \mu_m] V \frac{d\theta(t)}{dt} = \\ kA \alpha (\theta_o - \theta(t)) + C_m \mu_m \rho_m V \frac{\theta_n - \theta(t)}{T} [\varepsilon(t - T_0) - \varepsilon(t - T_0 - T)] + G_1 C_v \rho_v (\theta_o - \theta(t)) + \\ G_2 C_v \rho_v (\theta_o - \theta(t)) - \beta P(t - \tau) \end{aligned} \quad (5.11)$$

式(5.11)经过拉普拉斯变换得:

$$\begin{aligned} [C_v \rho_v (1 - \mu_n - \mu_m) + C_m \rho_m \mu_m] V (s \theta(s) - \theta(0)) = [(kA \alpha + G_1 C_v \rho_v + G_2 C_v \rho_v) \theta_o] \frac{1}{s} + \\ \{ C_m \rho_m \mu_m V \theta_n \frac{1}{T} [\varepsilon(t - T_0) - \varepsilon(t - T_0 - T)] \} \frac{1}{s} - (kA \alpha + G_1 C_v \rho_v + G_2 C_v \rho_v) \theta(s) - \\ C_m \rho_m \mu_m V \theta_n \frac{1}{T} [\varepsilon(t - T_0) - \varepsilon(t - T_0 - T)] \theta(s) - \beta e^{-\tau s} P(s) \end{aligned} \quad (5.12)$$

经整理得  $\theta(s)$  与  $P(s)$  的关系式:

$$\theta(s) = - \frac{\beta}{D_A s + D_B + D_C} e^{-\tau s} P(s) + \frac{D_A \theta(0) s + D_B \theta(0) + D_C \theta_n}{D_A s^2 + (D_B + D_C) s} \quad (5.13)$$

$$\text{其中, } D_A = [C_v (1 - \mu_n - \mu_m) + C_m \mu_m] V \quad (5.14)$$

$$D_B = kA \alpha + G_1 C_v \rho_v + G_2 C_v \rho_v \quad (5.15)$$

$$D_C = C_m \rho_m \mu_m V \theta_n \frac{1}{T} [\varepsilon(t - T_0) - \varepsilon(t - T_0 - T)] \quad (5.16)$$

由此得到控制对象的传递函数:

$$G(s) = \frac{\frac{-\beta}{D_B + D_C}}{1 + \frac{D_A}{D_B + D_C}} e^{-\tau s} \quad (5.17)$$

由此可知冷库冷藏间模型为具有纯滞后的一阶惯性环节。

## 5.2 冷藏间相关设计参数

### 5.2.1 冷间建筑参数

本文选取只有一个冷间的冷库来进行建模分析。

本冷库冷藏间的外形尺寸为：长×宽×高；

因此冷间的体积  $V=10 \times 20 \times 5=1000 \text{ m}^3$ ；

冷间的传热面积  $A=(10 \times 2 + 20 \times 2) \times 5 + 10 \times 20 \times 2=700 \text{ m}^2$ ；

围护结构外侧的温度  $\theta_0=300 \text{ K}$ ；

制冷效率系数  $\beta=0.7$ ；

滞后时间  $\tau=0.1 \text{ h}$ 。

### 5.2.2 冷间主要热工参数

冷间结构为 20mm 水泥砂浆抹面，240mm 砖墙，20mm 水泥砂浆找平，二毡三油隔气层，600mm 稻壳，35mm 钢筋混凝土插板<sup>[2]</sup>。

将各层材料对应的导热率  $\lambda$  和结构层厚度  $\delta$  带入导热率计算公式

$$k = \frac{1}{\frac{1}{a_w} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{1}{a_n}} \quad (5.18)$$

得到了本冷藏间围护结构的传热系数  $k=0.22 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ ，

围护结构两侧温差修正系数  $\alpha=1.05$ ，

室外计算温度  $\theta_0$  是排除了太阳辐射作用的温度。实际上冷库围护结构除受到室内外温差作用外，还受到太阳辐射作用的影响，实际热流量大于按  $Q_w = kA\alpha(\theta_0 - \theta(t))$  的计算值。为了使计算值与实际值相近，此时的温差修正系数  $\alpha > 1$ 。对于地坪等室外温度低于室外计算温度的， $\alpha < 1$ 。为简化模型，本文将冷间的地坪和墙体用相同的温差修正系数进行修正。

### 5.2.3 冷间内的冷负荷

冷间内的冷负荷可表示为：

$$C_m \mu_n \rho_m V \frac{\theta_n - \theta(t)}{T} \quad (5.19)$$

在本冷间中，货物主要是结冻了的牛肉。它的密度  $\rho_m = 1200 \text{ kg/m}^3$ ，比热容  $C_m = 3.45 \text{ KJ/kg} \cdot \text{K}$ 。

货物品进入冷间的初始温度  $\theta_n = 300 \text{ K}$ 。

同时，还要考虑空气的因素。空气比热容  $C_v = 1.003 \text{ KJ/kg} \cdot \text{K}$ ，密度  $\rho_v = 1.29 \text{ kg/m}^3$ 。

#1701

冷间的通风量  $G_1 = 1500 \text{ m}^3/\text{h}$ ，经营操作引起的通风量  $G_2 = 500 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

## 5.2.4 温度对象数学描述

根据 5.2.3 节提供的数据，分别代入式子(5.14)~(5.17)，计算系统的传递函数。

当冷间内没有任何货物，即  $\mu_m = 0$  时的传递函数为：

$$G(s) = \frac{-3.2 \times 10^{-4}}{0.6s + 1} e^{-\tau s} \quad (5.20)$$

当冷间 40% 的容积装有货物，即  $\mu_m = 0.4$  时的传递函数为：

$$G(s) = \frac{-3.7 \times 10^{-4}}{765s + 1} e^{-\tau s} \quad (5.21)$$

## 6 控制算法设计

### 6.1 备用制冷系统控制

系统的传递函数建立后，我们要设计算法对系统进行控制。由第 2 章的问题分析，我们可知系统存在着两大问题：

- (1) 系统存在着很大的时滞现象。
  - (2) 系统存在着明显的扰动现象，每次扰动都会造成系统参数和传递函数的变化。
- 因此这将是我们的算法设计的出发点。

#### 6.1.1 Smith 预估补偿算法

首先看问题(1)。对系统存在的时滞现象，可以预先估计其动态特性，然后由预估器进行补偿控制，力图使被延迟了  $\tau$  的被调量提前反映到控制器，并使之动作，以此来减小超调量并加速调节过程。Smith 预估补偿算法就是这样一种经典的处理大时滞系统的算法。其控制原理如图 6.1 所示<sup>[4]</sup>。

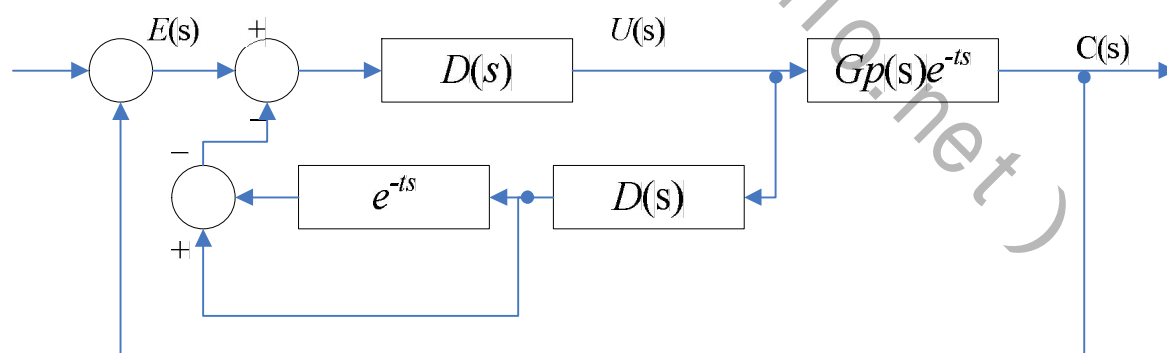


图 6.1 带 Smith 预估器的控制系统

由图 6.1 可以看出其算法的原理是：与  $D(s)$  并联一个补偿环节，用来补偿被控对象的滞后部分。这个补偿环节称为补偿器，其传递函数为  $Gp(s)(1 - e^{-\tau s})$ ， $\tau$  为滞后时间。

经过 Smith 预估器和控制器  $D(s)$  组成的回路称为纯滞后补偿器，经补偿后的系统闭环传递函数为

# 1701

$$G(s) = \frac{D(s)Gp(s)e^{-\tau s}}{1 + D(s)Gp(s)} \quad (6.1)$$

同(2.1)比较，式(6.1)消除了纯滞后部分对控制系统的影响，因为式子中的  $e^{-\tau s}$  在闭环控制回路之外，不影响系统的稳定性。从拉普拉斯变换的位移定理说明，本算法仅将控制作用在时间坐标上推移了一个时间  $\tau$ ，控制系统的过渡过程和其它特性为  $Gp(s)$  时完全相同<sup>[3]</sup>。

利用该算法进行仿真，编译环境为 Matlab7.0。假设冷库内原储存物品占冷藏间容积的 40%，新存入货物占 20%。关于本系统的预设参数见 5.2 节。

由图 6.2 可以看出，在冷库温度由 230K 降到 180K 这段过程中，系统的性能良好，没有出现超调的情况，稳态误差也比较小。然而，当再次放入货物的时候，系统出现了严重的超调的情况。这主要是因为 Smith 预估补偿算法必须以知道被控对象的精确模型为前提，在设计控制系统时根据某一对象的传递函数进行设计，一旦对象的运行过程中发生变化，那么按照原参数设计的预估器就不能完全补偿对象的纯滞后性。当出现了扰动后，系统的传函发生了变化，因此也在造成了该算法的失效性。这一不符合实际应用，也不符合本题的要求。

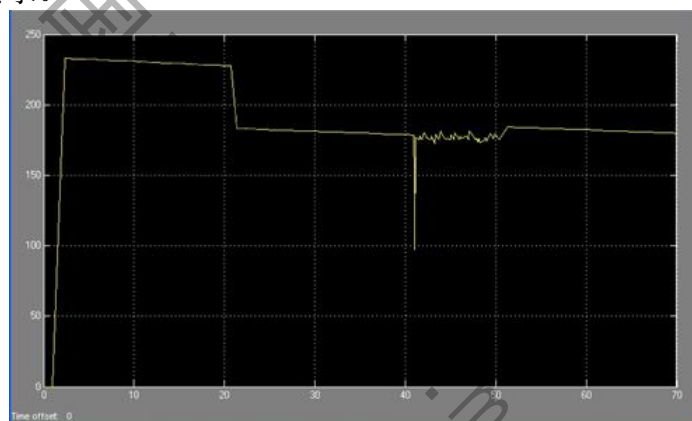


图 6.2 利用 Smith 预估器的仿真结果  
(横坐标为时间，单位:h；纵坐标为控温，单位:K)

### 6.1.2 预估模糊控制算法

针对 6.1 节提到的 Smith 预估补偿算法的劣势，我们参考了 L.A.Zadeh 的模糊逻辑的思想，设计了预估模糊控制算法。模糊逻辑的思想模仿人脑的不确定性概念判断、推理思维方式，对于模型未知或不能确定的描述系统，以及强非线性、大滞后的控制对象，应用模糊集合和模糊规则进行推理，表达过渡性界限或定性知识经验。根据 L. A. Zadeh 的理论，模糊逻辑善于表达界限不清晰的定性知识与经验，它借助于隶属度函数概念，区分模糊集合，处理模糊关系，模拟人脑实施规则型推理，解决因“排中律”的逻辑破缺产生的种种不确定问题。而本文的模型正好适合使用模糊逻辑的思想。将其与预估结合起来，便得到了预估模糊算法。

同通常的控制系统比较，该算法增加了预估环节和误差综合环节。控制器的输入为误差综合环节的输出。关系如下式：

$$\alpha E(s) + (1 - \alpha) E_b(s) = E_0(s) \quad (6.2)$$

其中  $E(s)$  为实际误差， $E_b(s)$  为预估误差， $E_0(s)$  为综合误差。 $\alpha$  为误差权系数，取值在 0, 1 之间。

其预估系统方框图见图 6.3。

# 1701

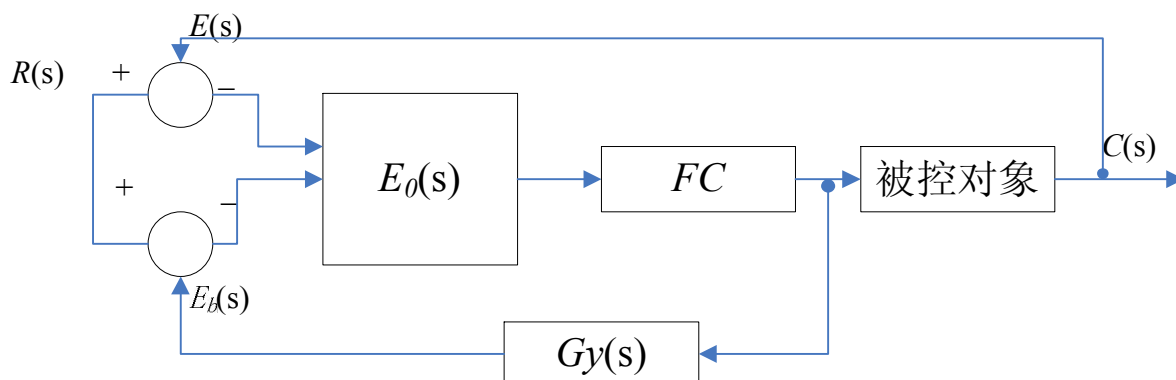


图 6.3 预估模糊控制系统框图

模糊控制器的输入为综合误差  $E_0(s)$ ，模糊控制器的输出量  $U(s)$ ，该控制量一方面作用于被控对象，也用于预估模型。被控对象的输出  $C(s)$  与给定值  $R(s)$  比较，计算出系统实际误差  $E(s)$ ，预估模型输出  $C_b(s)$  为被控参数的预估值， $C_b(s)$  与给定值  $R(s)$  比较，计算出预估误差  $E_b(s)$ ，实际误差也预估误差同时作用于综合关节，该环节计算输出预估控制器的输入  $E_0(s)$ 。

### 6.1.3 算法设计

采用预估模糊控制方法，模糊控制器的输入变量为  $E_0(s) = \alpha E(s) + (1 - \alpha) E_b(s)$ ，输出变量为  $U$ 。将实值输入转换成模糊输入。常用的模糊化器有三角形、梯形和高斯形隶属度函数<sup>[5]</sup>。本文选择三角形模糊化器。将模糊输出集转换成系统的数值输出。最常用的解模糊器有重心、中心平均和最大平均解模糊器。本文选择的是重心解模糊器。研究表明，利用三角形模糊化输入量的精确性高，更符合输入变量的特性。

模糊控制器输入输出的论域都为  $[-6, 6]$ ，输入变量  $E$  和  $E_b$  的语言变量取值为：负大，负中，负小，零，正小，正中，正大，表示为  $E = \{NL, NM, NS, ZO, PS, PM, PL\}$ ， $E_b = \{NL, NM, NS, ZO, PS, PM, PL\}$ 。输出的变量  $U$  的语言变量值为负大，负中，负小，零，正小，正中，正大，表示为  $E_0 = \{NL, NM, NS, ZO, PS, PM, PL\}$ 。其输入输出隶属函数分别为图 6.4，图 6.5 所示。模糊控制规则使用 Mamdani 模糊规则，

$$\text{IF } x_1 \text{ is } A \text{ and } x_2 \text{ is } B \text{ THEN } u \text{ is } C \quad (6.3)$$

表见表 6.1。

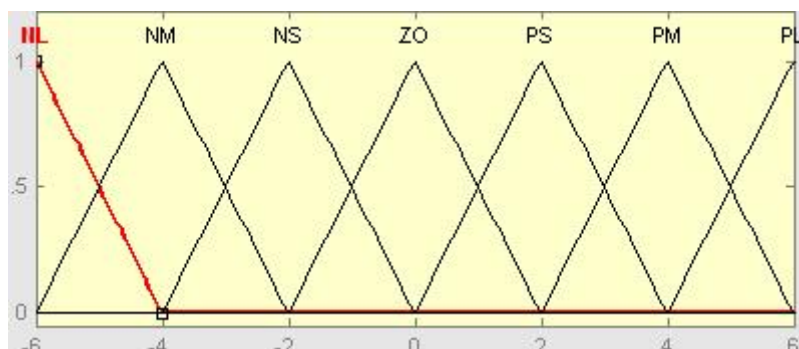


图 6.4 模糊控制器输入函数隶属度函数

# 1701

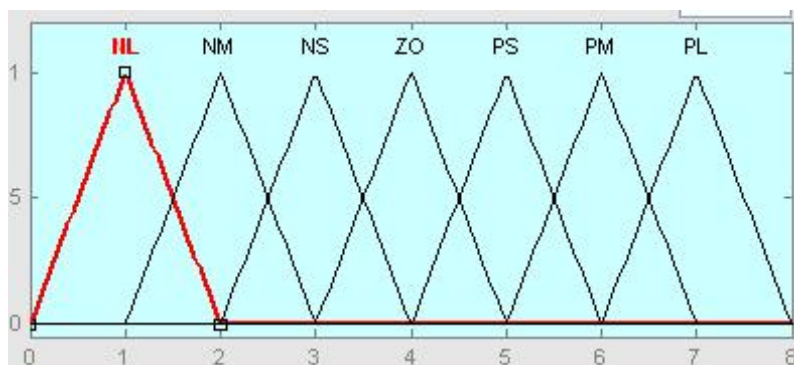


图 6.5 模糊控制器输出函数隶属度函数

表 6.1 模糊控制规则表

$U$		$E$						
		$NL$	$NM$	$NS$	$ZO$	$PS$	$PM$	$PL$
$E_b$	$NL$	NL	NL	NL	NL	ZO	ZO	PS
	$NM$	NL	NL	NM	NM	ZO	ZO	PM
	$NS$	NL	NM	NM	NS	ZO	PS	PL
	$ZO$	NL	NM	NS	ZO	PS	PM	PL
	$PS$	NL	ZS	ZO	PS	PS	PM	PL
	$PM$	NM	ZO	ZO	PM	PM	PL	PL
	$PL$	NS	ZO	ZO	PL	PL	PL	PL

#### 6.1.4 仿真实验

Smith 估计控制是专门针对大时滞系统的一种控制器，本文选择 Smith 预估控制来作为对比，以说明预估模糊控制的优点。因为 Smith 预估控制需要建立精确的数学模型，我们这里先假定我们所建立的模型是精确的，用下面再 SIMULINK 中建立的仿真模型进行仿真。据预估模糊控制原理，在 SIMULINK 中建立的仿真模型如图 6.6 所示。

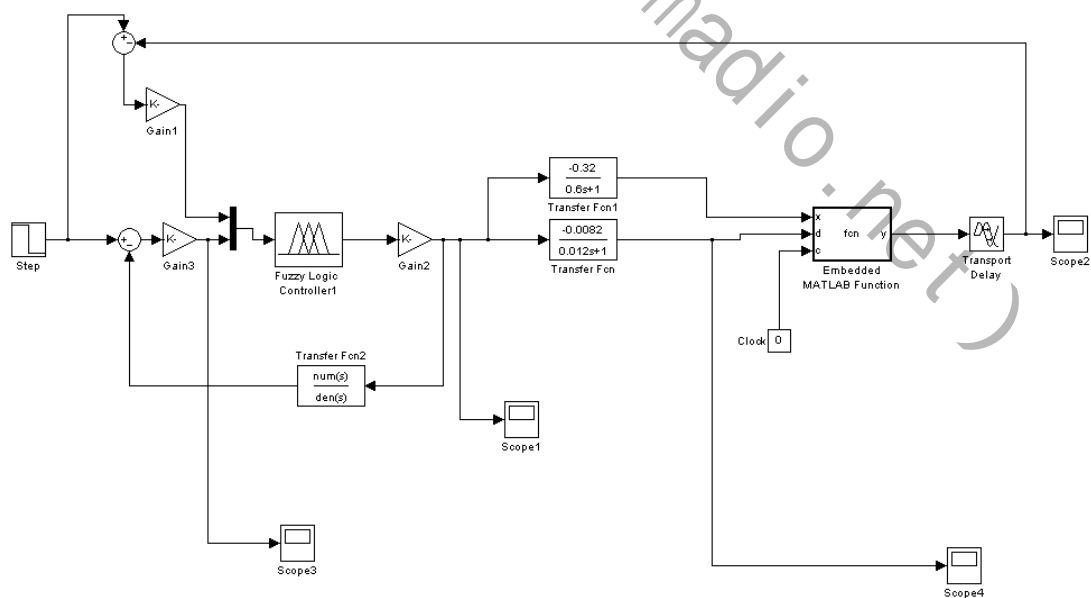


图 6.6 预估模糊控制仿真结构图



#1701

同图 6.2 比较起来, 预估模糊控制方法则不需要写出精确的传递函数, 只需给出同阶的参考模型就能得到良好的控制效果。如图 6.7 所示从采用预估模糊控制的系统响应曲线可以看出控制器不仅对阶跃信号的调节速度快效果好而且当外界对系统产生干扰时, 控制效果也很稳定, 没有产生大的超调与误差。由此可见对冷库模型采用预估模糊控制比 Smith 预估控制具有更好的优越性。

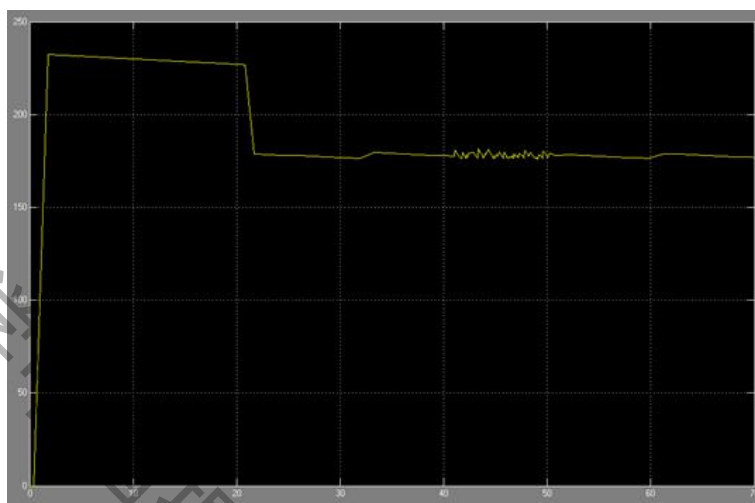


图 6.7 预估模糊控制  
(横坐标为时间, 单位:  $h$ ; 纵坐标为控温, 单位:  $K$ )

## 6.2 辅助控制器设计

在设计辅助控制器时, 控制的思路有所变化, 但控制对象没有改变, 于是我们在关于第一题的分析中得到的系统两大问题依然存在:

- (1) 系统存在着很大的时滞现象。
- (2) 系统存在着明显的扰动现象, 每次扰动都会造成系统参数和传递函数的变化。

本章在关于问题一的讨论中, 已经对算法的选择进行了比较充分的论证。模糊预估控制器对于滞后对象有良好的性能, 同时对被控对象的参数发生改变时有良好的适应能力。而辅助控制器的主要目的是, 抑制由于操作员对时滞估计的不足引起超调和振荡的产生。所以在辅助控制器的设计中, 仍然采取模糊预估算法。

在无辅助控制器的手动操作模式下的系统, 实际上是一个开环系统, 依靠操作员的经验来修正被控量与输入量之间的偏差, 实现对冷库对象的控制。在一些应用领域中, 操作员的经验要优于计算机控制, 特别是输出量与被控量之间偏差较大时, 这种优势尤其明显。但由于突发事件带来的情绪紧张, 会造成操作员对时滞估计不足, 引起超调和振荡。这时就需要一个辅助控制器来对手动操作进行补偿, 起到压制超调的作用。

在辅助控制器的设计中需要考虑以下几点:

- (1) 不过度干预人的操作。
- (2) 对手动操作进行补偿, 压制超调。
- (3) 消除复杂环境可能存在的噪声对控制器的影响。

带辅助控制器的手动系统框图见图 6.8。



# 1701

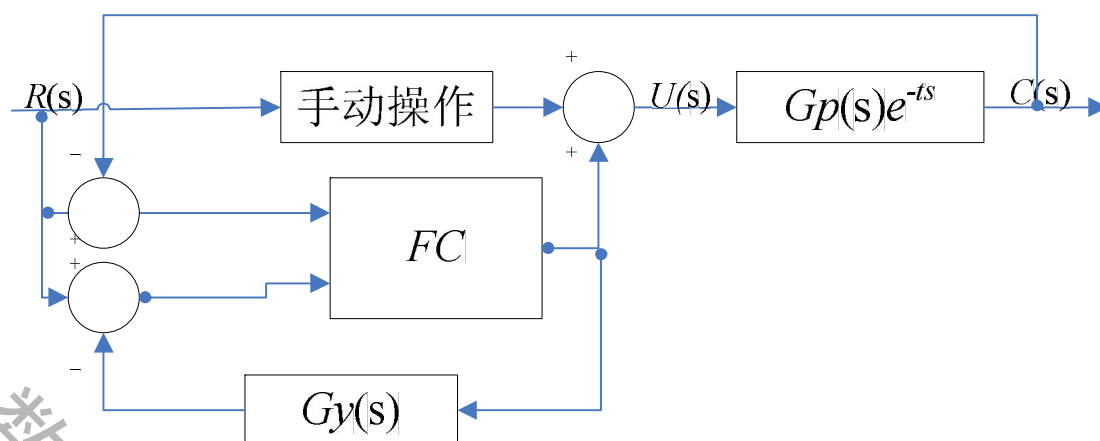


图 6.8 带辅助控制器的手动系统框图

操作员与辅助控制器同时对输出产生影响，即并发控制。

因为要求以人的操作为主,辅助控制器不过度干预,所以在设计时对手动操作与辅助控制器对输出影响设置了不同的权重,且使手动操作的作用始终大于辅助控制器的作用。输出实际上是两者分别乘以各自的比例系数之后的叠加。我们用二者比例系数的比值  $L$  来描述权重的分配情况。模糊控制器会根据不同情况对  $L$  值作一定范围内的调整,使得辅助控制器在不影响人的操作的前提下,增强了抑制振荡的能力。比如在被控对象调整到较接近规定值时,模糊控制器就会增大  $L$  值,使辅助控制器的调节作用增强,在一定程度上减小了由于操作员对时滞估计不足带来的影响,减小了超调,加快了调节速度,提高了控制质量。据预估模糊控制原理,在 SIMULINK 中建立模型的仿真模型如图 6.9 所示。

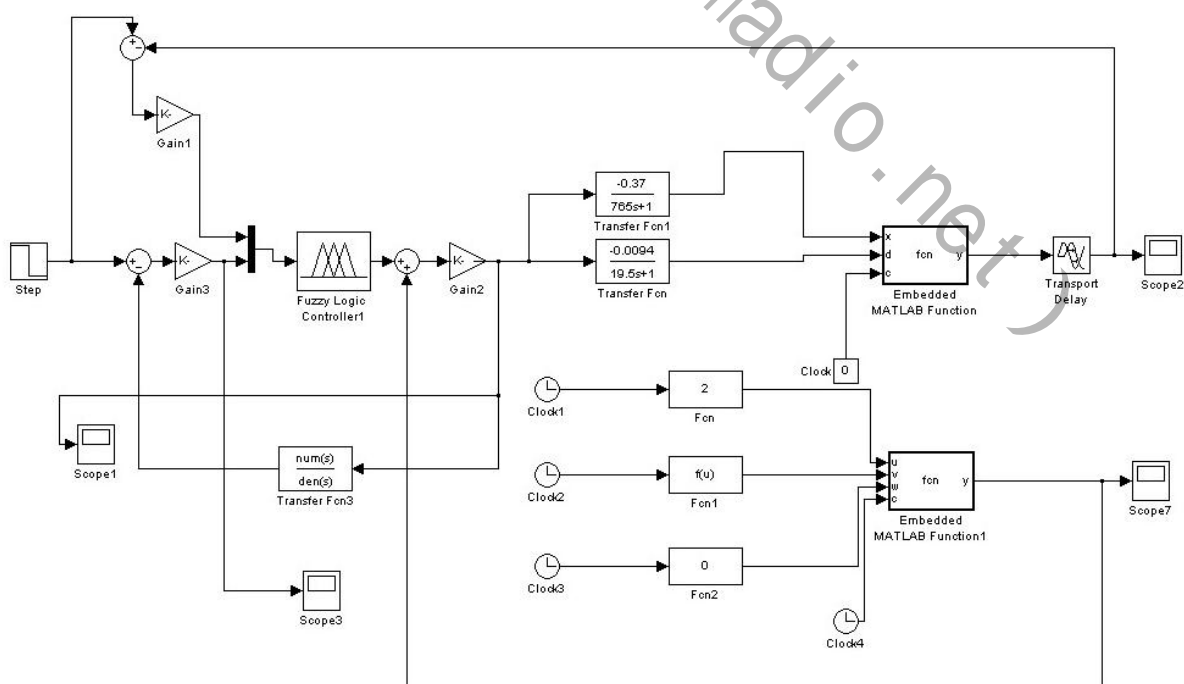


图 6.9 带辅助控制器的手动系统控制仿真结构图

#1701

## 7 结果分析

### 7.1 问题一的求解

设计一个控制系统，必须考虑如下三点性能评价：

- (1) 调节时间尽量小。调节时间即系统响应并保持在终值 5% 所需的最短时间。在本文中即可形象的表述为备用制冷系统制冷达到冷可规定温度的时间。
- (2) 超调量尽量小。超调量指的是系统响应的最大偏离量和终值的差值同终值比的百分数。本文的超调量表示备用制冷系统降温功率过大，达到 180K 以下的情况。
- (3) 稳态误差尽量小。影响冷藏间模型热量变化的因素很多，而稳态误差将是衡量其抗干扰能力的度量。

由于冷库系统复杂，因此我们基于 4 种不同的假设对系统分别进行仿真研究。

情况 1：若冷库内温度在 50h 时到达 230K 启动备用制冷系统且冷库内有 40% 的容积存放货物时冷库温度的响应曲线如图 7.1 所示。

可以看出在这种情况下，调节时间很快，仅用了 3 小时就将温度控到了 180K 且没有稳态误差。

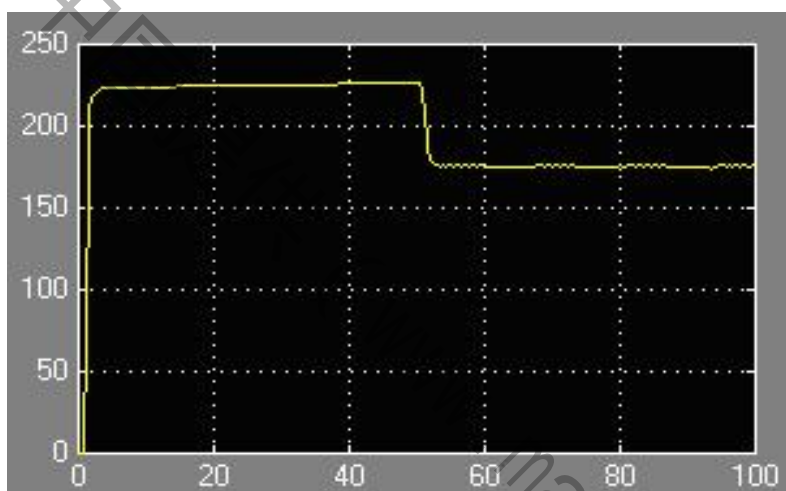


图 7.1 容积率为 40% 时的 230K-180K 阶跃响应曲线  
(横坐标为时间，单位：h；纵坐标为冷库温度，单位：K)

情况 2：冷库内温度在 20h 时到达 230K 启动备用制冷系统且冷库内有 40% 的容积存放货物并在第 60-70h 时往冷库内存放占 20% 容积的货物，对温度产生干扰，此时冷库的温度曲线如图 7.2 所示。

可以看出，尽管有扰动，但是并未对系统造成太大影响，稳态有 1K 的温差。

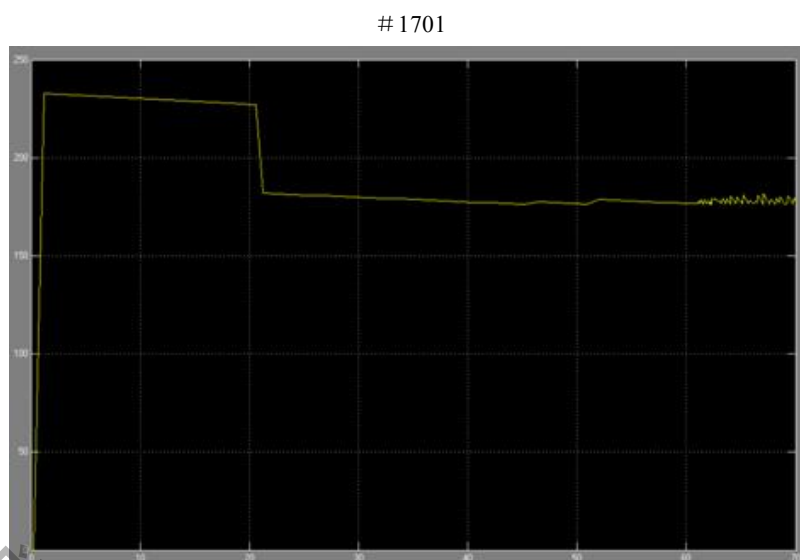


图 7.2 容积率为 40% 时的 230K-180K 阶跃响应曲线且 60-70h 遇到干扰后的响应曲线  
(横坐标为时间，单位：h；纵坐标为冷库温度，单位：K)

情况 3：冷库内温度在 20h 时到达 230K 启动备用制冷系统且冷库内有 40% 的容积存放货物并在 40-50h 往冷库内存放占 20% 容积的货物，对温度产生干扰，此时冷库的温度曲线如图 7.3 所示。

此假设缩短了扰动和稳态之间的时间差，提高了系统辨识难度，然而系统的性能依然优秀。

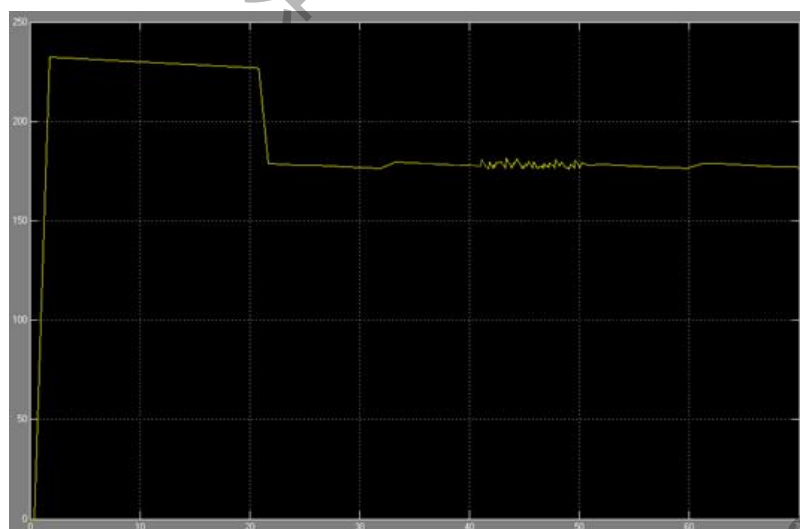


图 7.3 容积率为 40% 时的 230K-180K 阶跃响应曲线且 60-70h 遇到干扰后的响应曲线  
(横坐标为时间，单位：h；纵坐标为冷库温度，单位：K)

情况 4：冷库内温度在 20h 时到达 230K 启动备用制冷系统且冷库内没有存放货物，此时冷库的温度曲线如图 7.4 所示。

这是模型理想的冷库降温系统，可以看出，如果没有任何货物的情况下，系统半小时就可以到达目标温度并且稳定的控制在 180K。

# 1701

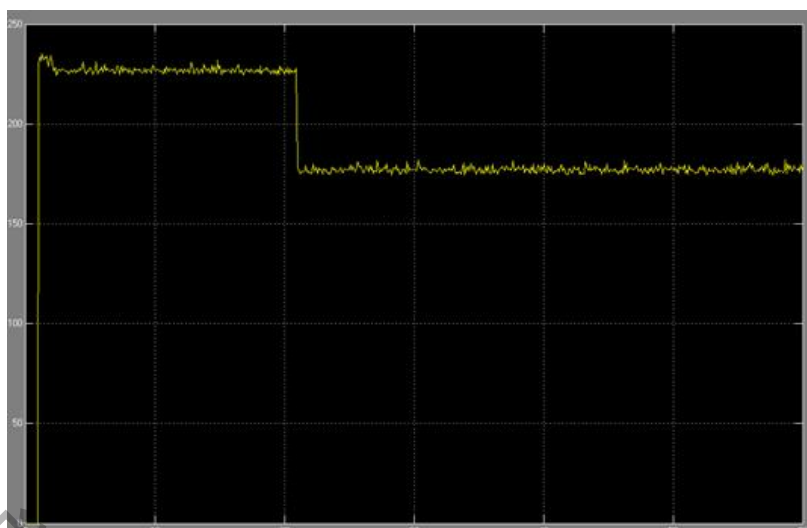


图 7.4 空冷库的 230K-180K 阶跃响应曲线  
(横坐标为时间, 单位:  $h$ ; 纵坐标为冷库温度, 单位:  $K$ )

从图 7.1~7.4 我们可以看出我们算法的优越性, 在系统的三大指标方面都取得了不错的成果。表 7.1 形象直观的归纳了温控系统的综合性能指标表。

表 7.1 综合性能指标表

	调节时间 ( $h$ )	超调量(%)	稳态误差( $K$ )
情况 1	3	0	0
情况 2	3	0	1
情况 3	3	0	0
情况 4	0.5	0	2

## 7.2 问题二的求解

对于第二问中所需要设计的辅助控制器, 需要满足以下几个功能。

- (1) 控制员虽然经过严格的训练, 但由于突发事件带来的情绪紧张, 会造成对时滞估计不足, 引起超调和振荡的产生。辅助控制器必须能够实时监控冷库的温度, 当操作员估计错误产生超调时辅助控制器能立刻应激, 减小超调和振荡, 稳定温度。
- (2) 在冷库的日常经营维护中会遇到很多随机的干扰, 例如管理人员的进出与货物的进出都会对冷库温度造成干扰, 且有些干扰需要做微调, 而操作员不一定每次都能及时地做出合适的控制, 当操作员失误时辅助控制器必须恰当的调控。

为了体现辅助控制器的性能, 我们在不同情况下分别比较有无辅助控制器的响应曲线。

情况 1: 若冷库内温度在  $50h$  时到达  $230K$  启动备用制冷系统且冷库内有 40% 的容积存放货物时冷库温度的响应曲线如图 7.1 所示。

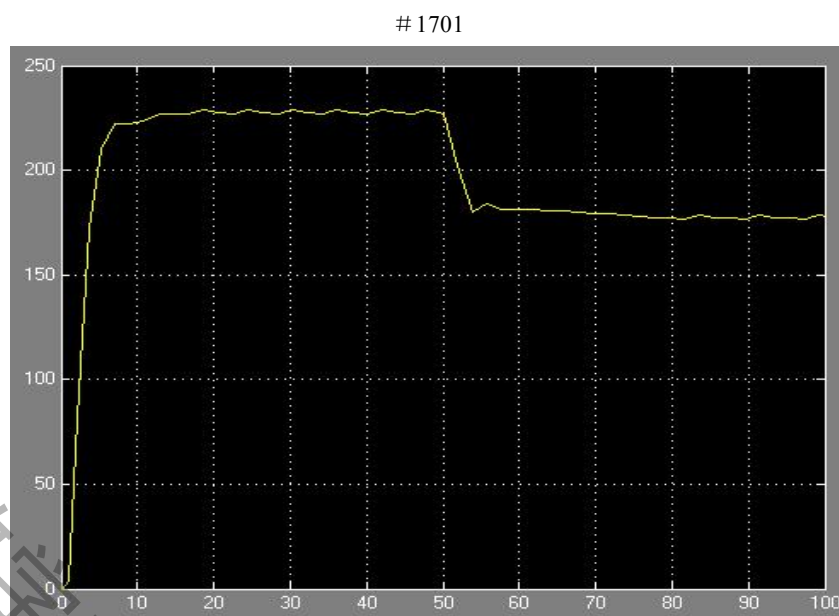


图 7.5(a) 没有辅助控制系统容积率为 40%时的 230K-180K 阶跃响应曲线  
(横坐标为时间，单位： $h$ ；纵坐标为冷库温度，单位： $K$ )

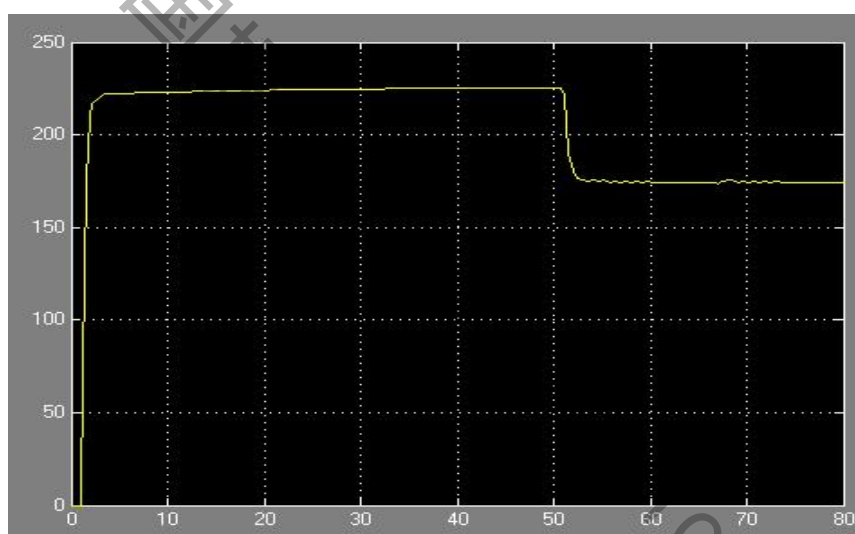


图 7.5(b) 拥有辅助控制系统容积率为 40%时的 230K-180K 阶跃响应曲线  
(横坐标为时间，单位： $h$ ；纵坐标为冷库温度，单位： $K$ )

图 7.5(a)是没有辅助控制系统的响应曲线，如图所示在 50 时要求将温度从 230k 跳到 180k。由于操作员的预估出现细微的偏差，响应曲线出现了超调现象。图 7.5(b)中采用了辅助控制器，不仅响应时间很短，而且没有出现纯人工操作造成的超调与振荡，冷库温度很快就稳在设定值上，控制效果很好。

情况 2：冷库内温度在 20h 时到达 230K 启动备用制冷系统且冷库内有 40%的容积存放货物并在 60-70 时往冷库内存放占 20%容积的货物，对温度产生干扰。

#1701

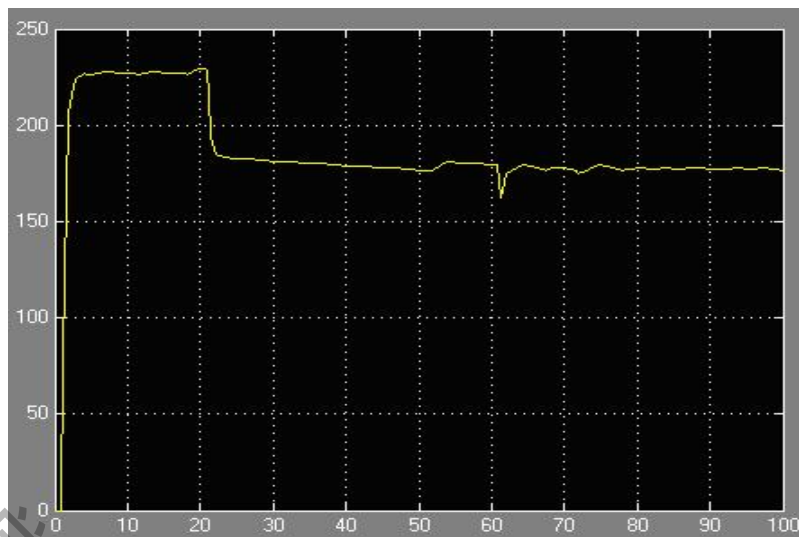


图 7.6(a) 没有辅助控制系统的 230K-180K 阶跃响应曲线  
且 60-70h 遇到干扰后的响应曲线  
(横坐标为时间, 单位:  $h$ ; 纵坐标为冷库温度, 单位:  $K$ )

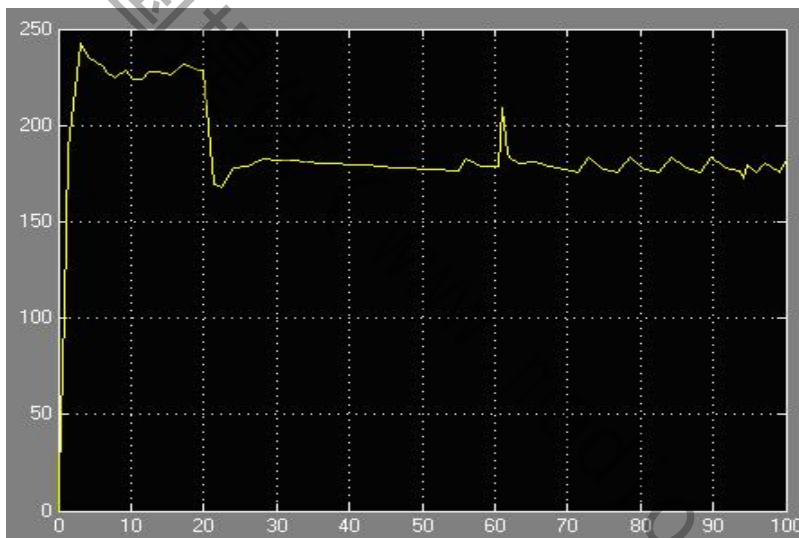


图 7.6(b) 没有辅助控制系统的 230K-180K 阶跃响应曲线  
且 60-70h 遇到干扰后的响应曲线  
(横坐标为时间, 单位:  $h$ ; 纵坐标为冷库温度, 单位:  $K$ )



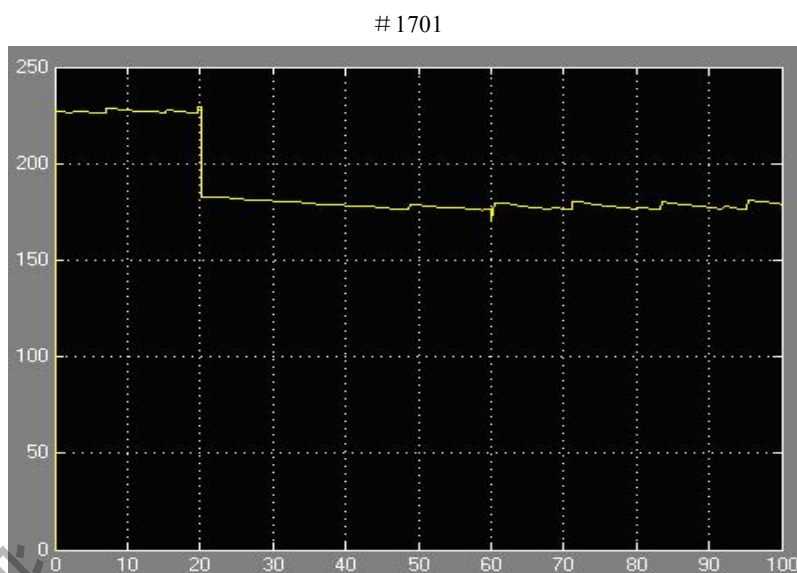


图 7.6(c) 拥有辅助控制系统的 230K-180K 阶跃响应曲线  
且 60-70h 遇到干扰后的响应曲线

(横坐标为时间, 单位:  $h$ ; 纵坐标为冷库温度, 单位:  $K$ )

由图 7.6(a)可知由于操作员预估过大, 使得制冷功率过大, 在放入新货物时冷库温度反而下降产生较大的超调。而图 7.6(b)则表明操作员预估不足, 使得冷库在放入新货物遭遇干扰时, 温度产生了很大的超调与振荡。安装了我们设计的辅助控制系统后这些问题都得到了解决。如图 7.6(c)所示, 虽然你操作员也产生了预估错误使得温度出现了超调但辅助控制系统立刻做出反应, 通过微调大大减少了超调幅度, 并使温度很快就稳定在设定值, 表明系统具有较好的鲁棒性。

## 8 模型评价

系统优点如下:

- (1)控制策略清除易懂, 参数调整方便, 控制效果好。
- (2)能够有效地克服被控对象的纯滞后性质所引起的控制振荡问题。
- (3)针对问题一或问题二设计的控制器都不需要知道被控对象的精确数学模型, 只需同阶系统的模型作为参考。
- (4)针对问题一设计的控制器自动地适应不同的情况, 尽快使冷库里的温度恢复到规定值, 并尽量减少稳态误差。
- (5)针对问题二设计的辅助控制器能够有效解决操作员对时滞的偏差估计导致的振荡与超调问题。

系统目前存在的缺点:

问题一与问题二中的控制器在遇到噪声时冷库的温度都还是会有小幅的波动。

## 参考文献

- [1] 张有凤, 大中型冷库制冷系统的建模与控制, 广州: 广东工业大学硕士论文, 2007
- [2] 姜珊, 冷库自动控制系统设计与实现, 大连: 大连理工大学硕士论文, 2005
- [3] 郑荣等, 预测模糊控制在温度控制中的应用, 自动化技术与应用, 26(6): 35, 2007

#1701

[4] 杨海勇, 史密斯预估及其 MATLAB 仿真, 高新技术, 10(b), 2007

[5] 丁永生, 计算智能——理论技术与应用, 北京: 科学出版社, 2004

## 附 录

模糊控制器属性代码

[System]

Name='FC'

Type='mamdani'

Version=2.0

NumInputs=2

NumOutputs=1

NumRules=49

AndMethod='min'

OrMethod='max'

ImpMethod='min'

AggMethod='max'

DefuzzMethod='bisector'

[Input1]

Name='E'

Range=[-6 6]

NumMFs=7

MF1='NL': 'trimf', [-10 -6 -4]

MF2='NM': 'trimf', [-6 -4 -2]

MF3='NS': 'trimf', [-4 -2 0]

MF4='ZO': 'trimf', [-2 0 2]

MF5='PS': 'trimf', [0 2 4]

MF6='PM': 'trimf', [2 4 6]

MF7='PL': 'trimf', [4 6 10]

[Input2]

Name='EC'



#1701

Range=[-6 6]

NumMFs=7

MF1='NL':trimf,[-10 -6 -4]

MF2='NM':trimf,[-6 -4 -2]

MF3='NS':trimf,[-4 -2 0]

MF4='ZO':trimf,[-2 0 2]

MF5='PS':trimf,[0 2 4]

MF6='PM':trimf,[2 4 6]

MF7='PL':trimf,[4 6 10]

[Output1]

Name='U'

Range=[0 8]

NumMFs=7

MF1='NL':trimf,[0 1 2]

MF2='NM':trimf,[1 2 3]

MF3='NS':trimf,[2 3 4]

MF4='ZO':trimf,[3 4 5]

MF5='PS':trimf,[4 5 6]

MF6='PM':trimf,[5 6 7]

MF7='PL':trimf,[6 7 8]

[Rules]

1 1, 1 (1) : 1

2 1, 1 (1) : 1

3 1, 1 (1) : 1

4 1, 1 (1) : 1

5 1, 4 (1) : 1

6 1, 4 (1) : 1

7 1, 5 (1) : 1

7 2, 6 (1) : 1

6 2, 4 (1) : 1

5 2, 4 (1) : 1

4 2, 2 (1) : 1

#1701

 $3\ 2, 2(1) : 1$  $2\ 2, 1(1) : 1$  $1\ 2, 1(1) : 1$  $1\ 3, 1(1) : 1$  $2\ 3, 2(1) : 1$  $3\ 3, 2(1) : 1$  $4\ 3, 3(1) : 1$  $5\ 3, 4(1) : 1$  $6\ 3, 5(1) : 1$  $7\ 3, 7(1) : 1$  $7\ 4, 7(1) : 1$  $6\ 4, 6(1) : 1$  $5\ 4, 5(1) : 1$  $4\ 4, 4(1) : 1$  $3\ 4, 3(1) : 1$  $2\ 4, 2(1) : 1$  $1\ 4, 1(1) : 1$  $1\ 5, 1(1) : 1$  $2\ 5, 3(1) : 1$  $3\ 5, 4(1) : 1$  $4\ 5, 5(1) : 1$  $5\ 5, 5(1) : 1$  $6\ 5, 6(1) : 1$  $7\ 5, 7(1) : 1$  $7\ 6, 7(1) : 1$  $6\ 6, 7(1) : 1$  $5\ 6, 6(1) : 1$  $4\ 6, 6(1) : 1$  $3\ 6, 4(1) : 1$  $2\ 6, 4(1) : 1$  $1\ 6, 2(1) : 1$  $1\ 7, 3(1) : 1$  $2\ 7, 4(1) : 1$  $3\ 7, 4(1) : 1$

#1701

4 7, 7(1) : 1

5 7, 7(1) : 1

6 7, 7(1) : 1

7 7, 7(1) : 1

数学中国提供 (www.madio.net)