

杭州电子科技大学

硕士学位论文

题 目：基于电加热炉温度的预测函数控制系统

研 究 生 徐卫德

专 业 控制科学与工程

指导教师 张日东 教 授

邹洪波 副教授

完成日期 2017 年 3 月

杭州电子科技大学硕士学位论文

基于电加热炉温度的预测函数控制系统

研 究 生： 徐卫德

指导教师： 张日东 教 授

邹洪波 副教授

2017 年 3 月

**Dissertation submitted to Hangzhou Dianzi University
for the Degree of Master**

**Predictive function control system
based on temperature of electric heating
furnace**

Candidate: Xu Wei-de

**Supervisor: Prof. Zhang Ri-dong
Prof. Zou Hong-bo**

March, 2017

杭州电子科技大学

学位论文原创性声明和使用授权说明

原创性声明

本人郑重声明： 所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品或成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

论文作者签名：

日期： 年 月 日

学位论文使用授权说明

本人完全了解杭州电子科技大学关于保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属杭州电子科技大学。本人保证毕业离校后，发表论文或使用论文工作成果时署各单位仍然为杭州电子科技大学。学校有权保留送交论文的复印件，允许查阅和借阅论文；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。（保密论文在解密后遵守此规定）

论文作者签名：

日期： 年 月 日

指导教师签名：

日期： 年 月 日

摘 要

温度控制系统是一个大范围工况、大时滞、非线性的过程，但是传统的控制器很难达到工业控制的要求，从而需要研究新的方法去解决这些难题。多模型结构是通过把全局模型分化为一系列的局部模型，利用系统中的局部线性特征可以很好的解决大工况范围造成的非线性的问题。预测函数控制作为一种新型的控制算法，能够根据模型预测未来系统变化的趋势，对未来的变化趋势做出相应的改变，并且这种控制算法的计算量小很适合在实时的控制领域，鲁棒性能强能很好的克服系统的干扰，同时对时间滞后的环节也表现出很好的控制性能。如果把两者的优点结合起来能够对工业控制的发展起到推进作用。

本文主要是针对电加热炉中温度如何快速稳定的达到设定的工作点，而做了以下方面的研究。第一点，针对电加热炉的大工况范围和非线性的特点，把工作范围按照温度的区域进行划分，在局部的工作范围内建立的局部线性模型，从而把非线性系统转为了局部的线性系统。根据划分好的局部线性模型设计相应工作范围内的预测函数控制器，并把 Smith 预估器引入到控制器的设计中减小了时间滞后的问题，最后当温度跨过不同的工作区间时，利用多模型的切换思想进行控制器间的切换。通过把此方法用在电加热炉的控制，并获得了较好的控制效果。

第二点，在对局部模型进行建模时利用整数阶模型并不能反应局部模型的特性，因此提出了一种分数阶模型的拟合。通过分数阶的 Oustaloup 数值方法把分数阶模型转换为高阶的整数阶模型，从而通过预测函数设计局部模型的状态空间控制器，最后通过各个模型的当前误差确定每个模型的加权系数，从而得到多模型下的控制量。利用此方法在电加热炉中，通过实验的数据分析，表明了多模型的预测函数控制能够很好的处理此类问题。

关键词：电加热炉，预测函数控制，多模型，分数阶系统

ABSTRACT

Temperature control system is industrial process with a large range of working conditions, large time delay and nonlinear process, but the traditional controller is difficult to achieve the requirements of control, so we need to study new methods to solve industrial process with problems. Multi-model structure is constructed by a series of local models which can be reflected by a series of local characteristics, it can be used to solve the nonlinear problem caused by the large operating range. Predictive control is a new control algorithm, it according to the model to predict the trend of system changes in the future. It make the appropriate changes to the future trend, small calculated amount and that this control is suitable in the field of real-time control, robust performance and strong interference can well overcome the system, at the same time for the time lag link also showed good control performance. If we combine the advantages of both, it can promote the development of industrial control.

This article mainly aims at the electric heating furnace temperature how fast and stable arrive to the set point of work, so we do the following aspects of research. First, the characteristics of large working range and nonlinear in electric heating furnace, the scope of work are divided a series of local models according to the temperature region, a local linear model based on the local scope of work, so as to convert a nonlinear system of local linear systems. According to the divided local linear model design the predictive functional controller work within the scope of the local linear model, and the Smith predictor is introduced to the controller design to reduce the time lag problem, finally when the temperature across the interval when different ideas for switching between controllers using multiple models. By using this method in the control of electric heating furnace, a better control effect is obtained.

In the second point, when the local model is modeled, the model can be reflected the local characteristics, so a fractional order model is proposed. Through the Oustaloup numerical method for the fractional conversion of fractional order model for integer order model of higher order, thus the design of local controller model through the prediction function, finally determine the weighting coefficient of each model of the current error of each model, in order to get the control volume model of the. By using this method in electric heating furnace, analysis the experimental data, it shows that the multi model predictive function control can be very good to deal with

this kind of problem.

Key words: electric heating furnace, predictive functional control, multi-models, fractional order system

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
目 录.....	IV
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究意义.....	2
1.3 研究状况.....	2
1.3.1 预测控制研究现状.....	3
1.3.2 多模型研究现状.....	3
1.4 论文的主要内容及安排.....	4
第 2 章 多模型控制及加热炉的简介.....	6
2.1 引言.....	6
2.2 多模型的结构.....	6
2.2.1 模型集的建立.....	6
2.2.2 控制其结构的选择.....	7
2.2.3 模型集的切换.....	7
2.2.4 控制性能的评估策略.....	9
2.3 预测函数控制.....	10
2.3.1 预测模型.....	10
2.3.2 滚动优化.....	11
2.3.3 反馈校正.....	11
2.4 电加热炉的系统简介.....	12
2.4.1 SXF-4-20 电加热炉的结构.....	12
2.4.2 SXF-4-20 电加热炉控制系统.....	13
2.5 本章总结.....	14
第 3 章 内模 PID 控制系统.....	15
3.1 引言.....	15
3.2 PID 控制的工作原理.....	15
3.2.1 PID 的实现原理.....	15
3.2.2 PID 参数的整定方法.....	16

3.3 内模控制 PID.....	17
3.3.1 两点法建模.....	18
3.3.2 内模整定 PID 参数.....	18
3.4 内模 PID 在电加热炉中的应用.....	19
3.5 本章总结.....	21
第 4 章 多模型的预测函数控制系统.....	22
4.1 引言.....	22
4.2 多模型预测函数控制.....	22
4.2.1 模型集的建立.....	22
4.2.2 预测函数控制器的设计.....	23
4.2.3 多模型的切换.....	24
4.3 电加热炉的多模型预测函数控制.....	25
4.3.1 电加热炉模型的建立.....	25
4.3.2 电加热炉控制器的设计.....	25
4.3.3 电加热炉的应用结果.....	26
4.4 本章总结.....	27
第 5 章 分数阶的多模型温度控制系统.....	28
5.1 引言.....	28
5.2 分数阶模型的性质.....	28
5.2.1 分数阶微积分的定义.....	28
5.2.2 分数阶的数值处理方法.....	29
5.3 预测函数控制器的设计.....	29
5.3.1 预测模型的输出.....	29
5.3.2 多模型加权.....	31
5.4 分数阶的多模型预测控制在电加热炉中的应用.....	31
5.4.1 预测模型的建立.....	31
5.4.2 电加热炉控制器的设计.....	32
5.4.3 电加热炉的应用结果.....	33
5.5 本章总结.....	34
第 6 章 总结与展望.....	35
致 谢.....	37
参考文献.....	38
附录.....	43

第 1 章 绪论

1.1 研究背景

温度控制系统是石油萃取，产品生产等工业过程中的一个必不可少的环节。温度控制系统的好坏直接影响着产品的质量，生产的效率甚至是工业中的安全问题，因此如何保证控制效果在我们的预期的范围内是研究这一课题的必要环节。随着科技的发展，工业生产更加趋向于大型化、智能化等方向发展，因此对生产过程中的要求也进一步的提升，不同于传统控制中仅仅只是达到设定的温度。在控制中的装置工作效率高、产品质量好、能源损耗低、生产过程智能化等方面也是我们在设计控制系统的必要的考虑因素。随着系统要求的提高，必然导致了我们在设计的过程中会面临着许多的难题。在工业生产中控制量的约束、变量之间的耦合、系统的非线性、大时滞、大工况范围等因素也就成为了对现代控制系统设计的难点。在传统的过程控制中往往是没有考虑到这些因素的存在，为了解决这些因素对系统造成不利的影响就需要引进一些先进的控制算法。在先进控制理论中需要知道工业过程的动态过程，了解内部的主要性能，从而建立工业过程的参数模型和传递函数。在实际的工业生产中建立精确的数学模型很难达到要求，并且在工业过程会伴随着非线性、参数的时变，外界的干扰，从而使生产的质量达不到我们预期的结果。加热炉温度控制过程中温度的变化是一个复杂的非线性的物理过程，而传统的理论控制方法不能达到理想的控制效果，需要寻找更先进的控制策略达到更好的温度控制效果，这已成为研究工业控制的一个共同的目标和方向。

现代控制理论对模型的精度要求高，但是在控制过程中建立工业模型的精度却又达不到预计的我们的要求时，我们需要寻找一些新的方法能够改善我们的现状。它既能够使我们不用对工业对象进行繁琐的建模过程，亦能使工业过程达到我们的要求，这就是最早时的模型预测启发控制提出的目的和要求。预测控制只需要采集系统过程中阶跃响应的数据就可以获得对象的非模型的参数，并且不需要去辨识对象的模型就可以直接设计控制器。它随着控制理论的优化思想而来，并不断地进行有限步长的优化。它取代了传统控制中求取系统控制的全局最优值，并且在滚动优化之后的每一步都进行反馈校正。它的优点使其避免了参数模型辨识的困难，降低了在线优化的实时计算量，提高了控制系统的实时性和鲁棒性，符合现代工业过程的实际要求。因此预测控制在炼油、化工、电力等行业很快得到了应用。

1.2 研究意义

目前,国内对加热炉控制模式,主要是基于传统的 PID 控制策略[1].在生产工业控制中的温度控制系统突显出其非线性,大工况范围,大时滞等特性,而常规的 PID 控制往往达不到我们所需要控制的效果,如何快速的控制电加热炉的温是我们研究的一个重要方向。由此需要在传统的 PID 控制器的基础之上对其进行优化和改进得到更好的控制性能。许多研究者在对其传统的研究方法上,通过改进提出了不同的新思路。文[2]提出了一种通过模糊控制优化 PID 参数的方法,文[3]在之前的基础之上通过对其控制算法进行优化从而提出了模糊免疫的 PID 控制。在对系统中存在大延迟的环节时,通过在模糊 PID 的基础之上引入 SMITH 预估器解决了系统的延迟问题[4]。[5]在对前者的文章中做出了优化,改善了系统同原来单一的模糊规则 PID 的方法,通过实时采集的数据用神经网络的优化模糊逻辑从而产生新的模糊规则增加了系统的伸缩性。虽然上述方法都对传统的 PID 进行改进,但是并没有改变传统控制的结构,从根本上很难达到我们的要求。预测函数控制作为一种新型的智能控制受到人们的关注[6]。

1.3 研究状况

电加热炉是一种被广泛应用在工业生产中装置[7].由于它具有大延迟,不确定性等因素,因此用常规的控制算法很难达到我们所需要的控制精度。电加热炉的控制好坏会直接影响工业生产中的产品质量,因此寻找一种有效的算法是解决问题的关键。PID 是一种工业生产中常用的控制算法[8]。许多学者把它应用于工业控制中,主要是它的控制原理简单,很容易被理解,对参数的调整比较方便等特点,然而系统的参数直接影响系统的控制速度,超调量的大小,如何调整系统的参数是 PID 控制的关键。因此一些学者研究如何调整 PID 的参数使系统性能最优。文[9]提出了一种通过系统的反馈闭环系统的稳态性能和稳定裕度调节 PID 参数。文[10]通过被控对象的内部参数调整 PID 的参数。虽然他们都解决了一定的问题,然而 PID 控制却很难满足工业过程中的大延迟,大滞后环节。现在模型预测控制是一种能够有效的处理工业工程中系统延迟,因此可以认为一种能够替换 PID 的新型控制[11-13]。串级的预测函数控制已经被用于了不同的化学工业控制中[14-16]。文中[17]提出了一种有约束的非线性分布式预测函数控制并应用得到了太阳能系统中。预测控制应用到了一种双感应发电机的反馈线性化中 [18]。文[19]中提出了一种预测控制在苯加氢的反应蒸馏塔的应用。预测控制算法在精密跟踪控制和电机伺服的约束系统[20],预测控制与内模 PID 串级控制在工业焦化炉的应用[21]。尽管预测控制存在许多的优点,但是传统的预测控制在非线性系统中对模型的精确度不足的情况下也很难到达控制要求,在非线性系统中系统的动态响应过程受到了模型精度的影响,为了提高模型的精度

就需要寻找一些新的方法[22]。多模型控制能够有效克服系统的强非线性和参数的时变[23-24]。在文中[25]提出了一种应用于高超声速飞行器的多模型切换控制。文中[26]提出了一种针对非线性混杂系统的基于贝叶斯加权的预测函数控制。[27-31]多模型结构和预测控制相结合逐步成为了工业控制的一个方向。

1.3.1 预测控制研究现状

预测控制作为一种先进控制被用于催化开裂原油常压蒸馏生产装置中[33]。预测控制是以系统的模型参数作为未来时刻输出的依据，系统中通过反馈环节能够有效的克服系统模型的误差和外界对系统的干扰，从而使得那些对模型参数辨识不准确，系统中存在误差的环境状态下能有效的克制。但是工业生产中实际的对象都存在非线性，从而一些研究人员开始对其研究。[34]文中提出了一种神经网络对系统的非线性部分进行补偿。文[35]提出了一种利用支持向量机的方法用于非线性过程中。一种具有反馈离散的非线性系统提出了预测函数控制[36]。对系统中存在扰动和多种不确定状态提出了一种鲁棒预测控制[37]。对不确定关系的非线性系统提出了一种解析切换的方法[38]。文[39]对预测控制的研究的发展做出了总结。当系统出现了强非线性时，预测控制就很难达到我们预测的效果因此需要寻找高效、稳定、快速的方法，使电加热炉中的温度达到预期的效果是我们在探究道路上的一个新的起点。

1.3.2 多模型研究现状

多模型控制主要针对系统中存在强非线性、大工况变化、参数时变的系统。其主要研究的是如何解决非线性问题，通过模型的分解从而降低系统的非线性，并利用线性系统的理论基础做指导对系统进行控制。多模型的控制中首先应该注重的是如何把系统的全局模型划分为线性局部模型，通过对局部模型设计控制器。在对系统进行模型划分的时候，通常对系统的稳定点处进行聚类算法把数据集划分为不同集合，通过对局部集合的数据建立局部模型。薛明成提出了一种在线辨识算法，首先通过对子模型进行划分，利用贝叶斯分类器对数据进行实时的分类，根据分类后的数据建立系统的局部模型，最后通过贝叶斯对数据划分的概率进行模型加权得到系统的控制量[40]。孙建平在主气温的发电厂系统中，利用双层聚类算法对采集到的数据划分为不同区域的数据，通过对局部的区域数据利用支持向量机的方法求解系统的局部模型参数，最后利用粒子群算法在全局建立的子模型中求解最优的全局近似加权系数[41]。文[42]主要是提出了一种对非线性系统建模的方法，由于在神经网络建模中需要大量的训练的数据导致了计算量过大，从而局部多项式的拟合算法，通过二次范数距离法确定系统的工作点，在某些工况点附近利用多项式拟合算法建立局部模型。文[43]提出了一种将系统分为局部的 Hammerstein 模型，并对非线性模型利用

小波神经网络训练进行补偿,最后通过加权方法得到系统的全局模型。文[44]中对锅炉汽轮机系统提出了一种减法聚类的多模型在线辨识算法。针对主气温的发电厂系统通过对求取系统的值函数的得到局部模型的加权系数从而得到系统的全局模型[45]。杨慧中针对软测量模型难以描述负责的工业过程,从而提出了一种对输入样本划分为若干子集,在每个子集中采用基于支持向量机的算法求取局部的子模型,利用二次判别算法对输出模型做出子模型判别[46]。多模型不仅仅是为了建立系统的多个局部模型参数,而且要对建立后的模型集设计其响应的控制器。[47]文中通过在线辨识数据集中的局部模型,提出了对局部模型基于测量概率不同的分层交换的模型,它能够适当地平衡系统的鲁棒性。文[48]中提出了一种多模型自适应切换控制系统,在每个时刻通过对系统的模型之间的误差作为系统的指标函数,从而求取当前时刻的最优自适应控制器。[49]本文主要针对锅炉过热气温系统的大惯性和滞后性,用传统的 PID 无法达到控制的要求,从而设计了对系统在不同工作点利用神经网络建立局部的动态模型,通过预测控制器进行设计,最后通过加权合成的策略得到最后的控制量。[50-58]解决了在过热气温系统中系统的参数随着过热气温的负荷变化而产生大的影响。文[59]提出了一种多模型动态矩阵控制算法并应用到了 pH 值中和过程中 [60]本文主要是针对污水处理过程提出了一种利用局部多项式拟合建立系统模型,并设计多模型预测控制算法。[61]针对系统中跳变的情况下设计了一种切换和混合策略的多模型自适应控制,通过参数的变化判断系统是否发生了跳变,如果没有就通过对系统进行混合控制,如何系统发生了跳变就通过切换控制,把模型切换到相应的子集中。[62]本文主要是针对传统的多模型自适应控制模型集过多,从而影响系统的实时性,从而提出了一种在线优化系统的方法降低了系统的模型个数。[63-64]本文主要是针对大范围工况提出了一种工况范围分层方法,从而解决了系统的响应速度问题。将多模型运用在非线性中,并解决了模型建立比较困难等问题。

1.4 论文的主要内容及安排

本文研究的主要内容如下:

第一章主要是对全文的论述,在本章节中主要是介绍了当前研究的背景和研究方向的意义所在,从传统的工业控制到先进的预测函数控制方法的发展,以及多模型在控制方向的研究状况,简单说明了本文的研究的意义和意图。

第二章概括的描述了预测控制的基本原理和多模型控制的扼要,简单介绍了预测函数控制方法,从不同的角度分析了多模型的结构和相应的原理,同时对电加热炉的结构进行了介绍,详细的说明了电加热炉的工作原理。本章节主要是对理论知识的简要介绍,并为后文提供了充分的理论基础。

第三章从传统的 PID 控制出发, 分析了 PID 在电加热炉中的原理, 通过建立电加热炉中的内部模型, 根据模型的参数整定计算得到 PID 的参数, 给出了其控制器性能的评价, 最后利用内模整定的 PID 参数应用在电加热这一个实际的被控对象中, 并指出了其控制性能。

第四章 多模型预测函数控制器在电加热炉中的设计和应用。针对电加热炉的温度是一个非线性, 大延迟, 大范围工况的被控量, 在传统的 PID 控制中对延迟, 非线性环节不能有效的达到我们的预期的效果, 从而设计多模型预测函数控制器。基于 Smith 预测控制能够有效的针对延迟环节, 多模型的结构通过对全局对象局部化, 很好的克服了系统的非线性和大范围工况的不足之处。最后通过对电加热炉的内模 PID 控制器的基础之上, 根据电加热炉的温度范围对其划分为不同的工作范围, 在其不同的工况范围内建立其相应温度区间的模型, 通过不同的模型设计其相应的 Smith 预测函数控制器, 最后通过在不同的工作区间切换器模型的控制器。传统的预测函数控制和 PID 控制作比较, 验证多模型预测函数控制在电加热炉中的有效性。

第五章 分数阶的多模型加权预测函数控制, 针对在多个不同的工作范围内建立的电加热炉的温度模型的精确度低, 从而提出了一种分数阶模型。由于在实际的系统中整数阶次的模型有时并不能很好的体现出系统的性能, 通过建立的实际对象分数阶模型减少了实际对象与模型之间的误差, 从而提高了系统的控制性能。首先通过在不同工况范围内建立其相应温度范围的分数阶模型, 再通过 Oustaloup 近似方法将分数阶模型近似为整数高阶的模型来处理, 通过不同的整数高阶系统设计其相应模型的控制器, 计算多个模型在每个时刻的输出与实际输出求解出每个模型的控制量的相应的系数, 最后通过每个模型的控制量与系数的加权得到实际的控制量作用于被控对象。

第六章 对全文的总结, 基于当前控制系统中存在的问题进行进一步的探讨和深究, 对系统的不完善进行展望。

第2章 多模型控制及加热炉的简介

2.1 引言

在电加热炉的控制中温度被控对象通常是大工况范围，非线性。如何利用一种有效的办法使得温度能够快速的达到我们预期设定的范围，是设计控制器的关键。多模型控制主要是针对非线性，大工况的系统而设计，在控制中主要是将模型按照非线性系统按照一定的方法划分为一系列的局部模型，通过对分解后的每个子问题运用线性预测控制理论设计相对应的控制算法，能够有效的解决系统的问题，预测函数控制是一种实时性高，不依赖于模型的精度，能够有效地抑制外界的干扰，使系统快速达到设定值的算法，将多模型的结构和预测函数控制相结合并应用到电加热炉的控制系统中是我们研究的一个方向。

2.2 多模型的结构

多模型控制的设计问题是一种分总问题，通过对模型的分解，控制的组合，从而把一些复杂的问题简单化从而解决问题。多模型的思想方法可以分为三部分，第一是模型建立的问题，主要解决的是通过把一个全局的非线性模型通过一定的方法分解为一些局部的线性模型。第二是针对模型进行控制器的设计的问题，在控制器的设计中解决系统的快速性、稳定性。第三是模型的切换问题，模型的切换又可以分为模型的加权切换问题和单模型切换问题。以下通过这三个方面介绍多模型的设计：

2.2.1 模型集的建立

在多模型的控制中，一般模型都呈现出非线性、大工况范围，而局部的模型又呈现出线性特征，因此需要对模型进行分解为一系列的局部模型。在划分模型时很难通过一个统一的方法去建立模型集，因此需要考虑到不同的情况去划分模型集。对模型的分解是多模型的一个重点是如何使得分解后的模型集最优，因为模型集的结构对系统的控制性能起着关键性的作用，如果模型集不完备，从而系统的工况覆盖不全面无法对全局非线性模型逼近，就会使得某些区域的控制性能比较差，从而影响了系统的控制性能和稳定性能降低。如果模型集的数量过多就会造成系统太过冗余，在系统的计算过程中造成系统的计算负荷过大，系统很难达到实时性能，并且在系统切换过程中切换次数过于频繁，会使系统产生不稳定的可能性增加。因此在模型集的建立过程中如何使得系统能够以最优的数量的模型集使系统的局部模型逼近全局非线性模型是一个重点。

在对模型集的划分时一般可以考虑对系统的组成进行划分，对稳定工况点进行划分，对系统影响的主要原因进行划分，对系统的物理、化学现象进行划分。在分解系统的时候需要对系统进行分析，根据系统的工作模型和在对工作环境的经验对具体的情形做出准确的分析。对模型划分的好坏会直接影响系统的性能，因此如何设计一个好的线性模型集，使得系统的计算量低，模型与模型之间的耦合度低，工作点的数目合适，都是在研究多模型控制中建立模型集的难点。但是在目前的研究过程中主要是通过对模型进行辨识，或者依靠在实践中的丰富经验对系统的模型进行划分。

经验法主要是对系统的动态过程比较明确，在实验中对过程中起主导作用的变量优先考虑其特性，依此作为划分模型集的方法。在对模型的划分中通过实验中的经验，用试凑的方法对系统的参数进行逐步的调整最后得到模型集，但是这种方法会使得模型集不完整，会造成系统的偏差。另外是对系统进行理论上的分析，局部线性化是通过在被控对象的不同的平衡点对系统的模型进行泰勒展开，将非线性系统变为局部的线性模型，然后根据线性控制的原理设计其局部模型的控制器。另外一种就是模型辨识的方法，首先通过对模型在不同的状态下进行输入，同时采集系统的输出，要尽可能的覆盖到系统的每一种状态，否则会造成系统的不完全性。系统的输入输出的数据如何确定它们之间的耦合性，把不同类别的数据进行划分从而得到数据的分类情况，通常可以使用聚类算法和非线性度量对数据进行分类。除此之外是对系统建立 T-S 模糊模型，对模型的输入输出空间进行不同的模糊区域的划分，在划分好的每个模糊局域建立其相对应的线性模型。

2.2.2 控制其结构的选择

控制器的选择对系统的控制性能其主要作用，通常在系统中每个模型的控制器都选择相同的类型，只是进行控制器的参数的选择有所区别，不同的参数对应不同情况下的模型集中的状态进行选择。在控制器的选择中如何能够使得控制效果达到我们的预期效果，是选择控制器的关键所在。预测函数控制器是一个计算量少，系统的实时性能好，能够有效的克服系统的延迟和模型不精确等因素对系统造成影响的控制方法。

2.2.3 模型集的切换

加权控制是一种并行控制的思想方式，通过把每个模型的控制器或者是系统中的每个模型协同起来工作，从而使得整体的模型都参与到了当前的控制中呈现出全局的控制效果。在加权控制中需要每个模型参与到系统的工作中，然而确定每个模型或者控制器的工作程度是由模型的加权系数决定的，从而需要对加权系数进行归一化处理。当子模型的系数中仅有一个模型系数存在，而其

他模型在当前时刻没有参与到系统的控制中，此时可以认定为模型进行了切换控制，因此切换控制可以认为是加权控制中的一个特殊情况。当系统需要从一个工作点转换到另一个工作点时，如果在转换的过程中有多个模型或者控制器参与到系统的切换工作中时，此时认为系统是一种软切换模式。相反如果当前时刻参与系统的工作中仅有一个模型或者控制器参与工作，则认为此时是一种硬切换。在系统的硬切换中由于当前时刻只有一个模型或者控制器参与工作中，当系统中出现一些跳变、扰动过程，有可能使系统性能降低或者是系统发散得不到控制，而软切换是一种全局控制，在发生跳变时可以通过调整比例系数从而降低了系统的扰动，使得系统在应对参数的突变时呈现出平滑的趋势。硬切换在某些局部过程中对系统的控制过程更加稳定、快速，没有其他的模型和控制器对当前的控制互相影响。在多模型的控制中，由于全部的模型和控制器都参与到了系统的工作过程中在对其系统的稳定性没有合理的解释。由于硬切换作为软切换的一个特殊情况时，其应用的场合也是相对软切换存在一定的限制。在控制器的切换过程中时通过硬切换模式还是软切换模型通常需要通过具体的工业过程进行分析，从而得到最佳的控制效果。在多模型的控制策略中因此可以把切换方式划分为如下几种：按照切换模式的划分方式可以分为模型硬切换、控制器硬切换、模型软切换、控制器软切换四种模式。

模型硬切换的模式在预测控制器的设计中是通过对未来预测的过程而进行模型的切换。由于模型工作在不同的工作区域中，此在在对未来做预测的过程中需要把模型的转变考虑在预测的步数中。当未来预测的某一步达到了工作点的转变条件的时候，此时把模型的变化考虑到了当前的预测步数中，从而实现模型的切换过程，可以考虑为对模型未来的改变的一种预测。由于模型在未来预测的步数中进行了改变，因此在对预测控制进行计算时增加系统的计算负载，但是对模型的切换有着平滑的作用。

控制器硬切换的模式是当工作区域的改变时，通过对控制器的性能进行评估，从而对控制器进行变化。由于控制器的突然改变可能会对系统的稳定性造成一定的影响，从而引起系统的震荡或者发生大的跳变，因此控制器的硬切换受到了很多的关注，并提出了一些相关的理论保证系统在切换的控制中稳定。如何通过切换评估函数是控制性能的关键。

控制器的软切换模式是通过在每个时刻的控制的输出系数通过归一化处理得到当前时刻每个控制器的输出量与系数的累积，从而得到系统的当前时刻控制量。在每个时刻的控制量是由每个控制器的输出量的加权系数所确定，因此用什么来评判系统的加权系数是系统的关键所在。

模型的软切换模式是在控制系统中只存在唯一的一个控制器，而每个时刻

模型参数是发生改变的。在每个时刻对当前时刻的模型的评定是由一系列之前对系统所确定模型的加权系数。通过模型加权使得每个时刻的模型能够有一系列的子模型进行近似表示，因此在每个时刻调整加权子模型的系数是构建模型软切换模型的关键。

2.2.4 控制性能的评价策略

(1) 软切换的性能评估方法

对软切换的评估主要在于如何确定其权值。根据当前时刻模型在工作区域的范围对其进行划分或者系统当前时刻的误差为指标，例如常用方法为：高斯隶属度，贝叶斯加权，输出误差加权等。其中高斯隶属度是对局部模型的区域按照当前时刻的状态，通过每个子模型的高斯隶属度函数求取当前时刻的每个模型的隶属度的大小，通过归一化处理可得子模型的权值。

$$f_i(y) = \exp\left(\frac{-\frac{1}{2}(y-y_i)^2}{\sigma^2}\right) \quad (2.1)$$

其中当前时刻 $f_i(y)$ 是每个模型的隶属度的值， y_i 是每个子模型的隶属度中心， y 是当前系统的输出值。

通过对模型的隶属度归一化处理：

$$\beta_i(y) = f_i(y) / \sum_{j=1}^n f_j(y) \quad (2.2)$$

其中 $\beta_i(y)$ 是每个子模型的加权系数， n 是模型的总个数。

(2) 硬切换的性能评估方法

硬切换是通过性能指标函数作为评估函数。通常以当前时刻系统闭环控制性能，当前时刻的输出误差或者是估计的误差值作为系统切换时的性能指标函数。常用的误差性能指标函数如下：

在当前时刻采用各个模型与实际对象的匹配程度来判断系统工作集中最优的控制器，选择具有积分性质的指标切换函数：

$$J_i(k) = ae_i^2(k) + b \sum_{j=1}^k \beta e_i^2(k-j) \quad (2.3)$$

其中 $e(k)$ 是模型输出与实际输出之间差值， a 表示为误差对系统的影响系数， b 表示为过去时刻对系统的影响系数， β 是过去时刻所占的权重比例， k 是过去时刻的误差对当前时刻的影响长度，它代表了系统对过去时刻的记忆长度。 $J(k)$ 的计算值表示了在当前时刻和过去的一段时间内系统的输出和模型输出的吻合度，相应的表示了当前的模型和控制器的匹配程度。

对多模型控制影响的关键三个方面：

1 模型集的建立

多模型的控制中是对全局的模型进行分解为一系列的局部模型，然后根据模型设计相应的控制器，那么多模型的建立就成为了解决多模型的一个核心问题。对系统模型的划分，被控对象数据的集划分，不同工作点的划分，通过在不同的划分模式中对输入输出数据进行建模得到当前数据集的局部模型。对模型集的划分的数量也影响这系统的系能，数量过多导致计算量大，模型集的数量过少影响系统的全局模型近似程度，需要对系统的模型进行合理的选择，才能获的满意的控制效果，这些都是在对建立模型集中应该注意的问题。

2 控制器切换稳定性分析

在对系统的控制器的选择的时候，对系统的稳定有不同程度的影响。在预测控制器中系统在不同的模型之间做切换控制的时候，由于预测函数控制是从当前时刻起对未来的一定步数内做最优控制的计算，因此在得到的控制量并不是全局最优的控制量，更不能保证系统在未来能够稳定在某个区域范围内，如何保证系统在切换前后系统都能都稳定，如何选取系统的切换函数是切换系统的关键。在系统中模型加权的时候暂时还没有实质的理论证明系统的稳定性。

3 系统的实时性

由于系统在模型进行切换或者加权时，需要消耗大量的计算时间，作为系统在每个时刻都需要对控制器和模型的输出进行计算，因此在控制器的选择时需要选择计算量少，计算方便，实时性能高的控制算法。

2.3 预测函数控制

动态矩阵控制（DMC）、模型预测控制（MPC）和广义预测控制（GPC）是预测控制的主要三大方向。在这三种预测控制中都需要通过计算系统的矩阵求解，从而使系统的计算量加大，特别是 GPC 算法中需要在每个时刻通过自适应计算当前时刻的模型参数，因此在对系统的精度要求高，控制速度快地情况下，这种算法通过复杂的计算会使系统过程变慢，限制系统的实时性能。当我们面临着这个问题时候，从而提出了预测函数控制。预测函数的输出量是由一组我们所期望的基函数的线性组合而得到。在每个时刻通过对基函数的线性加权组合所得到的控制量作用于被控对象，从而只需要求解基函数的组合系数，不用通过计算复杂的矩阵求解，从而使得系统的计算量大大的减少，提高了系统的实时控制系能，因此这种算法被广泛的应用在电机、智能机器人等对系统实时性高的快速随动系统中。

2.3.1 预测模型

模型的预测输出 $y_m(k)$ 主要是由两部分组成，一部分是零输入响应，它是由过去时刻的控制量和输出量所决定，与未来我们的输入量没有直接的影响，所以我们称之为自由响应项 $y_l(k)$ ，另一部分是零状态响应输出，它与当前时刻的

输入和未来时刻的控制量无关，我们相应称之为受迫响应项 $y_f(k)$ ，它对系统未来加入到模型中的控制量和预测的轨迹有着直接影响作用。

$$y_m(k) = y_l(k) + y_f(k) \quad (2.4)$$

受迫响应 $y_f(k)$ 是通过控制系统的未来的控制量在系统响应下的输出，而系统的控制量是由若干选定的基函数线性组合而成。通常预测轨迹的趋势和被控对象的性质决定了基函数的选取形式，基函数的选取需要考虑系统的结构。

$$u(k+i) = \sum_{n=1}^N \mu_n f_n(i), i = 0, 1, \dots, P-1 \quad (2.5)$$

其中 f_n 为计算控制量时根据系统的结构所选定的基函数，它体现了系统的变化趋势和加入的控制结构的趋势变化，对系统的变化起着关键作用。 N 为基函数的个数， $f_n(i)$ 为第 n 个基函数在 i 时刻时的采样值， μ_n 为我们通过未来的预测的轨迹趋势从而求取的系数。

2.3.2 滚动优化

在传统的控制中通过求取系统的控制量是全局最优，但是预测控制中通过对预测时间段中指标函数为控制目标，求取局部最优控制量，因此我们需要选择一组性能指标函数为控制的目标函数，从而求取系统的最优控制量。通常我们选取系统的未来的误差和控制量变化的二次性能指标函数作为系统的优化目标，其表示形式如下：

$$J(k) = \sum_{j=1}^P q_i [y_c(k+j) - y_r(k+j)]^2 + \sum_{i=1}^M r_i [u(k+i-1)]^2 \quad (2.6)$$

在求取系统中的目标函数的过程中，需要寻找一组线性加权的系数，使得系统的模型的输出最大程度的接近我们的预期规划的一条轨线，我们称这条轨线为系统的参考轨迹。为了使系统沿着我们设定的参考轨迹逐渐达到我们预期的设定值，从而以当前时刻的输出量作为依据，可以得到在预计步数中与设定值的误差变化趋势的一条曲线作为参考轨迹：

$$y_r(k+i) = [c(k+i) - y(k)](1 - e^{-jT_s/\tau}) + y(k) \quad (2.7)$$

其中 y_r 为参考曲线， $c(k+i)$ 为期望的设定值， $y(k)$ 是当前时刻过程的输出， T_s 为系统的采样时间， τ 为参考轨迹的时间常数。

2.3.3 反馈校正

通过预测模型和滚动优化求取的只是系统的开环性能，然而在系统中存在不同的干扰量。一方面由于实际过程中存在噪音的干扰，另一方面由于过程和模型在匹配的过程中存在模型误差，因此仅仅是通过开环系统来控制的系统会存在许多不利的地方，因此需要通过反馈的环节减少干扰带来的不必要的误差。在反馈矫正中只能测量当前时刻系统的输出量，而无法得到未来时刻的输出量，

因此可以对当前时刻模型的输出值与实际的测量值之间的误差来补偿未来时刻系统的误差项。

$$e(k+i) = y(k) - y_m(k) \quad (2.8)$$

在预测控制中参数的选择对系统性能起着关键性的作用。基函数的选取是参考轨迹的趋势和被控对象的性质所决定的，通常情况下的基函数都能满足要求，在系统中采样时间 TS 在满足香农定理的前提下选取其值，它对系统的抗干扰和动态性有着密切的联系，当系统的抗干扰性能高，动态性能快时需要使采样时间减少，采样频率提高，增加系统的精度。在预测函数中关键的两个取值分别为预测步长 P 和系统的柔滑系数，P 的取值越大所对应的系统的响应速度减慢，其稳定性随之增加，而系统的柔滑系数影响着系统的跟踪速度的快慢，柔滑系数越小其跟踪速度就越快，相应的就会是使系统产生超调量，所以在系统的参数的调节时需要综合考虑系统的预测步长和柔滑系数对系统的动态性能和跟踪性能的影响，通常在先调节预测步长的情况下，再调整柔化系数使系统达到预计的效果。

2.4 电加热炉的系统简介

2.4.1 SXF-4-20 电加热炉的结构

SXF-4-10 电加热炉的温度控制系统由温度的采集，上位机程序处理模块和执行模块三部分组成。其中温度采集模块主要是采集电加热炉中温度数据，并负责把电加热炉中采集到的温度值转换为电压信号传送到上位机处理模块进行处理。当测量环境的温度不同，采集到的电压信号也不相同。上位机处理模块主要通过温度采集的模拟信号转换为工控机能够识别的数字信号，并通过上位机进行程序编写，控制温度执行模型进行工作。当温度执行模块收到上位机发送过来的信号时，对电加热炉进行加热，从而使电加热炉中温度持续发生变化。

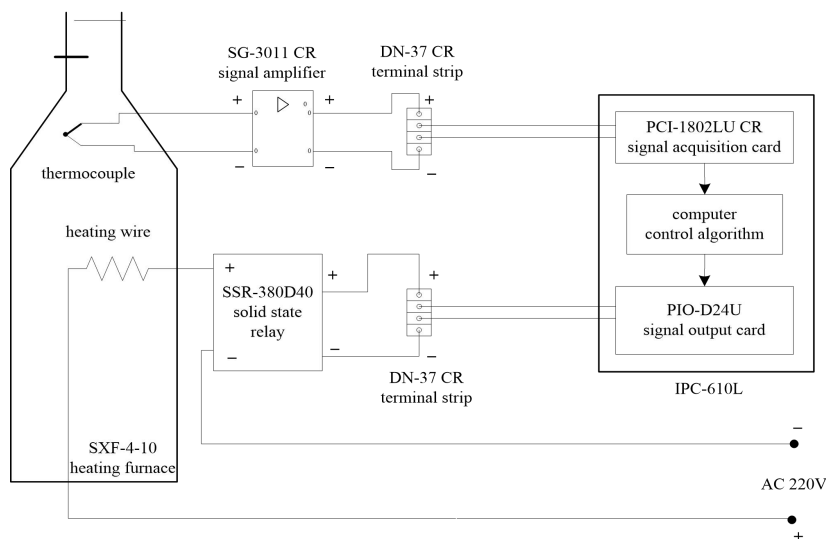


图 2.1 电加热炉的组成



2.2 电加热炉的实物

本文基于电加热炉控制系统 SXF-4-10 为控制的目标,可以把它主要划分为温度采集模块,上位机算法处理模块,温度执行模块三个不同的部分。

2.4.2 SXF-4-20 电加热炉控制系统

(1) 温度采集模块

温度处理模块主要是由 K 型热电偶和电压放大器两部分组成。其中 K 型热电偶是一种工业控制中常用的温度检测器,它的主要特点是测量温度的跨度范围大,无论环境有多恶劣都能准确的采集到合理范围内的数据,结构简单,在温度变化时电偶两端能够快速产生电压信号。热电偶的测温原理是基于热电效应。K 型热电偶通过在传感器两端的温度产生一个电压差由于热电偶两端测量的电压很小只有几十毫伏到几百毫伏之间,而上位机处理模块接受到要处理的电压为 0-5v 之间,因此在上位机和热电偶之间需要加入了一个信号放大器。通过在热电偶和上位机处理模块之间连接一个 SG-3011 放大器,通过放大器的连线可以调整信号的放大倍数,使得热电偶输出的电压值调整到符合工控机测量的范围。

(2) 上位机算法处理模块

上位机处理模块主要是 PCI-1802LU 转换器,PIO-D24U 转换器和程序处理三部分组成。当温度采集模块采集到的模拟信号通过 PCI-1802LU 转换器可以转换为上位机能够处理接受的数字信号。上位机通过程序设定,在规定的采样时间

中采集转换后的数字信号得到当前电加热炉中的温度值，通过相应的算法控制温度执行器对电加热炉进行加热，将计算得到的控制量转化为对温度执行模块的加热量的占空比信号。

(3) 温度执行模块

温度执行模块主要通过继电器进行控制，通过在单位时间内对电加热炉加热的时间提供不同的加热量。其中电流流过电阻丝时，电阻丝在热电感应的条件下产生热量，从而升高电加热炉炉内温度，达到加热的效果。通过在继电器输入端的电压值大小来判断加热炉的加热状态，从而使电加热炉的温度上升。当输入电压为 5V 的情况下，输出端是闭合状态从而有电流流过此时对电加热炉进行加热，否则输出端是断开状态电流为零，停止对电加热炉加热。在周期的时间内通过对继电器的通断时间的调节可以控制电加热的加热时间，实现对电加热炉温度的输入量的控制。

2.5 本章总结

本章中主要是对多模型从不同的角度进行简要的介绍，对模型的建立的方法的介绍，对模型的结构从不同的方式进行了简要的规划。最后通过对电加热炉的原理进行了说明，本章主要是对下文中的电加热炉的控制进行了总的概括和了解，为下面对电加热炉的控制提供了简要的支持。

第3章 内模PID控制系统

3.1 引言

PID 控制算法由于简便, 容易操作等优点, 因此被广泛的应用到了实际的工业控制中。虽然 PID 控制器能够解决工业控制中的大部分的控制问题, 但是对一些非线性, 纯滞后系统就会突显出它的不足之处, 因此传统的 PID 的参数镇定方法已经不能满足我们对系统的控制要求。随着现代控制理论的发展, 出现了一些新型的 PID 控制器, 它们要从模型的角度出发分析模型中潜在的性能, 通过模型的参数对 PID 控制器进行设计。在随后的发展中出现了内模 PID, 它通过把模型划分为稳定部分和不稳定部分, 根据不同的性能指标参数对模型和前向通路的近似为一个 PID 的控制结构从而设计 PID 的参数。内模 PID 作为一种新型的控制算法能够对提高系统鲁棒性和抗干扰能力, 减少系统的时间滞后等问题, 并且由于模型的参数整定可调, 所以在工业控制中被广泛应用。由于在电加热炉温度的控制系统中时间滞后和非线性突出, 用传统的 PID 控制器已经达不到我们预测的要求, 因此本文利用内模 PID 控制器对 SXF-4-10 电加热炉进行设计。

3.2 PID 控制的工作原理

3.2.1 PID 的实现原理

PID 是一种线性控制器, 它通过测量被控对象的当前时刻的输出值与设定值之间的偏差, 对控制器进行设计。控制器与被控对象一起构成一个闭环的反馈回路, 通过对回路中的偏差分别进行比例、微分、积分计算最后的到控制量, 因此控制器的输入形式可以描述为:

$$u(t) = k_p[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (3.1)$$

其中 $e(t)$ 为实际输出和设定输出之间的偏差, k_p , T_i , T_d 分别为系统的比例环节系数、积分环节系数和微分环节系数。

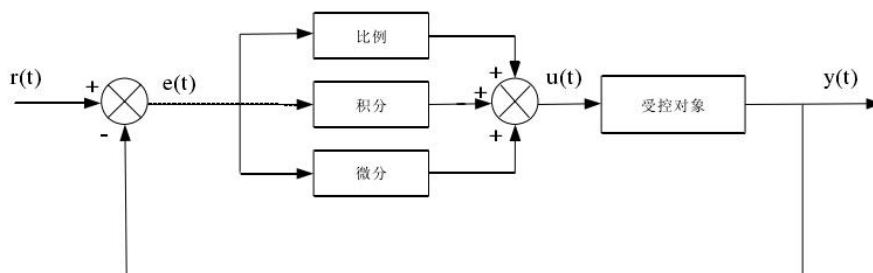


图 3.1 PID 控制结构

(1) 比例环节

比例环节的作用是对实际输出与预计值之间的偏差做最直接的处理方式，它通过比例环节系数把偏差放大，然后直接作用于被控对象，使偏差朝减小的趋势变化，从而加快了系统到达预计值的状态，因此比例环节对系统的性能起着关键作用。比例系数影响着系统的响应速度，静态偏差，超调量。比例系数偏大时会使系统的上升速度加快，减少了静态偏差，但也加剧了系统的超调量。相反比例系数过小会使反应速度减慢，会存在静态误差，但是系统也不会产生超调量。因此在调节参数时，放大系数应作为首要调节对象。

(2) 积分环节

积分环节主要通过反应过程中对偏差量的叠加，使偏差在时间上的累积。引入积分环节是为了消除系统的稳态误差，当系统存在误差的时候，由于误差在时间的积分作用下会消除系统之间的误差，从而提高了系统的精度。但是积分现象偏大时会出现过积分饱和现象，积分时间常数 T_i 越小积分现象越强烈，会使系统的稳定性能降低，动态响应速度变慢，因此积分环节也是一个重要的调节参数。

(3) 微分环节

微分环节主要是通过连续两次偏差的变化量调节系统的性能，从而在偏差到来之前就能够预计到偏差的存在，从而提前调节系统的偏差，因此微分环节具有预测的功能。它的这种提前预测可以减少系统的动态的偏差，从而使系统的响应速度加快，减少了过程中的偏差加强了系统的稳定性能。

3.2.2 PID 参数的整定方法

(1) Ziegler – Nichols 方法

此方法是在实验数据的基础上得到的，根据系统的阶跃响应曲线整定系统的 PID 参数。但是这种方法的优点是通过对系统的阶跃输入的响应曲线就可以得到系统中所需要的参数，因此很快就能计算得到 PID 的参数比较方便、易操作，不需要经过复杂的计算。因为此方法的要求比较特殊，所以利用的场合比较少并不能在工业生产中推广出来，其中 $a = K\tau / T$ 。

表 3-1 Z-N 方法

控制器类型	K_p	T_i	T_d
P	$1/a$		
PI	$0.9/a$	3τ	
PID	$1.2/a$	2τ	$\tau/2$

(2) *Cohen-Coon* 方法

此方法主要是通过通过在系统的阶跃响应的曲线下,使系统的连续的两个超调量的衰减率为 4:1,它是 *Ziegler-Nichols* 的一种改进方法。在响应曲线下可以得到该方法的两个关键参数 $a = K/\tau$, $b = \tau/T + \tau$,从而可以计算的到 PID 的参数值。该方法存在的弊端就是调节系统的参数使衰减比率为 4:1 的过程比较复杂,耗时,特别是在工业过程中时间增益比较大时更加突出。在工程的应用中并不能快速的调节系统的参数使得衰减比率达到我们的预期的过程。当系统存在大延迟环节的情况下会使系统的超调量过大,既在满足衰减比率的情况下,达不到预期的结果。

表 3-2 C-C 方法

控制器类型	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{1}{a}(1 + \frac{0.35b}{1-b})$		
PI	$\frac{0.9}{a}(1 + \frac{0.92b}{1-b})$	$\frac{3.3-3b}{1+1.2b}L$	
PD	$\frac{1.24}{a}(1 + \frac{0.13b}{1-b})$		$\frac{0.27-0.36b}{1-0.87b}L$
PID	$\frac{1.35}{a}(1 + \frac{0.18b}{1-b})$	$\frac{2.5-2b}{1-0.39b}L$	$\frac{0.37-0.37b}{1-0.81b}L$

(3) 内模 PID

内模控制是通过系统的模型对控制器参数进行设计的,属于一种先进控制。因为它的设计结构简单、控制性能好、性能分析简单等优点被广泛的应用在工业生产中。内模控制作为一种实用的先进控制算法,与传统的 PID 控制器相比只需要选定一个滤波参数,就能够使系统动态品质和鲁棒性折衷。但是其在整定参数的工程中比其他的较为复杂,需要获得对象的模型参数,在参数的理论情况下才能推测到 PID 的整定参数。

3.3 内模控制 PID

内模控制是建立在对内部模型结构了解的情况下,针对不同的系统的结构

设计其相应的系统参数，因此首先要建立被控对象的模型，然后根据模型的参数整定 PID 的系数，从而达到设计控制系统的目的。本文主要是针对 SXF-4-10 电加热炉中温度控制对象作为控制目标，其模型结构通常认为是一阶惯性纯滞后（FOPDT），因此可以选择工业中常用的两点法建立 SXF-4-10 电加热炉的模型参数。

3.3.1 两点法建模

两点法是一种机理的建模方法[32]，通过对系统的时域响应曲线进行分析得到的结果。系统对象过程的性能需要通过其内部模型反应而来，因此得到过程对象的模型是在工业控制中，由此可以描述为 FOPDT：

$$G(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{K}{Ts+1} e^{-\tau s} \quad (3.2)$$

其中 $G(s)$ 为传递函数， $y(s)$ ， $u(s)$ 是通过对过程的时域内输入 $u(t)$ 和输出 $y(t)$ 的拉普拉斯变换， K 是模型过程的增益， T 是系统的时间常数，由系统本身所决定的需要辨识的数据， τ 是系统的延迟环节。

FOPDT 的时域响应可以描述如下：

$$y(t) = \begin{cases} 0 & , t < \tau \\ K - Ke^{-\frac{t-\tau}{T}} & , t \geq \tau \end{cases} \quad (3.3)$$

其中当系统达到稳定后可以表述为 $y(\infty)$ ，其描述了系统稳定后的输出值。 U 是系统阶跃输入的数值，模型的过程增益可以通过系统达到稳定后输出值与输入值的比值表示 $K = \frac{y(\infty) - y(0)}{U}$ 。从系统中选取增益比例系数分别为 0.39 和 0.63 的两个特殊点，通过对系统的响应曲线可以求取：

$$\begin{aligned} y(t_1) &= 0.39(y(\infty) - y(0)) + y(0) \\ y(t_2) &= 0.63(y(\infty) - y(0)) + y(0) \end{aligned} \quad (3.4)$$

因此可以得到系统时间常数 T 和系统的延迟时间 τ

$$\begin{aligned} T &= 2(t_2 - t_1) \\ \tau &= 2t_1 - t_2 \end{aligned} \quad (3.5)$$

3.3.2 内模整定 PID 参数

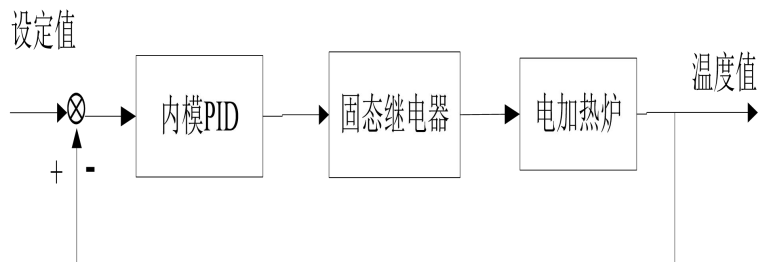


图 3.2 内模 PID 的控制结构

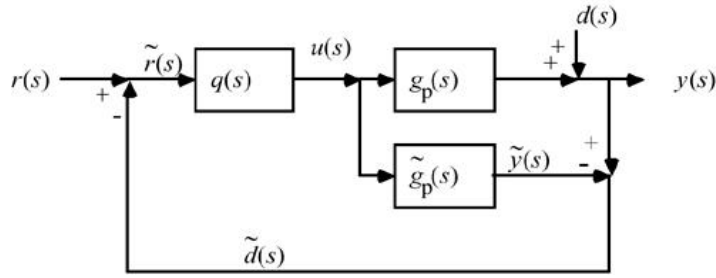
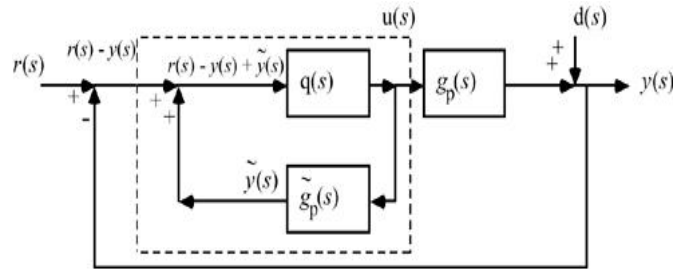


图 3.3 内模控制器

内模的控制器结构可以认为系统是由前向通道的控制器 $q(s)$ ，系统的对象 $g_p(s)$ 和对系统对象建立的模型 $\tilde{g}_p(s)$ 三部分组成（如图 4-3 所示）。由此可以对系统进行变换可以得到 PID 控制结构的系统（如图 4-4 所示）。



3.4 内模转换的 PID 控制器

通过变化后的模型可以得到 PID 控制器与内模控制间的关系：

$$G(s) = Kc(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s), \quad G(s) = \frac{q(s)}{1 - \tilde{g}_p(s)q(s)} \quad (3.6)$$

首先对过程模型 $\tilde{g}_p(s)$ 进行分解， $\tilde{g}_p'(s)$ 可分解成两项： $\tilde{g}_{p+}(s)$ 和 $\tilde{g}_{p-}(s)$

$$\tilde{g}_p(s) = \tilde{g}_{p+}(s) * \tilde{g}_{p-}(s) \quad (3.7)$$

其中 $\tilde{g}_{p+}(s)$ 是一个全通滤波器函数， $\tilde{g}_{p+}(s)$ 包含了所有时滞和右半平面零点， $\tilde{g}_{p-}(s)$ 是具有最小相位特征的传递函数，是稳定且不包含预测项。

内模控制器的可以近似为：

$$q(s) = [\tilde{g}_{p-}'(s)]^{-1} f(s) \quad (3.8)$$

因此可以得到 PID 的参数与内模控制器的关系：

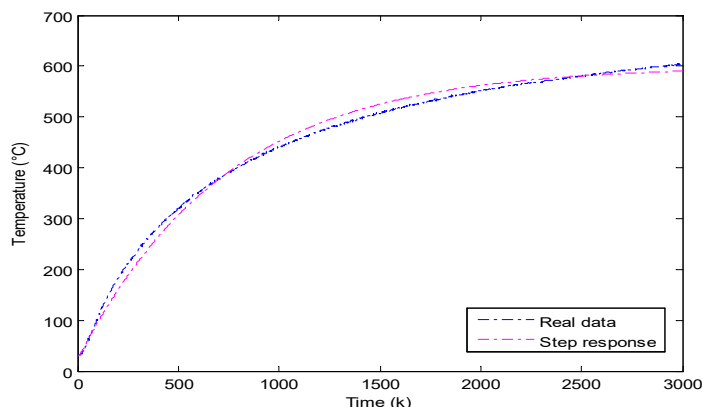
$$G_c(s) = \frac{q(s)f(s)}{1 - G_{p-}(s)G_{p+}(s)G_{p-}^{-1}(s)f(s)} = \frac{q(s)f(s)}{1 - G_{p+}(s)f(s)} = \frac{(\tau s + 1)(0.5 \tau s + 1)}{K(\lambda + 0.5 \tau)s} \quad (3.9)$$

$$Kc = \frac{T_s + 0.5\tau}{K(\lambda + 0.5\tau)}, \quad T_i = T_s + 0.5\tau, \quad T_d = \frac{T_s \tau}{2T_s + \tau}$$

3.4 内模 PID 在电加热炉中的应用

在 SXF-4-10 电加热炉中，通过对固态继电器给予一个恒定不变的占空比，占空比的时间长度决定了对电加热炉的加热时间，从而得到了对电加热炉的加热量的大小。在实验中通过对电加热炉一个恒定的占空比为 20%，直到电加热炉中的温度不再发生较大的变化。采集到电加热炉中的温度的数值（如图所示），直到电加热炉中的温度稳定时，利用两点法建立电加热炉的模型可得：

$$G(s) = \frac{28.5}{7350s+1} e^{-100s} \quad (3.10)$$



3.5 电加热炉的阶跃响应

由于系统存在滞后环节需要对滞后环节进行一阶 PADE 近似可得：

$$e^{-\tau s} = \frac{-0.5\tau s + 1}{0.5\tau s + 1} = \frac{-50s + 1}{50s + 1} \quad (3.11)$$

因此可以得到系统在近似后的模型参数为：

$$G_p(s) = \frac{K}{T_s + 1} e^{-\tau s} = \frac{K(-0.5\tau s + 1)}{(T_s + 1)(0.5\tau s + 1)} = \frac{28.5(-50s + 1)}{(7350s + 1)(50s + 1)} \quad (3.12)$$

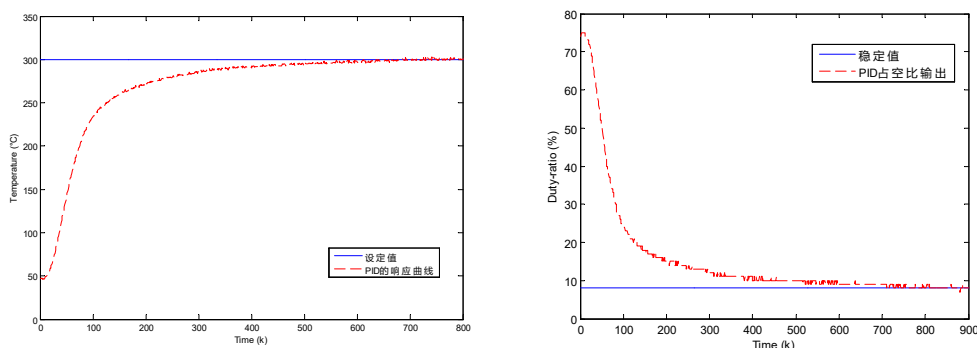
通过对模型参数划分为稳定的部分和不稳定的部分可以描述为：

$$G_{p+}(s) = \frac{28.5}{(7350s + 1)(50s + 1)}, \quad G_{p-}(s) = -50s + 1 \quad (3.13)$$

最后计算得到 PID 的参数：P=2.74, i=0.0036。

通过内模整定的参数代入到 PID 控制器的参数中，由此电加热炉的 PID 参数设计完毕。通过对电加热炉中温度从室温到达设定温度值（300 摄氏度）的时候，采集系统中温度的变化情况，可以得到的数据用图 3.6 表示为：

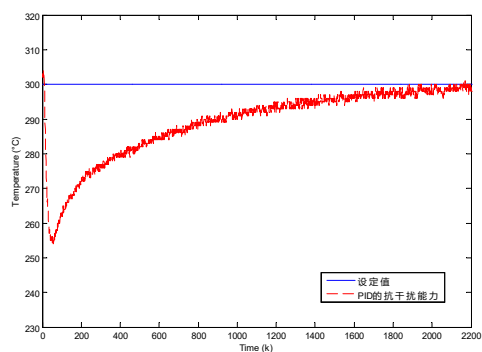
从图中我们发现系统从室温达到设定值的过程比较平稳，没有超调量。但是系统的响应过程比较缓慢，经过了 100 分钟才使系统到达设定值。



3.6 内模 PID 的跟踪曲线

当系统达到稳定值后，通过把电加热炉的炉门打开一定的角度，使电加热炉产生一个固定不变的干扰量，可以从图中可以发现系统的响应缓慢，需要经过 6

个小时左右才能会再次回到设定值，因此系统的抗干扰性能比较弱。



3.7 内模 PID 的抗干扰性能

3.5 本章总结

本文主要是针对 PID 的参数对系统的性能起着关键性的作用，要通过对参数的设定使得 SXF-4-10 电加热炉的温度能够快速的跟踪到目标的设定值，并且在温度受到干扰的情况下能够使温度快速的恢复到初始的状态。在 PID 的参数调节中内模 PID 作为一种以被控对象的模型为参考，兼顾了系统的快速性和鲁棒性折衷的算法，因此作为一种优化被控对象的算法应用到了 SXF-4-10 电加热炉中，并作为一种串级控制为下文中提供了很好控制的思想。

第 4 章 多模型的预测函数控制系统

4.1 引言

由于预测控制是基于系统的模型对未来的输出进行预测，能够有效的消除系统的延迟环节，并且对模型的精度要求不高的情况下都能够得到有效的控制，因此被认为是一种新型的工业控制被应用到生产过程中。温度控制系统是一个延迟，大惯性系统，用传统的 PID 不能达到我们的需求，而预测控制能够有效的解决上述问题。由于温度控制是一个大范围工况并且呈现出一定的非线性特征，从而我们可以通过对其建立局部的线性模型，通过模型切换的方式在各个模型中进行切换控制。本章主要是针对 PID 控制不能快速，有效的把 SXF-4-10 电加热炉中温度这一个被控对象控制到预期的效果，从而设计了一种多模型的预测控制函数的方法。通常在电加热炉中的温度控制，从而把温度的跨度范围分化为若干个小的控制区域，从而减小了模型与实际被控对象的误差，提高了模型的精确度，改善系统的控制效果。最后通过把这种算法应用到 SXF-4-10 电加热炉中通过与传统的控制算法的进行对比。从实验的数据表明此方法的优缺点。

4.2 多模型预测函数控制

4.2.1 模型集的建立

传统的预测控制是针对线性的被控对象，而在非线性系统中我们不能精确的获得对象的模型参数，并且模型参数会随着工作环境的不同会发生变化，但是系统的性能在局部却表现出其线性特征，因此可以按照其工作区间的范围划分不同的工作区域，将系统的局部模型近似转换为线性模型。从而通过设计局部模型的控制器，最后通过对每个模型的控制器进行相应的处理，使得全局的控制系统性能达到最优。由于电加热炉中的温度控制量是一个只随着电加热炉中的加热量的多少来变化的系统量，因此对模型的温度划分只能从温度的变化范围出发，按照不同温度的区域来设计模型的工作范围，从而建立 SXF-4-10 电加热炉的多个局部模型。

本文通过电加热炉控制系统建立的多个模型的方法，通过内模 PI 控制器的温度设定值进行设定，从而使电加热炉中的温度能够稳定在某一个设定的温度范围内，对电加热炉在到达稳定的过程中采集电加热炉中温度的变化，设定电加热炉模型温度的局部的工作范围。由于电加热炉中温度的工况范围为 $[0, T]$ ，按照模型的个数 N 对温度值进行均匀的划分为 N 个不同的工作区间，其中第一

个工作范围的温度区间为 $[0, T/N]$, 相应的第二个工作范围区间为 $[T/N, 2T/N]$ 依次可以得到不同的工作区间。通过内模 PI 控制器整定的电加热炉后, 通过设定其相应温度工作区间的范围, 采集电加热炉中的温度值和占空比例, 最后利用两点法分别建立其相应工作区间的模型, 因此可以得到每个模型的传递函数形式为:

$$G_i(s) = \frac{K_i}{T_i s + 1} e^{-\tau s} \quad (4.1)$$

其中 $G_i(s)$ 为第 i 个模型的传递函数, K_i , T_i 分别为模型的过程增益系数和时间常数。

4.2.2 预测函数控制器的设计

(1) 模型输出的预测

在工业控制中电加热炉的模型通常考虑为:

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s} \quad (4.2)$$

其中 K 为系统的增益系数, T 为模型的时间常数, τ 为系统的滞后时间。

当只考虑惯性环节时, 模型可以描述为:

$$G(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{K}{Ts + 1} \quad (4.3)$$

在采样时间 T_s 和零阶保持器的作用下, 转换为离散的形式可得:

$$y_m(k) = a \cdot y_m(k-1) + K \cdot (1-a) \cdot u(k-1) \quad (4.4)$$

其中 $a = e^{(-T_s/T_m)}$, $y_m(k)$ 为系统离散后的输出值, $u(k-1)$ 为系统所对应的输入值。

与传统的模型预测控制不同的是, 预测函数控制是可控的输入结构。输入量是由若干个设定的基函数的线性的组合而成, 它直接影响着系统的性能结构, 通常选择基函数为阶跃函数:

$$u(k) = u(k+1) = \dots = u(k+H-1) \quad (4.5)$$

根据系统离散化后的模型和选取的基函数, 因此可以推算出系统在 H 步后的预估的输出为:

$$y_m(k+H) = a^H \cdot y_m(k) + K_m \cdot (1-a_m^H) \cdot u(k) \quad (4.6)$$

其中 $y_m(k+H)$ 是模型在预测 H 步后的模型输出。

(2) 系统误差的校正

在实际的情况中, 由于模型的失陪, 系统中的噪音, 外部的干扰等的影响。实际过程的输出与预测模型的输出之间存在误差, 需要对模型的输出误差进行补偿。通过对当前时刻系统的误差对未来的输出进行校正可得:

$$e(k) = y_p(k) - y_m(k) \quad (4.7)$$

其中 $e(k)$ 是当前时刻系统模型与对象之间的误差, $y_p(k)$ 当前对象的输出值,

$y_m(k)$ 是当前时刻模型的输出值。

(3) 预测函数控制器的设计

在控制过程中为了使实际的输出按照我们预计的参考轨迹运行，而不会使系统在运行中出现控制量的剧烈变化，因此可以选取预估曲线的参考轨迹为：

$$y_r(k+H) = y_p(k) + (c(k) - y_p(k)) [1 - e^{(-H \frac{T_s}{T_r})}] \quad (4.8)$$

其中 $y_r(k+H)$ 是参考轨迹 H 步后的预估输出， $c(k)$ 是设定值， $y_p(k)$ 是对象的当前时刻的输出值， T_r 是参考轨迹的响应时间常数， $\lambda = e^{(-T_s/T_r)}$ 为系统的柔化系数。

通过滚动优化求取在当前时间内 H 步中最优的控制量作为当前的输出，因此选取性能指标函数为：

$$J = \min(y_m(k+H) + e(k) - y_r(k+H))^2 \quad (4.9)$$

可以通过计算得到最优的控制输入为：

$$u(k) = \frac{(c - y_p(k)) \cdot (1 - \beta^H) + y_m(k)(1 - a_m^H)}{K_m \cdot (1 - a_m^H)}$$

由于系统是存在延迟环节，可以通过 SMITH 预估器的对系统的延迟环节进行补偿。

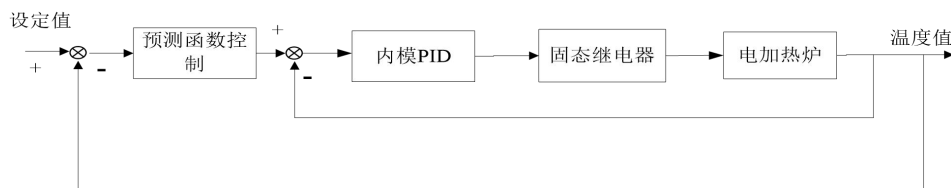
$$y_p(k) = a \cdot y_p(k-1) + K \cdot (1-a) \cdot u(k-1-d) \quad (4.10)$$

通过 SMITH 预估器对系统进行补偿后可得：

$$y_{ps}(k) = y_p(k) + y_{ms}(k) - y_{ms}(k-d) \quad (4.11)$$

因此可以得到补偿后的当前时刻的控制量为：

$$u(k) = \frac{(c(k) - y_{ps}(k)) \cdot (1 - \beta^H) + y_{ms}(k)(1 - a_m^H)}{K(1 - a_m^H)} \quad (4.12)$$



4.1 串级预测函数结构

4.2.3 多模型的切换

当系统在工作中会跨过不同的几个工作区间，因此当温度在跨过不同的工作区间的时候，其相对应的模型会发生变化，其控制器也随之改变。在不同的工作区间建立相应模型的预测函数控制器也随着发生变化，当系统工作在不同的工作区间的时候，不仅要调节模型的参数，其控制器也需要进行调节。当温度跨过当前的工作区间到达另一个工作区间的时候，只需要做一次硬切换使当前工作的控制器切换到对应区间的控制器中，从而调节系统的控制性能。

4.3 电加热炉的多模型预测函数控制

4.3.1 电加热炉模型的建立

本文主要针对 SXF-4-10 电加热炉的实际对象进行实验，由于实际工业中的温度通常设定在 300° C，因此本文在进行实验时，最终的温度控制目标设定在 300° C。首先对电加热炉的工作温度的区间进行划分，通常实验室的温度在 20 到 30 摄氏度之间，对温度的区域划分过大将带来实验的数据的计算量偏大，会使得系统的实时控制能力降低。因此本文主要通过对电加热炉的工作范围划分为 0-150 摄氏度和 150-300 摄氏度两个不同的工作区间。

通过对内模 PI 的控制器的设定值分别设定为 150 和 300，采集电加热炉中的温度分别从室温达到 150 摄氏度稳定时的数据建立模型 1 和温度在 150 摄氏度到 300 摄氏度温度稳定时建立模型 2，分别对采集到的两组数据用两点法建立实际的模型如图 4.2 所示，可以计算模型参数分别为：

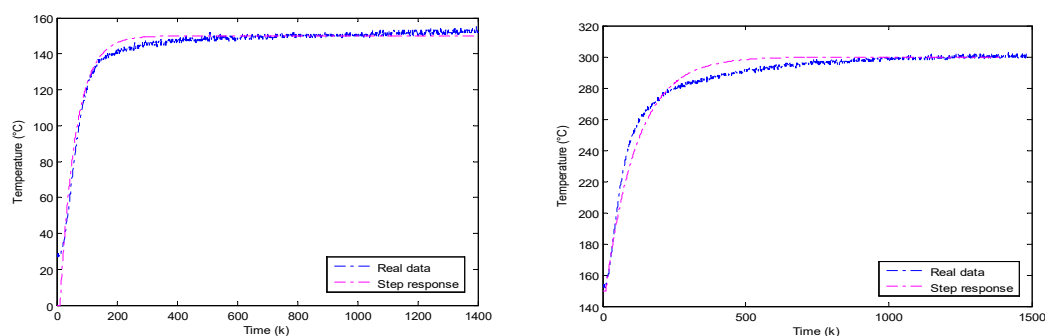
模型 1 的参数为：

$$G(s) = \frac{1}{520s + 1} e^{-100s} \quad (4.13)$$

模型 2 的参数为：

$$G(s) = \frac{1}{1100s + 1} e^{-100s} \quad (4.14)$$

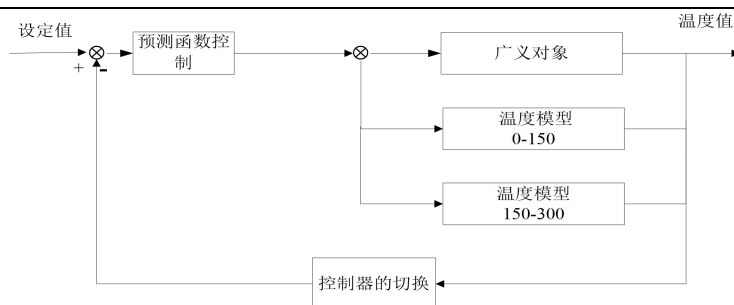
通过对建立好的模型进行阶跃响应输出和电加热炉的温度值得输出进行比较，并且对系统的参数进行微调使得系统的参数尽可能的和实际的输出值相吻合得到如图所示：



4.2 多模型集的建立

4.3.2 电加热炉控制器的设计

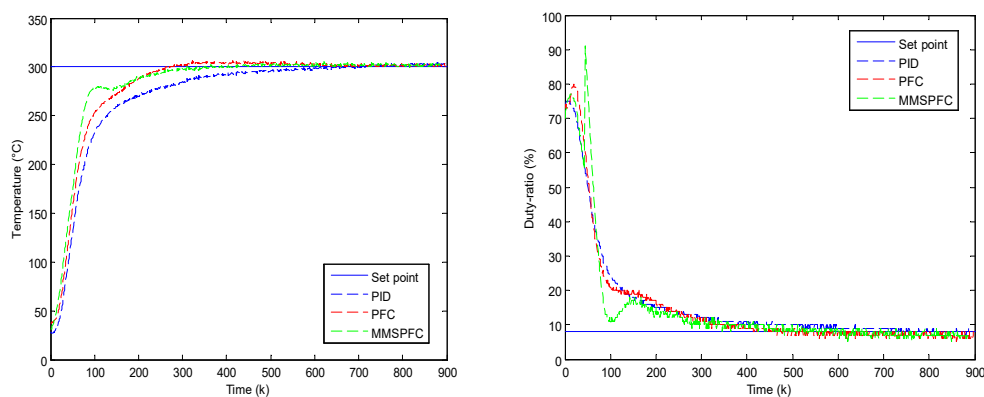
由于在设计控制器的时候，模型的参数对控制器中参数选择有一定的作用，需要对模型中的参数进行选取，为了比较方便并且对实验的数据进行不断的调整，最后选择的预测步数为 40，柔化系数为 0.95。由于最后的设定的温度为 300 摄氏度，而室温是 20 摄氏度左右，当温度从室温到达稳定的时候需要进行一次模型的切换，从而导致了系统中的控制器也做相应的变化。当温度超过 150 摄氏度的时候需要执行一次硬切换调整控制器。



4.3 多模型的控制策略

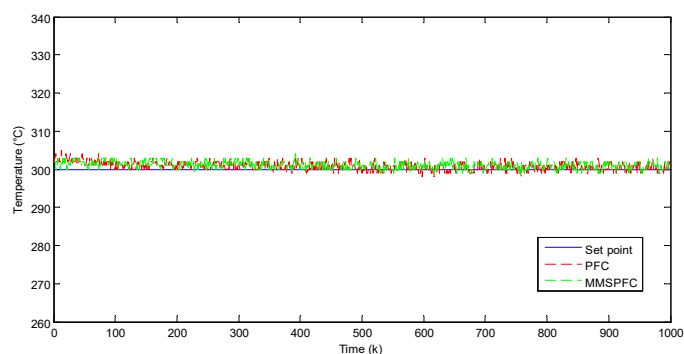
4.3.3 电加热炉的应用结果

最后本方法通过与单模型的预测函数控制，PID 控制器对 SXF-4-10 电加热炉的控制效果进行比较。图 4-3 左代表的是温度从室温达到设定值的响应曲线，图 4-3 右边代表的是相应时刻的控制量的大小，从中可以发现传统的 PFC 控制在 48 分钟左右达到设定的曲线，本文经过 54 分钟左右才到达设定的曲线，而传统的 PID 控制则需要 110 分钟才能到达。然而在 PFC 控制中温度在到达设定的曲线后会产生一个小量的超调，并且需要经过很久才能使得超调量消失。



4.4 系统的跟踪能力

为了比较系统在达到稳定后的性能，通过在系统达到稳定后从中抽取 1000 组数据对系统在稳定后的平稳性做了一次对比如表 4.1 所示。表中的数据分别从平均值，最大值，最小值，系统的方差和标准差五个不同的方面可以看出，本文提出的方法优于 PFC 控制。

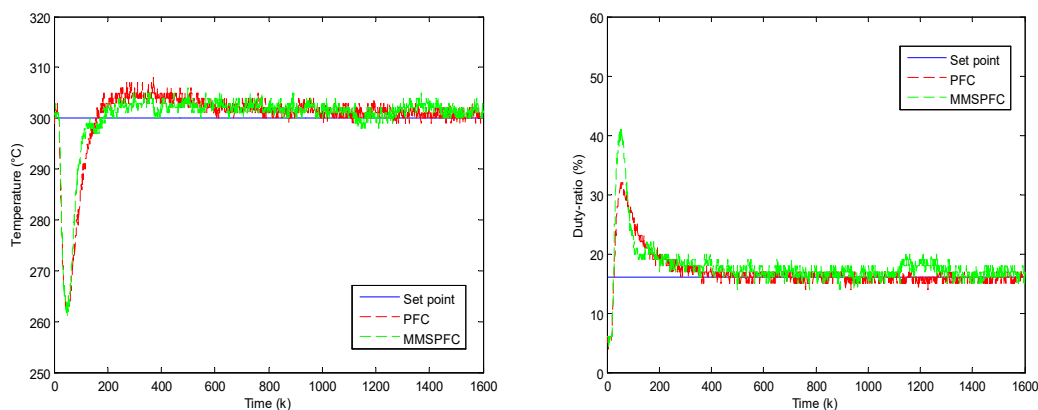


4.5 系统的稳定性

4.1 系统稳定的比较

algorithm	Average value	Maximum value	Minimum value	variance	Standard deviation
MMSPFC	301.11	303	299	0.969045	0.80593
PFC	300.80	305	298	1.16316	0.8948

系统的跟踪性能和稳定性只是评判控制器好坏的一个性能指标，系统的抗干扰能力也是作为评价系统好坏的一个很重要的性能指标，因此当系统达到稳定后本文通过对电加热炉打开固定的角度（每次试验角度相同）从而使电加热炉产生一个恒定的干扰量。经过观察电加热炉中温度的变化和计算的到的占空比的变化（如图 4-5 所示）。可以看出本文提出的算法比 PFC 更加快速的再次到达设定，但是到达设定之后都会再次产生一个超调量，并经过一定时间才回到设定值，因此可以从以上的性能综合判定出本文提出的方法整体是最优。



4.6 系统的抗干扰能力

4.4 本章总结

本文主要是提出了一种多模型的预测函数控制方法并应用到了 SXF-4-10 电加热炉中。该方法主要是针对电加热炉中温度这一个被控量的非线性特征，通过对电加热炉的全局模型进行分解为局部的线性模型，根据不同区间的模型设计控制器，从而改善了 SXF-4-10 电加热炉的控制效果。最后通过电加热炉实验的比较，表明本文提出的多模型预测控制比传统的预测函数控制性能更优。

第 5 章 分数阶的多模型温度控制系统

5.1 引言

在预测函数控制中,模型的精确性能直接影响着系统对未来预测输出,因此如何提高模型的精确性是温度控制系统中一个需要考虑的问题。分数阶的系统是在整数阶的理论基础之上演变而来,它将整数系数用分数来代替,从而可以把现实中的许多整数阶的对象无法精确描述的过程用分数阶的形式来替代。由于分数阶的微积分含有一个拟微分算子,从而使得系统具有记忆性和遗传性,以及拥有局部的非线性的特征,因此许多物理过程和动态系统可以通过用分数阶微积分方程进行拟合。在利用整数阶模型存在精度的误差时,可以通过对其建立分数阶的微分方程来代替整数阶的系统过程从而提高了系统的模型的精度,弥补了整数阶控制系统的不足。本文主要是针对温度控制系统在工作区域范围内建立的模型的精度不高的情况下提出了一种分数阶的多模型预测函数控制方法,通过在每个工作区范围内建立的分数阶模型,然后利用一种数值求解的 Oustaloup 近似方法将分数阶的系统转换为高阶整数阶系统,最后利用 SXF-4-10 电加热炉设计预测函数控制器,并利用在温度控制系统中。通过与常规的方法进行对比,显示了分数阶的控制系统优越的性能。

5.2 分数阶模型的性质

5.2.1 分数阶微积分的定义

(1) *Riemann – Liouville* 微积分的定义

根据微积分中的多重积分可得:

$${}_a D_t^{-n} f(t) = \frac{1}{(n-1)!} \frac{d^n}{dt^n} \int_a^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{1-n}} d\tau, t > a \quad (5.1)$$

将其演化到分数的情况下,可得到 *Riemann – Liouville* 分数阶的定义为:

$${}_a D_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(m-\alpha)} \frac{d^m}{dt^m} \int_a^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-m+1}} d\tau, t > a \quad (5.2)$$

其中 $f(t)$ 是定义在 (a,b) 上可积函数, $a > 0$ 且 $n-1 \leq \alpha < n$, $\Gamma(z) = \int_0^\infty e^{-t} t^{z-1} ds$ 为欧拉伽马函数。

(2) *Grünwald – Letnikov* 微积分定义

根据整数阶的导数的极限定义可得:

$$f^{(n)}(t) = \lim_{h \rightarrow 0} h^{-n} \sum_{j=0}^n (-1)^j \binom{n}{j} f(t-jh), t > a \quad (5.3)$$

通过对其极限定义演化到分数阶的情况下可得 *Grünwald – Letnikov* 分数阶的定义:

$${}_a D_t^\alpha f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^\alpha} \sum_{i=1}^{[(t-a)/h]} (-1)^i \binom{\alpha}{i} f(t-ih) \quad (5.4)$$

其中, $f(t)$ 是定义在 (a, b) 上可积函数, $a > 0$ 且 $n-1 \leq a < n$, a 初始状态时间, h 为采样的步长, $[]$ 是对数取整操作, 为了方便计算

$$S_j = \binom{\alpha}{j} = \frac{\alpha(\alpha-1)\cdots(\alpha-j+1)}{j!}, \quad S_0^{(\alpha)} = 1, S_j^{(\alpha)} = (1 - \frac{\alpha+1}{j}) S_{j-1}^{(\alpha)}.$$

(3) *Capotu* 分数阶微分定义

通过调换 *Riemann – Liouville* 中微积分的次序, 可得 *Capotu* 分数阶定义:

$${}_a D_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(m-\alpha)} \int_a^t \frac{f^m(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-m+1}} d\tau \quad (5.5)$$

5.2.2 分数阶的数值处理方法

Oustaloup 近似方法可以将分数阶模型在设定的频域内整数近似, 数值化处理为整数阶模型:

$$S^\alpha \approx K_\alpha \prod_{n=1}^N \frac{S+W_n'}{S+W_n} \quad (5.6)$$

其中, α 为分数阶微分阶次, $0 < \alpha < 1$, N 为选定的近似阶次, $K_\alpha = W_h^\alpha$, $W_n' = W_b W_u^{(2n-1-\alpha)/N}$, $W_n = W_b W_u^{(2n-1+\alpha)/N}$, $W_u = \sqrt{W_h / W_b}$, W_h 和 W_b 分别为拟合频率的上限值和下限值。

5.3 预测函数控制器的设计

5.3.1 预测模型的输出

由于系统的阶次是分数阶次, 需要通过 *Riemann – Liouville* 定理将系统的微分方程转换为传递函数的形式, 转换后的分数阶模型可以描述为:

$$G(s) = \frac{m_1 s^{\beta_1} + m_2 s^{\beta_2} + \cdots + m_m s^{\beta_m}}{n_1 s^{\alpha_1} + n_2 s^{\alpha_2} + \cdots + n_n s^{\alpha_n}} e^{-\tau} \quad (5.7)$$

其中 $\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_n$ 是分母的阶次, $\beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_m$ 是分子的阶次, τ 是系统的延迟时间。

线性理论中模型的阶次都是整数, 从而需要通过 Oustaloup 近似法将上述的分数阶模型近似的转换为高阶的整数模型, 再通过零阶保持器和采样时间 TS 的作用下, 将模型离散化可得如下形式:

$$y(k) = -A_1 y(k-1) - A_2 y(k-2) - \cdots - A_m y(k-m) + B_1 u(k-d) + \cdots + B_n u(k-d-n) \quad (5.8)$$

其中 A_1, A_2, \cdots, A_m , B_1, B_2, \cdots, B_m 分别为离散后得到的相应项的系数, n, m 分别为输入和输出的阶次, d 为离散后的时滞。

在模型的计算中为了减少对象输出与实际模型的误差, 从而引入差分算子

$\Delta = 1 - Z^{-1}$ ，可以进一步得到差分模型为：

$$\Delta y(k) = -A_1 \Delta y(k-1) - A_2 \Delta y(k-2) - \cdots - A_m \Delta y(k-m) + B_1 \Delta u(k-d) + \cdots + B_n \Delta u(k-d-n)$$

选取状态变量 $\Delta x(k) = [\Delta y(k), \Delta y(k-1), \cdots, \Delta y(k-n), \Delta u(k-1), \cdots, \Delta u(k-d-m+1)]^T$ ，因此可以得到系统的状态空间模型为：

$$\begin{aligned} \Delta x(k+1) &= A \Delta x(k) + B u(k) - B u(k-1) \\ \Delta y(k+1) &= C \Delta x(k+1) \end{aligned} \quad (5.9)$$

其中，

$$A = \begin{bmatrix} -A_1 & \cdots & -A_{n-1} & -A_n & 0 & \cdots & 0 & B_0 & \cdots & B_{m-1} & B_m \\ 1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 & \cdots & & 0 & \cdots & & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & & \vdots & & & \cdots & & \cdots & \vdots \\ \vdots & \ddots & 1 & 0 & \vdots & \cdots & & \cdots & & \cdots & \vdots \\ 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 & & \cdots & \cdots & & & 0 \\ 0 & & \ddots & 0 & 1 & 0 & \cdots & \cdots & & & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & & 0 & 1 & 0 & & & & \vdots \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & & & \ddots \\ \vdots & & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & & \vdots \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \\ 0 & & \cdots & & \cdots & 0 & \cdots & \cdots & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = [0 \ \cdots \ 0 \ 1 \ 0 \ \cdots \ 0]^T, \quad C = [1 \ 0 \ 0 \ \cdots \ \cdots \ 0]$$

输出的误差可以定义为：

$$e(k) = y(k) - y_r(k) \quad (5.10)$$

在预测函数控制中，控制量是由若干已知的基函数的组合，本章选择基函数为阶跃函数：

$$u(k+i) = u(k), \quad (i=1, 2, \cdots, P) \quad (5.11)$$

在控制过程中为了使实际的输出按照预计的参考轨迹运行，而不会使系统在运行中出现控制量的剧烈变化，因此我们选取预估曲线的参考轨迹为：

$$y_r(k+i) = \beta^i y_p(k) + (1-\beta^i) c(k) \quad (5.12)$$

$$\begin{aligned} e(k+1) &= e(k) + \Delta y(k+1) - \Delta r(k+1) \\ &= e(k) + CA \Delta x(k) + CB u(k) - CB u(k-1) - \Delta r(k+1) \\ e(k+2) &= e(k+1) + \Delta e(k+2) \\ &= e(k) + CA \Delta x(k) + CB u(k) - CB u(k-1) - \Delta r(k+1) + \Delta y(k+2) - \Delta r(k+2) \\ &= e(k) + (CA^2 + CA) \Delta x(k) + (CAB + CB)(u(k) - u(k-1)) - \Delta r(k+1) - \Delta r(k+2) \\ &\vdots \\ e(k+P) &= e(k+P-1) + \Delta e(k+P) \\ &= e(k) + (CA^P + CA^{P-1} + \cdots + CA) \Delta x(k) + (CA^{P-1}B + CA^{P-2}B + \cdots + CB)u(k) \\ &\quad - (CA^{P-1}B + CA^{P-2}B + \cdots + CB)u(k-1) - \Delta r(k+1) - \Delta r(k+2) - \cdots - \Delta r(k+P) \end{aligned} \quad (5.13)$$

系统的性能指标函数可以选择为：

$$J = \min[y_r(k+P) - y(k+P)]^2 = \min[e(k+P)]^2 \quad (5.14)$$

因此可以得当前时刻的控制量为：

$$u(k) = -S^{-1}[y(k) - r(k) + G\Delta x(k) - Su(k-1) - L\Delta R] \quad (5.15)$$

其中： $\Delta R = [\Delta y_r(k+1) \ \Delta y_r(k+2) \ \cdots \ \Delta y_r(k+P)]^T$ ，

$G = CA^P + CA^{P-1} + \cdots + CA$ $S = CA^{P-1}B + CA^{P-2}B + \cdots + CB$ ， $L = [1 \ 1 \ \cdots \ 1]$

5.3.2 多模型加权

计算此时每个模型的输出与当前时刻电加热炉的实际输出 $y_j(t)$ 的偏差值。

$$e_j(t) = |y_{out}(t) - y_j(t)|, \quad j=1,2,\cdots,i. \quad (5.16)$$

其中 $y_j(t)$ 为系统输出通道 j 的实际输出， $e_j(t)$ 代表第 j 个子模型与实际输出的偏差。

计算每个子模型权重系数。

$$w_j(t) = \frac{\sum_{k=0}^n \left(\frac{1}{e_i(t-k)} \right)^2}{\sum_{j=1}^i \sum_{k=0}^l \left(\frac{1}{e_i(t-k)} \right)^2}, \quad j=1,2,\cdots,i \quad (5.17)$$

其中 $w_j(t)$ 表示第 j 个子模型的加权系数， $e_i(t-k)$ 表示历史误差。

因此当前时刻的控制量可以表示为：

$$u(t) = \sum_{j=1}^i w_j u_j \quad (5.18)$$

5.4 分数阶的多模型预测控制在电加热炉中的应用

5.4.1 预测模型的建立

本文主要针对 SXF-4-10 电加热炉的实际对象进行实验，由于实际工业中的温度通常设定在 300°C ，因此本文在进行实验时，最终的温度控制目标设定在 300°C 。首先对电加热炉的工作温度的区间进行划分，通常实验室的温度在 20 到 30 摄氏度之间，对温度的区域划分过大将带来实验的数据的计算量偏大，会使得系统的控制能力降低。因此本文主要通过对电加热炉的工作范围划分为 0-150 摄氏度和 150-300 摄氏度两个工作区间。通过对内模 PI 的控制器的设定值分别设定为 150 和 300，采集电加热炉中的温度分别从室温达到 150 摄氏度稳定时的数据建立模型 1 和温度在 150 摄氏度到 300 摄氏度温度稳定时建立模型 2，分别对采集到的两组数据建立分数阶的模型如图 5-1 所示，可以计算模型参数分别为：

模型 1 的参数为：

$$G(s) = \frac{1}{500s^{0.98} + 1} e^{-100s} \quad (5.19)$$

模型 2 的参数为：

$$G(s) = \frac{1}{400s^{0.88} + 1} e^{-100s} \quad (5.20)$$

然后通过 Oustaloup 近似法将上述的分数阶模型近似的转换为高阶的整数模型，其中为了尽可能的表示系统的全部特性选取系统的频率上限为 $\omega_h = 10^6$ 和频率的下限为 $\omega_l = 10^{-6}$ ，为了计算简便但不对模型影响选取系统的阶次为 4。

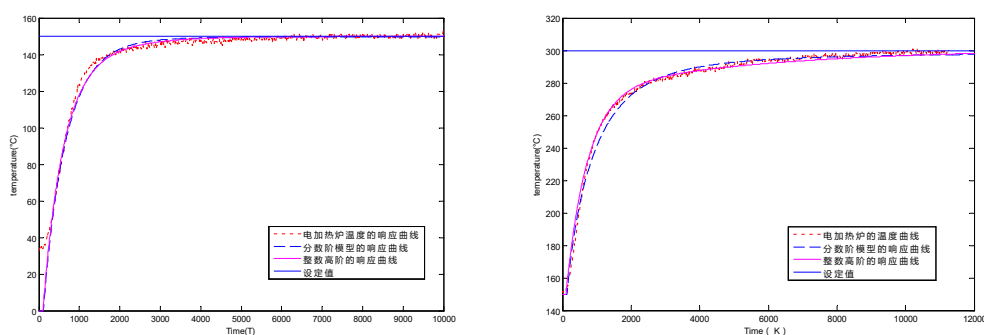
模型 1 的高阶整数模型为：

$$G(s) = \frac{s^4 + 6.6 \times 10^5 s^3 + 4.3 \times 10^8 s^2 + 2.8 \times 10^8 s + 1.9}{7.6 \times 10^7 s^4 + 1.5 \times 10^{11} s^3 + 1.7 \times 10^{11} s^2 + 5.5 \times 10^8 s + 1.9 \times 10^5} e^{-100s} \quad (5.21)$$

模型 2 的高阶整数模型为：

$$G(s) = \frac{s^4 + 9.3 \times 10^5 s^3 + 8.7 \times 10^8 s^2 + 8.1 \times 10^8 s + 7.6}{3.7 \times 10^8 s^4 + 4.1 \times 10^{11} s^3 + 4.3 \times 10^{11} s^2 + 1.3 \times 10^9 s + 7.6 \times 10^5} e^{-100s} \quad (5.22)$$

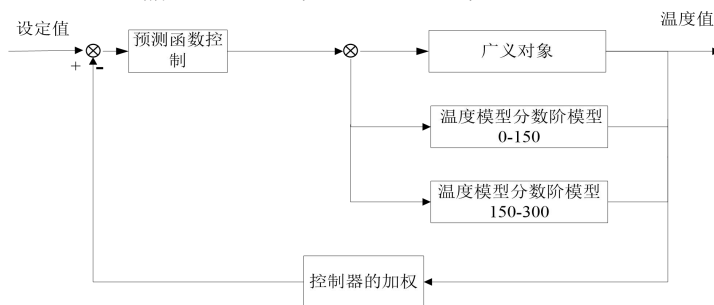
为了了解建立后模型的精确度，分别对建立好的分数阶模型的阶跃响应和整数阶模型的阶跃响应作比较，通过电加热炉的温度值得输出进行比较，从图中可以看出系统的输出响应和实际的输出值相吻合，达到了预期的效果：



5.1 分数阶多模型集的建立

5.4.2 电加热炉控制器的设计

由于在设计子控制器的时候，模型的参数对控制器中参数选择有一定的作用，需要对模型中的参数进行选取，为了比较方便并且对实验的数据进行不断的调整，最后选择的预测步数为 15，柔化系数为 0.98。由于最后的设定的温度为 300 摄氏度，而室温是 20 摄氏度左右，在每个时刻通过对系统的输出和模型输出作为系统加权的指标函数，从而要求取每个温度区间模型控制量的比值，最后通过控制器的输出与比例值的乘积系数作为系统的控制量。

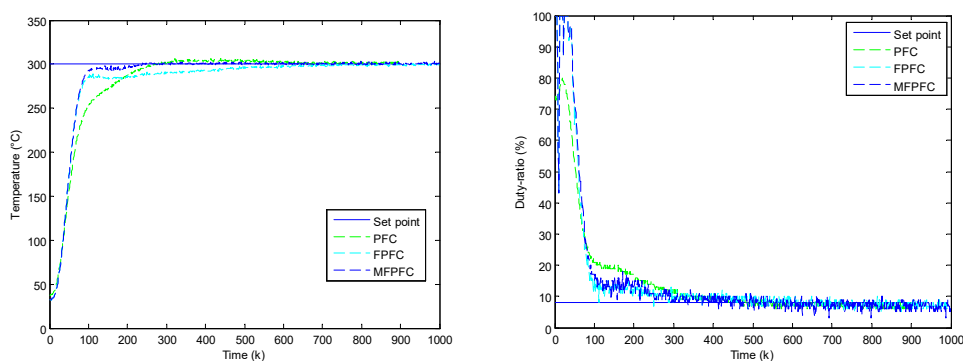


5.2 多模型的控制策略

5.4.3 电加热炉的应用结果

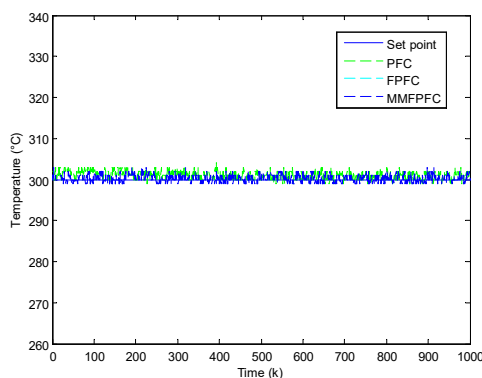
为了对本文所提出的方法进行评估，因此选取系统的分数阶模型的预测函数控制，预测函数控制和 PID 控制作对比。通过对系统的跟踪性能，稳定性能和系统的抗干扰性能三个方面得出以下结论：

系统的跟踪性能是通过对温度设定为 300 摄氏度，从室温的条件下通过 SXF-4-10 电加热炉进行控制，使温度最后达到我们所设定的条件。从图中可以看出多模型的分数阶预测函数控制在 42 分钟左右达到了稳定值，而分数阶单模型和 PID 控制方法下温度通过了 100 分钟左右才达到稳定，预测控制函数的则通过了 48 分钟左右才达到稳定，并且系统在到达设定之后会产生一点超调量，通过很久才会使超调量消除。分数阶模型的预测函数控制其前期的响应速度很快，但是当温度快要达到设定值时，其速度减慢甚至有降低的趋势，经过很久才会是温度达到设定值。PID 控制在这几组试验中相对其速度是最慢的一组。



5.3 系统的跟踪能力

系统稳定性能体现了在温度达到设定范围时的精度和在设定值附近的波动性能。为比较系统在达到稳定后的性能，在系统稳定后从中抽取 1000 组数据对系统在稳定后的平稳性做了一次对比如表 5.1 所示。表中的数据分别从平均值，最大值，最小值，系统的方差和标准差五个不同的方面对系统的稳定性做比较，得到了本方法的控制效果。

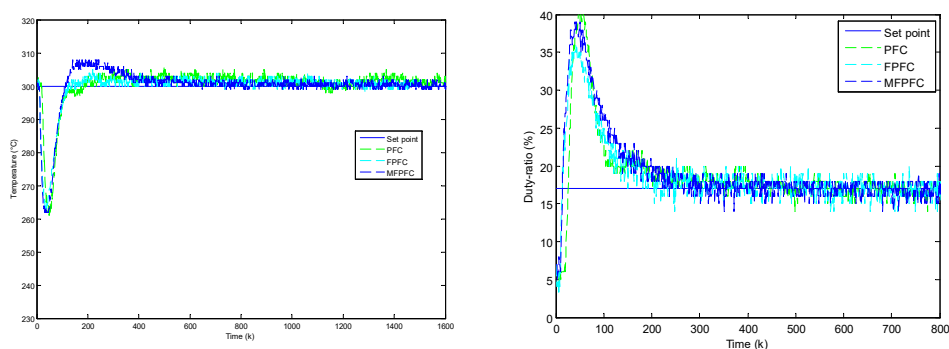


5.4 系统的稳定性

5.1 系统稳定的比较

algorithm	Average value	Maximum value	Minimum value	variance	Standard deviation
MFPFC	300.047	302	299	0.83969	0.927188
FPFC	299.599	302	298	0.748947	0.865417
PFC	301.109	305	298	0.922041	0.960229

系统的性能不仅只是从跟踪性能和平稳性作为依据，系统的抗干扰能力也是系统的一个很重要的性能指标，因此在系统达到稳定后本文通过对电加热炉打开固定的角度从而使电加热炉产生一个恒定的干扰量，从而测试系统的抗干扰性能。经过测量电加热炉中的温度和计算的到的控制量（如图 5-5 所示）。可以看出本文提出的算法与 PFC 同时到达设定，但是到达设定之后都会再次产生一个超调量，并经过一定时间才回到设定值，因此本文提出的方法在抗干扰方面不强。



5.5 系统的抗干扰性

5.5 本章总结

本章主要是提出了一种分数阶的多模型预测函数加权控制算，并运用到 SXF-4-10 电加热炉中。首先把电加热炉模型按照温度的范围划分为不同的工作区间，在不同的工作区间上建立其分数阶的模型，然后通过 Oustaloup 近似方法将分数阶的模型转换为高阶整数阶的模型。通过转换后的模型设计系统的预测函数控制器，并作用于 SXF-4-10 电加热炉中。通过对 SXF-4-10 电加热炉的响应曲线的比较，表明了本文所提出的控制器的有效性。

第6章 总结与展望

本文的主要工作内容：

本文主要是考虑在工业生产中温度的控制对产品的质量，生产效率等各方面起着关键性的作用。在控制的过程中如何能够使得电加热炉的温度快速、稳定的上升到设定值，并且在干扰的情况下能够快速恢复到原先的状态，这个是本文研究的重点。

首先本文从传统的 PID 控制出发，根据建立的电加热炉模型通过内模 PID 整定 PID 的参数，并应用到电加热炉的温度控制性能中。然而这种控制方法没有得到我们预期的效果，从而对电加热炉温度控制系统算法需要进一步的改进，因此提出了下两个方法，针对电加热炉中温度如何快速稳定的达到设定的工作点的问题做了以下方面的研究。

针对电加热炉温度的系统要求快速达到设定的工作点，首先提出了一种多模型预测函数切换控制。通过对电加热炉的大工况范围和非线性特点的分析，把工作范围按照温度的区域进行划分，在局部的工作范围内建立的局部线性模型，从而把非线性系统转换为了局部的线性系统。根据划分好的局部线性模型设计相应工作范围内的预测函数控制器，并把 Smith 预估器引入到控制器的设计中减小了时间滞后的问题，最后当温度跨过不同的工作区间时，利用多模型的切换思想进行控制器间的切换。通过把此方法用在电加热炉的控制，并获得了较好的控制效果。

在对局部模型进行建模时利用整数阶模型并不能反应局部模型的特性，因此提出了一种分数阶模型的拟合。通过分数阶的 Oustaloup 数值方法把分数阶模型转换为高阶的整数阶模型，从而通过预测函数设计局部模型的控制器，最后通过各个模型的当前误差确定每个模型的加权系数，从而得到多模型下的控制量。利用此方法在电加热炉中，通过实验的数据分析，表明了多模型的预测函数控制能够很好的处理此类问题。

因为本人研究的水平的限制，在很多方面还需要进一步进行完善和改进。

(1) 多模型集的建立过程

在针对实际的温度控制中，本文只是按照温度的范围的区间进行了简单的划分，但是电加热炉温度的特性有可能不仅仅只是和温度的区间相关联还可能和实际的被控对象之间存在紧密的关系，所以在对对象模型的划分时可以考虑对电加热炉给予不同程度的占空比的加热量使得电加热炉在自然的条件下能够稳定的温度点对电加热炉的模型进行划分。同样下本文中对分数阶模型只是先

对其建立整数阶模型的基础上调节参数得到的模型系数，并没有一个实际的理论作为指导，因此如何通过阶跃响应建立一个分数阶的模型也是以后需要完善和等待研究的问题。

（2）模型的切换过程

在本文的切换过程中只是按照温度模型的区域的变化进行模型的切换，并没有考虑在切换的时候进行切换模型的竞争问题。同样在模型加权的过程中没有考虑剔除一些对当前时刻影响较大的模型，只是简单的对整体模型的一种加权。

（3）多模型稳定性能的分析

在多模型的切换过程中在软切换中并没有理论知识能够证明系统的稳定性能。在硬切换中可以对系统进行分析通过李亚普洛夫定理进行推断，也可以对系统考虑在切换过程前的一个驻留时间，使得切换的过程能够稳定。

致 谢

岁月如歌，光阴似箭，两年半的研究生生活即将结束，而入学仿佛还是昨天的事情，初来乍到时的场景历历在目。回忆起这两年半的点点滴滴，感慨不已，欣慰之时又庆幸无比。值得欣慰的是，我这两年多的时间是在汗水和拼搏中度过的，学到了许多受益无穷的东西。庆幸的是我来到了一个很好的环境，遇到了很多的良师益友，给了我很多的指引和帮助，我心中充满了感激。

首先最深的谢意要献给我的导师张日东教授。我知道，我所表达的言语并不能确切地表达我对张老师的感激之情。在我攻读硕士研究生期间，深深受益于张老师的关心和谆谆教导，不仅教给我做学问的道理，更教会了我许多做人的道理。张老师在学术上给了我方向，生活中给了我温暖，行动上给了我勇气。忘不了我做错事情的时候，张老师对我说的道理。在读研究生的这段时间里，他教会了我做事要认真、做学问要严谨、做人更要诚信真诚。张老师给我提醒，让我继续前进。能师从张老师，我为自己感到庆幸。在此谨向张老师表示我最诚挚的敬意和感谢！

其次感谢本实验室的汪大卫，王玉中，戴宇丰，王成龙给予的关心和支持！，感谢他们创造的欢乐和谐环境，感谢你们给予我的所有关心和帮助，感谢两年来，我们朝夕相处，共同进步，同窗之谊，我将终生难忘。感谢所有帮助过我的老师、同学和朋友，感谢所有关心过和帮助过我的人，没有他们对我的关注，就没有我今天的任何成绩。

最后感谢母校，她给了我一个优越的平台，在我的人生道路上添加了浓烈的一笔，给我了一个更新更高的起点，让我更加从容自信地面对未来的挑战！

谨以此文献给所有关注过和关注着我的人，祝愿他们心想事成，万事如意。

参考文献

- [1] 李天婧. PID 电加热炉温度控制系统[J]. 中国高新技术企业, 2013(27):55-56.
- [2] 南新元, 陈志军, 程志江. 基于模糊 PID 控制的电锅炉温度过程控制系统[J]. 自动化仪表, 2008, 29(5):5-8.
- [3] 冯江涛. 模糊免疫 PID 控制在电阻加热炉温度控制系统中的应用[J]. 科技情报开发与经济, 2006, 16(9):183-184.
- [4] 张友鹏, 范子荣. 电加热炉温度系统的 PID-模糊 Smith 复合控制方法研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2006(6):18-20.
- [5] 范子荣. 基于电加热炉温度系统的 Smith-FNNC-PI 复合控制器研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2008(6):10-11.
- [6] 潘红华, 苏宏业, 褚健,等. 预测函数控制及其在工业电加热炉中的应用[J]. 机电工程, 1999(5):130-132.
- [7] Trinks W. Industrial furnaces[M]. John Wiley & Sons, 2004.
- [8] Bennett S. Development of the PID controller[J]. IEEE Control Systems, 1993, 13(6): 58-62.
- [9] Ntogramatzidis L, Ferrante A. Exact tuning of PID controllers in control feedback design[J]. IET Control Theory & Applications, 2011, 5(4): 565-578.
- [10] Shamsuzzoha M, Lee M. IMC-PID controller design for improved disturbance rejection of time-delayed processes[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007, 46(7): 2077-2091.
- [11] Zou Q, Jin Q, Zhang R. Design of fractional order predictive functional control for fractional industrial processes[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2016, 152: 34-41.
- [12] Richalet J, O'Donovan D. Predictive functional control: principles and industrial applications[M]. Springer Science & Business Media, 2009.
- [13] Richalet J, Estival J L, Fiani P. Industrial applications of predictive functional control to metallurgical industries[C]//Control Applications, 1995., Proceedings of the 4th IEEE Conference on. IEEE, 1995: 934-942.
- [14] Wu S, Zhang R, Lu R, et al. Design of dynamic matrix control based PID for residual oil outlet temperature in a coke furnace[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2014, 134: 110-117.
- [15] Zhang R, Xue A, Gao F. Temperature control of industrial coke furnace using

- novel state space model predictive control[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(4): 2084-2092.
- [16] Zhang R, Xue A, Lu R, et al. Real-time implementation of improved state-space MPC for air supply in a coke furnace[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(7): 3532-3539.
- [17] Zhang R, Li P, Xue A, et al. A simplified linear iterative predictive functional control approach for chamber pressure of industrial coke furnace[J]. Journal of Process Control, 2010, 20(4): 464-471.
- [18] Gálvez-Carrillo M, De Keyser R, Ionescu C. Nonlinear predictive control with dead-time compensator: Application to a solar power plant[J]. Solar energy, 2009, 83(5): 743-752.
- [19] Liu X, Kong X. Nonlinear model predictive control for DFIG-based wind power generation[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2014, 11(4): 1046-1055.
- [20] Mahindrakar V, Hahn J. Model predictive control of reactive distillation for benzene hydrogenation[J]. Control Engineering Practice, 2016, 52: 103-113.
- [21] Lin C Y, Liu Y C. Precision tracking control and constraint handling of mechatronic servo systems using model predictive control[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17(4): 593-605.
- [22] Zhang R, Cao Z, Lu R, et al. State-Space Predictive-P Control for Liquid Level in an Industrial Coke Fractionation Tower[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2015, 12(4): 1516-1524.
- [23] Zhang R, Tao J, Gao F. A new approach of TS fuzzy modeling using improved GA optimization for oxygen content in a coke furnace[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research.
- [24] Porfirio C R, Neto E A, Odloak D. Multi-model predictive control of an industrial C3/C4 splitter[J]. Control engineering practice, 2003, 11(7): 765-779.
- [25] Townsend S, Lightbody G, Brown M D, et al. Nonlinear dynamic matrix control using local models[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 1998, 20(1): 47-56.
- [26] Chen H, Ning L, Shaoyuan L. Switching multi-model predictive control for hypersonic vehicle[C]//Control Conference (ASCC), 2011 8th Asian. IEEE, 2011: 677-681.
- [27] Nandola N N, Bhartiya S. A multiple model approach for predictive control of

- nonlinear hybrid systems[J]. Journal of process control, 2008, 18(2): 131-148.
- [28] Yang H, He L, Zhang Z, et al. Multiple-model predictive control for component content of CePr/Nd countercurrent extraction process[J]. Information Sciences, 2016, 360: 244-255.
- [29] Li S, Xi Y. Switching smoothly of multi-model predictive control systems[J]. JOURNAL-SHANGHAI JIAOTONG UNIVERSITY-CHINESE EDITION-, 1999, 33(11): 1345-1347.
- [30] Zeng J, Xue D Y, Yuan D C. Multi-model predictive control of nonlinear systems[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2009, 1: 006.
- [31] Li N, Li S Y, Xi Y G. Multi-model predictive control based on the Takagi-Sugeno fuzzy models: a case study[J]. Information Sciences, 2004, 165(3): 247-263.
- [32] Bequette B W. Process control: modeling, design, and simulation[M]. Prentice Hall Professional, 2003.
- [33] Moro L F L, Odloak D. Constrained multivariable control of fluid catalytic cracking converters[J]. Journal of Process Control, 1995, 5(1): 29-39.
- [34] 张日东, 王树青. 基于神经网络的非线性系统预测函数控制[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(6):949-953.
- [35] 张日东, 王树青, 李平. 基于支持向量机的非线性系统预测控制[J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(10):1066-1073.
- [36] 张日东, 王树青. 一类非线性系统的自适应预测函数控制[J]. 控制与决策, 2007, 22(6):711-715.
- [37] 苏成利, 赵家程, 李平. 一类具有非线性扰动的多重时滞不确定系统鲁棒预测控制[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(5):644-649.
- [38] 张国银, 杨智, 谭洪舟. 一类非线性系统非切换解析模型预测控制方法研究[J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(9):1147-1156.
- [39] 席裕庚, 李德伟, 林姝. 模型预测控制——现状与挑战[J]. 自动化学报, 2013, 39(3):222-236.
- [40] 薛明晨, 熊伟丽, 徐保国. 基于局部加权偏最小二乘的在线多模型建模[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(10):2981-2984.
- [41] 孙建平, 苑一方. 复杂过程的多模型建模方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(1):132-137.
- [42] 李柠, 李少远. 基于 LPE 算法的多模型建模方法[J]. 控制与决策, 2002, 17(1):11-14.

- [43] 丛秋梅, 苑明哲, 柴天佑,等. 带有工况中心修正的多模型在线建模[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(6):115-122.
- [44] 潘天红, 薛振框, 李少远. 基于减法聚类的多模型在线辨识算法[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(2):220-224.
- [45] 薛振框, 李少远. 一种基于加权性能指标的多模型辨识算法及其在热工过程中的应用[J]. 自动化学报, 2005, 31(3):470-474.
- [46] 杨慧中, 贾淑矿. 基于二次判别分析的多模型建模方法[J]. 控制工程, 2010, 17(5):662-664.
- [47] Campi M C, Hespanha J P, Prandini M. Cautious hierarchical switching control of stochastic linear systems[J]. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2004, 18(4): 319-333.
- [48] Giovanini L, Ordys A W, Grimble M J. Adaptive predictive control using multiple models, switching and tuning[J]. *International Journal of Control Automation and Systems*, 2006, 4(6): 669.
- [49] 栾秀春, 李士勇. 基于局部神经网络模型的过热汽温多模型预测控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8):190-195.
- [50] 翟军勇. 基于多模型切换的智能控制研究[D]. 东南大学, 2006.
- [51] 翟军勇, 费树岷. 基于多模型切换的智能控制研究[J]. 东南大学学报自然科学版, 2004(s1):113-116.
- [52] 翟军勇, 费树岷. 基于多模型切换的智能控制研究[C]// 江苏省自动化学会七届四次理事会暨 2004 学术年会青年学者论坛论文集. 2004:113-116.
- [53] 翟军勇, 费树岷. 基于多模型切换的过热汽温智能控制[J]. 自动化仪表, 2005, 26(6):10-12. [55]
- [54] 翟军勇, 费树岷, 达飞鹏. 基于神经网络多模型自适应切换控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24):61-66.
- [55] 翟军勇, 费树岷. 基于递阶结构的多模型切换控制[J]. 2006. [58]
- [56] 林金星, 沈炯, 李益国. 基于多模型切换的过热汽温自适应预测控制[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2008, 38(1):69-74.
- [57] 赵文杰, 牛玉广, 刘吉臻. 基于多模型的过热汽温自适应串级控制[J]. 计算机仿真, 2003, 20(5):107-109.
- [58] 张云广, 沈炯, 李益国. 基于多模型切换的过热汽温广义预测控制[J]. 华东电力, 2009, 37(1):164-168.
- [59] 王志甄, 邹志云, 赵丹丹,等. 分段线性化多模型动态矩阵控制算法的设计[J]. 计算机与应用化学, 2010, 27(8):101-104.

- [60] 曾静, 薛定宇, 袁德成. 非线性系统的多模型预测控制方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2009, 30(1):26-29.
- [61] 曹叙风, 王昕, 王振雷. 基于切换和混合策略的多模型自适应控制[J]. 控制工程, 2014, 21(6):878-881.
- [62] 刘鲁源, 吕伟杰, 牟世忠. 基于在线优化的切换多模型自适应控制[J]. 控制与决策, 2002, 17(4):407-410.
- [63] 刘琳琳, 周立芳. 多层次结构模型预测控制系统的层次间模型切换方法[J]. 化工学报, 2012, 63(4):1132-1139.
- [64] 刘琳琳, 周立芳, 嵇婷, 等. 多层次多模型预测控制算法的模型切换方法研究[J]. Acta Automatica Sinica, 2013,

附录

已投稿的学术论文

- [1] Weide Xu, Junfeng Zhang, Ridong Zhang. Application of multi-model switching predictive function control on the temperature system of an electric heating furnace. (ISA Transactions 已录用, SCI, IF:2.6).
- [2] Weide Xu, Dawei Wang, Jili Tao, Ridong Zhang. A multi-model design of fractional order predictive function control. (已投 The 36th Chinese Control Conference 2017).

公开的发明专利

- [1] 张日东, 张俊峰, 徐卫德. 电加热炉的多模型分数阶加权预测函数控制方法. 发明专利, 公开号: CN105974798A.
- [2] 徐卫德, 张日东, 张俊峰. 电加热炉的多层次多模型加权预测函数控制方法. 发明专利, 公开号: CN105955021A.
- [3] 张日东, 徐卫德, 陶吉利. 一种化学放热反应的分布式主元分析神经网络建模方法. 发明专利, 公开号: CN105760344A.
- [4] 徐卫德, 张日东. 一种焦化加热炉氧气含量的预测函数控制方法. 发明专利, 公开号: CN105487379A.
- [5] 薛安克, 徐卫德, 张日东, 王俊宏. 多变量过程的蒸馏塔模型预测控制优化PID 控制方法. 发明专利, 公开号: CN105159095A.