

分类号.....

密级.....

UDC.....

编号.....

中南大學

CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

硕士学位论文

论文题目.....隧道式电烘炉控制系统研究.....

学科、专业.....控制工程.....

研究生姓名.....滕立国.....

导师姓名及
专业技术职务.....桂卫华教授、郑巍高级工程师.....

摘 要

400KW 隧道式电烘炉是饼干生产线的关键设备，原来温度控制全靠手工操作，参数设定既繁琐又容易出错，而且实时性差，导致饼干烘烤的效果不理想，既影响产品质量，浪费电能，也满足不了某些特殊饼干生产工艺要求。如何减轻参数设定和调整的工作量，使得系统更加有效率地工作，节约电能消耗，就成为迫切需要解决的问题。

本文以 400KW 隧道式电烘炉的温度控制系统为研究对象，分析了隧道式电烘炉的结构特点，结合不同品种饼干的温度控制曲线，获得了隧道式电烘炉温度控制系统的数学模型，该模型具有时变、不确定性和非线性等特点。在此基础上，研究了常规 PID、改进数字 PID 和智能 PID 算法。

通过对常规 PID 控制算法、积分分离 PID 控制算法、变速积分 PID 控制算法、带滤波器的 PID 控制算法、不完全微分 PID 控制算法和微分先行 PID 控制算法等 PID 控制算法的仿真研究，可知它们都不能满足隧道式电烘炉的温度控制的要求。

根据模糊控制和免疫控制的原理，提出了基于模糊免疫 PID 控制算法，并将其应用于电烘炉温度控制系统中。仿真结果表明其控制性能优于常规 PID 控制及改进的数字 PID 算法，完全满足隧道式电烘炉的控制要求。

关键词 电烘炉，温度控制，模糊，免疫，PID 算法

ABSTRACT

400KW tunnel electric oven (TEO) is the key equipment for biscuit production line whose temperature is controlled manually. Parameter settings are cumbersome, error-prone, and real-time worse. These will not only affect the quality of biscuit, waste electricity power, but also fail to meet some special biscuits production process requirements. It is an important problem to reduce the parameters adjustment, improve the efficiency and save power consumption.

At first, the temperature control of 400 KW TEO is researched and the structure of TEO is analyzed. Then, the temperature control system mathematical model of TEO is obtained based on the temperature control curves of different varieties of biscuits. This model is time-varying, uncertain and non-linear. On the basis, conventional PID, improving digital PID and intelligent PID algorithm are researched.

The simulations of conventional PID, integral separation PID, velocity PID with a filter, not fully differential PID and differential first PID control algorithms show that they can not meet the temperature control requirements of TEO.

According to the principle of fuzzy control and immune control, fuzzy immune PID algorithm for temperature control of TEO is proposed. Simulation result show that the control performance of the fuzzy immune PID algorithm is superior to conventional PID and improved digital PID algorithms. It can meet the temperature control requirements of TEO.

KEY WORDS electric oven, temperature control, fuzzy, immunization, PID algorithm

目 录

摘 要.....	I
目 录.....	III
第一章 绪论.....	1
1.1 课题研究背景.....	1
1.1.1 饼干食品需求发展概况.....	1
1.1.2 食品机械发展的新趋势.....	2
1.1.3 400KW 隧道式电烘炉控制系统简介.....	3
1.2 隧道式电烘炉控制系统研究现状.....	3
1.3 论文的研究内容及结构安排.....	4
第二章 隧道式电烘炉系统结构.....	5
2.1 烤炉的分类.....	5
2.1.1 按热源分类.....	5
2.1.2 按结构型式分类.....	5
2.2 隧道式电烘炉内部结构.....	7
2.2.1 红外辐射元件的布置.....	8
2.2.2 温度检测与控制.....	10
2.3 设备参数及设备配置.....	10
2.3.1 FX2N 介绍.....	15
2.3.2 FX0N-3A 介绍.....	17
2.3.3 三菱变频器 FR-A700 介绍.....	18
2.3.4 F900GOT 系列触摸屏介绍.....	19
2.4 电加热隧道式网带烘烤炉的工作原理.....	20
2.5 多温区电气加热炉控制系统数学模型.....	20
2.6 焙烤技术.....	22
2.6.1 苏打饼干的焙烤技术.....	22
2.6.2 酥性饼干焙烤技术.....	23
2.6.3 韧性饼干焙烤技术.....	24

2.7	食品的高温工艺.....	26
2.8	脱水工艺.....	29
2.9	小结.....	31
第三章	数字 PID 控制算法及其仿真.....	32
3.1	引言.....	32
3.1.1	常规 PID 的控制原理.....	32
3.1.2	数字 PID 控制器.....	33
3.2	改进数字 PID 控制算法及电烘炉模型仿真.....	34
3.2.1	积分分离 PID 控制算法及其仿真.....	34
3.2.2	变速积分 PID 控制算法及其仿真.....	37
3.2.3	带滤波器的 PID 控制算法及其仿真.....	40
3.2.4	不完全微分 PID 控制及其仿真.....	42
3.2.5	微分先行 PID 控制及其仿真.....	43
3.3	小结.....	46
第四章	模糊免疫 PID 控制算法及其仿真.....	48
4.1	引言.....	48
4.2	模糊控制原理.....	48
4.2.1	模糊数学.....	49
4.2.2	隶属度及隶属函数的确定.....	49
4.2.3	精确输入的模糊化.....	50
4.2.4	模糊规则与模糊推理.....	50
4.2.5	反模糊化.....	51
4.2.6	模糊系统的组成.....	52
4.3	免疫控制原理.....	52
4.3.1	典型人工免疫算法.....	53
4.3.2	基本免疫算法.....	53
4.4	模糊免疫 PID 控制算法.....	53
4.5	模糊免疫 PID 控制算法在饼干电烘炉上的应用.....	57
4.6	小结.....	58

第五章 结论与展望.....	59
5.1 结论.....	59
5.2 展望.....	59
参考文献.....	60
致 谢.....	65
攻读学位期间发表的论文.....	66

第一章 绪论

1.1 课题研究背景

凡是为食品工业服务的各种加工、包装、储存、运输等机械设备，均可称为食品机械。但通常所说的食品机械指的是与食品加工生产直接相关的机械设备，如各种食品加工和包装机械。食品机械的种类很多，若按其功能来说的话，可分为通用设备和专用设备；若按其生产的产品来说的话，可分为乳品设备、罐头设备、肉品设备、焙烤设备、饮料设备、蛋制品设备等 23 类。

饮食水平是一个国家文明程度和人民生活质量高低的重要标志。食品的质量和供应状况，直接关系着全民族的体质，影响到国家的政治安定和社会进步。世界上经济发达的国家都十分重视发展食品工业。

中国食品工业负有满足人民日益增长的物质文化生活需要和为国家经济建设提供积累的双重任务，是国民经济的重要组成部分。发展食品工业可以加速农业结构及其产品品质的优化调整，提高农产品经济价值，促进农业生产的良性循环。同时，对于带动和促进饲料工业、包装工业、机械工业、电子工业和精细化学工业等相关行业协调发展，适应餐饮业，旅游业等第三产业崛起的需要，繁荣城乡市场，扩大外贸出口以及扩大劳动就业等都具有十分重要的作用。

本研究课题“隧道式电烘炉控制系统研究”是本人与广东省东莞市某食品有限公司合作研究开发项目。目的是实现企业生产自动化，提高经济效益和社会效益。

1.1.1 饼干食品需求发展概况

随着人们生活水平的提高，昔日用于充饥的饼干食品，正朝着休闲型方向转化，各种具有点心和休闲双重功能的饼干产品不断面市，显示出新的市场活力。业内人士分析指出，饼干食品的发展趋势具体表现出四大走向^[1]。

糕点式饼干。近年国际上逐渐流行起来的产品，其结构仍然是高油脂及高糖配比，属曲奇型产品。因而它的工艺仍沿用辊印挤条、挤花、钢丝切割等手段，不过块形已改成小而薄的细巧产品，并且，充分利用二次加工的精细操作，在一个组合包装中有夹心、表面涂层等多种品种组成。这种高档礼盒的精细点心饼干，其数量可能不会太大，但一方面体现了企业的水平，同时又是一种高附加值产品。

休闲型饼干。休闲食品是新世纪初的热门产业，为抢占市场一席之地，饼干生产开始向休闲食品转变。利用发酵的方法，采用低糖及低油的配比，制成一种

极度膨松的饼干，它的块形小巧，呈颗粒状，表面喷洒各种风味的糖状调味料，采用简单的小包装，销售起点价低，适合儿童人群的需要。

风味苏打饼干。传统的苏打饼干是一种四季相宜的产品，口感爽滑不腻，特别适合老年人及消化不良、糖尿病患者的需要。但亦有缺点，即口味平淡，食之无味。因此，新一代苏打饼干将在保持原有特色的基础上，改善口感，制成各具特色的风味型苏打饼干。

营养保健型饼干。随着健康饮食消费观念的形成，各种保健食品相继面世，为顺应市场需求，厂家将开发适合各年龄层次的饼干。这种产品严禁使用焦亚硫酸钠作改良剂，而以木瓜蛋白酶或中性蛋白酶相替代。儿童营养饼干应采用不饱和脂肪酸较高的油脂，加入优质蛋白质和钙、铁等矿物质和维生素。

1.1.2 食品机械发展的新趋势

当前食品机械发展的新趋势为：一是中国食品机械行业的飞速发展。资料显示，2006 年中国的食品机械行业销售火爆，销售额达到 828.38 亿元，是近几年增长率最高的一年。其二是由于国际上对食品安全的高度重视，具有高新技术的食品机械市场需求旺盛^[2]。

据了解，基于食品安全的发展需要，世界各国开始高度重视和大力开发符合安全卫生要求的食品机械；同时研究制订相关的安全卫生标准，把安全卫生要求作为食品机械与国际接轨的重要条件。目的在于：一是减少食品机械作业过程的错误发生，将食品加工过程中人为或机器的差错降低到最低限度；二是以防范食品机械在不卫生条件、可能引起污染的环境下作业，避免食品加工中不合格产品的发生；三是确保食品机械可靠运行，实现安全生产和清洁生产。

为了实现从食品机械的设计制造起就达到食品加工的安全卫生，发达国家对食品机械安全生产技术的研究与应用十分重视。研究的结果表明实现的方式有两条：一是制订完善的食品机械技术规范；二是按照这些技术规范严格组织食品机械的设计、制造和应用。在这些技术规范中，最主要的是食品机械的安全与卫生要求，其内容涵盖了食品机械的设计与制造、设备选型与配套、设备安装与验证等环节。

高新技术的运用成为实现食品机械安全的重要途径。当前，在食品机械中广泛采用的高新技术主要有机电光液一体化技术、自动化控制技术、数字化智能化技术等，并且已贯穿于食品加工各个环节的食品机械中。

与传统的食品加工技术相比，高新技术具有更大的经济效益、社会效益和环境效益等发展优势。各种高新技术的不断应用大大推进了各国食品工业的产业发展，由连续化生产代替了间歇式生产；由专业化生产代替了通用化生产；由大型

化生产代替了中小型生产；由全程质量控制代替了最终产品的质量控制等。实现了食品加工过程的连续化生产、专业化作业、自动化调节、全程化控制和产业化经营。事实表明，这些高新技术的应用不仅可保证加工产品的营养、安全、卫生、方便、快捷和降低生产成本，而且还可以提高生产效率和产品的市场竞争力。

1.1.3 400KW 隧道式电烘炉控制系统简介

400KW 隧道式电烘炉有四个控温、测温区，炉长 60 米，是整条生产线的关键设备、“用电大户”，两班制生产月电费多达 10 多万元，而烘烤也是决定饼干产品质量好坏的关键工艺。为了及时了解炉内的运行状况，运行管理人员及调度指挥人员需要及时知晓各类运行参数。为此在各控温、测温区设立测点，用以测量各类运行参数。隧道式电烘炉的整个温度的控制，简化为对上述四个特定点的温度定值控制，即将电烘炉分成四个区，每一区选择一个测温点作为温度控制点。其温度控制数值由上位机根据产品工艺配方自动下装。

1.2 隧道式电烘炉控制系统研究现状

国内外饼干生产企业普遍都已经配备了积木式的饼干生产线，各生产部件之间的组合比较灵活，但同时也使整条生产线的参数调整工作非常复杂。特别是生产线的关键设备——400KW 隧道式电烘炉的温度控制全靠手工操作，每当改变饼干的生产品种时，需进行近 30 处的参数设定，参数设定工作既繁琐又容易出错，并且在炉内情况发生改变时，要靠人工进行参数调整，实时性较差，这样将导致饼干烘烤的效果不理想，既影响了产品的质量，浪费了电能，也满足不了某些饼干生产的特殊工艺要求。特别在生产高档饼干产品的时候，废品率较高，使生产成本提高了不少，又常常导致生产厂家与顾客之间的纠纷，故在接受高档饼干产品订单的时候，生产厂家格外谨慎，甚至于不敢接这种生产订单。

文献[3][4]研究了应用 BP 网络在电炉温度控制过程中建立数学模型的方法，建立了温度控制系统的 BP 模型，对于任意给定的误差，只要有足够的训练次数，都能达到要求。研究结果证明人工神经网络是研究电炉温度控制系统动态建模的一个有效方法。同时从前向模型和反向模型的仿真结果，可以看出神经网络与传统的方法相比，具有很多优点。它在仪表和测量中有非常广阔的应用前景。但饼干生产线却不能提供足够的训练次数，因为这样会对企业带来较大的实验损耗。

模糊PID控制具有较小的超调量和较短的调节时间，具有较好的动态响应特性和稳态特性，他优于常规的PID控制，且有较好的抗干扰性能。当工况发生变

化时，与传统PID算法相比，模糊PID参数控制有更好的鲁棒性。显然，模糊PID控制器是一种设计简单、实现方便、控制规则优化，以及性能优良的智能控制器，具有动态性能好、稳态精度高、抗干扰性能好及鲁棒性较强等特点，适用于非线性、时变、强干扰的不确定复杂系统^{[5][6]}。

将模糊控制与 PLC 控制系统相结合，既显示了 PLC 的可靠、灵活、适应性强的特点，也大大提高了控制系统的智能化程度^{[7][8][9]}。基于模糊控制的 PLC 系统适用于很多场合，控制程序易于模块化、标准化，与 PLC 自带的 PID 控制模块相比，具有编程方式灵活，限制条件少，模糊变量和模糊规则个数不受系统硬件限制等特点，降低了系统的开发成本^{[10][11][12]}，扩大了应用范围^{[13][14]}。

1.3 论文的研究内容及结构安排

本研究课题主要围绕着功能结构灵活的分散性和安全维护的可靠性来进行考虑。从系统工程出发，采用了“分级递阶结构”来考虑系统的功能分散、危险分散，提高可靠性、减少设备的复杂性与投资成本，并便于维修和技术更新。

主要是把复杂的对象划分为几个子对象。第一级为局部控制器，直接作用于控制对象；第二级是监控管理级，是操纵各局部控制器的协调控制器，它使各子系统协调配合，共同完成系统的总任务，并进行优化控制和系统管理任务。

第一级可细分为四个局部区域的温度控制回路。四个烘炉加热区域的温度由温度传感器测出后，与设定温度比较计算，并经过先进 PID 控制策略的判别修正后输出一调节量至调功器，调功器在综合判别诸多因素后将输出量均衡分布在该调节周期的电源周波序列中，去推动电热元件将温度精确控制在工艺要求范围内。该种控制方法具有控制精度高，节能，提高电源利用率和避免电力设备的增容。设定温度可由上位机根据产品工艺配方自动下装，也可由操作人员在控制站现场设定。

对 400KW 隧道式电烘炉进行系统优化改造后，一方面可以充分利用设备的产能，提高产品的质量稳定性，更有效地利用电能；另一方面可以建立“专家控制系统”，减轻参数设定或调整时的工作量，并把相关的系统运行资料保存到数据库系统当中，可用来离线修改完善专家系统的知识库，以实现智能化的最优控制。对国内饼干生产企业的隧道式电烘炉的升级改造有较大的应用意义。

第二章 隧道式电烘炉系统结构

2.1 烤炉的分类

2.1.1 按热源分类

根据热源的不同,烤炉可分为煤炉、煤气炉、燃油炉和电炉等,其中电炉又可分为普通电烤炉、远红外烤炉和微波炉^[15]。

(1) 煤炉。以煤为燃料的烤炉称为煤炉。它有多种型式,而且结构简单,操作安全,燃料便宜,容易获得,适合于中小型食品厂各种食品的烘烤。其缺点是卫生条件较差,工人劳动强度大,而且炉温调节比较困难,炉体笨重,不宜搬运。

(2) 煤气炉。以煤气、天然气、液化石油气等作为燃料的烤炉统称煤气炉。煤气炉的温度调节比煤炉容易。比如在高温区可多安装一些喷头,而在低温区可适当减少。必要时,还可关闭一定的喷头。煤气炉较煤炉的外形尺寸小得多,并可减少热量损失,改善工人劳动条件。

(3) 电炉。电炉是指以电为热源的烤炉。根据辐射波长的不同,又分为普通电烤炉、远红外电烤炉等。

电烤炉具有结构紧凑、占地面积小,操作方便,便于控制,生产效率高、烘烤质量好等优点。其中以远红外电烤炉最为突出,它利用远红外线的特点,提高了热效率,节约了电能,在大、中、小食品厂都得到广泛应用。

2.1.2 按结构型式分类

食品烤炉按结构型式不同,可分为箱式炉和隧道炉两大类。

(1) 箱式炉。箱式炉外形如箱体,因此得名。箱式炉按食品在炉内的运动形式不同,可分为烤盘固定式箱式炉、风车炉和水平旋转炉等,其中烤盘固定式箱式炉是这类烤炉中结构最简单、使用最普遍、最具有代表性的一种,因此常简称为箱式炉。

a. 箱式炉。箱式炉炉膛内壁上安装若干层支架,用以支承烤盘,辐射元件与烤盘相间布置。在整个烘烤过程中,烤盘内的食品与辐射元件间没有相对运动。这种烤炉属间歇式操作,所必产量小,它比较适用于中小型食品厂烘烤各类食品。

b. 风车炉。风车炉因烘室内有一形似风车的转篮装置而得名。

这种烤炉多采用无烟煤、焦炭,煤气等为热源,也可采用电及远红外加热技术。

以煤为燃料的风车炉、其燃烧室多数位于烘室的下面。因为燃料在烘室内燃烧,热量直接通过辐射和对流烘烤食品,所以热效率很高。风车炉还具有占地面积小,结构比较简单,产量较大的优点。目前仍有很多工厂用于面包生产。风车炉的缺点是手工装卸食品,操作紧张,劳动强度较大。

c. 水平旋转炉。水平旋转炉内设有一水平布置的回转烤盘支架,摆有生坯的烤盘放在回转支架上。烘烤时,由于食品在炉内回转,各面坯间温差很小,所以烘烤均匀,生产能力较大。其缺点是手工装卸食品,劳动强度较大,且炉体较笨重。

(2) 隧道炉。隧道炉是指炉体很长,烘室为一狭长的隧道。在烘烤过程中食品与加热元件之间有相对运动的烤炉。因食品在炉内运动,好像通过长长的隧道,所以叫做隧道炉。

隧道炉根据带动食品在炉内运动的传动装置不同,可分为钢带隧道炉、网带隧道炉、烤盘链条隧道炉和手持烤盘隧道炉等。

a. 钢带隧道炉。钢带隧道炉是指食品以钢带作为载体,并沿隧道运动的烤炉,简称钢带炉。钢带靠分别设在炉体两端,直径为 500~1000 毫米的空心辊筒驱动。焙烤后的产品从烤炉末端输出并落入在后道工序的冷却输送带上。

由于钢带只在炉内循环运转,所以热损失少。通常钢带炉采用调速电机与食品成型机械同步运行。可生产面包、饼干、小甜饼和点心等食品。其缺点是钢带制造较困难,调偏装置较复杂。此种烤炉通常以天然气、煤气、燃油及电为热源。

b. 网带隧道炉。网带隧道炉,简称网带炉,其结构与钢带炉相似,只是传送面坯的载体采用的是网带。网带是由金属丝编制而成。网带长期使用损坏后,可以补编,因此使用寿命长。由于网带网眼空隙太,在焙烤过程中制品底部水分容易蒸发,不会产生油滩和凹底。网带运转过程中不易发生打精、跑偏现象,也比钢带易于控制。网带炉采用的热源与钢带炉基本相同,其产量大、热量损失小,多用于烘烤饼干等食品。该炉易与食品成型机械配套组成连续的生产线,网带炉的缺点是不易清洗,网带上的污垢易于粘在食品底部,影响食品外观质量。

c. 链条隧道炉。链条隧道炉是指食品发其载体在炉内的运动靠链条传动来实现的烤炉,简称链条炉。其主要传动部分有电动机,变速器、减速器、传动轴,链轮等。

链条炉炉体进出两端各有一水平横轴,轴上分别装有主动和从动链轮。链条带动食品载体器轨道运行。根据焙烤的食品品种不同,链条炉的载体大致有两种,即烤盘与烤篮。烤盘用于承载饼干、糕点及花色面包,而烤篮用于听型面包的烘烤。

由于车间纵向长度的限制,常需要在链条炉出炉端设置烤盘转向装置及翻盘

装置,以便成品进入冷却输选带,载体由炉外传送装置送回入炉端。由于烤盘在炉外循环,因此热量损失较大,不利于工作环境,而且浪费能源。

根据同时并列进入炉内的载体数量不同,链条炉又分为单列链条炉和双列链条炉两种。单列链条炉具有一对链条,一次进入炉内一个烤盘或一列烤篮。双列链条炉具有两对链条,同时并列进入炉内两个烤盘或两列烤篮。

链条炉一般与成型机械配套使用,并组成连续的生产线,其生产效率较高。因传动链的速度可调,因此适用面广,可用来烘烤多种食品。

d. 手推烤盘隧道炉。手推烤盘隧道炉没有机械传动装置,载体在炉内运动是依靠人力推动的。这种烤炉在炉底上装有一对或数对由扁钢或角钢制成的轨道,食品烤盘放在轨道上。操作时炉的进出口各需一位操作者,以完成装炉和出炉的任务。这种隧道炉的炉体较短,结构简单,适用面较广,多用于中、小型食品厂。其缺点是所需操作工人较多,劳动强度较大,食品在炉内的运动速度不易控制,食品烘烤质量不易掌握,而且不能与食品成型机械配套组成连续的生产线。

钢带炉和刚带炉生产能力计算公式相同。

$$G = \frac{60LRN\eta}{tM} \quad (2-1)$$

G ——带式炉生产能力(公斤/时)

L ——带式炉加热区长度(米)

R ——炉带纵向每米长度上的制品排数(排/米)

N ——炉带横向宽度上制品的个数(块)

t ——烘烤时间(分)

M ——每公斤制品块数(块/公斤)

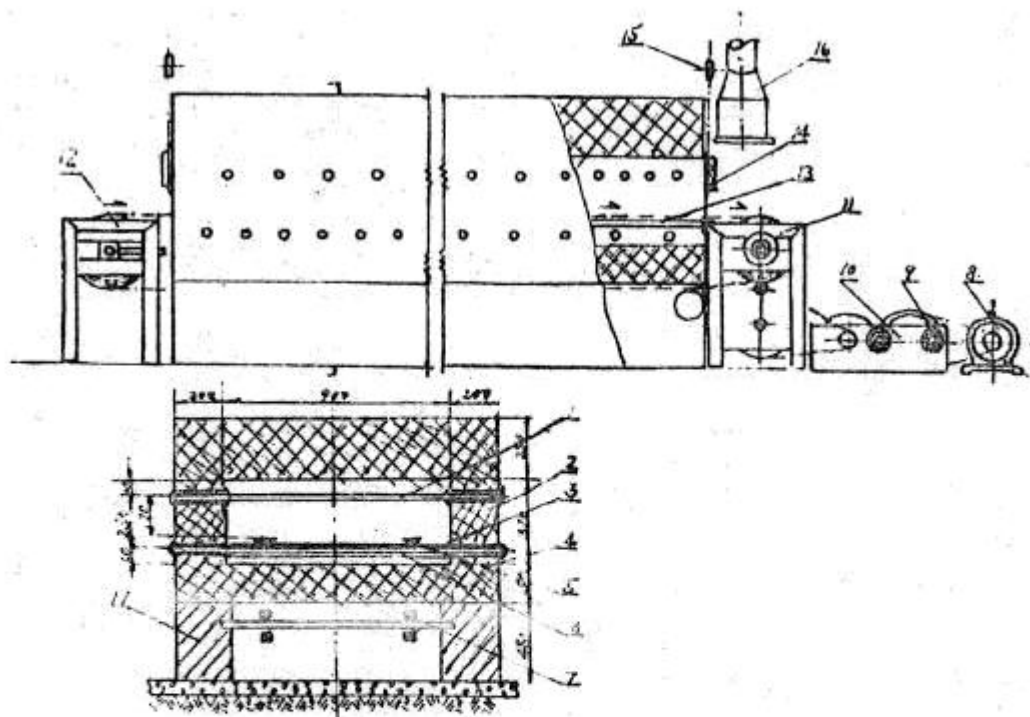
η ——成品率,对于饼干炉 $\eta=0.9$ 左右

2.2 隧道式电烘炉内部结构

随着工业的发展,焙烤制品逐渐成为方便食品中的一个重要的组成部分,满足了百姓的消费需求,也为国家提供了一定数量的积累。据国家统计局对其中 917 家企业的统计结果,2004 年焙烤食品的产量达 415.9 万吨、产品销售收入为 692.3 亿元、全年利润总额 22.5 亿元、税金总额 26.7 亿元,比 2003 年实际分别增长 18.38%、21.8%、9.6%、9.33%和 15%,取得了稳步健康的发展。但其利润率之低(2004 年度糕点行业总体销售收入利润率仅为 3.81%),引起业内人士的普遍思考。这当然与 2003 年以来全国粮、油、蛋、奶等农副产品相继提价和延续到 2004 年春季发生的禽流感疫情的影响有关,但与企业内部挖潜、降低成本不无关系,

而成本的大头就是焙烤能耗。隧道炉的节能降耗与智能化控制就是本文的核心内容。

隧道炉包括炉体及排潮系统、加热及控制系统、传动系统三大部分。节能降耗贯穿于三大部分，智能化控制集中在加热控制系统和传动系统上^{[16] [17]}。结构图见图 2-1。外部整体结构见图 2-2，实际运行设备见图 2-3。



1—管状辐射元件，2—铁皮外壳，3—铁皮内壳，4—保温材料，
5—链条轨道，6—轨道承铁，7—回链托轮与轴，8—电动机，
9—变速快慢操作轮，10—无级摩擦变速器，11—出炉机座与
减速箱，12—入炉机座，13—链条，14—可开启隔热板，
15—滑轮，16—排气罩，17—炉基座。

图 2-1 隧道炉内部结构

2.2.1 红外辐射元件的布置

对于隧道炉取上辐射距离 50~150mm，下辐射距离 50~70mm，管状辐射元件间距 100~250mm，面火与底火上下交错平衡布置，各分为上下对称的 4 个区，如图 2-4 所示，各管状辐射元件采用专门处理后的抛物线型反射罩，并将管状元件中心由焦点处外移，以便获得更多的反射平行波保温区不设加热元件，由焙烤制品维持该区的温度，避免出炉时大的温度梯度使焙烤制品开裂变形^[18]。



图 2-2 隧道炉外部整体结构



图 2-3 实际运行设备图

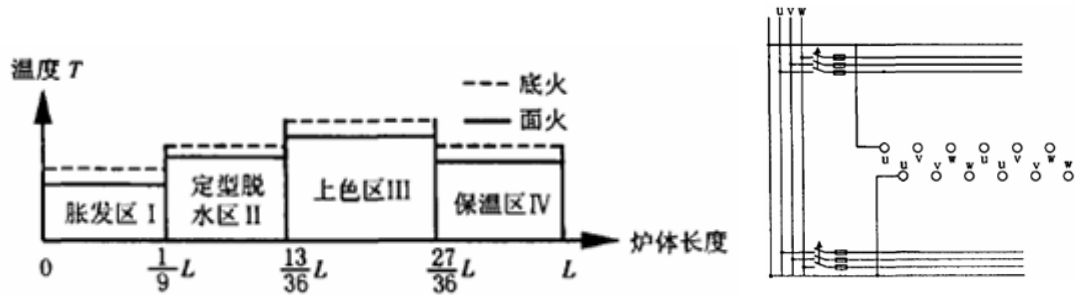


图 2-4 炉温分区及辐射元件的分相排布

主电路各区分面火与底火，各区的面火与底火输入三相电源，各区中面火与底火的各辐射管状元件按 U、V、W 相序顺序联接电源。底火与面火相序空间位置滞后辐射元件间距的一半^{[19][20][21]}，这种联接利于分组独立调温及分组调温时三相保持对称平衡。

2.2.2 温度检测与控制

各区面火与底火独立安装铂热电阻传感器(铂热电阻用 WZP-131，上限温度 500℃，时间常数在 30 s 以内)、采用触摸屏控制系统和温度显示。通过触摸屏设置手动、编辑、复位、回零挡位，满足不同焙烤制品的工艺要求。各区面火与底火温度高低是影响焙烤制品质量的非常重要的因素，通过铂热温度传感器检测面火与底火的实际温度，作为隧道炉的控制信息源。实际温度随设定温度上下波动，表明炉内温度在上升或下降，在生产阶段，PLC 发出指令，给各区中面火与底火中间隔联接的变频器控制指令，从而改变远红外辐射元件工作的功率，实现面火与底火对设定温度的跟踪^{[22][23]}。

2.3 设备参数及设备配置

该燃气式食品隧道炉每个测温区又分为上火区和下火区，上火区和下火区各配备一个 PT100 温度感应传感器来检测该区温度，共六个温度感应传感器，从而将六个区炉火温度控制在一定的范围内^{[24][25]}。整个系统有 5 台电机，每个温区分配一个冷风机，炉链电机一台，保温区电机一台。温区的冷风机起到排潮和适当的降温作用，炉链电机可以调整饼干在炉内的加温时间，保温区电机（炉尾电机）起到排潮作用。控制系统框图见图 2-5。下面将详细叙述各个部件的功能^{[26][27][28]}。

该食品隧道炉要求能够根据烤制食品的不同种类来设定烘烤时间。

系统电源从 3 相 380V 引入，降压成 AC 220V，作为 PLC 的供电。又将 AC 220V 转换成 DC 24V，作为继电器的输出驱动，见图 2-6。

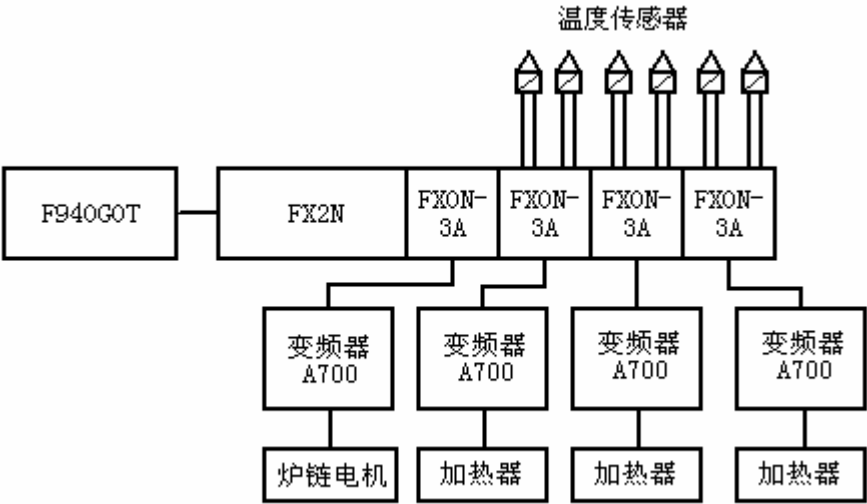


图 2-5 控制系统框图

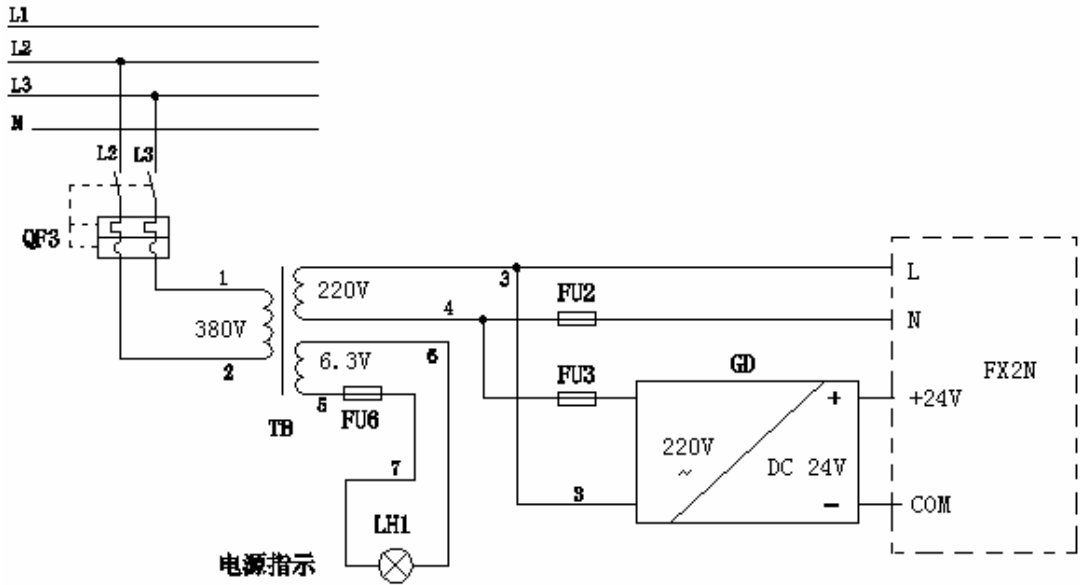


图 2-6 电源变换

本系统采用三菱 FX2N-48MR 作为主控制器，其中每个温区对应一个 FX0N-3A 模块。FX0N-3A 模块是八位、2 通道模拟量输入和 1 通道模拟量输出的模块。智能控制运算结果以电压模拟量的形式控制每个温区的变频器的频率，由于变频器的输出频率与输出电压之间的比例是恒定的，故调节变频器频率的同时也改变了电压，从而实现电烘炉温度的控制。F940GOT 触摸屏作为人机界面，操作人员可以在触摸屏监控整个生产线。表 2-1 是 FX0N-3A 模块的通道分配，表 2-2 是 FX2N 的 IO 分配表。

炉链电机与变频器 A700 相接，FX2N 主机可以通过 FX0N-3A 模块输出变化的电压值，从而控制变频器的转速，调整炉链电机的转速。图 2-7 是炉链电机的接线图。为了变频器的安全，在变频器的电源输入端串接了一个开关。

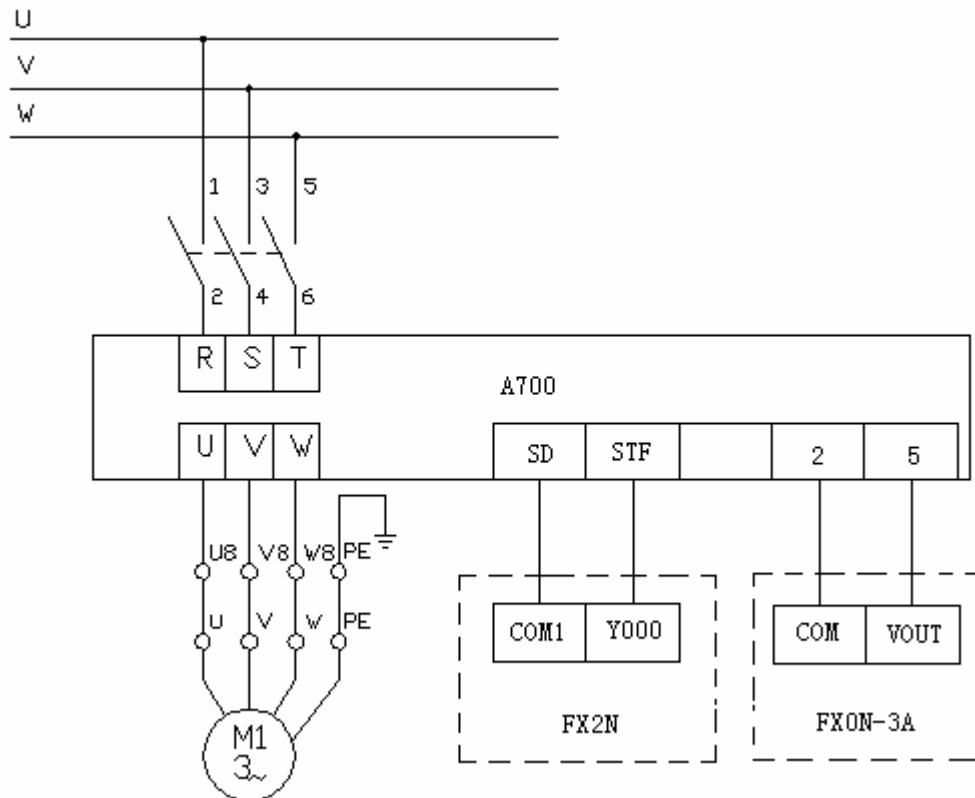


图 2-7 炉链电机接线图

FX0N-3A 模块采集炉内温度，每个温区用两个铂热电阻测量，其中一个铂热电阻测量面火温度，另一个测量底火温度。图 2-8 是铂热电阻与 **FX0N-3A** 模块的接线。

每个温区各有一个变频器控制发热丝，发热丝分成面火和底火两组。发热丝与变频器 A700 相接，FX2N 主机可以通过 FX0N-3A 模块输出变化的电压值，从而控制变频器的输出电压，调整发热丝的输出温度。图 2-9 是胀发区的加热接线，其余加热区的接线都与胀发区相同。

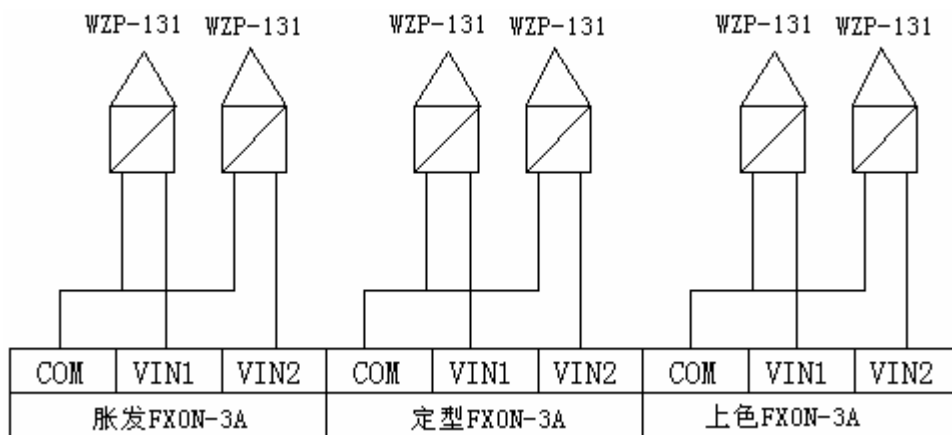


图 2-8 铂热电阻接线

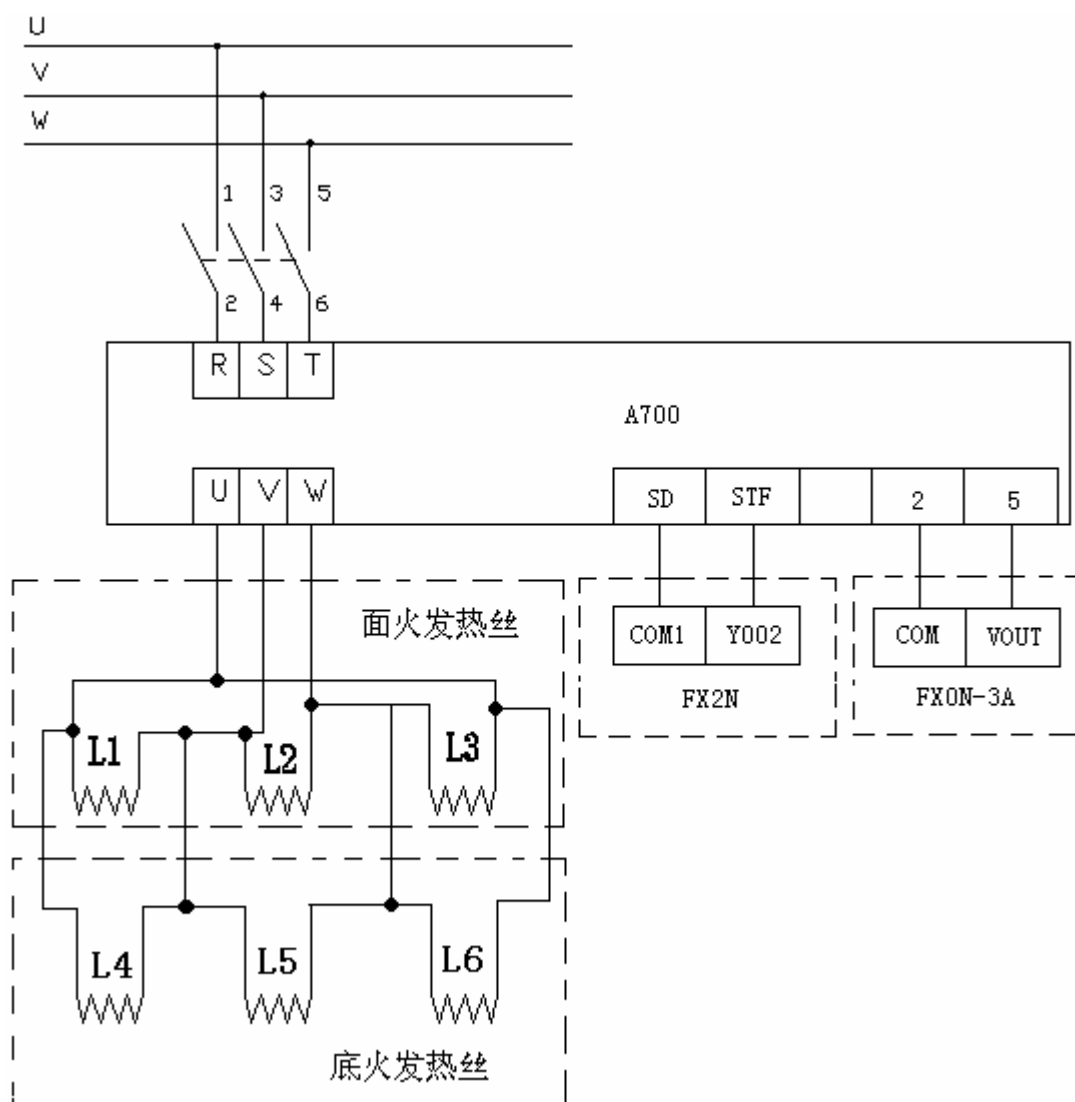


图 2-9 胀发区的加热接线

利用三菱变频器 A700 系列改变隧道炉链电机的转速从而达到控制食品从进炉口到出炉口的时间也就是食品的烘烤时间。不同型号的隧道炉首先要通过长度给定，速比给定，链轮节圆给定，这是一个通用参数页，适用于所有类型的隧道炉。该参数还可以监视变频器的设定频率和运行频率值以及设定排风时间。

每个温区还安装了冷风电机，以适当的降低炉内温度。图 2-10 是 PLC 与冷风电机、炉尾电机的继电器接线图，图 2-11 是电机的主控制电路图。

在人机接口上制作的带显示状态的按钮通过 PLC 程序的控制来完成变频器的运行启动和停止^[29]。启动或停止时，按钮上的指示灯会相应显示其状态。图 2-12 是部分触摸屏画面，其余画面外观类似与这两幅画面。

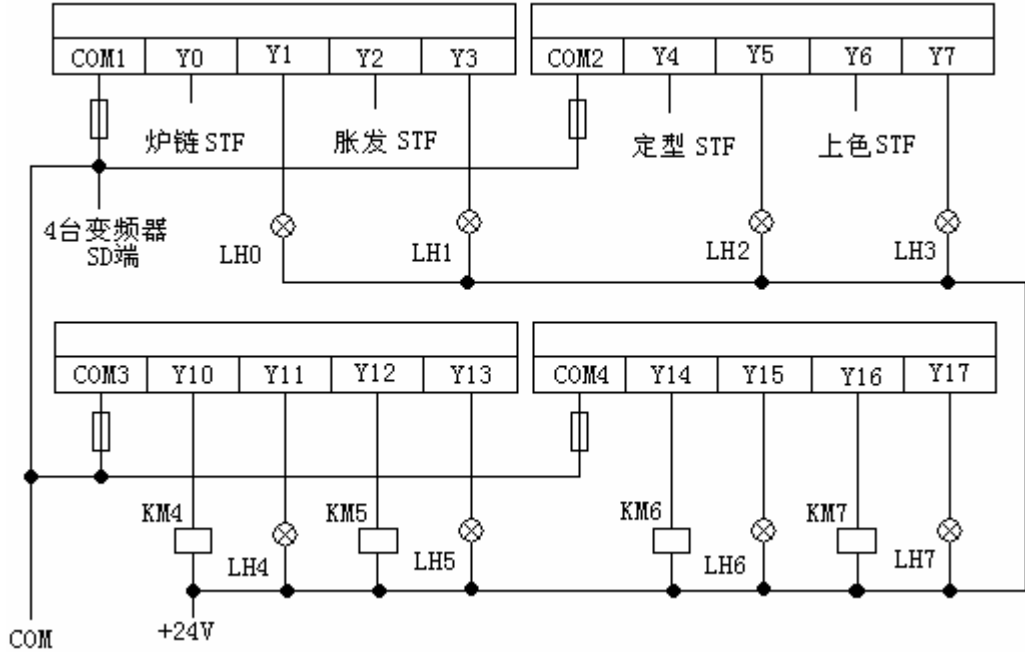


图 2-10 PLC 与电机继电器的接线

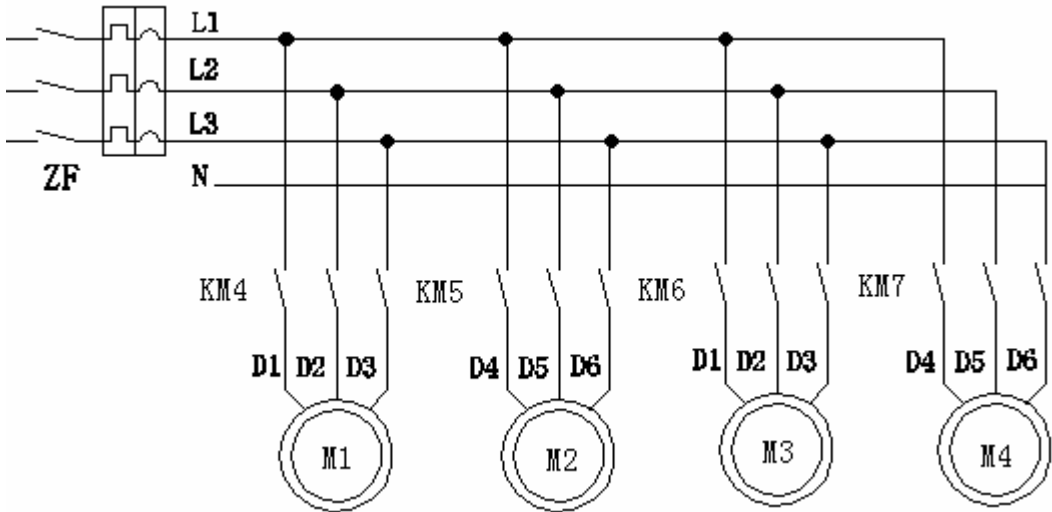


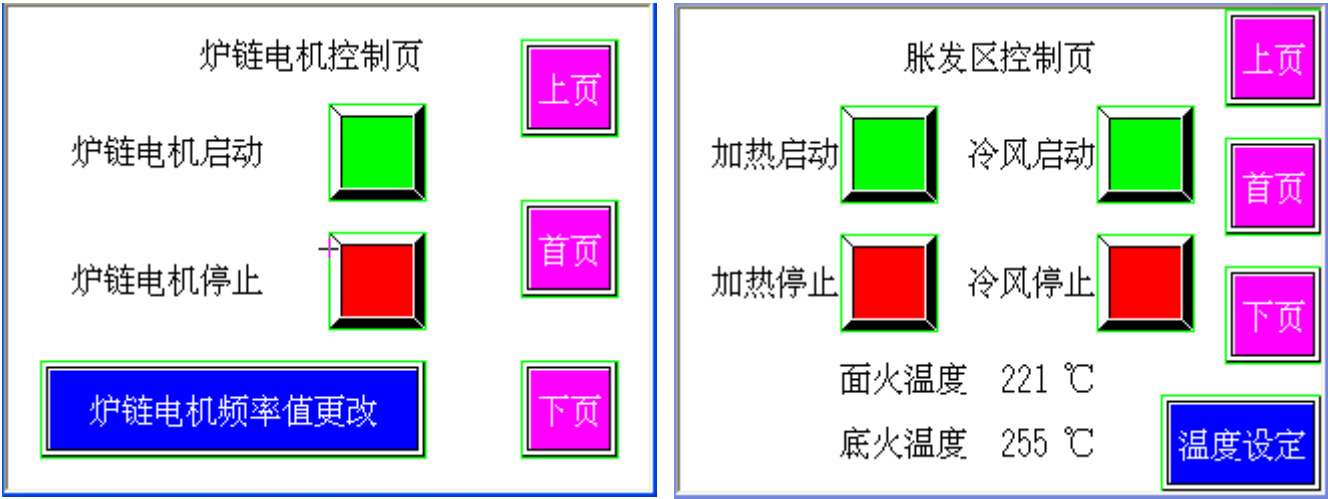
图 2-11 电机的主控制电路图

表 2-1 FX0N-3A 模块的通道分配表

模块号、输入通道号	功能	模块号、输出通道号	功能
1 号模块, 1#通道	胀发区面火测量	0 号模块, 1#通道	炉链电机变频器控制
1 号模块, 2#通道	胀发区底火测量	1 号模块, 1#通道	胀发区变频器控制
2 号模块, 1#通道	定型区面火测量	2 号模块, 1#通道	定型区变频器控制
2 号模块, 2#通道	定型区底火测量	3 号模块, 1#通道	上色区变频器控制
3 号模块, 1#通道	上色区面火测量		
3 号模块, 2#通道	上色区底火测量		

表 2-2 FX2N 的 IO 分配表

输入继电器编号 (X)	功能	输出继电器编号 (Y)	功能
X0	炉链电机启动	Y0	炉链电机启动指示灯
X1	炉链电机停止	Y1	炉链电机停止指示灯
X2	胀发区加热启动	Y2	胀发区加热启动指示灯
X3	胀发区加热停止	Y3	胀发区加热停止指示灯
X4	定型区加热启动	Y4	定型区加热启动指示灯
X5	定型区加热停止	Y5	定型区加热停止指示灯
X6	上色区加热启动	Y6	上色区加热启动指示灯
X7	上色区加热停止	Y7	上色区加热停止指示灯
X10	胀发区冷风启动	Y10	胀发区冷风继电器
X11	胀发区冷风停止	Y11	胀发区冷风停止指示灯
X12	定型区冷风启动	Y12	定型区冷风继电器
X13	定型区冷风停止	Y13	定型区冷风停止指示灯
X14	上色区冷风启动	Y14	上色区冷风继电器
X15	上色区冷风停止	Y15	上色区冷风停止指示灯
X16	炉尾电机启动	Y16	炉尾电机继电器
X17	炉尾电机停止	Y17	炉尾电机停止指示灯



(1)炉链电机 (2)胀发区

图 2-12 部分触摸屏画面

2.3.1 FX2N 介绍

FX2N 系列 PLC 是 FX 系列中最高级的模块。它拥有无以匹及的速度、高级的功能、逻辑选件以及定位控制等特点。表 2-3 总结了 FX2N 的性能规范^[30]。

表 2-3 FX2N 的性能规范

项目	规格
运转控制方法	通过储存的程序周期运转

I/O 控制方法	批次处理方法（当执行 END 指令时） I/O 指令可以刷新
运转处理时间	基本指令：0.08 μ s
	应用指令：1.52 至几百 us 指令
编程语言	逻辑梯形图和指令清单，使用步进梯形图能生成 SFC 类型程序
程式容量	8000 步内置 使用附加寄存器盒可扩展到 16000 步
指令数目	基本顺序指令：27
	步进梯形指令：2
	应用指令：128 最大可用 298 条应用指令
I/O 配置	最大硬体 I/O 配置 256，依赖于用户的选择（最大软件可设定地址输入 256、输出 256）
辅助继电器（M）	一般：500 点 M0 到 M499
	锁定：2572 点 M384 至 M3071
	特殊：256 点 M8000 至 8255
状态继电器（S）	一般 490 点 S0 至 S499
	锁定 400 点 S500 至 S899
	初始 10 点 S0 至 S9
	信号报警器 100 点 S900 至 S999
定时器（T）	100 毫秒 范围：0 至 3276.7 秒 200 点 T0 至 T199
	10 毫秒 范围：0 至 3276.7 秒 46 点 T200 至 T245
	1 毫秒保持型 范围：0.001 至 32.767 秒 4 点 T246 至 T249
	100 毫秒保持型 范围：0 至 3276.7 秒 6 点 T250 至 T255
计数器（C）	一般 16 位 范围：0 至 32767 数 200 点 C0 至 C99 类型：16 位上计数器
	锁定 16 位 100 点（子系统） C100 至 C199 类型：16 位上计数器
	一般 32 位 范围：-2147483648 至+32147483648 数 35 点 C200 至 C219 类型：32 位上/下计数器
	锁定 32 位 15 点 C220 至 C234 类型：32 位上/下计数器
	高速计数器（C） 单相 范围：-2147483648+2147483648 数 一般规则：选择组合计数频率不大于 20KHz.计数器组合注意所有的计数器都锁定。C235~C255

数据寄存器 (D)	一般 200 点 D0 至 D199 类型: 32 位元件的 16 位数据存储寄存器
	锁定 7800 点 D200 至 D7999 类型: 32 位元件的 16 位数据存储寄存器
	文件寄存器 7000 点 D1000 至 D7999 通过 14 块 500 程式步的参数 设置类型: 16 位数据存储寄存器
	特殊 256 点 从 D8000 至 D8255 类型: 16 位数据存储寄存器
	变址 16 点 V0 至 V7 和 Z0 至 Z7 类型: 16 位数据存储寄存器
指标 (P)	用于 CALL 128 点 P0 至 P127
嵌套层次	用于 MC 和 MRC 时 8 点 N0 至 N7
常数 十进位 K	16 位: -32768 至 32768 32 位: -2147483648 至+2147483647 十六进位 H 16 位: -32768 至+32768 32 位: -214783648 至+2147483647 浮点 32 位: $\pm 1.175 \times 10^{-33}$, $\pm 3.403 \times 10^{33}$ (不能直接输入)

2.3.2 FX0N-3A 介绍

该模块具有 2 路模拟量输入 (0~10V 直流或 4~20mA 直流) 通道和 1 路模拟量输出通道。其输入通道数字分辨率为 8 位, A/D 的转换时间为 100μs, 在模拟与数字信号之间采用光电隔离, 适用于 FX1N、FX2N、FX2NC 子系列, 占用 8 个 I/O 点。表 2-4、表 2-5、表 2-6 分别是 FX0N 的模拟量输入规格^[31]、模拟量输出规格、拟量输出规格。

表 2-4 模拟量输入规格

项目	输入电压	输入电流
模拟量输入范围	DC 0 至 10V, DC 0 至 5V (输入电阻 200 千欧)	4 至 20mA (输入电阻 250 欧)
	绝对最大量程: DC -0.5V 和 +15V	绝对最大量程: -2mA 和 +60mA
数字分辨率	8 位	
转换速度	(TO 指令处理时间×2)+FROM 指令处理时间	
A/D 转换时间	100μS	

表 2-5 模拟量输出规格

项目	输入/输出电压	输入/输出电流
最小输出 信号分辨率	0 至 10V 输入 400mV (15V/250 欧)	4 至 20mA 输入: 64uA
	0 至 5V 输入: 400mV (15V/250 欧)	(20~4mA)/250 欧
总体精度	$\pm 1\%$ (满量程)	
隔离	在模拟和数字电路之间光电隔离	
	直流/直流变压器隔离主单元电源	
	在模拟通道之间没有隔离	
电源规格	DC 5V30mA (主单元提供的内部电源)	
	DC 24V $\pm 10\%$, 90mA (主单元提供的内部电源)	
占用的 输入输出点数	占 8 个输入或输出点	
适用的控制器	FX1N/FX2N	
尺寸 (mm) (宽 $\times$ 厚 $\times$ 高)	43 $\times$ 87 $\times$ 90	
重量	0.2Kg	

2.3.3 三菱变频器 FR-A700 介绍

A700 系列变频器具有以下先进的功能和特点^[32]:

(1) 汇总了以往三菱变频器中具有代表性产品的特点, 即: 常规控制性能方面吸取了 A500 的特点 (过载能力强、控制功能多、适合大多数通用场合); 矢量控制方面与 V500 相当 (工作于多种模式: 速度、转矩、位置及各模式的切换、用途更广泛、更专业); 外型结构和辅助功能与 F700 相同 (通讯功能强、信号调整方面近似工业仪表的特点, 调节余地大、使用更为方便)。

(2) 发挥普通电机的最佳性能 (无传感器矢量控制): 驱动无编码器的普通电机实现高精度和快速度响应运行的矢量控制。在 0.3Hz 的超低速下最高可实现 200% 的输出转矩。转矩模式下控制范围 1:20; 响应水平进一步提高, 速度响应 120rad/s, 速度控制范围 1:200。

(3) 驱动带编码器的电机实现高性能的矢量控制: 闭环矢量控制下, 变频器可达到比无传感器矢量控制时更高精度和更快速度响应的性能。速度控制范围 1:1500; 速度波动率: 0.01%; 速度响应 300rad/s。转矩控制范围 1:50; 并具零速控制和伺服锁定功能。位置控制中, 内置 15 段预设位置段, 并且可与 PLC 或脉

冲单元连接后可构成通用伺服系统,实现定位操作。若选用三菱专用电机,可实现低速时连续输出 100%转矩,适合于开卷/收卷等场合。

(4) 简易、实用的 PLC 功能(可选):内置的 PLC 编程功能使操作人员方便地利用三菱 PLC 通用编程软件 GX-Developer 对变频器内的 PLC 编制程序,即除了变频器正常使用外附加了 PLC 的运行功能,进行相关的电气控制,做到一机多用。用户使用此功能时可以简化结构、降低成本。

(5) 强大的网络通讯功能:内置 USB 通讯接口,方便连接 FR-Configurator 变频器设置软件。除内置的基本 485 通讯方式外,通过选用各种总线适配器,可链接于 CC-Link、Profibus-DP、Device-NET、LonWorks、CANopen、EtherNET、SSCNETIII,高效、快速地实现设备网络化。

(6) 内置 EMC 滤波器:有效地抑制电磁噪声,无需外部配置,节省安装空间。

(7) 长寿命设计:主回路电容、控制回路电容、新设计的冷却风扇设计寿命均为十年。

2.3.4 F900GOT 系列触摸屏介绍

F900GOT 系列是经济型人机界面,F940GOT-SWD-C 有八颜色,其特点如下:

- 5.7 寸 STN 液晶显示器-阔视角、高速回应、功能齐备、性能可靠。
- 背景光灯的寿命长达 25000 小时,更可更换,而且还带有自动熄灯功能。
- 有优良的耐酸性,具有相当于 IP65F 的防尘、防水、耐油性等环境性能。
- 具有所有操作面板应有的功能,通过菜单设定可显示日文、英文、韩语及中文汉字。
- 可以改变每 1 点的键尺寸大小,显示系统画面。
- 可对操作人员的级别来进行画面显示,保护那些只可看,不用操作的画面。根据普通操作人员、生产线主管、保养人员、系统设计人员等不同的使用用途,可以限制所显示的画面。
- 可以减少使用 PLC 的数据寄存器,机械的加工数据,定位的移动距离等的初期设定。保存 PLC 的运算结果。
- 可以指定某时段中使指定的设备为 ON。
- 在 F940GOT 上的 RS232C 接口上接上打印机,可列印出采样结果和警报纪录。
- 为了保护 PLC 的程序,可以设定密码,可以设定禁止读出,禁止读/写口令。
- 内置 FX-10P 功能的 PLC 顺序程序的调试及保养都变得方便。通过相当

于 FX-10P 手持编程面板的指令清单程序形式，在 F940GOT 中完成程序读出/写入/插入/删除/监控等功能^{[33][34][35]}。

2.4 电加热隧道式网带烘烤炉的工作原理

用电加热烘烤炉，由于结构简单，使用方便，清洁卫生，现在又采用远红外电热管加热，耗电省，所以应用较为广泛^[36]。

为了适应大量生产的需要，采用以钢带或金属网带为载体的隧道烘炉。与链条式隧道烘炉相比，具有烘烤质量好，容易操作维修，节省能源等优点。采用金属网带使用中比较平稳，苏打饼干和其它各种饼干均能生产。

电加热隧道式网带烘烤炉主要由烘烤炉体，网带、调速电动机传动部分、调偏和张紧机构等组成。

加热隧道式网带烘烤炉的工作原理：将网带在烘烤炉两端的两个辊轮上，借主动轮的转动而运转。它是通过调节调速电动机转速与成型机相匹配的。饼干坯由成型机直接落在网带上，随网带的运转而进入烘烤炉内。饼干烘烤完毕，从烘烤炉的末端出来，进行冷却。

网带在运行中，易走偏、易伸长，需用调偏和张紧机构进行调节。

2.5 多温区电气加热炉控制系统数学模型

电烘炉是典型的一阶惯性延时对象，其形式为：

$$G(s) = \frac{Kc}{Ts+1} e^{-\tau s} \quad (2-2)$$

实验建模原则上是把被研究对象看作为一个黑箱，通过施加不同的输入信号，研究对象的输出响应信号与输入激励信号之间的关系，估计出系统的数学模型。这种方法也可称为系统辨识方法或黑箱方法，见图 2-13。



图 2-13 黑箱法

显然，任何一个对象都可能有多多个输入变量和输出变量，当我们要研究的是 x 与 y 之间的关系时，就应该将施加的输入信号加在 x 输入端上，并记录相应的 y 的变化。

这种方法对于复杂对象更为有效。对于已知的一阶或二阶系统，通过实验方法测取其特性参数也很方便、实用。常用的方法有：

(1) 阶跃扰动法。当对象处于稳定状态时，施加一个阶跃信号到输入端，记录输出端的变化曲线即可。阶跃信号容易获得。

(2) 矩形脉冲法。这时所施加的输入信号如图 2-8 所示，相当于在 t_1 时刻施加了一个阶跃扰动之后，在 t_2 时刻再施加一个幅度相同但方向相反的阶跃扰动。与阶跃扰动方法相比，干扰仅施加较短的时间。因此，幅度可以相对大一些，以提高试验精度。

(3) 周期扰动法。所谓周期扰动法就是施加周期信号作为扰动。常用的周期信号有矩形脉冲波和正弦波。周期信号围绕平均值上下波动，对系统的影响很小。当输入为一系列不同频率的正弦波时，可直接获得系统的频率特性。这是周期扰动法的主要优点之一。

除了上面介绍的几种方法之外，还可以直接从正常生产过程的记录数据中分析过程特性，建立数学模型。这种方法称为在线辨识。但它需要大量的数据、较长的时间、较多的数据处理技术水平，而且精确度也不够高。为了提高所得模型的可信度和精度，有时采用多种方法相互验证，相互补充。

当反应曲线上升到最终值的 63.2% 时，所用的时间正好为时间常数 T 。因此，从实测的反应曲线上，相应于最终值的 63.2% 处的时间值就是时间常数 T 的数值。

当时间 $t=3T$ 时，曲线已经很接近最终值，此时计算值为最终值的 95%；当时间 $t=5T$ 时，曲线已几乎与最终值重合，此时的计算值为最终值的 99.3%。可见，时间常数 T 也是标志系统动态过程何时基本结束的重要参数。因此，时间常数 T 是系统的动态参数。

阶跃响应曲线测试。阶跃输入信号是 100，稳定输出是 100，可得比例常数为 1。从图 2-14 可知， $T=6$ ， $\tau=8$ ，所以，加热炉模型为

$$G(s) = \frac{e^{-8s}}{6s+1} \quad (2-3)$$

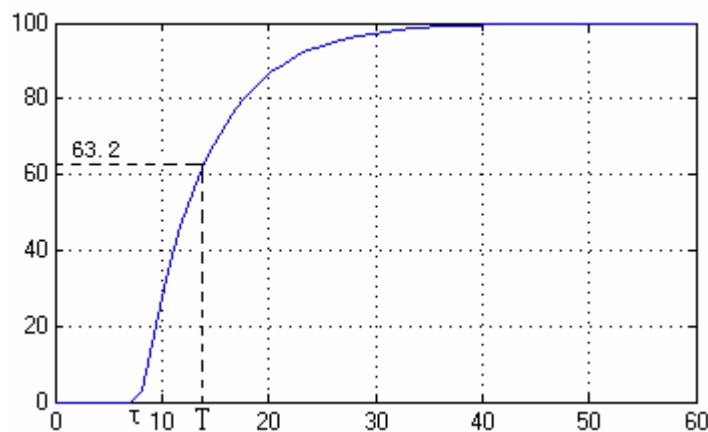


图 2-14 阶跃响应

2.6 焙烤技术

饼干的焙烤工艺技术主要是根据上述胀发、定型、脱水和上色四过程的理论,按照各大类产品的基本特性,设计和制订出合理的炉膛(各烤区)温度分布和焙烤时间,高效地焙制出品质优良的饼干^{[37][38][39]}。

酥性、韧性和苏打饼干等三大类产品都有各自的配方用料范围(主要是油脂和糖的用量),每一大类产品中的各具体品种配方虽有差异,但其面团和生坯的基本特性甚为接近,归属于同一类。为此本文以此三大类产品的焙烤技术分别讨论如下:

2.6.1 苏打饼干的焙烤技术

市售苏打饼干绝大部分为咸苏打饼干极少数品种是甜苏打饼干。本节讨论的内容属咸苏打饼干。

一般咸苏打饼干配方中,每 100kg 面粉的油脂用量约为 12~24kg。食盐约为 18~2kg,糖的用量极少或不加,工艺技术上分为一次发酵、二次发酵法或三次发酵法制作苏打饼工。不论采用何种方法进行面团发酵,面团中均有大量湿面筋形成,经过发酵的面团呈多孔性结构,滚压成型后的生坯中留存适量 CO_2 ,含水量较高(约 28%~30%)。接此基本特性,苏打饼干的焙烤工艺宜采用“底、面火温度逆向设置(即底火温度由高到低,面火温度由低到高)”。合理的温度设置是:第 1 烤区“底火温度高,面火温度低”。底火温度旺盛可使足够的热量迅速通过网带传至生坯内层和中心,促使分布在生坯中的 CO_2 急速膨胀,随后碳酸氢钠受热升温,至 60~65℃ 以上时分解产生 CO_2 ,并在升温过程中膨胀,使生坯迅速胀发。这一阶段相应采取低温面火,使生坯表面升温缓慢,保持其柔软而具有伸展之特性,延缓饼干外壳硬化,使饼体膨发饱满,内部形成良好的层次结构,赋予苏打饼以疏松的口感。

苏打饼干焙烤技术上采取第 1 烤区“底火温度高,面火温度低”的温度设置极为重要,这是苏打饼干获得“炉内胀发”的关键。如果底火温度偏低,即使发酵良好的饼坯,也将因胀发不良而影响疏松度。反之在底火足够的技术条件下对于发酵略微欠佳的饼坯,亦可在质量上得到适度改善。

苏打饼干成型技术分为“不拉头子”和“拉头子”两种,“不拉头子”的苏打饼干在网带上除了两边保持适当空档以外,生坯满板覆盖在网带上,覆盖率高达 90% 以上,不言而喻,这种苏打饼干焙烤时底火热量消耗太,一般第 1 烤区底火炉膛温度在 350℃ 以上。“拉头子”的苏打饼在网带上坯前后左右都留有 8~10mm 空档,其覆盖率约为 75% (随块形大小而定),即留有约 25% 的空档面积,底火热量消耗

相对低些,一般底火炉膛温度约为 330~350℃(随块形大小而定),面火炉膛温度向炉向内逐步升高至 200℃即可。

生坯进入第 2 烤区,面火温度逐步增大,底火温度逐步减小。此时重要的是逐步加快饼体脱水速度,并使已经胀发到最大限度的外壳逐步硬化定型。如果第 2 烤区面火温度不够,将会使胀发起来的饼体“过度回落”,造成苏打饼干疏松度不良。一般而火炉膛温度约 250℃,底火温度(约 280℃)略高于面火温度。

进入第 3 烤区,为上色阶段。底火和面火炉膛温度都降至饼干上色合适的温度范围(约 200℃以下),以防上色过度,色泽“过老”。

苏打饼干在上述温度条件下的焙烤时间约为 6~7min(包括炉内缓冷区的运行时间在内,以下同)。

2.6.2 酥性饼干焙烤技术

酥性饼干配方中油脂和糖的用量较高,蛋制品、奶制曲等辅料用量亦较为丰富。一般酥性饼干配方中,每 100kg 面粉的油脂用量约为 16~30kg,砂糖用量约为 28~36kg,调制面团时的加水量较少(面团含水量约为 16%~20%),并在有限控制湿面筋形成的工艺条件下进行面团调制,面团(和生坯)结构疏松,按此基本特性分析,酥性饼干宜采用“炉温较高,培烤时间较短”(与韧性饼干相对比较而言)的焙烤工艺。生坯进炉后胀发和定型阶段需要较高的底火和面火温度(块形大的生坯宜选用底火温度大于面火温度)。使生坯底部迅速凝固,防止由于配方中油脂用量较多而饼体发生“油摊”,此后培烤阶段的底火和面火温度均可逐步降低。培烤曲线见图 2-15、图 2-16。

由于生坯含水量较低,焙烤失水相对较少。适度降低炉膛温度仍能使产品水分达到合格标准。酥性饼干配方中油糖和蛋奶制品等辅料比韧性饼干为多,焙烤后期适当减低炉温,对于饼体表面上色也是适宜的。工艺技术上可以根据产品配方、块形大小、生坯厚度和软硬程度等不同情况选择炉温,一般可供参考的炉膛温度为:第1烤区约为 250~300℃;第2烤区约为 200~250℃;第3烤区约为 180~200℃,在上述温度条件下的参考焙烤时间约为 5~6min。

油、糖和其他辅料较少的一般酥性饼干,调制面团时加水量稍多一些。尽管是在有限控制湿面筋形成的工艺条件下进行面团调制,但与配料丰富的高档酥性饼干比较,生坯中湿面筋的形成量略多一些。酥性饼干饼面无“针孔”。由于这些特点,生坯进炉后如遇高温面火,表面容易“起泡”,可将第 1 烤区的高温段略向后移。至于底火温度问题,采用网带为载体的情况下,当无“凹底”之虞;在采用钢带为载体时,如遇饼干发生“凹底”,底火温度的高温段亦应略向后移。

2.6.3 韧性饼干焙烤技术

韧性饼干与酥性饼干比较, 配方中油脂和砂糖用量较少, 一般配方中每 100kg 面粉的油脂用量约为 10~16kg, 砂糖用量约为 20~26kg, 其他辅料亦少, 加水量较多, 面团含水量约为 22%~24%。调制面团是在面筋充分吸水胀润的工艺条件下进行的, 因此面团和生坯性质较为柔韧, 生坯中存在较多结合水而焙烤时水分较难脱除, 按此基本特性, 韧性饼干宜采用“炉温较低, 焙烤时间较长”(与酥性饼干比较而言)的焙烤工艺。

生坯进炉后, 第 1 烤区需要较高的底火温度。一般炉温由进口逐步升高至 250~280℃, 以较多热量传至体内层和中心, 使疏松剂分解, 饼体胀发。韧性饼干生坯中湿面筋已充分吸水胀润, 其持气性较强, 焙烤开始时如遇高温面火, 容易引起生坯表面“起泡”, 除了采取饼坯上打“针孔”的措施以外(饼坯上打“针孔”还可加快水分蒸发, 相应缩短焙烤时间), 第 1 烤区面火温度应稍低些(约 200℃)为宜, 使饼面保持柔韧状态, 有利于饼体胀发。第 2 烤区底火前半段仍应保持与第 1 烤区相近的底火温度, 同时面火温度由第 1 烤区递步升高至第 2 烤区的 250~280℃, 以提供足够热量, 加速饼体定型和脱水; 第 3 烤区底、面火温度逐步降低至 200℃左右。这一阶段应注意的是面火温度要保证饼干上色之需要。韧性饼干块形大小差异较大, 如块形大的圆形玛利饼干, 直径约 50mm(中型), 块形小的宝石饼干, 直径约 20mm(小型)。两者面积相差 6 倍。

此外还有呈不规则形状的动物型饼干和玩具型饼干等, 因此全炉各烤区温度和培烤时间应随具体品种而定, 一般韧性饼干在上述温度条件下参考焙烤时间约为 6min 左右。

生坯特性决定各类饼干的焙烤温度曲线, 从以上图比较可以看出: 苏打饼干和酥性饼干的焙烤温度曲线特征完全不同。韧性饼干生坯中面筋已充分吸水胀润, 此点与苏打饼干生坯中的湿面筋有相似之处, 又从韧性生坯含有相当数量糖分来看, 与一般酥性生坯相似。因此, 韧性饼干焙烤温度曲线有介于苏打饼干和酥性饼干焙烤温度曲线之间的走势。

焙烤技术是影响苏打饼干质量的重要环节。在隧道式网带炉内, 饼干生坯在焙烤过程中经历胀发、定型、脱水、上色和缓冷等五个过程^{[40][41]}。

苏打饼干生坯含水量高达 28%~30%, 为此需要高温长时间培烤。除了烤炉末段作为缓冷区不加热以外, 加热区分为前、中、后三个烤区。大约各占加热区总长的 1/3。

第一烤区最为重要, 工艺技术上温度设置是: “底火温度高(约 350℃以上), 面火温度低(200℃左右)”。饼干生坯进炉以后, 依靠高温底火, 大量热量从生坯底部传入饼体内部, 面片滚压时留存在生坯中的二氧化碳气体受热迅速膨胀, 随

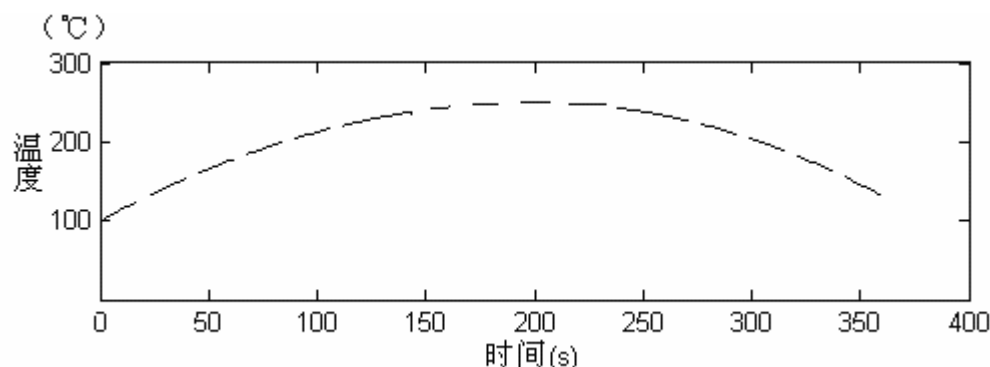


图 2-15 面火输入曲线

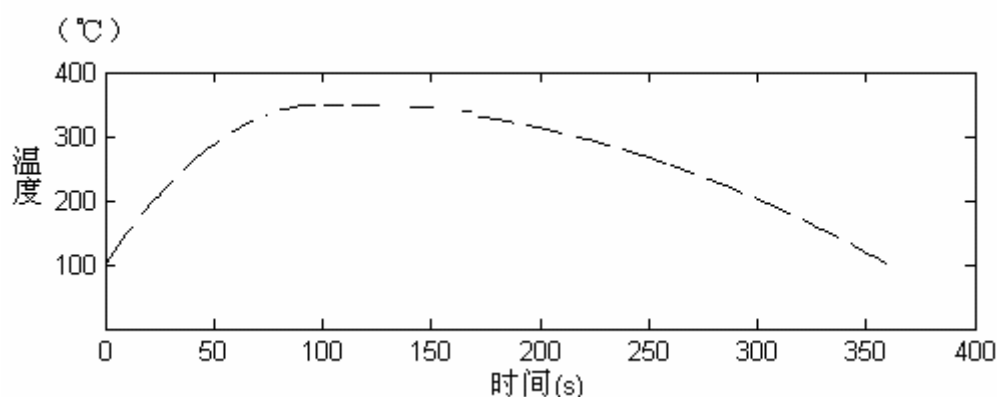


图 2-16 底火输入曲线

后,小苏打受热温度上升至 65°C 以上时分解生成二氧化碳气体,并在高温下膨胀。在表面温度上升至 100°C 时水份开始蒸发。饼坯内层水分逐步转移到表面加大蒸发量,此时饼干生坯上表面的温度不高,外壳尚未硬化定型,饼干生坯就是在“底火大,面火小”的工艺条件下胀发饱满,内部形成良好的层次结构,赋予苏打饼干优良的疏松度。如果第一烤区底火温度不高,生坯就会胀发不良,影响产品内部层次结构和疏松度。

第二烤区温度设置是:“底火温度逐步降低(降至 250°C 左右),面火温度逐步升高(升至 $250\sim 280^{\circ}\text{C}$)”。在此工艺条件下使胀发至最大限度的饼体加快失水速度,外壳逐步硬化定型。如果第二烤区的面火温度不够,便会推迟定型,甚至会使胀发起来的饼体重新“回落”,造成内部层次结构不良。影响产品质量。

在第三烤区内,饼体的水分已降低到一定水平,开始上色,这一烤区的温度设置是:底火温度进一步降低,面火温度亦由高转低(上、下火温度约在 200°C 左右)。防止温度过高和上色过度。

培烤结束,进入缓冷区,此时饼体含水量为 $8\%\sim 10\%$ 。而且温度较高,在缓冷区内,饼体继续蒸发水分。使其在出炉时达到水分规定标准,同时逐步冷却降温,防止温度较高的饼干出炉时与炉外冷空气接触,温差较大会产生“自然裂缝”。

整个过程约需 $6\sim 7\text{min}$ 。

2.7 食品的高温工艺

人类自从知道用火，深深得益于食品的热处理。热加工后的食品美味适口，提高了消化吸收率，降低了生物性病原威胁，延长了食品保藏期限。当然，热处理不当，也可产生营养素损失，形成有害热解产物等，但这毕竟是次要的。食品卫生上对高温工艺的着眼点在于正确理解高温工艺的基础上，控制食品质量变化和达到消毒杀菌要求。

1. 高温工艺的应用

食品高温工艺主要应用于以改善食品色香味型即烹任意义上的热处理，食品加工所必需的加热，以及消除生物病原上的消毒杀菌。如煎炒烹炸、罐藏、焙烤、烘干浓缩、熬糖、炼油、炸制等等。工艺要点是利用适宜热源，通过水、汽、油及金属工具等介质，对食品进行热处理。

食品热处理的温度，通常考虑消毒杀菌有效、蛋白质变性与淀粉糊化等必要温度，从 60℃ 开始即可认为是热处理。能够杀死繁殖型微生物，包括常见致病菌，而又最大限度保持食品结构及营养素的巴氏消毒法，温度范围为 60~95℃。多用于鲜奶、啤酒、酱油、某些饮料等的杀菌。包括 63℃、30 分钟的传统巴氏消毒法，和 72~95℃、10~30 秒钟的高温瞬间巴氏消毒法，后者生产效率高，杀菌效果相同。食品热处理最常用的温度是 100℃，不仅可以消除绝大多数生物病原，也是习惯上认为食物生熟的界限温度，而且以常压下水沸为标志，界限鲜明，100~120℃ 是高温杀菌范围。罐头等须长期无菌保藏的食品多用此温度，须借助高压方可达到。当鲜奶、软罐头等有做成薄层进行热处理的条件时，可用超高温(UHT)处理，即温度达 120~150℃、1~3 秒钟，鲜奶杀菌效果与前述传统的和高温瞬间巴氏消毒法等效，当然须有灵敏准确的升降温控制手段。消毒杀菌以外的热处理，基本上均应在此温度范围内。

2. 高温工艺的热源

最普遍应用的供热方式是炉灶，虽然比较原始，但简单经济，而且在中餐烹饪上几乎是气热、电热所无法取代的。一般用隔壁灶等方式，防止煤、煤气、燃油等的污染。一火多用的万能灶，即在炉膛内安装水加热器的办法，因其温度压力不稳定，除简单采暖、供应少量热水外，作为热源意义不大。高温工艺普遍采用的供热方式是安装中央锅炉，连接管道，供水供气，可准确调控气水用量及其压力温度与时间。如供给的热水、热气直接与食品接触(如将蒸汽通入食物蒸煮

锅中), 则此种锅炉应与一般采暖锅炉在水质卫生要求上不同。饼干面包等焙烤业的烤炉, 在卫生上以用电烤炉为好。直火烘干水分高的粮食, 曾证明有致癌性物质污染, 因此任何情况下均不应用烟火直接烘烤食品。用远红外线(波长 1000 μ m 以上)加热是一种节省能源的方式, 主要导热方式是辐射, 穿透力强。辐射原件应选用碳化硅、氧化镁、氧化钛等安全无害材质。红外线消毒柜升降温很快, 不适于陶瓷器皿消毒。另一种热源是微波加热。微波电场是超高频电场, 食品中水分子是电荷分布不均匀的双极子, 所以随电场方向改变而改变, 频率从 915 到 2415MHz, 水分子超高频振动转化为热能。其特点是食品内(水分子)产热, 升温快而受热均匀。130g 的牛排, 由生到熟, 600W 功率只需 1 分钟, 1200W 才 40 秒即可。120g 的馒头同上条件只需 40 秒和 20 秒, 150g 扒牛肉, 由生到熟只需 3 分和 1 分 40 秒。大肠杆菌 15 秒全部死灭。可见微波加热的优点是快速、节省能源、杀菌效果高, 营养素损失少、无害, 适用于水分分布均匀食品的再加热。但不能用金属器皿, 防止微波反射, 可用玻璃、陶瓷、纸、耐热塑料等盛装食品, 且能旋转, 使微波均匀。

3. 高温工艺对食品质量的影响

高温作用于食品, 可使食品质量发生一系列改变。主要表现在:

(1) 蛋白质变性。指高温作用下蛋白质分子四级结构改变, 空间构象破坏, 肽链松散开, 酶等特殊蛋白质失去生理功能, 氮溶解指数下降, 保水性下降, 易受消化酶作用而有利于在体内消化吸收等。热处理也可使食品蛋白质由溶胶状态变成凝胶状态而改变食品构型, 加热也可使食品中游离氨基酸、寡肽、嘌呤、嘧啶、肌酸等增加或溶出, 而使食品有悦人的香气与美味。近年有报告称蛋白质中色氨酸、谷氨酸等, 在 190℃ 以上可热解产生有诱变性的杂环胺类化合物。

(2) 油脂变性。油脂经 160~180℃ 以上加热, 特别是达 250℃ 时, 将产生过氧化物, 低分子分解产物、脂肪酸的二聚体和多聚体、碳基和环氧基等, 以致油脂变色、粘度上升、脂肪酸氧化, 而有一定毒性并破坏氨基酸等营养素。例如豆油 180℃ 加热 64 小时, 聚合物含量达 26%, 玉米油 200℃ 经 48 小时过氧化物价由 1.11 至 2.0L, 酸价由 0.2L 至 1.6L, 粘度由 0.65L 至 7.55L(Poises 法, 25℃)。这些结果在国内已得到一定验证, 主要呈现于反复加热的煎炸油中。为此, 我国专门制订了煎炸油卫生标准及卫生管理办法, 规定煎炸油除须符合食用油要求外, 酸价不超过 5, 羰基价不超过 50meq/kg, 煎炸温度在 250℃ 以下, 煎炸后的油须滤过除渣后始得再用等(GB7102—86)。最好是少用或不用反复高温处理过的油脂。

(3) 碳水化合物变性。高温工艺对食品中碳水化合物有多种影响, 主要有:

1) 淀粉的 α 化即糊化：淀粉粒结晶被破坏，膨润与水结合，粘度增高。 α 化即淀粉性食物一般认为的生熟标志，要求这类食物 α 化至少达 85% 以上。这是人体吸收利用淀粉的必要条件。几种食物淀粉的糊化温度，大米、马铃薯、玉米、小麦粉分别为 63.6°C 、 64.5°C 、 86.2°C 和 87.3°C 。淀粉类食物热处理后的 α 化程度，应是高温工艺关注问题之一。

2) 淀粉性食物老化：俗称回生。老化与糊化是淀粉粒呈结晶态不与水结合或分子内氢键结合破坏与水结合的两个相反的过程，在一定条件下老化与糊化是可逆的。如馒头冷凉之后变硬(老化)，干烤之后变软(糊化)即其一例。馒头、面包一类食品，人们均不喜欢其老化。食物老化条件是直链淀粉比例大、玉米、小麦等来源的淀粉、水分含量在 30%~60%，弱酸性， $0\sim 60^{\circ}\text{C}$ 等。保持 60°C 以上，食物即不发生老化。蔗糖酯类、盐类、 PO_{4-3} 、 CO_{3-2} 等有脱自由水或阻止淀粉分子间结合作用的物质，均有防止食物老化作用。

3) 食品褐变：食品褐变有酶促褐变与非酶褐变。前者如苹果、梨、茄子中鞣酸、氯原酸等一类多酚化合物，在多酚氧化酶作用下形成红棕色的现象。后者，非酶褐变也称碳氨反应或美拉德反应。系由蛋白质、氨基酸等的氨基和糖以及脂肪氧化的醛、酮等碳基所发生的反应。使食物带有红棕色和香气，如烤面包的硬壳，酱油、豆酱的颜色气味，炼乳、果汁等的棕色物质等。有的是人们希望的，有的则是要避免的。凡原料中有氨基与碳基的高温工艺，均须注意这种褐变反应。

4) 碳水化合物的焦糖化：是焙烤业、糖果业高温工艺中食品的重要变化。适度焦糖化可赋予食物以悦人色泽与香气。焦糖化一般分二个阶段。 150°C 以下，糖类分子不断链，产生一系列异构化(α, β 糖、醛酮糖异构化)，分子间和分子内脱水，生成寡聚糖、无水糖等。温度超过 150°C ，则糖分子碳链断裂，产生低分子挥发物，如麦芽醇及某些酮类等香气物质，碱性物质有促进这种反应的作用。

5) 食品质量的其他影响：食品热处理最显著的变化是影响色香味型，除已叙述者外，还有：四吡咯衍生物分解变化所致食品变色，如植物性食品中叶绿素被分解或脱掉镁离子而变褐，但在碱性下生成叶绿醇、叶绿酸、 Mg^{2+} 被 Cu^{2+} 取代则绿色反而更鲜明。血红素是动物性食品中的四吡咯色素，以血红蛋白和肌红蛋白形式存在。加热时其中珠蛋白变性， Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} ，生成变性血色素而使肉类由红变灰。虾蟹体内类胡萝卜素与蛋白质结合，生鲜状态时呈青灰色，加热后或腐败时蛋白变性或分解，则虾蟹即显示类胡萝卜素的红黄色。许多天然食品含有低分子易挥发的香气物质，如水果、茶叶、酒类等，加热时香气浓郁，但随即因挥发丧失而失去香气，牛乳有时因所产酸、醛、酮、硫化氢等而产生热臭味。烧煮肉类的诱人香气主要是内酯、映喃、吡嗪和含硫化合物；其鲜美滋味则主要是蛋白质分解产生的谷氨酸钠、氨基酸酰胺肽、肌苷酸等，一般总称为含氮浸出

物。

2.8 脱水工艺

1. 脱水工艺的应用

自然降低食品水分含量称为干燥，如日晒、阴干等；借助各种技术手段减少食品水分称为脱水，二者常混用称做脱水或干制。食品脱水处理的目的在于延长食品货架寿命，防腐保藏；减少食品重量及体积，便于贮存运输，如鲜肉 $1.42\sim 2.41\text{m}^3/\text{吨}$ ，脱水后只有 $0.425\sim 0.566\text{m}^3/\text{吨}$ ；鲜果品 $1.42\sim 1.56\text{m}^3/\text{吨}$ ，脱水后只有 $0.085\sim 0.20\text{m}^3/\text{吨}$ ；近年脱水还成为方便与快餐食品的工艺手段，如速煮面和固体汤料等。脱水工艺普遍应用于加工奶粉、炼乳、肉松、肉干、鱼松、鱼干、蛋粉、蛋白片、饼干、谷粉、豆粉、脱水蔬菜、果干；砖茶、固体饮料等等。

2. 脱水工艺概要

食品脱水虽有上述三方面的目的，但脱水工艺的本质在于将食品中水分降至足以抑菌防腐程度。食品中水分存在形式有三：一为吸附于蛋白质和淀粉等大分子表面的结合水；二为在大分子表面形成二层以至多层的溶解水；三为存在于固形成分孔隙中与食品成分松散结合的自由水。食品脱水去掉的水分主要是自由水和溶解水。食品中以百分含量表示的总水分，实际上包括这三种水分及低沸点挥发物，应该正确地称之为干燥($98\sim 105^\circ\text{C}$)减重才是。微生物生存和在食品防腐保藏中起决定作用的均是食品中的活性水分，即可以自由蒸发的水分，其蒸发难易，即蒸汽压(P)高低与同一条件下纯水蒸汽压(P_o)之比称为水分活性 (Water Activity)，简称 a_w 或 A_w 。若食品或溶液中水和溶质的克分子数分别为 n_1 和 n_2 ，则 $P=P_o n_1/(n_1+n_2)$ ，或 $a_w=P/P_o=n_1/(n_1+n_2)$ 。因为 a_w 是表示食品中水分状态，而食品周围空气中水分状态以相对湿度表示，当食品水分与空气中水分平衡时，则 $a_w=\text{相对湿度(以小数表示)}$ 。例如空气相对湿度为 90%，食品 $a_w=0.90$ ，如二者不相等，则说明相对湿度小或大，食品水分即将蒸发或吸水，而使 a_w 下降或增大，直至 $a_w=\text{相对湿度}/100$ 为止。这个关系也是测定食品 a_w 的根据。影响食品脱水效率的因素有温度、气压、时间、气流、气湿、食品表面积等。脱水方式往往根据工艺设备条件和质量要求，分别采用自然干燥和人工脱水方式。

(1) 晒干和风干。需要空气相对湿度低，有一定气流流速，虽简便易行，但影响食品质量。

(2) 空气对流脱水。是应用最广的脱水方式，一般在常压下，使空气自然或

强制对流。应用具体方式又有强制通风柜式设备；隧道式脱水设备，比前者容量大，效率高，可连续生产；输送带或输送槽式设备；气流脱水设备，适用于粮谷干燥，水分在 40% 以下，脱水过程物料无固结之虞者；仓贮脱水，适用于脱水蔬菜等压片食品，先脱去大部分水，再经几十小时通暖干气流的仓贮，使物料中干湿不匀水分，得到扩散均匀；膨化脱水，与崩爆米花一样，食品达高压后突然减压。内部水蒸气膨化爆出；泡沫脱水，将蛋白类或加入起泡剂的果浆先制成泡沫状，再用热气流干燥；喷雾脱水，将浓缩奶、蛋液等喷成雾滴，增大表面积，经热气流脱水而制成奶粉、蛋粉、果汁粉类。

(3) 滚筒脱水。将液态、浆态、泥态食品与 100~145℃ 金属滚筒接触 2 秒到几分钟，因其设备复杂，物料受限，且质量往往受影响，因而不是一个理想脱水方式。

(4) 真空脱水。适用于不耐高温处理的食品，如果汁粉，可在 0.33kPa~0.66kPa (2.5~5mmHg)，37~82℃ 低温真空(减压)下脱水。虽设备昂贵但产品质量优良，有时还可使物料先充惰性气体后进入真空室，发生膨化，即真空膨化相结合脱水。

(5) 冷冻脱水或称升华脱水。食品先经冷冻，然后再经低温真空升华脱水。食品内水分（水溶液）必须达到三相点（固态、液态、气态共存或处于平衡的条件）以下才能升华脱水。对水来说，三相点是 0℃、0.63kPa (4.7mmHg) 压力。实用冷冻升华条件多为 -4℃、0.53kPa (4mmHg) 压力以下。脱水干制品应注意包装，防止吸水。果干一类尚应防止虫卵污染及生虫，为此可用甲基溴烟熏或适宜防腐剂，品种、用量、残留量须符合添加剂使用卫生标准。有些食品如果干等还须经速化复水处理，一般有压片法、刺孔法等，使食用前易于复水。还有些食品如脱水蔬菜、砖茶等，脱水后要经压片（或压块），以缩小容积有利运输，也耐保藏。脱水食品的耐保藏性和复水后的质量，是脱水工艺合理性的重要标志。

3. 脱水工艺与食品质量

食品脱水过程水分蒸散速度并不一致，一般分为预备脱水期、恒率脱水期和减率脱水期等三期，前二期水分可等率减少，随时间加长，水分几乎成一定坡度直线下降，水分可脱除 90% 左右，但减率期水分蒸发速度大减，为脱去残存 10% 的水分，几乎仍需与前两期相等的时间，因此不仅耗费大量能源，而且由于食品成分在表层加浓，形成硬壳，以及随脱水过程加长所产生的一系列影响，如蛋白质变性、复水率低、脂肪酸败、褐变、焦糖化以及感官方面的改变，除所希望的变化外，多是对食品质量有影响的。为改善这些影响，近年推崇一种中间水分食品，有人称为半湿半干食品，指在 0.6~0.85，总水分约在 20%~40% 之间，不

仅可克服上述缺陷，尤其是减少能源消耗，降低费用，而且具有韧性口感，受消费者欢迎，也有一定的耐保藏性和便于运输、包装性质。这种食品有时也可借助加入多元醇、糖、盐等“湿润剂”，以降低其 a_w 值；使用防腐剂抑菌或其他改善食品风味外观手段。脱水过程中对食品质量的其他影响基本与高温工艺项下所述相同。由于食品脱水工艺常是温度不过高而处理时间较长，为防止工艺过程中酶对食品质量的不利影响，都在脱水前对食品先行漂烫，即 70°C , 1~3 分钟，或用 0.13% 亚硫酸及其盐类处理，破坏氧化酶等酶类，而使食品营养成分有更多保存，食品质量变化更小。

2.9 小结

本章介绍了隧道式电烘炉的系统结构和饼干的生产工艺过程。隧道式电烘炉系统包括机械传动部分和电气控制部分，系统结构比较复杂，炉内温度必须根据饼干的工艺要求合理控制。为了实现隧道炉的炉内温度的可靠控制，使之符合饼干生产要求，良好的控制算法是必不可少的。

第三章 数字 PID 控制算法及其仿真

3.1 引言

PID 控制是最早发展起来的控制策略之一, 由于其具有原理简单、使用方便、鲁棒性强、适应性广等优点而成为生产过程中的一种最基本的控制方法, 广泛地应用于石油化工、电力、冶金、轻工、水利等行业。自从计算机进入控制领域以来, 用数字计算机替代模拟调节器组成的计算机控制系统中, 不仅可以用软件实现 PID 控制算法, 还能充分利用计算机的丰富功能, 使 PID 控制更为灵活实用^[42]。

3.1.1 常规 PID 的控制原理

在现在控制领域中, 温度控制占据重要的位置。PID 控制是温控系统中一种典型的控制方式, 是在温度控制中应用最广泛、最基本的一种控制方式。随着科学技术的发展, 各行各业对温度控制精度的要求越来越高, 经典的 PID 控制在某些场合已经不能满足要求, 因而智能 PID 控制的引入是精密温控系统的发展趋势。

具有比例-积分-微分控制规律的控制器的, 称 PID 控制器。其运动方程为:

$$u(t) = k_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (3-1)$$

比例环节是按比例反应系统的偏差信号 $e(t)$, 系统一旦出现了偏差, 比例调节立即产生调节作用以减少偏差。比例作用大, 可以加快调节, 减少误差, 但是过大的比例 k_p , 使系统的稳定性下降, 甚至造成系统的不稳定。要有效消除静差, 需引入积分环节和微分环节。积分环节用于消除系统稳态误差, 提高无差度。输出信号与偏差存在随时间的增长而增强, 直到偏差消除, 输出信号保持原输出值不变, 故能消除静差。积分作用的强弱取决于积分时间常数 T_i , T_i 越小, 积分作用就越强。反之则积分作用弱, 但加入积分调节会使系统稳定性下降, 动态过程变慢。而微分调节是指调节器的输出与偏差对时间的微分成比例, 微分调节器在温度有变化“苗头”时就有调节信号输出, 变化速度越快、输出信号越强, 故能加快调节速度, 降低温度波动幅度, 改善系统的动态性能。在微分时间 T_d 选择合适情况下, 可以减少超调, 减少调节时间。微分作用对噪声干扰有放大作用, 因此过强的微分调节, 对系统抗干扰不利^[43]。

3.1.2 数字 PID 控制器

在电子数字计算机直接数字控制系统中, PID 控制器是通过计算机 PID 控制算法程序实现的。计算机直接数字控制系统大多数是采样-数据控制系统。进入计算机的连续-时间信号, 必须经过采样和整量化后, 变成数字量, 方能进入计算机的存储器 and 寄存器, 而在数字计算机中的计算和处理, 不论是积分还是微分, 只能用数值计算去逼近。

在数字计算机中, PID 控制规律的实现, 也必须用数值逼近的方法。当采样周期相当短时, 用求和代替积分, 用差商代替微商, 使 PID 算法离散化, 将描述连续-时间 PID 算法的微分方程, 变为描述离散-时间 PID 算法的差分方程。模拟表达式:

$$\frac{P(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (3-2)$$

$$\text{将积分项和微分项离散化: } \int_0^n e(t) dt \approx \sum_{j=0}^n E(j) \Delta t = T \sum_{j=0}^n E(j) \quad (3-3)$$

将上两式代入模拟表达式中得到离散 PID 表达式:

$$\frac{de(t)}{dt} \approx \frac{E(k) - E(k-1)}{\Delta t} = \frac{E(k) - E(k-1)}{T} \quad (3-4)$$

上式的输出与阀门开度位置一一对应, 也称为位置型 PID 算式。用位置型 PID 算式计算 $P(K)$, 需要用到各采样时刻的偏差值, 计算复杂, 且需要占用内存。

($k-1$)时刻的输出:

$$P(k) = K_p \left\{ E(k) + \frac{T}{T_I} \sum_{j=0}^k E(j) + \frac{T_D}{T} [E(k) - E(k-1)] \right\} \quad (3-5)$$

$$P(k-1) = K_p \left\{ E(k-1) + \frac{T}{T_I} \sum_{j=0}^{k-1} E(j) + \frac{T_D}{T} [E(k-1) - E(k-2)] \right\} \quad (3-6)$$

两式相减:

$$P(k) = P(k-1) + K_p [E(k) - E(k-1)] + K_I E(k) + K_D [E(k) - 2E(k-1) + E(k-2)] \quad (3-7)$$

表示第 K 次输出的信号增量, 称为增量型 PID 控制算式。

位置型算式不仅需要对 $E(k)$ 累加, 而且计算机的任何故障将引起 $P(k)$ 的大幅度变化, 对生产不利。

增量型较位置型的优点: 由于输出的是增量, 所以误动作小; 易于实现手动/自动的无扰切换(位置型算法中, 当由手动切换到自动时, 首先需要保证控制器的输出等于实际的控制量; 增量型算式只给出偏差, 而与原来位置无关); 不产生积分失控, 容易获得良好的调节品质。

增量型的缺点：积分截断效应大，有静态误差；溢出的影响大。

3.2 改进数字 PID 控制算法及电烘炉模型仿真

在工业生产过程中，一般用闭环控制方式来控制温度、压力、流量、转速等这些连续变化的模拟量，无论模拟调节器的模拟控制系统，或者可编程逻辑控制器(PLC)的数字控制系统，PID(比例、积分、微分)控制，都得到了广泛的应用，这是因为PID控制具有三个优点：(1) 不要求出控制系统的数字模型；(2) PID调节器具有典型的结构，程序设计简单，参数调整方便；(3) 它具有较强的灵活性和适应性，根据被控对象，可以采用PID控制的改进方式。如积分分离PID算法、变速积分PID算法、带滤波器的PID算法、不完全微分PID控制、微分先行PID控制^{[44][45]}。

3.2.1 积分分离 PID 控制算法及其仿真

随着数字技术、计算机技术的发展，采样控制系统在工业控制中得到了广泛的应用。数字 PID 算法便成为一种最常用的控制算法。在普通的 PID 控制中，积分环节的引入是为了消除静差，提高控制精度。但系统在启动、结束或大幅度调整设定时，系统输出大的偏差，造成积分积累，引起系统较大的超调，甚至引起较大的震荡，这在实际生产中是不允许的。

积分分离控制基本原理是，当被控量与设定值偏差较大时，取消积分作用，以免由于积分作用使系统稳定性降低，超调量增大；当被控量接近给定值时，引入积分控制，以便消除静差，提高控制精度。积分分离控制算法可表示为：

$$u(k) = K_p error(k) + \beta K_I \sum_{j=0}^k error(j)T + K_D (error(k) - error(k-1)) / T \quad (3-8)$$

式中， T 为采样时间， β 项为积分项的开关系数

$$\beta = \begin{cases} 1 & |error(k)| \leq \varepsilon \\ 0 & |error(k)| > \varepsilon \end{cases} \quad (3-9)$$

上式 ε 为设定阈值。其具体实现步骤如下：

- (1) 根据实际情况，人为设定阈值 $\varepsilon > 0$ ；
- (2) 当 $|error(k)| > \varepsilon$ 时，采用 PD 控制，可避免产生过大的超调，又使系统有较快的响应；
- (3) 当 $|error(k)| \leq \varepsilon$ 时，采用 PID 控制，以保证系统的控制精度。

根据积分分离式 PID 控制算法得到其程序框图如图 3-1 所示。

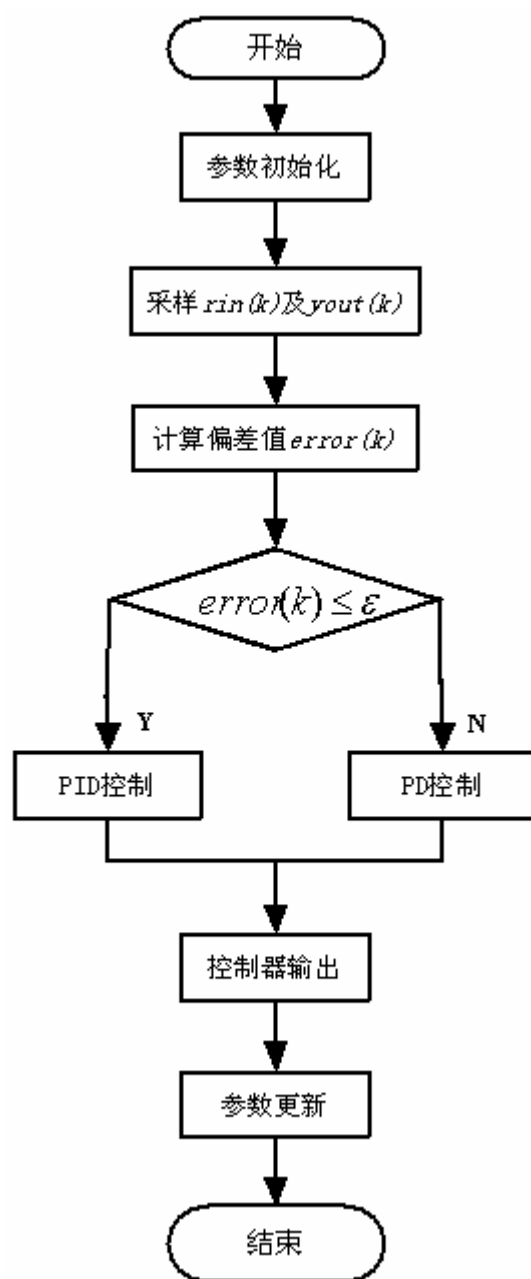


图 3-1 积分分离式 PID 算法流程图

上面已经建立了电烘炉控制模型为一个延迟对象：

$$G(s) = \frac{e^{-8s}}{6s+1} \quad (3-10)$$

这里仿真的采样时间为 2s，延迟时间为 4 个采样时间，即 8s，在 Matlab 中采用 c2d 函数和零阶保持，执行指令

`sys=tf([1],[6,1],'inputdelay',8);%建立控制对象命令`

`dsys=c2d(sys,ts,'zoh');%离散化命令`

被控对象离散化为：

$$y(k) = 0.7165y(k-1) + 0.2835u(k-5) \quad (3-11)$$

采用积分分离式 PID 控制器进行阶跃响应，PID 参数设为 $k_p=0.80, k_i=0.06, k_d=0.09$ 。仿真中指令信号为 $rin(k)=100$ ，控制输出限制在 $[0,200]$ ，采用积分分离式 PID 和采用常规 PID 的仿真如下图 3-2 和图 3-3。

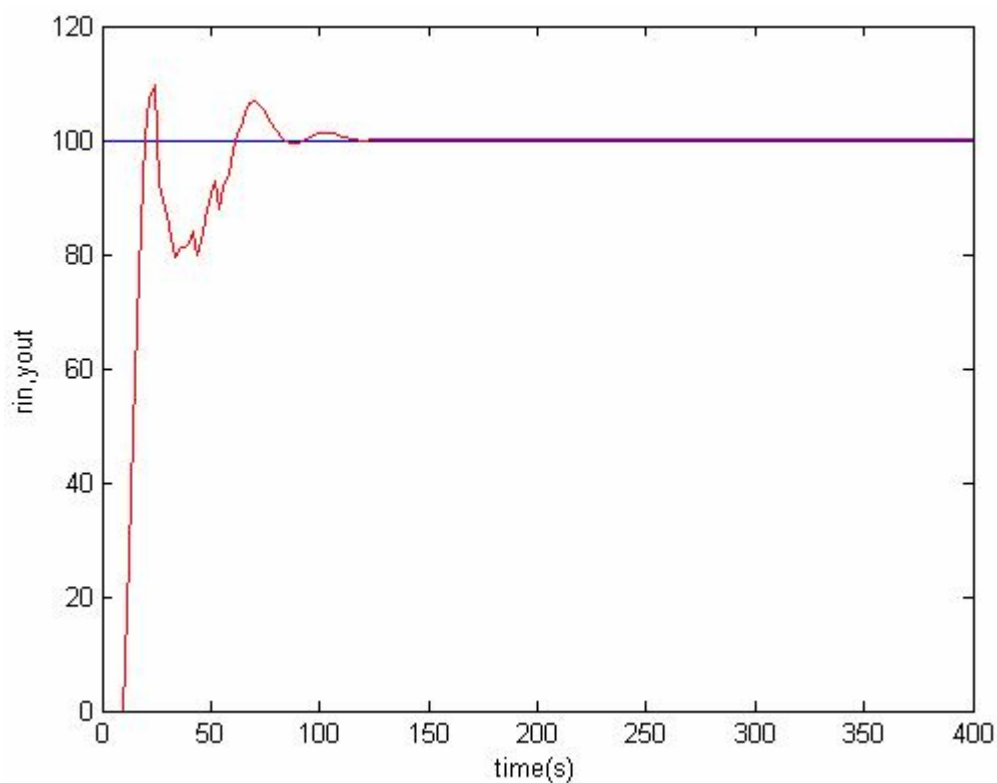


图 3-2 积分式分离 PID

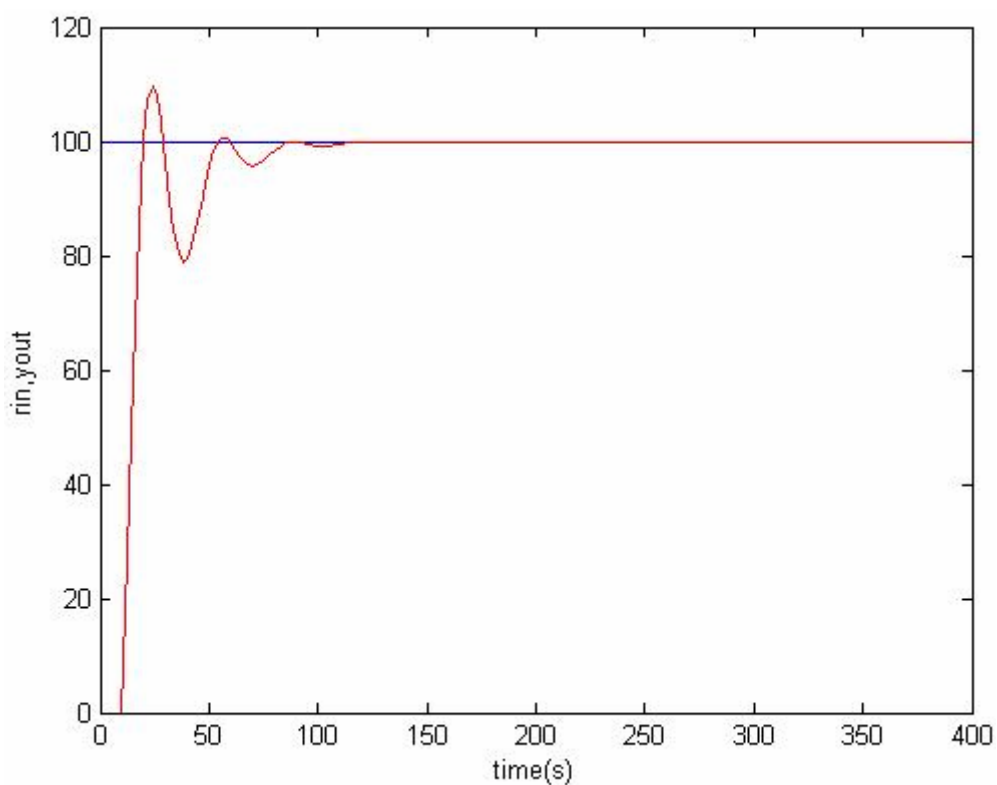


图 3-3 常规 PID

3.2.2 变速积分 PID 控制算法及其仿真

在常规 PID 控制算法中，由于积分系数 k_i 是常数，所以在整个控制过程中，积分增量不变。而系统对积分项的要求是，系统偏差大时积分作用应减弱甚至全无，而在偏差小时则应加强。积分系数取大了会产生超调，甚至积分饱和，取小了又迟迟不能消除偏差。因此如何根据系统偏差改变积分的速度，对于提高系统调节品质是很重要的。变速积分 PID 可较好地解决这个问题^[46]。

变速积分 PID 的基本思想是，设法改变积分项的累加速度，使其与偏差大小相对应：偏差越大，积分越慢；反之则越快。

为此，设置系数 $f(e(k))$ ，它是 $e(k)$ 的函数。当 $|e(k)|$ 增大时， f 减小，反之增大。变速积分 PID 积分项表达式为：

$$u_i(k) = K_I \left\{ \sum_{i=0}^{k-1} e(i) + f[e(k)]e(k) \right\} T \quad (3-12)$$

系数 f 与偏差当前值 $|e(k)|$ 的关系可以是线性的或非线性的，可设为：

$$f[e(k)] = \begin{cases} 1 & |e(k)| \leq B \\ \frac{A - |e(k)| + B}{A} & B < |e(k)| \leq A + B \\ 0 & |e(k)| > A + B \end{cases} \quad (3-13)$$

f 值在 $[0, 1]$ 区间内变化，当偏差 $|e(k)|$ 大于给定分离区间 $A+B$ 后， $f=0$ ，不再对当前值 $e(k)$ 进行继续累加；当偏差 $|e(k)|$ 小于 B 时，加入当前值 $e(k)$ ，即积分项

变为 $u_i(k) = K_I \sum_{i=0}^k e(i)T$ ，与一般 PID 积分项相同，积分动作达到最高速；而当偏

差 $|e(k)|$ 在 B 与 $A+B$ 之间时，则累加计入的是部分当前值，其值在 $0 \sim |e(k)|$ 之间随

$|e(k)|$ 的大小而变化，因此，其积分速度在 $K_I \sum_{i=0}^k e(i)T$ 和 $K_I \sum_{i=0}^{k-1} e(i)T$ 之间。变速积

分 PID 的算法为：

$$u(k) = K_p e(k) + K_I \left\{ \sum_{i=0}^{k-1} e(i)T + f[e(k)]e(k) \right\} T + K_D [e(k) - e(k-1)] \quad (3-14)$$

这种算法对 A, B 两个参数的要求不精确，参数整定比较容易。

上面已经建立了电烘炉控制模型为一个延迟对象：

$$G(s) = \frac{e^{-8s}}{6s + 1}$$

这里仿真的采样时间为 2s，延迟时间为 4 个采样时间，即 8s，被控对象离散化

为：

$$y(k) = 0.7165y(k-1) + 0.2835u(k-5)$$

程序流程图见图 3-4。采用变速积分 PID 控制器进行阶跃响应，PID 参数设为 $k_p=0.5, k_i=0.05, k_d=0.0$ ， $A=40, B=60$ 。仿真中指令信号为 $rin(k)=100$ ，采用变速积分 PID 和常规 PID 的仿真如下图 3-5、图 3-6。

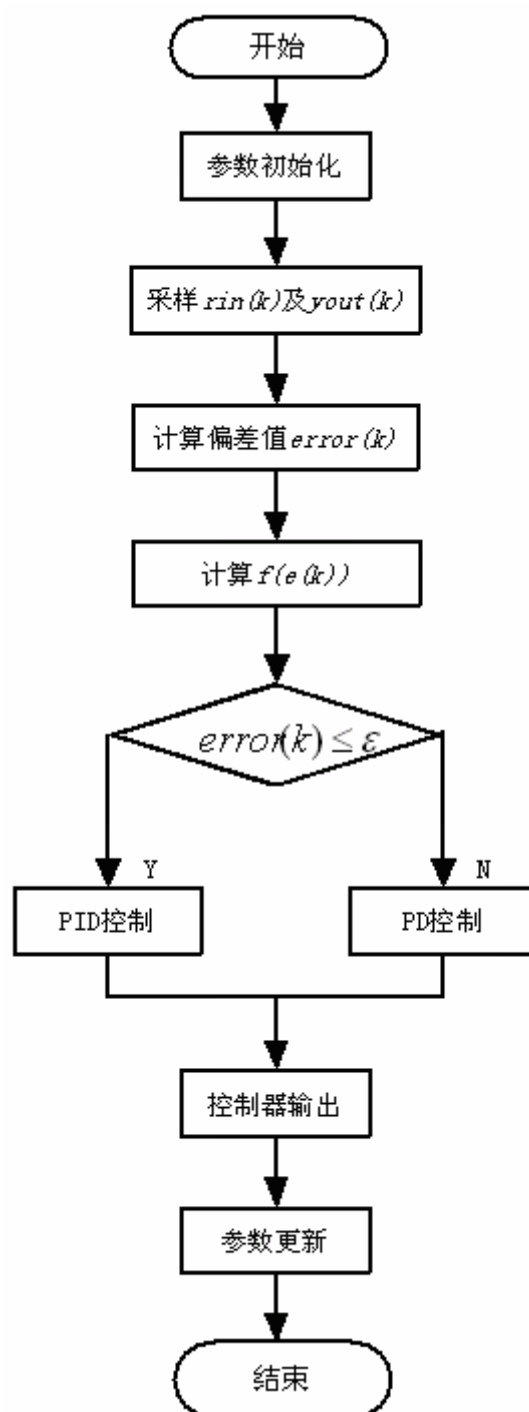


图 3-4 变速积分 PID 程序流程图

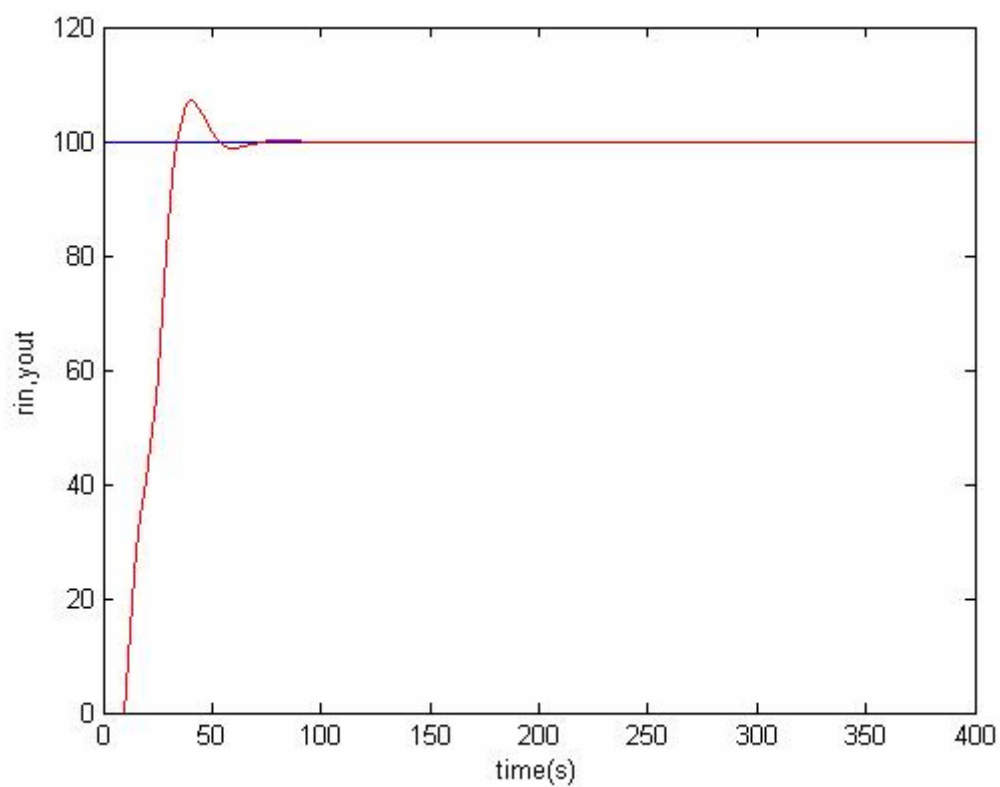


图 3-5 带变速 PID 仿真

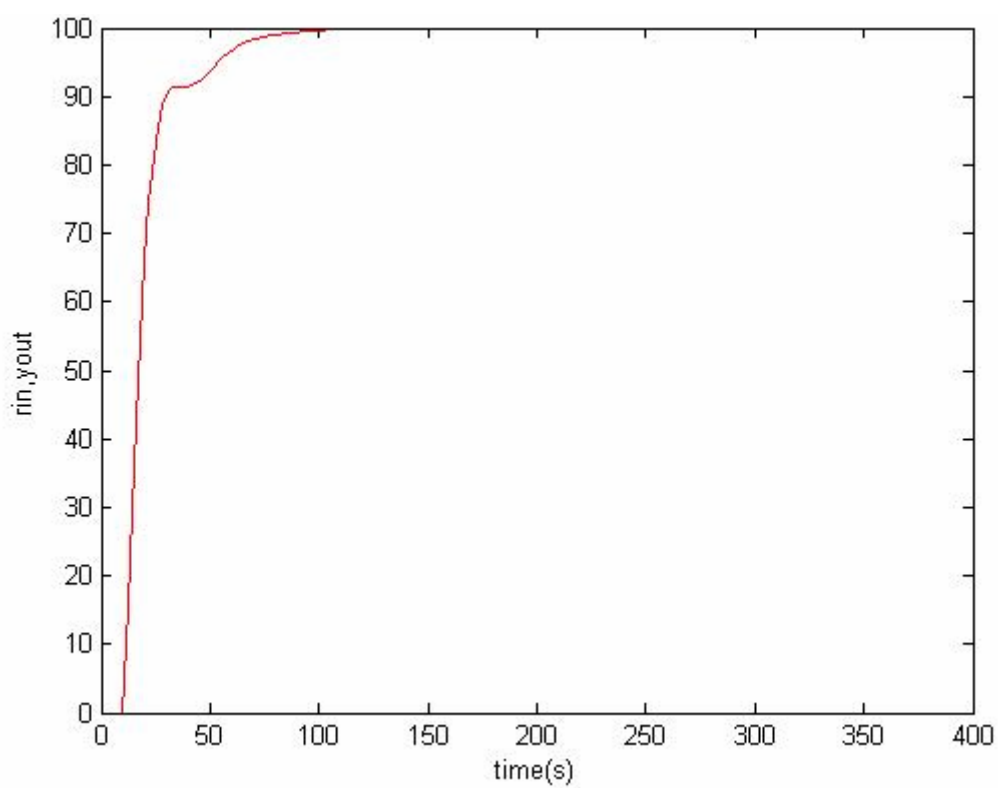


图 3-6 常规 PID 仿真

3.2.3 带滤波器的 PID 控制算法及其仿真

采用滤波器对指令信号进行滤波,将滤波输出作为给定信号,可使某些快速变化的信号响应及执行器的动作更加平稳,在工程上具有一定意义^[46]。三阶离散滤波器的设计原理为 $F(z-1)=a_1+a_2+z^{-1}+a_1z^{-2}$, $2a_1+a_2=1$ 。程序流程图见图 3-7。取阶跃信号为 $rin(t)=100$, 滤波器参数取 $a_1=0.10$, $a_2=0.80$ 。PID 参数取 $k_p=0.9, k_i=0.05, k_d=0.0$ 。

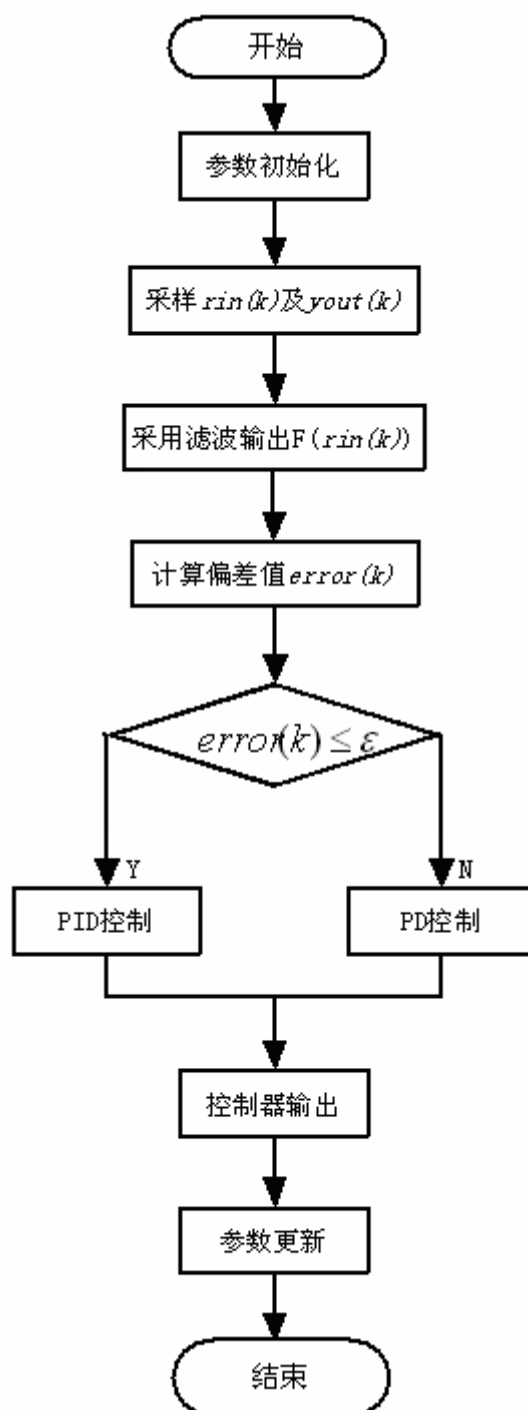


图 3-7 带滤波器的 PID 程序流程图

可见，把阶跃指令信号加滤波后，方波响应更加平稳，控制输入信号的抖动消除，见图 3-8、图 3-9。

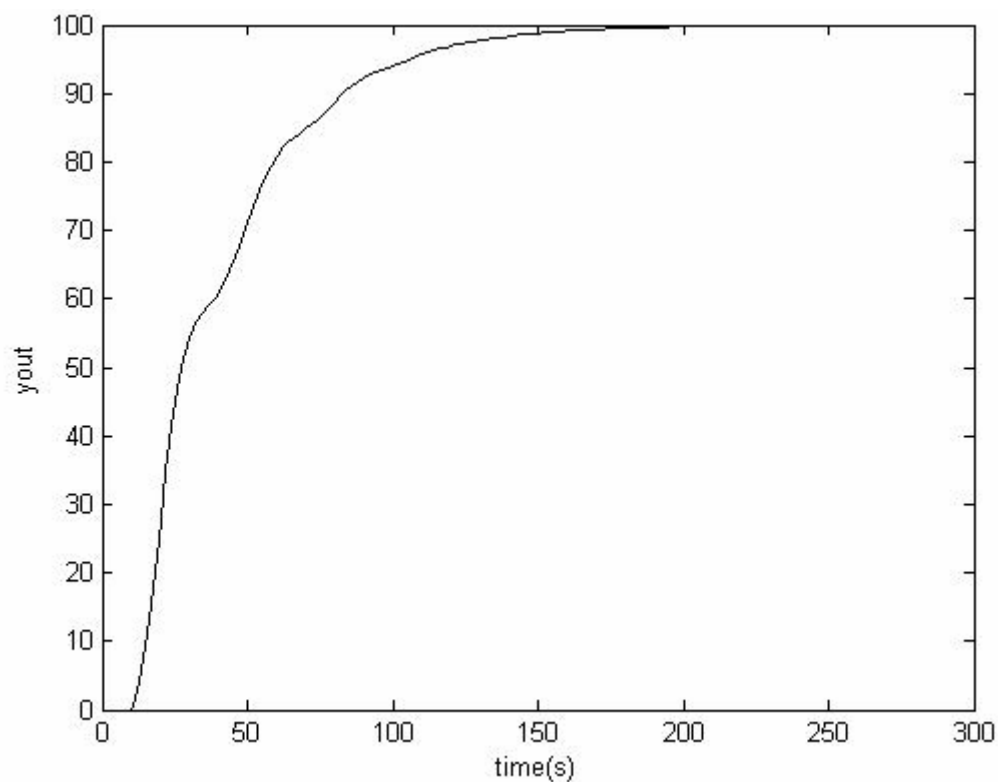


图 3-8 带滤波 PID 控制

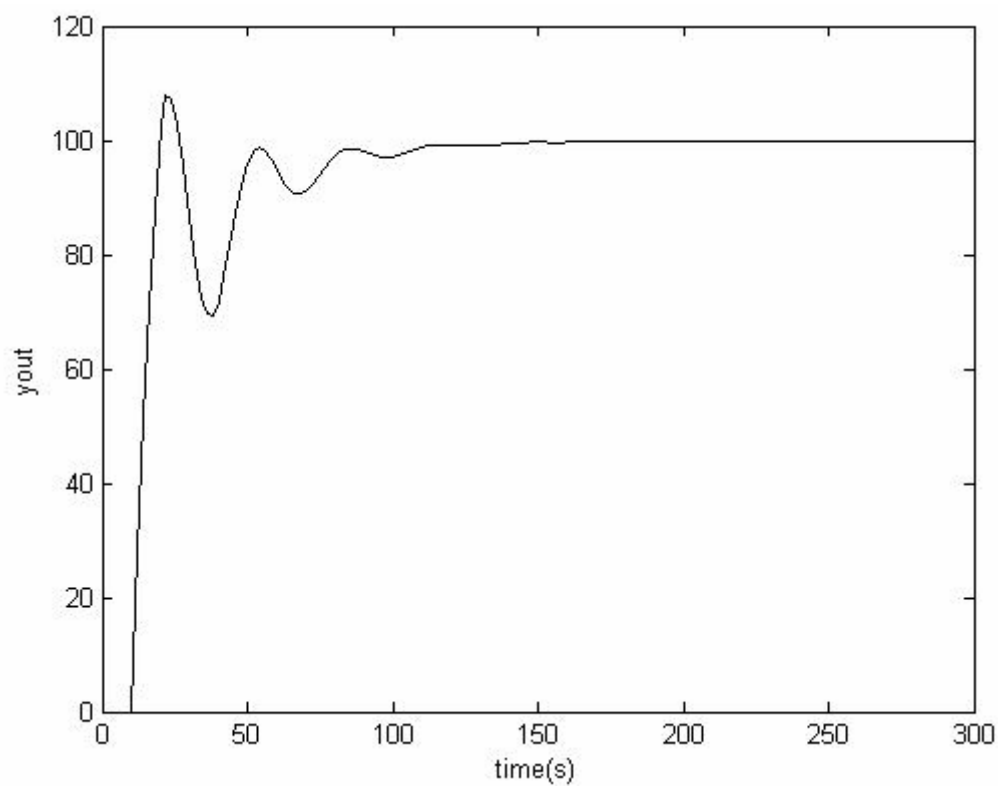


图 3-9 常规 PID 控制

3.2.4 不完全微分 PID 控制及其仿真

对于理想型的PID，微分作用的引入虽然改善了系统的动态特性，但是由于微分作用只持续一拍，且幅值过大，对于时间常数较大的系统，其调节作用小，不能达到超前控制误差的目的，因而理想型PID对干扰就显得敏感。而不完全PID控制，微分输出在第一拍内的幅值下降，此后又按一定的规律衰减，因此相比理想型的PID，不完全微分PID控制具有较好的控制特性^{[47][48]}。

在PID控制中，微分信号的引入可以改善系统的动态特性，但也容易引进高频干扰，在误差扰动突变时，尤其显出微分项的不足。克服上述缺点的方法之一，若是在控制算法中加入低通滤波器，即在PID算法中加入一个一阶惯性环节（低通滤波器） $G_f(s)=1/(1+T_f s)$ ，则可以使得系统性能得到改善。

不完全微分PID的结构如图所示，其中图是将低通滤波器直接加在微分环节上，下面以这个结构为例，说明不完全微分PID是如何改进常规PID的性能。

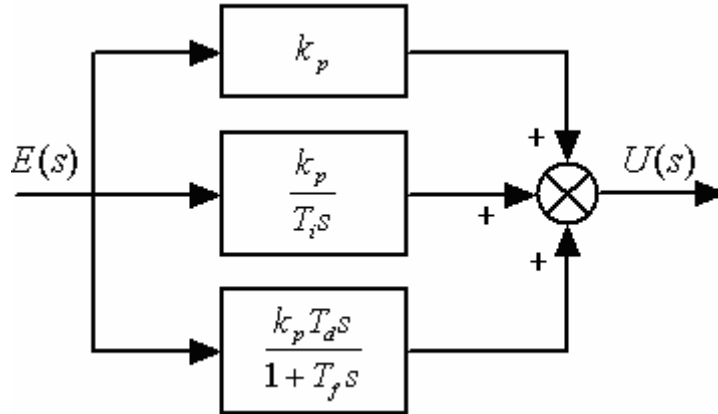


图 3-10 不完全微分 PID 结构

对图 3-10 所示的不完全微分结构，其传递函数是

$$U(s) = \left(k_p + \frac{k_p}{T_i s} + \frac{k_p T_d s}{T_f s + 1} \right) E(s) = u_p(s) + u_i(s) + u_d(s) \quad (3-15)$$

将上式离散化为

$$u(k) = u_p(k) + u_i(k) + u_d(k) \quad (3-16)$$

$$\text{其中, } u_d(s) = \frac{k_p T_d s}{T_f s + 1} E(s) \quad (3-17)$$

写成微分方程的形式为：

$$u_d(t) + T_f \frac{du_d(t)}{dt} = k_p T_d \frac{derror(t)}{dt} \quad (3-18)$$

取采样时间为 T_s ，将上式离散化为：

$$u_d(k) + T_f \frac{u_d(k) - u_d(k-1)}{T_s} = k_p T_d \frac{error(k) - error(k-1)}{T_s} \quad (3-19)$$

经整理得：

$$u_d(k) = \frac{T_f}{T_f + T_s} u_d(k-1) + k_p \frac{T_d}{T_f + T_s} (error(k) - error(k-1)) \quad (3-20)$$

令 $\alpha = \frac{T_f}{T_f + T_s}$ ，则 $\frac{T_s}{T_f + T_s} = 1 - \alpha$ ，显然 $\alpha < 1, 1 - \alpha < 1$ 成立，则可得不完全微分算法：

$$u_d(k) = \alpha u_d(k-1) + K_d (1 - \alpha) (error(k) - error(k-1)), \text{ 式中 } K_d = \frac{k_p T_d}{T_s} \quad (3-21)$$

可见，不完全微分的 $u_d(k)$ 多了一项 $\alpha u_d(k-1)$ ，而原微分系数由 k_d 降至 $k_d(1 - \alpha)$ 。以上各式中， T_s 为采样时间， $T_s = \Delta t$ ， k_p 为比例系数， T_d 、 T_i 分别为微分时间常数和积分时间常数。 T_f 是滤波器常数。

上面已经建立了电烘炉控制模型为一个延迟对象：

$$G(s) = \frac{e^{-8s}}{6s + 1}$$

这里仿真的采样时间为 2s，延迟时间为 4 个采样时间，即 8s，被控对象离散化为：

$$y(k) = 0.7165y(k-1) + 0.2835u(k-5)$$

采用不完全微分 PID 控制器进行阶跃响应，PID 参数设为 $k_p=0.30, k_i=0.055, T_d=10, T_f=180$ 。仿真中指令信号为 $rin(k)=100$ ，控制输出限制在 $[-200, 200]$ 。在对象的输出端加幅度为 1 的随机信号。采用不完全微分 PID 和常规 PID 的仿真如下图 3-11、图 3-12。

3.2.5 微分先行 PID 控制及其仿真

微分先行 PID 是理想型 PID 改进中的一种，它适合于给定值频繁变化的情况^[49]。微分先行 PID 控制的结构如图 3-13 所示，其特点是只对输出量 $yout(k)$ 进行微分，而对给定值 $rin(k)$ 不进行微分。这样，在改变给定值时，输出不会改变，而被控量的变化通常是比较缓和的。这种输出量先行微分控制适用于给定值 $rin(k)$ 频繁升降的场合，可以避免给定值升降时引起的系统振荡，从而明显的改善了系

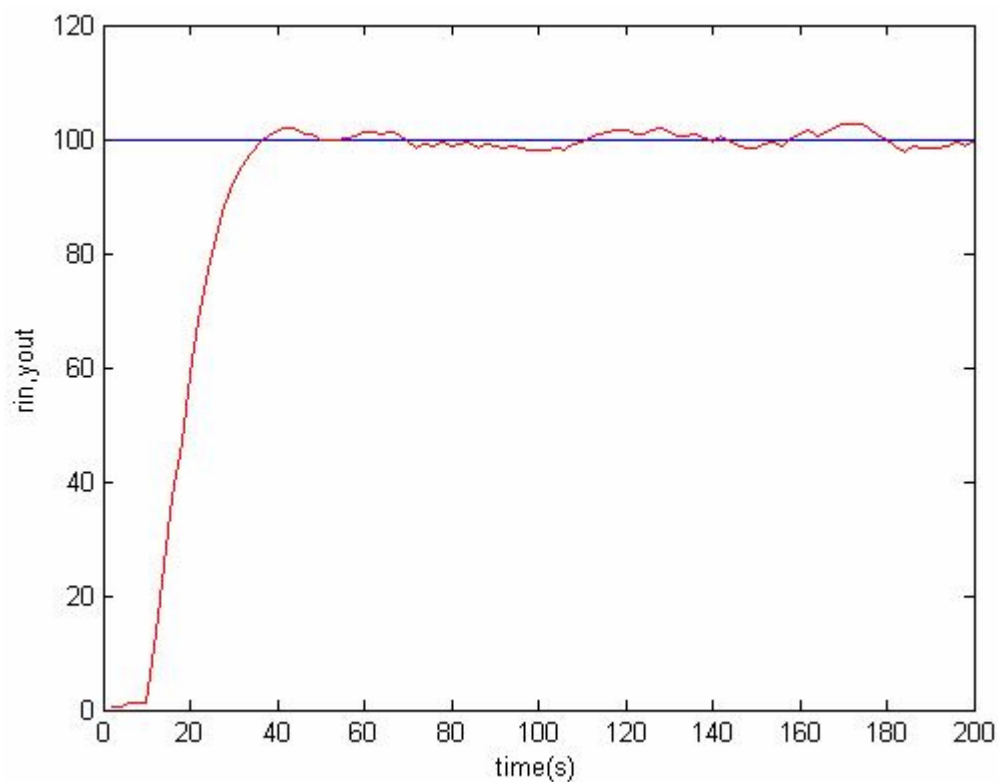


图 3-11 不完全微分 PID

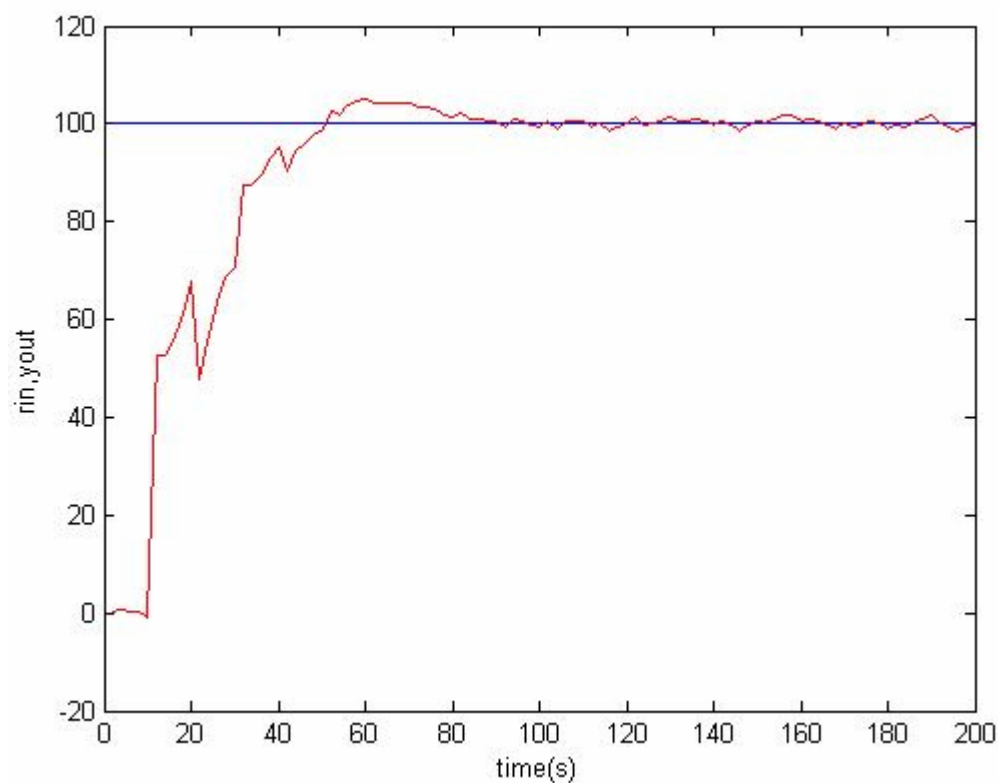


图 3-12 常规 PID

统的动态特性。

令微分部分的传递函数为：

$$\frac{u_d}{y(s)} = \frac{T_d s + 1}{\gamma T_d s + 1}, \gamma < 1 \quad (3-22)$$

式中, $1/(\gamma T_d s + 1)$ 相当于低通滤波器。

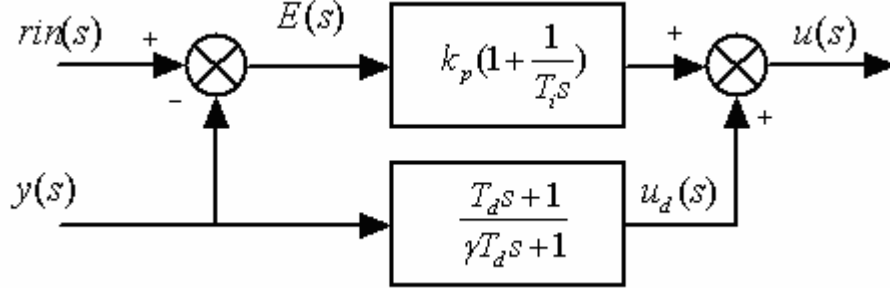


图 3-13 微分先行 PID 控制结构

则有

$$\gamma T_d \frac{du_d}{dt} + u_d = T_d \frac{dy}{dt} + y \quad (3-23)$$

由差分得:

$$\frac{du_d}{dt} \approx \frac{u_d(k) - u_d(k-1)}{T} \quad (3-24)$$

$$\frac{dy}{dt} \approx \frac{y(k) - y(k-1)}{T} \quad (3-25)$$

$$\gamma T_d \frac{u_d(k) - u_d(k-1)}{T} + u_d(k) = T_d \frac{y(k) - y(k-1)}{T} + y(k) \quad (3-26)$$

$$u_d(k) = \frac{\gamma T_d}{\gamma T_d + T} u_d(k-1) + \frac{T_d + T}{\gamma T_d + T} y(k) - \frac{T_d}{\gamma T_d + T} y(k-1) \quad (3-27)$$

$$u_d(k) = c_1 u_d(k-1) + c_2 y(k) - c_3 y(k-1) \quad (3-28)$$

其中, $c_1 = \frac{\gamma T_d}{\gamma T_d + T}, c_2 = \frac{T_d + T}{\gamma T_d + T}, c_3 = \frac{T_d}{\gamma T_d + T}$

PID 控制部分的传递函数为:

$$\frac{u_{pi}(s)}{E(s)} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \quad (3-29)$$

式中, T_i 是积分时间常数。

离散控制规律为:

$$u(k) = u_{pi}(k) + u_d(k) \quad (3-30)$$

上面已经建立了电烘炉控制模型为一个延迟对象:

$$G(s) = \frac{e^{-8s}}{6s + 1}$$

这里仿真的采样时间为 2s，延迟时间为 4 个采样时间，即 8s，被控对象离散化为：

$$y(k) = 0.7165y(k-1) + 0.2835u(k-5)$$

采用微分先行PID控制器进行阶跃响应，PID参数设为 $k_p=0.36, k_i=0.021, k_d=1$ 。仿真中指令信号为 $rin(k)=100$ ，控制输出限制在 $[0,200]$ 。在输入信号加带有高频干扰的方波信号 $rin(k)=100+sign(sin(0.0005\pi t)+0.05sin(0.03\pi t))$ 。采用微分先行PID和常规PID的仿真如下图3-14、图3-15。 $Sign()$ 是符号函数。

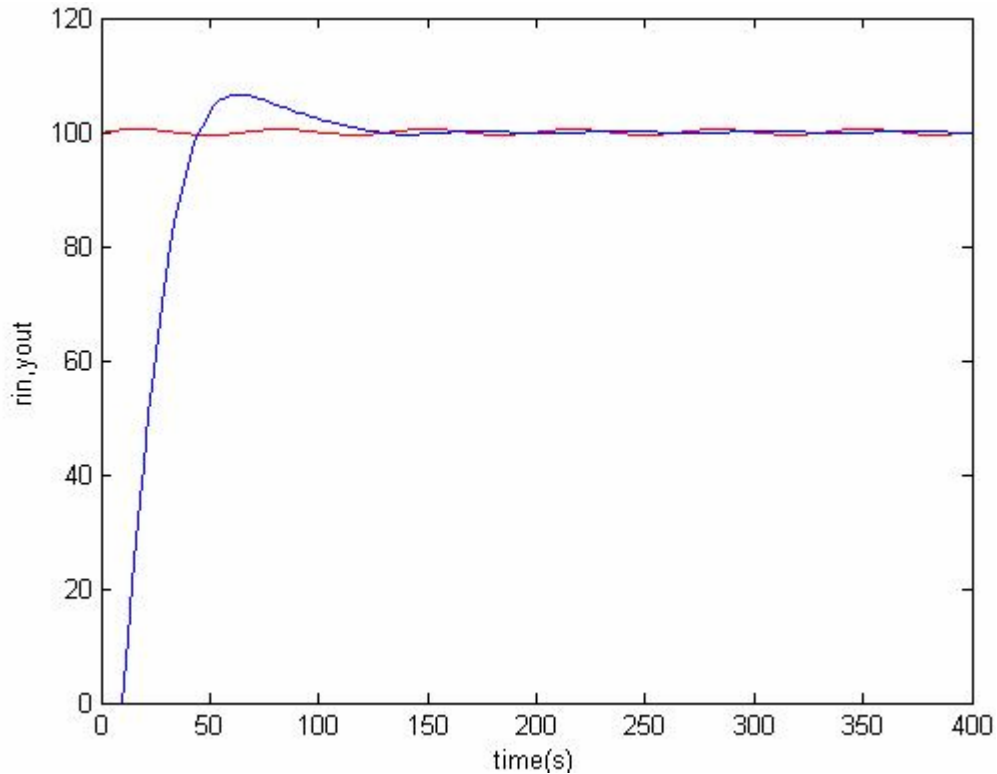


图 3-14 微分先行 PID

3.3 小结

PID 调节器是一种线性调节器，这种调节器是将设定值与输出值进行比较构成控制偏差，将其按比例、积分、微分运算后，并通过线性组合构成控制量。电烘炉对象具有时变、不确定和非线性等特性，其模型参数的不确定性以及在控制系统的运行过程中出现环境变化、元件老化等问题，采用常规的 PID 控制就很难取得满意的控制品质。从上面的五种改进的 PID 算法可知，虽然控制效果比改进前的 PID 算法有较好的提高，但是控制效果仍然不是令人很满意。而且在仿真的过程中，这些改进 PID 算法的参数设定并不是一件容易的事情，往往要反复实验很多次才能得出较好的控制曲线。所以这些改进的数字 PID 算法控制效果还需要继续改造，才能得到更好的效果和减少参数设定的难度。

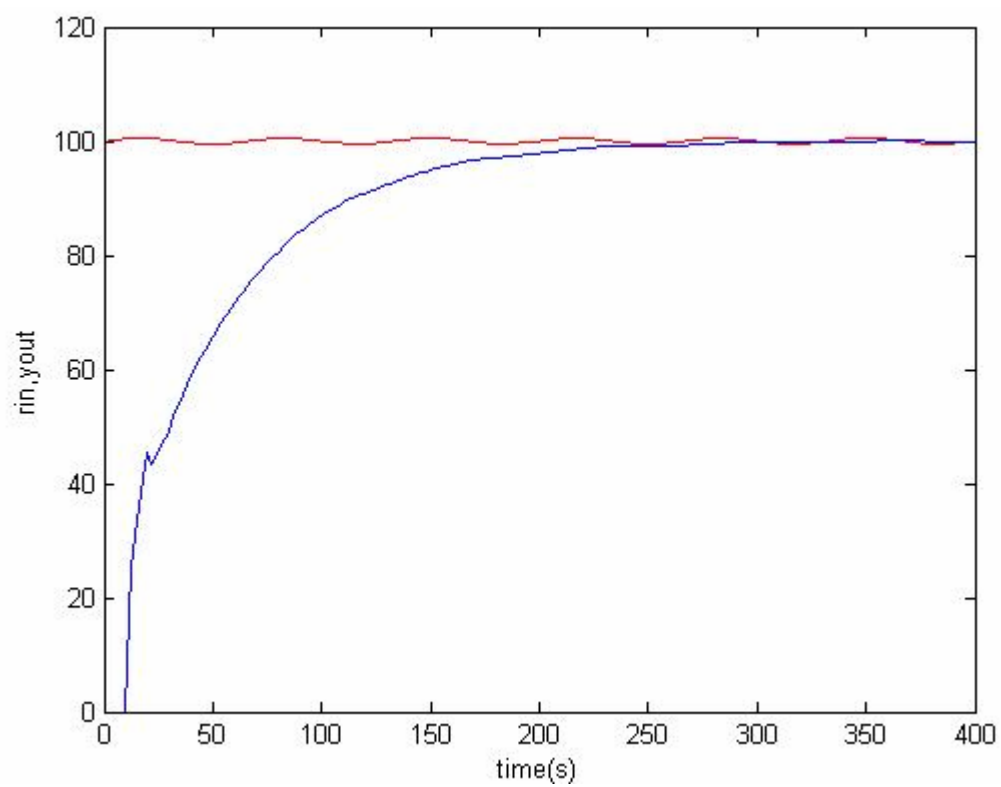


图 3-15 常规 PID

第四章 模糊免疫 PID 控制算法及其仿真

4.1 引言

电烘炉对象具有时变、不确定和非线性等特性,其模型参数的不确定性以及在控制系统的运行过程中出现环境变化、元件老化等问题,采用常规的 PID 控制就很难取得满意的控制品质。生物免疫系统是一种在大量干扰和不确定性环境中都具有很强鲁棒性和自适应性的系统,能对侵入机体的非己成分(如细胞、病毒和各种病原体等)以及发生了突变的自身细胞(如癌细胞)进行精确识别、适度响应和有效排除;没有免疫系统的保护,生物体不可避免的会受到感染并导致死亡。借鉴生物免疫反馈响应过程的调节作用,本文提出将模糊免疫 PID 控制策略应用到电烘炉控制系统中,仿真结果表明控制性能优于常规的 PID 控制^{[50][51]}。

4.2 模糊控制原理

自从 1965 年美国加利福尼亚大学控制论专家 L. A. Zadeh 教授提出模糊数学以来,吸引了众多的学者对其进行研究,使其理论与方法日臻完善,并且广泛地应用于自然科学和社会科学的各个领域,尤其是在第 5 代计算机研制和知识工程开发等领域占有特殊重要的地位。把模糊逻辑应用于控制领域则始于 1973 年。1974 年英国的 E. H. Mamdani 成功地将模糊控制应用于锅炉和蒸汽机控制。此后 20 多年来,模糊控制不断发展并在许多领域中得到成功应用。由于模糊逻辑本身提供了由专家构造语言信息并将其转化为控制策略的一种系统的推理方法,因而能够解决许多复杂而无法建立精确数学模型系统的控制问题,所以它是处理推理系统和控制系统中不精确和不确定性的一种有效方法。从广义上讲,模糊控制是适于模糊推理,模仿人的思维方式,对难以建立精确数学模型的对象实施的一种控制策略。它是模糊数学同控制理论相结合的产物,同时也是智能控制的重要组成部分^{[52][53]}。模糊控制的突出特点在于:

(1) 控制系统的设计不要求知道被控对象的精确数学模型,只需要提供现场操作人员的经验知识及操作数据。

(2) 控制系统的鲁棒性强,适应于解决常规控制难以解决的非线性、时变及大纯滞后等问题。

(3) 以语言变量代替常规的数学变量,易于形成专家的“知识”。

(4) 控制推理采用“不精确推理”(Approximate Reasoning)。推理过程模仿人的思维过程。由于介入了人类的经验,因而能够处理复杂甚至“病态”系统。

4.2.1 模糊数学

模糊数学是基于模糊集的理论。模糊集的概念与古典集非此即彼的概念相对应，描述没有明确、清楚地定义界限的集合。

在模糊数学中，我们称没有明确边界（没有清晰外延）的集合为模糊集合。常用大写字母下加波浪线的形式来表示，如 $\tilde{A}$ 、 $\tilde{B}$ 等。

元素属于模糊集合的程度用隶属度或模糊度来表示。用于计算隶属度的函数称为隶属函数。隶属度即论域元素属于模糊集合的程度。用 $\mu_{\tilde{A}}(x_i)$ 来表示。隶属度的值为 $[0, 1]$ 闭区间上的一个数，其值越大，表示该元素属于模糊集合的程度越高，反之则越低。

计算隶属度的函数称为隶属函数。用 $\mu_{\tilde{A}}(x)$ 表示。

隶属度和隶属函数的表示形式看起来很相似，但是它们的意义是完全不一样的。 $\mu_{\tilde{A}}(x_i)$ 指论域中特定元素 x_i 属于 $\tilde{A}$ 的隶属度，而 $\mu_{\tilde{A}}(x)$ 中的 x 是一个变量，可表示论域中的任一元素。

4.2.2 隶属度及隶属函数的确定

用模糊统计法确定隶属度。对论域 U 上一个确定元素 u_0 是否属于论域上的一个边界可变的普通集合 A^* 的问题，针对不同的对象进行调查统计，再根据模糊统计规律计算出 u_0 的隶属度。具体步骤是：

- (1) 确定一个论域 U ；
- (2) 在论域中选择一个确定的元素 u_0 ；
- (3) 考虑 U 上的一个边界可变的普通集合 A^* ；
- (4) 就 u_0 是否属于 A^* 的问题针对不同对象调查统计，并记录结果；
- (5) 根据模糊统计规律下式，计算 u_0 属于模糊集合 $\tilde{A}$ 的隶属度

$$\mu_{\tilde{A}}(u_0) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{u_0 \in A^* \text{ 的次数}}{n} \quad (4-1)$$

隶属函数是一条曲线，定义了怎样将输入空间（论域）上的每一点映射到一个从 0 到 1 之间的隶属度。求取论域中足够多元素的隶属度，根据这些隶属度求出隶属函数。如何获得模糊规则及隶属函数，这在目前完全凭经验来进行，以及如何保证模糊系统的稳定性就成为关注的焦点。具体步骤为：

- a. 求取论域中足够多元素的隶属度;
- b. 求隶属函数曲线。以论域元素为横坐标, 隶属度为纵坐标, 画出足够多元素的隶属度 (点), 将这些点连起来, 得到所求模糊结合的隶属函数曲线;
- c. 求隶属函数。将求得的隶属函数曲线与常用隶属函数曲线相比较, 取形状相似的隶属函数曲线所对应的函数, 修改其参数, 使修改参数后的隶属函数的曲线与所求隶属函数曲线一致或非常接近。此时, 修改参数后的函数即为所求模糊结合的隶属函数。

4.2.3 精确输入的模糊化

通常控制总是用系统的实际输出值与设定的期望值相比较, 得到一个偏差 E , 控制器根据这个偏差来决定如何对系统加以调整控制。很多情况下还需要根据该偏差的变化率 EC , 来进行综合判断。无论是偏差还是偏差变化率, 他们都是精确的输入值。要采用模糊控制的技术, 首先把它们转换成模糊集合的隶属函数。每一个输入值都可以对应一个模糊集合, 某个范围的连续变化值就可以有无限多个模糊集合, 这在工程实践上是无意义的。为了便于工程实现, 经常把变量范围人为的定义为离散的若干级, 所定义的级数多少取决于输入量的分辨率。现在使用最多的为三角隶属函数。

为了实现模糊控制器的标准化设计, 目前在实际中常用的处理方法是将偏差 E 和 EC 的变化范围设定为 $[-6, +6]$ 区间连续变化量, 使之离散化, 构成含 7 个整数元素的离散集合:

{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}

即: {负大, 负中, 负小, 不变, 正小, 正中, 正大}

并将误差 E 和误差的变化量 EC 量化为 13 个等级,

即: {-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6}

4.2.4 模糊规则与模糊推理

模糊规则一般采用最常用的模糊 if-then 规则。一个单独的模糊 if-then 规则形式如下:

If x is A then y is B

其中, A 和 B 是有模糊集合分别定义在 X 、 Y 范围 (论域) 上的语言值。模糊规则中的 if 部分“if x is A ”被称为规则的前提或假设, 同时 then 部分“ y is B ”被称为结果或结论。实质上, 该表达式描述了变量 x 和 y 之间的关系。

模糊推理是建立在模糊规则之后的。它是对一个特定的表达式解释的过程。

在建模时，只要将模糊输入集和模糊规则库定义为重叠的，模糊系统使用自己的归纳法则进行模糊判定，尤其是对相近的表述信息进行归纳、总结，使系统的判定变为连续的判定，从而达到连续的执行模糊法则的过程。

4.2.5 反模糊化

经过模糊推理得到的控制输出是一个模糊隶属或模糊子集，它反映了控制语言的模糊性。这是一种不同取值的组合。然而在实际运用中要控制一个物理对象，只能在某一时刻有一个确定的控制量，这就要从模糊输出隶属函数中找出一个最能代表这个模糊集合即模糊控制作用可能性分布的精确量，这就是反模糊化。

常用的反模糊法有：最大隶属度法，重心法，加权平均法^[54]。

最大隶属度法：简单地取所有规则推理结果的模糊集合中隶属度最大的那个元素作为输出值，即 $v^{out} = \max \mu_i(v), v \in V$ 。最大隶属度函数法不考虑输出隶属度函数的形状，只关心其最大隶属度值处的输出。因此，难免会丢失许多信息量。

重心法：取模糊隶属度函数曲线与横坐标围成的面积的重心为模糊推理的最

终输出值，即 $v^{out} = \frac{\int v \mu_v(v) dv}{\int \mu_v(v) dv}$ 。

对于具有 m 个输出量化级数的离散论域情况，有

$$v^{out} = \frac{\sum_{k=1}^m v_k \mu_k(v_k)}{\sum_{k=1}^m \mu_k(v_k)} \quad (4-2)$$

与最大隶属度法相比较，重心法具有更平滑的输出推理控制。即对应于输入信号的微小变化，其推理的最终输出一般也会发生一般的变化，而且这种变化明显的比最大隶属度法要平滑。本研究就是采用重心法反模糊的。

加权平均法：加权平均法的最终输出是由下式决定的

$$v^{out} = \frac{\sum_{i=1}^m v_i k_i}{\sum_{i=1}^m k_i} \quad (4-3)$$

这里的系数 k_i 的选择要根据实际情况而定，不同的系数就决定系统有不同的响应特性。

4.2.6 模糊系统的组成

模糊系统的建立是基于知识库、推理机制、模糊化和反模糊化。其系统结构如图 4-1 所示。要实现语言控制的模糊控制器，首先要把实际输入值转化成模糊集合的隶属函数，这一步称为模糊化。然后根据有经验操作者或专家的经验制定出模糊控制规则，并进行模糊推理，以得到一个模糊输出集合即一个新的模糊隶属函数，这一步称为模糊控制规则形成和推理。最后根据模糊推理得到的输出模糊隶属函数，用不同的方法找到一个具有代表性的精确的真实输出值，这一步称为反模糊化。这三个步骤称为模糊推理过程^{[55][56]}。

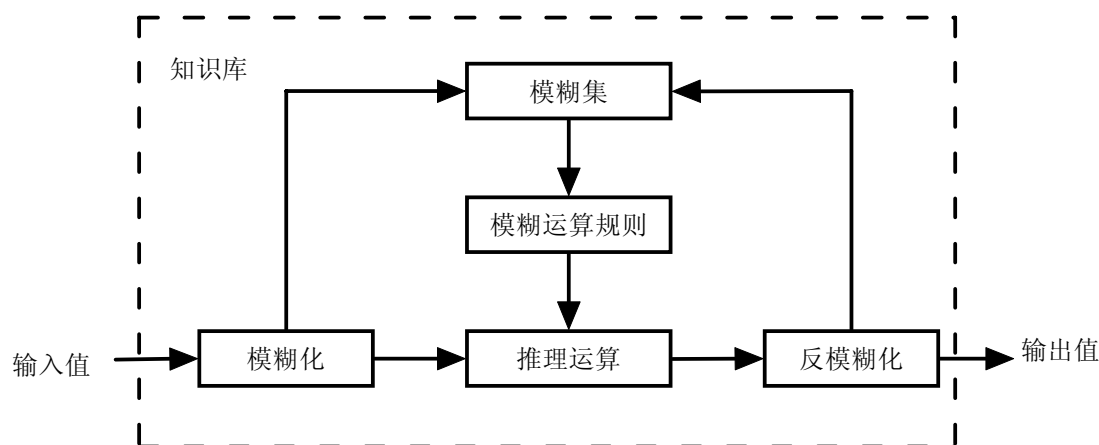


图 4-1 模糊推理过程

4.3 免疫控制原理

从上世纪50年代至今，人工智能飞速发展并应用于工程实践中。人工免疫系统AIS（Artificial Immune System）理论源于生物学、医学领域。目前的定义主要有以下几种：“AIS是一种数据处理、归类、表示和推理策略，该模型依据一种似是而非的生物范式，即人体免疫系统”；“由生物免疫系统启发而来的智能策略所组成，主要用于信息处理和问题求解”；AIS是一种由理论生物学启发而来的计算范式，它借鉴了免疫系统的功能、原理和模型并用于复杂问题的解决；人工免疫系统是遵循可信的生物学范例——人类免疫系统原理的数据处理、分类、表示和推理策略系统；人工免疫系统是基于自然免疫系统方法的计算系统。人工免疫系统是以人类等高等脊椎动物的免疫系统为原型、利用生物免疫系统各种原理和机制而发展的各类模型、算法及其在工程和科学中应用而产生的各种智能系统的统称。它是与生物免疫系统相对应的工程概念，如同人工神经网络与脑神经系统；进化计算与遗传系统；模糊控制与人类模糊思维等^{[57][58][59]}。

4.3.1 典型人工免疫算法

很早以前，人们就注意到传染病患者痊愈后，对该病有不同程度的免疫力。因此，在相当长时期内，免疫在微生物学和病毒学上是指免除瘟疫；换言之，是指对传染因子的再次感染有抵抗力，这是机体在初次感染后对该传染因子产生了免疫应答的结果。在医学上，免疫是指机体接触抗原性异物的一种生理反应。免疫系统有能力产生很多种抗体，免疫系统的控制机制可完成这一调节功能，即只产生所需数量的抗体。根据网络理论，如果任一细胞系中的细胞由于抗原的刺激而被激活并开始繁殖，其它能识别这种基因类型的细胞系也被激活并开始繁殖。这样，如果这一过程连续地进行，就构成了对自身的免疫，并且通过所有淋巴细胞的作用实现了调节机制。宏观描述如图 4-2 所示。

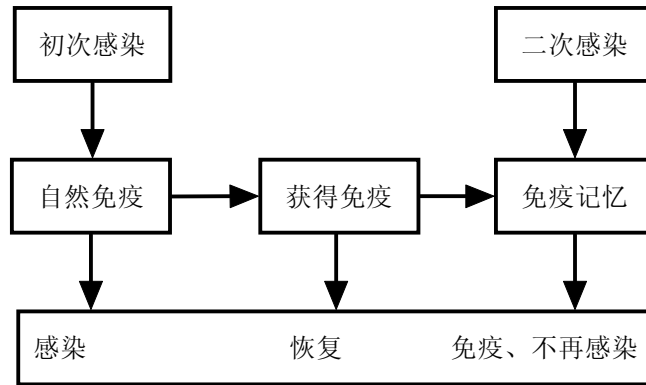


图 4-2 生物免疫过程

4.3.2 基本免疫算法

基本免疫算法基于生物免疫系统基本机制，模仿了人体的免疫系统。基本免疫算法从体细胞理论和网络理论得到启发，实现了类似于生物免疫系统的抗原识别、细胞分化、记忆和自我调节的功能。如果将免疫算法与求解优化问题的一般搜索方法相比较，那么抗原、抗体、抗原和抗体之间的亲和性分别对应于优化问题的目标函数、优化解、解与目标函数的匹配程度。程序流程图见图 4-3。

4.4 模糊免疫 PID 控制算法

常规增量式 PID 控制器离散形式^[50]如下：

$$\begin{aligned}
 u(k) &= u(k-1) + K_p(e(k) - e(k-1)) + K_I e(k) + K_D(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \\
 &= u(k-1) + K_p((e(k) - e(k-1)) + \frac{K_I}{K_p} e(k) + \frac{K_D}{K_p}(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2))) \quad (4-4)
 \end{aligned}$$

式中, K_p 、 K_I 、 K_D 分别为比例、积分和微分系数。

P 控制器的控制算法为:

$$u(k) = K_p e(k) \quad (4-5)$$

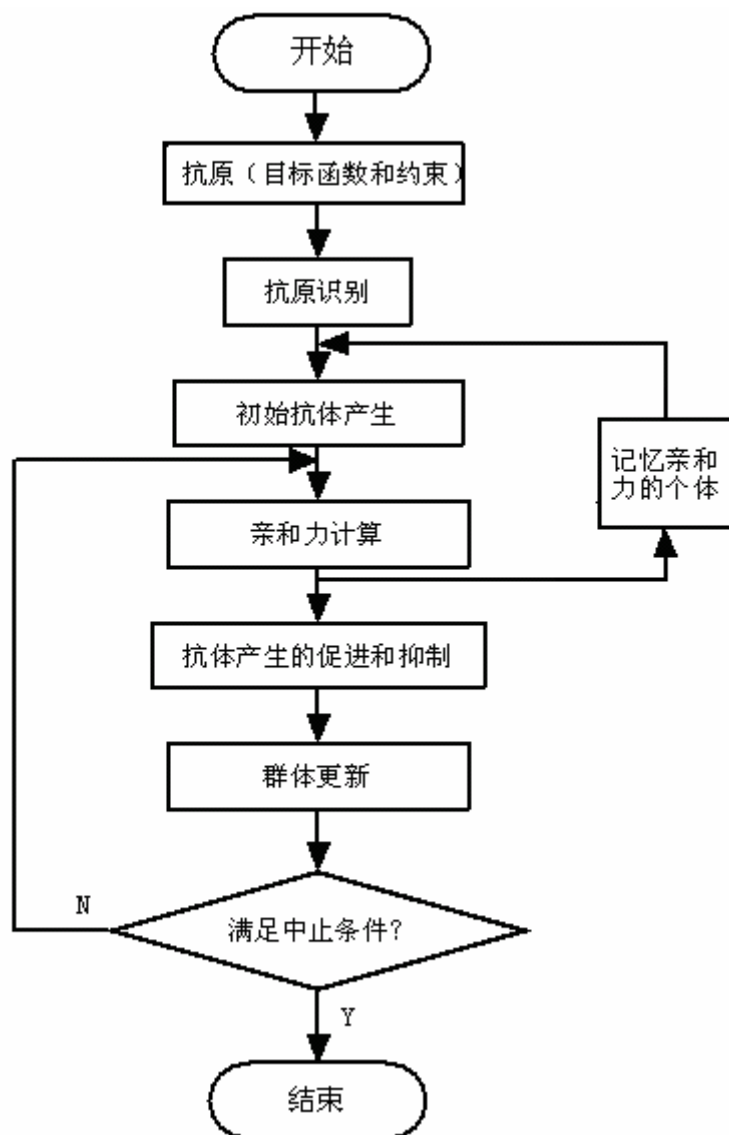


图 4-3 基本免疫算法程序流程图

免疫 PID 控制器是借鉴生物系统的免疫机理而设计出的一种非线性控制器。免疫是生物体的一种特性生理反应。生物的免疫系统对于外来侵犯的抗原,可产生相应的抗体来抵御。抗原和抗体结合后,会产生一系列的反应,通过吞噬作用或产生特殊酶的作用而毁坏抗原。生物的免疫系统由淋巴细胞和抗体分子组成,淋巴细胞又由胸腺产生的 T 细胞(分别为辅助细胞 T_H 和抑制细胞 T_S)和骨髓产生的 B 细胞组成。当抗原侵入机体并经周围细胞消化后,将信息传递给 T 细胞,即传递给 T_H 细胞和 T_S 细胞,然后刺激 B 细胞。B 细胞产生抗体以消除抗原。当抗原较多时,机体内的 T_H 细胞也较多,而 T_S 细胞却较少,从而会产生较多的 B

细胞。随着抗原的减少，体内 T_s 细胞增多，它抑制了 T_H 细胞的产生，则 B 细胞也随着减少。经过一段时间间隔后，免疫反馈系统便趋于平衡。抑制机理和主反馈机理之间的相互协作，是通过免疫反馈机理对抗原的快速反应和稳定免疫系统完成的。

免疫系统虽然十分复杂，但其抵御抗原的自适应能力却是十分明显的。生物信息系统的这些智能行为，为科学和工程领域提供了各种理论参考和技术方法。基于上述免疫反馈原理，提出了免疫 PID 控制器：假设第七代的抗原数量为 $\varepsilon(k)$ ，由抗原刺激的 T_s 细胞的输出为 $T_H(k)$ ， T_s 细胞对 B 细胞的影响为 $T_s(k)$ ，则 B 细胞接收的总刺激为：

$$S(k) = T_H(k) - T_s(k) \quad (4-6)$$

式中， $T_H(k) = k_1 \varepsilon(k)$, $T_s(k) = k_2 f(S(k), \Delta(Sk)) \varepsilon(k)$ 。

若以抗原的数量 $\varepsilon(k)$ 作为偏差 $e(k)$ ，B 细胞接收的总刺激 $S(k)$ 作为控制输入 $u(k)$ ，则 $\Delta S(k) = \Delta u(k)$ 。有如下的反馈控制规律：

$$u(k) = K(1 - \eta f(u(k), \Delta u(k)))e(k) = k_{p1}e(k) \quad (4-7)$$

式中， $k_{p1} = K(1 - \eta f(u(k), \Delta u(k)))$ ， $k_{p1} = k_1$ 为控制反应速度， $\eta = \frac{k_2}{k_1}$ 为控制稳定

效果， $f(\cdot)$ 为一个选定的非线性函数， $f(\cdot)$ 表示细胞抑制刺激能力的大小。

利用模糊规则可逼近非线性函数 $f(\cdot)$ ：每个输入变量被两个模糊集模糊化，分别是“正”(P)和“负”(N)；输出变量被三个模糊集模糊化，分别是“正”(P)、零“Z”和负(N)。以上隶属度函数都定义在整个 $(-\infty, +\infty)$ 区间。按“细胞接受的刺激越大，则抑制能力越小”及“细胞接受的刺激越小，则抑制能力越大”的原则，可采用以下四条模糊规则：

- (1) If u is P and Δu is P then $f(u, \Delta u)$ is N
- (2) If u is P and Δu is N then $f(u, \Delta u)$ is Z
- (3) If u is N and Δu is P then $f(u, \Delta u)$ is Z
- (4) If u is N and Δu is N then $f(u, \Delta u)$ is P

免疫 PID 控制 u 、 du 、 $f(\cdot)$ 的隶属度函数请见下表 4-1、4-2、4-3。

基于免疫反馈原理的控制器实际上就是一个非线性 P 控制器，其比例系数 $k_{p1} = K(1 - \eta f(u(k), \Delta u(k)))$ 随控制器输出的变化而变化，其中 K 为增益，则免疫 PID 控制的输出为：

表 4-1 免疫PID控制u隶属度函数

u	NB	PB
-10	1	0
-5	0.8	0.2
0	0.5	0.5
5	0.2	0.8
10	0	1

表 4-2 免疫PID控制du隶属度函数

du	NB	PB
-1	1	0
-0.5	0.8	0.2
0	0.5	0.5
0.5	0.2	0.8
1	0	1

表 4-3 免疫PID控制 $f(\cdot)$ 隶属度函数

$f(\cdot)$	NB	Z	PB
-1	1	0	0
-0.5	0.5	0.5	0
0	0	1	0
0.5	0	0.5	0.5
1	0	0	1

$$\begin{aligned}
 u(k) &= u(k-1) + k_{p1}((e(k) - e(k-1)) + \frac{K_i}{K_p}e(k) + \frac{K_d}{K_p}(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2))) \\
 &= u(k-1) + k_{p1}((e(k) - e(k-1)) + K'_i e(k) + K'_d(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)))
 \end{aligned} \quad (4-8)$$

上面已经建立了电烘炉控制模型为一个延迟对象：

$$G(s) = \frac{e^{-8s}}{6s+1}$$

这里仿真的采样时间为 2s，延迟时间为 4 个采样时间，即 8s，被控对象离散化为：

$$y(k) = 0.7165y(k-1) + 0.2835u(k-5)$$

采用模糊免疫 PID 控制器进行阶跃响应，PID 参数设为 $K=K_I=K_D=0.3$ 。仿真中指令信号为 $rin(k)=100$ ，采用模糊免疫 PID 的仿真如下图 4-6。

可见控制效果明显比前面的所述的数字积分算法要好得多，所以模糊免疫 PID 控制算法适合在饼干电烘炉上的使用。

4.5 模糊免疫 PID 控制算法在饼干电烘炉上的应用

以苏打饼干为例，全过程 6 分钟，即 360 秒，每区为 120 秒，采样周期是 2s。设隧道炉传送带是匀速运动，则上面温区的长度坐标可以转化成时间坐标。

(1) 面火输入

$$\begin{aligned} rin(i) &= -0.00375(i-200)^2 + 250 & 0 < i \leq 200 \\ rin(i) &= -0.00463(i-200)^2 + 250 & i > 200 \end{aligned} \quad (4-9)$$

式中， i 为时间，单位是秒。

(2) 底火输入

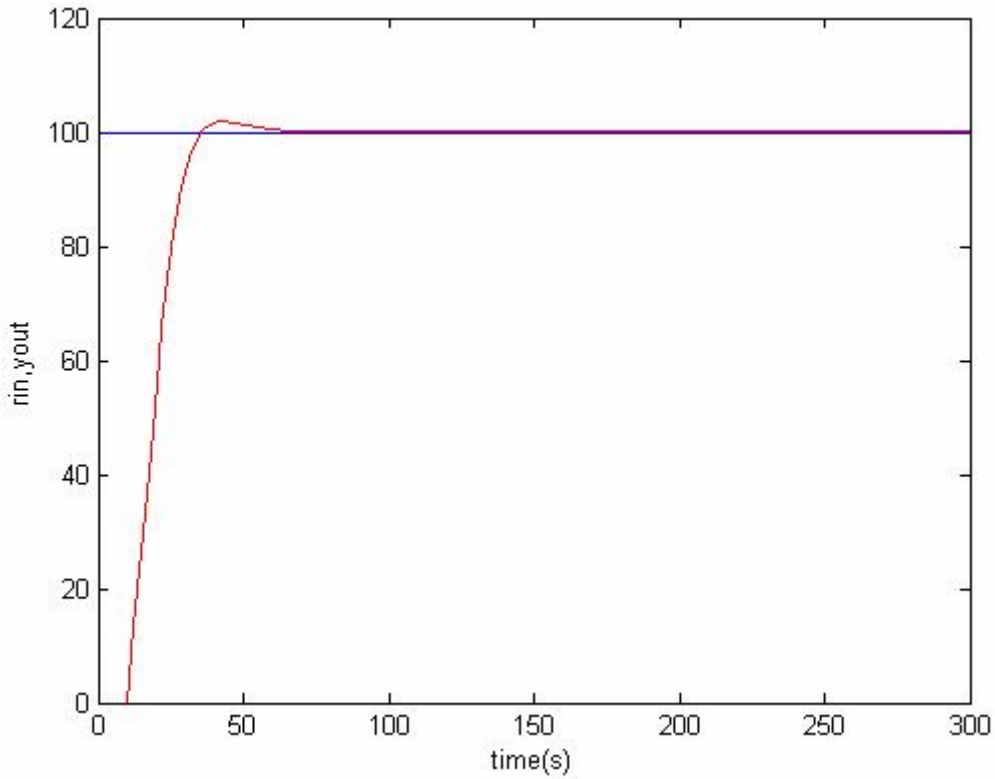


图 4-6 模糊免疫 PID 仿真

$$\begin{aligned} rin(i) &= -0.025(i-100)^2 + 350 & 0 < i \leq 100 \\ rin(i) &= -0.0037(i-100)^2 + 350 & i > 100 \end{aligned} \quad (4-10)$$

式中， i 为时间，单位是秒。取值 $K=K_I=K_D=0.3$ 。仿真结果见图 4-7 和图 4-8，图中虚线为设定温度，实线为输出温度。

从图中可见，模糊免疫 PID 控制算法能较好地跟踪输入温度控制曲线。

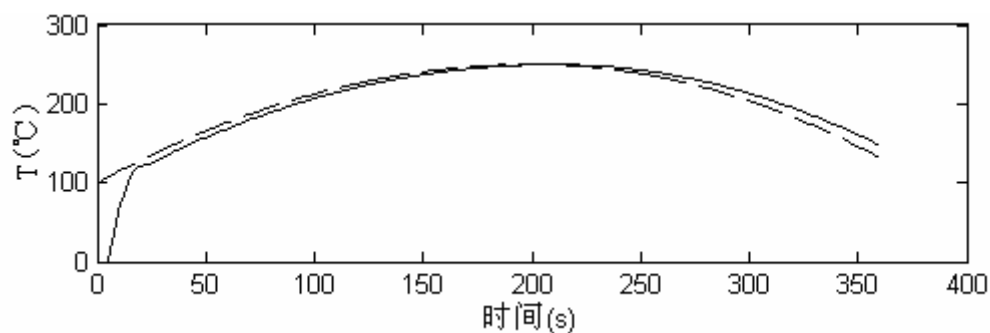


图 4-7 面火输入输出曲线

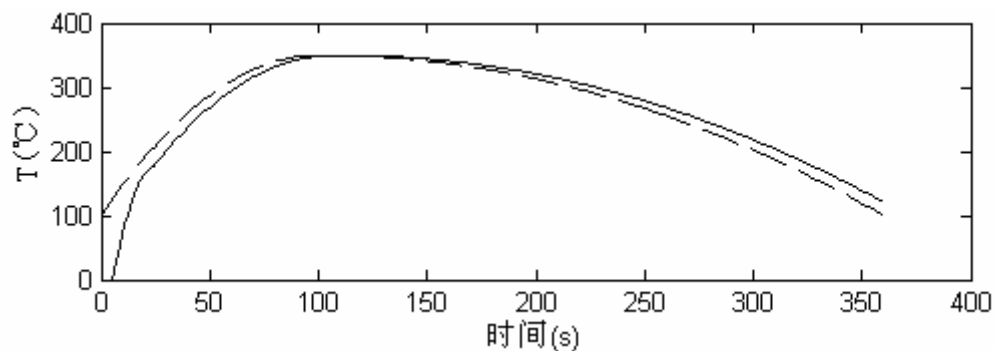


图 4-8 底火输入输出曲线

4.6 小结

应用模糊免疫 PID 控制算法，实现对饼干隧道炉的温度控制，使得系统更加有效率的工作，从而减轻参数设定和调整时的工作量，节约电能消耗。系统投入实际使用，运行效果比较满意，受到用户的好评。系统运行两个多月以来，从企业反馈的信息分析，单电费一项就节省了 2 万多元。操作工在改变饼干生产品种时所花费的参数设定时间，从原来的 3~4 小时减少到半个小时，饼干的生产质量完全满足要求。利用模糊免疫 PID 控制器优化过程控制，系统的稳定性好，有利于提高产品质量，为企业或公司创造更好的经济效益。

第五章 结论与展望

5.1 结论

PID 调节器是一种线性调节器，这种调节器是将设定值与输出值进行比较构成控制偏差，将其按比例、积分、微分运算后，并通过线性组合构成控制量。电烘炉对象具有时变、不确定和非线性等特性，其模型参数的不确定性以及在控制系统的运行过程中出现环境变化、元件老化等问题，采用常规的 PID 控制就很难取得满意的控制品质。从上面的五种改进的 PID 算法可知，虽然控制效果比改进前的 PID 算法有较好的提高，但是控制效果仍然不是令人很满意。而且在仿真的过程中，这些改进 PID 算法的参数设定并不是一件容易的事情，往往要反复实验很多次才能得出较好的控制曲线。所以这些改进的数字 PID 算法控制效果还需要继续改造，才能得到更好的效果和减少参数设定的难度。

本文提出将模糊免疫 PID 控制策略应用到电烘炉控制系统中，仿真结果表明控制性能优于常规的 PID 控制。应用模糊免疫 PID 控制算法，实现对饼干隧道炉的温度控制，使得系统更加有效率的工作，从而减轻参数设定和调整时的工作量，节约电能消耗。系统投入实际使用，运行效果比较满意，受到用户的好评。系统运行两个多月以来，从企业反馈的信息分析，单电费一项就节省了 2 万多元。操作工在改变饼干生产品种时所花费的参数设定时间，从原来的 3~4 小时减少到半个小时，饼干的生产质量完全满足要求。利用模糊免疫 PID 控制器优化过程控制，系统的稳定性好，有利于提高产品质量，为企业或公司创造更好的经济效益。

5.2 展望

对 400KW 隧道式电烘炉进行系统优化改造后，充分利用设备的产能，提高产品的质量稳定性，更有效地利用电能。今后将在原来的基础上建立“专家控制系统”，减轻参数设定或调整时的工作量，并把相关的系统运行资料保存到数据库系统当中，可用来离线修改完善专家系统的知识库，使得隧道式电烘炉能更好地适应多类型产品的生产，以实现生产线的智能化和最优化。未来的电烘炉操作者仅需将待处理的产品规格、数量输入计算机，整套设备将自行处理出高质量的产品，工艺控制完全程序化，整个系统可实时、多项目控制，通过屏幕可监视并控制设备运行状况中所检测到的工艺参数。

参考文献

- [1] 章信. 饼干的发展趋势[J]. 江西食品工业, 2001,(4): 36-37.
- [2] 杨晓玉. 食品包装机械发展的新趋势[J]. 现代制造, 2007(18): 10-11.
- [3] 刘瑞英, 李明军, 徐克宝. 电炉温度控制系统的 BP 神经网络建模[J]. 煤矿机械, 2005 (9): 66-67.
- [4] 李晓谦, 曾松盛. 倾动式电炉流量自控系统的建模与实验模拟[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2006 (3): 547-552.
- [5] 张会敏, 何永义. Fuzzy PID 算法在炉温控制中的应用[J]. 自动化与仪器仪表, 2002 (3): 27-30.
- [6] Taifu Li, Jundi Xiong, Rui Zhang, Qifu Tan, Ruizheng Xu. Hardware Implementation of Fuzzy PID Controllers[J]. Fuzzy Optimization and Decision Making, 2006 , 5(2): 113-122.
- [7] 仪怀亮. 模糊控制器在电炉温度控制系统中的应用[J]. 机械工程与自动化, 2006,(6): 111-114.
- [8] Lianfei Zhai, Tianyou Chai. Nonlinear decoupling PID control using neural networks and multiple models[J]. Journal of Control Theory and Applications, 2006, 4(1): 62-69.
- [9] 张雪平, 王志斌, 基于模糊控制的 PLC 在温度控制中的应用[J]. 电气传动, 2005 (8): 54-55.
- [10] Chia-Ju Wu. Genetic Tuning of PID Controllers Using a Neural Network Model: A Seesaw Example[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 1999, 25 (1) : 43-59.
- [11] 尹明, 董振银, 宋利君. 模糊 PID 在电炉温度控制中的应用[J]. 齐齐哈尔大学学报: 自然科学版, 2003 (2): 33-35.
- [12] J. H. Kim, S. J. Oh. A fuzzy PID controller for nonlinear and uncertain systems[J]. Soft Computing - A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications, 2000, 4 (2): 123-129.
- [13] Taifu Li, Yingying Su, Bingxiang Zhong .Remodeling for Fuzzy PID Controller Based on Neural Networks[J]. Fuzzy Information and Engineering, 2007, 40: 714-725.

- [14] Jia Lu, Yunxia Hu. An Algorithm for the Optimal Tuning of Fuzzy PID Controllers on Precision Measuring Device[J]. Computational and Information Science, 2004, 3314: 7-12.
- [15] 程凌敏等, 食品加工机械[M], 北京: 中国轻工业出版社, 1992:12-16.
- [16] 曹乐平, 陈理渊, 温芝元. 隧道炉的节能与智能化改造[J]. 轻工机械, 2006 (3): 142-146.
- [17] 刘霄彤. 模糊控制技术在饼干烘炉中的运用[J]. 包装与食品机械, 2001 (5): 9-11.
- [18] 龚国治. 隧道式远红外电加热炉的设计[J]. 商业科技开发, 1997 (2): 7-9.
- [19] 夏春荣. 基于 PLC 的 FBT 隧道炉设计[J]. 工业控制计算机, 2006 (5): 71-72.
- [20] Lars Boström, Claus K. Larsen. Concrete for Tunnel Linings Exposed to Severe Fire Exposure[J]. Fire Technology, 2006 (8):351-362.
- [21] M.A. Hossain, M.S. Munir, M.Z. Hafiz, H.S. Takhar. Flow of a viscous incompressible fluid of temperature dependent viscosity past a permeable wedge with uniform surface heat flux[J]. Heat and Mass Transfer, 2007 (7): 333-341.
- [22] Emine Doğru Bolat, Kadir Erkan, Seda Postalç oğlu. Microcontroller Based Temperature Control of Oven Using Different Kinds of Autotuning PID Methods[J]. AI 2005: Advances in Artificial Intelligence, 2005, 3809: 1295-1300.
- [23] 王小平, 王大承. 隧道炉自适应温度控制系统[J]. 新技术新工艺, 2004 (6): 9-11.
- [24] S.A. Manesis, P.M. Michael. Fuzzy Supervisory Control of Air Flow and Temperature in Industrial Tunnel Furnaces[J]. Digital Object Identifier, 2005, 1:387-391.
- [25] Dömen Hudoklin, Igor Pušnik, Jovan Bojkovski, Janko Drnovšek. Simultaneous Calibration of Large Number of Thermocouples[J]. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Budapest: Hungary, 2001 (5):688-692.
- [26] 李铁成. 台达机电产品在燃气式食品隧道炉上的整合应用[J]. 可编程控制器与工厂自动化(PLC&FA), 2006 (1): 131-132.
- [27] Jerry Luecke. Analog and Digital Circuits for Electronic Control System Applications[M]. Elsevier, 2005:156-187.
- [28] G. Rizzoni. Principles And Applications of Electrical Engineering[M]. 3Ed. McGraw Hill, 2000:212-226.

- [29] Elisabet Estévez & Marga Marcos & Darío Orive. Automatic generation of PLC automation projects from component-based models[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2007 (7): 527-540.
- [30] FX Series Programmable Controllers Programming Manual[M]. MITSUBSHI ELECTRIC CORPORATION, 1999 (11):1-5.
- [31] FX0N-3A SPECIAL FUNCTION BLOCK. MITSUBSHI ELECTRIC CORPORATION, 1997 (4):1-3.
- [32] 三菱变频器 FR-A720[EB/OL]. [2007-10-15]. <http://www.gkzhan.com/sale/show/153417.asp>.
- [33] 人机界面 [EB/OL]. [2007-10-15]. <http://www.yymmfa.com/023.html>, 2007-10-15
- [34] GOT-F900 系列图形操作终端操作手册[M]. MITSUBSHI ELECTRIC CORPORATION, 2002(6) :1-3.
- [35] GOT-F900 系列图形操作终端硬件手册[M]. MITSUBSHI ELECTRIC CORPORATION, 2001 (5) :1-3.
- [36] 刘传富, 董海洲等. 影响饼干质量的关键因素分析[J]. 食品工业科技, 2002 (8): 87-89.
- [37] 李道龙. 饼干制作与水[J]. 食品工业, 1998 (6): 18-20.
- [38] 李道龙. 饼干的焙烤技术一[J]. 食品工业, 2000 (6): 17-18.
- [39] 李道龙. 饼干的焙烤技术二[J]. 食品工业, 2001 (1): 33-34.
- [40] 李道龙. 苏打饼干的制作技术上[J]. 食品工业, 1997 (6): 18-20.
- [41] 李道龙. 苏打饼干的制作技术下[J]. 食品工业, 1998 (2): 37-39.
- [42] 李曼珍. 过程控制中 PID 控制算法的实用性[J]. 仪器仪表用户, 2004 (5): 48-50.
- [43] 胡祝兵, 易江, 王娟. 积分分离 PID 控制在温控系统中的仿真研究[J]. 承德石油高等专科学校学报, 2006 (4):17-19.
- [44] 张仑. 可编程序控制器中 PID 控制的研究[J]. 电气电子教学学报, 2005 (3): 90-92.
- [45] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真(第 2 版)[M]. 北京: 电子工业出版社. 2004: 56-78.
- [46] 朱仲邃. 变速积分 PID 算法在温度控制中的应用[J]. 仪器仪表用户, 2005 (3): 68-68.
- [47] 林瑞全, 杨富文, 邱公伟. 一类不完全微分 PID 控制的实现方法[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2004 (1): 31-34.

- [48] Guanzheng Tan, Qingdong Zeng, Wenbin Li. Design of PID controller with incomplete derivation based on ant system algorithm[J]. Journal of Control Theory and Applications, 2004, 2(3): 246-252.
- [49] 陈芸, 王永初. 基于神经网络的微分先行 PID 控制器的研究[J]. 机械与电子, 2004 (6): 64-66.
- [50] 赵君, 仇林庆, 关硕. 模糊免疫 PID 在主汽温控制系统中的应用[J]. 东北电力大学学报, 2006 (4): 75-78.
- [51] Ling He, Yu-cheng Zhou, Yuan-wei Jing, Hai-yu Zhu. A VRC Algorithm Based on Fuzzy Immune PID-Smith.Intelligent Control and Automation[J]. 2006, 344: 463-468.
- [52] Amit Konar. Artificial Intelligence and Soft Computing[M]. CRC Press, 2000:301~324.
- [53] Dragan Kukolj, Emil Levi. Identification of complex systems based on neural and Takagi-Sugeno fuzzy model[J]. IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS—PART B: CYBERNETICS, 2004,34(2):272-282.
- [54] 闻新. MATLAB 模糊逻辑工具箱的分析与应用[M]. 北京, 科学出版社, 2001:143-150.
- [55] S. Lee and G.G. Yen.Analysis of Takagi-Sugeno Fuzzy Models in System Identification for Model-Based Control[J]. Control and Intelligent Systems,2004 (2):201-213.
- [56] Otacílio M. Almeida, Laurinda Lucia N. Reis; Luis Daniel S. Bezerra,Sanderson Emanuel U. Lima. A MIMO Fuzzy Logic Autotuning PID Controller: Method and Application[J]. Applied Soft Computing Technologies: The Challenge of Complexity, 2006 (3):568-580.
- [57] 谢克明, 郭红波, 谢刚, 续欣莹. 人工免疫算法及其应用[J]. 计算机工程与应用, 2005 (20): 77-80.
- [58] Dong Hwa Kim, Jin Ill Park.Intelligent PID Control by Immune Algorithms Based Fuzzy Rule Auto-Tuning[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2003, 1(1): 474-482.
- [59] Laihua Fang, Zongzhi Wu, Aiguo Wu, Aihong Zheng. Fuzzy Immune Self-Regulating PID Control of Networked Control System[C]. Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation, 2006 and International

Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce,
International Conference,2006 (11):74-74.

致 谢

首先衷心感谢我的导师桂卫华教授和郑巍高级工程师对我的教诲与指导。本文的研究工作以及论文的写作得到了导师的悉心指导、热心支持和鼓励，从导师那里学到对科学研究的严谨作风，孜孜不倦的科研精神，兢兢业业的工作态度，为人师表的高尚品德。这些将激励我在工作上不断进取，科学上努力探索。

在中南大学的学习和研究得到了唐朝晖教授、李勇刚副教授的热心指导和帮助，在此向唐老师、李老师深表谢意！

感谢中南大学研究生院、信息科学与工程学院的其他老师对我学习的关心和帮助。

感谢中南大学的博士研究生宋海鹰、硕士研究生王新华等对我的帮助。

感谢原广东省机械学校的校领导们，感谢他们独到的眼光选择了中南大学作为教师的培养基地，感谢他们为培养教师付出的心血和提供的物质基础。

感谢广东技术师范学院自动化学院、设备与实验室管理处的领导和同事们对我的关心和支持，给我良好的学习氛围，让我专心进行研究工作。

衷心感谢父亲对我的谆谆教诲，这些都使我努力，不能稍有辜负。

衷心感谢我的妻子关敏玲对我莫大的关爱和支持，正是她对家庭的任劳任怨和无私奉献，才使我能全身心投入学习和工作，顺利完成学业。

感谢我刚读小学的儿子滕俊斌对我学习的支持和理解，让我安心学习，无后顾之忧。

路漫漫其修远兮，吾将上下而求索。我愿在未来的学习和研究过程中，以更加丰厚的成果来答谢曾经关心、帮助和支持过我的所有领导、老师、同学、同事和亲戚朋友们。

滕立国

2008年3月28日于广州

攻读学位期间发表的论文

- [1] 滕立国, 桂卫华. 智能 PID 在隧道式电烘炉上的应用. 微计算机信息, 2007 (25): 93-94, 101.