

挤压工艺过程控制¹

EXTRUSION PROCESS CONTROL

谢富弘 博士，美国密苏里大学

前 言

挤压熟化是效率最高而又具有通用性的加工饲料和食品的方法之一。食品和饲料工业都广泛采用挤压工艺生产多种多样的产品(Harper, 1981)。挤压工艺的特点是在物体、能量和动量传递之间强烈相互作用，并伴有复杂的物理化学变化，这些变化支配着最终产品的种种特性。挤压熟化系统的复杂性从图 1 可以得到进一步的说明。挤压工艺控制系统由挤压机、可控变量(manipulative variables)、受控变量(controlled variables)和各种干扰(disturbances)组成。

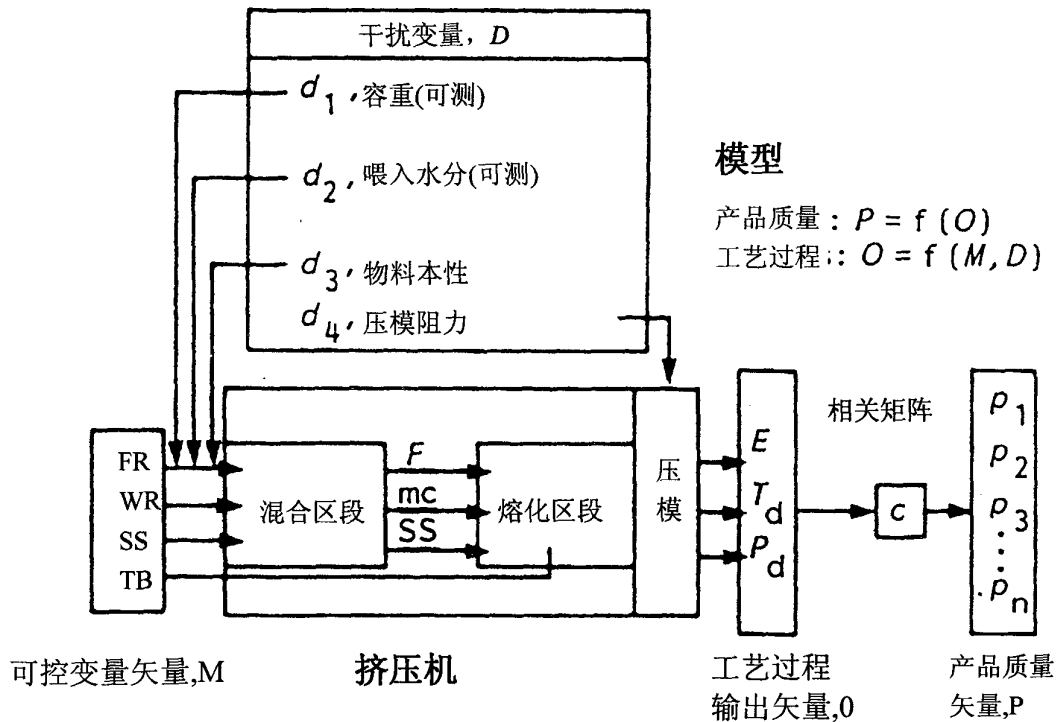


图 1 典型挤压熟化系统的复杂性

¹ 首次发表于 1999 年 6 月

可控变量是用来将受控变量保持在设定点的变量。对挤压熟化而言，可控变量通常包括喂料速度、喂入水分、螺杆转速和机镗温度。受控变量是产品质量，必须保持或控制在某些数值水平上。但是产品质量特征往往不可能现场测定，只能在随后的实验室测试之后才能得知。所以不可能直接控制产品质量。幸好产品质量特征往往与工艺的一些输出数值相关，如像产品温度、压模压力、能量消耗等，这些都是现场可测的。因此，可将这些工艺过程输出数值当作受控变量看待。除可控变量之外，所有影响受控变量的变量，都称作干扰(disturbances)，负载(loads)或扰动(upsets)。

挤压工艺过程控制实质上是一个多输入(multiple input)多输出(multiple output)系统，干扰和可控变量对各种挤压机输出值的影响是高度非线性的，并与时间的推延相互作用。因此说，要把全部工艺过程输出值控制在一个所希望的水平是不大可能的。要作出好的挤压控制系统设计，需要明确限定控制目标、选定受控变量、掌握干扰和可控变量，还要制定适宜的控制策略。

一、控制目标

总的说，挤压工艺过程控制的目标，是在工艺稳定性和安全性允许范围内保证挤压产品符合规格要求。

1．产品规格

挤压工艺过程控制的主要作用，就是在符合安全性和稳定性准则的前提下，尽管有各种工艺过程扰动和天然干扰，也能保证稳定的产品质量。如图 1 所示，产品质量实际上包含许许多多特征。多输出控制是相当困难的，因此往往有必要把受控的产品质量特征限定到最少几项，或者只选定其中最重要的一项。Tan 等人(1994, 1996)报道过几种现场传感器，可以检验挤压物的颜色、表面质地、长度和宽度，但是实际生产线上还没有检验产品质量特征的现场传感器，这仍然是直接控制产品质量的一大障碍。现有的控制系统多半是推理的，就是把一些可测定的工艺过程变量调整到与所希望的产品质量相应的设定点(Stults,1978)。还有一个解决办法，是用微信息处理芯片设计一些智能传感器，根据各种工艺过程变量的现场测定和数学处理，编制能预测产品质量的程序(Green, 1984)。

2．安全性

安全性最为重要，通常由挤压机厂商负责。安全保证包括防止主螺杆电机超载

和模头超压。在超压情况下卸下模头是有危险的，必须非常小心。因此，挤压工艺过程控制的目标之一是避免挤压机骤然停车。

3. 工艺过程稳定性

挤压操作在某些操作条件下可能出现非稳定的(或稳定的)周期性变动(图2)(Roberts and Guy, 1986 及 1987 ; Levine and Symes, 1992)。保持工艺过程稳定性要求将工艺过程输出值控制在一个稳定区域内进行。如果没有避开不稳定的作业区域，就要调整控制器。在不稳定作业区域采用控制器，甚至会让工艺过程的控制更为恶化。

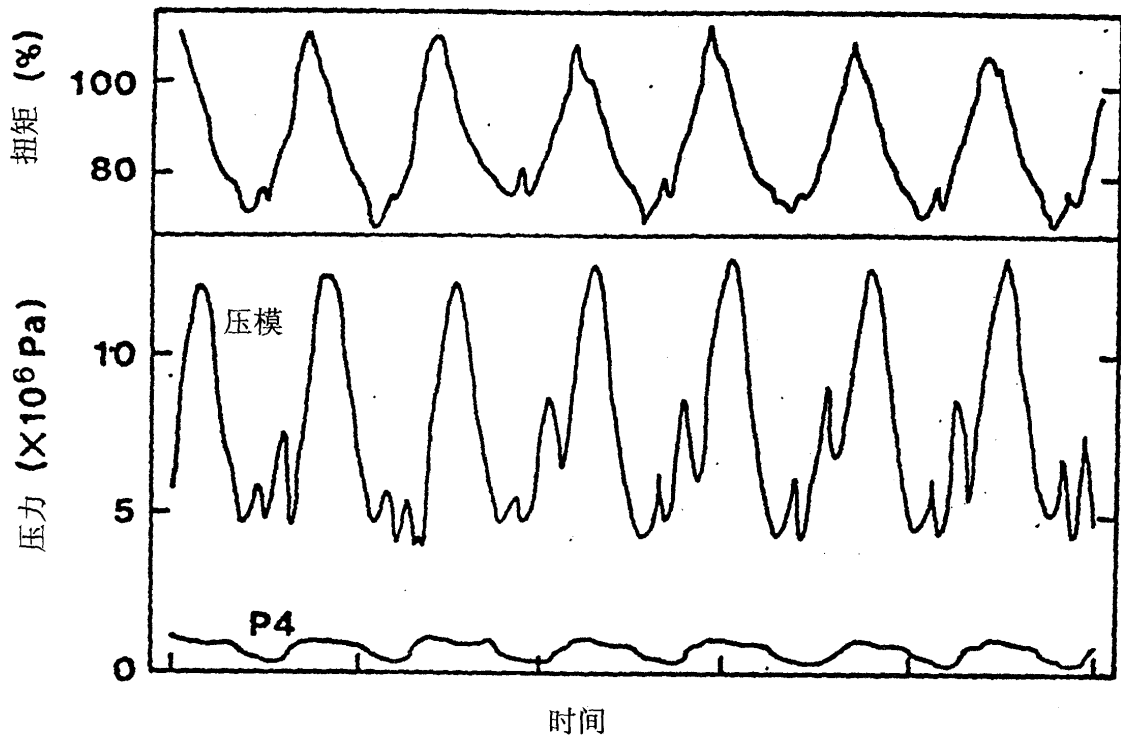


图2 在低水分造成的不稳定挤压过程中的5分钟数据记录

二、受控变量

由于作为原始受控变量的产品质量难以利用，一直普遍采用的作法是利用工艺过程输出值(产品温度、压模压力、传动扭矩)作为受控变量。应当强调的是，尽管工艺过程输出值与真实产品质量之间高度相关，但产品质量仍然是唯一最重要的受控变量。

三、干 扰

正确地认定并了解干扰变量,对一个好的控制系统设计来说是必不可少的。干扰的性质往往可以提供线索去确定最适合的干扰变量。有两类干扰与挤压工艺过程有关。一类干扰发生在喂料区一端,包括物料的容重变化、物料含水量和物料本身的性质。在压模一端的干扰是由于压模局部或全部阻塞而引起压模阻力的骤然变化。一般地说,喂料一端的干扰是导致产品质量不佳的原因所在,必须加以控制。压模一端的干扰更加引人注目,经常造成突然停车。这种情况最常发生在启动或突然改变作业条件的场合。一个控制器可能不会反应如此之快而控制住这些后果,但应该能够认识到即将来临的事故而执行一个安全停车的程序。

四、可控变量

挤压的可控变量有螺杆转速、喂料速度、喂料水分和机镗温度。其中,机镗温度是最不适用的,因为调整进行很慢。这一点将在后面详细讨论。

五、设定控制策略

认定受控变量和可能用的可控变量之后,必须找出他们之间的恰当联系。设计一个适用的控制系统,必须了解应当利用哪一个或哪些可控变量来控制每个控制输出。这并不简单,既要考虑平稳状态,还要考虑动力学关系。根据基础原理、实验数据、或二者结合,做出数学模型,能最好地兼顾稳态和动力学过程。该模型应能预测挤压系统的平稳状态和不稳定运转状态。为实现控制的目的,该模型要有两项重要功能,即:设计控制器并将它调谐,进行实际的现场控制。

控制方案按信息流的方向可能是返馈(feed-back)或者是前馈(feed-forward)。反馈系统是根据测定值和参考值之差产生控制信号。前馈系统是根据影响工艺过程的各种干扰而产生控制信号。挤压控制多半是反馈控制,这主要是由于难以测定干扰变量也难以将其影响模型化的缘故。可控变量的调节是根据该系统的动态反应特性而进行的。自适应控制方案是靠不断修正控制器参数来处理系统变量,因此在挤压工艺过程控制上很有发展前途。

在进一步深入挤压控制这话题之前,需要先谈谈测定挤压作业参数或变量以及作业数据显示和储存问题。

测 定

要让一台挤压机保持稳定的工艺过程，必须掌握或测定全部作业参数或变量。这些参数或变量可分为四类：原料、加工参数(包括加工常量和加工变量或可控变量)、系统参数(工艺过程输出值)、产品特性(图 3)。

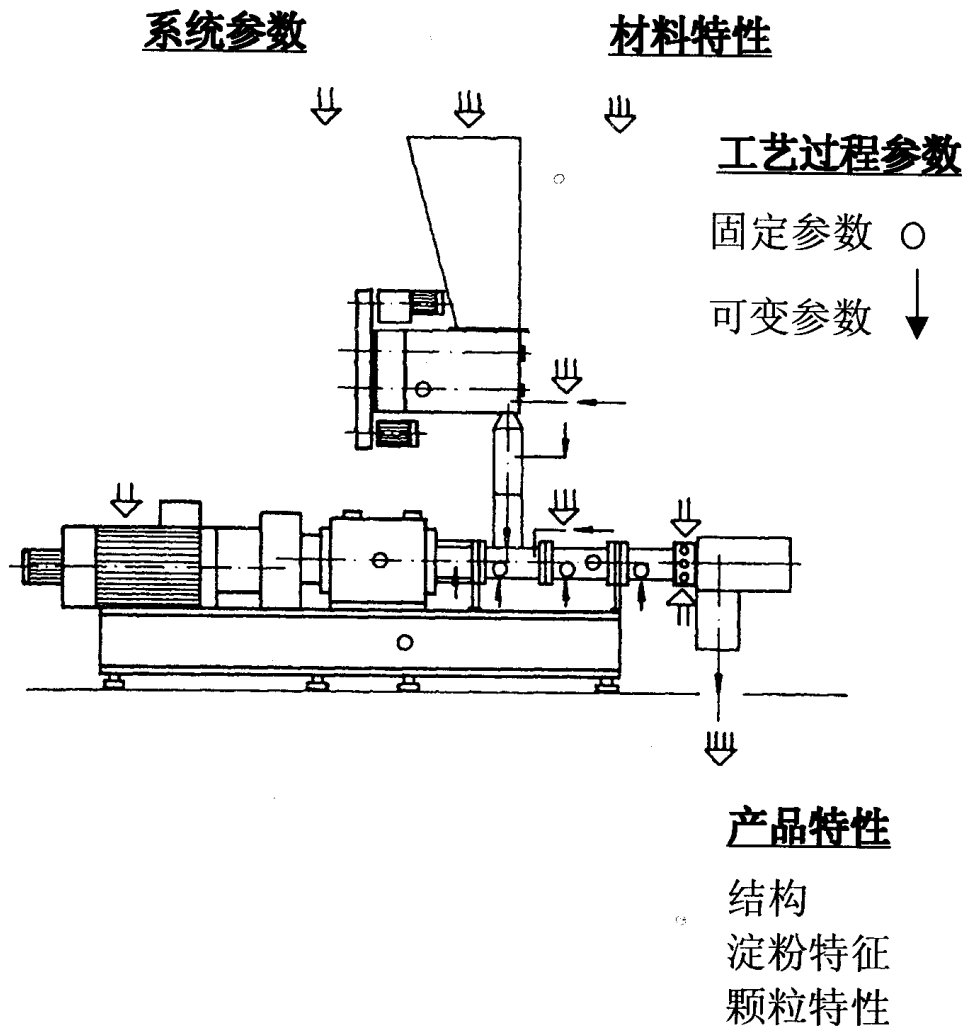


图 3 挤压熟化系统的数据测定

1. 原料

原料的化学组成(淀粉、蛋白质、脂肪、灰分和水分), 密度, 粒度, 补加物(水、注入的蒸汽), pH, 均质性。

2 . 加工参数

加工参数包括加工常量和加工变量(或可控变量)。

a. 加工常量：

挤压机类型，挤压机大小，挤压机长度和直径比(L / D)，螺杆构形，螺杆磨损率，压模构形，压模直径，压模材料，模孔数目。

b. 加工变量(可控变量)：

通过量(喂料速度)，喂入水分(添加水或蒸汽)，进料温度，挤压机机膛温度，挤压机螺杆冷却，螺杆转速。后面两个变量控制剪切速率和螺杆填满程度。

3 . 系统参数(工艺过程输出值)

能量消散或消耗(比机械能)，主传动扭矩或电机电流负荷，产品温度，压模压力。

4 . 产品特性

外形，膨胀(纵向和横向)，密度，水分，表面糙度，硬度，易碎性，吸收脂肪能力，淀粉糊化程度，氮可溶性指数，吸水率，水吸收指数，水可溶性指数，水中漂浮性，对氧化的稳定性，微细结构(扫描电镜、荧光显微镜或光学显微镜)等等。

加工变量

生产过程中必须密切注意各种加工变量，诸如：通过量(喂料速度)、喂料温度、喂入水分(添加水或蒸汽)、机膛温度、螺杆冷却、螺杆转速、工艺过程输出值(主传动负载或扭矩、产品温度、压模压力)。应当精确测定并记录这些变量。充分认识这些数值，所希望的操作条件就可以人工设定、启动并加以控制。

1 . 通过量(喂料速度)

如果原料非常稳定，密度和流动特征都保持一致，那么大多数容量式喂料系统(图 4)都很适用。但是，要掌握原料的准确重量，就必须将出料过称。为这种目的可以使用重量喂料器，如称重传送带或减重式装置(图 4)。

2 . 喂入水分

挤压使用的液体主要是水或蒸汽。其他一些液体，如麦芽、液化消化物、糖浆等，也可能使用。测定或调节液体流速可以使用转动活塞流量计、泵转速、感应型接收器、或减重罐，等等。

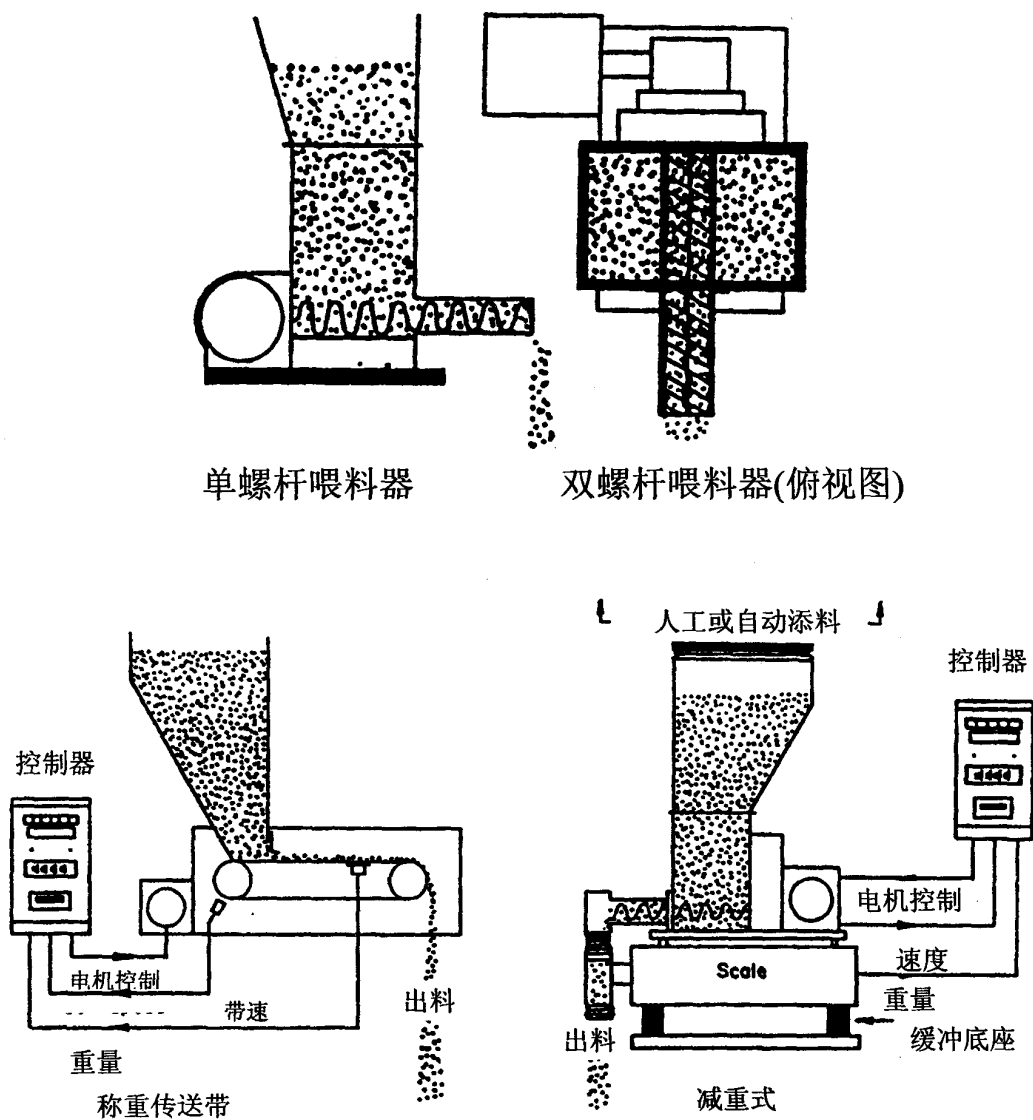


图 4 容量式和重量式喂料器

3. 物料温度

这一项对预调制原料特别重要。饲料原料在预调制器中的时间和温度上的任何一点变化，都会造成产品特性的显著变动。普遍采用标准热电偶测定挤压加工中的温度，热电偶坚固耐用，自生电流，型号很多，测定温度范围也很宽。热电偶是两个不同金属线圈的交结，暴露于热源时，产生一个与交结温度和该金属成一定比例的电压。为解决腐蚀问题，通常使用铜-康铜(T 型)或铬镍合金-铝锰合金(K 型)热电偶，而不用铁-康铜(J 型)。

4 . 螺杆转速

有许多机械的和电学的速度感应装置。常用的是感应型转速计或频闪观测计。

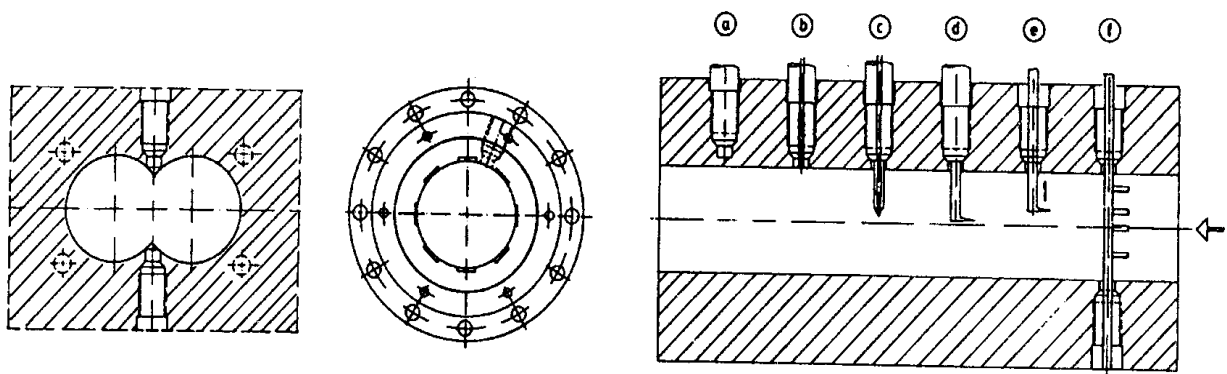
5 . 主传动扭矩或电机电流负荷

挤压机螺杆的电机作业负荷直接指示出物料所吸收的能量。电机的机械能由螺杆的摩擦和剪切过程而以热能消散。测量交流电机的功率可以用相位反应电流的安培计或结合 kWh(千瓦小时)测量计进行。这样可得出传动负荷。直流电机的负荷是从电压和电枢电流测定。为测定挤压机螺杆的真实扭矩，应把传动链效率考虑进去，还应扣除空载运转损失。

在挤压机螺杆传动轴上直接安装一个扭矩测定毂(hub)或扭矩感应器，可以更准确地测量扭矩值。这种装置是通过拉力计(strain gauges)发出与扭矩成比例的电子信号。该信号必须由转动的汇电环(slip-rings)接受。

6 . 产品温度

测定产品温度普遍采用标准熔体塑料热电偶。测定挤压机机膛中的产品温度，重要的是让所测的温度确实是要测的点的温度。图 5 表示了用于挤压机的一些温度传感器。多数挤压机都有温度传感器，装在机膛壁里面，不与物料接触而只测量机膛温度。内壁表面安装的传感器只能测量内壁的直接表面温度。由于机膛壁温度的影响，所测温度不是准确的产品温度。可浸水的传感器简单耐用，生产中经常使用。



- a) 机膛壁里面传感器
- b) 机膛内表面传感器
- c) 可浸水的传感器
- d) 固定毛细管传感器
- e) 可调毛细管传感器
- f) 带温度传感器的测定锭

图 5 埋在挤压机机膛里的热电偶

7 . 压模压力

机械的和电力的压力传感器两种都有(图 6)

- 机械的，带柱塞
- 机械的，带 Bourbon 管，有一个硅润滑压力传感器

· 压力转换器，带有预应力阻力金属线，能感应一个与压力成比例的膜片或薄膜发生的偏移，该信号由一个充水银或甘醇的管传递给一个测量条带，以便将这电子仪器与纷杂的环境隔离。压力转换器与自生电流的热电偶不同，它需要一个外来的激发电压(图 7)。

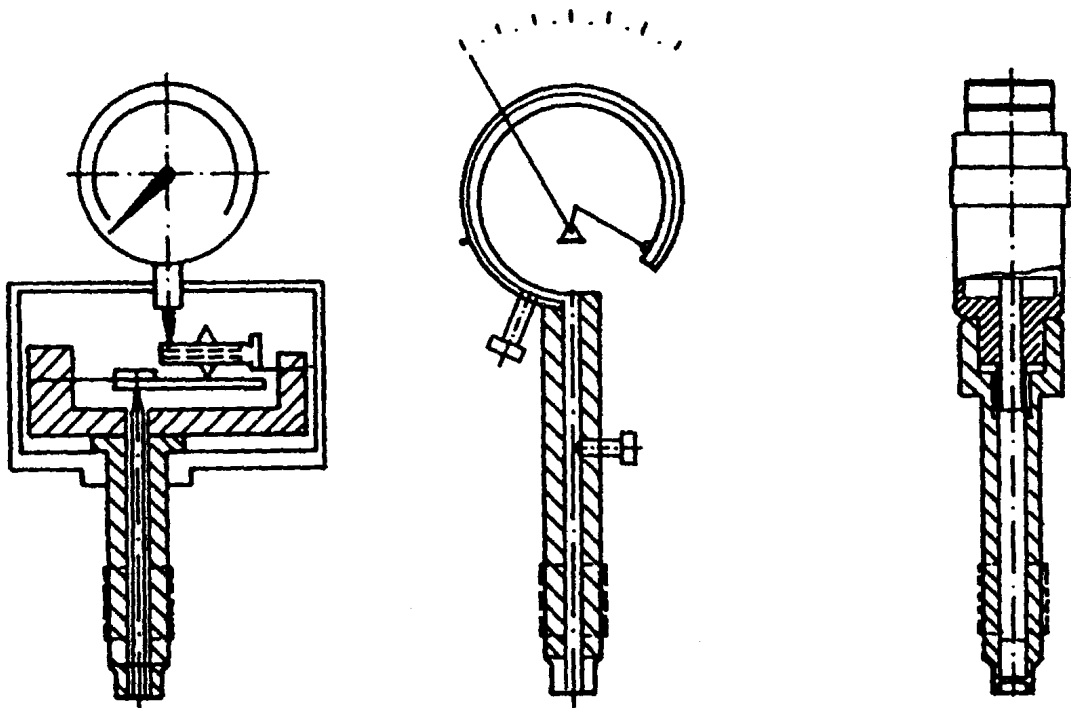


图 6 压力计

作业数据显示和储存

所有取得的测量信息必须能够传达到挤压机操作人员。信息的显示可以是数字显示或模拟显示。可以用一个数据记录器和处理机得出实时数值加上时间的平均值。Seibel 等人(1989)描述过一个 PC 帮助的装置，可以安装在挤压机上现场收集并处理数据。开发了一个在个人电脑上运行的软件包复杂程序，可以进行数据收集、实时显示、记录、数据评估、图形数据显示及数据管理。

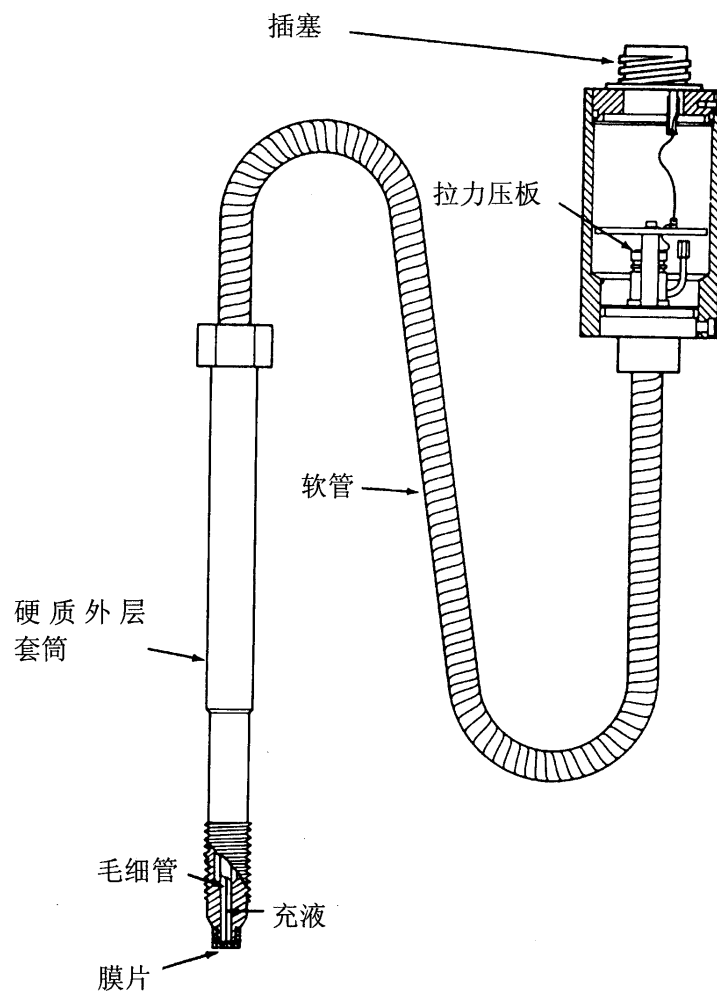


图 7 Dynisco 熔体压力转换器

工艺过程控制实施

测量了挤压操作参数或变量并使测定信息可以传达到操作人员时,便可实施挤压工艺过程的控制了。例如,挤压熟化工艺过程的启动(图 8)和停车(图 9)都可以靠屏幕显示的实时扭矩和压力曲线加以监控而大为方便。挤压机传动的扭矩过调量或标称马力使用不足都可以观察到并立即纠正。扭矩和压力的水平和稳定表明启动过程完成而进入了平稳操作状态。如在挤压当中发生波动或干扰,依靠屏幕显示的实时控制参数可以尽早发现,从而可以采取纠正措施而不致让挤压过程发生代价很大的中断甚至停产。

控制挤压工艺过程有不同水平的实施方式,最基本的是人工控制。

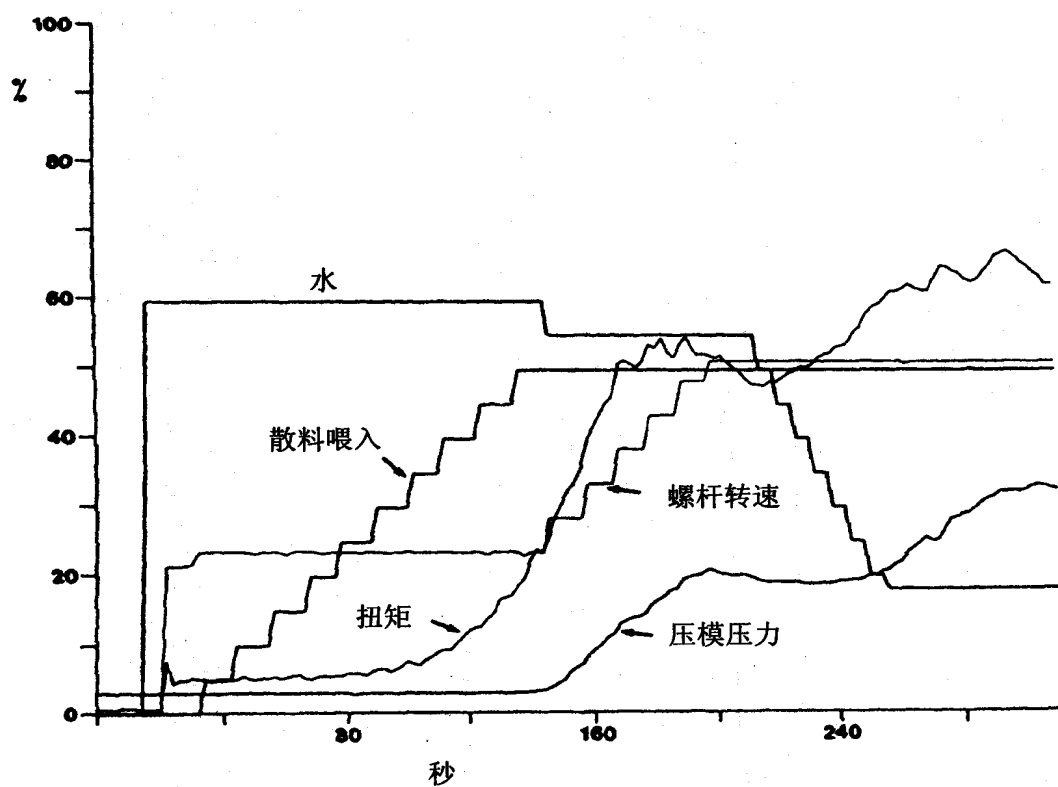


图 8 玉米粗粉挤压的自动启动

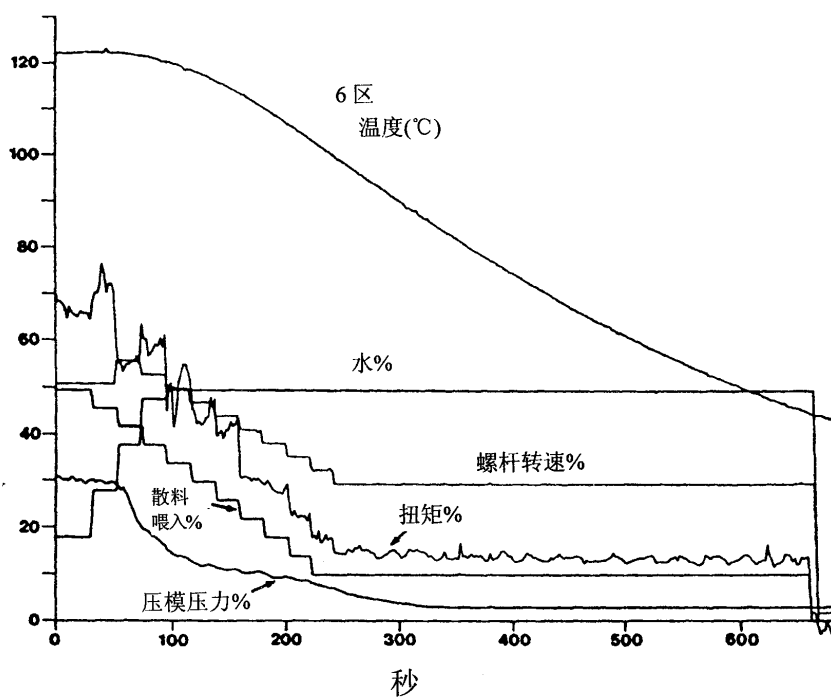


图 9 玉米粗粉挤压的自动停车

一、人工控制

现在多数挤压机仍是人工操作。根据控制复杂性不同,各种参数如像喂料速度、喂入水分(水或蒸汽注入速度)、螺杆转速、机膛温度、切刀转速等都设置在控制面板上(图 10),不过主传动扭矩、产品温度和压模压力通常是不调节的。有很多控制元件,但信号传递只朝一个方向进行,没有自动反馈。反馈控制系统执行及调节幅度可以用人工操作并指示出来,不过这些数值是不加处理的。

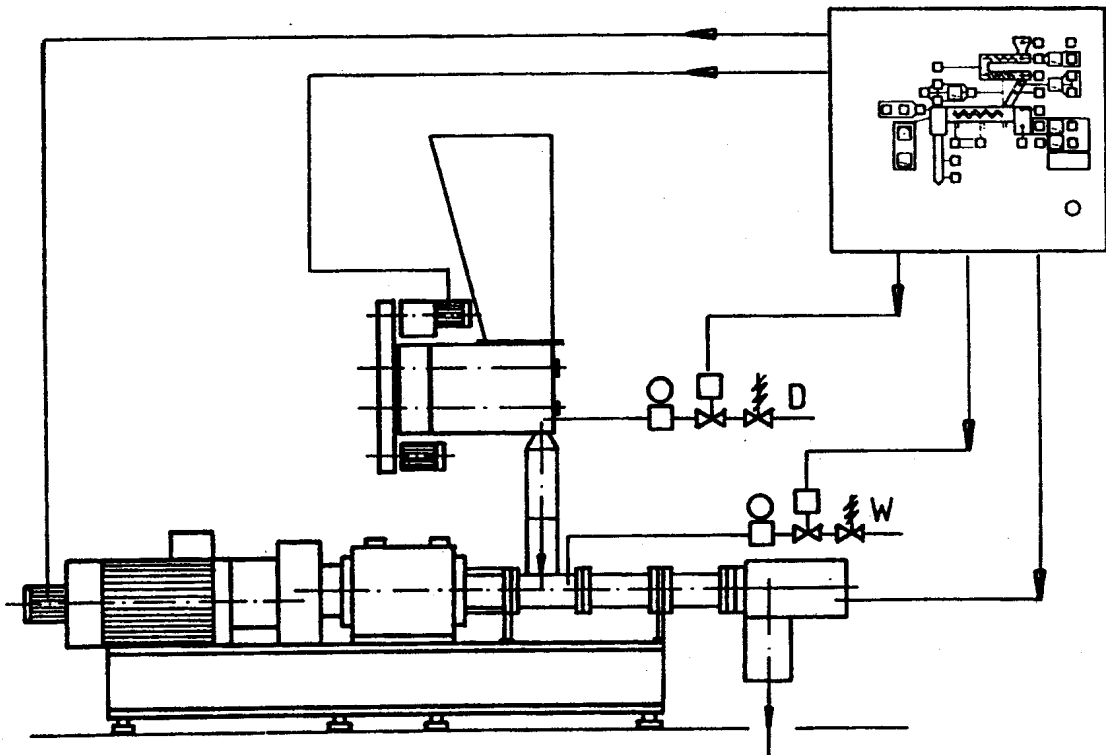


图 10 挤压熟化的人工控制

有经验的操作人员可以靠人工有效地执行复杂的非平稳态启动和停车,如图 11 所示(Wiedmann and Strecker,1988)。

二、人员和机器防护(系统保护和联锁)

为保护工厂人员并使挤压机和工厂免受损害,许多挤压机装有许多防护设施。这些设施还能在发生运转故障时发出警报信号并将有关部分关停。主要防护有:

- 电机热过载保护(主传动、喂料机传动、搅拌器传动、油泵传动、切刀传动)。
- 传动打滑(指标器)

- 油压监测
- 变速箱温度调控
- 压模压力(压模喷孔前监测)
- 切刀传动转速调控
- 切刀安全保护联锁

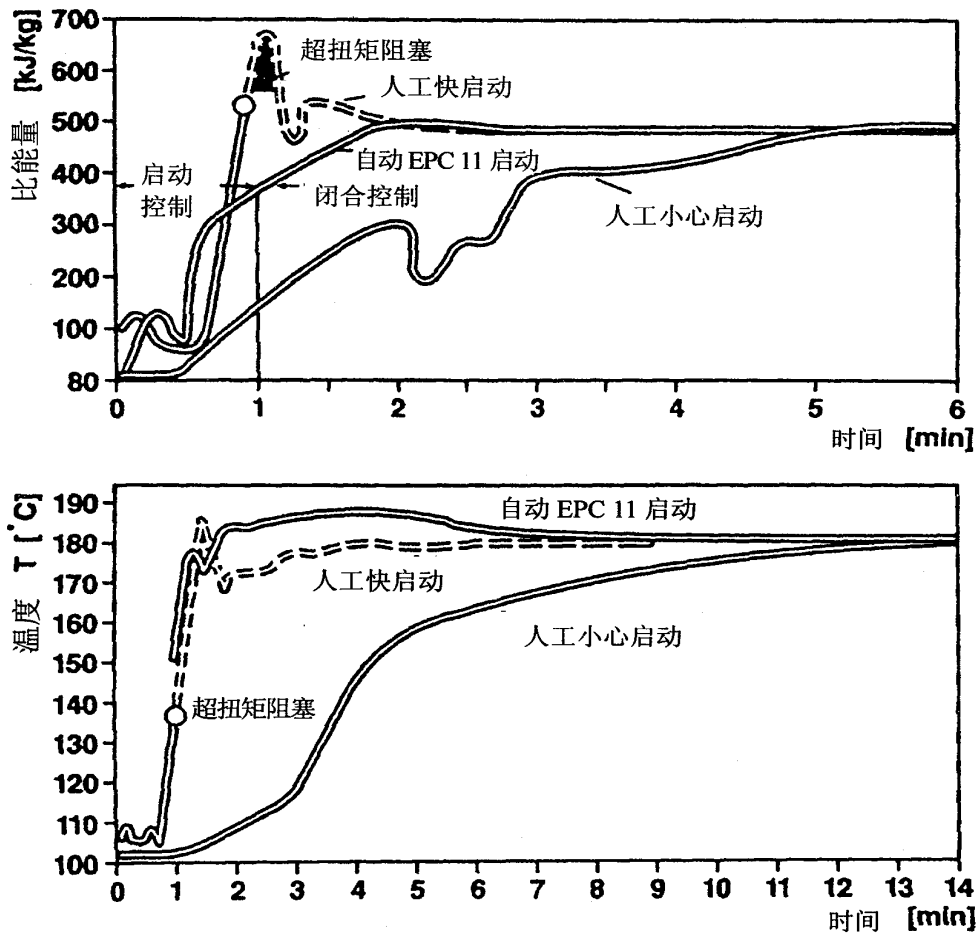


图 11 人工和自动启动

三、工艺过程监控

在尽可能少的工厂人员监控下进行挤压机的自动化控制和操作,有必要适当地监测工艺过程,发生任何作业故障时立即发出信号,甚至在一种控制功能作出反应后能让挤压机恢复正常操作(图 12)。在操作人员没有对控制信号作出反应时,控制系统必须立即让挤压机自动停车。为此,应当监测下列项目:

- 筒仓物料高度
- 最少喂料量

- 喂料器电机作业
- 主电机，最小 / 最大扭矩和最小 / 最大转速
- 蒸汽压力
- 物料温度(过高 / 过低)
- 挤压机阻塞
- 机镗发热
- 产品高 / 低温度
- 压模高 / 低压力
- 产品卸料阻塞
- 产品出厂作业

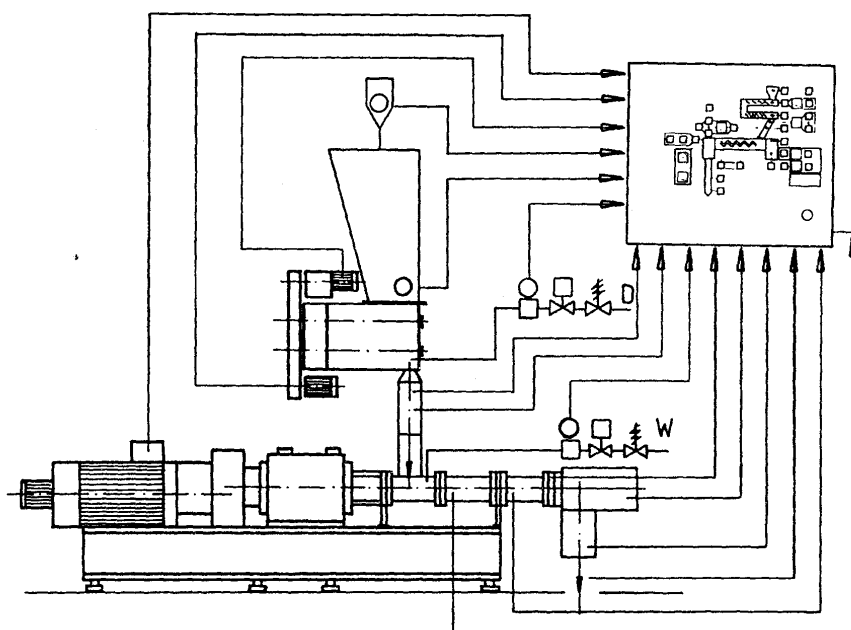
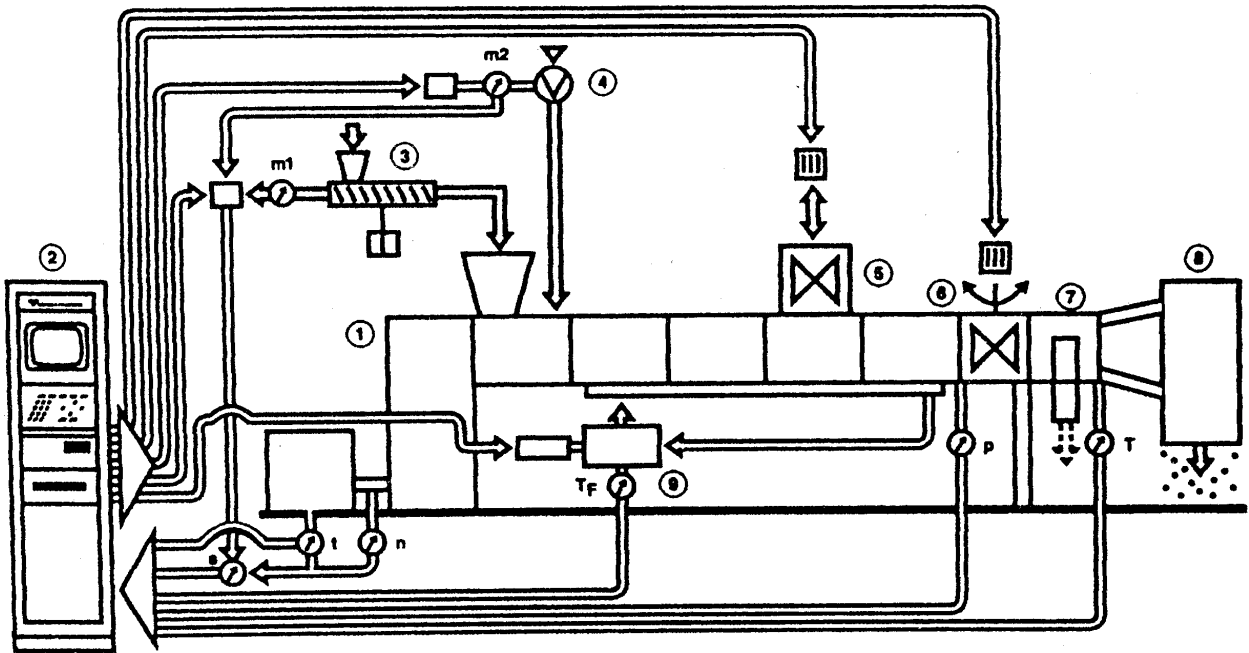


图 12 挤压熟化的工艺过程监控

四、自动化工艺过程控制

自动化控制就是各种作业参数都按控制系统预先设定的数值受到控制调整而运转。这个过程是以真实数值不断与设定数值进行比较而进行的。真实数值与设定数值的任何偏离都会得到自动纠正而使设定的作业数值得以连续保持(图 13)。自动化工艺过程控制有几种策略。经典的按比例 - 综合 - 衍生 (proportional-integral-derivative, 缩写 PID) 控制器已用于多种工艺加工过程，取得不

同程度的成功。PID 控制器通常在有线性的低次方程动力学特征的工艺过程中表现最佳，故经常用来控制挤压机机镗温度。高水平控制(advanced control)技术是为挤压这类工艺过程设计的，这类过程是非线性的高次方程动力学过程。该过程可随时间而变动。有三种基本的高水平控制：模型基础控制器、模糊逻辑控制和人工神经网络(artificial neural networks)。



- | | |
|------------------|---------------|
| 1 双螺杆熟化挤压机 ZSK70 | 6 带调节电机的产品节流阀 |
| 2 微电脑控制 EPC 11 | 7 启动阀 |
| 3 生物聚合物喂料装置 | 8 制粒机 |
| 4 水分喂入装置 | 9 流体热交换器 |
| 5 带调节电机的蒸汽阀 | |

图 13 挤压熟化的闭合控制

以模型为基础的控制是从一个工艺过程模型和一份控制系统表现说明书从数学上建立起来的。用于模型控制的数学方法可以对所控制的工艺过程的稳定与牢固性进行一种演绎的(priori)测定。挤压实质上是一个多输入多输出(multiple input, multiple output, 缩写 MIMD)系统。干扰和可控变量对各种挤压机输出值的影响是高度非线性的，并与时间推延相互作用。最近建立起来关于描述双螺旋挤压机的平稳状态和非平稳运转状态的数学模型见于下列参考文献中：Levine 等人(1987a 和 1987b)，Ferdinand 等人(1988)，Kulshreshtha 等人(1991)，Kulshreshtha and Zaror(1992),Nejman 等人(1992) Lu 等人(1993) ,Chang and Tan(1993a 和 b),Singh and

Mulvaney(1994), Cayot 等人(1995)。

模糊逻辑控制是一种完全不同的控制挤压工艺过程的途径。它应用 Lofti Zadeh 在 1965 年介绍的模糊逻辑(Sperber,1991)，用一种方便的方法来处理复杂的工艺过程、不充足不精确的信息、以及可得数据的不确定性质，可容纳专家主观知识并使之转化成电脑可处理的定量函数。多数专家知识是以“如果-那么”规则(if-then rules)形式并带有加权因子实施的，构成一种知识网络形式和该工艺过程变量的模糊成员函数。在模糊逻辑应用结构中不需要任何复杂的数学关系。这一途径在复杂、多变量的挤压系统这种场合比经典方法具有潜在优势。关于模糊逻辑在挤压熟化的模型建立和控制方面的应用(图 14),在 Eerikäinen 等人(1988) ,Eerikäinen and Linko(1989)和 Aarts 等人(1989)诸文献中均有讨论。应当提到，模糊逻辑在挤压控制中的实际应用尚未见报道。

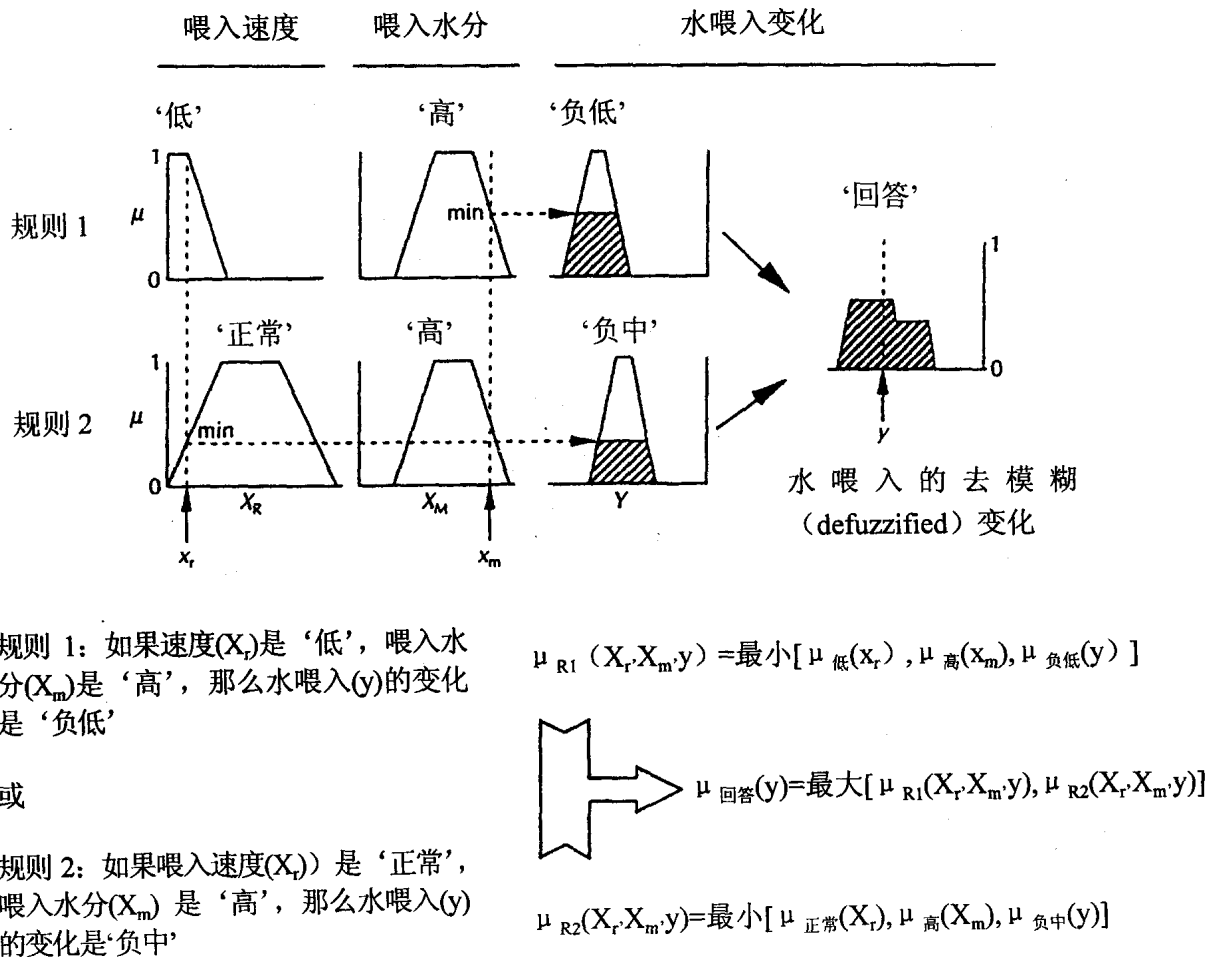
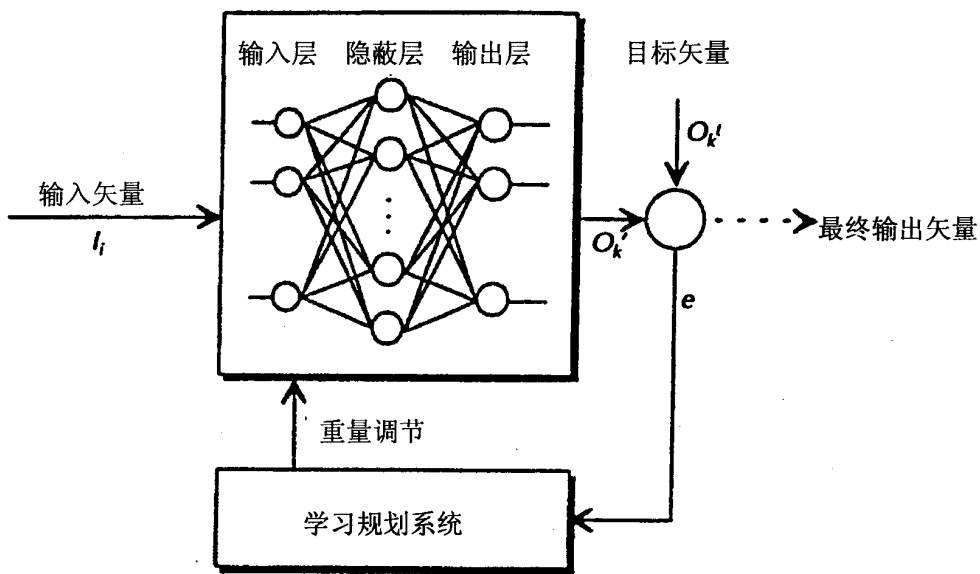


图 14 水喂入速度的模糊逻辑控制

神经网络模型是神经网络 paradigm 的缩节说明。神经网络是可以从以往经验进行学习的电脑程序(图 15)。该系统在应用模糊逻辑同时,还需要一种演绎认知能力。神经网络是真正的自适应程序,它不需要认识工艺过程参数的性质和关系。如同模糊逻辑一样,神经网络能够处理非确定性和有干扰的数据。Linko 等人(1993)用一个带输出反馈和时间推延的神经网络,对一台双螺杆挤压机生产小面包干过程,根据螺杆转速对其比机械能量输入进行动力学控制(图 16)。



- 第 1 步: 将小的初始随机值指定给所有重量 (W_1)
- 第 2 步: 从一个样品数据选择一个尺度化单元的输入矢量 (I_i), 呈现于输入层
- 第 3 步: 输入值传递给隐蔽层, 隐蔽层的每个神经元计算输入值的称量总和
- 第 4 步: 隐蔽层的输出值 (O_i) 计算如下:

$$O_i = f\left(\sum_j W_{ij} I_j + \theta_i\right)$$

其中 $1 \leq j \leq M$ 并且

- 第 5 步: 输出层的输出值 (O_k') 计算如下:

$$O_k' = f\left(\sum_i W_{ik} O_i + \theta_k\right)$$

其中 $1 \leq k \leq N$; θ_k 而 ' θ_k ' 是中间偏移, f 是 $f(x) = (1 + e^{-x})^{-1}$ 型的一个 S 形非线性转换函数

第 6 步: 然后获得真实输出 (O_k') 与希望 (目标) 输出 (O_k^t) 之间的偏差 (e), 产生输出层和隐蔽层中的重量调节 ('重量') 的误差因子用最小均方原理计算。

- 第 7 步: 重量矩阵被所采用的学习规则不断更新

第 8 步: 第二次相互作用周期在第 2 步开始; 或者在预测互相作用数目之后, 或者在达到一定偏差之后停止。

图 15 多层“神经”网络的回反扩展学习程序

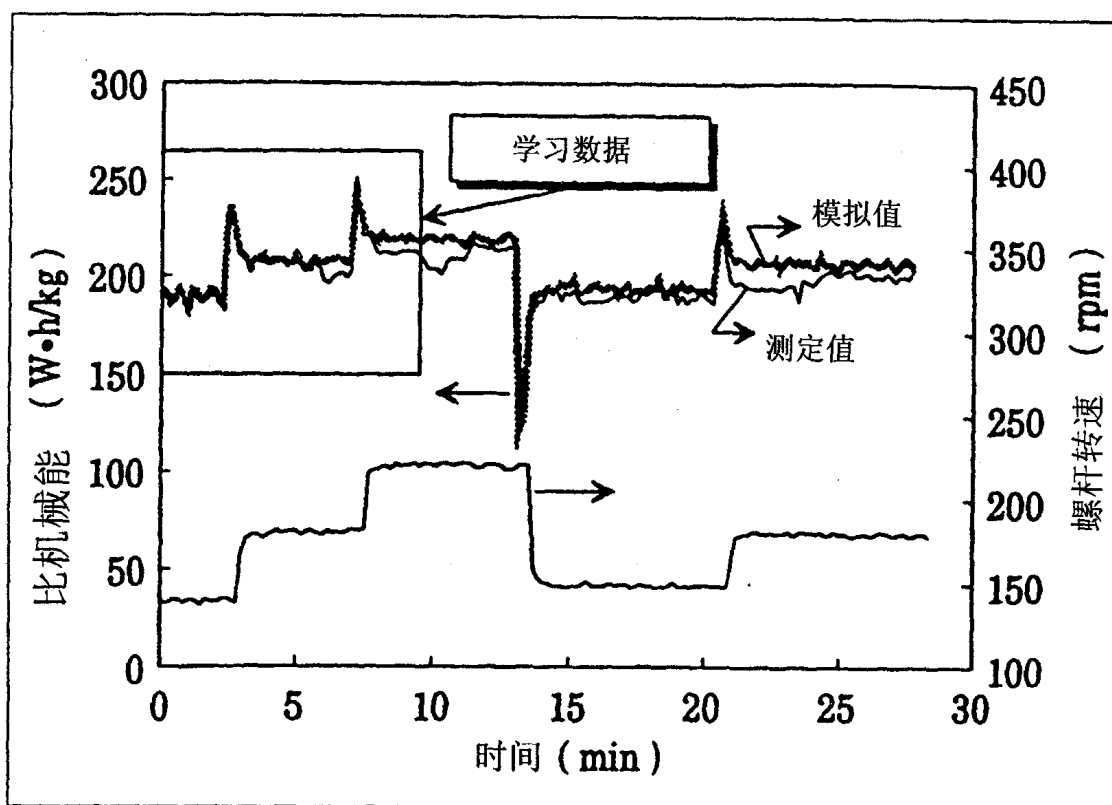


图 16 根据螺杆转速及其时间推移得出的比机械能的动力学“神经”控制

挤压工艺过程的动力学

任何一种控制构思都必须基于对所要控制的工艺过程的了解(Mulvaney and Heish, 1988)。在挤压机作业过程中，各种独立的操作变量，通常有喂料速度、喂入水分，螺杆转速和机膛温度，都保持在前面提到过的平稳状态工艺过程设定点。但是，启动、对设定点的任何改变、对输入干扰的反应以及停车等操作，全部包含动力学过程。因此，除明显需要的闭合工艺过程控制之外，考察挤压工艺加工的动力学也很重要，以使用人工操作或半自动操作都能实现可重复的工艺过程。

一、螺杆转速变化的影响

图 17 表示将螺杆转速从 150rpm 增加到 250rpm 对电机扭矩、压模压力和产品温度的动力学反应(Lu 等人, 1993)。在恒定的喂料速度下提高螺杆转速会降低机膛中物料填满的程度，因为后者取决于喂料速度和螺杆转速(Della Valle 等人，

1987)。在加快螺杆转速时，扭矩和压模压力先是增加，这表示电机传动正在克服螺杆轴的惯性和输出值的瞬时增值。随后，扭矩和压模压力均迅速下降，这是因为螺杆转速提高而导致的机腔内物料充满程度急剧下降所致。在喂料速度恒定的条件下，比机械能投入随螺杆转速提高而增加。因此，产品(物料)温度也随之上升。扭矩和压模压力大体上是可以即时测定的。温度的测定则包含着流动的受热塑性物料和热电偶温度计之间的动态平衡，热电偶温度计测定的时间常数比压力传感器稍大。因此，产品温度本身反应慢，是一个过度衰减(overdamped)的二次函数系统。

电机扭矩和压模压力反应在这类条件下是高度相关的，而产品温度与压模压力和电机扭矩成反相关。Kulshreshtha and Zaror(1992)也报道过与此十分近似的扭矩和压模压力反应。

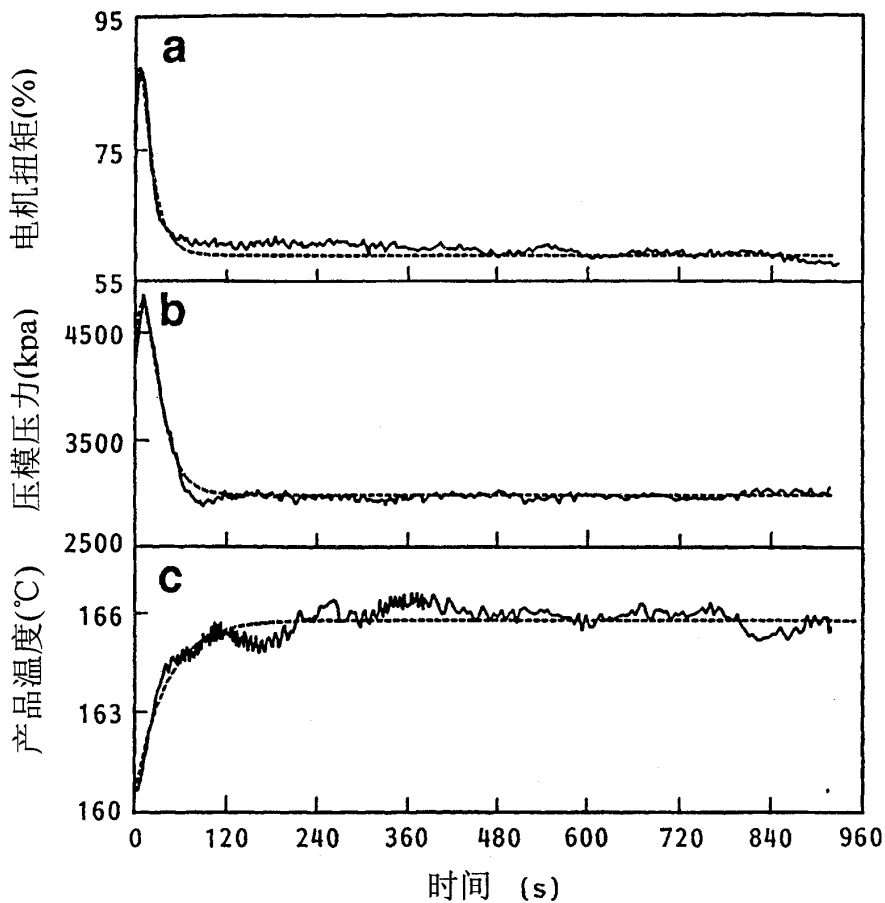


图 17 电机扭矩、压模压力和产品温度对螺杆转速逐级变化 (150rpm-250rpm)的实验和模型化动力学反应

二、喂入水分变化的影响

电机扭矩、压模压力和产品温度在含水量从 16% 逐级变到 18% 时的动力学反应如图 18 所示(Lu 等人, 1993)。电机扭矩和压模压力与含水量变化毫无相关, 螺杆转速的情况也是如此。含水量的少量增加会使扭矩、比机械能和产品温度显著下降, 而对压模压力的影响相对极小。这与 Kulshreshtha and Zaror(1992)观察的情况不同, 他们报道说压模压力随喂入水分的增加而下降。压模压力与塑性体粘度密切相关。增加含水量会迅速降低粘度和所看到的最初的压模压力下降。由于比机械能输入减少, 产品温度则会逐渐下降, 最终导致粘度再次上升。于是, 压模压力在最初下降之后逐渐恢复。这与 Lu 等人(1993)的研究相似, 即喂入水分和产品温度对粘度的影响彼此抵销而使压模压力的变化相对很小。压模压力和产品温度二者反应均比含水量的逐级变化要迟缓 30~60 秒。由于挤压物在挤压机中的滞留时间变动于 35~85 秒之间, 这种反应延缓, 看来是由挤压过程中的物料滞留所致。电机扭矩看不到时间延迟情况, 这表明机膛内的塑性体粘度随着水分改变立即起了变化。控制系统应当把这些情况都考虑进去。

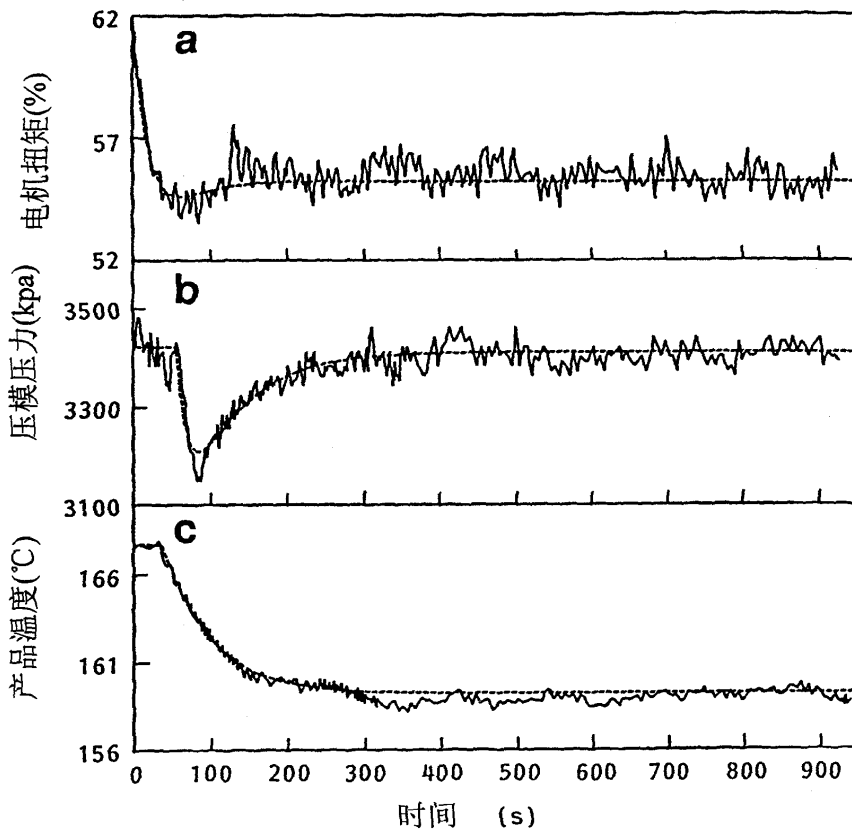


图 18 电机扭矩、压模压力和产品温度对喂入水分逐级变化(16%-18%)的实验和模型化动力学反应

三、喂料速度变化的影响

图 19 表示，喂料速度从 40.86kg/h 加大到 49.94kg/h，使得电机扭矩和压模压力迅速上升，并使产品温度缓慢下降(Lu 等人,1993)。Kulshreshtha and Zaror(1992)也报道过同样结果。喂料速度变化对压模压力和扭矩的影响，与螺杆转速变化的影响在这一点上是相同的，即这两种效应看来是高度相关的。电机扭矩和压模压力都建立了逆反应动力学模型。而产品温度也建立了模型，作为过度衰减二次函数系统。

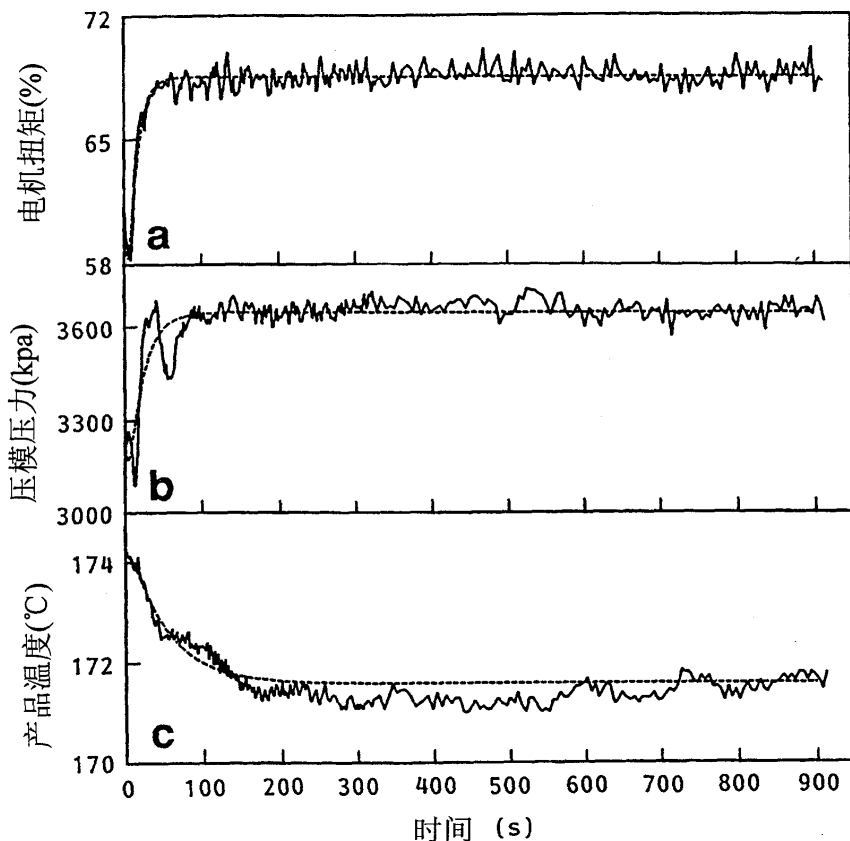


图 19 电机扭矩、压模压力和产品温度对喂料速度逐级变化 (40.86kg/h-49.94kg/h) 实验和模型化动力学模型

在保持恒定的螺杆转速的情况下加大喂料速度会增加挤压机机镗的充满程度 (Della Valle 等人, 1987)，这会相继提高电机扭矩和压模压力。另一方面，比机械能输入随喂料速度加大而下降。于是产品温度降低。从输入/输出观点来看，可以说，喂料速度变化的影响与螺杆速度变化的影响恰恰相反。与含水量变化相比，加大喂料速度与提高物料水分均降低产品温度，但加大喂料速度还提高电机扭矩 (图 17 和 19)。

四、机镗温度变化的影响

与其他三种输入值不同，机镗温度设定点的变化包含着输入本身的一个动力学变化。换句话说，机镗的发热或冷却都是动态的，并反映在工艺过程输出值中。因此，从工艺过程的每个输出值都能看到，机镗温度变化的时间常数较大。

图 20(Lu 等人, 1993)所示为电机扭矩和压模压力以相反的反应作为动力学系统而建立的模型，看来是有同样动力学反应的相关变量。产品温度对其新的平衡值反应缓慢，并作为一种过度衰减的二次函数反应建立了模型。电机扭矩和压模压力反应在引入输入值 3 分钟后明显下降，而测量的产品温度只略微上升。这可能是热电偶动力学的结果，或是反映这样一个事实，即局部粘度下降所致的机镗表面摩擦降低对挤压机作业具有实质性的影响，与产品温度无关。

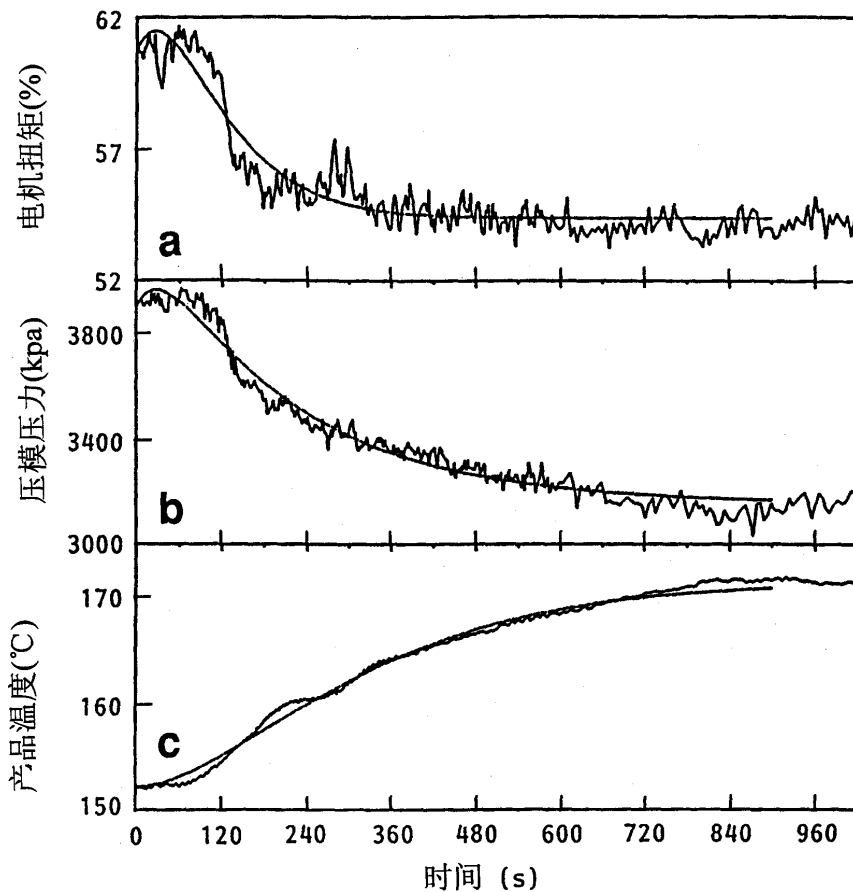


图 20 电机扭矩、压模压力和产品温度对机镗设定点温度逐级变化 (101.1 — 141.1) 的实验和模型化动力学反应

(刘瑞征 翻译)

参 考 文 献

- Aarts, R.J., Seppälä, L., Eerikinen, T., and Linko, P. 1989. A real-time expert system in extrusion cooker control. In: *Engineering and Food. Vol.1. Physical Properties and Process Control.* W.E.L. Spiess and H.Schubert, (Eds.), Elsevier Applied Sci., New York.
- Cayot, N., Bounie, D. and Baussart, H. 1995. Dynamic modeling for a twin screw food extruder: Analysis of the dynamic behavior through process variables. *J. Food Eng.* 25:245-260.
- Chang, Z. and Tan, J. 1993a. Determination of model structure for twin-screw food extrusion, Part I: multi-loop. *Trans. IChemE., Part C.* 71:11-19.
- Chang, Z. and Tan, J. 1993a. Determination of model structure for twin-screw food extrusion, Part II: multi-variable. *Trans. IChemE., Part C.* 71:20-26.
- Della Valle, G., Tayeb, J., and Melcion, J.P. 1987. Relationship of extrusion variables with pressure and temperature during twin screw extrusion cooking of starch. *J. Food Eng.* 6:423-444.
- Eerikinen, T., Linko, S. and Linko, P. 1988. The potential of fuzzy logic in optimization and control: Fuzzy reasoning in extrusion cooker control. In: *Automatic Control and Optimization of Food Processes.* M. Renard and J.J. Bimbenet, (Eds.), Elsevier Applied Sci., New York.
- Eerikinen, T. and Linko, P. 1989. Extrusion cooking modeling: Control and optimization. In: *Extrusion Cooking.* C. Mercier, P. Linko and J.M. Harper, (Eds.), AACC, St. Paul, MN.
- Ferdinand, J.M., Holley, M.L., Prescott, E.H.A., Richmond, P. and Smith, A.C. 1988. Modeling and optimization of the extrusion cooking process. In: *Automatic Control and Optimization of Food Processes.* M. Renard and J.J. Bimbenet, (Eds.), Elsevier Applied Sci., New York.
- Green, D.A. 1984. The use of microprocessors for control and instrumentation in the food industry. In: *Engineering and Food. Vol. 2. Process Applications.* B.M. McKenna, (Ed.), Elsevier Applied Sci., New York.
- Harper, J.M. *Extrusion of Foods, Vol. I de II,* CRC Press, Boca Raton, FL, 1981.
- Hauck, B.W. 1981. Control of process variables in extrusion cooking. *Cereal Foods World.* 26:170-173.
- Kulshreshtha, M.K., Zaror, C.A., Jukes, D.J., and Pyle, D.L. 1991. A generalized steady model for twin screw extruders. *Trans. IChemE., Part C.* 69:189-199.
- Kulshreshtha, M.K. and Zaror, C.A. 1992. An unsteady state model for twin screw extruders. *Trans. IChemE., Part C.* 70:21-28.
- Levine, L., Symes, S. and Weimer, J. 1987a. A simulation of the effects of formula variations on the transient output of single screw food extruders. *Biotechnol. Progress.* 3:212-220.

- Levine, L., Symes, S. and Weimer, J. 1987a. A simulation of the effects of formula and feed rate variations on the transient output of single screw food extruders. *Biotechnol. Progress.* 3:221-230.
- Levine, L. and Symes, S. 1992. Some aspects of the instabilities of food extruders. In: *Food Extrusion Science and Technology*. J. L. Kokini, Chi-Tang Ho, and M.V. Karwe, (Eds.), Marcel Dekker. New York.
- Linko, P., Uemura, K, Zhu, Y.H. and Eerikinen, T. 1993. Application of neural network models in fuzzy extrusion control. *Trans. IChemE.* 70C:131-137.
- Lu, Q., Mulvaney, S.J., Hsieh, F. and Huff, H.E. 1993. Model and strategies for computer control of a twin-screw extruder. *Food Control.* 4:25-33.
- Mulvaney, S.J. and Hsieh, F. 1988. Process control for extrusion processing. *Cereal Foods World.* 33:971-976.
- Nejman, N., Shakourzadeh, K. and Bouvier, J. and Martin, T. 1992. State reproducibility and relative gain analysis in twin-screw extrusion cooking. In: *Food Extrusion Science and Technology*. J. L. Kokini, Chi-Tang Ho, and M.V. Karwe, (Eds.), Marcel Dekker, New York.
- Roberts, S.A. and Guy, R.C.E. 1986. Instabilities in an extrusion cooker: a simple model. *J. Food Eng.* 5:7-30.
- Roberts, S.A. and Guy, R.C.E. 1987. Metastable states in a food extrusion cooker. *J. Food Eng.* 6:103-112.
- Seibel, W., Nestl, B. and Sielemann, O. 1989. Extrusion cooking controlled by personal computer - Process optimization, flow characteristics, residence time. In: *Engineering and Food*. Vol. 1. Physical Properties and Process Control. W.E.L. Spiess and H. Schubert, (Eds.), Elsevier Applied Sci., New York.
- Singh, B. and Mulvaney, S.J. 1994. Modeling and process control of twin-screw cooking food extruders. *J. Food Eng.* 23:403-428.
- Sperber, R.M. 1991. Fuzzy logic. *Food Processing.* 52(10):72-76.
- Stults, B. 1978. Food process instrumentation and control. *Food Technol.* 32(3):22-25.
- Tan, J., Gao, X. and Hsieh, F. 1994. Extrudate characterization by image processing. *J. Food Sci.* 59:1247-1250.
- Tan, J., Chang, Z. and Hsieh, F. 1996. Implementation of an automated real-time statistical process controller. *J. Food Process Eng.* 19:49-61.
- Wiedmann, W. and Strecker, J. 1988. Process control of cooker-extruders. In: *Automatic Control and Optimization of Food Processes*. M. Renard and J.J. Bimbenet, (Eds.), Elsevier Applied Sci., New York.