

一类不确定性系统的多目标智能控制

蒋 健

(北京理工大学化工与材料学院, 100081)

摘要: 针对一种不确定性非线性过程且其控制需要较多人为判断的控制系统, 作者提出了采用各个不同位置温度测量值的加权平均作为控制器的反馈输入, 该控制器则兼有变参数 PID 调节器和实时专家系统的优点, 并可根据实际的进程和效果, 采用在线调整工艺设定值的多目标控制策略, 其效能通过实际运行结果加以说明。

关键词: 变结构; 加权; 模糊控制; 热压罐; 专家系统; 不确定性; 多目标

1 概 述

现代控制理论在受控对象的数学模型已知或可准确辨识的领域得到了广泛的成功应用。然而当系统存在结构未知或系统参数波动很大等不确定因素时, 以及控制目标有多个且相对重要性不固定因而需要较多的人为判断时, 现代控制理论的优势就不复存在了。这也是目前许多计算机过程控制系统的实际控制效果尚不如熟练的操作工的主要原因之一。

近些年来, 模糊化智能控制得到很大发展, 这为解决复杂的、难以建模的对象的控制提供了一种有力的工具。模糊化智能控制是以知识模型为基础, 既能利用现有的控制理论, 亦可归纳人的知识、经验和推理逻辑, 是根据受控对象的特征信息, 诸如纯滞后时间、误差及其变化率、控制的敛散性等进行决策, 并可通过对多个控制目标进行综合评判来实施控制。

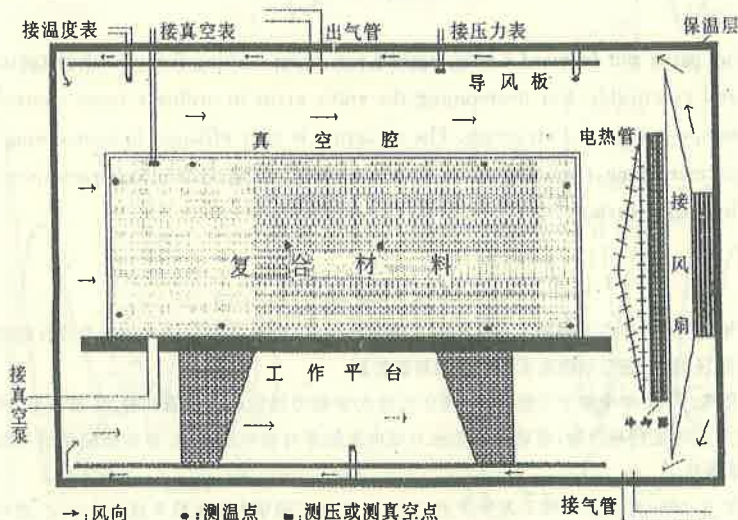


图1 热压罐的基本结构

热压罐是用于复合材料固化生产的一种通用的加热、加压和保持真空的设备,其基本结构示于图 1。固化时,涂胶装配好的复合材料制件连同夹具一起密封在热压罐内的活动平台上并通过其上的真空嘴与真空泵相接。制件与罐内气体被密封囊隔开,以便在罐内充气时向制件胶缝施压。某些复合材料制件的固化过程应遵循形如图 2 所示的温度、时间和压力的标准规范,在一定的温度条件下,加压开始的时间对于复合材料制件质量的影响很大,加压过早或过晚均使复合材料中孔隙率增大,强度下降。

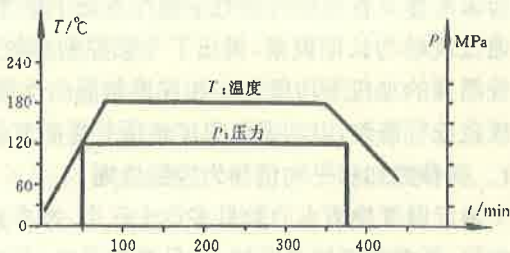


图 2 固化工艺的温度、时间和压力的标准规范

允许固化的复合材料制件可高达 $5 \times 1.8 \times 0.5 \text{ m}^3$,有的是多层结构,但大功率电热管以及冷却器都位于罐尾,靠强力鼓风实现热量循环,并加热复合材料。受热物质还包括罐壳、活动平台、保温层、模夹具以及罐体的热散失,除了测量气温的三个热电偶分别固定于罐体的前、中和后部外,其余的十个测量复合材料的热电偶均是根据复合材料的类型和形状以及固化工艺随机埋设的,而复合材料的种类繁多,且相当多的固化工艺仍处于试验阶段,因此各处的控制滞后也不相同,这为限制各处温度的极差于一定值内带来了很大困难,充压开始的时间也难以掌握。因为温度受控对象是一个单输入十余个输出的非线性时变系统,且具有明显的分布参数特性;另外罐内充、放气会影响罐内气温,升、降温也会改变气压值,所以说这是一个多回路调节且各调节回路之间存在耦合作用的复杂系统。

具体的温度控制目标如下:

- 按规定的速率进行升温 and 降温;
- 保温阶段的控制允差 $\pm 2^\circ\text{C}$;
- 从升温阶段到保温阶段应实现平稳过渡,严禁超调;
- 复合材料各处的最大温差应始终限制在一定范围;
- 罐内气温不得超过 250°C ,防止用于机械轴封的机油在一定压力下起火;
- 节约水电。

2 控制方案

温度对象一般是用一个或两个惯性环节加纯滞后环节来描述的,即

$$G(s) = Ke^{-\tau}/(1 + sT_1)(1 + sT_2).$$

从控制角度来看,上式描述的只是某个测温点附近小区域的平均温度的动态特性,并不总能代表整个对象的温度场。事实上,对于热压罐来说,复合材料各温度检测点处的时间常数和纯滞后时间与具体的安放位置以及该处的风向有关。从传热的三种基本形式来看,在不同的温区导热、对流和辐射在总传热量中所占的比例是不同的,由于辐射热量是绝对温度的四次方函数,故随温度的升高,纯滞后会减小。

通常,系统操作人员的控制策略及某个目标所赋予的重要性是处于动态变化中的,而且有时这些目标是相互冲突的,关键阶段只能保证重点目标的实现。例如充压开始时刻复合材料的温度场必须较为均匀;当气温超过 230°C 时必须降温;当材料温度接近设定的最终的保温值时必须小心谨慎以免超调;……

由于温度对象具有明显的分布参数和纯滞后特征,且控制目标多元化,有时相互冲突,因而采用建立在受控对象数学模型基础上的常规控制器无法获得良好的控制效果.为此我们通过现场的长期摸索,提出了专家控制系统+变参数 PID 的多结构控制器方案,以罐内各处温度的加权平均值作为相应控制器的反馈输入,并可根据固化的实际进程对原有的固化规范进行修改,以避免温度超调并提高复合材料温度场的均匀性.

2.1 多参数加权平均值作为控制依据

由于温度检测点的数目多达十三个,考虑到参数的分布性,不宜只取一点的温度作为受控参数.虽然空气的热容较小,且直接受热,其温度较易控制,但固化工艺的温度规范是针对复合材料制件区制定的.若是温度过低时就加压会使树脂流失过多,低分子物挥发不充分,致使孔隙率增大,若是温度超过凝胶点时才加压则树脂已接近凝固状态,即使加压也很难把树脂和材料压制成密实的整体了.故加压开始的时刻应该选择在各处的温度较为均匀且都在某一范围的时段上,因此我们在系统中取全部各点温度的某个加权平均值 T_w 作为受控参数,即控制器的反馈输入:

$$T_w = \sum W_i \times T_i, \quad i = 1, 2, \dots, 13.$$

其中 $\sum W_i = 1$.

不仅对于工件测温点根据其重要性及位置给予相应的权,而且给予空气温度一定的权,具体而言,假如空气温度总的权定为 1,那么根据复合材料工件的品种以及胶接工艺,工件温度总的权可取为 3~4,这样即可充分利用空气的过热来加热复合材料,使空气温度不会超过材料温度太多,减小控制滞后引起的工件区温度超调,同时工件区的温度与设定温度又相差无几.在图 3 所示的两个例子中,气温与工件温度的加权之比分别取为 1:3(a 图)和 1:4(b 图),它们的加权平均值与设定值相比,因而加热过程成为:电热器工作一段时间后便停止一会儿,等待强风将罐内温度场搅得尽可能均匀,此时气温虽然下降,但工件温度却在上升,然后再加热,……这期间无需人工干预,大大降低了纯滞后引起的温度超调,并改善了热压罐各处温度的均匀性.

2.2 固化规范的在线调整

通常,在机内实时时钟的管理下,温度、压力的设定值按照预先输入的工艺规范每分钟改变一次.但固化规范由工艺研究人员制定,并未考虑其可实现性,而固化的最佳效果

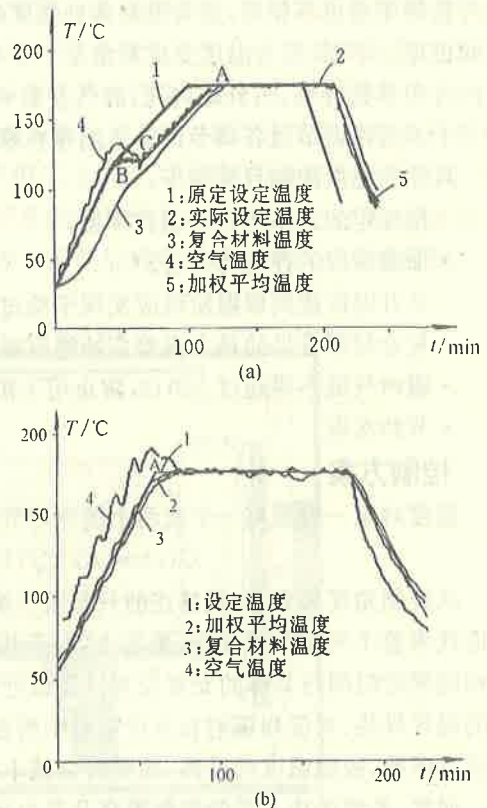


图 3 控制实例 2:

是在特定的温度和压力共同作用下以及制件区的温度场较为均匀的情况下获得的. 如前所述, 正确掌握充压开始的时刻对于保证复合材料制品的质量是至关重要的, 因此必须具备允许操作人员根据实际进程修改温度、压力工艺规程的功能.

在图 3(a)所示的例子中, 当固化进行到温度设定曲线的 B 点(原定加压点)时, 尽管加权温度 T_w 与设定曲线一直拟合得很好, 但事实上复合材料各处只有迎风侧的温度较为接近设定值, 而背风侧的温度尚相差甚远, 因此不满足开始加压的条件, 此时经程序判定后自动引入一个温度设定平台, 即保持温度设定值不变. 从曲线可以看出, 这阶段主要靠强风将罐内温度搅匀, 空气中的热量均匀地传到复合材料的各处, 该在线引入的保温段在 C 点结束, 此时开始充压, 瞬间气温突降是由冷空气大量进入引起的, 之后温度设定值仍按原定斜率继续上升.

2.3 PID+专家系统

因为设定温度曲线呈多台阶状, 在拐点处若控制不好, 温度势必过冲, 这就会影响复合材料的固化质量, 并导致能源浪费. 为此我们把 PID 同专家控制系统结合起来, 利用前者消除系统的稳态误差, 利用后者改善系统的动态特性.

1) 变速积分 PID.

温度控制的 PID 调节器具有变速积分功能, 而且为了防止给定值改变瞬间引起输出跳变, 微分是对测量值进行的, 实际的增量型算式如下:

$$\Delta U_i = K_p \{ \Delta e_i + f(K_i) \times e_i - K_d (\Delta T_{w_i} - \Delta T_{w_{i-1}}) \}.$$

式中 $e_i = T_s - T_{w_i}$, T_s 是当前温度设定值, $\Delta e_i = e_i - e_{i-1}$, $\Delta T_{w_i} = T_{w_i} - T_{w_{i-1}}$, K_p , K_i 和 K_d 是在保温段仅有 PID 作用时整定出来的可保证稳态误差小于 2°C 的一组 PID 系数, ΔU_i 是控制器开度的本次变化量.

为抑制超调, 积分系数与误差的关系选取如下:

$$f(K_i) = K_i, \quad |e_i| \leq 2^\circ\text{C},$$

$$f(K_i) = K_i/2^n, \quad 2^n^\circ\text{C} (|e_i| \leq 2^{n+1}^\circ\text{C}, n = 1, 2, 3, 4).$$

2) 专家系统.

专家系统是根据温度控制各个阶段的特点和一些成熟的操作经验来控制温度, 比如在线性升温段为避免加压时各处的温度差异过大, 实行间断加热; 为防止在线性升温阶段结束的拐点处出现超调, 当 T_w 距本阶段终止给定温度值 8°C 之内时, 就对加热器的功率进行箝位限制, 即在距拐点温度 8°C 时的电热输出功率不得超过其总功率的 80% , 在差 4°C 时不得超过 40% , 以此类推, 实现从线性升温阶段到保温段的平稳过渡; 在保温阶段, 电热输出的幅值与保温阶段的温度值以及罐内的空气压力有关, 它们大, 补充的热量就要大, 这相当于前馈调节; 在升温 and 保温阶段一般是不开冷却系统的, 即使开的话, 其阀位也控制在 5% 之内, 而且一旦温度下降(即使仍高于设定值)便关闭冷却阀; 等等. 总之, 本专家系统不仅考虑误差及其变化趋势, 引入阶段终值与当前测量值的差值以抑制温度超调, 而且还考虑了负载区温度场的均匀性.

下面是部分控制规则:

IF T_r AND $(T_{w_i} - T_s > 10^\circ\text{C})$ AND $(T_{w_i} - T_{w_{i-1}} > 0)$ THEN $C_r =$

5% ELSE $C_e = 0$;

IF T_r AND $(T_f - T_{w_i} < 8^\circ\text{C})$ THEN $H_e = (T_f - T_{w_i}) \times 10\%/^\circ\text{C}$ ELSE $H_e = H_a$;

IF T_r AND $\Delta T_{\max} > \Delta T_p$ THEN $H_e = 0$;

IF T_h THEN $H_e = (T_h/10^\circ\text{C} - 8)\%$; $T_h = 120 \sim 200^\circ\text{C}$;

IF T_h AND $(T_{w_i} - T_h > 1^\circ\text{C})$ AND $(T_{w_i} - T_{w_{i-1}} > 0)$ THEN $C_e = 5\%$ ELSE $C_e = 0$;

IF T_d THEN $C_e = C_a$;

IF T_d AND $(T_s - T_{w_i} > 10^\circ\text{C})$ AND $(T_{w_i} - T_{w_{i-1}} < 0)$ THEN $H_e = 5\%$ ELSE $H_e = 0$;

IF $H_a < H_e$ THEN $H = H_a$ ELSE $H = H_e$;

IF $C_a < C_e$ THEN $C = C_a$ ELSE $C = C_e$.

其中 T_r 表示升温阶段, $\Delta T_{\max}$ 是当前时刻复合材料各处的最大温差, ΔT_p 是容许的最大温差, T_h 表示保温阶段以及保温阶段的设定值, T_d 表示降温阶段, T_f 表示当前升温阶段的终值, H 表示真正的加热阀位开度, C 表示真正的冷却阀位开度, H_e 表示专家系统求出的加热阀位开度, C_e 表示专家系统求出的冷却阀位开度, H_a 表示 PID 调节器求出的加热阀位开度, C_a 表示 PID 调节器求出的冷却阀位开度。

从图 3 所示的两个例子中可以看出,在设定曲线的拐点 A 处实现了平稳过渡。

3 工程实现

控制系统软硬件的选取和设计是根据项目要求、输入输出通道数目以及系统应具有一定的容错功能来实施的,图 4 是系统硬件的基本配置框图。

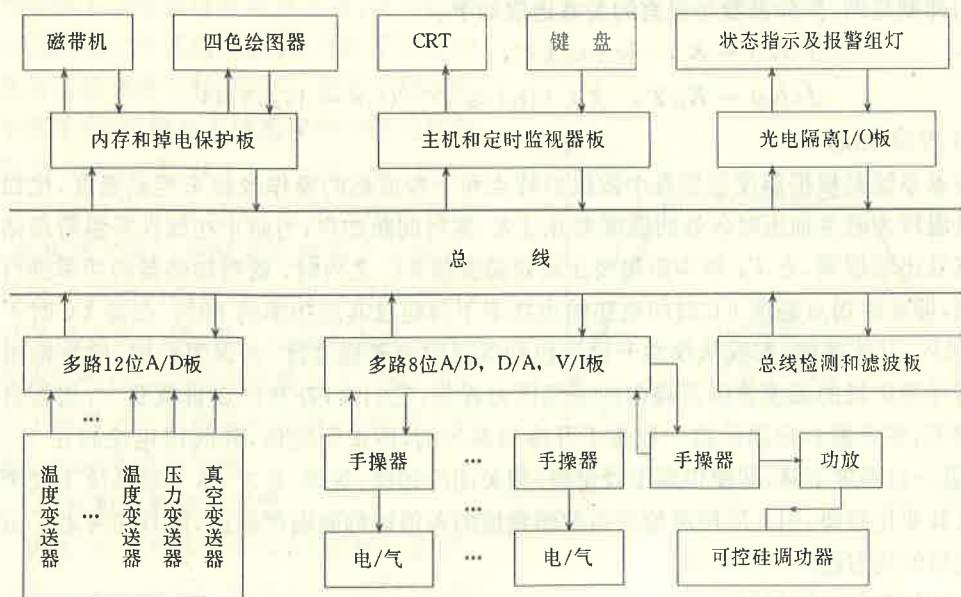


图 4 控制系统的硬件配置

系统软件采用模块化设计思想,全部采用 Z80 汇编语言编制,运行速度快,可靠性高。

4 结束语

本系统投运一年多来,温度和压力的控制精度明显提高,热压罐内复合制件区的温度场的均匀性得到显著改善,提高了复合材料产品的质量,为研究新的或改进老的固化工艺提供了强有力的技术保障。尽管负载的变化范围很大,但控制质量始终很稳定,证明本控制策略的鲁棒性极好。此外,由于采用智能控制,与原有控制方式相比还节水 20%,节电 13%,系统操作人员的工作强度大大降低。由此可见,控制目标的多元化是提高复杂过程控制质量的一条有效途径。

致谢 作者感谢张弘、张丽昌、薛锦诚和李萍等为完成本项目所做的工作。

参 考 文 献

- [1] 涂适存等四人. 用动态分析技术监控复合材料的固化过程. 航空学报, 1983, (2): 103—108
- [2] Louis, H. D. . Controller Tuning for a Slow Nonlinear Process. IEEE Control System Magazine, 1988, 4(2): 56—60
- [3] Haubold, V. B. . Fuzzy Logic: A Clear Choice for Temperature Control. Instrument & Control Systems, 1993, June, 39—41
- [4] 贺剑锋等. 模糊控制的新近发展. 控制理论与应用, 1994, 11(2): 129—136
- [5] Kwok D. P. , Wang P. & Li C. K. . A Combined Fuzzy and Classical PID Controller. Microprocessing and Microprogramming, 1991, (32): 701—708
- [6] Edwards, C. & Spurgeon, S. K. . Robust Nonlinear Control of Heating Plant. IEE Control Theory and Applications, 1994, 141(4): 227—234
- [7] Linkens, D. A. & Abbod, M. F. . Supervisory Intelligent Control Using a Fuzzy Logic Hierarchy. Trans. Inst. MC. , 1993, 15(3): 112—132
- [8] Spyros Tzafestas et al. . Incremental Fuzzy Expert PID Control. IEEE Trans. Indus. Electro. , 1990, 37(5): 365—371

Multiojective Intelligent Control of a Class of Uncertain System

JIANG Jian

(College of Chemical Engineering and Materials, Beijing Institute of Technology • Beijing, 100081, PRC)

Abstract: For an undeterministic nonlinear process control system which needs an amount of human judgement, the author presents a multiojective control strategy, that is, implementing a controller combining benefits of varying term PID with those of realtime expert system, using weighted average of all the individual temperature measurements at different positions as the controller's feedback, adjusting on-line process setpoints based on practical progresses and effects. The effectiveness of this strategy is demonstrated through practical results.

Key words: varying structure; weight; fuzzy control; outclaver; expert system; uncertainty; multiojective

本文作者简介

蒋 健 1959 年生, 工学硕士, 北京理工大学副教授, 感兴趣的研究领域为容错技术在微机测控系统中的应用和复杂对象的智能控制等, 现已在各种中、英文期刊或学术会议上发表论文 30 篇。