

基于多种控制方法的多模式控制器设计

谭飞^{1,2}, 程建¹

(1. 四川理工学院自动化与电子信息学院, 四川 自贡 643000; 2. 电子科技大学电子工程学院, 成都 610054)

摘要:文章讨论了多种控制方法以及反馈在控制中的作用,说明了反馈最重要的作用是其“监控性”;充分利用反馈中的信息是深入研究控制问题的一种方法。利用开环与闭环控制的特点及反馈的作用,设计了一种控制器结构并给出了一种可行的多模式智能控制算法,并通过仿真验证了算法的优良性能。

关键词:反馈;监控性;多模式控制;算法

中图分类号:TP271

文献标识码:A

引言

自上世纪初布莱克、奈奎斯特和波德等在控制领域做出杰出贡献来,在控制系统设计中,反馈方法使控制系统稳定和减小系统噪声及失真,从而获得了广泛的应用,到1948年 Winner《控制论》的出现,标志反馈控制理论基本形成^[1]。反馈方法不仅支配控制理论技术的发展,而且还对非控制学科的发展起到了促进作用。如反馈在经济,生物,心理等理论研究方面都起了核心作用。经济中的市场调查是明显的反馈方法应用实例。很多因果现象其实可被看作是动态的原因——效果——原因反馈环路,在工程决策系统中,反馈方法的应用实例就更多,都是为某一个已定任务,观测应用系统的输出信息,返回到输入用以设计或修正其输入,使得系统偏离被纠正,从而达到预期目标。所谓控制,就是使系统对象的一种或多种动态对象行为特征属性按拟定的轨迹运动变化的过程。实际工程应用中,反馈控制系统都是根据检测系统的输出用以改变系统的输入而完成控制功能,即通过反馈方法来完成控制。简单讲,所谓反馈控制,就是利用对象表现出来(输出)的行为特征信息数据,进行加工,从而确定实现系统期望目标所需要的对象激励(输入)的过程。可见,研究控制理论,其主要工作就是研究系统为实现某个目的该如何决策并评价,

再有就是怎样施加相应控制作用来达到这一功能,着眼于控制的目的地和能动性。常规反馈控制在理论上的成就虽然是辉煌的,但用于解决现代复杂系统不确定性和高标准性能要求就显得有些不足。其原因主要表现在理论上假设控制系统的模型是已知,且用线性定常微分方程描述;在设计思想上过分强调目的性而轻视了能动性。

本文拟从目的性与能动性并重的角度来探讨反馈控制的实质并加以应用。

1 开环的前馈控制方法

在现实被控对象环节中通常存在多个储能元件,为分析、比较方便,以下讨论采用同一双容积分被控对象特性进行讲述。设对象传递函数特性如下:

$$G_o(s) = \frac{C(s)}{U(s)} = \frac{1}{s^2} \quad (1)$$

由于实际系统通常存在控制量幅度或能量约束,并设系统中控制器的输出约束为:

$$-1 \leq u \leq 1 \quad (2)$$

系统输入信号 $R(s) = 1(t)$ 。

对表达式(1)所描述的特征,表示系统有两个储能元件,属非自衡双容被控对象。对这种系统对象采用环控制方式,考虑式(2)的约束情况下,并希望用最短的时

收稿日期:2011-09-12

基金项目:四川省人工智能重点实验室基金(2010RZ002)

作者简介:谭飞(1972-),男,重庆人,副教授,硕士生,主要从事智能控制、系统仿真方面的研究,(E-mail)tf72w@suse.edu.cn

间达到输入给定要求,使系统进行能量转移,最理想的开环控制器的传递函数算式可设计为:

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{R(s)} = 1 - 2e^{-s} + e^{-2s} \quad (3)$$

该系统的单位阶跃响应如图 1 中曲线 4。这种控制结果是在系统无干扰、无参数摄动,算式精确的情况下获得的,当然其控制效果很理想,开环控制具有主动性的优点,但由于没有反馈的监控,控制失误时没有自动修正能力。

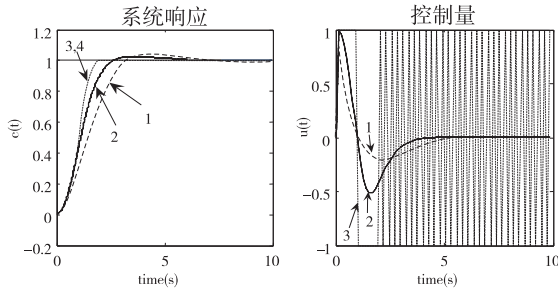


图 1 反馈控制系统结构 (PFWD)

2 常规单回路反馈控制方法

所谓反馈就是把系统的输出引入系统的输入并提炼利用返回的信息用于控制决策。反馈方法在控制领域的应用就叫反馈控制。其特征就是信息流通存在回路。常规控制中反馈控制具有重要作用:一是反馈可使开环不稳定的系统镇定,其实就是利用反馈改变了闭环系统特征方程的根,使系统全部极点为负实部;二是对付模型不确定性和不可测干扰,也就是监视系统偏离程度,并根据偏差计算产生控制作用。系统将给定目标与被控变量的差作为控制器的决策依据,计算控制作用,同时只要保证系统收敛稳定,即使存在多处不确定性,也可使被控变量与给定值基本一致即系统无差。而且,如果系统开环增益远大于 1,反馈方法还可以校正那些前向通道对象特性的非线性使整个系统输入输出线性化。这里面重要的问题是,必须保证闭环回路系统的稳定性。只有在系统稳定的情况下,才能达到控制目的,这也许是反馈系统非常重视稳定性的原因。研究稳定判别方法和改善稳定性的方法也是控制理论研究的重要内容。

在经典的常规控制理论中,用反馈控制使系统稳定简单而有效的方法是增加系统的阻尼比。常规控制系统中阻尼比在整个系统响应过程中通常保持不变。这种方式优点表现在定量分析方便,可使系统暂态响应过程的平稳性要求和稳态的稳定性要求都得到满

足。它的缺点是,被动的“反省”,即扰动已经引起了系统的偏离,也就是偏差出现了才开始修正控制作用。为保证系统稳定并有足够的稳定裕度,反馈系统的反馈是一种消极的行为,但不可缺,其在动作上的不间断“神经质”而又不够大胆,造成控制品质降低,即削弱了系统暂态响应的快速性。这也表明“快”与“稳”有矛盾,固定的阻尼不能解决这矛盾。微分控制也许能减小矛盾,但对系统的纯延迟无效,那么问题就得不到本质上的解决。

3 变阻尼的反馈控制方法

常规控制方法从本质上讲是一种线性的,固定模式的,固定阻尼比的控制方式。欲通过这种单一固定模式同时满足暂态响应平稳性、快速性要求以及稳态响应的稳定、无差的品质要求是不可能的,因为这些品质在单模式的控制中对参数的要求是矛盾的,解决办法只能在要求中寻求一个合理的折衷参数。

如果把控制信息看成是能量的转移传递,控制过程就可看成是信息能量变换转移的过程,设计系统控制器所要解决的核心问题就是提高信息能量和处理变换能力,并以最短的时间实现系统按预定规律进行能量转移。

系统结构如图 2 所示。

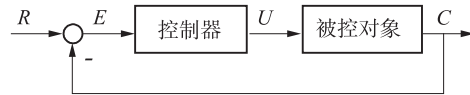


图 2 反馈控制系统结构 (PFWD)

设被控对象为式(1),控制器的输出为:

$$U(s) = k \cdot E(s) - a \cdot s \cdot C(s) \quad (4)$$

参数 k 受能量约束,只能在一定范围内取值,为分析计算方便,设参数条件 $k = \omega_n = 1$,用常规传统控制理论方法,选取 $a = \sqrt{2}$,计算阻尼比系数 $\xi = 0.707$ 。仿真计算可得到系统在这种条件下的单位阶跃响应(图 1 曲线 1)。这时系统的响应的平稳性与稳定性满足要求;但是系统的响应的快速性问题却由于 a 选 $\sqrt{2}$ 而被削弱了,具体表现为在阶跃响应的“上升”阶段,被控变量的速度明显减慢(与 $a = 0$ 系统相比),从能量的观点分析,可认为是阻尼参数 a 的存在并保持不变,阻止了系统环节间能量的快速变换转移。将 a 设计成可变系数,从而改变系统阻尼参数,在偏差 (e) 大时阻尼 (a) 小,解决暂态响应的快速性;偏差 (e) 小时阻尼 (a) 增大,解决稳态响应时的稳定性问题,这种变阻尼^[2]系数方法

削弱了阻尼对系统暂态响应速度的影响,提高了系统响应的快速性。

例如,选取变阻尼参数的算式:

$$a = b(1 - \left| \frac{e(t)}{r(t)} \right|), b = 2.2 \quad (5)$$

系统在该条件下的单位阶跃响应曲线如图1中曲线2。变阻尼的曲线与固定阻尼情形下的曲线相比,图1曲线2对给定跟踪响应的快速性有明显改善。这同时说明了线性元件连接在一起,得到的只是本质上线性的大系统,它不会发生质的变化;如果把非线性元件加入线性元件之中构成新系统,则可能得到一个崭新的事物,使系统性能得到较好改善。

4 滑模变结构的反馈控制方法

滑模变结构控制系统^[3,4]的特点是对系统小幅扰动和干扰有较强的自适应性。这种特点源于系统自身具有的两种切换模态,系统通过模态的切换时间调整即“调宽”的方法来抵御系统的不确定性,如图1控制量的曲线3前后的切换频率明显不同。只要被控系统“调宽”的宽度可由切换条件任意调整,不仅系统的自适应能力可充分展现出来,而且,系统还可以最短时间代价实现预定规律的能量转移。

仍然以式(1)为被控对象,系统结构如图2,控制器的滑模变结构控制算法为:

$$u = \begin{cases} u^+ = 1, & e + 0.5\dot{e} \geq 0 \\ u^- = -1, & e + 0.5\dot{e} < 0 \end{cases} \quad (6)$$

这时系统的仿真的单位阶跃响应如图1中曲线3所示结果,比图1曲线1和2的情况要好得多,响应特性指标评价都是最优的。但是图1控制量中的线3在系统输出跟踪上目标后频繁地以最大控制量切换,这会造成现实中系统的能源浪费,更甚者会缩短仪器的寿命,是滑模控制缺陷。

上述系统暂态响应优点明显,由于滑模继电型控制总是用最大极限控制作用,反向用 $u = u^-$ 减速制动放能,正向用 $u = u^+$ 最大能量加速储能启动,在加速储能控制过程中排除了减速控制的参与,反之亦然。就像汽车加速时驾驶员只踏油门不得踩刹车,减速制动时关闭油门再踩刹车,不能在开大油门的时候又使用刹车,这本是极普通的常识。如果将滑模控制比喻为驾驶汽车,则常规反馈控制和变阻尼反馈控制都违背了常识。

滑模变结构控制最具启发性的地方是应用了“反向控制”(放能控制),这种极富挑战性的控制策略改善了变结构控制系统的性能。所谓反向控制,与通常控制方

法不同点在于控制器的控制量 u 与控制器输入信号偏差 e 之间是反相的“负号”(对象及测量为正环节时),系统表现为正反馈特点,从而使系统具有了“强制性”减速的控制作用,这种作用使得系统暂态响应能在快速变化中平稳消失,几乎不出现超调。

5 多模式变结构反馈控制解决方案

变结构控制的最明显特点是使用 u^+ 与 u^- 最大能量控制作用的“切换”强制使系统镇定,与传统的采用固定单一模式固定阻尼的反馈控制使系统镇定的方法相比,优点在于暂态响应平稳性不考虑系统阻尼,无论偏差大小都用最大能量控制,控制作用类似于开环控制,从而使系统暂态响应快速消失。

从图1控制量3可以看到,变结构控制的抖动是应用的突出障碍,但另一方面,抖动与滑动模态切换又是孪生的,滑模变结构控制抗干扰的“完全自适应”能力产生于模态的切换,消除抖动也就消除了系统自适应能力。因此正确处理变结构控制抖动的方法是减弱而不是彻底消除。

深入分析控制本质,滑模变结构控制没有把系统的暂态和稳态区别开来。系统输出跟踪上给定后仍然把系统当暂态跟踪处理,频繁决策失误并以最大能量控制,是变结构控制的一个重大“失误”。但是这种“失误”对系统的好处在于模式的切换强制使系统镇定下来,如果硬性取消控制作用切换的高频抖动,支撑系统镇定的依赖条件就可能因此而丧失。

常规控制采用固定的阻尼控制模式使系统镇定,它既决定了暂态响应的平稳性要求,也决定了稳态响应的(内部)稳定性要求;而变结构控制参与 u^+ 与 u^- 的最强控制作用的切换使系统镇定,它也影响系统的整个时间响应的快速性。两者使用的镇定方法不同,但都没有意识到暂态要求与稳态要求是不同的,暂态要求平稳快速,问题要求稳定无差,固定模式由于参数矛盾无法办到,必须采用两种不同的控制模式分别对待暂态和问题要求,才可能获得理想的控制效果。

作者研究后认为,采用最大能量控制模式的切换完成系统暂态响应的平稳性、快速性,暂态响应很快结束;采用增加系统阻尼的办法保证系统的内部稳定性,并使控制器输出一个满足稳态需要的激励,实现稳态无差(或误差允许)。这种选择性的解决暂态和稳态要求的控制决策必然使控制方法由变结构控制的双模式向多模式控制方向发展。

用式(1)被控对象,借用变结构的算式,其控制规则

集:

①IF $|e| > \Delta$ OR $|e| \leq \Delta \cap e \cdot \dot{e} > 0$, THEN

$$u = \begin{cases} u^+ = 1, & e + 0.5 \dot{e} \geq 0 \\ u^- = -1, & e + 0.5 \dot{e} < 0 \end{cases}$$

②IF $|e| \leq \Delta \cap e \cdot \dot{e} \leq 0$, THEN $u = e + 2 \dot{e}$ (7)

式中 Δ 为一正数,此例选择 $\Delta = 0.01r = 0.01$ 。

这种控制方法的系统单位阶跃响应曲线与图 1 中的响应曲线 3 和式(6)的控制结果重合,不同点在于控制量,算法式(6)的控制量高频抖动部分在算法式(7)的情况下变为一条与时间轴重合的直线,从而削掉了大幅度高频抖动对控制设备的影响。

6 多模式控制设计方法

根据前面多种方法的分析比较,可以得出多模式控制的设计框架方法,就是运用开环控制的主动性、闭环控制的监控性、反向控制的强制性、模式切换的适应性、稳态控制的激励性等控制特征功能于控制器的设计中,实现多模式智能控制,充分应用反馈信息,集多种控制功能于一体。一种典型方法就是用正比例控制来解决系统响应快速性的要求;用负比例反向制动控制来解决响应平稳性要求;用稳态激励控制来解决系统的准确性要求。算法有正比例控制、负比例控制、智能积分^[5]控制实现三种控制模式。响应末期,系统已进入工艺规定的稳态,偏差很小,这时采用常规 PID 控制,这种控制器经历了几十年实践应用的考验,积累了丰富的实践操作的经验,在现代工业过程控制中仍占有主导地位,用它对付系统的稳态稳定和无差是可行的^[6]。同时控制模式切换方便,控制器结构如图 3 所示,并根据反馈的偏差大小及其特征信息设计的一种典型控制算法如下:

① IF $(|e| \geq a \cdot |e_m|) \cup (e \cdot \bar{e} \geq 0)$

THEN $U = k_p \cdot e + U_{i(n-1)}, \Delta U_{i(n)} = k_i \int_{t_n}^{t_{n+1}} edt$

② IF $(a \cdot |e_m| > |e| \geq b \cdot |e_m|) \cap (e \cdot \bar{e} < 0)$

THEN $U = K_n \cdot e + U_{i(n)}$

③ IF $(b \cdot |e_m| > |e| \geq 1\%) \cap (e \cdot \bar{e} < 0)$

THEN $U = U_{i(n)} = U_{i(n-1)} + \Delta U_{i(n)}$

④ IF $|e| < 1\%$ THEN $U = c_p \cdot$

$$(e + c_i \int edt + c_d \frac{de}{dt}) + U_{i(n)} \quad (8)$$

算法(8)中符号 e 为系统当前时刻的偏差,符号 e_m 为当前方向(正向或负向)绝对值最大的偏差, e_m 的计算算法表示为:

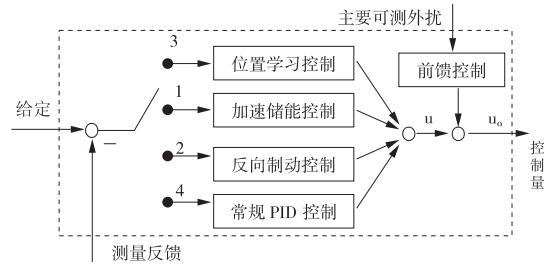


图 3 多模式控制器结构框图 (PFWD)

IF $(e \cdot e_m \geq 0 \cap |e| > |e_m|) \cup (e \cdot e_m < 0)$

THEN $e_m = e$ ELSE $e_m = e_m$

此算法可实现偏差过 0 时置 0,然后重新实时求取单方向最大绝对值偏差。

选取文献[6]中一个三阶逆不稳定对象:

$$G_p(s) = \frac{1 - 2s}{(40s + 1)(15s + 1)(10s + 1)} \quad (9)$$

用本文所述控制算法构成一个单回路计算机控制系统,采用零阶保持器,控制周期选为 0.5 秒。控制器参数设置为: $a = 0.81, b = 0.25, k_p = 8.1, k_n = -7.8, k_i = 0.078$ 。仿真结果如图 4 所示,其建立时间约为 36.3 秒($\Delta = 2\%$),超调量为 1.3%,与文献[7]所提供的 ITAE 最佳 PID 控制结果比较,建立时间提前了 63.2 秒,可见此控制方法的优良性能。通过仿真可证明,该算法削弱了噪声的影响,具有很好的系适应性和鲁棒性,且比文献[8]提供的算法适应性更好。

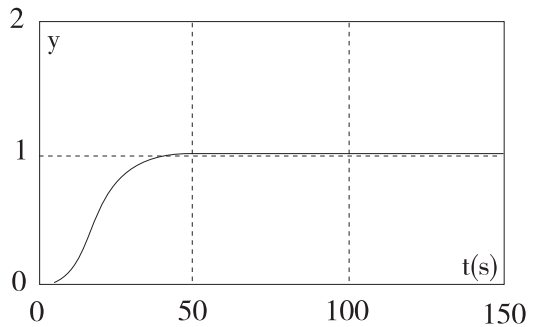


图 4 系统单位阶跃响应曲线

7 结束语

从前面的分析和应用可看到,反馈在控制中显著作用是其监控性(Supervision),“真正意义”的控制系统是反馈控制,用单一固定不变的反馈控制模式是反馈控制的一种应用,并非反馈信息的全部应用,多模态控制是反馈控制的一种更全面的的应用。因为反馈才能知道系统当前与目标间的差距,以及偏差的变化情况,避免了盲目决策,并使多模式协调配合,控制性能更加优良。

采用反馈信息来监督判断控制系统是否实现了严格的指令跟踪,实时进行模式切换,消除干扰与建模不确定性,达到控制目的。在反馈监控下,应用反馈中的定量与定性的信息,使多种控制模式(开环的控制模式,正反馈控制模式、激励控制模式等)在反馈的监督下协调工作,达到系统稳定、快速、准确的控制要求,没有反馈控制就不会有“真正意义”的控制。文献[9]是实现多模态反馈控制的另一种算法,该算法已在流程工业的过程控制中获得了成功的应用。

参考文献:

- [1] Katsuhiko Ogata. Modern Control Engineering(4th)[M], publish house of electronics industry,2007.
- [2] 章卫国.二阶系统变阻尼技术研究[J].自动化与仪器仪表,1977(4):9-11.
- [3] 解云鹏,方一鸣.关于滞后不确定系统的变结构控制与仿真[J].计算机仿真,2011,28(4):163-166.
- [4] 王丰尧.滑模变结构控制[M].北京:机械工业出版社,1995.
- [5] 傅成华,谭飞.一种新型智能积分器的设计与分析[J].四川轻化工学院学报,2004,17(1):28-32.
- [6] 吴宏鑫,沈少萍. PID 控制的应用与理论依据[J].控制工程,2003,10(1):37-42.
- [7] 李清泉,郭莉.智能 PID 调节器[J].自动化学报,1993,19(3):336-339.
- [8] 陈玉梅,谭飞.大纯滞后过程的多模式智能控制及仿真[J].自动化与仪器仪表,2009(4):2-5,20.
- [9] 谭飞,谭功全.仿人智能控制器 PPH 及其理论参数整定[J].自动化与仪器仪表,2002(1):7-10.

Design of Multi-mode Controller Based on Several Control Methods

TAN Fei^{1,2}, CHENG Jian²

- (1. School of Automation and Electronic Information, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China;
2. Institute of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: The several control methods are discussed in this paper, and the function of the feedback in control is analyzed. The most important function of feedback is supervision. How to make full use of the information coming from feedback is a good method for the control questions. One controller framework and one intelligent control algorithm are provided. The simulation shows the high performance of the control algorithm.

Key words: feedback; supervision; multi-mode control; algorithm