

文章编号: 1000-8152(2008)06-1155-03

基于动力学等价的一种通用控制器的设计

刘建民¹, 韩 璞¹, 开平安², 刘吉臻¹, 曹文亮³

(1. 华北电力大学 自动化系, 河北 保定 071003; 2. 中国科学院 能源研究所, 北京 100046;
3. 国电电力发展股份有限公司, 北京 100034)

摘要: 在动力学运动方程的基础上, 构建了一种系统状态观测器, 该观测器能够精确估计被控对象的位置、速度和加速度而无需知道其数学模型. 在此基础上, 设计了一种通用控制器, 该控制器通过系统运动的位置、速度和加速度的负反馈作用, 把原被控对象的输出轨迹引导到期望的系统输出轨迹, 能提高系统的控制品质和鲁棒性能. 分析了PID控制器、内模控制器、状态控制器、预测控制器和鲁棒控制器的算法特性, 指出这些控制器与所设计的通用控制器在动力学意义上具有等价性.

关键词: 动力学; 状态观测器; 通用控制器; 控制器的等价性
中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Design of a general controller based on dynamics identity

LIU Jian-min¹, HAN Pu¹, KAI Ping-an², LIU Ji-zhen¹, CAO Wen-liang³

(1. Department of Automation, North China Electric Power University, Baoding Hebei 071003, China;
2. Energy Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100046, China;
3. GD Power development Company Ltd, Beijing 100034, China)

Abstract: A state observer based on dynamics is constructed; the state observer perfectly estimates the position, velocity and acceleration of controlled plant without a controlled plant model. A general controller is designed; the controller can improve the performance and quality of the control system. The plant output is controlled to follow the desired output by using feedback control of position, velocity and acceleration. The authors consider that PID controller, state feedback controller, robust controller, inner model controller and GPC/MPC controller are identical in the transfer function and dynamics, that is to say, the controllers in dynamics have identity each other.

Key words: dynamics; state observer; general controller; identity of controller

1 基于动力学运动方程的状态观测器(State observer based on the dynamics equations)

在大部分现代工业过程控制系统中, 物体运动可以应用动力学运动方程来描述, 根据测量到的系统信息对系统状态进行估计, 构建动力学运动状态观测器^[1,2]. 在动力学中, 当加速度是常数时, 物体运动方程为

$$\begin{cases} \vec{S} = \vec{S}_0 + \vec{V}_0 t + 0.5 a t^2, \\ \vec{V} = \vec{V}_0 + a t, \\ \vec{S}'' = \vec{a}. \end{cases} \quad (1)$$

其中 \vec{S} , \vec{V} , \vec{a} 分别是位置、速度和加速度.

设控制系统的状态空间表示是

$$x_1' = x_2, \quad (2a)$$

$$x_1'' = x_3, \quad (2b)$$

\vdots

$$x^{(n)} = f(x, x', \dots, x^{(n-1)}) + k_0 u, \quad (2c)$$

$$y = x_1. \quad (2d)$$

其中 $f(x, x', \dots, x^{(n-1)})$ 是未知的线性或非线性函数.

假设 $z(1), z(2), \dots, z(k)$ 是系统(2)输出 y 的 k 个量测数据, 采样时间为 t_s , 量测方程为

$$\begin{cases} z(k) = y(k) + v(k), \\ E[v(k)] = 0, E[v^2(k)] = r_2. \end{cases} \quad (3)$$

$v(k)$ 是白噪声序列, 通过量测数据 $z(1), z(2), \dots, z(k)$, 对系统输出 $y(k)$ 进行滤波估计. 当 t_s 很小时, 可以认为 $y(k)$ 是匀加速运动物体(系统)的轨迹(式(1)),

对 $y(k)$ 作如下估计:

$$\begin{cases} \hat{y}(k) = \hat{y}(k-1) + t_s \hat{y}'(k-1) + 0.5t_s^2 \hat{y}''(k-1), \\ \hat{y}'(k) = \hat{y}'(k-1) + t_s \hat{y}''(k-1), \\ \hat{y}''(k) = \hat{y}''(k-1). \end{cases} \quad (4)$$

其中 $\hat{y}(k)$, $\hat{y}'(k-1)$ 和 $\hat{y}''(k-1)$ 分别是对 k 时刻系统输出 $y(k)$ 的位置、速度和加速度的估计.

$$\text{令 } x(k) = \begin{bmatrix} \hat{y}(k) \\ \hat{y}'(k) \\ \hat{y}''(k) \end{bmatrix}, \quad \varphi = \begin{bmatrix} 1 & t_s & t_s^2/2 \\ 0 & 1 & t_s \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

式(4)可以写成

$$x(k) = \varphi x(k-1). \quad (5)$$

为提高其近似精度, 对 $\hat{y}''(k)$ 引入测量误差补偿(加以随机干扰), 上面的动态方程为

$$x(k) = \varphi x(k-1) + \Gamma w(k-1), \quad (6)$$

$$\Gamma = [0 \ 0 \ 1]^T, \quad E[w(k)] = 0, \quad E[w^2(k)] = r_1.$$

将量测方程(3)改写为

$$z(k) = cx(k) + v(k), \quad c = [1 \ 0 \ 0]. \quad (7)$$

根据方程(2c), 加入控制量 u , 就得到一个简单的时不变系统模型, 可以应用卡尔曼滤波器公式^[1]对其进行滤波处理, 得下面的滤波器方程:

$$\begin{cases} \hat{y}(k) = \hat{y}(k-1) + t_s \hat{y}'(k-1) + \\ \quad 0.5t_s^2 \hat{y}''(k-1) + \alpha(z(k) - \hat{y}(k)), \\ \hat{y}'(k) = \hat{y}'(k-1) + t_s \hat{y}''(k-1) + \\ \quad \beta(z(k) - \hat{y} + \theta u(k)), \\ \hat{y}''(k) = \hat{y}''(k-1) + \gamma(z(k) - \hat{y}(k)). \end{cases} \quad (8)$$

式(8)就是基于动力学运动方程构建的系统状态观测器离散形式. 通过 $e^{At} \approx I + At$ 把式(8)转化为连续形式的状态观测器:

$$\begin{cases} \hat{y}_1' = \hat{y}_2 + 0.5t_s \hat{y}_3 + \alpha(z - \hat{y}), \\ \hat{y}_2' = \hat{y}_3 + \beta(z - \hat{y}) + \theta u, \\ \hat{y}_3' = \gamma(z - \hat{y}). \end{cases} \quad (9)$$

其中: $\hat{y}_1 = \hat{y}$, $\hat{y}_2 = \hat{y}'$, $\hat{y}_3 = \hat{y}''$, t_s 为采样时间, u 是控制输入, θ 是最优化控制系统选择的参数.

适当的选择滤波器参数 $\alpha, \beta, \gamma, \theta$ 就可以应用 $\hat{y}_1, \hat{y}_2, \hat{y}_3$ 来估计式(2)表示的系统的位置 y 、速度 y' 和加速度 y'' , 而无需知道系统的数学模型.

应用观测器(9)进行仿真验证, 2阶系统传递函数 $G(s) = 1/(60s^2 + 15s + 1)$, 仿真周期 $t_s = 0.2$ s.

图1是2阶系统(实线)和观测器输出(虚线)的位置、速度和加速度曲线的比较, 可以看出, 实线与虚线几乎重合, 基于动力学运动方程构建的系统状态观测器能够很精确的估计2阶系统.

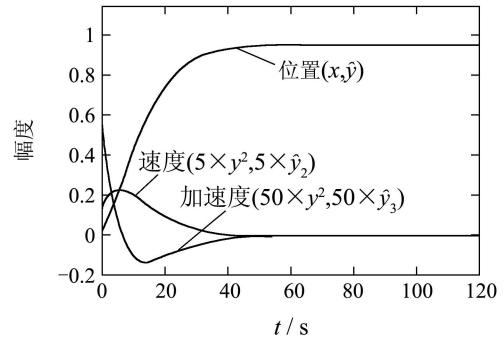


图1 系统输出(实线)和观测器输出(虚线)比较

Fig. 1 Comparing system output with observer

2 2阶系统的通用控制器设计(General controller design of second order system)

设被控对象是一个稳定的时不变2阶系统:

$$G(s) = k_0/(as^2 + bs + 1). \quad (10)$$

基于上面的动力学运动特性, 对于一个稳定的时不变2阶系统(10), 可以设计一个通用控制器 $G_c(s)$:

$$G_c(s) = \frac{k(m_1s^2 + m_2s + m_3)}{(n_1s^2 + n_2s + n_3)}. \quad (11)$$

得到(或者逼近)期望的闭环系统:

$$H(s) = 1/(cs^2 + n_2s + n_3). \quad (12)$$

其中: $c = 1/w^2$, $d = 2\xi/w$, 取 $\xi = 0.75 \sim 1$;

系统的开环传递函数是

$$Q(s) = \frac{kk_0m_3(m_1s^2/m_3 + m_2s/m_3 + 1)}{(n_1s^2 + n_2s + n_3)(as^2 + bs + 1)}. \quad (13)$$

一种简单的计算方法是: 取

$$k_0m_3 = 1, \quad m_1/m_3 = a, \quad m_2/m_3 = b,$$

$$Q(s) = k/(n_1s^2 + n_2s + n_3).$$

系统的闭环传递函数是

$$H(s) = \frac{k/(k + n_3)}{(n_1s^2/(k + n_3) + n_2s/(k + n_3) + 1)}. \quad (14)$$

结合式(13), 并且比较式(14)和(12), 很容易求解式(11)中的 $k, m_1, m_2, m_3, n_1, n_2, n_3$ 的值. 式(14)中的 $k/(k + n_3)$ 表示系统的静态稳定值. 当 $n_3 = 0$ 时, 系统是无静差的.

式(11)表示的通用控制 $G_c(s)$ 的动力学意义是: 通过系统的运动位置 m_3 , 速度 m_2s 和加速度 m_1s^2 的负反馈作用, 把被控对象(11)的输出轨迹引导和控制到期望的闭环系统(12)的输出轨迹. 当被控对象的传递函数是一个稳定的时不变一阶系统或者2阶系统的阻尼系数 $\xi > 0.8$ 时, 加速度 m_1s^2 的负反馈作用可以取消, 当阻尼系数 $\xi < 0.8$ 时, 或者2阶对象是不确定系统时, 加速度 m_1s^2 的负反馈作用是非常重要的, 它能够提高系统的品质和鲁棒性. 应用通

常的单位负反馈控制系统对通用控制器 $G_c(s)$ 进行仿真, $t_s = 0.1$, 给定值是单位阶跃信号, 被控对象为 $G_c(s) = 1.6/(0.2066s^2 + 0.3636s + 1)$; 配置期望的闭环系统为 $H(s) = 1/(0.0341s^2 + 0.3692s + 1)$; 通用控制器 $G_c(s)$ 的参数是

$$n_1 = 17.0755, n_2 = 184.9846, n_3 = 1, k = 500, \\ m_1 = 0.1291, m_2 = 0.2273, m_3 = 0.6250.$$

闭环系统输出的稳态值为 $k/(k + n_3) = 0.9980$, 静差为0.2%. 图2是系统仿真的结果, 图中的实线和虚线分别是闭环系统和被控对象(开环)对单位阶跃输入的响应曲线.

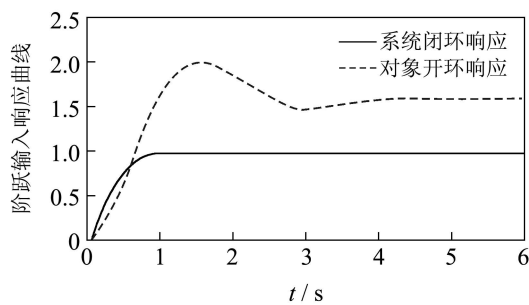


图2 通用控制器系统仿真结果

Fig. 2 Simulation result of general controller

3 控制器的动力学等价性分析(Identity of controller in dynamics)

3.1 PID控制器(PID controller)

PID控制器的传递函数是

$$\text{PID} = (K_p + 1/T_i s + K_d s / (T_d s + 1)) = \\ (m_1 s + m_2 + m_3 / s) / (n_1 s + n_2). \quad (15)$$

这是通用控制器(11)中, $k = 1, n_3 = 0$ 的特例. 它没有加速度控制作用.

3.2 内模控制系统(The internal mold control system)

内模控制器结构为

$$G_c(s) = G_c^*(s)F(s).$$

其中: $G_c(s)^*(s) = 1/G_p$, G_p 是被控对象. $F(s) = 1/(Ts + 1)^2$ 是滤波器. 容易证明

$$G_c(s) = (m_2 s^2 + m_1 s + m_0) / (n_2 s^2 + n_1 s + n_0).$$

这也是一个2阶有理多项式, 它与通用控制器(11)在动力学意义上是等价的.

3.3 状态反馈、状态观测器和预测控制(State feedback controller, state observer and forecast controller)

由状态观测器(9)构建的状态反馈控制系统仿真结果和工程应用证明, 它能够改善控制系统品质. 状态反馈和预测控制器应用系统的状态量(位置 y , 速度 y' 和加速度 y'')进行控制, 具有与通用控制

器(11)等价的传递函数, 在动力学意义上与通用控制器(11)是等价的.

3.4 鲁棒控制器(Robust controller)

鲁棒控制器(H_∞ 和 μ 综合)设计结果可简化为

$$G_c(s) = k(m_1 s^2 + m_2 s + m_3) / (n_1 s^2 + n_2 s + n_3),$$

这也是一个2阶有理多项式, 它与通用控制器(11)在动力学意义上是等价的.

4 结论(Conclusions)

1) 当系统的采样时间 t_s 很小时, 基于动力学运动方程构建的系统状态观测器(8)和(9)能够精确的估计被控对象(2阶系统或者高阶系统可以近似为2阶系统)的位置、速度和加速度, 而无需知道被控对象的数学模型.

2) 说明了通用控制器的动力学意义.

3) 分析了PID、内模、状态/状态观测器和鲁棒控制器, 指出这些控制器虽然设计方法和理论不同, 但是它们的传递函数与本文设计的通用控制器 $G_c(s)$ 相似, 在动力学意义中具有等价性.

4) 对于不可简化的高阶、非线性、耦合、复杂的系统未进行深入的研究, 该方法仍有进一步研究的问题.

参考文献(References):

- [1] 刘豹. 现代控制理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988: 240 - 254. (LIU Bao. *Modern Control Theory*[M]. Beijing: Machine Press, 1988: 240 - 254.)
- [2] KALMAN R E. A new approach to linear filtering and prediction problems[J]. *Transactions on ASME, Journal of Basic Engineering*, 1960, 82D: 24 - 45.
- [3] 刘建民, 韩璞, 开平安, 等. 一种改进的滤波器和PID控制器[J]. 动力工程, 2007, 27(4): 551 - 554. (LIU Jianmin, HAN Pu, KAI Pingan, et al. An improved filter and PID controller[J]. *Journal of Power Engineering*, 2007, 27(4): 551 - 554.)
- [4] 韩京清. 从PID技术到“自抗扰控制”技术[J]. 控制工程, 2002, 9(3): 13 - 18. (HAN Jingqing. Control technology: From PID to auto disturbance rejection control[J]. *Control Engineering*, 2002, 9(3): 13 - 18.)

作者简介:

刘建民 (1960—), 男, 在职博士研究生, 从事电站热工自动化和系统节能方面的工作, E-mail: liujianmin@cgd.com.cn;

韩璞 (1959—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为现代控制理论及应用、智能控制、网络化控制系统;

开平安 (1948—), 男, 教授, 从事能源系统和自动控制理论及应用的研究;

刘吉臻 (1951—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为大机组智能优化控制和火电厂综合自动化;

曹文亮 (1979—), 男, 博士, 从事电站热工过程自动化和系统节能方面的工作.