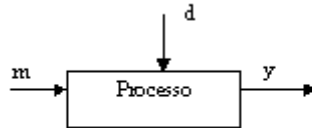


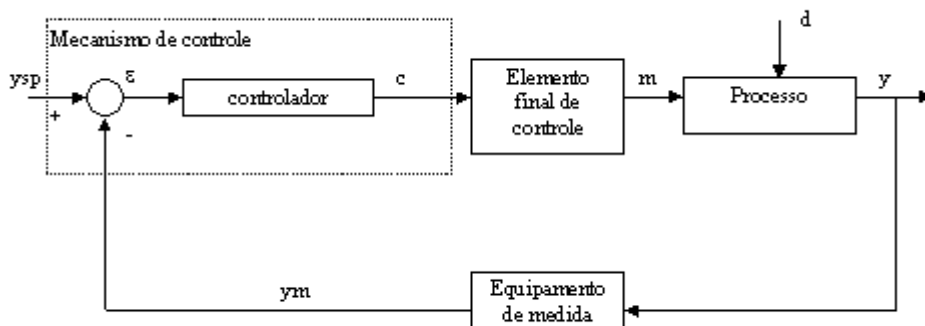
4-Sistemas de Controle Feedback (Controle por Realimentação de Estados)

4.1-Introdução

Considere o processo genérico mostrado na Figura 4.1a. Ele tem uma saída y , uma perturbação potencial d e uma variável manipulada m .



(a)



(b)

Figura 4.1- (a) Processo; (b) Malha de controle correspondente.

Existem duas situações nas quais um sistema de controle pode ser requerido. Na primeira, a perturbação d , também chamada de carga, muda de maneira imprevisível e o objetivo do controle é manter a saída y num valor desejado. Este é o chamado **problema de controle regulatório**. Na segunda, é feita uma mudança no valor do estado estacionário desejado (set point) e o objetivo do controle é levar a saída y ao novo estado estacionário. Este é o chamado **problema de controle servo**. Em ambos os casos a ação de controle feedback é a seguinte:

- mede-se o valor da saída y usando um equipamento de medida adequado
- compara-se o valor medido da saída y_m ao valor de set point (y_{sp}). O erro é calculado por

$$\epsilon = y_{sp} - y_m.$$

- o valor do erro é alimentado ao controlador. Este muda o valor da variável manipulada de forma a reduzir o erro. O controlador geralmente não afeta a variável manipulada diretamente, mas através de um elemento final de controle.

A figura 4.1b mostra estes três passos. O sistema na figura 4.1a é dito estar em **malha aberta**, em contraste com o sistema controlado da figura 4.1b, que é dito estar em **malha fechada**.

Vantagens do controle feedback:

- o sistema de controle não requer nenhum conhecimento da fonte ou natureza da perturbação.
- para fazer um sistema feedback funcionar só é necessário saber se a variável manipulada faz a variável controlada aumentar ou diminuir.

Desvantagens:

A principal desvantagem do controle feedback é que a perturbação atinge o processo e somente depois que a saída controlada se afasta do set point é que o sistema de controle toma alguma ação. Embora a maioria dos processos permitam alguma flutuação da variável controlada dentro de uma certa faixa, existem duas condições que fazem com que o controle feedback não funcione bem. Uma delas é a ocorrência de perturbações de grande magnitude que sejam fortes o suficiente para afetar seriamente ou mesmo danificar o processo. O outro caso é o de processos com grandes atrasos (*lag*).

Os componentes de uma malha de controle feedback são

- processo: equipamentos físicos do processo (tanques, trocadores de calor, reatores etc)
- instrumentos de medida ou sensores: tais instrumentos são usados para medir a variável de saída e são as principais fontes de informação sobre o que acontece com o processo.

Exemplos característicos são

- termopares ou termômetros de resistência para medir a temperatura
- tubos de venturi para medir vazões
- cromatógrafos gasosos para medir a composição de uma corrente

Um termômetro de mercúrio não é um instrumento de medida apropriado para ser usado num sistema de controle já que a sua medida não pode ser prontamente transmitida. Por outro lado, um termopar é aceitável, porque gera uma voltagem elétrica que pode ser prontamente transmitida. Logo, a transmissão é um fator crucial na seleção de equipamentos de medida.

- transdutores: muitas medidas não podem ser usadas para controle até que tenham sido convertidas em quantidades físicas (tais como voltagem elétrica ou corrente, ou um sinal pneumático, isto é, líquido ou ar comprimido) que possam ser transmitidas facilmente. Os transdutores são usados com o propósito de fazer esta conversão. Por exemplo, existem condutores metálicos cuja resistência elétrica muda quando eles são sujeitos a pressão mecânica. Logo, podem ser usados para converter um sinal de pressão para um elétrico.
- linhas de transmissão: usadas para carregar o sinal medido do sensor ao controlador e do controlador ao elemento final de controle. Estas linhas podem ser pneumáticas (ar comprimido) ou elétricas. Muitas vezes o sinal vindo de um equipamento de medida é muito fraco e não pode ser transmitido por uma distância longa. Nestes casos, as linhas de transmissão são equipadas com amplificadores que elevam o nível do sinal. Por exemplo, a saída de um termopar é da ordem de milivolts. Antes de ser transmitida ao controlador, ela é amplificada ao nível de volts.
- controlador: também inclui a função do comparador. esta é a unidade com lógica que decide quanto mudar o valor da variável manipulada. Requer a especificação do valor desejado (set point).
- elemento final de controle: é o equipamento que recebe o sinal de controle e o implementa fisicamente ajustando o valor da variável manipulada. A válvula de controle é o elemento final de controle mais usado, mas não o único. Outros elementos finais de controle usados em processos químicos são:
 - interruptores de revezamento, para controle *on-off*
 - bombas de velocidade variável
 - compressores de velocidade variável

Cada um destes elementos deve ser visto como um sistema físico com uma entrada e uma saída. Conseqüentemente, o seu comportamento pode ser descrito, por exemplo, por uma equação diferencial ou uma função de transferência.

4.2- Controladores feedback

Entre o equipamento de medida e o elemento final de controle está o controlador. A sua função é receber o sinal da saída medida $y_m(t)$ e, após compará-lo com o set point y_{sp} , produzir um sinal $c(t)$ de forma a retornar a saída para o valor desejado y_{sp} . Logo, a entrada para o controlador é o erro $\varepsilon(t)=y_{sp}-y_m(t)$, enquanto a saída é $c(t)$. Os vários tipos de controladores diferem na forma em que relacionam $\varepsilon(t)$ e $c(t)$.

Há três tipos básicos de controladores feedback:

- proporcional
- proporcional-integral
- proporcional-integral-derivativo

4.2.1- Controlador proporcional (P)

Seu sinal de saída é proporcional ao erro

$$c(t) = K_c \varepsilon(t) + c_s \quad (4.1)$$

em que K_c é o ganho proporcional do controlador e c_s é o sinal de bias do controlador, ou seja, o seu sinal de saída quando $\varepsilon=0$.

Um controlador proporcional é descrito pelo valor do seu ganho proporcional K_c ou pela sua banda proporcional ($BP=100/K_c$). Quanto maior o ganho K_c ou, equivalentemente, quanto menor a sua banda proporcional, maior a sensibilidade do sinal de atuação $c(t)$ a desvios no erro $\varepsilon(t)$.

Num controle feedback proporcional pode-se

- ajustar o ganho do controlador para fazê-lo tão sensível quanto desejado ao erro
- ajustar o sinal de K_c de forma que a saída do controlador aumente ou diminua quando o desvio aumenta

Exemplo: considere que queremos controlar a temperatura (T) no tanque aquecedor da Figura 1.2. A variável manipulada é taxa de calor introduzida pela passagem de vapor na serpentina (Q). Sabemos que

- se T aumenta, Q deve baixar
- se T diminui, Q deve aumentar

Suponha que $T_{sp}=40$ °C.

-Situação 1: A temperatura aumenta: $T_m=60$ °C. Logo, $c(t)=K_c(40-60)+c_s=-20K_c+c_s$. Assim, se $K_c > 0$, a saída do controlador diminui e se $K_c < 0$, a saída do controlador aumenta. Queremos baixar Q e logo o sinal de K_c deve ser positivo.

-Situação 2: A temperatura diminui: $T_m=20$ °C. Logo, $c(t)=K_c(40-20)+c_s=20K_c+c_s$. Assim, se $K_c > 0$, a saída do controlador aumenta e se $K_c < 0$, a saída do controlador diminui. Queremos aumentar Q e logo o sinal de K_c deve ser, novamente, positivo.

O bias também pode ser ajustado. Como a saída do controlador é igual a c_s quando o erro é zero, c_s deve ser ajustado de forma que a saída do controlador e, conseqüentemente, a variável manipulada, estejam nos seus valores de estado estacionário.

O controlador proporcional ideal descrito pela eq. (4.1) e mostrado na Figura 4.2a não inclui limitações físicas na saída do controlador. Uma representação mais real é mostrada na Figura 4.2b. Diz-se que o controlador fica saturado quando a sua saída chega a um limite, c_{\min} ou c_{\max} .

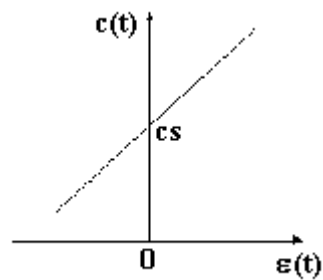


Figura 4.2a

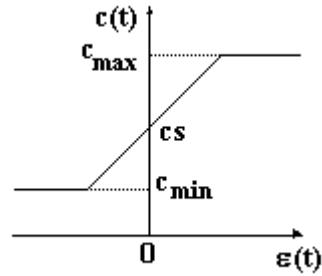


Figura 4.2b

Em variáveis desvio temos que a saída do controlador é dada por

$$c'(t) = K_c \varepsilon(t) \quad (4.2)$$

Note que o erro já é uma variável desvio e que no estado estacionário $\varepsilon=0$.

A função de transferência para o controlador proporcional é dada por:

$$G_c(s) = \frac{c(s)}{\varepsilon(s)} = K_c \quad (4.3)$$

Uma desvantagem do controle proporcional é a sua inabilidade em eliminar os erros estacionários (**off-set**) que ocorrem após uma mudança de set point ou após uma perturbação sustentada. Logo, normalmente se usam controladores que contenham ação integral. Em alguns casos em que off-sets podem ser tolerados, o controlador somente proporcional é atrativo devido a sua simplicidade. Por exemplo, em alguns problemas de controle de nível, manter o nível do líquido no set point não é importante, desde que o tanque não transborde ou seque.

4.2.2- Controlador proporcional-integral (PI)

Este controlador também é chamado de proporcional+reset. O seu sinal de saída está relacionado ao erro pela equação

$$c(t) = K_c \varepsilon(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int_0^t \varepsilon(t) dt + c_s \quad (4.4)$$

em que τ_I é a constante de tempo integral ou tempo de reset (reajuste).

Em variáveis desvio:

$$c'(t) = K_c \varepsilon(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int_0^t \varepsilon(t) dt \quad (4.5)$$

Podemos explicar a origem do termo reset (reajuste). Considere que o erro mude num degrau de magnitude ε . Pela equação 4.4 pode-se ver que no tempo $t=0$ a saída do controlador $c'(t)$ é igual a $K_c \varepsilon$ (a contribuição do termo integral é zero). Depois de τ_I minutos, a contribuição do termo integral é:

$$\frac{K_c}{\tau_I} \int_0^{\tau_I} \varepsilon(t) dt = \frac{K_c}{\tau_I} \varepsilon \tau_I = K_c \varepsilon \quad (4.6)$$

Ou seja, a ação integral "repete" a resposta da ação proporcional. Esta repetição ocorre a cada τ_I minutos. Tempo de reset, então, é o tempo necessário para o controlador repetir a ação proporcional inicial na saída.

A ação integral faz com que a saída do controlador $c(t)$ mude enquanto existir um erro na saída do processo. Logo, este controlador pode eliminar mesmo pequenos erros.

Uma desvantagem da ação de controle integral está relacionada justamente a esta característica de que a saída muda enquanto houver erro. Frequentemente os erros não são eliminados rapidamente e, passado algum tempo, produzem valores cada vez maiores para o termo integral, que por sua vez continua aumentando a ação de controle até a saturação (por exemplo, a válvula completamente aberta ou fechada). Esta condição é chamada *integral windup* e ocorre quando um controlador PI ou PID encontra um erro sustentado, como, por exemplo, durante a partida de um processo em batelada ou depois de uma grande mudança de set point. Pode também ocorrer em consequência de uma grande perturbação de carga sustentada que está além da faixa da variável manipulada. Existem controladores comerciais que apresentam *antireset windup*, que retira a ação integral temporariamente sempre que a saída do controlador está saturada e depois a retorna.

A partir da equação 4.5 pode-se calcular a função de transferência para o controlador PI:

$$G_c(s) = \frac{c(s)}{\varepsilon(s)} = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} \right) \quad (4.7)$$

obs.: A transformada de Laplace da integral é dada por:

$$L \left\{ \int_0^t f(t) dt \right\} = \frac{1}{s} f(s)$$

4.2.3- Controlador proporcional-integral-derivativo (PID)

A saída deste controlador é dada por

$$c(t) = K_c \varepsilon(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int_0^t \varepsilon(t) dt + K_c \tau_D \frac{d\varepsilon}{dt} + c_s \quad (4.8)$$

em que τ_D é a constante de tempo derivativa.

Com a presença do termo derivativo o controlador PID antecipa qual vai ser o erro no futuro imediato e aplica a ação de controle proporcional à taxa atual de mudança do erro. Devido a esta propriedade a ação derivativa também é chamada de controle antecipativo. Os maiores desafios proporcionados por esta ação de controle são os seguintes

- para uma resposta com erro diferente de zero mas constante, não há ação de controle, já que $d\varepsilon/dt=0$.
- para uma resposta com ruído e erro praticamente zero, derivadas grandes podem ser calculadas e logo a ação de controle será grande, embora não necessária.

A função de transferência para o controlador PID é dada por:

$$G_c(s) = \frac{c(s)}{\varepsilon(s)} = K_c \left\{ 1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \right\} \quad (4.9)$$

Como no controlador proporcional, o sinal de K_c também pode ser escolhido para os controladores PI e PID. Quando $K_c > 0$, a saída do controlador $c(t)$ aumenta quando a variável medida $y_m(t)$ diminui. Neste caso o controlador é de ação reversa. Quando $K_c < 0$, o controlador é de ação direta, já que a saída do controlador aumenta quando a variável medida aumenta.