

CAPITULO UNO

Introducción



En el curso de toda la historia de la teoría de control automático, la intensidad de investigación de sistemas con acciones de control discontinuo han sido mantenidas en un alto nivel. En particular, en la primera fase, relevo o reguladores 'encendido-apagado' muy adecuado para diseño de sistemas de retroalimentación. El motivo es doble: comodidad de implementación y alta eficiencia de Hardware. Monografías de Flugge-Lotz (1953) y Tsytkin (1955) fueron los más obvios las primeras generalizaciones teóricas de la amplia diversidad de análisis y métodos de diseño para sistemas relevadores.

En sistemas con control como una función de estado discontinuo, llamados modos deslizantes pueden elevarse. El control de la acción del interruptor a alta frecuencia el modo deslizante debiera ocurrir en el sistema. El estudio de los modos deslizantes abarca una amplia extensión de áreas heterogéneas desde problemas matemáticos puros hasta aspectos de aplicación.

Los sistemas con modos deslizantes tienen capacidad para ser una herramienta eficiente para el control complejo de alto orden de plantas dinámicas no lineales que operan bajo condiciones inciertas, un problema común para muchos procesos de tecnología moderna. Esto explica el alto nivel de la actividad de investigación y publicación en el área y el interés de practicas de ingenieros en el control de modo deslizante durante las ultimas dos décadas.

1.1 Ejemplos de sistemas dinámicos con modos deslizantes

Los modos deslizantes como un fenómeno pueden aparecer en un sistema dinámico gobernado por ecuaciones diferenciales ordinarias con lados de mano derecha discontinuos. El termino *modo deslizante* apareció primero en el contexto de los sistemas relevadores. Puede suceder en el control como una función del interruptor de estado de sistema en alta (teóricamente infinita) frecuencia; este movimiento es llamado modo deslizante. Puede ser ejecutado en el más simple sistema relevador de primer orden con el estado variable $x(t)$:

$$\dot{x} = f(x) + u$$

Con la función contenida $f(x)$, $|f(x)| < f_0 = \text{constante}$ y el control como una función relevadora (figura 1.1) del error rastreable $e=r(t)-x$; $r(t)$ es la referencia de entrada y u es dada por

$$u = \begin{cases} u_0 & \text{sí } e > 0 \\ -u_0 & \text{sí } e < 0 \end{cases} \quad \text{o} \quad u = u_0 \operatorname{sign}(e) \quad u_0 = \text{const}$$

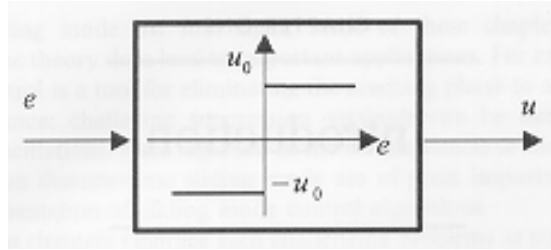


Figura 1.1 control relevador

Los valores de e y $de/dt = \dot{e} = \dot{r} - f(x) - u_0 \text{sign}(e)$ tiene diferentes signos si $u_0 > f_0 + |r|$. Significa que la magnitud del error rastreable decae a un promedio infinito y el error es igual a cero después de un intervalo de tiempo definido T (fig 1.2). El argumento de la función de control, e , es igual a cero el cual es el punto discontinuo. Para cualquier implementación en la vida real, las imperfecciones en el dispositivo interruptor median el interruptor del control a alta frecuencia o toma valores intermedios para aproximaciones continuas de la función relevadora. El movimiento para $t > T$ es llamado modo deslizante.

Formalmente, el modo deslizante puede aparecer no solo en un sistema de control con control discontinuo sino en cualquier sistema dinámico con discontinuidades en las ecuaciones de movimiento. Por ejemplo, el lado de mano derecha es una función discontinua del estado en el sistema mecánico simple con fricción Coulomb descrita en la figura 1.3 la ecuación de movimiento es dada por.

$$m\ddot{x} + kx = -uf(\dot{x})$$

Donde $x(t)$ es el desplazamiento, k es la rigidez del resorte y la fuerza de fricción es una función discontinua de la velocidad:

$$uf = u_0 \text{sign}(\dot{x}) \quad u_0 = \text{const}$$

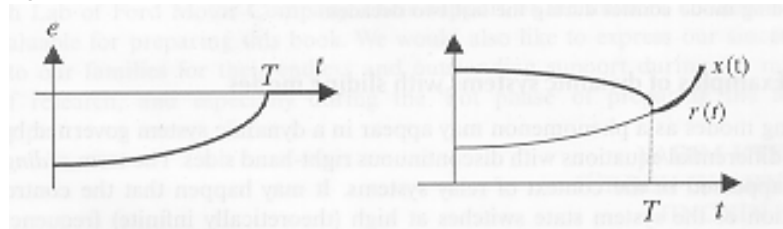


FIGURA 1.2 Control rastreable de modo deslizante.

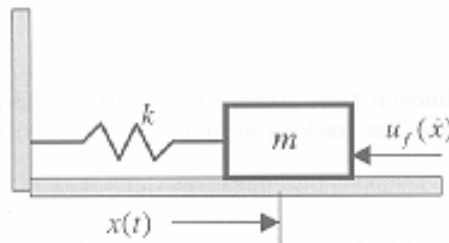


FIGURA 1.3 Sistema mecánico con fricción Coulomb.

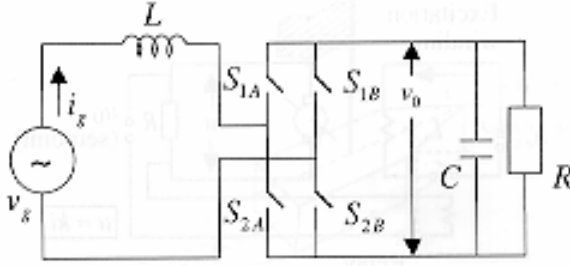


Figura 1.4 convertidor de voltaje AC/DC

Si $u_0 < k|x|$ entonces la fuerza de fricción toma uno de los valores extremos y el movimiento es descrito por ecuaciones diferenciales no homogéneas con el lado mano derecha igual a u_0 o $-u_0$. Para $u_0 > k|x(t_0)|$ y $x(t_0)=0$, los bastones de masa y $\dot{x}(t)=0$, $x(t) = x(t_0)$ para $t > t_0$. Este movimiento puede ser llamado modo deslizante desde el argumento de la función discontinua $uf=u_0 \text{sign}(x)$ es igual a cero idénticamente, similar al ejemplo anterior.

El tercer ejemplo ilustra movimientos deslizantes en un sistema eléctrico, un convertidor de voltaje AC/DC (figura 1.4) con ecuaciones dinámicas.

$$\frac{di_g}{dt} = \frac{V_g}{L} \text{sen}(\omega t) - \frac{v_0}{L} u$$

$$\frac{dv_0}{dt} = \frac{v_0}{RC} + \frac{i_g}{C} u$$

En donde el voltaje de entrada $v_g = V_g \text{sen}(\omega t)$ y los interruptores S_{1A} , S_{2A} , S_{1B} y S_{2B} constituyen el control de entrada.

$$u = \begin{cases} 1 & \text{si } S_{1A} \text{ y } S_{2B} \text{ están cerrados} \\ -1 & \text{si } S_{1B} \text{ y } S_{2A} \text{ están cerrados} \end{cases}$$

El interruptor lógico debiera encontrar semejante que el voltaje de salida v_0 es igual al valor deseado $v_d(t)$. Suenan razonable para interrumpir la función u dependiendo sobre el signo del error rastreable $v_e = v_d - v_0$:

$$u = \begin{cases} 1 & \text{si } (v_d - v_0)i_g > 0 \\ -1 & \text{si } (v_d - v_0)i_g < 0 \end{cases} \quad \text{o} \quad u = \text{sign}[(v_d - v_0)i_g]$$

Calcular la derivada de tiempo del error rastreable como

$$\dot{v}_e = \dot{v}_g + \frac{v_0}{RC} - \frac{|i_g|}{C} \text{sign}(v_e)$$

Si $|i_g| > (v_0/R) + C\dot{v}_g$ entonces v_e y \dot{v}_e tienen signos diferentes, por tanto el error v_e desaparecerá después del intervalo de tiempo definido T y será idénticamente igual a cero mas tarde. Los esquemas de $v_e(t)$, $v_0(t)$ y $v_d(t)$ son similares a los de $e(t)$, $x(t)$ y $r(t)$ de la figura 1.2. como para el ejemplo de primer orden el tracking ideal es suministrado por la imposición de este modo deslizante.

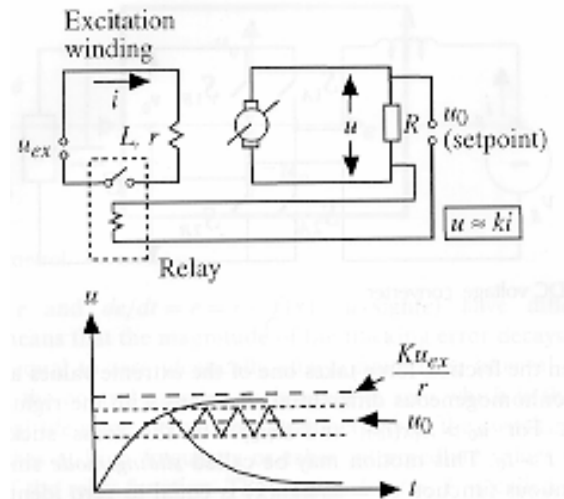


Figura 1.5 control de vibración de un generador DC

1.2 Modos deslizantes en sistemas transmisores y de estructura variable.

Las ideas que subrayan los análisis y métodos de diseño modernos para el control de modos deslizantes pueden encontrarse en publicaciones de los inicios de los años 30's. La figura 1.5 ilustra el llamado control de vibración estudiado por V. Kulebakin (1932) en el contexto de control de voltaje para un generador DC de un avión. Nótese que el voltaje de salida está cerrado al punto maleable debido a alimentación discontinua y alta frecuencia de interrupción en el resorte de excitación. Parece que el "control de vibración" de los 30s es lo mismo que nuestro contemporáneo "control de modo deslizante".

Un segundo ejemplo de los 30s (fig. 1.6) interesan relevadores de modo deslizante para controlar el curso de un barco (Nikolski, 1934). Es sorprendente que un periódico publicado hace más de sesenta años escribiera en el lenguaje de la teoría de control moderna : Fase plana, línea interruptora y siempre modo deslizante.

En todos los ejemplos, excepto el último, el fenómeno modo deslizante fue revelado y discutido en el dominio del tiempo, aunque este término no fue usado directamente. Pero, para análisis y diseño de control de modo deslizante, el método estado-espacio parece prometer mucho más.

El ejemplo convencional para demostrar el modo deslizante en términos del modo estado-espacio es un sistema relevador de segundo orden de tiempo invariable.

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= a_2 \dot{x} + a_1 x = u + f(t), \\ u &= -M \operatorname{sign}(s), \quad s = \dot{x} + cx \end{aligned} \quad (1.2.1)$$

Donde M , a_1 , a_2 , c son parámetros constantes y $f(t)$ es una interrupción contenida.

La conducta del sistema puede ser analizada en el estado plano (x, \dot{x}) . El plano de estado de la figura 1.7 se muestra para $a_1 = a_2 = 0$. El control u experimenta discontinuidades en la línea interruptora $s=0$ y las trayectorias de estado están constituidas por dos familias: la primera familia corresponde a $s>0$ $u=-M$ (semiplano superior); la segunda familia corresponde a $s<0$ y $u=M$

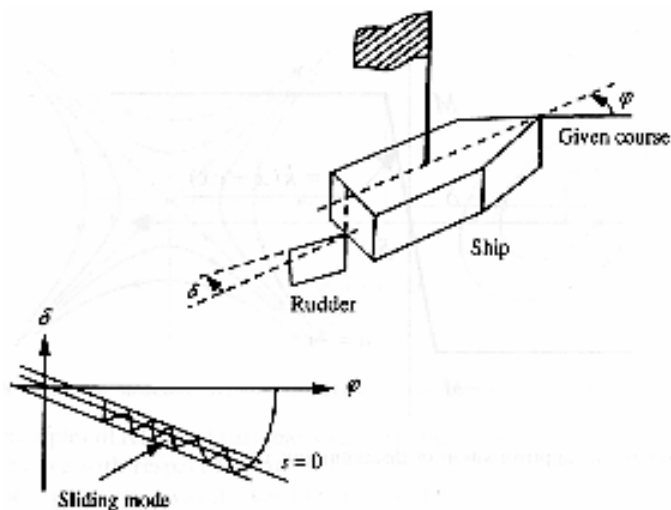


FIGURA 1.6 Control de modo deslizante del curso de un barco

(semiplano inferior). Dentro del sector $m-n$ en la línea interruptora, el estado de línea. Habiendo alcanzado el sector en algún tiempo t_1 , el estado no puede dejar la línea interruptora. Esto significa que la trayectoria de estado pertenecerá a la línea interruptora para $t > t_1$. Este movimiento con la trayectoria de estado en la línea interruptora es llamado modo deslizante. Desde que, en el del modo deslizante, la trayectoria de estado coincide con la línea interruptora $s=0$, la ecuación puede ser interpretada como la ecuación de movimiento, i.e.

$$\dot{x} + cx = 0 \quad (1.2.2)$$

Es importante que la solución $x(t) = x(t_1)e^{-c(t-t_1)}$ no dependa de los parámetros de la planta ni de las perturbaciones. Esta es llamada propiedad de invarianza parece prometedora para diseñar un control de retroalimentación para plantas dinámicas que operan bajo condiciones inciertas.

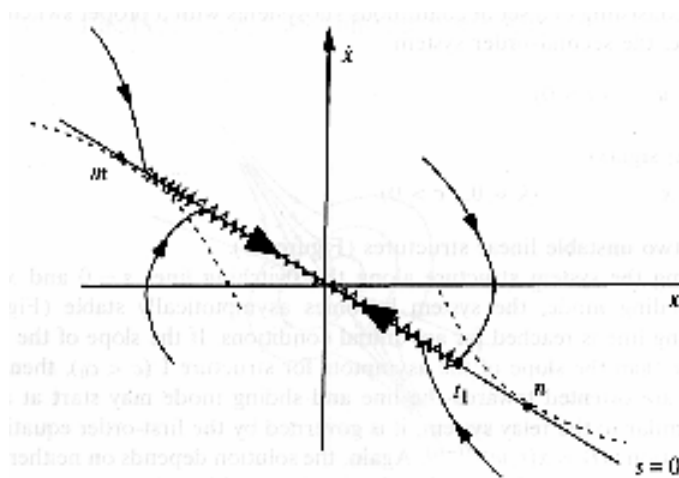


FIGURA 1.7 Plano de Estado del sistema relevado de segundo orden.

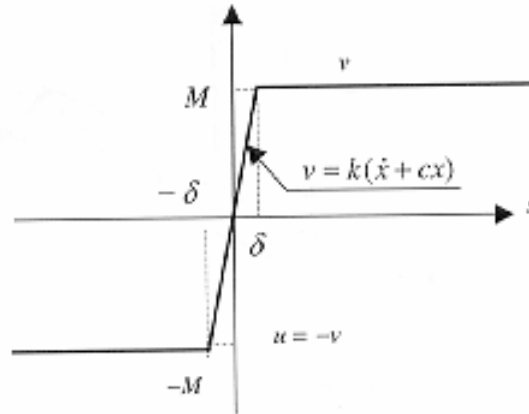


FIGURA 1.8 Aproximación continua del control discontinuo.

Solo hemos descrito un sistema matemático ideal. En implementaciones reales, las trayectorias están sometidas a un poco de vecindad de la línea interruptora. La desviación del modelo ideal puede ser causada por imperfecciones de los dispositivos interruptores tales como pequeñas demoras, zonas muertas e histéresis, los cuales pueden conducir a oscilaciones de alta frecuencia como se muestra en la figura 1.6. El mismo fenómeno puede aparecer debido a pequeñas constantes de tiempo de sensores y actuadores que fueron descuidadas en el modelo ideal. Este fenómeno llamado “chattering” fue un serio obstáculo para el uso de modos deslizantes en sistemas de control, y una atención especial será puesta en los métodos de supresión de chattering en el capítulo 8. Nótese que las trayectorias de estado están limitadas también a la vecindad de la línea interruptora para aproximación continua de una función relevadora discontinua como en la figura 1.8. En δ -vecindad de la línea $s=0$, el control es una función de estado lineal con una alta ganancia k y los valores de y y del sistema lineal se cierran $a-k$ y $-c$. Esto significa que el movimiento en la vecindad se compone del componente rápido que decae rápidamente y el componente lento que coincide con la solución a la ecuación del modo deslizante ideal.

Los modos deslizantes llegan a ser un modo operacional principal en sistemas de estructura variable o sistemas constituidos de un juego de subsistemas continuos con interruptores lógicos propios.

Por ejemplo el sistema de segundo orden.

$$\ddot{x} - ax = u \quad (a > 0)$$

$$u = k|x| \operatorname{sign}(s)$$

$$s = cx + \dot{x} \quad (k > 0, c > 0)$$

Consiste en dos estructuras lineales inestables (figura 1.9)

Por variación en la estructura del sistema a lo largo de las líneas de conmutación $s=0$ y $x=0$ y ejecutando el modo deslizante llega a ser asintoticamente estable (figura 1.10). La línea de conmutación es alcanzada por cualquier condición inicial. Si la pendiente de la línea es inferior que la pendiente del asintótico para la estructura I ($c > c_0$), entonces las trayectorias de estado están orientadas hacia la línea y el modo deslizante puede empezar en cualquier punto de $s=0$. Similar al sistema relevador es gobernado por una ecuación de primer orden (1.2.2) con la solución $x(t) = x(t_1)e^{-c(t-t_1)}$. Otra vez la solución no depende de ningún parámetro de la planta ni de las perturbaciones a las que la planta puede estar sujeta también.

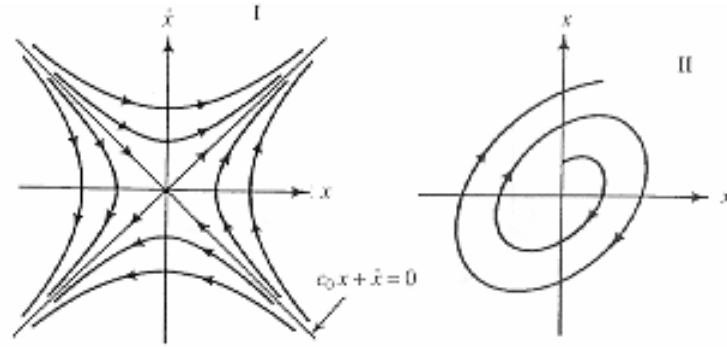


FIGURA 1.9 sistema de estructura variable consistente en dos subsistemas inestables

Los ejemplos de sistemas relevadores y de estructura variable demostraron reducción de orden e invarianza con respecto a la incertidumbre de la planta de los sistemas con modos deslizantes. Usar estas propiedades es la idea clave de la teoría de estructura variable en la primera fase cuando solo sistemas de una entrada-una salida con ecuaciones de movimiento en espacio reglamentario fueron estudiadas (Emelyanov *et.al.*, 1970). Un control variable $x=x_I$ y su derivada de tiempo $\dot{x}^{(i-1)}=x_i$, ($i=1, \dots, n$) son componentes de un vector estático en el espacio reglamentario.

$$\dot{x} = x_1 + 1$$

$$x_n = -\sum_{i=1}^n a_i(t)x_i + f(t) + b(t)u \quad (1.2.3)$$

Donde $a_i(t)$ y $b_i(t)$ son parámetros desconocidos y $f(t)$ es una interrupción desconocida.

El control experimenta discontinuidades en algún plano $s(x)=0$ en el espacio estado.

$$u = \begin{cases} u^+(x, t) & \text{sí } s(x) > 0 \\ u^-(x, t) & \text{sí } s(x) < 0 \end{cases}$$

Donde $u^+(x, t)$ y $u^-(x, t)$ son funciones de estado continuas, $u^+(x, t) \neq u^-(x, t)$, $s(x) = \mathbf{a}^n_{i=1} c_i x_i$, $c_n = 1$ y c_1, \dots, c_{n-1} son coeficientes constantes

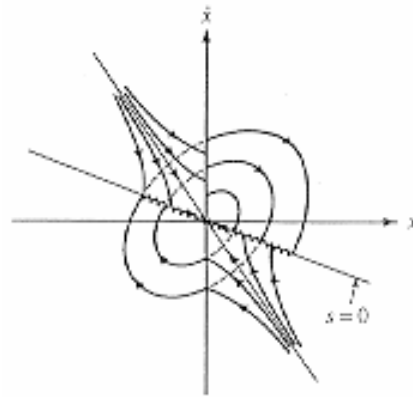


FIGURA 1.10 estado plano de un sistema de estructura variable: $s=0$, $x+cx=0$

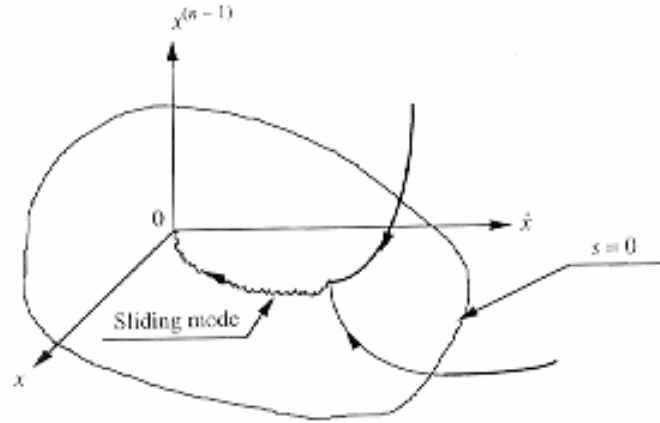


FIGURA 1.11 Modo deslizante en estado espacio canónico: $x^{(n-1)} + c_{n-1}x^{(n-2)} + \dots + c_1x = 0$

El control discontinuo fue seleccionado tal que las trayectorias de estado están orientadas hacia el plano interruptor $s=0$, por tanto el modo deslizante se inclina en este plano (fig. 1.11). Una vez que el modo deslizante ha iniciado, las trayectorias del sistema (1.2) están en la superficie interruptora,

$$x_n = -\sum_{i=1}^{n-1} a_i c_i$$

Sustitución en la ecuación de orden (n-1) de las ecuaciones del modo deslizante.

$$\dot{x} = x_{i+1} \quad (i = 1, \dots, n-2)$$

$$\dot{x}_{n-1} = -\sum_{i=1}^{n-1} c_i x_i \quad \text{o} \quad x^{(n-1)} + c_{n-1}x^{(n-2)} + \dots + c_1 = 0$$

La ecuación de movimiento es de orden reducido y no depende de ningún parámetro de la planta ni de las perturbaciones. Las dinámicas deseadas del modo deslizante pueden ser señaladas por una elección propia de los parámetros del plano conmutado ci .

Aunque la propiedad invarianza es muy útil, esto ha creado la ilusión de que cualquier problema de control puede ser resuelto fácilmente por imposición del modo deslizante en el sistema. El problema principal es que el espacio de las derivadas de estado es una idealización matemática y los diferenciadores ideales difícilmente son implementados. Como un resultado, el otro extremo aparece reflejando un cierto pesimismo sobre la posibilidad de implementación de sistemas de estructura variable con modos deslizantes. Pero la negativa para usar modos deslizantes en sistemas de control probados para ser tan irrazonable como bueno.

En los procesos tecnológicos modernos es común que el control y la salida de sistema pueden ser cantidades valoradas del vector y solo algunos componentes del vector son accesibles para medir. El espacio reglamentario aproximado no sugirió como puede ser diseñado el control en tales situaciones. La segunda fase de los estudios del sistema de estructura variable esta dedicada al desarrollo de métodos de diseño para sistemas con ecuaciones de movimiento en un espacio-estado arbitrario con vector de acción de control y variables del vector para ser controlado (Utkin, 1983). La idea básica que forma la base de la mayoría de los métodos de control es la imposición de modos deslizantes multidimensionales.

1.3 Modos deslizantes multidimensionales.

En los ejemplos previos de sistemas de control con modos deslizantes, el control era una función de estado escalar y el modo deslizante era gobernado por una ecuación diferencial con orden uno menor que el orden del sistema original. Por tanto podemos asumir que el movimiento deslizante puede aparecer en una intersección de varias superficies si el control es una cantidad valorada del vector y cada componente experimenta discontinuidades en su propia superficie interruptora. El movimiento planeado de un punto de masa m con fricción Coulomb (figura 1.12) puede servir como un ejemplo.

El movimiento en el marco ortogonal (x, y) es gobernado por el sistema de cuarto orden

$$\begin{aligned} x &= x_1 & y &= y_1 \\ \left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 &= x_2 \\ m\dot{x}_2 &= -kx_1 - F_x \\ \dot{y}_1 &= y_2 \\ m\dot{y}_2 &= -ky_1 - F_y \end{array} \right. \end{aligned}$$

Donde ambos resortes tienen la misma rigidez k , $F_x = x_2/\sqrt{x_2^2 + y_2^2}$ y $F_y = y_2/\sqrt{x_2^2 + y_2^2}$ son (x, y) componentes del vector de fuerza de fricción $F = -Mv/||v||$, $M = \text{const}$, v es un vector de velocidad con componentes x_2 y y_2 y $||v|| = \sqrt{x_2^2 + y_2^2}$.

La magnitud de la fuerza de fricción es igual a M para $v \neq 0$. F experimenta discontinuidades cuando x_2 y y_2 son igual a cero simultáneamente. Si al tiempo inicial $v=0$ (i.e. $x_2=0$ y $y_2=0$) y el valor máximo de la fuerza de fricción excede la fuerza del resorte, $M > k\sqrt{x_1^2 + y_1^2}$ entonces la masa esta pegada y $v=0$ para todo el tiempo excedente.

De este modo, mas allá las intersecciones de dos superficies $x_2=0$ y $y_2=0$, la fuerza de fricción es una función de estado discontinuo, y en el dominio $M > k\sqrt{x_1^2 + y_1^2}$, el estado de las trayectorias ($x_1(t)=\text{const}$, $y_1(t)=\text{const}$) pertenece a esta variable. Este movimiento puede ser llamado *modo deslizante bi dimensional* en la intersección de dos superficies discontinuas.

El siguiente ejemplo ilustra un modo deslizante bi-dimensional en un sistema de con un vector de control bi-dimensional.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= x_3 + f_1(t) + u_1 \\ \dot{x}_3 &= f_2(t) + u_2 \end{aligned} \tag{1.3.1}$$

Donde $f_1(t)$ y $f_2(t)$ son perturbaciones contenidas desconocidas con un rango de variación conocido.

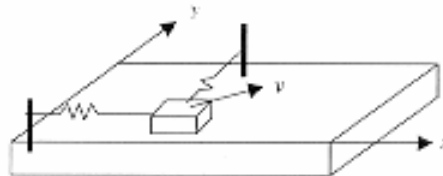


Figura 1.12 Sistema mecánico con fricción Coulomb, en un plano.

Los componentes del control experimentan discontinuidades en dos planos del estado tri-dimensional:

$$\begin{aligned} u_1 &= -M_1 \operatorname{sign}(s_1) & s_1 &= x_1 + x_2 \\ u_1 &= -M_2 \operatorname{sign}(s_2) & s_2 &= x_1 + x_2 + x_3 \end{aligned}$$

Donde M_1, M_2 son valores constantes positivos.

Si $M_2 > |x_2 + x_3 + f_1(t)| + M_1$ entonces los valores s_2 y $s_2 = x_2 + x_3 + u_1 - M_2 \operatorname{sign}(s_2)$ tienen diferentes signos. Por tanto el plano $s_2 = 0$ es alcanzado después de un intervalo de tiempo definido y luego el modo deslizante con trayectorias de estado en este plano empezara (figura 1.13). Para este movimiento $x_3 = -x_1 - x_2$ y el modo deslizante es gobernado por la ecuación de segundo orden

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -x_1 - x_2 + f_1(t) + u_1 \end{cases}$$

Otra vez, para $M_1 > |x_1 + f_1(t)|$, los valores s_1 y $\dot{s}_1 = -x_1 + f_1(t) - M_1 \operatorname{sign}(s_1)$ tienen diferentes signos y después de un intervalo de tiempo definido el estado alcanzara la intersección de los planos $s_1 = 0$ y $s_2 = 0$. El movimiento adicional será en esta variable (la línea recta formada por la intersección de dos planos), y es una ecuación de primer orden puede ser derivada por sustitución de $-x_1$ por x_2 (desde $s_1 = 0$) en la primera ecuación para obtener

$$\dot{x}_1 = -x_1$$

El modo deslizante bi-dimensional es asintoticamente estable, esta orden es dos veces menor que el orden del sistema original y el movimiento no depende de las perturbaciones $f_1(t)$ y $f_2(t)$.

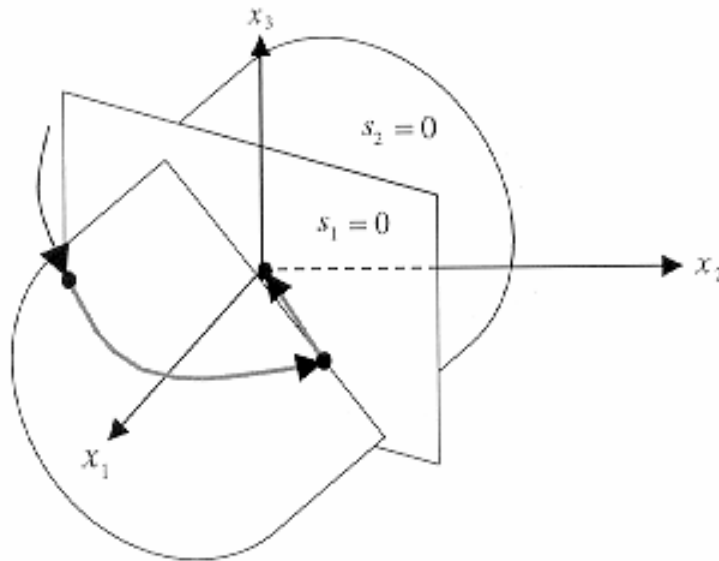


Figura 1.13 Modo deslizante bi-dimensional

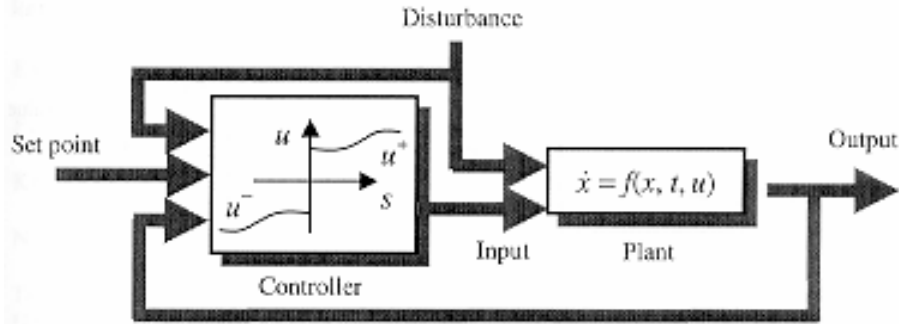


Figura 1.14 Sistemas con control de modo deslizante

1.4 Perfil de la metodología del control de modo deslizante

Los ejemplos en las secciones anteriores nos permiten perfilar las principales razones del porque la imposición de modos deslizantes es un método prometedor para control de plantas dinámicas no lineales de alto orden que operan bajo condiciones inciertas. En este libro, trataremos principalmente con procesos descritos por ecuaciones diferenciales no lineales en un arbitrario n -dimensional estado espacio con m -dimensional acciones de control del vector (figura 1.14):

$$\dot{x}_1 = f(x, t, u) \quad (1.4.1)$$

con $x \in \mathbb{R}^n, f: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$; t denota el tiempo.

El control es seleccionado como una función discontinua del estado. Por ejemplo, cada componente del control u_i puede experimentar discontinuidades en algunas superficies no lineales $s_i(x)=0$ en el espacio estado.

$$u_i = \begin{cases} u_i^+(x, t) & \text{si } s_i(x) > 0 \\ u_i^-(x, t) & \text{si } s_i(x) < 0 \end{cases} \quad (i = 1, \dots, m) \quad (1.4.2)$$

Donde $u_i^+(x, t)$ y $u_i^-(x, t)$ son funciones de estado continuas con $u_i^+(x, t) \neq u_i^-(x, t)$; el $s_i(x)$ son funciones de estado continuas.

Similar al ejemplo con modo deslizante bi-dimensional en la intersección de dos planos discontinuos (sección 1.3), podemos esperar que el modo deslizante pueda ocurrir en la intersección de m superficies $s_i(x)=0 (i=1, \dots, m)$ y el orden de la ecuación de movimiento es m menor que el orden del sistema original. En conexión con el control de plantas de altas dimensiones, un gran interés es agregado a métodos de diseño que permitan perfilar los movimientos del sistema para ser desacoplados en componentes parciales independientes. Como podemos ver, poniendo en vigor modos deslizantes en sistemas con control discontinuo se habilita la reducción del orden, llevando a la división y simplificación del proceso de diseño.

Además, el elemento implementa una función discontinua $u(x)$ tiene la entrada $s(x)$ cerca del cero durante el modo deslizante (figura 1.15) donde como su salida toma valores definidos (para ser preciso el medio valor de la salida desde que contiene un componente de alta frecuencia). Esto significa que el elemento implementa alta (teóricamente infinita) ganancia, será una herramienta convencional para suprimir la influencia de perturbaciones e incertidumbres en el comportamiento de la planta. sistemas de control de alta ganancia continuos diferentes, el efecto de la invarianza que usa acciones de control definidas se logra.

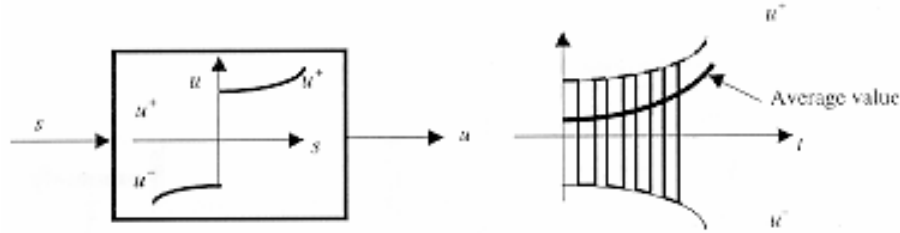


Figura 1.15 Modo deslizante para implementación de ganancia alta.

Nuestra breve discusión de los movimientos en sistemas con modos deslizantes ha mostrado dos cosas:

- El orden de los sistemas es reducido.
- La sensibilidad con respecto a la variación del parámetro y perturbaciones puede reducirse si el modo deslizante debe ocurrir.

Como se demostró en las secciones anteriores, la reducción del orden y propiedades de la invarianza son fácilmente factibles en sistemas de segundo-orden con ecuaciones de movimiento en el espacio canónico. La dinámica del modo deslizante depende de las ecuaciones de la superficie interruptora y no depende del control. El procedimiento del plan debe consistir de dos fases. Primero, la ecuación de la variable con modo deslizante se selecciona para diseñar la dinámica deseada de este movimiento de acuerdo con algún criterio de la actuación. Entonces, el control discontinuo debe encontrarse tal que el estado alcanzaría la variable y tal en que el modo deslizante existe esta variable. Como resultado, el plan es dividido en dos subproblemas de dimensión más baja, y después de un intervalo de tiempo definido que precede el movimiento deslizante, el sistema poseerá el comportamiento dinámico deseado.

Tenemos dwelt en las razones principales para usar modos deslizantes en sistemas del control y perfilamos la metodología del plan de control de modo deslizante. El concepto del plan básico de los métodos del mando estudiado en este libro enfocará en dar fuerza a modos deslizantes. Desacoplamiento o invarianza (o ambos) será inherente en la mayoría de la metodología propuesta una herramienta eficaz para controlar procesos dinámicos eléctricos y mecánicos complejos gobernados por ecuación de diferencial de alto-orden con información limitada sobre los parámetros y perturbaciones. Dos ejemplos son un motor de la inducción y un manipulador del multilink con desconozca torque de carga e inercia, y con posición, velocidad o torque para ser controlado. Los métodos del plan para el control del testamento de los sistemas serán desarrollados en el libro:

- Sistemas completamente mecánicos con fuerzas o torques como acciones del control, e.g. manipuladores y robots móviles
- Sistemas completamente eléctricos, e.g. convertidores de energía
- Sistemas electromecánicos, e.g. motores eléctricos

Los servomecanismos eléctricos ampliamente usados son controlados a través de convertidores electrónicos de energía. Al emplearlos, parece razonable para volverse a algoritmos de control con acciones de control discontinuas, desde que sólo un funcionamiento encendido-apagado es admisible para tales convertidores y discontinuidades en el control es dictado por la misma naturaleza de los elementos del convertor.

Referencias:

- EMELYANOV, S. *et al.*, 1970, *Theory of Variable Structure Control Systems* (en Ruso), Moscú: Nauka.
- FLUGGE-LOTZ, I., 1953, *Discontinuous Automatic Systems*, New York: Princeton University press.
- KULEBAKIN, V., 1932, en la teoría de control de vibración para maquinas electricas. (en Ruso) *Theoretical and experimental electronics*, **4**.
- NIKOLSKI, G., 1934, en la estabilidad automática de una nave en un curso dado. (en Ruso) *Proceedings of the Central Communication Laboratory*, **1**, 34-75.
- TSYPKIN, Y., 1955, *Theory of Relay Control Systems* (en Ruso), Moscow: Gostechizdat.
- UTKIN, V., 1983, Sistemas de Estructura Variable: presente y futuro, *Automation and Remote Control*, **44**, 1105-20.