

# La sintonizzazione dei regolatori PID

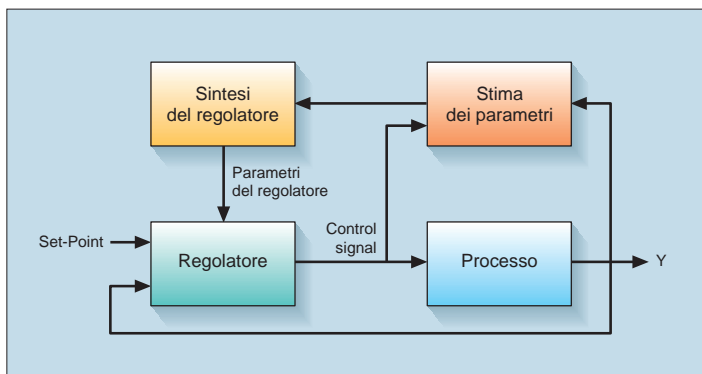
I controllori lineari convenzionali non sono in grado di controllare un processo con successo in presenza di variazioni.

Dal punto di vista progettuale i sistemi di controllo adattativi riescono invece a garantire la stabilità e a mantenere le prestazioni desiderate del sistema di controllo

DANIELE CATTANEO

In numerosi sistemi di controllo industriali l'operazione di sintonizzazione o taratura (tuning) dei parametri del controllore è spesso eseguita con scarsa conoscenza sulla dinamica del processo da controllare, non tanto per ragioni tecniche quanto per ragioni economiche. La modellizzazione dei processi fisico-chimici, infatti, è estremamente sviluppata e l'utilizzo di metodi computazionali, integrati se necessario da esperimenti (come per esempio le prove nella galleria del vento per

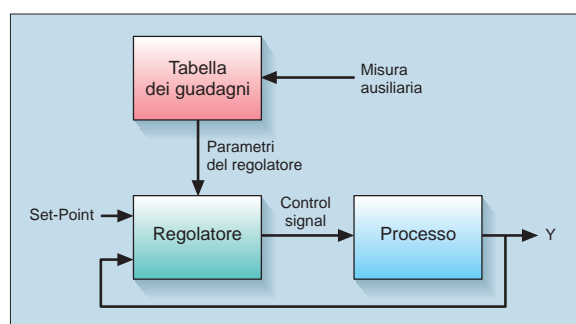
l'industria aerospaziale), conduce a simulazioni molto accurate sul comportamento del sistema. Nell'industria nucleare e nell'industria aerospaziale esistono disposizioni legislative riguardanti la sicurezza che rendono obbligatoria la determinazione di questi modelli, ma il costo di questo metodo è molto alto quindi non giustificato per la grande maggioranza degli anelli di controllo presenti nell'industria (dove la soluzione tradizionale è quella dei controllori standard PID inseriti in catene di controreazione SISO). L'utilizzo di algoritmi PID sintonizzati porta comunque a risultati soddisfacenti; la sintonizzazione avviene manualmente se condotta da un tecnico: in questo caso è necessaria buona familiarità con i metodi di sintonizzazione. Spesso sono richiesti più tentativi per raggiungere i risultati desiderati e ogni aggiustamento ha bisogno di tempo per verificare la conformità del risultato con le aspettative (se le costanti di tempo intrinseche del processo sono nell'ordine delle ore si intuisce quanto tempo sia necessario per la sintonizzazione). I processi, inoltre, hanno spesso caratteristiche dinamiche quindi può essere necessaria una nuova sintonizzazione a distanza di tempo; le variazioni infatti possono essere dovute a diversi



**Un controllore si dice adattativo quando apprende informazioni sul processo controllato e contemporaneamente ne verifica il comportamento**

l'industria aerospaziale), conduce a simulazioni molto accurate sul comportamento del sistema. Nell'industria nucleare e nell'industria aerospaziale esistono disposizioni legislative riguardanti la sicurezza che rendono obbligatoria la determinazione di questi modelli, ma il costo di questo metodo è molto alto quindi non giustificato per la grande maggioranza degli anelli di controllo presenti nell'industria (dove la soluzione tradizionale è quella dei controllori standard PID inseriti in catene di controreazione SISO). L'utilizzo di algoritmi PID sintonizzati porta comunque a risultati soddisfacenti; la sintonizzazione avviene manualmente se condotta da un tecnico: in questo caso è necessaria buona familiarità con i metodi di sintonizzazione. Spesso sono richiesti più tentativi per raggiungere i risultati desiderati e ogni aggiustamento ha bisogno di tempo per verificare la conformità del risultato con le aspettative (se le costanti di tempo intrinseche del processo sono nell'ordine delle ore si intuisce quanto tempo sia necessario per la sintonizzazione). I processi, inoltre, hanno spesso caratteristiche dinamiche quindi può essere necessaria una nuova sintonizzazione a distanza di tempo; le variazioni infatti possono essere dovute a diversi

fattori: il verificarsi di cambiamenti nel punto di lavoro (dovuti a variazioni nel riferimento o nel carico) che possono far variare il guadagno (o la dinamica) dell'attuatore o del processo; variazioni nelle caratteristiche della materia prima (come avviene per esempio negli impianti di trasformazione) che potrebbero portare a diversi comportamenti statici e dinamici; disturbi esterni che possono modificare le caratteristiche di processo; cambiamenti a lungo termine nel processo dovuti ad esempio all'usura delle parti che costituiscono l'impianto. Queste considerazioni hanno portato all'introduzione della funzione di autosintonizzazione (autotuning) nei regolatori industriali, una sintonizzazione automatica del regolatore con cui



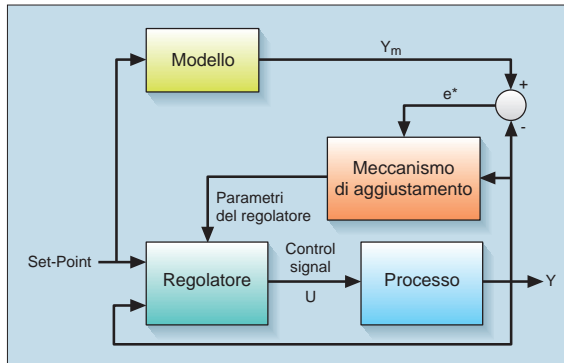
**Nel metodo di gain-scheduling l'eliminazione dell'influenza delle variazioni dei parametri del processo è possibile modificando i parametri del regolatore in funzione di una variabile ausiliaria**

il sistema esegue un particolare ciclo di funzionamento nella fase di messa in esercizio oppure quando richiesto dall'operatore; i valori determinati dei parametri del regolatore sono sostanzialmente 'congelati' sino al nuovo ciclo di taratura. La funzione di sintonizzazione automatica è realizzata agevolmente adottando algoritmi implementati in sistemi a microprocessori, come dimostra il fatto che attualmente buona parte dei pacchetti applicativi per DDC offrono questa opzione. Nella maggior parte dei casi il microprocessore che realizza il controllo è collegato a una rete locale industriale quindi la funzione di sintonizzazione automatica può essere impostata anche da una postazione remota. Gli algoritmi di sintonizzazione automatica possono essere considerati come una sottoclasse dei sistemi adattativi (sistemi in cui la sintonizzazione del regolatore si svolge con continuità durante il normale funzionamento del sistema).

## Controllo adattativo

Un controllore si dice adattativo quando apprende informazioni sul processo controllato e contemporaneamente ne controlla il comportamento. L'interesse per il controllo adattativo è sorto originariamente nel settore aerospaziale dove i classici controllori lineari non sempre fornivano un controllo soddisfacente del comportamento di vettori e aeromobili ad alte prestazioni; le difficoltà sorgevano perchè le caratteristiche dei processi controllati

variavano significativamente durante il corso del volo mentre il classico controllore a termini fissi poteva essere tarato in modo da fornire risultati soddisfacenti solo per una condizione di volo specifica. Questo problema ha manifestato l'esigenza di poter disporre di un controllore più sofisticato in grado di adattarsi alle caratteristiche



**Il regolatore MRAC è composto da due anelli; l'anello interno è un normale anello di retroazione costituito dal processo e dal regolatore i cui parametri sono sintonizzati dall'anello esterno in modo tale da minimizzare l'errore  $e^*$  tra uscita del modello  $y_m$  e uscita del processo  $y$**

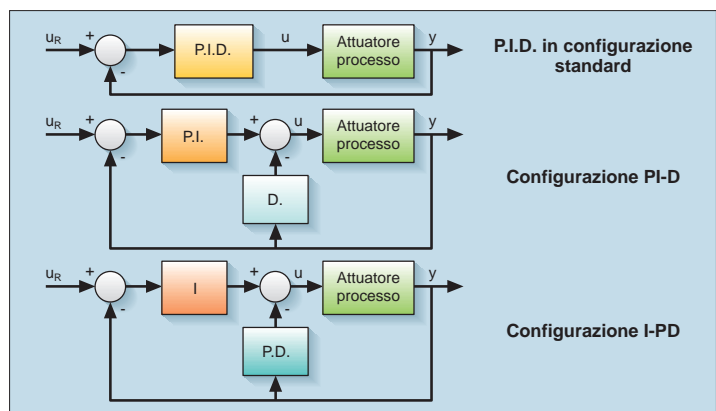
variabili del processo controllato. Successivamente si è attestata la validità di questo tipo di controllore anche in differenti campi applicativi - per esempio nel controllo di processi industriali e nel controllo di sistemi economici - evidenziando analogie con alcuni sistemi di controllo biologici.

## Controllo adattativo tipo Self-Tuning (STR)

Un modo per rendere automatica la modellizzazione del processo e la procedura di sintesi del regolatore è determinare una opportuna struttura per il modello, stimare i parametri del modello (fase di identificazione) e adottare tali stime per ottenere la legge di controllo in base al metodo di sintesi prescelto per il controllore. Un regolatore ottenuto seguendo queste regole è definito regolatore self-tuning (STR) perchè ha la capacità di sintonizzare indipendentemente i propri parametri. Dal punto di vista della struttura il regolatore può essere pensato come composto da due anelli: l'anello più interno comprende il processo con un normale regolatore in retroazione mentre l'anello più esterno è costituito da uno stimatore dei parametri e un blocco che effettua la sintesi del regolatore - in base al metodo di sintesi prescelto questo blocco è in grado di determinare la legge di controllo a partire dalle stime fornite del modello di processo e provvede a tarare di conseguenza i parametri del regolatore. Esistono casi in cui il ciclo esterno è fonte di instabilità, per esempio in presen-

za di disturbi che variano esattamente con i parametri del sistema; l'effetto di questo tipo di disturbi è falsare la stima parametrica del processo producendo una identificazione inattendibile (la conseguenza può essere l'innescò di una instabilità indesiderata). Una possibile soluzione al problema della instabilità è la tecnica di jacketing: il sistema di controllo è progettato in modo tale da prevedere il funzionamento di un controllore stabilizzante (eventualmente a scapito delle prestazioni) in presenza di instabilità dovuta al self-tuning. Il regolatore STR è molto flessibile rispetto al metodo di sintesi: praticamente può essere utilizzata qualsiasi tecnica di sintesi. Sono stati proposti regolatori STR basati sul margine di fase e sul margine di guadagno, sul piazzamento dei poli, sul controllo a minima varianza e sul controllo LQG (Lineare Quadratico Gaussiano). La stima dei parametri può invece sfruttare metodologie di approssimazione stocastica, minimi quadrati, minimi quadrati estesi e generalizzati, variabili strumentali, filtraggio di Kalman esteso e massima verosimiglianza.

Dal punto di vista della classificazione gli algoritmi di self-tuning possono essere suddivisi in due classi di algoritmi: algoritmi impliciti (o diretti, si basano sulla stima di un modello implicito del processo: si effettua una nuova parametrizzazione per esprimere il processo direttamente



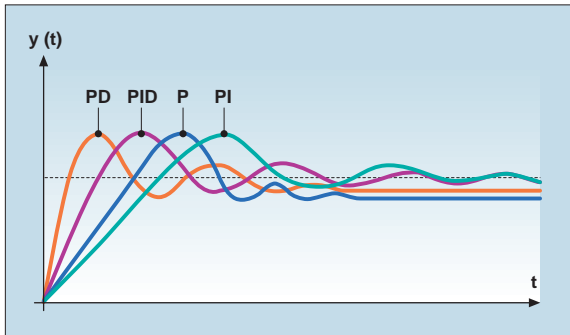
**Un regolatore PID analogico o digitale può essere inserito nella catena di controllo nella configurazione standard, nella configurazione PI-D o nella configurazione I-PD**

in termini di parametri del regolatore, semplificando l'algoritmo perchè si eliminano i calcoli necessari per la sintesi) e algoritmi espliciti (o indiretti, nell'algoritmo è sempre presente una fase in cui si stima esplicitamente il modello del processo).

## Gain Scheduling (GS)

Un approccio più semplice rispetto al self-tuning è il gain scheduling, ossia il tentativo di controllare un sistema la cui dinamica varia nel tempo. Il metodo può essere impiegato quando si dispone di una variabile ausiliaria di processo strettamente correlata alle variazioni nella dinamica dello stesso processo: in questo caso è allora possibile eli-

minare l'influenza delle variazioni dei parametri del processo modificando i parametri del regolatore in funzione di questa variabile ausiliaria. La denominazione 'gain scheduling' è dovuta alle origini del metodo, inizialmente concepito solo per reagire a variazioni nel guadagno del processo. Uno svantaggio del metodo GS è la struttu-



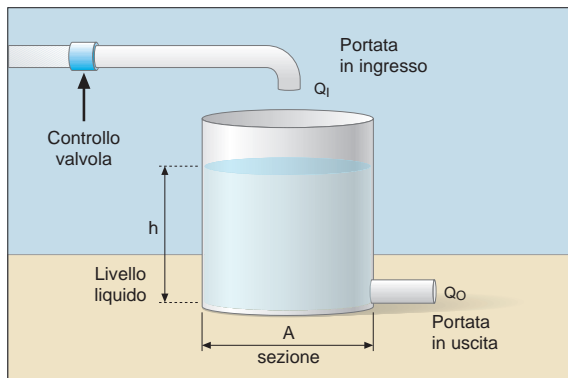
**I controllori che contengono l'azione integratrice (PI e PID) presentano un errore a regime nullo; rispetto al caso di controllo puramente proporzionale (P), l'azione dell'integratore (PI) rallenta la risposta che può però essere resa più veloce dalla presenza del termine derivativo (D)**

ra di compensazione a catena aperta: non è prevista alcuna azione di feedback (per questa ragione il gain scheduling può essere considerato come un'estensione della compensazione feed-forward). Il secondo svantaggio è dovuto al tempo richiesto dall'acquisizione dati perché i parametri del regolatore devono essere determinati in corrispondenza di molteplici condizioni operative e prima di installare la tabella dei parametri è necessario collaudare molto bene il sistema attraverso numerose simulazioni. Il grande vantaggio del GS è però la possibilità di variare rapidamente i parametri del regolatore in risposta a variazioni di processo. Esistono dubbi nel considerare il metodo GS come schema adattativo (dal momento che i parametri sono modificati in catena aperta) ma è certamente una tecnica utile per ridurre gli effetti delle variazioni dei parametri di processo.

## Sistemi adattativi tipo Model-Reference (MRAC)

La risoluzione del problema dell'asservimento ha portato all'elaborazione del modello MRAC per la taratura dei parametri del regolatore: le specifiche sono fornite basandosi su un modello di riferimento per restituire la risposta voluta del sistema al segnale di comando (il modello di riferimento è parte integrante del sistema di controllo). Il regolatore è composto da due anelli: l'anello interno è un normale anello di retroazione costituito dal processo e dal regolatore i cui parametri sono sintonizzati dall'anello esterno in modo tale da minimizzare l'errore  $e^*$  tra uscita del modello  $y_m$  e uscita del processo  $y$ . Il problema consiste nella determinazione del meccanismo di aggiu-

stamento per annullare l'errore  $e^*$  mantenendo allo stesso tempo stabile il sistema complessivo - il problema è complesso perché non risolvibile a partire da una semplice retroazione lineare dall'errore ai parametri del controllore. Gli schemi adattativi tipo STR e MRAC possono essere considerati sistemi gerarchici a due livelli: il livello



**Esempio di un sistema da controllare: regolare la portata in uscita**

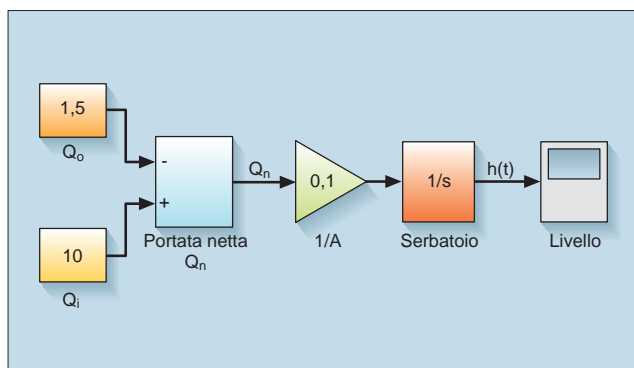
inferiore è rappresentato dal processo con l'anello di regolazione mentre l'anello di adattamento, che sintonizza i parametri del regolatore, rappresenta il livello superiore; l'anello di adattamento richiede tipicamente parametri come l'ordine del modello e il periodo di campionamento.

E' necessario definire un terzo livello di supervisione per stabilire quali valori attribuire a questi parametri, gestire le procedure di avviamento, rilevare eventuali malfunzionamenti e effettuare una statistica dei dati storici. Esistono anche sistemi esperti applicati alla sintonizzazione (Expert Tuning Systems): osservando i valori di ingresso e di uscita del processo valutano i risultati delle osservazioni con criteri qualitativi di prestazione e decidono le

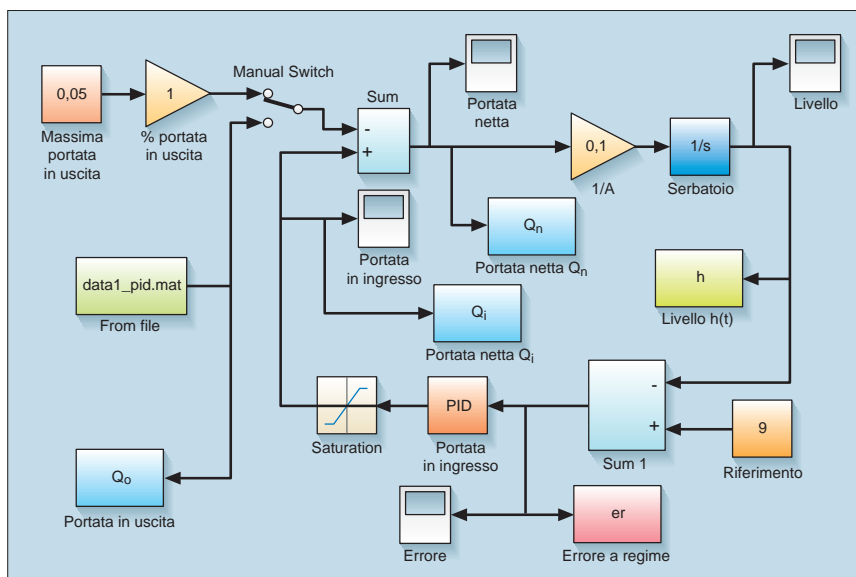
modifiche da apportare ai parametri del controllore secondo regole euristiche.

## Controllori PID a sintonizzazione automatica (Autotuning)

L'autotuning per i controllori PID è la sintonizzazione automatica del controllore da effettuare all'avviamento o nel momento in cui si dovesse constatare uno scadimento nelle prestazioni del sistema di controllo dovuto ad una variazione delle caratteristiche del processo. Tra una sintonizzazione e la sintonizzazione successiva il controllore a sintonizzazione automatica utilizza parametri fissi (a differenza del controllore con algoritmi di self-tuning in cui la procedura di identificazione rimane sempre attiva); questi parametri sono ricalcolati e aggiornati ad una frequenza generalmente inferiore rispetto alla frequenza di campionamento del sistema di controllo digitale - si evitano interferenze tra la dinamica del sistema di adattamento e il controllo. E' evidente che se i parametri del processo variano molto rapidamente è inevitabile l'interazione tra i due cicli (controllo e adattamento) con gravi



**Sistema di controllo per la portata con riferimento al modello di figura 6**



**Controllore PID per gestire la portata del modello di figura 6. Lo schema è un sistema chiuso in retroazione attraverso un controllore PID; a valle del PID è stata inserita una saturazione per limitarne l'uscita (l'immissione di liquido è infatti controllata da una valvola, come si nota anche in figura 7, e la saturazione tiene conto proprio del limite di portata dovuto alla stessa valvola)**

conseguenze sulla stabilità del sistema complessivo. La sintonizzazione automatica si può ottenere anche da un algoritmo ST (Self-Tuning): raggiunta la convergenza della stima dei parametri di processo, si disattiva l'anello di identificazione e il regolatore continua ad operare mantenendo fissi i propri parametri.

La sintonizzazione automatica fornisce così ad un sistema di controllo la prestazione aggiuntiva di una procedura automatica di modellizzazione del processo e la sintesi dei parametri del regolatore; di fatto elementi di questo tipo sono convenienti in un pacchetto per il controllo digitale diretto perché lo stesso algoritmo di autosintonizzazione può essere utilizzato da più anelli: se si considera che un buon algoritmo di autotuning richiede solo pochi kbyte di memoria si intuisce facilmente che è possibile ottenere sostanziali benefici ad un costo marginale. Gli algoritmi ST acquisiscono i dati durante il normale funzionamento dell'impianto modificando i parametri del controllore all'istante (sistemi di sintonizzazione online); negli algoritmi a sintonizzazione automatica, invece, si può ricorrere a schemi di sintonizzazione fuori linea (offline) in cui ingresso uscita dell'impianto sono osservati per un certo periodo di tempo in condizioni sperimentali particolari e solo in una seconda fase si realizza il regolatore. I regolatori disponibili sul mercato provvisti di capacità di sintonizzazione automatica sono basati sul controllo PID e possono essere classificati in diverse tipologie di sistemi: sistemi che si basano sulla risposta del processo da controllare a catena aperta (oppure a catena chiusa) con un regolatore non sintonizzato ad un segnale di ingresso; sistemi che si basano sull'impostazione di un ciclo limite controreazionando il processo da controllare con un relè; sistemi che corrispondono ad un vero e proprio sistema self-tuning con stima dei parametri di processo e successiva sintesi del regolatore.

Ogni classe presenta diverse varianti secondo, per esempio, il metodo di sintesi del regolatore oppure per l'algoritmo impiegato nella stima dei parametri o, più in generale, per la caratterizzazione dinamica del processo.

Nella prima classe di regolatori a sintonizzazione automatica normalmente si utilizza come riferimento la risposta al gradino del processo: la conoscenza dei valori caratteristici della risposta permette di ricavare i parametri del regolatore (seguendo, ad esempio, le regole del primo metodo Ziegler-Nichols); in alternativa si può impostare la sintesi del regolatore ottimizzando un indice di qualità (ad esempio l'ISE o l'ITAE) della risposta in funzione dei parametri del regolatore. La seconda classe di metodi può essere ricondotta al secondo metodo di Ziegler-Nichols: dalla conoscenza del guadagno critico e dal periodo dell'oscillazione permanente si ricava il valore dei parametri del regolatore; un metodo di sintesi alternativo è progettare il regolatore in modo tale da ottenere il margine di fase desiderato. La terza classe di metodi si riconduce alla teoria dei regolatori adattativi self-tuning nei quali gioca un ruolo fondamentale la fase di identificazione del processo da controllare. ■