Archive of SID

مجموعه مقالات
دهمین کنفرانس مهندسی پزشکی ایران

کنترل دمای کوره دندانپزشکی جهت تعقیب منحنی‌های دمایی مرجع با استفاده از یک روش پیش‌بین تطبیقی

علی امامی، دکتر علی فلاح
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی پزشکی، دانشیار دانشکده مهندسی پزشکی
دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده: کنترل کوره به دلیل دارا بودن دینامیک غیر خطی از درجه بالا و نیز تأخیر زیاد و متغیر این سیستم حرارتی، از دشواری زیادی برخوردار است. در بسیاری از کاربردهای صنعتی هدف از کنترل، تثبیت دما در یک مقدار مشخص می باشد، اما درکاربردهای خاص و پیشرفته صنعتی، نظیر صنایع پلیمریزاسیون یا شیشه سازی و ... هدف پیشبرد واکنشهای شیمیایی روی منحنی های مشخص دمایی است، بطوریکه دقت تعقیب این منحنی های دمایی با زمان ، در کیفیت محصول نهایی نقش کلیدی دارد.

برای گرم کردن کوره با شیب دلخواه همیشه می توان یک ورودی مشخص بدست آورد، اما شیب سرمایش آن در اختیار سیستم کنترل نمی باشد، زیرا تبادل حرارتی کوره با محیط اطراف ، عامل اصلی سردشدن آن است. این محدودیت ، از دیگر سرچشمه های دشواری کنترل سیستم است. از سوی دیگر چون شیب سرمایش کوره بسیار کمتر از شیب گرمایش آن است، هرگونه فراجهش در درجه حرارت کوره نسبت به مقدار مطلوب، به کندی از بین می رود و این بر دشواری کنترل می افزاید .

در این مقاله ، برای غلبه بر این مشکلات از یک کنترل کننده پیش‌بین تطبیقی استفاده شده است . پیش بینی برای غلبه بر تاخیر زیاد کوره لازم می‌باشد و انتخاب یک روش تطبیقی ، بدلیل دینامیک متغیر و غیرخطی کوره اجتناب ناپذیر است . این کنترل کننده توانسته است بادقت بسیار خوب منحنیهای حرارتی مرجع را دنبال نماید.در قسمت اول این مقاله ، مقدمه‌ای بر روشهای کنترل تطبیقی و روش بکارگرفته شده برای کنترل این کوره،ارائه شده است. در بخش دوم درباره تخمین و شناسایی سیستم به بحث پرداخته‌ایم.در قسمت سوم با استفاده از مدل بدست آمده برای سیستم به طراحی پیش‌بین و کنترل کننده تطبیقی برای سیستم پرداخته‌ایم و در بخش آخر نتایج آزمایشهای عملی ارائه شده و مقایسه‌ای بین آنها صورت گرفته است.

کلمات کلیدی: شناسایی ، پیش بینی، کنترل روی خط، کنترل تطبیقی ، کوره

www.SID.ir

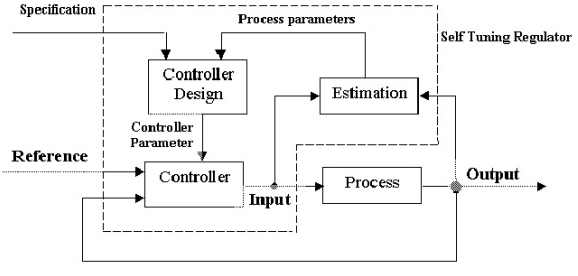
Archive of SID

۱) مقدمه :

روشـهای کنترل تطبیقی اصولاً برای برخورد با سیستم هایی به وجودآمد، که در شرایط مختلف کاری ، دینامیک متغیر دارند. تغییرات دینامیک سیستم در عمل منابع مختلفی می تواند داشته باشد و معمـولاً ترکیـبی از عوامـل مختـلف است. اما از آنجایی که بیشتر فرآیندهای صنعتی بسیار پیچیده هسـتند ، دلایل تغییرات آنها به طور کامل معلوم نیست. کوره مورد بحث ما و کوره‌های مورد استفاده در صـنایع مختـلف هـم از ایـن مسئله مستثنی نیستند. از طرف دیگر، بررسی کامل برای یافتن علل تغییـرات فرآیـند و محاسـبه آنها، نه ممکن است و نه اقتصادی . در چنین مواردی کنترل کننده های تطبیقی راه حلی مناسب برای مسئله هستند. یک کنترل کنندهٔ تطبیقی ، کنترلری است که می تواند در پاسـخ بـه تغییـرات دیـنامیک فرآیـند و مشخصـه های اغتشاشات، عملکرد خودش را اصلاح کند. بنابراین یک کنترل کنندهٔ تطبیقی ، کنترل کننده هوشمندی با پارامترهای قابل تنظیم است و دارای مکانیـزمی بـرای تـنظیم این پارامترها می‌باشد.خصوصیت بارز چنین کنترل کننده‌هایی این است که نیازی به مدل دقیق سیستم ندارند .

کنترل کننده های تطبیقی با ساختارهای مختلفی وجود دارند که موارد زیر از آن جمله‌اند :

- کنترل کنندهٔ تطبیقی با تنظیم بهره (Gain Scheduling)
- سیستم های تطبیقی مدل مرجع (MRAS : Model Reference Adaptive System)
- رگولاتورهای خود تنظیم (STR : Self Tuning Regulator)



شکل ۱) بلوک دیاگرام یک سیستم رگولاتور خودتنظیم

برای طراحی و ساخت Tracker دما در این کار از روش سوم استفاده کرده‌ایم . در این روش ابتدا پارامترهای فرآیند تخمین زده شده و سپس پارامترهای کنترلر از حل یک مسئله طراحی با استفاده از پارامـترهای تخمیـن زده شـدهٔ فرآیـند بدسـت مـی آیـند . بـلوک دیاگـرام چـنین سیسـتمی ، در شـکل (۱) قـابل رؤیـت اسـت. حـلقه خـارجی کـه شـامل تخمیـنگر بازگشـتی پارامـترها (Recursive Parameter Stimator) و بـلوک محاسـبات طـراحی است، پارامترهای کنترلر را تنظیم

www.SID.ir

Archive of SID

مـی کـند. یـک تـلقی ممکـن از ایـن سیسـتم ، مدلسـازی و طـراحی خودکار است. به روز در آمدن پارامـترهای کنـترل کنـنده در هر دورهٔ نمونه برداری ، به نحوی صورت می گیرد که به رفتار مطلوب حلقه بسته سیستم برسیم.

تذکـر این نکته لازم است که در صورتیکه قادر باشیم مدلسازی فرآیند را به نحوی انجام دهیم که بر اساس پارامترهای کنترل کننده باشد ، به روش مستقیم STR دست پیدا کرده ایم و با حذف بلوک طـراحی ، حجـم محاسـبات کـاهش مـی یـابد. امـا در ایـن کار ما از روش STR غیر مستقیم مطابق شکل ۱ استفاده کرده‌ایم .

۲) تخمین و شناسایی سیستم

هر عملیات شناسایی شامل مراحل زیر می باشد :

انـتخاب سـاختار مناسب برای مدل سیستم ، مانند مدلهای ARMA ، DARMA ، ARMAX ، FIR و...

طراحی آزمایش و تولید ورودیهای مناسب (مانند پله، شیب، PRBS و...) برای شناسایی مناسب سیستم

تخمین پارامترها با استفاده از معیارهایی مانند حداقل مربعات

از آنجـایی کـه کـوره، یـک سیسـتم حـرارتی با تأخیر زیاد می‌باشد، از یک مدل DARMA برای آن استفاده کرده‌ایم :

$$\frac{y}{u} = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} = \frac{q^{-d}\cdot B'(q^{-1})}{A(q^{-1})} \qquad (1)$$

$$B'(q^{-1}) = b_0 + b_1\cdot q^{-1} + \ldots + b_m\cdot q^{-m} \qquad (2)$$

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1\cdot q^{-1} + \ldots + a_k\cdot q^{-k} \qquad (3)$$

در ایـن مدل ، ابتدا باید اندازهٔ تأخیر(d) را تخمین بزنیم. این کار با استفاده از منحنی های حلقه بـاز سیسـتم انجـام گرفت. از روی این منحنی ها دیده می شود که با روشن کردن کوره، حدود ۱۰۰ ثانیـه طول می کشد تا دمای کوره در محل سنسور (خروجی سیستم) شروع به افزایش کند. بنابراین با داشتن تأخیر(τ=۱۰۰s) و پریود نمونه برداری (T=۱۰ s)، $d = \frac{\tau}{T} = 10$ می‌شود . همانطور که می دانیـم تأخیـر سیسـتم، مقـدار ثابـتی ندارد و با افزایش دمای کوره زیاد می شود، ولی بهر حال اندازه تأخیر در هر درجه حرارت نزدیک زمان فوق بوده و همین مقدار به سادگی به عنوان تأخیر سیستم در نظـر گرفـته مـی‌شـود. از طرف دیگر چون مدل سیستم و عملیات کنترلی که بر اساس آن صورت می‌گیرد، به مقدار دقیق d حساس نیست، مشکلی پیش نمی آید

www.SID.ir

Archive of SID

اکنون باید با استفاده از یک روش شناسایی ضرایب صورت و مخرج را تخمین بزنیم. طی فرآیند شناسایی درجهٔ مدل (m و k) را آنقدر تغییر می دهیم تا به یک مدل نسبتاً خوب برسیم. برای شناسایی سیستمها دو روش روی خط(On-Line) و خارج خط (Off-Line) وجود دارد. از آنجایی که کوره یک سیستم غیر خطی و متغیر با شرایط است و با تغییر جنس و مقدار مواد داخل کوره، دینامیک و تأخیر آن تغییر می کند ، لازم است که در حین عملیات کنترل و در هر نقطهٔ دمایی مدل سیستم و مقدار ضرایب آن مجدداً شناسایی شوند و شناسایی خارج خط با استفاده از یک مدل خطی ثابت به درد ما نمی خورد . بنابراین قابل قبول است که در اکثر کاربردها، شناسایی روی خط یکی از اجزای بلوک کنترل تطبیقی باشد.

به لحاظ تئوری می توان ادعا کرد که با اعمال یک ورودی مناسب به کوره می توان، با استفاده از روش شناسایی روی خط، مدلی مناسب در هر درجه حرارت بدست آورد. اما در عمل پیاده سازی این تئوری با مشکل مواجه است، زیرا با فرض آنکه تولید سیگنال ورودی مناسب ساده باشد، اعمال آن در بیشتر مواقع ممکن نیست. در کوره مورد نظر ورودی منفی، مفهوم فیزیکی ندارد و در عین حال شیب منفی سرمایشی آن بسیار کم می باشد. (چون کوره از طریق مبادله حرارتی با محیط سرد می‌شود) بنابراین هنگامیکه درحال کنترل درجه حرارت کوره هستیم، اعمال ورودی که موجب تغییر محسوس خروجی آن شود، علاوه بر کاستن از دقت کنترل،منتهی به قطع ورودی کوره به مدت طولانی میگردد. لذا به کار بردن روش شناسایی روی خط همزمان با کنترل درجهٔ حرارت آن منجر به بدست آوردن یک مدل مناسب برای کوره نخواهد شد. با استفاده از این روش فقط هنگامی می توان به یک مدل مناسب از سیستم دست یافت، که بتوان از کنترل همزمان با شناسایی صرفنظرکرد و به عبارت دیگر فقط شناسایی سیستم مورد نیاز باشد! این مسئله اگر چه از طرفی نقض غرض به نظر می آید، اما از آنجا که برای پیشگویی وضعیت سیستم و کنترل آن همانطور که در فصل آینده خواهید دید، به مدل دقیقی از سیستم نیاز نداریم، در پروسه کنترل مورد نظر ما خللی وارد نمی شود.

با در نظر گرفتن مدل ارائه شده برای کوره به شکلی که در روابط ۱ و ۲ و ۳ بیان شد، اگر بردار ضرایب θ و بردار رگرسیون φ را به شکل زیر تعریف کنیم:

$$\theta^T = \left[a_1, a_2, \dots, a_k, b_0, b_1, \dots, b_m\right] \qquad (4)$$

$$\phi^T(t-1) = \left[-y(t-1), -y(t-2), \dots, -y(t-k), u(t-d), \dots, u(t-d-m)\right]$$

داریم:

$$y(t) = \phi^T(t-1)\cdot\theta \qquad (5)$$

www.SID.ir

Archive of SID

$y(t)$ بدست آمده از این رابطه ، برآورد مدل از مقدار خروجی در لحظهٔ t می باشد.

حال برای شناسایی پارامترهای مدل سیستم، در رابطه (۱) از روش حداقل مربعات بازگشتی استفاده می کنیم. معادلات حاکم بر الگوریتم شناسایی از حداقل سازی معیار حداقل مربعات زیر بدست آمده اند:

$$V(\theta,t)=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{t}\lambda^{t-i}\cdot\left[y(i)-\phi^{T}(i-1)\cdot\theta\right]^{2} \qquad (6)$$

λ ضریب فراموشی نام دارد و یک ضریب کوچکتر از یک است که به داده های نزدیکتر به زمان حاضر وزن بیشتری برای شناسایی پارامترها می دهد. معادلات بدست آمده عبارتند از:

$$\hat{\theta}(t)=\hat{\theta}(t-1)+K(t)\cdot\left[y(t)-\phi^{T}(t-1)\cdot\hat{\theta}(t-1)\right]$$

$$K(t)=P(t-1)\cdot\phi(t-1)\cdot\left[\lambda+\phi^{T}(t-1)\cdot P(t-1)\cdot\phi(t-1)\right]^{-1}$$

$$P(t)=\left[I-K(t)\cdot\phi^{T}(t-1)\right]\frac{P(t-1)}{\lambda} \qquad (7)$$

که در آن :

$$\hat{\theta}(t)=\left(\hat{a}_1,\hat{a}_2,\ldots,\hat{a}_k,\hat{b}_0,\hat{b}_1,\ldots,\hat{b}_m\right)^{T}$$

برآوردی از پارامترهای مدل تا زمان حاضر است.

ضریب فراموشی λ از نوع متغیر با تغییرات نمایی است و با رابطه $\lambda=1-ae^{-bt}$ داده می شود، که در آن $a=1-\min(\lambda)$ و $b>0$ و مقدار λ از ۰/۸ شروع می شود. همچنین $P(0)=10^{4}\cdot I$ انتخاب شده است.

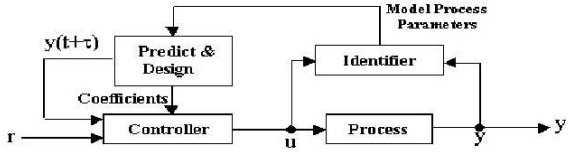
۳) پیش بین و کنترل‌کنندهٔ تطبیقی

همانطور که گفتیم، کوره سیستمی تأخیر دار و غیر خطی است. مقدار بزرگ تأخیر، یکی از مشکلات در کنترل درجه حرارت آنرا بوجود آورده است. اگر بتوانیم به نحوی اثر تأخیر را بر سیگنال برگشتی حذف نمائیم، قادر به ساختن سیگنال خطای صحیح خواهیم بود. بعبارت دیگر چون اثر ورودی که هم اینک به کوره اعمال می شود، پس از مدت زمان قابل ملاحظه ای در خروجی آن ظاهر میگردد، چنانچه بخواهیم بر اساس خروجی مربوط به ورودی در این زمان، سیگنال ورودی زمان بعد را بسازیم، باید به طریقی خروجی آنرا پیش بینی نمائیم . نتیجهٔ کنترل به صحت پیش بینی و

www.SID.ir

Archive of SID

نـوع کنـترل کننده بستگی دارد . نیاز به یک پیش بین خوب و در دست نبودن مدل فرآیند، ما را به سـمت کنـترل تطـبیقی بـرد. بدیـن تـرتیب در بـلوک طراحی ، پیش بین قرار گرفت. بلوک دیاگرام سیستم کنترلی بدست آمده را در شکل(۲) مشاهده می کنید.



شکل ۲) نمای بلوکی سیستم کنترل تطبیقی با پیش بین

بـنابراین اسـتراتژی کنـترلی، سـازمان دادن یک پیش بین تطبیقی است تا با کمک آن بتوانیم اثر تأخیر سیستم را حذف نمائیم. برای پیش‌بینی خروجیهای آینده سیستم از لم زیر استفاده می‌کنیم .

لـم : بـا در نظـر گرفـتن مدل رابطه (۱) برای سیستم ، خروجی سیستم در لحظهٔ $(t+d)$ توسط رابطهٔ پیش بین زیر بیان می‌شود

$$y(t+d)=\alpha\left(q^{-1}\right)\cdot y(t)+\beta\left(q^{-1}\right)\cdot u(t) \qquad (8)$$

$$\alpha\left(q^{-1}\right)=G\left(q^{-1}\right) \qquad \beta\left(q^{-1}\right)=F\left(q^{-1}\right)\cdot B\left(q^{-1}\right)$$

F و G چند جمله ایهای منحصر بفردی هستند که از معادلات تابعی زیر بدست می آیند:

$$F\left(q^{-1}\right)\,A\left(q^{-1}\right)+q^{-d}\,G\left(q^{-1}\right)=1 \qquad (9)$$

$$\begin{cases} F\left(q^{-1}\right)=1+f_1\cdot q^{-1}+\ldots+f_{d-1}\cdot q^{-d+1} \\ G\left(q^{-1}\right)=g_0+g_1\cdot q^{-1}+\ldots+g_{n-1}\cdot q^{-n+1} \end{cases} \qquad (10)$$

با حل معادلهٔ (۹) ضرایب F و G به ترتیب زیر بدست می آیند:

$$f_0=1\ ,\ f_i=-\sum_{j=0}^{i-1} f_j\,a_{i-j} \qquad i=1,\ldots,(d-1) \qquad (11)$$

$$g_i=-\sum_{j=0}^{d-1} f_j\,a_{i+d-j} \qquad i=0,\ \ldots,(n-1) \qquad (12)$$

www.SID.ir

Archive of SID

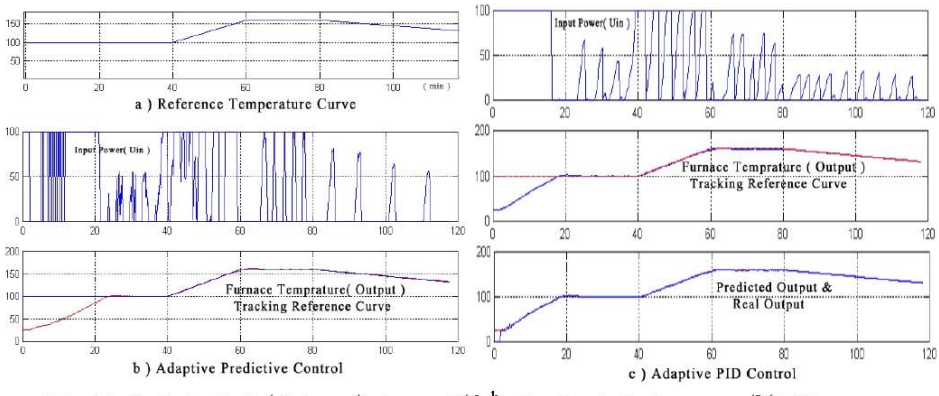
در روابط فوق هرگاه جملات $a_{n+1}, a_{n+2}, \cdots$ ظاهر گردید، به جای آنها صفر قرار می دهیم.

۴) آزمایش و نتیجه‌گیری :

هدف ما از کنترل سیستم این است که دمای کوره مطابق یک منحنی مرجع مثل شکل (۳-a) تغییر کند . برای کنترل سیستم دو نوع استراتژی در پیش گرفته‌ایم. در یک سیستم کنترل ، ابتدا با استفاده از پیش بین اثر تأخیر در سیستم را از بین برده ایم (از $y(t+\tau)$ پیش‌بینی شده به عنوان فیدبک استفاده کرده‌ایم) سپس با یک کنترل کنندهٔ PID تطبیقی ، به کنترل سیستم پرداخته‌ایم.نتایج پیاده‌سازی این الگوریتم کنترلی را در شکل (۳-c) مشاهده می‌کنید. در روش دوم از قوانین کنترل پیش بین ، برای کنترل سیستم استفاده کرده ایم، به عبارت دیگر در این حالت کنترلر، یک کنترل کننده پیش بین تطبیقی با قانون زیر می‌باشد:

$$y(t+d) = \alpha\left(q^{-1}\right)\cdot y(t) + \beta\left(q^{-1}\right)\cdot u(t) = r(t+d) \qquad (13)$$

نتایج اعمال این روش کنترل به کوره در شکل (۳-b) دیده می‌شود.



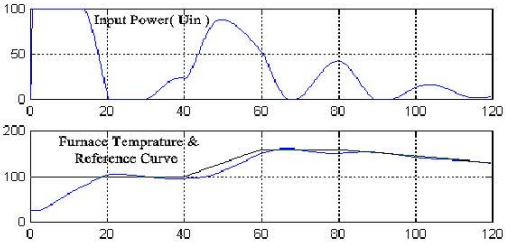
شکل ۳) a منحنی مرجع تغییرات دمایی مطلوب کوره b و c) توان ورودی کوره(خروجی کنترلر)و تغییرات دمایی کوره که حاصل عملیات کنترل می‌باشد

همانطور که می‌بینید در هر دو روش نتایج کنترل مطلوب و قابل قبول است. البته در روش اول (شکل c) تغییرات ورودی کنترل کمتر و هموارتر بوده و از این جهت مطلوبتر است .برای بررسی چگونگی پاسخها و کیفیت عمل کنترل ، نتایج را با نتیجه یک کنترل کننده PID معمولی (بدون

www.SID.ir

Archive of SID

استفاده از تکنیک پیش‌بینی) ، مقایسه کرده‌ایم.منحنی‌های مربوط به خروجی سیستم و ورودی به آن که خروجی کنترل‌کننده PID است ، در شکل زیر نمایش داده شده است :



شکل ۴) توان ورودی به کوره ، منحنی مرجع و خروجی واقعی کوره که با یک PID معمولی بدست آمده است.

خطای حاصل از عملیات کنترل در شکل ۴ (PID معمولی) به ۲۰ درجه هم میرسد،اما با استفاده از دو روش پیش‌بین تطبیقی بکارگرفته شده که در شکل ۳ نتایج آن را مشاهده می‌کنید، خطا به کمتر از ۲ درجه رسیده است . یعنی دقت کنترل علیرغم تاخیر بزرگ سیستم و غیرخطی بودن آن بهبود قابل توجهی یافته است .

مراجع :

[1] پایان نامه کارشناسی ارشد، علی امامی ، دکتر علی فلاح، "کنترل دمای کوره دندانپزشکی برای حرکت روی مسیر یک منحنی با بکارگیری یک الگوریتم پیش‌بین تطبیقی" ، ۱۳۷۸.
[2] Karl J. Astrom, Bjorn wittenmark, "Adaptive Control " , Addison- wesley,1989
[3]G.C.Goodwin, K.S.Sin, "Adaptive Filtering, Prediction and Control" ,Prentice–Hall, 1984.

www.SID.ir