



سمینار مربوط به درس سیستم‌های کنترل تطبیقی

تنظیم پارامترهای کنترل پیش‌بین

استاد درس: دکتر علی خاکی صدیق

ارائه دهنده: پیمان باقری کلجاهی

بهار ۱۳۹۳



مقدمه

۱

معرفی خانواده کنترل کننده های پیش بین

۲

پارامترهای قابل تنظیم کنترل کننده های پیش بین

۳

تنظیم تحلیلی پارامترهای کنترل پیش بین SISO

۴



کنترل پیش بین مبتنی بر مدل

- ✓ کنترل پیش بین مبتنی بر مدل پرکاربردترین روش کنترل فرآیند پیشرفته صنعتی
- ✓ کاربردهای بسیار موفق در صنایع مختلف، از قبیل صنایع شیمیایی، نفت و پتروشیمی، صنایع سبک و سنگین

مساله‌ی تنظیم پارامترهای کنترل کننده

- ✓ شرط دستیابی به عملکرد مطلوب سیستم کنترلی

کنترل کننده های چندمتغیره

- ✓ ماهیت چند ورودی- چند خروجی سیستم های واقعی و وجود تداخل

مساله تنظیم پارامترهای کنترل پیش بین چندمتغیره



پارامترهای قابل تنظیم کنترل کننده پیش بین

✓ زمان نمونه برداری (T_s)

✓ افق پیش بینی (P) و یا حد بالا و پایین افق پیش بینی (N_1, N_2)

✓ افق کنترل (M)

✓ افق مدل (N) برای کنترل ماتریس دینامیکی

✓ ضریب یا ماتریس های وزنی در تابع هزینه (λ) برای حالت تک ورودی- تک خروجی، (Γ, Λ)
برای حالت چند ورودی- چند خروجی

✓ قطب فیلتر نرم کننده ی ورودی مرجع (α)



دسته بندی روش های تنظیم پارامترهای کنترل کننده پیش بین

➤ روش های متفرقه تنظیم

❑ روش های تجربی بر اساس سعی و خطا

❑ روش های تنظیم با در نظر گرفتن سیستم های خاص

❑ روش های تنظیم برای کنترل کننده های پیش بین خاص و یا پارامترهای خاص

➤ تنظیم بر پایه روش های عددی و محاسبات نرم

➤ فرمول های بسته تنظیم

❑ تنظیم مبتنی بر روش های تجربی

❑ روش های تنظیم بر پایه های نظری

✓ روش های آماری

✓ روش های تحلیلی



چند مطالعه جامع در ارتباط با روش های تنظیم

- روش های تنظیم ارائه شده از سال ۱۹۸۰ تا سال ۱۹۹۴ در [۱]،
 - بررسی روش های تنظیم جدیدتر تا سال ۲۰۰۹ در [۲]،
 - روش های تنظیم ارائه شده برای کنترل ماتریس دینامیکی در [۳]،
 - بررسی روش های تنظیم جدیدتر تا سال ۲۰۱۴ در [۴]،
- تاکید بیشتر بر روش های تنظیمی است که فرمول های بسته برای پارامترهای قابل تنظیم ارائه کرده اند

- [1] K. Y. Rani and H. Unbehauen, "Study of Predictive Controller Tuning Methods", *Automatica*, Vol. 33, (12), pp. 2243–2248, **1997**.
- [2] L. Garriga and M. Soroush, "Model Predictive Control Tuning Methods: A Review", *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 49, pp. 3505–3515, **2010**.
- [3] R.D. Kokate, L.M. Waghmare, S.D. Deshmukh, "Review of Tuning Methods of DMC and Performance Evaluation with PID Algorithms on a FOPDT Model," In Proc. of International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing (ARTCom), pp. 71-75, 2010.
- [4] پیمان باقری، علی خاکی صدیق، "بررسی روش های تنظیم پارامترهای کنترل کننده های پیش بین و راهکارهای نوین تنظیم"، ارسال شده به مجله کنترل، اردیبهشت ۱۳۹۳.



کنترل پیش بین مبتنی بر مدل

کنترل پیش بین مبتنی بر مدل به یک روش کنترلی یکتا اشاره ندارد

به دسته بزرگی از روش های کنترلی اطلاق می شود
که در آن ها روند زیر اجرا می شود:

- ✓ پیش بینی رفتار آینده سیستم در طول افق پیش بین با استفاده از مدلی که برای فرآیند در نظر گرفته شده است
- ✓ تعریف یک تابع معیار به عنوان هدف بهینه سازی
- ✓ بهینه سازی تابع معیار با استفاده از مدل پیش بین به منظور به دست آوردن سیگنال های کنترلی بهینه در طول افق کنترل
- ✓ اعمال اولین سیگنال کنترلی بهینه در طول افق کنترل و اجرای مجدد همین روند



کنترل پیش بین مبتنی بر مدل

- ✓ کنترل پیش بین خطی
- ✓ کنترل پیش بین غیر خطی
- ✓ کنترل پیش بین مقید
- ✓ کنترل ماتریس دینامیکی
- ✓ کنترل پیش بین تعمیم یافته
- ✓ کنترل پیش بین در فضای حالت
- ✓ کنترل پیش بین ساده شده



کنترل پیش بین مبتنی بر مدل

□ ویژگی ها و قابلیت های مهم کنترل کننده های پیش بین

- ✓ حل مسئله ی قید
- ✓ برخورد روشمند و مهندسی با مساله تاخیر و قابلیت جبران کامل آن
- ✓ قابلیت اعمال به طیف وسیعی از سیستم های خطی و غیرخطی، می نیمم فاز و غیر می نیمم فاز، پایدار و ناپایدار
- ✓ توانایی کنترل سیستم های چندمتغیره بدون پیچیدگی زیاد، کنترل متمرکز سیستم های با تداخل بالا
- ✓ استفاده از اطلاعات مسیر ورودی مرجع در زمان آینده برای مقابله با لختی و دینامیک کند سیستم
- ✓ امکان استفاده از اطلاعات اغتشاش در آینده



پارامترهای قابل تنظیم کنترل کننده پیش بین

زمان نمونه برداری

گسسته سازی مناسب سیستم

- زمان نمونه برداری کوچک: حجم محاسباتی بالا
- زمان نمونه برداری بزرگ: از دست دادن بخشی از دینامیک سیستم

افق پیش بینی

شامل دینامیک سیستم

- افق پیش بینی بزرگ پایداری بیشتری را برای سیستم حلقه بسته در بر خواهد داشت — ایده ی افق پیش بینی بی نهایت — کنترل کننده پیش بین پایدار
- مقدار بزرگ برای حد پایین افق پیش بینی — بی اهمیت بودن خطا در زمان های اولیه — کند شدن پاسخ در حالت گذرا
- حداقل مقدار برای حد پایین: زمان تاخیر سیستم
- حداکثر مقدار برای حد بالا: زمان نشست سیستم حلقه

افق مدل

برای کنترل ماتریس دینامیکی

- پاسخ پله تقریباً به حالت ماندگار رسیده باشد



پارامترهای قابل تنظیم کنترل کننده پیش بین

افق کنترل

- حد بالا: برابر حد بالای افق پیش بینی
 - حد پایین: برای سیستم پایدار ۱ است
 - عملکرد مطلوب با یک درجه آزادی قابل حصول نیست
- درجه آزادی سیستم کنترلی

ضریب یا ماتریس های وزنی

- ضریب وزنی در حالت SISO و ماتریس های وزنی در حالت MIMO
 - نقش دوگانه آن
 - در این رساله تمرکز بیشتر روی این ماتریس ها می باشد
- موثرتر نسبت به بقیه پارامترهای قابل تنظیم

قطب فیلتر نرم کننده ورودی مرجع

- کاهش تلاش کنترلی در لحظات اولیه اعمال ورودی مرجع با نرم تر شدن ورودی
- محدود کردن تغییرات سیگنال کنترلی به مانند ضریب وزنی



تنظیم تحلیلی کنترل کننده پیش بین SISO

مدل مد نظر برای تولید پیش بینی ها

$$G_m(s) = \frac{k_p e^{-\theta s}}{\tau s + 1}$$

○ مدل مرتبه اول با تاخیر

$$G_m(z^{-1}) = \frac{k_p(1-a)z^{-k-1}}{1-az^{-1}}$$

○ صورت گسسته شده مدل

$$a = e^{-T_s/\tau} \quad k = \theta/T_s$$

$$\Delta = 1 - z^{-1}$$

افزودن انتگرال گیر به مدل
برای تضمین حذف خطای
حالت ماندگار

- [1] P. Bagheri, A. Khaki Sedigh, "Analytical approach to tuning of model predictive control for first-order plus dead time models," *IET Control Theory & Applications*, Vol. 7, No. 14, pp. 1806-1817, 2013.



تنظیم تحلیلی کنترل کننده پیش بین SISO

$$\mathbf{x}(n+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(n) + \mathbf{B}\Delta\mathbf{u}(n)$$

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{C}\mathbf{x}(n)$$

پیش بینی خروجی در
طول افق

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{F}\mathbf{x}(n) + \mathbf{S}\Delta\mathbf{u}(n)$$

$$\mathbf{y}(n) = \begin{bmatrix} \hat{y}(n+N_1|n) \\ \hat{y}(n+N_1+1|n) \\ \vdots \\ \hat{y}(n+N_2|n) \end{bmatrix}_{P \times 1}$$

$$\Delta\mathbf{u}(n) = \begin{bmatrix} \Delta u(n) \\ \Delta u(n+1) \\ \vdots \\ \Delta u(n+M-1) \end{bmatrix}_{M \times 1}$$

- [1] P. Bagheri, A. Khaki Sedigh, "Analytical approach to tuning of model predictive control for first-order plus dead time models," *IET Control Theory & Applications*, Vol. 7, No. 14, pp. 1806-1817, 2013.



تنظیم تحلیلی کنترل کننده پیش بین SISO

پیش بینی خروجی در
طول افق

$$F = \begin{bmatrix} CA^{k+1} \\ CA^{k+2} \\ \vdots \\ CA^{k+P} \end{bmatrix}_{P \times (k+2)},$$

$$S = \begin{bmatrix} CA^k B & 0 & 0 & 0 \\ CA^{k+1} B & CA^k B & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{k+P-1} B & CA^{k+P-2} B & \dots & CA^{k+P-M} B \end{bmatrix}_{P \times M}$$

$$\hat{y}(n+k) = a^k y_m(n) + k_p(1-a)(a^{k-1}u(n-k) + \dots \\ + au(n-2) + u(n-1)) + d(n)$$

$$d(n) = y_p(n) - y_m(n)$$

[1] P. Bagheri, A. Khaki Sedigh, "Analytical approach to tuning of model predictive control for first-order plus dead time models," *IET Control Theory & Applications*, Vol. 7, No. 14, pp. 1806-1817, 2013.



تنظیم تحلیلی کنترل کننده پیش بین SISO

تابع معیار مد نظر

$$\min_{u(n)} (\mathbf{w}(n) - \mathbf{y}(n))^T \mathbf{Q} (\mathbf{w}(n) - \mathbf{y}(n)) + (\Delta \mathbf{u}(n))^T \mathbf{R} (\Delta \mathbf{u}(n))$$

$$\text{s.t. } u_{\min} \leq u(n + i|n) \leq u_{\max}, \quad i = 0, 1, \dots, M - 1$$

$$y_{\min} \leq \hat{y}(n + j|n) \leq y_{\max}, \quad j = N_1, N_1 + 1, \dots, N_2$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & q_2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & q_P \end{bmatrix}_{P \times P} \quad \mathbf{R} = k_p^2 (1 - a)^2 \begin{bmatrix} r_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & r_2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & r_M \end{bmatrix}_{M \times M}$$

$$\mathbf{w}(n) = \begin{bmatrix} w(n) \\ w(n) \\ \vdots \\ w(n) \end{bmatrix}_{P \times 1}$$

- [1] P. Bagheri, A. Khaki Sedigh, "Analytical approach to tuning of model predictive control for first-order plus dead time models," *IET Control Theory & Applications*, Vol. 7, No. 14, pp. 1806-1817, 2013.



تنظیم تحلیلی کنترل کننده پیش بین SISO

سیگنال کنترلی بهینه

$$\Delta \mathbf{u}(n) = \mathbf{K}_y (w(n) - \hat{y}(n+k)) - \mathbf{K}_x \Delta \hat{y}(n+k)$$

$$\mathbf{K}_x = \begin{bmatrix} K_{x1} \\ K_{x2} \\ \vdots \\ K_{xM} \end{bmatrix} = (\mathbf{R} + \mathbf{S}^T \mathbf{Q} \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^T \mathbf{Q} \mathbf{F}_{k+1}$$

$$\mathbf{K}_y = \begin{bmatrix} K_{y1} \\ K_{y2} \\ \vdots \\ K_{yM} \end{bmatrix} = (\mathbf{R} + \mathbf{S}^T \mathbf{Q} \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^T \mathbf{Q} \mathbf{1}_{P \times 1}$$

- [1] P. Bagheri, A. Khaki Sedigh, "Analytical approach to tuning of model predictive control for first-order plus dead time models," *IET Control Theory & Applications*, Vol. 7, No. 14, pp. 1806-1817, 2013.



تنظیم تحلیلی کنترل کننده پیش بین SISO

تابع تبدیل حلقه بسته

$$\Delta u(n) = K_{y1}(w(n) - \hat{y}(n+k)) - K_{x1}\Delta\hat{y}(n+k)$$

$$G_{cl}(z) = \frac{K'_{y1}}{z^{k-1}[z^2 + z(-1 - a + K'_{x1} + K'_{y1}) + (a - K'_{x1})]}$$

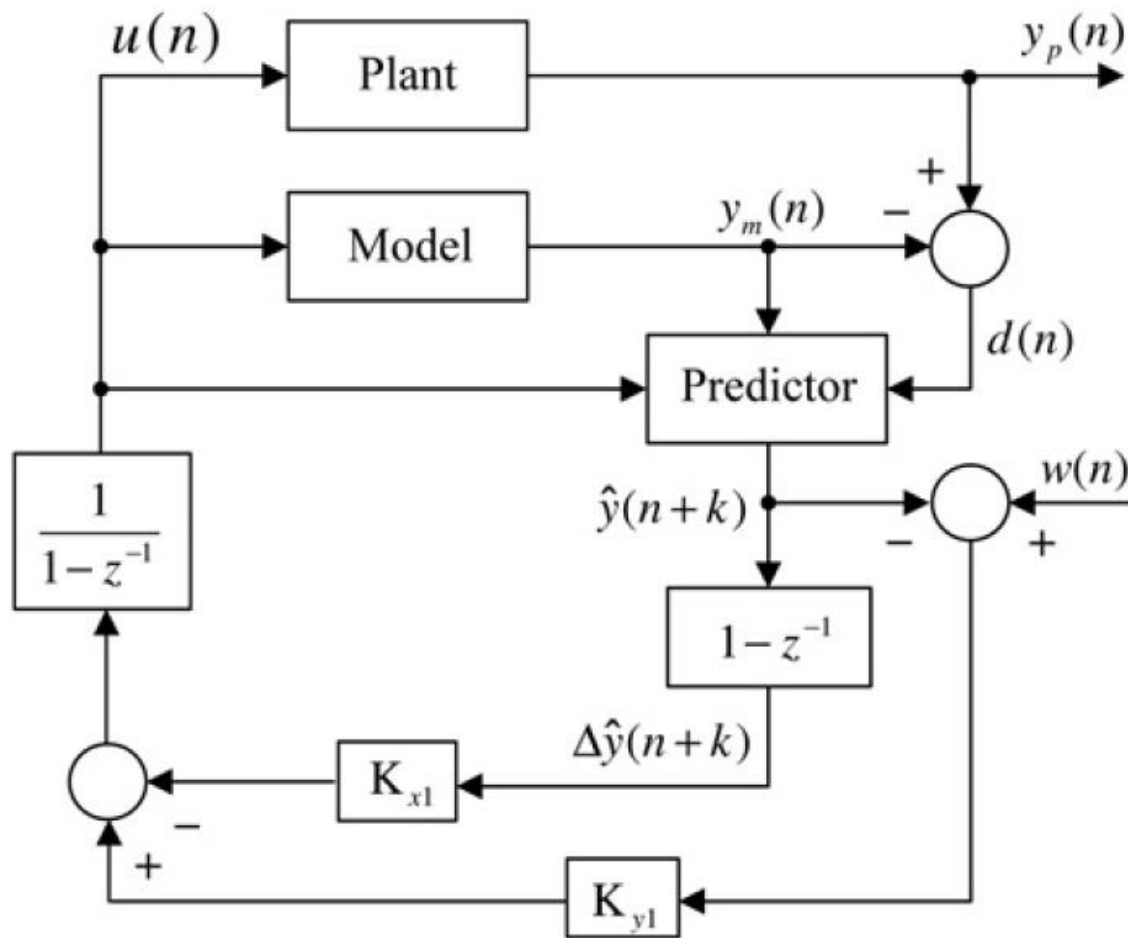
$$K'_{x1} = k_p(1 - a)K_{x1}, \quad K'_{y1} = k_p(1 - a)K_{y1}$$

- [1] P. Bagheri, A. Khaki Sedigh, “Analytical approach to tuning of model predictive control for first-order plus dead time models,” *IET Control Theory & Applications*, Vol. 7, No. 14, pp. 1806-1817, 2013.



تنظیم تحلیلی کنترل کننده پیش بین SISO

بلوک دیاگرام معادل



- [1] P. Bagheri, A. Khaki Sedigh, "Analytical approach to tuning of model predictive control for first-order plus dead time models," *IET Control Theory & Applications*, Vol. 7, No. 14, pp. 1806-1817, 2013.



تنظیم تحلیلی کنترل کننده پیش بین SISO

محدوده عملکردی سیستم حلقه بسته

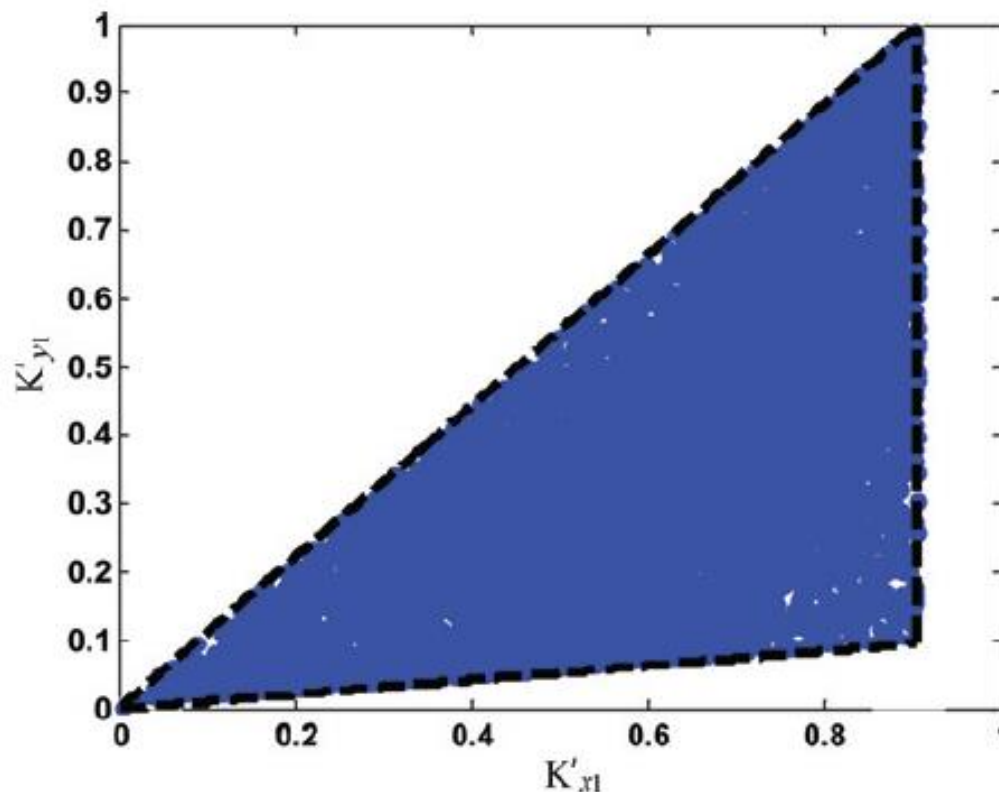


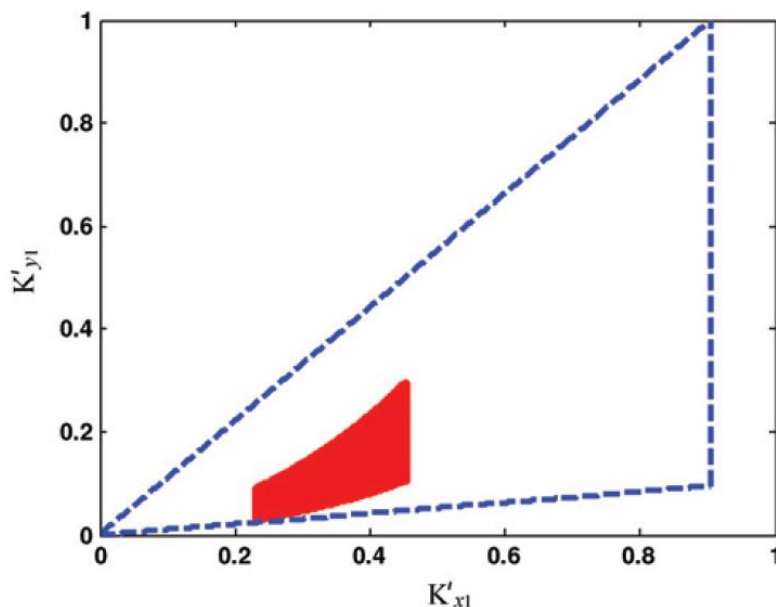
Fig. 3 Maximum feasibility area

- [1] P. Bagheri, A. Khaki Sedigh, "Analytical approach to tuning of model predictive control for first-order plus dead time models," *IET Control Theory & Applications*, Vol. 7, No. 14, pp. 1806-1817, 2013.



$$G_p(s) = G_m(s) = \frac{1.5e^{-4s}}{10s + 1}$$

$$T_s = 1 \text{ s} \longrightarrow G_p(z^{-1}) = G_m(z^{-1}) = \frac{0.1425z^{-5}}{1 - 0.905z^{-1}}$$



فراجهش کمتر از ۱۰٪ و زمان نشست بین
۱۴ تا ۲۴ ثانیه

$$K'_{xd1} = 0.3 \text{ and } K'_{yd1} = 0.1$$

Fig. 4 Desired and feasibility regions of the gains

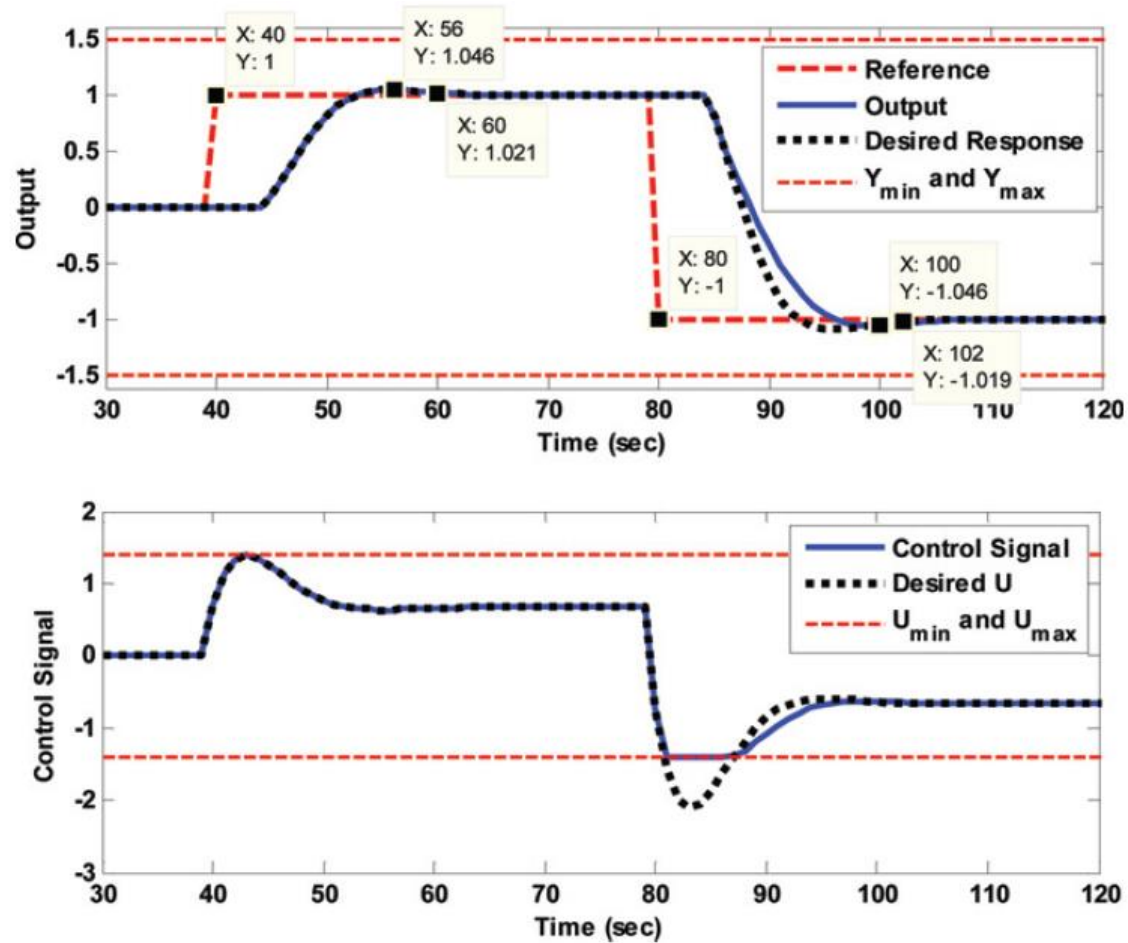


Fig.5 Closed-loop responses, dotted line: desired response



با تشکر

؟