مجله کنترل
ISSN 2008-8345
جلد ۴، شماره ۳، پاییز ۱۳۸۹، صفحه ۶۵-۵۶

طراحی فیلتر تشخیص خطا برای سیستم های LTI دارای نامعینی با استفاده از حداقل سازی نرم H_∞ خطا

حمید رنجبر، محمدعلی نکوئی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی – سیدخندان - تهران

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۸۹/۷/۱۲، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۸۹/۹/۲۷)

چکیده : تشخیص خطا مساله مهمی در حفظ عملکرد و امنیت یک فرآیند کنترل می‌باشد . روش های مختلفی برای تشخیص خطا در یک فرآیند وجود دارد . در این روشها علاوه بر مساله تشخیص خطا ، بحث قوام سیستم نسبت به نامعینی ها و اغتشاش نیز مهم خواهد بود ، در نتیجه باید مصالحه مناسبی بین حساسیت سیستم به خطا و قوام سیستم وجود داشته باشد . یکی از روش های پیشنهادی بر اساس تبدیل مساله تشخیص خطای مقاوم به یک مساله استاندارد H_∞ تطابق مدل می‌باشد . در این مقاله ابتدا یک مدل مرجع مناسب از لحاظ تشخیص خطای مقاوم انتخاب شده سپس یک فیلتر تشخیص خطا به صورت یک مولد مانده بر اساس مینیمم سازی نرم H_∞ اختلاف بین مدل مرجع و مولد واقعی مانده با استفاده از ابزار LMI طراحی می‌شود و در انتها با یک مثال طراحی موثر بودن روش توجیه می‌شود.

کلمات کلیدی : تشخیص مقاوم خطا ، خطای مدلسازی ، مدل مرجع ، LMI

Fault Detection Filter Design for Uncertain LTI Systems using H_∞ Norm Error Minimization

Hamid Ranjbar, Mohammad Ali Nekoui

Abstract: Due to the importance of fault detection in maintaining the performance and immunity of control process, various methods have been proposed where as well as fault detection, the robustness of the system with respect to uncertainty and disturbance has been also discussed. In this regard a compromise between error sesitivity of the system and its robustness should be considered. One of the proposed methods is based on transformation of robust fault detection problem to a standard H_∞ model-matching one. In this paper after the selection of a proper reference model for the robust fault detection problem, a residual generator will be considered on the basis of an H_∞ minimization of the difference between reference model the realastic residual generator using LMI technics. A design example has been chosen to demonstrate the effectiveness of the proposed approach.

Keywords : Robust Fault Detection, Modelling Error, LMI

۱- مقدمه

تشخیص خطای مبتنی بر مدل در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه واقع شده است[۱,۲,۳,۴]. در تشخیص خطای مبنی بر مدل، هدف، طراحی مکانیزم تولید سیگنالی است که آشکار سازی سیگنال‌های خطا را بر عهده دارد. این امر بر اساس دانشی از مدل سیستم استوار بوده که نهایتا منجر به تولید سیگنال مانده می‌شود[1,3]. یکی از روش‌های بسیار کاربردی و مورد مطالعه، تکنیک فیلتر تشخیص خطای مبنی بر رویتگر می‌باشد[۵]. این روش علاوه بر سادگی پیاده سازی، در تشخیص انواع

نویسنده عهده دار مکاتبات: محمدعلی نکوئی

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.3.5.7]

خطاهای ممکنه بسیار مناسب عمل می‌کند. از آنجا که اغتشاشات معلوم و نامعلوم و نویز برای بسیاری از سیستمهای عملی اجتناب ناپذیر می‌باشد، در هر نوع طراحی فیلتر تشخیص خطا، در نظر گرفتن این اثرات ضروری می‌نماید. بر این اساس در فرآیند طراحی منطقی است که مصالحه‌ای میان حساسیت به خطا و قوام سیستم به ورودی نامعلوم برقرار شود.

برای تولید مانده در سیستم‌هایی که علاوه بر ورودی نامعلوم در آنها نامعینی در مدلسازی نیز مطرح است، هدف اصلی بالا بردن قوام سیگنال مانده نسبت به ورودی نامعلوم و همچنین نامعینی‌های مدلسازی است. بدیهی است که افزایش حساسیت سیستم مولد مانده نسبت به خطا نیز باید مدنظر قرار گیرد.

نامعینی مدلسازی به فرم‌های متفاوتی بیان می‌شود که به فراخور نوع تعریف از آن، روش خاصی در تولید مانده در این سیستم‌ها مطرح می‌شود. بر خلاف روش‌های متنوع تولید مانده در حضور ورودی نامعلوم، در حالت کلی روش مدون و مشخصی برای تولید مانده درحضور نامعینی وجود ندارد.[۶] یکی از ایده‌های بکار گرفته شده به منظور حذف اثر نامعینی مدلسازی، تبدیل این مورد به صورت ورودی نامعلوم می‌باشد که به دلیل سهولت استفاده متداولی یافت.[۷] ولی این روش معایب خاص خود را داشت. در واقع شناختن نامعینی مدلسازی به عنوان ورودی نامعلوم سبب انحراف در طراحی مولد مانده می‌شود. چرا که، سبب بی اثر شدن اطلاعات ساختار نامعینی در روند طراحی شده و این معلومات به هیچ وجه در نظر گرفته نمی‌شوند. ثانیا اثراتی از خطا در ورودی نامعلوم بروز میابد که ضمن مقاوم سازی مانده نسبت به ورودی نامعلوم، این اثرات حذف می‌شوند.[6]

روش بهینه و مناسب‌تر که برای اولین بار به منظور سیستم تشخیص خطا در [۹,۸] بکار گرفته شد، ایده استفاده از مدل مرجع بود.

در روش مدل مرجع، مساله اصلی طراحی سیستم FDI [1]، تبدیل به یک مساله استاندارد طراحی مانند:

$$\min_{L,R(s)} \quad \sup_{u,f,d} \frac{\left\|r_{ref}-r\right\|_2}{\left\|\begin{bmatrix} u \\ d \\ f \end{bmatrix}\right\|_2}$$

می‌شود[1]. در استفاده از این روش به منظور طراحی سیستم FDI، مدلی مطلوب همانند:

$$r_{ref}(s)=f(s) \quad or \quad r_{ref}=W(s)f(s) \qquad (۱-۱)$$

به عنوان مدل مرجع برای سیگنال مانده در نظر گرفته می‌شود که در آن $f(t)$ بیانگر بردار خطا می‌باشد.

مطابق با این انتخاب، هدف مطلوب، کمینه سازی اختلاف میان مانده حاصل از سیستم دارای نامعینی با مدل مرجع انتخابی خواهد بود به طوری که در جهت کمینه سازی اثر نامعینی مدلسازی حرکت شود. انتخاب مدل مطلوب یعنی r_{ref}، به صورت $f(s)$ یا در حالت کلی‌تر $w(s)f(s)$ انجام می‌شود. در واقع استفاده از خود خطاها یا ضریب وزنی آنها به عنوان هدف تولید مانده ایده اصلی روش مدل مرجع می‌باشد.[۱۱,۱۲,۱۰]

همچنین انتخاب مدل مرجع یکسان نبوده و همین تفاوت در روش‌های مختلف تعریف آن، خود از انعطاف پذیری این روش ناشی می‌شود.

در این نوشتار با انتخاب مدل مرجع مناسب به صورت :

$$r_{ref}=W(s)f(s)+Q(s)d(s) \qquad (۲-۱)$$

دو هدف کمینه سازی اثر ورودی نامعلوم و نامعینی مدلسازی، به طور جداگانه مورد اجرا قرار گرفته‌اند. به عبارت دیگر می‌توان فرآیند طراحی را به دو مرحله تقسیم بندی نمود:

مرحله اول: یافتن حل بهینه پارامترهای سیستم تشخیص خطا در حالتی که نامعینی مدلسازی وجود ندارد و تنها عامل مزاحم در تولید مانده وجود ورودی نامعلوم می‌باشد. با قرار دادن این حل بهینه و پارامترهای بدست آمده در روابط تولید مانده در این حالت، مدل مرجع مناسب تعریف می‌شود. البته این نحوه انتخاب مدل مطلوب، نگرانی در موردقوام سیستم نسبت به ورودی نامعلوم را برطرف می‌سازد.

مرحله دوم: یافتن پاسخ بهینه مساله زیر (که به نوعی یک مساله H_∞ می باشد):

$$\min_{L,V} \quad \left\|r_{ref}-r\right\|_\infty = \min_{L,V} \quad \sup_{u,f,d} \frac{\left\|r_{ref}-r\right\|_2}{\left\|\begin{bmatrix} u \\ d \\ f \end{bmatrix}\right\|_2}$$

که در آن r مانده تولیدی در حالت تولید مانده در حضور نامعینی مدلسازی بوده و از طریق روش‌های مرسوم (نظیر LMI)محاسبه می‌شود.

۲- تعریف مساله

سیستم خطی تغییر ناپذیر با زمان ، که در آن خطای مدلسازی و ورودی نامعلوم لحاظ شده است را به صورت زیر در نظر می‌گیریم :

$$\begin{cases} \dot{x}=\bar{A}x+\bar{B}u+\bar{E}_d d+\bar{E}_f f \\ y=\bar{C}x+\bar{D}u+\bar{F}_d d+\bar{F}_f f \end{cases} \qquad (۱-۲)$$

[1] fault detection and isolation

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.3.5.7]

$$\bar{A} = A^0 + \Delta A \,,\, \bar{B} = B^o + \Delta B$$
$$\bar{C} = C^0 + \Delta C \,,\, \bar{D} = D^0 + \Delta D$$
$$\bar{E}_d = E_d^0 + \Delta E_d \,,\, \bar{F}_d = F_d^0 + \Delta F_d$$
$$\bar{E}_f = E_f^0 + \Delta E_f \,,\, \bar{F}_f = F_f^0 + \Delta F_f$$

$x(t) \in R^n$ بردار حالت و $u(t), y(t)$ به ترتیب بردار خروجی و ورودی سیستم می‌باشند. $d(t), f(t)$ نیز نشان دهنده بردار خطاهای سیستم و ورودی نامعلوم می‌باشند. ماتریس‌های $\bar{A}, \bar{B}, \bar{E}_d, \bar{E}_f, \bar{C}, \bar{D}, \bar{F}_d, \bar{F}_f$ نیز معلوم و با ابعاد مناسب هستند.

به منظور در نظر گرفتن اثر نامعینی مدلسازی ، معمولا در اکثر موارد، نامعینی به سه فرم زیر مورد بررسی قرار گرفته است [6]:

۱- در اولین مورد که تحت عنوان نرم محدود شناخته می‌شود، قسمت کاملا مجهول در مدلسازی، یعنی Δ به صورت $\Delta \in RH^\infty$ در نظر گرفته می‌شود، یعنی :

$$\bar{\sigma}(\Delta) \le \delta_\Delta$$

اگر این نامعینی در مدلسازی به صورت تحقق در فضای حالت نیز وارد شود، برای قسمت نامعینی سیستم (۲-۱) خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} \Delta A & \Delta B & \Delta E_d & \Delta E_f \\ \Delta C & \Delta D & \Delta F_d & \Delta F_f \end{bmatrix} \in$$
$$\dots \left\{ \begin{bmatrix} F_A \\ F_C \end{bmatrix} \Delta_H \begin{bmatrix} W_A & W_B & W_d & W_f \end{bmatrix} \mid \Delta \in \Lambda \right\}$$
$$\Delta_H = \Delta (I - H\Delta)^{-1}$$

که در آن $H, W_f, W_d, W_B, W_A, F_C, F_A$ معلوم و مربوط به ساختار نامعینی می‌باشند. همچنین $\Delta(t)$ کاملا مجهول بوده و تنها دانش در مورد آن، نرم محدود بودن آن است، یعنی:

$$\bar{\sigma}(\Delta) \le \delta_\Delta$$

این فرم از نمایش نامعینی مدلسازی، که در تئوری‌های کنترل نیز مرسوم است[]، برای استفاده از قضایای مربوط به تبدیل مساله H_∞ به یک LMI ضروری می‌نماید.

۲- در نوع دوم توصیف نامعینی مدلسازی، نامعینی‌ها به صورت چند موضوعی[1] در نظر گرفته می‌شوند که بر اساس آن خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} \Delta A & \Delta B & \Delta E \\ \Delta C & \Delta D & \Delta F \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^{l} \beta_i \begin{bmatrix} A_i & B_i & E_i \\ C_i & D_i & F_i \end{bmatrix}$$
$$\sum_{i=1}^{l} \beta_i = 1 \,, \quad \beta_i \ge 0$$

در این حالت نیز مدل سیستم (۱-۲) به صورت زیر قابل بازنویسی می‌باشد:

$$\dot{x} = \left(\sum_{i=1}^{l} \beta_i (A + A_i) \right) x + \left(\sum_{i=1}^{l} \beta_i (B + B_i) \right) u$$
$$\dots + \left(\sum_{i=1}^{l} \beta_i (E_d + E_i) \right) d$$
$$y = \left(\sum_{i=1}^{l} \beta_i (C + C_i) \right) x + \left(\sum_{i=1}^{l} \beta_i (D + D_i) \right) u$$
$$\dots + \left(\sum_{i=1}^{l} \beta_i (F_d + F_i) \right) d$$

بدیهی است که در این نحوه نمایش، سخنی در مورد محدود بودن یا نامحدود بودن نرم نامعینی مطرح نیست.

۳- نوع دیگر از توصیف نامعینی، توصیف به فرم آماری می‌باشد. یعنی:

$$\begin{bmatrix} \Delta A & \Delta B & \Delta E \\ \Delta C & \Delta D & \Delta F \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^{l} \left(\begin{bmatrix} A_i & B_i & E_i \\ C_i & D_i & F_i \end{bmatrix} p_i(k) \right)$$

در این مورد $(A_i, B_i, C_i, D_i, E_i, F_i)$ معلوم بوده و $p^T(k) = \begin{bmatrix} p_1(k) & \cdots & p_l(k) \end{bmatrix}$ اشاره به نامعینی سیستم داشته و یک فرآیند آماری با:

$$\bar{p}(k) = E(p(k)) = 0$$
$$E(p(k)\, p^T(k)) = diag(\sigma_1, \cdots, \sigma_l)$$

فرض می‌شود. با این توصیف از $p(k)$ مشخص است که $p(0), p(1), \dots$ از یکدیگر کاملا مستقل بوده و ضمنا $x(0), u(k), d(k)$ کاملا از $p(k)$ مستقل می‌باشند.

در ادامه مولد مانده و سیستم تشخیص خطای مناسب برای این حالت یعنی سیستم دارای نامعینی را می‌توان به فرم:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A_k \hat{x} + \begin{bmatrix} B_{ku} & B_{ky} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ y \end{bmatrix} \\ r = C_k \hat{x} + \begin{bmatrix} D_{ku} & D_{ky} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ y \end{bmatrix} \end{cases} \qquad (۲-۲)$$

تعریف نمود. با تعریف $z = \begin{bmatrix} x^T & \hat{x}^T \end{bmatrix}^T$ برای دینامیک مولد مانده می‌توان نوشت:

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{A} & \tilde{B}_f & \tilde{E}_d & \tilde{E}_u \\ \tilde{C} & \tilde{D}_f & \tilde{F}_d & \tilde{F}_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ f \\ d \\ u \end{bmatrix}$$

لذا توابع انتقال از خطا، اغتشاش و ورودی u به مانده در حالت سیستم با خطای مدلسازی به شرح زیر می‌باشند:

[1] polytopic

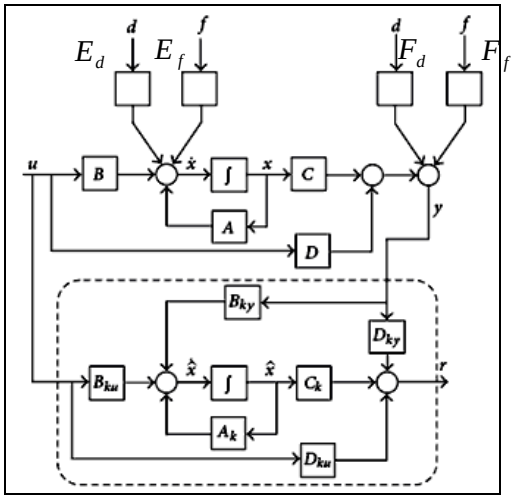
[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.3.5.7]

$$\begin{bmatrix} T_{rf}^M & T_{rd}^M & T_{ru}^M \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|cc} \tilde{A} & \tilde{E}_f & \tilde{E}_d & \tilde{B}_u \\ \hline \tilde{C} & \tilde{F}_f & \tilde{F}_d & \tilde{D}_u \end{array}\right]$$

$$= \left[\begin{array}{cc|ccc} \bar{A} & 0 & \bar{E}_f & \bar{E}_d & \bar{B} \\ B_{ky}\bar{C} & A_k & B_{ky}\bar{F}_f & B_{ky}\bar{F}_d & B_{ku}+B_{ky}\bar{D} \\ \hline D_{ky}\bar{C} & C_k & D_{ky}\bar{F}_f & D_{ky}\bar{F}_d & D_{ku}+D_{ky}\bar{D} \end{array}\right]$$

بـه منظـور تشـخیص خطـای مقـاوم، در حالـت ایـده آل بایـد $T_{rf}^M \neq 0 \quad T_{rd}^M = 0 \quad T_{ru}^M = 0$ برقرار باشد.

در عمل معمولا این حالت برقرار نبوده و باید تا حد امکان شرایط $\left\| T_{rf}^M \right\| \to \max \quad \left\| T_{rd}^M \;\; T_{ru}^M \right\| \to \min$ برقرار شود. ضمنا مانده‌ی تولیدی نیز از نامعینی مدلسازی حداکثر تاثیر ناپذیری را دارا باشد.



شکل ۱ : شمای کلی سیستم تشخیص خطا

اگر سیستم مانده مرجع را در حالت تولید مانده بهینه در برابر ورودی نامعلوم بدون خطای مدلسازی به فرم زیر فرض کنیم:

(۳-۲)

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{ref} \\ r_{ref} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|cc} A_{ref} & E_{ref,f} & E_{ref,d} \\ \hline C_{ref} & F_{ref,f} & F_{ref,d} \end{array}\right] \begin{bmatrix} x_{ref} \\ f \\ d \end{bmatrix}$$

با کمینه سازی حداکثر اختلاف میان مانده تولیدی در این حالت و مانده مرجـع، و کمینـه سـازی دوبـاره انحـراف در مانـده ناشـی از $u(t), d(t)$، یعنی:

$$\left\| \left[T_{rf}^M - T_{ref} \quad T_{rd}^M \quad T_{ru}^M \right] \right\|_\infty$$

مولـد مانـده مـورد طراحـی تـا حـد امکـان نسـبت بـه تغییـرات $u(t), d(t)$ و خطای مدلسازی مقاوم خواهد بود. در طراحی مولد مانده مقاوم نسبت به ورودی نامعلوم روش‌های متنوعی وجود دارند [۱۳۴,2,] که بر اساس آنها می‌توان طراحی مولد مانده مرجع فوق را بسادگی انجام داد.بدیهی است که با توجه به این فرم از انتخاب مولد مانده مرجع، هدف اصلی کمینه سازی اثر خطای مدلسازی باشد.

از آنجا که در حالت بدون نامعینی ($\Delta(t)=0$) اثر ورودی سیستم یعنی u، روی مانده نزدیک به صفر است ، در مدل مرجع اثری از آن وجود ندارد. به هر حال ورودی سیستم u بروی دینامیک‌های سیستم اثر می گذارد لذا منطقی است که u به عنوان یک اغتشاش (معلوم) روی طراحی سیستم FDI اثر بگذارد. از طرف دیگر باید به خاطر داشت که $u(t)$ از $d(t)$ متفاوت می‌باشد چرا که در حالت برخط[1] نیز در دسترس است.

به همین سبب جهت بهبود عملکرد سیستم FDI، دانش در مورد $u(t)$ باید در عمل و طراحی سیستم FDI وارد شود. برای مثال در طراحی ارزیاب های تطبیقی یا در انتخاب حد آستانه تطبیقی برای اعلام خطا می توان اهمیت این مطلب را درک نمود.[۱۵,۱۴]

۳- یافتن مولد مانده مرجع

به منظوریافتن مدل مرجع مناسب، دینامیک سیستم فیلتر تشخیص خطا را به صورت:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = \hat{A}\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = \hat{C}\hat{x} + \hat{D}u \\ r = V(y - \hat{y}) \end{cases}$$

در نظر می‌گیریم، که در آن $\hat{x}, y$ به ترتیب نمایانگر خروجی و حالات تخمین زده شده از(۲-۱) در حالت بدون نامعینی و H, L به ترتیب بهره رویتگر و ماتریس وزنی یا فیلترپسین[2] مانده می‌باشند. دینامیک خطا نیز به صورت:

$$\begin{cases} \dot{e} = (A - LC)e + (E_d - LF_d)d + (E_f - LF_f)f \\ r = V(Ce + F_d d + F_f f) \end{cases}$$

خواهد بود. بدیهی است که در این سیستم:

$$r_{ref}(s) = Gr_{ref,f}(s) f(s) + Gr_{ref,d}(s) d(s)$$

$$Gr_{ref,f}(s) = V_{opt}\left(Q(E_f - L_{opt}F_f) + F_f\right)$$

$$Gr_{ref,d}(s) = V_{opt}\left(Q(E_d - L_{opt}F_d) + F_d\right)$$

$$Q = C(sI - A + L_{opt}C)^{-1}$$

بوده و با توجه به مدل مرجع انتخابی (۲-۳) می‌توان نوشت:

[1] online
[2] Post filter

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.3.5.7]

$$A_{ref} = A - L_{opt}C$$
$$E_{f,ref} = E_f - L_{opt}F_f \ , \ E_{d,ref} = E_d - L_{opt}F_d$$
$$C_{ref} = V_{opt}C \ , \ F_{f,ref} = V_{opt}F_f \ , \ F_{d,ref} = V_{opt}F_d$$

با بکار گیری یکی از روش‌های موجود در طراحی بهینه V_{opt} , L_{opt} نظیر H_-/H_∞ می‌توان پارامترهای مدل مرجع را محاسبه نمود[۱۴].

معیار H_∞ به منظور اندازه گیری حداکثر میزان اثر گذاری ورودی‌های نامعلوم بر سیگنال مانده مورد استفاده قرار می‌گیرد که با توجه به تابع تبدیل از ورودی نامعلوم به مانده، به صورت:

$$H_\infty = \left\| Gr_{ref,d} \right\|_\infty = \sup_\omega \bar{\sigma}\left(Gr_{ref,d}\left(j\omega \right) \right)$$

تعریف می‌شود. معیار ارزیابی H_- نیز به منظور ارزیابی حداقل میزان اثر گذاری خطا بر روی سیگنال مانده به صورت:

$$H_- = \inf_\omega \underline{\sigma}\left(Gr_{ref,f}\left(j\omega \right) \right)$$

مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تعاریف $\bar{\sigma}(\ldots), \underline{\sigma}(\ldots)$ به ترتیب به کمترین و بیشترین مقدار ویژه توابع مطرح شده اشاره دارند.

با توجه به تعریف H_- مطابق آنچه در[۱۶] آمده است، اگرچه این ابزار نرم نیست ولی به عوض نرم می‌توان از آن در اندازه گیری بدترین حالت حساسیت خطا بهره برد.[6,14]

۴- بکار گیری ابزار LMI در حل مساله بهینه سازی

با توجه به سیستم مرجع می‌توان نوشت:

$$\left[T_{rf}^M - T_{ref} \quad T_{rd}^M \quad T_{ru}^M \right] = \left[\begin{array}{c|cc} A_c^M & B_c^M \\ \hline C_c^M & D_c^M \end{array} \right]$$

$$\ldots = \left[\begin{array}{cc|ccc} A_{ref} & 0 & E_{f,ref} & E_{ref,d} & 0 \\ 0 & \tilde{A} & \tilde{E}_f & \tilde{E}_d & \tilde{B}_u \\ \hline -C_{ref} & \tilde{C} & \tilde{F}_f - F_{ref,f} & \tilde{F}_d - F_{ref,d} & \tilde{D}_u \end{array} \right]$$

بر اساس BRL[1]، سیستم FDI پایدار قابل طراحی است اگر و تنها اگر ماتریس $P_c = P_c^T > 0$ موجود باشد که:

$$\begin{bmatrix} \left(A_c^M\right)^T P_c + P_c A_c^M & P_c B_c^M & \left(C_c^M\right)^T \\ * & -\gamma I & \left(D_c^M\right)^T \\ * & * & -\gamma I \end{bmatrix} < 0$$

۴- ۱) طراحی سیستم FDI برای نامعینی نرم محدود

با توجه به ساختار نامعینی نرم محدود، با جداسازی قسمت نامعینی مدلسازی از قسمت اصلی داریم:

$$\left(A_c^M, B_c^M, C_c^M, D_c^M \right) = \ldots$$
$$\left(A_c^o + A_c^\Delta, B_c^o + B_c^\Delta, C_c^o + C_c^\Delta, D_c^o + D_c^\Delta \right)$$

که بر این اساس می‌توان نوشت:

$$\left[\begin{array}{c|c} A_c^0 & B_c^0 \\ \hline C_c^0 & D_c^0 \end{array} \right] = \ldots$$

$$\left[\begin{array}{ccc|ccc} A_{ref} & 0 & 0 & E_{ref,f} & E_{ref,d} & 0 \\ 0 & A^0 & 0 & E_f^0 & E_d^0 & B^0 \\ 0 & B_{ky}C^0 & A_k & B_{ky}F_f^0 & B_{ky}F_d^0 & B_{ku}+B_{ky}D^0 \\ \hline -C_{ref} & D_{ky}C^0 & C_k & D_{ky}F_f^0 - F_{ref,f} & D_{ky}F_d^0 - F_{ref,d} & D_{ku}+D_{ky}D^0 \end{array} \right]$$

$$\left[\begin{array}{c|c} A_c^\Delta & B_c^\Delta \\ \hline C_c^\Delta & D_c^\Delta \end{array} \right] = \begin{bmatrix} F_{r1} \\ F_{r2} \end{bmatrix} \Delta_H \begin{bmatrix} E_{r1} & E_{r2} \end{bmatrix} = \ldots$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ F_A \\ \hline B_{ky}F_c \\ D_{ky}F_c \end{bmatrix} \Delta_H \left[\begin{array}{ccc|ccc} 0 & W_A & 0 & W_f & W_d & W_B \end{array} \right]$$

با این تجزیه می‌توان نامساوی مذکور را به شکل زیر بازنویسی نمود:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \left(A_c^0\right)^T P_c + P_c A_c^0 & P_c B_c^0 & \left(C_c^0\right)^T \\ * & -\gamma I & \left(D_c^0\right)^T \\ * & * & -\gamma I \end{bmatrix}}_{M_c^0} + \ldots$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \left(A_c^\Delta\right)^T P_c + P_c A_c^\Delta & P_c B_c^\Delta & \left(C_c^\Delta\right)^T \\ * & 0 & \left(D_c^\Delta\right)^T \\ * & * & 0 \end{bmatrix}}_{M_c^\Delta} < 0$$

با باز نویسی رابطه بالا برای قسمت نامعینی (M_c^Δ) داریم:

$$M_c^\Delta = \tilde{F}\Delta_H\tilde{E} + \tilde{E}^T\Delta_H\tilde{F}^T$$
$$\tilde{F} = \begin{bmatrix} \left(P_c F_{r1}\right)^T & 0 & F_{r2}^T \end{bmatrix}^T, \tilde{E} = \begin{bmatrix} E_{r1} & E_{r2} & 0 \end{bmatrix}$$

قضیه (۱): [۱۷] فرض کنیم Δ، توصیف شده در حالت اول قسمت ۲ باشد (نامعینی نرم محدود)، برای ماتریس های $R = R^T, F, E, H$ با ابعاد مناسب، و هر Δ که $\bar{\sigma}(\Delta) \le \delta_\Delta$ باشد، نابرابری‌های:

[1] Bounded Real Lemma

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.3.5.7]

$$\det\left(I-H\Delta\right)\neq 0$$

$$R+F\Delta\left(I-H\Delta\right)^{-1}E+E^T\left(I-\Delta^T H^T\right)^{-1}\Delta^T F^T<0$$

برقرار است، اگر و تنها اگر داشته باشیم:

$$\begin{bmatrix} R+\lambda E^T E & F+\lambda E^T H \\ * & \lambda\left(H^T H-I\right)\end{bmatrix}<0 \quad ,\lambda\geq 0$$

بنابراین با توجه به قضیه فوق:

$$T_c^o+T_c^\Delta<0\Leftrightarrow T_c^o+\tilde{F}\Delta_H\tilde{E}+\tilde{E}^T\Delta_H\tilde{F}^T<0\Leftrightarrow$$

$$\begin{bmatrix} T_c^o+\lambda\tilde{E}^T\tilde{E} & \tilde{F}+\lambda\tilde{E}^T H \\ * & \lambda\left(H^T H-I\right)\end{bmatrix}<0 \quad ,\lambda\geq 0$$

بوده و با استفاده از schur complement داریم:

$$\begin{bmatrix} \left(A_c^0\right)^T P_c+P_c A_c^0 & P_c B_c^0 & \left(C_c^0\right)^T & P_c F_{r1} & \lambda E_{r1}^T \\ * & -\gamma I & \left(D_c^0\right)^T & 0 & \lambda E_{r2}^T \\ * & * & -\gamma I & F_{r2} & 0 \\ * & * & * & -\lambda I & \lambda H^T \\ * & * & * & * & -\lambda I\end{bmatrix}<0$$

با تغییر متغیر:

$$P=\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & 0 \\ P_{12} & P_{22} & 0 \\ 0 & 0 & P_{33}\end{bmatrix}$$

$$B_{ky}=P_{33}^{-1}Z \quad ,A_k=P_{33}^{-1}X \quad ,B_{ku}=P_{33}^{-1}Y$$

می توان نابرابری غیر خطی فوق را به فرم خطی تبدیل کرد. یعنی:

$$\min_{P,X,Y,Z,D_{ky},D_{ku},C_k,\lambda}\ \gamma$$

$$\begin{bmatrix} \mu_{11}+\mu_{11}^T & \mu_{12} & \left(C_c^0\right)^T & \mu_{14} & \lambda E_{r1}^T \\ * & -\gamma I & \left(D_c^0\right)^T & 0 & \lambda E_{r2}^T \\ * & * & -\gamma I & F_{r2} & 0 \\ * & * & * & -\lambda I & \lambda H^T \\ * & * & * & * & -\lambda I\end{bmatrix}<0$$

$$\lambda\geq 0 \quad ,P=\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & 0 \\ P_{12} & P_{22} & 0 \\ 0 & 0 & P_{33}\end{bmatrix}>0$$

$$\mu_{11}=\begin{bmatrix} P_{11}A_{ref} & P_{12}A^0 & 0 \\ P_{12}A_{ref} & P_{22}A^0 & 0 \\ 0 & ZC^0 & X\end{bmatrix},\mu_{14}=\begin{bmatrix} P_{12}F_A \\ P_{22}F_A \\ ZF_C\end{bmatrix}$$

$$\mu_{12}=\begin{bmatrix} P_{11}E_{ref,f}+P_{12}E_f^0 & P_{11}E_{ref,d}+P_{12}E_d^0 & P_{12}B^0 \\ P_{12}E_{ref,f}+P_{22}E_f^0 & P_{12}E_{ref,d}+P_{22}E_d^0 & P_{22}B^0 \\ ZF_f^0 & ZF_d^0 & Y+ZD^0\end{bmatrix}$$

۴-۲) طراحی سیستم FDI برای نامعینی چندموضوعی

با توجه به ساختار نامعینی ذکر شده برای حالت مذکور، داریم:

$$\left[\begin{array}{c|c} A_c^M & B_c^M \\ \hline C_c^M & D_c^M\end{array}\right]\in\left\{\sum_{i=1}^p\zeta_i\left[\begin{array}{c|c} A_c^i & B_c^i \\ \hline C_c^i & D_c^i\end{array}\right]\ |\ \sum_{i=1}^p\zeta_i=1,\zeta_i\geq 0\right\}$$

مطابق حالت قبل، فرض پایداری سیستم به ازای تمام نامعینی‌های چندموضوعی همچنان به قوت خود باقی است. از آنجا که شرط برقراری مساله بهینه سازی ارائه شده، شدنی بودن حل LMI ارائه شده بود، می‌توان برقراری آن را به حالت:

$$\ldots\Leftrightarrow\begin{bmatrix} \left(A_c^i\right)^T P_c+P_c A_c^i & P_c B_c^i & \left(C_c^i\right)^T \\ * & 0 & \left(D_c^i\right)^T \\ * & * & 0\end{bmatrix}<0$$

$$\forall\zeta_i>0,\sum_{i=1}^p\zeta_i=1$$

تبدیل نمود و مشابه حالت قبل برای این رابطه با اعمال همان تغییر متغیرها، رابطه زیر را بدست آورد:

$$\min_{P,X,Y,Z,D_{ky},D_{ku},C_k}\ \gamma$$

$$\begin{bmatrix} \mu_{11}^i+* & \mu_{12}^i & \left(C_c^i\right)^T \\ & -\gamma I & \left(D_c^i\right)^T \\ & & -\gamma I\end{bmatrix}<0$$

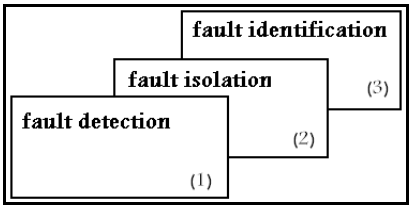
$$\lambda\geq 0 \quad ,P=\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & 0 \\ P_{12} & P_{22} & 0 \\ 0 & 0 & P_{33}\end{bmatrix}>0$$

۵- تشخیص نوع خطا

به طور کلی روش اجرای فرآیند تشخیص خطا شامل سه مرحله‌ی تشخیص خطا، تعیین نوع خطا و شناسایی خطا می‌باشد.[۱۸] بسته به نوع خطا و عملکرد مورد انتظار از سیستم کنترل، این سه مرحله می‌توانند نسبت به هم دارای اولویت باشند. ولی با این همه، بحث تشخیص خطا تقریبا برای تمام سیستم‌های عملی مورد نیاز است و بعد از آن مقوله جداسازی خطا نیز به همان اندازه اهمیت می‌یابد.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.3.5.7]

از طرف دیگر شناسایی نوع عیب معمولا در سیستم‌ها ضروری نبوده و اهمیت زیادی در سیستم‌های کنترلی پیدا نمی‌کند چرا که به محض وقوع عیب، سیستم را در صورت امکان خاموش می‌کنند و به سرعت، در جهت تعمیر، اقدام می‌کنند.



شکل ۲: مراحل انجام فرآیند تشخیص عیب

معمولا تشخیص خطا و جداسازی خطا به صورت برخط انجام می‌گیرند و هر دو هم زمان، و به موازات هم اجرا می‌شوند. در اکثر سیستم‌ها این دو مورد، هم زمان فعال بوده و در برخی دیگر از سیستم‌ها تشخیص خطا به صورت دائم روشن است و به محض نمایش عیب جداسازی خطا فعال می‌شود.

برای تشخیص نوع عیب نیز روش‌ها عموما در دو سطح مبتنی بر مدل و مبتنی بر سیگنال دسته بندی می‌شوند. روش‌های مبتنی بر استفاده از شبکه‌عصبی[1] که بر اساس ایجاد نگاشت‌های غیرخطی و دسته بندی عمل‌می‌کنند و روش‌هایی همچون PCA[2],FDA[3],PLS[4],... که بر اساس استفاده از پردازش آماری به منظور تشخیص عیب مورد استفاده هستند. عیب اصلی این روش‌ها عموما در عدم برخط بودن آنهاست. در این میان استفاده از روش‌های مبتنی بر مدل به صورت برپایی بانک‌های رویتگری به صورت DOS[5] و GOS[6] نیز مرسوم و معمول است.[۱۹] در واقع با بکارگیری هر یک از این دو روش نیازمند طراحی حداقل رویتگر به تعداد خطاهای سیستم، به منظور تشخیص هر عیب خواهیم بود.[۲۰19,]

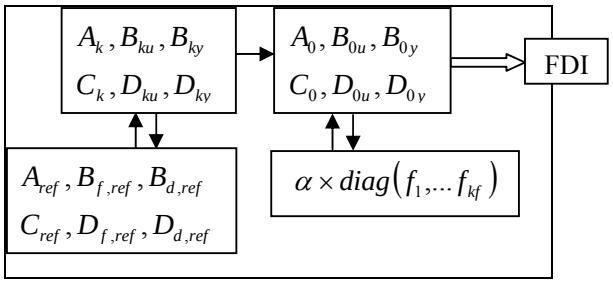
اما بکارگیری از روش مدل مرجع و انتخاب مرجع مناسب می‌تواند این فرآیند را با مرحله تشخیص خطا، یکی کند. در واقع اگر در سیستم مولد مانده مرجع انتخابی (۱-۲) ضریب وزنی $f(s)$ طوری انتخاب شود که داشته باشیم:

$$r_{ref} = Wf \quad ,W = diag(\beta_i) \quad ,i = 1,2,...,n_f$$

می‌توان اثر هر خطا را به صورت منفرد بر هر مانده مشاهده نمود.

بدین منظور هدف طراحی، تنها افزایش مقدار β_i ها خواهد بود چرا که مانده بدست آمده نسبت به اثر ورودی نامعلوم و نامعینی مدلسازی قبلا مقاوم گردیده است و مقصود از این مورد جداسازی حداکثری میان خطاهای ممکنه می‌باشد.

از آنجا که سیستم مولد مانده به صورت (۲-۲) تعریف شده است، مانده‌ی تولیدی در مرحله نهایی را می‌توان با عبور از یک سیستم، با انتخاب مدل مرجع قطری مناسب به فرم دلخواه قطری تبدیل نمود و از آن در فرآیند تشخیص نوع خطا بهره برد.



شکل ۳: استفاده از مدل مرجع در شناسایی و تشخیص نوع خطا

این بدان معناست که پس از کمینه سازی اثر ورودی نامعلوم و نامعینی مدلسازی می‌توان با انتخاب مدل مرجع دیگری به صورت بردار خالص خطا یا ضریب وزنی قطری آن، از مانده حاصله در جهت تعیین نوع عیب نیز بهره برد. با توجه به سیستم نهایی مانده، سیستم ضریب وزنی قطری ساز مانده را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$\begin{cases} \dot{k} = A_0 k + B_0 r \\ r_{iso} = C_0 k + D_0 r \end{cases}$$

که در آن r مانده حاصل از فرآیند کمینه سازی اثر نامعینی مدلسازی و k متغیر حالت می‌باشد. با توجه به (۲-۲) خواهیم داشت :

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{k} \\ \dot{\hat{x}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_k & 0 \\ B_0 C_k & A_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k \\ \hat{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{ku} & B_{ky} \\ B_0 D_{ku} & B_0 D_{ky} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ y \end{bmatrix} \\ r_{iso} = \begin{bmatrix} D_0 C_k & C_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k \\ \hat{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_0 D_{ku} & D_0 D_{ky} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ y \end{bmatrix} \end{cases}$$

که با در نظر گرفتن مانده مرجع مطلوب جهت جداسازی خطا به صورت :

$$r_{iso_ref} = \beta \times diag(f_1,...f_{kf})$$

میتوان پارامترهای ضریب وزنی مانده یعنی ماتریس‌های A_0, B_0, C_0, D_0 را جهت تعیین نوع خطا محاسبه نمود. البته مقدار β را می‌توان به صورت مرحله به مرحله تا جایی که نابرابری ماتریسی حاصل از:

$$\min \left\| r_{iso} - r_{iso_ref} \right\|_\infty$$

[1] neural network
[2] Principal Component Analysis
[3] Fisher Discrimnant Analysis
[4] Partial Least Square
[5] Dedicated Observer Scheme
[6] Generalized Observer Scheme

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.3.5.7]

قابل حل نباشد، افزایش داد.

۶- مثال عددی تشخیص خطا

مطابق با مدل ارائه شده در [۲۱] برای فضای حالت موتور جت، پارامترها به شرح زیر خواهند بود:

$$A^0=\begin{bmatrix}-0.9835 & -0.0110 & -0.0039\\ -0.0004 & -0.9858 & -0.0026\\ 0 & 0.0002 & -0.9891\end{bmatrix}, B^0=\begin{bmatrix}0.0080 & 0.2397 & -0.0383\\ 0.0068 & 0.1565 & 0.0248\\ 0.0003 & -0.0003 & 0.0003\end{bmatrix}$$

$$C^0=\begin{bmatrix}0.2383 & 0.4871 & 0.1390\\ 0 & -0.0008 & 0.0004\\ 0.0000 & -0.0000 & 0\end{bmatrix}, D^0=\begin{bmatrix}0.4171 & -4.4920 & 0.4875\\ 0.0008 & -0.0050 & 0.0003\\ 0 & 0.0005 & -0.0021\end{bmatrix}$$

$$E_d=\begin{bmatrix}0.1I & 0\\ 0 & 0.01\end{bmatrix}, E_f=\begin{bmatrix}0.0080 & 0.2397 & -0.0383\\ 0.0068 & 0.1565 & 0.0248\\ 0.0003 & -0.0003 & 0.0003\end{bmatrix}, F_d=0.1I$$

$$F_f=\begin{bmatrix}-0.0205 & 0.6217 & 0.8115\\ 0.2789 & -1.7506 & 0.6363\\ 1.0583 & 0.6973 & 1.3101\end{bmatrix}, H=\begin{bmatrix}-0.3190 & -0.0800 & 0.1420\\ -0.2880 & 0.1380 & 0.2580\\ 0.1140 & 0.1630 & 0.1330\end{bmatrix}$$

$$W_A=\begin{bmatrix}-0.0600 & -0.0080 & -0.1350\\ -0.0150 & 0.1540 & 0.0470\\ -0.0440 & -0.0610 & -0.0900\end{bmatrix}, W_B=\begin{bmatrix}0.1340 & 0.6300 & 0.4510\\ 0.2070 & 0.3710 & 0.0440\\ 0.6070 & 0.5750 & 0.0270\end{bmatrix}$$

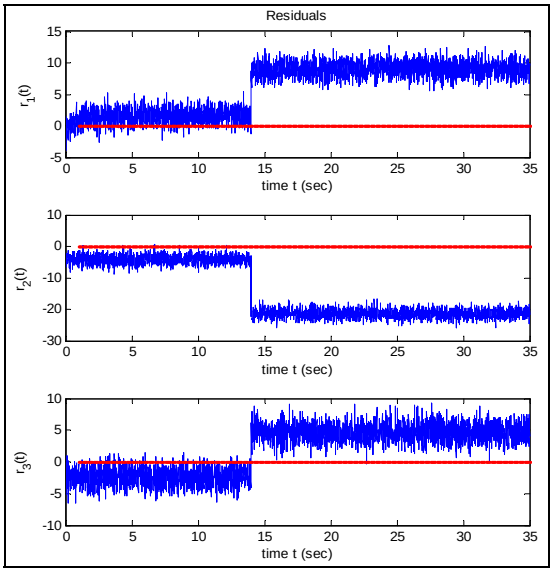
$$F_A=\begin{bmatrix}0.1480 & -0.1290 & -0.0840\\ 0.1140 & -0.0070 & 0.0500\\ -0.0680 & -0.0330 & 0.1490\end{bmatrix}, F_C=\begin{bmatrix}-0.0550 & 0.0660 & -0.0120\\ -0.0850 & -0.0850 & -0.0070\\ -0.0250 & -0.1200 & 0.0490\end{bmatrix}$$

برای این مثال با استفاده از روش‌های مختلف، بهره فیلتر و ماتریس فیلترپسین مدل مرجع محاسبه شده است که نتایج بدست آمده برای هر کدام مطابق جدول زیر مشاهده شد[6]:

جدول ۱: مقایسه عملکرد روشهای طراحی در تعریف مناسب مدل مرجع

Method	H_-/H_∞	H_2/H_2	H_-/H_2
γ	2.2824	2.4276	2.6133

بر اساس این مقایسه با انتخاب مدل مرجع توصیف شده، فیلتر مناسب با حل به روش تکراری LMI بدست می‌آید. با اعمال سیگنال خطا به صورت پله واحد در لحظه ۱۴ و اعمال ورودی نامعلوم به صورت نویزسفید با میانگین صفر و واریانس ۲ نتایج سیگنال مانده به شرح زیر بدست می‌آید: (شکل ۴)



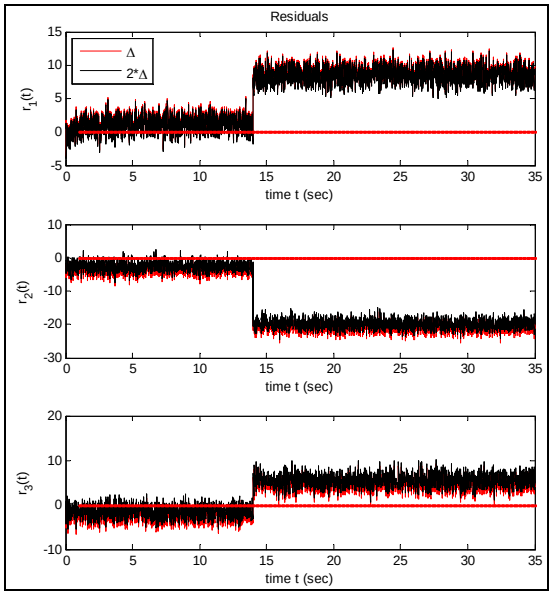
شکل ۴: مانده تولیدی به روش مدل مرجع

با افزایش واریانس نامعینی مدلسازی، و نهایتا تغییر در ماتریس نامعینی به صورت:

$$\Delta_{H,1}=\begin{bmatrix}0.3741 & 0.3173 & 0.1506\\ 0.7977 & 0.7207 & 0.2220\\ 0.0848 & 0.0325 & 0.2133\end{bmatrix}$$

$$\rightarrow \Delta_{H,2}=\begin{bmatrix}1.3521 & 0.6380 & 1.4948\\ 1.2179 & 0.2271 & 0.3274\\ 1.1046 & 0.4046 & 1.1749\end{bmatrix}$$

تغییر محسوسی در مانده رخ نمی‌دهد که این امر مبین قوام سیستم به نامعینی مدلسازی خواهد بود.(شکل ۵)



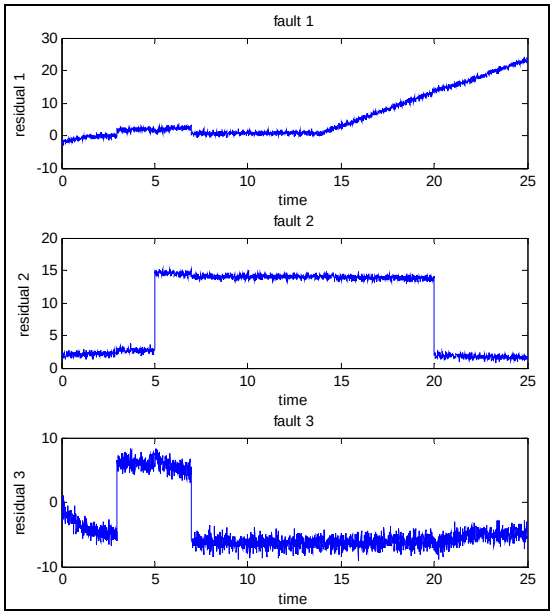
شکل ۵: اثر تغییر مقدار نامعینی روی مانده

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.3.5.7]

به منظور تعیین نوع خطا با در نظر گرفتن مدل مرجع:

$$r_{iso_ref} = \alpha \times diag\left(f_1,\dots f_{kf}\right)$$

و افزایش تدریجی β، با اعمال سه سیگنال خطا به صورت پالس واحد از لحظه ۵ الی ۲۰، شیب ۰.۲ در لحظه ۱۴ و پالس از زمان ۳ الی ۷ واعمال ورودی نامعلوم به صورت نویزسفید با میانگین صفر و واریانس ۱ نتایج سیگنال مانده به شرح زیر بدست می‌آید: (شکل ۶)



شکل ۶ : تعیین نوع خطا بوسیله مدل مرجع $\beta = 12$

۷- نتیجه گیری

با اینکه برای تولید مانده در حضور اشکال مختلف نامعینی، روش‌های مختلفی وجود دارد ولی تقریبا هسته اصلی تمام روش‌ها یکی می‌باشد. در واقع به نوعی در تمام آنها استفاده از یک مدل مرجع مورد نیاز است، که از شباهت‌های اساسی این روش‌ها محسوب می‌شود.

در این مقاله طراحی سیستم عیب یاب بر اساس روش مدل مرجع و تعریف مدل مرجع مناسب از لحاظ تشخیص خطای مقاوم برای سیستم‌های خطی دارای نامعینی مدلسازی با ورودی نامعلوم ارائه شد. بر اساس این تعریف از مدل مرجع، که در آن لحاظ نمودن اثر ورودی نامعلوم درمدل مطلوب و یافتن مدل مرجع مناسب از دید حداکثر قوام سیستم نسبت به ورودی نامعلوم مطرح شده است، هدف اصلی مساله بهینه سازی، بهبود میزان قوام مانده به نامعینی مدلسازی خواهد بود.

اینکه اثر ورودی نامعلوم به مدل مرجع تعریف شده وارد شده است، تناقضی با کم کردن اثر آن در مانده – که همواره مطلوب است – نخواهد داشت. چرا که این اثر، در روش‌های موجود در طراحی مقاوم مولد مانده در حضور ورودی نامعلوم مستقلا به طور بهینه، مینیمم شده و توجه بیشتر شامل نامعینی مدلسازی خواهد بود. لیکن با این فرض می‌توان تاکید مساله را بر کمینه سازی اثر نامعینی مدلسازی به صورت منفرد تضمین نمود.

با این تعریف از مدل مرجع، قوام سیستم FDI نسبت به نامعینی مدلسازی، نسبت به حالتی که در مدل مطلوب ورودی نامعلوم لحاظ نشود، بهبود می‌یابد. از آنجا که مدل انتخابی از لحاظ حداکثر قوام سیستم نسبت به سیگنال ورودی نامعلوم انتخاب می‌شود، این تعریف از مدل مرجع منافاتی با قوام سیستم FDI نسبت به ورودی نامعلوم ندارد.

همچنین مدل مرجع مورد نظر برای شبیه سازی هرچه بیشتر مانده با آن، می‌تواند بر حسب نیاز تعریف شود و حتی با تعریف مناسب آن (مثلا در این مورد، قطری با عناصر یکسان)، تفکیکی میان اثرات خطاهای مختلف ایجاد نمود و به نوعی از مانده حاصله برای ایجاد سیستم جداساز خطا بهره برد. در این کاربرد با کمی تامل می‌توان تغییراتی در مدل مرجع مناسب وارد نمود و بر اساس آن با تغییر تعداد سیگنال‌های مانده برابر با تعداد خطاهای موجود آن را تا حد امکان نسبت به اغتشاش مقاوم نمودو از ایجاد بانک‌های رویتگری به منظور جداسازی خطا بی نیاز شد. حتی می‌توان با ایجاد ساز و کار مناسبی این مدل مرجع مناسب جهت جداسازی خطاها را به صورت یک الگوریتم تکرار بهینه نمود.

در نهایت نیز با اعمال نتایج بر سیستم عددی داده شده، قوام سیستم نسبت به تغییرات مدلسازی در عین حساسیت به تشخیص خطا مورد ارزیابی قرار گرفته و درحالت رخداد خطاهای مختلف، با ایجاد مدل مرجع قطری اقدام به جداسازی خطاها و طراحی سیستم تعیین نوع خطا شده است.

۸- مراجع

[1] Zhonga M., Ding Steven X., Lam J., Wang H., 2003, “An LMI approach to design robust fault detection filter for uncertain LTI systems,” Automatica, Vol. 39, No. 3, pp. 543 – 550

[2] Khosrowjerdi M., Nikoukhah R., Safari-Shad N. , 2004, “A mixed H2/Hinf approach to simultaneous fault detection and control,” Automatica, Vol. 40, No. 3, pp. 261-267

[3] Hamelin F., Sauter D., 2000, “Robust fault detection in uncertain dynamic systems,” Automatica, Vol. 36, Issue 11, pp. 1747-1754

[4] Chen J., Patton R.J., Zhang H.Y., 1996, “Design of unknown input observer and robust fault detection filters,” International Journal of Control, Vol. 63, No. 1, pp. 85-105

[5] Isermann R., Balle P., 1997, “Trends in the application of model-based fault detection and

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.3.5.7]

diagnosis of technical processes," Control Eng. Practice., Vol. 5, No. 5, pp. 709-719

[6] Ding X., 2000, "Model-based fault diagnosis techniques," Springer

[7] Akhenak A., Chadli M., Ragot J., Maquin D. , 2007 "Design of Sliding Mode Unknown Input Observer for Uncertain Takagi-Sugeno Model," Control & Automation Mediterranean Conference, pp. 1-6

[8] Murad G., Postlethwaite I., Gu D.W., 1996, "A robust design approach to integrated control and diagnostics," Proc. the 13th IFAC Word Congress

[9] Stroustrup J., Grimble M., Niemann H., 1997, "Design f integrated systems for the control and detection of actuator/sensor faults," Sensor review, Vol. 17, pp.138-149

[10] Rank M.L., Niemann H., 1999, "Norm based design of fault detectors," International Journal of Control, Vol. 72, No. 9, pp. 773-783

[11] Frisk E., Nielsen L., 2006, "Robust residual generation for diagnosis including a reference model for residual behavior," Automatica, Vol. 42, Issue 3, pp. 437-445

[12] Chen J., Patton R.J., 2000, "Standard h-infinity formulation of robust fault detection," Proc. of the 4th IFAC Symp. Safe Process, pp. 256-261

[13] Ding S.X., Jeinsch J., Frank P.M., Ding E.L., 2000, "A unified approach to the optimization of fault detection systems," International journal of adaptive control and signal processing, Vol. 14, pp. 725-745

[14] Guo J., Huang X., Cui Y., 2009, "Design and analysis of robust fault detection filter using LMI tools," Computers & Mathematics with Applications, Vol. 57, Issues 11-12, pp. 1743-1747

[15] Frank P.M., Ding X., 1997, "Survey of robust residual generation and evaluation methods in observer-based fault detection systems," Journal of Process Control, Vol. 7, No. 6, pp. 403-424

[16] Liu J., Wang J.L., Yang G.H., 2005, "An LMI approach to minimum sensitivity analysis with application to fault detection," Automatica, Vol. 41, No. 11,pp.1995-2004

[17] El Ghaoui L., Folcher J.P., 1996, "Multi objective robust control of LTI systems subject to unstructured perturbations,"

Systems and Control Letters, Vol. 28, No. 1, pp.23-30

[18] Chiang L.H., Russell E., Broatz R.D., 2001, "Fault Detection and Diagnosis in Industrial Systems," Springer

[19] Frisk E., 1996," Model-based fault diagnosis applied to an SI-Engine," M.s Thesis of Linkoping university

[20] Frank P.M., Ding S.X., Marku T., 2000, "Model-based fault diagnosis in technical processes," Transactions of the Institute of Measurement and Control, Vol. 22, No. 1, pp. 57-101

[21] Curry T.D., Collins J., 2005, "Robust fault detection and isolation using robust $\ell 1$ estimation," Journal of Guidance Control and Dynamics, Vol. 28, Vo. 6, pp.1131-1139

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.3.5.7]