دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه برای دریافت درجه دکتری

رشته برق- گرایش کنترل

طراحی کنترل‌کننده مقاوم و شکل‌دهی مجموعه نامعینی مبتنی بر شناسایی سیستم

نگارنده

آرش صادق‌زاده

استاد راهنما

دکتر حمیدرضا مؤمنی

اردیبهشت ۱۳۸۹

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به همسر فداکارم

چکیده

در این رساله، از یک‌سو به مساله طراحی کنترل‌کننده مقاوم برای سیستم‌های با نـامعینی پـارامتری بیضوی و از سوی دیگر به طراحی سیگنال ورودی در شناسایی سیستم برای کنترل مقـاوم، پرداختـه می‌شود.

بدلیل وجود نویزهای اندازه‌گیری، پروسه‌های متداول شناسایی سیستم (شناسایی بر پایه پـیش‌بینـی خطا) یک مدل نامی از سیستم بهمراه یک مجموعه نامعینی پارامتری بیضوی شکل را نتیجه می‌دهند. در این رساله، روش‌های نوینی جهت طراحی کنترل‌کننده مقاوم بـرای سیـستم‌هـای بدسـت آمـده از پروسه‌های متداول شناسایی سیستم، ارائه می‌شوند. در طراحی کنترل‌کننده مقاوم بـرای ایـن نـوع از سیستم‌ها با نامعینی ساختاری پارامتری، طراحی کنترل‌کننده دینامیک فیدبک خروجی مرتبـه ثابـت مدنظر قرار می‌گیرد. عملکرد مطلوب در پروسه طراحی به‌صورت جایـابی ناحیـه‌ای قطـب‌هـای حلقـه بسته و همچنین شکل‌دهی توابع تبدیل حلقه بسته به‌صورت نرم H_2 و یا H_∞ خواهد بود.

با توجه به این اصل که عملکرد مقاوم در یک سیستم حلقه بسته علاوه بر کنترل‌کننده، تابعی از شکل مجموعه نامعینی است، برای دستیابی به یک عملکرد مطلوب مقاوم، همزمان با طراحی کنترل‌کننـده مقاوم، مساله طراحی شکل مجموعه نامعینی مدنظر قـرار مـی‌گیـرد. از آنجـایی کـه شـکل مجموعـه نامعینی در پروسه شناسایی سیستم تابعی از طیف سیگنال ورودی است، حل ایـن مـساله منجـر بـه طراحی سیگنال وروردی در شناسایی سیستم می‌گردد. شکل‌دهی مجموعه نامعینی به‌صورت حل یک مساله بهینه‌سازی محدب، ارائه شده است که حل آن منجر به تعیین سیگنال مناسبی جهت شناسایی سیستم و تعیین کنترل‌کننده مقاومی جهت دستیابی به عملکرد مطلوب می‌گردد.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی روش‌های ارائه شده در این رسـاله بـر روی دو سیـستم واقعـی، کارامـدی روش‌های ارائه شده را نشان می‌دهند.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول- مقدمه

۱-۱ شناسایی و کنترل: تاریخچه ۱

۱-۲ نتایج موجود در زمینه کنترل سیستم‌ها با نامعینی پارامتری بیضوی ۳

۱-۳ نتایج موجود در زمینه طراحی آزمایش شناسایی سیستم ۵

۱-۴ توصیف مساله ۱۰

۱-۵ بخش‌های پایان‌نامه و نوآوری‌های رساله ۱۲

فصل دوم- نامعینی حاصل از شناسایی سیستم با ساختار مدل بدون بایاس

۲-۱ شناسایی PE با ساختار مدل بدون بایاس ۱۶

۲-۱-۱ روش کلی شناسایی PE ۱۶

۲-۱-۲ شناسایی PE با ساختار مدل بدون بایاس ۱۸

۲-۲ نواحی نامعینی حاصل از شناسایی PE ۲۰

۲-۲-۱ فرض‌های اولیه بر روی سیستم واقعی G_0 ..... ۲۱

۲-۲-۲ شناسایی PE حلقه باز ۲۲

۲-۲-۳ شناسایی حلقه بسته ۲۳

۲-۲-۳-۱ شناسایی حلقه بسته مستقیم ۲۴

۲-۲-۳-۲ شناسایی حلقه بسته غیر مستقیم ۲۴

۲-۳ ساختار کلی نواحی نامعینی حاصل از شناسایی PE ۲۷

فصل سوم- طراحی کنترل‌کننده H_∞ برای سیستم‌های با نامعینی پارامتری بیضوی

۳-۱ روش چندجمله‌ای‌های مثبت ۳۰

۳-۱-۱ توصیف مساله و پیش‌نیازها ۳۰

۳-۱-۲ جایابی ناحیه‌ای قطب‌ها ۳۱

۳-۱-۳ طراحی کنترل‌کننده H_∞ مقاوم ۳۵

۳-۲ روش قسمت حقیقی اکیداً مثبت ۳۷

۳-۲-۱ پیش‌نیازها ۳۷

۳-۲-۲ طراحی کنترل‌کننده H_∞ ۳۸
۳- ۳ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۴۴

فصل چهارم- بهبود روش طراحی کنترل‌کننده H_∞ با استفاده از توابع لیاپانوف وابسته پارامتری

۴ -۱ مقدمه ۴۶
۴-۲ توصیف مساله و پیش‌نیازها ۴۷
۴-۳ طراحی کنترل‌کننده H_∞ ۴۹
۴-۴ پارامتره نمودن محدب با بعد محدود ۵۳
۴-۵ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۵۸

فصل پنجم- طراحی کنترل‌کننده به روش ترکیبی جایابی قطب‌ها و شکل‌دهی توابع حساسیت برای سیستم‌های با نامعینی پارامتری بیضوی

۵-۱ توصیف مساله ۵۹
۵-۲ پارامتره نمودن کنترل‌کننده ۶۰
۵-۳ ویژگی‌های عملکردی ۶۳
۵-۳-۱مساله طراحی کنترل‌کننده به‌فرم یک مساله بهینه‌سازی محدب ۶۳
۵-۳-۲ طراحی کنترل‌کننده H_2 ترکیبی با جایابی قطب ۶۵
۵-۳-۳ طراحی کنترل‌کننده H_∞ ترکیبی با جایابی قطب ۶۸
۵-۴ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۷۲

فصل ششم- شکل‌دهی مجموعه نامعینی به هدف طراحی کنترل مقاوم

۶-۱ تعریف مساله ۷۴
۶-۲ شکل‌دهی مجموعه نامعینی حاصل از شناسایی حلقه باز ۷۶
۶-۳ شکل‌دهی مجموعه نامعینی حاصل از شناسایی حلقه بسته ۷۸
۶-۴ پارامتره نمودن مساله طراحی ورودی ۸۰
۶-۴-۱ پارامتره نمودن طیف ورودی ۸۰
۶-۴-۱-۱ پارامتره نمودن طیف با بعد محدود ۸۱

۶-۴-۱-۲ پارامتره نمودن همبستگی جزئی ۸۲
۶-۴-۲ پارامتره نمودن ماتریس کوواریانس ۸۳
۶-۴-۲-۱ بسط زیر فضا ۸۳
۶-۴-۲-۲ بسط غیرمستقیم ۸۴
۶-۴-۲-۳ جمع‌بندی ۸۴
۶-۴-۳ پارامتره نمودن قیدهای سیگنال ۸۴
۶-۴-۳-۱ پارامتره نمودن قیدهای توان ۸۵
۶-۴-۳-۲ پارامتره نمودن قیدهای نقطه‌ای ۸۵
۶-۵ پارامتره نمودن مساله شکل‌دهی مجموعه نامعینی با بعد محدود ۸۶
۶-۶ جمع‌بندی ۸۷

فصل هفتم- شبیه‌سازی نتایج بر روی سیستم واقعی

۷-۱ مقدمه ۸۹
۷-۲ طراحی کنترل مقاوم برای سیستم با نامعینی پارامتری بیضوی ۸۹
۷-۳ طراحی توام آزمایش شناسایی سیستم و کنترل مقاوم ۹۳
۷-۳-۱ شکل‌دهی مجموعه نامعینی حاصل از شناسایی سیستم ۹۳
۷-۳-۲ مقایسه با سایر روش‌های موجود ۹۸
۷-۳-۲-۱ مقایسه با روش‌های موجود طراحی سیگنال ورودی ۹۸
۷-۳-۲-۲ مقایسه با یک روش طراحی کنترل مقاوم ۹۹
۷-۳-۲-۳ مقایسه با روش‌های طراحی کنترل‌کننده بر پایه مدل نامی ۱۰۱

فصل هشتم- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۸-۱ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۱۰۴
۸-۲ پیشنهادات جهت ادامه پژوهش در این زمینه ۱۰۵
۸-۲-۱ تنظیم بهینه مجموعه‌های نامعینی ۱۰۶
۸-۲-۲ روال اتوماتیک طراحی کنترل‌کننده بر پایه داده‌ها ۱۰۶
۸-۲-۳ تعریف و اندازه‌گیری کیفیت مجموعه‌های نامعینی با هدف کنترل ۱۰۷
۸-۲-۴ طراحی مقاوم آزمایش شناسایی ۱۰۷
۸-۲-۵ ارائه روش جامع طراحی کنترل‌کننده مقاوم با وجود نامعینی پارامتری بیضوی ۱۰۸
۸-۲-۶ طراحی آزمایش شناسایی با وجود UNDERMODELING ۱۰۸

مراجع ۱۰۹

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۷-۱ γ_{opt} برای انتخاب متفاوت چند جمله‌ای مرکزی و ماتریس‌های لیاپانوف.....۹۲
جدول ۷-۲ مقایسه روش ارائه شده در بخش ۳-۱ با پروسه‌های طراحی کنترل‌کننده مقاوم بر پایه مدل نامی.....۱۰۳

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱ سیستم حلقه بسته مورد استفاده در روش شناسایی سیستم حلقه بسته.....۲۳
شکل ۳-۱ شماتیک سیستم استاندارد حلقه بسته.....۳۳
شکل ۴-۱ شماتیک سیستم استاندارد حلقه بسته ۴۸
شکل ۶-۱ سیستم حلقه بسته برای آزمایش شناسایی.....۷۹
شکل ۷-۱ طیف‌های سیگنال ورودی بهینه. طیف سیگنال ورودی برای طراحی کنترل‌کننده مرتبه ۵ (نمودار توپر). طیف سیگنال ورودی برای کنترل‌کننده مرتبه ۴ (نمودار نازک). دیاگرام بود اندازه پروسه (نقطه‌چین).....۹۶
شکل ۷-۲ تاثیر تعداد جملات در پارامتره طیف بر روی توان کمینه بدست آمده و زمان محاسباتی ۹۷
شکل ۷-۳ قطب‌های حلقه بسته برای سیستم‌های شناسایی شده در ۱۰۰ تکرار مونت‌کارلو از آزمایش شناسایی سیستم ۹۷
شکل ۷-۴ دیاگرام بود توابع حساسیت وزندار شده از ۱۰۰ تکرار مونت‌کارلو از آزمایش شناسایی سیستم.....۹۸

فصل اول

مقدمه

۱-۱ شناسایی و کنترل: تاریخچه

شناسایی برای مدت زمان طولانی قلمرو ریاضی‌دانان، آماردانان، آنالیز کننده‌های سری‌های زمانی و اقتصاددانان بوده است. تاریخچه شناسایی سیستم به کارهای گاوس و لژاندر در قرن هجده و نوزده باز می‌گردد.

تئوری کنترل نیز قلمرو مهندسین بوده است. تا ۱۹۶۰ طراحی کنترل بر پایه نمایش‌های بود، نایکوئیست و زیگلر-نیکولز بود. این روش‌ها در زمینه‌هایی از مهندسی که مدل‌های قابل اطمینان بر پایه تئوری‌های پایه‌ای بدست می‌آیند مانند کاربردهای الکتریکی، مکانیکی و هوافضا، کاربرد دارند. در صنایع فرایند، مدل‌های بسیار ساده مرتبه اول با تاخیر زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. معرفی مدل‌های فضای حالت در ۱۹۶۰ به همراه پاسخ‌های کنترل بهینه و مسائل فیلتر نمودن بهینه باعث پیشرفت عظیمی در طراحی کنترل‌کننده بر پایه مدل شد. کاربردهای موفقیت‌آمیزی از آن بویژه در صنعت هوافضا که در آن مدل‌های با دقت بالا در دسترس است، مشاهده شد.

شناسایی مدل‌های black-box در جامعه کنترل از ۱۹۶۵ آغاز شد. در [۱] تئوری تحقق فضای حالت که بعد از ۲۵ سال به سنگ‌بنای روشی که امروزه با نام شناسایی زیرفضا نامیده می‌شود، مطرح می‌شود. در [۲] چارچوب ML[1] برای شناسایی مدل‌های ورودی- خروجی مطرح گردید، که باعث پدیدار شدن چارچوب مشهور پیش‌بینی خطا[2] (PE) که بسیار کارامد است، گشت. برای سیستم‌هایی

[1] Maximum likelihood
[2] Prediction Error

که در آنها بر اساس قوانین پایه‌ای نمی‌توان مدل سیستم را بدست آورد، بی‌شک ظهور تئوری شناسایی سیستم باعث توسعه کاربرد روش‌های طراحی بر پایه مدل در زمینه‌های کاربردی گوناگونی شده است.

از سال ۱۹۶۵ تا ۱۹۸۰ کنترل بر پایه مدل به سیستم‌های دینامیکی و پروسه‌ها، که مدل آنها با استفاده از تکنیک‌های جدید شناسایی بدست می‌آمدند، اعمال شد. در آنجا غالب آن بود که دو گام شناسایی و کنترل از یکدیگر مجزا باشند. در ابتدا با روش‌های شناسایی سیستم، مدل سیستم بدست می‌آمد و سپس با بکارگیری روش‌های طراحی کنترل‌کننده بر پایه مدل، کنترل‌کننده بر پایه قانون معادل بودن قطعی[1] طراحی می‌شد. بعبارت دیگر فرض می‌شد که مدل، رفتار سیستم واقعی را نشان می‌دهد و نامعینی برای مدل سیستم در نظر گرفته نمی‌شد.

روش متداول شناسایی سیستم که بر پایه پیش‌بینی خطا می‌باشد باعث می‌گردد که در شناسایی یک پروسه علاوه بر مدل نامی یک مجموعه نامعینی حاصل گردد که بردار پارامتر تخمین زده شده با یک احتمال از پیش تعیین شده در این مجموعه نامعینی بیضوی قرار می‌گیرد.

از دهه ۸۰ تئوری‌های کنترل مقاوم شکل گرفتند و طراحی کنترل مقاوم با وجود نامعینی‌های ساختاری و غیر ساختاری مورد توجه قرار گرفت. تئوری‌های کنترل مقاوم با در نظر گرفتن نامعینی‌های غیر ساختاری رشد و پیشرفت بیشتری داشتند ولی طراحی کنترل‌کننده مقاوم با در نظر گرفتن نامعینی ساختاری پارامتری هنوز در اولین گام‌های پیشرفت خود قرار دارد. این امر باعث گردیده است که فاصله‌ای میان طراحی کنترل مقاوم و شناسایی سیستم ایجاد گردد. زیرا همان‌طور که گفته شد مجموعه‌های نامعینی حاصل از شناسایی سیستم به‌صورت نامعینی پارامتری می‌باشند.

از ۱۹۹۰ تلاش‌های زیادی برای کم‌نمودن فاصله میان این دو شاخه از علوم مهندسی انجام پذیرفت. مباحث مختلفی در این زمینه مطرح گردید که تا حدی نتایج تحقیقات پاسخ‌گوی این مباحث بود. اولین نتایج در زمینه شناسایی و طراحی کنترل با مدل‌های با پیچیدگی محدود که به

[1] Certainty equivalence principle

عنوان یک مساله ترکیبی ظاهر گشت، در حدود ۱۹۹۰ ارائه شد. در سمیناری در زمینه شناسایی سیستم در سال ۱۹۹۱ (SYSID 1991) بسیاری از موضوعات کلیدی مطرح گردیدند. با این وجود در آن سمینار این موضوعات بیشتر بصورت دستور جلسه بود تا راه حلی برای آنها. در آن زمان ارتباط بسیار کمی میان رابطه میان شناسایی سیستم و طراحی کنترل مقاوم وجود داشت. این دو تئوری بطور جداگانه توسط دو دسته مجزا از محققین با تعامل بسیار کم توسعه داده شده بودند. در ۱۹۹۰ فعالیت‌ها در زمینه شناسایی برای کنترل آغاز شدند. در مجمع SYSID 2003 یالمارسون[1] تعداد مقالاتی را که در زمینه شناسایی برای کنترل بعد از SYSID 1991 شکل گرفته بودند را حدود ۱۵۰۰ مقاله عنوان نمود.

نیمه دوم دهه ۱۹۹۰ حرکت به سمت تعریف و تخمین مجموعه‌های نایقینی بر پایه کنترل انجام پذیرفت [۵-۳] و طراحی کنترل‌کننده را در چارچوب طراحی کنترل‌کننده مقاوم قرار داد. تمرکز بیشتر بر روی شکل دادن توزیع خطای واریانس مدل‌های شناسایی شده بود، یا بعبارت دیگر دستکاری شکل مجموعه‌های نامعینی. در واقع رویه طراحی کنترل‌کننده مقاوم، محاسبه کنترل‌کننده به‌گونه‌ای است که بهترین عملکرد ممکن در بدترین حالت ممکن بدست آید. یا بعبارت دیگر بهترین عملکرد ممکن در تمامی مدل‌های مجموعه نامعینی. این عملکرد در بدترین حالت، علاوه بر اینکه به کنترل‌کننده ارتباط دارد به مجموعه نامعینی نیز مربوط می‌باشد. این مجموعه نامعینی وابسته به شرایط آزمایشی است که عمل شناسایی در آن انجام می‌پذیرد.

۱-۲ نتایج موجود در زمینه کنترل سیستم‌ها با نامعینی پارامتری بیضوی

بدنبال پیشرفت روش‌های طراحی کنترل‌کننده بر پایه مدل سیستم، شناسایی سیستم مورد توجه بسیار قرار گرفته است. بدلیل وجود نویزهای اندازه‌گیری، مدل‌های بدست آمده ازفرایند شناسایی سیستم دقیق نبوده و دارای نامعینی می‌باشند. در شناسایی سیستم وقتی که سیستم واقعی به

[1] Hjalmarsson

مجموعه مدل‌های پارامتریزه شده مورد بررسی متعلق باشد، می‌توان نامعینی حاصل از فرایند شناسایی را بصورت نامعینی پارامتری توصیف نمود. در این حال پارامترهای شناسایی شده با یک احتمال از پیش تعیین شده به یک ناحیه بیضوی شکل متعلق خواهند بود [۶]. بنابراین مدل‌های بدست آمده از شناسایی سیستم، مدل‌هایی با نامعینی پارامتری بیضوی خواهند بود.

مدل‌های با نامعینی پارامتری حقیقی، امکان نمایش دقیق‌تر سیستم‌ها را در مقایسه با نامعینی غیر ساختاری[1] فراهم می‌آورند. مقدار تکین ساختاری[2] (μ) به‌منظور بررسی نامعینی ساختاری در مدل‌های خطی ارائه شده است. اما در واقعی و در حالت کلی این مسائل سنتز μ مسائلی موسوم به مسائل NP-hard می‌باشند و از لحاظ محاسباتی انجام‌نشدنی[3] هستند. در مباحث کنترلی، روش‌های متفاوت دیگری برای حل چنین مسائلی ارائه شده‌اند.

روش‌هایی که در آنها طراحی کنترل‌کننده مقاوم با وجود نامعینی بیضوی انجام گیرد، بسیار اندک هستند. در [۷] مساله پایداری مربعی[4] برای سیستم‌ها با نامعینی پارامتری مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله روش‌های طراحی کنترل‌کننده فیدبک حالت و فیدبک خروجی ارائه شده‌اند. در [۸] نشان داده می‌شود که مساله جایابی مقاوم قطب‌ها برای سیستم‌ها با نامعینی پارامتری بیضوی می‌تواند به فرم یک مساله بهینه‌سازی min-max محدب مطرح گردد. با استفاده از تقریب بیضوی داخلی[5] از حوزه پایداری در فضای ضرایب چندجمله‌ای [۹]، یک روش جهت طراحی کنترل‌کننده مرتبه ثابت پایدارساز برای سیستم‌های با نامعینی پارامتری بیضوی ارائه شده است [۱۰]. در [۱۱] ویژگی مطلوب، پایدارسازی مقاوم است. هدف یافتن کنترل‌کننده‌ای است که حجم مجموعه مدل بیضوی را بیشینه نماید.

مساله طراحی کنترل‌کننده فیدبک حالت H_∞ در [۱۲] مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از ایرادهای این روش آن است که پارامترهای نامعین تنها می‌توانند در ماتریس A و یا C از تحقق

[1] Unstructured uncertainty
[2] Structured singular value
[3] Intractable
[4] Quadratic stability
[5] Ellipsoidal inner approximation

فضای حالت سیستم نامعین قرار گیرند. بعبارت دیگر حالتی که هم ماتریس A و هم C دارای نامعینی باشند، قابل بررسی نیست. علاوه بر این، نتایج ارائه شده در این مقاله بر پایه در نظر گرفتن یک ماتریس لیاپانوف مشترک برای تمامی سیستم‌ها در مجموعه مدل می‌باشد که بسیار محافظه‌کارانه است. در [۱۳] یک پروسه تکرارشونده[1] برای طراحی کنترل‌کننده برای سیستم‌های با نامعینی پارامتری بیضوی ارائه شده است. در این روش در گام اول یک مجموعه از کنترل‌کننده‌ها برای سیستم نامی به‌گونه‌ای طراحی می‌شود که عملکرد کنترل‌کننده بر روی سیستم نامی کمی بهتر از عملکرد مطلوب بر روی کل مجموعه مدل بیضوی باشد. سپس مساله سنتز به مساله آنالیز تبدیل می‌شود. بدین شکل که بررسی می‌شود آیا کنترل‌کننده‌ها ویژگی مطلوب عملکردی را بر روی کل سیستم‌ها در مجموعه مدل برآورده می‌نمایند یا خیر. یک روش طراحی کنترل‌کننده فیدبک خروجی H_∞ بر پایه پارامتریزاسیون با بعد نامحدود یولا-کوثرا[2] در [۱۴] آورده شده است. این روش قادر نیست راه‌حلی جهت طراحی کنترل‌کننده‌ای با مرتبه‌ای پایین‌تر از مرتبه مدل ارائه نماید. بنابراین کنترل‌کننده‌های بدست آمده از این روشی همگی کنترل‌کننده‌های مرتبه کامل[3] خواهند بود.

۱-۳ نتایج موجود در زمینه طراحی آزمایش شناسایی سیستم

در دهه ۱۹۷۰ طراحی آزمایش برای شناسایی سیستم یک زمینه فعال تحقیقاتی بود و اندازه‌گیری‌های متفاوتی از مدل شناسایی شده برای این طراحی بهینه بکار گرفته می‌شد. از نقطه‌نظر شناسایی در آن زمان تنها شناسایی حلقه باز مد نظر بود و تابع هدفی که کمینه می‌شد اندازه‌های متفاوتی از ماتریس کوواریانس پارامترها، P_θ، بود. از آنجمله می‌توان به طراحی $D-\text{optimal}$ که در آن $\det(P_\theta)$ کمینه می‌شود و یا طراحی $L-\text{optimal}$ که در آن $\text{tr}(WP_\theta)$ کمینه می‌شود که در آن W یک ماتریس وزنی غیر منفی است، اشاره نمود.

[1] Recursive procedure
[2] Youla-Kucera
[3] Full order

یک مساله کلاسیک حلقه باز طراحی ورودی با در نظر گرفتن تعداد داده‌های ثابت، کمینه نمودن $\det(P_\theta)$ نسبت به $\Phi_u(\omega)$ با در نظر گرفتن قیدی بر روی $\Phi_u(\omega)$ به صورت $\int_{-\pi}^{\pi}\Phi_u(\omega)d\omega \le \alpha$ برای مقدار از پیش تعیین شده α، می‌باشد.

کمینه نمودن توابع هدف کلاسیک از ماتریس کوواریانس مانند $\det(P_\theta)$ و $\mathrm{tr}(WP_\theta)$ و در نظر گرفتن قیودی بر روی طیف توان ورودی منجر به یک مساله بهینه‌سازی محدب خواهد شد و جواب بهینه به فرم یک طیف توان گسسته خواهد بود (به‌عبارت دیگر ورودی را می‌توان به صورت مجموع چند سینوس در نظر گرفت).

فرمول‌های خطای بایاس و واریانس برای تخمین توابع تبدیل از دهه ۱۹۸۰ راه را برای فرمولاسیون مسائل طراحی آزمایش به سمت کنترل هموار نمودند. این فرمول‌ها به‌طور صریح شامل تاثیر شرایط آزمایش (تعداد داده‌ها، طیف ورودی، طیف نویز، پیکربندی فیدبک، کنترل‌کننده فیدبک C_{id} و غیره) بر روی اندازه خطا می‌باشد. در زمینه طراحی نکته‌ای که باید به آن توجه شود آن است که این فرمولاسیون با فرض به سمت بینهایت رفتن مرتبه سیستم می‌باشد و در صورتی که از این رابطه برای مدل‌های با مرتبه محدود استفاده گردد ممکن است که باعث نتیجه‌گیری‌های اشتباه شود. این امر باعث گردید که توجه به سمت روابط واریانس برای مدل‌های با مرتبه محدود معطوف گردد.

ملاک‌های پایداری و عملکرد مقاوم را به‌طور عمده می‌توان به صورت قیود وزندار شده فرکانسی واریانس خطای تابع تبدیل توصیف نمود. به‌منظور فرمولاسیون مساله طراحی ورودی بهینه به‌هدف کنترل با توجه به اندازه‌هایی بر روی تابع تبدیل سیستم و بدون در نظر گرفتن فرمول مجانبی (در مرتبه سیستم) واریانس، روش‌های متفاوتی را می‌توان در نظر گرفت.

شناسایی به هدف کنترل عمدتاً در حلقه بسته و بصورت تکرار شونده انجام می‌پذیرد. در سیستم حلقه بسته برای یک کنترل‌کننده مشخص C_{id} و طول داده‌های ثابت، مشاهده می‌شود که ماتریس کوواریانس نسبت به طیف سیگنال مرجع $\Phi_r(\omega)$ خطی است که می‌تواند به عنوان هدف طراحی در نظر گرفته شود. به‌جای ثابت در نظر گرفتن کنترل‌کننده و بهینه نمودن طیف سیگنال

مرجع، مساله طراحی بهینه حلقه بسته را می‌توان نسبت به هم طیف سیگنال مرجع و هم کنترل‌کننده C_{id} فرموله نمود.

در [۵۱] چارچوبی برای مساله طراحی ورودی در شناسایی ارائه شده است. که در آن با ارائه یک پارامتریزاسیون مناسب خطی با بعد محدود از طیف ورودی مساله طراحی ورودی به یک مساله محدب با بعد محدود تبدیل خواهد شد. قیدهای متفاوتی از کیفیت مدل را می‌توان در این چارچوب قرار داد. به‌طور ویژه قیدهای فرکانسی متفاوتی را می‌توان استفاده نمود. این قیدها می‌توانند در کاربردهای کنترل ظاهر گردند که از آن‌جمله می‌توان به تضمین پایداری مقاوم و عملکرد مقاوم برای تمامی مدل‌های در یک مجموعه مدل شناسایی شده، اشاره نمود.

در مقاله یاد شده می‌توان از پارامتریزاسیون طیف ورودی با بعد محدود و یا پارامتریزاسیون همبستگی جزئی استفاده نمود. انتخاب نوع پارامتریزاسیون به موضوعاتی از قبیل بهینگی، محاسباتی، قیدهای سیگنال‌ها و مقاومت بستگی دارد. پارامتریزاسیون همبستگی جزئی به‌طور سراسری[1] بهینه است و تعداد مینیمال از پارامترها را در بر دارد که به حجم محاسباتی کمتر منتهی می‌شود. با این وجود قیدهای سیگنال خاصی را نمی‌توان تضمین نمود و پارامتریزاسیون ممکن است که به سیستم واقعی وابسته باشد. پارامتریزاسیون طیف با بعد محدود در حالت کلی یک جواب بهینه سراسری را نخواهد داد ولی از طرفی توابع پایه‌ای لازم نیست که تابعی از سیستم واقعی باشند و این روش می‌تواند طیف وسیعی از قیدهای سیگنال را در برگیرد.

در [۶۵] روشی برای محاسبه محدب ملاک‌های بدترین حالت ارائه شده است. از این ملاک‌ها می‌توان برای ارزیابی عملکرد و یا پایداری مجموعه مدل‌های پارامتریک بیضوی استفاده نمود.

یکی از موانعی که در ارتباط دادن کنترل مقاوم و مدل‌هایی که از شناسایی PE بدست می‌آیند آن است که روش‌های محدودی برای طراحی کنترل‌کننده مقاوم وجود دارند که با نامعینی پارامتری بیضوی سر و کار داشته باشند. در [۱۲] یک شرط کافی برای وجود کنترل‌کننده فیدبک حالت H_∞

[1] global

برای سیستم‌های چند ورودی- تک خروجی نامعین با نامعینی پارامتری بیضوی ارائه شده است. این شرط به صورت یک نامساوی ماتریس خطی است که پاسخ آن یک مجموعه از بهره‌های فیدبک مجاز را فراهم می‌آورد. دو ساختار مدل متفاوت در نظر گرفته می‌شود که یکی دارای قطب‌های مشخص ولی صفرهای نامشخص است و دیگری دارای قطب‌های نامشخص و صفرهای مشخص است. همچنین در این مقاله مساله طراحی ورودی در شناسایی سیستم با این روش سنتز کنترل‌کننده همراه شده است. این امر بدین معنی است که مشخصه H_∞ مطلوب بر روی تابع تبدیل حلقه بسته سیستم در طراحی طیف سیگنال ورودی برای شناسایی پروسه مورد استفاده قرار می‌گیرد. بعبارت دیگر، نامعینی بیضوی حاصل از شناسایی با این طیف ورودی به‌گونه‌ای شکل می‌یابد که ویژگی کنترل برای تمامی مدل‌ها در مجموعه نامعینی ارضا گردد و بنابراین برای سیستم واقعی نیز تضمین خواهد شد.

در [۵۶] یک روش جهت طراحی آزمایش شناسایی به‌هدف کنترل ارائه می‌گردد. هدف طراحی آزمایش شناسایی حلقه بازی است که با کمترین تحریک باعث گردد کنترل‌کننده طراحی شده بر اساس مدل شناسایی شده سیستم را پایدار سازد و به یک سطح عملکرد H_∞ مطلوب در سیستم واقعی برسد.

در این مقاله هدف طراحی آزمایش شناسایی با کمترین هزینه است. این آزمایش شناسایی مدلی را نتیجه می‌دهد که کنترل‌کننده بر پایه این مدل یک هدف کنترلی از پیش تعیین شده را بر آورده سازد. به‌عبارت دیگر فرض کنید که زمان آزمایش ثابت است و به دنبال آزمایش شناسایی با کمترین هزینه هستیم به‌طوری که کنترل‌کننده $\hat{C}$ طراحی شده بر پایه مدل نامی شناسایی شده $\hat{G}$ سیستم واقعی را پایدار سازد و به عملکرد مطلوب از پیش تعیین شده بر روی سیستم واقعی G_0 برسد. در اینجا عملکرد مطلوب به‌صورت حدی بر روی اندازه یکی از توابع تبدیل حلقه بسته سیستم می‌باشد. برای حل این مساله طراحی ورودی با پایین‌ترین هزینه آزمایش، یک روش دو مرحله‌ای ارائه می‌شود. در گام اول اندازه $r_{adm}(\omega)$ تعیین می‌گردد که مربوط به بزرگترین نامعینی جمع‌شونده است که اگر پروسه $\hat{G}$ دارا باشد کنترل‌کننده طراحی شده $\hat{C}=C(\hat{G})$ عملکرد H_∞ مورد نیاز برای تمامی

سیستم‌ها در این مجموعه مدل را برآورده می‌نماید. در گام دوم (طراحی شناسایی) سیگنال شبه ایستای $u(t)$ با کمترین انرژی به‌گونه‌ای تعیین می‌گردد که اندازه $r_u(\omega)$ مربوط به ناحیه نامعینی شناسایی شده $D_{r_u}(\hat{\theta}_N)$ در هر فرکانسی کوچکتر از بزرگترین شعاع نامعینی قابل قبول $r_{adm}(\omega)$ باشد.

در واقع در این مقاله، یک روش برای تاثیر متقابل میان طراحی آزمایش شناسایی و کنترل مقاوم بر پایه یک مدل شناسایی شده و مجموعه نامعینی مربوطه، ارائه شده است. در این روش بجای آنکه بدنبال طراحی آزمایشی باشیم که یک اندازه به‌هدف کنترل بر روی مجموعه نامعینی تخمین زده شده را نتیجه دهد، بدنبال آزمایش شناسایی به‌گونه‌ای خواهیم بود که دارای کمترین هزینه بوده و با این وجود مجموعه نامعینی به‌گونه‌ای باشد که ویژگی‌های کنترل مقاوم را ارضا نماید. لازم به‌ذکر است که مقاله یاد شده طراحی کنترل‌کننده مقاوم و یا ساختار کنترل‌کننده در نظر گرفته نمی‌شود.

در [۶۶] به‌طراحی آزمایش بهینه شناسایی پرداخته می‌شود که در آن ساختار مدل به‌گونه‌ای است که سیستم واقعی را در بر ندارد. در این مقاله همان روش طراحی شناسایی مطرح شده در مقالات قبلی مورد استفاده قرار می‌گیرد، که در آن با تعیین محدوده‌ای بر روی دقت شناسایی مدل، سعی در کمینه نمودن هزینه شناسایی می‌گردد.

در تمامی روش‌های طراحی شناسایی قبلی، فرض بر آن بود که خطای مدل‌سازی تنها ناشی از تاثیر واریانس است، بعبارت دیگر $G(z,\hat{\theta}_N)$ در یک ساختار مدل مرتبه کامل $(S \in M)$ شناسایی می‌شد و ساختار مدل از پیش مشخص بود. در [۶۶] نتایج به حالتی که شناسایی در یک ساختار مدل کاهش مرتبه یافته و یا بعبارت دیگر $(S \notin M)$، بسط داده خواهد شد. در این حالت خطای مدل‌سازی از دو بخش تشکیل می‌شود: یکی بخش واریانس که مربوط به وجود نویز است و یکی بخش بایاس که مربوط به undermodeling است. اگر ساختار مدل به‌صورت خطی در بردار پارامترها انتخاب گردد، هر دو بخش یاد شده را می‌توان با حدهای بالای $\alpha(\omega,u)$ و $\beta(\omega,u)$ که وابسته به سیگنال ورودی $u(t)$ که بایستی تعیین گردد، محدود نمود. در اینجا کلاس سیگنال‌های ورودی که بهینه‌سازی بر روی آن

انجام می‌پذیرد، منحصر به سیگنال‌های PRBS است و بهینه‌سازی بر روی دامنه و پریود کلاک سیگنال انجام می‌گردد.

یکی از اهداف در طراحی کنترل مقاوم، پایدار نمودن تمامی پروسه‌های موجود در ناحیه نامعینی شناسایی شده است. در [۶۷] هدف طراحی آزمایش شناسایی است به گونه‌ای که بدترین حالت $v-gap$ میان پروسه شناسایی شده و تمامی پروسه‌های موجود در ناحیه نامعینی بدست آمده، کمترین مقدار ممکن باشد. طراحی آزمایش بر روی طیف توان ورودی انجام می‌پذیرد. در اینجا دو تابع هزینه در نظر گرفته می‌شود که در هرکدام از آنها مبادله متفاوتی میان دقت و حجم محاسبات در نظر گرفته می‌شود. نشان داده شده است که مساله بهینه‌سازی ورودی با توجه به این توابع هزینه را می‌توان به الگوریتم‌های استاندارد عددی که در آنالیز محدب مورد استفاده قرار می‌گیرد، تبدیل نمود.

علاوه بر این، فرض شده است که شناسایی سیستم در حلقه باز و به صورت ساختار ARX انجام می‌پذیرد و در ضمن سیستم واقعی در این مجموعه مدل، قرار می‌گیرد. بنابراین خطای مدل‌سازی تنها ناشی از خطای کوواریانس بردار پارامترهای تخمین زده شده است.

۱-۴ توصیف مساله

هدف این رساله ارائه روشی جهت طراحی سیگنال ورودی در شناسایی سیستم برای کنترل مقاوم است. این مساله مشتمل بر ترکیبی از مسائل طراحی زیر است:

۱) تنظیم بهینه مجموعه‌های نامعینی

۲) طراحی آزمایش شناسایی بر پایه خصوصیات پایداری و عملکرد مقاوم

۳) ارائه روش طراحی کنترل‌کننده مقاوم برای سیستم‌ها با نامعینی پارامتری بیضوی

۴) طراحی توام آزمایش شناسایی سیستم و کنترل‌کننده مقاوم