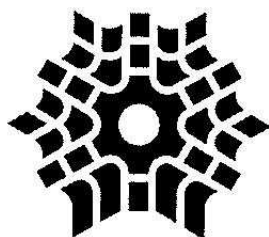


سیستم‌های کنترل غیرخطی پیشرفته: تئوری، طراحی و کاربردها

نصیف‌کننده:

محمدرضا محمود آقابابا

عضو هیات علمی دانشگاه صنعتی ارومیه



انتشارات دانشگاه صنعتی ارومیه



سازمان نشر و کتابخانه ملی
جمهوری اسلامی ایران

- سرشناسه : پورمحمد آقابابا، محمد، ۱۳۶۲-
عنوان و نام پدیدآور : سیستم‌های کنترل غیرخطی پیشرفته: تئوری، طراحی و کاربردها/ تصنیف کننده: محمد پورمحمد آقابابا
مشخصات نشر : ارومیه: دانشگاه صنعتی ارومیه، انتشارات، ۱۳۹۷.
مشخصات ظاهری : ل، ۳۶۷ ص: مصور(بخشی رنگی)، جدول (بخشی رنگی)، نمودار (بخشی رنگی).
شابک : ۹۷۸-۶۰۰-۹۹۶۷۷-۰۴
وضعیت فهرست نویسی : قیفا
یادداشت : کتابنامه: ص. ۳۶۴.
موضوع : کنترل غیرخطی
موضوع : Nonlinear control theory
شناسه افزوده : دانشگاه صنعتی ارومیه، انتشارات
رده بندی کنگره : ۶۷-۲/۵/۱۴-۱۹۸۳۱۲
رده بندی دیویی : ۵۱۳۷۹۷۵
شماره کتابشناسی ملی : ۵۱۳۷۹۷۵



انشارات دانشگاه صنعتی ارومیه

انتشارات دانشگاه صنعتی ارومیه

اول	نوبت چاپ:
اردیبهشت ۹۷	تاریخ چاپ:
۵۰۰	شمارگان:
۲۷۰۰۰ ریال	بهای کتاب:
۹۷۸-۶۰۰-۹۹۶۷۷-۰۴	شابک:
بهاره عزت‌تبار	طراح جلد:
نوروزی	لیتوگرافی/چاپ:

آدرس مؤسسه: ارومیه، خیابان آیت‌الله مدنی ۲، نرسیده به مسجد ابوطالب، انتشارات دانشگاه صنعتی ارومیه، صندوق پستی: ۴۱۹-۵۷۱۵۵، تلفن: ۰۴۴۳۱۹۸۰۲۵۱، نمابر: ۰۴۴۳۱۹۸۰۲۵۱، آدرس ایمیل: press@uut.ac.ir.

پیشگفتار

امروزه اکثر سیستم‌های موجود در صنعت‌های مختلف و فرآیندهای آن‌ها، دارای مشخصه‌ها و خاصیت‌های غیرخطی و پیچیده می‌باشند. از دیدگاه عملی، تجزیه و تحلیل این نوع سیستم‌ها به منظور دستیابی به خروجی مطلوب، دارای اهمیت ویژه و کاربردی می‌باشد که توسط مهندسين سیستم و کنترل طراحی و پیاده‌سازی می‌شود. گام‌های اساسی در کنترل عملی سیستم‌ها شامل مدل‌سازی، طراحی کنترل‌کننده به صورت تئوری، شبیه‌سازی کامپیوتری و پیاده‌سازی اولیه و نهایی می‌باشد. سیستم‌های غیرخطی دسته‌ی وسیعی از سامانه‌های فیزیکی و مهندسی پرکاربرد را شامل می‌شوند که توسط معادلات دیفرانسیل غیرخطی مدل می‌شوند. برای رسیدن به عملکرد مناسب و قابل قبول، در برخی موارد بهینه) در این نوع سیستم‌ها، عموماً نیاز به طراحی کنترل‌کننده‌ی سازگار با شرایط و محدودیت‌ها می‌باشد. از آنجایی که اغلب کنترل‌کننده‌های کلاسیک و خطی کارایی کمی برای سیستم‌های غیرخطی را ندارند، استفاده از کنترل‌کننده‌های غیرخطی امری ضروری می‌باشد. به حال کنترل‌کننده‌های غیرخطی متنوعی مانند کنترل مود لغزشی^۱، کنترل بازگشت به عقب^۲، کنترل خطی سازی فیدبک^۳ و کنترل تطبیقی^۴ برای سیستم‌های غیرخطی ارائه شده‌اند که هر کدام دارای مزیت‌ها و عایب خاص خود می‌باشند.

از آنجایی که مهم‌ترین و اصلی‌ترین مساله در بحث طراحی کنترل‌کننده‌ها، پایداری سیستم حلقه بسته (سیستم نامی به همراه کنترل‌کننده) می‌باشد، روش‌های کنترل غیرخطی به گونه‌ای معرفی می‌شوند تا تضمین‌کننده‌ی پایداری نهایی سیستم باشند. رسوم‌ترین روش برای تجزیه و تحلیل پایداری نقاط تعادل سیستم‌های غیرخطی روش لیاپانوف^۵ می‌باشد. روش‌های کنترلی مانند بازگشت به عقب، کنترل مود لغزشی و کنترل تطبیقی عموماً به صورت مفهومی یا غیرمستقیم از تئوری پایداری لیاپانوف برای طراحی کنترل‌کننده‌ی مورد نظر استفاده می‌کنند. رنی با افزایش پیچیدگی سیستم‌های عملی و کاربردی در صنعت و سایر زمینه‌ها، نیاز به طراحی و پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌های غیرخطی پیشرفته به وجود آمده‌است. به طور مثال، کنترل‌کننده‌های غیرخطی

^۱ sliding mode control

^۲ backstepping control

^۳ feedback linearization control

^۴ adaptive control

^۵ Lyapunov method

سنتی در مساله‌ی کنترل سیستم‌های سویچ‌شونده کارایی مناسب را از خود نشان نمی‌دهند. لذا باید رویه‌های کنترلی پیشرفته و جامع‌تری برای این گونه سیستم‌ها ابداع نمود.

مساله‌ی دیگر در نظر گرفتن موارد پیش‌آمده‌ی عملی در پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌ها می‌باشد. از آنجایی که طراحی‌های تئوری بر پایه‌ی ساده‌سازی‌های ریاضیاتی بوده و برخی موارد عملی در آن‌ها در نظر گرفته نمی‌شود، در عمل کارایی چندان مناسب و قابل قبولی برای کنترل‌کننده‌ها به دست نمی‌آید. از جمله‌ی این موارد می‌توان به عدم احتساب وجود نویز و اغتشاش^۱ در طراحی اشاره کرد. در نظر نگرفتن اثرات نویز محیط و سنسورها و همچنین اغتشاشات خارجی می‌تواند خروجی سیستم را از حالت مطلوب دور کرده و حتی ناپایداری به وجود آورد. همچنین، اکثر سیستم‌ها کاربردی شامل دینامیک‌های مدل‌نشده، خطاهای مدل‌سازی و عدم قطعیت در اثر تغییر مقدار پارامترهای سیستم می‌باشند. تضمین مقاومت^۲ کنترل‌کننده‌ی طراحی‌شده با وجود چنین نامعینی‌ها از دورویی^۳ سیستم کنترلی مطلوب می‌باشد. علاوه بر مقاومت سیستم در مقابل نویز، اغتشاش و نامعینی‌ها، اثرات پارامترهای مجهول سیستم نیز همواره باید در طراحی‌ها لحاظ شود؛ چرا که در عمل نمی‌توان به سادگی مقادیر برخی از پارامترهای فرآیندها و سیستم‌های غیرخطی را محاسبه نمود. بر این شرایط، استفاده از قوانین تطبیقی مناسب که تخمین‌زننده‌ی پارامترهای نامعلوم بوده و پایداری سیستم کلی را تحت تاثیر قرار ندهند، از موارد نظریه‌ی کنترل غیرخطی پیشرفته می‌باشد. مساله‌ی دیگر برسی وجود غیرخطی‌گری‌هایی مانند اشباع^۴ و ناحیه‌مرده^۵ در ورودی کنترل می‌باشد که در صورت در نظر گرفتن آن‌ها، پیاده‌سازی عملی کنترل‌کننده‌ی طراحی‌شده با مشکل جدی روبه‌رو خواهد شد. بنابراین، کنترل‌کننده‌ی مناسب باید بتواند از طریق محرکه‌های فیزیکی که اغلب شامل غیرخطی‌گری می‌باشند، سیگنال کنترلی قابل قبولی برای رسیدن به خروجی مطلوب را تولید نماید.

از طرف دیگر، در سال‌های اخیر با پیشرفت علم ریاضیات و مدل‌سازی دقیق‌تر سیستم‌ها و فرآیندها، گونه‌های دیگری از سیستم‌های غیرخطی با مدل‌سازی‌های متفاوت به وجود آمده‌اند. سیستم‌های مدل‌شده با معادلات مرتبه‌کسری^۵ از جمله‌ی این نوع سامانه‌های نوین به شمار

^۱ disturbance

^۲ robustness

^۳ saturation

^۴ dead-zone

^۵ fractional-order differential equations

می‌روند. امروزه نشان داده شده‌است که بسیاری از فرآیندهای پیچیده با معادلات دیفرانسیل معمولی^۱ قابل مدل‌سازی و تحلیل مناسب نمی‌باشند. همچنین، مسأله‌ی آنالیز پایداری و طراحی کنترل‌کننده برای این دسته سیستم‌ها کاملاً متفاوت از سیستم‌های مدل شده با معادلات دیفرانسیل معمولی می‌باشند. لذا به منظور رسیدن به دقت بالای کنترلی باید از کنترل‌کننده‌های غیرخطی پیشرفته‌ی جدیدی برای این نوع فرآیندها بهره گرفت.

در زمینه‌ی علم کنترل غیرخطی پیشرفته، مباحث دیگری مانند کنترل‌کننده‌های زمان محدود (کنترل‌کننده با تضمین پایداری در زمان محدود)، کنترل‌کننده‌های مرتبه‌کسری، رویت‌گرهای غیرخطی، روبت‌گر اغتشاش^۲، کنترل سیستم‌های سویچ‌شونده، سنکرون‌سازی سیستم‌های آشوبناک^۳، برخی مسایل دیگر نیز مطرح می‌باشند که درخور توجه ویژه می‌باشند.

سیستم‌های آشوبناک دسته‌ای گسترده‌ای از سیستم‌های غیرخطی هستند که اصلی‌ترین ویژگی آن‌ها حساسیت زیاد، شایع^۱ و تغییر در مقادیر پارامترهای سیستم می‌باشد. این خاصیت باعث غیرعادی بودن و غیرقابل پیش‌بینی بودن رفتار این سیستم‌ها شده‌است. پدیده‌ی آشوب و رفتار آشوبناک در بسیاری از سیستم‌های طبیعی و مدل‌شده در فیزیک، شیمی، بیولوژی، اقتصاد و علوم مهندسی مشاهده می‌شود. در حال حاضر کاربردهای مهندسی آشوب به سرعت در حال گسترش هستند که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به کاربرد در تکنولوژی‌های لیزرها، مهندسی شیمی، مهندسی مکانیک، ارتباطات محرمانه و مهندسی الکترونیک اشاره کرد. با توجه به کاربردهای وسیع، پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌های پیشرفته برای سیستم‌های آشوبناک از جنبه‌ی نظری و عملی دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد.

هدف اصلی این کتاب، بررسی و تحلیل موارد مطرح شده در بالا از جنبه‌ی تحلیلی و کاربردی می‌باشد. این کتاب سه عنوان کلی تئوری، طراحی و کاربردها را در یک فصل به‌شش می‌دهد. ابتدا در فصل یک بعد از معرفی کلی مبانی سیستم‌های غیرخطی و کنترلی، به ارائه‌ی مقدمات ریاضیاتی لازمه پرداخته می‌شود و اهمیت آن‌ها از نگاه مهندسین سیستم و کنترل بیان می‌شود. مثال‌هایی از برخی از سامانه‌های کنترل غیرخطی و نحوه‌ی مدل‌سازی سیستم‌ها نیز در این فصل ارائه می‌شوند. در فصل دوم، معیارهای آنالیز پایداری سیستم‌های غیرخطی بر پایه‌ی

^۱ ordinary differential equations

^۲ disturbance observer

^۳ synchronization

تئوری لیپانف، مطرح خواهند شد. در ادامه‌ی این فصل، روش‌های کنترل‌کننده‌های غیرخطی کلاسیک موجود مانند خطی‌سازی فیدبک، بازگشت به عقب، کنترل مود لغزشی و کنترل تطبیقی مرور می‌شوند. در فصل سوم، انواع روش‌های کنترل تطبیقی مود لغزشی ارائه می‌شوند. مساله‌ی کنترل تطبیقی مود لغزشی ترمینال سیستم‌های غیرخطی در فصل چهارم بررسی می‌شود. فصل پنجم تکنیک کنترل تطبیقی زمان محدود را معرفی می‌کند. مسایل کنترل در حضور ورودی‌های غیرخطی در فصل ششم مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند. معرفی رویت‌گرهای غیرخطی و رویت‌گر اغتشاش در فصل هفتم ارائه می‌شود. در فصل هشتم، طراحی کنترل‌کننده‌ی مناسب برای سیستم‌های سوئیچ‌شونده ارائه می‌شود. در فصل‌های نهم و دهم، به معرفی روش‌های کنترلی برای سیستم‌های مرتبه‌کسری پرداخته می‌شود. در نهایت، کنترل سیستم‌های غیرخطی مرتبه‌صحیح توسط کنترل‌کننده‌های مرتبه‌کسری در فصل یازدهم ارائه می‌شود. در انتهای هر بخش، برخی از کاربردها، سیستم‌های کنترل غیرخطی در دنیای واقعی ارائه و شبیه‌سازی می‌شوند. مثال‌هایی از طراحی کنترل‌کننده برای ربات، سیستم‌های الکترومکانیکی، ژيروسکوپ، ماشین‌های چرخشی و سیستم‌های شوت‌بک بیان می‌شوند تا خواننده دید عملی و کاربردی نسبت به روش‌های کنترلی مطروحه در کتاب پیدا کند.

شایان ذکر است که اکثر روش‌های کنترل پیشرفته‌ی معرفی‌شده در این کتاب، حاصل یافته‌های نویسنده در طول بیش از سیزده سال تدریس و تحقیق بوده و موضوعات و بحث‌های وسیعی از علم ریاضیات و مهندسی کنترل را شامل می‌شود که تا به حال در کتاب کاربردی و جامعی برای توصیف و بیان آن‌ها نوشته نشده‌است. در این راستا، کتاب حاصل جست‌وجوی پرکردن جای خالی یک کتاب تحقیقاتی (و یا درسی) برای دوره‌ی تحصیلات تکمیلی رشته‌ی مهندسی برق، مهندسی مکانیک، مهندسی شیمی، مهندسی عمران و ریاضیات کاربردی تصنیف شده است. بر خود لازم می‌دانم از همسر من که تنها حامی و مشوق من در نوشتن این کتاب بود قدردانی کرده و همچنین از حمایت‌های آقایان دکتر کاظمی‌نیا (مسئول محترم انتشارات دانشگاه) و دکتر قربان‌زاده (مدیر محترم کتابخانه دانشگاه) نیز تشکر نمایم. مهندسین، دانشجویان و استادان گرامی می‌توانند نقطه نظرات خود را از طریق ایمیل m.p.aghababa@gmail.com با اینجانب در میان گذارند.

محمد پورمحمد آقابابا

عضو هیات علمی دانشگاه صنعتی ارومیه

اردیبهشت ۹۷

فهرست مطالب

فصل اول: سیستم‌های غیرخطی و مقدمات ریاضیاتی.....	۱۳
۱-۱- سیستم‌های خطی تغییرناپذیر با زمان.....	۱۴
۱-۲- سیستم‌های غیرخطی.....	۱۶
۱-۳- سیستم‌های آشوبناک.....	۲۰
۱-۴- مقدمات ریاضیاتی.....	۲۶
۱-۴-۱- فضای متریک.....	۲۶
۱-۴-۲- فضای برداری.....	۲۷
۱-۴-۳- فضای برداری نرم‌دار.....	۲۸
۱-۴-۴- ماتریس‌ها.....	۲۹
۱-۴-۵- توپولوژی پایه.....	۳۳
۱-۴-۶- معادلات رانسا- غیرخطی.....	۳۵
فصل دوم: معیارهای آنالیز پایداری و روش‌های کنترل غیرخطی کلاسیک.....	۳۹
۱-۲- مفاهیم و قضایای پایداری.....	۴۰
۱-۲-۱- تعاریف پایداری.....	۴۰
۱-۲-۲- پایداری لیاپانف.....	۴۲
۱-۲-۳- پایداری زمان محدود.....	۴۵
۲- روش‌های کنترل غیرخطی کلاسیک.....	۴۶
۲-۱- کنترل بازگشت به عقب.....	۴۶
۲-۲- کنترل خطی‌سازی فیدبک.....	۵۰
۲-۳- کنترل مود لغزشی.....	۵۵
۲-۴- کنترل تطبیقی.....	۵۸
۲-۵- کنترل زمان محدود.....	۵۹
فصل سوم: کنترل تطبیقی مود لغزشی.....	۶۱
۱-۳- سنکرون‌سازی سیستم‌های آشوبناک با پارامترهای نامعلوم.....	۶۲
۲-۳- سنکرون‌سازی سیستم‌های آشوبناک با دینامیک نامعلوم.....	۷۰
۳-۳- کنترل سیستم‌های آشوبناک کانونیکال با دینامیک نامعلوم.....	۷۳
فصل چهارم: کنترل تطبیقی مود لغزشی ترمینال.....	۷۹
۱-۴- ردیابی سیستم‌های غیرخطی نامعین با کنترل مود لغزشی ترمینال.....	۸۰
۲-۴- ردیابی سیستم‌های غیرخطی با پارامترهای نامعلوم توسط کنترل مود لغزشی ترمینال.....	۸۶

۳-۴	پایدارسازی سیستم‌های کانونیکال با کنترل مود لغزشی ترمینال بدون چترینگ.....	۹۳
۴-۴	مهار نوسانات سیستم‌های مکانیکی با کنترل مود لغزشی ترمینال درجه دوم.....	۱۰۴
	فصل پنجم: کنترل تطبیقی زمان محدود.....	۱۱۷
۱-۵	کنترل تطبیقی زمان محدود سیستم تراز افقی.....	۱۱۸
۲-۵	کنترل تطبیقی زمان محدود سیستم گاورنر چرخشی.....	۱۲۳
۳-۵	کنترل تطبیقی زمان محدود سیستم ژيروستات.....	۱۲۹
۴-۵	کنترل تطبیقی زمان محدود ناهموار سیستم ژنراتور سنکرون.....	۱۳۷
	فصل ششم: کنترل با ورودی‌های غیرخطی.....	۱۴۷
۱-۶	سنکرون سازی سیستم‌های آشوبناک با غیرخطی گری قطاع ورودی.....	۱۴۸
۲-۶	سنکرون سازی زمان محدود سیستم‌های آشوبناک با غیرخطی گری قطاع ورودی.....	۱۵۶
۳-۶	ردیابی ناوخت برای سیستم‌های رباتیک با ورودی اشباع.....	۱۶۴
۴-۶	کنترل تطبیقی سیستم‌های آشوبناک با دینامیک نامعین و ورودی اشباع.....	۱۷۴
۵-۶	پایدارسازی زمان محدود در ربات‌ها با ورودی ناحیه مرده.....	۱۸۹
	فصل هفتم: روتگرهای غیرخطی.....	۲۰۱
۱-۷	روتگرهای سیستم‌های خطی غیرناپذیر با زمان.....	۲۰۲
۲-۷	روتگرهای سنتی سیستم‌های غیرخطی.....	۲۰۴
۳-۷	روتگر تطبیقی برای سیستم‌های آشوبناک ناخوارزان.....	۲۰۷
۴-۷	کنترل ردیابی سیستم‌های غیرخطی توسط روتگر اغشاش.....	۲۱۳
	فصل هشتم: کنترل سیستم‌های سوئیچ شونده.....	۲۲۷
۱-۸	پایدارسازی سیستم‌های سوئیچ شونده‌ی غیرخطی آبشاری.....	۲۲۸
۲-۸	کنترل سیستم‌های سوئیچ شونده با پارامتر نامعلوم و ورودی اشباع.....	۲۴۴
	فصل نهم: کنترل سیستم‌های مرتبه کسری (۱).....	۲۵۵
۱-۹	سیستم‌های غیرخطی مرتبه کسری و ریاضیات مرتبه کسری.....	۲۵۶
۲-۹	مهار رفتار آشوبناک در رزوناتور میکروالکترومکانیکی مرتبه کسری.....	۲۶۵
۳-۹	کنترل و سنکرون سازی مقاوم سیستم‌های آشوبناک مرتبه کسری.....	۲۷۴
۴-۹	پایدارسازی زمان محدود مقاوم سیستم‌های فوق آشوبناک مرتبه کسری.....	۲۸۵
	فصل دهم: کنترل سیستم‌های مرتبه کسری (۲).....	۲۹۷
۱-۱۰	کنترل مود لغزشی ترمینال سلسله مراتبی سیستم‌های مرتبه کسری.....	۲۹۸
۲-۱۰	پایدارسازی سیستم‌های مرتبه کسری درجه سه با نامعینی نامنطبق.....	۳۱۰

۳-۱۰- کنترل سیستم‌های مرتبه‌کسری با غیرخطی‌گری ورودی.....	۳۱۲
فصل یازدهم: کنترل سیستم‌های غیرخطی توسط کنترل‌کننده‌های مرتبه‌کسری.....	۳۳۵
۱-۱۱- طراحی کنترل‌کننده‌ی مرتبه‌کسری برای مهار لرزه‌های سازه‌ها.....	۳۳۶
۲-۱۱- کنترل مود لغزشی مرتبه‌کسری برای سیستم‌های غیرخطی.....	۳۴۴
۳-۱۱- کنترل مرتبه‌کسری سیستم‌های مکانیکی با دو درجه آزادی.....	۳۵۲
منابع.....	۳۶۴

www.ketab.ir