کنترل پیشرفته
و
سیستم‌های دینامیک

www.ketab.ir

مؤلفان:

دکتر علی غفاری

استاد مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دکتر علیرضا خدایاری

دکتر فرزاد چراغ‌پور سماواتی

شماره ۴۸۸

سرشناسه: غفاری، علی، - ۱۳۲۶
عنوان و نام پدیدآور: کنترل پیشرفته و سیستم‌های دینامیک/ مؤلفان علی غفاری، علیرضا خدایاری، فرزاد چراغ‌پورسماواتی؛ ویراستار دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی
مشخصات نشر: تهران: دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، انتشارات، ۱۳۹۸
مشخصات ظاهری: خ، ۶۵۶ ص.: مصور
شابک: 978-622-6655-55-2
وضعیت فهرست نویسی: فیپا
یادداشت: واژه‌نامه یادداشت: کتابنامه: ص ۶۳۹ یادداشت: نمایه
موضوع: مهندسی کنترل
موضوع: دینامیک
موضوع: تجزیه و تحلیل سیستم‌ها
موضوع: نظریه کنترل
شناسه افزوده: خدایاری، علیرضا، -۱۳۵۹ شناسه افزوده: چراغ‌پورسماواتی، فرزاد، -۱۳۵۸
رده بندی کنگره: TJ۲۱۳
رده بندی دیویی: ۶۲۹/۸
شماره کتابشناسی ملی: ۶۱۱۲۱۱۵

ناشر: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی press.kntu.ac.ir

عنوان: کنترل پیشرفته و سیستم‌های دینامیک
مؤلفان: دکتر علی غفاری، دکتر علیرضا خدایاری و دکتر فرزاد چراغ‌پورسماواتی
نوبت چاپ: اول
تاریخ انتشار: اسفند ۱۳۹۸ ، تهران
شمارگان: ۵۰۰ جلد
ویرایش: ویراستار دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
چاپ: شریف
صحافی: گرنامی
قیمت: ۱۳۰۰۰۰ تومان

خیابان میرداماد غربی- شماره ۴۷۰- انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تلفن: ۸۸۸۸۱۰۵۲
میدان ونک - خیابان ولی‌عصر(عج) - بالاتر از چهارراه میرداماد - شماره ۲۶۲۶- مرکز پخش و فروش انتشارات
تلفن: ۸۸۷۷۲۲۷۷ رایانامه: press@kntu.ac.ir - تارنما (فروش برخط): press.kntu.ac.ir

www.ketab.ir

پیش‌گفتار

کنترل چیست؟

جهان هستی و شگفتی‌های آن را می‌توان از زوایای گوناگون تماشا کرد و مورد کنکاش قرار داد. گل‌های وحشی که در فصل بهار بی‌مزد و منت دامن صحرا را می‌آرایند؛ زیبا و چشم‌نوازند؛ ولی زیباتر از این ظاهر، نظمی است که در ساختار درونی کوچک‌ترین جزء زندهٔ هر برگ گل وجود دارد. تماشای رشد و تکثیر گلبرگ گل تنها به مدد عقل و به کمک علم میسر شده است؛ جهان شگفت‌انگیزی را آشکار می‌کند که با نظمی خیره‌کننده طراحی و ساخته شده است.

مشتی برادهٔ آهن را بر روی سطح یک آینهٔ بزرگ که کف اتاق گذاشته‌اید؛ بریزید. براده‌ها در همه جای آینه پخش می‌شوند. ممکن است در قسمت‌هایی از آینه مقدار بیشتری براده جمع شده باشد و در جای دیگری مقداری کم‌تر. چقدر ممکن است در دفعات متعددی که براده‌ها را بر روی سطح آینه می‌ریزید همواره یک شکل منظم هندسی مانند یک ستاره، یک مارپیچ، یک گل و شبیه آنها درست شود؟ احتمال این امر آن‌چنان ناچیز است که رسماً صفر است. حال اگر کسی قبلاً چند آهن‌ربا را در پشت آینه طوری تعبیه کرده باشد که شکل منظم مزبور درست شود، در چنین حالتی، اگر براده‌ها را در حضور جمعی تماشاچی بر روی سطح آینه بریزید همه بی‌عجب خواهند دید همواره شکلی منظم از براده‌ها بر روی سطح آینه ایجاد می‌شود.

نتیجهٔ روشن این مثال آن است که هرجا با نظم روبه‌رو شدید؛ به شرط آن که این نظم یک قاعده باشد و نه یک استثنا، یعنی اگر همواره ان نظم حاکم باشد؛ یقین داشته باشید که چنین امری تصادفی و اتفاقی نبوده، کسی آن را به وجود آورده است.

اساس کار جهان نظم است و علم کنترل یعنی ایجاد نظم. کنترل یعنی چگونگی ایجاد نظم در سیستم‌های دینامیکی. آنجا که سیستم‌های دینامیکی ساختهٔ بشر است؛ کنترل به معنای ایجاد نظم در آن سیستم‌ها است و آن‌جا که با طبیعت سروکار داریم؛ کنترل به معنای کشف نظم موجود در طبیعت است.

در دنیای محدود قوانین کنترلی ساختهٔ دست انسان، کنترل یعنی تنظیم فرکانس برق یک نیروگاه، تعقیب هواپیما توسط موشک، تنظیم اصطکاک ترمز خودرو در جادهٔ لغزنده و مثال‌های دیگر. از سوی

www.ketab.ir

دیگر، در جهان هستی کنترل یعنی کشف نظم موجود در جهان از بی‌نهایت کوچک‌ها تا بی‌نهایت بزرگ‌ها. کنترل یعنی کشف قوانین موجود در اجزای طبیعت و شناخت نظم موجود در آن‌ها. کشف نظم موجود در چگونگی عملکرد DNA، کشف نظم عملکرد ساختار مولکولی اجسام. کنترل یعنی کشف نظم و قوانین حاکم بر حرکت تمامی سیارات و همهٔ کهکشان‌ها، کشف نظمی که در همهٔ سیستم‌های دینامیکی موجود در جهان هستی برقرار است. کنترل، علمی نامتناهی است که پیشرفت آن در امتداد حیات انسان و جهان ادامه می‌یابد و با پیشرفت علم و آگاهی انسان از رازهای جهان هستی، فناوری‌های کنترلی ساختهٔ دست انسان نیز با الهام از آنچه کشف می‌شود؛ پیشرفت خواهد کرد. امروزه هوشمندسازی کنترل‌کننده‌ها و ربات‌ها، طراحی و ساخت نانوربات‌ها و بایوربات‌ها مراحل تکوینی خود را می‌گذرانند. اینکه در آینده سیستم‌های کنترلی ساختهٔ انسان چه توانایی‌هایی خواهند داشت؛ بستگی به آن دارد که چه کشف‌های تازه‌ای از نظم حاکم بر اجزای جهان آشکار شود. کنترل علمی است که هرچه شناخت ما از نظم موجود در جهان بیشتر شود؛ فناوری‌های انسانی‌اش نیز توسعه می‌یابد.کنترل یعنی شناخت هستی و در یک کلام کنترل یعنی خداشناسی.

این سؤال که آیا امروزه نگارش کتاب‌های دانشگاهی در ساختار سنتی و چاپ و نشر کاغذی آن‌ها درست است یا خیر و اینکه چه بازنگری‌هایی در آن باید انجام شود؛ جای گفتگوی فراوان دارد. شما می‌توانید با دست و در اینترنت هر آنچه را که می‌خواهید بیابید و پاسخ مناسب بسیاری از پرسش‌هایتان را به‌ویژه اگر پرسش علمی باشد؛ به دست آورید و اگر نتوانید، شانس شما برای یافتن پاسخ در یک کتاب هم اندک است. نکتهٔ دیگر آنکه شما نمی‌توانید همهٔ کتاب‌های دلخواهتان را در نسخه‌های چاپی آن در اختیار داشته باشید؛ ولی در کامپیوتان این امر ممکن است.

آنچه در پشتیبانی از نشر کتاب‌های دانشگاهی به زبان فارسی می‌توان گفت آن است که با وجود فراوانی دانشجویان دانشگاهی، ما مرجع‌های فارسی در شاخه‌های مختلف دانش روز کم داریم و این، تلاش در تألیف کتاب‌های فارسی زبان را شایسته می‌کند.

در زمینهٔ دانش کنترل، این نکته را باید دانست که هم‌اکنون در آخرین سال‌های سدهٔ چهاردهم هجری خورشیدی و اخرین سال از دههٔ دوم قرن بیست و یکم میلادی نزدیک به سه دهه است که نظریه‌ها و دستاوردهای تازه در کنترل نیامده است. امروزه بیشتر تلاش‌ها در جهت کاربردی کردن دستاوردها و نظریه‌های موجود است تا آفریدن دستاوردهای جدید. زیرا این نظریه‌ها حتی در کشورهای پیشرفتهٔ صنعتی هنوز هم از صنعت پیشتر و فراتر است. امروزه بر خلاف گذشته‌ها و دوران جنگ سرد بین ابرقدرت‌ها، که هر نظریهٔ تازه‌ای با حمایت گستردهٔ بخش‌های نظامی و دفاعی روبه‌رو می‌شد، کسی حاضر نیست از نظریه‌های جدید حمایت کند؛ مگر آنکه جنبه‌های کاربردی آن روشن باشد و در کوتاه‌ترین زمان به فناوری تبدیل شود. به این سبب است که بخش‌های فراوانی از آنچه در این کتاب آمده را می‌توان به شیوه‌های دیگر در سایر مرجع‌ها هم یافت؛ ولی تالیف‌کنندگان کوشیده‌اند تا حد ممکن همه چیز را چنان روشن و روان بنویسند که خوانندهٔ دانش‌پژوه علاوه بر فهم کامل موضوع، از خواندن و شناخت پایه‌های این علم احساس شادی کند.

کتاب کنترل و سیستم‌های دینامیکی، برای استفادهٔ دانشجویان تحصیلات تکمیلی در دوره‌های کارشناسی ارشد و دکترا در گرایش‌های دینامیک و کنترل از رشتهٔ مهندسی مکانیک، کنترل از مهندسی

www.ketab.ir

برق، دینامیک پرواز و کنترل از مهندسی هوافضا، مدل‌سازی و کنترل از مهندسی شیمی، و رشته های مکاترونیک و رباتیک در دانشکده‌های مختلف مهندسی مرجع مناسبی است. خواندن این کتاب همچنین به مهندسان و پژوهشگران صنعتی که با کنترل و سیستم‌های دینامیکی سروکار دارند و همکاران دانشگاهی که به تدریس در این گرایش‌ها مشغولند یا مایلند با دانش کنترل و کاربردهای آن بیشتر آشنا شوند و با نگاهی ژرف‌تر به آن بپردازند؛ پیشنهاد می‌شود.

دانشجویان گرایش‌های یاد شده که با کنترل سروکار دارند؛ همگی باید سرفصل‌های این کتاب را بیاموزند و فراگیری سرفصل‌های آن پیش نیاز سایر درس‌های کنترل ارشد و دکترا است. پیشنهاد می‌شود فصل‌های ۱ تا ۴ و ۶ تا ۱۱ در یک درس ۳ واحدی و فصل‌های ۵، ۷، و ۱۱ تا ۱۳ با افزودن *کنترل* پیش‌بین در یک درس ۳ واحدی دیگر ارائه شود.

چهار فصل اول کتاب به معرفی انواع سیستم‌های دینامیکی، روش‌های نمایش آن‌ها و رفتار سیستم‌های دینامیکی زمان‌پیوسته و زمان‌گسسته خطی نامتغیر با زمان و متغیر با زمان می‌پردازد. فصل پنجم که نسبت به سایر فصل‌ها حجم بیشتری نیز دارد؛ پدیده‌های اتفاقی و کاربردهای آن را بیان می‌کند. برای درک چگونگی رفتار سیستم‌های دینامیکی به ورودی‌های اتفاقی این فصل کمک می‌کند و از آنجا که سیستم‌های کنترلی عموماً تحت تاثیر ورودی‌های اغتشاشی و نویز اندازه‌گیری هستند و برای درک چگونگی کارکرد فیلتر کالمن در فصل دوازدهم دانستن و فراگیری این فصل پیشنهاد می‌شود.

فصل ششم هفتم به پایداری سیستم‌ها می‌پردازد. چون سیستم‌های خطی رفتار شناخته شده دارند و معادلات نمایش ریاضی آنها دارای حل تحلیلی هستند؛ بررسی پایداری آنها پیچیده نیست. به این خاطر است که مهم‌ترین قضیهٔ پایداری یعنی قضیهٔ مستقیم لیاپانوف و چند قضیهٔ اصلی دیگر را گرچه برای سیستم‌های خطی و غیرخطی می‌توان به‌کار برد؛ ولی آن‌ها به درستی بیشتر برای بررسی پایداری سیستم‌های غیرخطی و یا برای طراحی سیستم‌های کنترلی غیرخطی به‌کار می‌روند که در فصل هفتم به این قضایا و کاربرد آن‌ها می‌پردازیم.

در فصل هشتم کنترل‌پذیری و مشاهده‌پذیری سیستم‌های دینامیکی زمان پیوسته و زمان گسسته در هر دو حالت متغیر با زمان و نامتغیر با زمان، و چند قضیهٔ وابسته به این فصل بیان می‌شود. در فصل‌های نهم و دهم به ترتیب طراحی سیستم‌های کنترلی در فضای حالت و تخمین‌گرها یا مشاهده‌گرهای حالت بیان می‌شوند که نقطهٔ گذار از کنترل کلاسیک به کنترل پیشرفته یا مدرن است.

باید توجه داشت که عنوان کنترل مدرن بیش از ۶۰ سال پیش، در سنجش با کنترل کلاسیک، به این روش‌ها داده شده است و امروزه که دیگر هیچ نشانه‌ای از جدید بودن در آن‌ها نمی‌توان یافت و پایه‌گذاران این روش‌ها نیز که در جوانی آنها را مطرح کرده‌اند؛ عموماً به رحمت خدا رفته‌اند؛ عنوان کنترل مدرن برای آن‌ها چندان مناسب نیست و بهتر است عنوان کنترل پیشرفته را به‌کار بریم.

فصل یازدهم به بیان کنترل بهینهٔ مربعی خطی در سیستم‌های زمان‌پیوسته و زمان‌گسسته می‌پردازد که تنها روش کنترل بهینه با فرامین کنترلی خطی است. این روش با کاربردهای فراوان در

www.ketab.ir

صنایع فضائی و فناوری‌های پیچیده، شکل گسترش یافتهٔ روش کنترل فیدبک فضای حالت در فصل نهم است که در آن، یک تابع هزینهٔ مربعی از متغیرهای حالت و ورودی‌های کنترلی کمینه می‌شود.

فصل دوازدهم به تعیین بهترین تخمین از متغیرهای حالت در شرایط وجود اغتشاش در ورودی و نویز اندازه‌گیری می‌پردازد که توسط کالمن در سال ۱۹۶۰ میلادی پیشنهاد شد. فیلتر کالمن کاربردهای فراوانی در صنایع با فناوری‌های پیشرفته دارد. هدایت، ناوبری و کنترل فضاپیماها، کشتی‌ها و هواپیماها بدون بهره‌گیری از فیلتر کالمن ناممکن است.

فصل سیزدهم به طراحی بهینهٔ کنترل مربعی خطی در شرایطی می‌پردازد که به خاطر در دسترس نبودن متغیرهای حالت و نویزی بودن سیستم از فیلتر کالمن برای تعیین بهترین تخمین متغیرهای حالت استفاده می‌شود.

در همهٔ کتاب سعی شده است آنچه پیچیده و دشوار است گام به گام و به نرمی و آرامی بیان شود تا خوانندگان از آموختن آن احساس شادمانی کنند. آن‌ها باید از پیمودن این مسیر و قدم گذاشتن در این جنگل انبوه نهراسند؛ در راه پر پیچ و خم استوار گام بردارند تا در زیر انبوه درختان سرو آن خرمن خرمن گل سرخ بیابند.

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از پشتکار و تلاش ارزشمند مهندس حمید رحمانی به خاطر همکاری مؤثر در آماده‌سازی کتاب صمیمانه قدردانی نمایند. از دکتر عادل مقصودپور، دکتر محسن علیرضائی و مهندس فرشید طاهری که در تهیهٔ شکل مختلف تألیف کتاب، یاری کرده‌اند نیز سپاسگزاریم. همچنین از زحمات مهندس فرید فرزانه برای ترسیم شکل‌های کتاب و ابراهیم نعمت‌پور برای تایپ و صفحه‌آرایی کتاب، قدردانی می‌شود.

علی غفاری
علیرضا خدایاری
فرزاد چراغ‌پور سماواتی
آذرماه ۱۳۹۸

www.ketab.ir

فهرست مطالب

پیش‌گفتار ..... ز
فهرست مطالب ..... ک
فهرست علائم ..... ق

فصل ۱. مفاهیم، تعاریف و اصطلاحات
مقدّمه ۱
۱-۱. تاریخچهٔ کنترل ۱
۱-۲. مفاهیم و تعاریف سیستم ۶
۱ ۳. مدل سیستم ۱۲
۱-۴. مفاهیم و تعاریف سیستم‌های کنترلی ۲۰
سؤالات پایانی ۲۵
مراجع ۲۸

فصل ۲. مدل‌سازی سیستم‌های دینامیکی زمان پیوسته (روش‌های کلاسیک)
مقدّمه ۲۹
۲-۱. مدل حالت ۳۰
۲-۱-۱. مدل حالت سیستم‌های زمان پیوسته با پارامترهای مجزا ۳۱
۲-۱-۲. نقطهٔ تعادل (حالت تعادل) در سیستم‌های دینامیکی ۳۳
۲-۱-۳. مدل حالت سیستم‌های دینامیکی خطی نامتغیر با زمان ۳۵
۲ ۱ ۴. مدل حالت سیستم‌های دینامیکی خطی متغیر با زمان ۳۸
۲ ۲. تابع تبدیل ۴۰
۲ ۳. تابع تبدیل از معادلات حالت ۴۱

www.ketab.ir

۲-۴. معادلات حالت از تابع تبدیل ۴۴
۲-۵. نمایش ترسیمی سیستم‌های دینامیکی ۵۵
سؤالات پایانی ۵۸
مراجع ۶۲

فصل ۳. رفتار سیستم‌های دینامیکی زمان پیوسته
مقدّمه ۶۳
۳-۱. حل معادلات حالت سیستم‌های خطی نامتغیر با زمان ۶۴
۳-۱-۱. حل سیستم بدون ورودی (سیستم آزاد) ۶۵
۳-۱-۲. حل سیستم با ورودی ۷۷
۳-۲. مسیر حرکت در سیستم‌های دینامیکی نامتغیر با زمان ۸۳
۳-۲-۱. ترسیم مسیر حرکت به روش تحلیلی ۸۵
۳-۲-۲. روش ایزوکلاین ۸۶
۳-۲-۳. تحلیل صفحهٔ فاز سیستم‌های خطی ۸۹
۳-۲-۴. تحلیل صفحهٔ فاز سیستم‌های غیرخطی ۹۲
۳-۳. حل معادلات حالت سیستم‌های خطی متغیر با زمان ۹۵
۳-۴. پاسخ سیستم خطی به صورت تابع تبدیل ۹۶
سؤالات پایانی ۹۹
مراجع ۱۰۳

فصل ۴. مدل‌سازی سیستم‌های دینامیکی زمان‌گسسته و رفتار آن‌ها
مقدّمه ۱۰۵
۴-۱. معادلات حالت گسسته در میدان زمان ۱۰۹
۴-۲. حل معادلات حالت سیستم زمان‌گسستهٔ خطی نامتغیر با زمان ۱۱۰
۴-۳. تبدیل z ۱۱۲
۴-۴. حل معادلات حالت سیستم زمان‌گسستهٔ خطی در میدان z ۱۱۸
۴-۵. تابع تبدیل در سیستم‌های زمان‌گسسته ۱۲۲
۴-۶. نمایش ترسیمی سیستم زمان‌گسسته در میدان زمان و میدان z ۱۲۵
۴-۷. ارتباط تبدیل z و تبدیل لاپلاس ۱۲۷
۴-۸. گسسته‌ساز، نگهدارندهٔ رستهٔ صفر و قضیهٔ نمونه‌گیری ۱۳۰
۴-۱۰. مدل ریاضی زمان گسسته در سیستم‌های زمان پیوسته ۱۳۴
۴-۱۱. روش‌های تعیین تبدیل z از تبدیل لاپلاس و بالعکس ۱۳۹
۴-۱۱-۱. محاسبهٔ $G(z)$ از تبدیل لاپلاس ۱۴۰
۴-۱۱-۲. محاسبهٔ $G(s)$ از تبدیل z ۱۴۵

www.ketab.ir

سؤالات پایانی ۱۴۶
مراجع ۱۵۰

فصل ۵. تئوری احتمالات، متغیرها، فرآیندها و دنباله‌های اتفاقی
مقدّمه ۱۵۱
۵-۱. فضای نمونه، رخدادها و اصول احتمالات ۱۵۲
ردیف احتمالات ۱۵۷
متغیر اتفاقی ۱۶۰
توابع توزیع و چگالی احتمال ۱۶۱
۵-۲. میانگین‌های آماری متغیرهای اتفاقی ۱۶۳
۵-۳. انواع توابع توزیع و چگالی احتمال ۱۶۶
۵-۳-۱. توابع توزیع و چگالی یکنواخت ۱۶۶
۵-۳-۲. توابع توزیع و چگالی گوسی نرمال ۱۶۷
ویژگی‌های توزیع گوسی ۱۶۸
۵-۴. توزیع احتمال متصل دو متغیر اتفاقی ۱۶۹
۵-۴-۱. تعاریف و اصطلاحات ۱۷۰
۵-۴-۲. میانگین آماری دو متغیر اتفاقی ۱۷۱
مقدار متوسط دو متغیر اتفاقی ۱۷۱
تعیین رابطهٔ کوواریانس و انحراف معیار ۱۷۲
۵-۴-۳. احتمال شرطی متصل دو متغیر اتفاقی ۱۷۴
میانگین شرطی و کوواریانس شرطی ۱۷۶
۵-۵. تابع احتمال متغیرهای اتفاقی در شکل برداری ۱۷۷
۵-۵-۱. توزیع احتمال متصل دو متغیر اتفاقی در شکل برداری ۱۷۷
۵-۵-۲. توزیع احتمال متصل متغیر اتفاقی برداری x ۱۷۸
۵-۵-۳. توزیع احتمال متصل متغیرهای اتفاقی x و y برداری ۱۸۰
۵-۶. احتمال متصل متغیرهای اتفاقی با توزیع گوسی ۱۸۱
۵-۶-۱. دو متغیر اتفاقی اسکالر x و y گوسی ۱۸۱
۵-۶-۲. احتمال متصل متغیر اتفاقی برداری گوسی x ۱۸۲
۵-۶-۳. احتمال متصل متغیرهای x و y برداری گوسی ۱۸۳
۵-۶-۴. احتمال متصل شرطی متغیرهای x و y برداری گوسی ۱۸۴
۵-۷. فرآیندهای اتفاقی در سیستم‌های زمان‌پیوسته ۱۸۷
۵-۷-۱. میانگین نمونه‌ها، میانگین زمانی و توابع ارگادیک ۱۸۹
۵-۷-۲. تابع چگالی طیف توان ۱۹۵
۵-۷-۳. فرآیندهای اتفاقی با پهنای باند فرکانسی نازک و پهن ۲۰۱

www.ketab.ir

۵-۷-۴. نویز سفید با باند محدود ۲۰۴
۵-۸. احتمال متصل دو فرآیند اتفاقی ۲۰۵
۵-۸-۱. ویژگی‌های متصل فرآیندهای اتفاقی ارگادیک ۲۰۹
۵-۸-۲. تابع چگالی طیف توان ۲۱۱
۵-۹. بررسی رفتار سیستم‌های خطی به ورودی‌های اتفاقی زمان ایستا ۲۱۲
۵-۹-۲. تابع خودهمبستگی خروجی ۲۱۴
۵-۹-۳. چگالی طیف توان خروجی ۲۱۵
۵-۹-۴. ارتباط ورودی– خروجی سیستم خطی با توابع خودهمبستگی آن‌ها ۲۲۰
۵-۹-۵. اغتشاشات سفید ۲۲۳
۵-۱۰. دنباله‌های اتفاقی ۲۲۵
۵-۱۰-۱. دنباله اتفاقی مطلقاً زمان ایستا ۲۲۵
۵-۱۰-۲. تابع چگالی طیف توان در دنباله‌های اتفاقی ۲۲۷
۵-۱۰-۳. رفتار سیستم‌های زمان گسسته خطی به ورودی‌های اتفاقی ۲۲۹
۵-۱۰-۴. نویز یا اغتشاش سفید در سیستم زمان گسسته (ورودی اسکالر) ۲۳۰
۵-۱۰-۵. رفتار سیستم‌های خطی زمان گسسته با ورودی‌های اتفاقی ۲۳۲
۵-۱۰-۶. سیستم خطی زمان گسسته در فضای حالت با ورودی برداری نویز سفید ۲۳۲
۵-۱۰-۷. حالت زمان ایستا ۲۳۳
سؤالات پایانی ۲۴۲
مراجع ۲۴۶

فصل ۶. پایداری سیستم‌های دینامیکی
مقدّمه ۲۴۷
۶-۱. پایداری لیاپانوف (تاریخچه، مفاهیم و تعاریف) ۲۴۹
۶-۱-۱. تاریخچهٔ پایداری لیاپانوف ۲۴۹
۶-۱-۲. مفاهیم و تعاریف پایداری ۲۴۹
۶-۱-۳- تحلیل پایداری با ورودی ۲۵۴
۶-۱-۴- توابع مثبت معین، منفی معین و شرط سیلوستر ۲۵۶
۶-۱-۵- تابع لیاپانوف ۲۶۲
۶-۲. قضایای پایداری لیاپانوف در سیستم‌های زمان ایستا ۲۶۳
۶-۲-۱. روش مستقیم یا قضیهٔ دوم پایداری لیاپانوف ۲۶۳
۶-۲-۲. قضایای ناپایداری ۲۷۰
۶-۲-۳. پایداری سیستم‌های خطی زمان‌پیوسته براساس تابع لیاپانوف ۲۷۴
۶-۲-۴. پایداری سیستم‌های پیوسته خطی از تابع تبدیل ۲۸۴
۶-۲-۵. پایداری ورودی- خروجی ۲۸۵

www.ketab.ir

۶-۳. بررسی پایداری سیستم‌های زمان‌گسستهٔ خطی از روش لیاپانوف ۲۹۰
۶-۳-۱. تعیین شرط پایداری سیستم‌های زمان‌گسستهٔ خطی ۲۹۱
۶-۳-۲. پایداری سیستم‌های زمان‌گسستهٔ خطی از تابع تبدیل ۲۹۲
۶-۳-۳. پایداری سیستم‌های زمان‌گسستهٔ خطی از روش راوث ۲۹۴
۶-۳-۴. آزمون پایداری سیستم‌های زمان‌گسسته به روش جوری ۲۹۵
۶-۴. طراحی سیستم‌های زمان‌گسستهٔ خطی بر مبنای پایداری نایکویست ۲۹۷
۶-۴-۱. پایداری نایکویست در سیستم زمان‌گسسته ۲۹۷
۶-۴-۲. قضیهٔ پایداری نایکویست در سیستم‌های خطی زمان‌گسسته ۳۰۱
۶-۴-۳. تحلیل پایداری نایکویست مدار بسته وقتی مدار باز در مرز پایداری قرار دارد ۳۰۲
سؤالات پایانی ۳۰۸
مراجع ۳۱۲

فصل ۷. پایداری سیستم‌های غیرخطی
مقدّمه ۳۱۳
۷-۱. روش خطی‌سازی یا قضیهٔ اول پایداری لیاپانوف ۳۱۴
۷-۲. روش خطی‌سازی لیاپانوف تعمیم یافته ۳۱۹
۷-۳. قضیهٔ تعمیم یافتهٔ نایکویست (معیار پاپاف) ۳۲۶
۷-۴. معیار دایره ۳۳۱
۷-۵ قضایای مجموعه‌های نامتغیر ۳۳۵
۷-۶. فراپایداری ۳۴۵
۷-۶-۱. مفاهیم و تعاریف مربوط به فراپایداری ۳۴۵
۷-۷. قضایای فراپایداری ۳۵۲
۷-۷-۱. ترکیب بلوک‌های فراپایدار ۳۵۴
سؤالات پایانی ۳۵۹
مراجع ۳۶۳

فصل ۸. کنترل‌پذیری و مشاهده‌پذیری
مقدّمه ۳۶۵
۸-۱. مفهوم کنترل‌پذیری و مشاهده‌پذیری ۳۶۶
۸-۲. کنترل‌پذیری در سیستم‌های زمان‌پیوستهٔ متغیر با زمان ۳۶۸
۸-۳. کنترل‌پذیری در سیستم‌های زمان‌پیوستهٔ زمان ایستا ۳۷۴
۸-۴. مشاهده‌پذیری در سیستم‌های زمان‌پیوسته ۳۸۰
۸-۴-۱. مشاهده‌پذیری در سیستم‌های زمان‌پیوستهٔ متغیر با زمان ۳۸۰
۸-۴-۲. مشاهده‌پذیری در سیستم‌های زمان‌پیوستهٔ زمان ایستا ۳۸۱

www.ketab.ir

۸-۵. کنترل‌پذیری و مشاهده‌پذیری سیستم‌های خطی با قطری‌کردن ماتریس A ۳۸۲
۸-۶. ارتباط کنترل‌پذیری و مشاهده‌پذیری با بردارهای ویژه A ۳۸۸
۸-۷. ارتباط کنترل‌پذیری و مشاهده‌پذیری سیستم‌های خطی با تابع تبدیل ۳۹۳
۸-۸. کنترل‌پذیری در سیستم‌های زمان‌گسسته ۳۹۶
۸-۹. مشاهده‌پذیری در سیستم‌های زمان‌گسسته ۴۰۲
۸-۱۰. تجزیهٔ مقادیر تکین ۴۰۵
۸-۱۱. مدل متعادل ۴۰۹
سؤالات پایانی ۴۱۳
مراجع ۴۱۸

فصل ۹. کنترل فیدبک بردار حالت
مقدّمه ۴۱۹
۹-۱. کنترل فیدبک بردار حالت در سیستم‌های زمان‌پیوسته ۴۲۰
۹-۱-۱. طراحی مقادیر ویژهٔ سیستم فیدبک بردارحالت ۴۲۲
الف- طراحی برای سیستم مدارباز در فرم کانونیکال کنترل‌پذیر ۴۲۲
ب- طراحی برای سیستم مدارباز در فرم کانونیکال کنترل‌پذیر ۴۲۹
۹-۱-۲. رابطهٔ ضرایب بهره در روش کنترل فیدبک بردارحالت ۴۳۴
۹-۲. پایدارسازی سیستم‌های پایدارپذیر ۴۴۲
۹-۳. کنترل فیدبک بردار حالت در سیستم‌های زمان‌گسسته ۴۴۴
۹-۳-۱. طراحی کنترل‌کننده با ورودی اسکالر و زمان استقرار معلوم ۴۴۴
۹-۳-۲. طراحی کنترل‌کننده با ورودی برداری در سیستم زمان‌گسسته ۴۵۴
سؤالات پایانی ۴۵۸
مراجع ۴۶۴

فصل ۱۰. مشاهده‌گر حالت
مقدّمه ۴۶۵
۱۰-۱. طراحی مشاهده‌گر حالت در سیستم زمان‌پیوسته ۴۶۸
۱۰-۱-۱. مشاهده‌گر مرتبهٔ کامل در سیستم زمان‌پیوسته ۴۶۹
۱۰-۱-۲. مشاهده‌گر حالت با رستهٔ کاهش یافته ۴۸۰
۱۰-۲. مشاهده‌گرهای حالت در سیستم‌های زمان‌گسسته ۴۸۵
۱۰-۲-۱. مشاهده‌گر حالت زمان گسسته با تخمین یک مرحله‌ای ۴۸۵
۱۰-۲-۲. مشاهده‌گر حالت زمان‌گسسته با تخمین دومرحله‌ای ۴۸۷
۱۰-۲-۳. مشاهده‌گر حالت سیستم زمان‌گسسته با چند خروجی ۴۹۲
سؤالات پایانی ۵۰۲

www.ketab.ir

مراجع ۵۰۸

فصل ۱۱. کنترل بهینهٔ مربعی خطی

مقدّمه ۵۰۹

۱۱-۱. تعاریف اولیهٔ مسألهٔ کنترل بهینه ۵۱۰

۱۱-۲. مسألهٔ تنظیم‌کننده‌های مربعی خطی (LQR) ۵۱۲

۱۱-۳. کنترل بهینهٔ مربعی خطی در سیستم‌های زمان‌پیوسته ۵۱۴

۱۱-۳-۱. روش حل مسألهٔ رگولاتورهای مربعی خطی ۵۱۵

۱۱-۳-۲. حل مسألهٔ بهینهٔ مربعی خطی در حالت زمان ایستا ۵۱۸

۱۱-۴. کنترل بهینهٔ رگولاتور مربعی خطی از طریق تابع لیاپانوف ۵۲۸

۱۱-۵. خواص طراحی رگولاتورهای مربعی خطی ۵۳۰

۱۱-۵-۱. تساوی تفاضل برگشتی و ... بودن رگولاتورهای مربعی خطی ۵۳۱

۱۱-۵-۲. مرزهای پایداری ... مربعی خطی اسکالر ۵۳۳

۱۱-۶. مسألهٔ مربعی خطی در سیستم‌های زمان‌گسسته ۵۳۷

سؤالات پایانی ۵۴۶

مراجع ۵۵۰

فصل ۱۲. فیلتر کالمن

مقدّمه ۵۵۱

۱۲-۱. خطای اندازه‌گیری و اصل کمترین مربع ۵۵۲

۱۲-۱-۱. اندازه‌گیری خطا ۵۵۲

۱۲-۱-۲. اصل کمترین مربع ۵۵۴

۱۲-۱-۳. اصل کمترین مربع برای متغیرهای اتفاقی x و y گوسی ۵۵۷

۱۲-۲. ویژگی‌های تخمین بهینه در حالت گوسی ۵۵۸

۱۲-۳. دنباله‌های اتفاقی ۵۷۳

۱۲-۴. فیلترکالمن زمان‌گسسته ۵۷۴

۱۲-۵. حل گام به گام مسألهٔ تخمین بهینهٔ زمان‌گسسته ۵۷۷

۱۲-۶. فیلتر کالمن در حالت زمان‌گسسته ۵۷۹

۱۲-۷. مقایسه فیلتر بهینه (فیلتر کالمن) و کنترل فیدبک بهینه (LQR) ۵۸۰

۱۲-۸. فیلتر کالمن زمان‌گسسته در حالت ایستا ۵۸۲

۱۲-۹. فیلتر کالمن زمان‌پیوسته ۵۹۱

مرحلهٔ اول: تقریب گسسته از مسألهٔ زمان‌پیوسته ۵۹۲

مرحلهٔ دوم: فیلتر کالمن گسسته برای سیستم زمان‌گسستهٔ مرحلهٔ اول ۵۹۳

مرحلهٔ سوم: زمان نمونه‌گیری Δt را به سمت صفر میل می‌دهیم ۵۹۴

www.ketab.ir

۱۲-۱۰. فیلتر کالمن زمان‌پیوسته در حالت ایستا ۵۹۴
سؤالات پایانی ۵۹۹
مراجع ۶۰۵

فصل ۱۳. کنترل گوسی مربعی خطی (LQG)
مقدّمه ۶۰۷
۱۳-۱. برنامه‌ریزی دینامیکی ۶۰۸
۱۳-۲. کاربرد برنامه‌ریزی دینامیکی در حل مسائل کنترل بهینه ۶۰۸
۱۳-۳. حل مسألهٔ کنترل مربعی خطی زمان‌گسسته با روش برنامه‌ریزی دینامیکی ۶۱۰
۱۳-۴. کنترل گوسی مربعی خطی ۶۱۲
۱۳-۴-۱. کنترل اتفاقی با فرض دسترسی به همهٔ متغیرهای حالت ۶۱۳
۱۳-۴-۲. کنترل اتفاقی با فرض عدم دسترسی به همهٔ متغیرهای حالت ۶۲۳
۱۳-۴-۳ کنترل LQG زمان‌پیوسته ۶۳۴
سؤالات پایانی ۶۳۷
مراجع ۶۳۹

پیوست ۱. واژه‌نامهٔ انگلیسی به فارسی ۶۴۱
پیوست ۲. نمایه ۶۴۹

www.ketab.ir