

تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل چندمتغیره

www.ketab.ir

علی خاکی صدیق

سرشناسه	: خاکی صدیق، علی، ۱۳۴۱ -
عنوان و نام پدیدآور	: تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل چند متغیره / نویسنده علی خاکی صدیق.
مشخصات نشر	: تهران: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۹۰.
مشخصات ظاهری	: ۴۲۷ص: مصور(رنگی)، جدول، نمودار.
شابک	: ۱۱۰۰۰۰ ریال: 978-600-6383-02-6
یادداشت	: واژه‌نامه.
یادداشت	: کتابنامه.
یادداشت	: نمایه.
موضوع	: تجزیه و تحلیل چند متغیره
موضوع	: نظریه کنترل
موضوع	: توابع چند متغیره مختلط
موضوع	: تجزیه و تحلیل سیستم‌ها
شناسه افزوده	: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
رده بندی کنگره	: ۱۳۹۰ ۳۲۳/۳ QAT۷۸
رده بندی دیویی	: ۵۱۹/۵۳۵
شماره کتابشناسی ملی	: ۲۵۰۳۲۲۱

نام کتاب: تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل چند متغیره

نویسنده: دکتر علی خاکی صدیق، استاد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

ناشر: انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

ویرایش: دوم

نوبت چاپ: اول

تاریخ چاپ: مهرماه ۱۳۹۰

تیراژ: ۱۵۰۰ نسخه

قیمت: ۱۱۰۰۰ تومان

کد کتاب: ۲۸۸

ISBN :978-600-6383-02-6

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۶۳۸۳-۰۲-۶

صحافی: گرنامی

لیتوگرافی: هوررنگ

چاپ: پدیدرنگ

آدرس و تلفن مرکز پخش و فروش: خیابان ولیعصر(عج)، بالاتر از میدان ونک، تقاطع میرداماد، رویروی ساختمان اسکان (۰۲۱-۸۸۷۷۲۲۷۷)

(حق چاپ برای ناشر محفوظ است)

فهرست مطالب

پیش‌گفتار ----- چ

فصل ۱: مقدمه

۱-۱ مقدمه ----- ۱

۲-۱ تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل چندمتغیره ----- ۸

۳-۱ یک مطالعه موردی: نیازهای صنعت و پاسخ‌های مهندسی کنترل ----- ۱۵

۴-۱ مثال‌های عملی از سیستم‌های چندمتغیره ----- ۱۷

مراجع ----- ۲۷

فصل ۲: نمایش سیستم‌های خطی چندمتغیره

۱-۲ مقدمه ----- ۲۹

۲-۲ توصیف ماتریس سیستم ----- ۳۱

۱-۲-۲ مرتبه سیستم ----- ۳۵

۲-۲-۲ ماتریس سیستم رزونبراک ----- ۳۷

۳-۲ توصیف کسر-ماتریسی ----- ۳۹

۱-۳-۲ توصیف کسر-ماتریسی کاهش‌ناپذیر ----- ۴۶

۲-۳-۲ تعیین MFDهای راست کاهش‌ناپذیر از MFDهای چپ کاهش‌ناپذیر ----- ۵۶

۴-۲ جمع‌بندی ----- ۵۷

مسائل ----- ۵۷

مراجع ----- ۶۰

فصل ۳: قطب‌ها و صفرها در سیستم‌های چندمتغیره

۱-۳ مقدمه ----- ۶۱

۲-۳ قطب‌های سیستم‌های چندمتغیره ----- ۶۲

۱-۲-۳ قطب‌های سیستم‌های چندمتغیره در فضای حالت و ماتریس سیستم ----- ۶۲

۶۷	۲-۲-۳ قطب‌های سیستم‌های چندمتغیره در ماتریس تابع تبدیل
۷۱	۱-۲-۲-۳ صورت اسمیت- مک میلان یک ماتریس تابع تبدیل
۸۶	۲-۲-۳ نوع سیستم‌های چندمتغیره خطی
۸۶	۱-۳-۲-۳ نوع اسکالر
۹۰	۲-۳-۲-۳ نوع برداری
۹۲	۳-۳ صفرهای سیستم‌های چندمتغیره
۹۴	۱-۳-۳ صفرهای عنصر
۹۵	۲-۳-۳ صفرهای انتقال
۹۸	۱-۲-۳-۳ جهت‌های صفر انتقال در سیستم‌های چندمتغیره
۱۰۳	۲-۲-۳-۳ یک کاربرد جهت صفر خروجی در سیستم‌های غیر می‌نیم‌فاز
۱۰۸	۳-۲-۳-۳ تعداد صفرهای انتقال
۱۱۱	۴-۳ جایابی صفرهای انتقال
۱۱۴	۱-۴-۳ روش اول جایابی صفرهای انتقال
۱۲۰	۲-۴-۳ روش دوم جایابی صفرهای انتقال
۱۲۴	۵-۳ جمع‌بندی
۱۲۴	مسائل
۱۲۸	مراجع
	فصل ۴: تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل چندمتغیره در حوزه فضای حالت
۱۲۹	۱-۴ مقدمه
۱۳۰	۲-۴ کنترل‌پذیری و رؤیت‌پذیری سیستم‌های خطی
۱۳۰	۱-۲-۴ کنترل‌پذیری
۱۳۳	۲-۲-۴ رؤیت‌پذیری
۱۳۷	۳-۲-۴ کنترل‌پذیری، رؤیت‌پذیری در توصیف ماتریس سیستم
۱۴۳	۳-۴ کنترل‌پذیری خروجی و کنترل‌پذیری تابعی
۱۴۶	۴-۴ نظریه تحقق در سیستم‌های چندمتغیره
۱۴۸	۱-۴-۴ تحقق‌های غیر می‌نیمال

۱۵۱	۲-۴-۴	تحقق گیلبرت فضای حالت
۱۶۱	۵-۴	کاهش مرتبه معادلات فضای حالت
۱۶۱	۱-۵-۴	کاهش مرتبه معادلات فضای حالت غیر می‌نیمال
۱۶۷	۲-۵-۴	کاهش مرتبه معادلات فضای حالت می‌نیمال
۱۶۸	۱-۲-۵-۴	روش بُرش
۱۷۲	۲-۲-۵-۴	روش مانده‌گذاری
۱۷۴	۳-۲-۵-۴	انتخاب مرتبه مدل دینامیکی کاهش یافته
۱۷۸	۶-۴	دکوپله‌سازی سیستم‌های چندمتغیره با فیدبک حالت
۱۸۷	۷-۴	جمع‌بندی
۱۸۸		مسائل
۱۹۳		مراجع

فصل ۵: پایداری و محدودیت‌های عملکردی در سیستم‌های چندمتغیره

۱۹۵	۱-۵	مقدمه
۱۹۶	۲-۵	تحلیل پایداری نامی سیستم‌های چندمتغیره
۱۹۶	۱-۲-۵	تعاریف و مفاهیم پایه
۲۰۳	۲-۲-۵	معیار پایداری نایکوئیست تعمیم یافته
۲۱۷	۳-۲-۵	معیار پایداری نایکوئیست معکوس تعمیم یافته
۲۱۸	۳-۵	محدودیت‌های عملکردی در سیستم‌های چندمتغیره
۲۱۸	۱-۳-۵	محدودیت‌های عملکردی در حوزه زمان
۲۲۴	۲-۳-۵	محدودیت‌های عملکردی در حوزه فرکانس
۲۳۱	۴-۵	جمع‌بندی
۲۳۱		مسائل
۲۳۵		مراجع

فصل ۶: تحلیل پایداری و عملکرد سیستم‌های چندمتغیره نامعین

۲۳۷	۱-۶	مقدمه
-----	-----	-------

۲۳۸	۲-۶ مثال‌های توصیفی
۲۴۲	۳-۶ مدل‌سازی سیستم‌های نامعین چندمتغیره
۲۴۳	۱-۳-۶ نامعینی‌های بی‌ساختار
۲۴۶	۲-۳-۶ نامعینی پارامتری
۲۴۷	۴-۶ تحلیل پایداری مقاوم سیستم‌های چندمتغیره نامعین
۲۴۸	۱-۴-۶ پایداری مقاوم برای نامعینی بی‌ساختار
۲۵۲	۲-۴-۶ حاشیه پایداری مقاوم بر اساس نظریه نایکوئیست
۲۵۹	۵-۶ تحلیل عملکرد سیستم‌های چندمتغیره
۲۵۹	۱-۵-۶ تضعیف اثر اغتشاش بر پاسخ حلقه بسته
۲۶۲	۲-۵-۶ ردیابی ورودی‌های مرجع
۲۶۲	۳-۵-۶ تضعیف اثر خطاهای اندازه‌گیری بر پاسخ حلقه بسته
۲۶۴	۴-۵-۶ عملکرد مقاوم
۲۶۵	۶-۶ جمع‌بندی
۲۶۵	مسائل
۲۶۷	مراجع

فصل ۷: مباحث کلاسیک در طراحی سیستم‌های کنترل چندمتغیره

۲۶۹	۱-۷ مقدمه
۲۷۰	۲-۷ انتخاب ورودی و خروجی
۲۷۲	۱-۲-۷ معیارهای ارزیابی انتخاب ورودی و خروجی
۲۷۵	۲-۲-۷ یک مثال عملی
۲۸۰	۳-۷ انتخاب پیکربندی کنترل
۲۸۱	۱-۳-۷ اصول RGA
۲۸۷	۲-۳-۷ ملاحظات پیکربندی کنترل در طراحی سیستم‌های کنترل غیرمتمرکز
۳۰۲	۴-۷ طراحی کنترل‌کننده‌های چندمتغیره به روش حلقه بستن تدریجی
۳۰۶	۵-۷ طراحی ماتریس‌های پیش جبران‌ساز برای حل دشواری کنترل

۳۱۸	۶-۷ جمع‌بندی
۳۱۸	مسائل
۳۲۱	مراجع

فصل ۸: کنترل PI سیستم‌های چندمتغیره

۳۲۳	۱-۸ مقدمه
۳۲۵	۲-۸ طراحی‌های مبتنی بر ماتریس پاسخ پله‌ی سیستم
۳۲۵	۱-۲-۸ مطالب مقدماتی و فرضیات مساله
۳۲۹	۲-۲-۸ راهکار اول طراحی
۳۳۵	۳-۲-۸ راهکار دوم طراحی
۳۳۷	۳-۸ کنترل‌کننده‌های PI چندمتغیره‌ی بهره‌بالا
۳۳۸	۱-۳-۸ طراحی برای سیستم‌های چندمتغیره‌ی منظم
۳۴۶	۲-۳-۸ طراحی برای سیستم‌های چندمتغیره‌ی نامنظم
۳۵۲	۴-۸ جمع‌بندی
۳۵۳	مسائل
۳۵۵	مراجع

فصل ۹: طراحی سیستم‌های کنترل مقاوم به روش نظریه فیدبک کمی

۳۵۷	۱-۹ مقدمه
	۲-۹ طراحی سیستم‌های کنترل مقاوم به روش QFT برای سیستم‌های چند ورودی و یک خروجی
۳۵۸	۱-۲-۹ مدل‌های مطلوب رفتار حلقه بسته
۳۵۹	۲-۲-۹ نگاره‌های نامعینی
۳۶۴	۳-۲-۹ مرز پایداری یا مرز U
۳۶۷	۴-۲-۹ کران‌ها در QFT
۳۶۸	۵-۲-۹ شکل‌دهی حلقه و طراحی پیش فیلتر

۳-۹ طراحی سیستم‌های کنترل مقاوم به روش QFT برای سیستم‌های چندمتغیره

۳۷۸-----

۳۷۹-----۱-۳-۹ معادله‌های MISO موثر

۳۸۲-----۲-۳-۹ کران‌های عملکردی

۳۸۳-----۳-۳-۹ روش طراحی QFT

۳۸۹-----۴-۹ جمع‌بندی

۳۹۰-----مسائل

۳۹۴-----مراجع

۳۹۵-----واژه‌نامه انگلیسی به فارسی

۴۰۶-----فهرست الفبائی

پیش گفتار

تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل چندمتغیره از اوائل نیمه دوم قرن گذشته مورد توجه جدی پژوهش‌گران در حوزه مهندسی کنترل قرار گرفت. از آن زمان تاکنون صدها مقاله و ده‌ها کتاب در این زمینه چاپ شده است. روش‌های بسیاری برای تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل چندمتغیره ارائه شده است و برخی از این روش‌ها هم اکنون در حلقه‌های کنترلی فرآیندهای صنعتی به کار گرفته شده‌اند. دلیل رو آوردن گسترده‌ی پژوهشگران به مسأله تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل چندمتغیره، کاربرد فراوان آن در صنعت و نیاز مبرم بسیاری از فرآیندها و حلقه‌های کنترلی واقعی به کنترل چندمتغیره است. این موضوع به پیچیده شدن سیستم‌ها و افزایش تعداد ورودی‌ها و خروجی‌های مؤثر در آن‌ها برمی‌گردد و مطالعات مستقل نشان می‌دهد که یکی از جدی‌ترین چالش‌ها در صنایع، فرآیندها و سیستم‌های پیشرفته مسأله تداخل ناشی از ماهیت چندمتغیره بودن آن‌ها است. هم اکنون در نیروگاه‌ها، پالایشگاه‌ها، فرآیندهای شیمیایی، صنایع غذایی، خودروسازی، سیستم‌های هوافضا، رباتیک و ... می‌توان دستگاه‌هایی را یافت که در آن‌ها کنترل هم‌زمان چندین ورودی و چندین خروجی ضروری است.

در بسیاری از موارد استفاده از کنترل چندمتغیره یک ضرورت بوده و اجتناب‌ناپذیر است و در پاره‌ای از موارد با کنترل چندمتغیره می‌توان به بهره‌وری بهتر و کیفیت بالاتر دست پیدا کرد. نمونه‌هایی از هر دو دست کاربرد را می‌توان به سادگی در صنعت یافت. همان‌طور که اشاره شد، مشکل اصلی در سیستم‌های چندمتغیره تداخل است که به تنزل عملکرد سیستم‌ها و در شرایطی نیز به ناپایداری حلقه بسته منجر می‌گردد. بسیاری از مهندسان کنترل و ابزار دقیق در صنعت به خوبی به این مسأله رسیده‌اند که در تنظیم مناسب پارامترهای کنترلی یک حلقه، تغییر دادن یک پارامتر می‌تواند رفتار چندین متغیر دیگر را در سایر حلقه‌های کنترلی تغییر دهد و گاهی حتی شرایط هشدار را برای سیستم پیش آورد. یکی از دلایل عمده این پیشامد همان مسأله تداخل در سیستم‌های چندمتغیره است. از این‌رو، تحلیل این مسأله از زوایای مختلف و بررسی ابعاد گوناگون سیستم‌های چندمتغیره موضوعی مهم و کاربردی است.

به دلیل اهمیت تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل چندمتغیره، در دانشگاه‌های داخل کشور و اکثر دانشگاه‌های معتبر بین‌المللی یک درس سه واحدی تحت همین

عنوان یا عناوین دیگر در دوره‌ی کارشناسی ارشد مهندسی کنترل ارائه می‌گردد. هر چند سرفصل دروس ارائه شده متنوع است، اما برخی مفاهیم کلیدی هستند که اطلاع از آن‌ها توسط کارشناسان ارشد و پژوهش‌گران حوزه مهندسی کنترل و سیستم‌های الزامی است. در این کتاب سعی شده است که این مفاهیم گنجانده شوند و در زمینه‌ی طراحی سیستم‌های کنترل چندمتغیره، به روش‌هایی پرداخته شده است که در کاربردهای واقعی به کار گرفته شده‌اند. چاپ اول این کتاب در سال ۱۳۷۵ انتشار یافت که در آن تنها به تحلیل سیستم‌های کنترل چندمتغیره پرداخته شده است. در بررسی‌های انجام شده طی سال‌های متمادی تدریس درس کنترل چندمتغیره در دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشگاه تهران و چندین دانشگاه دیگر، و همچنین بازدید و اجرای چندین پروژه‌ی نظری و کاربردی، برخی مباحث مطرح شده در چاپ اول حذف شده و موضوع‌های جدیدی نظیر نوع سیستم، جهت صفر، کاهش مرتبه، دکوپله‌سازی و محدودیت‌های عملکردی جایگزین آن‌ها شده است. هم‌چنین، یک فصل در رابطه با سیستم‌های چندمتغیره‌ی نامعین و سه فصل طراحی به کتاب افزوده شده است تا از نظر تحلیل و طراحی جامعیت نسبی پیدا کند. در انتخاب سرفصل‌ها و گزینش موضوع‌های تالیف شده، تلاش شده است که مفاهیم پایه و کلیدی نظری در کنار مباحث و مفاهیم کاربردی آورده شود. از ویژگی‌های مهم دیگر این چاپ و ویراست جدید کتاب، ارائه برنامه‌هایی در محیط MATLAB است که برای حل مسائل مختلف آورده شده‌اند. پیش‌نیاز مطالعه‌ی این کتاب، آشنایی با سیستم‌های کنترل خطی، اصول کنترل مدرن، جبر خطی و نظریه ماتریس‌ها، نرم‌ها و مقادیر استثنایی است.

مطالب کتاب در نه فصل ارائه شده‌اند. فصل اول به مقدمات می‌پردازد. در این فصل پس از ارائه تعاریف و مفاهیم اولیه در زمینه‌ی سیستم‌های چندمتغیره، به موضوع مهم تداخل و کوپلینگ در این سیستم‌ها اشاره شده است. با ارائه مثال‌ها و یک مطالعه موردی از صنعت ژاپن، اهمیت مساله‌ی تداخل نشان داده شده است. هم‌چنین برای نمونه سیستم‌هایی از حوزه‌های مختلف صنعتی با ماهیت چند ورودی و چند خروجی آورده شده است.

فصل دوم به نمایش ریاضی سیستم‌های چندمتغیره می‌پردازد. در این فصل چهار نمایش معادلات فضای حالت، ماتریس تابع تبدیل، ماتریس سیستم رزونبراک و توصیف کسر ماتریسی معرفی شده‌اند. با توجه به فرض آشنایی خوانندگان با مفاهیم اولیه

نظریه‌ی سیستم‌های خطی، بیشتر مطالب ارائه شده در فصل دوم درباره‌ی ماتریس سیستم رزنبراک، توصیف کسر ماتریسی و خواص مربوط به آن‌ها است.

قطب‌ها و صفرها نقش مهمی در تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل دارند. تعریف دقیق، تعداد و محاسبه قطب‌ها و صفرهای سیستم‌های چندمتغیره در فصل سوم ارائه شده است. نشان داده شده است که تعمیم ایده‌های قطب و صفر از سیستم‌های یک ورودی و یک خروجی به چند ورودی و چند خروجی چندان سراسر نیست و برای نمایش‌های مختلف سیستم چندمتغیره روش‌هایی برای محاسبه قطب‌ها و صفرها پیشنهاد شده است. صورت مهم اسمیت-مک میلان در همین راستا معرفی شده است. در سیستم‌های چندمتغیره می‌توان به همراه قطب و صفر، جهت‌هایی را تعریف کرد که در تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل چندمتغیره سودمند است. این موضوع نیز مورد بررسی قرار گرفته است. از دیگر مباحث مطرح شده در فصل سوم، نوع سیستم‌های چندمتغیره است که در دو رده‌ی اسکالر و برداری تعریف شده است. همچنین، کاربرد این تعاریف در ردیابی ورودی‌های مرجع بحث شده است. در آخر فصل سوم مساله جایابی صفرهای انتقال مطرح و دو روش حل آن ارائه شده است.

فصل چهارم به تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل چندمتغیره در فضای حالت می‌پردازد. مباحثی از قبیل کنترل‌پذیری، رؤیت‌پذیری، کنترل‌پذیری خروجی و کنترل‌پذیری تابعی ارائه شده‌اند. نظریه‌ی تحقق نیز برای ماتریس تابع تبدیل معرفی و تحقق‌های مستقیم یا غیر می‌نیمال و تحقق گیلبرت برای سیستم‌های چندمتغیره ارائه شده‌اند. از مباحث مرتبط با نمایش فضای حالت، کاهش مرتبه سیستم‌های دینامیکی است که در این فصل با دو رویکرد کاهش مرتبه معادلات فضای حالت غیر می‌نیمال (به دست آمده از تحقق مستقیم) و کاهش مرتبه معادلات فضای حالت می‌نیمال برای ساده‌سازی تحلیل و طراحی، آورده شده است. تحقق بالانس شده و روش‌های بُرش و مانده‌گذاری در همین راستا معرفی شده‌اند. در آخر فصل چهارم دکوپله‌سازی سیستم‌های چندمتغیره با فیدبک حالت بحث شده است.

فصل پنجم به مباحث پایداری و محدودیت‌های عملکردی در سیستم‌های چندمتغیره می‌پردازد. در این فصل پایداری سیستم چندمتغیره نامی بدون نامعینی بحث شده است و پس از ارائه تعاریف اولیه، نظریه نایکوئیست به سیستم‌های چندمتغیره تعمیم داده شده است. دیگر مباحث مورد اشاره در این فصل، محدودیت‌های عملکردی است که در دو حوزه زمان و فرکانس ارائه شده‌اند.

فصل ششم پایداری و محدودیت‌های عملکردی در سیستم‌های چندمتغیره نامعین را بررسی می‌کند. نخست با ارائه مثال‌های توصیفی به معرفی اثر نامعینی در تحلیل پایداری سیستم می‌پردازد و پس از آن انواع مدل‌سازی نامعینی ارائه می‌شود. سپس تحلیل پایداری مقاوم سیستم‌های چندمتغیره نامعین با دو رویکرد بررسی می‌شود. در رویکرد اول، قضیه‌های پایداری مقاوم برای نامعینی بی‌ساختار ارائه می‌شود و در رویکرد دوم حاشیه پایداری مقاوم بر اساس نظریه نایکوئیست به سیستم‌های چندمتغیره تعمیم داده شده است. در آخر، تحلیل عملکرد سیستم‌های چندمتغیره و عملکرد مقاوم ارائه شده است.

مساله تحلیل سیستم‌های چندمتغیره، محور اصلی بحث در شش فصل اول کتاب است. در سه فصل پایانی، طراحی سیستم‌های کنترل چندمتغیره ارائه شده است. روش‌های مطرح شده روش‌هایی کاربردی هستند که در سیستم‌های واقعی به کار گرفته شده‌اند. فصل هفتم مباحث کلاسیک و پایه‌ای در طراحی سیستم‌های کنترل چندمتغیره را ارائه کرده است. نخست مساله مهم و کاربردی طراحی ساختار کنترل مطرح شده است. این موضوع در دو مرحله، انتخاب ورودی و خروجی و انتخاب پیکربندی کنترل، معرفی شده است. برای انتخاب ورودی و خروجی معیارهای ارزیابی ارائه و در یک مثال کاربردی به کار گرفته شده‌اند. روش اصلی در انتخاب پیکربندی یا جفت‌سازی ورودی و خروجی ماتریس آرایه بهره‌نمایی است که به تفصیل بحث تنده است. پس از آن به طراحی حلقه بستن ترتیبی پرداخته است که از روش‌های کنترل غیر متمرکز است. در آخر نیز برای حل دشواری کنترل در کنترل غیرمتمرکز، طراحی ماتریس‌های پیش جبران‌ساز پیشنهاد شده است. روش‌های مختلفی برای طراحی ماتریس‌های پیش جبران‌ساز موجود است که ضمن معرفی کلی آن‌ها، با ارائه ایده غلبه قطری در سیستم‌های کنترلی چندمتغیره، یک مثال طراحی آورده شده است.

فصل هشتم به تعمیم ایده کنترل‌کننده‌های PI به سیستم‌های چندمتغیره می‌پردازد. نشان داده شده است که ویژگی مهم این کنترل‌کننده‌ها سادگی طراحی و عملکرد مناسب حلقه بسته با حداقل اطلاعات لازم از سیستم تحت کنترل است. کنترل‌کننده‌های PI در دو دسته با ویژگی‌های خاص خود ارائه شده‌اند. در دسته اول، طراحی مبتنی بر ماتریس پاسخ پله‌ای سیستم است، که برای آن دو راهکار ارائه شده است. این طراحی‌ها در زمره طراحی‌های PI مقاوم هستند و تنها فرض آن‌ها در رابطه با سیستم تحت کنترل، پایداری حلقه باز و کنترل‌پذیری تابعی است. دسته دوم،

طراحی کنترل‌کننده‌های PI با عملکرد بالا هستند که با عنوان کنترل‌کننده‌های بهره بالا نیز شناخته شده‌اند. مراحل طراحی این کنترل‌کننده‌ها برای سیستم‌های چندمتغیره منظم و نامنظم داده شده است. شرایط اصلی در طراحی هر کدام از حالت‌ها آورده شده است و مراحل طراحی با مثال‌های کاربردی توضیح داده شده‌اند.

فصل نهم به طراحی سیستم‌های کنترل مقاوم به روش نظریه فیدبک کمی می‌پردازد. نظریه فیدبک کمی یکی از روش‌های کاربردی طراحی سیستم‌های کنترل مقاوم است که در مثال‌های عملی فراوانی به کار گرفته شده است. در این فصل، نخست مفاهیم، تعاریف و مراحل کلی طراحی بر اساس نظریه فیدبک کمی برای سیستم‌های چند ورودی و یک خروجی ارائه شده است. سپس، نظریه فیدبک کمی بر اساس ایده معادل‌های MISO موثر به سیستم‌های چند ورودی و چند خروجی تعمیم داده شده است.

در مراحل مختلف تهیه کتاب افراد زیادی کمک نموده‌اند که از همگی آن‌ها تشکر می‌کنم. به ویژه از دانشجویان کارشناسی ارشد و دکتری درس کنترل چندمتغیره که در طی سال‌های گذشته و در حین ارائه‌ی درس پیشنهادهای سودمندی برای بهبود مطالب و رفع کاستی‌های آن نموده‌اند. هم‌چنین از آقای مهندس احسان سرشاری کارشناس ارشد مهندسی مکانیک که در آماده‌سازی فصل‌های ششم و هفتم کتاب کمک شایانی نموده و در زمینه‌ی انتخاب ورودی-خروجی نظرات مفیدی ارائه کرده است و از سرکار خانم مریم حنطه‌زاده که در زمینه‌ی QFT نظرات سودمندی ارائه کرده است، تشکر می‌گردد. آقای مهندس پیمان باقری کلجاهی دانشجوی دکتری مهندسی کنترل در تهیه برنامه‌های MATLAB، تصحیح و بازخوانی متن و شبیه‌سازی مثال‌های کتاب کمک فراوانی نموده‌اند که از ایشان تقدیر و تشکر می‌گردد. هم‌چنین از آقای دکتر نیک‌خواه و همکاران انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی که در مراحل چاپ کتاب همکاری نموده‌اند تشکر می‌گردد.

علی خاکی صدیق

استاد گروه مهندسی کنترل و سیستم