

کنترل مقاوم H_∞

نویسندگان:

دکتر حمید رضا تقی‌راد

محمد فتحی و فرینا زمانی اسکویی

سرشناسه	: تقی‌راد، حمیدرضا، ۱۳۴۵ -
عنوان و نام پدیدآور	: کنترل مقاوم H∞/نویسندگان حمیدرضا تقی‌راد، محمد فتحی و فرینا زمانی اسکویی.
مشخصات نشر	: تهران: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۹۳.
مشخصات ظاهری	: ۵۳۶ ص.: مصور، جدول، نمودار.
شابک	: ۲۰۰۰۰۰ ریال: 3-61-6383-978600
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا
یادداشت	: واژه‌نامه.
موضوع	: مهندسی کنترل
موضوع	: کنترل مقاوم
شناسه افزوده	: فتحی، محمد، ۱۳۶۳ -
شناسه افزوده	: زمانی اسکویی، فرینا، ۱۳۶۳ -
شناسه افزوده	: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
رده بندی کنگره	: ۱۳۹۳ ۹۹۷/ت/۱۳۲۱۳
رده بندی دیویی	: ۶۲۹/۸
شماره کتابشناسی ملی	: ۳۳۸-۳۵۴

نام کتاب: کنترل مقاوم H∞

مؤلف: دکتر حمیدرضا تقی‌راد عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی

خواجه نصیرالدین طوسی، محمد فتحی و فرینا زمانی اسکویی

ناشر: انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

نوبت چاپ: اول

تاریخ چاپ: ۱۳۹۲

تیراژ: ۵۰۰ جلد

قیمت: ۲۰۰۰۰ تومان

کد کتاب: ۳۴۷

ISBN: 978-600-6383-61-3

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۶۳۸۳-۶۱-۳

لیتوگرافی: هوررنگ

صحافی: گرنامی

آدرس و تلفن مرکز پخش و فروش: خیابان ولیعصر (عج)، بالاتر از میدان ونک، تقاطع میرداماد، روبروی

ساختمان اسکان (۰۲۱-۸۸۷۷۲۲۷۷)

(حق چاپ برای ناشر محفوظ است)

سخن نگارندگان

امروزه شاهد گسترش روز افزون سیستم‌های کنترل پیشرفته صنعتی در کشور می‌باشیم. از سوی دیگر کنترل مقاوم با داشتن پشتوانه قوی ریاضی و استفاده وسیع در کاربردهای صنعتی، بسیار مورد توجه محققین و متخصصین قرار گرفته است. با توجه به اینکه سیستم‌های کنترل مقاوم به عنوان شاخه مهمی از گرایش کنترل در دانشگاه‌ها و صنعت شناخته می‌شود، آشنائی دانش پژوهان و متخصصین کشور با مبانی و مفاهیم این نوع سیستم‌های کنترل ضروری به نظر می‌رسد. همچنین تحقیقات و گسترش فناوری در زمینه کنترل مقاوم در دانشگاه‌ها و بخش‌های گوناگونی از صنایع دنبال می‌شود، اما تا کنون هیچ کتاب درسی مرجع به زبان فارسی در این زمینه تدوین نشده است تا نیاز آموزشی دانش پژوهان را با توجه به ویژگی‌های نظری و کاربردی این زمینه برآورده سازد. نگارش این کتاب در ابتدا از برداشت‌ها و دریافتهای مستقیم مولف اول از آموزش‌های مرحوم پروفسور زیس است، که به عنوان پدر علم کنترل مقاوم در مجامع علمی شناخته می‌شود. تاثیر شگرفی که ایشان در توسعه این شاخه از علم کنترل داشته، بر محققین این زمینه پوشیده نیست، و در این کتاب سعی شده است در بخش‌های مربوط به توسعه مفاهیم کنترل مقاوم، تا حد ممکن گرمی نوای استاد به مخاطبین منتقل گردد.

کتاب‌های زیادی در زمینه‌ی کنترل مقاوم در دنیا نوشته شده است که هر یک از دیدگاه خاصی به بیان یکی از روش‌ها و بخشی از مفاهیم کنترل مقاوم پرداخته‌اند. علیرغم اینکه همه این کتاب‌ها در جایگاه خود بسیار مفید و با ارزش هستند، اما معمولاً کمتر با دیدگاه آموزشی بلکه بیشتر در راستای توسعه نظری این زمینه نگاشته شده‌اند. تجربه تدریس چند ساله این درس در دانشگاه‌های ایران نشان می‌دهد، استفاده مستقل یکی از این کتاب‌ها به منظور آموزش روش‌های کاربردی کنترل مقاوم برای دانشجویان و محققین دلچسب نیست. گاهی این موضوع ممکن است حتی ایجاد سردرگمی در تولید تصویری منسجم از این زمینه مهندسی در مخاطب نماید و ارتباط لازم میان مفاهیم نظری و طراحی کاربردی کنترل‌کننده مقاوم را فراهم نیاورد. از طرفی غالب این کتاب‌ها مثال‌های متنوع و یکپارچه‌ای برای فراگیری موضوع ارائه نمی‌دهند. این موضوع طی تدریس این درس به دانشجویان کارشناسی ارشد بیشتر نمایان شده است و اشتیاق دانشجویان برای حل مثال‌های کاربردی و انجام پروژه‌های درسی بیش از پیش احساس شده است.

دو رویکرد کلی در تدوین کتاب آموزشی در زمینه کنترل مقاوم می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. در رویکرد اول جمع‌آوری همه‌ی روش‌های کنترل مقاوم مانند H_∞ خطی و غیر خطی، سنتر H_2 ، شکل دهی حلقه، روش‌های خارتانوف و QFT در یک مرجع واحد می‌تواند مد نظر قرار گیرد. در این رویکرد با توجه به حجم بالای مطالب مربوط به هر یک از این روش‌ها، و محدودیت در حجم یک کتاب امکان پرداختن به مفاهیم به صورت عمیق میسر نمی‌شود و لاجرم لازم است تنها به بیان کلیات روش‌های مختلف پرداخته شود. در رویکرد دوم که مد نظر این کتاب قرار گرفته است، ضمن اشاره کلی به روش‌های مختلف، تمرکز بر تدوین مفاهیم و گسترش روش‌های مبتنی بر طراحی کنترل‌کننده مقاوم H_∞ و

سنتز H_{∞} قرار می‌گیرد. همچنین استفاده وسیع از نرم‌افزار متلب و به خصوص جعبه ابزار کنترل مقاوم در آن کمک خواهد نمود تا ضمن بسط مفاهیم ریاضی و نظری، دانش‌پژوهان را در استفاده از الگوریتم‌های آماده راهنمایی نموده و ایشان را با برنامه‌های آماده شده در این جعبه ابزار آشنا سازد. بدین ترتیب این کتاب با نگارش مستقل بخش‌های مفهومی متأثر از آموزه‌های پروفسور زمیس، ترجمه و تخلص برخی متون از مراجع و منابع مختلف، و توسعه برنامه‌های گوناگون در نرم‌افزار متلب و جعبه ابزار کنترل مقاوم، به رشته تحریر در آمده است. در این فرآیند سعی شده‌است نمادها و شکل‌ها یکنواخت گشته و از معروف‌ترین نمادها استفاده شود. همچنین موضوع این نگارش در طی دوازده سال تدریس در قالب درس کارشناسی ارشد در گروه‌های کنترل دانشگاه‌های صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، صنعتی شریف و صنعتی امیرکبیر مورد استفاده قرار گرفته و حجم فصول آن و تناسب مطالب نظری، کاربردی و استفاده از نرم‌افزار متلب متناسب با نیاز و زمان ارائه درس برازش شده‌است.

این کتاب به‌عنوان مرجعی مناسب برای دانشجویان سال آخر کارشناسی و یا سال اول کارشناسی ارشد مرتبط با گرایش کنترل در مهندسی برق، مهندسی مکانیک، مهندسی مکاترونیک، مهندسی هوافضا، مهندسی فرآیند و مهندسی شیمی پیشنهاد می‌شود. پیشنهاد لازم برای بهره‌برداری مناسب از مطالب این کتاب، آشنائی با فیزیک مکانیک، معادلات دیفرانسیل ریاضی، سیستم‌های کامپیوتری، سیستم‌های کنترل خطی و در صورت امکان کنترل مدرن است. البته در حد امکان نکات مقدماتی مورد نیاز در متن کتاب اشاره شده‌است و مراجع و منابع لازم به منظور ردیابی موضوع به خوانندگان ارائه می‌شود. علاوه بر مرور بیش‌نیازهای مطرح شده، به منظور درک بهتر موضوعات آشنائی کلی با نرم‌افزار متلب و مرور راهنمای این نرم‌افزار نیز توصیه می‌شود، تا به همت خوانندگان و با تمرین مثال‌های فراوان و گوناگون ارائه شده در این کتاب، یادگیری کامل موضوع فراهم شود.

این کتاب در سیزده فصل و مطابق با سرفصل‌های پیشنهادی زیر تدوین شده‌است. در فصل اول کتاب، آشنائی عمومی با مفاهیم مورد بحث و تعبیر کلی از مسئله بهینه‌سازی مورد تعقیب در این کتاب ارائه شده‌است. با مطالعه این فصل جایگاه فصول آینده و ترتیب ارائه مطالب روشن خواهد شد. در فصل دوم به صورت اجمالی ریاضیات مقدماتی کنترل مقاوم مورد توجه قرار می‌گیرد، انواع نرم در سیگنال‌ها و سیستم‌ها تعریف می‌شود و ارتباط بین انواع نرم در سیگنال‌ها و تعبیر نرم القایی سیستم به‌صورت دقیق بیان می‌شود. در فصل سوم به موضوع مدل‌سازی سیستم نامی و تعبیر مناسبی از نامعینی در مدل‌سازی خواهیم پرداخت. در این فصل بر نامعینی ضربی تأکید شده‌است چرا که در رفتار بسیاری از سیستم‌های واقعی قابل تفسیر است. در ادامه‌ی این فصل با توجه به پیچیدگی فرآیند تحلیل و طراحی کنترل‌کننده مقاوم، مدل استاندارد ارائه می‌گردد که با جداسازی سیستم نامی، نامعینی و کنترل‌کننده از یکدیگر شرایط را به منظور طراحی کنترل‌کننده مقاوم در حضور نامعینی فراهم می‌آورد.

در فصل چهارم مفاهیم پایداری و کارایی نامی و مقاوم شرح داده می‌شود و بر مبنای توابع تبدیل حساسیت و متمم حساسیت معیارهایی به منظور تحلیل و طراحی کنترل‌کننده استخراج می‌شود. در فصل پنجم مفاهیم فاکتورهای بهم‌اول معرفی خواهند شد و کنترل‌کننده‌های پایدار ساز ممکن برای یک سیستم حلقه بسته تعیین می‌گردد. در فصل ششم، مجموعه محدودیت‌های جبری و تحلیلی در حل مسئله بهینه‌سازی معرفی خواهند شد. همچنین قضیه بنیادی مقدار بیشینه در طراحی کنترل‌کننده‌های مقاوم تعریف شده و سپس قضیه کوشی و فرمول انتگرال کوشی و پواسون مورد بحث قرار می‌گیرند. در فصل هفتم مسئله‌ی عمومی تنظیم توصیف می‌گردد و راه‌های مختلف حل بهینه آن به منظور دستیابی به پایداری مقاوم و کارایی نامی ارائه می‌شوند. در فصل هشتم، مجموعه‌ای از مثال‌های مربوط به مسئله

تنظیم عمومی ارائه می‌شود و مراحل طراحی کنترل‌کننده برای آنها و روش بهبود طراحی در قالب این مثال‌ها توصیف می‌شود.

در فصل نهم، مفهوم مقادیر تکیین ساختاریافته (μ) معرفی می‌گردد و کنترل‌کننده یک سیستم بر مبنای سنتز μ ایجاد می‌گردد و روش‌های مختلف طراحی کنترل‌کننده با این دیدگاه ارائه می‌شود. در فصل دهم، روش‌هایی برای کاهش مرتبه کنترل‌کننده مانند روش برش، روش باقیمانده و روش هنکل ارائه می‌گردد. در فصل‌های یازدهم، دوازدهم و سیزدهم کتاب نیز سه پروژه بصورت جامع و یکپارچه مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. این پروژه‌ها شامل هواپیمای F14، سیستم نامعین سه-انرسی و سیستم PH می‌باشند.

با توجه به ساختار تدوین شده در این کتاب پیش بینی می‌شود دو طیف از مخاطبین علاقه مند به استفاده از این کتاب شوند. از یک طرف این کتاب به عنوان مرجع درسی دانشگاهی می‌تواند مورد استفاده دانشجویان مقطع کارشناسی و یا کارشناسی ارشد قرار گیرد. هر چند این کتاب نیاز به کتاب‌هایی که در بخش مراجع معرفی شده‌اند را مرتفع نمی‌سازد، اما می‌تواند به عنوان راهنمای کاملی مورد استفاده دانشجویان و اساتید ارجمند قرار گیرد. طیف دیگر از مخاطبین این کتاب می‌تواند کارشناسان محترمی باشند که در صنایع کشور مشغول به فعالیت بوده و علاقه‌مند به استفاده از روش‌های طراحی کنترل مقاوم در کاربردهای مورد نظر خود می‌باشند. این کتاب به عنوان تنها مرجع فارسی در این زمینه می‌تواند راهگشای این متخصصین باشد.

این کتاب توسط همکاران و دانشجویان زیادی مورد بازبینی و تصحیح قرار گرفته است. علیرغم تلاش فراوان نسبت به تصحیح اشکالات، قطعاً همچنان اشکالات دیگری در آن وجود دارد، که باعث خوشحالی مولفین خواهد شد اگر این موارد به صورت الکترونیکی به آدرس taghirad@kntu.ac.ir یا mohammad.fathi63@gmail.com گزارش شود. همچنین کلیه برنامه‌های مورد استفاده در این کتاب و موارد اصلاحی مورد اشاره در وب‌گاه کتاب به آدرس:

<http://saba.kntu.ac.ir/eeed/taghirad/RobustControl.html>

به روز رسانی خواهد شد. دانشجویان و متخصصین محترم می‌توانند با مراجعه به این پایگاه از کدهای نوشته شده در این کتاب بهره برداری نموده و ضمن فراگیری موضوعات درس امکان تمرین بیشتری را داشته باشند. کارشناسان صنایع نیز می‌توانند با استفاده از الگوی ارائه شده در این برنامه‌ها، با استفاده از ساختار آن و تغییر در جزئیات، به طراحی و تحلیل کنترل‌کننده‌های مناسب در کاربرد خود بپردازند. در پایان از کلیه کسانی که در تدوین کتاب و انجام اصلاحات لازم ما را یاری نموده‌اند به خصوص دکتر علی خاکی صدیق، دکتر مهسان توکلی، دکتر سجاد انصاری، مهندس حامد طلوعی، مهندس پیمان باقری، مهندس محمدرضا نیری و مهندس یاسر شیرمحمدی تشکر و قدردانی می‌نمایم. امید است این مجموعه برای دانش‌پژوهان و متخصصین صنعتی کشور مفید و موثر قرار گیرد.

حمید رضا تقی راد

محمد فتحی و فرینا زمانی اسگویی

دی ماه ۱۳۹۲

جدول نمادها

نمادها	توضیحات
$S(s)$	تابع حساسیت
$T(s)$	تابع مکمل حساسیت
$L(s)$	تابع حلقه باز
$W(s)$	تابع وزنی بروقیل نامعینی
$W_s(s)$	تابع وزنی حساسیت
$W_u(s)$	تابع وزنی تلاش کنترلی
$W_p(s)$	تابع وزنی کارایی (در بسیاری از موارد مشابه $W_s(s)$)
$M(s)$	سیستم تعمیم یافته، مجزا شده از کنترل کننده و نامعینی
$N(s)$	سیستم تعمیم یافته، مجزا شده از نامعینی
$K(s)$	کنترل کننده در سیستم تعمیم یافته و در حالت متداول
$C(s)$	کنترل کننده در حالت متداول
$P(s)$	سیستم تعمیم یافته، مشابه $M(s)$ ، با مولفه های تزئین شده
$P(s)$	سیستم معین در حالت متداول
$G(s)$	سیستم معین در حالت متداول
$\tilde{P}(s)$	سیستم نامعین در حالت متداول
$G_p(s)$	سیستم نامعین در حالت متداول
$F_l(M, K)$	تبدیل کسری خطی پائینی: مجزا کننده ی سیستم تعمیم یافته از کنترل کننده
$F_u(N, \Delta)$	تبدیل کسری خطی بالایی: مجزا کننده ی سیستم تعمیم یافته از نامعینی
$D(s)$	ماتریس وزنی تابع تبدیل $F_l(M, K)$
$G(s)$	ماتریس وزنی تابع تبدیل $F_l(M, K)$ در حضور نامعینی حقیقی
T_{zw}	تابع تبدیل از ورودی w به خروجی z
$w(s)$	ورودی های برون غیر قابل کنترل مانند اغتشاش، نویز، مسیر مطلوب ردیابی و غیره در سیستم تعمیم یافته

ورودی‌های کنترلی ایجاد شده توسط کنترل‌کننده در سیستم تعمیم یافته	$u(s)$
خروجی‌های تنظیم شونده حاصل از معیارهای بهینه‌سازی در سیستم تعمیم یافته	$z(s)$
خروجی‌های اندازه‌گیری شونده مورد استفاده در پسخور در سیستم تعمیم یافته	$y(s)$
سیگنال ورودی به سیستم نامی تعمیم یافته از سمت نامعینی	$p(s)$
سیگنال خروجی سیستم تعمیم یافته به سمت نامعینی	$q(s)$
سیگنال ورودی مرجع در سیستم‌های متداول	$r(s)$
سیگنال ورودی اغتشاش در سیستم‌های متداول	$d(s)$
سیگنال ورودی نویز حاصل از سنسورها در سیستم‌های متداول	$n(s)$
نامعینی پارامتریک یا ساختار یافته معمولاً بصورت نرمالیزه $ \sigma_p \leq 1$	$\bar{\sigma}_p$
گرامیان کنترل‌پذیری	P
گرامیان رویت‌پذیری	Q
نامعینی بدون ساختار معمولاً بصورت نرمالیزه $\ \Delta_I\ _\infty \leq 1$	Δ_I
ماتریس نامعینی ساختار یافته و بدون ساختار معمولاً بصورت نرمالیزه $\ \Delta\ _\infty \leq 1$	Δ
ماتریس نامعینی فرضی	Δ_F
ترکیب ماتریس نامعینی فرضی Δ_F و ماتریس نامعینی واقعی Δ	$\tilde{\Delta}$
مجموعه ماتریس‌های نامعینی با فرمت Δ که لزوماً نرمالیزه باشند.	$\mathcal{A}$
مجموعه ماتریس‌های نامعینی با فرمت Δ که لزوماً نرمالیزه شده باشند.	$B_{\mathcal{A}}$
نماد نرم	$\ \cdot\ $
مجموعه اعداد حقیقی	$\mathbb{R}$
مجموعه اعداد مختلط	$\mathbb{C}$
فضای برداری مجموعه $\mathbb{C}$	$\mathbb{C}^n$
فضا در حوزه‌ی زمان	ℓ
فضا در حوزه فرکانس	L
توابع تبدیل اکید سره پایدار که عناصر آن بصورت نسبت چند جمله‌هایی با ضرایب حقیقی تعریف شده‌اند	R
مجموعه‌ای شامل تمامی توابع تبدیل ماتریسی اکیدا سره پایدار که عناصر آن بصورت نسبت چند جمله‌هایی با ضرایب حقیقی تعریف شده و دارای نرم بی نهایت محدود باشند.	RH_∞

مقدار تکیں ساختار یافته	μ
مقدار ویژه	λ
مقدار تکیں بیشینه	$\bar{\sigma}$
مقدار تکیں بیشینه	$\sigma_{\max}$
مقدار تکیں کمینه	$\underline{\sigma}$
مقدار تکیں کمینه	$\sigma_{\min}$
مقدار تکیں هنگل	σ_H
کوچکترین کران بالا	sup
بزرگترین کران پایین	inf
فرکانس طبیعی	ω_n
ضریب میرایی	ζ
زمان صعود	t_r
زمان استقرار	t_s
فراجهش	M_p
بیشینه‌ی تشدید	M_s
پهنای باند	ω_B
فرکانس عبور	ω_C
حاشیه فاز	γ
ضرایب توابع تبدیل فیلترهای پائین گذر و بالا گذر	α, β
مقدار تابع وزنی در فرکانس‌های پائین	A_0
مقدار تابع وزنی در فرکانس‌های بالا	A_∞

www.ketab.ir

۱	مقدمه	۱
۱.۱	مدل سازی، نامعینی و قوام	۳
۲.۱	تابع تبدیل حساسیت	۶
۳.۱	مسئله عمومی تنظیم	۱۱
۴.۱	ترکیب فصول	۱۵
۲	مروری بر ریاضیات کنترل مقاوم	۱۹
۱.۲	مقدمه‌ای بر مقدار و بردار ویژه	۱۹
۱.۱.۲	الگوریتم محاسبه مقدار و بردار ویژه	۲۰
۲.۱.۲	کنترل پذیری، پایداری پذیری، رویت پذیری و مشاهده پذیری	۲۲
۳.۱.۲	ارتباط بردار ویژه با کنترل پذیری و رویت پذیری	۲۴
۲.۲	مقدمه‌ای بر نرم	۲۶
۱.۲.۲	نرم بردار و نرم ماتریس	۲۶
۱.۱.۲.۲	نرم بردار	۲۷
۲.۱.۲.۲	نرم ماتریس	۲۸
۲.۲.۲	نرم سیگنال و نرم سیستم	۳۰
۱.۲.۲.۲	نرم سیگنال	۳۰
۲.۲.۲.۲	نرم سیستم	۳۲
۳.۲.۲	الگوریتم‌های محاسبه نرم	۳۴
۱.۳.۲.۲	الگوریتم محاسبه نرم دو	۳۴
۲.۳.۲.۲	الگوریتم محاسبه نرم بی‌نهایت	۳۸
۴.۲.۲	ارتباط نرم سیگنال و سیستم	۴۰
۳.۲	مقدمه‌ای بر مقادیر تکین	۴۲
۱.۳.۲	الگوریتم محاسبه مقادیر تکین	۴۵
۲.۳.۲	ارتباط مقادیر تکین و نرم	۵۰
۴.۲	مقدمه‌ای بر فضاهاى نرم‌دار	۵۲
۱.۴.۲	فضای هیلبرت	۵۲
۲.۴.۲	فضای L_2	۵۵
۳.۴.۲	فضای H_2	۵۵
۴.۴.۲	فضای $H_2^\perp$	۵۶
۵.۴.۲	فضای باناخ	۵۶
۶.۴.۲	فضای L_∞	۵۷
۷.۴.۲	فضای H_∞	۵۷

۵۷	 فضای $H_\infty^\perp$	۸.۴.۲
۵۸	 ارتباط فضای زمان و فضای فرکانس	۹.۴.۲
۶۰	 جمع‌بندی فصل	۵.۲
۶۱	 مسائل	۶.۲
۶۵	 مدل‌سازی مسائل مقاوم	۳
۶۵	 مدل‌سازی سیستم‌های نامی	۱.۳
۶۶	 تعریف ریاضی نامعینی	۲.۳
۶۶	 نامعینی ساختاریافته	۱.۲.۳
۷۰	 نامعینی بدون ساختار	۲.۲.۳
۷۰	 نامعینی بدون ساختار جمع‌پذیر	۱.۲.۲.۳
۷۲	 نامعینی بدون ساختار ضربی یا دیسکی	۲.۲.۲.۳
۷۴	 تعمیم تابع نامعینی نسبت به عمل	۳.۲.۲.۳
۷۸	 مزایا و معایب نامعینی ضربی	۴.۲.۲.۳
۸۰	 شکل کلی نامعینی	۳.۲.۳
۸۱	 پیکربندی استاندارد مسائل کنترل مقاوم	۳.۳
۸۱	 پیکربندی استاندارد مسائل طراحی کنترل مقاوم	۱.۳.۳
۹۶	 پیکربندی استاندارد تحلیل قوام	۲.۳.۳
۱۰۴	 پیکربندی استاندارد جامع در تحلیل و طراحی کنترل مقاوم	۳.۳.۳
۱۱۴	 جمع‌بندی فصل	۴.۳
۱۱۵	 مسائل	۵.۳
۱۲۱	 تحلیل پایداری و کارایی سیستم‌های کنترل مقاوم	۴
۱۲۱	 پایداری داخلی در سیستم پسخورد نامی استاندارد	۱.۴
۱۲۵	 آزمون پایداری اول	۱.۱.۴
۱۲۶	 آزمون پایداری دوم	۲.۱.۴
۱۲۶	 آزمون پایداری سوم	۳.۱.۴
۱۲۷	 آزمون پایداری چهارم: معیار نایکوئیست	۴.۱.۴
۱۲۷	 پایداری داخلی در سیستم پسخورد دارای نامعینی	۲.۴
۱۳۳	 کارایی نامی یک سیستم پسخورد	۳.۴
۱۳۵	 کارایی مقاوم یک سیستم پسخورد	۴.۴
۱۳۵	 پایداری و کارایی در سیستم پسخورد بر مبنای توابع S و T	۵.۴
۱۳۶	 پایداری مقاوم	۱.۵.۴
۱۳۹	 کارایی مقاوم	۲.۵.۴
۱۴۱	 پایداری و کارایی در سیستم پسخورد استاندارد بر مبنای نرم بی‌نهایت	۶.۴

۱۴۳	۱.۶.۴	پایداری نامی و مقاوم
۱۴۵	۲.۶.۴	کارایی نامی و مقاوم
۱۴۵	۷.۴	پایداری و کارایی در سیستم پشخورد استاندارد بر مبنای مقدار تکین ساختاریافته
۱۴۷	۱.۷.۴	الگوریتم محاسبه مقدار تکین ساختاریافته
۱۵۰	۲.۷.۴	پایداری مقاوم
۱۵۱	۳.۷.۴	کارایی مقاوم
۱۶۲	۸.۴	جمع‌بندی فصل
۱۶۳	۹.۴	مسائل
۱۶۷	۵	ایجاد سیستم‌های کنترل مقاوم: کنترل‌کننده پارامتری
۱۶۸	۱.۵	تجزیه پارامتری کنترل‌کننده: سیستم‌های پایدار
۱۷۰	۲.۵	سیستم‌های ناپایدار و فاکتورهای بهم اول
۱۷۱	۱.۲.۵	چند جمله‌ای‌های بهم اول
۱۷۱	۲.۲.۵	الگوریتم اقلیدس
۱۷۳	۳.۲.۵	توابع تبدیل بهم اول
۱۷۴	۱.۳.۲.۵	الگوریتم یافتن چند جمله‌ای بهم اول: بسط الگوریتم اقلیدس
۱۷۶	۲.۳.۲.۵	الگوریتم یافتن چند جمله‌ای بهم اول: روش فضای حالت
۱۷۸	۳.۵	تجزیه پارامتری کنترل‌کننده: سیستم‌های ناپایدار
۱۷۹	۴.۵	تجزیه پارامتری کنترل‌کننده: کارایی سیستم پشخورد
۱۸۱	۵.۵	پایداری‌پذیری قوی
۱۸۱	۶.۵	تجزیه پارامتری کنترل‌کننده: سیستم‌های چند متغیره
۱۸۴	۱.۶.۵	روش یافتن زوج فاکتورهای بهم اول
۱۸۸	۲.۶.۵	کنترل‌کننده پارامتری در حالت ساده
۱۹۰	۳.۶.۵	مجموعه کلیه کنترل‌کننده‌های پارامتری
۱۹۱	۴.۶.۵	سیستم و کنترل‌کننده پارامتری در حالت کلی
۱۹۶	۷.۵	جمع‌بندی فصل
۱۹۶	۸.۵	مسائل
۱۹۹	۶	محدودیت‌های طراحی
۱۹۹	۱.۶	قیدهای جبری
۱۹۹	۱.۱.۶	اتحاد تابع حساسیت و متمم حساسیت
۲۰۰	۲.۱.۶	محدودیت جبری توابع وزنی
۲۰۱	۳.۱.۶	شرایط درون‌یابی
۲۰۳	۲.۶	قیدهای تحلیلی
۲۰۶	۱.۲.۶	محدودیت توابع وزنی W و W_s

۲۰۷	فاکتورسازی درونی- برونی	۲.۲.۶
۲۰۸	اثر نزدیکی قطب و صفر	۳.۲.۶
۲۰۹	اثر تشک آبی	۴.۲.۶
۲۱۱	فرمول مساحت	۵.۲.۶
۲۱۳	محدودیت‌های صفر غیر کمینه فاز بر روی کارایی	۶.۲.۶
۲۱۵	نحوه انتخاب توابع وزنی	۳.۶
۲۱۶	پهنای باند	۱.۳.۶
۲۱۷	الگوی توابع وزنی بر حسب فیلترهای پائین گذر و بالا گذر	۲.۳.۶
۲۱۹	الگوی توابع وزنی بر حسب اندازه تابع وزنی در فرکانس پائین، بالا و فرکانس عبور	۳.۳.۶
۲۲۲	الگوی تابع وزنی بر حسب بهره‌ی DC، فرکانس عبور و بهره‌ی فرکانس بالا	۴.۳.۶
۲۲۳	الگوی تابع وزنی بر حسب ضریب میرایی و فرکانس طبیعی	۵.۳.۶
۲۲۳	جمع‌بندی فصل	۴.۶
۲۲۴	مسائل	۵.۶
۲۲۷	حل بهینه مسئله‌ی عمومی تنظیم: روش‌ها	۷
۲۲۸	تبدیل مسئله‌ی طراحی مقاوم به مسئله‌ی عمومی تنظیم	۱.۷
۲۳۰	تبدیل مسئله‌ی طراحی مقاوم به بیکریندی استاندارد	۲.۷
۲۳۴	آماده سازی به منظور حل بهینه مسئله‌ی عمومی تنظیم	۳.۷
۲۳۷	حل بهینه مسئله کنترل H_2 : به روش ریکاتی	۴.۷
۲۴۲	حل بهینه مسئله کنترل H_∞ : به روش ریکاتی	۵.۷
۲۴۷	حل مسئله کنترل H_∞ : به روش LMI	۶.۷
۲۵۱	حل مسئله کنترل H_∞ : به روش LMI با قید جای‌دهی قطب‌ها	۷.۷
۲۵۵	حل مسئله ترکیبی H_2 و H_∞	۸.۷
۲۵۷	جمع‌بندی فصل	۹.۷
۲۵۸	مسائل	۱۰.۷
۲۶۱	حل بهینه مسائل عمومی تنظیم: شبیه‌سازی و بهبود طراحی	۸
۲۶۱	طراحی کنترل‌کننده برای سیستم SISO	۱.۸
۲۶۳	طراحی کنترل‌کننده به روش H_∞	۱.۱.۸
۲۶۶	بهبود اول در طراحی کنترل‌کننده به روش H_∞	۱.۱.۱.۸
۲۶۸	بهبود دوم در طراحی کنترل‌کننده به روش H_∞	۲.۱.۱.۸
۲۷۰	طراحی کنترل‌کننده به روش H_2	۲.۱.۸
۲۷۲	تلفیق طراحی کنترل‌کننده به روش H_2 و H_∞	۳.۱.۸
۲۷۴	مقایسه‌ی کنترل‌کننده‌ها	۴.۱.۸
۲۷۶	طراحی کنترل‌کننده برای سیستم غیر کمینه‌فاز پایدار	۲.۸

۲۸۰	شبیه‌سازی و تحلیل در حالت ایده‌آل	۱.۲.۸
۲۸۱	طراحی در حضور نامعینی ضربی	۲.۲.۸
۲۸۳	شبیه‌سازی و تحلیل در حضور نامعینی	۳.۲.۸
۲۸۴	طراحی کنترل‌کننده برای سیستم غیرکمینه‌فاز ناپایدار	۳.۸
۲۸۹	شبیه‌سازی سیستم حلقه بسته با حضور نامعینی	۱.۳.۸
۲۹۲	طراحی کنترل‌کننده با حلقه‌ی داخلی	۲.۳.۸
۲۹۹	شبیه‌سازی سیستم کنترل با حلقه داخلی در حضور نامعینی	۳.۳.۸
۳۰۱	طراحی کنترل‌کننده برای مساله دفع اغتشاش در سیستم‌های معین	۴.۸
۳۰۴	طراحی کنترل‌کننده دفع اغتشاش در سیستم SISO	۱.۴.۸
۳۱۰	طراحی کنترل‌کننده دفع اغتشاش در سیستم MIMO	۲.۴.۸
۳۱۳	مقایسه دستورات augw و reconnect_sysic	۵.۸
۳۱۴	جمع‌بندی فصل	۶.۸
۳۱۴	مسائل	۷.۸
۳۱۷	طراحی مقاوم بر اساس مقدار تکین ساختار یافته	۹
۳۱۷	طراحی کنترل‌کننده به روش سنتز μ با نامعینی موهومی	۱.۹
۳۱۹	تعریف مساله سنتز μ	۱.۱.۹
۳۱۹	راهکار حل مساله سنتز μ	۲.۱.۹
۳۲۰	طراحی کنترل‌کننده به روش $D-K$	۳.۱.۹
۳۲۱	دستور dksyn	۱.۳.۱.۹
۳۲۲	دستور dksynOptions	۲.۳.۱.۹
۳۲۶	طراحی کنترل‌کننده به روش $\mu-K$	۴.۱.۹
۳۲۶	طراحی کنترل‌کننده به روش سنتز μ با نامعینی حقیقی و موهومی	۲.۹
۳۲۷	طراحی کنترل‌کننده به روش $D-G-K$	۱.۲.۹
۳۲۹	دستور dksyn و دستور dksynOptions	۲.۲.۹
۳۳۵	مقایسه‌ی طراحی کنترل‌کننده با μ موهومی و μ مختلط	۳.۹
۳۳۶	شباهت‌های دو روش: کاربرد روش دیسک	۱.۳.۹
۳۳۸	تفاوت‌های دو روش: تحلیل بدترین حالت	۲.۳.۹
۳۴۰	طراحی کنترل‌کننده به روش μ با ساده‌سازی نامعینی‌ها	۴.۹
۳۴۵	جمع‌بندی فصل	۵.۹
۳۴۶	مسائل	۶.۹
۳۴۹	کاهش مرتبه مدل	۱۰
۳۵۰	برش و باقیمانده	۱.۱۰
۳۵۰	روش برش	۱.۱.۱۰

۳۵۱	۲.۱.۱۰ روش باقیمانده
۳۵۲	۲.۱۰ تحقق متوازن
۳۵۴	۳.۱۰ تخمین مقادیر تکیین هنکل
۳۵۶	۱.۳.۱۰ الگوریتم کاهش مرتبه مدل با مقادیر تکیین هنکل
۳۵۷	۴.۱۰ کاهش مرتبه مدل در نرم افزار متلب
۳۵۹	۵.۱۰ مثال جامع: کاهش مرتبه مدل
۳۶۱	۱.۵.۱۰ کاهش مرتبه مدل با استفاده از کران خطای جمع‌پذیر
۳۶۲	۲.۵.۱۰ کاهش مرتبه مدل با استفاده از کران خطای افزایش ضریبی
۳۶۵	۳.۵.۱۰ صحت‌گذاری نتایج
۳۶۵	۶.۱۰ مثال جامع: کاهش مرتبه‌ی کنترل‌کننده‌ها
۳۶۶	۱.۶.۱۰ مدل نامی هواپیمای HiMAT
۳۶۸	۲.۶.۱۰ طراحی کنترل‌کننده با H_{∞} و کاهش مرتبه کنترل‌کننده
۳۷۲	۳.۶.۱۰ طراحی کنترل‌کننده با ستر μ و کاهش مرتبه کنترل‌کننده
۳۷۴	۴.۶.۱۰ مقایسه‌ی کنترل‌کننده‌ها
۳۷۶	۷.۱۰ جمع‌بندی فصل
۳۷۷	۸.۱۰ مسائل
۳۷۹	۱۱ طراحی نمونه: کنترل عرضی - سمتی هواپیمای F-14
۳۸۰	۱.۱۱ مدل نامی هواپیما
۳۸۳	۲.۱۱ مشخصات کارایی مطلوب
۳۸۸	۳.۱۱ تبدیل مشخصات کارایی به توابع وزنی
۳۹۰	۴.۱۱ نامعینی در مدل
۳۹۱	۵.۱۱ ساخت مدل سیستم در حضور نامعینی
۳۹۲	۶.۱۱ طراحی کنترل‌کننده
۳۹۵	۷.۱۱ مقایسه‌ی کنترل‌کننده‌ها در فضای فرکانسی
۳۹۷	۸.۱۱ بررسی کارایی مقاوم کنترل‌کننده‌ها در فضای زمان
۳۹۹	۹.۱۱ جمع‌بندی فصل
۴۰۱	۱۲ طراحی نمونه: سیستم سه-اینرسی (SISO)
۴۰۱	۱.۱۲ معرفی سیستم
۴۰۲	۱.۱.۱۲ مدل سازی فیزیکی سیستم
۴۰۳	۲.۱.۱۲ اهداف طراحی
۴۰۳	۳.۱.۱۲ شبیه‌سازی سیستم حلقه باز
۴۰۷	۴.۱.۱۲ مدل خطی سازی شده و حساسیت آن به تغییر در پارامترها
۴۱۳	۲.۱۲ شناسایی خطی سیستم غیر خطی

۴۱۳	تخمین تابع تبدیل	۱.۲.۱۲
۴۱۳	آزمودن روش شناسایی سیستم با ورودی chirp	۲.۲.۱۲
۴۱۷	آزمودن روش شناسایی سیستم با ورودی تصادفی	۳.۲.۱۲
۴۱۹	اعمال ورودی‌های مختلف و شناسایی نهانی سیستم	۴.۲.۱۲
۴۲۳	انتخاب سیستم نامی و تابع وزنی نامعینی ضربی	۳.۱۲
۴۲۳	انتخاب سیستم نامی	۱.۳.۱۲
۴۲۳	تعیین تابع وزنی نامعینی ضربی	۲.۳.۱۲
۴۲۵	روشی دیگر در تعیین تابع وزنی نامعینی	۳.۳.۱۲
۴۲۶	طراحی کنترل کننده بهینه H_{∞}	۴.۱۲
۴۲۷	تبدیل به فرم مسئله عمومی تنظیم	۱.۴.۱۲
۴۲۸	انتخاب تابع وزنی کارایی	۲.۴.۱۲
۴۲۹	انتخاب تابع وزنی سگنال تلاش کنترلی	۳.۴.۱۲
۴۲۹	طراحی کنترل کننده اول و بررسی پاسخ سیستم	۴.۴.۱۲
۴۳۳	بهبود طراحی و بررسی پاسخ سیستم	۵.۴.۱۲
۴۳۶	میزان تضعیف اغتشاش در کنترل کننده بهبود یافته	۶.۴.۱۲
۴۳۸	طراحی کنترل کننده H_2 / H_{∞}	۵.۱۲
۴۳۸	طراحی کنترل کننده اولیه	۱.۵.۱۲
۴۴۱	بهبود طراحی	۲.۵.۱۲
۴۴۳	پاسخ به اغتشاش	۳.۵.۱۲
۴۴۴	طراحی کنترل کننده توسط سنتر μ	۶.۱۲
۴۴۴	طراحی کنترل کننده اولیه	۱.۶.۱۲
۴۴۵	طراحی کنترل کننده کاهش یافته	۲.۶.۱۲
۴۴۷	تحلیل پاسخ‌های زمانی	۳.۶.۱۲
۴۴۹	پاسخ به اغتشاش	۴.۶.۱۲
۴۵۰	مقایسه کنترل کننده‌های طراحی شده با تحلیل μ	۷.۱۲
۴۵۰	بررسی پایداری مقاوم	۱.۷.۱۲
۴۵۰	بررسی کارایی مقاوم	۲.۷.۱۲
۴۵۲	مقایسه کنترل کننده‌های طراحی شده	۳.۷.۱۲
۴۵۳	جمع بندی فصل	۸.۱۲
۴۵۵	طراحی نمونه: سیستم pH (MIMO)	۱۳
۴۵۵	معرفی فرآیند pH	۱.۱۳
۴۵۶	مدل سازی فرآیند pH	۱.۱.۱۳
۴۵۷	شبیه سازی سیستم حلقه باز	۲.۱.۱۳
۴۶۰	خطی سازی و شناسایی فرآیند pH	۳.۱.۱۳

۴۶۰	۱.۳.۱.۱۳ رویکرد اول: خطی سازی معادلات حالت سیستم
۴۶۴	۲.۳.۱.۱۳ رویکرد دوم: خطی سازی بر اساس آزمون پله و محاسبه هر دو خروجی ارتفاع و pH
۴۶۹	۴.۱.۱۳ اهداف طراحی
۴۷۰	۲.۱۳ انتخاب سیستم نامی و تابع وزنی نامعینی ضربی
۴۷۰	۱.۲.۱۳ انتخاب سیستم نامی
۴۷۱	۲.۲.۱۳ تعیین تابع وزنی نامعینی ضربی
۴۷۴	۳.۱۳ طراحی کنترل کننده ی بهینه H_{∞} با هدف عملکرد مقاوم
۴۷۴	۱.۳.۱۳ تبدیل به فرم مساله عمومی تنظیم
۴۷۵	۲.۳.۱۳ انتخاب تابع وزنی کارایی
۴۷۶	۳.۳.۱۳ انتخاب تابع وزنی تلاش کنترلی
۴۷۶	۴.۳.۱۳ طراحی کنترل کننده
۴۷۸	۵.۳.۱۳ کاهش مرتبه کنترل کننده
۴۸۰	۶.۳.۱۳ تحلیل و شبیه سازی پاسخ های سیستم دینامیکی
۴۸۲	۷.۳.۱۳ بهبود طراحی و بررسی پاسخ سیستم
۴۸۵	۸.۳.۱۳ میزان تضعیف اغتشاش در کنترل کننده بهبود یافته
۴۸۶	۴.۱۳ طراحی کنترل کننده ی H_2/H_{∞}
۴۸۷	۱.۴.۱۳ کاهش مرتبه کنترل کننده
۴۸۹	۲.۴.۱۳ تحلیل و شبیه سازی پاسخ های سیستم دینامیکی
۴۸۹	۳.۴.۱۳ پاسخ به اغتشاش
۴۹۱	۵.۱۳ طراحی کنترل کننده توسط سنتز μ
۴۹۲	۱.۵.۱۳ کاهش مرتبه کنترل کننده
۴۹۳	۲.۵.۱۳ تحلیل و شبیه سازی پاسخ های سیستم دینامیکی
۴۹۵	۳.۵.۱۳ پاسخ به اغتشاش
۴۹۵	۶.۱۳ مقایسه کنترل کننده های طراحی شده با تحلیل μ
۴۹۵	۱.۶.۱۳ بررسی کارایی مقاوم
۴۹۶	۲.۶.۱۳ مقایسه کنترل کننده های طراحی شده
۴۹۷	۷.۱۳ جمع بندی فصل
۴۹۹	منابع و مراجع
۵۰۳	واژه نامه انگلیسی به فارسی
۵۰۷	واژه نامه فارسی به انگلیسی
۵۱۱	فهرست راهنما

۱ مقدمه

قوام^۱ یکی از اساسی‌ترین موضوعات طراحی در یک سیستم کنترلی است. زیرا سیستم‌های کنترلی در عمل علاوه بر آنکه در معرض اغتشاش‌های خارجی و نویز اندازه‌گیری هستند، بر اساس مدل‌های ریاضی طراحی می‌شوند که با سیستم واقعی اختلاف دارند. عموماً یک مهندس کنترل باید کنترل‌کننده‌ای طراحی نماید که ضمن پایدارسازی سیستم، سطحی از کارایی را در حضور اغتشاش سیگنال‌ها، تداخلات نویزها، دینامیک‌های مدل نشده سیستم و تغییرات پارامترهای سیستم فراهم آورد. این اهداف چندگانه طراحی به بهترین نحو از طریق ساختار پسخورد^۲ در سیستم کنترل حاصل می‌گردد.

همیشه نیاز و اهمیت قوام در طراحی سیستم‌های کنترلی به خصوص در سه دهه‌ی گذشته درک شده‌است. در سیستم‌های کلاسیک تک ورودی- تک خروجی (SISO)، مقاوم بودن از طریق حاشیه فاز و حاشیه بهره تامین می‌گردد، که این امر تا حدی کارایی مطلوب را تضمین می‌نماید. اما با توسعه سیستم‌های چند ورودی- چند خروجی (MIMO) در دهه‌ی ۱۹۶۰، روش‌های ارائه شده به منظور دستیابی به کارایی مطلوب، مقاوم بودن سیستم را تضمین نمی‌کرد. در آن سال‌ها عموماً این روش‌های چند متغیره بر مبنای معیار کارایی مرتبه دوم و اغتشاشات گوسی بنا شده بود و کاربرد آنها در سیستم‌های که دارای مدل ریاضی دقیقی هستند و نویزها و اغتشاشات آنها بر مبنای نویز سفید قابل بیان می‌باشند، به اثبات رسیده‌است. به هر حال کاربرد چنین روش‌هایی که عموماً LQG^۳ خوانده می‌شوند در برخی مسائل صنعتی موفق آمیز نبوده و از لحاظ قوام، نتایج ضعیفی را در بر داشته‌اند. این امر منجر به تحقیقات گسترده‌ای به منظور توسعه نظری روش‌های طراحی کنترل‌کننده گشت تا بتوان نیاز به قوام را در طراحی سیستم کنترلی لحاظ نمود.

کارهای اولیه در این حوزه توسط آقای Zames در اواخر دهه‌ی ۱۹۷۰ و اوایل دهه‌ی ۱۹۸۰ با ارائه قضیه بهره کوچک^۴ انجام گرفت. ایشان شالوده‌ی روشی را بنا نهادند که امروزه به تئوری کنترل بهینه‌ی H_∞ معروف است. این تئوری کنترل مقاوم در سال‌های بعد بر مبنای روش بهینه‌سازی H_∞ و روش آنالیز و تحلیل μ دارای رویه‌ای سیستماتیک در طراحی سیستم‌های خطی گشت و هنوز هم به طور وسیعی تحقیقات در این حوزه در سیستم‌های خطی و غیرخطی ادامه دارد. در روش کنترل مقاوم H_∞ معایب دو روش کنترل کلاسیک (در سال‌های ۱۹۳۰ تا ۱۹۵۰) و کنترل مدرن (در سال‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۷۰) جبران شده و از مزایای آنها استفاده می‌شود. به گونه‌ای که برخلاف سیستم‌های کلاسیک این روش پاسخگوی طراح در سیستم‌های پیچیده‌ی چند ورودی و چند خروجی است. اما فلسفه و نگاه فرکانسی در طراحی کنترل کلاسیک از طریق فهم دقیق دیاگرام بودی^۵ و نایکوئیست در توجه به رفتار سیستم همچنان در آن حفظ و بکار می‌رود. از طرفی نقص روش‌های کنترل مدرن در طراحی مقاوم کنترل سیستم‌های صنعتی را حل نموده ولی از

¹Robustness² Feedback³Linear Quadratic Guassian⁴Small Gain Theory⁵Bode Diagram

توانمندی‌های کامپیوتری و روش‌های مدرن طراحی کنترل استفاده می‌کند. جدول ۱.۱ به اختصار تاریخچه توسعه روش‌های طراحی کنترل‌کننده‌های مقاوم را بیان می‌دارد [۴۳] و [۷۲].

جدول ۱.۱ تاریخچه توسعه کنترل مقاوم.

سال	توسعه‌دهنده	حوزه فعالیت
۱۹۳۲	نایکوئیست (Nyquist)	یافتن ویژگی پایداری در سیستم فیدبک از طریق پسخورد منفی
۱۹۴۰	بودی (Bode)	توسعه‌ی ویژگی پایداری در سیستم فیدبک از طریق پسخورد منفی با مفاهیم دامنه و فاز
۱۹۵۹	هروویتز (Horowitz)	معرفی تئوری کنترل پسخورد کیفی (Quantitative Feedback Theory) در سیستم‌های دارای نامعینی از طریق توسعه کار بودی در سیستم‌های تک ورودی و تک خروجی
دهه ۱۹۶۰	کالمن (Kalman) و وینر (Wiener)	شروع و توسعه استفاده از روش‌های فضای حالت در فرآیندهای اتفاقی و بهینه سازی H_2 که اصطلاحاً LQG نامیده می‌شود.
۱۹۸۱	زیمس (Zames)	معرفی روش H_∞ و استفاده از مفاهیم فرکانسی برای بیان نامعینی با اینکه مدل فضای حالت در آن سال‌ها در صدر تحقیقات قرار داشته است.
۱۹۸۴	دویل (Doyle)	استفاده از مفاهیم فرکانسی ارائه شده توسط زیمس و توسعه روش‌های مبتنی بر فضای حالت برای حل مسئله بهینه سازی
۱۹۸۹	دویل، گلاور (Glover)، کارگونکار (Kharagonkar) و فرانسیس (Francis)	ارائه روش حل H_∞ از طریق روش تساوی‌های جبری ریکاتی (Algebraic Riccati Equations)
۱۹۹۲	مک‌فارلن (McFarlane) و گلاور (Glover)	ارائه روش شکل‌دهی حلقه (Loop Shaping)
۱۹۹۲	دویل (Doyle)	ارائه روش مقادیر تکین ساختار یافته (μ) به منظور حل مسئله کارایی مقاوم
۱۹۹۴	آپکاریان (Apkarian)، گاهینت (Gahinet)، ایوازاکی (Iwasaki) و سکلتون (Skelton)	ارائه روش LMI که انعطاف بیشتری نسبت به تساوی‌های ریکاتی دارد و پیچیدگی محاسبات آن در سطح راه‌حل‌های ریکاتی است.

این کتاب بر مبنای تئوری کنترل بهینه‌ی H_∞ بنا نهاده شده است. لذا به دیگر روش‌های کنترل مقاوم مانند روش فیدبک کمی QFT [۴۵]، روش خاریتانوف^۱ [۱۹]، روش H_2 (یا LQG) [۱۳]، روش شکل‌دهی حلقه^۲ [۵۸، ۳۰]، روش‌های غیرخطی H_∞ [۵]، روش مود لغزشی^۳ [۴۹] و روش‌های مقاوم تطبیقی مانند LPV^۴ [۶، ۴] نمی‌پردازد. اگرچه در مواردی به آنها اشاره می‌گردد.

^۱Quantitative Feedback Theory

^۲Kharitanov

^۳Loop Shaping

^۴Sliding Mode

^۵Linear Parameter Varying

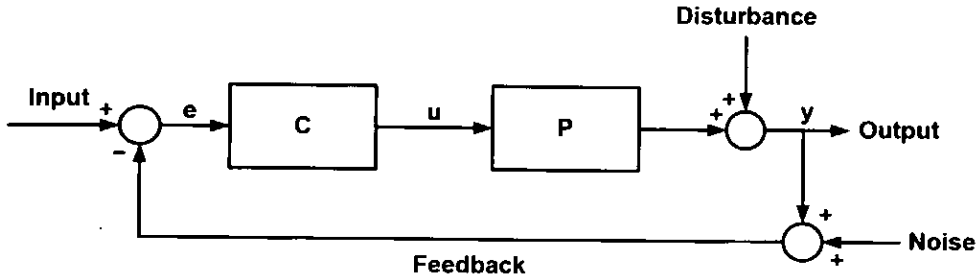
۱.۱ مدل سازی، نامعینی و قوام

مهندسان کنترل غالباً به دنبال طراحی سیستمی هستند که رفتار خروجی سیستم به صورت خودکار از رفتار مطلوبی پیروی کند. در بسیاری از سیستم‌ها و فرآیندهای صنعتی خروجی سیستم می‌بایست بر روی مقدار مطلوب ثابتی تنظیم شود. مثال‌هایی نظیر کنترل درجه حرارت یک اتاق، ثابت نگهداشتن فرکانس برق تولیدی در یک نیروگاه، کنترل ضخامت کاغذ تولیدی در یک کارخانه مطابق استاندارد و تنظیم درجه حرارت بدن انسان بر روی مقدار مطلوب ۳۷ درجه، نمونه‌هایی از این نوع کاربرد می‌باشند. این هدف کنترلی را تنظیم^۱ و سیستم‌های کنترلی که این هدف را پیگیری می‌نمایند، تنظیم‌کننده می‌نامند. از سوی دیگر در برخی دیگر از کاربردهای کنترلی خروجی سیستم می‌بایست رفتار مطلوب تابعی از زمان را ردیابی نماید. مثال‌هایی نظیر یک رادار ردیاب، جستجوگر یک هواپیما، کنترل پروفیل حرارتی خاص در یک کوره در فرایند تنش زدایی فولاد و یا کنترل حرکت یک بازوی رباتیک از این دسته می‌باشند. این هدف کنترلی را ردیابی^۲ می‌نامند. روشن است که رسیدن به اهداف ردیابی نسبت به اهداف تنظیم چالش برانگیزتر است. چرا که رفتار مطلوب خروجی سیستم در حالت ردیابی با زمان تغییر می‌کند. اما به لحاظ ریاضی با تعریف متغیر خطا بر مبنای اختلاف مقدار واقعی خروجی از مقدار مطلوب، و هدف قرار دادن کاهش خطا تا حد ممکن می‌توان این دو هدف را به فرم ریاضی به صورت مشابهی تعبیر نمود [۷۳].

با اینکه عمومی‌ترین و مهمترین هدفی که در سیستم‌های کنترل خودکار دنبال می‌شود تنظیم یا ردیابی است، اما این هدف بایستی در کنار اهداف مهم دیگری تعقیب گردد. پایداری سیستم کنترلی یکی دیگر از اهداف مهم به شمار می‌رود. در صورتی که پایداری یک سیستم کنترل تضعیف شود اندازه خروجی‌های سیستم یا متغیرهای تاثیر گذار دیگر در سیستم به شدت رشد خواهد نمود و طبیعی است که در این حالت رسیدن به ردیابی مناسب امکان پذیر نخواهد بود. پایداری در سیستم‌های کنترلی از ردیابی نیز مهم‌تر است و به عنوان شرط لازم در طراحی مد نظر قرار می‌گیرد. چرا که ناپایداری تهدیدی برای سلامت سیستم و کاربرانی که با آن تعامل دارند محسوب می‌شود.

در کنار اهداف پایداری و ردیابی در سیستم‌ها، اهداف دیگری نیز مد نظر قرار می‌گیرند. با توجه به اینکه در بسیاری از سیستم‌های کنترلی از ساختار پسخورد واحد مطابق شکل ۱.۱ استفاده می‌شود، و این ساختار مبنای طراحی کنترل در این کتاب نیز می‌باشد، در ابتدا اهمیت این ساختار را برای رسیدن به اهداف چندگانه در سیستم‌های کنترلی ارزیابی می‌نماییم. همانگونه که در این شکل ملاحظه می‌شود، در حالت کلی سیگنال خروجی سیستم $y(t)$ می‌بایست ورودی مطلوب در سیستم را ردیابی نماید. این ردیابی توسط سیگنال خطا که به صورت $e(t) = r(t) - y(t)$ تعریف می‌شود قابل توصیف بوده، که در هر دو حالت تنظیم یا ردیابی، سیگنال خطا بایستی کوچک گردد. اما در سیستم‌های واقعی مشکلات و محدودیت‌های دیگری نیز وجود دارد که بایستی مورد توجه قرار گیرد. اغتشاش $d(t)$ از دیگر ورودی‌هایی است که به سیستم وارد شده و اغلب کارایی سیستم کنترل را تهدید می‌نماید. از طرف دیگر هیچگاه اندازه‌گیری خروجی سیستم بی‌نقص نبوده و نویز اندازه‌گیری $n(t)$ مشاهده خروجی‌های سیستم را دچار اختلال می‌نماید. محدودیت دیگر در سیستم معمولاً در اعمال فرامین کنترلی $u(t)$ بروز می‌نماید. این فرامین می‌بایست توسط محرک‌های سیستم اجرا شوند و محرک‌ها غالباً از لحاظ اشباع دامنه و پهنای باند کارایی دارای محدودیت می‌باشند.

^۱Regulation^۲Tracking



شکل ۱.۱ نمودار بلوکی از یک مساله‌ی کنترلی.

محدودیت‌ها و مطلوبیت‌های دیگری نیز در سیستم‌های کنترل جلوه می‌نمایند، که یکی از مهمترین آنها را در غالب نیاز به قوام در رفتار سیستم می‌توان بیان نمود. همانگونه که در شکل ۱.۱ ملاحظه می‌شود، به منظور طراحی سیستم کنترل معمولاً از یک مدل ریاضی سیستم که رفتار ورودی-خروجی سیستم را به صورت ریاضی بیان می‌کند، استفاده می‌شود. روش‌های کنترل خطی بر مبنای نمایش سیستم با مدل‌های حتمی و آسوار است. این بررسی‌ها بر مبنای مدل‌های غیرخطی بر اساس مدل‌های غیرخطی طراحی می‌شوند. اگر توجه خود را به سیستم‌های خطی معطوف سازیم، نحوه مدل‌سازی سیستم در فضای فرکانسی و استفاده از تابع تبدیل منجر به طراحی کنترل‌کننده کلاسیک در حوزه فرکانس خواهد شد. این در حالی است که اگر سیستم را در حوزه زمان و با نمایش فضای حالت مدل‌سازی نماییم، طبیعی است به منظور طراحی کنترل‌کننده از روش‌های توسعه یافته در حوزه کنترل مدرن بهره برداری شود. ولی در هر صورت و با هر دقتی که مدلی ریاضی از سیستم مورد نظر تهیه شود، این مدل تنها بخشی از رفتار سیستم را می‌تواند تعبیر نماید از بیان دقیق کلیه دینامیک‌های سیستم عاجز است. اهمیت این عدم دقت وقتی بیشتر روشن می‌شود که توجه نمایید کنترل‌کننده طراحی شده بر اساس مدل، لازم است بر روی سیستم واقعی و نه بر روی مدل پیاده‌سازی شود. لذا این اختلاف مدل با واقعیت هر چند کوچک تأثیر خود را در کارایی سیستم و حتی گاهی در پایداری سیستم نشان می‌دهد.

برای بررسی این موضوع می‌توان معیار عدم حساسیت رفتار سیستم به خطای مدل‌سازی را نیز در نظر گرفت. بدین ترتیب لازم است در ابتدا علاوه بر ارائه مدل سیستم به نوعی عدم دقت آن را نیز تعبیر نمود. مدل‌سازی در سیستم‌های صنعتی معمولاً بر اساس روشهایی همچون استفاده از قوانین فیزیکی حاکم، مدل‌سازی تجربی، روشهای مختلف شناسایی و غیره صورت می‌پذیرد. در همه این روش‌ها مدل‌سازی کلیه دینامیک‌های سیستم مد نظر نبوده و با توجه به نیاز، تنها بخش اصلی از دینامیک‌های سیستم مدل‌سازی می‌شود. بدین ترتیب مدل سیستم تنها می‌تواند بیانی تخمینی از رفتار دینامیکی واقعی سیستم‌ها باشد. به اختلاف مدل از واقعیت «عدم قطعیت»^۱ یا «نامعینی» در مدل‌سازی می‌گویند. نامعینی مدل بیانگر اختلاف رفتار سیستم واقعی با مقدار نامی آن بوده و به صورت‌های مختلف قابل تعبیر است. اگر از روش‌های مدل‌سازی خطی در تعبیر نامعینی استفاده نماییم، امکان بررسی عدم حساسیت رفتار سیستم به این نوع نامعینی در فضای کنترل خطی بوجود خواهد آمد و از روشهای کنترل خطی به منظور مقابله با نامعینی مدل می‌توان بهره جست. اگر تعبیر نامعینی در فضای مدل‌سازی غیرخطی سیستم‌ها صورت گیرد، آنگاه می‌توان از روش‌های غیرخطی به منظور طراحی کنترل‌کننده غیر حساس به خطاهای مدل‌سازی استفاده نمود.

^۱Uncertainty

قوام خصوصیتی است که در سیستم‌ها با توجه به نوع نامعینی مورد بررسی قرار می‌گیرد. قوام ویژگی مستقلی همانند پایداری یا کارایی در سیستم‌ها نبوده بلکه صفتی است که می‌تواند به این ویژگی‌ها اضافه شود. در ادبیات کنترل هرگاه سخن از پایداری به میان می‌آید، منظور پایداری سیستم تنها با در نظر گرفتن مدل نامی سیستم است. اما اگر پایداری مقاوم را بخواهیم بررسی نماییم لازم است نه تنها سیستم نشان داده شده در شکل ۱.۱ به ازای مدل نامی پایدار باشد، بلکه ضروری است رفتار سیستم حلقه بسته به ازای بزرگترین میزان نامعینی نیز پایدار بماند. بدین ترتیب اگر تعبیر صحیحی از نامعینی سیستم واقعی انجام پذیرد، اطمینان خواهیم داشت که کنترل‌کننده طراحی شده در عمل نیز سیستم را پایدار می‌سازد. به همین ترتیب می‌توان خصوصیت ردیابی، تضعیف اغتشاش، حذف اختلال یا سایر خصوصیت‌های مبین کارایی سیستم را با صفت قوام تقویت نمود. بنابراین کارایی مقاوم در سیستم‌هایی بررسی می‌شود که اثر بیشینه نامعینی در کارایی سیستم حلقه بسته مورد تجزیه تحلیل قرار گیرد.

بررسی اثر نامعینی مدل‌سازی در رفتار سیستم به دو شکل کلی قابل ارزیابی است. اگر سیستم حلقه بسته‌ای وجود داشته باشد که کنترل‌کننده‌ی معینی برای آن طراحی شده‌است، می‌توان خصوصیات پایداری مقاوم یا کارایی مقاوم را برای آن بررسی نمود. در این حالت با ابزارهایی که برخی از آنها در این کتاب معرفی خواهد شد، اگر اطمینان یابیم که شرایط پایداری سیستم به ازای بیشینه نامعینی ارضاء می‌شود، آنگاه تحلیل پایداری مقاوم در سیستم به انجام رسیده است. همچنین اگر این بررسی در مورد کارایی سیستم به ازای بیشینه نامعینی صورت پذیرد، تحلیل کارایی مقاوم سیستم صورت پذیرفته است. در مرحله تحلیل قوام^۱ به این سوال می‌توان پاسخ گفت که آیا ویژگی مورد نظر در سیستم حلقه بسته با وجود نامعینی در مدل‌سازی باقی خواهد ماند. اگر نتیجه تحلیل منفی باشد راهکاری برای تصحیح کنترل-کننده ارائه نمی‌شود.

طراحی مقاوم^۲ در اصطلاح به روش‌های طراحی کنترل‌کننده‌ای اطلاق می‌شود که در فرآیند طراحی اطلاعات مربوط به نامعینی در مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفته باشد، تا اطمینان حاصل شود که ویژگی پایداری مقاوم یا کارایی مقاوم در آن بدست آید. به کنترل‌کننده‌هایی که بدین صورت طراحی می‌شوند در اصطلاح کنترل‌کننده مقاوم گفته می‌شود. این بدان معنی نیست که سایر کنترل‌کننده‌هایی که به وفور در صنعت استفاده می‌شوند و خصوصیت قوام را در عمل از خود نشان می‌دهند، مقاوم نیستند. اما در ادبیات کنترل اگر در طراحی این کنترل‌کننده‌ها از اطلاعات مربوط به نامعینی در مدل‌سازی بهره برداری نشود، آنها را جزء کنترل‌کننده‌های مقاوم دسته‌بندی نمی‌کنند.

همانگونه که بیان گردید روش‌های متنوعی برای مدل‌سازی سیستم و تعبیر نامعینی به کار گرفته می‌شود. در این کتاب به منظور توسعه نظریه پایه، خود را محدود به مدل‌سازی و تعبیر نامعینی در فضای خطی می‌نماییم. بدین ترتیب از ارائه روش‌های مختلف طراحی کنترل‌کننده‌های غیر خطی مقاوم اجتناب می‌نماییم. در سالیهای اخیر این نوع کنترل‌کننده‌ها با استفاده از روش‌های مبتنی بر تئوری لیاپانوف توسعه بسیاری یافته‌اند و مورد استفاده وسیع قرار می‌گیرند. اما دیدگاه طراحی کنترل‌کننده‌های غیرخطی مقاوم مقدمات دیگری را می‌طلبد که مجال بیان آن در این کتاب وجود ندارد. این بدان معنا نیست که خواننده از طراحی کنترل‌کننده مقاومی که برای سیستم‌های غیر خطی مورد استفاده قرار گیرد محروم خواهد شد. چرا که در حالت‌هایی که شرح آن در ادامه کتاب خواهد آمد، اگر بتوان رفتار غیر خطی سیستمی را با

^۱Robust Analysis^۲Robust Synthesis

مدلی خطی از آن و تعبیر مناسبی از نامعینی با کران بیشینه محدود بیان نمود، روشهای مورد بحث در این کتاب می‌تواند به خوبی پاسخگوی طراحی کنترل‌کننده مقاوم برای این دسته از سیستمهای غیر خطی نیز باشد.

در فضای کنترل خطی و روشهای مدل‌سازی آن نیز نامعینی را به صورت‌های مختلف می‌توان تعبیر نمود و متناسب با گونه‌های این تعبیر، ابزارهای متفاوتی برای تحلیل و طراحی مقاوم آن توسعه یافته است. در ساده‌ترین حالت مدلی خطی از سیستم را در نظر بگیرید که به صورت تابع تبدیل نمایش داده شده است. اگر تنها پارامترهای مدل که در عمل ضرایب صورت یا مخرج توابع تبدیل سیستم هستند نامعین باشند، این نوع نامعینی از نوع ساختاریافته^۱ یا پارامتریک بوده و روش‌های گوناگونی در طراحی کنترل‌کننده مقاوم آن توسعه یافته است. این روش‌ها که به اختصار در بخش قبل به آنها اشاره شد، شامل روش‌های خواریتانوف و روش‌های مبتنی بر سنتز μ و غیره می‌باشند. نوع دیگر نامعینی علاوه بر عدم دقت در پارامترهای سیستم، دینامیک‌های مدل نشده در سیستم را نیز شامل می‌شود. این نوع عدم قطعیت که گستره بزرگ‌تری از نامعینی‌های واقعی را در بر می‌گیرد با عنوان نامعینی بدون ساختار^۲ شناخته شده و روش‌های متنوع دیگری برای مواجهه با آنها توسعه یافته است. این روش‌ها که به اختصار در بخش قبل به آنها اشاره شد شامل روشهای QFT و روشی بر اساس نرم‌مقیاس‌های نامعینی^۳ می‌باشند. این کتاب‌ها به ترتیب نام بر نهایت سیستم‌ها H_∞ و همچنین روشهای مبتنی بر سنتز μ به تفصیل بیان خواهد شد.

۲.۱ تابع تبدیل حساسیت

در این بخش می‌خواهیم با مروری بر کنترل کلاسیک اهمیت ساختار پسخورد را در طراحی چند هدفه سیستم‌های کنترل بیان داریم. بدین منظور ساختار پسخورد واحد نشان داده شده در شکل ۱.۱ را مجدداً به یاد آورید و اهداف چندگانه سیستم‌های کنترل را که توسط طراحی مناسب کنترل‌کننده بایستی تأمین شود را به صورت لیست خلاصه زیر در نظر بگیرید [۶۰]:

- ۱- پایداری
- ۲- کوچک‌بودن خطای ردیابی
- ۳- تضعیف اغتشاش^۴
- ۴- کاهش اثر نویز^۵
- ۵- عدم حساسیت به خطاهای مدل‌سازی در سیستم

در کنترل کلاسیک تابع تبدیل بهره حلقه $L(s) = C(s) \cdot P(s)$ مبنای طراحی سیستم‌های کنترلی براساس روش‌هایی همانند مکان هندسی ریشه‌ها، روش نایکویست و نیکولز می‌باشد. این در حالی است که در کنترل مقاوم معمولاً تابع تبدیل حساسیت^۵ $S(s)$ ، مبنای طراحی قرار می‌گیرد. برای اینکه دلیل آنرا بهتر بتوان تعبیر نمود، تعاریف زیر را برای تابع حساسیت $S(s)$ و تابع متمم حساسیت $T(s)$ در نظر بگیرید:

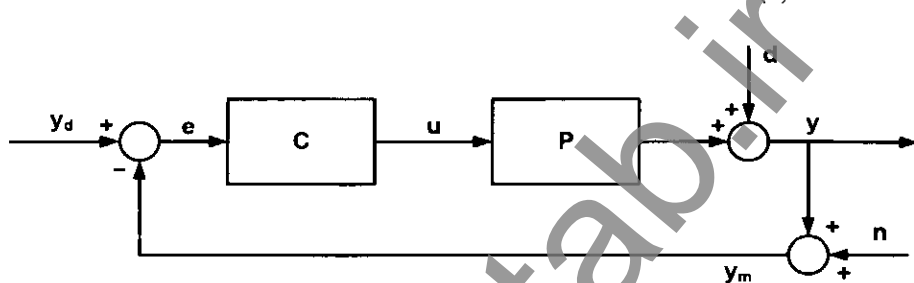
¹ Structured Uncertainty
² Unstructured Uncertainty
³ Disturbance Attenuation
⁴ Noise Reduction
⁵ Sensitivity Function

$$S(s) = \frac{1}{1 + C(s)P(s)} \quad (۱.۱)$$

و تابع متمم حساسیت برابر است با:

$$T(s) = \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)P(s)} \quad (۲.۱)$$

بدین ترتیب $S(s) + T(s) = 1$



شکل ۲.۱ حلقه‌ی طراحی کنترل‌کننده‌ی پس‌خورد.

حال همانند کنترل کلاسیک، با تعریف متغیرهای مختلف سیستم در شکل ۲.۱ تابع تبدیل حلقه بسته سیستم را برای خروجی y و خطای e به ورودی‌های سیستم y_d ، d و n تعیین می‌کنیم. به راحتی می‌توان نشان داد:

$$y(s) = \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)P(s)} y_d(s) + \frac{1}{1 + C(s)P(s)} d(s) - \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)P(s)} n(s) \quad (۳.۱)$$

و

$$e(s) = y_d(s) - y(s) = \frac{1}{1 + C(s)P(s)} y_d(s) - \frac{1}{1 + C(s)P(s)} d(s) + \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)P(s)} n(s) \quad (۴.۱)$$

بر مبنای تعاریف ارائه شده برای توابع حساسیت و متمم آن، رابطه سیستم حلقه بسته به شکل زیر خلاصه می‌شود:

$$y(s) = T(s)y_d(s) + S(s)d(s) - T(s)n(s) \quad (۵.۱)$$

$$e(s) = S(s)y_d(s) - S(s)d(s) + T(s)n(s) \quad (۶.۱)$$

اما چرا به تابع $S(s)$ ، تابع حساسیت اطلاق می‌شود و اهمیت آن در طراحی کنترل‌کننده مقاوم در چیست؟ اجازه دهید با توجه به مفهومی که از تابع حساسیت استنباط می‌شود حساسیت رفتار خروجی را نسبت به تغییرات مدل به صورت ریاضی تعبیر نماییم. بدین منظور اگر رفتار مورد نظر سیستم را در تابع تبدیل حلقه بسته $M(s) = y(s)/y_d(s)$

جستجو کنیم، آنگاه تابع حساسیت به نسبت انحراف نرمالیزه $M(s)$ به ازای انحراف نرمالیزه مدل سیستم $P(s)$ می‌تواند تعبیر شود. بدین ترتیب می‌توان نوشت:

$$S_M^P = \frac{\partial M / M}{\partial P / P} = \frac{\partial M}{\partial P} \cdot \frac{P}{M} \quad (7.1)$$

حال در یک سیستم کنترل با ساختار پسخورد واحد نشان داده شده در شکل ۲.۱ می‌دانیم:

$$M(s) = \frac{y(s)}{y_d(s)} = \frac{P(s)C(s)}{1+P(s)C(s)} \quad (8.1)$$

بنابراین تابع حساسیت سیستم برابر خواهد بود با:

$$S_M^P = \frac{C(s)(1+P(s)C(s)) - C(s)P(s)C(s)}{(1+P(s)C(s))^2} \cdot \frac{P(s)(1+P(s)C(s))}{P(s)C(s)} \quad (9.1)$$

$$S_M^P = \frac{C(s)(1+P(s)C(s))}{C(s)(1+P(s)C(s))^2} = \frac{1}{1+P(s)C(s)} = S(s) \quad (10.1)$$

در نتیجه تعبیر فیزیکی تابع حساسیت به تعریف ارائه شده در معادله (۱۰.۱) منجر خواهد شد. توجه کنید که این امر به واسطه در نظر گرفتن ساختار پسخورد حاصل می‌شود و در ساختارهای دیگر کنترلی نظیر ساختار حلقه باز^۱، مدار پیشرو^۲ و غیره این رابطه برقرار نیست.

حال طراحی چند هدفه سیستم کنترل را به یاد آورید و معیارهای دوم، سوم و پنجم طراحی شامل کوچک‌بودن خطای ردیابی، تضعیف اغتشاش و عدم حساسیت به خطاهای مدل‌سازی در سیستم را در نظر بگیرید. رابطه خطای ردیابی با ورودی مرجع y_d و اغتشاش d در معادله (۶.۱) آورده شده‌است. ملاحظه می‌شود که در صورت اختیار نمودن ساختار پسخورد واحد، معیارهای کاهش خطای ردیابی (معیار دوم)، تضعیف اغتشاش (معیار سوم) و ایجاد ویژگی قوام (معیار پنجم) به کوچک بودن تابع حساسیت $S(s)$ در پهنای باند سیستم مرتبط می‌شوند. این در حالی است که مطابق معادله (۶.۱) کاهش اثر نویز (معیار چهارم) به جای ارتباط مستقیم با $S(s)$ به تابع متمم حساسیت^۳ $T(s)$ مرتبط می‌شوند. خوشبختانه اگر طراحی در فضای فرکانسی صورت گیرد، با توجه به اینکه معمولاً محتوای فرکانسی نویز اندازه‌گیری در فرکانس‌های بزرگ خودنمایی می‌کند، می‌توان با کمینه‌سازی توابع حساسیت در فرکانس‌های کمتر از پهنای باند سیستم و کمینه‌سازی تابع متمم حساسیت در فرکانس‌های مافوق آن، به صورت همزمان این اهداف کنترلی را ارضاء نمود. بدین دلیل غالباً در روش‌های کنترل مقاوم با تبدیل مسئله طراحی چند هدفه سیستم کنترل به بهینه‌سازی همزمان توابع

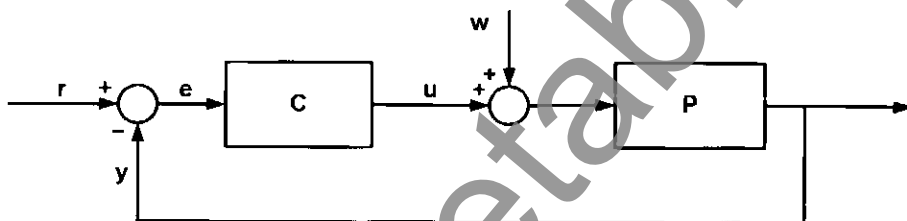
^۱Open Loop

^۲Feed Forward

^۳Complementary Sensitivity Function

حساسیت و متمم آن، کنترل‌کننده‌های بهینه مقاوم قابل طراحی خواهند بود. تعبیر دقیق این موضوع در ادامه فصول این کتاب به صورت ریاضی ارائه خواهد شد.

تاکنون معیارهای مختلف طراحی را به توابع حساسیت و متمم آن مرتبط نموده‌ایم. اما ارتباط ویژگی بسیار مهم و حیاتی سیستم یعنی پایداری با این توابع چگونه است. برای اینکه تعبیر مناسبی از این ارتباط ارائه نماییم، توابع تبدیلی که در پایداری داخلی سیستم بایستی مورد ارزیابی قرار گیرند را بررسی می‌نماییم. پایداری داخلی مفهومی فراتر از پایداری ورودی-خروجی در سیستم‌های کنترل کلاسیک دارد و معمولاً این نوع پایداری در طراحی سیستم‌های کنترل مورد توجه قرار می‌گیرد. سیستمی دارای پایداری داخلی است که کلیه مدهای دینامیکی آن پایدار بمانند. بدین ترتیب در سیستمی که پایدار داخلی است نه تنها بایستی با اعمال ورودی‌های محدود، خروجی سیستم محدود بماند، بلکه بایستی تمام سیگنال‌های تشکیل دهنده سیستم اصلی اعم از خروجی سیستم یا سیگنال‌های داخلی آن، به ازای اعمال هر نوع ورودی محدود، اعم از ورودی‌های واقعی یا هر نوع ورودی‌های محتمل دیگر، محدود بمانند.



شکل ۳.۱ حلقه‌ی طراحی کنترل‌کننده پسخورد.

بر این اساس می‌توان نشان داد، سیستم حلقه بسته نشان داده شده در شکل ۳.۱ پایدار داخلی است اگر سیستم نشان داده شده در شکل ۳.۱ با دو ورودی r و w و دو خروجی y و u پایدار بماند. این ورودی‌ها و خروجی‌ها تمامی سیگنال‌های محتمل سیستم را پوشش می‌دهند. حال رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌ها را به صورت زیر تعیین می‌کنیم.

$$y(s) = \frac{C(s)P(s)}{1+C(s)P(s)}r(s) + \frac{P(s)}{1+C(s)P(s)}w(s) \quad (11.1)$$

$$= T(s)r(s) + P(s)S(s)w(s)$$

$$u(s) = \frac{C(s)}{1+C(s)P(s)}r(s) + \frac{-C(s)P(s)}{1+C(s)P(s)}w(s) \quad (12.1)$$

$$= P^{-1}(s)T(s)y(s) - T(s)w(s)$$

بدین ترتیب رابطه بین دو ورودی و دو خروجی با ماتریس تبدیل زیر بیان می‌شود.

$$\begin{bmatrix} y(s) \\ u(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T(s) & P(s)S(s) \\ P^{-1}(s)T(s) & -T(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r(s) \\ w(s) \end{bmatrix} \quad (13.1)$$

به منظور تضمین پایداری داخلی سیستم لازم است کلیه عناصر ماتریس تبدیل فوق پایدار باشند. به عبارت دیگر بایستی کنترل کننده $C(s)$ به گونه‌ای طراحی شود که توابع تبدیل $T(s)$ ، $P(s)S(s)$ و $P^{-1}(s)T(s)$ پایدار باشند. در این حالت پایداری به صورت شروطی بر پایداری تابع حساسیت و متمم آن تعبیر می‌شود. حال اگر سیستم اصلی $P(s)$ خود پایدار و کمینه‌فاز باشد (کلیه قطب‌ها و صفرها در نیم صفحه باز سمت چپ قرار گیرند) پایداری داخلی سیستم با پایدار سازی تابع تبدیل حلقه بسته سیستم $T(s)$ تضمین می‌شود. در صورتی که سیستم اصلی $P(s)$ ناپایدار باشد، به منظور ارضاء شرط دوم لازم است که $S(s)$ دارای صفری مشابه در صورت خود باشد. دقت کنید که این موضوع به معنای حذف قطب ناپایدار با صفر کنترل کننده نبوده زیرا این امر پایداری داخلی را مخدوش می‌سازد. با این حال در صورتی که شرایط پایداری را بر روی توابع حساسیت و متمم آن قرار دهیم، تعبیر آن حذف قطب ناپایدار با صفر تابع حساسیت و نه صفر کنترل کننده همزه خواهد بود. حال اگر سیستم اصلی $P(s)$ کمینه‌فاز نباشد، به منظور ارضاء شرط سوم لازم است که $T(s)$ دارای صفری مشابه در صورت خود باشد. این موارد را شرایط درونیابی^۱ می‌نامند، که در حالت عدم می‌توان به صورت زیر بیان می‌شود:

اگر $P(s)$ در حالت کلی دارای قطب ناپایدار p_0 ($\operatorname{Re}(p_0) \geq 0$) با تکرار m و صفر غیر متمم z_0 ($\operatorname{Re}(z_0) \geq 0$) با تکرار n باشد، آنگاه شرایط درونیابی برای پایداری $P(s)S(s)$ (شرط دوم) برابر است با:

$$\begin{cases} S(p_0) = \frac{dS(p_0)}{ds} = \dots = \frac{d^{m-1}S(p_0)}{ds^{m-1}} = 0 \\ T(p_0) = 1; \quad \frac{dT(p_0)}{ds} = \dots = \frac{d^{n-1}T(p_0)}{ds^{n-1}} = 0 \end{cases} \quad (14.1)$$

و شرط درونیابی برای پایداری $P^{-1}(s)T(s)$ (شرط سوم) برابر است با:

$$\begin{cases} T(z_0) = \frac{dT(z_0)}{ds} = \dots = \frac{d^{n-1}T(z_0)}{ds^{n-1}} = 0 \\ S(z_0) = 1; \quad \frac{dS(z_0)}{ds} = \dots = \frac{d^{m-1}S(z_0)}{ds^{m-1}} = 0 \end{cases} \quad (15.1)$$

شرایط درونیابی به تنهایی محدودیت زیادی را در طراحی کنترل کننده مقاوم ایجاد نمی‌کنند. اما اگر معیارهای طراحی نظیر ردیابی، تضعیف اغتشاش، کاهش اثر نویز و از همه مهمتر عدم حساسیت به خطای مدل سازی را در کنار نیاز به پایداری داخلی در نظر بگیریم، روشن می‌شود که چگونه طراحی کنترل کننده بهینه را پیچیده می‌سازد.

همانگونه که قبلاً بیان شد لازم است تابع حساسیت در پهنای باند سیستم تا حد ممکن کوچک شود. این در حالی است که برای سیستم‌های غیر کمینه فاز ارضاء شرایط درونیابی الزام می‌کند که $S(z_0) = 1$. این بدان معناست که مقدار تابع حساسیت در فرکانس‌های نزدیک z_0 نه تنها نمی‌تواند به اندازه کافی کوچک شود، بلکه لازمست در این فرکانس دقیقاً مساوی یک گردد. این شرطی است که سرپیچی از آن پایداری سیستم را بر هم می‌زند و به هیچ وجه نمی‌توان آن را

¹Interpolation Condition

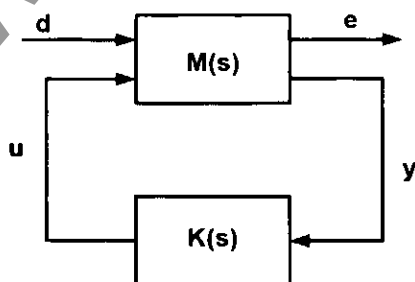
نادیده گرفت. لذا در این نوع سیستم‌ها پهنای باند ردیابی سیستم به شدت کاهش یافته، اثر اغتشاش بیشتر خودنمایی نموده و از همه مهمتر حساسیت به خطای مدل‌سازی در حوالی فرکانس Z_0 صد در صد خواهد شد. لزوم ارضاء شرایط درونیایی مسئله بهینه‌سازی توابع حساسیت و متمم حساسیت را مقید نموده، حل آن را دشوار و در مواردی غیر ممکن می‌نماید. تفسیر بیشتر این محدودیت‌ها به صورت دقیق در فصل ششم کتاب بیان خواهد شد.

۳.۱ مسئله عمومی تنظیم

در ادامه این فصل یک تعبیر عمومی از طراحی کنترل‌کننده مقاوم در قالب مسئله بهینه‌سازی مقید پرداخته می‌شود. بدین منظور در ابتدا فرض نماییم سیستم بدون عدم قطعیت در نظر گرفته شود. حال می‌توان مسائل مختلف کنترلی با توجه به اهداف تشریح شده در بخش قبل را به صورت کلی مسئله عمومی تنظیم تعبیر نمود. در این حالت اهداف سیستم کنترلی و اجزای دیگر سیستم را می‌توان به فرم نشان داده شده در شکل ۴.۱ نمایش داد. در این نمایش سیستم تعمیم یافته^۱ $M(s)$ ، تعبیری از سیستم و اجزای آن است که دارای ورودی و خروجی‌های چند متغیره زیر است.

- ورودی‌های برونی^۲ $u(s)$: این نوع ورودی‌ها قابل کنترل نبوده و از جنس اغتشاش، نویز، مسیر مطلوب ردیابی و غیره می‌باشند.
- ورودی‌های کنترلی $u(s)$: این ورودی‌ها تلاش کنترلی را می‌سازند که توسط کنترل‌کننده ایجاد می‌شود.
- خروجی‌های تنظیم‌شونده $e(s)$: این نوع خروجی از معیارهای بهینه‌سازی مقید سیستم استخراج شده که می‌بایست تا حد امکان کوچک گردند.
- خروجی‌های اندازه‌گیری شده $y(s)$: از این خروجی در مسیر پس‌خورده استفاده می‌شود.

و $K(s)$ کنترل‌کننده مورد نظر در ساختار پس‌خورده است. علت اینکه بسیاری از مسائل مختلف کنترلی را می‌توان در این ساختار عمومی تعبیر نمود در تعبیر دقیق خروجی‌های تنظیم‌شونده $e(s)$ ، نهفته است. دقت کنید که برخلاف مدل‌سازی معمول که در آن تنها خروجی اصلی سیستم $y(s)$ مورد اندازه‌گیری قرار گرفته و در پس‌خورده استفاده می‌شوند،



شکل ۴.۱ مسئله‌ی عمومی تنظیم.

¹ Generalized Plant

² Exogenous Inputs

در مسئله عمومی تنظیم، خروجی‌های دیگری نیز مد نظر قرار می‌گیرند که از خواستگاه بهینه‌سازی چند هدفه در سیستم کنترل در این نمایش اضافه شده‌اند. به عنوان مثال اگر ردیابی هدف اصلی سیستم در نظر گرفته شود، خطای ردیابی $e_1 = y_d - y$ ، به عنوان اولین مولفه بردار خروجی تنظیم شونده در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب با کمینه نمودن اندازه این بردار و نزدیک نمودن آن به مقدار صفر، هدف ردیابی در سیستم تضمین می‌شود. این تعبیر ریاضی سبب می‌شود اهداف ردیابی نیز به صورت تنظیم خطا به مقدار مطلوب صفر نمایش داده شود. حال اگر بتوان اهداف دیگر مورد نظر در طراحی بهینه را به صورت مولفه‌های دیگر این بردار در نظر گرفت و روشی ارائه نمود که اندازه این بردار به مقدار صفر تنظیم شود، مصالحه مناسبی بین اهداف مختلف کنترلی در مسئله عمومی تنظیم مورد بهینه‌سازی قرار خواهد گرفت. بدین ترتیب می‌توان کلیه اهداف کنترلی را به صورت مسئله زیر تعبیر نمود:

صورت مساله: با فرض اینکه تابع تبدیل تعمیم یافته $M(s)$ ، داده شده است تنظیم کننده $K(s)$ ، را به گونه‌ای طراحی کنید که:

۱- سیستم حلقه بسته پایدار داخلی شود و

۲- بردار خروجی تنظیم $e(t)$ ، به ازای ورودی‌های برون‌سیستم $d(t)$ "کوچک" گردد.

برای اینکه این اهداف را به صورت ریاضی تعبیر نماییم لازم است تعاریفی در خصوص اندازه سیگنال‌ها ارائه نماییم تا بتوان کوچک بودن در آنها را به صورت کمی مورد ارزیابی قرار داد. این موضوع به صورت کامل در فصل دوم کتاب تعقیب خواهد شد، اما در اینجا به منظور تعقیب مسئله نمونه‌ای از تعریف نرم سیگنال را که می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، ارائه می‌نماییم. نرم دو یک سیگنال به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\|e\|_2 = \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \sum_{i=1}^n |e_i(t)|^2 dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (16.1)$$

اهمیت استفاده از نرم دو در آن است که این تعریف منطبق با مفهوم فیزیکی انرژی سیگنال می‌باشد. علاوه بر آن می‌توان نرم دو را در فضای زمانی و فرکانسی به صورت مشابه بدست آورد. طبق قضیه پارسوال^۱ نرم سیگنال در فضای فرکانسی نیز به صورت مشابه و به فرم زیر بیان می‌گردد:

$$\|e\|_2 = \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \sum_{i=1}^n |e(j\omega)|^2 d\omega \right]^{\frac{1}{2}} \quad (17.1)$$

حال معیار دوم کنترل می‌تواند به صورت کمی زیر بیان شود:

نرم دوم سیگنال خطا $\|e\|_2$ به ازای دسته‌ای از ورودی‌های برون محدود $d(s)$ ، باید کمینه گردد.

توجه نمایید که با توجه به خصوصیت خطی سیستم، دامنه خروجی خطا و به تبع آن نرم دوم سیگنال خطا $\|e\|_2$ وابسته به دامنه ورودی d است. لذا به منظور انجام بهینه‌سازی موثر لازم است نرم سیگنال خروجی را بر حسب نرم

^۱Parseval Theorem

سیگنال‌های برون $\|d\|_2$ نرمالیزه نماییم. بدین منظور مجموعه‌ی $\{d(s) \in l_2 : \|d\|_2 \leq 1\}$ را در نظر گرفته و اهداف کنترلی را به صورت زیر تعبیر نماییم.

صورت مساله: با فرض اینکه تابع تبدیل تعمیم یافته $M(s)$ ، داده شده است تنظیم کننده $K(s)$ ، را به گونه‌ای طراحی کنید که

۱- سیستم حلقه بسته پایدار داخلی شود و

۲- بیشینه نرم دوم سیگنال خطای نرمالیزه شده، کمینه گردد.

این هدف به صورت ریاضی به صورت مسئله بهینه‌سازی زیر تعبیر می‌شود.

$$\min_{K(s)} \sup_{d \in D(s)} \|e\|_2 \quad (18.1)$$

در اینجا نرم بی‌نهایت سیستم به مسئله بهینه‌سازی فوق ورود پیدا خواهد نمود. بدین منظور تابع تبدیل T_{ed} را که رابطه بین ورودی $d(s)$ ، و خروجی $e(s)$ ، مطابق شکل ۵.۱ معین می‌کند را در نظر بگیرید:

$$e(s) = T_{ed}(s) \cdot d(s) \quad (19.1)$$



شکل ۵.۱ تابع تبدیل سیستم ورودی و خروجی سیستم.

نرم بی‌نهایت یا نرم القایی^۱ سیستم T_{ed} مطابق تعریف برابر است با:

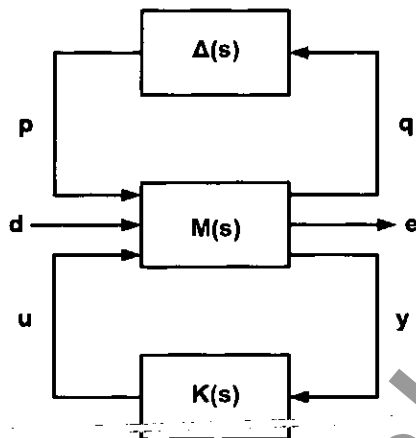
$$\begin{aligned} \|T_{ed}(s)\|_{\infty} &= \sup_{d \in l_2} \frac{\|e(s)\|_2}{\|d(s)\|_2} = \sup_{d \in l_2} \frac{\|T_{ed}(s) \cdot d(s)\|_2}{\|d(s)\|_2} \\ &= \sup_{d \in D(s)} \|e\|_2 \end{aligned} \quad (20.1)$$

این نرم دقیقاً برابر نیاز طراحی در معادله (۱۸.۱) است. بدین ترتیب اهداف طراحی بهینه در سیستم‌های کنترلی در قالب مسئله عمومی تنظیم به شکل زیر خلاصه می‌شود. هدف طراحی در سیستم پیدا نمودن $K(s)$ پایدارسازی است که نرم بی‌نهایت سیستم را کمینه سازد:

$$\text{Find stabilizing } K(s) \quad \ni \quad \min \|T_{ed}(s)\|_{\infty} \quad (21.1)$$

^۱Induced Norm

بدین ترتیب ملاحظه می‌شود که نرم بی‌نهایت سیستم چگونه می‌تواند در بسیاری از کاربردهای طراحی بهینه کنترل-کننده و در قالب مسئله عمومی تنظیم مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۶.۱ مسئله‌ی تنظیم عمومی توسعه داده شده.

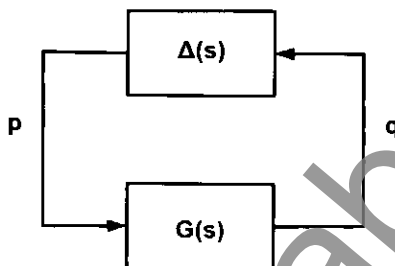
اگرچه استفاده از نرم بی‌نهایت در سیستم‌های بدون نامعینی یک گزینه مناسب در طراحی بهینه محسوب می‌شود، در سیستم‌هایی که دارای نامعینی می‌باشند تنها گزینه به منظور طراحی کنترل‌کننده پایدارساز مقاوم مطرح می‌شود. در فصل سوم روش‌های متنوعی را به منظور بیان نامعینی در مدل‌سازی ارائه می‌شود. در این روش‌ها چگونگی جداسازی بلوک نامعینی Δ از بخش‌های معین و مدل‌سازی شده توسعه یافته و مسئله عمومی تنظیم با وجود نامعینی به فرم نشان داده شده در شکل ۶.۱ تبدیل می‌گردد.

همانگونه که به اختصار در ابتدای این فصل و به تفصیل در فصل چهارم توضیح داده خواهد شد بررسی خصوصیت قوام در پایداری و کارایی سیستم در حضور نامعینی اهمیت می‌یابد. پایداری مقاوم، تنها پایداری سیستم حلقه بسته بر مبنای مدل نامی سیستم نیست، بلکه پایداری سیستم در حضور نامعینی را نیز بایستی تضمین نماید. به منظور تحلیل پایداری مقاوم در سیستم‌ها پایه‌ای‌ترین ابزار توسعه یافته در این خصوص، قضیه «بهره کوچک»^۱ است که توسط زیمنس در سال ۱۹۶۷ ارائه شده است. این قضیه بیان می‌کند که برای یک سیستم دارای نامعینی مطابق با شکل ۷.۱ پایداری مقاوم در صورتی تضمین می‌شود که $G(s)$ پایدار و اکیدا سره بوده و شرط $\|\Delta\|_\infty \cdot \|G(s)\|_\infty < 1$ برقرار باشد. اگر بلوک Δ نیز نرمالیزه گردد $\|\Delta\|_\infty \leq 1$ ، آنگاه در این حالت طراحی کنترل‌کننده پایدارساز مقاوم با تعیین نرم بی‌نهایت تابع تبدیل $G(s)$ ، و کوچک نمودن آن به میزان کمتر از یک تبدیل می‌شود. بایستی توجه داشت که اثبات پایداری مقاوم تنها توسط نرم بی‌نهایت سیستم تضمین می‌شود و هیچ نرم دیگری در این خصوص نمی‌تواند تضمین‌کننده پایداری مقاوم سیستم حلقه بسته باشد. بدین ترتیب می‌توان نیاز به پایداری مقاوم را نیز در مسئله تنظیم عمومی ترکیب نموده و با تعریف سیگنال‌های p و q در ساختار بردارهای e و d ، نرم بی‌نهایت سیستم نتیجه شده را کمینه نمود. در صورتی که نرم این سیستم کمتر از یک باشد:

^۱Small Gain

$$\|T_{ed}(s)\|_{\infty} < 1 \quad (22.1)$$

نه تنها اهداف کارایی سیستم از قبیل ردیابی، تضعیف اغتشاش، کاهش اثر نویز بدست آمده بلکه عدم حساسیت این خصوصیات در حضور نامعینی و پایداری مقاوم سیستم حلقه بسته تضمین می‌گردد. بایستی توجه داشت که در این بهینه‌سازی مصالحه‌ای بین اهداف کارایی و نیاز به پایداری و قوام صورت می‌پذیرد و تنها در حالتی کنترل‌کننده بهینه قابل تعیین است که نامعینی در سیستم بزرگ نباشد. محدودیت‌های حل مسئله بهینه‌سازی اعم از محدودیت‌های جبری و تحلیلی در فصل ششم به تفصیل توضیح داده خواهد شد.



شکل ۷.۱. قضیه بهره کوچک.

۴.۱ ترکیب فصول

در این فصل از کتاب آشنایی عمومی با مفاهیم مورد بحث و تعبیر کلی از مسئله بهینه‌سازی موضوع بحث در این کتاب ارائه شده‌است. با مطالعه این فصل ضرورت ارائه فصول آینده و ترتیب ارائه مطالب روشن خواهد شد. با توجه با اینکه اندازه سیگنال‌ها در مسئله بهینه‌سازی دارای موضوعیت کلیدی است، در ادامه و در فصل دوم به صورت اجمالی ریاضیات مقدماتی کنترل مقاوم H_{∞} مورد توجه قرار می‌گیرد. بدین منظور مفاهیم مقدار و بردار ویژه که در برگرفته‌ی مفهوم پایداری، مشاهده‌پذیری و کنترل‌پذیری سیستم است معرفی می‌گردد و سپس انواع نرم‌ها در سیگنال‌ها و سیستم‌ها مرور تعریف می‌شود. ارتباط بین انواع نرم در سیگنال‌ها و تعبیر نرم القایی سیستم به صورت دقیق در این فصل مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در کلیه فصول و همچنین در این فصل از نرم افزار متلب و ابزارهای آن در محاسبه مفاهیم ارائه شده استفاده خواهد شد.

در فصل سوم به موضوع مدل‌سازی سیستم نامی و تعبیر مناسبی از نامعینی در مدل‌سازی خواهیم پرداخت و روش‌های کلی در مورد شناسایی نامعینی ارائه می‌گردد. در این فصل بر نامعینی ضربی تاکید زیادی خواهد شد زیرا از یک طرف این نوع نامعینی در مسئله‌ی تنظیم عمومی بکار می‌رود. از طرف دیگر این نوع نامعینی، در فیزیک بسیاری از سیستم‌های واقعی قابل تفسیر است. در ادامه‌ی این فصل با توجه به پیچیدگی فرآیند تحلیل و طراحی کنترل‌کننده مقاوم، مدل استاندارد ارائه می‌گردد که با جداسازی هر سه سیستم نامی، نامعینی و کنترل‌کننده از یکدیگر شرایط را به منظور طراحی کنترل‌کننده مقاوم در حضور نامعینی بر مبنای روش مقدار تکیین ساختار یافته فراهم می‌آورد.

در فصل چهارم مفاهیم پایداری و کارایی نامی و همچنین پایداری و کارایی مقاوم شرح داده می‌شود و بر مبنای توابع تبدیل حساسیت و متمم حساسیت معیارهای به منظور تحلیل و طراحی کنترل‌کننده استخراج می‌شود. سپس این مفاهیم به نرم بی‌نهایت و سنتز μ توسعه می‌یابد. در واقع می‌توان گفت در این فصل، معیارهایی ارائه خواهد شد که

متخصصان می‌توانند با آن یک سیستم و کنترل‌کننده‌ی موجود را تجزیه و تحلیل نمایند و تاثیرات نامعینی را بر روی پایداری و کارایی مقاوم سیستم بررسی نمایند.

در فصل پنجم مفاهیم فاکتورهای بهم اول معرفی خواهند شد و تمامی کنترل‌کننده‌های پایدار ساز ممکن برای یک سیستم حلقه بسته تعیین می‌گردد. اهمیت این قضیه نه تنها در تعیین کلیه کنترل‌کننده‌های پایدارساز برای سیستم پس‌خور است بلکه بهینه‌سازی توابع حساسیت و متمم حساسیت را که مبنای طراحی کنترل‌کننده مقاوم در فصل‌های آتی است را به شدت ساده می‌سازد.

در فصل ششم، مجموعه محدودیت‌های جبری و تحلیلی در حل مسئله بهینه‌سازی معرفی خواهند شد. بدین منظور ارتباط بین توابع حساسیت و متمم حساسیت توصیف می‌گردد و قیود موجود در توابع وزنی مربوط به کارایی و نامعینی بیان شده و شرایط درونیابی استخراج می‌گردد. سپس قضیه مهم مقدار بیشینه بیان شده و نتیجه گرفته می‌شود که در طراحی کنترل‌کننده باید به هموارسازی مقدار تکیین بیشینه سیستم حلقه بسته اقدام نمود. سپس قضیه کوشی و فرمول انتگرال کوشی و پواسون مورد بحث قرار گرفته و روابط تحلیلی برای قطب و صفرهای سیستم‌های کمینه فاز و غیر کمینه فاز استخراج می‌شود. همچنین در این فصل مجموعه الگوهای به منظور انتخاب توابع وزنی تقریبی ارائه می‌گردد.

در فصل هفتم مسئله‌ی تنظیم عمومی توصیف می‌گردد و نشان داده می‌شود چگونه می‌توان به منظور دستیابی به پایداری مقاوم و کارایی نامی مسئله‌ی تنظیم عمومی را حل نمود. سپس در ادامه این فصل به حل مسئله تنظیم عمومی به دو روش ریکاتی و LMI در نرم دو و نرم بی‌نهایت پرداخته می‌شود و در قالب چند مثال با استخراج مدل سیستم تممیم یافته به طراحی کنترل‌کننده اقدام می‌شود. فصل هشتم، ادامه فصل هفتم است که در آن مجموعه‌ای از مثال‌های مربوط به مسئله تنظیم عمومی در نظر گرفته می‌شود و به جزئیات مراحل طراحی کنترل‌کننده پرداخته می‌شود. از جمله مباحثی که در این فصل تاکید خواهد شد نحوه‌ی بهبود مشخصات یک کنترل‌کننده بر مبنای توابع وزنی کارایی است. این مفاهیم در قالب چند مساله کمینه فاز و غیر کمینه فاز توصیف می‌گردد. در انتهای هر مساله نیز با شبیه‌سازی سیستم تحت مطالعه، به صحت‌گذاری طراحی انجام شده می‌پردازیم.

در فصل نهم، مفهوم مقادیر تکیین ساختاریافته (μ) معرفی می‌گردد و کنترل‌کننده یک سیستم بر مبنای روش μ ایجاد می‌گردد. در این روش ابتدا تمامی نامعینی‌ها به صورت موهومی در نظر گرفته می‌شوند و بر مبنای الگوریتم تکراری $D-K$ ، کنترل‌کننده طراحی می‌شود. سپس می‌گردد در صورتی که نامعینی‌ها بصورت حقیقی باشند چگونه می‌توان به روش دیسک آنها را به نامعینی موهومی تبدیل نمود. در ادامه الگوریتم $D-G-K$ معرفی می‌گردد. این الگوریتم نسخه‌ی تکامل یافته‌تر الگوریتم $D-K$ است که در مواجه با نامعینی‌ها مطابق با فیزیک آنها برخورد می‌کند. یعنی نامعینی‌های حقیقی و موهومی را جداگانه در نظر می‌گیرد و کنترل‌کننده را ایجاد می‌نماید. در پایان در این فصل نیز آنالیز بدترین نامعینی ارائه می‌گردد و برای مقایسه‌ی دو الگوریتم $D-K$ و $D-G-K$ بکار می‌رود.

اصولاً کنترل‌کننده‌های ایجاد شده در تئوری H_∞ از مرتبه‌ی بالایی برخوردار هستند در فصل دهم، روش‌هایی برای کاهش مرتبه کنترل‌کننده مانند روش برش، روش باقیمانده و روش هنکل ارائه می‌گردد و نشان داده می‌شود برای حذف موده‌های یک سیستم در فرکانس‌های بالا روش برش نتایج مطلوبی در بر دارد. همچنین نشان داده می‌شود که در فرکانس‌های پائین روش باقیمانده نتایج بهتری ارائه می‌دهد. سپس بیان می‌گردد که مقادیر تکیین هنکل بیانگر انرژی هر حالت در سیستم هستند. چنانچه حالت‌ها با انرژی بیشتر در هنگام کاهش مرتبه مدل حذف نشوند رفتار و مشخصات

سیستم بهتر در کاهش مرتبه مدل حفظ و منتقل می‌گردند. در سه فصل پایانی کتاب نیز پروژه‌هایی بصورت جامع و یکپارچه تجزیه و تحلیل می‌گردند. این پروژه‌ها شامل هواپیمای F14، سیستم سه-اینرسی و سیستم pH می‌باشند.

در تمامی فصول، مثال‌های زیادی ارائه شده‌است و تقریباً اکثر آنها با نرم‌افزار متلب حل شده‌اند اما به منظور بهره‌مندی بیشتر، پیشنهاد می‌گردد راهنمای نرم‌افزار متلب [۱] و [۲] در کنار مطالعه این کتاب به دقت مرور شود و به دو نکته توجه شود: نکته اول این است که نرم‌افزار متلب با سرعت زیادی در هر سال و گاهی هر چند ماه به روز می‌گردد و الگوریتم‌های بیشتر و تکامل یافته‌تری به آن اضافه می‌گردد. در این کتاب سعی شده‌است از به روزترین دستورات و الگوریتم‌های آن استفاده گردد اما به یاد داشته باشید تعدادی از دستورات نسخه‌های قدیمی متلب با الگوریتم‌های متفاوت‌تر نیز ممکن است مورد اشاره قرار گیرد. مثلاً دستور norm در نسخه‌های جدید متلب بصورت $Hinf = \text{norm}(\text{sys}, \text{inf})$ و دستور $\text{hinfnorm}(\text{sys}, \text{tol}, \text{iiloc})$ در نسخه‌های قدیم متلب بصورت $Hinf = \text{hinfnorm}(\text{sys}, \text{tol}, \text{iiloc})$ برای محاسبه نرم بی‌نهایت بکار می‌روند در حالی که در نسخه‌های جدید، دستورات نسخه‌های قدیم هنوز حذف نشده‌اند و بکار می‌روند.

نکته دوم آن است که متلب با شی‌های مخصوص هر جعبه‌ابزار کار می‌کند لذا هر دستور ممکن است شی خاص خود را داشته باشد مثلاً دستور ss بصورت $\text{sys} = \text{ss}(A, B, C, D)$ ضرایب یک سیستم خطی (A, B, C و D) را دریافت می‌نماید و دوباره (A, B, C و D) را ارائه می‌کند اما با این تفاوت که نتیجه آن متغیر sys است که یک شی کنترلی با فرمت ss است. این خروجی، در اکثر دستورات نسخه‌های جدید قرار می‌گیرد (مثلاً دستور norm). از طرفی دستور $\text{pss2sys}(\text{sys})$ بصورت $\text{sys} = \text{pss2sys}([A \ B; C \ D], rA)$ ضرایب یک سیستم خطی (A, B, C و D) را دریافت می‌نماید و دوباره (A, B, C و D) را ارائه می‌کند اما با این تفاوت که نتیجه آن متغیر sys است که یک شی کنترلی با فرمت double است. این خروجی در دستور norm قابل استفاده نیست اما در دستورات نسخه‌های قدیم بکار می‌رود (مثلاً دستور hinfnorm).