

معرفی سیستمهای کنترل

۱-۱ مقدمه

نظریه‌های کنترل مورد استفاده عبارت‌اند از نظریه کنترل کلاسیک، نظریه کنترل مدرن، و نظریه کنترل مقاوم. این کتاب معرفی جامعی از تحلیل و طراحی سیستمهای کنترل بر مبنای نظریه‌های کنترل کلاسیک و مدرن را در بردارد. در فصل ۱۰ نیز نظریه کنترل مقاوم به اختصار معرفی خواهد شد.

کنترل سیستم خودکار در تمام زمینه‌های علوم و مهندسی نقش اساسی دارد. کنترل خودکار بخش مهم و ناگسستنی سیستمهای فضاییما، هدایت موشک، روبات‌ها و فرایندهای صنعتی امروزی، شامل کنترل فشار، دما، رطوبت، چسبندگی، جریان، و غیره است. آشنایی اکثر مهندسين و علم‌پيشگان با نظریه و کاربرد کنترل خودکار امری مطلوب به حساب می‌آید.

این کتاب به عنوان کتاب درسی سیستمهای کنترل در سطح کارشناسی نوشته شده است. تمام مطالب پیشنهاد در کتاب گنجانده شده است. ریاضیات مورد نیاز، شامل تبدیل لاپلاس و تحلیل برداری و ماتریسی در پیوست‌های جداگانه‌ای، در انتهای کتاب، ارائه شده است.

مرور مختصر تاریخ تکامل نظریه‌ها و کاربردهای کنترل. اولین کار برجسته در زمینه کنترل خودکار، ناظم گریز از مرکز جیمز وات، برای کنترل سرعت ماشینهای بخار در قرن هیجدهم است. دیگر کارهای برجسته در مراحل اولیه بسط نظریه کنترل توسط مینورسکی، هازن، نایکویست و دیگران انجام شده است. در ۱۹۲۲ مینورسکی در زمینه کنترل خودکار کشتی کار کرد و نشان داد که چگونه می‌توان پایداری را با توجه به معادلات دیفرانسیل توصیف کننده سیستم تعیین کرد. در ۱۹۳۲ نایکویست روش نسبتاً ساده‌ای برای تعیین پایداری

سیستمهای حلقه بسته، براساس پاسخ حلقه باز به ورودیهای سینوسی ارائه کرد. در سال ۱۹۳۴ هازن، که اصطلاح **سروومکانیسم** را برای سیستمهای کنترل موقعیت به کار برد، طراحی سروومکانیسمهای رلهای را، که می‌توانستند ورودی متغیری را به خوبی دنبال کنند، مورد بحث قرار داد.

در دهه ۱۹۴۰ روشهای پاسخ فرکانسی (خصوصاً روش نمودار بوده که توسط بوده ابداع شده) امکان طراحی سیستمهای کنترل حلقه بسته خطی را فراهم کرد که شاخصهای عملکرد را برآورده می‌کردند. در دهه‌های ۱۹۴۰ و ۱۹۵۰ در بسیاری از سیستمهای کنترل برای کنترل فشار، دما، و غیره از کنترل‌کننده‌های PID استفاده می‌شد. در اوائل دهه ۱۹۴۰ زیگلر و نیکولس قواعدی برای تنظیم کنترل‌کننده‌های PID وضع کردند که قواعد تنظیم زیگرنیکولس نام گرفتند. طی سالهای آخر دهه ۱۹۴۰ تا سالهای اول دهه ۱۹۵۰، ابوانز روش مکان هندسی ریشه‌ها را به طور کامل مورد بررسی قرار داد.

روشهای پاسخ فرکانسی و مکان هندسی ریشه‌ها هسته اصلی نظریه کنترل کلاسیک هستند. اینها به سیستمهایی منجر می‌شوند که پایدارند و مجموعه‌ای از خواسته‌های کم و بیش دلخواه عملکرد را برآورده می‌کنند. این سیستمها در حالت کلی قابل قبول‌اند، ولی به هیچ مفهومی بهینه نیستند. از اواخر دهه ۱۹۵۰ به بعد، تأکید از طراحی سیستمی که کار قابل قبولی دارد، به طراحی سیستمهای بهینه معطوف گشته است.

چون دستگاههای چند ورودی - چند خروجی امروزی روز به روز پیچیده‌تر می‌شوند، یک سیستم کنترل امروزی با تعداد زیادی معادله توصیف می‌شود. نظریه کلاسیک کنترل که تنها به سیستمهای یک ورودی - یک خروجی اختصاص دارد، برای تحلیل این سیستمهای چند ورودی - چند خروجی توانایی کافی ندارد. از اواسط دهه ۱۹۶۰، به خاطر در دسترس بودن کامپیوترهای دیجیتال، تحلیل سیستمهای پیچیده در حوزه زمان امکان‌پذیر شده است. به همین خاطر نظریه جدید کنترل براساس تحلیل و طراحی در حوزه زمان، با استفاده از متغیرهای حالت پا گرفته است تا بتواند از عهده تحلیل دستگاههای پیچیده امروزی برآید و سیستم کنترلی برای کاربردهای نظامی، فضایی، و صنعتی تحویل دهد که خواسته‌های مربوط به وزن، هزینه، و دقت را که امروزه با وسواس بیشتر و تolerانس کمتر تعیین می‌شوند، برآورده کند.

طی سالهای ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۰ تحقیقات گسترده‌ای در مورد کنترل بهینه سیستمهای قطعی و اتفاقی، کنترل وفقی، و سیستمهای کنترل یادگیرنده صورت گرفته است. در دهه‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ تحقیقات نظری کنترل مدرن حول کنترل مقاوم و مباحث مربوط به آن دور می‌زده است.

نظریه کنترل مدرن بر پایه تحلیل حوزه زمان دستگاههای معادلات دیفرانسیل بنا نهاده شده است. کنترل مدرن طراحی سیستم کنترل را ساده‌تر کرده است، زیرا این نظریه بر اساس مدلی از سیستم کنترل واقعی کار می‌کند. ولی پایداری سیستم به خطای مدل حساس است، یعنی وقتی کنترل‌کننده طراحی شده بر اساس مدل به سیستم واقعی اعمال می‌شود، سیستم ممکن است پایدار نباشد. برای این که چنین وضعیتی پیش نیاید، هنگام طراحی ابتدا گستره خطاهای ممکن تعیین می‌شود؛ سپس سیستم کنترل طوری طرح می‌شود که در صورت قرار داشتن خطا در این گستره پایدار بماند. روش طراحی مبتنی بر این اصل کنترل مقاوم خوانده می‌شود. در این نظریه هم رهیافت پاسخ فرکانسی و هم رهیافت حوزه زمان به کار می‌رود. این نظریه پیچیدگی ریاضی فراوانی دارد.

به خاطر این که این نظریه به ریاضیاتی در حد دوره کارشناسی ارشد نیاز دارد، در این کتاب به کنترل مقاوم تنها در حد معرفی پرداخته شده است. خواننده علاقمند به جزئیات نظریه کنترل مقاوم باید در یک درس مجزا در این زمینه شرکت کند.

تعاریف. قبل از شروع بحث راجع به سیستمهای کنترل باید برخی اصطلاحات پایه‌ای را تعریف کنیم.

متغیر کنترل شده و سیگنال کنترل یا متغیر عملکرد. متغیر کنترل شده کمیت یا وضعیتی است که اندازه‌گیری و کنترل می‌شود. سیگنال کنترل یا متغیر عملکرد کمیت یا وضعیتی است که تغییر داده می‌شود تا بر متغیر تحت کنترل تأثیر بگذارد. معمولاً متغیر تحت کنترل خروجی سیستم است. منظور از کنترل، اندازه‌گیری متغیر تحت کنترل و اعمال سیگنال کنترل برای رساندن متغیر تحت کنترل به مقدار مطلوب است.

در مطالعه مهندسی کنترل برای توصیف سیستمهای کنترل نیازمند تعریف اصطلاحات دیگری نیز هستیم.

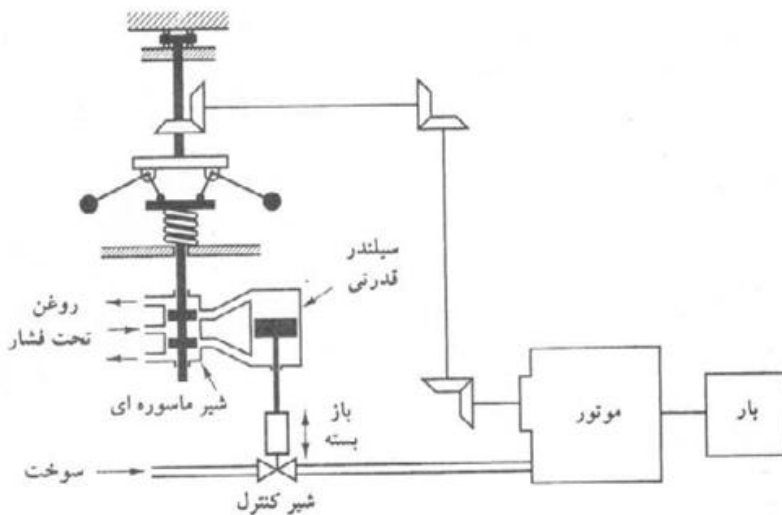
دستگاه. دستگاه می‌تواند بخشی از یک وسیله، مثلاً مجموعه‌ای از اجزاء ماشین که یک کار انجام می‌دهند، باشد. در این کتاب هر جسم فیزیکی تحت کنترل (مثلاً یک وسیله مکانیکی، کوره گرمایش، راکتور شیمیایی، یا سفینه) دستگاه نامیده می‌شود.

فرایند. فرایند عملی طبیعی و تدریجی، یا یک رشته تغییر تدریجی است که به صورتی تقریباً معین یکی پس از دیگری انجام شده، به هدفی مشخص می‌انجامد؛ همچنین عملی مصنوعی که از یک رشته کنش‌های کنترل شده و حرکات برای سوق به هدفی مشخص صورت می‌گیرد. در این کتاب هر عملی که باید کنترل شود فرایند نامیده می‌شود. فرایندهای شیمیایی، اقتصادی، و زیستی مثالهایی از این فرایندها هستند.

سیستم. سیستم ترکیبی از اجزاست که با هم و برای انجام عملی مشخص کار می‌کنند. سیستم تنها سیستم فیزیکی نیست. مفهوم سیستم را می‌توان به پدیده‌های پویای انتزاعی، مثلاً پدیده‌های اقتصادی، نیز تعمیم داد. بنابراین کلمه سیستم می‌تواند تمام سیستمهای فیزیکی، زیستی، اقتصادی، و غیره را شامل شود.

اغتشاش. اغتشاش سیگنالی است که در جهت تغییر شدید خروجی یک سیستم عمل می‌کند. اگر اغتشاش در داخل سیستم تولید شود آن را داخلی می‌نامیم؛ اغتشاش خارجی در خارج سیستم تولید می‌شود و یک ورودی سیستم است.

کنترل با فیدبک. منظور از کنترل با فیدبک عملی است که می‌کوشد اختلاف بین خروجی سیستم و ورودی مرجع را به رغم وجود اغتشاش می‌نیمد، و این کوشش براساس این اختلاف صورت می‌گیرد. در اینجا تنها اغتشاش‌های پیش‌بینی نشده مورد نظر است، زیرا اغتشاش‌های معلوم را همیشه می‌توان در داخل سیستم جبران کرد.



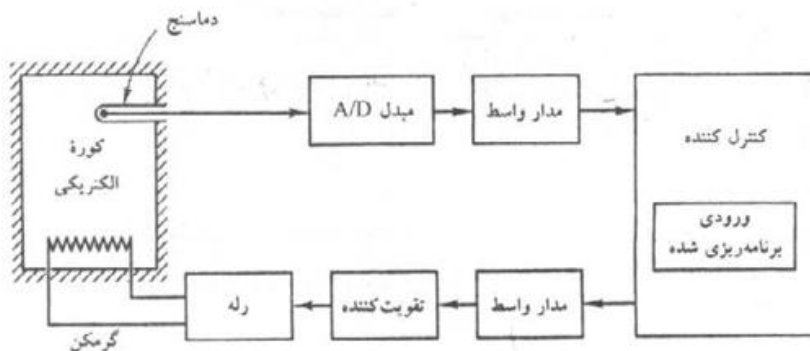
شکل ۱-۱ سیستم کنترل سرعت

۲-۱ نمونه‌هایی از سیستمهای کنترل

در این بخش نمونه‌هایی از سیستم کنترل را معرفی می‌کنیم.

سیستم کنترل سرعت. اصول اساسی ناظم سرعت وات برای یک موتور در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. مقدار سوختی که به ماشین می‌رسد براساس تفاضل سرعت مطلوب و سرعت واقعی ماشین تنظیم می‌شود. رشته عملیات کنترلی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد: ناظم سرعت طوری تنظیم شده است که روغن تحت فشار در سرعت مطلوب به هیچ طرف سیلندر قدرت وارد نشود. اگر سرعت موتور در اثر اغتشاش از این حد مطلوب کمتر شود، کاهش نیروی گریز از مرکز ناظم سرعت باعث حرکت شیر کنترل به سمت پایین می‌شود. این حرکت باعث افزایش ورودی سوخت شده، سرعت افزایش می‌یابد تا به حد مطلوب برسد. اگر سرعت موتور بیش از حد مطلوب شود، افزایش نیروی گریز از مرکز باعث بالا رفتن شیر کنترل شده، سوخت کمتری به ماشین می‌رسد. کاهش سوخت باعث کاهش سرعت ماشین و رسیدن آن به حد مطلوب می‌شود. در این سیستم کنترل سرعت، دستگاه (سیستم تحت کنترل) موتور و متغیر تحت کنترل، سرعت آن است. تفاضل بین سرعت مطلوب و سرعت واقعی سیگنال خطاست. سیگنال کنترل (مقدار سوخت) که به دستگاه (ماشین) اعمال می‌شود، سیگنال عملگر است. ورودی خارجی که باعث تغییر متغیر تحت کنترل می‌شود، اغتشاش است. به عنوان مثال تغییر غیرمنتظره بار یک اغتشاش است.

سیستم کنترل دما. شکل ۲-۱ نمودار شماتیک کنترل درجه حرارت یک کوره الکتریکی را نشان می‌دهد. درجه حرارت داخل کوره الکتریکی توسط دماسنج، که یک وسیله آنالوگ است سنجیده می‌شود. مبدل A/D سیگنال آنالوگ دما را به یک سیگنال دیجیتال دما تبدیل می‌کند. این سیگنال از طریق یک مدار واسط به کنترل کننده



شکل ۲-۱ سیستم کنترل دما.

داده می‌شود. دمای دیجیتال با دمای برنامه‌ریزی شده در ورودی مقایسه می‌شود، و در صورت وجود اختلاف (خطا) سیگنالی از طریق کنترل کننده به کوره، باز هم از طریق یک مدار واسط، تقویت کننده، و رله داده می‌شود و دما به حد مطلوب می‌رسد.

سیستم‌های اداری. سیستم اداری ممکن است از گروه‌های بسیاری تشکیل شده باشد. هر وظیفه محول شده به یک گروه عنصری پویا از این سیستم است. در چنین سیستمی برای عملکرد مطلوب باید روش فیدبک به صورت گزارشگیری از کارهای محول شده به کار گرفته شود. برای کاهش تاخیر نامطلوب در این سیستم باید تداخل بین گروه‌های کاری می‌نیم شود. هر چه این تداخلها کمتر شود کار روان‌تر صورت می‌گیرد.

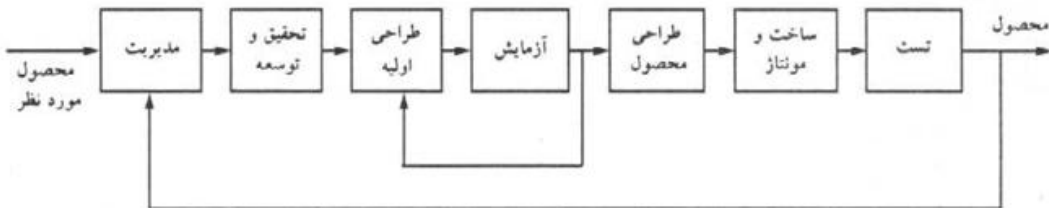
سیستم اداری یک سیستم حلقه بسته است. طراحی خوب، مدیریت کنترلی لازم را کاهش می‌دهد. اغتشاشهای این سیستم کمبود کارمند یا وسایل، وقعه در ارتباطات، اشتباههای انسانی، و موارد مشابه است. ایجاد یک سیستم برآورد خوب براساس آمار کاری لازمه مدیریت خوب است. این مطلب اثبات شده است که پیش افتادن کار، یا پیش‌بینی، عملکرد چنین سیستمی را بهبود می‌بخشد.

برای استفاده از نظریه کنترل برای بهبود عملکرد چنین سیستمی باید مشخصات دینامیکی گروه‌های کاری را با معادلات نسبتاً ساده‌ای توصیف کنیم.

گرچه تعیین نمایش ریاضی گروه‌های کاری مسئله مشکلی است، ولی کاربرد روشهای بهینه سازی در مورد سیستم‌های اداری بهبود قابل ملاحظه‌ای در عملکرد آنها ایجاد می‌کند.

به عنوان مثال یک سازمان مهندسی را در نظر بگیرید که گروه‌های اصلی آن مدیریت و تحقیق و توسعه، طراحی اولیه، آزمایش، طراحی محصول، نقشه‌کشی، مونتاژ، و آزمایش می‌باشد. این گروه‌ها برای انجام کار با هم همکاری می‌کنند.

برای تحلیل چنین سیستمی می‌توان آن را به صورت اجزای اساسی لازم ساده کرد، به نحوی که جزئیات تحلیلی لازم را در برداشته باشد و ویژگی‌های دینامیکی هر جزء با معادلات ساده‌ای بیان شود. (عملکرد دینامیکی چنین سیستمی را می‌توان براساس رابطه بین پیشرفت کار و زمان تعیین کرد).



شکل ۳-۱ نمودار بلوکی سیستم یک سازمان مهندسی.

برای رسم نمودار بلوکی می‌توان فعالیتهای کارکردی را به صورت جعبه، و اطلاعات یا محصولات خروجی هر فعالیت را به صورت خطوط سیگنال نشان داد. شکل ۳-۱ یک نمودار بلوکی ممکن را نشان می‌دهد.

سیستم کنترل مقاوم، گام اول طراحی یک سیستم کنترل یافتن مدل ریاضی دستگاه یا موضوع تحت کنترل است. هر مدلی برای دستگاه در نظر بگیریم نمی‌تواند دقیق باشد؛ به بیان دیگر فرایند مدلسازی با خطا همراه است. یعنی دستگاه واقعی با مدلی که در طراحی سیستم کنترل به کار می‌رود تفاوت دارد.

برای این که مطمئن باشیم کنترل‌کننده طراحی شده بر اساس مدل در عمل رفتار رضایتبخشی دارد، در نظر گرفتن خطای بین سیستم واقعی و مدل ریاضی آن در همان ابتدای فرایند طراحی کاملاً معقول می‌باشد. سیستم کنترلی که بر اساس این رهیافت طراحی می‌شود سیستم کنترل مقاوم نامیده می‌شود.

فرض کنید دستگاه واقعی که می‌خواهیم کنترلش کنیم $\bar{G}(s)$ ، و مدل ریاضی آن $G(s)$ است، یعنی

$$\bar{G}(s) = \text{مدل واقعی دستگاه که عدم قطعیت آن } \Delta(s) \text{ است}$$

$$G(s) = \text{مدل نامی دستگاه که برای طراحی سیستم کنترل به کار می‌رود}$$

$$\bar{G}(s) \text{ و } G(s) \text{ را می‌توان به صورت زیر با ضریب به هم مربوط کرد}$$

$$\bar{G}(s) = G(s)[1 + \Delta(s)]$$

همچنین این دو می‌توانند به صورت زیر با هم اختلاف داشته باشند

$$\bar{G}(s) = G(s) + \Delta(s)$$

شکل‌های دیگری از ارتباط نیز ممکن است.

چون توصیف دقیق عدم قطعیت یا خطای $\Delta(s)$ معلوم نیست، تقریبی از آن، $W(s)$ ، را در طراحی کنترل‌کننده به کار می‌بریم. $W(s)$ یک تابع تبدیل اسکالر است، به نحوی که

$$\|\Delta(s)\|_{\infty} < \|W(s)\|_{\infty} = \max_{0 \leq \omega < \infty} |W(j\omega)|$$

که در آن $\|W(s)\|_{\infty}$ ماکزیمم مقدار $|W(j\omega)|$ در گستره $0 \leq \omega < \infty$ است و هیچ H بینهایت $W(s)$ خوانده می‌شود.

در اینجا مسئله طراحی، با استفاده از قضیه بهره کوچک، به تعیین کنترل‌کننده‌ای به صورت $K(s)$ منجر می‌شود که نامساوی زیر را برآورده کند

$$\left\| \frac{W(s)}{1+K(s)G(s)} \right\|_{\infty} < 1$$

که در آن $G(s)$ تابع تبدیل مدل به کار رفته در طراحی، $K(s)$ تابع تبدیل کنترل کننده، و $W(s)$ تابع تبدیل انتخاب شده به عنوان تقریب $\Delta(s)$ است. در اکثر موارد عملی باید بیش از یک نامساوی مشتمل بر $G(s)$ ، $K(s)$ و $W(s)$ برآورده شود. برای مثال برای تضمین پایداری مقاوم و عملکرد مقاوم باید دو نامساوی به شکل های زیر هم برآورده شود

$$\left\| \frac{W_m(s)K(s)G(s)}{1+K(s)G(s)} \right\|_{\infty} < 1 \quad \text{برای پایداری مقاوم}$$

$$\left\| \frac{W_s(s)}{1+K(s)G(s)} \right\|_{\infty} < 1 \quad \text{برای عملکرد مقاوم}$$

(این نامساوی ها در بخش ۱۰-۹ اثبات خواهد شد). در سیستم های کنترل مقاوم مختلف، نامساوی های متفاوتی باید برآورده شوند. (منظور از پایداری مقاوم این است که $K(s)$ باید پایداری تمام سیستم هایی را که سیستم مورد نظر یکی از آنهاست تضمین کند. منظور از عملکرد مقاوم این است که تمام این سیستم ها باید عملکرد قابل قبولی داشته باشند). در این کتاب فرض می کنیم تمام دستگاه هایی که برایشان سیستم کنترل طراحی می کنیم دقیقاً معلوم هستند، بجز دستگاه هایی که در بخش ۱۰-۹ به منظور معرفی نظریه کنترل مقاوم به کار می آوریم.

۳-۱ کنترل حلقه بسته و کنترل حلقه باز

سیستم کنترل فیدبک دار. سیستمی که برای ایجاد ارتباط مطلوب بین خروجی و ورودی مرجع از مقایسه آنها و تفاضلشان استفاده می کند، سیستم کنترل فیدبک دار نامیده می شود. سیستم کنترل دمای اتاق نمونه ای از چنین سیستمی است. ترموستات با اندازه گیری دمای اتاق و مقایسه آن با یک درجه حرارت مرجع (دمای مطلوب) وسیله گرمایش یا سرمایش را به کار می اندازد یا آن را قطع می کند، تا دمای اتاق به رغم تغییر درجه حرارت بیرون مقدار مطلوبی داشته باشد.

سیستم کنترل فیدبک دار تنها به دیای مهندسی منحصر نیست، بلکه در زمینه های غیرمهندسی مختلفی نیز یافت می شود. برای مثال بدن انسان یک سیستم کنترل فیدبک دار بسیار پیشرفته دارد. هم دمای بدن و هم فشار خون توسط فیدبک های زیستی ثابت نگهداشته می شوند. در واقع فیدبک نقش حیاتی دارد و بدن انسان را به اغتشاش های خارجی نسبتاً غیرحساس می کند، تا بتواند در شرایط متغیر محیطی کار خود را انجام دهد.

سیستم کنترل حلقه بسته. سیستم های کنترل فیدبک دار را غالباً سیستم های کنترل حلقه بسته می نامند. در عمل سیستم کنترل حلقه بسته و سیستم کنترل فیدبک دار به یک معنی به کار می روند. در سیستم کنترل حلقه بسته سیگنال کارانداز خطا، که تفاضل سیگنال ورودی و سیگنال فیدبک شده است، برای کاهش خطا و آوردن خروجی به مقدار مطلوب به کنترل کننده داده می شود و سیگنال فیدبک شده می تواند خود خروجی، یا تابعی از

خروجی و مشتق و انتگرال آن باشد. منظور از کنترل حلقه بسته استفاده از عمل فیدبک برای کاهش خطای سیستم است.

سیستم کنترل حلقه باز. سیستمهایی که در آنها خروجی بر عمل کنترلی تأثیر ندارد، سیستمهای کنترل حلقه باز نامیده می‌شوند. به عبارت دیگر خروجی سیستم کنترل حلقه باز نه اندازه‌گیری می‌شود، و نه برای مقایسه با ورودی فیدبک می‌شود. یک مثال نوعی ماشین لباسشویی است. خیس کردن، شستن و آبکشی براساس یک زمانبندی از قبل معلوم انجام می‌شود. ماشین سیگنال خروجی را که تمیزی لباسهاست، اندازه گیری نمی‌کند.

در سیستمهای حلقه باز خروجی با ورودی مرجع مقایسه نمی‌شود. پس به ازای هر ورودی مرجع یک شرایط کاری ثابت وجود دارد، بنابراین دقت سیستم به تنظیم آن بستگی دارد. اگر اغتشاش وجود داشته باشد، سیستم کنترل حلقه باز نمی‌تواند وظیفه مطلوب را انجام دهد. سیستم کنترل حلقه باز را در عمل تنها موقعی می‌توان به کار برد که رابطه ورودی و خروجی معلوم بوده، اغتشاش خارجی و داخلی وجود نداشته باشد. واضح است که چنین سیستمی فیدبک دار نیست. هر سیستم کنترلی که براساس زمانبندی کار می‌کند حلقه باز است. چراغهای راهنمایی که براساس زمانبندی کار می‌کنند، نمونه دیگری از کنترل حلقه باز هستند.

مقایسه سیستمهای کنترل حلقه بسته و باز. یکی از مزایای سیستمهای کنترل فیدبک دار این است که فیدبک پاسخ سیستم را نسبت به اغتشاش خارجی و تغییر پارامترهای داخلی سیستم تقریباً بی‌اثر می‌کند. بنابراین می‌توان با استفاده از اجزاء ارزان و نه چندان دقیق دستگاه را به خوبی کنترل کرد، کاری که در سیستمهای حلقه باز ناممکن است.

از دیدگاه پایداری، ساختن سیستمهای کنترل حلقه باز ساده‌تر است، زیرا در این سیستمها مشکل ناپایداری وجود ندارد. ولی در سیستمهای کنترل حلقه بسته پایداری یک مشکل اساسی است، این مشکل باعث می‌شود سیستم با دامنه‌ای ثابت یا متغیر نوسان کند.

باید تأکید کرد که اگر در سیستمی ورودی از قبل معلوم است و اغتشاش وجود ندارد، بهتر است کنترل به صورت حلقه باز انجام شود. سیستم کنترل حلقه بسته تنها هنگامی برتری خود را نشان می‌دهد که اغتشاشهای پیش‌بینی نشده و - یا تغییرات غیر قابل پیش‌بینی اجزای سیستم وجود داشته باشد. توجه کنید که توان خروجی تا حدی هزینه، وزن، و اندازه سیستم کنترل را تعیین می‌کند. تعداد اجزای سیستم کنترل حلقه بسته از تعداد اجزای سیستم کنترل حلقه باز بیشتر است. بنابراین سیستم کنترل حلقه بسته معمولاً گرانتر است و توان بیشتری می‌خواهد. برای کاهش توان لازم می‌توان در صورت امکان از کنترل حلقه باز استفاده کرد. معمولاً ترکیب کنترلهای حلقه باز و حلقه بسته ارزانتر است و عملکرد مطلوب برای کل سیستم را در پی دارد.

اکثر سیستمهایی که در این کتاب تحلیل و طراحی می‌شوند، سیستمهای کنترل حلقه بسته هستند. در شرایط خاصی (مثلاً وقتی اغتشاش وجود ندارد یا اندازه‌گیری خروجی سخت است) سیستم کنترل حلقه باز مطلوبتر است. پس بد نیست که مزایا و معایب سیستمهای کنترل حلقه باز را خلاصه کنیم.

مزایای اصلی سیستم‌های کنترل حلقه باز عبارت‌اند از:

۱. ساخت ساده‌تر و نگهداری آسان
۲. ارزاتر بودن نسبت به سیستم حلقه بسته متناظر
۳. نداشتن مشکل پایداری
۴. مناسب‌تر بودن برای مواقعی که اندازه‌گیری خروجی آنقدر سخت است که توجیه اقتصادی ندارد. (مثلاً در ماشین لباسشویی تعبیه وسیله‌ای که بتواند کیفیت شسته شدن لباسها، یعنی تمیزی، را اندازه بگیرد بسیار پرهزینه است.)

معایب عمده سیستم‌های کنترل حلقه باز عبارت‌اند از:

۱. اغتشاش و تغییر کالبراسیون خطا ایجاد می‌کند و ممکن است خروجی آنچه باید باشد، نباشد.
۲. برای دستیابی به کیفیت مطلوب در خروجی کالبراسیون مجدد لازم است.

۱-۴ طراحی و جبرانسازی سیستم‌های کنترل

در این کتاب جنبه‌های بنیادی طراحی و جبرانسازی سیستم‌های کنترل مورد بحث قرار می‌گیرد. جبرانسازی همانا اصلاح رفتار دینامیکی سیستم برای برآورده شدن مشخصات مطلوب است. رهیافت‌هایی که در این کتاب برای طراحی و جبرانسازی سیستم کنترل به کار می‌رود عبارت‌اند از رهیافت مکان هندسی ریشه‌ها، رهیافت پاسخ فرکانسی، و رهیافت فضای حالت. اینها در فصول ۶، ۷، ۹، و ۱۰ معرفی خواهند شد. رهیافت جبرانسازی مبتنی بر PID در فصل ۸ بیان شده است.

در طراحی واقعی یک سیستم کنترل این که از جبرانساز الکترونیکی، نیوماتیکی، یا هیدرولیکی استفاده شود، باید بر اساس طبیعت دستگاه تحت کنترل تعیین شود. برای نمونه اگر در دستگاه تحت کنترل مایعات قابل اشتعال به کار رفته، استفاده از اجزای نیوماتیکی (هم به عنوان جبرانساز و هم به عنوان عملکرد) توصیه می‌شود تا احتمال ایجاد جرقه از بین برود. ولی اگر خطر آتش‌سوزی وجود ندارد، معمولاً از اجزای الکترونیکی استفاده می‌شود. (در واقع غالباً سیگنال‌های غیرالکتریکی به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل می‌شود، زیرا انتقال، تقویت، پردازش، قابلیت اطمینان، و جبرانسازی این سیگنال‌ها ساده‌تر است.)

مشخصات عملکرد. سیستم کنترل برای این طراحی می‌شود که وظائف مشخصی را صورت دهد. خواسته‌های مورد انتظار از سیستم کنترل معمولاً به عنوان مشخصات عملکرد بیان می‌شوند. این مشخصات می‌تواند بر حسب خواسته‌های پاسخ گذرا (مثل ماکزیمم فراجش یا زمان نشست پاسخ پله)، خواسته‌های حالت ماندگار (مثل خطای ماندگار به ازای ورودی شیب) یا بر حسب خواسته‌های پاسخ فرکانسی بیان شود. این مشخصات باید پیش از شروع فرایند طراحی معلوم باشند.

در مسائل معمولی طراحی مشخصات عملکرد (که به دقت، پایداری نسبی، و سرعت پاسخ مربوط می‌شوند) به صورت چند مقدار عددی دقیق داده می‌شوند. در موارد دیگر ممکن است این مشخصات تا حدی به صورت مقادیر عددی دقیق و تا حدی به صورت گزاره‌های کیفی بیان شوند. در این صورت ممکن است در

فرایند طراحی مشخصات اصلاح شوند، زیرا ممکن است به صورتی داده شده باشند که اصلاً برآورده نشوند (خواسته‌های متضاد) یا به سیستمی بسیار گران قیمت بانجامند.

معمولاً مشخصات عملکرد نباید بیش از حد لازم برای انجام وظائف محول شده سخت گیرانه باشند. اگر در یک سیستم کنترل دقت حالت ماندگار اهمیت اساسی داشته باشد، نباید خواسته‌های غیرلازمی بر پاسخ گذرا تحمیل کنیم، زیرا چنین کاری استفاده از اجزای گران قیمت را ضروری می‌کند. به خاطر داشته باشید که مهمترین بخش طراحی سیستم کنترل بیان مشخصات عملکرد است، به نحوی که برای هدف مورد نظر به یک سیستم کنترل بهینه منجر شود.

جبرانسازی سیستم. تنظیم بهره اولین گام دستیابی به عملکرد رضایت بخش است. ولی در بسیاری از موارد عملی تنظیم بهره به تنهایی رفتار سیستم را به حد کافی برای رسیدن به مشخصات مورد نظر تغییر نمی‌دهد. معمولاً افزایش بهره رفتار حالت ماندگار را بهبود می‌دهد، ولی پایداری را بدتر می‌کند و حتی می‌تواند به ناپایداری بانجامد. در این صورت باید طراحی سیستم را عوض کرد (ساختار آن را تغییر داد یا اجزای دیگری به آن افزود) تا رفتار کل سیستم عوض شده، سیستم به صورت خواسته شده رفتار کند. این کار جبرانسازی نام دارد. وسیله‌ای که به سیستم افزوده می‌شود تا مشخصات مطلوب را ایجاد کند جبرانساز نامیده می‌شود. جبرانساز ناکارآمدی‌های سیستم اصلی را جبران می‌کند.

روش طراحی. در فرایند طراحی سیستم کنترل یک مدل ریاضی برای سیستم کنترل ترتیب می‌دهیم و پارامترهای جبرانساز را تنظیم می‌کنیم. وقت گیرترین بخش کار واریسی عملکرد سیستم، پس از هر تغییر در پارامترها می‌باشد. طراح می‌تواند از MATLAB یا دیگر برنامه‌های کامپیوتری استفاده کند تا درگیر محاسبات لازم برای این واریسی نشود.

پس از یافتن مدل ریاضی رضایت بخش باید نمونه‌ای ساخته و سیستم حلقه باز آزموده شود. اگر پایداری مطلق سیستم حلقه بسته تضمین شده باشد، می‌توان حلقه را بست و عملکرد سیستم حلقه بسته را آزمود. به خاطر اثرات بارگذاری بین اجزا، اثرات غیرخطی، پارامترهای توزیع شده، و غیره، که در طراحی ندیده گرفته شده است، عملکرد سیستم نمونه احتمالاً با پیش‌بینی‌های نظری تفاوت دارد. بنابراین ممکن است طرح اول تمام مشخصات عملکرد را برآورده نکند. طراح باید پارامترهای سیستم را تغییر دهد، اصلاحات لازم را در نمونه صورت دهد و آزمون را تکرار کند. این کار باید تا برآورده شدن تمام خواسته‌ها تکرار شود. در این کار طراح باید طرح جدید را تحلیل کند و نتایج آن را در طرح بعدی به کار برد. طراح باید مطمئن شود که طرح نهایی علاوه بر برآوردن خواسته‌ها، قابل اعتماد و اقتصادی نیز هست.

۵-۱ نمای کلی کتاب

کتاب در ۱۵ فصل سازمان یافته است. خلاصه هر فصل در زیر ارائه شده است:

فصل ۱ مطالب مقدماتی در مورد سیستمهای کنترل را دربر دارد.

در فصل ۲ به مدلسازی ریاضی سیستمهای کنترل توصیف شده با معادلات دیفرانسیل خطی می‌پردازیم. مشخصاً عبارتهای تابع تبدیل دستگاههای معادلات دیفرانسیل را به دست می‌آوریم. همچنین بیان فضایی حالت دستگاههای معادلات دیفرانسیل را نیز به دست می‌آوریم. از MATLAB برای تبدیل مدلهای ریاضی، از تابع تبدیل به فضای حالت و برعکس استفاده می‌کنیم. در این کتاب سیستمهای خطی به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرند. اگر مدل ریاضی یک سیستم غیرخطی باشد، پیش از اعمال مطالب بیان شده در این کتاب باید آن را خطی کنیم. در این فصل روشی برای خطی کردن مدلهای ریاضی غیرخطی نیز ارائه شده است.

در فصل ۳ مدلهای ریاضی سیستمهای مکانیکی و الکتریکی پرکاربرد در نظریه کنترل را به دست می‌آوریم. در فصل ۴ در مورد سیستمهای سیالاتی و گرمایی مورد استفاده در سیستمهای کنترل صحبت می‌کنیم. سیستمهای سیالاتی سیستمهای سطح مایع، سیستمهای نیوماتیک، و سیستمهای هیدرولیک را شامل می‌شوند. در مورد سیستمهای گرمایی، مثل سیستمهای کنترل دما نیز در این فصل صحبت خواهیم کرد. مهندس کنترل باید با تمام سیستمهای توصیف شده در این فصل آشنا باشد.

فصل ۵ در مورد تحلیل پاسخ گذرا و پاسخ حالت ماندگار سیستمهای کنترل تعریف شده بر اساس تابع تبدیل است. رهیافت MATLAB برای یافتن پاسخ گذرا و پاسخ حالت ماندگار به تفصیل بیان خواهد شد. همچنین روش استفاده از MATLAB برای یافتن نمودارهای سه بعدی نیز معرفی می‌شود. تحلیل پایداری بر اساس معیار پایداری روث در این فصل گنجانده شده، و معیار پایداری هورویتز نیز به اختصار مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

فصل ۶ تحلیل و طراحی سیستمهای کنترل با مکان هندسی ریشه‌ها را بیان می‌کند. این یک روش ترسیمی برای تعیین محل تمام قطبهای حلقه بسته سیستم، در صورت مشخص بودن قطبها و صفرهای سیستم حلقه باز، در صورت تغییر پارامتر بهره از صفر تا بینهایت است. این روش را اپوانز در حدود سالهای ۱۹۵۰ ابداع کرد. امروزه برای رسم سریع و آسان مکان هندسی ریشه‌ها از MATLAB استفاده می‌شود. جزئیات طراحی سیستمهای کنترل با استفاده از جبرانسازهای پیشفاز، پسفاز، و پسفاز - پیشفاز در این فصل به صورت مفصل بیان شده است.

فصل ۷ روش پاسخ فرکانسی تحلیل و طراحی سیستمهای کنترل را در بر دارد. این قدیمی‌ترین روش تحلیل و طراحی سیستم کنترل است و در دهه‌های ۱۹۴۰ و ۱۹۵۰ توسط نایکویست، بوده، نیکولس، هازن و دیگران پی‌ریزی شد. در این فصل جزئیات رهیافت پاسخ فرکانسی برای طراحی سیستم کنترل، با استفاده از روشهای جبرانسازی پیشفاز، جبرانسازی پسفاز، و جبرانسازی پسفاز-پیشفاز بیان می‌شود. روش پاسخ فرکانسی پرکاربردترین روش تحلیل و طراحی، پیش از متداول شدن رهیافت فضای حالت بوده است. البته چون طراحی سیستم کنترل مقاوم به روش H بینهایت بر رهیافت پاسخ فرکانسی مبتنی است، این روش دوباره جانی دیگر گرفته است.

فصل ۸ در مورد کنترل کننده‌های PID پایه و گونه‌های اصلاح شده آن، مثل کنترل کننده‌های PID با چند درجه آزادی است. کنترل کننده PID سه پارامتر دارد: بهره تناسبی، زمان انتگرال، و زمان مشتق. در

سیستمهای کنترل صنعتی بیش از نصف کنترلکننده‌ها از نوع PID هستند. عملکرد کنترلکننده PID به اندازه نسبی سه پارامتر آن بستگی دارد. تعیین اندازه نسبی این پارامترها تنظیم کنترلکننده PID خوانده می‌شود.

زیگلر و نیکولس در ۱۹۴۲ قواعدی موسوم به قواعد تنظیم زیگلر - نیکولس پیشنهاد کردند. از آن پس قواعد تنظیم بسیاری پیشنهاد شده است. امروزه سازندگان کنترلکننده‌های PID قواعد تنظیم مخصوص خود را پیشنهاد می‌کنند. در این فصل یک رهیافت بهینه‌سازی کامپیوتری با استفاده از MATLAB، برای تعیین سه پارامتر کنترلکننده PID بیان شده است که تنظیم را بر اساس مشخصات پاسخ گذرا انجام می‌دهد. می‌توان این روش را تعمیم داد و از آن برای تعیین پارامترهای ارضاءکننده دیگر مشخصات نیز استفاده کرد.

فصل ۹ مباحث پایه‌ای تحلیل فضای حالت سیستمهای کنترل را در بر دارد. مفاهیم کنترل‌پذیری و مشاهده‌پذیری، که به نظر کالمن مهمترین مفاهیم نظریه کنترل مدرن هستند، در این فصل به تفصیل مورد بحث قرار گرفته‌اند. در این فصل حل معادلات فضای حالت نیز بیان شده است.

فصل ۱۰ به طراحی سیستم کنترل در فضای حالت اختصاص دارد. در این فصل ابتدا مسئله جابدهی قطب و طراحی مشاهده‌گر حالت بیان می‌شود. در مهندسی کنترل معمولاً تبیین یک شاخص عملکرد معنی‌دار، و کوشش برای می‌نیم کردن آن (و در بعضی موارد ماکزیم کردن آن) کار مطلوبی به حساب می‌آید. اگر شاخص عملکرد برگزیده شده معنی فیزیکی روشنی داشته باشد، این رهیافت برای تعیین متغیر کنترل بهینه بسیار مفید است. این فصل با بحث در مورد مسئله تنظیمکننده بهینه، که در آن شاخص عملکرد انتگرال تابع مرتبه دومی از متغیرهای حالت و متغیر کنترل است، ادامه می‌یابد. این انتگرال از $t=0$ تا $t=\infty$ گرفته می‌شود. در انتهای این فصل سیستمهای کنترل مقاوم به اختصار مورد بررسی قرار می‌گیرند.