



کنترل خطی

مؤلفان:

مهندس محمود کریمی

مهندس علی اکبر استارمی

بسمه تعالی

سرشناسه	: کریمی، محمود، ۱۳۵۱
عنوان و نام پدیدآور	: کنترل خطی / مؤلفان محمود کریمی، علی اکبر استارمی
مشخصات نشر	: تهران؛ دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، بسیج دانشجویی، ۱۳۹۷
مشخصات ظاهری	: ۷۴۰ ص، مصور(رنگی)، جدول(رنگی)، نمودار(رنگی)
شابک	: ۹۷۸-۶۰۰-۶۹۲۷-۸۸-۶ ، ۴۸۰۰۰۰ ریال
وضعیت فهرست‌نویسی	: فیبا
موضوع	: آزمون‌ها-دانشگاه‌ها و مدارس عالی - ایران
شناسه اداره	: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، بسیج دانشجویی
رده‌بندی کنگ	: ۱۳۹۷ / ۴۴۰ / ۴۲۲۰
رده‌بندی یویی	: ۶۲۹/۸۳۲۰۷
شماره کتاب‌شناسی	: ۵۱۵۵۶۹۵

نام کتاب	: کنترل خطی
مؤلف	: مهندس محمود کریمی، علی اکبر استارمی
ناشر	: بسیج دانشجویی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
نوبت چاپ	: اول
سال و محل نشر	: تهران، ۱۳۹۷
ناظر فنی چاپ	: احسان ابوبی مهریزی - علیرضا داودی مقدم
صفحه‌آرایی	: اکرم بحری
تیراژ	: ۱۰۰۰ جلد
قیمت	: ۴۸۰۰۰ تومان
شابک	: ISBN ۹۷۸-۶۰۰-۶۹۲۷-۸۸-۶

* هرگونه چاپ و تکثیر از این اثر ممنوع و به موجب بند ۵ ماده ۲ قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان پیگرد قانونی دارد.
 نشانی: خیابان شریعتی، نرسیده به پل سید خندان، دانشکده برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، مرکز خدمات آموزشی نصیر
 تلفن: ۸۸۴۶۹۳۵-۸۸۴۶۴۷۸۰

پس از انتشار کتب « مدارهای الکتریکی » - « الکترونیک ۲ » - « تجزیه و تحلیل سیگنال ها و سیستم ها » - « الکترومغناطیس » - « بررسی سیستم های قدرت » و « ماشین های الکتریکی » از مجموعه کتاب های رشته مهندسی برق « مرکز خدمات آموزشی نصیر » بار دیگر توفیق یافتیم تا با انتشار کتاب کنترل خطی به قلم اساتید گرانقدر و فرهیخته آقایان محمود کریمی و علی اکبر استارمی خدمت دیگری به دانشجویان عزیز ارائه نماییم.

کتاب پیش روی شما به گونه ای نگاشته شده که هم برای دانشجویان کارشناسی قابل استفاده بوده و هم برای داوطلبان و دانشجویان کارشناسی ارشد و دکتری مورد استفاده قرار می گیرد و از این نظر مجموعه کاملی است که نیاز دانشجویان را به هر مرکز دیگری برطرف می سازد. مرکز خدمات آموزشی نصیر وابسته به بسیج دانشجویی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، اولین مرکز آموزشی در حیطه ای آمادگی آزمون های کارشناسی ارشد در کشور است که از شروع فعالیت های آن قریب به ۲۷ سال می گذرد. این مرکز که در سال ۱۳۷۱ توسط دانشجویان بسیجی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی راه اندازی شد در طی این سال ها همواره در حال رشد، ترقی و تعالی بوده است و علاوه بر توسعه حیطه فعالیت ها و گسترش کمی مخاطبان، کیفیت آموزش و سطح علمی آن همواره روند رو به رشدی داشته است. با توجه به این که این مرکز زیر مجموعه فرماندهی بسیج دانشجویی می باشد، اصلی ترین هدف خود را خدمت رسانی، عدالت آموزشی و ارتقاء علمی دانشجویان قرار داده است و از این جهت، محض ترین مرکز آموزشی در میان موسسات مشابه است. این حقیقت فراتر از یک ادعا می باشد؛ از این رو همواره به عنوان مرکزی خوش نام و موفق در میان اساتید و دانشجویان محترم مطرح بوده است. به علاوه چون مسئولین و کادر این مرکز خود نیز اغلب از دانشجویان دانشگاه های تهران هستند، بیشترین ارتباط را با دانشجویان مخاطب دارند و همواره از نقطه نظرات آنان استفاده می کنند. در زیر نکاتی برای آشنایی بیشتر شما مخاطب ارجمند، این مرکز ذکر می شود:

- ۱) استفاده از اساتید مجرب و طراز اول دانشگاه های تهران که به لحاظ علمی جزء سرآمدترین اساتید کشور می باشند؛ از اصلی ترین نقاط قوت این مرکز است. اعتقاد ما این است که به این هدف مقدس و والا و این موفقیت هرگز نائل نمی شدیم مگر با مساعدت و تلاش و همکاری صادقانه اساتید گران قدر که در این راه تمامی پتانسیل و انگیزه ی خود را سرلوحه ی فعالیت های مرکز قرار داده اند.
- ۲) رویکرد ما همواره افزایش سطح کیفی فعالیت ها در عین ارائه کمترین هزینه می باشد که با تحقق آن هدف اصلی ما که خدمت رسانی و ارتقاء هر چه بیشتر علمی دانشجویان این مرکز و بروز در کنار آن آموزشی می باشد محقق می شود و در این میان از حجم فعالیت های موسسات سودمندی که با تبلیغات رنگارنگ مجیب مخاطبان، غالی می کنند، می کاهد.
- ۳) با توجه به برگزاری ۲۷ سال کلاس های آموزشی و ۱۷ سال آزمون های آریشی، تجربه ۴۰ ساله ای اندوخته ایم که یکی از عوامل اصلی موفقیت روزافزون ما است. این تجربیات که سایر موسسات نیز در پارک از ما استفاده کرده و الگو گرفته اند، همواره مرکز خدمات آموزشی نصیر را در جایگاه پیشروترین موسسه آموزشی کارشناسی ارشد قرار داده است.
- ۴) با توجه به وابستگی این مرکز به سازمان بسیج دانشجویی و با توجه به اهداف مذکور هزینه ها به حداقل رسیده و کمترین مقدار را در میان تمامی موسسات مشابه دارا می باشد. این اختلاف عمیق بعضاً باعث تعجب و ایجاد سوال برای مخاطبان است که تازه با این مرکز آشنا شده اند گردیده ولی پس از آشنایی بیشتر با این مجموعه پاسخ سوال خود را دریافت نموده اند.

با عطف به سابقه درخشان این مرکز در طی این سال ها و ضعف موجود در زمینه ی کتاب های کارشناسی ارشد به لحاظ کیفی، این مجموعه تصمیم گرفت که در این زمینه نیز وارد شده و افتخاری دیگر به افتخارات خود بیفزاید.

مجموعه کتاب های کارشناسی ارشد نصیر که از این پس به تدریج در اختیار علاقه مندان قرار خواهد گرفت، مجموعه ای بی نظیر با رویکردی نوین و ویژگی های منحصر به فرد می باشد به طوری که داوطلبان بعد از مراجعه به آن نیازی به استفاده از منابع دیگر نخواهند داشت. نظر به همکاری اساتید گران قدری که با خود کوله باری از تجربه ارزشمند علمی در سطح دانشگاه ها و کلاس های مرکز خدمات آموزشی نصیر را دارند و رعایت بالاترین کیفیت در صفحه آرایی و چاپ، دانشجویان عزیز لذت واقعی یادگیری را خواهند چشید. در این جا لازم است از زحمات فراوان اساتید گران قدر جناب آقایان محمود کریمی و علی اکبر استارمی در تألیف این اثر ارزشمند کمال قدر دانی را بنماییم.

در پایان اجر معنوی فعالیت های این مرکز را تقدیم می کنیم به شهدای دفاع مقدس، این شمع های همیشه فروزان بشریت که با مقاومت مردانه خود حماسه ی جاوید آفریدند.

مقدمه مؤلفین

خدا را شاکریم فرصتی ایجاد شد تا به یکی از نیازهای دانشجویان در راستای آمادگی آزمون کارشناسی ارشد و دکتری پاسخ دهیم. جهت مطالعه بهینه کتاب لازم است مقدمه کتاب دقیق مطالعه شود تا متناسب با شرایط فردی تان بتوانید از کتاب بهره مناسب را ببرید. به این جهت ابتدا به دو موضوع کلی زیر می پردازیم.

(۱) ویژگی های کتاب
(۲) روش مطالعه کتاب

ویژگی های کتاب: این کتاب با قصد استفاده دانشجویان برای آمادگی در آزمون کارشناسی ارشد و دکتری برای رشته های مهندسی برق، مهندسی مکانیک، مهندسی هوافضا، مهندسی ابزار دقیق، مهندسی مکترونیک و سایر رشته هایی که درس کنترل خطی در آزمون کارشناسی ارشد رشته مورد نظرشان وجود دارد نوشته شده است. در این راستا در ابتدا توجه به چند مطلب اهمیت دارد.

(۱) ما بحث اهمیت که از آن ها سؤال طرح نشده است یا خیلی به ندرت طرح شده است به طور گذرا اشاره شده است و یا اشاره نشده است.

(۲) عمده مطالب این کتاب تست و مثال است به طوری که بر اساس یک بررسی آماری پراکندگی صفحات کتاب مطابق زیر است:

حدود ۲۸۰ صفحه آموزش مطلب درسی و حدود ۴۶۰ صفحه حل تست و مثال.

(۳) سعی شده است روش های مطرح شده در کتاب، مناسب ترین روش ها برای حل تست باشند. بعضی از این روش ها از کتاب های مرجع استخراج شده است و بعضی از آن ها توسط مؤلفین پیاده سازی و طرح شده است و نمونه این روش ها در هیچ کتاب مرجعی وجود ندارد.

(۴) اغلب تست ها به چند روش حل شده اند و این است که دانشجو با تنوع روش های حل مسأله آشنا شود و هم چنین بتواند مقایسه دقیق بین روش های ارائه شده در ذهنش ایجاد کند.

(۵) در کتاب سعی شده است از انواع تست ها و مثال های سخت تر متوسط و آسان استفاده شود تا دانشجویان هر رشته ای بتوانند متناسب با سطح سؤالاتی که در آزمون آن ها طرح می شود، انتخاب و حل کنند.

(۶) تست های انتخابی در متن کتاب از تمام رشته ها انتخاب شده است به نحوی که تحلیل دقیق سؤالات رشته برق که در سال های اخیر در گروه سخت ترین سؤالات قرار داشته اند، انجام شده است.

(۷) توجه شود مطالب درسی تمام گرایش ها کاملاً یکسان است فقط سطح سؤالات انحرافی و آسانی متفاوت می باشد.

(۸) صورت تست ها دقیقاً به همان فرمی که در آزمون ارشد و دکتری آمده، آورده شده است. اگر تغییری یا نقدی وجود داشته در ضمن حل به آن اشاره شده است.

فهرست مندرجات

۹	فصل اول: تابع تبدیل و فضای حالت
۹	بخش اول: تابع تبدیل
۹	تعریف سیستم
۱۱	تحلیل سیستم در حوزه زمان
۱۳	تعریف تابع تبدیل SISO
۱۵	سیگنال فلوگراف (سیگنال گذر جریان) SFG
۲۰	قانون جمع گره‌های SFG
۲۴	روش میسون برای محاسبه تابع تبدیل
۲۹	میسون اصلاح شده
۴۰	رسم نمودار SFG از روی بلوک دیاگرام
۴۷	انواع تابع تبدیل
۵۰	بخش دوم: فضای حالت
۵۰	نمایش مدل با فضای حالت
۵۰	تعاریف و مزایا
۵۳	روش‌های تبدیل معادله دیفرانسیل، تابع تبدیل و SFG به فضای حالت
۵۳	روش تبدیل معادله دیفرانسیل به فضای حالت
۵۵	تبدیل بلوک دیاگرام به فضای حالت
۶۰	تبدیل SFG به فضای حالت
۶۳	تبدیل فضای حالت به تابع تبدیل
۶۸	بدست آوردن معادلات فضای حالت از تابع تبدیل

۶۸	فرم کانونی کنترل پذیر
۷۳	فرم جردن
۷۷	کنترل پذیری و مشاهده پذیری
۸۲	حل معادلات فضای حالت
۸۳	محاسبه و معرفی خصوصیات ماتریس انتقال حالت
۸۷	فیدبک حالت و جایابی قطب
۹۰	سیستم های غیر خطی (تکمیلی)

۹۵ فصل دوم: پایداری و خطا در حالت ماندگار

۹۵	بخش اول: پایداری
۹۵	تعریف پایایی پایداری در سیستم های خطی یک ورودی و یک خروجی
۹۶	تعریف پایایی کنترل
۹۶	پایداری ناشی شرط اول یا ورودی صفر
۹۷	پایداری (BIBO) یا ورودی هر مدار خروجی کراندار
۱۰۰	پایداری کامل
۱۰۱	پایداری به مفهوم لیپانوف
۱۰۱	پایداری مجانبی
۱۰۲	پایداری نمایی
۱۰۴	روش تشخیص پایداری یک سیستم
۱۰۶	چند نکته مهم در جدول راث - هرولتز
۱۰۸	حالت های خاص در جدول راث هرولتز
۱۴۲	پایداری نسبی
۱۴۹	بخش دوم: خطای حالت ماندگار
۱۴۹	معرفی سیستم های حلقه باز و حلقه بسته
۱۵۰	تعریف نوع سیستم
۱۵۵	تعریف خطای حالت ماندگار
۱۵۵	خطای ورودی مرجع
۱۵۶	خطای ردیابی
۱۵۶	محاسبه خطای ردیابی بر اساس ضرایب خطای استاتیک
۱۶۲	خطای مقایسه کننده

۱۶۳	خطای ورودی اغتشاش
۱۷۳	خلاصه روش محاسبه‌ی خطای حالت دائم
۱۸۳	محاسبه خطا در فضای حالت
۱۸۷	معیار (شاخص) عملکردی خطا
۱۹۲	بخش سوم: حساسیت
۱۹۳	حساسیت به پارامتر در سیستم‌های حلقه بسته

فصل سوم: پاسخ گذرای سیستم‌ها

۱۹۹	مقدمه
۱۹۹	سیستم رتبه اول
۲۰۱	تعریف ثابت زمانی
۲۰۴	پاسخ ضربه سیستم مرتبه اول
۲۰۶	سیستم‌های مرتبه دوم
۲۰۸	میرایی بحرانی
۲۰۹	حالت میرایی شدید
۲۰۹	حالت میرایی ضعیف
۲۱۳	حالت نوسانی
۲۱۳	حالت ناپایدار
۲۱۵	تقریب سیستم‌های مرتبه ۲ به مرتبه ۱
۲۱۹	مرور چند تعریف برای حالت گذرای سیستم‌های مرتبه دوم
۲۱۹	زمان تأخیر
۲۱۹	زمان صعود
۲۲۰	زمان پیک
۲۲۰	زمان نشست
۲۲۵	ماکزیمم جهش
۲۲۶	جهش نسبی
۲۳۸	محاسبه پاسخ ضربه در سیستم‌های مرتبه ۲
۲۴۳	افزودن صفر به سیستم‌های مرتبه دوم
۲۴۳	افزودن یک صفر به سیستم
۲۴۹	افزودن چند صفر به سیستم

۲۵۹	افزودن یک قطب حقیقی سمت چپ به سیستم‌های مرتبه دوم	۲۹۱
۲۶۶	محاسبه دامنه و بخش ثابت پاسخ‌های نوسانی (تکمیلی)	۲۹۱

فصل چهارم: مکان هندسی ریشه‌ها

۲۸۰	مکان ریشه‌ها روی محور حقیقی	۲۹۱
۲۸۵	مجاانب‌ها در مکان ریشه‌ها	۲۹۱
۲۹۰	نقاط شکستگی روی مکان ریشه‌ها	۲۹۱
۳۰۰	محل تلاقی مکان ریشه‌ها با محور موهومی	۲۹۱
۳۰۳	محدوده زوایای ورود یا خروج به صفرها یا قطب‌ها	۲۹۱
۳۰۵	محاسبه دامنه ورود و خروج به صفر و قطب به روش ترسیمی	۲۹۱
۳۱۱	خلاصه روش رسم مکان هندسی ریشه‌ها	۲۹۱
۳۵۶	کاربرد مکان هندسی ریشه‌ها به روش حل مسئله	۲۹۱
۳۷۲	مکان ریشه‌های سیستمی مرتبه ۲	۲۹۱
۳۷۵	نکات مکان هندسی سیستم‌های سه	۲۹۱
۳۷۷	اثر افزودن صفر و قطب در نمودار مکان ریشه‌ها	۲۹۱
۳۸۴	تأثیر وجود عامل e^{-Ts} در مکان ریشه‌ها	۲۹۱

فصل پنجم: پاسخ فرکانسی

۳۸۷	بخش اول: نمودار بود	۲۹۱
۳۸۷	مقدمه	۲۹۱
۳۸۸	تعریف پاسخ فرکانسی	۲۹۱
۳۹۲	نمودار بود	۲۹۱
۳۹۳	رسم نمودار $ G(j\omega) _{dB}$ بود	۲۹۱
۳۹۴	رسم نمودار اندازه بهره ثابت (k)	۲۹۱
۳۹۴	رسم نمودار اندازه صفر و قطب در مبدأ	۲۹۱
۳۹۶	رسم نمودار منحنی اندازه صفر و قطب حقیقی	۲۹۱
۳۹۷	رسم نمودار اندازه قطب و صفر مختلط	۲۹۱
۳۹۹	رسم نمودار اندازه عامل تأخیر	۲۹۱
۳۹۹	رسم نمودار اندازه قطب و صفر روی محور موهومی	۲۹۱
۴۰۰	خلاصه رسم نمودار اندازه بود	۲۹۱

۴۰۹	رسم نمودار $\angle G(s)$ بود
۴۰۹	رسم نمودار فاز برای بهره k
۴۱۰	رسم نمودار فاز برای قطبها و صفرهای مبدأ
۴۱۰	رسم نمودار فاز برای قطب و صفرهای حقیقی
۴۱۲	رسم نمودار فاز برای قطبها و صفرهای مختلط
۴۱۳	بررسی فاز عامل تأخیر e^{-sT_d}
۴۱۴	رسم نمودار فاز برای صفر و قطبهای متقارن نسبت به دو محور حقیقی و موهومی
۴۲۷	روش محاسبه تابع تبدیل با استفاده از نمودار بود
۴۵۶	محاسبه خطای حالت ماندگار و مشخصه‌های آن با استفاده از نمودار بود
۴۷۰	بخش دوم: نایکوئیست
۴۷۰	مروری بر نگاشت
۴۷۱	نمودار نایکوئیست
۴۷۲	نگاشت محور (jw)
۴۷۴	رفتار نمودار نایکوئیست در $w = 0$
۴۷۹	وضعیت نمودار $G(jw)$ به ازای $w = +\infty$
۴۹۴	بررسی رفتار نمودار $G(jw)$ در فرکانس‌های بیانی $w = 0$ تا $w = +\infty$
۴۹۸	محاسبه نگاشت نیم‌دایره
۵۱۲	بررسی یک حالت خاص و مهم در نمودار نایکوئیست
۵۳۱	نمودار نایکوئیست سیستم‌های مرتبه ۲ استاندارد
۵۳۷	اصل آرگومان (اصل آوند)
۵۴۰	استفاده از اصل آرگومان جهت بررسی پایداری با استفاده از نمودار نایکوئیست
۵۴۰	معیار نایکوئیست برای تعیین پایداری
۵۵۱	بررسی پایداری سیستم حلقه بسته با فیدبک منفی واحد k و تابع تبدیل حلقه باز $G(s)$
۵۶۸	محاسبه تابع تبدیل سیستم حلقه باز از نمودار نایکوئیست
۵۷۰	محاسبه محل برخورد نمودار نایکوئیست با محورها در نقاطی که فاصله تا مبدأ محدود است
۵۷۶	محاسبه خطای حالت ماندگار با استفاده از نمودار نایکوئیست
۵۸۰	مرور چند نکته در نایکوئیست
۵۸۴	بخش سوم: حاشیه بهره (GM) و حاشیه فاز (PM)
۵۸۴	حد بهره (GM)
۵۸۹	حد فاز (PM)

۵۹۱	روش‌های محاسبه حد بهره و حد فاز	۲۰۹
۵۹۱	تابع تبدیل حلقه باز سیستم معلوم است	۲۰۹
۵۹۵	محاسبه حد بهره و فاز با استفاده از نمودار بود	۲۱۰
۵۹۸	محاسبه حد بهره و فاز از نمودار نایکوئیست	۲۱۰
۶۰۲	معرفی نمودار نیکولز (اندازه بر حسب فاز)	۲۱۱
۶۰۳	تشخیص حد فاز و بهره از نمودار نیکولز	۲۱۱
۶۰۸	خلاصه تصویری نمایش حد فاز و بهره در نمودارهای بود، نایکوئیست و نیکولز	۲۱۲
۶۱۰	چند نکته مهم در مورد حد بهره و حد فاز	۲۱۲

فصل ششم: مدل سازم

۶۲۳	مقدمه	۲۱۲
۶۲۳	سیستم‌های مکانیکی با حرکت انتقالی	۲۱۲
۶۲۴	روش نوشتن معادلات پیرانسیل حاکم بر سیستم‌های مکانیکی	۲۱۲
۶۲۶	معرفی فرم ماتریسی	۲۱۲
۶۲۷	سیستم‌های الکتریکی	۲۱۲
۶۳۱	معادل‌سازی سیستم‌های مکانیکی الکتریکی	۲۱۲
۶۳۳	روش رسم معادل الکتریکی سری از یک سیستم مکانیکی	۲۱۲
۶۳۴	روش رسم الکتریکی معادل موازی یا معکوس	۲۱۲
۶۳۵	معادلات سیستم‌های مکانیکی دورانی	۲۱۲
۶۳۸	سیستم‌های مکانیکی همراه با چرخ‌دنده	۲۱۲
۶۳۹	اثر چرخ‌دنده‌ها روی امپدانس	۲۱۲
۶۴۲	سیستم‌های الکترومکانیکی	۲۱۲
۶۵۳	سیستم‌های سیالاتی	۲۱۲
۶۵۳	معرفی اجزاء مهم در سیستم‌های سیالاتی	۲۱۲

فصل هفتم: طراحی کنترل کننده

۶۵۹	مقدمه	۲۱۲
۶۵۹	معرفی یک سیستم کنترل جامع	۲۱۲
۶۶۱	معرفی پارامترهای مهم در طراحی کنترل کننده در حوزه زمان و فرکانس	۲۱۲
۶۶۲	روند کلی طراحی در حوزه زمان	۲۱۲

۶۶۴		روند کلی طراحی در حوزه فرکانس
۶۶۵		رابطه پاسخ فرکانس و پاسخ پله
۶۶۶		معرفی کنترل کننده‌های کلاسیک
۶۶۹		حل یک مثال جامع
۶۸۶		کنترل کننده‌های صنعتی
۶۹۰		توضیحات بیشتر در مورد کنترل کننده‌های صنعتی
۶۹۳		روش‌های مناسب جهت حل تست‌های مربوط به طراحی کنترل کننده
۷۱۰		اثر گذاری جبران‌ساز Lead و Lag در بازه‌ای که فاز را تغییر می‌دهد
۷۱۱		اثر گذاری جبران‌ساز Lead و Lag در بازه‌ای که فاز را تغییر نمی‌دهد

www.ketab.ir