سیستم‌های کنترل بهینه

Optimal Control Systems

نویسنده:

دسیننی سابارام نایدو

Desineni Subbaram Naidu

برگردان:

دکتر عبداله شمیسا

مهندس زهرا کیانی

انتشارات نیاز دانش

۱۳۹۲

سرشناسه	:	نایدو، دسیننی، ۱۹۴۰ – م.
	:	Naidu, Desineni S.
عنوان و نام پدیدآور	:	سیستم‌های کنترل بهینه، نویسنده دسیننی سابارام نایدو؛ برگردان عبداله شمیسا، زهرا کیانی.
مشخصات نشر	:	تهران: نیاز دانش، ۱۳۹۲.
مشخصات ظاهری	:	۳۷۲ ص.
شابک	:	978-600-6481-50-0
وضعیت فهرست‌نویسی	:	فیپا
یادداشت	:	عنوان اصلی: Optimal control systems
موضوع	:	مهندسی کنترل
موضوع	:	نظریه کنترل
موضوع	:	به‌گزینی ریاضی
شناسه افزوده	:	شمیسا، عبداله، ۱۳۵۶-، مترجم
شناسه افزوده	:	کیانی، زهرا، ۱۳۵۶ -، مترجم
رده‌بندی کنگره	:	۱۳۹۲ ۹ س ۱۷ن /۲۱۳ TJ
رده‌بندی دیویی	:	۶۲۹/۸
شماره کتابشناسی ملی		۳۲۳۵۸۹۶

نیاز دانش

نام کتاب	:	سیستم‌های کنترل بهینه
پدیدآورنده	:	دسیننی سابارام نایدو
برگردان و گردآوری	:	دکتر عبداله شمیسا – مهندس زهرا کیانی
مدیر اجرایی - ناظر بر چاپ	:	حمیدرضا ا محمد شیرازی – محمد شمس
طراح جلد	:	کیانا آرین
ناشر	:	نیاز دانش
صفحه‌آرا	:	قلم‌نگار – معمّری
لیتوگرافی / چاپ	:	گنجینه
نوبت چاپ	:	اول – ۱۳۹۲
شمارگان	:	۵۰۰
قیمت	:	۱۵۰۰۰۰ ریال

شابک ۰ -۵۰-۶۴۸۱-۶۰۰- ۹۷۸ **ISBN:978-600-6481-50-0**

هرگونه چاپ و تکثیر (اعم از زیراکس، بازنویسی، ضبط کامپیوتری و تهیه‌ی CD) از محتویات این اثر بدون اجازهٔ کتبی ناشر ممنوع است، متخلفان به موجب بند ۵ از مادهٔ ۲ قانون حمایت از مؤلفان، مصنفان، و هنرمندان تحت پیگرد قانونی قرار می‌گیرند

کلیه حقوق این اثر برای ناشر محفوظ است.

تماس با انتشارات: ۰۹۱۲-۷۰۷۳۹۳۵ ۰۲۱-۶۶۴۷۸۱۰۶-۰۸ www.Niaze –Danesh.com

مشاوره جهت نشر: ۰۹۱۲-۲۱۰۶۷۰۹

مقدمه نویسنده:

بسیاری از سیستم‌های فیزیکی، شیمیایی و اقتصادی را می‌توان با روابط ریاضی مانند معادلات دیفرانسیل یا تفاضلی، قطعی یا تصادفی مدل کرد. این سیستم‌ها مطابق روابط دینامیکی نسبت به زمان یا هر متغیر مستقل دیگری تغییر می‌کنند. این سیستم‌ها را می‌توان بوسیله نوعی از ورودی‌های بیرونی یا کنترل‌ها از یک حالت به حالت دیگر منتقل کرد. اگر این کار انجام‌پذیر باشد، ممکن است راه‌های مختلفی برای انجام یک کار مشابه موجود باشد. اگر راه‌های مختلفی برای انجام یک کار وجود داشته باشد، ممکن است یکی از این راه‌ها بهترین باشد. این بهترین راه، ممکن است حداقل زمان رفتن از یک حالت به حالت دیگر یا حداکثر نیروی پیشرانه تولید شده بوسیله موتور راکت باشد. ورودی اعمال شده به سیستم در بهترین شرایط را کنترل بهینه می‌گویند. معیار بهترین راه یا عملکرد را شاخص عملکرد یا تابع هزینه می‌گویند. بنابراین، وقتی که سیستم به روش بهینه‌ای کنترل شود که یک شاخص عملکرد را برآورده کند، یک سیستم کنترل بهینه داریم. تئوری کنترل بهینه یک دوره‌ی شکوفایی دو دهه‌ای را پس از ارائه تئوری کنترل مدرن در حدود سال ۱۹۶۰ سپری کرده است. جنبه‌های عملی و تئوری این موضوع بدلیل جذابیت‌های کاربردهای آن در شاخه‌های متعددی مانند سیستم‌های قدرت، هوافضا، پروسه‌های شیمیایی، اقتصاد، پزشکی، زیست‌شناسی و بوم‌شناسی تداوم یافته است.

اهداف و دورنما

در این کتاب به کنترل سیستم‌های فیزیکی دینامیکی که با معادلات دیفرانسیل یا تفاضلی معمولی بیان می‌شوند (برخلاف سیستم‌های استاتیکی بیان شده با معادلات جبری) پرداخته می‌شود. علاوه‌براین، تمرکز روی سیستم‌های قطعی و نه سیستم‌های تصادفی است.

توسعه تئوری کنترل بهینه در دهه شصت حول اصل حداکثر می‌چرخید که بوسیله یک ریاضیدان روسی با نام پونتریاگین و همکاران دانشگاهی‌اش اولین بار به زبان انگلیسی در ۱۹۶۲ ارائه شد. کارهای بعدی توسط کالمن از ایالات متحده انجام شد. پس از آن کتاب‌های ممتاز زیادی در تئوری کنترل بهینه در سطوح مختلف مهارتی منتشر شد.

این کتاب برای دانشجویان نوشته شده است و سعی دارد روش‌های عملیاتی ساده‌ای با ریاضیات مربوط به آن برای دانشجو فراهم کند. مشخصه دیگر این کتاب چیدمان تمامی مطالب به گونه‌ای است که کلاس یک ترمی را پوشش دهد. ویژگی خاص این کتاب ارائه روال‌ها در جدول خلاصه مطلب به صورت بیان مسئله و حل گام به گام آن است. علاوه بر این، نرم‌افزار متلب و سیمولینک شامل جعبه‌ابزارهای سیستم کنترل و ریاضیات سمبولیک نیز در کتاب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این کتاب برای یک درس تحصیلات تکمیلی یک ترمی سطح دوم در سیستم‌های کنترل و بهینه‌سازی مناسب است.

پیش‌نیازها و مخاطبان

این یک کتاب درسی تحصیلات تکمیلی سطح دوم است و به همین دلیل پیشنیازهای استفاده از این کتاب، درس سیستم‌های کنترل مقدماتی، تحلیل فضای حالت یا تئوری سیستم‌های خطی است.

پیشنهاد می‌شود که دانشجو مطالب پیوست‌های A و B در انتهای کتاب را مرور کند. این کتاب برای دانشجویان تحصیلات تکمیلی مهندسی برق، مکانیک، شیمی، هوافضا و ریاضی کاربردی مناسب است. علاوه‌براین، محققین حرفه‌ای و مهندسینی که در سازمان‌های تحقیقاتی و صنعتی مشغول به کار هستند، می‌توانند از آن بهره گیرند.

دسیننی سابارام نایدو

پوکاتلو، آیداهو

ژوئن ۲۰۰۲

سخن ناشر

هدف از ترجمه‌ی این اثر پاسخ به نیاز دانشجویان کارشناسی ارشد و دکتری در شاخه‌های مختلف مهندسی برق، مکانیک، شیمی، هوافضا و ریاضی کاربردی می‌باشد. بدون شک مطالبی که به وسیله‌ی پدیدآورنده‌ی این اثر پوشش یافته است، حاصل تجربه‌ی طولانی در ارائه‌ی دروس مرتبط با آن در کلاس‌های دانشگاهی می‌باشد و شاید به همین جهت است که این کتاب در اغلب دانشگاه‌های معتبر دنیا به عنوان یک مرجع درسی پذیرفته شده است.

بیان مسائل بهینه‌سازی و راه‌حل‌های آنها به زبان ساده و گام به گام، این کتاب را برای ارائه در یک ترم درسی بسیار مناسب کرده است.

در ترجمه‌ی این کتاب سعی شده است مطالب به‌روز در این حوزه نیز آورده و تمام کدنویسی‌های برنامه‌ی متلب به‌روزرسانی شود. همچنین برای درک بهتر مباحث، در مواردی به متن اصلی نکته‌هایی اضافه شده است که این موضوع نیز بر بالا بردن کیفیت مطالب ارائه شده بی‌تأثیر نبوده است.

در انتهای سخن لازم می‌داند از کلیه‌ی اساتید و دانشجویان عزیزی که مطالب ترجمه شده را مطالعه و با دیده‌ی تیزبین خود بررسی و تحلیل می‌نمایند، تقاضا نماید، کاستی‌ها و غلط‌های احتمالی را که ناگزیر جلوگیری از آن در این حجم میسر نمی‌باشد، گوشزد و اعلام نماید تا در چاپ‌های بعدی این نقطه‌نظرات به غایت ارزشمند مورد استفاده قرار گیرد.

انتشارات نیاز دانش همواره پذیرای اساتید و نخبگان دانشگاهی جهت انتشار و معرفی کتب برتر دانشگاهی می‌باشد.

مدیر مسئول انتشارات نیاز دانش

فهرست مطالب

عنوان | صفحه

فصل اول/مقدمه ۱۱

۱- مقدمه ۱۱

۱-۱- کنترل مدرن و کلاسیک ۱۱

۱-۲- بهینه‌سازی ۱۴

۱-۳- کنترل بهینه ۱۵

۱-۳-۱- پروسه ۱۵

۱-۳-۲- شاخص عملکرد ۱۵

۱-۳-۳- محدودیت‌ها یا قیود ۱۹

۱-۳-۴- بیان صورت مسئله برای سیستم کنترل بهینه ۱۹

۱-۴- تاریخچه مسئله ۲۰

۱-۴-۱- حساب تغییرات ۲۱

۱-۴-۲- تئوری کنترل بهینه ۲۳

۱-۵- مروری بر فصول کتاب ۲۴

۱-۶- مسائل ۲۵

فصل دوم /حساب تغییرات و کنترل بهینه ۲۷

۲- حساب تغییرات و کنترل بهینه ۲۷

۲-۱- مفاهیم پایه ۲۸

۲-۱-۱- تابع و تابعک ۲۸

۲-۱-۲- نمو ۲۸

۲-۱-۳- دیفرانسیل و تغییرات ۳۰

۲-۲- مقدار بهینه یک تابع و یک تابعک ۳۲

۲-۳- مسئله پایه تغییرات ۳۵

۲-۳-۱- سیستم با زمان و حالت انتهایی ثابت ۳۵

۲-۳-۲- مباحثی در مورد معادله اویلر-لاگرانژ ۳۹

۲-۳-۳- حالت‌های مختلف معادله اویلر-لاگرانژ ۴۱

۲-۴- تغییرات دوم ۴۴

۲-۵- بهینه‌سازی توابع تحت شروط یا محدودیت‌ها ۴۶

۲-۵-۱- روش مستقیم ۴۹
۲-۵-۲- روش ضرب‌کننده‌های لاگرانژ ۵۰
۲-۶- بهینه‌سازی تابعک‌ها تحت شروط یا محدودیت‌ها ۵۳
۲-۷- روش تغییرات در سیستم‌های کنترل بهینه ۶۰
۲-۷-۱- مسئله هزینه انتهایی ۶۰
۲-۷-۲- انواع سیستم‌ها ۶۸
۲-۷-۳- شرط کافی ۶۹
۲-۷-۴- خلاصه روش پونتریاگین ۷۰
۲-۸- خلاصه روش تغییرات ۸۴
۲-۸-۱- مرحله ۱: بهینه‌سازی یک تابعک ۸۴
۲-۸-۲- مرحله۲: بهینه‌سازی یک تابعک تحت قید یا محدودیت ۸۵
۲-۸-۳- مرحله ۳: سیستم کنترل بهینه با فرمول‌بندی لاگرانژین ۸۶
۲-۸-۴- مرحله ۴: سیستم کنترل بهینه با فرمول‌بندی هامیلتون: اصل پونتریاگین ۸۷
۲-۸-۵- خصوصیات برجسته ۹۰
۲-۹- مسائل ۹۳

فصل سوم/ سیستم‌های کنترل بهینه خطی مربعی (۱)..... ۹۷

۳- سیستم‌های کنترل بهینه خطی مربعی- بخش اول ۹۷
۳-۱- تدوین مسئله ۹۷
۳-۲- تنظیم‌کننده خطی مربعی با افق متناهی ۱۰۰
۳-۲-۱- خصوصیات تقارن ماتریس ضرایب ریکاتی ۱۰۴
۳-۲-۲- کنترل بهینه ۱۰۴
۳-۲-۳- شاخص عملکرد بهینه ۱۰۵
۳-۲-۴- خلاصه مسئله تنظیم‌کننده خطی مربعی افق متناهی: نوع متغیر با زمان ۱۰۷
۳-۲-۵- خصوصیات برجسته ۱۰۸
۳-۲-۶- سیستم LQR برای شاخص عملکرد جامع ۱۱۲
۳-۳- حل تحلیلی معادله دیفرانسیل ماتریسی ریکاتی ۱۱۲
۳-۳-۱- پیاده‌سازی حل تحلیلی معادله دیفرانسیل ماتریسی ریکاتی به وسیله نرم‌افزار متلب ۱۱۵
۳-۴- سیستم LQR با افق نامتناهی (۱) ۱۲۰
۳-۴-۱- خلاصه مسئله تنظیم‌کننده خطی مربعی افق نامتناهی: نوع متغیر با زمان ۱۲۱
۳-۵- سیستم LQR با افق نامتناهی (۲) ۱۲۲
۳-۵-۱- تعبیر مفهومی ضرایب ریکاتی ۱۲۴
۳-۵-۲- حل تحلیلی معادله جبری ریکاتی ۱۲۵

۳-۵-۳- خلاصه مسئله تنظیم‌کننده خطی مربعی افق نامتناهی- نوع متغیر با زمان..... ۱۲۵
۳-۵-۴- مسئله پایداری تنظیم‌کننده نامتغیر با زمان..... ۱۳۰
۳-۵-۵- هم‌ارزی کنترل بهینه حلقه‌باز و حلقه‌بسته..... ۱۳۱
۳-۶- نکات و مباحث..... ۱۳۶
۳-۷- مسائل..... ۱۳۶

فصل چهارم /سیستم‌های کنترل بهینه خطی مربعی (۲)..... ۱۴۱

۴- سیستم‌های کنترل بهینه خطی مربعی- بخش دوم..... ۱۴۱
۴-۱- سیستم تعقیب خطی مربعی با افق متناهی..... ۱۴۱
۴-۱-۱- خلاصه سیستم تعقیب خطی مربعی..... ۱۴۶
۴-۱-۲- خصوصیات برجسته سیستم تعقیب..... ۱۴۷
۴-۲- سیستم تعقیب خطی مربعی (LQT) با افق نامتناهی..... ۱۵۶
۴-۳- سیستم تنظیم‌کننده با نقطه نهایی ثابت..... ۱۵۷
۴-۴- سیستم LQR با درجه مشخصی از پایداری..... ۱۶۲
۴-۴-۱- خلاصه سیستم تنظیم‌کننده با درجه پایداری از پیش تعیین شده..... ۱۶۴
۴-۵- تفسیر حوزه فرکانس..... ۱۶۶
۴-۵-۱- حدفاز و حدبهره..... ۱۶۸
۴-۶- مسائل..... ۱۷۳

فصل پنجم / سیستم‌های کنترل بهینه گسسته زمانی..... ۱۷۷

۵- سیستم‌های کنترل بهینه گسسته زمانی..... ۱۷۷
۵-۱- حساب تغییرات برای سیستم‌های گسسته زمانی..... ۱۷۷
۵-۱-۱- بهینه‌سازی یک تابعک..... ۱۷۸
۵-۱-۲- تابعک با هزینه انتهایی..... ۱۸۲
۵-۲- سیستم‌های کنترل بهینه گسسته زمانی..... ۱۸۳
۵-۲-۱- حالت نهایی ثابت و کنترل بهینه حلقه‌باز..... ۱۸۷
۵-۲-۲- حالت نهایی آزاد و کنترل بهینه حلقه‌باز..... ۱۸۹
۵-۳- سیستم تنظیم‌کننده خطی حالت گسسته زمانی..... ۱۹۰
۵-۳-۱- کنترل بهینه حلقه‌بسته: معادله تفاضلی ماتریسی ریکاتی..... ۱۹۱
۵-۳-۲- تابع هزینه بهینه..... ۱۹۴
۵-۴- سیستم تنظیم‌کننده در حالت دائمی یا مانا..... ۱۹۹
۵-۴-۱- حل تحلیلی معادله ریکاتی..... ۲۰۵

۵-۵- سیستم تعقیب خطی مربعی گسسته زمانی ۲۱۱
۵-۶- تفسیر حوزه فرکانس ۲۱۶
۵-۷- مسائل ۲۲۱

فصل ششم /اصل حداقل پونتریاگین ۲۲۵

۶- اصل حداقل پونتریاگین ۲۲۵
۶-۱- سیستم مقید ۲۲۵
۶-۲- اصل حداقل پونتریاگین ۲۲۸
۶-۲-۱- خلاصه اصل پونتریاگین ۲۳۱
۶-۲-۲- شرایط لازم اضافی ۲۳۳
۶-۳- برنامه‌ریزی پویا ۲۳۵
۶-۳-۱- اصل بهینگی ۲۳۵
۶-۳-۲- کنترل بهینه با استفاده از برنامه‌ریزی پویا ۲۳۹
۶-۳-۳- کنترل بهینه سیستم‌های گسسته زمانی ۲۴۲
۶-۳-۴- کنترل بهینه سیستم‌های پیوسته زمانی ۲۴۸
۶-۴- معادله هامیلتون- ژاکوبی- بلمن (HJB) ۲۴۹
۶-۵- سیستم LQR با استفاده از معادله هامیلتون- ژاکوبی- بلمن ۲۵۴
۶-۷- مسائل ۲۵۸

فصل هفتم / سیستم‌های کنترل بهینه مقید ۲۶۱

۷- سیستم‌های کنترل بهینه مقید ۲۶۱
۷-۱- کنترل بهینه مقید ۲۶۲
۷-۱-۱- کنترل بهینه زمان برای سیستم‌های LTI ۲۶۳
۷-۱-۲- بیان صورت مسئله و تدوین آن ۲۶۳
۷-۱-۳- حل سیستم کنترل بهینه زمان (TOC) ۲۶۴
۷-۱-۴- ساختار سیستم کنترل بهینه زمان ۲۷۰
۷-۲- کنترل بهینه زمان یک سیستم انتگرال‌گیر دوبل ۲۷۲
۷-۲-۱- بیان صورت مسئله و تدوین آن ۲۷۲
۷-۲-۲- حل مسئله ۲۷۳
۷-۲-۳- پیاده‌سازی مهندسی قانون کنترل ۲۷۹
۷-۲-۴- پیاده‌سازی قانون کنترل بهینه در سیمولینک متلب ۲۸۰
۷-۳- سیستم های کنترل بهینه سوخت ۲۸۳

۷-۳-۱- کنترل بهینه سوخت سیستم انتگرل‌گیر دوبل ۲۸۴
۷-۳-۲- بیان صورت مسئله و تدوین آن ۲۸۴
۷-۳-۳- حل مسئله ۲۸۴
۷-۴- سیستم با کمترین سوخت: سیستم LTI ۲۹۲
۷-۴-۱- بیان صورت مسئله ۲۹۲
۷-۴-۲- حل مسئله ۲۹۲
۷-۴-۳- پیاده‌سازی قانون کنترل به وسیله سیمولینک متلب ۲۹۷
۷-۵- سیستم‌های کنترل بهینه انرژی ۳۰۱
۷-۵-۱- بیان صورت مسئله و تدوین آن ۳۰۱
۷-۵-۲- حل مسئله ۳۰۲
۷-۶- سیستم‌های کنترل بهینه با قیود حالت ۳۱۳
۷-۶-۱- روش تابع جریمه ۳۱۳
۷-۶-۲- روش متغیر کمکی یا خنثی ۳۱۸
۷-۷- مسائل ۳۲۱

پیوست A ۳۲٤
پیوست B ۳۳۹
پیوست C ۳٤٤

فصل اول

مقدمه

۱- مقدمه

در این فصل ابتدا ایده‌های اصلی بهینه‌سازی[1] و کنترل بهینه[2] معرفی شده و سپس تاریخچه مختصری از حساب تغییرات[3] و کنترل بهینه مطرح خواهد شد. همچنین خلاصه‌ای از محتویات فصل‌های کتاب ارائه می‌شود.

۱-۱- کنترل مدرن و کلاسیک

تئوری کنترل کلاسیک (سنتی) بیشتر در رابطه با سیستم‌های تک ورودی- تک خروجی (SISO)[4] بوده و عمدتا بر اساس تئوری تبدیل لاپلاس و استفاده از آن در تشریح سیستم به فرم بلوک دیاگرامی است. با توجه به شکل (۱-۱) مشاهده می‌شود که:

$$\frac{\mathrm{Y}(s)}{\mathrm{R}(s)} = \frac{\mathrm{G}(s)}{1+\mathrm{G}(s)\mathrm{H}(s)} \qquad (۱-۱-۱)$$

1. Optimization
2. Optimal Control
3. Calculus of Variation
4. SISO: Single Input Single Output