

بسم الله الرحمن الرحيم

دینامیک و کنترل فرآیندها

با نگرش کاربردی در

مهندسی شیمی، مهندسی پلیمر و مهندسی متالورژی

تالیف

دکتر مهدی رفیع‌زاده

(عضو هیات علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر)

بهار ۱۳۸۸

سرشناسه : رفیع زاده، مهدی، ۱۳۴۵ -
عنوان و نام پدیدآور: دینامیک و کنترل فرآیندها با نگرشی کاربردی در مهندسی شیمی، مهندسی پلیمر و مهندسی متالورژی / تألیف مهدی رفیع زاده.
مشخصات نشر : تهران: دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران): ۱۳۸۸.
مشخصات ظاهری: XII ۴۱۷ ص: مصور، جدول، نمودار.
شابک : 978-964-463-382-9

وضعیت فهرستری: فبا.
یادداشت :واژه نامه.
یادداشت :کتابنامه ص: [۳۹۵] - ۳۹۶.
یادداشت :نمایه
موضوع : شیمی -- فرایندها -- کنترل
موضوع : کنترل فرایندها
شناسه افزوده : دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران).
رده بندی کنگره : ۱۳۸۸ ۹۷ / ۷۵ / ۱۵۵ TP
رده بندی دیویی : ۶۶۰ / ۲۸۱۵
شماره کتابشناسی ملی : ۱۷۶۷۷۱۹

این کتاب در جلسه مورخ ۸۷/۱۲/۲۰ شورای چاپ و
نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر به تصویب رسید.



عنوان کتاب : دینامیک و کنترل فرآیندها
(بانگرش کاربردی در مهندسی شیمی، مهندسی پلیمر و مهندسی متالورژی)
تألیف : دکتر مهدی رفیع زاده
ناشر : انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)
لیتوگرافی، چاپ و صحافی : انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)
چاپ اول : بهار ۱۳۸۸
تیراژ : ۱۰۰۰ نسخه
قیمت : ۶۰۰۰ تومان
شابک : ۹۷۸-۹۶۴-۴۶۳-۳۸۲-۹
ISBN: 978-964-463-382-9
تلفن مرکز پخش: ۶۶۲۹۸۸۶۸

آدرس: خیابان ولی عصر، روبروی خیابان بزرگراه، فروشگاه کتاب مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

حق چاپ برای ناشر محفوظ است

فهرست مطالب

پیشگفتار -	xi
فصل اول - مفاهیم اولیه کنترل فرآیندها	۱
۱-۱- مقدمه	۱
۱-۲- عملکرد یک سیستم کنترلی ساده	۲
۱-۳- لزوم و اهمیت کنترل فرآیند	۵
۱-۴- سیستم گرمایش آب	۶
۱-۵- چند مثال پیچیده	۱۱
۱-۶- دید عمومی بر طراحی سیستم کنترلی	۱۳
۱-۷- ساختار این کتاب	۱۴
۱-۸- مسائل	۱۵
۱-۹- مراجع	۱۶
فصل دوم - مدل سازی دینامیکی سیستم های درجه اول و دوم	۱۷
۲-۱- مقدمه	۱۷
۲-۲- تابع تبدیل سیستم درجه اول - تانک گرمایش	۱۸
۲-۳- دیگر سیستم های درجه اول	۲۱
۲-۳-۱- تابع تبدیل دماسنج جیوه ای	۲۱
۲-۳-۲- تابع تبدیل راکتور تانکی پیوسته (CSTR)	۲۲
۲-۳-۳- تابع تبدیل تانک ارتفاع	۲۳
۲-۴- فرم عمومی و مشخصه های سیستم درجه اول	۲۵
۲-۵- پاسخ های مختلف سیستم درجه اول	۲۶
۲-۵-۱- پاسخ پله سیستم درجه اول	۲۷
۲-۵-۲- پاسخ پالس سیستم درجه اول	۳۱
۲-۵-۳- پاسخ ایمپالس سیستم درجه اول	۳۴
۲-۵-۴- پاسخ رمپ سیستم درجه اول	۳۸
۲-۵-۵- پاسخ سینوسی سیستم درجه اول	۴۰

۴۲.....	۶-۲- سیستم با چند ورودی
۴۳.....	۷-۲- سیستم‌های غیرخطی
۴۹.....	۸-۲- زمان مرده
۵۰.....	۹-۲- سیستم‌های درجه دوم
۵۱.....	۱-۹-۲- تابع تبدیل دو تانک ارتفاع در حالت سری
۵۴.....	۲-۹-۲- تابع تبدیل فشارسنج مانومتر
۶۰.....	۱۰-۲- شکل عمومی سیستم درجه دوم
۶۰.....	۱۱-۲- پاسخ‌های سیستم درجه دوم
۶۰.....	۱-۱۱-۲- پاسخ پله سیستم درجه دوم
۶۷.....	۲-۱۱-۲- پاسخ پله تحت میرا سیستم درجه دوم
۶۹.....	۳-۱۱-۲- پاسخ پالس، ایمپالس و رمپ سیستم درجه دوم
۷۳.....	۴-۱۱-۲- پاسخ سینوسی سیستم درجه دوم
۷۴.....	۱۲-۲- تقریب زمان مرده
۷۵.....	۱-۱۲-۲- تقریب درجه اول
۷۶.....	۲-۱۲-۲- تقریب‌های پد
۷۸.....	۱۳-۲- مسائل
۸۸.....	۱۴-۲- مراجع
۹۱.....	فصل سوم- دینامیک سیستم‌های درجه بالاتر، تقریب و شناسایی سیستم‌ها
۹۱.....	۱-۳- مقدمه
۹۲.....	۲-۳- تابع تبدیل سیستم درجه n ام
۹۵.....	۳-۳- تقریب با سیستم‌های درجه پائین‌تر
۹۵.....	۴-۳- تقریب با سیستم درجه اول
۹۶.....	۱-۴-۳- اندازه‌گیری از روی منحنی
۹۷.....	۲-۴-۳- رسم مماس در نقطه عطف
۹۸.....	۳-۴-۳- استفاده از بسط تیلور
۹۹.....	۴-۴-۳- روش تنصیف اسکوکستا
۱۰۰.....	۵-۴-۳- استفاده از مساحت بین دو منحنی

۱۰۲.....	۳-۴-۶- استفاده از منطق رگرسیون خطی
۱۰۴.....	۳-۵- تقریب با سیستم درجه دوم
۱۰۴.....	۳-۵-۱- تقریب ترسیمی سیستم غیرنوسانی با سیستم درجه دوم با زمان مرده
۱۰۶.....	۳-۵-۲- روش مساحت بین دو منحنی
۱۱۰.....	۳-۶- شناسائی سیستم بر اساس داده‌های تجربی
۱۱۲.....	۳-۷- مسائل
۱۱۴.....	۳-۸- مراجع
۱۱۵.....	فصل چهارم - سیستم حلقه بسته
۱۱۵.....	۴-۱- مقدمه
۱۱۵.....	۴-۲- سیستم کنترل دمای تانک گرمایش
۱۱۷.....	۴-۳- تابع تبدیل فرایند
۱۱۸.....	۴-۴- تابع تبدیل المان اندازه‌گیری
۱۲۰.....	۴-۵- المان نهائی کنترل
۱۲۳.....	۴-۶- دیاگرام جعبه‌ای کامل شده
۱۲۵.....	۴-۷- وجوه تاریخی سیستم‌های کنترلی
۱۲۷.....	۴-۷-۱- تابع تبدیل کنترلر P
۱۲۸.....	۴-۷-۲- کنترلر روشن/خاموش
۱۲۹.....	۴-۷-۳- تابع تبدیل کنترلر PI
۱۳۰.....	۴-۷-۴- تابع تبدیل کنترلر PD
۱۳۰.....	۴-۷-۵- تابع تبدیل کنترلر PID
۱۳۱.....	۴-۷-۶- حذف جهش عمل مشتقی در کنترلر PID
۱۳۳.....	۴-۸- تابع تبدیل حلقه بسته
۱۳۸.....	۴-۹- پاسخ گذرای سیستم حلقه بسته
۱۵۰.....	۴-۱۰- استراتژیهای چندحلقه‌ای و پیشرفته
۱۵۰.....	۴-۱۰-۱- کنترل سری متداخل
۱۵۳.....	۴-۱۰-۲- کنترل ضمنی
۱۵۳.....	۴-۱۰-۳- کنترل فیدفوروارد و فیدفوروارد- فیدبک

۱۵۵.....	۴-۱۰-۴- کنترل نسبی
۱۵۶.....	۴-۱۱- مسائل
۱۶۲.....	۴-۱۲- مراجع
۱۶۳.....	فصل پنجم - پایداری، مکان ریشه‌ها و روش‌های طراحی کنترلر
۱۶۳.....	۵-۱- مقدمه
۱۶۳.....	۵-۲- پایداری سیستم‌ها
۱۶۷.....	۵-۳- مکان ریشه‌ها
۱۶۹.....	۵-۴- تست روث
۱۷۲.....	۵-۵- رسم تقریبی دیاگرام مکان ریشه‌ها
۱۷۶.....	۵-۶- معیارهای تعیین مکان ریشه‌ها
۱۸۵.....	۵-۷- بررسی رفتار و طراحی کنترلر
۱۸۶.....	۵-۸- روش جانشانی قطب و صفر
۱۹۱.....	۵-۹- معیارهای انتگرالی در طراحی کنترلر
۱۹۸.....	۵-۱۰- روابط تنظیم کنترلر
۱۹۹.....	۵-۱۰-۱- روش کوهن- کُن
۲۰۱.....	۵-۱۰-۲- روش اسمیت-کوریپو
۲۰۱.....	۵-۱۰-۳- روش هاگلند-آستروم
۲۰۲.....	۵-۱۱- روش‌های مبتنی بر مدل
۲۰۳.....	۵-۱۱-۱- روش مستقیم
۲۰۵.....	۵-۱۱-۲- کنترل مدل داخلی
۲۰۹.....	۵-۱۱-۳- روابط تنظیم IMC
۲۱۰.....	۵-۱۱-۴- جبران‌کننده زمان مرده
۲۱۳.....	۵-۱۲- مسائل
۲۱۶.....	۵-۱۳- مراجع
۲۱۷.....	فصل ششم - روش پاسخ فرکانسی در مطالعه دینامیک و طراحی کنترلر
۲۱۷.....	۶-۱- مقدمه
۲۱۸.....	۶-۲- قانون جایگذاری

۲۲۰.....	۳-۶- دیاگرامهای مربوط به پاسخ فرکانسی
۲۲۱.....	۴-۶- دیاگرام بُد
۲۲۷.....	۵-۶- دیاگرام بد برای حاصلضرب چند سیستم
۲۳۲.....	۶-۶- مفهوم معیار پایداری بُد
۲۳۳.....	۷-۶- طراحی کنترلر بر اساس پاسخ فرکانسی
۲۳۸.....	۸-۶- حاشیه بهره و حاشیه فاز
۲۴۰.....	۹-۶- دیاگرام نایکوئیست
۲۴۲.....	۱۰-۶- معیار پایداری نایکوئیست
۲۴۵.....	۱۱-۶- توابع حساسیت
۲۴۶.....	۱۲-۶- روش تجربی تنظیم کنترلر روی خط
۲۴۷.....	۱۳-۶- مسائل
۲۴۹.....	۱۴-۶- مراجع
۲۵۱.....	فصل هفتم - مثال‌های عملی در کنترل فرآیندها
۲۵۱.....	۱-۷- مقدمه
۲۵۱.....	۲-۷- سیستم کنترل دما
۲۵۲.....	۱-۲-۷- مدل‌سازی سیستم دما
۲۵۴.....	۲-۲-۷- دیاگرام جبهه‌ای سیستم حلقه بسته
۲۵۵.....	۳-۲-۷- کنترل تعقیب کننده دما
۲۵۷.....	۳-۷- کنترل دمای راکتور نایبوسته پلیمریزاسیون
۲۵۸.....	۱-۳-۷- تابع تبدیل راکتور
۲۶۱.....	۲-۳-۷- طراحی کنترلر
۲۶۳.....	۴-۷- مراجع
۲۶۵.....	فصل هشتم - روش فضای حالت در مطالعه دینامیک و کنترل فرآیندها
۲۶۵.....	۱-۸- مقدمه
۲۶۶.....	۲-۸- مدل فضای حالت
۲۷۴.....	۳-۸- انتقال حالت
۲۷۸.....	۴-۸- پاسخ دینامیکی بر اساس معادلات حالت

۲۸۱.....	۵-۸- مشاهده پذیری و کنترل پذیری
۲۸۳.....	۶-۸- طراحی قانون کنترلی
۲۸۴.....	۸-۶-۱- روش هاتشانی قطب با استفاده از فیدبک حالت کامل
۲۸۹.....	۸-۶-۲- فرمول کِرمَن
۲۹۰.....	۷-۸- فیدبک حالت کامل با ورودی مرجع
۲۹۴.....	۸-۸- انتخاب محل مناسب قطب
۲۹۵.....	۹-۸- سیستم کنترل بهینه
۲۹۸.....	۸-۱۰- مسائل
۳۰۰.....	۸-۱۱- مراجع
۳۰۱.....	فصل نهم - نمونه برداری، فیلتر کردن و کنترل عددی
۳۰۱.....	۹-۱- مقدمه
۳۰۱.....	۹-۲- نمونه برداری
۳۰۳.....	۹-۳- ساخت مجدد سیگنال
۳۰۴.....	۹-۴- پردازش سیگنال و فیلتر کردن
۳۰۷.....	۹-۵- توسعه مدل گسسته در فضای زمان
۳۰۹.....	۹-۶- تبدیل z
۳۱۱.....	۹-۷- کنترلر عددی
۳۱۲.....	۹-۸- شکل گسسته کنترلرها
۳۱۲.....	۹-۸-۱- شکل گسسته کنترلر P
۳۱۲.....	۹-۸-۲- شکل گسسته کنترلر PI
۳۱۳.....	۹-۸-۳- شکل گسسته کنترلر PD
۳۱۳.....	۹-۹- مسائل
۳۱۴.....	۹-۱۰- مراجع
۳۱۵.....	ضمیمه الف - سیستم کنترل دما
۳۱۵.....	الف-۱- مقدمه
۳۱۶.....	الف-۲- مشخصات دستگاه
۳۱۹.....	الف-۳- مدارهای واسط الکترونیکی

الف-۴- کامپیوتر و کارت I/O.....	۲۲۴
الف-۵- کنترلر.....	۲۲۵
ضمیمه ب - مروری بر روش تبدیل لاپلاس.....	۲۲۷
ب-۱- مقدمه.....	۲۲۷
ب-۲- تعریف تبدیل لاپلاس.....	۲۲۷
ب-۳- تبدیل لاپلاس مشتق و انتگرال یک تابع.....	۲۲۸
ب-۴- انتقال روی محور s و محور t	۲۳۰
ب-۵- کسرهای جزئی.....	۲۳۰
ب-۶- ماهیت کیفی جواب.....	۲۳۲
ب-۷- قضیه‌های مقدار نهائی و مقدار اولیه.....	۲۳۴
ب-۸- مسائل.....	۲۳۴
ضمیمه ج - مقدمات MATLAB و جعبه‌ابزار کنترل.....	۲۳۷
ج-۱- مقدمه.....	۲۳۷
ج-۲- وارد کردن داده.....	۲۳۸
ج-۳- دستورهای ساده ریاضی.....	۲۳۹
ج-۴- فضای کاری MATLAB.....	۲۴۰
ج-۵- ضبط کردن و خواندن مجدد داده‌ها.....	۲۴۰
ج-۶- فرمت نمایش اعداد.....	۲۴۱
ج-۷- قواعد نام‌گذاری.....	۲۴۱
ج-۸- ملاحظات و علانم.....	۲۴۲
ج-۹- اعداد موهومی.....	۲۴۲
ج-۱۰- توابع ریاضی.....	۲۴۲
ج-۱۱- فایل Script.....	۲۴۵
ج-۱۲- مدیریت فایل.....	۲۴۶
ج-۱۳- دستورهای کنترل صفحه.....	۲۴۶
ج-۱۴- فرمان‌های کمک.....	۲۴۷
ج-۱۵- آرایه‌ها.....	۲۴۷

ج-۱۶- جبر ماتریس ها	۳۴۹
ج-۱۷- توابع ماتریس ها	۳۵۱
ج-۱۸- عملیات نسبی و منطقی	۳۵۳
ج-۱۹- جمله	۳۵۴
ج-۲۰- دستورهای کنترل جریان	۳۵۶
ج-۲۱- ساختار فایل های m	۳۵۷
ج-۲۲- ترسیم	۳۵۸
ج-۲۳- توابع تحلیل داده ها	۳۶۰
ج-۲۴- اعمال چند جمله ای ها	۳۶۱
ج-۲۵- برازش منحنی و درون یابی	۳۶۲
ج-۲۶- آنالیز عددی	۳۶۲
ج-۲۶-۱- دستور fplot	۳۶۲
ج-۲۶-۲- می نیم یابی	۳۶۲
ج-۲۶-۳- ریشه یابی	۳۶۳
ج-۲۶-۴- انتگرال گیری	۳۶۳
ج-۲۷- جعبه ابزار کنترلی در MATLAB	۳۶۳
ج-۲۸- دستورهای تعریف مدل	۳۶۴
ج-۲۹- دستورهای تبدیل مدل ها بیکدیگر	۳۶۴
ج-۳۰- پاسخ های حوزه زمان	۳۶۴
ج-۳۱- آنالیز حوزه فرکانس	۳۶۵
ج-۳۲- دستورهای ساده سازی مدل	۳۶۵
ج-۳۳- طراحی جبران کننده	۳۶۵
ج-۳۴- طراحی جبران کننده LQR/LQG	۳۶۶
ج-۳۵- مدل فضای حالت	۳۶۶
ضمیمه د - مقدمات Simulink	۳۶۷
د-۱- مقدمه	۳۶۷
د-۲- اجرای simulink	۳۶۸

۳۷۱	د-۳- ساخت مدل توسط m- فایل
۳۷۲	ضمیمه ه- مروری بر ماتریس ها و دترمینان ها
۳۷۳	ه-۱- مقدمه
۳۷۳	ه-۲- مفاهیم اساسی
۳۷۶	ه-۳- جبر ماتریس ها
۳۷۶	ه-۴- دترمینان
۳۷۸	ه-۵- معکوس ماتریس
۳۷۹	ه-۶- دستگاه معادلات
۳۷۹	ه-۷- مشتق و انتگرال ماتریس
۳۷۹	ه-۸- مقدارهای مشخصه و بردارهای مشخصه ماتریس
۳۸۰	ه-۹- دستگاه معادلات دیفرانسیل
۳۸۳	ه-۱۰- تابع نمائی ماتریس
۳۸۳	ه-۱۱- روش تبدیل لاپلاس در حل معادله های حالت همگن
۳۸۴	ه-۱۲- حل معادلات حالت ناهمگن
۳۸۷	ضمیمه و- مطالب اضافی
۳۸۷	و-۱- بهینه سازی
۳۸۸	و-۲- اعداد موهومی
۳۸۹	و-۳- رسم در مختصات لگاریتمی
۳۹۰	و-۴- اثبات قانون جایگذاری
۳۹۱	و-۵- اثبات قواعد رسم تقریبی مکان ریشه ها
۳۹۵	مراجع
۳۹۷	مبایه
۴۰۳	راژه نامه فارسی به انگلیسی
۴۱۱	راژه نامه انگلیسی به فارسی

پیشگفتار

کنترل فرایندها در نتیجه گسترش رقابت جهانی، تغییر سریع شرایط اقتصادی، و قوانین زیست محیطی، جزء لاینفک عملیات واحدهای صنعتی می باشند. این مهم با داشتن حداقل اطلاعات در خصوص مهندسی کنترل پدید می آید. زبان کنترل کمی دور از ادبیات معمول رشته های مهندسی شیمی، پلیمر و متالورژی است و نیاز به ممارست ویژه ای دارد. در چهار دهه گذشته مبحث مهندسی کنترل پیشرفتهای زیادی داشته است. بگونه ای که بدون استفاده از نرم افزارها و منطق های جدید کنترلی، آموزش کنترل آگزر غیرممکن نباشد، بسیار دشوار است. این کتاب ماحصل پانزده سال تحقیق و یازده سال آموزش در این زمینه در رشته های مختلف نظیر مهندسی شیمی، مهندسی پلیمر و مهندسی متالورژی در دانشگاه و صنعت می باشد.

هماهنگی تئوری و عمل که در مهندسی کنترل دیده می شود، در دیگر زمینه های مهندسی کم نظیر است. این هماهنگی باعث گردیده است که استفاده صحیح تئوری کنترل منجر به طراحی کنترلی شود تا بر فرآیند در دنیای واقعی بخوبی عمل نماید. با کاهش قیمت و گسترش روزافزون سیستم های دیجیتال، قابلیت اعمال سیستم های کنترلی پیچیده ای نیز ایجاد شده است.

کنترل بر هیچکس پدیده ناشناخته ای نیست. کلیه افراد با هر پیشینه و سطح تحصیلات بطور غریزی از مفاهیم کنترل در زندگی روزمره بهره می گیرند. اما در آموزش کلاسیک سعی بر آن است که مفاهیم به درستی تعریف شده و بطور سیستماتیک کنار هم گذاشته شوند تا منجر به نتیجه مطلوب و درک عمیق و عملی از کنترل شوند. تاکنون، کتاب های ارزشمندی در این زمینه، حتی به زبان فارسی نیز، به چاپ رسیده است، اما در این کتاب سعی شده است علاوه بر ارائه تئوری، از نتایج آزمایشگاهی نیز استفاده شود. ضمناً از نرم افزار MATLAB و Simulink استفاده شده است. به جرات می توان گفت امروزه بخش مهم آموزش، کنترل است.

این کتاب با هدف کتاب درسی برای یک درس سه واحدی در مقطع لیسانس تهیه شده است. جدول زیر بوجه بندی پیشنهادی را ارائه می نماید. البته، در صورت نیاز و صلاحدید می توان بخشی را حذف و زمان بیشتری را به مباحث دیگر تخصیص داد.

با توجه به تفاوت ادبیات مهندسی کنترلی، سعی گردیده از مثال های ساده شروع شود و مثال های کاربردی نیز ارائه گردند. به دانشجویان توصیه می شود مبانی را بخوبی فرا گرفته و در عمل سعی نمایند آنها را بر فرآیند در دست اعمال نمایند.

ردیف	موضوع	تعداد جلسه
۱	ارائه سیلابس درس، روش ارزیابی، مثال مقدماتی و مفاهیم اساسی مهندسی کنترل	یک
۲	مروری بر روش تبدیل لاپلاس در حل معادلات دیفرانسیل (در صورت لزوم)	یک
۳	سیستم حلقه باز - سیستم درجه اول	سه
۴	سیستم حلقه باز - سیستم درجه دوم	سه
۵	سیستم حلقه باز -- سیستم درجه بالاتر	دو
۶	مفاهیم حلقه بسته، دیاگرام جعبه‌ای و تابع تبدیل آن	سه
۷	مکان ریشه‌ها و بررسی رفتار حلقه بسته با آن	سه
۸	تنظیم کنترلر با معیارهای انتگرالی و روابط تجربی	سه
۹	دیاگرام بُد و معیار پایداری بُد	دو
۱۰	تنظیم کنترلر در روش پاسخ فرکانسی	دو
۱۱	معیار پایداری نایکویست	یک
۱۲	مدل فضای حالت در دینامیک فرآیندها	دو
۱۳	قانون کنترلی فیدبک حالت	دو
۱۴	مقدمات کنترل عددی	دو

در پایان از کلیه عزیزانی که تلاش آنها منجر به چاپ این کتاب شده تقدیر می‌نمایم و امیدوارم این کتاب مبنای قدمی رو به جلو در سیستم آموزش عالی باشد. نویسنده نظرات و پیشنهادات ارزشمند شما به آدرس: mehdi@aut.ac.ir را پاس می‌دارد.

مهدی رفیع‌زاده

خرداد ۱۳۸۸