

# کنترل تطبیقی

دکتر حمیدرضا رضاعلیخانی  
مهندس رضا اعظمی لریستانی

نیاز دانش

|                     |  |
|---------------------|--|
| سرشناسه             | : رضاعلیخانی، حمیدرضا، ۱۳۳۱                            |
| عنوان و نام پدیدآور | : کنترل تطبیقی / حمیدرضا رضاعلیخانی، رضا اعظمی لرستانی |
| مشخصات نشر          | : تهران: نیاز دانش، ۱۳۹۷                               |
| مشخصات ظاهری        | : ۴۸۰ ص.: مصور، جدول، نمودار                           |
| شابک                | : ۹۷۸-۶۰۰-۸۹۰۶-۱۹-۳                                    |
| وضعیت فهرست‌نویسی   | : فیپا   |
| یادداشت             | : کتابنامه   |
| موضوع               | : سیستم‌های کنترل تطبیقی                               |
| شناسه افزوده        | : اعظمی لرستان، رضا، ۱۳۶۸                              |
| رده بندی کنگره      | : TJ ۲۱۷/۶ک۹ ۱۳۹۷                                      |
| رده بندی دیویی      | : ۶۲۹/۸۳۶  |
| شماره کتابشناسی ملی | : ۵۱۶۴۹۶۳  |

Adaptive control systems



|                           |   |
|---------------------------|---|
| نام کتاب                  | : کنترل تطبیقی                                      |
| مؤلفین                    | : دکتر حمیدرضا رضاعلیخانی - مهندس رضا اعظمی لرستانی |
| مدیر اجرایی - ناظر بر چاپ | : حمیدرضا محمد شیرازی - محمد شمس                    |
| ناشر                      | : نیاز دانش   |
| صفحه آرا                  | : واحد تولید انتشارات نیاز دانش                     |
| نوبت چاپ                  | : اول - ۱۳۹۷  |
| شمارگان                   | : ۱۰۰ نسخه  |
| قیمت                      | : ۴۵۰۰۰۰ ریال                                       |

ISBN:978-600-8906-19-3

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۸۹۰۶-۱۹-۳

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

کلیه حقوق این اثر برای ناشر محفوظ است.

آدرس انتشارات: تهران، میدان انقلاب، خیابان ۱۲ فروردین، تقاطع وحید نظری، پلاک ۲۵۵، طبقه ۱، واحد ۲

۰۲۱-۶۶۴۷۸۱۰۶-۶۶۴۷۸۱۰۸-۰۹۱۲۷۰۷۳۹۳۵

www.Niaze-Danesh.com

مشاوره جهت نشر: ۲۱۰۶۷۰۹ - ۰۹۱۲

تعریفی که از کنترل تطبیقی در دانشنامه آزاد آمده است به شرح زیر است:

"هدف از استفاده از کنترل تطبیقی (به انگلیسی: Adaptive control) آن است که کنترلر طراحی شده بدین روش، بتواند در مقابل تغییرات آرام در سیستم و همچنین خطاهای مدل‌سازی پاسخ مناسب بدهد. تفاوت کنترل تطبیقی و کنترل مقاوم آن است که در کنترل تطبیقی نیازی به دانستن بازه کاری سیستم یا میزان خطای پارامترها نیست. به عبارتی، طراحی از دیدگاه کنترل مقاوم به کنترلی می‌انجامد که در بازه مشخصی به پایداری سیستم می‌انجامد بدون آنکه نیازی به تغییر قوانین کنترلی باشد، ولی، با روش کنترل تطبیقی می‌توان قوانین کنترلی را به گونه‌ای با تغییر شرایط تطبیق داد که سیستم پایدار شود."

ما در اینجا به عنوان مقدمه، به همین توضیح اکتفا می‌کنیم تا جذابیت و دیدگاه‌های محتوایی کتاب حفظ گردد. این کتاب اقتباسی از برخی کتب مهم در زمینه کنترل تطبیقی می‌باشد. دو پیش‌فصل با عنوان‌های "ریاضیات مقدماتی ۱" و "ریاضیات مقدماتی ۲" در خلال فصل‌های کتاب گنجانده شده است که پیشنهاد می‌شود برای فهم و درک بهتر مطالب کتاب، خوانندگان تسلط کافی بر روی این دو پیش‌فصل داشته باشند. در قسمت پیوست‌ها و به منظور مطالعه آزاد مبحثی با عنوان L1 Adaptive آورده شده است. همانطور گفته شد این فصل به عنوان مطالعه آزاد در این کتاب آورده شده است لذا از باز کردن مطالب آن صرف نظر شده است و تحقیق در این زمینه را به خواننده واگذار می‌نماییم. امید است که این کتاب بتواند راهگشا در فهم و تسلط دانشجویان در این زمینه باشد.

در آخر از سرکار خانم مریم مقدسی که ما را در انجام این اثر یاری و همکاری کردند کمال تشکر و قدر دانی را داریم. از همه اساتید، دانشجویان و همه کسانی که این کتاب را مورد مطالعه قرار می‌دهند تقاضا داریم که نظرات و پیشنهادات خود را به ادرس ایمیل زیر با ما در میان بگذارند.



## فهرست مطالب

### فصل ۱ مقدمه ..... ۹

- ۱-۱) کنترل تطبیقی: مبتنی بر شناساگر ..... ۱۰  
۱-۲) کنترل تطبیقی: Non-Identifier-Based (مبتنی بر بدون شناساگر) ..... ۱۴  
۱-۲-۱) زمان بندی بهره ..... ۱۴  
۱-۲-۲) مدل های چندگانه، روش های تحقیق، و ساختارهای سوئیچینگ ..... ۱۵  
۱-۳) چرا کنترل تطبیقی ..... ۱۷  
۱-۴) خلاصه تاریخچه ..... ۱۹

### فصل ۲ مدل های پارامتری ..... ۲۳

#### ریاضیات مقدماتی ۱ ..... ۳۹

- PR1-1) تئوری سیستم ..... ۳۹  
PR1-2) چند جمله ای های اول ..... ۴۲  
PR1-3) نرم ها و فضاها ..... ۴۴  
PR1-4) ویژگی های توابع و ماتریس ها ..... ۴۷  
PR1-5) پایداری ورودی / خروجی ..... ۵۰  
PR1-6) فرض Bellman-Gronwall ..... ۵۶

### فصل ۳ شناسایی پارامتر: زمان پیوسته ..... ۵۷

- ۳-۱) مقدمه ..... ۵۷  
۳-۲) مثال: حالت یک پارامتری ..... ۵۸  
۳-۳) مثال: دو پارامتری ..... ۶۳  
۳-۴) پایایی تحریک و ورودی های نسبتاً غنی ..... ۶۵  
۳-۵) مثال: مسئله بردار ..... ۶۸  
۳-۶) الگوریتم های گرادینت مبتنی بر مدل خطی ..... ۷۰  
۳-۶-۱) الگوریتم گرادینت با تابع هزینه لحظه ای ..... ۷۱  
۳-۶-۲) الگوریتم گرادینت با تابع هزینه انتگرال ..... ۷۶  
۳-۷) الگوریتم های کمترین مربعات ..... ۷۷  
۳-۷-۱) الگوریتم بازگشتی LS با فاکتور (ضریب) فراموشی ..... ۷۹  
۳-۷-۲) الگوریتم مطلق LS ..... ۸۰

- ۳-۷-۳) الگوریتم‌های اصلاح شده LS..... ۸۳
- ۳-۸) شناسایی پارامتر براساس DPM..... ۸۵
- ۳-۹) شناسایی پارامتر بر مبنای B-SPM..... ۸۶
- ۳-۱۰) تصویر کردن پارامتر..... ۸۹
- ۳-۱۱) شناسایی پارامتر مقاوم..... ۹۳
- ۳-۱۱-۱) مثال ناپایداری..... ۹۵
- ۳-۱۱-۲) تحریک غالباً غنی..... ۹۶
- ۳-۱۲) قوانین تطبیقی مقاوم..... ۱۰۲
- ۳-۱۲-۱) نرمالیزاسیون دینامیکی..... ۱۰۳
- ۳-۱۲-۲) قوانین تطبیقی مقاوم:  $\sigma$ -اصلاح..... ۱۰۵
- ۳-۱۲-۳) تصویرگر پارامتر..... ۱۱۲
- ۳-۱۲-۴) منطقه مرده..... ۱۱۵
- ۳-۱۳) شناساگرهای فضای حالت..... ۱۱۸
- ۳-۱۴) رویت‌گرهای تطبیقی..... ۱۲۱
- ۳-۱۵) (مورد مطالعاتی) کاربران در لینک Bottleneck شبکه کامپیوتری..... ۱۲۴

## فصل ۴

### شناسایی پارامتر زمان گسسته

- ۴-۱) مقدمه..... ۱۳۷
- ۴-۲) گسسته‌سازی قوانین تطبیقی زمان پیوسته..... ۱۴۱
- ۴-۳) مدل پارامتری زمان گسسته..... ۱۴۳
- ۴-۴) ورودی‌های نسبتاً غنی..... ۱۴۵
- ۴-۵) الگوریتم‌های گرادیان..... ۱۴۷
- ۴-۵-۱) الگوریتم تصویرگر..... ۱۴۷
- ۴-۵-۲) الگوریتم گرادیان براساس هزینه آنی (لحظه‌ای)..... ۱۴۹
- ۴-۶) الگوریتم‌های LS..... ۱۵۰
- ۴-۶-۱) LS مطلق..... ۱۵۰
- ۴-۷) الگوریتم‌های LS اصلاح شده..... ۱۵۶
- ۴-۹) تصویرگر پارامتر..... ۱۵۸
- ۴-۱۰) شناسایی پارامتر مقاوم..... ۱۶۳
- ۴-۱۰-۱) تحریک غالباً غنی..... ۱۶۴
- ۴-۱۰-۲) اصلاحات قوام..... ۱۶۷
- ۴-۱۰-۳) تصویرگر پارامتر..... ۱۷۳
- ۴-۱۱) مورد مطالعاتی: تخمین پارامتر آنالین ویژگی‌های جریان ترافیک..... ۱۷۵

### ریاضیات مقدماتی ۲

- PR2-1-2) روش مستقیم لیپانوف..... ۱۸۷
- PR2-1-3) توابع شبه لیپانوف..... ۱۹۱
- PR2-1-4) روش غیر مستقیم لیپانوف..... ۱۹۲
- PR2-2) پایداری سیستم‌های خطی..... ۱۹۳
- PR2-3) مثبت‌پذیری و پایداری..... ۱۹۷
- PR2-4) روش‌های بهینه‌سازی..... ۲۰۰
- PR2-4-1) پیش‌زمینه علامت‌گذاری و ریاضی..... ۲۰۰
- PR2-4-2) روش شیب نزولی..... ۲۰۲
- PR2-4-3) روش تصویرگر گرادیان..... ۲۰۳
- PR2-5) لم‌های swapping..... ۲۰۶
- PR2-6) سیستم‌های زمان گسسته..... ۲۰۹
- PR2-6-1) تئوری پایداری لیپانوف..... ۲۰۹

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| ۲۱۹.....I/O پایداری (PR2-6-4)     | ۲۱۶.....توابع حقیقی مثبت (PR2-6-2)        |
| ۲۲۱.....swapping لم‌های (PR2-6-5) | ۲۱۸.....پایداری سیستم‌های آشفته (PR2-6-3) |

## فصل ۵

|   |   |
|---|---|
| ۲۲۳.....کنترل تطبیقی مدل مرجع زمان پیوسته                     |   |
| ۲۲۳.....مقدمه (۵-۱)   |   |
| ۲۵۶.....MRAC مستقیم با قوانین تطبیقی نرمالیزه نشده (۵-۴)      | ۲۲۶.....طرح‌های MRAC ساده (۵-۲)                                     |
| ۲۵۶.....درجه نسبی (۵-۴-۱)                                     | ۲۲۶.....مثال اسکالری: تنظیم تطبیقی (۵-۲-۱)                          |
| ۲۶۰.....درجه نسبی (۵-۴-۲)                                     | ۲۲۶.....مثال اسکالری: MRAC مستقیم بدون نرمالیزاسیون (۵-۲-۲)         |
| ۲۶۴.....درجه نسبی بزرگتر از ۲ (۵-۴-۳)                         | ۲۳۰.....نرمالیزاسیون (۵-۲-۳)  |
| ۲۶۴.....MRAC مستقیم با قوانین تطبیقی نرمالیزه شده (۵-۵)       | ۲۳۲.....بدون نرمالیزاسیون (۵-۲-۴)                                   |
| ۲۶۷.....MRAC غیرمستقیم (۵-۶)                                  | ۲۳۵.....مثال اسکالری: MRAC مستقیم با نرمالیزاسیون (۵-۲-۵)           |
| ۲۶۷.....MRAC غیرمستقیم با قوانین تطبیقی نرمالیزه نشده (۵-۶-۱) | ۲۴۰.....مثال اسکالری: MRAC غیرمستقیم با نرمالیزاسیون (۵-۲-۶)        |
| ۲۶۷.....MRAC غیرمستقیم با قانون تطبیقی نرمالیزه (۵-۶-۲)       | ۲۴۵.....مسئله برداری (سیستم مرتبه n): اندازه‌گیری حالت کامل (۵-۲-۶) |
| ۲۷۲.....MRAC مقاوم (۵-۷)                                      | ۲۴۷.....MRC برای دستگاه‌های SISO (۵-۳)                              |
| ۲۷۳.....MRC: پارامترهای دستگاه معلوم (۵-۷-۱)                  | ۲۴۷.....بیان مسئله (۵-۳-۱)  |
| ۲۷۸.....MRAC مستقیم مقاوم (۵-۷-۲)                             | ۲۴۷.....MRC: پارامترهای دستگاه شناخته شده (۵-۳-۲)                   |
| ۲۹۲.....طراحی کنترل کروز تطبیقی (۵-۸)                         |   |
| ۲۹۷.....کنترل حالت تطبیقی هواپیما (۵-۹)                       |   |

## فصل ۶

|   |  |
|---|--|
| ۳۱۳.....کنترل جایابی قطب تطبیقی زمان پیوسته |  |
| ۳۱۴.....مقدمه (۶-۱)                         |  |
| ۳۱۴.....مثال اسکالری: تنظیم تطبیقی (۶-۲-۱)  | ۳۱۳.....طرح‌های APPC ساده: بدون نرمالیزاسیون (۶-۲) |
| ۳۱۸.....مثال اسکالری: ردیابی تطبیقی (۶-۲-۲) | ۳۱۴.....طرح‌های APPC: روش چندجمله‌ای (۶-۳)         |

|  |   |
|--|---|
| ۶-۵) کنترل درجه دوم خطی تطبیقی.....۳۳۶   | ۶-۲-۷) قوانین تطبیقی مقاوم برای طرح‌های     |
| ۶-۶) موضوعات پایدارپذیری و APPC          | APPC.....۳۴۷                                |
| اصلاح شده.....۳۴۱                        | ۶-۳-۷) APPC مقاوم: روش چند جمله‌ای-۳۴۹      |
| ۶-۶-۱) مثال ساده عدم پایدارپذیری.....۳۴۱ | ۶-۸) مورد مطالعاتی: طراحی ALQC برای         |
| ۶-۶-۲) طرح‌های APPC اصلاح شده.....۳۴۳    | هوایمای جنگی F-16.....۳۵۳                   |
| ۶-۷) طرح‌های APPC مقاوم.....۳۴۵          | ۶-۸-۱) طراحی کنترل LQ با زمان‌بندی بهره-۳۵۶ |
| ۶-۷-۱) PPC: پارامترهای معلوم.....۳۴۵     | ۶-۸-۲) طراحی کنترل LQ تطبیقی.....۳۵۶        |

## فصل ۷

|                              |  |
|------------------------------|--|
| ۷-۱) مقدمه.....۳۶۵           | کنترل تطبیقی برای سیستم‌های زمان گسسته.....۳۶۵ |
| ۷-۲) MRAC.....۳۶۵            | ۷-۲-۴) MRAC غیرمستقیم.....۳۷۵                  |
| ۷-۲-۱) مثال اسکالری.....۳۶۶  | ۷-۳) کنترل و پیش‌بین تطبیقی.....۳۷۸            |
| ۷-۲-۲) مورد کلی: MRC.....۳۶۹ | ۷-۳-۱) کنترل یک پله به جلوی تطبیقی.....۳۸۳     |
| ۷-۲-۳) MRAC مستقیم.....۳۷۲   | ۷-۴) APPC.....۳۸۵                              |

## فصل ۸

|   |   |
|---|---|
| ۸-۱) مقدمه.....۳۹۷                        | کنترل تطبیقی سیستم‌های غیرخطی.....۳۹۷     |
| ۸-۲) خطی سازی فیدبک.....۳۹۸               | ۸-۷) کنترل تطبیقی عصبی.....۴۱۹            |
| ۸-۳) توابع کنترل لیاپانوف.....۴۰۵         | ۸-۷-۱) شبکه‌های عصبی برای شناسایی.....۴۲۰ |
| ۸-۴) پسگام‌ها (Back stepping).....۴۰۷     | ۸-۷-۲) کنترل تطبیقی عصبی.....۴۲۳          |
| ۸-۵) پسگام تطبیقی با توابع تنظیم.....۴۱۲  | ۸-۸) مورد مطالعاتی: کنترل غیرخطی تطبیقی   |
| ۸-۶) پسگام تطبیقی با میرایی غیرخطی: طراحی | ردیابی مسیر وسیله نقلیه.....۴۲۹           |
| مودولار.....۴۱۶                           |   |

|                 |  |
|-----------------|--|
| پیوست B.....۴۳۹ |  |
| مراجع.....۴۶۹   |  |