



کنترل خودکار موشک و هواپیما

(ویرایش دوم)

تألیف:

جان اچ. بلیک لای

ترجمه:

مهندس محمدعلی الهیان

دکتر ابوالقاسم نقاش

عضو هیأت علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

دکتر رضا اسماعیل زاده

عضو هیأت علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

پاییز ۱۴۰۱

سرشناسه	: بلیک لاک، جان Blake lock, John H.
عنوان و نام پدیدآور	: کنترل خودکار موشک و هواپیما/ تألیف جان اچ. بلیک لاک؛ ترجمه محمدعلی الهیان، ابوالقاسم نقاش، رضا اسماعیل زاده.
وضعیت ویراست	: ویراست ۲.
مشخصات نشر	: تهران: دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، ۱۳۹۰.
مشخصات ظاهری	: ۷۰۰ ص.
شابک	: ۱۲۶۰۰۰ ریال: ۳-۲۶۹-۴۶۳-۹۶۴-۹۷۸
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا
یادداشت	: عنوان اصلی: Automatic control of aircraft and missiles, 2 nd ed, c1991.
یادداشت	: واژه نامه.
یادداشت	: کتابنامه.
یادداشت	: نمایه.
موضوع	: هدایتگر خودکار (هواپیماها).
موضوع	: موشک های هدایت شونده - سامانه های کنترل.
موضوع	: الهیان، محمدعلی، ۱۳۳۴ - ، مترجم.
موضوع	: نقاش، ابوالقاسم، ۱۳۳۸ - ، مترجم.
شناسه افزوده	: اسماعیل زاده، رضا، ۱۳۴۸ - ، مترجم.
شناسه افزوده	: دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران). مرکز نشر.
شناسه افزوده	: Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic). Publishing Center.
رده بندی کنگره	: ۱۳۹۰ ک ۸/ب ۵۸۹/۴ TL
رده بندی دیویی	: ۶۲۹/۱۳۲۶
شماره کتابشناسی ملی	: ۲۴۰۵۵۸۶



انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

عنوان کتاب	: کنترل خودکار موشک و هواپیما
تألیف	: جان اچ. بلیک لاک
ترجمه	: محمدعلی الهیان، ابوالقاسم نقاش، رضا اسماعیل زاد
ناشر	: انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)
لیتوگرافی، چاپ و صحافی	: انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)
چاپ پنجم	: پاییز ۱۴۰۱
قیمت	: ۳۳۸,۰۰۰ تومان
تیراژ	: ۵۰
شابک	: ۳-۲۶۹-۴۶۳-۹۶۴-۹۷۸ ISBN : 978-964-463-269-3

آدرس مرکز پخش: خیابان ولیعصر، روبروی خیابان بزرگمهر، فروشگاه کتاب مرکز نشر
دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران) - تلفن: ۶۶۴۹۸۸۶۸
وبسایت: <http://publication.aut.ac.ir>
حق چاپ برای ناشر محفوظ است.

**مترجمین این اثر را به خانواده خود
تقدیم می نمایند.**

پیشگفتار مترجمین

چهارم اکتبر ۱۹۵۷، خبر پرتاب نخستین سفینه فضایی روسها، اسپوتنیک، غرب را شوکه کرد و به دنبال آن تلاش شدید ایالات متحده آغاز شد تا ماهواره خود را در مدار قرار دهد. بدین ترتیب عصر فضا تبدیل به مسابقه فضا گشت. این مسابقه منجر به شکل گیری و گسترش پیشرفته ترین تکنولوژیها گردید به طوری که امروزه یکی از شاخصهای اصلی ارزیابی سطح علمی و فناوری یک جامعه در تمامی زمینه های آموزشی، تحقیقاتی و صنعتی، علوم و صنایع هوافضایی می باشد.

به منظور پیوستن به جرگه کشورهای پیشرو در علوم هوافضایی، لزوماً نیاز به تکرار این راه پر فراز و نشیب همراه با تجارب تلخ و شیرین آن نیست. منطقی است که در صورت امکان با هدف صرفه جویی در وقت و هزینه، باید از حاصل تجارب به دست آمده به وسیله دانشمندان، محققان، مدیران و صنعتگران که در این زمینه فعالیت کرده اند و می کنند نهایت استفاده را به عمل آورد.

امروزه اگرچه به یمن آشنایی مهندسين و دانشجویان به زبان انگلیسی ترجمه متون فنی شاید کمتر ضروری به نظر رسد اما نمی توان منکر شد که دسترسی به متون فارسی علاوه بر افزایش سرعت انتقال مفاهیم و انتقال تجارب مترجمین، بویژه اگر خود دست اندرکار تخصص مورد نظر باشند، این مزیت را دارد که بخشهای غافل مانده نیز مطالعه شود و همچنین کتاب ترجمه شده مبنایی برای ادامه تحقیق و در نهایت تألیف باشد.

عدم وجود کتاب مناسب در زمینه کنترل هواپیما و موشک مترجمین را بر آن داشت تا کتابی را در این زمینه تهیه و به ترجمه آن اقدام کنند. کتاب کنترل خودکار هواپیما و موشک که توسط جان اچ بلیک لاک تألیف شده برای این کار انتخاب شد. این کتاب صرفنظر از اعتبار قابل توجه مؤلف آن، یکی از کتابهای بسیار مناسبی بوده که در این زمینه منتشر شده است. این کتاب مرجع بسیار مفیدی برای

دانشجویان و مهندسين صنايع مربوط به هوافضا بوده و مباحث اصلی رشته‌های فوق را پوشش می‌دهد. این کتاب علاوه بر ارائه مطالب مهم مربوط به تمامی جنبه‌های کنترل، دارای ده پیوست بوده که در برخی از آنها اصول ریاضی و فیزیکی مباحث بنیادین مورد استفاده و در برخی دیگر اطلاعات تکمیلی مفیدی تشریح شده است.

در ترجمه کتاب سعی شده است از ترجمه واژه‌هایی که در صنايع هوافضا مصطلح شده‌اند خودداری شود چرا که این کار جز مغشوش کردن ذهن خواننده نتیجه‌ای ندارد. در پایان کتاب مفاهیم این واژه‌ها در واژه نامه ای شرح داده شده است. در ترجمه کتاب از ویرایش دوم استفاده شده است. در اینجا مراتب سپاس خود را نسبت به انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر که نهایت همکاری را در زمینه چاپ کتاب با مترجمین نمودند، ابراز داشته و همچنین از کلیه دوستانی که به روشهای مختلف ما را یاری نمودند تشکر می‌نماییم.

در پایان ذکر این نکته را ضروری می‌دانیم که ترجمه این کتاب خالی از نقص نمی‌باشد. خوشحال خواهیم شد از تذکرات و راهنمایی‌های عزیزان خواننده در جهت تقویت ترجمه مطالب این کتاب استفاده کنیم. خوانندگان می‌توانند نظرات خود را به آدرسهای زیر ارسال نمایند:

aelahian@yahoo.com, naghash@aut.ac.ir, esmaelzadeh@aut.ac.ir

بهار ۱۳۸۴

مترجمین

پیشگفتار مؤلف برای ویرایش دوم

در ویرایش دوم تمام مباحث ویرایش اول حفظ شده و اشتباهات موجود در ویرایش اول تصحیح شده‌اند. همچنین مباحث متعددی اضافه شده است که در پاراگراف ذیل مورد بحث قرار می‌گیرد.

درفصل چهار کارائی پسخور¹ $\beta - \beta$ به عنوان روشی برای تعیین مختصات در حین چرخش، با استفاده از اطلاعات هواپیمای F-15 (به عنوان یک مدل) بررسی می‌شود. فصل هفت برای تحلیل مکان هندسی ریشه‌های یک سیستم عمومی اتوپیلوت² شتاب که در بسیاری از موشکهای هدایت شونده هوا به هوا و سطح به هوا مورد استفاده قرار می‌گیرد، توسعه یافته است. استفاده از فرمان گشتاور لولا برای سطوح کنترل کانارد³ به منظور کنترل موشکهائی از قبیل AIM-9L ساییدویندر⁴ نیز مطرح می‌شود. سیستمهای هدایت این نوع موشکها و نیز موشکهای BTT⁵ در فصل جدید هشت بررسی می‌شوند. در اینجا سیستمهای هدایت تناسبی، خط دید و فرمان زاویه تقدم مورد نظر می‌باشند. مکان هندسی ریشه‌های این نوع از سیستمهای هدایت به طور کامل بررسی شده و نشان داده می‌شود که چرا هدایت تناسبی به ازای ثابت ناوبری کمتر از یک ناپایدار بوده، و به ازای یک تعقیب خالص را نتیجه می‌دهد. تداخل خروجی یک سیستم کنترل هدایت آتش همراه با تحلیل سیستم کنترل دیجیتالی مورد استفاده در هواپیمای F-15، در فصل جدید نه ارائه می‌شود. تحلیل گسسته با استفاده از روشهای مرسوم در صفحه Z و نیز با استفاده از تقریب پاده⁶ برای نمایش C^{-Ts} نگهدارنده مرتبه صفر در صفحه s، انجام می‌شود.

¹ Feedback

² Autopilot

³ Canard

⁴ Sidewinder

⁵ Bank-to-turn

⁶ Padé

نتایج شبیه‌سازی مرکب شش درجه آزادی نشان داده است که سیستم قادر به تعقیب اهدافی با سناریوهای متعدد، از جمله پرواز وارونه برای تعقیب هدفی با مانور S ضمن آنکه توپ در بخش اعظم اجرای برنامه در حال ردیابی است، را دارا می‌باشد. مطالب این فصل بر پایه تحقیقات انجام شده توسط مؤلف تحت قرارداد F33615-78-C-3145EE40 نیروی هوایی می‌باشد. تحلیل سیستمهای کنترل چند متغیره در فصل جدید ده، گنجانده شده است. فصل‌های هشت و نه ویرایش نخست، بدون هیچ تغییری، فصلهای ۱۱ و ۱۲ ویرایش جدید هستند. فصل جدید ۱۳ به روشهای مدلسازی خلبان انسانی و نیز تأثیر خلبان انسانی بر سیستم کنترل پرواز هواپیما می‌پردازد. مشتقات پایداری طولی و عرضی هواپیمائی چون F-102 با استفاده از نرم افزار کنترل و پایداری دتکام USAF در پیوست IV محاسبه شده است. چهار پیوست دیگر نیز اضافه شده است. پیوست VII استخراج معادلات حرکت در دستگاه باد را نمایش می‌دهد چرا که استفاده از این معادلات در شبیه‌سازیهای شش درجه آزادی نسبت به معادلات دستگاه بدنی مفیدتر است. پیوست VIII روشی را برای شبیه‌سازی دیجیتالی توابع تبدیل سیستمهای مرتبه اول و دوم ارائه می‌دهد. پیوست IX شامل بسط معادلات لازم برای حل مسئله کنترل آتش هوا به هوا بوده و محاسبه زمان پرواز پرتابه را نیز در بر می‌گیرد. سرانجام سیستم‌های نشانه‌روی سری A-1 تا A-4 در پیوست X توصیف می‌شوند.

مطالب جدید ویرایش دوم با کمک کامپیوتر IBM PS/2 مدل ۵۰ و با استفاده از یک سیستم واژه پرداز علمی^۳ تولید شرکت نرم افزاری TCI لاس گروسس^۱ نیو مکزیکو، و توسط مؤلف تایپ شده است.

در اینجا ما بایم از جان جی دآزو^۲ و سی ایچ هوپیس^۳ استادان انستیتو فناوری نیروی هوایی پایگاه نیروی هوایی رایت پترسون^۴ اوهایو به خاطر پیشنهادات مفیدشان برای ویرایش دوم، بخصوص مطالب فصل ده، قدردانی کنم. در انتها سپاس عمیق خود را نسبت به همسر من به خاطر تشویق، فهم و کمکش در ساعتها قرائت دستنویسها اظهار می‌دارم.

جان ایچ بلیک لای^۵
یلو اسپرینگز، اوهایو
می ۱۹۹۰

^۱ Las Cruces

^۲ John J. D'Azzo

^۳ C.H. Houpis

^۴ Wright-Patterson

^۵ John H. Blacklock

^۶ Yellow Springs

پیشگفتار مؤلف برای ویرایش اول

در سال ۱۹۵۸ وقتی در انستیتو فناوری نیروی هوایی پایگاه هوایی راییت پترسون دیتون^۱ ایالت اوهایو درسی از دوره تحصیلات تکمیلی در زمینه کنترل خودکار هواپیما و موشک ارائه می‌کردم، نطفه این کتاب بسته شد. این کتاب برای استفاده حرفه‌ای و دوره تحصیلات تکمیلی نوشته شده است هرچند مطالب آن بگونه‌ای است که می‌توان در سال آخر دوره کارشناسی هم مورد استفاده قرار داد.

چهار فصل اول قسمت عمده کتاب را تشکیل می‌دهد و اغلب تحلیل‌های مفصل سیستم‌های کنترل خودکار مختلف را شامل می‌شود. در فصل یک معادلات شش درجه آزادی یک جسم صلب به صورت کامل بدست آورده می‌شوند و سپس بحث خطی سازی و جداسازی معادلات حرکت مطرح می‌شود. سپس معادلات طولی سه درجه آزادی همراه با مشتقات پایداری طولی تعیین شده و این روند با تعیین توابع تبدیل طولی یک هواپیمای جت مسافری به ازای ورودی الویتور^۲ دنبال می‌شود. پاسخ گذرای هواپیما و نیز اثر تغییر وضعیت دورانی و سرعت بر پاسخ طولی هواپیما با استفاده از منحنی‌های حاصل از کامپیوتر آنالوگ نشان داده شده است. در فصل دو، سیستم‌های کنترل مختلف با استفاده از روش‌های مکان هندسی ریشه‌ها همراه با تحلیل کامل و طراحی یک کوپلر شیب گلاید^۳ (GSC) و کنترل خودکار فلر^۴، شامل کنترل خودکار سرعت، و نیز نتایج بدست آمده از شبیه سازی آنالوگ، مورد بررسی قرار می‌گیرند. در فصل‌های سه و چهار از الگوی مشابهی با سه معادله عرضی استفاده می‌شود. سیستم‌های کنترل بررسی شده در فصل چهار، شامل میرا کردن داچ رول^۵، روش‌های مختلف حصول هماهنگی در جین دور زدن (با حداقل سازی لغزش جانبی)، تحلیل کامل اتوپایلوت عرضی و طراحی کوپلر سمت نمایی است که وقتی با GSC و کنترل خودکار فلر بکار گرفته می‌شود یک سیستم خودکار فرود ایجاد

^۱ Dayton

^۲ Elevator

^۳ Glide Slope Coupler

^۴ Automatic flare control

^۵ Dutch roll

می‌کند. فصل پنج با بررسی اثرات تداخل اینرسی^۱ ادامه می‌یابد که شامل سیستم کنترلی برای جبران ناپایداری ناشی از اثر فوق می‌باشد. مبحث اتوپایلوتهای تطبیقی در فصل شش بررسی می‌شود و شامل بحثی از انواع اولیه سیستم کنترل تطبیقی مورد استفاده در هواپیماهای X-15 می‌باشد. فصل هفت با بررسی سیستمهای کنترل موشک با استفاده از تابع تبدیل موشک و نگارد^۲ دنبال می‌شود، این فصل [فصل ۱۱ کنونی] همچنین به بررسی اثرات انعطاف پذیری و تموج سوخت، همراه با تعیین توابع تبدیل مناسب و بحث روشهای جبرانسازی می‌پردازد. کتاب با فصلی [فصل ۱۲ کنونی] در مورد کاربرد اصول طراحی آماری پایان می‌یابد.

شکل نهایی معادلات حرکت هواپیما و جملات آیرودینامیکی، مشابه موارد مطرح شده در جزوه درسی منتشر نشده درس کنترل و پایداری هواپیمای پرفسور جی بیکنل^۳ در MIT می‌باشد. با توجه به تجربیاتم این شکل، بهترین شکل معادلات برای انجام محاسبات عددی و شبیه سازی آنالوگ می‌باشد. مشتقات پایداری آیرودینامیکی استفاده شده در معادلات، مشتقات پایداری بدون بعد NACA می‌باشند. سیستمهای کنترل مختلف استفاده شده در این کتاب لزوماً نمونه اصلی نمی‌باشند و لیکن مشابه سیستمهای کنترل واقعی می‌باشد که در هواپیماهای با قابلیت بالا از آنها استفاده شده است. کلیه مباحث، تحلیلها، شبیه سازیهای کامپیوتری و تفاسیر رفتار سیستمهای کنترل ابداع من بوده و از جایی اخذ نشده‌اند.

علاقتمندم سیاس عمیق را نسبت به خانمها جین مون^۴ و چارلاسلین مورف^۵ به خاطر تایید نوشته‌های اصلی ابراز دارم. قابلیت و توانائی آنها کمک کرد که این کتاب بوجود آید. همچنین از دانشجویان زیادی که از مطالبم استفاده کردند و نظرات و تصحیحات مفیدی ارائه دادند سپاسگزارم. از دکتر سی ام زمین^۶ رئیس دانشکده مهندسی برق و اساتیدی چون جان دآزو و سی اچ هویس به خاطر تشویق مستمرشان، و از پرفسور اچ فلیس ویتیکر^۷، که درس کنترل خودکار ایشان در MIT بر اساس برخی از مطالب اساسی می‌باشد که اغلب تحلیلهای این کتاب بر پایه آنها فراهم شده است، بسیار سپاسگزارم. سرانجام، سیاس عمیق را نسبت به همسر من به خاطر شکیبایی، فهم و تشویقش و نیز تایید دست نویس نهایی، ابراز می‌دارم.

جان اچ بلیک ۷
آوریل ۱۹۶۵

¹ Inertial cross-coupling

² Vanguard

³ J.Bicknell

⁴ Jane Moore

⁵ Charlesine Murph

⁶ C.M.Zieman

⁷ H.Phillips Whitaker

فهرست مطالب

مقدمه ۱

مراجع ۶

۱ حرکت‌های طولی ۸

۱-۱ مقدمه ۸

۲-۱ مفهوم سرعتها در یک سیستم مختصات متحرک ۹

۳-۱ بسط معادلات حرکت (بدون کنترل) ۹

۴-۱ وضعیت دورانی هواپیما نسبت به زمین ۱۷

۵-۱ خطی سازی و جدا سازی معادلات حرکت ۱۹

۶-۱ معادلات حرکت طولی ۱۹

۷-۱ بدست آوردن روابط مشتقات پایداری طولی ۲۸

۸-۱ حل معادلات طولی (بدون کنترل) ۴۰

۹-۱ تابع تبدیل طولی برای جابجایی الویتور ۴۵

۱۰-۱ پاسخ گذرای هواپیما ۵۹

۱۱-۱ اثر تغییر مشتقات پایداری روی عملکرد هواپیما ۶۵

مراجع ۶۷

۲ اتوبایلوت‌های طولی ۷۹

۱-۲ اتوبایلوت جابجایی ۶۹

۲-۲ سیستم کنترل زاویه پیچ ۷۵

۴-۲ کوپلر شیب گلاید و کنترل خودکار فلر ۹۰

۵-۲ پایداری مسیر پرواز ۱۰۸

۶-۲ ژیروسکوپ عمودی به عنوان مرجع اصلی وضعیت زاویه‌ای ۱۱۶

۷-۲ صفحه پایدار شده با ژیروسکوپ به عنوان مرجع اصلی وضعیت ۱۱۸

۱۱۴.....	۸-۲ پیامدهای عملکرد غیرخطی.....
۱۱۵.....	۹-۲ خلاصه.....
۱۱۵.....	مراجع.....

۳ حرکتهای عرضی..... ۱۱۷

۱۱۷.....	۱-۲ معادلات حرکت عرضی.....
۱۲۳.....	۲-۲ - استخراج معادلاتی برای مشتقات پایداری عرضی.....
۱۲۷.....	۳-۳ حل معادلات عرضی (بدون کنترل).....
۱۲۹.....	۴-۳ تابع تبدیل عرضی برای جابجایی رادر.....
۱۳۳.....	۵-۳ تابع تبدیل عرضی برای جابجایی ایلران.....
۱۳۷.....	۶-۳ توابع تبدیل تقریبی.....
۱۴۰.....	۷-۳ پاسخ گذرای هواپیما.....
۱۴۲.....	۸-۳ اثر تغییر مشتق پایداری.....
۱۴۷.....	مراجع.....

۴ اتوپایلوتهای عرضی..... ۱۴۹

۱۴۹.....	۱-۴ مقدمه.....
۱۵۰.....	۲-۴ میرا کردن داچ رول.....
۱۵۳.....	۳-۴ روشهای اخراز هماهنگی.....
۱۶۷.....	۴-۴ بحث روشهای هماهنگی.....
۱۷۲.....	۵-۴ سیستم کنترل زاویه سمت.....
۱۸۰.....	۶-۴ ترکیبهای دیگر اتوپایلوت عرضی.....
۱۸۳.....	۷-۴ جبران سازی دور زدن.....
۱۸۴.....	۸-۴ هدایت موجی عرضی خودکار.....
۱۹۷.....	۹-۴ عوامل غیر خطی.....
۱۹۷.....	۱۰-۴ خلاصه.....
۱۹۸.....	مراجع.....

۵ تداخل اینرسی..... ۱۹۹

۱۹۹.....	۱-۵ مقدمه.....
۲۰۰.....	۲-۵ اثرات سرعتهای غلت بالا.....
۲۰۵.....	۳-۵ تعیین پارامترهای موثر در پایداری هواپیما.....
۲۰۷.....	۴-۵ سیستمی برای کنترل هواپیمای تحت تداخل اینرسی.....
۲۱۱.....	۵-۵ سیستم کنترل بهبود یافته هواپیمای تحت تداخل اینرسی.....
۲۱۴.....	مراجع.....

۶ اتوبایوت‌های خود تطبیق ۲۱۵

۱-۶	مقدمه	۲۱۵
۲-۶	فلسفه کلی سیستم کنترل خود تطبیق	۲۱۶
۳-۶	سیستم کنترل خود تطبیق اسپری	۲۱۸
۴-۶	سیستم کنترل خود تطبیق شرکت هانیول شعبه مینیاپولیس	۲۲۳
۵-۶	سیستم کنترل تطبیقی مدل مرجع MIT برای هواپیما	۲۲۵
۶-۶	سیستم کنترل تطبیقی MH-۹۰	۲۳۱
۷-۶	خلاصه	۲۳۷
	مراجع	۲۳۷

۷ سیستم‌های کنترل موشک ۲۳۹

۱-۷	مقدمه	۲۳۹
۲-۷	پایدارسازی غلت	۲۴۰
۳-۷	کنترل موشک‌های آیرودینامیکی	۲۴۳
۴-۷	تابع تبدیل موشک بالستیک	۲۶۲
۵-۷	سیستم کنترل موشک ون گارد (موشک صلب)	۲۶۵
۶-۷	سیستم کنترل جابج‌ترین موشک (موشک صلب)	۲۶۷
۷-۷	خلاصه	۲۷۰
	مراجع	۲۷۱

۸ سیستم‌های هدایت ۲۷۳

۱-۸	مقدمه	۲۷۳
۲-۸	هدایت ناوبری تناسی	۲۷۵
۳-۸	هدایت فرمان	۲۸۷
۴-۸	مقایسه عملکرد سیستم هدایت	۲۹۴
۵-۸	هدایت موشک BTT	۲۹۸
۶-۸	موشک BTT کوتاه/میان برد	۳۱۷
	مراجع	۳۱۸

۹ سیستم جامع کنترل آتش و پرواز ۳۳۹

۱-۹	مقدمه	۳۳۹
۲-۹	سیستم کنترل هدایت آتش	۳۴۲
۳-۹	سیستم کنترل پرواز طولی	۳۴۴
۴-۹	سیستم کنترل پرواز عرضی	۳۴۹
۵-۹	بازبینی تحلیل سیستم کنترل عرضی	۳۵۷
۶-۹	سیستم کنترل سرعت	۳۶۰
۷-۹	کنترل توپ متحرک	۳۶۳

۳۶۴	۸-۹ طراحی ردیاب ژیمبالی
۳۶۷	۹-۹ قوانین کنترل ردیابی (TCL)
۳۷۲	۱۰-۹ تحلیل گسسته
۳۸۹	۱۱-۹ نتایج شبیه‌سازی
۳۹۹	مراجع

۱۰ سیستم‌های کنترل چند متغیره ۴۰۱

۴۰۱	۱-۱۰ مقدمه
۴۰۲	۲-۱۰ طراحی چند متغیره بدون دینامیک سرو
۴۱۳	۳-۱۰ طراحی چند متغیره با در نظر گرفتن دینامیک سرو
۴۲۱	۴-۱۰ طراحی چند متغیره YOCS
۴۲۳	۵-۱۰ خلاصه
۴۲۴	مراجع

۱۱ اعطاف پذیری سازه ۴۲۵

۴۲۵	۱-۱۱ مقدمه
۴۲۵	۲-۱۱ معادله لاگرانژ
۴۲۹	۳-۱۱ اعمال معادله لاگرانژ به سیستمی با پارامترهای فشرده
۴۳۲	۴-۱۱ شکل مودها و فرکانس ها
۴۳۹	۵-۱۱ مختصات نرمال
۴۴۱	۶-۱۱ تابع تبدیل سیستم دارای خمش بدنه
۴۴۴	۷-۱۱ صفر با مشخصه دم سگی
۴۴۷	۸-۱۱ اثرات تلاطم سوخت
۴۵۲	۹-۱۱ جبرانسازی لازم برای خمش بدنه
۴۶۰	۱۰-۱۱ خلاصه
۴۶۱	مراجع

۱۲ کاربرد اصول طراحی آماری ۴۶۳

۴۶۳	۱-۱۲ مقدمه
۴۶۴	۲-۱۲ فرایندهای تصادفی
۴۶۸	۳-۱۲ خطای میانگین مجذور
۴۶۸	۴-۱۲ تابع خود همبستگی
۴۷۳	۵-۱۲ تابع همبستگی متقابل
۴۷۴	۶-۱۲ چگالی طیف توان
۴۷۸	۷-۱۲ کاربرد اصول طراحی آماری
۴۸۴	۸-۱۲ کاربرد های دیگر اصول طراحی آماری
۴۸۵	۹-۱۲ خلاصه

۴۸۶	مراجع
-----	------------

۱۳ مدل‌سازی خلبان ۴۸۷

۴۸۷	 ۱-۱۳ مقدمه
۴۸۹	 ۲-۱۳ مدل قطع
۴۹۵	 ۳-۱۳ خلبان کاغذی
۵۰۲	 ۴-۱۳ مدل خلبان بهینه
۵۱۱	مراجع

پیوست I: مروری بر آنالیز برداری ۵۱۳

۵۱۳	 I-۱ نمایش برداری کمیتهای خطی
۵۱۳	 I-۲ نمایش برداری کمیتهای دورانی
۵۱۴	 I-۳ جمع و تفریق بردارها
۵۱۵	 I-۴ ضرب یک بردار در یک اسکالر
۵۱۵	 I-۵ مؤلفه‌های قائم بردارها
۵۱۶	 I-۶ ضرب اسکالر یا نقطه‌ای
۵۱۶	 I-۷ ضرب برداری یا ضربدیری
۵۱۷	 I-۸- ضربهای چند گانه
۵۱۷	 I-۹- مشتق یک بردار
۵۲۰	 I-۱۰- معادله کوریولیس

پیوست II: مقدمه‌ای بر تئوری ژيروسکوپ ۵۲۳

۵۲۳	 II-۱ قانون ژيروسکوپ
۵۲۵	 II-۲ معادلات دینامیکی ژيروسکوپ یک درجه آزادی
۵۲۷	 II-۳ ژيروسکوپ نرخ
۵۲۹	 II-۴ ژيروسکوپ انتگرالی نرخ
۵۳۱	 مرجع

پیوست III: اصول تئوری کنترل ۵۳۳

۵۳۳	 III-۱ دیاگرام بلوکی
۵۳۴	 III-۲ نسبت کنترل
۵۳۵	 III-۳ انواع سیستم
۵۳۸	 III-۴ مکان هندسی ریشه‌ها
۵۴۲	 III-۵ تشکیل مکان هندسی ریشه‌ها
۵۵۰	 III-۶ تابع تبدیل حلقه بسته
۵۵۱	 III-۷ مکان زاویه صفر

III-۸ پاسخ فرکانسی	۵۵۱
III-۹ دیاگرام مکان ریشه‌های بود	۵۵۷
III-۱۰ برنامه‌های CAD برای تحلیل و طراحی سیستم کنترل	۵۵۸
مراجع	۵۵۹

پیوست IV: اصول اساسی آیرودینامیک ۵۶۱

IV-۱ نیروهای آیرودینامیکی	۵۶۱
IV-۲ پسای القایی	۵۶۴
IV-۳ محاسبه مشتقات پایداری با استفاده از DATCOM	۵۶۶
مراجع	۶۲۴

پیوست V: ماتریس‌ها ۶۲۵

V-۱ تعریف	۶۲۵
V-۲ عملیات ماتریسی	۶۲۶
V-۳ ماتریسهای خاص	۶۲۸
V-۴ درمیان‌ها	۶۲۹
مرجع	۶۳۲

پیوست VI: اطلاعات آیرودینامیکی طولی و عرضی هواپیماهای F-15 و F-94A ۶۳۳

پیوست VII: دستگاه مختصات باد ۶۳۷

VII-۱ مقدمه	۶۳۷
VII-۲ استخراج معادلات حرکت در دستگاه باد	۶۳۸
VII-۳ بسط معادله	۶۴۲
مرجع	۶۴۴

پیوست IIX: شبیه‌سازی دیجیتالی توابع تبدیل ۶۴۵

IIX-۱ مقدمه	۶۴۵
IIX-۲ روش متغیر حالت	۶۴۶
IIX-۳ انتگرال‌گیری عددی	۶۴۸
مرجع	۶۴۹

پیوست IX: مسأله کنترل آتش ۶۵۱

IX-۱ مقدمه	۶۵۱
IX-۲ زاویه تقدم	۶۵۳
IX-۳ تصحیح انحنای	۶۵۶

۶۶۲	IX-۵ تصحیح پرسش
۶۶۲	IX-۵ زانویه پیشگویی
۶۶۳	IX-۶ زمان پرواز پرتابه
۶۶۶	مراجع

۶۶۷	پیوست X: دستگاههای نشانه روی A-1 و A-4
۶۶۷	X-۱ مقنمه
۶۶۷	X-۲ اصول کار نشانه روی A-1
۶۶۹	مراجع

۶۷۱	واژه نامه
۶۷۷	نمایه