بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی
بخش مهندسی مکانیک

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک
گرایش طراحی کاربردی

کنترل بهینه ارتعاشات محور چرخان بر روی یا تاقان مغناطیسی

مؤلف:
احسان درفشان

استاد راهنما:
دکتر محمد علی حاج عباسی

استاد مشاور:
دکتر ملیحه مغفوری فرسنگی

بهمن ماه ۱۳۹۱

این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط درجه کارشناسی ارشد به

بخش مهندسی مکانیک

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچ‌گونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی‌شود.

دانشجو : احسان درفشان

استاد راهنما : آقای دکتر محمدعلی حاج عباسی

استاد مشاور : خانم دکتر ملیحه فغفوری فرسنگی

داور ۱ :

داور۲ :

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده :

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه شهید باهنر کرمان است.

تقدیم به:

پدر، مادر و خواهر مهربانم
و
همسر عزیزم

به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند.

تشکر و قدردانی:

سپاسگزار خداوندی هستم که توفیق قدم گذاشتن در راه علم را به بنده ی خویش عطا فرمود.
لازم می دانم از راهنمایی های مدبرانه ی استاد ارجمندم جناب آقای دکتر محمدعلی حاج عباسی کمال تشکر و سپاسگزاری را داشته باشم که همواره با متانت و بزرگواری خود، مرا در این تحقیق یاری و راهنمایی نموده اند.
در تهیه این پایان نامه مادر، خواهرو همسرم مشوق جدی و حامی بنده در این راه بوده‌اند که بدینوسیله قدردان محبت‌های بی‌دریغشان هستم.

چکیده

در این پایان نامه،ارتعاشات حاکم بر محور چرخانِ قرار گرفته بر یاتاقان مغناطیسی به صورت بهینه‌ای کنترل شده است. به منظور معرفی دقیق‌تر معادلات و درنظر گرفتن اثرات پارامترهای بیشتر از روش کنترل ولتاژ به جای کنترل جریان استفاده شده است. معادلات حاکم بر سیستم کنترل نشده مدار باز استنتاج شده و سپس با استفاده از تئوری کنترل نوین، توابع تبدیل این سیستم در فضای لاپلاس به فضای حالت برده شده‌اند. با مشاهده ناپایداری سیستم، کنترل کننده LQG به سیستم اضافه شده و برای دو جهت x و y به صورت جداگانه بررسی شده است.در انتها برای سیستم یاتاقان مغناطیسی با ۸ قطب کنترل کننده LQG طراحی شده است.

کلمات کلیدی: ارتعاشات، محور چرخان، کنترل بهینه،یاتاقان مغناطیسی،LQG

فهرست

فصل اول : مقدمه ۱
۱-۱ مقدمه ۲
۱-۲ مروری برتحقیقات گذشته ۳
۱-۳ بیان مسئله وهدف ازانجام پایان نامه ۵
فصل دوم : یاتاقان مغناطیسی ۷
۲-۱ مقدمه ۸
۲-۲ یاتاقان‌های مغناطیسی ۸
۲-۲-۱ انواع سیستم‌های یاتاقان‌های مغناطیسی ۸
۲-۲-۲ اساس کار یاتاقان‌های مغناطیسی ۹
۲-۲-۳ سیستم‌های کنترل ۱۰
۲-۲-۴ کاربردهای مختلف ۱۱
۲-۲-۵ مزیت یاتاقان‌های مغناطیسی ۱۲
۲-۳ معادلات حاکم بر یاتاقان مغناطیسی ۱۴
فصل سوم : معرفی کنترل به روشLQG ۱۷
۳-۱ مقدمه ۱۸
۳-۲ کنترل سیستم‌ها ۱۸
۳-۲-۱ کنترل بافیدبک ۱۸
۳-۲-۲ سیستم‌های کنترل مدار بسته ۱۹
۳-۲-۳ سیستم‌های کنترل مدار باز ۱۹
۳-۲-۴ مقایسه سیستم‌های کنترل مدار باز و مدار بسته ۲۰
۳-۲-۵ مدل‌سازی در فضای حالت ۲۰
۳-۲-۵-۱ نظریه کنترل نوین ۲۰
۳-۲-۵-۲ معادلات فضای حالت ۲۱
۳-۲-۶ خطی کردن مدلهای ریاضی غیرخطی ۲۳
۳-۲-۷ تابع تبدیل ۲۵
۳-۲-۸ کنترل‌پذیری و مشاهده‌پذیری ۲۶
۳-۲-۸-۱ کنترل‌پذیر کامل حالت سیستم‌های پیوسته با زمان ۲۶

۳-۲-۸-۲ مشاهده‌پذیری ۲۷
۳-۳ کنترل به روش LQG ۲۸
فصل چهارم : کنترل محورچرخان با استفاده از LQG ۳۳
۴-۱ مقدمه ۳۴
۴-۲ معادلات دینامیکی محور چرخان ۳۴
۴-۳ کنترل سیستم در جهت x ۳۶
۴-۴ افزودن کنترل کننده LQG و مشاهده نتایج ۴۲
۴-۵ کنترل سیستم در جهت y ۴۷
۴-۶ افزودن کنترل کننده LQG و مشاهده نتایج ۵۲
۴-۷ تعمیم مسئله برای حل سیستم با ۸ قطب ۵۶
۴-۷-۱ تشکیل سیستم مدار باز ۵۷
۴-۷-۲ تشکیل سیستم مدار بسته با افزودن کنترل کننده LQG ۶۱
فصل پنجم : نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۶۶
۵-۱ جمع بندی نتایج ۶۷
۵-۲ پیشنهادها ۶۸
فصل ششم : پیوست ۶۹
منابع ۷۶

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱ هندسه یک قطب مغناطیسی ۱۵

شکل ۲-۲ شکل شماتیک روتور به همراه قطبهای مغناطیسی ۱۵

شکل ۳-۱ قضیه جداسازی ۳۰

شکل ۳-۲ کنترل کننده LQG ۳۱

شکل ۴-۱ مکان قطب‌های سیستم مدار باز در جهت x ۳۸

شکل ۴-۲ خروجی اول پاسخ سیستم مدار باز در جهت x به ورودی ضربه ۳۸

شکل۴-۳ خروجی دوم پاسخ سیستم مدار باز در جهت x به ورودی ضربه ۳۹

شکل ۴-۴ خروجی اول پاسخ سیستم مداربازدرجهتx به ورودی پله ۳۹

شکل۴-۵ خروجی دوم پاسخ سیستم مدار باز در جهت x به ورودی پله ۴۰

شکل ۴-۶ نویز سفید تولیدی ۴۰

شکل ۴-۷ پاسخ سیستم مدار باز در جهت x به ورودی نویز سفید ۴۱

شکل ۴-۸ خروجی اول پاسخ سیستم مدار باز در جهت x به ورودی نویز سفید ۴۱

شکل ۴-۹ خروجی دوم پاسخ سیستم مدار باز در جهت x به ورودی نویز سفید ۴۲

شکل ۴-۱۰ خروجی اول پاسخ سیستم مدار بسته در جهت x به ورودی ضربه ۴۳

شکل ۴-۱۱ خروجی دوم پاسخ سیستم مدار بسته در جهت x به ورودی ضربه ۴۴

شکل ۴-۱۲ خروجی اول پاسخ سیستم مدار بسته در جهت x به ورودی پله ۴۴

شکل ۴-۱۳ خروجی دوم پاسخ سیستم مدار بسته در جهت x به ورودی پله ۴۵

شکل ۴-۱۴ خروجی اول پاسخ سیستم مدار بسته در جهت x به ورودی نویز سفید ۴۶

شکل ۴-۱۵	خروجی دوم پاسخ سیستم مدار بسته در جهت x به ورودی نویز سفید	۴۶
شکل ۴-۱۶	مکان قطب‌های سیستم مدار باز در جهت y	۴۸
شکل ۴-۱۷	خروجی اول پاسخ سیستم مدار باز در جهت y به ورودی ضربه	۴۸
شکل ۴-۱۸	خروجی دوم پاسخ سیستم مدار باز در جهت y به ورودی ضربه	۴۹
شکل۴-۱۹	خروجی اول پاسخ سیستم مدار باز در جهت y به ورودی پله	۵۰
شکل ۴-۲۰	خروجی دوم پاسخ سیستم مدار باز در جهت y به ورودی پله	۵۰
شکل ۴-۲۱	خروجی اول پاسخ سیستم مدار باز در جهت y به ورودی نویز سفید	۵۱
شکل ۴-۲۲	خروجی دوم پاسخ سیستم مدار باز در جهت y به ورودی نویز سفید	۵۱
شکل ۴-۲۳	خروجی اول پاسخ سیستم مدار بسته در جهت y به ورودی ضربه	۵۲
شکل ۴-۲۴	خروجی دوم پاسخ سیستم مدار بسته در جهت y به ورودی ضربه	۵۳
شکل ۴-۲۵	خروجی اول پاسخ سیستم مدار بسته در جهت y به ورودی پله	۵۴
شکل ۴-۲۶	خروجی دوم پاسخ سیستم مدار بسته در جهت y به ورودی پله	۵۴
شکل ۴-۲۷	خروجی اول پاسخ سیستم مدار بسته در جهت y به ورودی نویز سفید	۵۵
شکل ۴-۲۸	خروجی دوم پاسخ سیستم مدار بسته در جهت y به ورودی نویز سفید	۵۵
شکل ۴-۲۹	نحوه آرایش قطبها در یاتاقان مغناطیسی دارای ۸ قطب	۵۶
شکل ۴-۳۰	محل قطبهای سیستم مدار باز ۸ قطبی	۵۹
شکل ۴-۳۱	پاسخ سیستم مدار باز۸ قطبی به ورودی ضربه	۶۰
شکل ۴-۳۲	پاسخ سیستم مدار باز ۸ قطبی به ورودی پله	۶۱
شکل ۴-۳۳	پاسخ سیستم مدار بسته ۸ قطبی به ورودی ضربه	۶۲
شکل ۴-۳۴	خروجی مکان در جهت x پاسخ سیستم مدار بسته ۸ قطبی به ورودی ضربه در قطب در جهت x	۶۲
شکل ۴-۳۵	خروجی مکان در جهت y پاسخ سیستم مدار بسته ۸ قطبی به ورودی ضربه در قطب در جهت x	۶۳
شکل ۴-۳۶	پاسخ سیستم مدار بسته ۸ قطبی به ورودی پله	۶۳

شکل ۴-۳۷ پاسخ سیستم مدار بسته ۸ قطبی به ورودی نویز سفید در قطب در جهت x ۶۴
شکل ۴-۳۸ خروجی اول پاسخ سیستم مدار بسته ۸ قطبی به ورودی نویز سفید در قطب در جهت x ۶۵
شکل ۴-۳۹ خروجی دوم پاسخ سیستم مدار بسته ۸ قطبی به ورودی نویز سفید در قطب در جهت x ۶۵

فهرست علائم

A_a	سطح فاصله هوایی
A, A_x, A_y	ماتریس حالت در فضای حالت
B, B_x, B_y	ماتریس ورودی در فضای حالت
C, C_x, C_y	ماتریس خروجی در فضای حالت
D, D_x, D_y	ماتریس انتقال مستقیم در فضای حالت
E	اپراتور امید ریاضی
F, F_x, F_y	نیروی الکترومغناطیس
$\bar{F}_y$	جمع نیروی وزن و الکترومغناطیس در جهت y
F_{xL}, F_{yL}	نیروی الکترومغناطیس خطی شده
$G_1, G_2, G_3, H_1, H_2, H_3$	پارامترهای موجود در توابع تبدیل
G	تابع تبدیل
H	هانری (واحد اندازه‌گیری)
I_{cx}, I_{cy}	جریان کنترلی در فضای لاپلاس
J	تابع ارزش در کنترل کننده LQG
$K_\upsilon, K_{\upsilon x}, K_{\upsilon y}$	ضریب سرعت – ولتاژ القایی
K_r	بهره LQR
K_f	بهره فیلتر کالمن
K, K_1, K_2	دیفرانسیل نسبت به جهات اصلی
L, L_x, L_y	ضریب اندوکتانس (ظرفیت القاء مغناطیسی)
N	تعداد دور سیم‌پیچ

Q,R	ماتریس طراحی کنترل کننده LQG
R,R_x,R_y	مقاومت اهمی
T	ترانهاده، متغیر تعریف تابع ارزش
U_x,U_y	نویز نابالانسی در فضای لاپلاس
V_x,V_2,V_y,V_4	ولتاژ کنترلی در فضای لاپلاس
V,W	ماتریسهای چگالی طیفی توان ثابت در کنترل‌کننده LQG
X,Y	جهات محورهای اصلی
X	ماتریس حالت در فضای لاپلاس، جواب معادله ریکاتی در LQR
Y	ماتریس خروجی در فضای لاپلاس، جواب معادله ریکاتی در فیلتر کالمن
c,c_x,c_y	میرایی
e	فاصله مرکز جرم تا محور هندسی روتور
g	شتاب گرانشی زمین
g_0	فاصله هوایی اسمی
$g_{11},g_{12},...,h_{11},h_{12},...$	توابع تبدیل در فضای حالت
$i,i_0,i_{cx},i_{cy},i_{c2},i_{c4}$	جریان کنترلی
i_b	جریان بایاس
k_s,k_i	ضرایب جریان و مکان در نیروی الکترومغناطیسی خطی شده
l	طول مسیر شار
m	جرم، متر
s	متغیر فضای لاپلاس
t	زمان
u	ماتریس ورودی

w_d, w_n	نویز فرایند ونویز اندازه‌گیری
w_2, w_4	جابجایی در نیمسازهای محورهای مختصات
v	ولت
x	ماتریس حالت
$\hat{x}$	حدس بهینه
x, y	جابجایی در جهات اصلی
y	ماتریس خروجی
α	نصف زاویه بین کفشکها در یک قطب مغناطیسی
δ	تابع دلتای کرونکر
μ_0	خاصیت نفوذپذیری
τ	زمان
ω	سرعت زاویه ای
ℓ	اپراتور لاپلاس‌گیری

زیرنویس‌ها و بالانویس‌ها

x, y	جهات اصلی
$2, 4$	جهات مربوط به نیمساز ربعهای اول-سوم و دوم-چهارم

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه

روتور دینامیک شاخه‌ای از مهندسی است که ارتعاشات جانبی و پیچشی شافت‌های در حال دوران را مطالعه و بررسی می‌کند. همچنین این شاخه به تجزیه و تحلیل سازه‌های مختلف مانند موتور جت، توربین های بخار و ... می‌پردازد. پیدایش روتور دینامیک به نیمه دوم قرن ۱۹ برمی‌گردد. رانکین در سال ۱۸۶۹ یک مقاله درباره نیروی سانتریفیوژ روی شافت‌های دوار را منتشر کرد که این اولین مقاله در روتور دینامیک محسوب می‌شود.[۱]

روتور یا شافت جزء در حال گردش سیستم است. دو جزء مهم دیگر در سیستم روتوردینامیک یاتاقان‌ها و درزبندها هستند.یاتاقان وسیله‌ای است که اجازه حرکت نسبی مقید را بین دو یا بیشتر از دو قطعه می‌دهد که به طور نمونه به صورت چرخش یا حرکت خطی است. یاتاقان ها می توانند به صورت گسترده ای بر طبق حرکتی که مجازند داشته باشند و یا براساس اصول کاریشان و همچنین جهت بارهای اعمالی که می‌توانند تحمل کنند، طبقه‌بندی شوند. یاتاقان‌ها در هر دستگاهی که دارای اجزای گرداننده هستند جهت تثبیت موقعیت و کنترل و نگهداری بار قسمت متحرک مورد استفاده قرار می‌گیرند و بسته به کاربرد دارای گونه‌های مختلفی هستند.

با پیشرفت فناوری و صنعت و نیاز به سرعت‌های بالاتر نوعی از یاتاقان‌ها در سیستم‌های روتور دینامیک مورد استفاده قرار گرفتند که به یاتاقان‌های مغناطیسی معروف شدند. مهم‌ترین مزیت یاتاقان مغناطیسی، حذف تماس فیزیکی و اصطکاک و درنتیجه امکان حرکت با سرعت بالا، نیاز نداشتن به روغن‌کاری (کم شدن آلودگی محیط و خطر آتش‌سوزی)، قابلیت کنترل بهتر روی دینامیک روتور و نیاز کمتر به نگهداری و تعمیرات است. در نوع خاصی از این یاتاقان‌ها که بیشتر مورد توجه بوده و به یاتاقان مغناطیسی فعال معروفند موقعیت محور توسط سنسورهای موقعیت اندازه‌گیری شده و نتایج به مدار کنترل فرستاده می‌شود و لذا ارتعاشات ناشی از عدم تعادل روتور، بدون نیاز به وسیله و تجهیزات اضافی، پایش و کنترل می‌شود. از این اطلاعات می‌توان برای تشخیص عملکرد مناسب سامانه و تخمین زمان نگهداری و تعمیر استفاده کرد. اساس کار یاتاقان مغناطیسی، نیروی جاذبه بین آهن‌ربا و ماده فرومغناطیس است. با این شیوه می‌توان نیروهای بزرگی ایجاد کرد که مشابه آن در موتورهای الکتریکی استفاده می‌شود.

مدار کنترل با توجه به اختلاف موقعیت محور از محل موردنظر، جریان الکتریکی آهن‌رباها را تنظیم می‌کند.البته این نوع تعلیق دارای طبیعت ناپایدار است. بنابراین مدار کنترل بسیار سریع و دقیق برای پایدارسازی تعلیق نیاز است. از آنجا که در سرعت‌های بالا جابجایی‌های جزئی نیز سبب عدم تعادل نسبتا بزرگی می‌شود، سرعت، دقت و پایداری سامانه کنترلی اهمیت بالایی دارد.

برای کنترل سامانه یاتاقان میله‌ای که شامل میله‌ای معلق و دوار است دینامیک و ارتعاشات میله باید مطالعه شود. تأخیرهای زمانی به ویژه ناشی از نرم‌افزارهای کامپیوتری مانند متلب اجتناب‌ناپذیر است. اما این نرم‌افزارها به دلیل انعطاف‌پذیری بالا جایگزین روش‌ها و ابزارهای قدیمی شده‌اند.
در این پایان‌نامه با استفاده از یکی از روش‌های کنترلی سیستم روتور دینامیک دارای یاتاقان مغناطیسی به شکل بهینه‌ای کنترل شده است.

۲-۱ مروری بر تحقیقات گذشته

در دو دهه اخیر در زمینه کنترل سیستم‌های روتور دینامیک با یاتاقان مغناطیسی تحقیقات وسیعی انجام شده و محققان از روش‌های متنوعی برای کنترل این سیستم‌ها در شرایط متفاوت استفاده کرده‌اند. در سال ۱۹۹۲ بیل[۱] و همکارانش [۲] از روش تعادل اجباری تطبیقی (AFB)[۲] برای کنترل نیروی گریز از مرکز ناشی از نابالانسی روتور در سیستم یاتاقان مغناطیسی استفاده کرده‌اند. استفاده از کنترل کننده PID[۳] روشی مرسوم در بین محققان بوده است. به عنوان مثال در سال ۱۹۹۴ جونگ[۴] و همکاران [۳] و در ۱۹۹۵ کیم[۵] و همکارانش [۴] از این روش کنترلی برای سیستم یاتاقان مغناطیسی استفاده کرده‌اند. همچنین در ۲۰۰۸ لی[۶] و پالازولو[۷] [۵] روش PID را برای کنترل روتور انعطاف‌پذیر با یاتاقان مغناطیسی به کار برده‌اند. از روش های کنترل مقاوم مانند سنتز μ یا روش H_∞ نیز برای کنترل سیستم‌های یاقان مغناطیسی فعال (AMB[۸]) استفاده شده است.
نونامی[۹] و آیتو[۱۰] [۶] در ۱۹۹۶ از روش سنتز μ[۱۱] برای کنترل روتور انعطاف پذیر بر یاتاقان مغناطیسی استفاده کردند. همچنین لوش[۱۲] و همکارانش [۷] در سال ۱۹۹۸ از این روش برای طراحی پمپ 3WM دارای یاتاقان مغناطیسی استفاده کرده‌اند. یک سال بعد او و همکارانش این‌بار برای طراحی پمپ دیگ بخار از روش سنتز μ استفاده کردند[۸]. البته باید توجه داشت که

1. Beale
2.Adaptive Forced Balancing
3.Proportional Integral Derivative
4.Jeong
5. Kim
6. Lei
7. Palazzolo
8. Active Magnetic Bearing
9. Nonami
10. Ito
11. μ-synthesis
12. Lösch

معادلات کنترل کننده بهینه μ به سمت مرتبه‌های بالا متمایل شده و محاسبات همیشه هم‌گرا نمی‌شوند[۹،۱۰].

روش‌های مختلف کنترل کننده H_∞ نیز به سیستم‌های AMB اعمال شده‌اند. فوجیتا[۱] و همکارانش [۱۱] در سال ۱۹۹۳ روش شکل‌دهی مدار H_∞[۲] را بر روی یاتاقان‌های مغناطیسی بررسی کرده‌اند. آردوندو[۳] و جاگو[۴] [۱۲] در سال۲۰۰۷ از روش H_∞ با رویکرد حساسیت مرکب[۵] برای کنترل سیستم AMB استفاده کرده‌اند. در دو مقاله اخیر از ساختار متقارن استفاده شده و لذا برای حل خود سیستم را به دو بخش مجزا از هم تقسیم کرده‌اند. گیبسون[۶] [۱۳] در سال ۲۰۰۳ از روش H_∞ با رویکرد حساسیت مرکب برای یک سیستم AMB تک ورودی تک خروجی استفاده کرد. او همچنین در این کار از روش شبکه عصبی برای شناسایی موارد تردید در سیستم بهره برد. لازم به ذکر است کنترل کننده‌های H_∞ وقتی که سیستم مورد مطالعه دینامیک قوی داشته باشد با مشکلات عددی مواجه می‌شوند[۱۲]. لذا جهت افزایش کارایی، تمایل به کنترل متمرکز مقاو م[۷] بیشتر شده است. در سال ۲۰۱۰ جاسترزبسکی[۸] و همکارانش [۱۴] کنترل کننده H_∞ متمرکز را برای سیستم روتور AMB به کار برده‌اند.

از روش‌های دیگری نیز برای کنترل این سیستم‌ها استفاده شده است. به عنوان مثال در ۱۹۹۹ لی و پالازولو [۱۵] روش منطق فازی[۹] را برای کنترل ارتعاشات روتور (ناشی از نابالانسی ناگهانی) بر یاتاقان مغناطیسی به کار برده‌اند. اکادا[۱۰] و همکارانش [۱۶] در سال ۲۰۰۱ از روش کنترل انحرافی[۱۱] برای کنترل این نوع سیستم استفاده کرده‌اند. در ۲۰۰۳ اگونفسکی[۱۲] و پلازا[۱۳] [۱۷] از کنترل کننده واریانس وزنی مینیمم[۱۴] برای سیستم یاتاقان مغناطیسی استفاده کرده و نتایج را با کنترل کنندههای PD مقایسه کرده‌اند. روش مود لغزشی[۱۵] نیز یکی از روش‌های مورد توجه برای کنترل این سیستم‌ها بوده است. به عنوان مثال در ۱۹۹۱ سینها[۱۶] و همکارانش [۱۸] از این روش

1. Fujita
2. loop shaping H_∞
3. Arredondo
4. Jugo
5. mixed-sensitivityH_∞
6. Gibson
7. robust centralized control
8. Jastrzebski
9. fuzzy logic
10. Okada
11. inclination method
12. Ogonowski
13. Plaza
14. weighted minimumvariance controller
15.sliding mode control
16. Sinha

برای کنترل روتور صلب با یاتاقان مغناطیسی استفاده کردند. در ۲۰۱۰ کانگ[1] و همکارانش [۱۹] از این روش برای یک سیستم یاتاقان مغناطیسی که تحت حرکت پایه است استفاده کردند. در سال ۲۰۱۱ لین[2] و همکارانش [۲۰] از سیستم کنترلی مود لغزان با ساختار تخمین‌گر شبکه عصبی برای کنترل موقعیت روتور در جهت محوری[3] سیستم یاتاقان مغناطیسی کف‌گرد استفاده کردند. همچنین در سال ۲۰۰۹ ژو[4] و همکارانش[۲۱] از کنترل کننده بهینه LQG[5] برای کنترل یک سیستم ذخیره انرژی به وسیله چرخ لنگر بر روی یاتاقان مغناطیسی استفاده کرده‌اند.

۱-۳ بیان مسئله و هدف از انجام پایان‌نامه

در این پایان نامه، کنترل بهینه یک محور چرخان قرار گرفته بر یاتاقان مغناطیسی ارائه شده است. در این سیستم از دو یاتاقان مغناطیسی به صورت متقارن در دو طرف محور استفاده شده است. محور نیز صلب بوده و طولش کوتاه است.در اثر وجود نابالانسی مرکز جرم و نویز در ورودی سیستم (ولتاژ) و نیز در خروجی (وسایل اندازه گیری سرعت و مکان) سیستم یاتاقان مغناطیسی مورد استفاده ناپایدار است و لذا لازم است از کنترل کننده فیدبک‌دار استفاده شود تا سیستم را در حالت تعادلش قرار داده و در صورت خروج از موقعیت مطلوب با دستورات مناسب آن را به حالت مطلوب بازگرداند. هدف از این پایان‌نامه طراحی کنترل کننده به منظور عملکرد مناسب روتور است. روش مورد استفاده در این پایان نامه، روش LQG می‌باشد. ویژگی بارز این روش این است که عملکردی بهینه دارد و انرژی سیستم (مجموع ورودی و جنبشی) را در حالت کمینه قرار می‌دهد.

فصل دوم، به بیان مقدماتی پیرامون یاتاقان مغناطیسی و نیز معادلات نیروهای تولیدی توسط این یاتاقان‌ها اختصاص یافته است. در این فصل پس از ذکر تاریخچه‌ای مختصر، به دسته‌بندی سیستم‌های یاتاقان مغناطیسی اشاره شده و به صورت خاص به اجزای سیستم کنترلی یاتاقان مغناطیسی فعال پرداخته است. در انتهای معرفی این یاتاقانها به مزایا و کاربردهای آنها اشاره شده است. در قسمت دوم این فصل معادلات نیروی الکترومغناطیس تولیدی توسط این یاتاقان‌ها استنتاج شده است.

1. Kang
2. Lin
3. axial
4. Zhu
5 Linear Quadratic Guassian

فصل سوم، راجع به معرفی کنترل خودکار و مفاهیم آن است. بـه کنتـرل فیـدبک‌دار، سیسـتم‌هـای کنترل حلقه بسته و باز اشاره شده و سپس در نظریه کنتـرل نـوین، معـادلات فضـای حالـت، خطـی کردن سیستم‌های غیرخطی، تابع تبدیل، کنترل‌پذیری و مشاهده‌پذیری سیستم‌هـا معرفـی شـده‌انـد. انتهای این فصل روش کنترلی LQG را به صورت کامل معرفی کرده است.

درفصل چهارم، برای کنترل روتور در دو جهت مستقل از هم x و y ابتدا معادلات فضای حالـت سیستم یاتاقان مغناطیسی را قبل از اعمال کنترل کننده بدست آورده و سپس کنترل کننده LQG را به آن اضافه کرده و پاسخ به ورودی‌های مختلف سیستم جدید با استفاده از نـرم‌افـزار متلـب نشـان داده شده و درباره آنها بحث شده است. در انتها نیز از این سیستم بـا یاتاقـان مغناطیسـی بـا ۸ قطـب کنترل کننده مناسب طراحی شده است.

فصل پنجم به جمع بندی نتایج به دست آمده در فصل قبل و ارائه‌ی پیشنهادهایی برای کارهای آتی اختصاص یافته است.

در فصل ششم، ماتریسهای طراحی،ماتریس‌های فضای حالت سیستم قبل و بعد از اعمال کنترل کننده برای دو جهت x و y و یاتاقان با ۸ قطب به عنوان پیوست آورده شده است.