دانشکده فنی

گروه مهندسی مکانیک

گرایش طراحی کاربردی

طراحی بهینه کنترلر مد لغزشی با لایه مرزی متغیر با استفاده از روش کنترل پیش‌گو

از:

وحید مجدآبادی فراهانی

استاد راهنما:

دکتر نادر نریمان‌زاده

استاد مشاور:

دکتر احمد باقری

اسفند ۸۹

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

به پاس یک عمر فداکاری و تلاش عاشقانه

تقدیر و تشکر از

دکتر نادر نریمان‌زاده

استاد راهنمای گرانقدرم که تمام مراحل انجام این پایان‌نامه مرهون کمک‌های بی‌دریغ و دلسوزانه ایشان بود.

بی‌شک موفقیت این کار نتیجه نظارت این بزرگوار بوده است.

دکتر احمد باقری

که زحمت مشاوره این پایان‌نامه را به عهده داشتند.

همه دوستان و عزیزانی که به من کمک کردند.

فهرست مطالب

چکیده فارسی ..... ر
چکیده انگلیسی ..... ز
۱- مقدمه ۱
۱-۱- کنترل لغزشی ۲
۱-۲- کنترل پیش بین ۴
۱-۳- الگوریتم ژنتیک ۵
۱-۴- بهینه سازی چند هدفی ۶
۱-۵- مطالب ارائه شده در این پایاننامه ۶
۲ - مقدمه‌ای بر کنترل پیش بین بر اساس مدل(MPC) ۸
۲-۱ استراتژی کنترل پیش بین ۱۰
۲-۲- اجزای کنترل پیشبین ۱۳
۲-۲-۱- مدل پیش بینی ۱۳
۲-۲-۲- تابع هدف ۱۶
۲-۲-۳- تعیین قانون کنترلی ۱۸
۲-۳- نتیجه گیری ۱۹
۳ - کنترل لغزشی ۲۱
۳-۱- مقدمه ای بر کنترل لغزشی ۲۱
۳-۲- سطوح لغزشی ۲۲
۳-۳- ساده سازی نمادین ۲۳
۳-۴- دینامیک های معادل ۲۵
۳-۵- پدیده لرزش ۲۷
۳-۶- استفاده از لایه مرزی به منظور حذف لرزش ۲۸
۳-۷- تعیین لایه مرزی کنترلر مد لغزشی با استفاده از کنترل پیش بین ۳۶
۳-۸- مقایسه نتایج ۴۰
۳-۹- نتیجه گیری ۴۲
۴ - الگوریتم ژنتیک ۴۴
۴-۱- مقدمه ۴۴
۴-۲- اصول محاسبات الگوریتم های تکاملی ۴۴
۴-۳- الگوریتم های ژنتیکی ۴۵
۴-۴- رمز گذاری،جهش و پیوند ۴۶

۴-۴-۱- فضای جستجوی عددی و رشته های باینری ۴۶
۴-۴-۲- رشته های باینری ۴۶
۴-۴-۳- عملگر پیوند ۴۷
۴-۴-۴- عملگر جهش ۴۸
۴-۵- تولید جمعیت اولیه ۴۹
۴-۶- الگوریتم های انتخاب ۴۹
۴-۶-۱- انتخاب براساس مکانیزم چرخ گردان ۵۰
۴-۷- نتیجه گیری ۵۱
۵ - بهینه‌سازی ۵۳
۵-۱- مقدمه ۵۳
۵-۲- ویژگی‌های مسائل بهینه‌سازی ۵۴
۵-۳- روش‌های بهگزینی ۵۴
۵-۳-۱- راهبردهای کاهشی ۵۶
۵-۳-۲- الگوریتم‌های تکاملی ۵۶
۵-۴- بهینه‌سازی چندهدفی به کمک الگوریتم ژنتیک ۵۷
۵-۴-۱- مفاهیم بهینه‌سازی چندهدفی ۵۷
۵-۴-۲- الگوریتم ژنتیک ۵۹
۵-۴-۳- پیاده سازی بهینه‌سازی چندهدفی در الگوریتم ژنتیک ۶۱
۵-۴-۴- روند بهینه‌سازی در Modified NSGA II ۶۳
۵-۵- نتیجه گیری ۶۶
۶ - تحلیل احتمالاتی ۶۸
۶-۱- مقدمه ۶۸
۶-۲- نامعینی احتمالاتی ۶۹
۶-۲-۲- توزیع احتمالاتی و تابع چگالی احتمالی ۷۰
۶-۲-۳- تابع توزیع جمعیت ۷۱
۶-۳- نمایش سیستم‌های نامعین ۷۲
۶-۴- تحلیل احتمالاتی ۷۲
۶-۴-۱- متغیرهای تصادفی ۷۲
۶-۴-۲- فرآیندهای تصادفی ۷۵
۶-۵- نمونه برداری و شبیه سازی مونت‌کارلو ۷۸
۶-۵-۲- روش نمونه برداری همرسلی ۸۲
۶-۶- میانگین و واریانس ۸۳
۶-۷- بهینه سازی مقاوم ۸۴
۶-۸- نتیجه گیری ۸۵
۷ - اعمال روش پیشنهادی بر روی آونگ وارون و بهینه سازی با الگوریتم ژنتیک ۸۷
۷-۱- معرفی سیستم آونگ وارون ۸۷
۷-۲- معادلات حرکت ۸۸

۷-۲-۲- مختصات مرکز جرم میله ۸۸
۷-۲-۳- معادلات لاگرانژ ۸۸
۷-۲-۴- روش کنترل مد لغزنده مجزا ۸۹
۷-۳- تعیین لایه مرزی کنترلر از دیدگاه کنترل پیش بین ۹۵
۷-۴- بهینه سازی ضرایب کنترلر با روش الگوریتم ژنتیک ۹۹
۷-۵- مقایسه نتایج ۱۰۴
۷-۶- بررسی میزان مقاوم بودن سه روش کنترلی ارائه شده ۱۰۶
۷-۷ نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۱۲
مراجع ۱۱۳

فهرست شکل‌ها

شکل (۱-۱) - پدیده لرزش و لایه مرزی [۲] ۴
شکل (۱-۲) - نحوه عملکردکنترل پیش بین / افق کنترل و افق پیش بینی ۵
شکل (۲-۱) - استراتژی کنترل پیش بین [۲۰] ۱۱
شکل (۲-۲) - ساختار پایه ای کنترل پیش بین بر پایه مدل [۲۰] ۱۲
شکل (۲-۳) - تشبیه الگوریتم MPC به فرآیند تصمیم گیری در رانندگی [۲۰] ۱۳
شکل (۲-۴) - مسیر مرجع [۲۰] ۱۷
شکل (۳-۱) - شرط لغزشی [۳] ۲۴
شکل (۳-۲) - تعبیر هندسی معادلات (۳-۳)و(۳-۵) n=2 [۳] ۲۴
شکل (۳-۳) - لرزش ناشی از سوئیچینگ کنترل ناقص [۳] ۲۵
شکل (۳-۴) – لایه مرزی [۳] ۲۸
شکل (۳-۵) – درون یابی کنترل در لایه مرزی [۳] ۲۸
شکل (۳-۶) – خطای کنترل بدون حضور لایه مرزی ۲۹
شکل (۳-۷) - سطح لغزشی بدون حضور لایه مرزی ۳۰
شکل (۳-۸) – سیگنال کنترل بدون حضور لایه مرزی ۳۰
شکل (۳-۹) - خطای پاسخ در حضور لایه مرزی ثابت ۳۱
شکل (۳-۱۰) - سیگنال کنترل در حضور لایه مرزی ثابت ۳۱
شکل (۳-۱۱) - سطح لغزشی در حضور لایه مرزی ثابت ۳۲
شکل (۳-۱۲) - ساختار دینامیک های خطای حلقه - بسته ۳۳
شکل (۳-۱۳) - خطای ردیابی لایه مرزی متغیر با زمان ۳۴
شکل (۳-۱۴) - سیگنال کنترل لایه مرزی متغیر با زمان ۳۵
شکل (۳-۱۵) - سطح لغزشی و لایه مرزی متغیر با زمان ۳۵
شکل (۳-۱۶) - تغییرات یکنواخت و تکرار شونده لایه مرزی ۳۶
شکل (۳-۱۷) – فلوچارت روش کنترلی پیشنهادی با به کار گیری کنترل پیش بین ۳۸
شکل (۳-۱۸) - خطای ردیابی با لایه مرزی حاصل از کنترل پیشبین ۳۹
شکل (۳-۱۹) - سیگنال کنترل با لایه مرزی حاصل از کنترل پیشبین ۳۹
شکل (۳-۲۰) - سطح لغزشی و لایه مرزی حاصل از کنترل پیش بین ۴۰
شکل (۳-۲۱) – نمودار مقایسه ای خطای ردیابی ۴۰
شکل (۳-۲۲) - نمودار مقایسه ای سیگنال کنترل ۴۱
شکل (۳-۲۳) - نمودار مقایسه ای سطح لغزشی ۴۱

شکل (۴-۱) - ژنومی دارای سه پارامتر که شامل ۸ بیت برای هر پارامتر میباشد ۴۷
شکل (۴-۲) - عملگر پیوند یک نقطهای ۴۸
شکل (۴-۳) - عملیات جهش روی یک کروموزوم ۴۹
شکل (۵-۱) - دو تابع هدف f1 وf2 برای بهینه سازی چند هدفی ۵۹
شکل (۵-۲) - روند اجرای الگوریتم ژنتیک ۶۱
شکل (۵-۳) - الگوریتم زیربرنامه FNDF ۶۳
شکل (۵-۴) - الگوریتم زیربرنامه FNDS ۶۴
شکل (۵-۵) - الگوریتم زیر برنامه ε-elimination ۶۵
شکل (۶-۱) - کراندار و نامعینی احتمالاتی ۷۰
شکل (۶-۲) - احتمال به دستآمده با استفاده از مساحت زیر تابع f(x) ۷۰
شکل (۶-۳) - منحنی PDF و CDF ۷۱
شکل (۶-۴) - سیستم جرم- فنر- دمپر ۷۳
شکل (۶-۵) - میزان فراوانی ماکزیمم فراجهش ۷۳
شکل (۶-۶) - منحنی CDF ماکزیمم فراجهش ۷۴
شکل (۶-۷) - منحنی تابع توزیع احتمالاتی و نواحی شکست ۷۵
شکل (۶-۸) - پاسخ احتمالاتی سیستم جرم- فنر- دمپر ۷۶
شکل (۶-۹) - نمایی از فرآیند تصادفی x(h) ۷۷
شکل (۶-۱۰) - فرآیند شبیه سازی به روش مونتکارلو ۷۹
شکل (۶-۱۱) - اعداد تصادفی تولید شده بین صفر و یک برای ۱۰۰ و ۵۰۰ نمونه ۸۱
شکل (۶-۱۲) - نقاط و نمونههای تولید شده توسط روش مونتکارلو ۸۳
شکل (۶-۱۳) - نقاط و نمونههای تولید شده توسط روش همرسلی ۸۳
شکل (۷-۱) - ساختار آونگ معکوس ۸۸
شکل (۷-۲) - تغییرات زاویه آونگ با راستای قائم بر حسب زمان [۴۵] ۹۳
شکل (۷-۳) - تغییرات سرعت زاویه ای آونگ بر حسب زمان [۴۵] ۹۳
شکل (۷-۴) - تغییرات جابجایی گاری بر حسب زمان [۴۵] ۹۴
شکل (۷-۵) - تغییرات سرعت گاری بر حسب زمان [۴۵] ۹۴
شکل (۷-۶) - تغییرات سیگنال کنترل بر حسب زمان [۴۵] ۹۵
شکل (۷-۷) - تغییرات سطح لغزش بر حسب زمان با لایه مرزی ثابت [۴۵] ۹۵
شکل (۷-۸) - تغییرات زاویه آونگ با راستای قائم بر حسب زمان برای لایه مرزی حاصل از *MPC* ۹۶
شکل (۷-۹) - تغییرات سرعت زاویه ای آونگ با راستای قائم بر حسب زمان برای لایه مرزی حاصل از *MPC* ۹۶
شکل (۷-۱۰) - تغییرات جابجایی گاری بر حسب زمان برای لایه مرزی حاصل از *MPC* ۹۷
شکل (۷-۱۱) - تغییرات سرعت گاری بر حسب زمان برای لایه مرزی حاصل از *MPC* ۹۷
شکل (۷-۱۲) - تغییرات سیگنال کنترل بر حسب زمان برای لایه مرزی حاصل از *MPC* ۹۸
شکل (۷-۱۳) - تغییرات سطح لغزش بر حسب زمان و لایه مرزی تعیین شده توسط کنترل پیش بین ۹۸

شکل (۷-۱۴) - نمودار پرتوی جمعیت آخرین نسل تولید شده ۱۰۰
شکل (۷-۱۵) - نمودار پرتوی جبهه برتر آخرین نسل تولید شده ۱۰۰
شکل (۷-۱۶) - تغییرات زاویه آونگ با راستای قائم بر حسب زمان پس از بهینه سازی ضرایب کنترلر پیشنهادی ۱۰۱
شکل (۷-۱۷) - تغییرات سرعت زاویه ای آونگ با راستای قائم بر حسب زمان پس از بهینه سازی ضرایب کنترلر پیشنهادی ۱۰۱
شکل (۷-۱۸) - تغییرات جابجایی گاری بر حسب زمان پس از بهینه سازی ضرایب کنترلر پیشنهادی ۱۰۲
شکل (۷-۱۹) - تغییرات سرعت گاری بر حسب زمان پس از بهینه سازی ضرایب کنترلر پیشنهادی ۱۰۲
شکل (۷-۲۰) - تغییرات سیگنال کنترل بر حسب زمان پس از بهینه سازی ضرایب کنترلر پیشنهادی ۱۰۳
شکل (۷-۲۱) - تغییرات سطح لغزش بر حسب زمان پس از بهینه سازی ضرایب کنترلر پیشنهادی ۱۰۳
شکل (۷-۲۲) - نمودار مقایسه ای خطای ردیابی ۱۰۴
شکل (۷-۲۳) - نمودار مقایسه ای تغییر مکان گاری ۱۰۴
شکل (۷-۲۴) - نمودار مقایسه ای سیگنال کنترل ۱۰۵
شکل (۷-۲۵) - نمودار مقایسه ای سطح لغزش ۱۰۵
شکل (۷-۲۶) - نمودار نمونه های تصادفی ایجاد شده ۱۰۷
شکل (۷-۲۷) - نمودار مقایسه ای خطای ردیابی سه روش کنترلی با ۵۰۰۰ نمونه تصادفی ۱۰۸
شکل (۷-۲۸) - نمودار مقایسه ای جابجایی گاری در سه روش کنترلی با ۵۰۰۰ نمونه تصادفی ۱۰۸
شکل (۷-۲۹) – میزان فراوانی سطح زیر نمودار خطا برای آونگ با روش مرجع [۴۵] ۱۰۹
شکل (۷-۳۰) - میزان فراوانی سطح زیر نمودار خطا برای گاری با روش مرجع [۴۵] ۱۰۹
شکل (۷-۳۱) - میزان فراوانی سطح زیر نمودار خطا برای آونگ با استفاده از کنترل پیش بین برای تعیین لایه مرزی.. ۱۱۰
شکل (۷-۳۲) - میزان فراوانی سطح زیر نمودار خطا برای گاری با استفاده از کنترل پیش بین برای تعیین لایه مرزی ... ۱۱۰
شکل (۷-۳۳) – میزان فراوانی خطای سطح زیر نمودار برای آونگ با استفاده از بهینهسازی ضرایب کنترلر پیشنهادی ... ۱۱۱
شکل (۷-۳۴) - میزان فراوانی سطح زیر نمودار خطا برای گاری با استفاده از بهینهسازی ضرایب کنترلر پیشنهادی ۱۱۱

فهرست جدول‌ها

جدول (۳-۱) مقایسه مقادیر متناظر در سه کنترلر لغزنده لایه مرزی ثابت، لایه مرزی متغیر با زمان و روش پیشنهادی..... ۴۱
جدول (۴-۱) پنج جمعیت نمونه و برازندگی مربوط به آن‌ها..... ۵۰
جدول (۷-۱) مقادیر متغیر های طراحی و توابع هدف برای نقطه مصالحه ۱۰۱
جدول (۷-۲) مقایسه نتایج سه روش ارائه شده ۱۰۶
جدول (۷-۳) مقادیر نامعینی پارامترهای سیستم آونگ معکوس ۱۰۶

نشانه‌ها

s : سطح لغزشی

λ : ثابت سطح لغزشی

Φ : لایه مرزی

η : ضریب سطح لغزشی

C_1 : ثابت سطح لغزشی اول

C_2 : ثابت سطح لغزشی دوم

Φ_1 : لایه مرزی سطح لغزشی اول

φ_z : لایه مرزی سطح لغزشی دوم

Z : متغیر واسط بین دو صفحه لغزشی

Z_u : کران بالای متغیر واسط

K : ضریب شرط لغزشی

N_u : افق کنترل

N_p : افق پیش‌بینی

چکیده فارسی

طراحی بهینه کنترلر مد لغزشی با لایه مرزی متغیر با استفاده از روش کنترل پیشگو

وحید مجدآبادی فراهانی

طراحی کنترلر بهینه برای سیستم‌های نامعین یکی از مهم‌ترین مسائل مهندسی کنترل می‌باشد. کنترل مد لغزنده به‌خاطر داشتن خاصیت ویژه‌ی مقاوم بودن در برابر نامعینی‌های پارامتری سیستم به عنوان یکی از روش‌های کارای کنترلی در این زمینه به کار می‌رود. فرم کلاسیک کنترل لغزشی منجر به سیگنال کنترلی ناپیوسته‌ای می‌شود که با لرزش همراه است.

اعمال لایه مرزی به کنترل مد لغزشی روشی متداول برای کاهش لرزش در سیگنال کنترلی است که برای افزایش کارایی کنترلر می‌توان آن را متغیر با زمان در نظر گرفت. به این صورت که در یک همسایگی از سطح لغزش از تابع اشباع برای حذف ناپیوستگی سیگنال کنترلی استفاده می‌شود؛ چنان‌که در این پروژه نیز انجام شده است. تاکنون شیوه‌های مختلفی از جمله منطق فازی و نیز معادلات دیفرانسیل برای حصول این هدف به‌کار گرفته شده‌اند.

در این پایان‌نامه از دیدگاه کنترل پیشگو به عنوان شیوه‌ای نوین برای طراحی لایه مرزی متغیر با زمان استفاده شده است. روش اعمال شده، لرزش سیگنال کنترل را در عین حفظ خواص کنترل لغزشی که پیش‌تر به آن اشاره شد، حذف می‌کند. کنترل پیشگو در حقیقت یک روند بهینه‌سازی را برای پیش‌بینی مقادیر لایه مرزی در لحظات زمانی آینده (به اندازه افق پیش‌بینی) در پیش می‌گیرد به گونه‌ای که رفتار مطلوبی را برای سیستم در لحظه زمانی فعلی فراهم می‌کند. در این روند بهینه‌سازی ضخامت لایه مرزی به عنوان متغیر طراحی برای مینیمم کردن خطای ردیابی در نظر گرفته می‌شود. در انتهای هر مرحله‌ی پیش‌بینی مقادیر پیش‌بینی شده‌ی لایه مرزی، بردار لایه مرزی را تشکیل می‌دهند که تنها عضو اول این بردار نگه داشته شده و به سیستم اعمال می‌شود. در نتیجه ورودی کنترل تعیین شده و پاسخ در این گام زمانی به دست می‌آید. پاسخ جدید برای مرحله بعدی پیش‌بینی مورد استفاده قرار گرفته و روند پیش‌بینی به همین صورت ادامه می‌یابد.

به منظور ارزیابی روش پیشنهادی دو سیستم غیر خطی نامعین مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در هر دو مورد نمودارهای خطای ردیابی، سطح لغزشی و نیروی کنترلی ارائه گردیده و با روش‌های پیشین مقایسه شده‌اند. مقایسه نتایج حاکی از برتری قابل ملاحظه روش پیشنهادی نسبت به روش‌های گذشته است.

هم‌چنین از الگوریتم ژنتیک به عنوان یکی از شناخته‌شده‌ترین و کاراترین شیوه‌های بهینه‌سازی چند هدفی برای بهینه سازی ضرایب کنترلر پیشنهادی در سیستم آونگ وارون استفاده شده است. که در آن ضریب خطا در سطح لغزشی اول (c_1)، ضریب شرط لغزشی (k)، ماکزیمم مقدار متغیر واسط (z_u) و ضخامت لایه مرزی دوم (Φ_z) به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده‌اند. توابع هدف عبارتند از ماکزیمم اندازه نیروی کنترلی ($\mathrm{Max}(|u|)$) و قدر مطلق سطح زیر نمودار سطح لغزش $\int |s|dt$. نتایج حاصل از بهینه‌سازی نیز نشان‌دهنده‌ی کاهش خطا و بهبود عملکرد روش کنترلی پیشنهادی است. در انتها مقاوم بودن کنترل اعمال شده در برابر نامعینی های پارامتری سیستم نیز با به‌کار گیری نمونه برداری همرسلی نشان داده شده است.

کلید واژه :

کنترل مد لغزشی، کنترل پیشگو، سیستم‌های غیر خطی، بهینه‌سازی چند هدفی، الگوریتم ژنتیک

Abstract

Pareto Optimum Design of Sliding Mode Controller With Variable Boundary Layer Using Predictive Control Method.

Vahid Majdabadi Farahani

Designing optimized controller for uncertain systems is one of the most important tasks in control engineering. For this purpose Sliding Mode Control (SMC) or Variable Structure Control (VSC) is known as one of the methods with good performance due to its fundamental property of robustness and invariance to model parametric uncertainties. But the conventional SMC results in a discontinuous control signal with chattering.

The use of boundary layer in SMC has been a common technique to reduce chattering of the control signal which can be assumed time varying to increase the performance of such controller. To do this saturation function is used in a neighborhood of sliding surface to avoid chattering and omit discontinuity of control signal, as done in this work. Many different methods such as fuzzy logic and differential equations have been used to reach this goal in recent years.

In this thesis the idea of Model Predictive Control (MPC) is used for designing a time variable boundary layer for SMC, which is the novelty of the work. The proposed method omits chattering in control signal along with preserving the pleasant properties of SMC mentioned above. In fact the method of MPC uses an optimization procedure to predict the value of the boundary layer in proceeding time steps (prediction horizon) in order to prepare a desirable performance for the system at the time being. Boundary layer thickness is assumed as design variable in order to minimize the system's tracking error. At the end of each prediction step the predicted values form a boundary layer vector. The first member of this vector is kept only and applied to the system to obtain the new control signal which determines the system response for the present time step. This value is used for next step of MPC prediction algorithm and the procedure goes on in the same way.

To prove the performance of this method it is proposed to two nonlinear uncertain systems. In each case graphs of tracking error, sliding surface and control signal are presented and also compared with the results of previous controls done. Simulation results show the prominence of the proposed control in comparison with previous controls used.

Coefficients of proposed controller for inverted pendulum are also optimized by the use of Genetic Algorithm as a well known and performable multi-objective optimization method, in which error coefficient in first sliding surface (c_1), sliding condition coefficient (k), maximum value of the transfer coefficient (z_u) and second sliding surface thickness (Φz) are design variables and maximum value of control signal (Max|u|) and integral absolute value of sliding surface ($\int |s| dt$) construct the two objective functions. Results obtained from optimization also show decrease in tracking error & better performance of the proposed control. At the end, the robustness of the proposed control method to uncertainties of system parameters is shown using a Hamersley sampling method.

Key words :
Sliding mode control, model predictive control, nonlinear systems, multi objective optimization, Genetic Algorithm

فصل اول

مقدمه

Introduction

۱ – مقدمه

تحقیقات امروزه نشان می‌دهند، که اکثر سیستم‌های فیزیکی و دینامیکی مورد مطالعه، معین نبوده و می‌توانند از لحاظ پارامتری و یا به طور کل از لحاظ ساختاری نامعین باشند. بنابراین طراحی کنترلر برای این‌گونه سیستم‌ها باید به گونه‌ای باشد که توانایی ایجاد پایداری و عملکرد مطلوب در حضور ناپایداری‌ها را داشته باشد. در شرایطی خاص می‌توان از پارامترهای غیرخطی و نامعین صرف‌نظر کرد ولی در حالت کلی روش‌هایی که بتوانند سیستم‌ها را در حالت غیرخطی و نامعین کنترل کنند از اهمیت و ارزش ویژه‌ای برخوردارند. در این پایان‌نامه به دنبال اصلاح و بهبود عملکرد یک روش کنترلی غیرخطی و مقاوم (کنترل مد لغزشی) برای تحقق اهداف مذکور هستیم. برای دست‌یابی به این هدف از یک روش کنترلی دیگر (کنترل پیش‌بین) و الگوریتم-های بهینه سازی چندهدفی استفاده شده است.

۱–۱– کنترل لغزشی

کنترلر لغزشی به عنوان روشی کارآمد برای کنترل سیستم‌های غیرخطی با دینامیک‌های نامعین و اغتشاش‌های محدود شده پیشنهاد شده است. در واقع کنترلرهای مد لغزشی به خاطر توانایی در مقابل اغتشاشات و عدم اطمینان در پارامترهای سیستم شناخته شده هستند. کنترل مد لغزنده در اواخر سال ۱۹۵۰ توسط محققان روسی پایه‌گذاری شد. و با انتشار مقالاتی در سال-های ۱۹۷۶ و ۱۹۷۷ که خود مقدمه چاپ مقالات متعددی در این زمینه شد، موقعیت مستحکمی در هر دو زمینه کنترل خطی و غیرخطی پیدا کرد. به علت یادگیری آسان و سریع، این تئوری کنترل مورد علاقه بسیاری از دانشمندان قرار گرفت [۱].

در بررسی‌های اولیه، سیستم در نظر گرفته شده یک مدل سیستم خطی در فرم متغیر فازی بود. از آن پس کنترل مد لغزشی به یک روش طراحی عمومی توسعه داده شد و برای محدوده وسیعی از انواع سیستم‌ها شامل سیستم‌های غیر خطی، سیستم‌های

چند ورودی - چند خروجی، مدل‌های زمان گسسته، مقیاس بزرگ، سیستم‌های با ابعاد نامتناهی و سیستم‌های اتفاقی آزمایش شد. در واقع کنترل مد لغزنده یک روش بسیار قوی در کنترل سیستم‌های غیرخطی است. این روش کنترل، روشی مقاوم[1] است که با وجود نامعینی مدل و پارامترهای اغتشاشی در شرایطی که حدود این عدم قطعیت‌ها و اغتشاش‌ها مشخص باشد به خوبی عمل می‌کند [۱و۲].

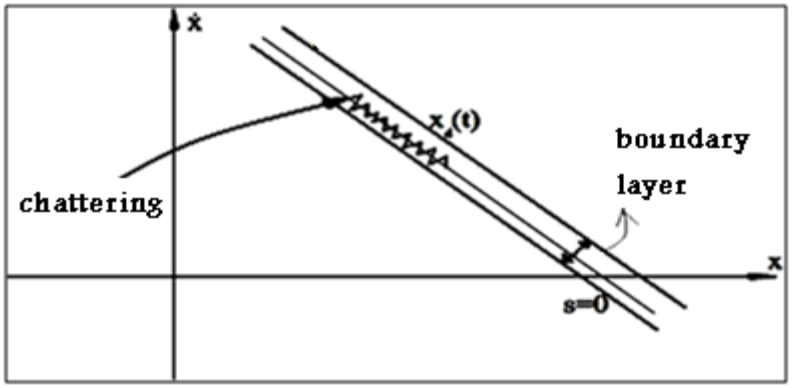
ایده اصلی کنترل مد لغزنده پیوسته تعریف یک خروجی جدید با مرتبه یک، به جای ردیابی یک مسأله مرتبه n-ام است به طوری که سیستم مرتبه یک جدید پایدار باشد. در واقع مسأله ردیابی مرتبه n-ام به وسیله یک مسأله پایدارسازی مرتبه اول خلاصه می‌شود. این خروجی جدید تابع سوئیچینگ نامیده می‌شود، که در واقع همان صفحه لغزش است [۳].

کنترل مد لغزنده با یک عمل کنترلی ناپیوسته، مسیرهای حالت سیستم را به سمت صفحه لغزش در فضای حالت می‌برد و این مسیرها روی این صفحه‌ی به‌خصوص می‌لغزند تا این که به مسیرهای مطلوب برسند. در کنترل لغزنده هدف طراحی، هدایت سیستم به همسایگی یک صفحه لغزش مناسب و سپس مقید نمودن آن به قرار گرفتن و باقی‌ماندن بر روی این صفحه لغزش می‌باشد [۴]. در تمام مدتی که پاسخ‌های سیستم روی این صفحه باقی می‌مانند، دینامیک‌های حلقه بسته به طور کامل به وسیله معادلاتی که صفحه لغزش را تعریف می‌کنند، تنظیم می‌شوند.

از جمله فواید این روش می‌توان به طراحی انعطاف‌پذیر آن اشاره نمود؛ زیرا این روش قادر است مسیرها را مستقیم به سمت صفحه لغزش ببرد. مقاوم بودن این شیوه کنترلی از دیگر فواید آن است. به‌طوری که پارامترهای تعریف صفحه لغزش به وسیله طراح انتخاب می‌شوند و رفتار دینامیکی سیستم حلقه بسته تا زمانی که سیستم روی صفحه لغزش باشد، مستقل از تغییرات پارامترهای دستگاه است. یکی دیگر از مزیتهای این روش این است که حرکت روی صفحه لغزش به رغم اغتشاش‌های محدود شده، نامتغیراست [۳].

یکی از عیوب این روش کنترلی مربوط به سیگنال کنترلی ناپیوسته می‌باشد که ممکن است فرکانس‌های بالای دینامیکی سیستم را که در مدل‌سازی سیستم نادیده گرفته شده‌اند تحریک نماید؛ مثل مدهای ساختاری مدل‌نشده و تأخیر زمانی و ... که باعث ایجاد نوساناتی با دامنه محدود به نام "لرزش"[2] می‌شوند. یکی از روش‌های حل این مشکل تعریف یک لایه مرزی در همسایگی صفحه لغزش است به طوری که تغییرات کنترل در این لایه مرزی به طور پیوسته صورت بگیرد. که در شکل (۱-۱) به خوبی نشان داده شده‌اند [۵].

[1] - Robust
[2] - chattering



شکل (۱-۱) - پدیده لرزش و لایه مرزی [۲]

وجود لایه مرزی در کنترل مد لغزشی علیرغم جلوگیری از پدیده لرزش، باعث افزایش خطای ردیابی می‌شود. یعنی باعث بروز دو اثر متناقض،همراه با هم، می‌گردد. در حقیقت میزان افزایش ضخامت لایه مرزی نسبت مستقیمی با خطای ردیابی دارد. زمانی که لایه مرزی ثابت در نظر گرفته می‌شود ناگزیر باید ماکزیمم ضخامت آن را در تمام طول مدت کنترل در نظر گرفت. برای حل این مشکل از لایه مرزی متغیر استفاده می‌شود. به گونه‌ای که در هر لحظه از زمان ضخامت لایه مرزی به میزانی باشد که برای رفتار مطلوب سیستم در آن لحظه مورد نیاز است. تاکنون روش‌های مختلفی برای طراحی لایه مرزی متغیر با زمان پیشنهاد و به کار گرفته شده است [۶].

در این پایان نامه دیدگاه کنترل پیش‌بین به عنوان شیوه‌ای نوین برای طراحی لایه مرزی متغیر با زمان مورد استفاده قرار گرفته است.

۱-۲- کنترل پیش بین

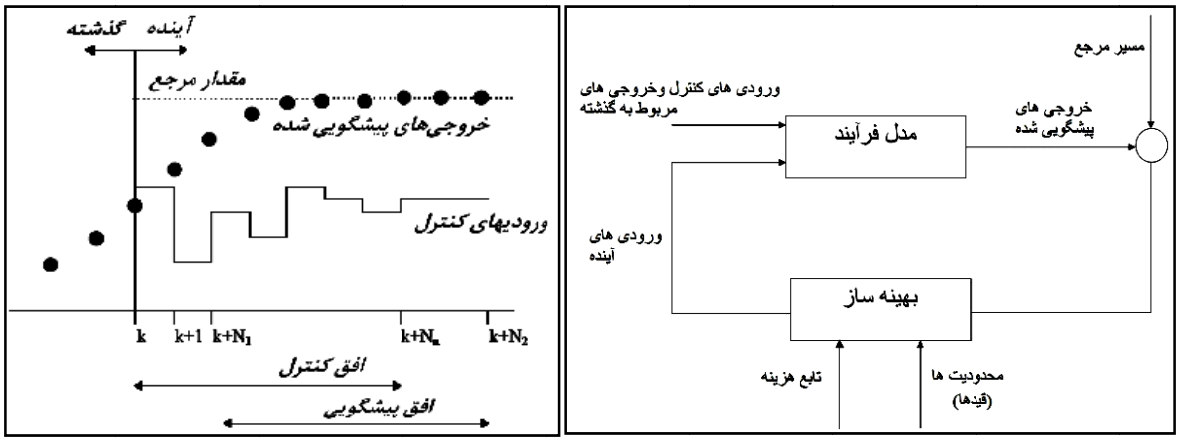
امروزه نحوه کنترل فرآیندهای صنعتی و انتخاب روش مناسب جهت این امر از اهمیت بسزایی برخوردار است. الگوریتم کنترلی مورد استفاده در صنعت بایستی دارای توانایی‌های لازم، از جمله سهولت به‌کارگیری توسط اپراتور و تنظیم ساده باشد.

کنترل کننده‌های پیش بین مبتنی بر مدل[3] یکی از پیشرفته‌ترین انواع کنترل کننده‌ها هستند که در چند سال اخیر کاربرد آن‌ها در صنعت و مراکز تحقیقاتی به طور چشم‌گیری گسترش یافته است. دلیل این امر ناشی از این حقیقت است که کنترل کننده‌های پیش‌بین، دارای قابلیت‌های بسیاری در کنترل فرآیندهای مختلف می‌باشند. به‌طورکلی کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل، به روش‌های کنترلی‌ای گفته می شود که با کمک مدلی از فرآیند موردنظر و مینیمم سازی یک تابع معیار، سیگنال‌های کنترل مطلوب را به‌دست می‌آورند. درالگوریتم MPC مسیر مطلوب به اندازه افق پیش‌بینی[4] (شکل (۱-۲)) از قبل مشخص شده است، حال بایستی سیگنال‌های کنترلی را به گونه‌ای تنظیم کرد که خروجی پیش‌بینی شده تا حد امکان به مسیر مطلوب

[3] -model-based controller
[4] -Pridiction Horizon

نزدیک گردد [۷].

در هر گام کنترلی خروجی کنترل کننده، برای چندین نمونه بعدی محاسبه می‌شود، شکل (۱-۲)، و از اولین مولفه (و در برخی موارد عملی چند درایه و یا برازشی از آن‌ها) برای کنترل فرآیند در زمان نمونه برداری فعلی، t، استفاده می‌گردد. سپس در زمان نمونه برداری بعدی، t+1، تمامی مراحل ذکر شده با استفاده از آخرین اطلاعات اندازه‌گیری شده، تکرار می گردد [۸و۹].



شکل (۱-۲) - نحوه عملکردکنترل پیش بین / افق کنترل و افق پیش بینی

همان‌طور که در بخش قبل نیز اشاره شد در این پایان‌نامه از دیدگاه کنترل پیش‌بین برای تعیین لایه مرزی کنترلر مد لغزشی استفاده شده است. در واقع سیستم مدل شده توسط کنترل مد لغزشی را به عنوان مدل پیش‌بینی در روند کنترل پیش‌بین مورد استفاده قرار داده و لایه مرزی را تعیین می‌کنیم. به این صورت که ضخامت لایه مرزی در کنترل پیش‌بین طی یک فرآیند بهینه سازی به عنوان متغیر طراحی با هدف مینیمم کردن خطای ردیابی مورد استفاده قرار گرفته و مقادیر آن تعیین می‌شوند.

۱-۳- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک که از روند تکاملی جانداران در طبیعت الهام گرفته شده است، برای پیدا کردن مقدار کمینه (یا بیشینه) یک تابع در بازه مورد نظر ابتدا از تعدادی نقطه به طور تصادفی انتخاب می‌کند، که به این مجموعه جمعیت اولیه گفته می‌شود. سپس به کمک مکانیزم انتخاب سعی می‌شود که عضوها یا کروموزوم‌های بدتر از این جمعیت حذف شده و عضوهای بهتر جانشین آن‌ها شوند. در ادامه با انجام عملیات ژنتیکی مانند پیوند[5] و جهش[6] نسل جدیدی تشکیل می‌شود و عملیات انتخاب دوباره روی این جمعیت جدید انجام می‌گیرد و این حلقه ادامه به همین شکل تکرار می‌شود تا عضو بهینه به‌دست آید [۱۰].

[5] - crossover
[6] - mutation

۱–۴– بهینه سازی چند هدفی

در بهینه سازی چند هدفی طراح قصد دارد تا با تعریف چند تابع هدف و انتخاب تعدادی متغیرهای طراحی مرتبط به سیستم و تأثیرگذار در توابع مورد نظر، متغیرها را به سمتی ببرد که بهترین جواب‌ها را برای تمام توابع ارائه دهد. برای هر متغیر طراحی حدودی معلوم می‌شود که در واقع همان کران‌های بالا و پایین متغیر است که بر اساس شناخت طراح از سیستم معین می‌شود.

با توجه به این‌که در بهینه‌سازی چند هدفی به دلیل تضاد بعضی از توابع هدف دستیابی به جوابی که همه توابع هدف را به سمت مطلوبی ببرد عملاً ممکن نیست - یعنی شرایطی پیش می‌آید که یکی از توابع هدف به سمت مطلوبی رفته و دیگری در شرایط نامطلوب قرار می‌گیرد- می‌بایست به دنبال یک دسته جواب (پرتو) بهینه بود که در آن یک یا چند تابع هدف به شرایط مطلوب برسند و سایرین کم‌ترین نامطلوبی را داشته باشند که البته این مشکل می‌تواند با الگوریتم‌های تکاملی به‌خصوص الگوریتم ژنتیک مرتفع شود [۱۱و۱۲].

در مسائل بهینه‌سازی چند هدفی پس از تعیین بردار طراحی که شامل همه متغیرهای طراحی است، به راحتی می‌توان مجموعه‌ای از توابع هدف را تحت تعدادی قیدهای مساوی یا نامساوی، به‌طور هم‌زمان بهینه نمود. بنابراین فرآیند بهینه سازی چند هدفی شامل ناحیه قابل قبول طراحی است به‌طوری که قیدهای مساوی و نامساوی را ارضا کند.

در سال‌های اخیر فرآیندهای بهینه سازی مورد توجه بسیاری از محققین در علوم مختلف قرار گرفته اند. از جمله می‌توان به کاربرد آن در مهندسی کنترل اشاره نمود. طراحی بهینه سیستم‌های کنترلی به منظور دستیابی به سیستم‌هایی با عملکرد بالا از جمله کاربردهای الگوریتم‌های تکاملی به ویژه الگوریتم ژنتیک می‌باشد. به برخی از این طراحی‌های بهینه، در مراجع [۱۳و۱۴] اشاره شده است. در طراحی بهینه کنترلر، می‌توان توابع هدفی را انتخاب کرده و به کمک الگوریتم‌های تکاملی در فرآیندهای بهینه سازی مقدار اکسترمم این توابع را پیدا نمود که منجر به دستیابی به کنترلرهای بهینه می‌شود. از جمله کاربردهای دیگر الگوریتم‌های تکاملی و الگوریتم ژنتیک، طراحی سیستم‌های کنترلی هوشمند نظیر کنترل‌های فازی و عصبی می‌باشد [۱۵-۱۹].

در این پایان نامه از بهینه‌سازی چند هدفی برای به‌دست آوردن ضرایب بهینه کنترلر حاصل از روش پیشنهادی (تعیین لایه مرزی کنترل لغزشی توسط کنترل پیش‌بین) استفاده شده است و نتایج حاکی از کاهش هم‌زمان خطا و نیروی کنترلی است.

۱–۵– مطالب ارائه شده در این پایان‌نامه

مطالب ارائه شده در فصول مختلف این پایان‌نامه به شرح زیر است:

در فصل دوم اصول و مفاهیم کنترل پیش‌بین بررسی شده است، سپس به معرفی اجزای آن پرداخته و انواع مدل‌های مورد استفاده در این روش بیان می‌شود. در پایان این فصل تعیین قانون کنترل توسط این روش شرح داده می‌شود.

در فصل سوم ابتدا مبانی کنترل لغزشی، معادلات حاکم و نحوه عملکرد آن به طور دقیق تبیین شده، سپس به بیان پارامتری لایه مرزی و تأثیر آن در هموار شدن سیگنال کنترلی پرداخته شده است. در پایان این فصل لایه مرزی متغیر از دیدگاه کنترل

پیش‌بین تعیین، و نتایج حاصل با روش‌های قبلی مقایسه شده است.

در فصل چهارم مقدمه‌ای از مباحث پایه‌ای الگوریتم‌های تکاملی ارائه شده است. الگوریتم ژنتیک به عنوان یکی از محبوب‌ترین و پرکاربردترین الگوریتم‌های تکاملی در این فصل توضیح داده می‌شود.

در فصل پنجم مباحث بهینه سازی چندهدفی و تعاریف مربوط به پرتو[۷] و پرتو غالب ارائه می‌شود. و در نهایت روش بهینه‌سازی مورد استفاده در این پایان‌نامه معرفی شده است.

در فصل ششم اصول تحلیل احتمالاتی بیان شده است. در این فصل روش‌های تولید مقادیر تصادفی برای پارامترهای کنترل شرح داده و چگونگی سنجش مقاوم بودن کنترلر بررسی شده است.

در فصل پایانی ابتدا مدل‌سازی آونگ وارون صورت گرفته سپس روش کنترل مد لغزنده مجزا[۸] به طور کامل توضیح داده می‌شود و در ادامه روش پیشنهادی را که اصول آن در انتهای فصل ۳ بیان شد، بر سیستم اعمال شده و نتایج در نمودارهای مجزا ارائه شده است. در قسمت بعدی این فصل ضرایب کنترلر حاصل با الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده و نتایج سه کنترلر به دست آمده با یکدیگر مقایسه و به دو صورت ترسیمی و پارامتری ارائه گردید.

در بخش پایانی این فصل، مقاوم بودن عملکرد کنترلرهای حاصل مورد بررسی قرار گرفت. به این گونه که هر کدام از پارامترهای فیزیکی آونگ وارون در بازه‌ای معین، متغیر در نظر گرفته شده و با استفاده از روش همرسلی مقادیر تصادفی برای این پارامترها تولید می‌شود، در ادامه سیستم‌ها به ازای این مقادیر حل شده و نتایج با هم مقایسه می‌گردد.

هم‌چنین نتیجه‌گیری نهایی و پیشنهادات برای ادامه کار، در انتهای این فصل بیان شده است. ضمن اینکه در پایان هر فصل نتیجه‌گیری مربوط به آن فصل و ارتباط مباحث فصل با این پایان‌نامه ارائه شده است.

[7] -Pareto
[8] -Decoupled Sliding Mode Control