دانشکده مهندسی
گروه مهندسی برق

گزارش پروژه کارشناسی رشته مهندسی برق (گرایش کنترل)

عنوان:

کنترل مرتبه کسری سیستم پاندول معکوس

نگارش :

محمدرضا سهرابی

استاد راهنما:

دکتر ابوالفضل جلیلوند

تابستان ۱۳۹۸

چکیده

این گزارش پروژه به مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم دینامیکی پاندول معکوس با استفاده از کنترل‌کننده تناسبی- انتگرالی- مشتقی مرتبه کسری (FOPID)[1] می‌پردازد. عموماً روش کنترل PID، برای کنترل سیستم‌های دینامیکی خطی استفاده می‌شود. در این پروژه برای کنترل سیستم دینامیکی غیرخطی علاوه بر کنترل کننده PID از کنترل‌کننده FOPID نیز استفاده شده است. پاندول معکوس به عنوان یک سیستم غیرخطی برای محک این روش کنترلی مورد استفاده قرار گرفته است. در اینجا، هدف کنترل سیستم است به‌گونه‌ای که ارابه به موقعیت مطلوب دست یابد و پاندول معکوس در موقعیت عمودی پایدار شود. با استفاده از مدل MATLAB-SIMULINK ساختار کنترلی سیستم شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی مزایای روش کنترلی FOPID را در حضور اغتشاشات خارجی به هر دو صورت پایدارسازی و ردیابی نشان می‌دهد.

[1] FRACTIONAL ORDER PID

فهرست مطالب

فصل اول

آشنایی با پاندول معکوس

۱-۱ مقدمه ۶

۱-۲ مدل‌سازی پاندول ۷

۱-۳ تابع تبدیل پاندول ۹

۱-۴ معادلات فضای حالت ۱۰

فصل دوم

کنترل‌کننده PID

۲-۱ معرفی کنترل‌کننده PID ۱۱

۲-۲ طراحی کنترل‌کننده PID ۱۱

۲-۳ روش‌های تنظیم ضرایب PID ۱۲

۲-۴ کنترل زاویه پاندول و موقعیت ارابه به‌طور هم‌زمان به کمک دو کنترل کننده PID ۱۳

فصل سوم

روش تنظیم مبتنی بر بهینه‌سازی

۳-۱ روش تنظیم مبتنی بر بهینه‌سازی ۱۴

۳-۲ بررسی انواع شاخص های (انتگرالی) عملکرد ۱۵

۳-۳ معیار انتگرال مجذور خطا (ISE) ۱۵

۳-۴ معیار انتگرال قدر مطلق خطا (IAE) ۱۶

۳-۵ معیار انتگرال حاصل ضرب زمان در مجذور خطا (ITSE) ۱۶

۳-۶ معیار انتگرال حاصل ضرب زمان در قدرمطلق خطا (ITAE) ۱۷

۳-۷ مقایسه انتخاب‌گری شاخص‌های عملکردی ۱۸

فصل چهارم

کنترل‌کننده مرتبه کسری (FOPID)

۴-۱ معرفی کنترل‌کننده مرتبه کسری ۲۳

۴-۲ نحوه پیاده‌سازی کنترل‌کننده مرتبه کسری ۲۴

فصل پنجم

نتایج شبیه‌سازی **۲۵**

۵-۱ پایداری پاندول معکوس درحضور و غیاب اغتشاش ۲۶

۵-۲ ردیابی پاندول معکوس در حضور و غیاب اغتشاش ۳۰

۵-۳ نتیجه‌گیری ۳۴

ضمیمه

الگوریتم ازدحام جمعیت(PSO)

B-۱ معرفی الگوریتمPSO ۳۵

B-۲ ویژگی الگوریتمPSO ۳۵

B-۳ مراحل الگوریتمPSO ۳۷

منابع ۴۰

فصل اول

۱-۱مقدمه :

حفظ تعادل یک پاندول معکوس سوار بر روی یک ارابه متحرک که در یک راستا به‌طور افقی حرکت می‌کند، یک مسئله کلاسیک در سیستم‌های کنترل است. در این پروژه روش‌های مختلفی جهت بازگرداندن پاندول معکوس از حالت نامتعادل به حالت تعادل و حفظ این حالت، ارائه می‌شود.

پاندول معکوس یک مسئله استاندارد در سیستم‌های کنترلی بوده و همچنین برای نمایش اصول کنترل خطی، مانند پایدار کردن سیستم‌های ناپایدار مفید می‌باشد. از آنجایی که این سیستم به‌طور ذاتی غیرخطی است، برای نمایش ایده‌هایی در سیستم‌های کنترلی غیرخطی نیز مفید می‌باشد. در این سیستم، یک پاندول معکوس بر روی یک ارابه متصل شده که توسط یک موتور در راستای محور افقی حرکت می‌کند. ما می‌توانیم از طریق موتور سرعت و موقعیت معینی را به ارابه بدهیم و مسیر ریلی، ارابه را به حرکت در یک راستا محدود می‌کند. در عمل، سنسورهایی جهت اندازه گیری زاویه انحراف پاندول و سرعت و موقعیت ارابه در سیستم قرار داده می‌شوند و اندازه‌گیری‌های لازم و همچنین سیگنال‌های کنترلی موتور توسط یک برد کنترلی که در واقع رابط بین کامپیوتر و این سیستم است، انجام می‌شود.

این سیستم در واقع یک سیستم یک ورودی- دو خروجی می‌باشد، چرا که ما باید بتوانیم تنها با یک سیگنال کنترلی که به موتور می‌دهیم، به‌طور هم‌زمان موقعیت ارابه و زاویه پاندول را تحت کنترل داشته باشیم. سیستم پاندول معکوس دو نقطه تعادل ذاتی دارد که یکی پایدار و دیگری ناپایدار است. نقطه تعادل پایدار جایی است که پاندول رو به پایین قرار گرفته که بدون نیاز به هیچ کنترل‌کننده‌ای سیستم به‌طور طبیعی رو به این حالت می رود. نقطه تعادل ناپایدار مربوط به وضعیتی می‌شود که پاندول دقیقاً رو به بالا قرار گرفته و در نتیجه نیاز به یک کنترل‌کننده برای حفظ تعادل دارد. هدف اصلی در مسئله پاندول معکوس، حفظ تعادل در نقطه ناپایدار است و هدف کنترلی این پروژه آن است که وضعیت پاندول را به حالت پایدار در یک نقطه نامتعادل برساند و این وضعیت را حفظ کند.

در این راستا، با استفاده از معادلات مکانیکی سیستم پاندول معکوس، شبیه‌سازی‌های مربوطه در نرم‌افزار MATLAB انجام می‌گیرد تا شمای کلی آنچه در پیش رو داریم، برایمان آشکار شود. از این شبیه‌سازی ما می‌توانیم پاسخ ذاتی سیستم را مشاهده کرده و با قرار دادن یک کنترل‌گر و تغییر ضرایب آن نتایج دلخواهی بدست

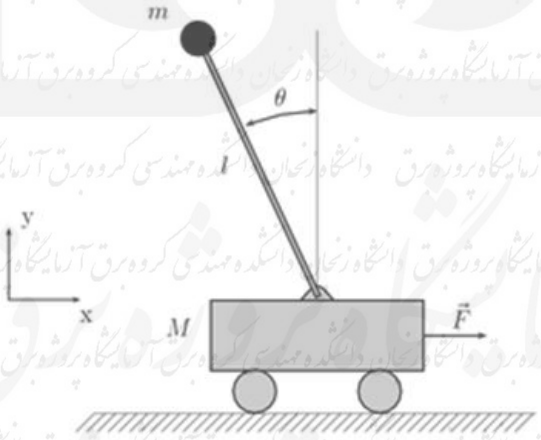
آوریم و بر اساس آن چگونگی تغییر رفتار سیستم با تغییر دادن پارامترهایی از آن، از جمله جرم و طول پاندول و... و تغییر ضرایب کنترل کننده، را پیش بینی کرده و در عمل سریع تر به نتایج دلخواه برسیم.

در این بخش ابتدا با استفاده از قوانین مکانیکی تابع تبدیلی برای سیستم بدست آورده و سیستم را با استفاده از آن مدل می‌کنیم. سپس کنترل‌کننده‌های مختلفی را به آن اعمال کرده و نتایج را شبیه‌سازی می‌کنیم.

برای این منظور ابتدا از کنترل کننده PID و سپس کنترل‌کننده FOPID جهت حفظ تعادل استفاده شده است که با استفاده از آن توانستیم هر دو خروجی سیستم یعنی زاویه و موقعیت پاندول را به خوبی کنترل کنیم.

۱-۲مدل‌سازی سیستم (پاندول معکوس) :

سیستم پاندول معکوس مورد نظر، در شکل۱-۱ نمایش داده شده است؛ که از یک ارابه، یک پاندول، و یک مسیر ریلی جهت محدود کردن حرکت ارابه به یک راستا و همچنین تعیین موقعیت آن، تشکیل شده است. پاندول از یک انتها به مرکز سطح فوقانی ارابه متصل شده و از انتهای دیگر آزاد می‌باشد، در نتیجه می‌تواند به طور آزادانه در صفحه‌ای شامل مسیر ریلی حرکت کند. ارابه، با توجه به اینکه محدود به حرکت بر روی مسیر ریلی است، توسط یک موتور حرکت می‌کند در حالی که موقعیت ارابه از وسط مسیر و زاویه انحراف پاندول از نقطه تعادل، توسط سنسورهایی اندازه‌گیری می‌شوند. در بدست آوردن معادلات سیستم و همچنین شبیه‌سازی، از اثر اصطکاک جهت ساده‌تر شدن معادلات صرف‌نظر شده است.



شکل (۱-۱) : نمودار جسم آزاد پاندول معکوس

سیستم پاندول معکوس شکل ۱-۱ با استفاده از یک نیروی ضربه‌ایF تحریک می‌شود. در ادامه معادلات دینامیکی این سیستم را بدست آورده و حول نقطه تعادل خطی می‌کنیم. (فرض بر این است که پاندول فقط در حدود چند درجه از نقطه تعادل منحرف می شود). پارامترهای سیستم مورد مطالعه در جدول ۱-۱ آورده شده است.

جدول (۱-۱) : پارامترهای سیستم پاندول معکوس

M	جرم ارابه	0.5 kg
m	جرم پاندول	0. ۰۵kg
b	اصطکاک ارابه	0.1 N/m/sec
l	فاصله مرکز جرم پاندول	0.3 m
I	گشتاور ماند پاندول	0.006 kg.m^2
F	نیروی اعمالی به ارابه	
x	موقعیت ارابه	
theta	زاویه پاندول نسبت به قائم	

مدل‌سازی پاندول معکوس:

مطابق شکل ۱-۱، یک پاندول معکوس به جرم m و به طول l متر روی یک ارابه به جرم M قرار گرفته است این ارابه در جهت افقی حرکت می‌کند. نیروی کنترل F موجب حرکت M و متعاقباً موجب تعادل پاندول معکوس می‌گردد. در این سیستم فرض می‌کنیم اصطکاک با سرعت رابطه مستقیم دارد.

روش مدل‌سازی بر اساس معادلات لاگرانژ:

متغیرهای تعمیم یافته θ , x حرکت سیستم را به‌طور کامل تعریف می‌کنند. انرژی کل سیستم برابر است با:

$$K = \frac{1}{2}M\dot{x}^2 + \frac{1}{2}m(\dot{X}_P^2 + \dot{Z}_P^2) \quad (۱-۱)$$

$$X_P = X + L\sin\theta \quad (۱-۲)$$

$$Z_P = Z + L\cos\theta \quad (۱-۳)$$

انرژی پتانسیل سیستم برابر است با:

$$\mathrm{L} = \mathrm{K} - \mathrm{P} \quad (۱-۴)$$

$$P = mgZ_P \quad (۱-۵)$$

با حل معادله لاگرانژ در امتداد θ, x داریم:

$$(I): \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}}\right) - \frac{\partial L}{\partial x} = F \quad (۱-۶)$$

$$\Rightarrow (M+m)\ddot{x} + m\ell\ddot{\theta}\cos\theta - \mathrm{m}\ell\dot{\theta}^2\sin\theta = \mathrm{F}$$

$$(II): \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = 0 \quad (۱-۷)$$

$$\Rightarrow \mathrm{L}\ddot{\theta} - \mathrm{g}\sin\theta + \ddot{\mathrm{x}}\cos\theta = 0$$

۱-۳ تابع تبدیل پاندول :

با گرفتن تبدیل لاپلاس از معادلات قبل داریم:

$$\begin{cases} (\mathrm{I} + \mathrm{m}\ell^2)\mathrm{s}^2\theta(\mathrm{s}) - \mathrm{mg}\ell\theta(\mathrm{s}) = \mathrm{m}\ell\mathrm{s}^2\mathrm{X}(\mathrm{s}) \\ (M+m)\mathrm{s}^2\mathrm{X}(\mathrm{s}) + bsX(s) + m\ell\mathrm{s}^2\theta(\mathrm{s}) = \mathrm{F} \end{cases} \quad (۱-۸)$$

با توجه به اینکه خروجی مطلوب، زاویه پاندول می باشد، با حذف x از معادلات فوق داریم:

$$\frac{\theta(s)}{F(s)} = \frac{\frac{\mathrm{m}\ell}{\mathrm{q}}\mathrm{s}^2}{\mathrm{s}^4 + \frac{\mathrm{b}(\mathrm{I}+\mathrm{m}\ell^2)}{\mathrm{q}}\mathrm{s}^3 - \frac{(\mathrm{M}+\mathrm{m})\mathrm{mg}\ell}{\mathrm{q}}\mathrm{s}^2 - \frac{\mathrm{bmg}\ell}{\mathrm{q}}\mathrm{s}} \quad (۱-۹)$$

$$\mathrm{q} = [(M+m)(I+m\ell^2) - (m\ell)^2]$$

با ساده‌سازی داریم:

$$\frac{\theta(s)}{F(s)} = \frac{\frac{m\ell}{q}s}{s^3 + \frac{b(I+m\ell^2)}{q}s^2 - \frac{(M+m)mg\ell}{q}s - \frac{bmg\ell}{q}} \quad (۱۰-۱)$$

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{\frac{I+m\ell^2}{q}s^2 - \frac{mg\ell}{q}}{s^3 + \frac{b(I+m\ell^2)}{q}s^2 - \frac{(M+m)mg\ell}{q}s - \frac{bmg\ell}{q}} \quad (۱۱-۱)$$

۱-۴ مدل فضای حالت پاندول :

همچنین می‌توان معادلات فضای حالت را برای سیستم فوق به‌صورت زیر به‌دست آورد:

$$\dot{x}_1 = x_2,$$

$$\dot{x}_2 = \frac{-mg\cos x_3 \sin x_3 + ml\sin x_3 x_4^2 + F_x}{M + m\sin^2 x_3} + d_1,$$

$$\dot{x}_3 = x_4,$$

$$\dot{x}_4 = \frac{-ml\cos x_3 \sin x_3 x_4^2 - \cos x_3 F_x}{Ml + ml\sin^2 x_3} + \frac{(M+m)\, g\sin x_3}{Ml + ml\sin^2 x_3} + d_2, \quad (۱۲-۱)$$

$$x_1 = x,\ x_2 = \dot{x},\ x_3 = \theta,\ x_4 = \dot{\theta}$$

دانشجویان محترم:

جهت دسترسی به متن کامل پایان نامه‌ها به کتابخانه دانشکده مهندسی و یا آزمایشگاه پروژه گروه برق مراجعه فرمایید.

منابع:

[۱] تواضعی ، محمد صالح ؛ توکلی کاخکی ، مهسان ، " سیستم‌ها و کنترل‌کننده‌های مرتبه کسری"، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی ، ۱۳۹۴.

[2] Stabilization and Tracking Control of Inverted Pendulum Using Fractional Order PID Controllers, Journal of Engineering Volume 2014, Article ID 752918, 9 pages, http://dx.doi.org/10.1155/2014/752918

[3] A. Tepljakov, E. Petlenkov, and J. Belikov, "FOMCON:fractional-order modeling and control toolbox for MATLAB,"in *Proceedings of the 18th International Conference on Mixed Design* of Integrated Circuits and Systems (MIXDES '11), pp.

[4] J.-J. Wang, "Simulation studies of inverted pendulum based on PID controllers," Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 19, no. 1, pp. 440–449, 2011