معرفی آموزنده سیستم پاندول معکوس

حامد ملااحمدیان، عضو هیئت علمی دانشگاه[1]

اطلاعات مقاله

واژگان کلیدی:

آموزنده سیستم پاندول معکوس، ریل و واگن، سیستم انتقال نیرو، میکرو کنترلر، واحد ارتباط داده

چکیده

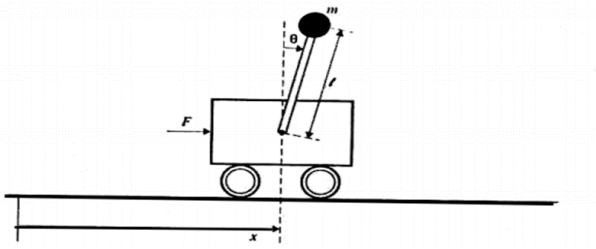
آموزش کاربردی و عملی سیستم های کنترل پیشرفته اعم از پاندول معکوس و مفاهیم مربوطه برای دانشجویان تحصیلات تکمیلی رشته مهندسی کنترل حائز اهمیت می باشد. در این مقاله، دستگاه شبیه ساز سیستم پاندول معکوس در بخش های مختلف مکانیکی و الکتریکی جهت آشنایی وکار عملی با مدل مکانیکی و الکتریکی دستگاه و بخش کنترلی جهت کنترل و پایدار سازی سیستم معرفی شده است. شبیه ساز مدل مکانیکی والکتریکی سیستم پاندول معکوس، میکروکنترلر، واحد ارتباط داده در این دستگاه تعبیه شده است. با استفاده از ورودی ها و خروجی های مناسب تعبیه شده در سیستم، امکان شناسایی دینامیک سیستم، تخمین مدل های مختلف، طراحی و اجرای کنترل کننده به روش های مختلف کنترلی مهیا شده است.

۱- معرفی سیستم پاندول معکوس

پاندول معکوس بر روی گاری مثالی کلاسیک از سیستم های کم عملگر مکانیکی است. کم عملگر به این معنا که تعداد خروجی‌های سیستم بیشتر از تعداد عملگرهای آن است. از منظر کنترل پذیری سیستم‌هایی که تعداد خروجی آنها از تعداد ورودی‌هایشان بیشتر است اگرچه ممکن است کنترل پذیر خروجی باشند ولی این سیستم‌ها کنترل‌پذیر عملکردی نیستند.

سیستم پاندول معکوس دارای دو نقطه تعادل است که یکی پایدار ($\theta=\pi$) و دیگری نقطه تعادل ناپایدار ($\theta=0$) است. هدف پایدارسازی سیستم حول نقطه تعادل ناپایدار آن است.

مطابق شکل ۱ یک پاندول معکوس به جرم m و به طول l را درنظر بگیرید که بر روی گاری به جرم M که حرکت افقی دارد نصب شده است. نیروی کنترل F باعث حرکت M و متعاقباً تعادل پاندول معکوس می گردد. فرض کنید میلهٔ پاندول دارای جرم قابل صرفنظر بوده و هیچگونه اصطکاکی در سیستم وجود نداشته باشد. ورودی سیستم نیروی F و خروجی‌های آن زاویهٔ پاندول θ و میزان جابجائی گاری x می‌باشد.



شکل۱- پاندول معکوس

با در نظر گرفتن متغیرهای حالت به فرم $\begin{bmatrix} x & \theta & \dot{x} & \dot{\theta} \end{bmatrix}^T$ ، معادلات حالت به فرم معادلات زیر خواهد بود:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\theta} \\ \ddot{x} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \theta \\ \dot{x} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ f_1(\theta,\dot{\theta}) \\ f_2(\theta,\dot{\theta}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ f_3(\theta,\dot{\theta}) \\ f_4(\theta,\dot{\theta}) \end{bmatrix} F$$

$$f_1(\theta,\dot{\theta}) = \frac{ml\dot{\theta}^2 sin\theta - mg\, sin\theta cos\theta}{M + m\left(1 - cos^2\theta\right)}$$

$$f_2(\theta,\dot{\theta}) = \frac{-ml\dot{\theta}^2 sin\theta cos\theta + \left(M + m\right) g\, sin\theta}{l\left[M + m\left(1 - cos^2\theta\right)\right]}$$

$$f_3(\theta,\dot{\theta}) = \frac{1}{M + m\left(1 - cos^2\theta\right)}$$

[1] Email: info@abzarazma.com

$$f_4(\theta,\dot{\theta}) = \frac{-\cos\theta}{l\left[M + m\left(1-\cos^2\theta\right)\right]}$$

۲- مشخصات آموزنده پاندول معکوس

سازه این آموزنده در دو بخش مکانیکی و الکتریکی طراحی شده است. بخش مکانیکی آن شامل ۱) ریل و واگن ۲) سیستم انتقال نیرو ۳) پاندول می شود و بخش الکتریکی آن شامل موتور و انکودردورانی می‌باشد.

۳- بخش مکانیکی

۳-۱- ریل و واگن

به جهت بخش ریل و واگن از شفت های پایه دار از جنس کروم استفاده شده است که از استحکام بالایی برخوردار می باشند. به جهت واگن یا همان بخش محرک سیستم نیز از بلبرینگ‌های خطی شیاردار که در حرکت خطی از اصطکاک بسیار پایینی برخوردار هستند استفاده شده است. از این بلبرینگ ها در ساخت پرینتر های سه بعدی، دستگاه های CNC و همچنین سیستم‌های ابزاردقیق استفاده می شود.

شکل۲- تصویر ریل و واگن تشکیل شده از شفت پایه دار کروم و بلبرینگ خطی شیاردار

۳-۲- سیستم انتقال نیرو

در ساخت آموزنده پاندول معکوس از سیستم انتقال نیرو تسمه و پولی استفاده شده است. سیستم انتقال حرکتی تسمه و پولی همانطور که از نام آن مشخص است از یک تسمه انعطاف پذیر به همراه پولی برای انتقال نیرو استفاده می کند. در شکل ۳ یک نمونه از پولی و تسمه را مشاهده می‌کنید.

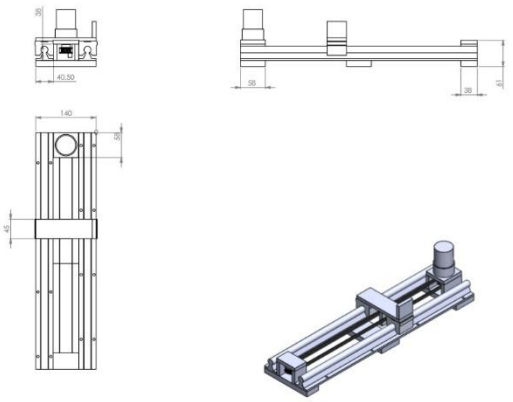
شکل۳- سیستم انتقال نیرو تسمه و پولی

این مکانیزم به جهت سرعت بالای انتقال نیرو برای آموزنده پاندول معکوس استفاده شده است. بایستی دقت شود استفاده از این مکانیزم ها و بهره وری بالا از آن مشابه با هر سیستم انتقال نیروی دیگری مستلزم نگهداری مناسب و بازدید های دوره ای منظم می‌باشد.

۳-۳- پاندول

بخش سوم این سازه پاندول یا همان بخش هدف این سازه می‌باشد. از این جهت این قسمت از سازه را بخش هدف می نامیم که هدف در ساخت این سازه پایداری پاندول در زاویه قائم (نقطه تعادل ناپایدار) می‌باشد. پاندول از دو بخش میله و وزنه تشکیل شده است که در این سازه دو پاندول یکی با میله آلومینیومی (جرم میله خیلی کمتر از وزنه است) و دیگری با میله آهنی (جرم میله نزدیک به وزن وزنه است) ساخته شده است.

سازه آموزنده پاندول معکوس ساخته شده با ویژگی‌های بیان شده در بالا به جهت بهره وری از یک سیستم سریع و دقیق طراحی شده است. در ساخت این مجموعه سعی شده تا تمامی ویژگی های مورد انتظار بیان شده در کتب و مقالات علمی معتبر رعایت شود. در زیر تصویر سازه طراحی شده با جزئیات دقیق ابعاد قطعات آورده شده است



شکل۴- تصویر سازه طراحی شده با جزئیات دقیق قطعات

۴- بخش الکتریکی

۴-۱- موتور

موتور در این سازه به عنوان محرکه اصلی نقش بسیار مهمی را در کارکرد هرچه بهتر آموزنده پاندول معکوس دارا می باشد. دقت در انتخاب نوع موتور می تواند بسیاری از مشکلات پیش رو در کار با این سیستم را مرتفع سازد. در انتخاب نوع موتور برای این سیستم ملاحظاتی چون سرعت بالا، قدرت کافی، عملکرد مناسب در تغییر وضعیت ها (چپگرد و راستگرد) و همچنین ایجاد نویز محیطی و الکتریکی بسیار پایین مد نظر قرار گرفته شده است. به جهت تحقق این اهداف و همچنین ایجاد چالش در کنترل سیستم، در این مجموعه از سروو موتور DC انکودردار در مقابل استپرموتور استفاده شده است. در زیر مشخصات موتور انتخابی برای این آموزنده نشان داده شده است.

DCM50207D-1000
DC servo motor 120W

DCM50207D-1000 is a permanent magnet DC brushed motor with attached incremental encoder which provides position feedback to the controller.

The incremental encoder has differential outputs and resolution of 1000 PPR, i.e. 4000 PPR with x4 encoder resolution multiplication.

Applications: CNC, measurement devices, inkjet printers.

Features: smooth operation, super-low noise, high precision and high reliability.

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Parameter	Unit	Value
Continuous torque (max)	Nm	0.35
Peak torque (stall)	Nm	2.90
No load speed	RPM	3600 ± 10%
Rated speed	RPM	2900
Rotor inertia	kgm^2	$4.73x10^{-5}$
Winding temperature (max)	°C	155
Thermal impedance	°C/W	4.98
Weight	kg	1.34
Rated voltage	V	30.3
Rated current	A	3.94
Rated power	W	120
Torque constant	Nm/A	$80x10^{-3}$
Resistance	Ω	0.90
No load current	A	0.45
Peak current (stall)	A	32.6
Resolution of incremental encoder	PPR	1000

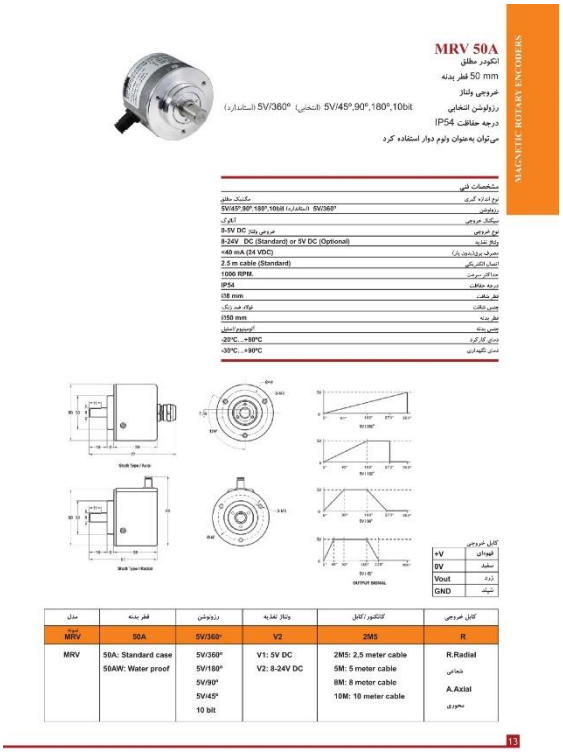
ENCODER WIRING

Color	Description
Black	A+
Blue	A-
Yellow	B+
Green	B-
Red	+5V
White	GND

شکل۵- تصویر و مشخصات سروو موتور انتخابی

۴-۲- انکودر دورانی

همانطور که می‌دانیم در این آموزنده هدف اصلی کنترل زاویه پاندول در زاویه قائم می‌باشد. به همین منظور نیاز به قراردادن انکودر دورانی به جهت اطلاع از زاویه پاندول در هر لحظه وجود خواهد داشت. در این مجموعه از انکودر دورانی مطلق استفاده شده است. تصویر و ویژگی های این انکودر در زیر آورده شده است.



MAGNETIC ROTARY ENCODERS

MRV 50A
انکودر مطلق
50 mm قطر بدنه
خروجی ولتاژ
رزولوشن انتخابی 5V/45°,90°,180°,10bit (انتخابی) 5V/360° (استاندارد)
درجه حفاظت IP54
می‌توان به‌عنوان ولوم دوار استفاده کرد

مشخصات فنی	
نوع اندازه گیری	مگنتیک مطلق
رزولوشن	5V/45°,90°,180°,10bit (استاندارد) 5V/360°
سیگنال خروجی	آنالوگ
نوع خروجی	0-5V DC ولتاژ
ولتاژ تغذیه	8-24V DC (Standard) or 5V DC (Optional)
مصرف برق(بدون بار)	<40 mA (24 VDC)
اتصال الکتریکی	2.5 m cable (Standard)
حداکثر سرعت	1000 RPM.
درجه حفاظت	IP54
قطر ماهک	⌀8 mm
جنس شفت	فولاد ضد زنگ
قطر بدنه	⌀50 mm
جنس بدنه	آلومینیوم آنودایز
دمای کارکرد	-20°C...+80°C
دمای نگهداری	-30°C...+90°C

Shaft type / Axial

Shaft type / Radial

OUTPUT SIGNAL

کابل خروجی

+V	قهوه‌ای
0V	سفید
Vout	زرد
GND	خاکستری

مدل	قطر بدنه	رزولوشن	ولتاژ تغذیه	کانکتور / کابل	کابل خروجی
MRV	50A	5V/360°	V2	2M5	R
MRV	50A: Standard case 50AW: Water proof	5V/360° 5V/180° 5V/90° 5V/45° 10 bit	V1: 5V DC V2: 8-24V DC	2M5: 2,5 meter cable 5M: 5 meter cable 8M: 8 meter cable 10M: 10 meter cable	R.Radial شعاعی A.Axial محوری

13

شکل۶- تصویر و مشخصات انکودر دورانی مطلق انتخابی

۵- طراحی کنترل کننده

همانطور که در بخش قبل گفته شده هدف در کنترل سیستم پاندول معکوس پایداری سیستم حول نقطه تعادل ناپایدار ($\theta=0$) می‌باشد. در آموزنده پاندول معکوس طراحی شده یک قید به این پایداری اضافه شده که آن پایداری سیستم در زاویه گفته شده در کورس محدود حرکت گاری می باشد. کنترل کننده طراحی شده بایستی این قابلیت را داشته باشد تا علاوه بر $\theta=0$، $x=0$ را نیز در پایداری سیستم در نظر بگیرد.

طراحی کنترل کننده برای سیستم پاندول معکوس به جهت پایداری آن حول نقطه تعادل ناپایدار به دو روش امکان پذیر است، روش اول روش سعی و خطا می‌باشد. در این روش با جهت اعمال نیرو به گاری و همچنین مشاهده نتایج در هر بار تست می توان با تغییر پارامترهای کنترل کننده متناسب با رفتار سیستم سعی در پایداری سیستم حلقه بسته نمود. این روش نیازمند تجربه کافی و تلاش بسیار می‌باشد.

روش دیگر استفاده از چندین روش طراحی کنترل کننده یادشده در کتب مهندسی کنترل می باشد روش هایی چون زیگلر نیکولز، روش IMC و ... که نیازمند کسب اطلاعاتی از سیستم می باشد. در طراحی کنترل کننده به روش های مرسوم شما نیاز دارید تا دینامیک سیستم را در اختیار داشته باشید. این اطلاعات نیازمند شناسایی سیستم حلقه باز یا حلقه بسته می‌باشد. همانطور که در معادلات بخش قبل نشان داده شده است بدست آوردن ضرایب $\dot{\theta}$ و θ در توابع f4 تا f1 به روش های مختلف شناسایی سیستم می تواند کمک بسیاری به طراحی کنترل کننده پایدارساز برای سیستم پاندول معکوس داشته باشد.

آموزنده پاندول معکوس طراحی شده این امکان را به کاربر می دهد تا سیستم را به صورت حلقه باز و یا حلقه بسته مورد آزمایش قرار داده تا بتواند تخمین درستی از پارامترهای سیستم داشته باشد. همچنین این امکان برای کاربر ایجاد شده تا بتواند کنترل کننده‌های کلاسیک و هوشمند را به صورت آنالوگ و دیجیتال بر روی این سیستم پیاده سازی نماید.

۶- معرفی آموزنده سیستم پاندول معکوس شرکت تجهیزات ابزارآزما

در شکل ۷ آموزنده پاندول معکوس و کد محصول نشان داده شده است.

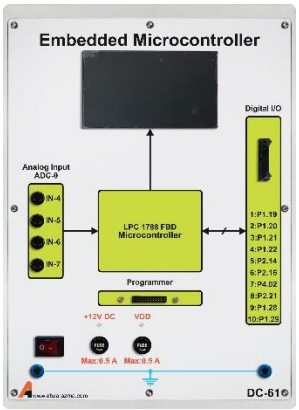
شکل۷- آموزنده سیستم پاندول معکوس

این آموزنده شامل قسمت های مختلف مکانیکی و الکتریکی می باشد که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد.

۷- اجزای آموزنده سیستم پاندول معکوس

۱- مدل مکانیکی و الکتریکی پاندول معکوس: پیاده سازی این مدل در ابتدای مقاله توضیح داده شده است.

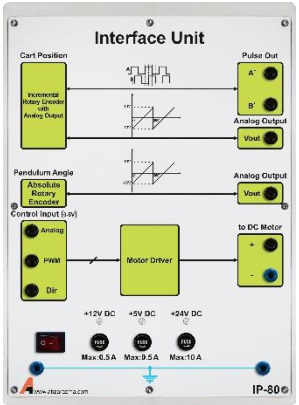
۲- واحد میکرو کنترلر Embedded Microcontroller: این ماژول تشکیل شده از یک پردازنده LPC1788 و مدارات واسط که این امکان را به کاربر می دهد تا از ورودی و خروجی های آنالوگ و دیجیتال با سطح ولتاژ های ۰- ۳,۳ ولت برای دیجیتال و ۱۰+~۱۰- برای آنالوگ استفاده کند. این ماژول در شکل ۸ نمایش داده شده است.



شکل۸- ماژول Embedded Microcontroller

۳- واحد واسط Interface Unit: این ماژول به جهت در دسترس قراردادن سیگنال های مربوط به انکودر زاویه و موقعیت و همچنین پورت های کنترلی درایور سرووموتور DC طراحی و ساخته شده است.

این ماژول در شکل ۹ نمایش داده شده است.

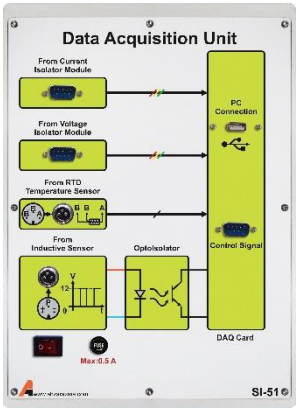


شکل۹- ماژول Interface Unit

۴- واحد ارتباط داده Data Acquisition Unit:

این ماژول با نام واحد ارتباط داده تشکیل شده از یک کارت Advantech usb4704، با هدف ایجاد قابلیت ثبت و نمایش سیگنال ها توسط رایانه طراحی و ساخته شده است.

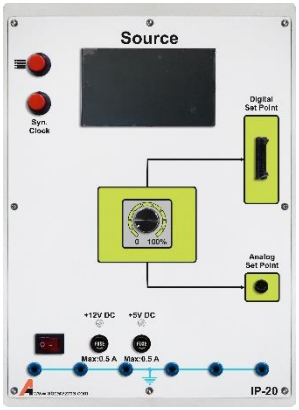
این ماژول در شکل ۱۰ نمایش داده شده است.



شکل ۱۰- ماژول واحد ارتباط داده

۵- منبع تغذیه: این ماژول جهت ساختن فرمان مرجع آنالوگ و دیجیتال و تنظیم فرکانس نمونه برداری ماژول های دیجیتال مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین سیگنال فرمان معادل جهت کنترل سرعت و موقعیت سروو موتور نمایش می‌دهد.

این ماژول در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.



شکل۱۱- ماژول منبع تغذیه

نتیجه گیری

در این مقاله اجزای مختلف سیستم پاندول معکوس معرفی شده و قابلیت ها و مشخصات دستگاه مرور شدند.

Inverted pendulum system training set Introduction

Hamed Molla-Ahmadian[1], Assistant Professor of Electrical Engineering

Article Info

Keywords:

Inverted pendulum system training set, rails and wagon, force transmission system, microcontroller, data acquisition

Abstract

Practical and practical training of advanced control systems, including inverted pendulum and related concepts, is important for graduate students in the field of control engineering. In this paper, the inverted pendulum system simulator is introduced in various mechanical and electrical parts for familiarity and practical work with the mechanical model of the device and the control part for control and stabilization of the system. Simulator of mechanical-electrical model of inverted pendulum, microcontroller and data acquisition unit is embedded in this device. Using appropriate inputs and outputs embedded in the system, it is possible to identify the dynamics of the system, estimate different models, design and implement the controller in different control methods.

[1] Email of Author: info@abzarazma.com