

HALL SENSOR



علیرضا فضلی شهری

تهیه و تنظیم :



مقدمه

یک عنصر هال از لایه نازکی ماده هادی با اتصالات خروجی عمود بر مسیر شارش جریان ساخته شده است. وقتی این عنصر تحت یک میدان مغناطیسی قرار می گیرد، ولتاژ خروجی متناسب با قدرت میدان مغناطیسی تولید می کند. این ولتاژ بسیار کوچک و در حدود میکرو ولت است. بنابراین استفاده از مدارات بهسازی ضروری است. اگر چه سنسور اثر هال، سنسور میدان مغناطیسی است ولی می تواند به عنوان جزء اصلی در بسیاری از انواع حسگرهای جریان، دما، فشار و موقعیت و ... استفاده شود. در سنسورها، سنسور اثر هال میدانی را که کمیت فیزیکی تولید می کند و یا تغییر می دهد حس می کند.

تاریخچه

اثر هال توسط دکتر ادوین هال (Edvin Hall) در سال ۱۸۷۹ در حالی کشف شد که او دانشجوی دکترای دانشگاه Johns Hopkins در بالتیمور (Baltimore) انگلیس بود. هال در حال تحقیق بر تئوری جریان الکترون کلون بود که دریافت زمانی که میدان یک آهنربا عمود بر سطح مستطیل نازکی از جنس طلا قرار گیرد که جریانی از آن عبور می کند، اختلاف پتانسیل الکتریکی در لبه های مخالف آن پدید می آید. او دریافت که این ولتاژ متناسب با جریان عبوری از مدار و چگالی شار مغناطیسی عمود بر مدار است. اگر چه آزمایش هال موفقیت آمیز و صحیح بود ولی تا حدود ۷۰ سال پیش از کشف آن کاربردی خارج از قلمرو فیزیک تئوری برای آن بدست نیامد. با ورود مواد نیمه هادی در دهه ۱۹۵۰ اثر هال اولین کاربرد عملی خود را بدست آورد. در سال ۱۹۶۵ Joe Maupin و Everett Vorthman برای تولید یک سنسور حالت جامد کاربردی و کم هزینه از میان ایده های متفاوت اثر هال را انتخاب نمودند. علت این انتخاب جا دادن تمام این سنسور بر روی یک تراشه سیلیکن با هزینه کم و ابعاد کوچک بوده است این کشف مهم ورود اثر هال به دنیای عملی و پروکاربرد خود در جهان بود.

ویژگیهای عمومی

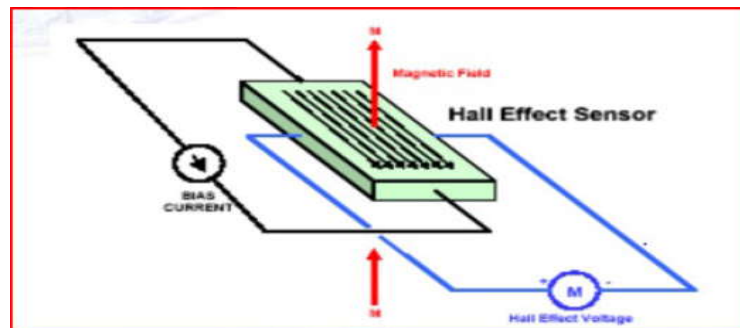
ویژگیهای عمومی سنسورهای اثر هال به قرار زیر می باشند:

۱. حالت جامد ؛
۲. عمر طولانی ؛
۳. عمل با سرعت بالا-پاسخ فرکانسی بالای 100KHZ ؛
۴. عمل با ورودی ثابت (Zero Speed Sensor) ؛
۵. اجزای غیر متحرک ؛
۶. ورودی و خروجی سازگار با سطح منطقی Logic Compatible input and output ؛
۷. بازه دمایی گسترده ($-40^{\circ}\text{C} \sim +150^{\circ}\text{C}$) ؛
۸. عملکرد تکرار پذیر عالی Highly Repeatable Operation ؛

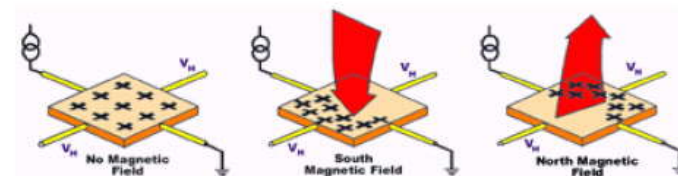
۹. یک عیب بزرگ این است که در این سیستمها پوشش مغناطیسی مناسب باید در نظر گرفته شود، چون وجود میدان های مغناطیسی دیگر باعث می شود تا خطای زیادی در سیستم رخ دهد .

تئوری اثر هال

اگر یک ماده هادی یا نیمه هادی که حامل جریان الکتریکی است در یک میدان مغناطیسی به شدت B که عمود بر جهت جریان عبوری به مقدار I می باشد قرار گیرد، ولتاژی به مقدار V در عرض هادی تولید می شود.



این خاصیت در مواد نیمه هادی دارای مقدار بیشتری نسبت به مواد دیگر است و از این خاصیت در قطعات اثر هال تجارتي استفاده میشود. ولتاژها به این علت پدید می آید که میدان مغناطیسی باعث می شود تا نیروی لرنتز بر جریان عمل کند و توزیع آنها برهم بزند $(\mathbf{B} \times \mathbf{F} = q(\mathbf{V}))$. نهایتاً حاملهای جریان مسیر منحنی را مطابق شکل پیمایند. حاملهای جریان اضافی روی یک لبه قطعه ظاهر می شوند، ضمن اینکه در لبه مخالف کمبود حامل اتفاق می افتد. این عدم تعادل بار باعث ایجاد ولتاژ هال می شود، که تا زمانی که میدان مغناطیسی حضور داشته و جریان برقرار است باقی می ماند.

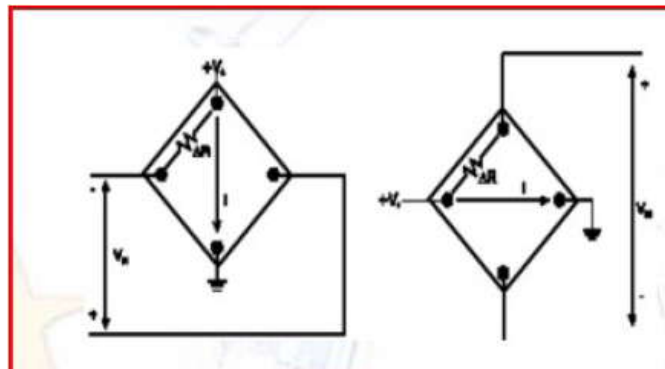


برای یک قطعه نیمه هادی یا هادی مستطیل شکل با ضخامت t ولتاژهای V توسط رابطه زیر بدست می آید:

$$V_H = \frac{K_H B I}{t}$$

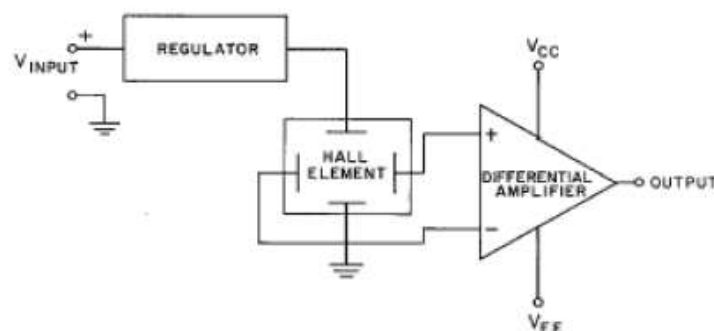
K_H ضریب هال برای ماده مورد نظر است که بستگی به موصلیت بهار و مقاومت هادی دارد.

آنتیمونید ایریدیم ترکیبی است که در ساخت عنصر اثر هال استفاده می شود و مقدار K_H برای آن ۲۰ است. سیلیکن اثر پیز و مقاومتی دارد و بنابراین بر اثر فشار مقاومت آن تغییر می کند. در یک سنسور اثر هال باید این خصوصیت را به حداقل رساند تا دقت و صحت اندازه گیری افزوده شود. این عمل با قرار دادن عنصر هال بریک IC برای به حداقل رساندن اثر فشار و با استفاده از چند عنصر هال انجام میشود. بطوری که بر هر یک از دو بازوی مجاور مدار پل یک عنصر هال قرار گیرد، در یکی جریان بر میدان مغناطیسی عمود است و ولتاژ هال ایجاد می شود و در دیگری جریان موازی با میدان مغناطیسی می باشد و ولتاژ هال ایجاد نمی شود. استفاده از ۴ عنصر هال نیز مرسوم می باشد.



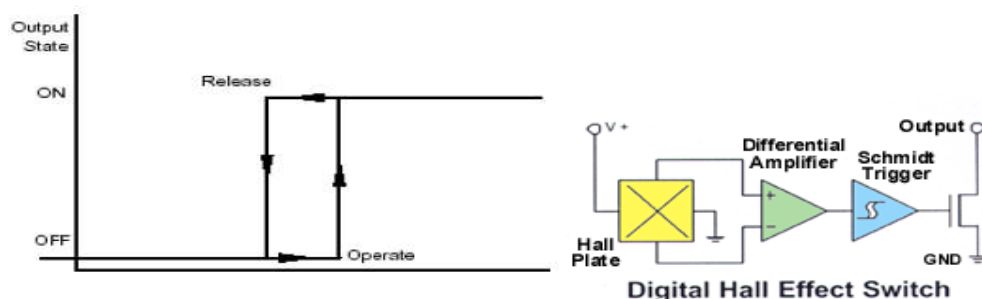
اساس سنسورهای اثر هال

عنصر هال، سنسور میدان مغناطیسی است. با توجه به ویژگیهای ولتاژ خروجی این سنسور نیازمند یک طبقه تقویت کننده و نیز جبران ساز حرارتی است. چنانچه از منبع تغذیه با ریل فراوان استفاده کنیم وجود یک رگولاتور ولتاژ حتمی است. رگولاتور ولتاژ باعث می شود تا جریان I ثابت باشد بنابراین ولتاژ هال تنها تابعی از شدت میدان مغناطیسی می باشد. اگر میدان مغناطیسی وجود نداشته باشد ولتاژی تولید نمی شود. با وجود این اگر ولتاژ هر ترمینال اندازه گیری شود مقداری غیر از صفر به ما خواهد داد. این ولتاژ که برای تمام ترمینال ها یکسان است با Common Mode Voltage (CMV) شناخته می شود. بنابراین تقویت کننده بکار گرفته شده می بایست یک تقویت کننده تفاضلی باشد تا تنها اختلاف پتانسیل را تقویت کند.



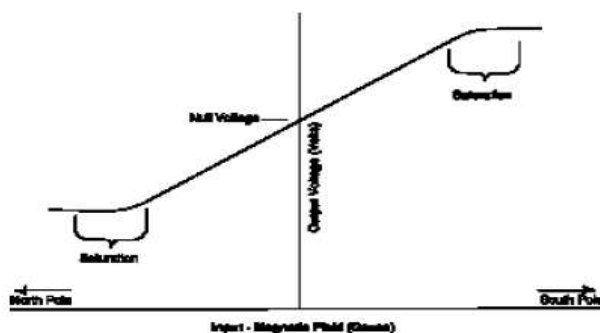
سنسورهای هال دیجیتال

در این سنسورها وقتی بزرگی میدان مغناطیسی به اندازه مطلوبی رسید سنسور ON می شود و پس از اینکه بزرگی میدان از حد معینی کاهش یافت سنسور خاموش می شود. لذا در این سنسورها خروجی تقویت کننده تفاضلی را به مدار اشmitt ترینگر می دهند تا این عمل را انجام دهد، برای جلوگیری از پرش های متوالی از تابع هسترزیس زیر استفاده می کنند.



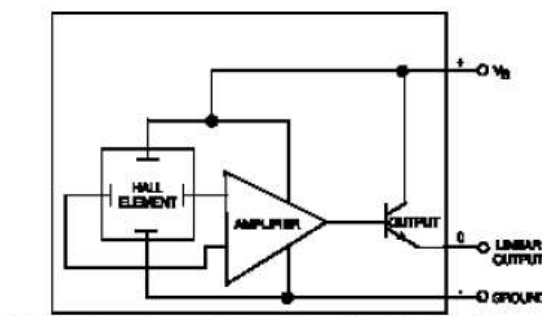
سنسورهای آنالوگ

سنسورهای آنالوگ ولتاژ خروجی خود را متناسب با اندازه میدان مغناطیسی عمود بر سطح خود، تنظیم می کنند. با توجه به کمیت های اندازه گیری این ولتاژ می تواند مثبت یا منفی باشد. برای اینکه سنسورهای ولتاژ خروجی منفی تولید نکند و همواره خروجی تقویت کننده تفاضلی را با یک ولتاژ مثبت را پاس می کنند.



در شکل بالا توجه داریم که یک نقطه صفر وجود دارد که در آن ولتاژی تولید نمی شود. از ویژگیهای اثر هال نداشتن حالت اشباع است و نواحی اشباع در شکل مربوط به آپ امپ در سنسور اثر هال می باشد.

معمولا خروجی تقویت کننده تفاضلی را به ترانزیستور پوش-پول می دهند.

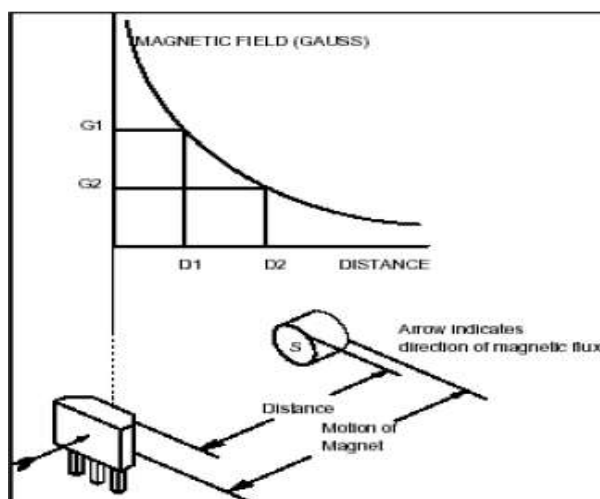
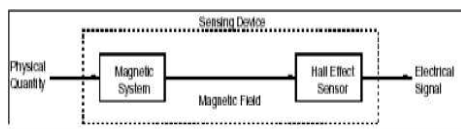


سنسور آنالوگ اثر هال

سیستم های مغناطیسی

سنسور اثر هال درحقیقت بدین ترتیب عمل میکند که توسط یک سیستم مغناطیسی کمیت فیزیکی به میدان مغناطیسی تبدیل می شود. حال این میدان مغناطیسی توسط سنسور اثر هال حس می شود. بسیاری از کمیت های فیزیکی با حرکت یک آهنربا اندازه گیری می شوند. مثلاً دما و فشار را می توان بوسیله انقباض و انبساط یک Bellows که به آهنربا متصل است اندازه گیری نمود. روش های مختلفی جهت ایجاد میدان مغناطیسی وجود دارد.

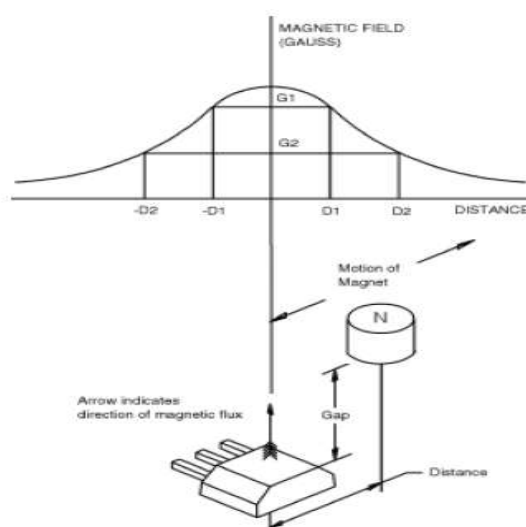
- Unipolar head-on mode در این حالت آهنربا نسبت به نقطه مرجع سنسور حرکت می کند.



همانطور که در شکل بالا دیده می شود منحنی تغییرات فاصله ومیدان مغناطیسی در این شکل آمده است (منحنی بدست آمده غیر خطی است) و دقت در حد متوسط است. مثلاً اگر یک سنسور اثرهال دیجیتالی را در نظر بگیریم در این حالت در فاصله A_1 که حاصل می شود سوئیچ عمل می کند و On میشود و وقتی که فاصله به حدی رسید که A_1 حاصل شود سوئیچ OFF میکند.

- Unipolar slide-by mode

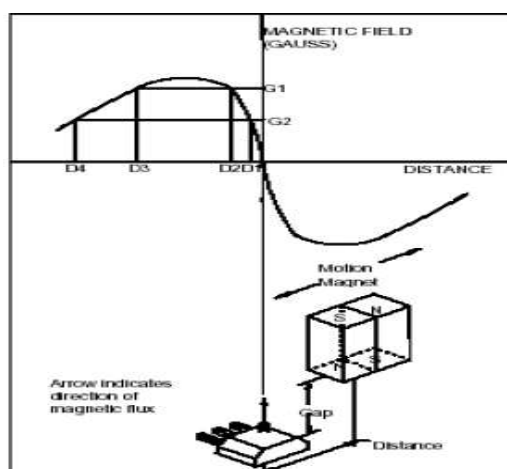
در این حالت آهنربا در یک مسیر افقی نسبت به سنسور تغییر مکان می کند.



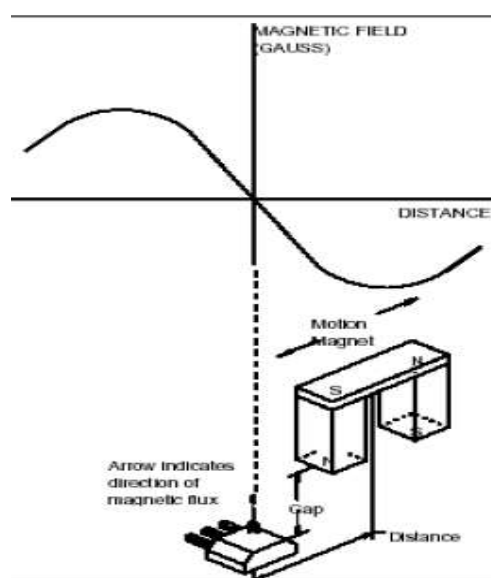
منحنی تغییرات مکان نسبت به میدان مغناطیسی بازهم غیر خطی است- دقت این روش کم است و لی حالت تقارنی کاملاً دیده می شود. مثلاً سنسور اثرهال دیجیتالی را در نظر بگیرید که در اثر میدان G_1 روشن شده و در میدان G_2 خاموش می شود وقتی آهنربا از سمت راست حرکت می کند و به موقعیت $+D_1$ می رسد آنگاه سنسور عمل میکند. این حرکت ادامه می تواند داشته باشد تا به موقعیت $-D_2$ برسد، در این هنگام سنسور آزاد می شود و به همین ترتیب.....

- Bipolar Slide-By made

در این حالت از ۲ آهنربا که قطب S,N هر کدام بصورت ناهمنام در مجاورت هم قرار گرفته است استفاده می کنیم.

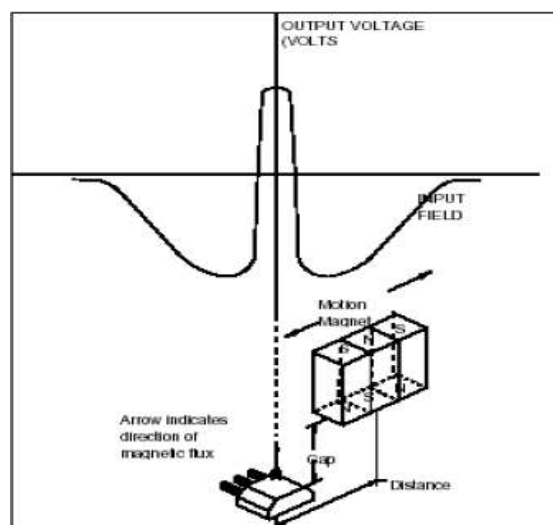


دقت در این روش در حد متوسط است- حالت تقارن وجود ندارد ولی می توان در بخش هایی، از خاصیت خطی منحنی استفاده نمود. اگر همان سنسور دیجیتالی قبلی را در نظر بگیریم در حرکت از راست به چپ وقتی که فاصله به $D2$ می رسد آنگاه سنسور عمل می کند و تا به مرحله $D4$ پیش می رود. بنابراین در یک حرکت پیوسته از راست به چپ سنسور در بخش شیب تند عمل می کند و در بخش شیب کند رها میکند. جهت حذف شیب تند در بخش مبدأ از یک تکنیک دیگر استفاده می شود. بدین ترتیب که در میان ایندو آهنربا فاصله معینی قرار می دهند.



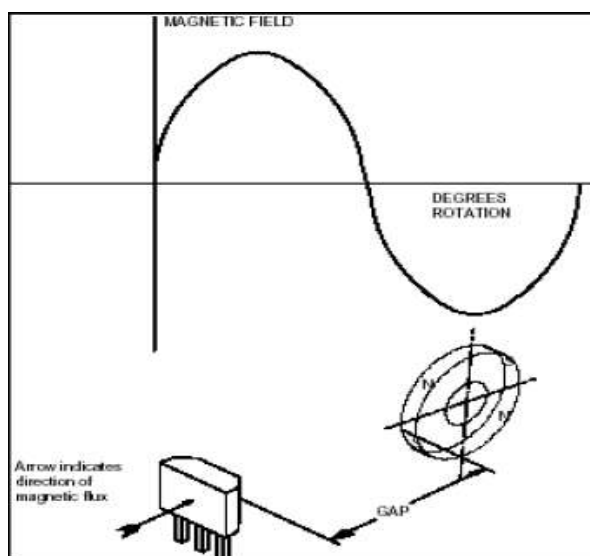
این عمل بطور چشمگیری دقت را افزایش می دهد.

حالت دیگری نیز به کار می رود که در آن منحنی حاصل بصورت یک تابع پالس است. در این روش در میان دو آهنربا، آهنربای دیگری قرار می دهند که پهنای پالس متناسب با پهنای این آهنربا می باشد.



- Bipolar Slide –By mode (ring magnet)

در این حالت از یک آهنربای حلقه استفاده می شود آهنربای حلقه ای یک قطعه آهنربای دیسک مانند است که قطب های آن در پیرامون آن قرار دارند. در شکل زیر آهنربای حلقه ای با دو جفت قطب نمایش داده می شود. به منحنی حاصل شبیه به یک منحنی سینوسی است. هرچه تعداد قطبهای آهنربای حلقه ای بیشتر باشد مقدار پیک حاصل در اندازه میدان کمتر خواهد بود. تعداد پالس های حاصل در این روش برابر با جفت قطبهای آهنربا می باشد. محدودیت در ساخت آهنربای حلقه ای با جفت قطبهای زیاد، محدودیت این روش محسوب می شود.



مقایسه ای از این سیستمها در زیر آمده است :

Mode	Motion Type	Mechanical Complexity	Symmetry	Recommended Applications		
				Digital	Linear	Precision
Unipolar Head-on	Reciprocating	Low	Not Applicable	Unipolar	No	Medium
Unipolar Slide-by	All*	Low-Medium	Yes	Unipolar	No	Low
Bipolar Slide-by (1)	All*	Low-Medium	No	Any	Yes	Medium
Bipolar Slide-by (2)	All*	Medium	No	Any	Yes	High
Bipolar Slide-by (3)	All*	Low-Medium	Yes	Any	Yes	High Medium
Bipolar Slide-by (Ring)	Rotational	Low	Yes	Any	Yes	Low

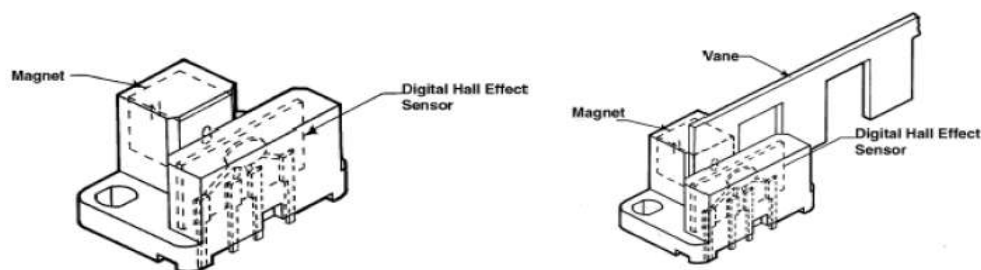
منظور از All حرکتهای چرخشی، پیوسته و رفت و برگشتی است .

کاربردهای سنسور اثر هال

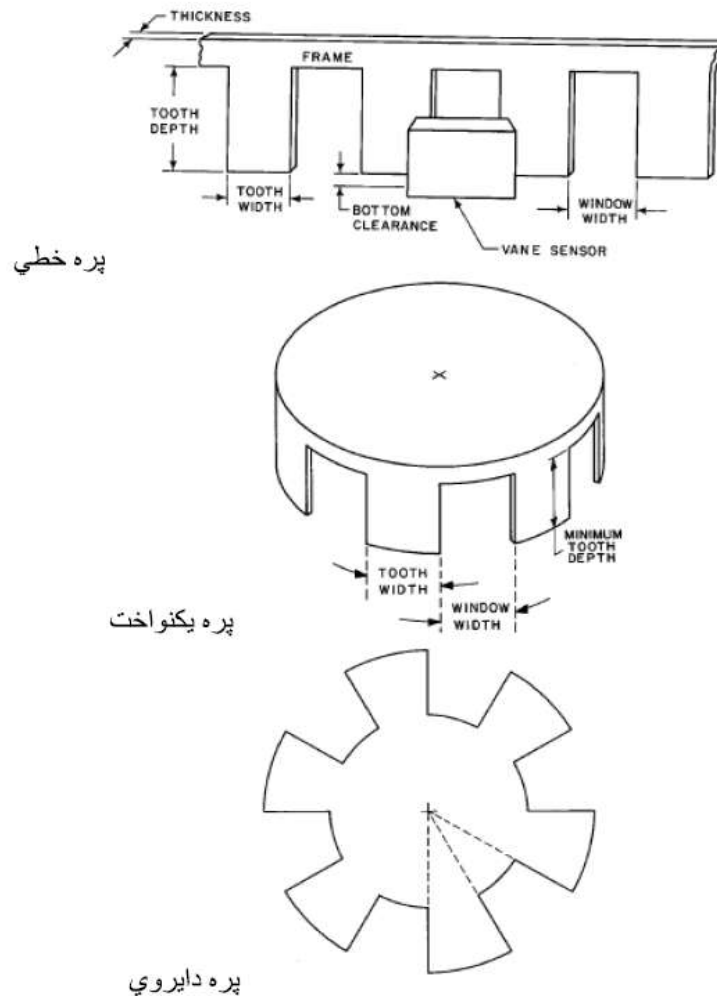
هم اکنون به تشریح برخی از کاربرد های سنسورهای اثرهال می پردازیم.

۱. سنسورهای موقعیت تشخیص پره (Position Sensor Vane Operated)

این سنسورها گاهی تحت عنوان سنسورهای پره شناخته می شوند و شامل یک آهنربا و یک سنسور اثرهال با خروجی دیجیتالی می باشند. شکل زیر این دو بخش را در یک بسته نشان میدهد.

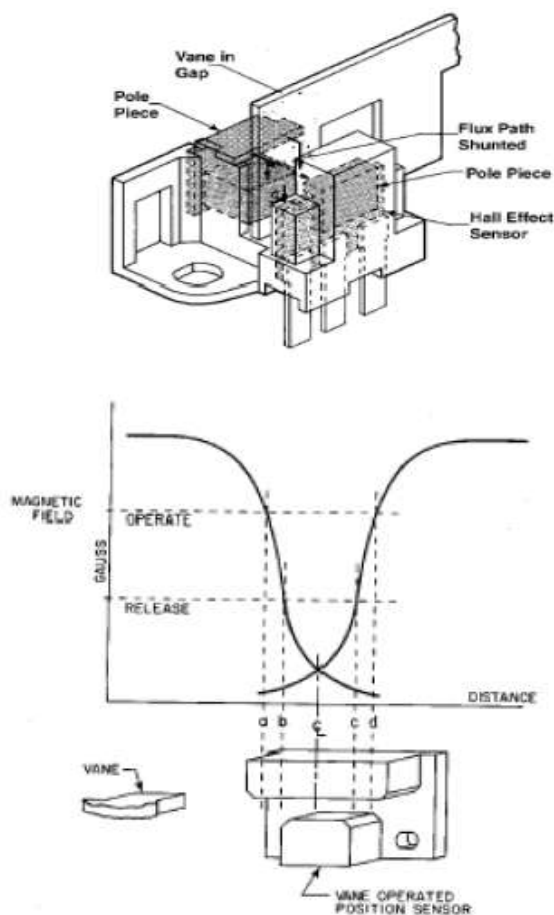


این سنسور دارای یک فاصله هوایی میان آهنربا و سنسور اثرهال می باشد و توانایی موقعیت سنجی خطی و نیز موقعیت سنجی زاویه ای را نیز دارد.

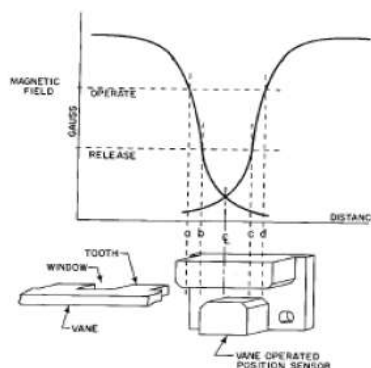


اساس عملکرد

شکل زیر را در نظر بگیرید. وقتی که پره در فاصله هوایی بین آهنربا و سنسور اثرهال قرار گیرد خطوط شار مغناطیسی پراکنده می شوند و توسط سنسور اثرهال احساس نمی شوند، بنابراین خروجی سنسور در سطح منطقی صفر (OFF) قرار می گیرد.



شکل بالا نشان می‌دهد که وقتی که یک پره میان این سنسور می‌رود چه اتفاقی می‌افتد. در حرکت از چپ به راست وقتی لبه جلوی پره به ناحیه b می‌رسد، آنگاه سنسور از حالت ON به حالت OFF تغییر وضعیت می‌دهد و این حالت تا زمانی که لبه انتهایی پره به ناحیه d برسد ادامه پیدا می‌کند تا در آن لحظه از OFF به ON تغییر وضعیت دهد. بنابراین مدت زمانی که خروجی سنسور OFF است برابر با فاصله بین b, d بعلاوه پهنای پره می‌باشد. در حرکت از راست به چپ نیز وضعیت کاملاً مشابه است. در اکثر مواقع پره‌ها بصورت به هم پیوسته می‌باشند. این حالت در شکل زیر در نظر گرفته شده است.



توجه کنید که این دو حالت هیچ تفاوتی باهم ندارند. رابطه بین مدت زمان ON, OFF برای حالت پره دندانه ای به پیوسته در جدول زیر خلاصه شده است

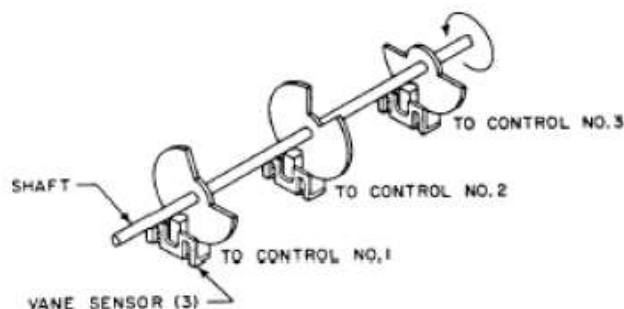
Travel	OFF Distance	ON Distance
Left to Right	Tooth width plus (b to d)	Window width minus (d to b)
Right to Left	Tooth width plus (c to a)	Window width minus (a to c)

نمونه هایی از این سنسور ها در زیر آمده است .

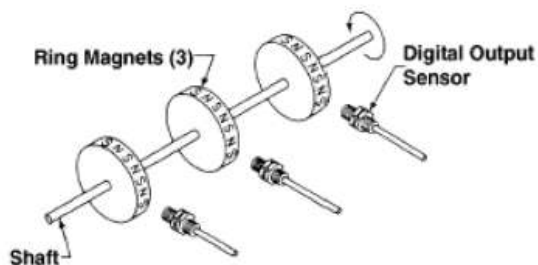
- 2AV series
- 4AV series
- SR 17 / 16 series

Sequence Sensors

شکل زیر را در نظر داشته باشید.

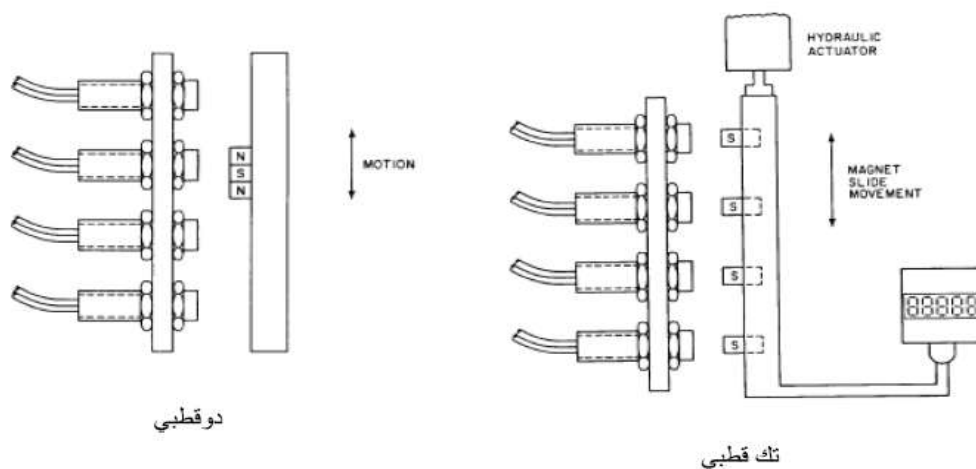


تعدادی دیسک آهنی بر روی یک شفت قرار گرفته اند. این دیسکها از فاصله هوایی سنسورهای پره (Vane Sensor) عبور می کنند. شکل هر کدام از این دیسکها بگونه ای است که یک مجموعه از آنها منجر به تولید کدهای خاصی می شود. سنسور پره در اثر حضور دیسک در فاصله هوایی خروجی را صفر و در اثر عدم حضور آن خروجی را یک می گویند. به این ترتیب کد حاصل از این روش موقعیت یا وضعیت شفت را نشان می دهد. به جای استفاده از دیسک ها و سنسورهای پره می توان از آهنربای حلقه ای متصل به شفت و سنسورهای اثرهال دو قطبی (bipolar) استفاده نمود.



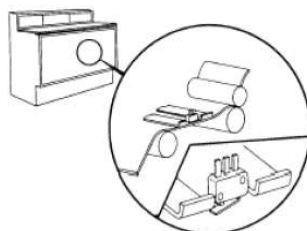
سنسورهای مجاورتی Proximity Sensor

در دو طرح زیر ۴ سنسور اثرهال با خروجی دیجیتالی که بر یک صفحه آلومینیومی قرار گرفته اند نشان داده شده است. در شکل اول سنسورها تک قطبی و در شکل دوم سنسورها دو قطبی هستند.



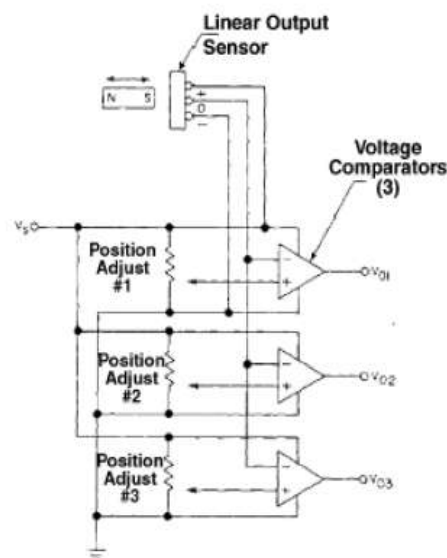
سنسور ماشین های اداری

دستگاههای فتوکپی، فاکس، پرینترهای کامپیوتر از این سنسورها می توانند استفاده کنند. برای مثال پرینتر، جهت دریافت وجود کاغذ و نیز جریان کاغذ از سوئیچ های اثرهال استفاده می کنند. (ویژگی: بدون تماس - بدون اعمال نیروی اضافی - عمر طولانی)



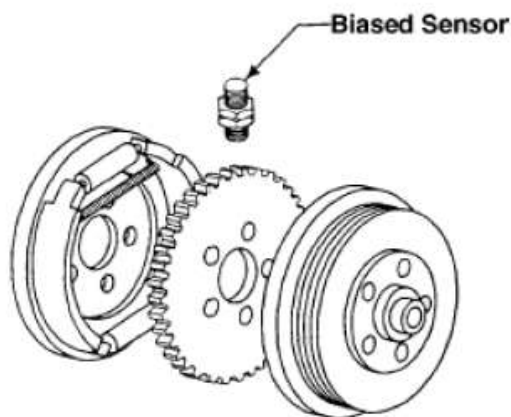
سنسور موقعیت چندگانه (Multiple position sensor)

شکل مقابل سنسور اثرهال را در کنار ۳ مقایسه کننده ولتاژ نشان می دهد این سنسور چندگانه دارای ۳ خروجی دیجیتالی است.



سنسور ضد لغزشی sensor Anti-Skid

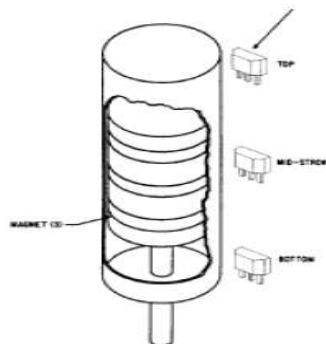
شکل زیر راه حلی را برای کنترل نیروی ترمز یک چرخ نشان میدهد. هدف این است بدون اینکه چرخ به اصطلاح قفل شود اتومبیل در حداقل زمان ممکن متوقف شود.



در این سیستم سنسور بگونه ای قرار گرفته است که یک چرخ دنده داخلی را حس می کند. زمان عکس العمل سیستم توقف بر مبنای فرکانس سیگنالی که سنسور تولید می کند تخمین زده می شود.

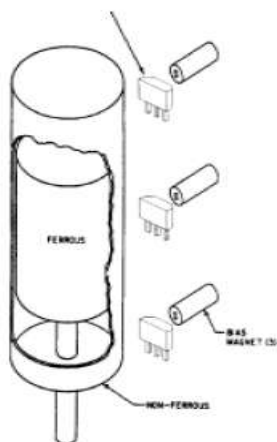
سنسور موقعیت پیستون (sensors Piston detection)

در شکل مقابل روشی جهت موقعیت سنجی پیستون در یک سیلندر غیر آهنی داده شده است. در حالت نخست آهنرباهایی را در درون پیستون به گونه ای قرار می دهند تا توسط چند سنسور اثرهال با خروجی خطی دریافت شوند.



در حالت دوم از یک پیستون آهنی و آهنربا و سنسور اثرهال استفاده می شود. در این حالت نیاز است تا مشخصات سیستم مغناطیسی بطور مطلوبی در دسترس باشد.

برقراری های استفاده از اثرهال در این موقعیت سنجی به شرح زیر می باشد:



۱- ابعاد کوچک سنسورها

۲- عدم نیاز به منبع قدرت خارجی برای آهنرباها

۳- رنج دمایی بزرگ از 40°C تا 150°C

۴- توانایی عمل در محیط کثیف و آلوده

برخی از نمونه ها

در این بخش برخی از سنسورهای شرکت Honeywell به همراه اطلاعات کلی آنها آمده است.

SS552MT Series	Surface Mount Sensor	230k
SS49E/SS59ET Series	Economical Linear Position Sensor	260k
RPN Series	Hall-Effect Rotary Position Sensor	112k
GTN Series	Hall-Effect Gear-Tooth Sensor	103k
SS 520 Series	Dual Hall-effect Digital Position Sensor with speed and direction outputs	72k
SR 13/15 Series	Hall Effect Sensor	247k
SS490 Series	Miniature Ratiometric Linear Hall Effect Sensor	148k
103SR Series	Analog Position Sensors	154k
103SR Series	Digital Position Sensors	131k
2SSP Series	Digital Position Sensors	124k
Analog Solid State Position Sensors		62k
Digital Solid State Position Sensors		73k
GT1 Series	Hall Effect Gear Tooth Sensors	213k
SR3 Series	Digital Position Sensors	126k
SS10 Series	Digital Position Sensors	117k
SS40 Series	Digital Position Sensors	97k
SS100 Series	Digital Position Sensors	209k
SS400 Series	Digital Position Sensors	238k
SS49/SS19 Series	Analog Position Sensors	140k
SS94A Series	Analog Position Sensors	126k
SS94B1 Series	Analog Position Sensors	139k
SS490 Series	Miniature Ratiometric Linear Sensors	551k
VX Series	Solid State Basic Switches	222k