

فصل ششم

اندازه گیری نیرو، کوپل و توان

۱-۶ استانداردها و درجه بندی

نیرو به وسیله رابطه $F=ma$ تعریف می شود و بنابراین یک تعریف استاندارد برای نیرو بستگی به استانداردهای تعریف شده برای شتاب و جرم دارد. جرم یک کمیت اصلی می باشد و استاندارد آن برابر است با جرم یک سیلندر از آلیاژ پلاتینیوم - ایریدیوم که مقدار آن 1kg می باشد. شتاب کمیت اصلی نمی باشد و از تقسیم دو کمیت اصلی طول و زمان حاصل می شود. شتاب جاذبه (g) یک استاندارد قراردادی است که با اندازه گیری پریود ارتعاشات یک آونگ با طول مشخص و یا با اندازه گیری تغییرات سرعت با زمان در مورد یک جسم که سقوط آزاد می کند مشخص می شود. مقدار شتاب جاذبه (g) از نقطه ای به نقطه دیگر تغییر می کند. همچنین ممکن است در یک نقطه مشخص نیز با گذشت زمان تغییر کند. اما آنچه به عنوان مقدار استاندارد برای شتاب جاذبه منظور می شود مقدار 980.665cm/s^2 می باشد که در عرض جغرافیایی 345° و در سطح دریا است. مقدار g در هر عرض جغرافیایی دیگر (f) از رابطه زیر قابل محاسبه می باشد.

$$g = 978.049(1 + 0.0052884 \sin^2 \varphi - 0.0000059 \sin^2 2\varphi) \frac{\text{cm}}{\text{s}^2} \quad (1-6)$$

مقدار تصحیح جهت ارتفاع از سطح دریا نیز از رابطه زیر حساب می شود.

$$\text{تصحیح} = -(0.00030855 + 0.00000022 \cos 2\varphi)h + 0.000072 \left(\frac{h}{1000}\right)^2 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2} \quad (2-6)$$

۲-۶ خواص ترانسدیوسرهای الاستیک اندازه گیری نیرو

شکل (۱-۵) یک مدل ساده شده ترانسدیوسرهای الاستیک را نشان می دهد. با نوشتن رابطه بین نیروی اعمالی و مقدار تغییر مکان خروجی به صورت یک معادله دیفرانسیل مرتبه دوم داریم:

$$F_i - K_s X_o - B \dot{X}_o = M \ddot{X}_o \quad (3-6)$$

و با لاپلاس گرفتن از معادله فوق داریم:

$$\frac{X_o}{F_i}(D) = \frac{K}{\omega_n^2 + 2\zeta \frac{D}{\omega_n} + 1} \quad (4-6)$$

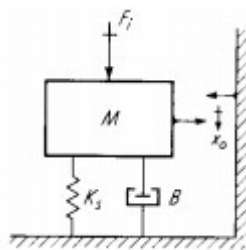
که در آن:

$$K \triangleq \frac{1}{K_s} \quad \zeta \triangleq \frac{B}{2\sqrt{K_s M}} \quad \omega_n \triangleq \sqrt{\frac{K_s}{M}}$$

توجه داشته باشید که وسایلی از این نوع، به صورت شتاب‌سنج نیز هستند که خروجی ایجاد شده توسط این وسایل نسبت به ارتعاشات ورودی پله‌ای غیرواقعی می‌باشد.

برای ترانسدیوسرهایی که به جای اندازه‌گیری مقدار جابجایی از کرنش‌سنجهایی که بر روی فنر تعبیه شده‌اند استفاده می‌کنند، مقدار کرنش خروجی (e) می‌تواند به جای خروجی x^3 در رابطه‌ها جایگزین شود. البته بشرط آنکه فنر K_s علاوه بر نیرو به ازای واحد جابجایی به عنوان نیرو به ازای واحد کرنش هم عمل کند. در بیشتر ترانسدیوسرها حالت فنریت و اینرسی به صورت جدا از هم نمی‌توانند وجود داشته باشند، به خاطر اینکه فنریت و اینرسی به شکل متمرکز وجود ندارند و به صورت گسترده می‌باشند. در این گونه موارد برای طراحی بایستی مقدار فرکانس طبیعی سیستم علاوه بر فرمول بالا از فرمولهای مناسب که اشکال هندسی جسم را هم در برگیرند حساب شوند. هنگامی که یک ترانسدیوسر ساخته می‌شود مقدار حد پایین فرکانس طبیعی آنرا می‌توان به راحتی از راه تجربی به دست آورد. مقدار ضریب میرایی را هم می‌توان به همین روش به دست آورد. ضریب میرایی (Z) مقدار کمی دارد و معمولاً به دلیل اثرات اصطکاک درونی جسم به راحتی از طریق فرمول قابل محاسبه نیست. مقدار سفتی فنر (K_s) معمولاً از راه تئوری و با داشتن جنس مواد و فرمولهای الاستیسیته قابل محاسبه است.

هنگامی که ترانسدیوسرها ساخته می‌شوند باید کل سیستم بین خروجی الکتریکی و نیروهای ورودی درجه‌بندی شود زیرا محاسباتی که در هنگام طراحی انجام می‌شود برای کاربردهای با دقت بالا کافی نیست.



شکل (۵-۱) ترانسدیوسر نیروالاستیکی

۶-۳ ترانسدیوسرهایی که از کرنش سنج استفاده می کنند^(۱)

در شکل (۵-۲) یک نوع از سل های نیرو^(۲) که برای اندازه گیری نیرو (نیروهای فشاری) به کار می روند نشان داده شده اند (سل های اندازه گیری برای هر دو نوع نیروی فشاری و کششی مکانیزمهای مناسبی در دو انتهای خود احتیاج دارند). عضو حس کننده به اندازه کافی کوتاه است تا از کمانش آن جلوگیری شود. این عضو می تواند به صورت تناسبی تا 1500 me را اندازه گیری کند. موارد استفاده شده در این اعضاء فولاد SAE ۴۳۴۰ و فولاد زنگ نزن ۴PH-۱۷ یا آلایژ آلومینیم ۲۰۲۴T-۴ می باشند. ورقهای ماده کرنش سنج در هر چهار سطح ستون قرار می گیرند. کرنش سنج های ۱ و ۳ مقدار مستقیم کرنش حاصل از F_i را اندازه گرفته و کرنش سنج های ۲ و ۴ کرنش جانبی را که حاصل از ضریب پواسون می باشد اندازه گیری می کنند. این ترتیب در چیدن کرنش سنجها مقدار حساسیتی معادل $2(1+m)$ برابر حالتی که از یک کرنش سنج استفاده می شود دارد. این ترتیب قرار گرفتن کرنش سنجها اثرات حرارتی برروی کرنش سنجها را از بین می برد زیرا در این حالت تمامی کرنش سنجها در یک دما قرار می گیرند.

نیروی F_i وارد شده به سل اگر به صورت خارج از مرکز و یا تحت زاویه وارد شود می توان آنرا به ترکیب دو ممان خمشی در راستای محورها x و y و یک نیرو در مرکز تبدیل کرد. که ممانهای خمشی تولید تنشهای خمشی می کنند در صورتی که اگر ترتیب چیده شدن کرنش سنجها به ترتیب ذکر شده در بالا باشد، کرنش سنج های ۱ و ۳ اثر تنشهای خمشی را هم خنثی می کنند و در نتیجه مقدار خروجی ϵ^3 به ازای خمش صفر می باشد. همین اتفاق برای کرنش سنج های ۲ و ۴ هم می افتد. مقدار خیز این نمونه از سلهای نیرو در هنگامی که ماکزیمم بار خود را تحمل می کنند بین 0.001 in تا 0.015 in می باشد. در مورد سلهای نیرو معمولاً فرکانس طبیعی ذکر نمی شود زیرا مقدار

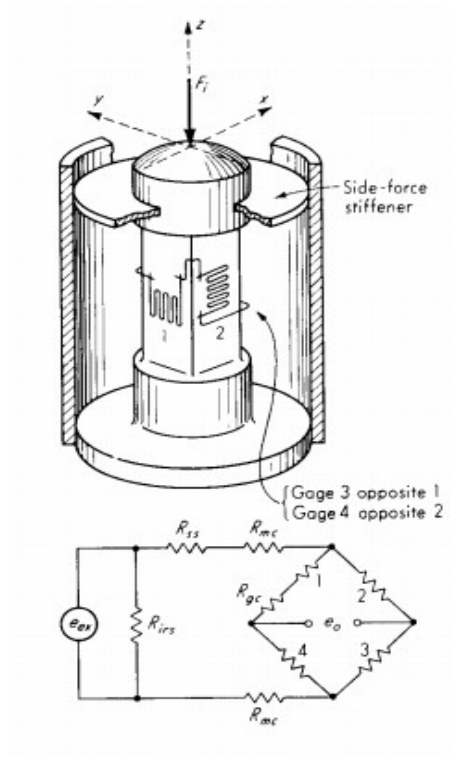
نیروی وارد بر سل شدیداً بر فرکانس طبیعی آن تأثیر می‌گذارد. این مطلب به خصوص در مواردی که از سل نیرو برای وزن کردن قطعات استفاده می‌شود صادق است. سختی بالای سل نیرو معمولاً از حساسیت آن می‌کاهد.

یکی از راههای ممکن برای بالا بردن حساسیت، استفاده از تنش خمشی به جای استفاده مستقیم از تنش فشاری و یا کششی است. در این روش معمولاً مقدار کرنش ایجاد شده به ازای نیروی واحد اعمال شده بیشتر می‌باشد. اما در عوض این راه از سفتی و در نتیجه از فرکانس طبیعی می‌کاهد. استفاده از ترتیب خمش کرنش سنجها به شرط تعادل دمایی و حساس نبودن دستگاه به مؤلفه‌های X و Y نیروی اعمالی، می‌تواند حساسیتی تا ۴ برابر حساسیت یک کرنش سنج تنها را ایجاد کند.

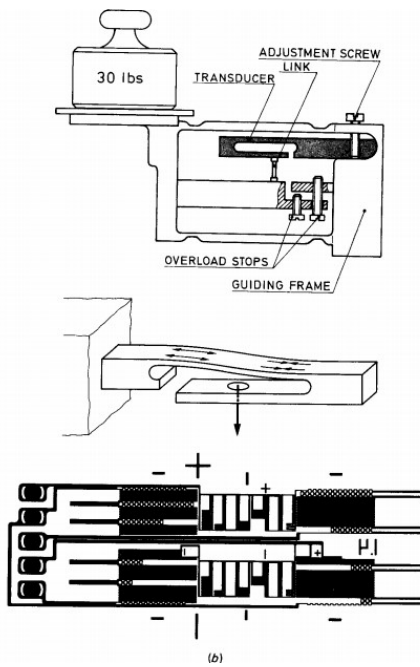
در شکل (۵-۳-ب) روش تازه‌ای در بکارگیری سلهای نیرو پیشنهاد شده است که از قیمت آنها می‌کاهد و پیچیدگی تولید طرحهای اولیه را هم ندارد. تیر منحنی شکل یکسر در گیر یک عضو الاستیک می‌باشد که تنش کششی یا فشاری مساوی در موقعیتهای نزدیک به (مجاور) هم بر روی یک سطح ایجاد می‌کند. این امر به ما اجازه می‌دهد که از سنجهای پیش ساخته صفحه‌ای که مدار سنجها را در هم ادغام می‌کند استفاده کنیم. هندسه غیرخطی این اعضاء برای نیروهایی که در مرکز وارد شده‌اند صفر می‌باشد و به محض اینکه نقطه اثر نیرو به طرف دیگر انتقال می‌یابد علامت جبری عوض می‌شود.

کرنش سنجهای تجارتي در انواع مختلفی موجود می‌باشند و می‌توان از چند پوند تا صدها یا هزاران پوند را به وسیله آنها اندازه‌گیری کرد. این کرنش سنجها در دقتهای متفاوتی موجود می‌باشند. کم دقت‌ترین کرنش سنجها حدود دارای دقت ۱٪ از کل مقدار اندازه‌گیری می‌باشند و تأثیرات دمایی در آنها $\pm 0.005\%$ F^3 کل مقدار اندازه‌گیری در جابجایی صفر (zero shift) است.

در مواردی که می‌خواهیم ماکزیمم خروجی از یک ترانسدیوسر کرنشی داشته باشیم، بایستی جنس ماده ترانسدیوسر را از ماده نرمی با مدول الاستیسته پایین انتخاب کنیم، تا در نیروی یکسانی مقدار کرنش حاصله بیشتر شود. اما استفاده از مواد با مدول الاستیسته پایین معایبی چون فرکانس طبیعی پایین را هم به دنبال دارد. همچنین بعضی از این مواد دارای عمر کارکرد کم یا پسمانی زیادی می‌باشند.



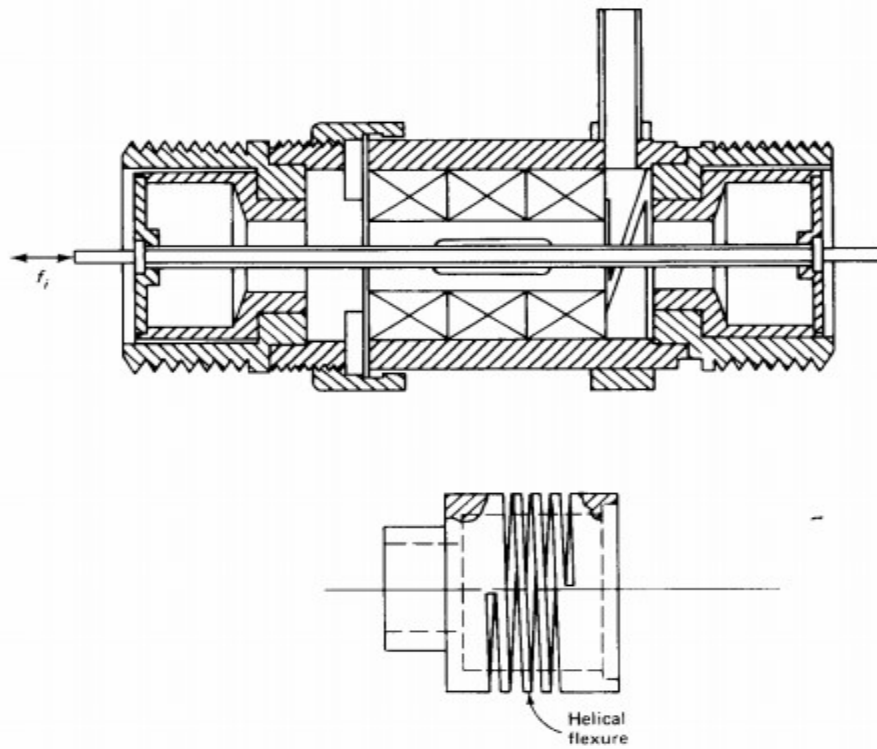
شکل (۲-۵) سل نیرو



شکل (۳-۵) تیر سنجه‌های نیرو

۶-۴ ترانسدیوسرهای LVDT

شکل (۴-۵) طراحی یک سل نیرو از نوع LVDT را نشان می‌دهد. این سل نیرو می‌تواند وزنهای ۱۰g تا ۱۰۰۰ را اندازه‌گیری کند. در این وسیله از دو انحنا مارپیچ به عنوان عضو انعطاف‌پذیر و الاستیک استفاده شده است. توسط یک رینگ دندانه‌دار خارجی صفر دستگاه به راحتی قابل تنظیم است. با چرخاندن این رینگ میزان فشردگی فنر فشاری تغییر می‌کند. مقدار جابجایی در حالت ماکزیمم ۰/۰۲in تا ۰/۰۳in است و دارای خطایی بهتر از ۰/۲٪ کل مقدار اندازه‌گیری بوده و در محدوده دمایی F^3 ۲۰۰ تا F^3 ۶۵- قابل کارکرد می‌باشد.



شکل (۴-۵) ترانسدیوسر نیروی LVDT

۱ - Transducers Bonded strain Gage

۲ - cell Load

۵-۵ ترانسدیوسرهای پیزوالکتریک

این ترانسدیوسرهای اندازه گیری نیرو دارای تابع انتقالی شبیه به تابع انتقال شتاب سنج‌های پیزوالکتریک هستند. این پیزوالکتریکها برای اندازه گیری نیروهای دینامیکی بکار می‌روند. اما بعضی از آنها (سنجه‌های کوارتزی همراه با آمپلی‌فایرها^(۱)) به دلیل داشتن ثابت زمانی (t) زیاد این قابلیت را دارند که نیروهای استاتیکی را نیز اندازه گیری کنند و همانند شتاب سنج‌های پیزوالکتریک ذکر شده در فصل ۴ درجه بندی استاتیکی شوند.

انواع مختلف پیزوالکتریکها دارای ۱٪ عملکرد غیرخطی بوده و دارای ضریب سفتی بالایی می‌باشند (۸۱۸ lb/in تا ۶۱۰). فرکانس طبیعی آنها در حدود ۳۰۰۰۰۰ Hz تا ۱۰۰۰۰۰ Hz است اما همانند همه ترانسدیوسرهای اندازه گیری نیرو مقدار فرکانس طبیعی پیزوالکتریکها هم به دلیل جرمهای اجزای متصل به آنها کمی کمتر از مقدار محاسبه شده می‌باشد. محدوده دمایی که پیزوالکتریک در آن خوب کار می‌کند و حساسیت کافی را داراست، بسته به جنس ماده پیزوالکتریک و جزئیات طراحی آن و اینکه از اجزاء الکترونیکی استفاده شده یا نه تغییر می‌کند.

حس کننده‌های پیزوالکتریک اندازه گیری نیرو نسبت به بارهای جانبی حساس می‌باشند. لذا سازنده‌های آنها احتیاطهای لازم را برای کم کردن این تأثیر پیشنهاد می‌کنند ولی مقدار عددی این حساسیت در جهت عمود بر محور را ذکر نمی‌کنند.

شکل (۵-۵-الف) ساختار دو نوع سل نیروی پیزوالکتریک را نشان می‌دهد. نوع کوچکتر آنها همواره پیش بارگذاری شده است تا در محدوده ۱۰۰۰ N نیروی کششی تا ۵۰۰۰ N نیروی فشاری را بتواند اندازه گیری کند. نوع بزرگتر آن به وسیله مهره‌هایی از خارج پیش بارگذاری شده محدوده بین ۴۰۰۰ N نیروی کششی تا ۱۶۰۰۰ N نیروی فشاری را اندازه گیری کند. با کمی دقت می‌توان فهمید که این چنین ترانسدیوسرهایی را می‌توان با یک فنر که بین عضو پیزوالکتریک فشرده شده است مدل کرد. شکل (۵-۵-ب) یکی از این ترانسدیوسرها را نشان می‌دهد که برای اندازه گیری نیروی اعمالی از طرف یک مرتعش کننده الکترو دینامیکی بر اجسام تحت آزمایش بکار می‌رود (۱ km و ۲ km بیان کننده سختی پیچهای نگهدارنده می‌باشند). اگر آمپدانس جسم تحت آزمایش (که شامل ۲ km می‌باشد) را Z_s که به صورت $Z_s \triangleq \frac{F_s}{V_s}$ تعریف می‌شود بنامیم، نیرویی که بر جسم تحت آزمایش اعمال می‌شود $Z_s \cdot V_s$ می‌باشد. نیروی Fm اندازه گرفته شده بر اساس kt بوده و متناسب با تغییر فاصله بین جرم ۱ Mt و ۲ Mt است، زیرا

این همان جابجایی اعضاء پیزوالکتریک می باشد. در شرایط دینامیکی F_m الزاما با F_s برابر نیست. آنالیز دینامیکی زیر برای اندازه گیری دقیق تر مفید می باشد.

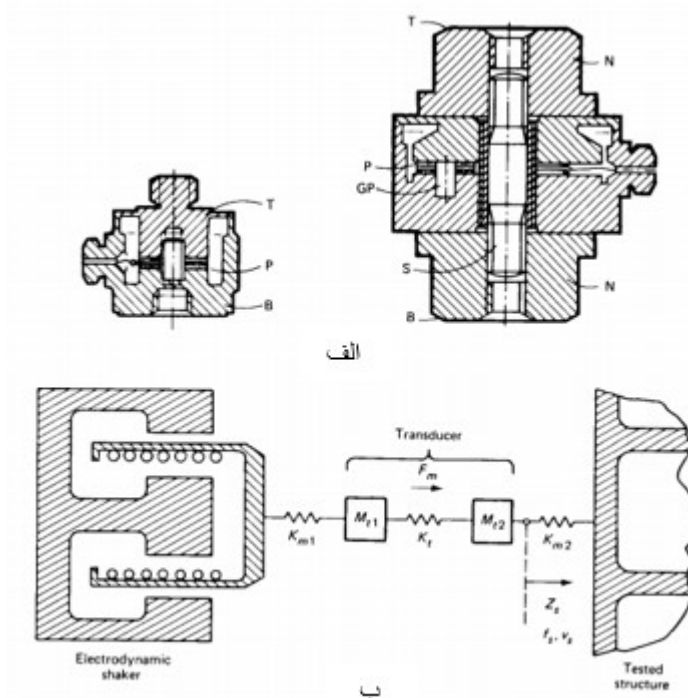
$$F_m - V_s Z_s = M t_2 D v_s \quad \Rightarrow \quad \frac{F_m}{f_s}(D) = \frac{M t_2 D}{Z_s(D)} + 1 \quad (5-5)$$

برای $M_{t_2} = 0$ تفاوتی نمی کند که مقدار Z_s چقدر باشد. بنابراین ترانسدیوسرهای با M_{t_2} کوچک مطلوب تر می باشند (ترانسدیوسرهای نشان داده شده در شکل (5-5-الف) دارای $M_{t_2} = 3g$ می باشند). همچنین برای

$$Z_s(D) = \frac{K_s}{D} \quad \text{داریم:}$$

$$\frac{F_m}{F_s}(i\omega) = 1 - \frac{M_{t_2}}{K_s} \omega^2 \quad (6-5)$$

فرمول بالا نشان می دهد که چگونه دقت با تغییرات فرکانس تغییر می کند.

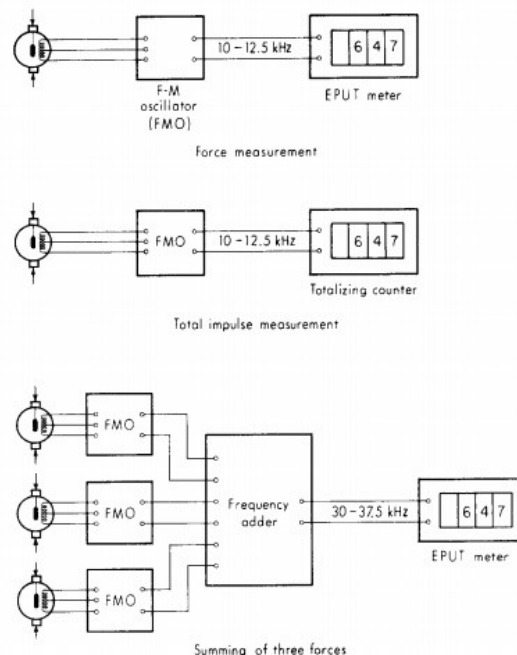


شکل (5-5) سل های نیروی الکتریکی

۵-۶ نوسانگر قابل تنظیم مغناطیسی^(۱)

بعضی از انواع حس کننده‌ها با توجه به این که سیگنالهای الکتریکی هر نوع از ترانسدیوسرهای اندازه‌گیری نیرو را می‌توان به شکل دیجیتال در آورد، ساخته شده‌اند. در اینجا یک نوع از این حس کننده‌ها را که در تست موتور جت مورد استفاده قرار می‌گیرد بررسی می‌کنیم. عضو انعطاف‌پذیر این مجموعه یک حلقه است که دارای ترانسدیوسر جابجایی مغناطیسی دو بازوی قابل تنظیم می‌باشد^(۲). از سیگنالهای ارسالی از این ترانسدیوسر برای تغییر دادن فرکانس نوسانگر از نوع FM (FM modulated Oscillator) استفاده می‌شود. تغییرات فرکانس ارتعاش کننده از مقدار اصلی خود را به صورت متناسب با مقدار جابجایی و بنابراین نیروی وارده می‌باشد.

خواندن نیروها به صورت دیجیتال با ارسال سیگنالهای خروجی از نوسانگر^(۳) به یک شمارنده الکتریکی، در زمان معلومی امکان‌پذیر است. مجموع پالسهای فرستاده شده، نشانگر اندازه نیرو به صورت دیجیتال می‌باشد. در نوعی از این وسیله با تغییر دادن نیرو از منفی‌ترین مقدار قابل اندازه‌گیری توسط دستگاه تا مثبت‌ترین آن فرکانس ارتعاشات بین ۱۰۰۰۰Hz تا ۱۲۵۰۰Hz تغییر می‌کند. مزایای یک چنین سیستمی این است که به وسیله آن می‌توان مجموع نیروهای ضربه‌ای موتور جت را اندازه گرفت. همچنین می‌توان در یک ایستگاه تست نیروهای مختلفی را کم یا زیاد کرد. مجموع نیروهای ضربه‌ای همان انتگرال نیروها در واحد زمان می‌باشد. شکل (۵-۶) دیاگرام بلوکی این قبیل سیستم‌ها را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۶) اندازه گیری نیروی دیجیتالی

۵-۷ نیروهای تعادل کننده الکترومغناطیسی

در روش تعادل الکترومغناطیسی از فتوالکتریکها یا سایر حس کننده های جابجایی نوع خنثی، آمپلی فایر و سیم پیچ ایجاد کننده کوپل نوع سروو استفاده می شود. این عمل برای جبران اختلاف بین نیروی مجهول F_i و نیروی معلوم حاصل از وزن یک جرم استاندارد شده استفاده می شود. از مزایای این روش سادگی استفاده، حساسیت کم به محیط اطراف، پاسخ سریع سیستم و اندازه کوچک آن می باشد. همچنین سیگنالهای خروجی آن را می توان به راحتی برای ثبت کردن و کاربردهای کنترل اتوماتیک به کار برد. اگر عمل تعادل توسط یک ریزپردازنده انجام شود باعث راحتی بیشتر استفاده کننده و قابلیت تغییر در سیستم می شود.

روشهای اساسی اندازه گیری نیرو عبارتند از:

- ۱- تعادل نیروی مجهول با نیروی وزن یک جرم استاندارد، که این عمل می تواند به صورت مستقیم و یا با یک سیستم و مکانیزم واسطه انجام شود.

۲- اندازه گیری شتاب جرم معلوم در اثر نیروی نامشخص تا با داشتن جرم و شتاب جسم، نیروی مجهول را به دست آوریم.

۳- استفاده از نیروی مجهول برای حرکت دادن سیم پیچ های جریان در یک میدان مغناطیسی و اندازه گیری جریان حاصله جهت اندازه گیری نیروی مجهول

۴- تبدیل نیرو به فشار در سیال مشخص و اندازه گیری فشار ایجاد شده در سیال

۵- اعمال نیرو به جسم الاستیک (انعطاف پذیر) و اندازه گیری تغییرات خواص آنها در اثر خیز ایجاد شده

۶- اندازه گیری مقدار انحراف زاویه ای ژيروسکوپ ناشی از کوپل نیروهای مجهول

۷- اندازه گیری تغییرات در فرکانس طبیعی سیم کشیده شده توسط نیروی مجهول

۱-Variable Reluctance/FM Oscillator Digital sys

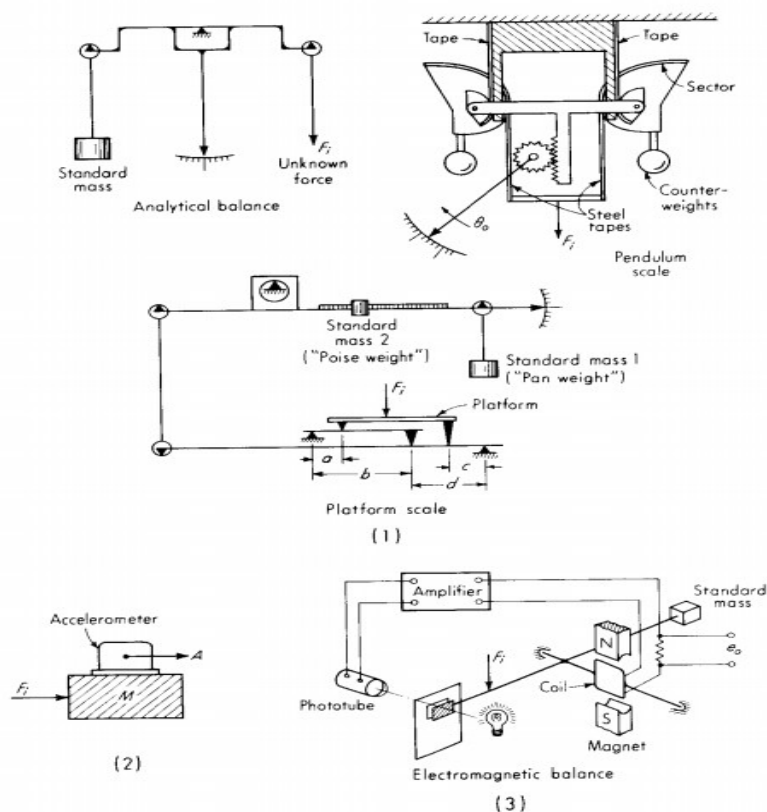
۲-Variable reluctance bridge displacement transducer

۳-Oscillator

روش‌های تعادل در اندازه‌گیری نیرو به شرح زیر می‌باشند.

۵-۷-۱ ترازوی عقربه‌ای

روش تعادل آنالوگی براساس قوانین ساده‌ای بنا شده است، اما در هنگام استفاده نیاز به دقت بالا و ضریب عملکرد زیادی دارد. در این نوع از وسایل، که در شکل (۵-۷) هم نشان داده شده، از یک تیر استفاده می‌شود که مرکز جرم آن دقیقاً در زیر لبه تیز تکیه‌گاه وسط قرار داشته و باعث می‌شود که تیر در حالت تعادل بایستد. در هنگام اعمال نیروی مجهول بر تیر، تیر از حالت تعادل خارج شده و استفاده‌کننده با اضافه کردن وزنه در طرف دیگر سعی در برگرداندن تیر به حالت تعادل می‌کند. در نوع دیگر این وسایل که جابجایی تیر هم کم می‌باشد، به جای برگرداندن تیر به حالت تعادل، مقدار جابجایی تیر را اندازه می‌گیریم و با استفاده از فرمولهای موجود مقدار نیرو را به دست می‌آوریم. این روش سریعتر از روش تعادلی می‌باشد، اما احتیاج دارد که فرمولهای لازم با دقت استخراج گردند.



شکل (۵-۷) روش‌های تعادل در اندازه‌گیری نیرو

۲-۷- ترازوی پاندولی

در روش پاندول اندازه گیری از نوع خیز می باشد که در آن نیروی مجهول به کوپل تبدیل شده و سپس توسط کوپل ناشی از جرمهای استاندارد می باشد که به صورت پاندول می باشند متعادل می شود. همان طور که در شکل (۷-۵) نشان داده شده نیروی مجهول F_i می تواند هم به صورت مستقیم به وسیله اندازه گیری اعمال شود و هم توسط مکانیزمی به وسیله انتقال یابد. با بکارگیری ترانسدیوسر جابجایی زاویه ای می توان خروجی سیستم را به نوع الکتریکی تبدیل کرد.

۳-۷-۵ ترازوی باسکولی^(۱)

در وسایل اندازه گیری که بر اساس سکوی مدرج یا باسکول کار می کنند از مجموعه ای از اهرمها استفاده می شود تا با استفاده از قانون اهرمها بتوان نیروهای زیادی را با استفاده از وزنه های استاندارد کوچکی اندازه گیری کرد. اهرم ترازوی باسکولی با انتخاب صحیح وزنه های استاندارد و جایگیری صحیح وزنه تعادل که بر روی اهرم می لغزد به حالت تعادل در می آید. در شکل (۷-۵) اگر نسبت $\frac{a}{b} = \frac{c}{d}$ باشد مقدار خوانده شده نیرو ربطی به محل نیروی f_i بر روی سکوی اندازه گیری نخواهد داشت. می توان با بکارگیری یک سیستم موتور - تقویت کننده و یک حس کننده جابجایی الکتریکی، سیستم اهرم را برای رسیدن به حالت تعادل اتوماتیک کرد.

روش آنالوگ اندازه گیری نیرو معمولاً برای توزین بکار می رود، در حالی که روشهای باسکولی و پاندولی برای اندازه گیری نیرو به کار می رود. در هر حال هر سه گروه ذکر شده برای اندازه گیریهای استاتیکی به کار می روند.

۴-۷-۵ سل های نیرو^(۲)

یکی دیگر از روشهای اشاره شده در شکل (۷-۵) استفاده از سلهای نیروی پنوماتیکی و یا هیدرولیکی می باشد. سلهای نیروی هیدرولیکی معمولاً از روغن پر می شوند و دارای پیش فشاری در حدود $20 \frac{lb}{in^2}$ می باشند. به کارگیری سل نیرو باعث افزایش فشار روغن می شود که این افزایش فشار بر روی یک سنج اندازه گیری دقیق خوانده می شود.

می‌توان از ترانسدیوسرهای فشار الکتریکی برای دریافت سیگنالهای الکتریکی استفاده کرد. سلهای حس کننده فشار خیلی سفت می‌باشند و جابجایی آنها تحت بار بیشینه حدود چند هزارم اینچ می‌باشد. مقدار ظرفیت بار قابل تحمل توسط سلهای نیروی استاندارد بین ۱۰۰۰۰۰ lbf تا ۱۰ میلیون lbf متغیر بوده و آنها دارای دقت ۰/۱ ماکزیمم مقدار اندازه‌گیری می‌باشند. سلهای نیروی پنوماتیکی که در شکل (۷-۵) نشان داده شده‌اند از ترانسدیوسرهای شیپوره و مانع به عنوان سیستم تنظیم کننده (سرو) استفاده می‌کنند که دیافراگم بلوکی آن نشان داده شده است. اعمال نیروی مجهول F_i بر دیافراگم باعث ایجاد جابجایی $\times$ در دیافراگم شده و این عمل باعث افزایش فشار p^3 می‌شود که افزایش فشار p^3 باعث کم شدن دبی گذرنده از شیپوره می‌شود. همچنین افزایش فشار بر روی دیافراگم به سطح A باعث افزایش نیروی مؤثر F_p وارد بر دیافراگم می‌شود که این افزایش نیرو باعث برگشتن دیافراگم به حالت عادی خواهد شد. عملکرد استاتیکی سیستم را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$(F_i - P_o A) K_d * K_n = P_o \quad (7-5)$$

که در اینجا

$$K_d = \text{عکس سختی فنر} \left(\frac{\text{in}}{\text{lbf}} \right)$$

$$K_n = \frac{\text{lb}}{\text{in}^2 / \text{in}} = \text{ضریب مانع - نازل}$$

با حل معادله بر حسب P_o داریم:

$$P_o = \frac{F_i}{\frac{1}{K_d K_n} + A} \quad (8-5)$$

در مسائل عملی ضریب $K_d K_n$ بسیار بزرگ می‌باشد و $\frac{1}{K_d K_n} \cong 0$ می‌باشد لذا داریم:

$$P_o = \frac{F_i}{A} \quad (9-5)$$

که این معادله خطی می‌باشد، زیرا A ثابت است همانند سایر سیستمهای فیدبک ناپایداری دینامیکی سیستم مقدار ضرایب را محدود می‌کند.

۸-۵ ترانسدیوسرهای نیروی ارتعاشی

در این روش اندازه گیری نیرو براساس فرمول کلاسیک فیزیک در مورد فرکانس طبیعی اول (W) سیمی به طول L و جرم واحد طول m₁ که در اثر نیروی کشیده شده است می باشد.

$$\omega = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F}{m_1}} \quad (۱۰-۵)$$

از آنجا که مقدار W به صورت پیوسته با تغییرات F تغییر می کند اندازه گیری به این روش معمولاً به صورت آنالوگ می باشد، اما با این همه فرکانس را به آسانی می توان توسط شمارنده های دیجیتال معمولی اندازه گیری کرد. تغییر طول سیم با دما و تأثیرات آن روی فرکانس اندازه گرفته شده و تغییرات غیرخطی W برحسب F باعث ایجاد مشکل در استفاده عملی از این نوع وسایل می شود. مسائل مربوط به دما و مشکلات غیرخطی بودن سیستم را می توان با طراحی دقیق سیستم و بکار بردن حس کننده هایی که از آنها برای کنترل سیستم تغذیه مواد در کارخانجات استفاده می شود حل کرد (industrial material feeding Controllers).

در هنگامی که اندازه گیری نیروی کششی در سیم توسط اندازه گیری فرکانس ارتعاشی سیم انجام می شود، با بکارگیری یک سیستم محرک ارتعاشات برروی سیم مرتعش می توان تلفات اصطکاکی ارتعاشات سیم را از بین برد تا ارتعاشات سیم به صورت ثابت انجام شود. در شکل (۸-۵) سیم ها که معمولاً از مواد هادی الکتریسته و غیرمغناطیس ساخته می شوند از میان آهنرباهای دائمی عبور کرده اند. به این ترتیب هم نقش ترانسدیوسرهای سرعت - ولتاژ را دارند و هم نقش ترانسدیوسرهای جریان الکتریکی - نیرو را بازی می کنند که جریان خروجی از تقویت کننده را دریافت کرده و باعث ایجاد نیروی محرک ارتعاشی در سیم می شوند.

۹-۵ ترانسیدیوسرهای نیروی ژيروسکوپي

استفاده از ژيروسکوپ و قواعد آن در اندازه گیری نیرو و یا کوپل در همه جا متداول نمی باشد، اما در بعضی از کاربردهای خاص ژيروسکوپ بکار می رود. استفاده از ژيروسکوپ در مواردی مفید می باشد که بخواهیم انتگرال زمانی نیرو یا گشتاور را داشته باشیم، زیرا ژيروسکوپ ایجاد یک چرخش مکانیکی متناسب با نیروی وارد بر آن می کند.

با بازگشت به فصل ۳ تابع انتقال T_2 بر حسب مقدار چرخش q را به صورت زیر می یابیم.

$$\frac{\theta}{T_x}(D) = \frac{H_s/I_x}{D[I_y + BD \frac{H_s^2}{I_s} + K_s]} \quad (11-5)$$

برای یک ژيروسکوپ آزاد همانند آنچه در شکل (۹-۵) نشان داده شده است مقادیر B و K_s صفر می باشند و تابع انتقال فوق به صورت زیر در می آید.

$$\frac{\theta}{T_x}(D) = \frac{K}{\frac{D^2}{\omega_n^2} + 1} \quad (12-5)$$

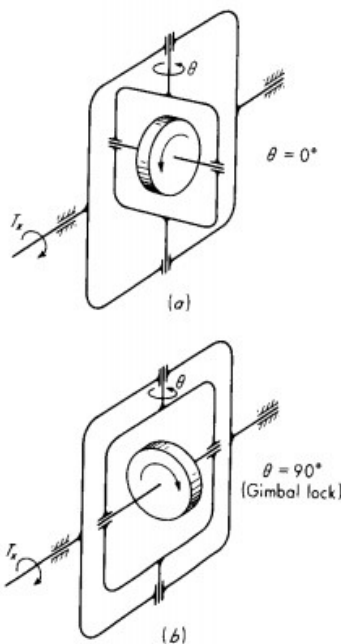
که در آن :

$$K \triangleq \frac{1}{H_s}, \quad \omega_n = \sqrt{\frac{H_s^2}{I_x I_y}}$$

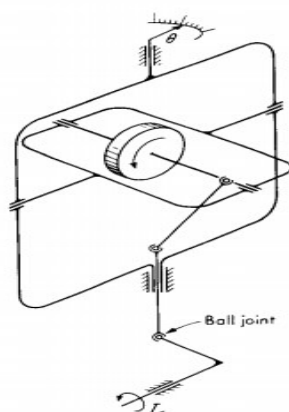
در حالی که عبارت درجه دوم از معادله (۱۲-۵) غیر میرا می باشد، اما تلفات ناچیز مانند اصطکاک در یاتاقانها باعث اتلاف انرژی ارتعاش سیستم می شود. همچنین اگر کوپل T_x وارد شده از مقدار صفر تا مقداری به صورت منظم تغییر کند، ارتعاشی نخواهیم داشت. بنابراین کوپل ثابت T_x می تواند باعث ایجاد سرعت زاویه ای $\dot{\theta}$ شود که توسط رابطه $\theta = K T_x$ با کوپل T_x ارتباط دارد. این رابطه تنها برای q های کم صادق است. اما از آنجا که کوپل ثابت ایجاد سرعت ثابتی هم می کند، سرانجام مقدار q هم افزایش یافته و تا مقداری زیاد می شود و در نهایت θ به 90° می رسد. در این حالت اصطلاحاً می گویند که قاب ژيروسکوپ قفل شده است.

مقدار انحراف زاویه‌ای ژيروسکوپ (q) به مؤلفه‌های برداری کوپل که عمود بر بردار ممتم زاویه‌ای هستند وابسته می‌باشد. برای زوایای کوچک، این مؤلفه‌های بردار مستقیماً متناسب با کوپل می‌باشند. اما برای زوایای بزرگ، این مؤلفه‌های برداری متناسب با حاصلضرب کوپل در $\cos\theta$ می‌باشد که با افزایش θ کم شده و در 90°

θ کوپل T_x هیچ انحرافی را ایجاد نمی‌کند و قاب بیرونی و داخلی هر دو با هم حول محور X می‌چرخند. برای جلوگیری از پدیده قفل قاب در ژيروسکوپ می‌توان از مکانیزم ساده نشان داده شده در شکل (۵-۱۰) استفاده کرد. با استفاده از این مکانیزم می‌توان بردار کوپل و بردار ممتم زاویه‌ای را همواره عمود برهم نگه داشت. با این توصیف معادله $\dot{\theta} = K T_x$ را برای هر زاویه θ می‌توان نوشت و می‌توان کوپل را با استفاده از اندازه‌گیری سرعت زاویه‌ای $\dot{\theta}$ اندازه گرفت. همچنین می‌توان انتگرال کوپل را با یک شمارنده چرخش زاویه‌ای (θ) که به شافت وصل است اندازه گرفت. بعضی از سیستمهای توزین تجارتي به وسیله حس کننده‌های ژيروسکوپی کار می‌کنند.



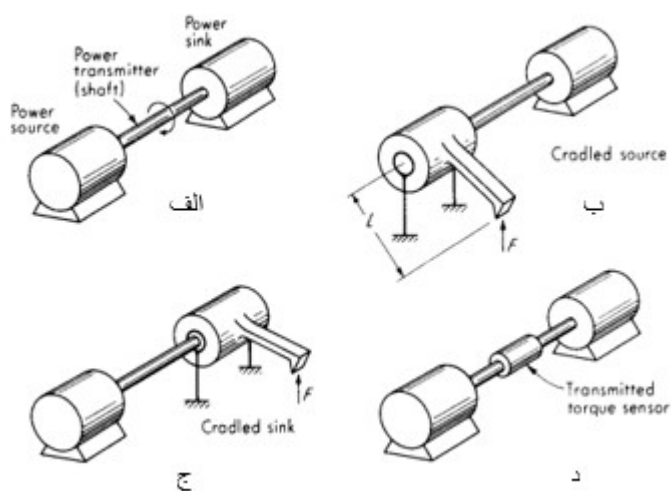
شکل (۵-۹) کوپل سنج ژيروسکوپی



شکل (۵-۱۰) جلوگیری از قفل قاب در ژيروسکوپ

۵-۱۰ اندازه‌گیری لنگر شافت‌های چرخان

اندازه‌گیری لنگر شافت چرخان و یا لنگر انتقال یافته توسط شافت، به دلیل اندازه‌گیری توان شافت و اندازه‌گیری خود لنگر مهم می‌باشد. شافتهایی که کوپل را انتقال می‌دهند همواره از یک طرف به منبع قدرت کوپل و از طرف دیگر به مصرف کننده کوپل متصل می‌شوند. شکل (۵-۱۱)



شکل (۵-۱۱) اندازه‌گیری لنگر شافت

لنگر شافت را می‌توان به دو طریق اندازه‌گیری کرد: یکی با اتصال منبع قدرت یا مصرف کننده به کریدل^(۱) و اندازه‌گیری نیروی عکس‌العمل (F) وارده بر بازوی به طول L در روی کریدل شکل (۵-۱۱-ب و ج) و دیگری با اندازه‌گیری گشتاور بر روی خود شافت از طریق اندازه‌گیری مقدار پیچش شافت. شکل (۵-۱۱-د).

وسایلی که به روش اول کار می‌کنند (دینامومترها) بیشتر در مورد اندازه‌گیری توان شافت‌ها آن هم از نوع توان ثابت، بکار می‌روند. در این موارد از یک ترازوی پاندولی و یا باسکولی (در بخش اندازه‌گیری نیرو) برای اندازه‌گیری نیرو استفاده می‌شود. با تحلیل پیکر آزاد کریدل، منابع خطا در اندازه‌گیری به خوبی آشکار می‌شود. این خطاها شامل خطای اصطکاک در یاتاقانهای کریدل، عدم تعادل استاتیکی اجزاء کریدل، تورک وارد شده از طرف هوا بر شافت (در صورت چرخیدن شافت) و نیروهای ناشی از خمش شافت و ... می‌باشند. در ادامه می‌بینیم که چطور بعضی از عوامل خطا را می‌توان از بین برد.

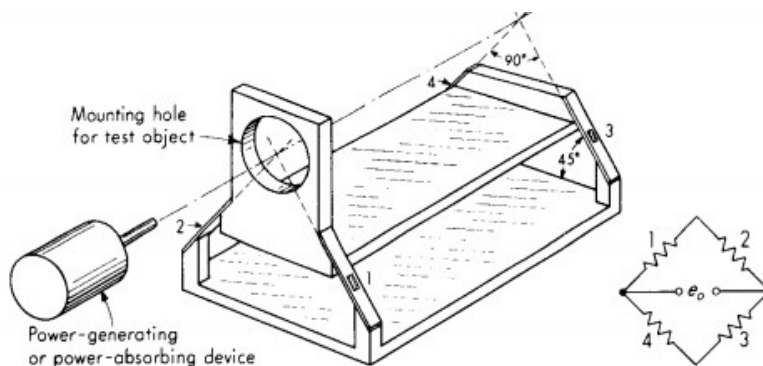
۵-۱۱ اندازه‌گیری کوپل با استفاده از کرنش سنج

برای کم کردن اثر اصطکاک در یاتاقانهای کریدل و برای اینکه بتوان گشتاورهای دینامیکی را هم اندازه گرفت، می‌توان به جای استفاده از کریدل از تکیه‌گاه منحنی شکل با کرنش سنج استفاده کرد (شکل (۵-۱۲)). نقاط تقاطع صفحات منحنی شکل مقدار چرخش تکیه‌گاه را نشان می‌دهد. مقدار چرخش تحت بار بیشینه کمتر از ۰/۵ است. ترتیب و نظم کرنش سنج‌های بکار رفته در سیستم به نحوی است که از اثرات تمام نیروها به جز نیروهای ناشی از کوپل اندازه‌گیری می‌کاهد. به راحتی می‌توان نمودار سرعت - گشتاور موتورها را رسم کرد، بدین ترتیب که به موتور تحت آزمایش اجازه داده می‌شود که یک جرم ساکن را تا ماکزیمم سرعت (که اندازه گرفته می‌شود) شتاب دهد. مقدار سیگنالهای گشتاور و سرعت بر روی یک ثبت کننده در دو محور X-Y ثبت می‌شود. شکل (۵-۱۳) نوع دیگری از کاربرد کرنش سنج را نشان می‌دهد که برای اندازه‌گیری لنگر به کار می‌رود. ترتیب قرار گرفتن کرنش سنجها بر روی بدنه شافت به نحوی است که سیگنالهای خروجی نسبت به دما و تنشهای خمشی و یا محوری حساس نمی‌باشند.

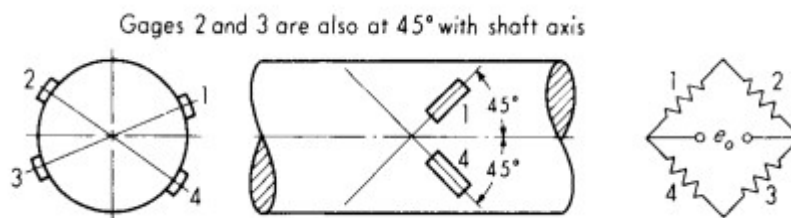
۱-Cradle

کرنش سنج‌های ۱ و ۳ بایستی در مقابل هم بر روی شافت قرار گرفته (همچنین کرنش سنج‌های ۴ و ۲) و بایستی در زاویه 345° از محور شافت نصب شوند. در بعضی موارد کرنش سنجها بایستی بر روی شافت در حال کار در ماشین نصب شوند. همچنین در بعضی موارد بایستی از شافتهای دیگری برای داشتن حساسیت کافی استفاده کرد.

انواع مختلف نشان داده شده در شکل (۵-۱۴) شامل چند نوع از کاربردهای صنعتی با استفاده از اشکال پره ای^(۱) برای کوپلهای ناچیز و شافت چهار گوش برای کوپلهای زیاد می‌باشند. قرار دادن کرنش سنجها بر روی شافتهای چهار گوش نسبت به شافتهای با مقطع دایره‌ای دارای مزایایی می‌باشد. از آن جمله می‌توان دقت بیشتر در قرار گرفتن کرنش سنج بر روی شافت و محکم چسبیدن کرنش سنج بر روی سطح شافت را ذکر کرد. همچنین برای مقدار مساوی از حساسیت (کرنش)، یک شافت با مقطع مربعی بسیار بیشتر از یک شافت با مقطع دایره‌ای در برابر خمش مقاوم می‌باشد. لنگر خیلی از ماشینها مانند موتورها در هنگام کار کردن پیوسته هم دارای مقادیر فیلتری می‌باشد، بنابراین در اندازه گیری آنها بایستی مقدار متوسط آنها را اندازه گیری کرد. اما سرعت پاسخ بالای کرنش سنج باعث شده خروجیها به صورت پالس باشند و برای داشتن مقدار متوسط خروجی بایستی عملیات خاصی روی خروجی انجام شود. به طور مثال اگر دقت بالایی مدنظر نیست می‌توان از یک موتور DC به عنوان یک فیلتر پایین گذر استفاده کرده و خروجی e^3 را اندازه گرفت. شکل (۵-۱۱) که برای آزمایش خیلی از موتورها هم به کار می‌رود، اندیس کرایدل و سرعت پاسخ پایین پاندول و یا باسکول استفاده شده برای تشخیص F ، همان کار متوسط گیری را انجام می‌دهد.



شکل (۵-۱۲) اندازه گیری لنگر با استفاده از کرنش سنج



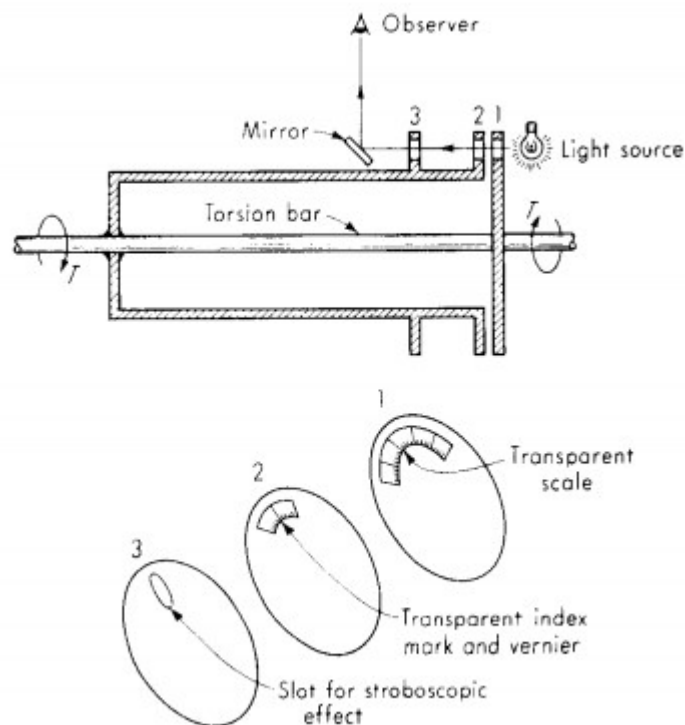
شکل (۵-۱۳) اندازه گیری لنگرشافت توسط کرنش سنج

۵-۱۲ ترانسدیوسرهای میله پیچشی

استفاده از پیچش الاستیک اعضاء انتقال دهنده لنگر برای اندازه گیری لنگر، می تواند با اندازه گیری مقدار کل پیچش و یا اندازه گیری مقدار پیچش واحد مشخصی از طول میله انجام گیرد.

نحوه این نوع اندازه گیری در خواندن مقدار جابجایی (پیچش)، هنگام چرخش شافت می باشد. شکل (۵-۱۴) یک نوع از این وسایل را نشان می دهد. که در آن از روشهای نوری برای اندازه گیری مقدار جابجایی پیچشی استفاده می شود.

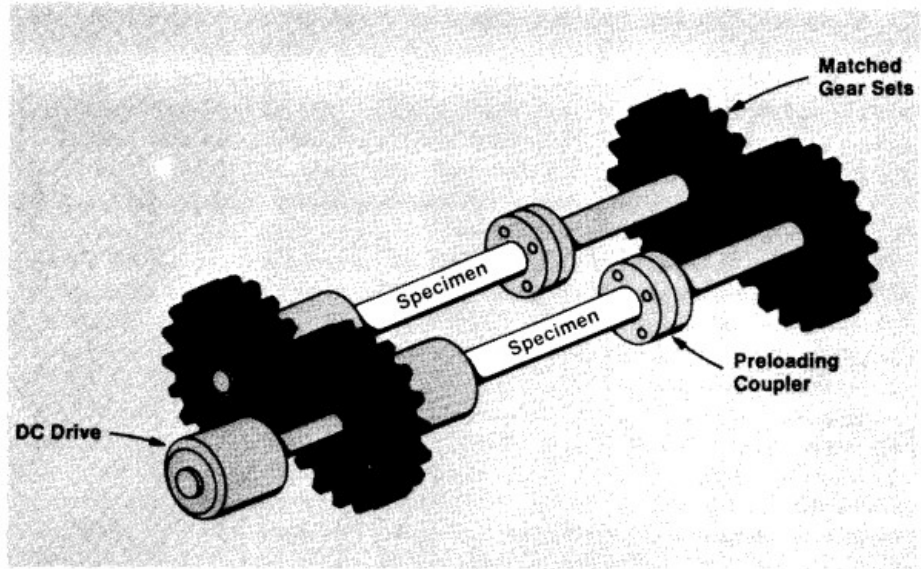
با بهره بردن از اثرات استروبوسکوپی و نگاه کردن ممتد به آینه می توان مقدار انحراف یک انتهای میله را نسبت به انتهای دیگر آن اندازه گرفت. اگر به جای مشاهده نور توسط استفاده کننده از ترانسدیوسر نوری تولید کننده سیگنالهای الکتریکی استفاده شود، می توان سیگنالهای خروجی را به صورت الکتریکی دریافت نمود و آنرا درجه بندی کرد. در این صورت برای مقادیر کوپل صفر دیسک مقطع (sector) به نحوی قرار می گیرد که ۵۰٪ از سطح، انتقال نور را فراهم کند. هنگامی که کوپل مقدار مثبتی می شود این سطح هم متناسب با آن افزایش می یابد. در هنگامی که کوپل منفی وارد می شود سطح مقطع نور کاهش می یابد و متناسب با کاهش و یا افزایش سطح گذر نور، سیگنال خروجی الکتریکی هم تولید می شود.



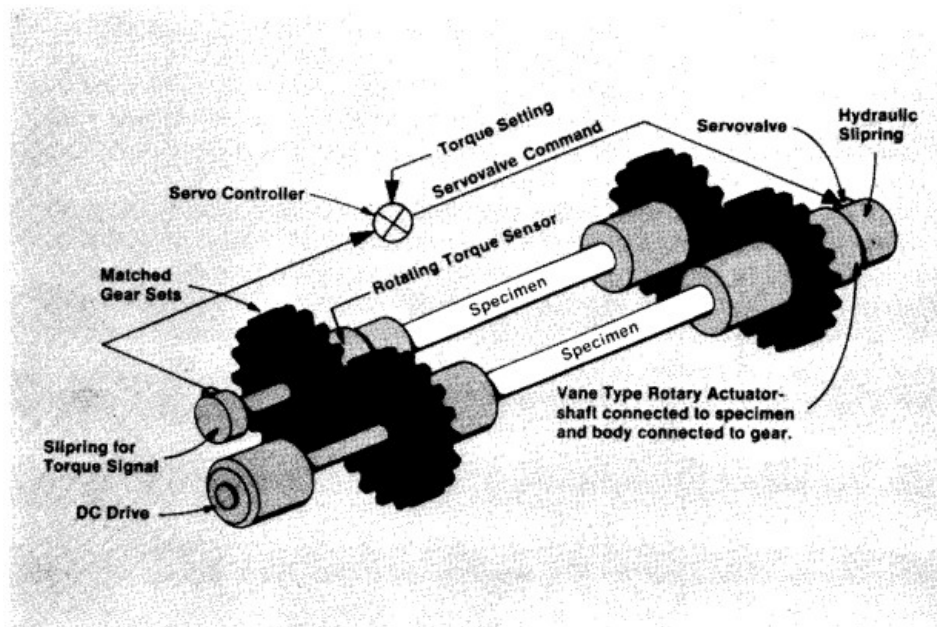
شکل (۵-۱۴) ترانسیدوسرهای میله پیچشی

۵-۱۳ دینامومتر مربعی^(۱)

این نوع از سیستمها برای اعمال بار روی شافت تحت آزمایش به کار می‌رود. شافت را از طرفی به منبع قدرت و از طرف دیگر به مصرف کننده توان متصل می‌سازند (شکل (۵-۱۵) و (۵-۱۶)). در این وسایل در مقدار انرژی صرفه جویی شده و آزمایش را هم می‌توان با سرعت انجام داد. همچنین در این وسایل نمونه‌های تحت آزمایش با اتصال به منحنیها پیش بارگذاری می‌شوند. حال چرخ دنده‌ها می‌توانند با هر سرعتی توسط موتور DC چرخانده شده و نمونه تحت سرعت و کوپل دلخواهی آزمایش شود. در اینجا موتور فقط اصطکاک بین چرخ دنده‌ها را تأمین می‌کند.

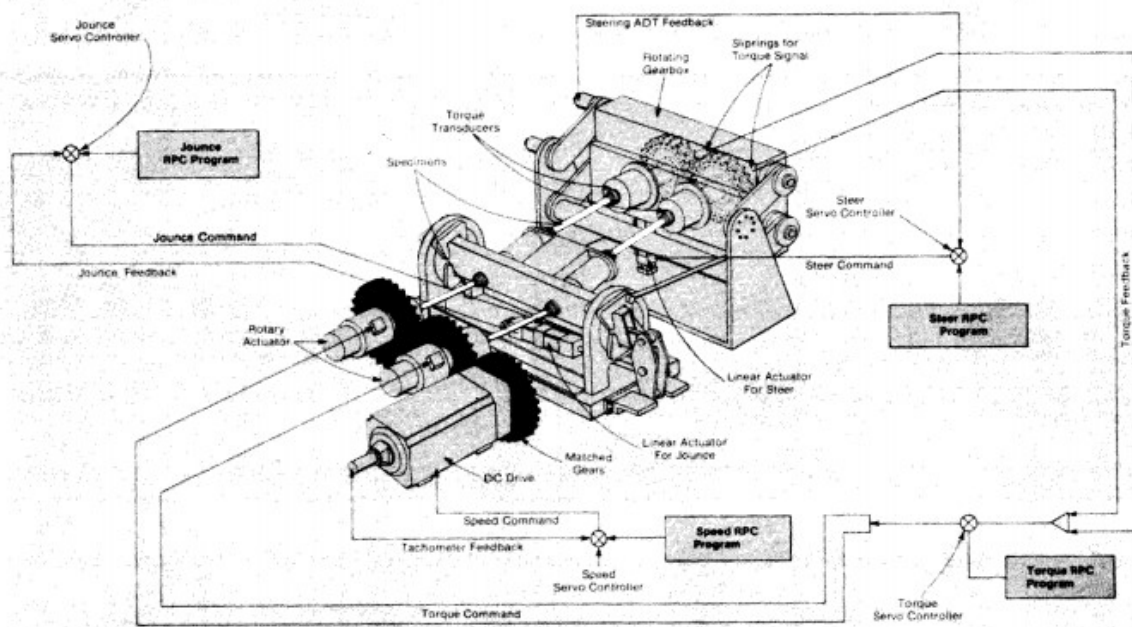


(a)



(b)

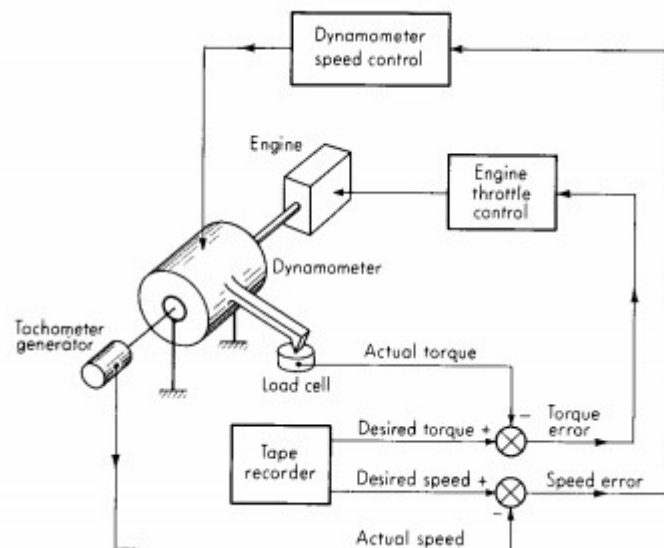
(شکل (۵-۱۵) دینامومتر مربعی



شکل (۵-۱۶) دینامومتر مربعی در دستگاه تست مدار بسته

۵-۱۴ دینامومتر کنترل شده سروو

این نوع از وسایل که در شکل (۵-۱۷) دیانگرام بلوکی آنها نشان داده شده‌اند، قادرند همزمان با سرعت کارکرد موتور و لنگر ایجاد شده توسط موتور را اندازه بگیرند. این وسایل شرایط کارکرد موتور را در آزمایشگاه ایجاد می‌کنند. از دو مدار فیدبک برای کنترل سرعت موتور و کوپل ایجاد شده توسط موتور استفاده می‌شود. تاکومتر سیگنالهای الکتریکی تولید شده را با مقدار سرعت در نظر گرفته شده برای موتور، مقایسه می‌کند و در صورتی که این دو مقدار با هم فرق کند، سیستم کنترل دینامومتر به صورت اتوماتیک شروع به تغییر سرعت می‌کند. این عمل تا زمانی که سرعت موتور به مقدار دلخواه برسد ادامه دارد. مقدار دقیق کوپل موتور توسط سل نیروی نصب شده بر روی دینامومتر به دست می‌آید و با کوپل پیش‌بینی شده روی سیستم مقایسه می‌شود. در صورتی که این دو مقدار باز با هم برابر نباشند، سیگنال خطای ایجاد شده با تنظیم سیستم کاربراتور موتور کوپل موتور را تغییر می‌دهد. مقدار کوپل و سرعت دلخواه موتور در روی ثبت کننده‌ای ثبت می‌شوند و مقایسه سیگنالهای خروجی با آنها انجام می‌گیرد.



شکل (۵-۱۷) دینامومتر کنترل شده سروو

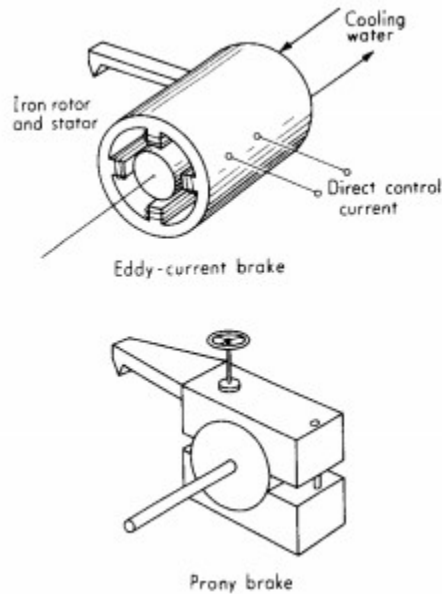
۵-۱۵ دینامومترهای جذب کننده

در شکل (۵-۱۸) کوپل سنج‌هایی که توان را کاملاً جذب می‌کنند نشان داده شده‌اند. این کوپل سنجها از دو نوع ترمز استفاده می‌کنند. یکی ترمزهای جریان گردابی و دیگری ترمزهای مکانیکی که براساس اصطکاک خشک و یا در اثر اصطکاک سیال کار می‌کنند. کوپل ایستایی ناشی از ترمزهای جریان گردابی به سادگی از طریق تغییر جریان ورودی dc قابل تنظیم می‌باشد. اما این نوع ترمزها در سرعت صفر نمی‌توانند هیچ کوپل ایستایی ایجاد کنند و ناچاراً شافت باید در سرعت خیلی کمی بچرخد. از آنجا که توان تلف شده در ترمز باعث ایجاد گرما می‌شود، ترمز جریان گردابی از طریق جریان آب و یا هوای بین استاتور و آرمیچر خنک می‌شود.

ترمزهای مکانیکی دارای مکانیزم ساده‌ای می‌باشند که در آن اصطکاک مکانیکی به صورت دستی با افزایش نیروی عکس‌العمل سطح توسط یک دسته افزایش می‌یابد. می‌توان توسط ترمزهای مکانیکی در سرعت صفر هم لنگر ایستایی به شافت اعمال کرد، اما عملکرد آنها به دلیل رفتار نامنظم اصطکاک خشک دقیقاً مشخص نمی‌باشد.

ترمزهای اصطکاکی از نوع هوایی و یا سیال دیگر براساس حرکت چرخ پره‌دار درون سیال مشخص کار می‌کنند. نیروی عکس‌العمل به وجود آمده باعث تلف شدن توان ورودی می‌شود. این ترمزها هم نمی‌توانند در سرعت‌های صفر

کار کنند و برای کویل‌های کم و سرعت‌های پایین بکار می‌روند. بعضی از ترمزهای آبی می‌توان تا توان ۱۰۰۰۰hp و سرعت ۳۰۰۰r/min هم رسید. ترمز پرونی نمونه‌ای از این نوع دینامومترها می‌باشد.



شکل (۵-۱۸) دینامومترهای جذب کننده

۵-۱۶ لنگرسنج ژيروسکوپی

این ترانسدیوسرهای اندازه‌گیری لنگر همانند ترانسدیوسرهای ژيروسکوپیکی نیرو می‌باشند و می‌توان از ترانسدیوسرهای اندازه‌گیری نیرو با تغییرات جزئی برای اندازه‌گیری لنگر استفاده کرد. بنابراین از تکرار آنها در اینجا صرف‌نظر می‌کنیم.

