

مدار پل و تستون

سر چارلز و تستون (1802 - 1875)، دانشمند انگلیسی، در سال 1843 مداری را ارائه داد که اندازه گیری دقیق مقاومت های الکتریکی را ممکن می ساخت. این مدار به "مدار پل و تستون" معروف شده است.

پل و تستون را می توان به روش های مختلفی برای اندازه گیری مقاومت های الکتریکی استفاده کرد:

- برای تعیین مقدار مطلق یک مقاومت با مقایسه مقاومت مجهول با مقاومت های معلوم پل،
- برای تعیین تغییرات نسبی مقاومت.

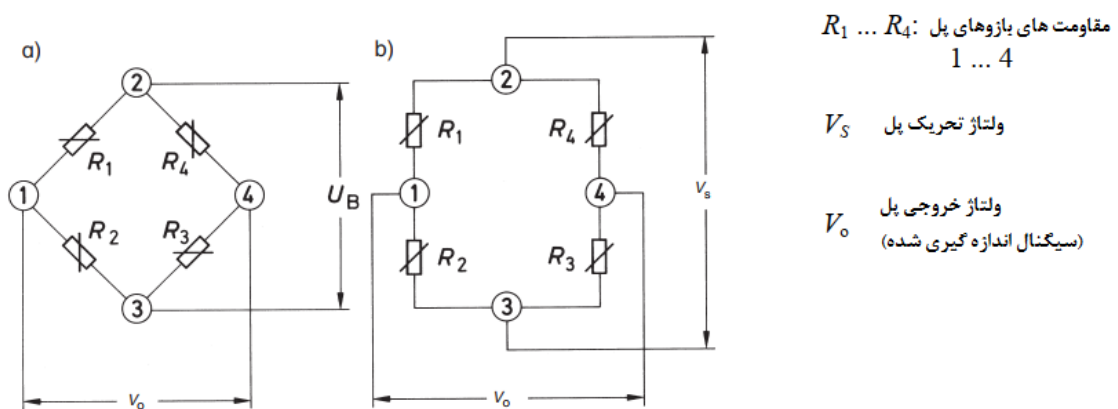
روش دوم در کاربردهای استرین گیج مورد استفاده قرار می گیرد. تغییرات نسبی مقاومت در استرین گیج را که معمولاً در حدود 10^{-4} تا $10^{-2} \Omega/\Omega$ هستند را قادر می سازد تا با دقت زیادی اندازه گیری شوند. پل و تستون فوق العاده همه کاره در زیر به طور انحصاری برای کاربردهای استرین گیج بررسی شده است.

دیاگرام مداری پل و تستون:

شکل 1 دو تصویر متفاوت از پل و تستون را نشان می دهد که این دو مدار از نظر الکتریکی با هم یکسان هستند: شکل 1-a نوع لوزی معمولی نمایشی را که و تستون استفاده می کرد نشان می دهد. شکل 1-b نمایشی از همان مدار است که برای افراد مبتدی مناسب تر است.

چهار بازو یا شاخه مدار پل توسط مقاومت های $R1$ تا $R4$ تشکیل می شوند. نقاط گوشه 2 و 3 پل، اتصالات ولتاژ تحریک پل V_s را مشخص می کند. ولتاژ خروجی پل V_o ، سیگنال اندازه گیری، نقاط گوشه 1 و 4 پل می باشد.

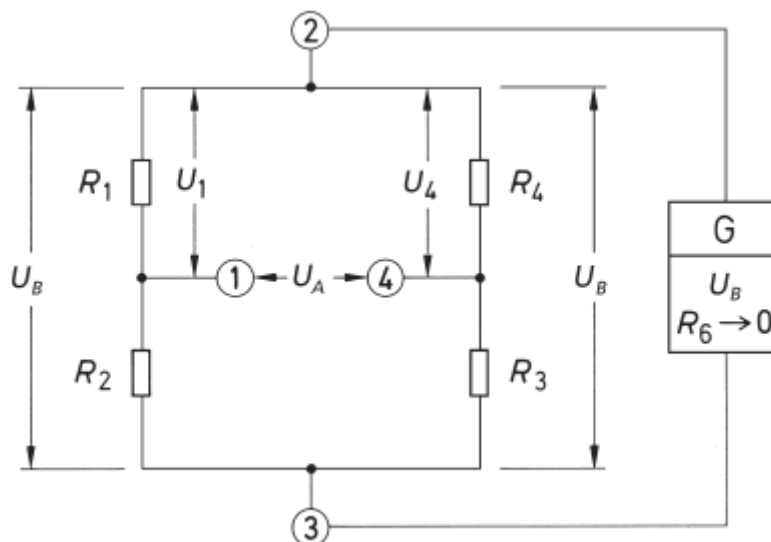
تحریک پل معمولاً توسط یک ولتاژ V_S اعمالی، تثبیت شده مستقیم یا متناوب است. گاهی اوقات از منبع جریان نیز برای تحریک پل استفاده می شود.



شکل 1: دو فرم نمایش متفاوت مدار پل وتستون

اصول کار مدار پل وتستون:

اگر ولتاژ تغذیه V_S به گره های تغذیه 2 و 3 پل اعمال شود، این ولتاژ به نسبت مقاومت های R_1 و R_2 در یک طرف پل و به نسبت مقاومت های R_3 و R_4 در طرف دیگر پل تقسیم می شود. یعنی طرفین پل هر کدام تشکیل مدار مقسم ولتاژ مقاومتی را می دهند. شکل 2 این موضوع را نشان می دهد.



شکل 2: اصول کار پل وتستون تغذیه شده با منبع ولتاژ ثابت

اگر پل در حالت بالانس نباشد، در این صورت یک اختلاف ولتاژ در خروجی آن ایجاد می شود که مقدار آن از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$V_o = V_s \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \quad (1)$$

اگر پل در حالت بالانس باشد در این صورت:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (2)$$

و ولتاژ خروجی پل در این حالت صفر می شود. اگر در بازوهای پل به جای مقاومت ثابت، استرین گیج قرار بگیرد، در این صورت برای یک کرنش از پیش تعیین شده، مقاومت نامی استرین گیج به مقدار ΔR تغییر می کند. در این صورت رابطه (1) را برای ولتاژ خروجی پل می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$V_o = V_s \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_4 + \Delta R_4}{R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4} \right) \quad (3)$$

در کاربردهای اندازه گیری کرنش مقدار مقاومت های R_1 و R_2 باید باهم برابر باشند، همین طور مقاومت های R_3 و R_4 .

$$R_1 = R_2 = R_1 \quad (4)$$

$$R_3 = R_4 = R_3 \quad (5)$$

با جایگذاری این عبارت ها در رابطه (3)، می توان آن را به صورت زیر نوشت:

$$V_o = V_s \left(\frac{(R_1 + \Delta R_1) \cdot (2R_3 + \Delta R_3 + \Delta R_4) - (R_3 + \Delta R_4) \cdot (2R_1 + \Delta R_1 + \Delta R_2)}{(2R_1 + \Delta R_1 + \Delta R_2) \cdot (2R_1 + \Delta R_3 + \Delta R_4)} \right) \quad (6)$$

با بسط دادن رابطه بالا، عبارت های زیادی به شکل $\Delta R_X \cdot \Delta R_Y$ تولید می شوند، و چون مقدار آنها در مقایسه با عبارت های دیگر کوچک می باشد، می توان از آنها صرف نظر کرد. با اعمال این ساده سازی ها رابطه (6) به شکل زیر در می آید.

$$V_o = V_s \left(\frac{R_1(\Delta R_3 + \Delta R_4) - R_1(\Delta R_1 + \Delta R_2) + 2R_3\Delta R_1 - 2R_1\Delta R_4}{4R_1R_3 + 2R_1\Delta R_3 + 2R_1\Delta R_4 + 2R_3\Delta R_1 + 2R_3\Delta R_2} \right) \quad (7)$$

رابطه (7) را باز هم می توان ساده تر کرد. این موضوع را با یک مثال بررسی می کنیم. فرض کنید در بازوهای پل گج 120 اهمی با کرنش $10000\mu m$ قرار گرفته است، در این صورت در مخرج کسر رابطه (7) داریم:

$$4R_1R_3 = 57600\Omega^2 \quad (8)$$

که جمله های دیگر مخرج در مقایسه با آن خیلی کوچک هستند. مثلاً:

$$2R_1\Delta R_3 = 0.48^2 \quad (9)$$

اگر مقاومت کرنش سنج بزرگتر یا میزان کرنش کوچکتر باشد، تفاوت این عبارت ها از همدیگر حتی بیشتر هم خواهد بود.

بنابراین در مخرج کسر رابطه (7)، ما از همه جملات آن به غیر از جمله $4R_1R_3$ صرف نظر می کنیم، نتیجه به شکل زیر در می آید:

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{R_1\Delta R_3}{4R_1R_3} + \frac{R_1\Delta R_4}{4R_1R_3} - \frac{R_3\Delta R_1}{4R_1R_3} - \frac{R_3\Delta R_2}{4R_1R_3} + \frac{2R_3\Delta R_1}{4R_1R_3} - \frac{2R_1\Delta R_4}{4R_1R_3} \quad (10)$$

و به صورت خلاصه تر:

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{\Delta R_3}{4R_3} + \frac{\Delta R_4}{4R_3} - \frac{\Delta R_1}{4R_3} + \frac{\Delta R_2}{4R_1} + \frac{\Delta R_1}{2R_1} - \frac{\Delta R_4}{2R_3} \quad (11)$$

دوباره یادآوری می کنیم که مقاومت های R_1 ، R_2 ، R_3 و R_4 باید باهم برابر باشند. در این صورت رابطه (11) به صورت زیر خلاصه نویسی می شود:

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (12)$$

در رابطه (12) برای گنج ها باید رابطه زیر را جایگذاری کنیم:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (13)$$

که در آن K فاکتور گنج و ε میزان کرنش روی گنج می باشد. با جایگذاری (13) در (12) رابطه نهایی به شکل زیر در می آید:

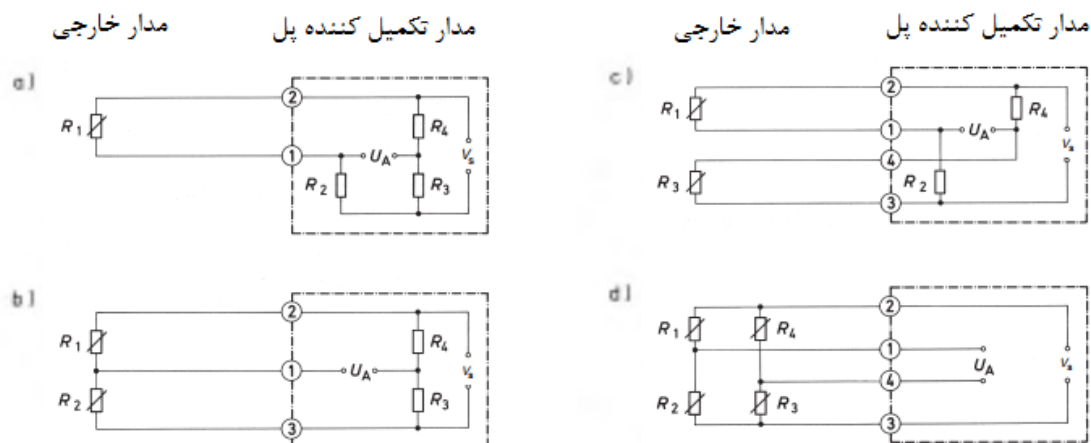
$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (14)$$

در معادلات (3) و (14) فرض بر این است که تمام مقاومت ها در پل تغییر می کنند. این وضعیت برای مثال در مبدل ها و یا در اهداف آزمایشگاهی که عملکرد مشابهی را انجام می دهند، رخ می دهد. در تجزیه و تحلیل تنش تجربی این امر به سختی انجام می شود و معمولاً فقط برخی از بازوهای پل حاوی کرنش سنج فعال هستند، بقیه بازوهای پل از مقاومت های ثابت جهت تکمیل پل تشکیل می شوند. اشکال مختلف مانند پل مانند ربع پل، نیم پل، ربع پل دابل یا پل مورب و پل کامل در عمل رایج هستند. شکل 2 اشکال مختلف پل را نشان می دهد.

مقاومت های تکمیل پل با توجه به پایداری طولانی مدت و عدم وابستگی به دما، تقاضاهای بالایی دارند. مقاومت فیلم فلزی برای این کار بسیار پایدار و مفید هستند. برخی از تقویت کننده های اندازه گیری، حاوی مدارات تکمیل پل به صورت داخلی هستند. به جای این مقاومت های کاملاً غیرفعال، می توان از کرنش سنج های جبرانی نیز به عنوان مقاومت های تکمیل پل استفاده کرد. الزاماتی که یک کرنش سنج جبرانی باید انجام دهد در بخش های بعدی توضیح داده شده است.

از روابط (5) و (7) مشخص است که با تغییر مقاومت استرین گنج ها که توسط کرنش ها به وجود می آید، پل نامتعادل شده و سیگنال خروجی با علامت های مختلف در خروجی ظاهر می شود. با متصل کردن ابزار اندازه گیری مناسب در خروجی پل برای اندازه گیری کرنش های به وجود آمده، حالت های زیر اتفاق می افتد:

- سیگنال خروجی مثبت است اگر $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ و یا $\varepsilon_3 > \varepsilon_4$
- سیگنال خروجی منفی است اگر $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$ و یا $\varepsilon_3 < \varepsilon_4$

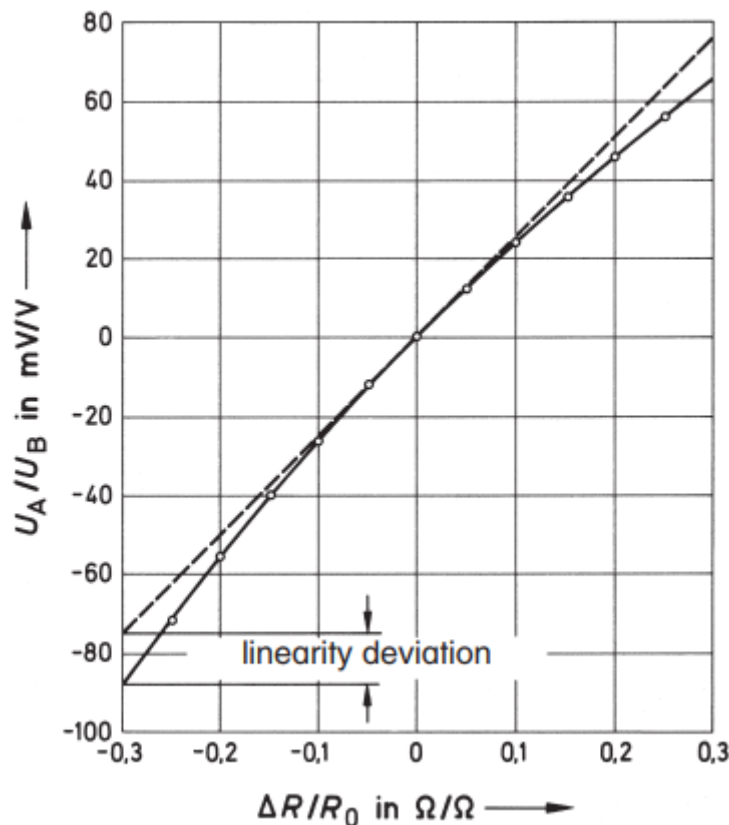


شکل 2: آرایش های مداری پل و تستون مختلف که در کاربردهای استرین گیج مورد استفاده قرار می گیرند.

(a) ربع پل (b) نیم پل (c) پل مورب یا دوبل ربع (d) تمام پل

بسته به اینکه تغییرات مقاومت در یک یا چند بازوی پل اتفاق بیفتد و بسته به مقدار و علامت آنها، یک خطای انحراف از خط یا همان خطای غیرخطی در خروجی پل رخ می دهد.

اگر مجموع تغییر مقاومت در هر دو نیمه پل صفر باشد، در این صورت یک مشخصه خطی در خروجی پل



شکل 3: منحنی مشخصه مدار پل و تستون در حالت عملیاتی "ربع پل" با توجه به معادله (15) و مقایسه مشخصه آن بر اساس فرمول تقریبی (16).

به وجود می آید. یعنی

$$\Delta R_1 + \Delta R_2 = 0 \text{ and } \Delta R_3 + \Delta R_4 = 0$$

بیشترین خطای غیرخطی در مدار ربع پل و پل مورب اتفاق می افتد. شکل 3 نمودار تغییرات V_O/V_S مدار ربع پل را در مقایسه با تغییرات $\Delta R/R$ در بازوی 1 پل نشان می دهد، که از طریق رابطه زیر محاسبه شده است.

$$\frac{V_O}{V_S} = \frac{\Delta R}{2(2R_0 + \Delta R)} \quad (15)$$

در رابطه بالا فرض براین است که $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R = R_0$ می باشد.

جهت مقایسه، مشخصه خطی

$$\frac{V_O}{V_S} = \frac{\Delta R}{4R_0} \quad (16)$$

که از فرمول تقریبی محاسبه شده است، به صورت خط چین در نمودار 3 رسم شده است.

خطای غیرخطی مدار ربع پل اغلب در عمل به عنوان یک نقطه ضعف بزرگ پل و تستون تغذیه شده با ولتاژ ثابت در مقایسه با پل تغذیه شده با جریان ثابت نشان داده می شود. با این حال، آنچه در نظر گرفته نمی شود این است که برای کرنش های بزرگ، استرین گیج خود یک رفتار غیرخطی به همان اندازه بزرگ اما در جهت مخالف را نشان می دهد. در نتیجه این دو خطا اثر همدیگر را در خروجی خنثی می کنند، در حالی که پل تغذیه شده با منبع جریان، خود به تنهایی قادر به جبران این خطا نیست.

تحریک پل و تقویت ولتاژ خروجی آن:

مدار پل و تستون را می توان از طریق ولتاژ مستقیم و یا ولتاژ متناوب تغذیه کرد. نوع تحریک پل باید در ارتباط با سیستم تقویت کننده ای که برای تقویت ولتاژ خروجی پل استفاده می شود در نظر گرفته شود.

تقویت کننده های اندازه گیری موجود در بازار دارای یک منبع ولتاژ ثابت برای تغذیه مدار پل هستند. ولتاژ تغذیه معمولاً بین مقادیر 1 تا 10 ولت قابل تغییر است، بنابراین این ولتاژ، با ولتاژ تغذیه استرین گیج ها طبق کاتالوگ راهنمای آنها مطابقت دارد.

آمپلی فایرها همچنین دارای ابزارهای تنظیم برای جبران نقطه صفر و تنظیم آمپلی فایر به مقادیر دلخواه هستند. با تقویت کننده های اندازه گیری ac که دارای فرکانس حامل هستند، در صورت نیاز، ابزارهایی برای جبران فاز هم وجود دارد.

وظیفه اصلی تقویت کننده اندازه گیری، افزایش سطح سیگنال خروجی مدار پل از محدوده میلی ولت به رنج ولت است. ولتاژ سیگنال تقویت شده در صورت امکان باید بازتولید کاملی از متغیر اندازه گیری شده باشد. و تداخلاتی مانند ولتاژ حرارتی و تداخل خط نباید هیچ تاثیری در خروجی آن داشته باشد.

انواع و تنوع تقویت کننده های اندازه گیری آنقدر زیاد است که بررسی کامل آنها از حوصله این بحث خارج است. اطلاعات دقیق از هر تقویت کننده را می توان از برگه راهنمای محصول مربوطه گرفت. تفاوت های اصلی بین دو تقویت کننده ولتاژ مستقیم و متناوب در زیر به اختصار ذکر شده است.

تقویت کننده اندازه گیری ولتاژ مستقیم حاوی یک مولد ولتاژ است که یک ولتاژ مستقیم تثبیت شده را برای تامین مدار پل فراهم می کند. تقویت کننده ولتاژ مستقیم، که ولتاژ خروجی پل به آن منتقل می شود، سیگنال های استاتیک و سیگنال های دینامیکی را تا فرکانس های بالا

Houshmand Sanat Tav Electronic CO.,LTD.

تقویت می کند. در بیشتر موارد در اندازه گیری کمیت های مکانیکی، حد بالایی 10 کیلوهرتز برای فرکانس کافی است، زیرا اجسام مکانیکی جرم محدودی دارند و این حد تنها در موارد خاص به مقادیر بالاتر تجاوز می کند.

معمولا فرکانس های بالاتر توسط پالس های تداخلی ایجاد می شوند که باید به خوبی از سیگنال اندازه گیری دور نگه داشته شوند. عیب روش ولتاژ مستقیم این است که تداخل ناشی از میدان های الکتریکی یا مغناطیسی همراه با ولتاژهای حرارتی و گالوانیکی که در مدار اندازه گیری رخ می دهد، به طور کامل تقویت شده و به صورت خطا در نتیجه اندازه گیری ظاهر می شوند. غربالگری الکتریکی یا مغناطیسی برای محافظت در برابر اثرات این تداخلات مورد نیاز است. خطاهای ناشی از ولتاژ حرارتی را می توان با معکوس کردن ولتاژ تغذیه تشخیص داد. این خطاها باید محاسبه و از خروجی حذف شوند.

با روش فرکانس حامل، ژنراتور یک ولتاژ متناوب را که فرکانس و ولتاژ آن کاملاً تثبیت شده است، برای تغذیه مدار پل تامین می کند. اگر مدار پل توسط کمیت اندازه گیری شده نامتعادل شود، به عنوان مثال. یک کرنش بر روی استرین گیج، در این صورت ولتاژ خروجی تقویت کننده یک ولتاژ متناوب است که دامنه آن متناسب با عدم تعادل پل یا کرنش روی استرین گیج می باشد. (مدولاسیون دامنه). تقویت کننده به گونه ای طراحی شده است که فقط فرکانس ولتاژ تغذیه و باندهای جانبی نسبتاً باریک را تقویت می کند و فرکانس های بالاتر یا پایین تر از آنها را نمی پذیرد. از این رو، تمام بخش های تداخل ولتاژ مستقیم سیگنال اندازه گیری، به عنوان مثال ولتاژهای حرارتی تشکیل شده در مدار اندازه گیری، به طور کامل حذف می شوند. فرکانس حامل به گونه ای انتخاب می شود که ولتاژهای متناوب مزاحم، به عنوان مثال تداخلات سرگردان ناشی از فرکانس خط و هارمونیک های آن و همچنین پالس های تداخل فرکانس بالا، نیز هیچ تاثیری بر سیگنال اندازه گیری نداشته باشند. فرکانس های حامل رایج 225 هرتز و 5 کیلوهرتز هستند. تقویت کننده های 225 هرتز برای اندازه گیری فرآیندهای استاتیکی و شبه استاتیکی، یعنی تا 9 هرتز مناسب هستند. تقویت کننده های 5 کیلوهرتز می توانند فرکانس های استاتیک و دینامیکی تا 1 کیلوهرتز را با کاهش دامنه 1 دسی بل اندازه گیری کنند.