บทที่ 3

หลักการและทฤษฎี

3.1 หลักการ

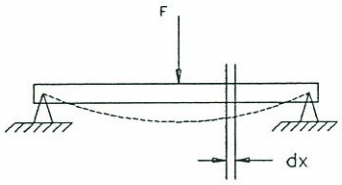
การทำงานของเครื่องคัดผลมะม่วงโดยใช้น้ำหนักเป็นเกณฑ์และควบคุมระบบการทำงานด้วย Microprocessor นี้ ปฏิบัติการโดยใช้คนป้อนผลมะม่วงลงบนถาดชั่งทีละผล และระบบควบคุมจะวัดน้ำหนักของมะม่วงเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับน้ำหนักมาตรฐานเกรดต่าง ๆ ที่เก็บไว้ในหน่วยความจำ หลังจากนั้น จึงสั่งงานให้ Stepper Motor หมุนถาดชั่งไปยังชุดรองรับที่ตรงกับเกรดมะม่วงนั้น ๆ แล้วจึงสั่งงานให้ Motor หมุนขับลูกเบี้ยวให้ถาดชั่งยกขึ้นเพื่อให้ผลมะม่วงไหลลงไปยังที่รองรับที่เหมาะสม หลังจากนั้น Stepper Motor จะหมุนถาดชั่งกลับมายังจุดเริ่มต้นใหม่ พร้อมที่จะรับมะม่วงลูกต่อไป

รูปที่ 1 เครื่องคัดผลมะม่วงโดยใช้น้ำหนักเป็นเกณฑ์

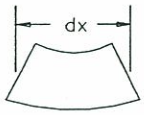
3.2 ทฤษฎี

3.2.1 วิเคราะห์ความเค้นในคาน

เมื่อคานรับแรงกระทำใด ๆ จะเกิดการแอ่นตัวขึ้นและพร้อมกันนั้น ในแต่ละตำแหน่งแต่ละชั้นของคานจะเกิดการยืดการหดขึ้น พิจารณาตามรูป A (ก) จะเกิดการแอ่นตัวตามเส้นประ



ก



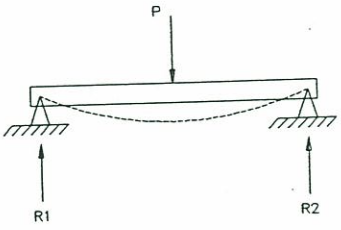
ข

เมื่อนำชิ้นส่วนช่วงใดมาพิจารณาจะเห็นว่า ตามลักษณะส่วนโค้งนี้ fiber ด้านบนของคานจะหดเข้าและ fiber จะมีแรงมากระทำและนั่นคือในแต่ละ fiber จะมีความเค้นเกิดขึ้น เมื่อพิจารณาให้มากขึ้นไปอีกจะเห็นว่า การยืด การหด แต่ละตำแหน่ง ความลึกของคานนั้น ก็ไม่เท่ากัน ย่อมหมายถึงค่าความเค้นจะแปรเปลี่ยนไปแต่ละตำแหน่งด้วย แต่ก่อนที่จะหาสูตรความเค้นนั้นมีข้อสมมุติฐาน ดังต่อไปนี้

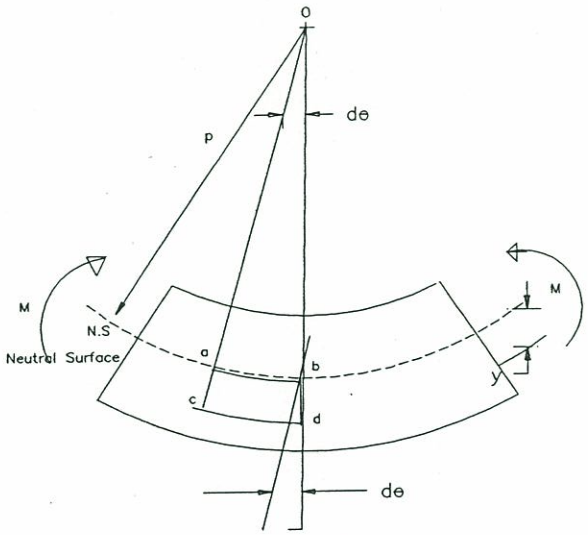
รูป A

1. คานที่พิจารณาเป็นคานตรงไม่โค้งงอ ก่อนที่จะรับโหลด
2. คานเป็นวัสดุที่มีเนื้อกลมกลืนสม่ำเสมอ (homogeneous material) และมีคุณสมบัติเป็นไปตามกฎของฮุค
3. ค่า MODULUS OF ELASTICITY ของคานมีค่าเท่ากันไม่ว่าจะเกิดการยืดหรือหด
4. แนวระนาบหน้าตัดของคาน หลังจากรับโหลดแล้ว ยังคงเป็นแนวระนาบเรียบ
5. แรงที่มากระทำอยู่ในแนวตั้งฉากกับแนวแกนของคาน

จากข้อสมมุติฐานข้างต้น เริ่มพิจารณาเมื่อคานรับโหลดกระทำ สมมุติอยู่ในรูป B (ก) ซึ่งจะทำให้คานเกิดการแอ่นตัวเป็นไปตามเส้นประ



ก



ข

รูป B

ตัด section ใด ๆ ที่มีความยาว dx ของคานมาพิจารณาดังในรูป B (ข) จะเห็นได้ว่า จากลักษณะการแอ่นตัวของคาน, fiber ของคานส่วนบนจะเกิดการหดตัว ในขณะที่ fiber ของคานส่วนล่างจะเกิดการยืดตัว นั่นคือ จะมีบางตำแหน่งที่ fiber ยังคงยาวเท่าเดิม แนวระนาบในแนวราบ ณ ตำแหน่งนี้ เรียกว่า neutral surface ในรูปแสดงด้วยเส้นที่ผ่านจุด ab

โดยให้เส้น ab กางรับมุมที่แอ่นเท่ากับ dθ ซึ่งมีค่าน้อยมาก โดยรัศมีของการโค้งของเส้น ab เท่ากับ ρ

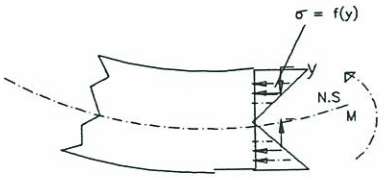
พิจารณา fiber ของคานที่ตำแหน่ง y ใด ๆ ที่ต่ำกว่า neutral surface (เส้น ab) จากรูป B (ข) จะเห็นว่าเส้น cd ซึ่งยาวเท่ากับเส้น ab นั้น ยืดออก = de นั่นคือ strain ของ cd มีค่า ,

$$\varepsilon = \frac{de}{cd} = \frac{de}{ab} = \frac{y d\theta}{\rho d\theta} = \frac{y}{\rho}$$

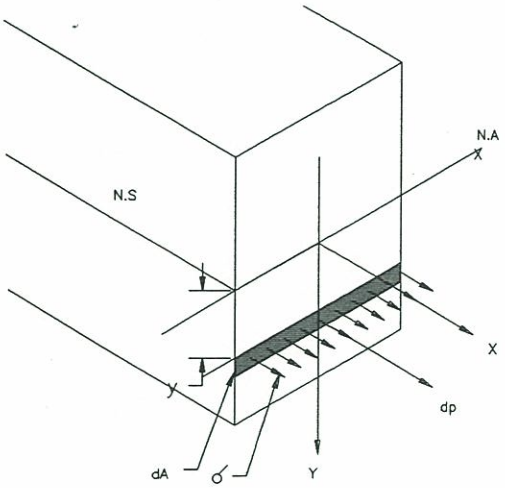
จาก $\sigma = E\varepsilon$

นั่นคือ $\sigma = \frac{E}{\rho} \cdot y$ (a)

สมการ (a) แสดงว่าความเค้นแปรผันตามตำแหน่งที่ห่างจากแกน y เท่านั้นค่า $\frac{E}{\rho}$ ณ ตำแหน่งใด ๆ ในหน้าตัดนั้นมีค่าคงที่ตลอดตามข้อสมมุติฐานที่กล่าวไว้ตอนต้น จากสมการ (a) เราเขียนลักษณะการกระจายของความเค้นที่เกิดขึ้น ที่หน้าตัดใด ๆ ที่รับโมเมนต์ดัดเป็นบวก ได้ดังแสดงในรูป C (อย่าลืม : โมเมนต์ดัดเป็น บวกคานแอ่นลง fiber บนสุดของคานรับแรงกด fiber ต่ำสุดรับแรงดึงโดยที่ neutral axis เป็นตำแหน่งที่ความเค้นเป็นศูนย์ - ไม่มีทั้งแรงดึง, แรงกด)



รูป C



รูป D

ในรูป D (แสดงแรงภายในที่กระทำต่อ พท. dA ที่จะดห่างจาก N.A. (neutral axis) เป็นระยะ y, แรงนั้น คือ $dP = \sigma . dA$

เนื่องจากแรงภายนอกที่กระทำต่อคานในแนวแกน x ไม่มี (ตามข้อสมมุติฐาน)

นั่นคือ $\Sigma F_x = \int_A \sigma . \, dA = 0$

$$\int_A \frac{E}{\rho} . y dA = 0$$

$$\frac{E}{\rho} \int y dA = \frac{E}{\rho} . \bar{y} . A = 0$$

$$\frac{EA}{\rho} \neq 0 ; \qquad \bar{y} = 0$$

* แสดงว่า N.A คือเส้นที่ลากผ่าน centroid ของหน้าตัดนั่นเอง

ในรูป C นั้นจะเห็นว่า ความเค้นที่กระจายในหน้าตัด จะมีลักษณะเป็น couple ซึ่งรวมกันแล้วจะเป็นโมเมนต์ภายในที่ต้านโมเมนต์ตัดภายนอก หรือ ก็คือ โมเมนต์ตัดที่ตำแหน่งนี้ นั่นเอง

จากรูป C $\quad M = \int . y . dP = \int y . \sigma . dA$

$$= \int \frac{E}{\rho} . y^2 \, dA = \frac{E}{\rho} \int y^2 dA$$

$$= \frac{E}{\rho} . I \qquad (b)$$

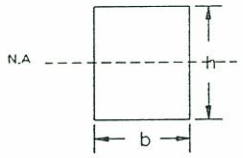
* เมื่อ $I = \int y^2 da$ หรือ โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดรอบ N.A

แทนค่า $\frac{E}{\rho}$ จาก (a) ลงใน (b)

$$M = \frac{\sigma I}{y}$$

หรือ $\quad \sigma = \frac{My}{I}$

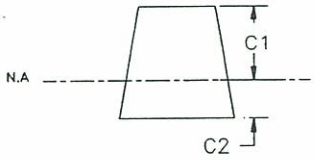
ตัวอย่างเช่น คานหน้าตัดสี่เหลี่ยมดังในรูป E ความเค้นที่มากที่สุด เกิดที่ตำแหน่ง h จาก N.A (แต่จะได้ความเค้นดึงหรือกด แล้วแต่ลักษณะของโมเมนต์ตัดที่หน้าตัดนี้) และ $I_{N.A} = \frac{bh^3}{12}$ จะทำให้เกิดความเค้นมากที่สุดมีค่า ,



$$\sigma_{max} = \frac{M(\frac{h}{2})}{\frac{bh^3}{12}} = \frac{6M}{bh^2}$$

รูป E

ถ้าค่า c_1, c_2 เป็นระยะจาก N.A ดึงขอบบนและขอบล่างของคาน ดังรูป F จะได้ความเค้นกดสูงสุดกับความเค้นดึงสูงสุดที่ขอบบนและล่างตามลำดับ (ถ้าโมเมนต์ตัดที่หน้าตัดนี้ เป็นบวก)



$$\sigma_{max} = \frac{MC_1}{I} = \frac{M}{Z_1} \text{ (ความเค้นกด)}$$

$$\sigma_{max} = \frac{MC_2}{I} = \frac{M}{Z_2} \text{ (ความเค้นดึง)}$$

รูป F

ค่า $Z = \frac{I}{c}$ นี้เรียกว่า section modulus ซึ่งในตารางของหน้าตัดคานจะมีค่านี้อยู่ด้วย เพื่อช่วยให้การคำนวณรวดเร็วขึ้น

3.2.2 เกจวัดความเครียดแบบใช้ความต้านทานทางไฟฟ้า (resistance strain gages)

พิจารณาสื่อไฟฟ้าที่มีภาคหน้าตัดคงที่ A และความยาว L ทำจากวัสดุที่มีความสามารถในการต้านทานกระแสไฟฟ้า ค่าความต้านทานของสื่อไฟฟ้านั้นจะได้จากสมการ

$$R = \frac{\rho L}{A} \qquad (3.1)$$

ถ้าหากว่าสื่อไฟฟ้านี้ ถูกยืดหรือถูกอัด ค่าความต้านทานจะเปลี่ยนไป เพราะขนาดเกิดการเปลี่ยนแปลง และเพราะคุณลักษณะพื้นฐานของวัสดุ เรียกว่าความต้านทานทางปีอีโซ (piexoresistance) ซึ่งหมายความถึงความสามารถในการต้านทาน ρ จะเปลี่ยนไปตามความเครียด ในการหาการเปลี่ยนแปลง dR ใน R เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดนี้เราจะดิฟเฟอเรนชิเอตสมการ (3.5) จะได้

$$dR = \frac{A(\rho dL + L\, d\rho) - \rho L\, dA}{A^2} \qquad (3.2)$$

และเมื่อปริมาตร $V = AL$, $dV = AdL + LdA$ และ

$$dV = L(1 + \varepsilon)\, A(1 - \varepsilon\nu)^2 - AL \qquad (3.3)$$

เมื่อ ε = หน่วยความเครียด (unit strain) และ ν = สัดส่วนของพอยซอน (Poisson'a ratio) เมื่อ ε มีค่าน้อย $(1-\nu\varepsilon)^2 \simeq 1-2\,\nu\varepsilon$ และสมการ (3.3) ก็จะกลายเป็น

$$dV = AL\varepsilon\,(1-2\,\nu) = AdL + LdA \qquad (3.4)$$

และเมื่อ $\varepsilon = dL/L$

$$\Delta\, dL\ (1-2\nu) = AdL + LdA \tag{3.5}$$

$$-2\,\nu AdL = LdA \tag{3.6}$$

แทนค่าเข้าไปในสมการ (3.2) จะได้

$$dR = \frac{\rho A\, dL + LA\, d\rho + 2\,\nu\rho A\, dL}{A^2} \tag{3.7}$$

และดังนั้น

$$dR = \frac{\rho\, dL(1+2\nu)}{A} + \frac{L\, d\rho}{A} \tag{3.8}$$

หารด้วยสมการ (3.1) จะได้

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L}(1+2\nu) + \frac{d\rho}{\rho} \tag{3.9}$$

และในที่สุด

$$\text{Gage factor} = \frac{dR/R}{dL/L} = 1 + 2\nu + \frac{d\rho/\rho}{dL/L} \tag{3.10}$$

ทางด้านขวาของสมการ (3.10) สามารถจะแยกออกเป็นส่วน ๆ ได้คือ ส่วนที่การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานจากการเปลี่ยนความยาว (1) ส่วนที่ความต้านทานเปลี่ยนแปลงจากการเปลี่ยน

แปลงพื้นที่ (2ν) และเทอมสุดท้าย คือส่วนที่ความต้านทานเปลี่ยนแปลงจากผลของ piezoresistance

ดังนั้น ถ้าเราทราบปัจจัยของเกจ การวัด dR/R จะทำให้เราวัดความเครียด dl/L = ε ซึ่งนี้ก็คือรากฐานของการใช้เกจวัดความเครียด เทอม (dρ/ρ)/(dL/L) อาจเรียกได้ว่า $\Pi_1 E$ เมื่อ

Π_1 = สัมประสิทธิ์ของ piezoresistance ในทิศทางยาว

E = modulus of eleasticity

ลักษณะของวัสดุ Π_1 อาจเป็นบวกหรือลบก็ได้ สัดส่วนของพอยซอนจะมีค่าระหว่า 0 ถึง 0.5 เสมอสำหรับวัสดุทุกชนิด

ในที่นี้จะกล่าวถึงการใช้เกจโลหะแผ่นแบบยึดติดกันเสียเป็นส่วนใหญ่เพราะจะเป็นชนิดที่วิศวกรมักจะใช้ในการวิเคราะห์ความเค้น หรือสร้างเครื่องมือวัดขึ้นมาใช้ด้วยตัวเอง เกจเหล่านี้จะติดตั้งมาบนฉนวนยืดได้บาง ๆ ซึ่งทำจาก polyimid หรือ glass reinforced phenolic หนาประมาณ 0.001 นิ้ว ดังนั้นแผ่นโลหะหนา 0.0002 ก็จะยื่นขึ้นมาไม่เกิน 0.001 นิ้วจากผิวของชิ้นส่วนที่ต้องการวัด ซึ่งผลของความหนาต่อการวัดจะมีไม่มาก นอกเสียจากว่าจะวัดการตัดบนตัวอย่างที่บางมาก ๆ เพราะในกรณีนี้ เกจจะรับรู้ถึงความเครียดแตกต่างไปจากที่เกิดบนชิ้นส่วน ในการวิเคราะห์ความเค้น จุดมุ่งหมายก็คือวัดความเค้นบนจุดทางเรขาคณิต และที่เป็นสิ่งที่เกจวัดความเครียดทำไม่ได้เพราะตัวเกจเองจะต้องใช้พื้นที่บางส่วน และสิ่งที่วัดก็คือความเค้นเฉลี่ยบนพื้นที่นี้ ถ้าหากว่าการเพิ่มขึ้นของความเครียดเป็นเส้นตรง ค่าเฉลี่ยก็อาจกล่าวได้ว่าเกิดขึ้นที่ตรงกลางของแกจ แต่ถ้าหากว่าไม่เป็นเส้นตรง ก็ไม่สามารถจะกล่าวได้ว่าเกิดขึ้นที่ตรงกลางของเกจ ก็ไม่สามารถจะกล่าวได้ว่าเกจวัดความเครียดที่จุดไหนแน่ แต่ความไม่แน่นอนนี้จะลดลงตามขนาดของเกจ ดังนั้นมักจะต้องการเกจขนาดเล็ก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเค้นมาก เช่น จุดความเค้นสูงต่าง ๆ ขนาดเกจเล็กที่สุด จะขึ้นอยู่กับบริษัทผู้ผลิต และข้อจำกัดของการติดตั้ง เกจที่เล็กที่สุดจะขนาดประมาณ 0.015 นิ้ว (0.38 มม.) การติดตั้งอาจทำบนผิวโค้งก็ได้ ในเกจบางชนิด รัศมีความโค้งที่ยอมได้อาจน้อยถึง 0.06 นิ้ว

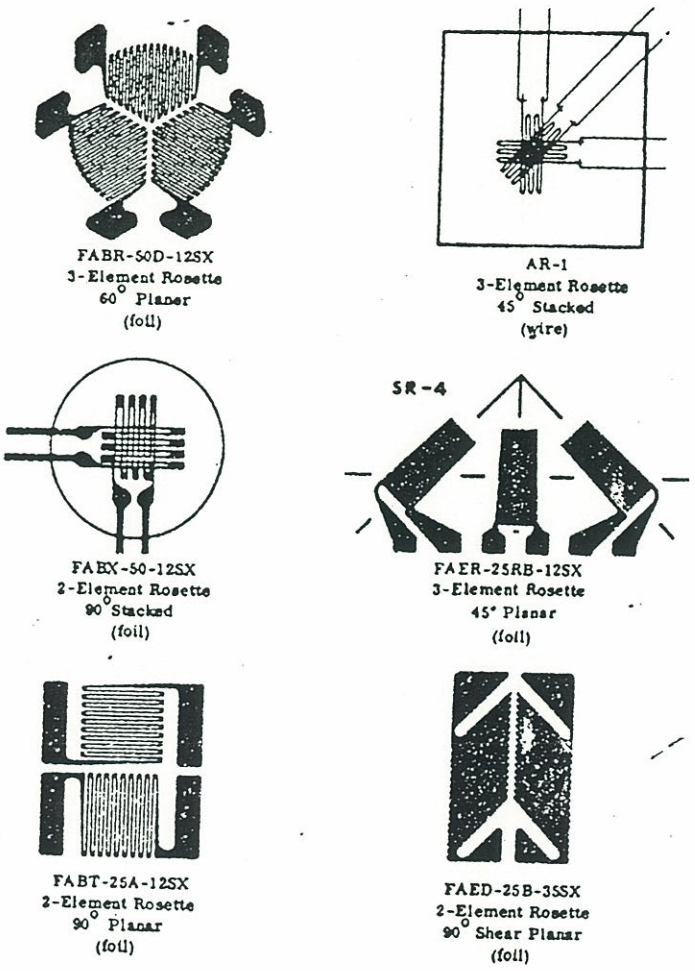
ความต้านทานของเกจจะมีค่า 120, 350, และ 1000 โอห์ม และกระแสไฟฟ้าที่จะผ่านเกจได้ จะขึ้นอยู่กับลักษณะการพาความร้อนออก และโดยทั่วไปจะใช้ค่าประมาณ 5 ถึง 40 mA ปัจจัยเกจจะมีค่าระหว่าง 2 ถึง 4 ความต้านทานของเกจแต่ละตัวนั้นวัดได้ง่าย แต่การวัดปัจจัยเกจจะต้องติดตัวเกจกับชิ้นส่วน ซึ่งสามารถจะคำนวณความเครียดได้ในทางทฤษฎี เกจวัดความเครียดไม่สามารถจะถอดออกมาใช้ใหม่ได้ ปัจจัยเกจที่ได้มาเมื่อซื้อ ไม่ได้วัดทีละตัว แต่เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างของเกจชนิดนั้น ดังนั้นความแน่นอนของปัจจัยเกจ จะขึ้นอยู่กับการควบคุมคุณภาพของบริษัทผู้ผลิต ความแน่นอนระดับ ± 1 เปอร์เซนต์เป็นค่าปกติ และมักจะใช้ค่านี้เป็นคำจำกัดของความแน่นอน เมื่อทำการวิเคราะห์ความเค้น สังเกตว่าค่านี้ไม่ใช่ค่าจำกัดของเครื่องมือวัด เพราะเครื่องมือวัดสามารถปรับสเกลได้ หลังจากสร้างเสร็จแล้ว โดยการปรับข้อมูลขาออกกับข้อมูลขาเข้า ดังนั้นเราอาจไม่ต้องรู้ปัจจัยเกจด้วยซ้ำไป ความเครียดสูงสุดที่วัดได้จะอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 4 เปอร์เซนต์ แต่ถ้าใช้เกจแบบที่ออกแบบมาให้วัดความเครียดหลังจากครากแล้ว (postyield) ก็อาจวัดความเครียดได้ถึง 0.1 นิ้ว/นิ้ว อายุการล้าของเกจจะขึ้นอยู่กับหลายอย่าง แต่ค่า 10 ล้านครั้งที่ $\pm$ 1,500 microstrain เป็นค่าปกติที่ใช้กัน เกจแบบเซมิคอนดักเตอร์ยึดติดกัน[2] อาจใช้งานได้ที่ค่าสเกลเต็มที่ต่ำกว่าได้มาก (20 $\mu\varepsilon$) ซึ่งก็ทำให้ออกแบบเครื่องมือวัดที่แข็งแรงได้ง่าย เมื่อเกจแบบแผ่นโลหะบางจะต้องใช้กับชิ้นส่วนที่ยืดได้มาก

กาวที่ใช้ยึดเกจวัดความเครียดนี้ มีอยู่หลายชนิดด้วยกัน วิธีการยึดเกจมีได้ตั้งแต่อุณหภูมิจาก -452°F(-296°C) ไปถึง 1500°F(816°C) การยึดเกจที่อุณหภูมิสูงอาจต้องใช้วิธีเชื่อมหรือพ่นไฟ (flame-spraying) แทนที่จะใช้กาว กาวบางชนิดแข็งตัวที่อุณหภูมิห้องแต่บางชนิดต้องอบ เวลาในการแข็งตัวของกาวมีตั้งแต่ สองสามนาที ไปจนถึงสองสามวัน คุณภาพของกาวที่ใช้ส่งผลถึงการทำงานของเกจมาก เนื่องจากใช้การส่งผ่านความเครียดของชิ้นส่วนไปยังเกจ สภาพของกาวสำคัญมากเมื่อใช้ในที่อุณหภูมิสูง ความชื้นสูงหรือใช้งานเป็นเวลานาน บางครั้งก็อาจเคลือบเกจด้วยสารกันน้ำเพื่อเพิ่มความไว้วางใจ

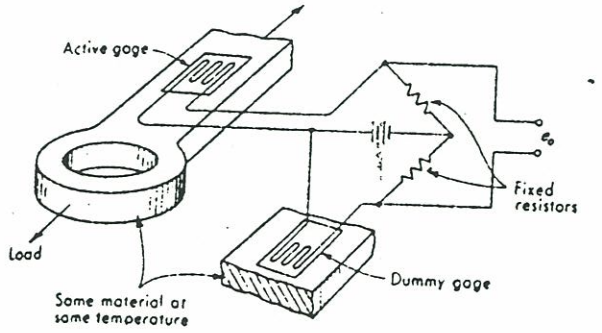
นอกเหนือจากเกจอันเดียวแล้ว ก็ยังมีเกจที่ใช้งานเป็นชุดเรียกว่าโรเซต (rosettes) ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2 ซึ่งก็หาซื้อได้หลายรูปแบบ แล้วแต่ว่าจะใช้งานแบบไหน ถึงแม้ว่าจะใช้เกจเดี่ยว ๆ ติดกาวลงไปให้เป็นรูปแบบเหมือนกับโรเซตได้ แต่ว่าการวางมุมของเกจแต่ละตัวมักจะสำคัญในการวัดต่าง ๆ ดังนั้นควรจะใช้เกจแบบโรเซตดีกว่า เพราะมักจะผลิตมาให้

มีความเที่ยงในการวางมุมกว่าที่มือคนจะทำได้ โรเซตชนิดหนึ่งใช้ในการวิเคราะห์ความเค้นที่ไม่ทราบทิศทางและความแรง ทฤษฎีบอกไว้ว่าการวัดด้วยโรเซตซึ่งประกอบด้วยเกจสามตัว จะทำให้เราสามารถคำนวณทิศทางและความแรงของความเค้นได้ การวัดแบบนี้มักจะต้องการวัดความเค้นที่จุด ดังนั้นเกจทั้งสามอันควรจะทับกันบนจุดที่ต้องการจะวัด เกจแบบนี้เรียกว่า โรเซตซ้อน (stacked rosette) ก็หามาใช้ได้ แต่ว่าเกจอันบนจะไกลจากผิวของวัสดุที่ต้องการวัด และการกระจายความร้อนสู่เนื้อวัสดุจะทำไม่ได้ดี ซึ่งอาจทำให้การวัดผิดพลาดได้ ถ้าหากว่าผลเสียของการใช้เกจแบบซ้อนกันมีมากกว่าผลดี เราอาจต้องใช้โรเซตที่แผ่ออกไปแทน ซึ่งก็หาซื้อได้ง่าย (ดูรูปที่ 2)

อุณหภูมิเป็นสัญญาณรบกวนตัวสำคัญในการใช้เกจวัดความเครียด เนื่องจากความต้านทานของเกจ เปลี่ยนไปตามความเครียดและอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงความต้านทานเนื่องจากความเครียดมีค่าน้อย ดังนั้นผลของอุณหภูมิอาจทำให้การวัดไม่ได้ผล ความไวต่ออุณหภูมิอาจมีผลมาจากการขยายตัวที่แตกต่างกันกับอุณหภูมิของวัสดุที่เป็นตัวอย่างและวัสดุที่ทำเกจ ซึ่งอาจทำให้เกิดความต้านทานเปลี่ยนแปลง เนื่องจากความเครียดถึงแม้ว่าวัสดุจะไม่รับแรงเลยก็ตาม ผลของอุณหภูมินี้ สามารถจะลบล้างออกด้วยกรรมวิธีหลายวิธีในรูปที่ 3 จะเห็นเกจที่ไม่ใช้งาน (dummy) ซึ่งเหมือนกับเกจที่ใช้วัดทุกประการ จะติดตั้งไว้ใกล้กับเกจที่ใช้วัด เพื่อให้เป็นอุณหภูมิเดียว เกจ dummy นี้จะต่อให้อยู่บนขาที่ติดกันในสะพานวีสโตน เพื่อให้การเปลี่ยนแปลงความต้านทานเนื่องจากอุณหภูมิไม่มีผลต่อความสมดุลของสะพาน แต่ว่าการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานเนื่องจากแรงจะมีผลตามปกติกรรมวิธีอีกอย่างหนึ่งก็คือ ใช้เกจที่ไม่ไวต่ออุณหภูมิ เกจชนิดนี้จะออกแบบมาให้ใช้กับวัสดุบางชนิดเท่านั้น โดยออกแบบให้ผลจากการขยายตัวและอุณหภูมิลบล้างกัน และไม่ต้องใช้เกจที่ไม่ทำงานเข้าช่วย



รูปที่ 2 เกจวัดความเครียดแบบโรเซต



รูปที่ 3 วิธีลบล้างผลของอุณหภูมิในการวัดความเครียด

ตั้งไว้ใกล้กับเกจที่ใช้วัด เพื่อให้เป็นอุณหภูมิเดียว เกจ dummy นี้จะต่อให้อยู่บนขาที่ติดกันในสะพานวีสโตน เพื่อให้การเปลี่ยนแปลงความต้านทานเนื่องจากอุณหภูมิไม่มีผลต่อความสมดุลของสะพาน แต่ว่าการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานเนื่องจากแรงจะมีผลตามปกติกรรมวิธีอีกอย่างหนึ่งก็คือ ใช้เกจที่ไม่ไวต่ออุณหภูมิ เกจชนิดนี้จะออกแบบมาให้ใช้กับวัสดุบางชนิดเท่านั้น โดยออกแบบให้ผลจากการขยายตัวและอุณหภูมิลบล้างกัน และไม่ต้องใช้เกจที่ไม่ทำงานเข้าช่วย

อุณหภูมิ สามารถจะเป็นสัญญาณปรับแต่งโดยการเปลี่ยนแปลงปัจจัยเกจสำหรับเกจโลหะนั้น ผลจากอุณหภูมิในลักษณะนี้มีน้อย ยกเว้นที่อุณหภูมิสูงมากหรือต่ำมากเกจแบบเซมิคอนดักเตอร์จะถูกปรับแต่งมากกว่าด้วยอุณหภูมิ ถึงแม้จะพอแก้ไขได้ แต่ก็ต้องพิจารณาเป็นกรณีไป เกจวัดความเครียดนั้น มีบางชนิดที่ใช้ได้ผลดีที่อุณหภูมิของฮีเลียมเหลว ($7^{\circ}R$) จนถึง $2000^{\circ}F$ แต่จะต้องใช้เทคนิคหลายอย่างช่วย และถึงอย่างนั้น ผลที่ได้รับก็ไม่สามารถจะทำได้ดีเท่ากับการวัดปกติที่อุณหภูมิห้อง ปัญหามักจะเกิดมากเฉพาะที่อุณหภูมิสูงเท่านั้น

เมื่อใช้เกจแบบยึดติดกันโดยตรง การใช้งานมักจะจำกัดอยู่ที่ความเครียดน้อย ๆ เท่านั้น ถ้าหากต้องการวัดระยะทางมาก ๆ ก็อาจทำได้โดยติดเกจกับชิ้นส่วนที่ยืดหยุ่นได้ เป็นต้นว่าคานแบบ cantilever และกดสิ่งที่เคลื่อนไหวเข้ากับปลายของคาน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4 ในการใช้งานแบบนี้ เราไม่จำเป็นที่จะต้องรู้ปัจจัยเกจ เพราะเราสามารถปรับสเกลของทั้งระบบโดยการกดปลายของคานให้เคลื่อนที่เป็นจำนวนที่รู้อยู่ แล้วและวัดแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากสะพานรูปที่แสดงไว้ เป็นการลบล้างผลของอุณหภูมิโดยไม่ต้องใช้เกจที่ไม่ทำงานและมีความไว 4 เท่าของเกจเดี่ยว ซึ่งทำได้โดยการวางวงจรสะพานให้เหมาะสม เครื่องวัดแบบนี้อาจแน่นอนถึง 0.1 เปอร์เซนต์ของสเกลที่ใช้วัด

การตอบสนองทางไดนามิคส์ของเกจวัดความเครียด มักไม่มีปัญหาจนถึงความถี่ประมาณ 50,000 Hz ผลของกาวและเส้นลวดที่ใช้มักจะมีน้อย ยกเว้นในกรณีที่ชิ้นส่วนที่ใช้วัดบางมาก ๆ

แรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจากวงจรของเกจแบบโลหะมักจะน้อยมาก (ไม่กี่ microvolt ถึงไม่กี่ millivolt) ดังนั้นมักจะต้องมีการขยายสัญญาณ ยกตัวอย่างเช่นการวัดความเค้น $1,000\ lb/in^2$ ในเหล็กด้วยเกจอันเดียว โดยมีความต้านทาน 120 โอห์ม และปัจจัยเกจเป็น 2 ถ้าหากว่าใช้วงจรสะพานที่มีความต้านทานเท่ากันแรงดันไฟฟ้าที่ยอมได้สำหรับกระแส 30 mA ก็จะเป็น

$$e_{ex} = (240)\ (0.030) = 7.2\ V \qquad (3.11)$$

ความเครียด ε เป็น $1{,}000/30 \times 10^{6} = 3.33 \times 10^{5}$ in/in ดังนั้น

$$\delta R = (\text{ปัจจัยเกจ})\ (E)(R) = (2)(3.33 \times 10^{5})\ (120) = 7.79 \times 10^{3} \text{ โอห์ม} \qquad (3.12)$$

และเมื่อใช้ในสะพาน

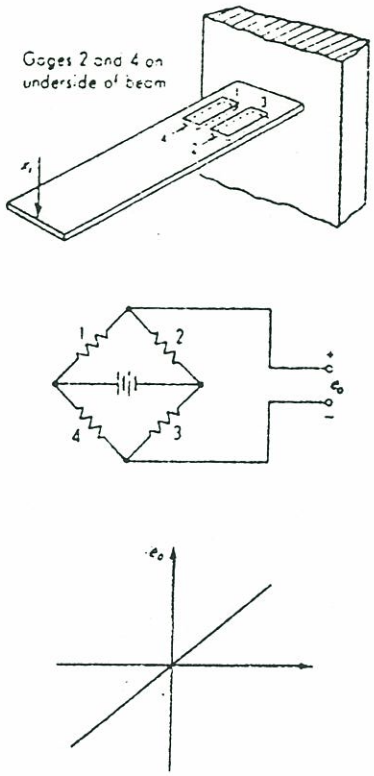
$$e_{o} = e_{ex}\frac{1}{4R}\Delta R = \frac{(7.2(7.99 \times 10^{-3})}{4.80} = 0.12\ mV \qquad (3.13)$$

ถ้าเรานึกถึงข้อจำกัดของเกจเท่านั้น ความเครียดน้อยที่สุดที่วัดได้จะขึ้นอยู่สัญญาณรบกวนของอุณหภูมิหรือที่เรียกว่า Johnson-noise ซึ่งเกิดขึ้นในความต้านทานทุกชนิดเพราะการเคลื่อนที่ของอีเล็คตรอน แรงดันที่เกิดขึ้นแบบ random นี้จะเป็นเสียงขาว (white noise) โดยมีความหนาแน่น 4 kTR โวล์ทยกกำลังสองต่อเฮิรซ เมื่อ

k = ค่าคงที่ของ Boltxmann = 1.38×10^{23} J/K (3.14)

T = อุณหภูมิที่นับจากศูนย์ของตัวต้านทาน K (3.15)

R = ความต้านทานเป็นโอห์ม (3.16)



รูปที่ 4 เครื่องวัดการยุบตัวของคาน

ดังนั้นถ้าแรงดันวัดด้วยเครื่องมือทางอุดมคติที่ไม่มีสัญญาณรบกวนเลยด้วย bandwidth Δf Hz ค่าโวล์ท rms ที่วัดได้ก็จะเป็น

$$E_{noise,rms} = \sqrt{4kTR\,\Delta f} \text{ volts} \qquad (1.17)$$

ยกตัวอย่างเช่น เกจวัดความเครียดที่มี R = 120 โอห์มที่อุณหภูมิ 300 K โดยมี bandwidth 1000,000 Hz จะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนประมาณ 0.45 μV เมื่อเปรียบเทียบกับการคำนวณที่ผ่านมา เนื่องจากความเค้น 1,000 lb/in^2 แล้วจะพบว่าสัดส่วนระหว่างสัญญาณที่ต้องการ กับสัญญาณรบกวนเป็น 120:0.45 = 267:1 แต่ถ้าเราต้องการวัดความเค้น 1lb/in^2 แทนที่จะเป็น 1000 สัญญาณที่ออกมาก็จะเป็น 0.12 μV ซึ่งน้อยกว่าสัญญาณรบกวน ดังนั้นสัญญาณที่ส่งออกมาได้ ก็จะหายไปในสัญญาณรบกวนการขยายสัญญาณในลักษณะนี้ ไม่มีประโยชน์ เพราะการขยายจะต้องขยายทั้งสัญญาณที่ต้องการ และสัญญาณรบกวน ตัวอย่างง่าย ๆ นี้ไม่ได้รวมไปถึงเทคนิคที่ใช้ในการลดข้อจำกัดนี้ แต่ก็ควรจะเข้าใจว่า ข้อจำกัดนี้เป็นข้อจำกัดพื้นฐาน ซึ่งสามารถลดลงได้แต่ทำให้หายไปไม่ได้ การเปลี่ยนแปลงแบบ random นี้จำกัดการวัดประเภทอื่นทุกชนิด ไม่ใช่เกิดขึ้นในการวัดความเครียดอย่างเดียว ในการใช้งานระบบวัดความเครียดนั้น สัญญาณรบกวน Johnson จากตัวต้านทานแหล่งอื่น ๆ หรือสัญญาณรบกวนจากทรานซิสเตอร์ มักจะเป็นตัวจำกัดความละเอียดของการวัด มากกว่าที่จะเป็นสัญญาณรบกวนจากตัวเกจเอง

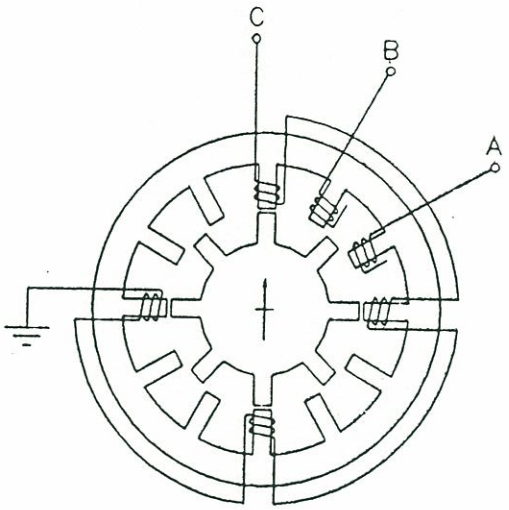
3.2.3 ลักษณะการทำงานของสเต็บเปอร์มอเตอร์

สเต็ปเปอร์มอเตอร์ หรือบางครั้งก็เรียกว่า สเต็ปมอเตอร์ หรือสเต็ปปิ้งมอเตอร์ เป็นอุปกรณ์ขับเคลื่อนทางกลที่ทำงานด้วยไฟฟ้า โดยการขับเคลื่อนกระทำเป็นขั้น มอเตอร์แบบนี้จะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นการหมุนทางกล การหมุนของเพลามอเตอร์จะหมุนเป็นขั้นซึ่งมีขนาดมุมการหมุนเท่ากัน เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านคอยล์หลายอันภายในมอเตอร์โดยการส่งกระแสผ่านคอยล์อันหนึ่งก่อน และตัดกระแสจากคอยล์อันนั้น แล้วจึงจ่ายกระแสให้คอยล์ต่อไปอย่างเป็นลำดับ สเต็ปเปอร์มอเตอร์ที่มีใช้กันทั่วไปมักจะเป็นแบบที่มีคอยล์ภายใน 4 ชุดหรือเรียกกันว่าเป็นมอเตอร์แบบ 4 เฟส ลักษณะการขับเคลื่อนแบบนี้จะทำได้ โดยใช้ไมโครคอมพิวเตอร์หรือไมโครโปรเซสเตอร์ในการควบคุมการจ่ายไฟให้แต่ละเฟส ซึ่งก็จะทำให้สามารถควบคุม ทิศทาง ความเร็ว และอัตราการเร่งของมอเตอร์ได้ด้วยโปรแกรม การขับมอเตอร์อาจทำได้ทีละเฟสในระบบที่ใช้กำลังน้อย หรืออาจกระทำทีละสองเฟสเพื่อให้ได้กำลังมาก ในบางสถานการณ์ การขับมอเตอร์อาจทำโดยการขับแบบหนึ่งและสองเฟสสลับกันไปเพื่อให้ได้ความละเอียดของมุมขับสองเป็นสองเท่า แรงบิดที่ได้จากมอเตอร์ซึ่งจะลดลงเมื่อความเร็วของมอเตอร์เพิ่มขึ้น การออกแบบวงจรขับ

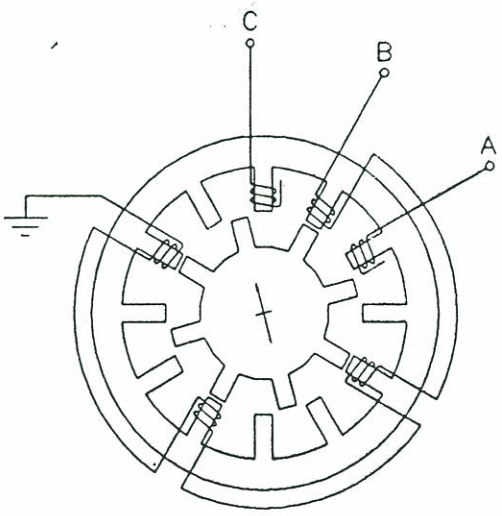
เคลื่อนมอเตอร์ที่ความเร็วต่ำสามารถจะกระทำได้ง่าย แต่เมื่อต้องการใช้มอเตอร์ที่ความเร็วสูง วงจรขับจะต้องซับซ้อนขึ้นเพื่อไม่ให้แรงบิดของมอเตอร์ลดลงมากเกินไปเมื่อความเร็วสูงขึ้น ถ้าหากว่ามอเตอร์ใช้ในการขับอุปกรณ์ที่มีความเฉื่อยสูง โปรแกรมในการควบคุมควรจะมีการเร่งและเบรคมอเตอร์อย่างช้า ๆ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการกระชากและทำให้มอเตอร์ไม่สามารถหมุนไปตามขั้นตอนที่ขับได้

โครงสร้างของสเต็ปเปอร์มอเตอร์

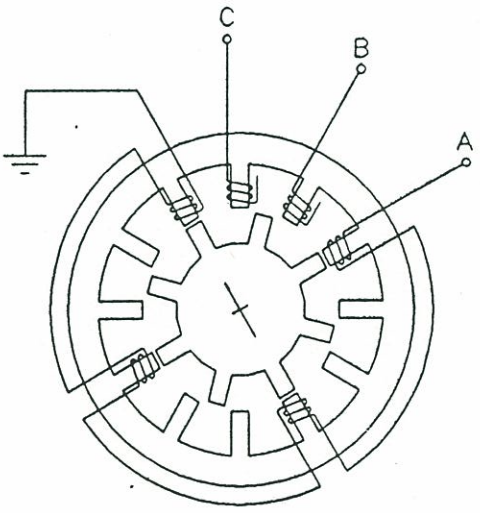
มอเตอร์แบบหรือที่ใช้กันมาก เรียกว่ามอเตอร์แบบ Variable Reluctance (VR) จะใช้สเตเตอร์ที่มีคอยล์พันอยู่เพื่อให้เกิดกระแสแม่เหล็กและตัวโรเตอร์จะไม่มีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า ในรูปที่ 5 แสดงให้เห็นโครงสร้างภายในของมอเตอร์ VR แบบสามเฟส ซึ่งมีสเตเตอร์ 12 ฟัน และโรเตอร์ 8 ฟัน ในรูปจะแสดงให้เห็นคอยล์ทุกอันที่ถูกกระตุ้นด้วยไฟฟ้าตามขั้นตอน และสำหรับคอยล์ที่ไม่ถูกกระตุ้น จะวาดให้ดูเพียงอันเดียวเพื่อความสะดวกต่อการทำความเข้าใจ ในรูปนี้แต่ละเฟสจะมีคอยล์ที่ใช้งานสี่คอยล์ด้วยกัน ซึ่งสำหรับมอเตอร์สามเฟส ก็จะมีคอยล์ทั้งหมด 12 อัน ตัวสเตเตอร์และโรเตอร์จะต้องสามารถทำให้เป็นแม่เหล็กได้เร็วเมื่อมีกระแสไหลผ่านคอยล์ และทำให้หมดสภาพการเป็นแม่เหล็กได้เร็วเมื่อหยุดจ่ายไฟ ดังนั้นสเตเตอร์และโรเตอร์ มักจะสร้างจากเหล็กผสมซิลิคอนเพื่อให้มีคุณสมบัตินี้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5 โครงสร้างภายในของสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบ VR

เมื่อเฟสใดเฟสหนึ่งของมอเตอร์ถูกกระตุ้นด้วยกระแสไฟตรง (Direct Current - DC) ที่สเตเตอร์ก็จะเกิดความเป็นแม่เหล็กขึ้นและดึงให้ฟันของโรเตอร์ที่อยู่ใกล้กับเฟสนั้นที่สุดให้มาตรงกับฟันของสเตเตอร์ที่ถูกกระตุ้น เพราะตำแหน่งนี้คือตำแหน่งที่มี Reluctance ต่ำสุด และมอเตอร์จะอยู่ในสภาพคงตัว (Equilibrium)

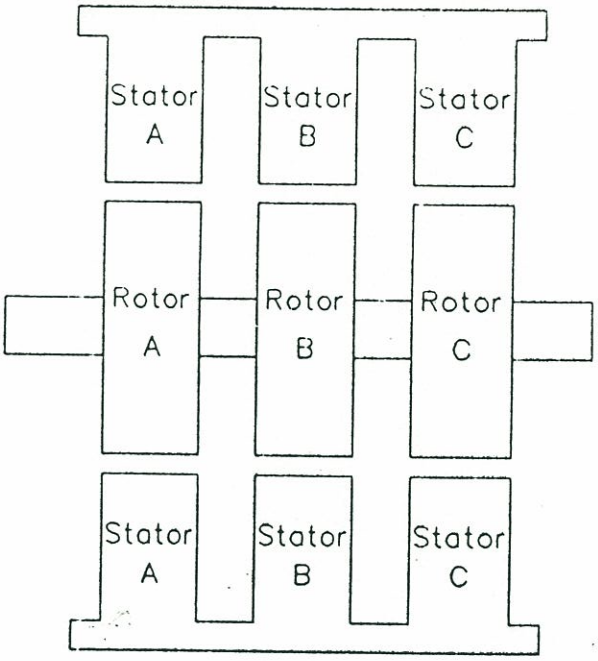
รูปที่ 5 ก. แสดงให้เห็นตำแหน่งโรเตอร์เมื่อเฟส C ถูกกระตุ้น ถ้าหากว่าตัดไฟจากเฟส C และกระตุ้นเฟส B แทน ก็จะทำให้ฟันของโรเตอร์ซึ่งอยู่ใกล้เฟส B ที่สุดถูกดึงเข้ามาตรงกับฟันสเตเตอร์ของเฟส B ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 5 ข. การเปลี่ยนเฟสนี้จะทำให้มอเตอร์หมุนไปหนึ่งขั้น ซึ่งในกรณีนี้ หนึ่งขั้นจะเท่ากับ 15° ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

การกระตุ้นเฟส A ตามรูปที่ 5 ค. จะทำให้มอเตอร์หมุนไปอีก 15° ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาแต่ถ้าหากว่ากระตุ้นเฟส C แทนที่จะกระตุ้นเฟส A มอเตอร์ก็จะหมุนกลับไปในทางตามเข็มนาฬิกาหนึ่งขั้นและตำแหน่งของโรเตอร์จะกลับไปที่ตำแหน่งเดิมในรูปที่ 1 ก.

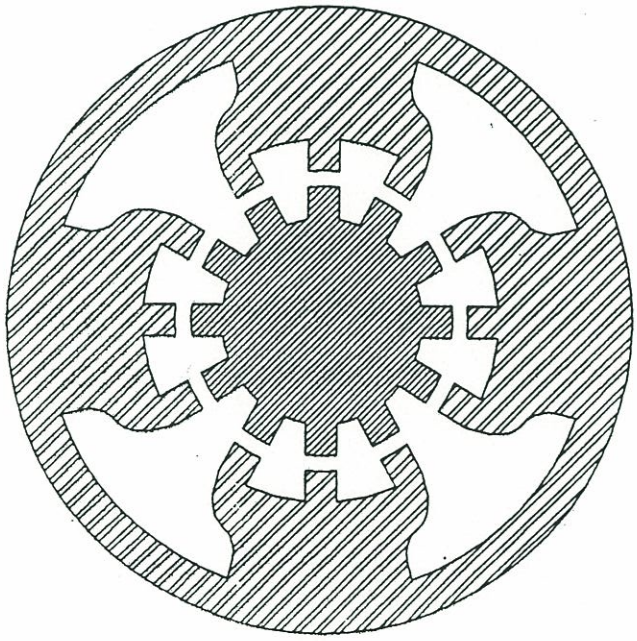
เมื่อมีการกระตุ้นเฟส B และหยุดกระแสไฟที่เฟส C มอเตอร์จะหมุนไปหนึ่งขั้นเป็นมุมที่แน่นอน มุมนี้เรียกว่า มุมสเต็ป (Step Angle) และถ้าหากว่าเฟส A ถูกกระตุ้นและหยุดการกระตุ้นที่เฟส B ในเวลาต่อมา ก็จะทำให้มอเตอร์หมุนไปอีกหนึ่งสเต็ป ดังนั้นตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์สามารถจะควบคุมได้ โดยการเลือกจ่ายกระแสไฟให้แต่ละเฟสตามลำดับ ถ้าหากว่าการสลับเฟสเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ทิศทางการหมุนและความเร็วเฉลี่ยก็สามารถควบคุมได้โดยระบบสลับเฟส ซึ่งระบบสลับเฟสนี้อาจเป็นไมโครคอมพิวเตอร์ ไมโครโปรเซสเซอร์ หรือระบบลอจิกไฟฟ้าก็ได้ จำนวนสเต็ปต่อรอบสามารถหาได้จากข้อมูลทางเรขาคณิตของมอเตอร์ ดังตัวอย่างข้างล่าง

สมมุติว่า ลำดับการกระตุ้นของมอเตอร์เริ่มจากเฟสหนึ่งของมอเตอร์ที่มี m เฟส เมื่อกระตุ้นไปจนครบ m เฟสแล้ว และเฟสที่เริ่มต้นถูกกระตุ้นอีกครั้ง ก็หมายความว่ามอเตอร์หมุนไปแล้วเป็นจำนวน m สเต็ปขณะที่ตัวโรเตอร์จะหมุนไป 1 ช่องฟันพอดี การที่ต้องใช้การกระตุ้น m ครั้ง เพื่อหมุนมอเตอร์ไปหนึ่งช่องฟันนั้นการหมุนหนึ่งรอบเต็มจึงต้องใช้การกระตุ้นเป็นจำนวน mN_r ครั้ง โดยที่ N_r เป็นจำนวนฟันของโรเตอร์

ดังนั้นจำนวนสเต็ปต่อรอบ s จะเท่ากับ mN_r ในรูปที่ 5 ค่าของ $N_r = 8$ และ $m = 3$ ซึ่งก็จะให้ค่า $S = 8 \times 3 = 24$ สเต็ปต่อรอบ มุมสเต็ปจึงเป็น $360/24 = 15°$



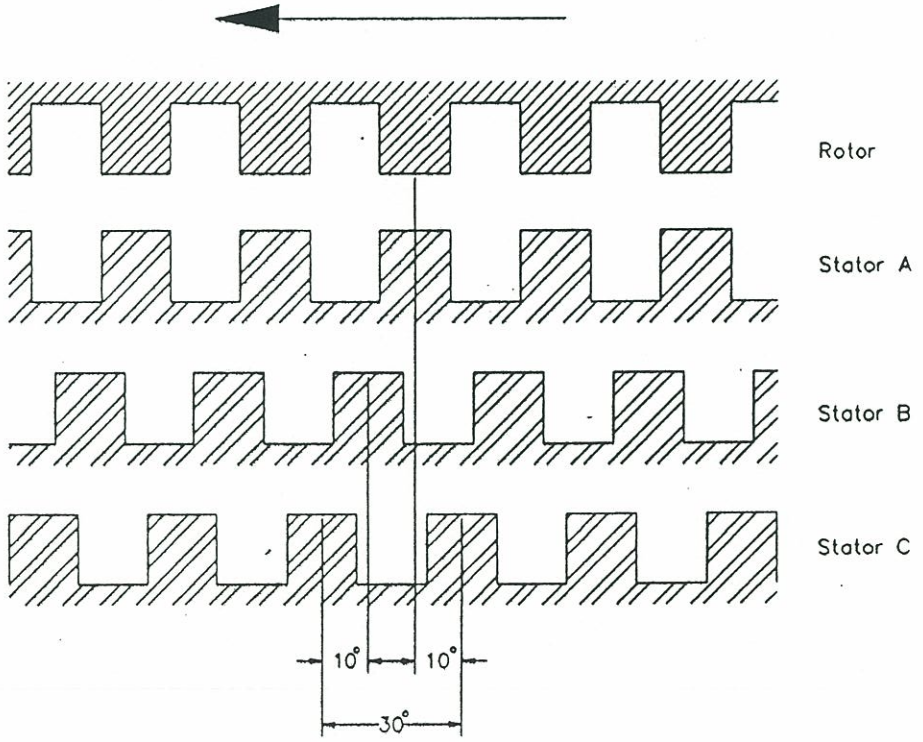
รูปที่ 6 ภาคหน้าตัดตามยาวของสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบหลายชั้น



รูปที่ 7 ภาคหน้าตัดตามขวางของสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบหลายชั้น

มอเตอร์ในรูปที่ 5 เป็นมอเตอร์แบบชั้นเดียว โดยที่ทั้งสามเฟสอยู่ในระนาบเดียวกันหมด มอเตอร์อีกแบบหนึ่งคือแบบหลายชั้น (Multi-Stack) ซึ่งแต่ละครั้งจะหมายถึงหนึ่งเฟสและโรเตอร์กับสเตเตอร์จะมีจำนวนฟันเท่ากัน รูปที่ 6 แสดงให้เห็นถึงภาคหน้าตัดตามยาวของมอเตอร์แบบสามชั้น และรูปหน้าตัดทางขวาง แสดงไว้ในรูปที่ 7 ในรูปนี้ ฟันของสเตเตอร์จะจัดเป็น 4 กลุ่ม และฟันของโรเตอร์จะจัดเรียงอย่างสม่ำเสมอ ฟันของสเตเตอร์และโรเตอร์มีมุมเท่ากัน ดังนั้นจึงจัดเรียงดังในรูปได้

การจัดเรียงของโรเตอร์ทั้งสามชั้นของมอเตอร์แบบนี้จะตรงกันหมด แต่สเตเตอร์ของแต่ละชั้นจะเยื้องกันเป็นมุม $360^\circ/mN_r$ เมื่อ N_r เป็นจำนวนฟันของโรเตอร์ และ M คือจำนวนเฟสหรือจำนวนชั้นของมอเตอร์ สำหรับมอเตอร์สามชั้นในรูปที่ 7 นั้นถ้าคลี่ออกมาจะเห็นเป็นรูปที่ 8 โดยอยู่ในสภาพที่โรเตอร์จะตรงกับฟันของสเตเตอร์ A ถ้าหากว่าเฟส B ถูกกระตุ้น โรเตอร์จะหมุนไป 10° การกระตุ้นด้วยลำดับ A B C A B จะทำให้มอเตอร์



รูปที่ 8 ตำแหน่งของโรเตอร์และสเตเตอร์ของมอเตอร์สามชั้น

หมุนไปในทิศทางที่บ่งไว้ในรูป และการกระตุ้นด้วยลำดับ A C B A C จะทำให้การหมุนกลับทิศทาง ดังนั้นการควบคุมทิศทางจะทำได้สำหรับมอเตอร์ที่มีสามเฟสหรือมากกว่า

มอเตอร์แบบสเต็ปเปอร์นี้สามารถจะมีมุมสเต็ปน้อยได้ สำหรับมอเตอร์ที่ใช้กันมากอาจมีโรเตอร์ที่มีฟัน 50 ฟัน และขับด้วยคอยล์ 4 เฟส ซึ่งก็ทำให้ได้มุมสเต็ปเป็น 1.8°

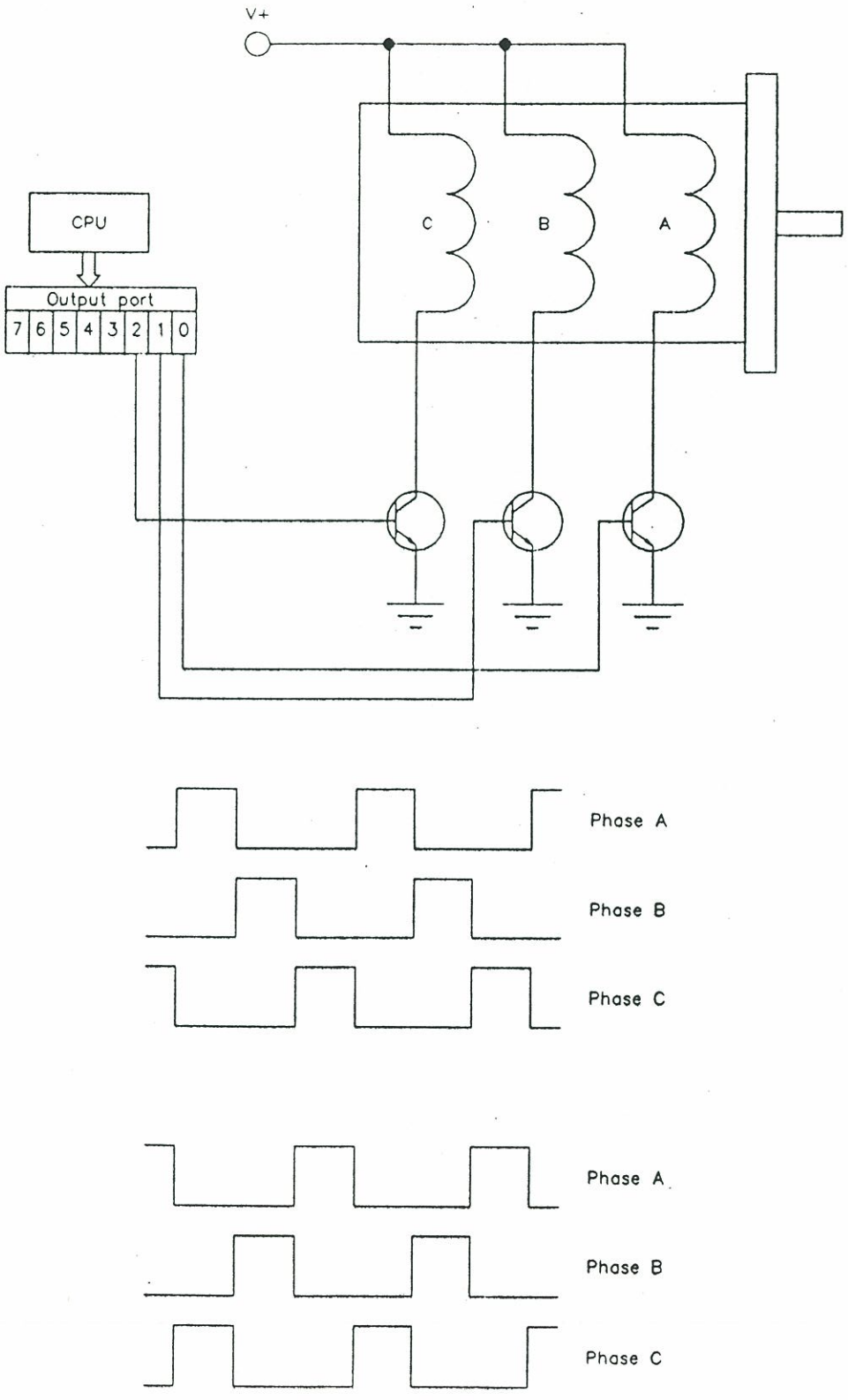
โดยทั่วไปแล้วมุมสเต็ปหรือจำนวนสเต็ปต่อรอบและจำนวนเฟสจะพิมพ์ติดไว้ที่ตัวมอเตอร์

การขับมอเตอร์

ระบบขับมอเตอร์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 9 ระบบสร้างสัญญาณขับในรูปคือไมโครโปรเซสเซอร์ที่ส่งสัญญาณการขับออกมาที่พอร์ท และสัญญาณจากพอร์ทจะถูกขยายด้วยทรานซิสเตอร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นสวิทช์จ่ายไฟให้แก่เฟสต่าง ๆ ของมอเตอร์ ความถี่ของการสลับเฟสจะควบคุมความเร็วของมอเตอร์ จำนวนของการสลับเฟสจะควบคุมตำแหน่งของโรเตอร์และลำดับของการสลับเฟส (เฟสไหนก่อนเฟสไหนหลัง) จะควบคุมทิศทางการหมุน

วงจรในรูปที่ 9 ยังใช้งานจริงไม่ได้เพราะเมื่อทรานซิสเซอร์ตัดกระแสที่ผ่านคอยล์ที่มีความเหนี่ยวนำจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้ากลับทิศทางคร่อมคอยล์ และแรงดันนี้อาจสูงพอที่จะทำให้ทรานซิสเซอร์เสียหายได้ แนวทางการออกแบบวงจรขับที่เหมาะสมจะกล่าวไว้ในบทที่เกี่ยวกับการออกแบบวงจร ในรูปที่ 10 แสดงให้เห็นถึงโปรแกรมที่เขียนด้วยภาษา Turbo Pascal ซึ่งใช้ในการควบคุมการหมุนของมอเตอร์แบบง่าย ๆ โปรแกรมนี้สมมุติเอาว่าไมโครคอมพิวเตอร์เชื่อมต่อกับมอเตอร์ผ่านพอร์ทหมายเลข 310H และที่พอร์ทนี้สัญญาณที่ขับออกไปสามารถจะแช่ไว้ได้ (Latched) จนกว่าจะได้รับคำสั่งใหม่

ในวงจรตัวอย่างนี้ ทรานซิสเตอร์ที่ใช้เป็นแบบ NPN ซึ่งก็หมายความว่าสัญญาณที่พอร์ทจะต้องเป็นค่าสูง (1) เพื่อให้ทรานซิสเตอร์ปล่อยกระแสผ่าน ดังนั้น เพื่อให้มอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกา สัญญาณเป็นเลขฐานสองที่จะออกไปที่พอร์ทควรจะเรียงลำดับ 001, 100, และ 010 เมื่อโปรแกรมนี้ทำงาน ก็จะสั่งงานให้พอร์ททำการจ่ายไฟไปที่เฟส A เพื่อหมุนโรเตอร์มาใช้ที่เฟส A หลังจากนั้นจึงไปรอรับข้อมูลว่าจะให้มอเตอร์หมุนกี่สเต็ป เมื่อผู้ใช้



รูปที่ 9 ระบบขับสเต็ปเปอร์มอเตอร์

```
Program StepperTest1;
{ This program is written with Turbo Pascal version 4.0 }
uses crt;
Var Phase,J : Integer;

  Procedure DriveStep(Steps : Integer);
    Const Sphase : Array[1..3] of byte = (1,2,4);
    Var N : Integer;
    Begin
      If Steps = 0 then exit;
      If Steps > 0 then
        For N := 1 to Steps do
          Begin
            Inc(Phase);
            If Phase > 3 then Phase := 1;
            Port[$310] := Sphase[Phase];
            Delay(10);
          End
        Else
        For N := Steps to -1 do
          Begin
            Dec(Phase);
            If Phase < 1 then Phase := 3;
            Port[$310] := Sphase[Phase];
            Delay(10);
          End;
    End;

Begin
  Phase := 1;
  Port[$310] := 1;
  J := 0;
  While J <> -999 do
    Begin
      Write ('Enter number of steps or -999 to exit ');
      ReadLn(J);
      If J <> -999 then DriveStep(J);
    End;
End.
```

รูปที่ 10 โปรแกรมควบคุมสเต็ปเปอร์มอเตอร์อย่างง่าย ๆ

ใส่จำนวนสเต็ปแล้วโปรแกรมก็จะไปเริ่มทำงานที่โปรซิเดอร์ Drivestep ภายในโปรซิเดอร์นี้จะเก็บข้อมูลไว้แล้วในอเรย์ค่าคงที่ชื่อ Sphase ซึ่งแต่ละตัวของอเรย์จะหมายถึงการขับเฟส A, B และ C ถ้าหากว่าข้อมูลที่ส่งไปเป็นบวก โปรซิเดอร์นี้ก็จะสั่งให้มอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกา และถ้าข้อมูลเป็นลบ มอเตอร์ก็จะหมุนทวนเข็มนาฬิกาไปจนครบจำนวนสเต็ปที่ใส่เข้าไป คำสั่ง Delay ใส่ไว้เพื่อประวิงเวลาไม่ให้มอเตอร์หมุนเร็วเกินไป จากโปรแกรมนี้ ผู้อ่านจะสามารถเห็นได้ว่าความเร็วในการหมุนของมอเตอร์จะขึ้นอยู่กับค่าที่ใช้ในคำสั่ง Delay ทิศทางที่มอเตอร์หมุนจะขึ้นอยู่กับว่าข้อมูลที่ใส่เข้าไปเป็นค่าบวกหรือลบ และตำแหน่งของโรเตอร์เมื่อโปรแกรมทำงานเสร็จแล้ว เทียบกับตำแหน่งของโรเตอร์ตอนเริ่มโปรแกรม จะขึ้นอยู่กับค่าของตัวเลขที่ใส่เข้าไป

ตัวแปรที่สำคัญของมอเตอร์

บทนี้จะกล่าวถึงตัวแปรที่สำคัญของสเต็ปเปอร์มอเตอร์

มุมสเต็ป (Step Angle): การขับสเต็ปเปอร์มอเตอร์นั้นกระทำได้โดยการกระตุ้นแต่ละเฟสตามลำดับและในการเปลี่ยนแปลงเฟสแต่ละครั้ง เพลาของมอเตอร์จะหมุนไปเป็นมุมที่มีค่าคงที่ มุมนี้เรียกว่ามุมสเต็ป หรือ θ_s สเต็ปเปอร์มอเตอร์อาจมีมุมได้ดังต่อไปนี้ คือ 18°, 15°, 7.5°, 2.5°, 2.0°, 1.8°, 0.9°, 0.72°

จำนวนสเต็ปต่อรอบ: ค่านี้คือ จำนวนสเต็ปรวมที่จะต้องใช้เพื่อหมุนมอเตอร์ไปหนึ่งรอบพอดี ดังนั้น

$$\text{จำนวนสเต็ปต่อรอบ } S = 360/\theta_s$$

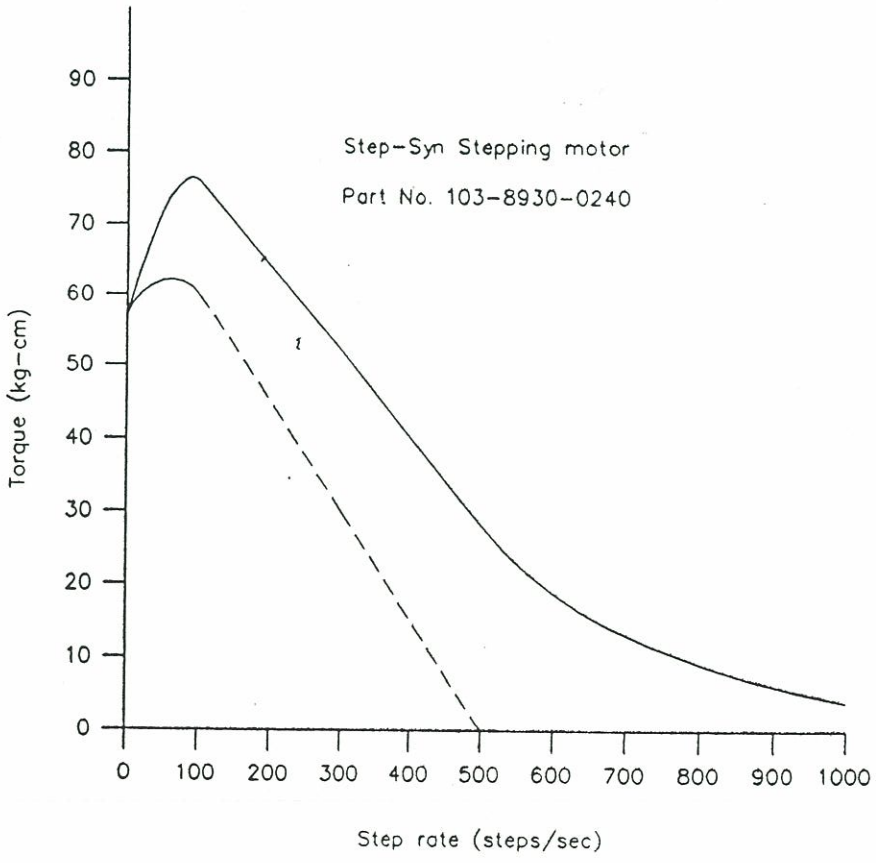
อัตราการสเต็ป (Stepping Rate): ตัวเลขนี้ คือ จำนวนสเต็ปต่อวินาที ซึ่งมอเตอร์ทำได้ที่แรงบิดใดแรงบิดหนึ่ง ถ้าหากว่าการขับมอเตอร์ใช้อัตราการสเต็ปสูงกว่าที่มอเตอร์จะทำได้ จะทำให้การควบคุมตำแหน่งมุมของมอเตอร์พลาด และการทำงานไม่ได้ผล มอเตอร์พิเศษบางชนิดอาจมีอัตราการสเต็ปสูงถึง 20,000 สเต็ปต่อวินาทีก็ได้

ความแน่นอนของสเต็ป (Step Accuracy): ความแน่นอนในการสเต็ปของมอเตอร์ทั่ว ๆ ไปจะอยู่ในช่วง =7% ของมุมสเต็ป โดยความผิดพลาดนี้จะไม่ทวีคูณ ดังนั้นมอเตอร์ที่มีมุมสเต็ป 7.5° จะสามารถควบคุมตำแหน่งเชิงมุมได้โดยมีความแน่นอน 0.5° ไม่ว่าจะขับมอเตอร์ให้หมุนไป 7.5° หรือว่า 7,500° หรือ 1,000 สเต็ป ความผิดพลาดของมุมสเต็ปจะไม่ทวีคูณ และจะมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์เมื่อแรงบิดคงที่ และจากการหมุนไปแล้วสี่เฟสสำหรับมอเตอร์แบบสี่เฟส นั่นก็เพราะว่า เมื่อหมุนไปสี่สเต็ป มอเตอร์จะกลับไปเฟสเดิมพอดี ซึ่งก็หมายความว่าโรเตอร์จะถูกดึงด้วยสเตเตอร์เดิมด้วยกระแสและแรงดันเดิมดังนั้น ถ้าต้องการความแน่นอนสูง การขับควรจะกระทำเป็นค่าที่หารด้วยสี่ลงตัว

แรงบิด (Torque): แรงบิดที่มอเตอร์ใด ๆ สามารถทำได้จะขึ้นอยู่กับอัตราการสเต็ปกระแสที่ใช้ขับ วิธีการขับ และการออกแบบวงจรขับ แรงบิดอาจแยกได้เป็นแรงบิดสถิตย์ (Static Torque หรือ Holding Torque) และแรงบิดจลน์ (Dynamic Torque)

แรงบิดสถิตย์ (Holding Torque): แรงบิดสถิตย์ คือ แรงบิดที่กระทำจากภายนอกเพื่อให้มอเตอร์หมุนไปหนึ่งสเต็ปในขณะที่มอเตอร์หยุดนิ่ง และถูกกระตุ้นด้วยกระแสเต็มที่ตามข้อมูลจำเพาะของมอเตอร์ ดังนั้นแรงบิดสถิตย์อาจแปลได้ว่าเป็นความสามารถในการเบรค

แรงบิดจลน์ (Dynamic Torque): รูปที่ 11 แสดงถึงกราฟแรงบิดกับอัตราการสเต็ปของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ตัวหนึ่ง กราฟแรงบิดโดยทั่วไปแล้วจะมีสองเส้น เส้นหนึ่ง คือ

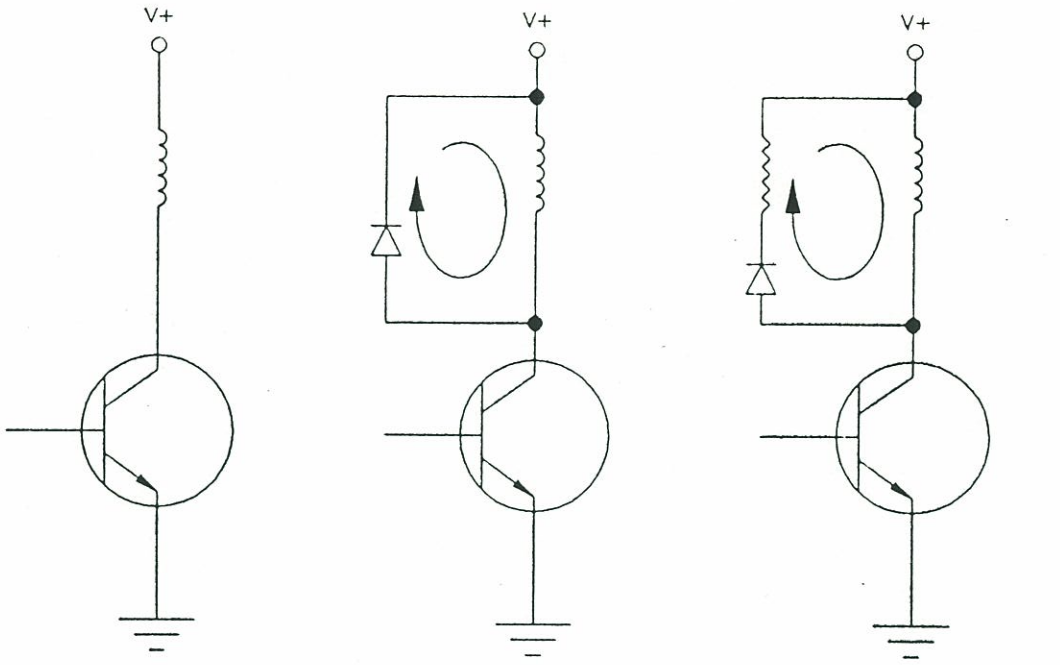


รูปที่ 11 กราฟแรงบิดกับความเร็วของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ตัวหนึ่ง

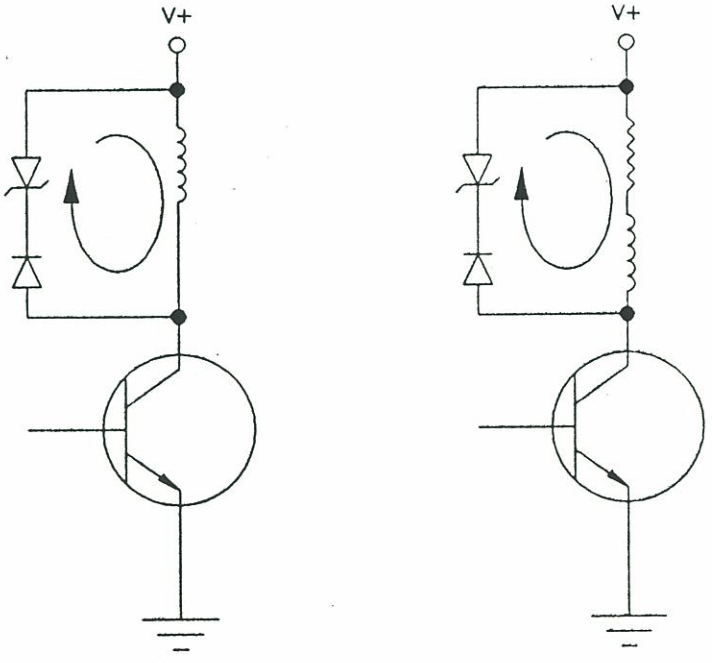
เส้นที่หมายถึงความสามารถของมอเตอร์ที่จะเริ่มหมุนโดยไม่มีการผิดพลาด (Start Without Error) ซึ่งบางครั้งเส้นนี้ก็เรียกว่าเป็นเส้นแรงบิดดึงเข้า (Pull-in Torque) กราฟเส้นนี้แสดงเป็นเส้นประในรูป อีกเส้นหนึ่งซึ่งเป็นเส้นทึบ แรงบิดขณะหมุน (Running Torque) ซึ่งบางครั้งเรียกว่าแรงบิดดึงออก (Pull-out Torque) แรงบิดนี้คือแรงบิดที่มอเตอร์ทำได้ขณะหมุน แต่ถ้ามอเตอร์เริ่มหมุนด้วยความเร็วนี้ทันทีก็อาจเกิดการหมุนข้ามสเต็ปได้ การที่จะไปถึงจุดแรงบิดขณะหมุนได้ การขับจะต้องค่อย ๆ เร่งมอเตอร์จากแรงบิดดึงเข้าจนกระทั่งความเร็วถึงจุดแรงบิดดึงออก กราฟความเร็วกับแรงบิดเป็นตัวแปรสำคัญในการเลือกมอเตอร์ให้เหมาะสมกับงานที่ทำ

วงจรขับมอเตอร์

วงจรขับมอเตอร์ทุกเฟสนั้นจะเหมือนกันทุกประการ ดังนั้นจะแสดงให้เห็นวิธีการขับมอเตอร์เพียงเฟสเดียวเพื่อความสะดวกในการอธิบาย รูปที่ 12 ก. แสดงให้เห็นวงจรขับมอเตอร์แบบง่ายที่สุด โดยที่คอยล์ของมอเตอร์จะรับกระแสจากแหล่งจ่ายไฟและมีทรานซิสเตอร์กำลังสูงทำหน้าที่เป็นสวิทช์ตัดต่อวงจร ทรานซิสเตอร์ตัวนี้จะรับกระแสจากวงจรควบคุมที่เบส เพื่อใช้เป็นสัญญาณในการปิดเปิดกระแสผ่านตัวทรานซิสเตอร์ในขณะใช้งาน เมื่อทรานซิสเตอร์ได้รับสัญญาณที่เบส ก็จะปล่อยกระแสผ่านลงดินทำให้มีกระแสผ่านคอยล์ เมื่อถึงจังหวะที่เฟสต่อไปจะถูกกระตุ้น ทรานซิสเตอร์จะต้องตัดกระแสที่ไหลผ่านตัวเองการสั่งงานของวงจรควบคุมมักจะเป็นแบบ Transistor - Transistor Logic (TTL) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณรวดเร็วมาก เมื่อกระแสถูกตัด คอยล์ซึ่งมีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำ ก็จะเกิดแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นที่ด้านล่างของคอยล์ เพราะว่าแรงดันตกคร่อมคอยล์จะเป็นไปตามสมการ $V = L (dI/dt)$ เมื่อทรานซิสเตอร์ตัดต่อกระแสเร็วมากก็หมายความว่า dI/dt จะมีค่าสูงและทำให้เกิดแรงดันย้อนกลับมีค่าสูงพอที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์เสียหายได้ วิธีแก้ที่อาจทำได้ก็คือการใช้ไดโอดต่อขนานกับคอยล์ดังรูปที่ 12ข. แรงดันย้อนกลับที่เกิดขึ้นจะไหลผ่านไดโอดได้ ซึ่งทำให้ทรานซิสเตอร์ไม่ถูกทำลายโดยแรงดันย้อนกลับ ทิศทางการเดินของกระแสได้แสดงไว้ในรูปที่ 12 ข. แล้ว การแก้ปัญหาแบบนี้ใช้ได้ดีเมื่อการใช้งานของมอเตอร์ทำที่ความเร็วต่ำ แต่ที่ความเร็วสูงขึ้น กระแสที่ไหลวนจะทำให้เฟสที่ถูกตัดไฟไปแล้วมีแรงดึงดูดของแม่เหล็กอยู่ และทำให้เกิดแรงบิดในลักษณะเบรคขึ้น



(ก) (ข) (ค)



(ง) (จ)

รูปที่ 12 วงจรขับสเต็ปเปอร์มอเตอร์อย่างง่าย

การใช้วงจรแบบนี้ จะทำให้แรงบิดของมอเตอร์ลดลงมากกว่าปกติเมื่อทำงานที่ความเร็วรอบสูง

ถ้าเราใช้ตัวต้านทานตัวหนึ่งต่อกับไดโอดในลักษณะอนุกรมดังรูปที่ 12 ค. กระแสที่ไหลวนก็จะหยุดลงได้อย่างรวดเร็ว ถ้าค่าของความต้านทานสูงขึ้นกระแสไหลวนก็จะหยุดลงเร็วขึ้น แต่ก็จะทำให้แรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์เพิ่มขึ้นด้วย การออกแบบในลักษณะนี้มักไม่นิยมใช้ เพราะความยากในการคำนวณค่าตัวต้านทานที่จะใช้ และการเลือกทรานซิสเตอร์ที่เหมาะสมที่ทุกความเร็วกระทำได้ยาก

วิธีการออกแบบที่นิยมใช้กันคือใช้ซีเนอร์ไดโอดต่ออนุกรมกับไดโอดที่มีอยู่ซึ่งในกรณีนี้การหยุดของกระแสไหลวนจะเกิดขึ้นเร็ว และแรงดันที่เกิดขึ้นที่คอเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์มีค่าสูงสุดที่แน่นอนนั่นก็คือ

V_{ce} = แรงดันจ่าย + แรงดันคร่อมไดโอด + แรงดันคร่อมซีเนอร์ไดโอด

ซึ่งการออกแบบในลักษณะนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 12 ง.

วิธีการออกแบบวงจรขับที่กล่าวถึงมาแล้วนั้นได้กล่าวถึงการป้องกันแรงดันย้อนกลับและป้องกันแรงบิดเบรคเนื่องจากการไหลวนของกระแส ซึ่งทำให้ลดแรงบิดเบรคที่เกิดขึ้นในขณะที่ตัดไฟจากเฟสหนึ่ง ในตัวของมอเตอร์นั้นประกอบด้วยคอยล์ซึ่งมีความต้านทานอยู่ด้วย ดังนั้นจึงเป็นลักษณะเหมือนกับตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ตัวเหนี่ยวนำนั้นมีลักษณะของการต่อต้านกระแส และความเร็วของการเกิดสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของความเหนี่ยวนำและความต้านทาน (L/R) ถ้าค่า L/R น้อย สนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นได้เร็ว และถ้า L/R สูงจะทำให้สนามแม่เหล็กเกิดขึ้นได้ช้า การที่จะทำให้สนามแม่เหล็กเกิดขึ้นได้เร็ว เพื่อให้ได้แรงบิดสูงที่อัตราการสเต็ปสูงอาจทำได้โดยการเพิ่มตัวต้านทานต่ออนุกรมกับคอยล์เพื่อลด L/R ดังรูปที่ 12 จ. ในการกระทำแบบนี้ ระบบจ่ายไฟจะต้องจ่ายไฟที่แรงดันสูงขึ้นเพื่อให้กระแสผ่านเฟสเป็นค่าคงเดิม เอกสารคู่มือของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ของฟิลลิปส์ แนะนำว่าควรจะใช้สัดส่วน $L/4R_m$ เมื่อ R_m คือความต้านทานภายในของมอเตอร์ ซึ่งก็หมายความว่าแรงดันจ่ายให้แก่วงจรจะเพิ่มขึ้นเป็น 4 เท่า และความต้านทานที่ต่อเข้าไปมีค่าเป็นสามเท่าของความต้านทานภายในของมอเตอร์

ในทางทฤษฎีแล้ว วงจรจ่ายไฟให้สเต็ปเปอร์มอเตอร์สามารถจะออกแบบให้สามารถจ่ายไฟตรงที่แรงดันและกระแสเท่าใดก็ได้ แต่ในทางปฏิบัติ ถ้าอุปกรณ์จ่ายไฟสามารถหาได้ในลักษณะสำเร็จรูปในท้องตลาด ก็จะช่วยลดราคาและความยุ่งยากในการจัดหาไปได้มากอุปกรณ์จ่าย

ไฟตรงที่มีอยู่ในตลาดมักจะอยู่ในรูปของเครื่องชาร์ทแบตเตอรี่รถยนต์ หรือเครื่องจ่ายไฟสำหรับวิทยุสื่อสาร ซึ่งมักจะมีแรงดันไฟฟ้าออกที่ 13.5 หรือ 12 โวลท์ เครื่องจ่ายไฟประเภทนี้สามารถหาได้ในราคาพอประมาณ โดยมีความสามารถในการจ่ายกระแสตั้งแต่ 5 แอมแปร์ ถึง 40 แอมแปร์ ขึ้นอยู่กับราคา ดังนั้นถ้าหากว่าเป็นไปได้ควรจะเลือกมอเตอร์ที่ออกแบบให้รับแรงดันไฟฟ้าประมาณ 3 โวลท์ เพราะเมื่อนำมาใช้กับเครื่องจ่ายไฟ 12 โวลท์ พร้อมกับค่าตัวต้านทานที่เหมาะสมก็จะได้ค่า L/R เป็น $L/4R_m$ พอดี แต่ถ้าหากว่ามอเตอร์ที่จะใช้เลือกไม่ได้หรือค่าของแรงดันที่แตกต่างไปจากนี้ก็อาจเลือกค่าความต้านทานอื่นเพื่อให้กระแสซึ่งไหลผ่านมอเตอร์ต่อเฟสเป็นค่าเหมาะสมได้

การเลือกตัวต้านทานที่จะใช้ต่ออนุกรมกับมอเตอร์ จะต้องระมัดระวังเรื่องความสามารถในการรับพลังงาน (Power Rating) ของตัวต้านทาน เพราะสเต็ปเปอร์มอเตอร์หลายแบบอาจมีความต้องการกระแสค่อนข้างสูง เพื่อให้ได้แรงบิดที่ต้องการออกมาในหลายกรณีอาจต้องใช้ตัวต้านทานหลาย ๆ ตัวต่อเป็นเครือข่ายเพื่อให้สามารถรับพลังงานทั้งหมดได้ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการขับมอเตอร์ที่จะใช้แรงดัน 3.6 โวลท์และต้องการกระแสต่อเฟสเป็น 6.1 แอมแปร์ โดยจะใช้เครื่องจ่ายไฟที่มีแรงดันออกเป็น 12 โวลท์ก่อนอื่นจะต้องคำนวณแรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์ที่ขับและมอเตอร์ก่อนด้วยสมการ

$$V_{mq} = V_m + V_q$$

เมื่อ V_{mq} = แรงดันไฟฟ้าคร่อมมอเตอร์และทรานซิสเตอร์

V_m = แรงดันที่มอเตอร์ต้องการ

V_q = แรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์เมื่อปล่อยกระแสผ่าน

V_m ในที่นี้ต้องการให้เป็น 3.6 โวลท์ ตามความต้องการของมอเตอร์ สำหรับแรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์นั้น ตามปกติแล้วทรานซิสเตอร์จะออกแบบให้ทำงานที่จุดอิ่มตัว (Saturate) เพื่อลดพลังงานผ่านทรานซิสเตอร์และทรานซิสเตอร์โดยทั่วไป จะมีแรงดัน ตกคร่อมประมาณ 0.7 โวลท์ เมื่ออิ่มตัว แต่ถ้าต้องการค่าที่แน่นอนควรจะหาค่าจากตารางเลือกทรานซิสเตอร์ที่ใช้ การหาค่าตัวต้านทานที่จะใช้ มีอยู่ในตัวอย่างต่อไปนี้

$$V_{mq} = 3.6 + 0.7 = 4.13 \text{ โวลท์}$$

ดังนั้นแรงดันคร่อมตัวต้านทานก็จะ เป็น

$$V_r = V_s \cdot V_{mq}$$

เมื่อ V_r = แรงดันคร่อมตัวต้านทานที่จะใช้

V_s = แรงดันจากเครื่องจ่ายไฟ

และในตัวอย่างนี้

$$V_r = 12 \cdot 4.13 = 7.87 \text{ โวลท์}$$

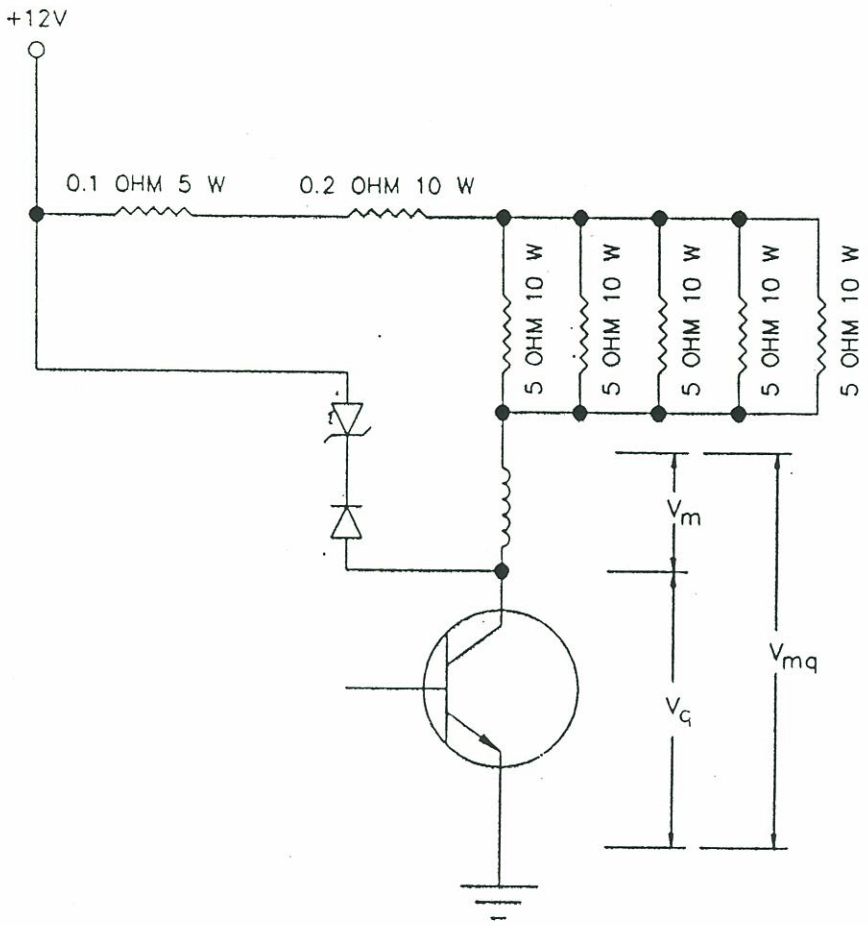
และค่าของตัวต้านทานก็คือ

$$R = V_r / I_m$$

เมื่อ R = ค่าความต้านทานของตัวต้านทาน

I_m = กระแสที่มอเตอร์ต้องการ

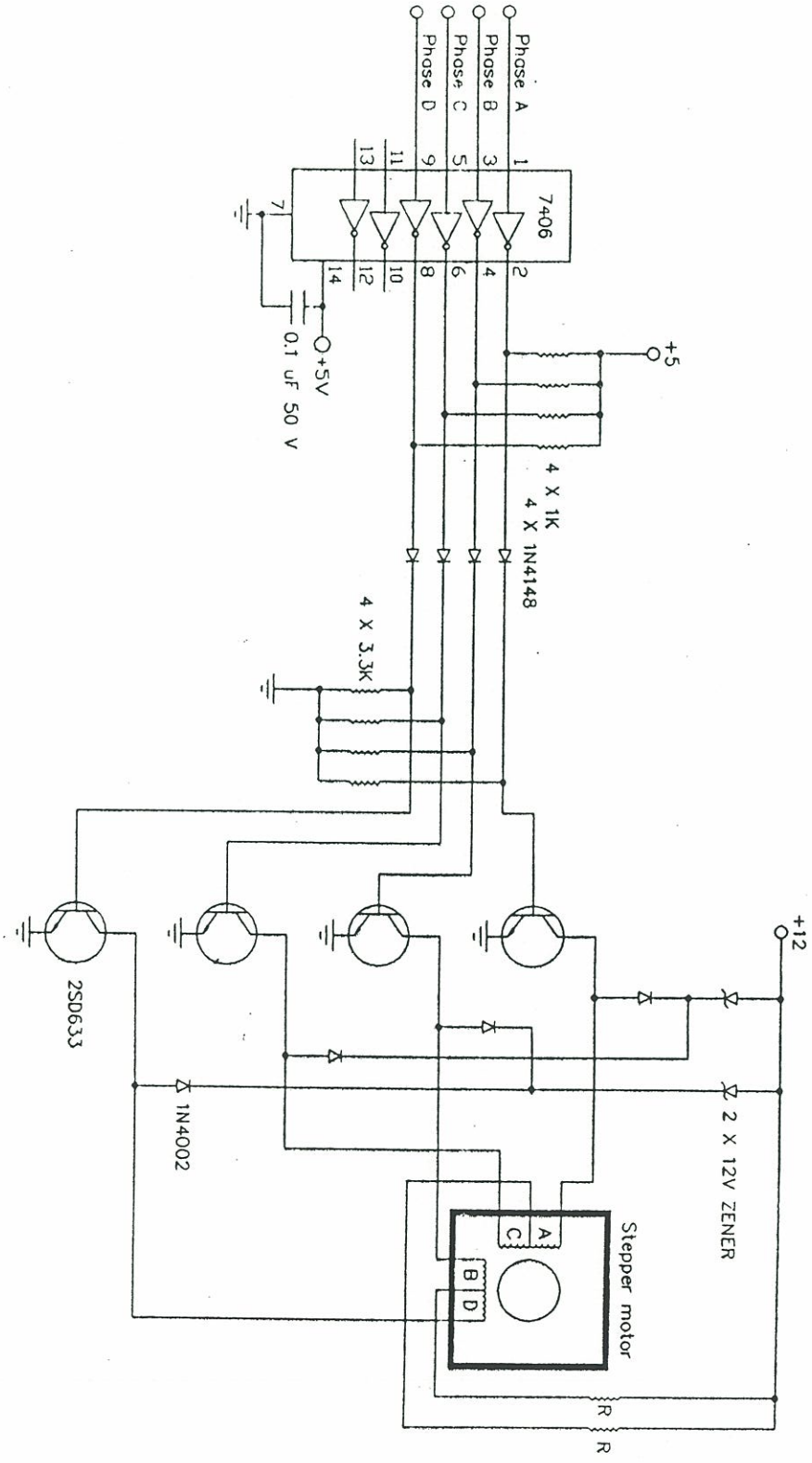
ในตัวอย่างนี้จะได้ $R = 7.87/6.1 = 1.3$ โอห์ม และกำลังผ่านตัวต้านทานคือ $P_r = I_m V_r = 6.1 \times 7.87 = 48$ วัตต์



รูปที่ 13 การใช้ตัวต้านทานต่ออนุกรมกับสเต็ปเปอร์มอเตอร์

ตัวต้านทานขนาด 1.3 โอห์ม 50 วัตต์ ไม่มีขายในตลาด และตัวต้านทานปรับค่าได้ที่มีวัตต์สูงราคาแพง ดังนั้นจึงอาจสร้างเครือข่ายของตัวต้านทานจากตัวต้านทานขนาด 10 วัตต์ และ 5 วัตต์ หลาย ๆ ตัว เพื่อใช้ในงานนี้ได้ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 13 ในรูปนี้ตัวต้านทานขนาด 5 โอห์ม 10 วัตต์ 5 ตัว ต่อขนานกันซึ่งในแต่ละตัวจะมีกระแสผ่าน 1.22 แอมแปร์และพลังงานที่ส่งผ่านแต่ละตัวจะเป็น $I^2R = (1.22)^2 \times 5 = 7.44$ วัตต์ ซึ่งก็ไม่เกินความสามารถ สำหรับตัวต้านทานขนาด 0.2 โอห์ม ก็จะมีกำลังผ่านเป็น 7.44 วัตต์ และตัวต้านทานขนาด 0.1 โอห์ม ก็จะมีกำลังผ่านเป็น 3.72 วัตต์ ซึ่งก็อาจใช้ตัวต้านทานขนาด 5 วัตต์ ได้สำหรับตัวต้านทาน 0.1 โอห์ม

ในวงจรขับมอเตอร์นั้นสัญญาณที่ส่งมาจากเครื่องควบคุมมักจะเป็นแบบ Transistor Transistor Logic (TTL) ดังนั้นวงจรขับควรจะรับสัญญาณแบบนี้โดยตรงได้ แต่การเลือกทรานซิสเตอร์ที่มีอัตราขยายสูงเพื่อให้รับสัญญาณแบบ TTL โดยตรง อาจทำให้ระบบไวต่อสัญญาณรบกวนมากเกินไป ดังนั้นในวงจรขับควรจะมีการใช้ Buffer เพื่อช่วยลดปัญหานี้ รูปที่ 14 เป็นตัวอย่างวงจรขับซึ่งผู้เขียนออกแบบไว้และจะใช้วงจรนี้ในการอธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับวงจรขับสเต็ปเปอร์มอเตอร์ ในวงจรนี้ใช้ตัวต้านทานสองชุดและซีเนอร์ไดโอดสองตัว เพื่อเตรียมไว้ขับสเต็ปเปอร์แบบสองเฟส ชิ้นส่วนทุกชิ้นที่ใช้ในวงจรนี้หาซื้อได้ง่ายภายในประเทศ ทรานซิสเตอร์ที่ใช้ทนกระแสได้ 8 แอมแปร์และแรงดันระหว่างคอเล็กเตอร์กับอิมิเตอร์เป็น 100 โวลท์ แต่ถ้าจะใช้การขับเกินสองแอมแปร์ต่อเฟสควรจะติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อน (Heat Sink) และถ้าขับเกิน 5 แอมแปร์ก็ควรจะมีพัดลมระบายความร้อนช่วย ไดโอด 1N4148 ใช้ช่วยป้องกันอุปกรณ์ควบคุมในกรณีที่ไดโอดป้องกันไฟย้อนกลับ หรือซีเนอร์ไดโอดเกิดเสียหายบัฟเฟอร์ที่ใช้เป็นแบบคอเล็กเตอร์เปิด ที่ทนแรงดันได้ถึง 30 โวลท์ และรับสัญญาณแบบ TTL ได้โดยตรง บัฟเฟอร์ที่ใช้นี้เป็นอินเวอร์เตอร์ เพราะว่าในกรณีที่ระบบควบคุมไม่ได้ต่อสายไว้ สัญญาณเข้าของ 7406 จะเป็นค่าสูงเอง และตัดไฟในทุกเฟสของมอเตอร์ เพื่อไม่ให้ระบบจ่ายไฟและมอเตอร์เสียหาย ไฟ +5โวลท์ ที่ใช้ในวงจรนี้ควรจะมีการเรกูเลทและไม่ควรใช้แหล่งจ่ายไฟมาจาก +12 โวลท์ เพราะที่แหล่งจ่ายไฟ 12 โวลท์ จะมีสัญญาณรบกวนมากเมื่อมอเตอร์ทำงาน ทรานซิสเตอร์ที่ใช้อาจลดขนาดลงได้ถ้าหากว่าใช้ในการขับสเต็ปเปอร์มอเตอร์ขนาดเล็ก



รูปที่ 14 วงจรขับมอเตอร์ที่รับสัญญาณแบบ TTL

บัฟเฟอร์ที่ใช้เป็นแบบคอเล็กเตอร์เปิด ที่ทนแรงดันได้ผึง 30 โวลท์ และรับสัญญาณแบบ TTL ได้โดยตรง บัฟเฟอร์ที่ใช้นี้เป็นอินเวอร์เตอร์ เพราะว่าในกรณีที่ระบบควบคุมไม่ได้ต่อสายไว้ สัญญาณเข้าของ 7406 จะเป็นค่าสูงเอง และตัดไฟในทุกเฟสของมอเตอร์ เพื่อไม่ให้ระบบจ่ายไฟและมอเตอร์เสียหาย ไฟ +5 โวลท์ที่ใช้ในวงจรนี้ควรจะมีการเรกูเลทและไม่ควรใช้แหล่งจ่ายไฟมาจาก +12 โวลท์ เพราะที่แหล่งจ่ายไฟ 12 โวลท์ จะมีสัญญาณรบกวนมากเมื่อมอเตอร์ทำงาน ทรานซิสเตอร์ที่ใช้อาจลดขนาดลงได้ถ้าหากว่าใช้ในการขับสเต็ปเปอร์มอเตอร์ขนาดเล็ก

การขับมอเตอร์แบบเฟสเดียว สองเฟส และ 1-2

ในตารางที่ 4 แสดงถึงขั้นตอนการขับสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบ 4 เฟส โดยการขับแบบเฟสเดียว สองเฟส และ 1-2 ตัวเลข 1 ในช่องของตารางหมายถึงว่าเฟสนั้นมีกระแสไหลผ่านและ 0 หมายความว่า ไม่มีกระแสไหลผ่าน วิธีการขับมอเตอร์ที่อธิบายไว้ใน จะเป็นแบบเฟสเดียว ถ้าหากว่าต้องการแรงบิดสูงอาจใช้วิธีการขับสองเฟสพร้อมกันได้ สเต็ปเปอร์มอเตอร์บางชนิดไม่ได้ออกแบบมาให้ขับสองเฟสพร้อมกันและถ้าขับแบบนี้มอเตอร์อาจร้อนมากได้ ดังนั้น ควรตรวจสอบเอกสารคู่มือของมอเตอร์ก่อนใช้การขับแบบนี้ การขับแบบสองเฟส จะต้องใช้กระแสจากแหล่งจ่ายไฟเป็นสองเท่าของปกติ และถ้าใช้ตัวต้านทานต่ออนุกรม ก็จะต้องใช้ตัวต้านทานสองชุดแยกกันสำหรับมอเตอร์แต่ละตัว การขับแบบ 1-2 จะได้แรงบิดน้อยกว่าการขับแบบสองเฟส แต่ว่าเมื่อขับแบบนี้มุมสเต็ปของมอเตอร์จะลดลงครึ่งหนึ่ง การขับแบบนี้ควรใช้เมื่อต้องการมุมสเต็ปเล็ก มอเตอร์ที่มีมุมสเต็ป 1.8° สามารถทำให้ทำงานโดยมีมุมสเต็ป 0.9° ได้ด้วยการขับแบบ 1-2

ตารางที่ 4 การขับสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบเฟสเดียว (ก) สองเฟส (ข) และ 1-2 (ค)

ก.การขับหนึ่งเฟส

ตามเข็มนาฬิกา---->

สเต็ป	1	2	3	4
A	1	0	0	0
B	0	1	0	0
C	0	0	1	0
D	0	0	0	1

<----ทวนเข็มนาฬิกา

ข.การขับสองเฟส

ตามเข็มนาฬิกา---->

สเต็ป	1	2	3	4
A	1	0	0	1
B	1	1	0	0
C	0	1	1	0
D	0	0	1	1

<----ทวนเข็มนาฬิกา

ค.การขับแบบ 1-2

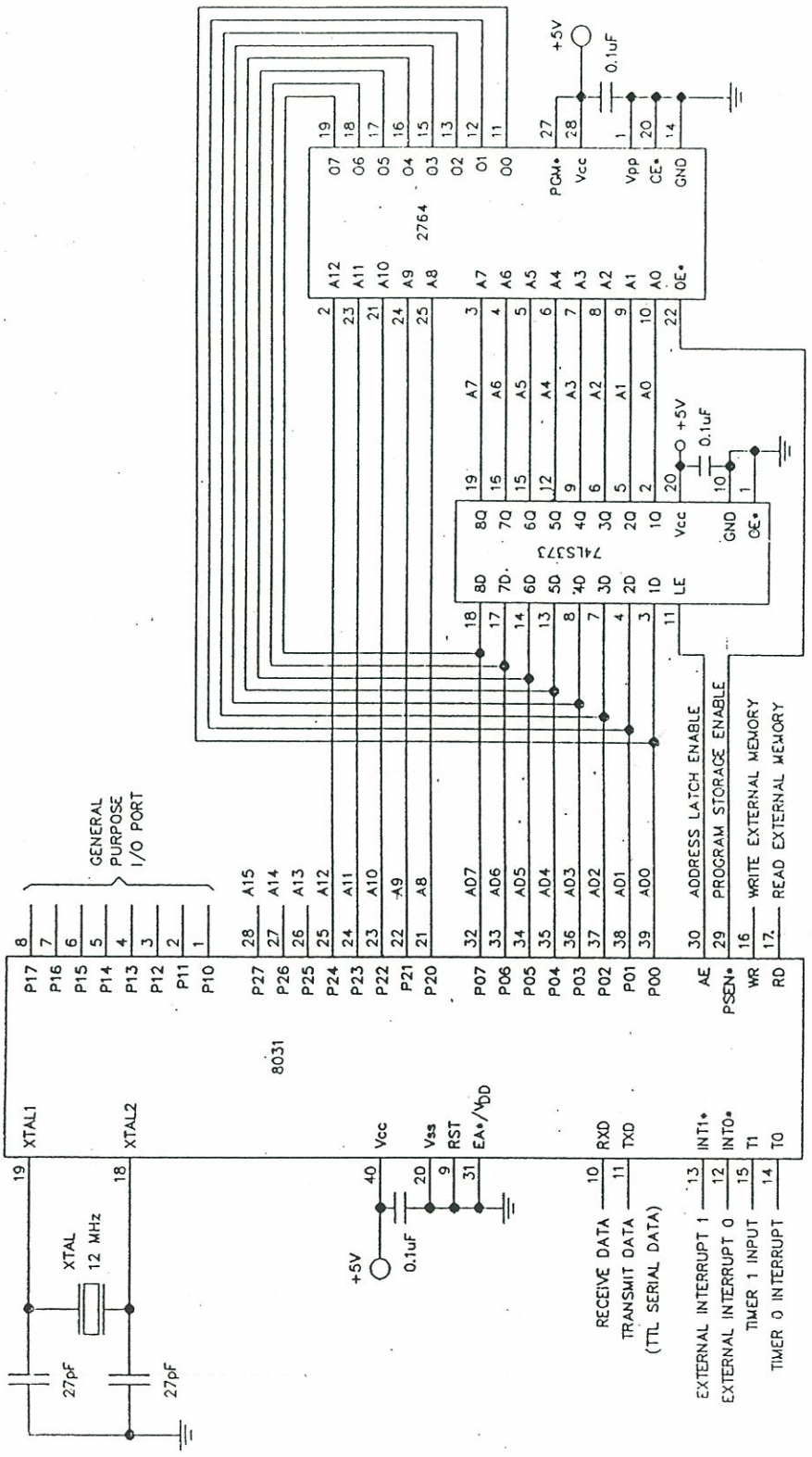
ตามเข็มนาฬิกา---------->

สเต็ป	1	2	3	4	5	6	7	8
A	1	1	0	0	0	0	0	1
B	0	1	1	1	0	0	0	0
C	0	0	0	1	1	1	0	0
D	0	0	0	0	0	1	1	1

<----------ทวนเข็มนาฬิกา

การใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ในการควบคุมสเต็ปเปอร์มอเตอร์

การใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ในการควบคุมสเต็ปเปอร์มอเตอร์นั้น เหมาะสำหรับการทดลองและสร้างเครื่องมือต้นแบบ เพราะโปรแกรมควบคุมเขียนด้วยภาษาที่อ่านเข้าใจได้ง่ายทำให้ง่ายต่อการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงและแก้ไข แต่เมื่อทุกอย่างทำงานได้ดีแล้วและจะใช้สเต็ปเปอร์มอเตอร์ไปควบคุมขบวนการทางอุตสาหกรรม การใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ทั้งตัวไปทำการควบคุมทำให้ราคาแพง นอกจากนั้น ไมโครคอมพิวเตอร์ทั่ว ๆ ไป ได้ออกแบบมาให้ใช้ในสำนักงานและมักจะทนสิ่งแวดล้อมในโรงงานเป็นต้นว่า ความสั่นสะเทือน ฝุ่นและละอองน้ำมันไม่ได้ วิธีควบคุมสเต็ปเปอร์มอเตอร์ที่ได้ผลอีกวิธีหนึ่งก็คือควบคุมด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ ระบบควบคุมที่ใช้ไมโครโปรเซสเซอร์อาจใช้ได้โดยการไม่ต้องมีชิ้นส่วนเคลื่อนไหวเลยและโปรแกรมควบคุมก็สามารถบันทึกไว้ใน Eprom ได้การออกแบบในลักษณะนี้ทำให้ระบบไมโครโปรเซสเซอร์มีราคาถูกและเหมาะกับการควบคุมเฉพาะงาน

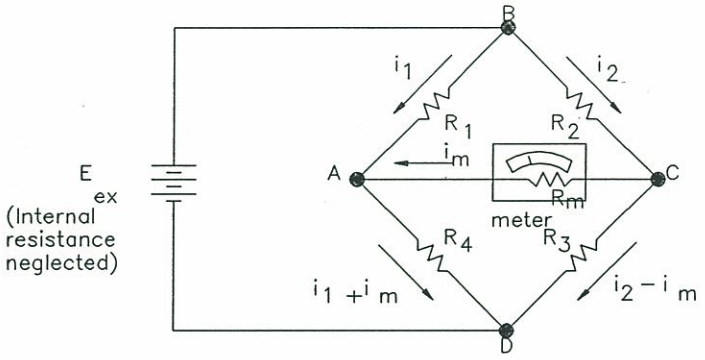


รูปที่ 15 การใช้งานไมโครโปรเซสเซอร์ 8031

ไมโครโปรเซสเซอร์ตระกูลหนึ่งที่ผลิตโดยบริษัท INTEL เพื่อใช้กับงานควบคุมคือตระกูล MCS-51 ซึ่งประกอบไปด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ที่ภายในไอซีตัวเดียวมีทั้ง CPU หน่วยความจำ พอร์ทอินพุท/เอาท์พุท วงจรจับเวลา วงจรสื่อสารอนุกรมและในบางตัวอาจมี ROM ด้วยได้ ไมโครโปรเซสเซอร์บางตัวในตระกูลนี้มี ROM อยู่ในตัวและจะต้องสั่งโปรแกรมมาจากโรงงานซึ่งจะไม่กล่าวถึงในที่นี้ ไมโครโปรเซสเซอร์เบอร์ 8751 มี EPROM อยู่ในตัวซึ่งผู้ใช้สามารถโปรแกรมเองได้ และอาจใช้เป็นตัวควบคุมได้โดยใช้ไอซีตัวนี้ตัวเดียว บวกกับ Crystal และแหล่งจ่ายไฟ 5 โวลท์เท่านั้น การโปรแกรม EPROM นั้นมีข้อจำกัดอยู่ที่จำนวนครั้งที่สามารถจะโปรแกรมได้ และไมโครโปรเซสเซอร์ 8751 มีราคาค่อนข้างสูง และไม่สามารถโปรแกรมได้ด้วย EPROM Programmer มาตรฐาน ดังนั้นจึงจะกล่าวถึงไมโครโปรเซสเซอร์ในตระกูลเดียวกันอีกเบอร์หนึ่ง คือ 8031 ซึ่งไมโครโปรเซสเซอร์นี้สามารถทำงานกับ EPROM ภายนอกได้ ทำให้ง่ายต่อการพัฒนาระบบควบคุมและมีราคาต่ำ ถ้าหากต้องการให้ 8031 ทำงานอื่นที่แตกต่างกันออกไปก็อาจเปลี่ยน EPROM สำหรับงานนั้น ๆ ได้ ระบบไมโครโปรเซสเซอร์ที่ใช้ 8031 แสดงไว้ในรูปที่ 15 จะเห็นได้ว่าทั้งระบบใช้ไอซีเพียงสามตัวคือ 8031, 74LS373 และ EPROM เบอร์ 2764 เท่านั้น ไมโครโปรเซสเซอร์เบอร์นี้ออกแบบให้ใช้กับงานควบคุม ดังนั้นแต่ละบิทของพอร์ทต่าง ๆ สามารถโปรแกรมได้โดยตรงและสายสัญญาณสำหรับส่งข้อมูลและอินเตอร์รัพท์ต่าง ๆ สามารถใช้ในการควบคุมได้ด้วย ซึ่งก็หมายความว่าทั้งระบบอาจมีบิทควบคุมได้ถึง 16 บิท ซึ่งก็ใช้คุมสเต็ปเปอร์มอเตอร์ได้ถึง 4 ตัว โดยใช้ไอซีเพียงสามตัว

3.2.4 วงจรสะพาน

วงจรสะพาน (bridge circuit) ชนิดต่าง ๆ ใช้กันมากสำหรับการวัดความต้านทาน ความจุประจุ และความเหนี่ยวนำ เนื่องจากเราได้เห็นแล้วว่า หัววัดหลายประเภทเปลี่ยนตัวแปรทางฟิสิกส์มาเป็นความต้านทาน ความจุประจุ หรือความเหนี่ยวนำ ที่เปลี่ยนแปรไปซึ่งมักจะต้องใช้วงจรสะพานเข้าช่วยในการอ่านค่าเหล่านี้ ถึงแม้สะพานความจุประจุและความเหนี่ยวนำจะสำคัญ แต่วงจรสะพานแบบที่ใช้กันมากที่สุดก็คือ แบบความต้านทาน และเราจะพิจารณาวงจรสะพานแบบความต้านทานในที่นี้



วงจรสะพาน Wheatstone พื้นฐาน

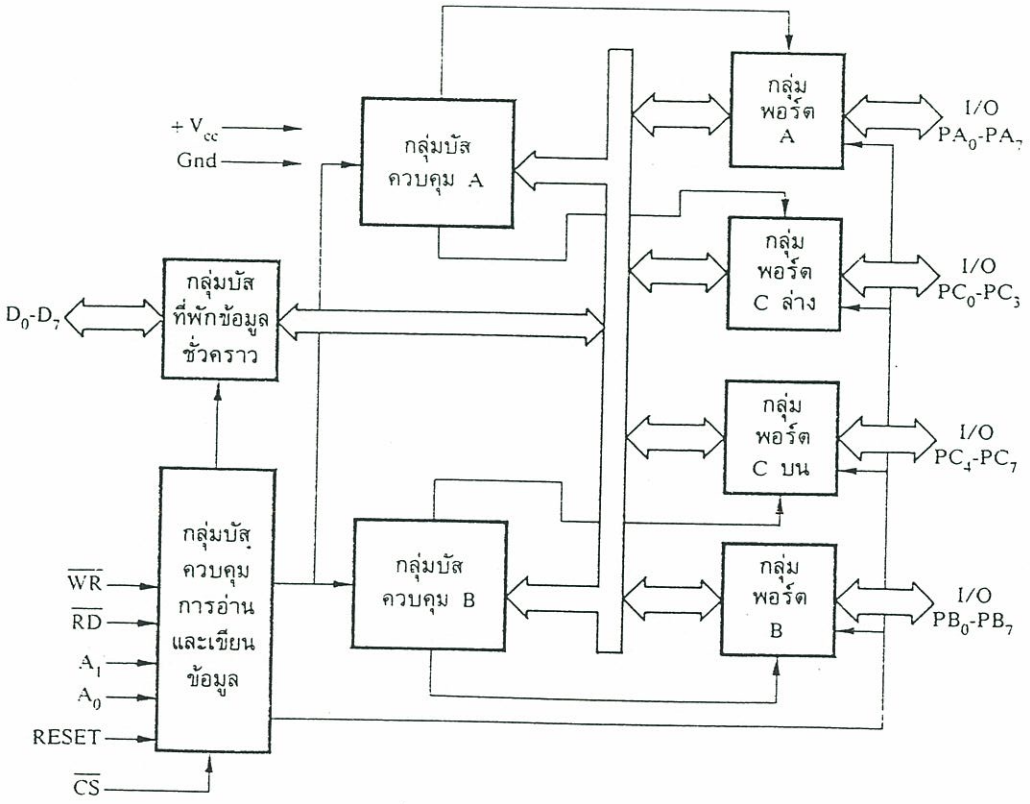
วงจรสะพาน Wheatstone พื้นฐานรูปที่แสดงให้เห็นสะพานความต้านทาน (Wheatstone) ในรูปแบบที่ง่ายที่สุด แรงดันกระตุ้น E_{ex} อาจเป็น ac หรือ dc และในที่นี้ จะกล่าวถึงการใช้ไฟ dc กระตุ้นในการวัด ขาหนึ่งหรือมากกว่าของสะพาน จะเป็นหัววัดแบบตัวต้านทานเช่น เสตรนเกจ เทอร์โมมิเตอร์แบบต้านทาน หรือเทอร์มิสเตอร์ การใช้สะพานจะทำได้สองวิธีด้วยกันคือ วิธีนัล และวิธี deflection เรามาลองสมมุติดูว่า ถ้าหากว่าตัวต้านทานทั้งหมดถูกปรับให้สะพานสมดุล นั่นก็คือ

$e_{AC} = o$ $(R_1/R_4 = R_2/R_3)$ และถ้าเราให้ตัวต้านทานตัวหนึ่งเป็นต้นว่า R_1 เปลี่ยนแปลงความต้านทานไป ซึ่งก็จะทำให้สะพานไม่สมดุล และเกิดแรงดันไฟฟ้าคร่อม AC ทำให้เกิดค่าที่อ่านได้ที่มาตร (meter) ค่าที่อ่านได้จากมาตร (meter) ค่าที่อ่านได้จากมาตร จะบอกถึงการเปลี่ยนแปลงใน R_1 และจะใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงนี้ได้ วิธีการในการวัดการเปลี่ยน

แปลงนี้เรียกว่าวิธีการ deflection เนื่องจากการเคลื่อนไหวของมาตร แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน ในวิธีแบบนัล (null) เราจะปรับตัวต้านทานตัวหนึ่งด้วยมือ ดังนั้น เมื่อ R_1 เปลี่ยนไป ทำให้มาตรเคลื่อนไหว เราก็จะปรับ R_2 จนผลลบล้างกับการเปลี่ยนแปลงใน R_2 ให้มาตรกลับมาอ่านค่าศูนย์หรือนัล ในกรณีนี้ ค่าตัวเลขที่เปลี่ยนแปลงของ R_1 จะขึ้นโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงใน R_2 ที่ทำให้เกิดความสมดุล

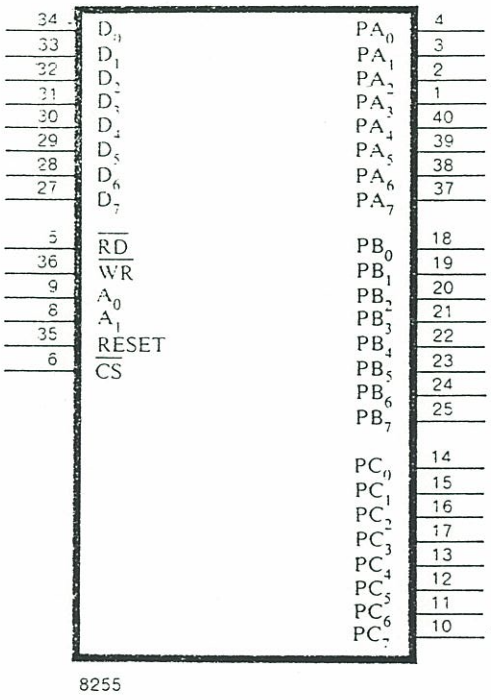
3.2.5 หน่วยรับส่งข้อมูลเข้าออก (I/o unit) ของ IC เบอร์ PIA 8255

8255 เป็น IC 40 ขา ของบริษัทอินเทล ได้รับการออกแบบเพื่อให้ใช้งานกับซีพียู 8080 แต่อย่างไรก็ตาม เราสามารถประยุกต์ใช้ในการเชื่อมต่อเข้ากับซีพียู 8031 ได้



รูปที่ 16 แสดงบล็อกไดอะแกรมของ IC 8255

โครงสร้างพื้นฐานของ PIA (PIA ย่อมาจากคำว่า programmable interface adapter) 8255 แสดงบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 16 ส่วนรายละเอียดของสัญญาณต่าง ๆ แสดงไว้ในรูปที่ 17 ตามลำดับ พบว่า 8255 จะประกอบด้วย I/O พอร์ต 3 พอร์ต ขนาด 8 บิต คือ พอร์ต A, B และ C ที่สามารถโปรแกรมให้พอร์ตใด ๆ เป็นได้ทั้งอินพุตพอร์ต หรือเอาต์พุตพอร์ต



รูปที่ 17 แสดงรายละเอียดขาสัญญาณต่าง ๆ ของ IC 8255 (PIA)

รายละเอียดของขาสัญญาณต่าง ๆ มีดังนี้ คือ

D_0-d_7 เป็นบัสข้อมูล

CS เป็นขาอินพุตเพื่อเลือกชิป (select ship) โดยเมื่อขาสัญญาณนี้เป็น o จะมีการอ่านข้อมูลและเขียนข้อมูลเกิดขึ้น

RD เป็นขาสัญญาณการอ่านข้อมูล เมื่อขาสัญญาณนี้เป็น o และขา CS เป็น o จะมีการอ่านข้อมูลเกิดขึ้นบนบัสข้อมูล

WR เป็นขาสัญญาณการเขียนข้อมูล เมื่อ CS และ WR เป็น o จะเกิดการเขียนข้อมูลขึ้นบนบัสข้อมูล

Rest เป็นขาสัญญาณเคลียร์สถานะต่าง ๆ ภายใน 8255 โดยจะมีการเซตให้ทุกพอร์ตเป็นอินพุตพอร์ต

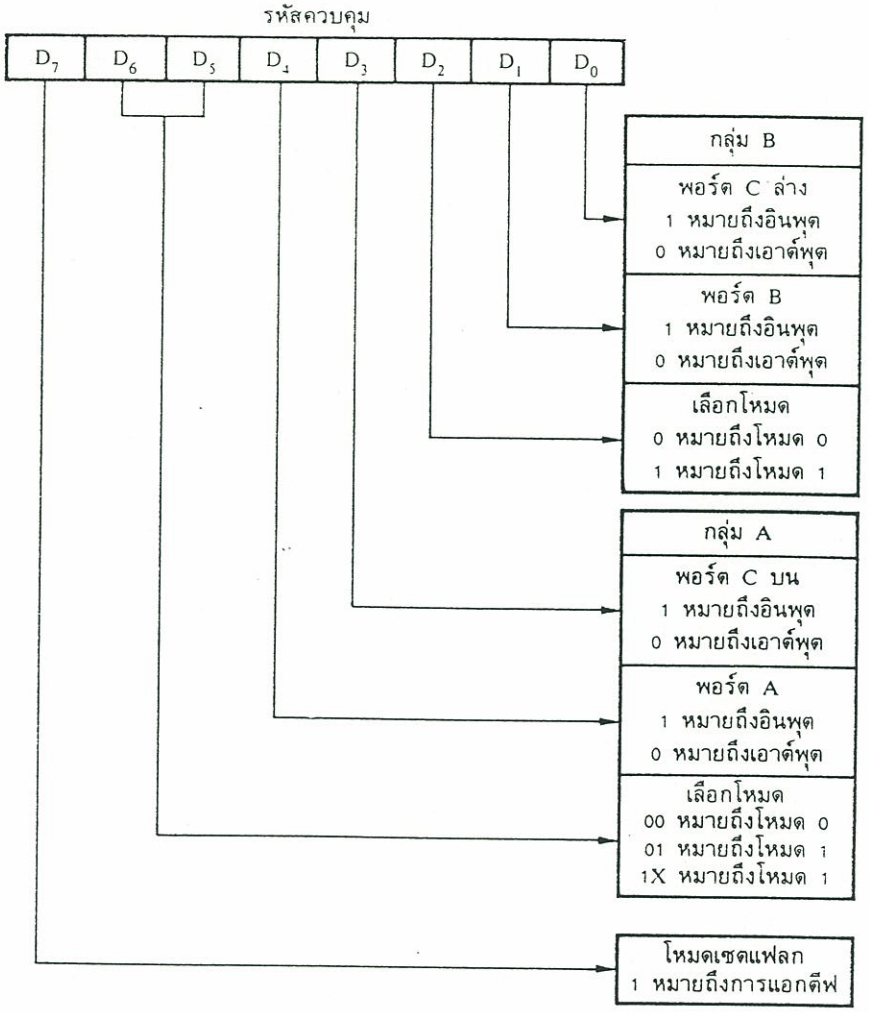
PA_0-PA_7 เป็นสายสัญญาณพอร์ต A ขนาด 8 บิต

PB_0-PB_7 เป็นสายสัญญาณพอร์ต B ขนาด 8 บิต

PC_0-PC_7 เป็นสายสัญญาณพอร์ต C ขนาด 8 บิต

A_1-A_0 เป็นสายสัญญาณพอร์ต A, B, C และควบคุมพอร์ต (control port)

IC 8255 สามารถใช้งานได้ 3 โหมด ซึ่งแต่ละโหมดจะมีการทำงานแตกต่างกันออกไปดังต่อไปนี้



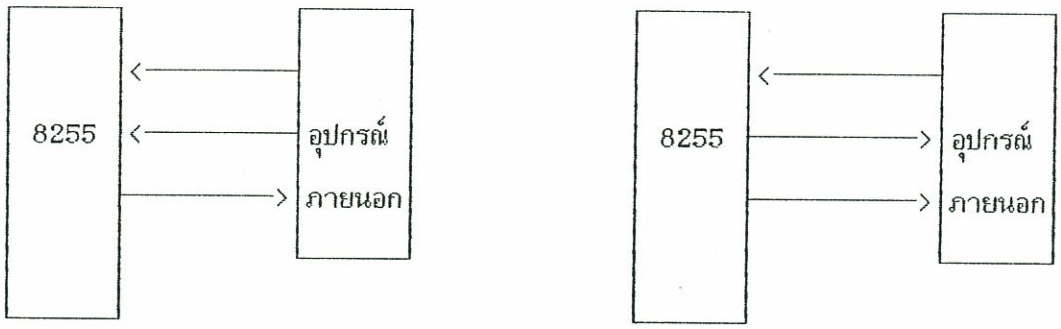
รูปที่ 18 แสดงรายละเอียดความหมายแต่ละบิตที่ใช้เป็นรหัสในการควบคุมพอร์ต

โหมด 0 (หรือโหมดพื้นฐานอินพุต/เอาต์พุต) การกำหนดโหมดการทำงาน ต้องมีการส่งข้อมูลโปรแกรมที่พอรต์ควบคุม (ในที่นี้หมายถึงพอร์ต 13 H) แต่ละบิตของข้อมูลที่ส่งไปจะมีความหมายในตัวเอง ลักษณะความหมายของแต่ละบิตที่เป็นรหัสในการควบคุมแสดงถึงรายละเอียดดังรูปที่ 18 ตัวอย่างเช่น ถ้า $D_7...D_0$ เป็น 1000 0000 = 80H จะหมายถึงโปรแกรมควบคุมให้ทุกพอร์ต (A, B และ C) เป็นเอาต์พุตพอร์ต เป็นต้น

การเขียนซอฟต์แวร์เพื่อให้ทุกพอร์ตเป็นเอาต์พุตพอร์ต โดยมีการส่งข้อมูล (เขียนข้อมูลค่า 23H ออกทางพอร์ต A, ค่า 41H ออกทางพอร์ต B และ 73 H ออกทางพอร์ต C ตามลำดับ รายละเอียดของโปรแกรมแสดงดังต่อไปนี้

```
XOR A
LD A, 80H
OUT (13h), A; ตั้งพอร์ตควบคุมให้ A, B และ C เป็นเอาต์พุต
LD A, 23H
OUT (10H), A; ส่งข้อมูล 23 H ออกทางพอร์ต A
LD a, 41H
OUT (11H), A; ส่งข้อมูล 41H ออกทางพอร์ต B
LD a, 73H
OUT (12H), A; ส่งข้อมูล 73H ออกทางพอร์ต C
```

โหมด 1 การทำงานในโหมดนี้มีการตรวจสอบ (handshaking) โดยใช้ I/O ของพอร์ต A และ B เป็นหลัก และพอร์ต C จะใช้เป็นพอร์ตในการตรวจสอบสัญญาณโดยที่พอร์ต C (บน) ตรวจสอบสำหรับพอร์ต A และพอร์ต C (ล่าง) ตรวจสอบสำหรับพอร์ต B ตามลำดับ แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานดังรูปที่ 19



(ก) อินพุต (ข) เอาต์พุต

รูปที่ 19 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงาน 8255 ในโหมด 1 แบบมีการตรวจสอบ

หน้าที่ของขาสัญญาณต่าง ๆ ของพอร์ต C ในการทำงานแบบตรวจสอบเมื่อ 8255 ทำงานในโหมด 1 แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การทำงานแบบตรวจสอบเมื่อ 8255 ทำงานในโหมด 1

ขา	อินพุต	เอาต์พุต
PC_0	$INTR_B$	$INTR_B$
PC_1	INF_B	OBF_B
PC_2	STB_B	ACK_B
PC_3	$INTR_A$	$INTR_A$
PC_4	STB_A	I/O
PC_5	IBF_A	I/O
PC_6	$I/_O$	ACK_A
PC_7	$I/_O$	OBF_A

โหมด 2 การทำงานในโหมด 2 8255 จะใช้พอร์ต A ทำหน้าที่เป็นพอร์ตสองทิศทาง (input/output) ส่วนพอร์ต C จะเป็นพอร์ตที่ทำหน้าที่ตรวจสอบที่สัญญาณแต่ละขา ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การตรวจสอบที่สัญญาณแต่ละขาของพอร์ต C

ขา	ความหมาย
PC_0	I/O
PC_1	I/O
PC_2	I/O
PC_3	INTR
PC_4	STB
PC_5	IBF
PC_6	ACK
PC_7	OBF

ในขณะที่พอร์ต A และ C ทำงานในโหมด 2 พอร์ต B เราสามารถจะโปรแกรมให้ทำงานในโหมด 0 หรือ 1 ก็ได้ ซึ่งสามารถแยกทำงานได้อย่างอิสระ