

ภาคผนวก ก

1. Mathematic 's Law

1.1 กฎของคราเมอร์(Cramer 's rule)

ทฤษฎีบท ให้ $a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_2$$

⋮

$$a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n = b_n$$

เป็นระบบสมการเชิงเส้น n สมการใน n ตัวแปร $A = [a_{ij}]_{n \times n}$

เป็นเมทริกซ์สัมประสิทธิ์ของระบบสมการ

$$B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}$$

ถ้า $|A| \neq 0$ แล้วระบบสมการมีผลเฉลยและมีผลเฉลยเดียวเท่านั้น

$$\text{โดยที่ } x_1 = \frac{|A_1|}{|A|}, x_2 = \frac{|A_2|}{|A|}, \dots, x_n = \frac{|A_n|}{|A|}$$

เมื่อ A_i คือเมทริกซ์ที่ได้จาก A โดยการแทนที่แนวตั้ง(column) ที่ i ของ A ด้วย B

1.2 กฎของโลปีตาล(L' Hopital 's rule)

ทฤษฎีบท สมมติว่า $f(a) = g(a) = 0$ โดยที่ $f'(a)$ และ $g'(a)$ ทาค่าได้

$$\text{และ } g'(a) \neq 0 \text{ แล้ว } \lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x)}{g(x)} = \frac{f'(a)}{g'(a)}$$

2. Electronic Principle

2.1 ความต้านทานไฟฟ้า(Resistance)

ขณะที่มีกระแสไฟฟ้าไหลในลวดทองแดง อิเล็กตรอนอิสระไม่เพียงแต่ปะทะซึ่งกันและกันเท่านั้น แต่ยังไปกระทบกับอิเล็กตรอนในอะตอมที่ไม่มีการเคลื่อนตัวของลวดทองแดงอีกด้วย ทำให้เกิดการต้านทานการไหลของอิเล็กตรอนอิสระหรือการไหลของกระแสไฟฟ้าซึ่งเรียกว่า **ความต้านทาน** ของวงจรไฟฟ้า

- ปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทานของตัวนำ

ความต้านทานของตัวนำทำหน้าที่ต้านการไหลของอิเล็กตรอน หรือการไหลของกระแสไฟฟ้าได้ดีเพียงใดขึ้นอยู่กับสมบัติเฉพาะของตัวนำ ได้แก่ ความยาว(L), ขนาดของตัวนำ(A), ความต้านทานจำเพาะของตัวนำนั้นๆ (ρ)

จึงได้ความสัมพันธ์

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad \dots(A-1)$$

- อุณหภูมิของตัวนำที่มีผลต่อความต้านทาน

จากการทดลองเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในตัวนำ พบว่าเมื่ออุณหภูมิในตัวนำสูงขึ้นความต้านทานย่อมมีค่าสูงขึ้นด้วย

จนได้ความสัมพันธ์

$$R = R_1[1 + \alpha(T_2 - T_1)] \quad \dots(A-2)$$

เมื่อ α = สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานในตัวนำที่ $20^\circ C$

R_1 = ความต้านทานที่ $20^\circ C$ (Ω)

R_2 = ความต้านทานเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง(Ω)

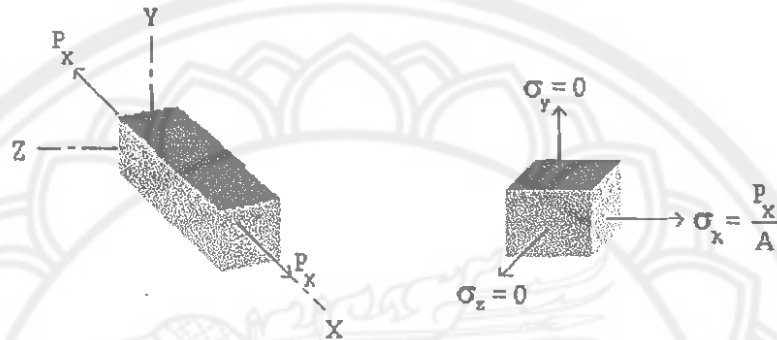
T_1 = อุณหภูมิเริ่มต้นที่ $20^\circ C$

T_2 = อุณหภูมิช่วงสุดท้ายที่เปลี่ยนแปลง ($^\circ C$)

3. Mechanic of Materials

3.1 อัตราส่วนของปัวซอง: น้ำหนักกระทำหลายแกน (Poisson's Ratio: Multiaxial Loading)

เมื่อวัสดุมีเนื้อเดียว (Homogeneous) ถูกน้ำหนักกระทำตามแนวแกนวัสดุนั้น ก็จะมีการเปลี่ยนรูปไปตามทิศทางที่น้ำหนักกระทำ เช่น แ่งวัสดุถูกแรงดึง แ่งวัสดุก็จะยืดออกไปตามแรงดึงนั้น ดังแสดงในรูปที่ A1



รูปที่ A1 การเปลี่ยนรูปเนื่องจากแรงตามแนวแกน (Axial deformation)

ถ้าหากความเค้นที่เกิดขึ้นไม่เกินขีดจำกัดสัดส่วนที่จะให้ความเครียด ซึ่งเป็นไปตามกฎของฮุก ดังนี้

$$\epsilon_x = \sigma_x / E \quad \dots(A-3)$$

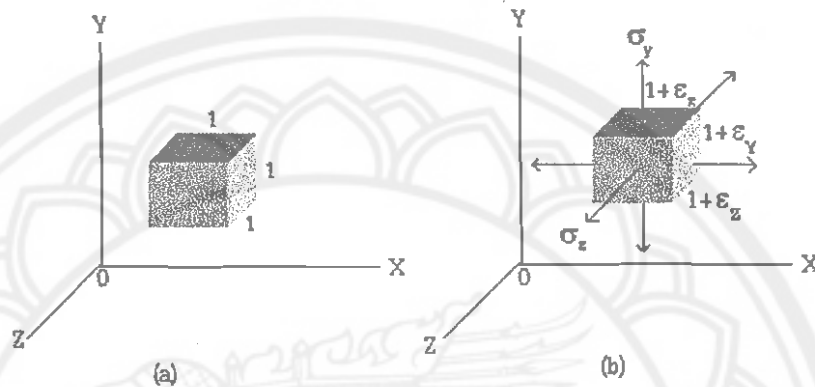
เนื่องจากไม่มีแรงกระทำในแนวแกน Y และแกน Z ดังนั้น $\sigma_y = 0$ และ $\sigma_z = 0$ จึงอาจจะคิดว่าไม่มีความเครียดเกิดขึ้นในแนวแกน Y และแกน Z ด้วย กล่าวคือ $\epsilon_y = 0$ และ $\epsilon_z = 0$ แต่จากการทดลองพบว่าวัสดุวิศวกรรมทุกชนิดเมื่อมีการยืดตัวเนื่องจากแรงดึงตามแนวแกนแล้วจะมีการหดตัวในทิศทางตั้งฉากกับการยืดตัวนั้นด้วย การหดตัวต่อหนึ่งหน่วยความยาวอันนี้เรียกว่า ความเครียดทางขวาง (Lateral strain) Simeon Denis Poisson (1781-1840) นักคณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศสพบว่า ภายใต้ขีดจำกัดสัดส่วนอัตราส่วนระหว่างความเครียดทางขวาง ต่อความเครียดตามแนวแกนมีค่าคงที่ จึงเรียกอัตราส่วนนี้ว่า อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's Ratio) ใช้สัญลักษณ์ ν (Nu)

ν = ความเครียดทางขวาง/ความเครียดตามแนวแกน

$$\nu = -\epsilon_y / \epsilon_x = -\epsilon_z / \epsilon_x \quad \dots(A-4)$$

หมายเหตุ : เครื่องหมายลบ แสดงว่าถ้ามีการยืดตัวตามแนวแกนก็จะมี การหดตัวทางขวาง

หากพิจารณาชิ้นส่วนเล็กสุด (Differential element) ที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ยาว ด้านละหนึ่งหน่วย ดังแสดงในรูปที่ A2 (a). เมื่อมีน้ำหนักกระทำทั้งสามทิศทาง ชิ้นส่วนเล็กสุด นี้จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงไปตามทิศทาง และขนาดของน้ำหนัก สมมุติให้ความยาวของด้าน สี่เหลี่ยมลูกบาศก์ตามแกน X แกน Y และแกน Z เป็น $1+\epsilon_x$, $1+\epsilon_y$, $1+\epsilon_z$ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ A2 (b).



รูปที่ A2 น้ำหนักกระทำหลายแกน (Multi-axial loading)

เนื่องจากมีน้ำหนักกระทำทั้งสามทิศทาง ดังนั้นการหาความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละทิศทางจะต้องนำเอาผลของอัตราส่วนของปัวซองมาคิดรวมไปด้วย การหาความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละทิศทางนี้กระทำได้โดยวิธีการรวมผล (Method of superposition) กล่าวคือหาความเครียดที่เกิดขึ้นในทิศทางหนึ่ง เนื่องจากน้ำหนักกระทำแต่ละน้ำหนัก แล้วนำความเครียดที่ได้แต่ละครั้งมารวมกันทางพีชคณิต แต่ทั้งนี้วิธีนี้จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อ

1. ความเครียดที่เกิดขึ้นจะต้องเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเค้น
2. การเปลี่ยนรูปของชิ้นส่วนเนื่องจากน้ำหนักกระทำจะต้องมีค่าน้อย และต้องไม่กระทบกระเทือนต่อภาวะการกระทำของน้ำหนักอื่น

ในกรณีของน้ำหนักกระทำหลายแกน เงื่อนไขข้อที่หนึ่งจะเป็นไปได้เมื่อความเค้นที่เกิดขึ้นไม่เกิดความเค้นที่ขีดจำกัดสัดส่วน และเงื่อนไขข้อที่สองจะเป็นไปได้เมื่อ ความเค้นที่เกิดขึ้นบนพื้นที่หน้าตัดจะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปพื้นที่หน้าตัดอื่น ๆ มากเกินไป จนกระทั่งทำให้มีผลกระทบกระเทือนต่อการคำนวณความเค้นที่เกิดขึ้นบนพื้นที่หน้าตัดนั้นๆ

จากผลของความเค้นที่เกิดขึ้นบนพื้นที่หน้าตัดในแต่ละทิศทาง และผลของอัตราส่วนของปัวซอง จะหาความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละทิศทางได้ดังนี้

พิจารณาผลของความเค้น σ_x ซึ่งจะทำให้เกิดความเครียดในแนวแกน x เท่ากับ σ_x/E และความเครียดในแนวแกน Y และแกน Z จาก (A-4) เท่ากับ $-v(\sigma_x/E)$ ในทำนองเดียวกันผลของความเค้น σ_y จะทำให้เกิดความเครียดในแนวแกน Y เท่ากับ σ_y/E และความเครียดในแนวแกน Z และแนวแกน X เท่ากับ $-v(\sigma_y/E)$ และผลของความเค้น σ_z จะทำให้เกิดความเครียดในแนวแกน Z เท่ากับ σ_z/E และความเครียดในแนวแกน X และแนวแกน Y เท่ากับ $-v(\sigma_z/E)$ เมื่อรวมผลของความเครียดเนื่องจากความเค้นในแนวแกนทั้งสาม จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\epsilon_x &= (1/E)(\sigma_x - v\sigma_y - v\sigma_z) \\ \epsilon_y &= (1/E)(\sigma_y - v\sigma_z - v\sigma_x) \\ \epsilon_z &= (1/E)(\sigma_z - v\sigma_x - v\sigma_y)\end{aligned}\quad \dots(A-5)$$

จากสมการ (A-5) สามารถหาความเค้นในแนวแกน X แกน Y และแกน Z ในรูปของความเครียดและอัตราส่วนของปัวซองได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\sigma_x &= [(1-v)\epsilon_x + v\epsilon_y + v\epsilon_z] E / (1+v)(1-2v) \\ \sigma_y &= [v\epsilon_x + (1-v)\epsilon_y + v\epsilon_z] E / (1+v)(1-2v) \\ \sigma_z &= [v\epsilon_x + v\epsilon_y + (1-v)\epsilon_z] E / (1+v)(1-2v)\end{aligned}\quad \dots(A-6)$$

ถ้าหากมีน้ำหนักกระทำเพียงในแนวแกน X และแกน Y ก็จะได้ความเครียดและความเค้นในแนวแกนทั้งสองดังนี้

$$\begin{aligned}\epsilon_x &= (1/E)(\sigma_x - v\sigma_y) \\ \epsilon_y &= (1/E)(\sigma_y - v\sigma_x)\end{aligned}\quad \dots(A-7)$$

และ

$$\begin{aligned}\sigma_x &= (\epsilon_x + v\epsilon_y)E / (1-v^2) \\ \sigma_y &= (\epsilon_y + v\epsilon_x)E / (1-v^2)\end{aligned}\quad \dots(A-8)$$

การคิดเครื่องหมาย (Sign Convention)

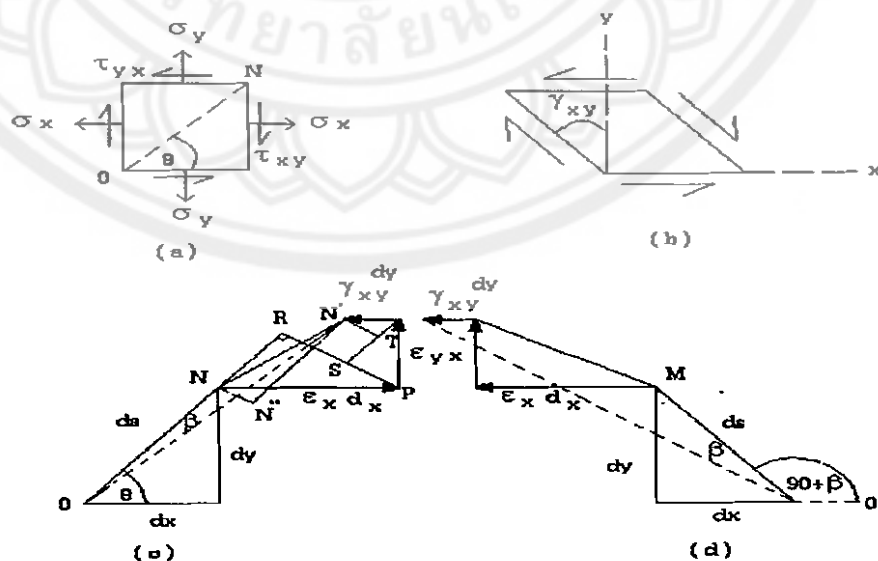
1. ความเครียดดึง (Tensile strain) และความเครียดเฉือน (Shearing strain) ที่ทำให้เกิดมาจากด้านสองด้านของชิ้นส่วนเล็กสุด (Differential element) กลายเป็นมุมป้านมีเครื่องหมายเป็นบวก

2. ความเครียดอัด (Compressive strain) และความเครียดเฉือน (Shearing strain) ที่ทำให้มุมฉากซึ่งเกิดจากด้านสองด้านของชิ้นส่วนเล็กสุด (Differential element) กลายเป็นมุมแหลมมีเครื่องหมายเป็นลบ

3.2 การแปลงความเครียด (Transformation of Strain Components)

ในการออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมนั้น มีหลักว่าจะต้องออกแบบให้โครงสร้างรับน้ำหนักได้ตามต้องการ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือจะต้องออกแบบให้ความเค้นที่เกิดขึ้นในโครงสร้างเท่ากับ หรือน้อยกว่าความเค้นที่ยอมให้ของโครงสร้างนั้นๆ เมื่อนำหนักกระทำกับโครงสร้างที่ประกอบด้วยวัสดุเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และมีรูปทรงเรขาคณิต (Prismatic shape) เราสามารถคำนวณหาความเค้นที่เกิดขึ้นในโครงสร้างได้โดยวิธีกล่าวมาแล้วข้างต้น แต่ในบางกรณีโครงสร้างมีรูปทรงที่ผิดปกติ หรือมีเงื่อนไขไม่เป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ของสูตรที่คำนวณหาความเค้นต่างๆ จึงจำเป็นต้องหาวิธีเพื่อหาความเค้นที่เกิดขึ้นให้ได้ วิธีที่ดีที่สุดคือวิธีทดลอง (Experimental method) แต่ความเค้นเป็นค่าที่แสดงถึงความเข้มของแรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ซึ่งไม่สามารถวัดได้โดยตรง ส่วนความเครียดสามารถวัดได้ จากนั้นก็ใช้ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดซึ่งเป็นไปตามกฎของฮุค (Hooke's law) เปลี่ยนค่าของความเครียดให้เป็นความเค้นที่ต้องการ

พิจารณาชิ้นส่วนเล็กสุดซึ่งอยู่ในสถานะความเค้นดังแสดงในรูปที่ A3 (a) สมมุติให้ความเค้นตั้งฉากเป็นความเค้นดึง ซึ่งจะตั้งให้ชิ้นส่วนเล็กสุดนี้ยืดออกไปตามแกน X และแกน Y และความเค้นเฉือนทำให้ชิ้นส่วนเล็กสุดบิดเปลี่ยนแปลงรูปร่างไป ดังแสดงในรูปที่ A3 (b) เท่ากับความเครียดเฉือน γ_{xy} ผลของความเครียดตั้งฉาก และความเครียดเฉือนทำให้เส้นชิ้นส่วน (Line element) ON ยืดออกไปเป็น ON' และเปลี่ยนค่าของมุม θ ออกไปเล็กน้อยเท่ากับ β ดังแสดงในรูป A3 (c)



รูปที่ A3 การแปลงความเครียด (Transformation of Strain Components)

กำหนดให้

จุด N เคลื่อนที่ไปตามแกน X เนื่องจากความเค้นตั้งฉาก $\sigma_x = \epsilon_x dx$

จุด N เคลื่อนที่ไปตามแกน Y เนื่องจากความเค้นตั้งฉาก $\sigma_y = \epsilon_y dy$

จุด N เคลื่อนที่ไปตามแกน X เนื่องจากความเค้นเฉือน $\tau_{xy} = \gamma_{xy} dy$

$$NN'' = NR + OS - QT$$

$$NN'' = \epsilon_x dx \cos\theta + \epsilon_y dy \sin\theta - \gamma_{xy} dy \cos\theta$$

$$\frac{N'N''}{ds} = \frac{\epsilon_x dx \cos\theta}{ds} + \frac{\epsilon_y dy \sin\theta}{ds} - \frac{\gamma_{xy} dy \cos\theta}{ds}$$

แต่

$$\frac{N'N''}{ds} = \epsilon_n, \quad \frac{dx}{ds} = \cos\theta; \quad \frac{dy}{ds} = \sin\theta$$

$$\epsilon_n = \epsilon_x \cos^2\theta + \epsilon_y \sin^2\theta - \gamma_{xy} \sin\theta \cos\theta$$

$$\epsilon_n = \epsilon_x \frac{1 + \cos 2\theta}{2} + \epsilon_y \frac{1 - \cos 2\theta}{2} - \frac{\gamma_{xy} \sin 2\theta}{2}$$

$$\epsilon_n = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 2\theta - \frac{1}{2} \gamma_{xy} \sin 2\theta \quad \dots(A-9)$$

เรียก ϵ_n ว่าความเครียดตั้งฉาก (Normal strain)

$$NN'' = PR - PS - N'T$$

$$NN'' = \epsilon_x dx \sin\theta - \epsilon_y dy \cos\theta - \gamma_{xy} dy \sin\theta$$

$$\frac{NN''}{ds} = \frac{\epsilon_x dx \sin\theta}{ds} - \frac{\epsilon_y dy \cos\theta}{ds} - \frac{\gamma_{xy} dy \sin\theta}{ds}$$

$$\beta = \epsilon_x \sin\theta \cos\theta - \epsilon_y \sin\theta \cos\theta - \gamma_{xy} \sin^2\theta \quad \dots(A-10)$$

พิจารณาเส้นชิ้นส่วน OM ซึ่งทำมุม 90° กับเส้นชิ้นส่วน ON เราสามารถหาค่าที่เปลี่ยนไปของ

มุม θ อีกด้านหนึ่ง ซึ่งในที่นี้ คือ β' ได้โดยแทนค่ามุม θ ในสมการ (A-10) ด้วยมุม $90^\circ + \theta$ ดังนี้

$$\beta' = \epsilon_x \sin(90^\circ + \theta) \cos(90^\circ + \theta) - \epsilon_y \sin(90^\circ + \theta) \cos(90^\circ + \theta) - \gamma_{xy} \sin^2(90^\circ + \theta)$$

$$\beta' = -\epsilon_x \sin\theta \cos\theta + \epsilon_y \sin\theta \cos\theta - \gamma_{xy} \cos^2\theta \quad \dots(A-11)$$

แต่มุม β และ β' หมุนไปในทิศทางตรงกันข้าม กล่าวคือถ้ามุม β หมุนตามเข็มนาฬิกา มุม β' จะหมุนทวนเข็มนาฬิกา ดังแสดงในรูปที่ A3 (d) ดังนั้นผลรวมสมบูรณ์ (Absolute sum) ของมุมทั้งสองจะมีค่าเท่ากับผลต่างทางพีชคณิต (Algebraic difference) นั่นคือค่าที่เปลี่ยนไปของมุมจาก NOM ซึ่งเกิดจากด้านตั้งฉาก ON และ OM ของชิ้นส่วนเล็กสุดซึ่งเลือกทำมุม θ กับแกน X-Y ซึ่งหมายถึงความเครียดเฉือน γ_{nm} (Shearing strain) ของชิ้นส่วนเล็กสุดนี้มีค่าเท่ากับ (A-10) ลบด้วย (A-11)

$$\gamma_{nm} = \epsilon_x (2 \sin\theta \cos\theta) - \epsilon_y (2 \sin\theta \cos\theta) + \gamma_{xy} (\cos^2\theta - \sin^2\theta)$$

$$\gamma_{nm} = \epsilon_x \sin 2\theta - \epsilon_y \sin 2\theta + \gamma_{xy} \cos 2\theta$$

$$\gamma_{nm} = (\epsilon_x - \epsilon_y) \sin 2\theta + \gamma_{xy} \cos 2\theta$$

$$\frac{1}{2} \gamma_{nm} = \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \sin 2\theta + \frac{1}{2} \gamma_{xy} \cos 2\theta \quad \dots(A-12)$$

γ_{nm} หมายถึง ความเครียดเฉือนบนด้านตั้งฉากสองด้านซึ่งในที่นี้คือ ON และ OM อักษรกำกับข้างใต้ตัวแรก (n) หมายถึง ด้านที่ทำมุม θ กับแกน X(ON) และอักษรกำกับข้างใต้ตัวหลัง (m) หมายถึง ด้านที่ทำมุมฉากกับด้านแรก (OM)

หากเปรียบเทียบ (A-9) และ (A-12) จะเห็นว่ารูปแบบคล้ายกัน ยกเว้นค่าของความเครียดเฉือนจะลดลงครึ่งหนึ่งและเนื่องจากรูปแบบที่คล้ายคลึงกันนี้สามารถเขียนวงกลมของมอร์เพื่อหาความเครียดที่ระนาบต่างๆ โดยวิธีการเช่นเดียวกันกับการเขียนวงกลมของมอร์เพื่อหาความเค้น เพียงแต่พิกัดตามแกนตั้ง (Ordinate) ซึ่งเป็นค่าของความเครียดเฉือนลดลงเหลือเพียงครึ่งเดียว

ในทำนองเดียวกัน สามารถหาค่าของความเครียดประธานได้จากสมการข้างล่างนี้

$$\epsilon_{\max, \min} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \quad \dots(A-13)$$

ค่าของความเครียดเฉือนมากที่สุด และน้อยที่สุดจากสมการ

$$\frac{1}{2}\gamma_{\max,\min} = \pm \sqrt{\left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \quad \dots(\text{A-14})$$

มุมที่ระนาบมีค่าความเครียดตั้งฉากมากที่สุด

$$\tan 2\theta_\epsilon = -\frac{\gamma_{xy}}{\epsilon_x - \epsilon_y} \quad \dots(\text{A-15})$$

มุมที่ระนาบมีค่าความเครียดเฉือนมากที่สุด

$$\tan 2\theta_\gamma = \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{\gamma_{xy}} \quad \dots(\text{A-16})$$

การคิดเครื่องหมาย (Sign Convention)

1. ความเครียดตั้งฉากดึง (Tensile strain) มีค่าเป็นบวก และความเครียดตั้งฉากอัด (Compressive strain) มีค่าเป็นลบ

2. ความเครียดเฉือน (Shearing strain) ที่ทำให้มุมฉากซึ่งเกิดจากด้านสองด้านทำขึ้นส่วนเล็กสุดกลายเป็นมุมป้าน หรือทำให้ด้านที่ทำมุม θ กับแกน X หมุนตามเข็มนาฬิกา มีค่าเป็นบวก
อย่างไรก็ดี การเขียนวงกลมของมอร์สำหรับความเครียดสามารถเขียนซ้อนกับวงกลมของมอร์สำหรับความเค้นโดยจุดศูนย์กลางของวงกลมเดียวกันได้จากสัดส่วนดังนี้

$$R_\sigma = R_\epsilon \frac{E}{1+\nu} \quad \dots(\text{A-17})$$

$$C_\sigma = C_\epsilon \frac{E}{1-\nu} \quad \dots(\text{A-18})$$

เมื่อ

R_σ = รัศมีของวงกลมของมอร์สำหรับความเค้น

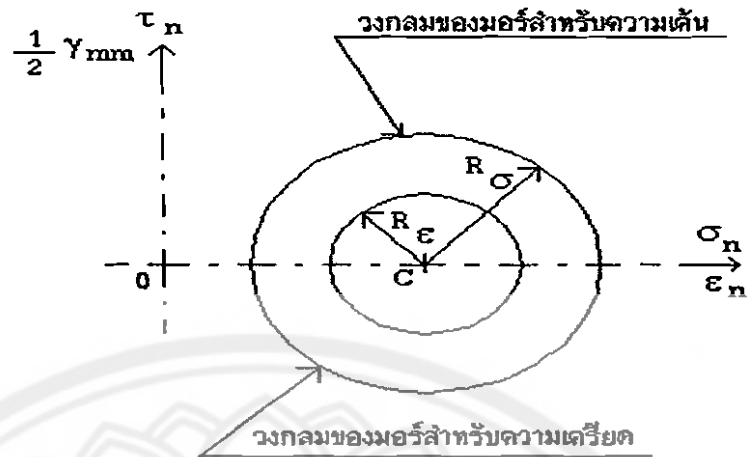
R_ϵ = รัศมีของวงกลมของมอร์สำหรับความเครียด

C_σ = ระยะเยื้องจุดศูนย์กลางของวงกลมของมอร์สำหรับความเค้น

C_ϵ = ระยะเยื้องจุดศูนย์กลางของวงกลมของมอร์สำหรับความเครียด

E = โมดูลัสแห่งความยืดหยุ่น

ν = อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's ratio)



รูปที่ A4 การแปลงวงกลมของมอร์สำหรับความเครียดเป็นวงกลมของมอร์สำหรับความเค้น
(Transformation of Mohr's circle of strains to Mohr's circle of stress)

ตัวอย่างที่ 1 ที่จุดๆ หนึ่งในวัสดุมีความเครียดดังนี้ $\epsilon_x = 800 \times 10^{-6}$ ม./ม.

$\epsilon_y = 200 \times 10^{-6}$ ม./ม. และ $\gamma_{xy} = 600 \times 10^{-6}$ เรเดียน จงคำนวณหา

- ความเครียดประธานและแกนของความเครียดประธาน
- ความเครียดตั้งฉาก ϵ_x ในทิศทางซึ่งทำมุม 60° กับแกน X และความเครียดตั้งฉาก ϵ_y ในทิศทางตั้งฉากกับ ϵ_x และความเครียดเฉือน γ_{xy}
- ถ้า $E = 200 \times 10^9$ นิวตัน/ม². และ $\nu = 0.30$ จงคำนวณหาค่าของความเค้นประธาน และความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือนบนชิ้นส่วนเล็กที่สุดซึ่งอยู่ในทิศทางทำมุม 60° กับแกน X

(1) โดยใช้สูตร

- ความเครียดประธาน และแกนของความเครียดประธาน

$$\epsilon_{\max, \min} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2}$$

$$\epsilon_{\max, \min} = \frac{800 \times 10^{-6} + 200 \times 10^{-6}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{800 \times 10^{-6} - 200 \times 10^{-6}}{2}\right)^2 + \left(\frac{600 \times 10^{-6}}{2}\right)^2}$$

$$= 500 \times 10^{-6} \pm 424 \times 10^{-6}$$

$$\epsilon_{\max, \min} = 500 \times 10^{-6} \pm 424 \times 10^{-6}$$

$$\epsilon_{\max} = 924 \times 10^{-6} \quad \text{m/m (แรงดึง.)} \quad \text{Ans}$$

$$\epsilon_{\min} = 76 \times 10^{-6} \quad \text{m/m (แรงดึง.)} \quad \text{Ans}$$

$$\tan 2\theta_{\epsilon} = -\frac{\gamma_{xy}}{\epsilon_x - \epsilon_y} = -\frac{600 \times 10^{-6}}{800 \times 10^{-6} - 200 \times 10^{-6}} = -1$$

$$2\theta_{\epsilon} = -45^{\circ}$$

$$\theta_{\epsilon} = -22.5^{\circ} \text{ (ตามเข็มนาฬิกา)} \quad \text{Ans}$$

ข. ความเครียดตั้งฉาก ϵ_a , ϵ_b และความเครียดเฉือน γ_{ab}

$$\epsilon_n = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 2\theta - \frac{1}{2} \gamma_{xy} \sin 2\theta$$

$$\epsilon_a = \frac{800 \times 10^{-6} + 200 \times 10^{-6}}{2} + \frac{800 \times 10^{-6} - 200 \times 10^{-6}}{2} \cos 120^{\circ} - \frac{600 \times 10^{-6}}{2} \sin 102^{\circ}$$

$$= 500 \times 10^{-6} - 150 \times 10^{-6} - 260 \times 10^{-6}$$

$$= 90 \times 10^{-6} \text{ m/m (แรงดึง.)} \quad \text{Ans}$$

$$\epsilon_b = \frac{800 \times 10^{-6} + 200 \times 10^{-6}}{2} + \frac{800 \times 10^{-6} - 200 \times 10^{-6}}{2} \cos (300^{\circ}) - \frac{600 \times 10^{-6}}{2} \sin (300^{\circ})$$

$$= 500 \times 10^{-6} + 150 \times 10^{-6} + 260 \times 10^{-6}$$

$$= 910 \times 10^{-6} \text{ m/m (แรงดึง.)}$$

$$\frac{1}{2} \gamma_{nm} = \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \sin 2\theta + \frac{1}{2} \gamma_{xy} \cos^2 \theta$$

$$\frac{1}{2} \gamma_{ab} = \frac{800 \times 10^{-6} + 200 \times 10^{-6}}{2} \sin(120^\circ) + \frac{600 \times 10^{-6}}{2} \cos(120^\circ)$$

$$= 260 \times 10^{-6} - 150 \times 10^{-6}$$

$$= 110 \times 10^{-6} \text{ rad.}$$

$$\gamma_{ab} = 220 \times 10^{-6} \text{ rad. (ตามเข็มนาฬิกา)}$$

Ans

ค. ความเค้นประชัน, ความเค้นตั้งฉาก σ_a, σ_b และความเค้นเฉือน τ_{ab} จากกฎของฮุค

(Hooke's law)

$$\sigma_x = \frac{(\epsilon_x + \nu \epsilon_y) E}{1 - \nu^2}$$

$$\sigma_y = \frac{(\epsilon_y + \nu \epsilon_x) E}{1 - \nu^2}$$

$$\tau_{xy} = \frac{\gamma_{xy} E}{2(1 + \nu)}$$

$$\sigma_{max} = \frac{(924 \times 10^{-6} + 0.3 \times 76 \times 10^{-6}) 200 \times 10^9}{1 - 0.09}$$

$$= 208 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

$$= 208 \text{ Mpa (แรงดึง.)}$$

Ans

$$\sigma_{min} = \frac{(76 \times 10^{-6} + 0.3 \times 924 \times 10^{-6}) 200 \times 10^9}{1 - 0.09}$$

$$= 77.6 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

$$C = OC = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} = \frac{800 \times 10^{-6} + 200 \times 10^{-6}}{2}$$

$$= 500 \times 10^{-6} \text{ m/m}$$

$$CD = OD - OC = 800 \times 10^{-6} - 600 \times 10^{-6}$$

$$= 300 \times 10^{-6} \text{ m/m}$$

$$R = AC = \sqrt{AD^2 + CD^2}$$

$$= \sqrt{(300 \times 10^{-6})^2 + (300 \times 10^{-6})^2}$$

$$= 424 \times 10^{-6} \text{ m/m}$$

ก. ความเครียดประธานและแกนของความเครียดประธาน

$$\epsilon_{\max} = OF = OC + R = 500 \times 10^{-6} + 424 \times 10^{-6}$$

$$= 924 \times 10^{-6} \text{ m/m (แรงดึง.)}$$

$$\epsilon_{\min} = OG = OC - R = 500 \times 10^{-6} - 424 \times 10^{-6}$$

$$= 76 \times 10^{-6} \text{ m/m (แรงดึง.)}$$

$$\tan 2\theta_{\epsilon} = \frac{AD}{CD} = \frac{300 \times 10^{-6}}{300 \times 10^{-6}} = 1$$

$$2\theta_{\epsilon} = 45^{\circ}$$

$$\theta_{\epsilon} = 22.5^{\circ} \text{ (ทวนเข็มนาฬิกา)}$$

ข. ความเครียดตั้งฉาก ϵ_a , ϵ_b และความเครียดเฉือน γ_{ab}

$$\epsilon_a = OJ = OC - R \cos 15^{\circ} = 500 \times 10^{-6} - 424 \times 10^{-6} \cos 15^{\circ}$$

$$= 500 \times 10^{-6} - 410 \times 10^{-6} = 90 \times 10^{-6} \text{ m/m (แรงดึง.) Ans}$$

$$\epsilon_b = OK = OC + R \cos 15^{\circ} = 500 \times 10^{-6} + 424 \times 10^{-6} \cos 15^{\circ}$$

$$= 500 \times 10^{-6} + 410 \times 10^{-6} = 910 \times 10^{-6} \text{ m/m (แรงดึง.) Ans}$$

$$\frac{1}{2} \gamma_{ab} = HJ = R \sin 15^{\circ} = 424 \times 10^{-6} \sin 15^{\circ}$$

$$= 110 \times 10^{-6} \text{ rad}$$

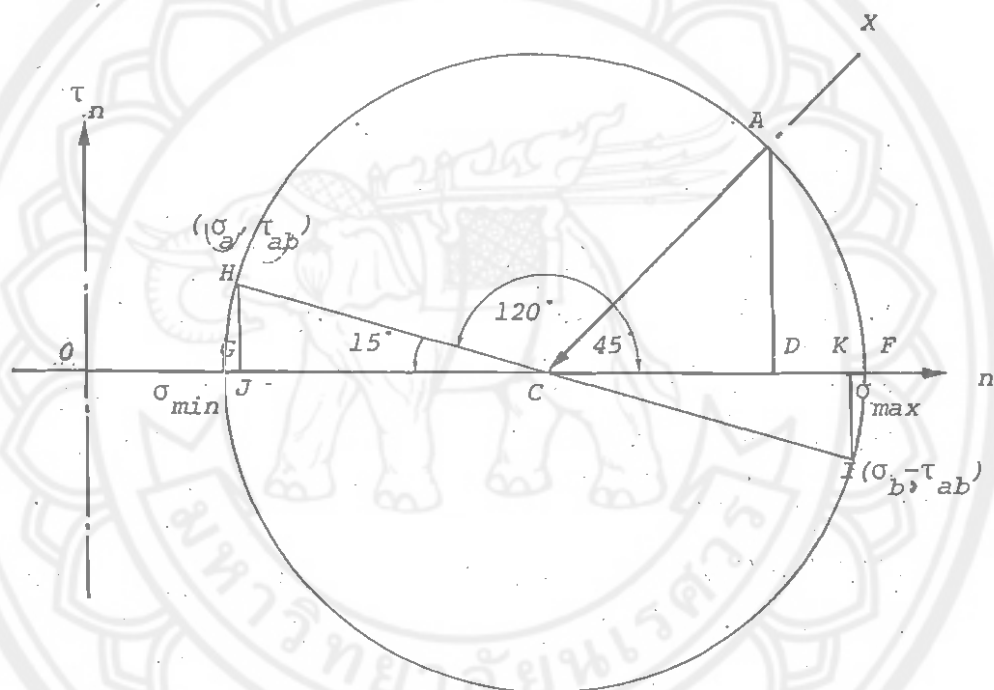
$$\gamma_{ab} = 220 \times 10^{-6} \text{ rad (ตามเข็มนาฬิกา)}$$

Ans

ค. ความเค้นประชัน, ความเค้นตั้งฉาก σ_a , σ_b และความเค้นเฉือน τ_{ab}

$$\begin{aligned} R_{\sigma} &= R_{\epsilon} \frac{E}{1+\nu} = 424 \times 10^6 \frac{200 \times 10^9}{1+0.30} \\ &= 65.2 \times 10^6 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{\sigma} &= C_{\epsilon} \frac{E}{1-\nu} = 500 \times 10^6 \frac{200 \times 10^9}{1-0.30} \\ &= 143 \times 10^6 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= OC + R = 143 \times 10^6 + 65.2 \times 10^6 = 208.2 \times 10^6 \text{ N/m}^2 \\ &= 208.2 \text{ MPa (แรงดึง.)} \end{aligned}$$

Ans

$$\begin{aligned} \sigma_{\min} &= OC - R = 143 \times 10^6 - 65.2 \times 10^6 = 77.8 \times 10^6 \text{ N/m}^2 \\ &= 77.8 \text{ MPa (แรงดึง.)} \end{aligned}$$

Ans

$$\begin{aligned} \sigma_a &= OJ = OC - R \cos 15^\circ = 143 \times 10^6 - 65.2 \times 10^6 \cos 15^\circ \\ &= 143 \times 10^6 - 63 \times 10^6 = 80 \times 10^6 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

Ans

$$\begin{aligned}\sigma_b &= OK = OC + R \cos 15^\circ = 143 \times 10^6 + 65.2 \times 10^6 \cos 15^\circ \\ &= 143 \times 10^6 - 63 \times 10^6 = 206 \times 10^6 \sin 15^\circ \\ &= 206 \text{ MPa (แรงดึง.)}\end{aligned}$$

Ans

$$\begin{aligned}\tau_{ab} &= HJ = R \sin 15^\circ = 65.2 \times 10^6 \sin 15^\circ \\ &= 16.9 \times 10^6 \text{ N/m}^2 \\ &= 16.9 \text{ MPa (ตามเข็มนาฬิกา)}\end{aligned}$$

3.3 ความเครียดโรเซตต์ (The Strain Rosette)

จากหัวข้อที่ 3.2 จะเห็นว่าเราสามารถหาความเค้นที่เกิดขึ้นในวัสดุได้จาก ความเครียดซึ่งวัดได้จากการทดลองและโดยอาศัยทฤษฎีของความยืดหยุ่น (Elastic theory) ตามปกติความเครียดจะมีค่าน้อยมากซึ่งเครื่องมือวัดความเครียด (Strain gage) จะต้องมีความไว (Sensitivity) มากพอควร แต่เดิมเครื่องมือวัดความเครียด เป็นเครื่องมือวัดความเครียดทางกล (Mechanical strain gage) หรือใช้วัดด้วยสายตา (Optical strain gage) ปัจจุบันนี้ได้พัฒนาขึ้นมาเป็นเครื่องมือวัดความเครียดด้วยไฟฟ้า (Electrical strain gage) ซึ่งประกอบด้วยเส้นลวดเล็กๆ บาง ๆ ซึ่งมีค่าความต้านทานไฟฟ้า (Electrical resistance) เปลี่ยนไปตามความยืดหดของเส้นลวด ดังแสดงในรูปที่ A5

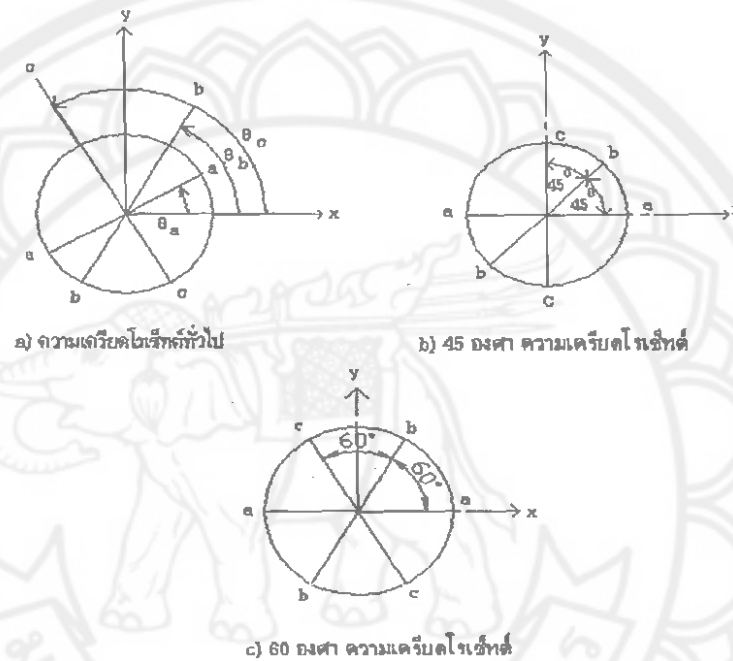


รูปที่ A5 เครื่องวัดความเครียดไฟฟ้า (Electrical strain gage)

การใช้เครื่องวัดความเครียดไฟฟ้าทำได้โดยนำเอาไปติดกับผิวของวัสดุที่ต้องการวัด แล้วต่อสายไฟฟ้าจากเครื่องวัดความเครียดไฟฟ้าไปยังเครื่องวัดความต้านทาน ซึ่งจะแปลงความต้านทานที่อ่านได้มาเป็นความเครียดอีกทีหนึ่ง ในกรณีที่วัสดุมีความเค้นเกิดขึ้นเพียงแกนเดียว (Uniaxial stress) เราสามารถหาความเค้นได้โดยง่าย เพียงแต่ติดเครื่องวัดความเครียดไฟฟ้าในทิศทางที่จะเกิดความเค้น ซึ่งเมื่อวัดความเครียดได้ก็คำนวณหาความเค้นได้จากสูตร $\sigma = E\epsilon$ หรือในกรณีของความเค้นสองแกน (Biaxial stress) เครื่องวัดความเครียดไฟฟ้าเพียงสองอันก็อาจพอเพียง แต่ทั้งนี้จำเป็นจะต้องรู้ทิศทางของความเค้นประมาณเสียก่อน ซึ่งส่วนมากจะไม่ทราบทิศทางของความเค้นประมาณ การที่จะหาขนาด

และทิศทางของความเค้นประชัน จำเป็นจะต้องทราบความเครียดสามค่า กล่าวคือ ϵ_x และแต่ เครื่องมือวัดความเครียดไฟฟ้า สามารถวัดได้เฉพาะความเครียดตั้งฉาก (Normal strain) เท่านั้น ยัง ไม่มีเครื่องมือที่วัดความเครียดเฉือน (Shearing strain) ได้ ในขณะนี้ จึงจำเป็นต้องหาวิธีคำนวณ ค่าความเครียดเฉือนจากความเครียดตั้งฉากที่วัดได้

พิจารณาสภาวะความเครียดที่จุดๆ หนึ่ง ซึ่งมีความเครียดตั้งฉากสามค่า ϵ_a , ϵ_b และ ϵ_c ใน ทิศทางทำมุมกับแกน X ตามลำดับ คือ θ_a , θ_b และ θ_c ดังแสดงในรูปที่ A6 (a)



รูปที่ A6 ความเครียดโรเซตต์ (Strain rosette)

จาก (A-9) อาจเขียนสมการความเครียดตั้งฉาก ϵ_a , ϵ_b และ ϵ_c ในรูปของความเครียด ตั้งฉาก ϵ_x และ ϵ_y และความเครียดเฉือน γ_{xy} ได้ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_a &= \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 2\theta_a - \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta_a \\ \epsilon_b &= \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 2\theta_b - \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta_b \\ \epsilon_c &= \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 2\theta_c - \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta_c \end{aligned} \right\} \dots(A-19)$$

จาก (A-19) มีตัวไม่รู้ค่าสามค่าคือ ϵ_x , ϵ_y , และ γ_{xy} แต่มีสามสมการสามารถหาค่าของมัน ออกมาได้ในรูปแบบของ ϵ_a , ϵ_b , และ ϵ_c จากนั้นนำค่าของ ϵ_x , ϵ_y , และ γ_{xy} มาหาค่าและทิศทางของความเค้นประชันได้

โดยทั่วไปเพื่อความสะดวกในการคำนวณจะติดเครื่องวัดความเครียดไฟฟ้า โดยให้อันแรกมีแกนอยู่ในทิศทางของแกน X สองอันต่อไปทำมุมเท่ากัน เช่นในรูปที่ A6 (b) ทำมุม 45° ซึ่งกันและกัน ในรูปที่ A6 (c) ทำมุม 60° ซึ่งกันและกัน ซึ่งการติดเครื่องวัดไฟฟ้าในลักษณะนี้เรียกว่าความเครียดโรเซตต์ (Strain rosettes)

เครื่องวัดไฟฟ้าที่ทำมุม 45° ซึ่งกันและกันมีชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าความเครียดโรเซตต์มุมฉาก (Rectangular strain rosette) ส่วนที่ทำมุม 60° ซึ่งกันและกัน เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ความเครียดโรเซตต์มุมเท่า (Equiangular strain rosette) แต่หากทำมุม 120° ซึ่งกันและกันเราเรียกว่าความเครียดโรเซตต์สามเหลี่ยม (Delta rosette)

การหาความเครียดประชันจากความเครียดโรเซตต์ชนิดต่างๆ ดังนี้

3.3.1 ความเครียดโรเซตต์มุมฉาก (Rectangular strain rosette)

$$\theta_a = 0^\circ, \theta_b = 45^\circ, \text{ and } \theta_c = 90^\circ$$

จาก (A-19)

$$\epsilon_a = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 0^\circ - \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 0^\circ$$

$$\epsilon_a = \epsilon_x \quad \dots(\text{A-20})$$

$$\epsilon_b = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 90^\circ - \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 90^\circ$$

$$\epsilon_b = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} - \frac{\gamma_{xy}}{2} \quad \dots(\text{A-21})$$

$$\epsilon_c = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 180^\circ - \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 180^\circ$$

$$\epsilon_c = \epsilon_y \quad \dots(\text{A-22})$$

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \epsilon_a \\ \epsilon_y &= \epsilon_c \\ \text{จาก (A-21), } \frac{1}{2} \gamma_{xy} &= \frac{\epsilon_a + \epsilon_c}{2} - \epsilon_b \end{aligned} \right\} \dots(\text{A-23})$$

$$R = \sqrt{\frac{\epsilon_a^2}{2} + \frac{\epsilon_c^2}{2} - \frac{2\epsilon_a\epsilon_b}{2} - \frac{2\epsilon_b\epsilon_c}{2} + \frac{2\epsilon_a^2}{2}}$$

$$R = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\epsilon_a - \epsilon_b)^2 + (\epsilon_b - \epsilon_c)^2}$$

$$\epsilon_{\max, \min} = \frac{\epsilon_a + \epsilon_c}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\epsilon_a - \epsilon_b)^2 + (\epsilon_b - \epsilon_c)^2} \quad \dots(A-24)$$

3.3.2 ความเครียดโรเซตต์มุมเท่า (Equiangular strain rosette)

$$\theta_a = 0^\circ, \theta_b = 60^\circ, \text{ and } \theta_c = 120^\circ$$

จากสมการ (A-19)

$$\epsilon_a = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 0^\circ - \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 0^\circ$$

$$\epsilon_a = \epsilon_x$$

...(A-25)

$$\epsilon_b = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 120^\circ - \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 120^\circ$$

$$\epsilon_b = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} - \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} - \frac{\sqrt{3}}{4} \gamma_{xy}$$

$$\epsilon_b = \frac{2\epsilon_a + \epsilon_b + \epsilon_c}{3} + \frac{3\epsilon_y}{4} - \frac{\sqrt{3}}{4} \gamma_{xy}$$

...(A-26)

$$\epsilon_c = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{4} + \frac{\sqrt{3}}{4} \gamma_{xy}$$

$$\epsilon_c = \frac{2\epsilon_a + \epsilon_b + \epsilon_c}{3} + \frac{3\epsilon_y}{4} + \frac{\sqrt{3}}{4} \gamma_{xy}$$

...(A-27)

จาก (A-26) + (A-27)

$$\epsilon_b + \epsilon_c = \frac{\epsilon_x}{2} + \frac{3\epsilon_y}{2} - \frac{\epsilon_a}{2} + \frac{3\epsilon_y}{2}$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{3} (2\epsilon_b + 2\epsilon_c - \epsilon_a)$$

...(A-28)

$$OC = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} = \frac{\epsilon_a + \frac{2\epsilon_b}{3} + \frac{2\epsilon_c}{3} - \frac{\epsilon_a}{3}}{2}$$

$$OC = \frac{\epsilon_a + \epsilon_b + \epsilon_c}{3}$$

$$CE = \epsilon_a - \frac{\epsilon_a + \epsilon_b + \epsilon_c}{3} = \frac{2\epsilon_a - \epsilon_b - \epsilon_c}{3}$$

$$AE = \frac{1}{2}\gamma_{xy} = \frac{1}{\sqrt{3}}(\epsilon_c - \epsilon_b)$$

$$R = \sqrt{(CE)^2 + (AE)^2} = \sqrt{\left(\frac{2\epsilon_a - \epsilon_b - \epsilon_c}{3}\right)^2 + \frac{1}{3}(\epsilon_c - \epsilon_b)^2}$$

$$R = \sqrt{\frac{1}{9}(4\epsilon_a^2 + \epsilon_b^2 + \epsilon_c^2 - 4\epsilon_a\epsilon_b + 2\epsilon_b\epsilon_c - 4\epsilon_c\epsilon_a) + \frac{1}{3}(\epsilon_c^2 - 2\epsilon_b\epsilon_c + \epsilon_b^2)}$$

$$R = \sqrt{\frac{4}{9}\epsilon_a^2 + \frac{4}{9}\epsilon_b^2 + \frac{4}{9}\epsilon_c^2 - \frac{4}{9}\epsilon_a\epsilon_b - \frac{4}{9}\epsilon_b\epsilon_c - \frac{4}{9}\epsilon_c\epsilon_a}$$

$$R = \frac{2}{3}\sqrt{\epsilon_a(\epsilon_a - \epsilon_b) + \epsilon_b(\epsilon_b - \epsilon_c) + \epsilon_c(\epsilon_c - \epsilon_a)}$$

$$\epsilon_{\max, \min} = \frac{\epsilon_a + \epsilon_b + \epsilon_c}{3} \pm \frac{2}{3}\sqrt{\epsilon_a(\epsilon_a - \epsilon_b) + \epsilon_b(\epsilon_b - \epsilon_c) + \epsilon_c(\epsilon_c - \epsilon_a)} \quad \dots(A-31)$$

ภาคผนวก ข



High Accuracy 8-Pin Instrumentation Amplifier

AMP02

FEATURES

- Low Offset Voltage: 100 μ V max
- Low Drift: 2 μ V/ $^{\circ}$ C max
- Wide Gain Range 1 to 10,000
- High Common-Mode Rejection: 115 dB min
- High Bandwidth (G = 1000): 200 kHz typ
- Gain Equation Accuracy: 0.5% max
- Single Resistor Gain Set
- Input Overvoltage Protection
- Low Cost
- Available In Die Form

APPLICATIONS

- Differential Amplifier
- Strain Gauge Amplifier
- Thermocouple Amplifier
- RTD Amplifier
- Programmable Gain Instrumentation Amplifier
- Medical Instrumentation
- Data Acquisition Systems

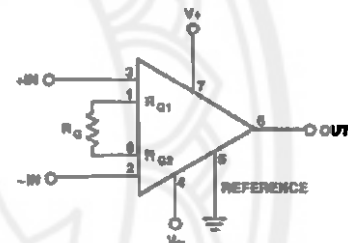
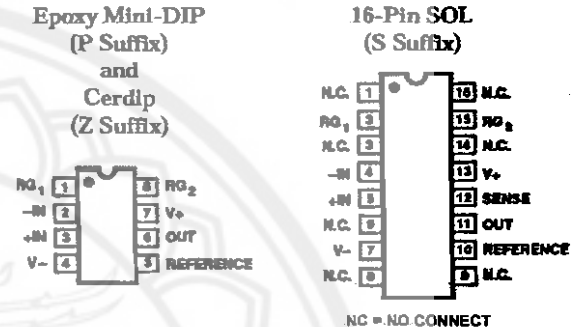
GENERAL DESCRIPTION

The AMP02 is the first precision instrumentation amplifier available in an 8-pin package. Gain of the AMP02 is set by a single external resistor, and can range from 1 to 10,000. No gain set resistor is required for unity gain. The AMP02 includes an input protection network that allows the inputs to be taken 60 V beyond either supply rail without damaging the device.

Laser trimming reduces the input offset voltage to under 100 μ V. Output offset voltage is below 4 mV and gain accuracy is better than 0.5% for gain of 1000. PMI's proprietary thin-film resistor process keeps the gain temperature coefficient under 50 ppm/ $^{\circ}$ C.

Due to the AMP02's design, its bandwidth remains very high over a wide range of gain. Slew rate is over 4 V/ μ s making the AMP02 ideal for fast data acquisition systems.

PIN CONNECTIONS



$$G = \frac{V_{OUT}}{(+IN) - (-IN)} = \left(\frac{R_{OH1}}{R_G} \right) + 1$$

FOR SOL CONNECT SENSE TO OUTPUT

Figure 1. Basic Circuit Connections

A reference pin is provided to allow the output to be referenced to an external dc level. This pin may be used for offset correction or level shifting as required. In the 8-pin package, sense is internally connected to the output.

For an instrumentation amplifier with the highest precision, consult the AMP01 data sheet. For the highest input impedance and speed, consult the AMP05 data sheet.

REV. D

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

AMP02-SPECIFICATIONS

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (@ $V_S = \pm 15\text{ V}$, $V_{CM} = 0\text{ V}$, $T_A = +25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.)

Parameter	Symbol	Conditions	AMP02E			AMP02F			Units
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
OFFSET VOLTAGE									
Input Offset Voltage	V_{IOS}	$T_A = +25^\circ\text{C}$ $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$	20	50	100	40	100	200	μV
Input Offset Voltage Drift	TCV_{IOS}	$-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$	0.5	2		1	4		$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Output Offset Voltage	V_{OOS}	$T_A = +25^\circ\text{C}$ $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$	1	4		2	8		mV
Output Offset Voltage Drift	TCV_{OOS}	$-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$	4	10		9	20		mV
Power Supply Rejection	PSR	$V_S = \pm 4.8\text{ V to } \pm 18\text{ V}$ $G = 100, 1000$ $G = 10$ $G = 1$	115	125		110	115		dB
		$V_S = \pm 4.8\text{ V to } \pm 18\text{ V}$ $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$ $C = 1000, 100$ $G = 10$ $G = 1$	100	110		95	100		dB
		$V_S = \pm 4.8\text{ V to } \pm 18\text{ V}$ $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$ $C = 1000, 100$ $G = 10$ $G = 1$	80	90		75	80		dB
		$V_S = \pm 4.8\text{ V to } \pm 18\text{ V}$ $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$ $C = 1000, 100$ $G = 10$ $G = 1$	110	120		105	110		dB
		$-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$ $C = 1000, 100$ $G = 10$ $G = 1$	95	110		90	95		dB
		$-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$ $C = 1000, 100$ $G = 10$ $G = 1$	75	90		70	75		dB
INPUT CURRENT									
Input Bias Current	I_B	$T_A = +25^\circ\text{C}$	2		10	4		20	nA
Input Bias Current Drift	TCI_B	$-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$	150			250			$\text{pA}/^\circ\text{C}$
Input Offset Current	I_{OS}	$T_A = +25^\circ\text{C}$	1.2		5	2		10	nA
Input Offset Current Drift	TCI_{OS}	$-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$	9			15			$\text{pA}/^\circ\text{C}$
INPUT									
Input Resistance	R_{IN}	Differential, $G \leq 1000$ Common-Mode, $G = 1000$	10		16.5	10		16.5	$\text{G}\Omega$ $\text{G}\Omega$
Input Voltage Range	IVR	$T_A = +25^\circ\text{C}$ (Note 1)	± 11			± 11			V
Common-Mode Rejection	CMR	$V_{CM} = \pm 11\text{ V}$ $G = 1000, 100$ $G = 10$ $G = 1$	115	120		110	115		dB
		$V_{CM} = \pm 11\text{ V}$ $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$ $G = 100, 1000$ $G = 10$ $G = 1$	100	115		95	110		dB
		$V_{CM} = \pm 11\text{ V}$ $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$ $G = 100, 1000$ $G = 10$ $G = 1$	80	95		75	90		dB
		$V_{CM} = \pm 11\text{ V}$ $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$ $G = 100, 1000$ $G = 10$ $G = 1$	110	120		105	115		dB
		$-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$ $G = 100, 1000$ $G = 10$ $G = 1$	95	110		90	105		dB
		$-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$ $G = 100, 1000$ $G = 10$ $G = 1$	75	90		70	85		dB
GAIN									
Gain Equation Accuracy	$G = \frac{50\text{ k}\Omega}{R_C} + 1$	$G = 1000$ $G = 100$ $G = 10$ $G = 1$			0.50 0.30 0.25 0.02			0.70 0.50 0.40 0.05	% % % %
Gain Range	G	$G = 1$ to 1000	1		10k	1		10k	V/V
Nonlinearity	G_{TC}	$1 \leq G \leq 1000$ (Notes 2, 3)		0.006			0.006		%
Temperature Coefficient				20	50		20	50	$\text{ppm}/^\circ\text{C}$
OUTPUT RATING									
Output Voltage Swing	V_{OUT}	$T_A = +25^\circ\text{C}$, $R_L = 1\text{ k}\Omega$ $R_L = 1\text{ k}\Omega$, $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$	± 12	± 13		± 12	± 13		V V
Positive Current Limit		Output-to-Ground Short	± 11	± 12		± 11	± 12		mA
Negative Current Limit		Output-to-Ground Short		22			22		mA
		Output-to-Ground Short		32			32		mA
NOISE									
Voltage Density, RTI	e_n	$f_0 = 1\text{ kHz}$ $G = 1000$ $G = 100$ $G = 10$ $G = 1$		9 10 18 120			9 10 18 120		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
Noise Current Density, RTI	i_n	$f_0 = 1\text{ kHz}$, $G = 1000$		0.4			0.4		$\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
Input Noise Voltage	$e_{n,p-p}$	0.1 Hz to 10 Hz $G = 1000$ $G = 100$ $G = 10$		0.4 0.5 1.2			0.4 0.5 1.2		$\mu\text{V p-p}$ $\mu\text{V p-p}$ $\mu\text{V p-p}$
DYNAMIC RESPONSE									
Small-Signal Bandwidth (-3 dB)	BW	$G = 1$ $G = 10$		1200 300			1200 300		kHz kHz
Slew Rate	SR	$G = 10$, $R_L = 1\text{ k}\Omega$		200			200		kHz
Settling Time	t_s	To 0.01% $\pm 10\text{ V}$ Step $G = 1$ to 1000	4	6 10		4	6 10		V/ μs μs
SENSE INPUT									
Input Resistance	R_{IN}			25			25		k Ω
Voltage Range				± 11			± 11		V
REFERENCE INPUT									
Input Resistance	R_{IN}			50			50		k Ω
Voltage Range				± 11			± 11		V
Gain to Output				1			1		V/V

Parameter	Symbol	Conditions	AMP02E			AMP02F			Units
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
POWER SUPPLY									
Supply Voltage Range	V_S	$T_A = +25^\circ\text{C}$ $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$	± 4.5		± 18	± 4.5		± 18	V
Supply Current	I_{SY}		5	6	5	6	5	6	mA

NOTES

- ¹Input voltage range guaranteed by common-mode rejection test.
 - ²Guaranteed by design.
 - ³Gain tempo does not include the effects of external component drift.
- Specifications subject to change without notice.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

- Supply Voltage ± 18 V
- Common-Mode Input Voltage . [(V-) - 60 V] to [(V+) + 60 V]
- Differential Input Voltage [(V-) - 60 V] to [(V+) + 60 V]
- Output Short-Circuit Duration Continuous
- Operating Temperature Range -40°C to $+85^\circ\text{C}$
- Storage Temperature Range -65°C to $+150^\circ\text{C}$
- Function Temperature Range -65°C to $+150^\circ\text{C}$
- Lead Temperature (Soldering, 10 sec) $+300^\circ\text{C}$

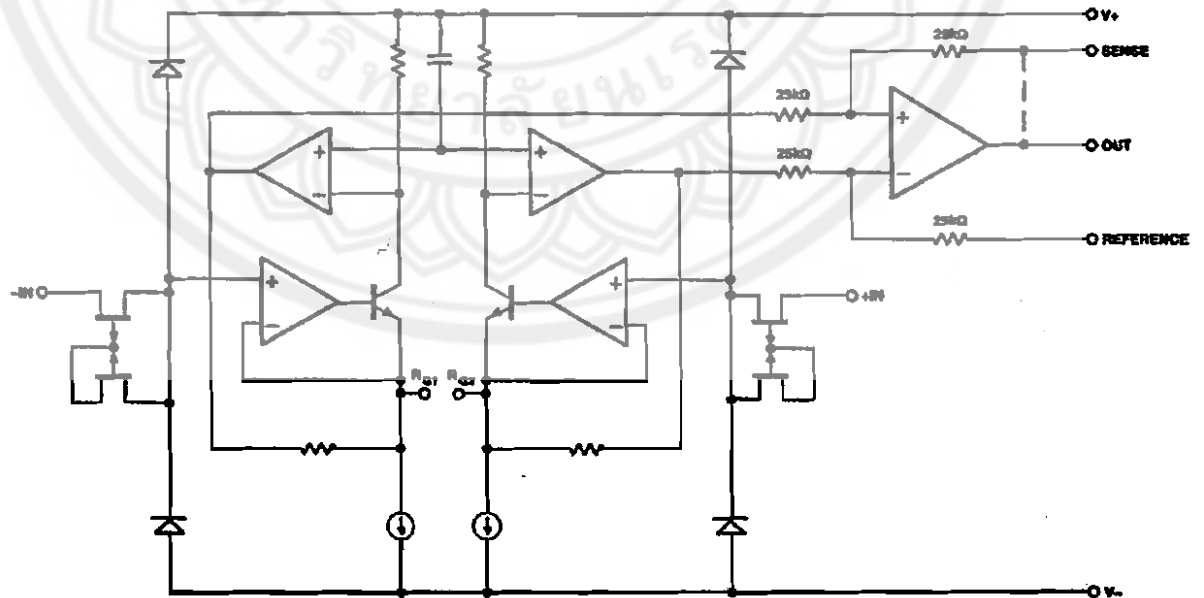
Package Type	θ_{JA}^2	θ_{JC}	Units
8-Pin Plastic DIP (P)	96	37	$^\circ\text{C/W}$
16-Pin SOL (S)	92	27	$^\circ\text{C/W}$

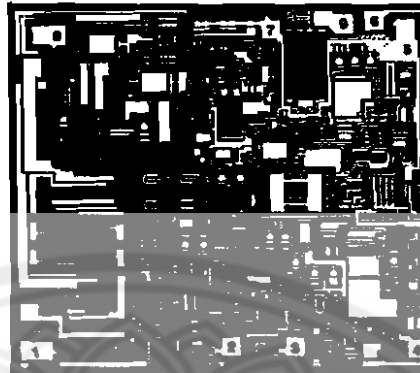
NOTES

- ¹Absolute maximum ratings apply to both DICE and packaged parts, unless otherwise noted.
- ² θ_{JA} is specified for worst case mounting conditions, i.e., θ_{JA} is specified for device in socket for P-DIP package; θ_{JA} is specified for device soldered to printed circuit board for SOL package.

ORDERING GUIDE

Model	V_{IOS} max @ $T_A = +25^\circ\text{C}$	V_{OOS} max @ $T_A = +25^\circ\text{C}$	Temperature Range	Package Description
AMP02EP	100 μV	4 mV	-40°C to $+85^\circ\text{C}$	8-Pin Plastic DIP
AMP02FP	200 μV	8 mV	-40°C to $+85^\circ\text{C}$	8-Pin Plastic DIP
AMP02AZ/883C	200 μV	10 mV	-55°C to $+125^\circ\text{C}$	8-Pin Cerdip
AMP02FS	200 μV	8 mV	-40°C to $+85^\circ\text{C}$	16-Pin SOIC
AMP02GBC				Die
AMP02FS-REEL	200 μV	8 mV	-40°C to $+85^\circ\text{C}$	16-Pin SOIC





1. RG₁
2. -IN
3. +IN
4. V-
5. REFERENCE
6. OUT
7. V+
8. RG₂
9. SENSE

CONNECT SUBSTRATE TO V-

DIE SIZE 0.103 X 0.116 Inch, 11,948 sq. mils
(2.62 X 2.95 mm, 7.73 sq. mm)

Dice Characteristics

WAFER TEST LIMITS at $V_S = \pm 15\text{ V}$, $V_{CM} = 0\text{ V}$, $T_A = +25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.

Parameter	Symbol	Conditions	AMP02 GBC Limits	Units
Input Offset Voltage	V_{IOS}		200	μV max
Output Offset Voltage	V_{OOS}		8	mV max
Power Supply Rejection	PSR	$V_S = \pm 4.8\text{ V}$ to $\pm 18\text{ V}$	110	dB min
		$G = 1000$	110	
		$G = 100$	95	
		$G = 1$	75	
Input Bias Current	I_B		20	nA max
Input Offset Current	I_{OS}		10	nA max
Input Voltage Range	IVR	Guaranteed by CMR Tests	± 11	V min
Common-Mode Rejection	CMR	$V_{CM} = \pm 11\text{ V}$	110	dB min
		$G = 1000$	110	
		$G = 100$	95	
		$G = 1$	75	
Gain Equation Accuracy		$G = \frac{50\text{ k}\Omega}{R_G} + 1$, $G = 1000$	0.7	% max
Output Voltage Swing	V_{OUT}	$R_L = 1\text{ k}\Omega$	± 12	V min
Supply Current	I_{SY}		6	mA max

NOTE

Electrical tests are performed at wafer probe to the limits shown. Due to variations in assembly methods and normal yield loss, yield after packaging is not guaranteed for standard product dice. Consult factory to negotiate specifications based on dice lot qualifications through sample lot assembly and testing.

CAUTION

ESD (electrostatic discharge) sensitive device. Electrostatic charges as high as 4000 V readily accumulate on the human body and test equipment and can discharge without detection. Although the AMP02 features proprietary ESD protection circuitry, permanent damage may occur on devices subjected to high energy electrostatic discharges. Therefore, proper ESD precautions are recommended to avoid performance degradation or loss of functionality.



Typical Performance Characteristics—AMP02

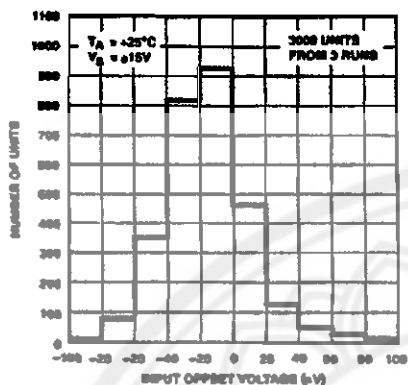


Figure 3. Typical Distribution of Input Offset Voltage

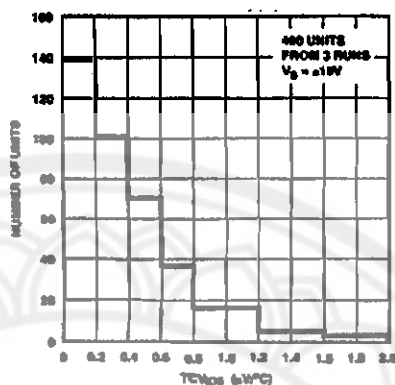


Figure 4. Typical Distribution of TCV_{10S}

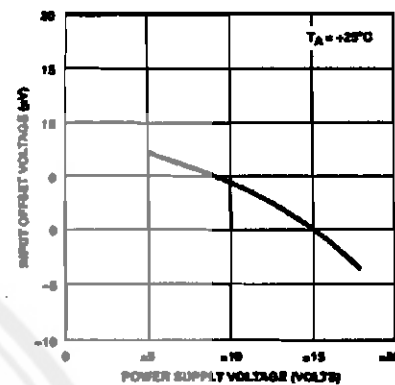


Figure 5. Input Offset Voltage Change vs. Supply Voltage

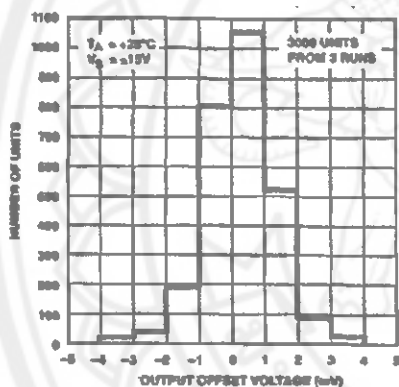


Figure 6. Typical Distribution of Output Offset Voltage

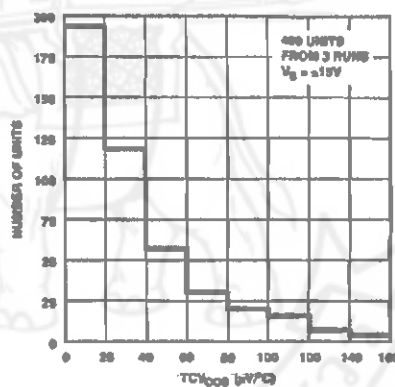


Figure 7. Typical Distribution of TCV_{00S}

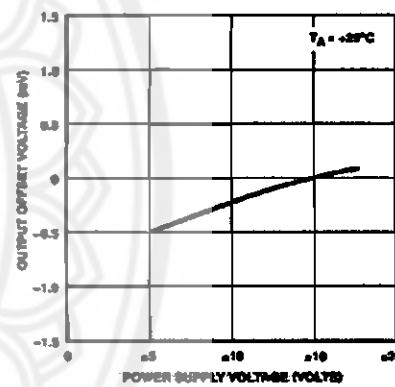


Figure 8. Output Offset Voltage Change vs. Supply Voltage

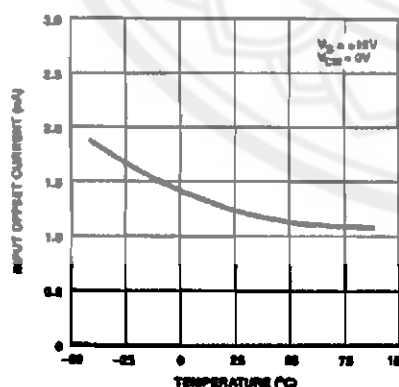


Figure 9. Input Offset Current vs. Temperature

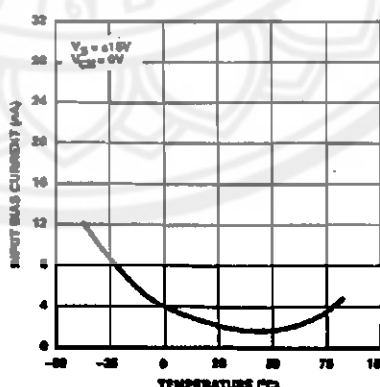


Figure 10. Input Bias Current vs. Temperature

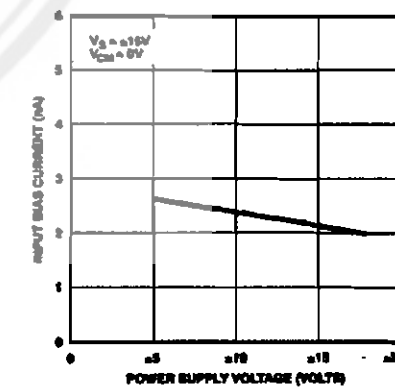


Figure 11. Input Bias Current vs. Supply Voltage

AMP02

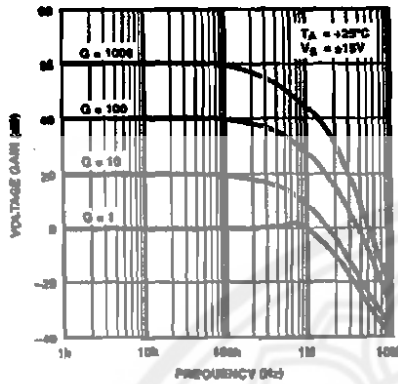


Figure 12. Closed-Loop Voltage Gain vs. Frequency

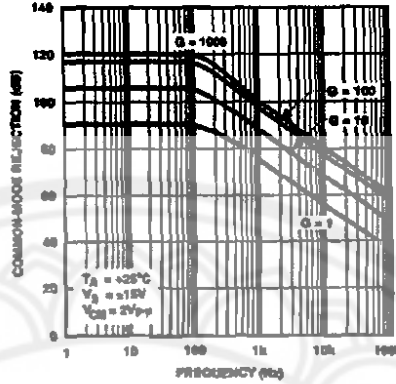


Figure 13. Common-Mode Rejection vs. Frequency

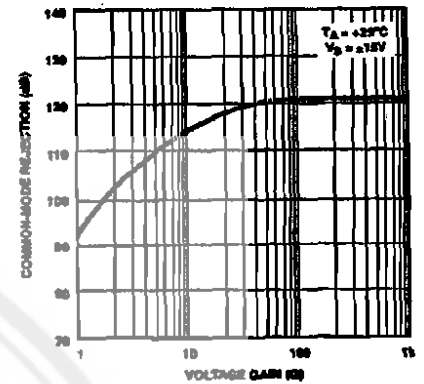


Figure 14. Common-Mode Rejection vs. Voltage Gain

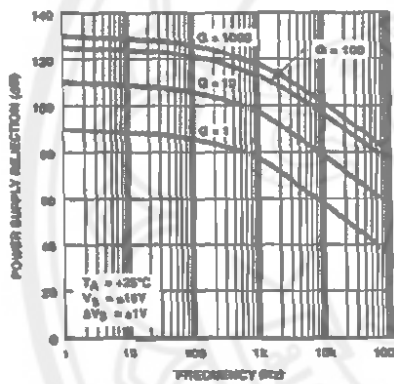


Figure 15. Positive PSR vs. Frequency

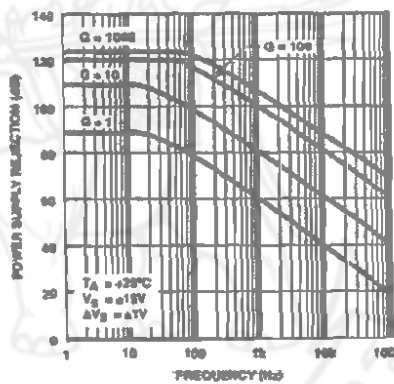


Figure 16. Negative PSR vs. Frequency

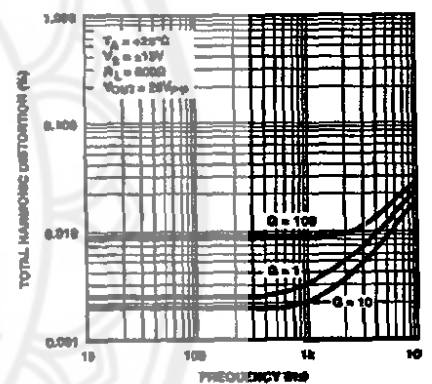


Figure 17. Total Harmonic Distortion vs. Frequency

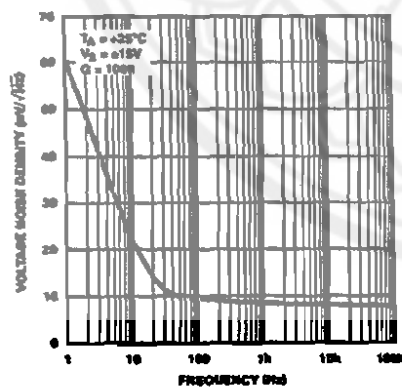


Figure 18. Voltage Noise Density vs. Frequency

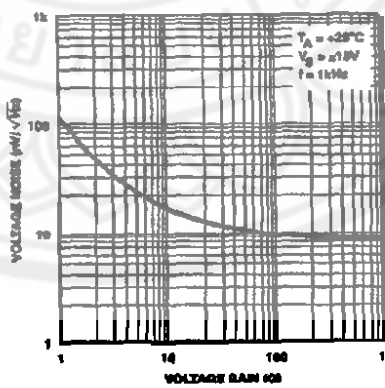


Figure 19. RTI Voltage Noise Density vs. Gain

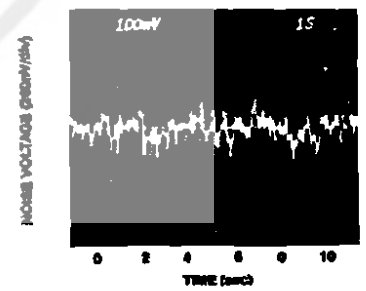


Figure 20. 0.1 Hz to 10 Hz Noise $A_V = 1000$

AMP02

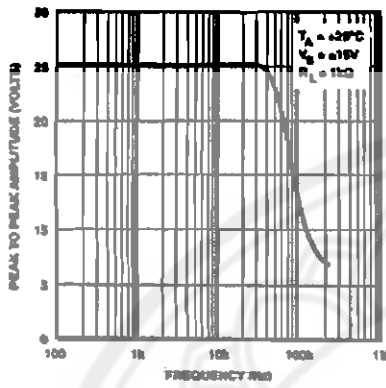


Figure 21. Maximum Output Swing vs. Frequency

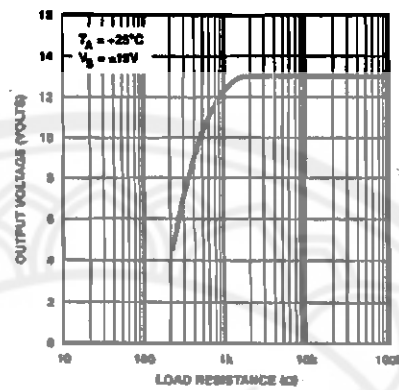


Figure 22. Maximum Output Voltage vs. Load Resistance

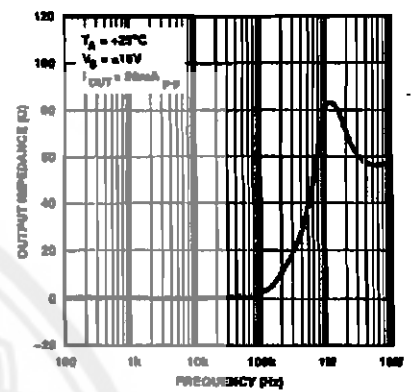


Figure 23. Closed Loop Output Impedance vs. Frequency

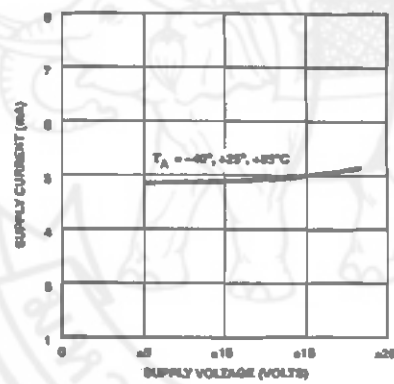


Figure 24. Supply Current vs. Supply Voltage

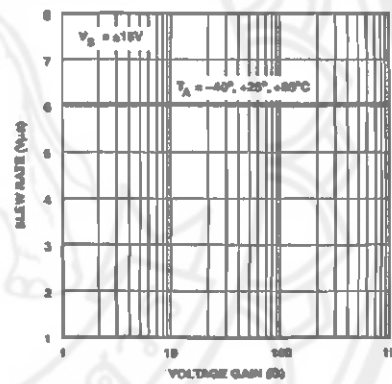


Figure 25. Slew Rate vs. Voltage Gain

AMP02

APPLICATIONS INFORMATION INPUT AND OUTPUT OFFSET VOLTAGES

Instrumentation amplifiers have independent offset voltages associated with the input and output stages. The input offset component is directly multiplied by the amplifier gain, whereas output offset is independent of gain. Therefore, at low gain, output-offset-errors dominate, while at high gain, input-offset-errors dominate. Overall offset voltage, V_{OS} , referred to the output (RTO) is calculated as follows:

$$V_{OS} (RTO) = (V_{IOS} \times G) + V_{OOS}$$

where V_{IOS} and V_{OOS} are the input and output offset voltage specifications and G is the amplifier gain.

The overall offset voltage drift TCV_{OS} , referred to the output, is a combination of input and output drift specifications. Input offset voltage drift is multiplied by the amplifier gain, G , and summed with the output offset drift:

$$TCV_{OS} (RTO) = (TCV_{IOS} \times G) + TCV_{OOS}$$

where TCV_{IOS} is the input offset voltage drift, and TCV_{OOS} is the output offset voltage drift. Frequently, the amplifier drift is referred back to the input (RTI) which is then equivalent to an input signal change:

$$TCV_{OS} (RTI) = TCV_{IOS} + \frac{TCV_{OOS}}{G}$$

For example, the maximum input-referred drift of an AMP02EP set to $G = 1000$ becomes:

$$TCV_{OS} (RTI) = 2 \mu V/^{\circ}C + \frac{100 \mu V/^{\circ}C}{1000} = 2.1 \mu V/^{\circ}C$$

INPUT BIAS AND OFFSET CURRENTS

Input transistor bias currents are additional error sources which can degrade the input signal. Bias currents flowing through the signal source resistance appear as an additional offset voltage. Equal source resistance on both inputs of an IA will minimize offset changes due to bias current variations with signal voltage and temperature. However, the difference between the two bias currents, the input offset current, produces an error. The magnitude of the error is the offset current times the source resistance.

A current path must always be provided between the differential inputs and analog ground to ensure correct amplifier operation. Floating inputs, such as thermocouples, should be grounded close to the signal source for best common-mode rejection.

GAIN

The AMP02 only requires a single external resistor to set the voltage gain. The voltage gain, G , is:

$$G = \frac{50 \text{ k}\Omega}{R_G} + 1$$

and

$$R_G = \frac{50 \text{ k}\Omega}{G - 1}$$

The voltage gain can range from 1 to 10,000. A gain set resistor is not required for unity-gain applications. Metal-film or wire-wound resistors are recommended for best results.

The total gain accuracy of the AMP02 is determined by the tolerance of the external gain set resistor, R_G , combined with the gain equation accuracy of the AMP02. Total gain drift combines the mismatch of the external gain set resistor drift with that of the internal resistors (20 ppm/ $^{\circ}C$ typ). Maximum gain drift of the AMP02 independent of the external gain set resistor is 50 ppm/ $^{\circ}C$.

All instrumentation amplifiers require attention to layout so thermocouple effects are minimized. Thermocouples formed between copper and dissimilar metals can easily destroy the TCV_{OS} performance of the AMP02 which is typically 0.5 $\mu V/^{\circ}C$. Resistors themselves can generate thermoelectric EMFs when mounted parallel to a thermal gradient.

The AMP02 uses the triple op amp instrumentation amplifier configuration with the input stage consisting of two transimpedance amplifiers followed by a unity-gain differential amplifier. The input stage and output buffer are laser-trimmed to increase gain accuracy. The AMP02 maintains wide bandwidth at all gains as shown in Figure 26. For voltage gains greater than 10, the bandwidth is over 200 kHz. At unity-gain, the bandwidth of the AMP02 exceeds 1 MHz.

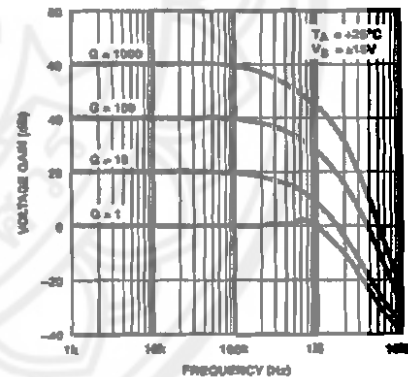


Figure 26. The AMP02 Keeps Its Bandwidth at High Gains

COMMON-MODE REJECTION

Ideally, an instrumentation amplifier responds only to the difference between the two input signals and rejects common-mode voltages and noise. In practice, there is a small change in output voltage when both inputs experience the same common-mode voltage change; the ratio of these voltages is called the common-mode gain. Common-mode rejection (CMR) is the logarithm of the ratio of differential-mode gain to common-mode gain, expressed in dB. Laser trimming is used to achieve the high CMR of the AMP02.

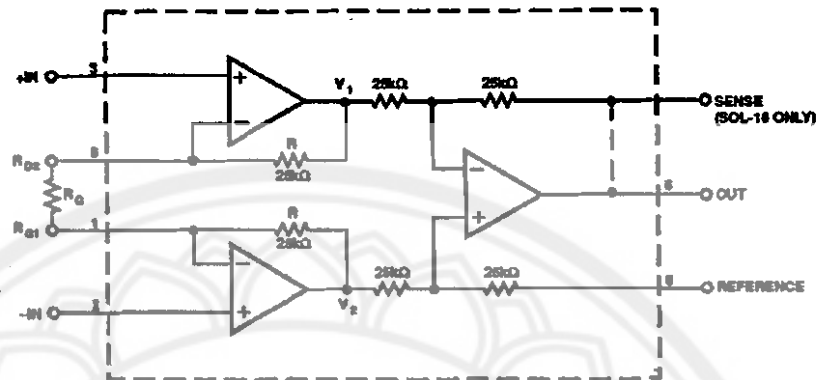


Figure 27. Triple Op Amp Topology of the AMP02

Figure 27 shows the triple op amp configuration of the AMP02. With all instrumentation amplifiers of this type, it is critical not to exceed the dynamic range of the input amplifiers. The amplified differential input signal and the input common-mode voltage must not force the amplifier's output voltage beyond ± 12 V ($V_S = \pm 15$ V) or nonlinear operation will result.

The input stage amplifier's output voltages at V_1 and V_2 equals:

$$\begin{aligned} V_1 &= -\left(1 + \frac{2R}{R_G}\right) \frac{V_D}{2} + V_{CM} \\ &= -G \frac{V_D}{2} + V_{CM} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_2 &= \left(1 + \frac{2R}{R_G}\right) \frac{V_D}{2} + V_{CM} \\ &= G \frac{V_D}{2} + V_{CM} \end{aligned}$$

where

V_D = Differential input voltage
= (+IN) - (-IN)

V_{CM} = Common-mode input voltage

G = Gain of instrumentation amplifier

If V_1 and V_2 can equal ± 12 V maximum, then the common-mode input voltage range is:

$$CMVR = \pm \left(12 \text{ V} - \frac{GV_D}{2}\right)$$

GROUNDING

The majority of instruments and data acquisition systems use separate grounds for analog and digital signals. Analog ground may also be divided into two or more grounds which will be tied together at one point, usually the analog power-supply ground. In addition, the digital and analog grounds may be joined, normally at the analog ground pin on the A to D converter. Following this basic practice is essential for good circuit performance.

Mixing grounds causes interactions between digital circuits and the analog signals. Since the ground returns have finite resistance and inductance, hundreds of millivolts can be developed between the system ground and the data acquisition components. Using separate ground returns minimizes the current flow in the sensitive analog return path to the system ground point. Consequently, noisy ground currents from logic gates do not interact with the analog signals.

Inevitably, two or more circuits will be joined together with the grounds at differential potentials. In these situations, the differential input of an instrumentation amplifier, with its high CMR, can accurately transfer analog information from one circuit to another.

SENSE AND REFERENCE TERMINALS

The sense terminal completes the feedback path for the instrumentation amplifier output stage and is internally connected directly to the output. For SOL devices, connect the sense terminal to the output. The output signal is specified with respect to the reference terminal, which is normally connected to analog ground. The reference may also be used for offset correction level shifting. A reference source resistance will reduce the common-mode rejection by the ratio of $25 \text{ k}\Omega/R_{REF}$. If the reference source resistance is 1Ω , then the CMR will be reduced 88 dB ($25 \text{ k}\Omega/1 \Omega = 88 \text{ dB}$).

AMP02

OVERVOLTAGE PROTECTION

Instrumentation amplifiers invariably sit at the front end of instrumentation systems where there is a high probability of exposure to overloads. Voltage transients, failure of a transducer, or removal of the amplifier power supply while the signal source is connected may destroy or degrade the performance of an unprotected device. A common technique used is to place limiting resistors in series with each input, but this adds noise. The AMP02 includes internal protection circuitry that limits the input current to ± 4 mA for a 60 V differential overload (see Figure 28) with power off, ± 2.5 mA with power on.

POWER SUPPLY CONSIDERATIONS

Achieving the rated performance of precision amplifiers in a practical circuit requires careful attention to external influences. For example, supply noise and changes in the nominal voltage directly affect the input offset voltage. A PSR of 80 dB means that a change of 100 mV on the supply, not an uncommon value, will produce a 10 μ V input offset change. Consequently, care should be taken in choosing a power unit that has a low output noise level, good line and load regulation, and good temperature stability. In addition, each power supply should be properly bypassed.

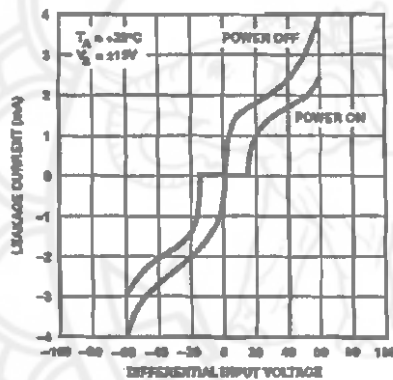
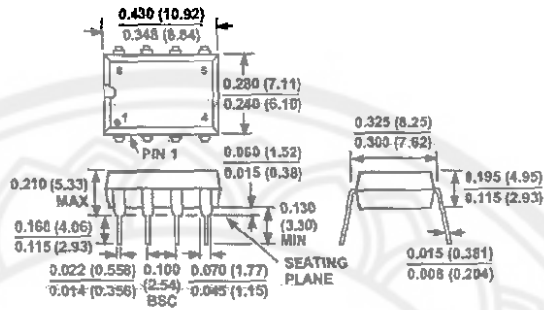


Figure 28. AMP02's Input Protection Circuitry Limits Input Current During Overvoltage Conditions

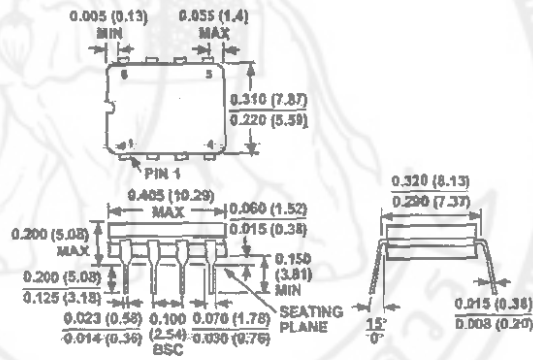
OUTLINE DIMENSIONS

Dimensions shown in inches and (mm).

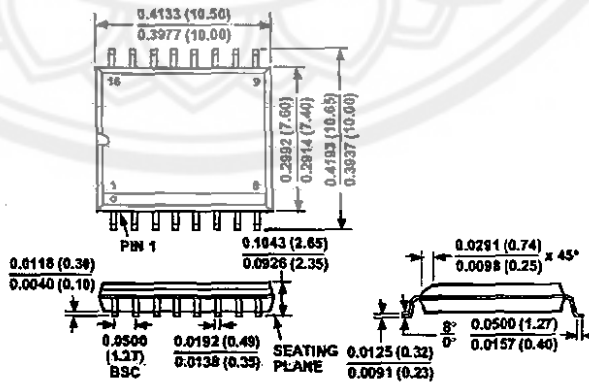
Mini-Dip (N-8) Package



Cerdip (Q-8) Package



SOL (R-16) Package



ภาคผนวก ค

Specified SGC Component Values

Identification	Specified Value	Rating	Tolerance
Resistors			
R1	5.49 K Ω	1/4 Watt	1%
R2	499.0 Ω	1/4 Watt	1%
R3	49.9 Ω	1/4 Watt	1%
R4	24.9 Ω	1/4 Watt	1%
R5	User selectable	1/4 Watt	1%
R6	121 Ω	1/4 Watt	1%
R7	1.0 K Ω	1/4 Watt	1%
R8	510 Ω	1/4 Watt	5%
R9	1.0 K Ω	1/4 Watt	5%
R10	2.2 K Ω	1/4 Watt	5%
R11	User selectable	1/4 Watt	0.1%
Capacitors			
C1	1 μ F	50 V	5%
C2	User selectable	50 V	5%
Trimpots			
Trimpot1	2 K Ω	3/4 Watt	15 turn cermet
Trimpot2	1 K Ω	3/4 Watt	15 turn cermet
LEDs			
LED1	Yellow	T-1 3/4	
LED2	Red	T-1 3/4	
LED3	Red	T-1 3/4	
Fuse			
Fuse1	2AG	1/8 Amp	

Complete Parts List

Item	Vendor	Vendor Id	Cost per Unit	No. Req'd
SGC BOARD				
Circuit Board	Lehighton		19.00	1
LED Yellow	Digi-Key	HLMP-4719QT-ND	0.19	1
LED Red (2)	Digi-Key	HLMP-4700QT-ND	0.19	2
LED Holders	Digi-Key	LU4002-ND	0.05	3
Header Pins Single Row .1 in. sq	Digi-Key	2440-6213TG-ND	0.03	23
1% Bridge Resistors 121 Ohm	Digi-Key	121XBK-ND	0.02	3
1 % Gain Resistors 25 Ohm	Digi-Key	24.9XBK-ND	0.04	1
1 % Gain Resistors 50 Ohm	Digi-Key	49.9XBK-ND	0.04	1
1 % Gain Resistors 500 Ohm	Digi-Key	499XBK-ND	0.04	1
1 % Gain Resistors 5500 Ohm	Digi-Key	5.49KXBK-ND	0.04	1
1 % Filter Resistors 1KOhm	Digi-Key	1.00KXBK-ND	0.04	1
1 microFarad 50 V Capacitor	Digi-Key	P4675-ND	0.71	1
5 % Resistor 2.2KOhm	PA Peters	CF 1/4	0.01	2
5 % Resistor 1KOhm	PA Peters	CF 1/4	0.01	1
5 % Resistor 500 Ohm	PA Peters	CF 1/4	0.01	1
Shunts	PA Peters	PPE-PLS-MJ-02	0.04	2
Jumper Wires 0.4 in	Digi-Key	923345-04	0.02	1
741 Op-Amps	PA Peters	741	0.72	1
AMP02FP Inst. Amp	Allied	630-2270	5.25	1
Op-Amp Sockets	PA Peters	PPE-SCS-8	0.04	2
5 Position Dip Switch	PA Peters	AMP-3-435640-6	0.75	1
SPDP Switch	PA Peters	PHI-10002	0.99	1
Tip Jack Black	Digi-Key	J118-ND	0.34	1
Tip Jack Red	Digi-Key	J117-ND	0.34	1
Fuse Clips	PA Peters	LF-111501	0.09	2
Fuse 1/8 Amp 2AG	PA Peters	LF 225.125	0.48	1
15 Turn 2 KOhm Trimpot	PA Peters	3006P-2K	1.05	1
15 Turn 1 KOhm Trimpot	PA Peters	3006P-1K	1.05	1
2 circuit Housings	PA Peters	AMP 640440-2	0.07	6
3 circuit Housings	PA Peters	AMP 640440-3	0.15	2
4 circuit Housings	PA Peters	AMP 640440-4	0.19	1
Shielded 3 cond. Wire 22 gage	Newark	50F3477WMO	0.21	1
Shielded 4 cond. Wire 22 gage	Newark	50F3478WMO	0.77	1
Twisted 2 cond. Wire 22 gage	Newark	87F4391WM	0.45	1
RACK HARDWARE				
Enclosure (rack of 8)	Vector	CCK12S/90	90.14	1
Face Plate	H.T. Lyons	1/8 x 5-1/4 x19 in.	4.10	1
6 Term. Beau Barrior Block	PA Peters	72206	1.35	8
POWER SUPPLY				
Power Supply	PA Peters	SLT-12-31010-12	78.52	1
Enclosure	Circuit Specialist	LA-7	13.28	1
A/C Power Cord	PA Peters	AEC SK-086	1.90	1
Cables (4 Cond. 18 gage)	Newark	50F3460WA0	6.00	4
Amp Connector Receptical	PA Peters	AMP 206429-1	1.19	8
Amp Connector Plug	PA Peters	AMP 206429-1	1.41	8
Amp Crimp Pins	PA Peters	AMP 66361-2	0.15	32
Amp Crimp Sockets	PA Peters	AMP 66360-2	0.15	32
Amp Cable Clamps	PA Peters	AMP 206358-1	1.80	8