บทที่ 2

ทฤษฎี

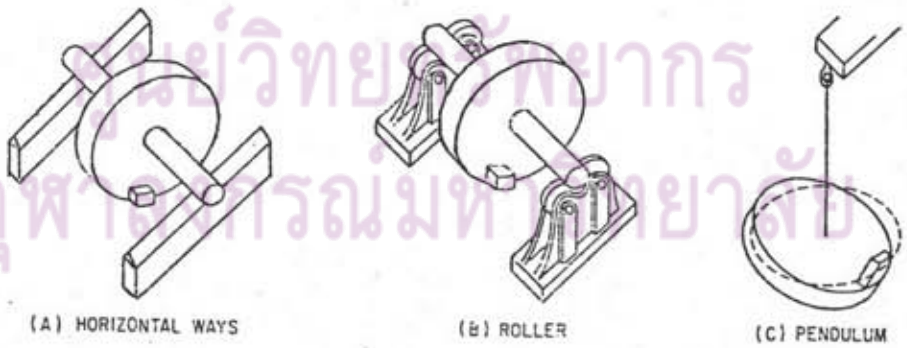
หลักการเบื้องต้นและความสำคัญทั่ว ๆ ไปของเครื่องตรวจสอบสมดุลย์ ซึ่งจะนำมาใช้ให้เป็นประโยชน์กับงานที่ต้องการจะตรวจสอบ โดยหลักการแล้วถือว่าเครื่องตรวจสอบเป็นเครื่องมือหรืออุปกรณ์ชิ้นหนึ่ง ซึ่งทำหน้าที่ชั่งขนาดของน้ำหนักส่วนเกินที่มีอยู่ใน Rotating part หรือ Assembly ซึ่งควรจะเพิ่มเข้าไปหรือเอาออก ดังนั้นเครื่องตรวจสอบทุกเครื่องมีจุดประสงค์หรือเป้าหมายอันเดียวกัน และสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ ด้วยกัน คือ

1. เครื่องตรวจสอบสมดุลย์แบบไม่หมุน (Static Balancing Machine)

2. เครื่องตรวจสอบสมดุลย์แบบหมุน (Dynamic Balancing Machine)

<u>เครื่องตรวจสอบสมดุลย์แบบไม่หมุน</u>

เครื่องตรวจสอบแบบนี้สามารถที่จะตรวจสมดุลย์ ชิ้นงานที่มีลักษณะความยาวในแนวแกน สั้นและยาวได้ เครื่องจะตรวจสอบได้เฉพาะความไม่สมดุลย์สถิตเท่านั้น การตรวจสอบสมดุลย์ปราศจากการหมุนชิ้นงานมีลักษณะรูปร่างภายนอก ดังแสดงในรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1

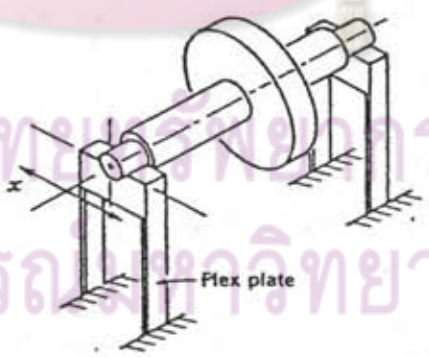
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แต่ยึดความสามารถของเครื่องตรวจสอบแบบนี้เหมาะสำหรับโรเตอร์ ที่จะนำไปใช้งานที่ความเร็วรอบไม่สูงจนเกินไป สำหรับชิ้นงานที่มีความยาวในแนวแกน เมื่ออยู่ในสภาพที่ไม่สมดุลย์ ตัวชิ้นงานจะมีความไม่สมดุลย์แบบ dynamic หรือมีทั้ง static และ dynamic รวมกัน ความไม่สมดุลย์หากมีจำนวนค่อนข้างมาก ควรผ่านการตรวจสอบสมดุลย์แบบสแตติคจะได้ช่วยลดขนาดของความไม่สมดุลย์ลงได้มาก ก่อนที่จะนำไปตรวจสอบแบบ dynamic เพื่อป้องกันหรือหลีกเลี่ยงความเสียหายที่จะเกิดขึ้นได้กับเครื่องตรวจสอบสมดุลย์แบบหมุน

<u>เครื่องตรวจสอบสมดุลย์แบบหมุน (Dynamic Balancing Machine)</u>

เครื่องตรวจสอบสมดุลย์แบบหมุน เหมาะสมกับการนำมาใช้ตรวจสอบชิ้นงานที่เป็นแบบระนาบเดี่ยวหรือแบบสองระนาบก็ได้ จะวางชิ้นงานหรือรองรับชิ้นงานให้อยู่ในแนวนอนหรือแนวตั้งก็ได้ เครื่องสามารถตรวจสอบความไม่สมดุลย์ได้ทั้ง static และ dynamic การตรวจสอบสมดุลย์กระทำในลักษณะที่ชิ้นงานหรือโรเตอร์กำลังหมุนอยู่ ส่วนเทคนิคหรือวิธีการตรวจสอบนั้นจะใช้แบบใดขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องและการเลือกอุปกรณ์ที่จะนำมาใช้ให้เหมาะสม ดังนั้น Dynamic Balancing Machine สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ด้วยกันคือ

1. Soft-Bearing Balancing Machine โดยทั่ว ๆ ไปแล้วเครื่องตรวจสอบแบบนี้มีลักษณะรูปร่างอย่างง่าย ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2-2



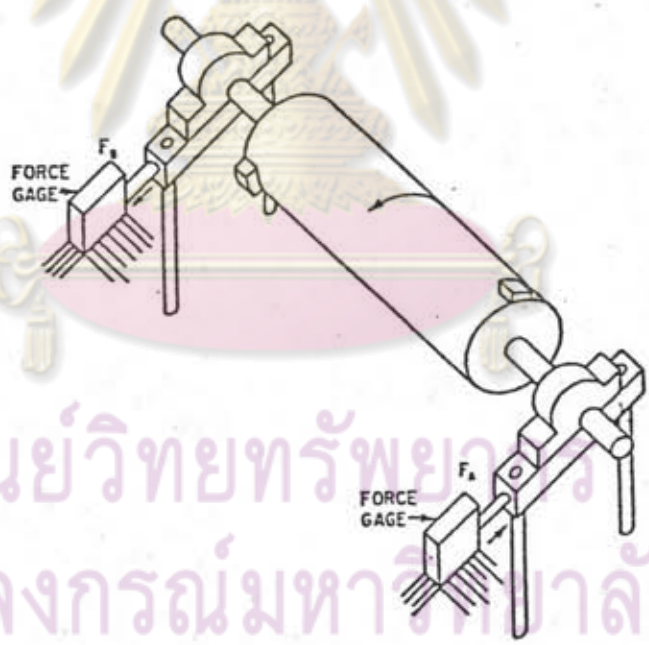
รูปที่ 2-2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถ้าหากนำแผ่นดิสไปยึดเข้ากับเพลาแล้ววางบนแบริ่งทั้ง 2 และมีความไม่สมดุลย์อยู่ในแผ่นดิส เมื่อเดินเครื่องจะมีแรงหนีศูนย์กลางที่เกิดจากมวลล้วนเกิน กระทำต่อแผ่นดิสและเพลาที่กำลังหมุนเกิดการแกว่งและล่ายอ่อนตัวไปมาในแนวนอน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเราสามารถบังคับการเคลื่อนที่ ของเพลาให้อยู่ในแนวนอนเพียงแนวเดียวได้ แต่สำหรับในแนวดิ่งสมมุติว่าระบบการรองรับ ของเรานั้น มีความแข็งแกร่งมาก ๆ

การวัดขนาดของความไม่สมดุลย์ของเครื่องชนิดนี้กระทำได้โดยการวัดขนาดการสั่นที่เกิดขึ้นกับแบริ่งทั้งสอง โดยทั่ว ๆ ไปแล้วจะใช้ Dial indicator , Velocity pickup , displacement gage และ Differential Transformer ฉะนั้นการตรวจสอบด้วยเครื่องแบบนี้เราเรียกว่า displacement Balancing

2. Rigid - Bearing Balancing Machine



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

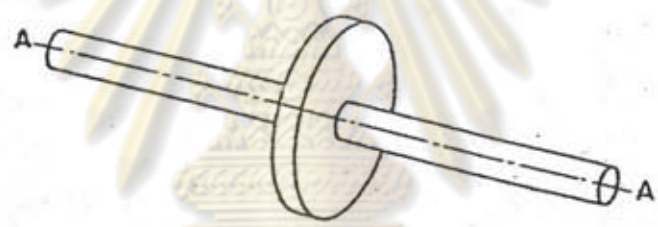
รูปที่ 2-3

เครื่องตรวจสอบสมดุลย์ชนิด Rigid - Bearing เป็นแบบที่ปรับปรุงมาจากชนิด soft - Bearing โดยที่อาการล่ายไปมาของแบริ่งทั้งสองถูกบังคับ (restrained) เอาไว้ด้วยชิ้นส่วนที่แข็งกว่าแรงที่ไม่สมดุลย์ จากโรเตอร์กระทำต่อแบริ่งทั้ง 2 ส่งผ่าน

Thrust rod ทั้ง 2 กำหนดให้เป็น F_A และ F_B ซึ่งเปลี่ยนแปลงแบบ Harmonically เมื่อเทียบกับเวลา

ดังนั้น ฐานเครื่องและที่รอบรับแบริ่งต้องมีโครงสร้างที่แข็งแกร่งเพียงพอเมื่อเทียบกับแรงที่มากระทำ การวัดขนาดของความไม่สมดุลย์ที่มีอยู่ในโรเตอร์ก็วัดได้โดยต่อ gage force เข้ากับ Thrust rod และวัดการสั่นตอบสนองในเทอมของแรง ซึ่งเป็นสัดส่วนกับแรงที่ไม่สมดุลย์ โดยทั่ว ๆ ไปแล้ว เครื่องตรวจสอบแบบนี้ใช้ Sensing Element เช่นพวก magnetostrictive และ piezoelectric pickup ด้วยเหตุนี้เองเราจึงเรียกการตรวจสอบแบบนี้ว่า force Balancing

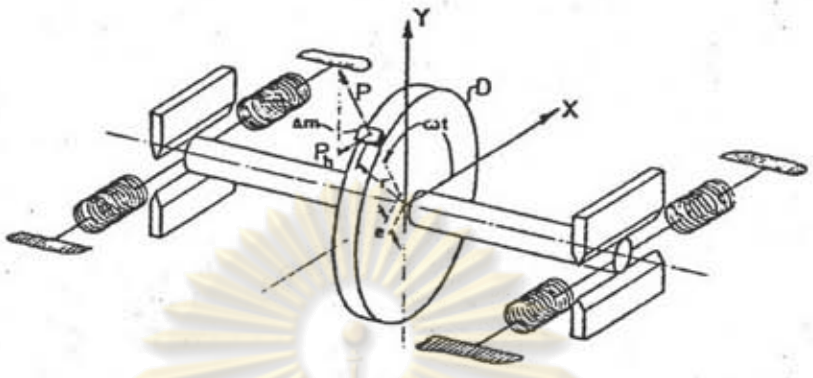
<u>ความไม่สมดุลย์และผลที่เกิดจากความไม่สมดุลย์ (Unbalance and its Effect)</u>



รูปที่ 2-4 แผ่นดิสและเพลาที่สมดุลย์

พิจารณาแผ่นดิสและเพลาหมุนรอบแกน A-A ตัวแผ่นดิสและเพลามีรูปร่างเป็นแบบทรงกระบอกกลมโดยสมบูรณ์แบบแกนทรงเรขาคณิตกับแกนหมุนกับสนิทกันพอดีและผิวด้านข้างของแผ่นดิสตั้งฉากกับแกนเพลาตลอดจนความหนาแน่นของมวลกระจายเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั้งแท่ง ดังนั้นแผ่นดิสก็อยู่ในสภาพที่สมดุลย์ แสดงว่าแรงเหวี่ยงที่เกิดจากภายในกระทำต่อมวลทุกส่วนหักล้างกันหมด และไม่มีทั้งแรง และโมเมนต์สุทธิกระทำต่อแบริ่งทั้งสอง ดังนั้นไม่มีหรือเกิด displacement ของการสั่น แต่จะต้องสมมุติว่าแผ่นดิสนั้นแข็งแกร่ง เมื่อนำไปวางบนแบริ่งทั้ง 2 และถูกขับให้หมุน ผลจากแรงโน้มถ่วง ความผิดและโมเมนต์ขับไม่มีผลต่อ disk Balance

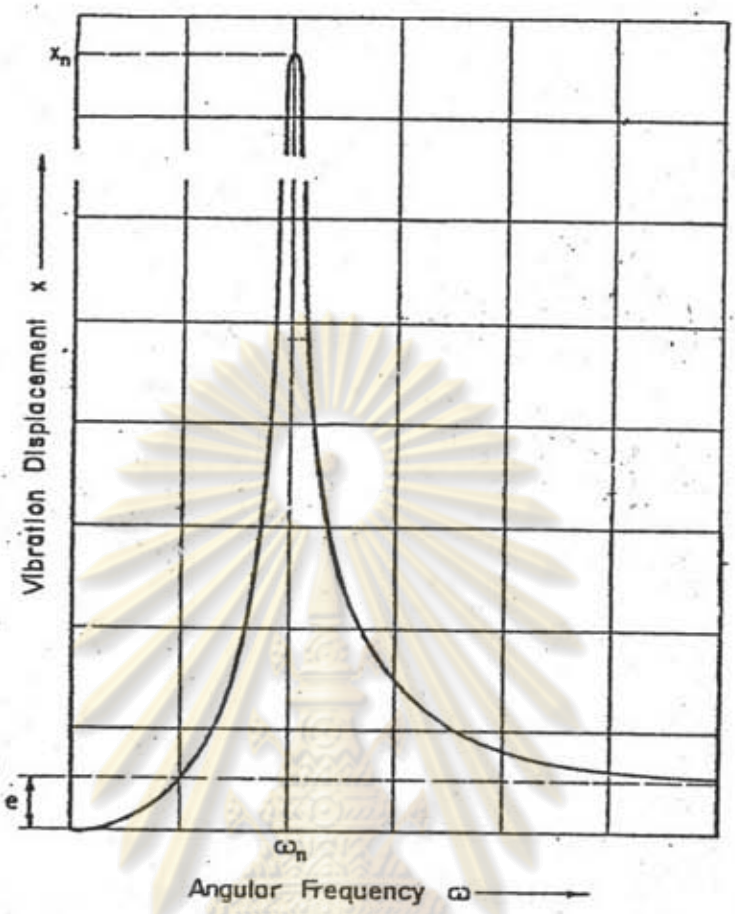
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2-5 แผ่นดิสและเพลาอยู่ในสภาพที่ไม่สมดุลย์

ถ้าเราเติมความไม่สมดุลย์ขนาด Δm ที่ขอบของแผ่นดิส รัศมี r และแผ่นดิสถูกยับให้หมุนด้วยความเร็วรอบที่เรา จะทำการวัดการเคลื่อนที่ของเพลาในทิศทาง x จะเห็นได้ว่าแรงหนีศูนย์ (p) เกิดจาก Δm มีขนาดเท่ากับ $\Delta mr\omega^2$ กระทำในแนวรัศมีทิศทางของแรงออกจากตัวแผ่นดิส และองค์ประกอบของแรงในแนวนอน คือ $P_h = p.\cos \omega t$ ซึ่ง ωt เป็นตำแหน่งเชิงมุมของ Δm ที่เวลา t ส่วนขนาดของแรงขึ้นอยู่กับความเร็วรอบ และสำหรับที่ความเร็วรอบคงที่ การกระจัด (x) ที่เกิดจากแรง P_h จะเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะ sinusoidally หากเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นขนาดของการกระจัด ไม่ได้เพิ่มตามอย่างเป็นสัดส่วนกับการเพิ่มของแรง แต่ขนาดการสั่นจะเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่กลับเป็นดังแสดงในรูปที่ 2-6

ขณะที่โรเตอร์อยู่ในช่วงเริ่มหมุนนั้น ทั้งแรงหนีศูนย์ และ การกระจัด จะเกิดขึ้นน้อย เมื่อความถี่เชิงมุมเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แรงหนีศูนย์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และการกระจัด (x) เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ด้วยความถี่ที่เพิ่มขึ้น ระบบการรองรับจะผ่านช่วงที่เราเรียกว่า Resonance ขนาดการสั่นจะเกิดขึ้นมากที่สุดที่จุดนี้ความถี่ของการหมุนตรงกับความถี่ธรรมชาติของระบบ สำหรับขนาดของการกระจัดที่มากที่สุดที่ resonance จะเกิดมากน้อยเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับ damping effect ทั้งหมดที่อยู่ในระบบ ถ้าหากระบบ



รูปที่ 2-6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบต่าง ๆ กับ vibration displacement

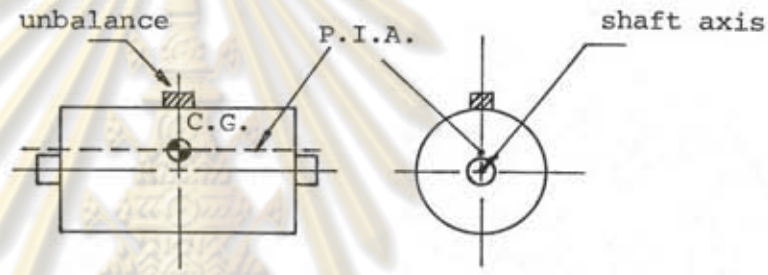
การรองรับ เป็นแบบ small damping ขนาดของการกระจัดที่มากที่สุด จะมากกว่า และขณะความเร็วรอบพ้นช่วงความถี่ resonance ขนาดการสั่นจะลดลงเรื่อย ๆ และเข้าใกล้ค่า e (Eccentricity) เมื่อความถี่สูงขึ้นเทียบกับความถี่ธรรมชาติของระบบ

<u>ความสัมพันธ์ระหว่าง Principal Inertia Axis กับแกนหมุนของโรเตอร์ที่มีความไม่สมดุลย์แบบต่าง ๆ</u>

ถ้ามีโรเตอร์ชนิดที่ประกอบแผ่นดิส จำนวน 2 แผ่นขึ้นไป เช่น multistage turbine หรือที่มีความยาวเช่น อาร์มเมเจอร์ของมอเตอร์ หรือ Blower จะมีความไม่สมดุลย์อยู่ในตัวมันตามความยาวของโรเตอร์ เราสามารถแบ่งชนิดของความไม่สมดุลย์ได้ 4 แบบ ด้วยกันคือ static unbalance , couple unbalance , dynamic unbalance

และ quasi - static unbalance เป็นต้น สำหรับแบบที่ 1 และ 3 ส่วนใหญ่จะพบบ่อยมาก แต่สำหรับแบบที่ 2 และที่ 4 มันจะปรากฏมีอยู่เฉพาะในกรณีพิเศษเท่านั้น ดังนั้นถ้าเราทราบคุณลักษณะของมัน จะมีส่วนช่วยเหลือในการตรวจสอบสมดุลย์ด้วยการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกนเพลากับ principal inertia axis (P.I.A.) ซึ่งเป็น imaginary axis จะผ่านจุดศูนย์ถ่วงของโรเตอร์ การกระจายของน้ำหนักจะสมมาตรกันในแนวแกน ถ้าหากสมมุติว่าโรเตอร์ผ่านการตรวจสอบสมดุลย์อย่างสมบูรณ์แล้วแกนของเพลากับ P.I.A. จะเป็นแกนเดียวกัน และถ้าความไม่สมดุลย์แต่ละชนิดมีอยู่ในโรเตอร์จะเป็นเหตุให้ P.I.A. แยกออกจากแกนเพลา ดังแสดงให้เห็นดังต่อไปนี้

Static Unbalance



รูปที่ 2-7 ความไม่สมดุลย์ชนิดสแตติค

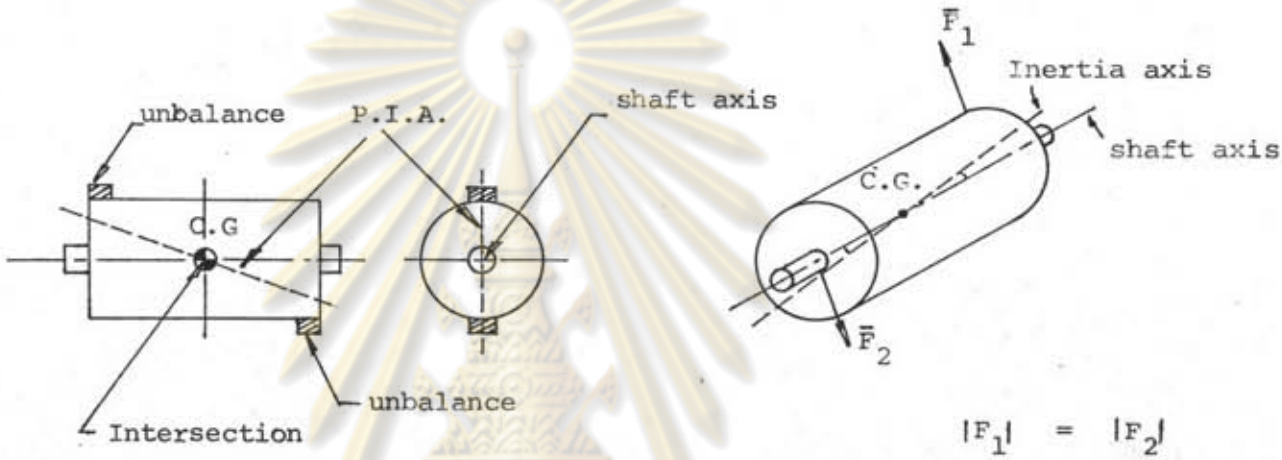
Static Unbalance บางครั้งเราเรียกว่า force หรือ Kinetic Unbalance เมื่ออยู่ในโรเตอร์จะทำให้ principal inertia axis เคลื่อนออกไปขนานกับแกนเพลาดังแสดงในรูปที่ 2-7 และสามารถตรวจสอบ ได้โดยการนำโรเตอร์ไปวางบนคมมีดหรือแบริงทั้ง 2 ด้านหนักของโรเตอร์จะเหวี่ยงไปอยู่ด้านล่าง ดังนั้นสามารถตรวจสอบแบบ static ด้วยการเอาน้ำหนักออกหรือเพิ่มน้ำหนักจนกระทั่งเกิดความสมดุลย์

Static Unbalance บ่อยครั้งสามารถตรวจสอบ ได้ด้วยการนำโรเตอร์ไปวางบนแบริงทั้ง 2 ของเครื่องตรวจสอบ ขนาดการสั่นและตำแหน่งจะประมาณเท่ากันและอยู่ที่เดียวกันทั้ง 2 ด้านของแบริง หากมีเฉพาะ static unbalance เท่านั้นที่มีอยู่ในโรเตอร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Couple Unbalance

Principal inertia axis ตัดกับแกนหมุนของเพลาที่จุดศูนย์ถ่วง ดังแสดงในรูป โรเตอร์ที่มีความไม่สมดุลย์ชนิด couple unbalance เพียงอย่างเดียว จะก่อให้เกิด Torque พยายามจะบิดเพลาออกห่างจากแกนเพลา อันนี้ไม่สามารถตรวจสอบแบบ static แต่สามารถตรวจสอบ ได้เมื่อโรเตอร์กำลังหมุนเท่านั้น เมื่อนำโรเตอร์ไปวางบนเครื่องตรวจสอบ ขนาดการสั่นทั้ง 2 แบริ่งจะเท่ากัน แต่ phase angle จะแตกต่างกันโดยประมาณ 180° ดังแสดงในรูปที่ 2-8



$$|F_1| = |F_2|$$

$$\angle F_1 + 180^{\circ} = \angle F_2$$

รูปที่ 2-8 ความไม่สมดุลย์ชนิดแรงคู่ควบ

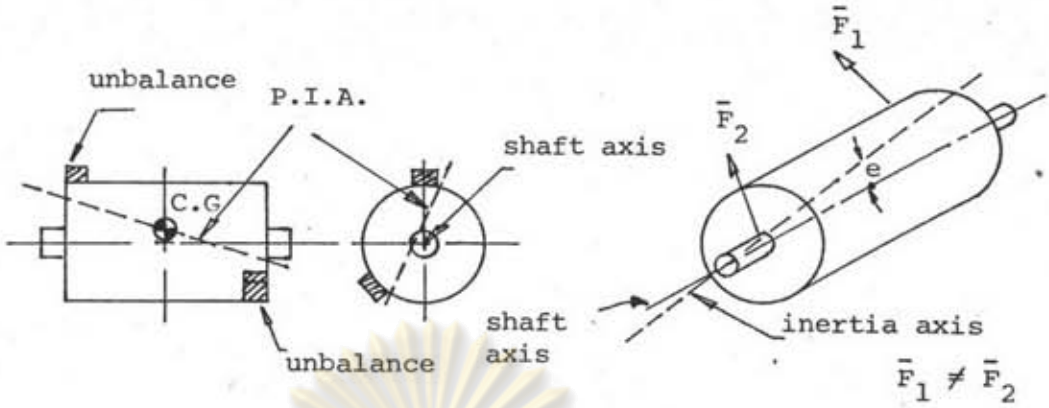
Dynamic Unbalance

Principal inertia axis ไม่ได้ขนาน หรือขนานและไม่ได้ตัดกับแกนหมุนของเพลา ดังแสดงในรูปที่ 2-9 dynamic unbalance เกิดจากการรวมกันของ static และ couple unbalance หากนำโรเตอร์ไปวางบนเครื่องตรวจสอบ ขนาดการสั่นจะไม่เท่ากัน และ phase angle จะต่างกันโดยมากกว่า 180°

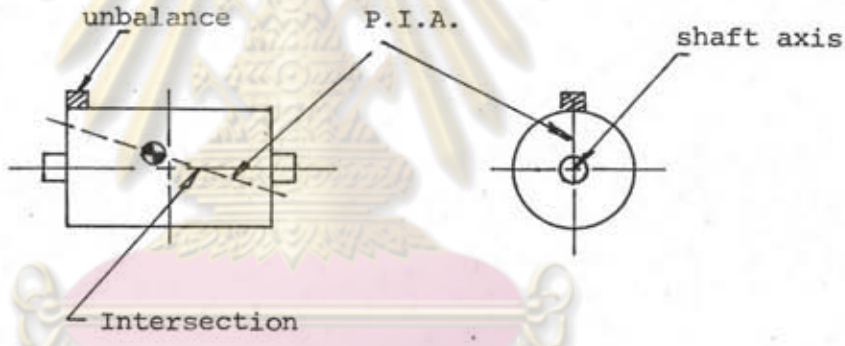
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Quasi - static unbalance

Principal inertia axis ตัดกับแกนของเพลาที่จุด ๆ หนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2-10 อันนี้เป็นกรณีพิเศษของ dynamic ซึ่งเกิดขึ้นจาก static unbalance และ couple unbalance อยู่ในระนาบเดียวกัน เมื่อนำโรเตอร์ไปวางบนเครื่องตรวจสอบขนาดการสั่นที่อ่านได้จะไม่เท่ากันในแต่ละแบริ่ง แต่ phase angle จะแตกต่างกันโดยประมาณ 180°



รูปที่ 2-9 ความไม่สมดุลย์พลวัตไดนามิค



รูปที่ 2-10 ความไม่สมดุลย์พลวัต Quasi-static

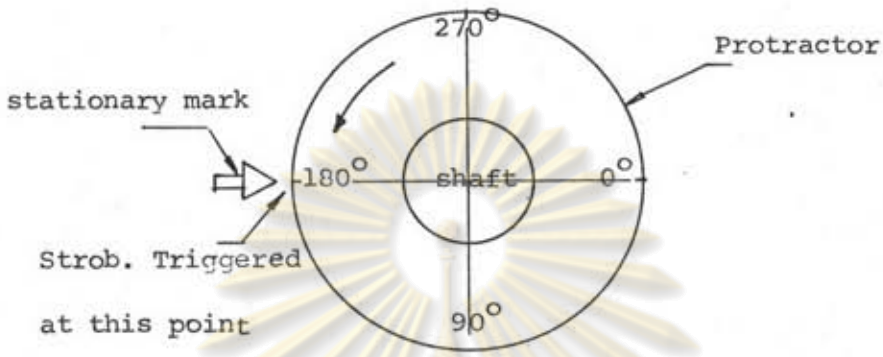
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Sign Convention

ในการอ่านตำแหน่งมุมของการสั่น (vibration angle หรือ phase angle) ต่าง ๆ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ระบบ ด้วยกันคือ

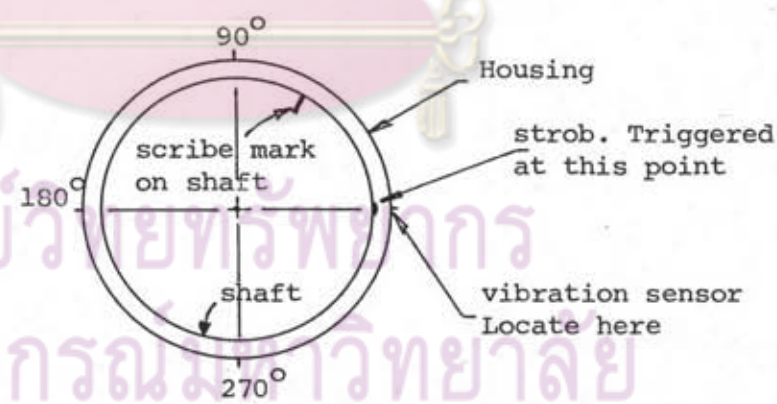
ระบบที่ 1 Rotating - protractor - stationary - mark system (R P S M) เครื่องตรวจสอบของเราได้จัดอยู่ในระบบที่ 1 โดยตัวโปรแทรกเตอร์ ทำจากแผ่นพลาสติก มาแบ่งมุมจาก 0° ถึง 360° บนขอบของแผ่นจานกลม 1 องศาเท่ากับ 1 ช่อง โดยมาตราส่วน $1^{\circ} = 1$ ม.ม. (การกระจัดเชิงมุม) ทำการล่วมยึดแผ่น

โปรแทรกเตอร์เข้ากับเพลาหมุน ให้ตัวชี้ตำแหน่งอยู่กับที่ เวลาจะอ่านตำแหน่งมุมก็ใช้ไฟสโตรโบสโคปส่องอ่านค่าที่ตัวชี้ตำแหน่งติดตั้งอยู่ ทิศทางการหมุนของโรเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกา แต่มาตราส่วนของมุมองศาเพิ่มขึ้นตามเข็มนาฬิกา ดังแสดงในรูปที่ 2-11



รูปที่ 2-11

ระบบที่ 2 Rotating - mark - stationary - protractor system (R M S P) ระบบที่ 2 นี้ จะจัดทำเครื่องหมายไว้ที่เพลา อาจจะใช้ย่อสักยึดไว้ หรือถ้าหากมีร่องก็ไม่จำเป็นต้องทำใหม่ โดยให้ตำแหน่งเชิงมุมอยู่กับที่ติดอยู่บน housing ดังแสดงรูปที่ 2-12



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2-12

การแสดงตำแหน่งของความไม่สมดุลย์ในทางปฏิบัติ (Indicated and Actual Angle of unbalance)

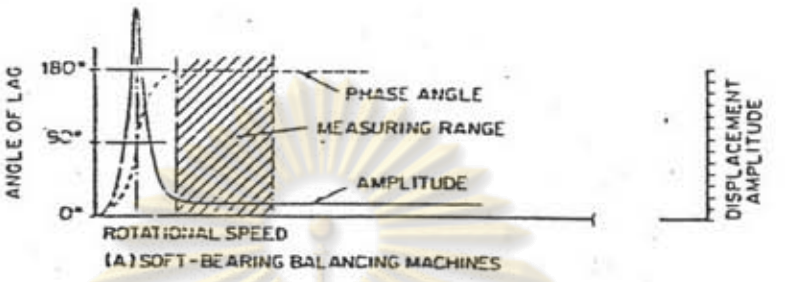
ในการตรวจสอบสมดุลย์จะเป็นแบบระนาบเดี่ยวหรือสองระนาบ เราต้องการที่จะหาขนาดและตำแหน่งของความไม่สมดุลย์ จากนั้นก็ดำเนินการตรวจแก้ไข โดยการถ่วงน้ำหนักให้กับชิ้นงาน แต่โดยทั่ว ๆ ไปแล้วเมื่อชิ้นงานอยู่ในสภาพไม่สมดุลย์ เราไม่สามารถที่จะทราบได้เลยว่าความไม่สมดุลย์อยู่ที่ตำแหน่งใด ๆ ของชิ้นงานหมุน ถ้าหากว่าอยู่ในตำแหน่งนั้น ๆ จะเรียกจุดนั้นว่า จุดหนัก (Heavy Spot) พิจารณาทางด้านกลศาสตร์ของชิ้นงานหมุนไม่ได้ให้ข้อมูลเราโดยตรง แต่ก็สามารถสังเกตได้จากผลของความไม่สมดุลย์ที่ทำให้เกิดการสั่นต่อแบริ่งทั้งสอง

ดังนั้นในขณะที่เราวัดขนาดการสั่น ถือโอกาสวัดตำแหน่งของการสั่นด้วย เราใช้สโตรโบสโคป ซึ่งต่อเข้ากับชุด Analyzer และลำแสงจะวาบขึ้น (flash) หนึ่งครั้งต่อการหมุนของชิ้นงานหนึ่งรอบ แสงวาบจะเกิดขึ้นขณะที่ตัวรับสัญญาณได้เกิดการกระจัดที่มากที่สุด ซึ่งจะแสดงตำแหน่งของการสั่น (phase Angle) เป็นตัวเลขปรากฏให้เห็นบน dial protractor ซึ่งนิ่งอยู่กับที่ ฉะนั้นจุดที่มองเห็นได้นี้เรียกว่า จุดสอง (High spot)

ถ้าหากระบบการรองรับอยู่ในรูปของ spring mass ที่มี Damping และความถี่ Resonance ต่ำเตียว เมื่อชิ้นงานหมุนด้วยความเร็วรอบต่ำ จุดสองจะอยู่ในตำแหน่งเดียวกันกับจุดหนัก แสดงว่าแรงของความไม่สมดุลย์สูงสุดกับการกระจัดที่มากที่สุด อยู่ในทิศทางเดียวกัน เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจะมีเวลา ล้าหลังระหว่างจุดทั้งสอง ดังนั้นมุมระหว่างสองจุดนี้เรียกว่า มุม ล้าหลัง (phase lag) ขณะที่ชิ้นงานหมุนด้วยความเร็วรอบเพิ่มขึ้นต่อไปเรื่อย ๆ Resonance ของระบบเกิดขึ้น มุมหล้าหลังเป็น 90^0 หากความเร็วเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าของความเร็ววิกฤติ มุม ล้าหลังเข้าใกล้ 180^0 และที่ความเร็วเพิ่มขึ้นมากกว่าสองเท่าของความเร็ววิกฤติ มุม ล้าหลังจะเป็น 180^0 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมแห่งการ ล้าหลังและขนาดของการกระจัด กับความเร็วรอบของเครื่องตรวจสอบสมดุลย์ชนิด Soft-Bearing ดังแสดงในรูปที่ 2-13

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

009721



รูปที่ 2-13 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมแห่งการ ล้าหลัง , ขนาดของการกระจัด กับความเร็วรอบต่าง ๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย