

機電修護工程學

陳樹勛 編著

作者簡介

陳 樹 勛 (S. H. Chen)

國立廈門大學機電工程系畢業
英國 Metropolitan-Vickers 兩年制機電工程研究班畢業
英國 Manchester College of Technology 工業管理研究班卒業
英國國家特許工程師 (Chartered Engineer, U.K.)
越南紗廠、越南印染廠顧問工程師
臺灣電力公司十四等機械工程監
臺灣電力公司十四等企業管理監
臺灣電力公司修理廠廠長
臺北工業專科學校兼任教授
中華企業管理發展中心講師
中央標準局電氣工業標準起草委員
臺北市工業會監事
英國機械工程師學會會員 (M. I. Mech. E.)
中國機械工程學會理事
中國電機工程學會理事
著作：企業管理方法論
創造力發展方法論

版權所有
翻印必究

機 電 修 護 工 程 學 (Mechanical & Electrical Maintenance)

——工廠機電問題之解決與設備之修護——

每冊實價新臺幣一百二十元

編 著 者	陳	樹	勛
發 行 者	陳	文	哲
發 行 所	中華企業管理發展中心		
	臺北市武昌街二段卅七號三愛大樓		
	電話總機：3 3 1 6 5 0 • 3 3 2 8 6 2		
	郵政劃撥儲金戶第 1 4 2 3 2 號		
印 刷 所	精	進	印 務 局
	臺北市武昌街廿二 • 廿四號		

中華民國六十一年十一月再版

本中心經內政部核准登記登記證為內版業字第1526號

序

提高工廠生產能力及產品品質的重要工作之一，為對廠內機械及電氣設備加強維護，防止故障的產生，而且經常保持其精密狀況。工廠設備雖然各異，但其所遭遇的機電問題則類相同。譬如：機器發生振動，材料產生疲勞裂隙，設備腐蝕，潤滑不良，動力機械之安裝或中心對準不良，電氣設備絕緣劣化，以及電動機或變壓器之燒損等等。此等問題發生時，均嚴重地影響了生產的進行。本書乃針對生產機構所共同遭遇的這些機電問題，提出其基本原因，預防措施，與具體的修護方法，以應今日在劇烈的生產力競爭下，提高我國工業生產設備維護水準的需要。

一般言之，機電設備維護的簡要原則如下：

(一)保持穩定：高速迴轉的機械，由於磨耗或機件鬆弛，將使機械逐漸發生振動，以致將有用的能量來做破壞性的工作。導致設備之損壞，或降低其精密度。所以必須定期測定其振動之變化，將鬆弛部份鎖緊，或採取平衡措施，保持運轉的穩定狀態。

(二)保持清潔：不論是日積的灰塵，油污，金屬微粒或化學粉末，都將妨碍運轉。污物累積在電機運轉部份，發生較高阻抗導致發熱，甚或使線圈發生短路。各種電機器具的檢查得包括一有系統的器具清潔表。

(三)保持乾燥：潮溼會增加污物的附着，同時使銅鐵生銹，導致較高阻抗因之發熱。潮溼並將促進電氣絕緣之劣化。所以要注意維持適當的溫度，並儘量保持乾燥。

(四)保持潤滑：所有相對運動的部份都要使其發生最小摩擦，否則此等部份將導致磨損及發熱。適當的潤滑將使粗糙面間因油膜而隔離，減少磨損使機器運轉平滑。

以上工作有賴於預防保養制度的建立。定期檢查，建立紀錄，適時採取修護措施，使故障消弭於無形，而不致釀成嚴重損失。不過對這些問題，技術上的正確瞭解，則為機電保養及修護人員，所必須獲得的重要智能之一。

作者在國內外從事機電工程及修護工作至今廿五年，所累積之資料頗多。敝帚自珍，倘不加以整理，任令散失，殊感可惜。因此倘能因此書之刊行，在國家建設聲中，貢獻一得之愚，公諸社會，實為衷心之願望。

本書作成，除根據作者多年工作上所累積之資料與經驗，及參考國內外論著外，並承 張國泰先生，許憲標先生，杜樹林先生，江添富先生提供之資料不少，方能使此書獲得比較完整的體系。至於鐫繪之勞則承 江振芳先生，劉東海先生之助為多，並此致謝。

此書尚未脫稿之時，即承中華企業管理發展中心 李董事長裕昆之重視，提前予以付梓，精裝刊印，至為令人感謝。

作者學殖有限，公餘編述，時間極不充裕，錯誤之處知所難免，尚望工業界先進有以正之。

陳樹勛 謹識

中華民國六十年五月

機電修護工程學目次

第一章	迴轉機械的振動與平衡	1—54
1.1.	迴轉機械振動的原因	1
1.2.	振動之允許制限	21
1.3.	迴轉體靜態平衡與動態平衡之理論	27
1.4.	動態平衡用機械	42
1.5.	單面與双面平衡計算法	47
第二章	金屬機械材料非破壞性探傷法	55—155
2.1.	磁性探傷法	55
2.2.	超音波探傷法	71
2.3.	放射線檢驗	97
2.4.	液體浸透檢驗	117
2.5.	應變量測規檢驗	114
2.6.	非破壞性檢驗之重要用途	126
第三章	機械腐蝕	157—208
3.1.	金屬腐蝕之原因	157
3.2.	腐蝕之種類	163
3.3.	防蝕對策	166

3.4.	蒸汽與凝結系統之抗蝕法·····	192
3.5.	冷卻系統之腐蝕·····	195
3.6.	燃燒所發生之低溫與高溫之腐蝕·····	200
3.7.	機器結構之腐蝕·····	203
3.8.	地下管路的腐蝕·····	206
第四章	潤滑與軸承的故障 ·····	209
4.1.	潤滑理論·····	209
4.2.	潤滑劑·····	215
4.3.	抗摩軸承的故障·····	220
4.4.	普通軸承之故障·····	229
4.5.	齒輪潤滑與故障·····	232
4.6.	汽車用軸承之潤滑與故障·····	236
第五章	熱力機械之裝配與檢修 ·····	241—305
5.1.	蒸汽透平現場安裝方法·····	241
5.2.	透平發電機聯結器之中心對準·····	263
5.3.	透平機檢修工作法·····	272
5.4.	柴油機之故障與維護·····	295
第六章	水輪機之安裝檢修與焊接 ·····	306—341
6.1.	水輪機現場安裝方法·····	306
6.2.	水輪機之檢修及維護·····	317

6.3.	水輪機件之焊補方法	334
第七章	電氣絕緣	343
7.1.	電機絕緣構造的分類	343
7.2.	絕緣材料特性	345
7.3.	一般用絕緣材料之基本性質	349
7.4.	電機部份品之主要絕緣構造	366
7.5.	絕緣劣化之原因	375
7.6.	絕緣材料之清洗與烘乾	380
第八章	電氣非破壞性檢驗	383—417
8.1.	絕緣電阻測驗器	383
8.2.	功率因數試驗	391
8.3.	交流電流試驗法	395
8.4.	接地線電流波形法	398
8.5.	衝擊電壓試驗	405
第九章	感應馬達與同步馬達之故障與修理	419—463
9.1.	感應馬達線圈繞組之錯誤	419
9.2.	操作錯誤	434
9.3.	繞線轉子馬達與同步馬達滑環之修正	440
9.4.	補償器故障	441
9.5.	同步馬達的故障	449

第十章 變壓器之保養點檢與維護465—548

- 10.1. 工廠配電用變壓器之型態與保護..... 465
- 10.2. 變壓器保養及檢查..... 494
- 10.3. 保養點檢之標準..... 513
- 10.4. 變壓器之現場乾燥法..... 529

第一章 迴轉機械的振動與平衡

1.1. 迴轉機械振動的原因

1.1.1. 振動原因

迴轉機械在製造過程中，由於加工精密度及原材料均勻性的制限。及在運轉狀態中軸承間隙，聯軸節定心，以及由於溫度產生變形，與磁力中心變位等等原因之影響，在運轉時不可能無微量的振動。如果其振動的振幅在容許範圍之內則當視為正常情形。但是當某種缺憾之原因逐漸嚴重之時，振動將隨之增大，此時導致部份有用之能量，做成破壞性的工作，加速機械磨耗肇致故障。因之機械振動的測定，在預防性保養上，成為預測機械故障的一項非常有用的工具。而且不同故障的原因形成不同的振動頻率 (Frequency) 與振幅 (Amplitude) 之現象。所以對於振動狀態的衡量與分析成為發現故障的重要方法之一。

1. 在維護上 (Maintenance)：振動的分析可以迅速發現缺憾原因，予以修復。

2. 預防性保養 (Preventive Maintenance)：有計劃的週期性對振動的測量，可在早期發現缺憾原因施以預防。

3. 品質管制 (Quality Control)：消除由於工作機械振動使得產品的加工粗劣及尺寸的誤差，以提高產品品質。

4. 檢驗 (Inspection)：機械運轉的振動量應作為裝機完畢時驗收條件之一，以確保機器運轉的圓滑。

5. 壽命 (Life)：劇烈的振動將迅速縮短機械的壽命，迴轉機械使用的年限倚賴於限制其振動在允許範圍內。

迴轉體的振動起因甚多，例如：

1. 不平衡 (Unbalance)
2. 對心不良 (Misalignment-Coupling or Bearing)
3. 軸頸不良 (Eccentric or Out-of-round Journal)
4. 軸承不良 (Bad Bearings)
5. 齒輪不良或有聲音 (Bad Gears or Gear Noise)
6. 機械鬆動 (Mechanical Looseness)
7. 皮帶拖動不良 (Bad Drive Belts)
8. 機構共振 (Resonance)
9. 電磁不平衡 (Electrical or Magnetic Unbalance)
10. 流體動力 (Aerodynamic or Hydraulic Force)
11. 機械往復力 (Reciprocating Force)

1.1.2. 迴轉子的不平衡

迴轉機械發生振動時，吾人首先考慮到的必是迴轉子 (Rotor) 重量之不平均。這可能是由於製造時的誤差或材料不均勻，使得迴轉體的幾何中心 (Geographical Centre) 與質量中心不能一致，因之發生離心力，以致每迴轉一周即發生一次振動，因之其振動之頻率與迴轉數相等，使得機械發生嘈音，軸承承受額外負擔以致材料疲乏 (Fatigue) 終至損壞。

假設 δ 為實際質量中心與迴轉軸心所誤差之距離。在相當優良的靜態平衡技術下所能達到最小的 δ 有賴於平衡台刀口邊緣 (Knife Edge) 所用之材料與平滑度。

倘以軟鋼軸放在鑄鐵刀口平衡台上之情形，最佳之 $\delta = 0.00113$ 吋。
 。如果放置在硬鋼刀口上則可達到 $\delta = 0.0004$ 吋，即 $\frac{4}{10,000}$ 吋。粗略
 視之 $\frac{4}{10,000}$ 吋之誤差似乎已極微小，事實上

$$\text{離心力 } F = \frac{W\omega^2}{g} \delta = \frac{W}{g} \delta \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2$$

設 $n = 3,600$ r.p.m.

$$\begin{aligned} \text{則 } F &= W \times \frac{4}{10,000 \times 32.2 \times 12} \times \left(\frac{2\pi \times 3,600}{60} \right)^2 \\ &= \frac{14.6}{100} W = \frac{15}{100} W \end{aligned}$$

設 $n = 6,000$ r.p.m.

$$\begin{aligned} \text{則 } F &= W \times \frac{4}{10,000 \times 32.2 \times 12} \times \left(\frac{2\pi \times 6,000}{60} \right)^2 \\ &= \frac{40}{100} W \end{aligned}$$

上列表示 $\frac{4}{10,000}$ 吋之差距，視之似乎相差極微。但在 3,600 r.p.m. 時其離心力可等於迴轉體重量之 15%。在 6,000 r.p.m. 時，離心力可等於迴轉體重量之 40%，其破壞力已相當可觀。

有者非由於製造上之原因，却是爲了經過長時期運轉之後，累致發生不平衡現象。譬如馬達迴轉體爲了迴轉子和冷却扇附着了大量塵埃或油渣等等，以致產生重量不平衡現象。此種情形加以清掃即可消除。尤其捲線型迴轉子 (Wound Type Rotor) 經過長時期之使用，楔鐵發生鬆馳以及絕緣物枯化，綁線變形等也可以產生不平衡重量之現象。此時務必重新施行平衡調整。倘爲大型機械則須送到原廠家施行迴轉下之平衡才可完善。

1.1.3. 軸彎曲

軸彎曲時之振動現象跟迴轉子不平衡之現象相同，且為常見之一種故障。所以遇有振動發生時也是首先要予以測量調查以確定軸是否發生彎曲。軸發生彎曲之原因如下：

1. 外物撞擊軸端。
2. 當軸承燒壞時，軸頸本身受了高溫影響，產生了“加熱變形”。
3. 軸材料組織不均衡，因而產生了不平衡的熱膨脹。

解決的方法，除了在可修正之範圍內儘量予以修正，如果超出範圍則須換用新軸。一般修正軸彎曲的方法如：

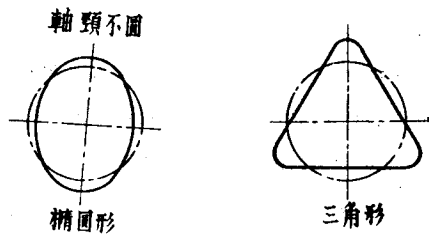
1. 以敲打把軸材料之結晶性拉伸。
2. 以“炙法”加熱急冷使其收縮。

1.1.4. 軸頸被磨成橢圓形或成為三角形

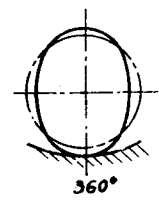
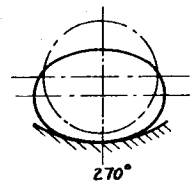
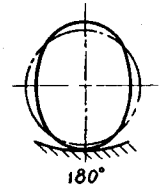
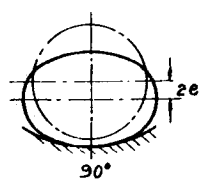
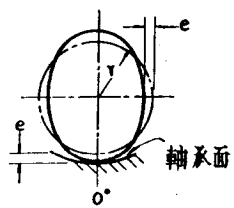
大型迴轉機軸頸 (Journal) 經過研磨加工應該為完全圓形。但有時由於對心不良或研磨機振動及加工疏忽等可能形成橢圓形或輕微之三角形。前者由於每一迴轉軸心昇降兩次勢必引起迴轉數之 2 倍的頻率，後者勢必引起了 3 倍於迴轉數的頻率之振動，見圖 1.1.4.

2 倍頻率之振動之現象極易與磁力振動 $2f$ 相似，所以往往會引起誤會。區別的方法係將電源切斷，如果仍為 $2f$ 的振動頻率則可能屬之。尤其是在誘導馬達 (Induction Motor) 時，因發生滑動 (Slip)，所以其振動頻率應比電源頻率數值之 2 倍為小因之判別不難。此種振動之振幅不大，但如果軸系之自然頻率 (Natural Frequency) 適為轉速之 2 倍時則將發生共振。

在某一實例中發現一支直徑 9 吋之轉軸，其直徑誤差為 0.002 吋，在 900 r.p.m. 之轉速下發生 0.006 吋振幅之振動。



橢圓形軸迴
轉時之情形



可能發生兩倍於轉速的頻率

圖 1.1.4

1.1.5. 滾動軸承之內圈 (Inner Race) 或外圈 (Outer Race) 之裝置與軸心不垂直

大部份起因於軸類不能成為直角，或裝配之嵌合不當。圖1.1.5.表示當轉動時，動輪軸與軸承外壳所發生之軸向遊移之情形。此種振動現象一如軸心彎曲一般，其振動頻率與迴轉數相等，但會產生軸向振動。亦即當我們測定振動時，軸方向之振幅可能會比垂直方向者為大。

1.1.6. 滾動軸承有條痕時

滾動軸承由於輸送時受到撞擊，或在停止中由外來振動而引起之壓痕，不僅成為振動之起因，甚至產生極大噪音，倘情形嚴重則必須予以重換。

1.1.7. 由於滾動軸承之構造上引起者

每一鋼珠均有其固有之彈性係數。而且其彈性係數隨着鋼珠位置之移轉而產生週期性之變化。其頻率與迴轉數常無明顯的關係。解決之方法如：

1. 鋼珠軸承予以加壓。
2. 使用半徑方向間隙較小的軸承。
3. 換用另外一種牌子的鋼珠軸承。

1.1.8. 油膜滾動 (Oil Whip)

高速度迴轉機如蒸汽透平等，使用平滑軸承時，由於油膜狀態引起的振動其情形如下：

1. 軸在其臨界速度 (Critical Speed) 2 倍以上迴轉時可能發生

鋼珠軸承在軸頸上裝置不正之情形

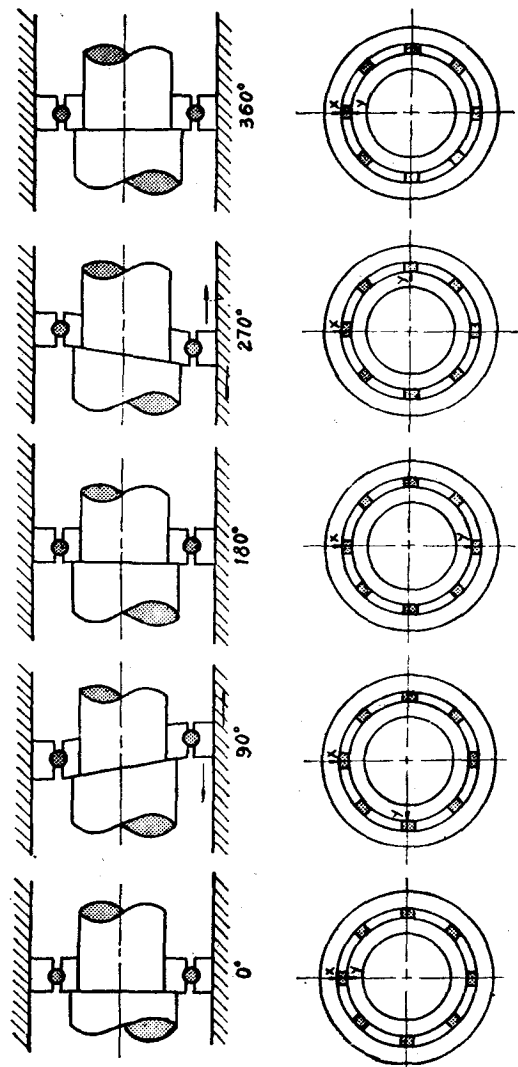


圖 1.1.5

振動。

2. 油膜振動之頻率與軸轉速無直接關係。其振動頻率常等於軸之臨界速度。即振動頻率為迴轉數之 $\frac{1}{2}$ 或以下。

3. 一旦油膜振動發生之後，提高迴轉數，振動亦不消滅，而且其頻率不變。

4. 油膜振動消滅時之轉速，可能與發生油膜振動時之轉速並不一致。

5. 油膜振動係為自激（Self-excitation）而發生，故振動係為突發而非逐漸增大者。

油膜振動的防止方法如下：

1. 使轉速低於 2 倍臨界速度。
2. 增強適當的軸承支持容量。
3. 潤滑油勿使太多。
4. 減少軸承 L/D 之比例。
5. 適當軸承間隙。

1. 1. 9. 帶動其他機器發生振動

例如馬達本身並無異常振動，但與其他機器聯結時則發生振動。此時應當查看聯結器有無偏心，軸與聯結器是否成直角。偏心允許度雖隨馬達容量之大小而異。以 100KW 之二磁極機為例。偏心誤差應在 $\frac{2}{100}$ 至 $\frac{3}{100}$ m.m. 以內。面之偏歪應在 $\frac{2}{100}$ m.m. 以下為宜。再者倘聯結器之螺栓鬆落，或可撓型聯結器螺栓之橡皮套磨耗，因之每一螺栓之傳動力不均勻時，也會發生異常振動的。如遇若干部機器一起分解時，聯結器應成對保管以免錯配。

有時由於負載時常變化，如火力電廠之磨煤機，吹風機，高壓液

體電動泵等，容易產生不平衡現象。務必充份注意到日常之保養。施行定期振動測定以期預先發現異狀加以修護為宜。

1. 1. 10. 軸之臨界速度

此為設計上之問題。在理論上迴轉機械以採用硬軸為佳。所謂硬軸即其一次臨界速度係在轉速以上。但在大客量之高速機器，如此設計甚不經濟。所以運轉速度務必在一次危險速度與二次危險速度之間。至少各離開轉速20%以上為宜。關於臨界速度之理論將在本章他節論述。

1. 1. 11. 構架關係之共振

迴轉機所裝置之構架，其固有振動數如果很接近迴轉數時，構架勢必產生共振現象而發生極大振動。電源頻率若接近於構架固有振動數之2倍時亦將發生磁力共振，均應遠離之為宜。

共振現象在機器運轉之前未能被發現，一旦裝置完竣之後不易改變其固有振動數。以馬達帶動水泵為例。此一系統之固有振動數非為馬達單體，也不能僅視為水泵台架與馬達兩系統之振動，還要加上基礎，包括吸水管，出水管等等。因之多為最初設計時難以計算準確者，而在裝置之後始被發現。此時變更那一部份之彈性係數方為有效，需要十分複雜之研究。

萬一發現共振現象時，則變化其共振點有兩個辦法。其一為增加其剛性，把共振點提高到定格迴轉速度以上，這是較基本而安心可靠之辦法。但是近年來為了經濟的觀點採取另外一個辦法，把定格運轉速度拖到共振點以下的辦法逐漸廣被採用，此法勢必考慮到高度調頻(High Harmonic)的問題。