

馬達品質自動檢測分析—

鼠籠式轉子的鑑定技術

Evaluation Techniques
for
Squirrel-Cage Rotor



目錄

1.	<u>簡介</u>	2
2.	<u>非同步電機的電路模式</u>	2
2.1	<u>理論</u>	3
2.2	<u>轉子阻抗的決定</u>	5
2.3	<u>阻抗在操作特性上的影響</u>	7
3.	<u>感應的量測</u>	8
3.1	<u>基本檢測原理</u>	8
3.2	<u>影響感應量測的因素</u>	9
3.2.1	<u>轉子與感測器的間隙</u>	9
3.2.2	<u>轉速</u>	9
3.2.3	<u>感測器與轉子的斜槽角度</u>	9
3.3	<u>波形的數學評定</u>	11
3.3.1	<u>斷槽</u> (Broken bar)	11
3.3.2	<u>半波長</u> (Halfwave length)	12
3.3.3	<u>振幅</u> (Amplitude)	12
3.3.4	<u>不良斜率</u> (Slope error)	13
3.3.5	<u>偏心</u> (Eccentricity)	14
3.3.6	<u>整體比較值</u> (Overall value)	15
4.	<u>結論</u>	16

1. 簡介

鼠籠式轉子的發明，使得非同步電動機的結構更簡單，在價格上比其它電動機更具競爭力，且不須要基本維修。目前工業上大多數的小馬力電動機，都採用鋁籠。因為轉子鋁棒都在一個封閉的槽溝內，不易接近，因此鋁棒品質的檢測方式，受到相當大的限制。此外，轉子的電磁特性評估，也被限制在實驗室的環境下進行。

雖然鼠籠式轉子的結構看起來相當簡單，但是在沖片、壓鑄的製造過程中，仍然有相當多技術上的問題有待克服。從材料的選定到製造的每個過程，都會影響轉子品質的好壞。

對馬達製造商而言，找出一個不合格成品的形成原因是非常困難的。通常，透過馬達製造過去的精密分析，可以找出不合標準馬達的形成原因。除了傳統的尺寸規格控制以外，沒有簡單且可信賴的方法，可以在轉子的製作過程中，提供品質的控制。同時，轉子的電磁特性是在馬達組裝完成或經過實驗室的測試之後最早被得知的。大部份的情況是在生產了幾百個，甚至幾千個馬達後，轉子的瑕疵才會被明顯的看出來。而根本瑕疵不易被找出的主要原因是由於一個產品通常會有週期性的瑕疵產生，而且當問題不再發生時，要鑑定根本瑕疵的原因，就幾乎，不可能了。

因此，在轉子組裝前，我們極需要量測轉子品質的技術。而且，量測轉子品質的技術應該提供線上即時的過程監督及回授。

自然的，轉子品質的測試不僅是判斷產品的合格與否，而應去瞭解各種產品製造出來的可能原因。各種不同瑕疵對產品所造成的影響也是我們該去研究的。轉子生產必須利用統計分析的方法來控制，而上述的測試及控制也儘可能採用線上即時的方式。

2. 非同步電機的電流模式

2.1 理論

靜止時的非同步電動機相當於一部短路的變壓器，定子相當於一次側，而轉子相當於二次側。定子的旋轉磁場會感應電壓 V_2 及電流 I_2 ，至轉子

鋁棒。短路的鋁棒透過圓環產生最大感應電流。轉子電壓的大小及頻率取決於旋轉磁場(W_s)及轉子(W)的相對速度。一般定義此相對速度為轉差

(S)

$$S = \frac{W_s - W_m}{W_s} \quad S = 1 \text{ 靜止}, \quad S = 0 \text{ 同步轉速}$$

V_2 與 S 成正比

轉子電流的大小則取決於歐姆阻抗及洩漏阻抗。當速度增加，轉子電壓的頻率會跟著降低而導致洩漏阻抗降低。(X₂' 與 S 成正比)

理論上，轉子的電阻(R_2')為常數，但是我們必須考慮到的是 R_2'/S 的電阻隨著轉速而有極大的改變。圖 2-1 是非同步電機的電流模式。

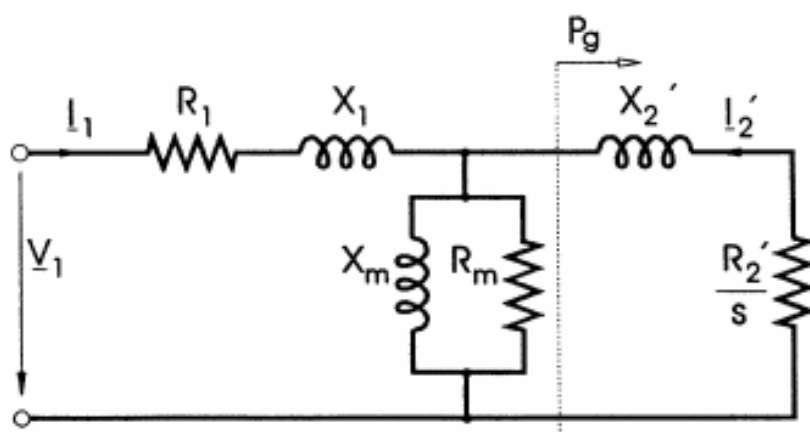


圖 2.1 非步電機的電流模式

X_1	定子的洩漏阻抗	R_m	鐵損的電阻
X_2'	轉子的洩漏阻抗 *	V_1	定子電壓
X_m	磁化電抗	I_1	定子電流
R_1	定子繞組的電阻	I_2'	轉子電流 *
R_2'	轉子繞組的電阻 *	P_g	氣隙功率

* 換算至定子側

透過定子電壓(取決於定子的匝數與幾何結構)的轉換推導，我們就可以求得 R_2' 及 X_2' 的值，但是我們只是要比較電阻值及阻抗值，所以並不需要將 R_2' 及 X_2' 的值找出來，只要知道轉子電阻 R_2 與 R_2' 成正比及洩漏阻抗 X_2 與 X_2' 成正比的特性就可以了，而不必求出實際值。下圖(圖 2.2)為非同步電機的功率流程圖：

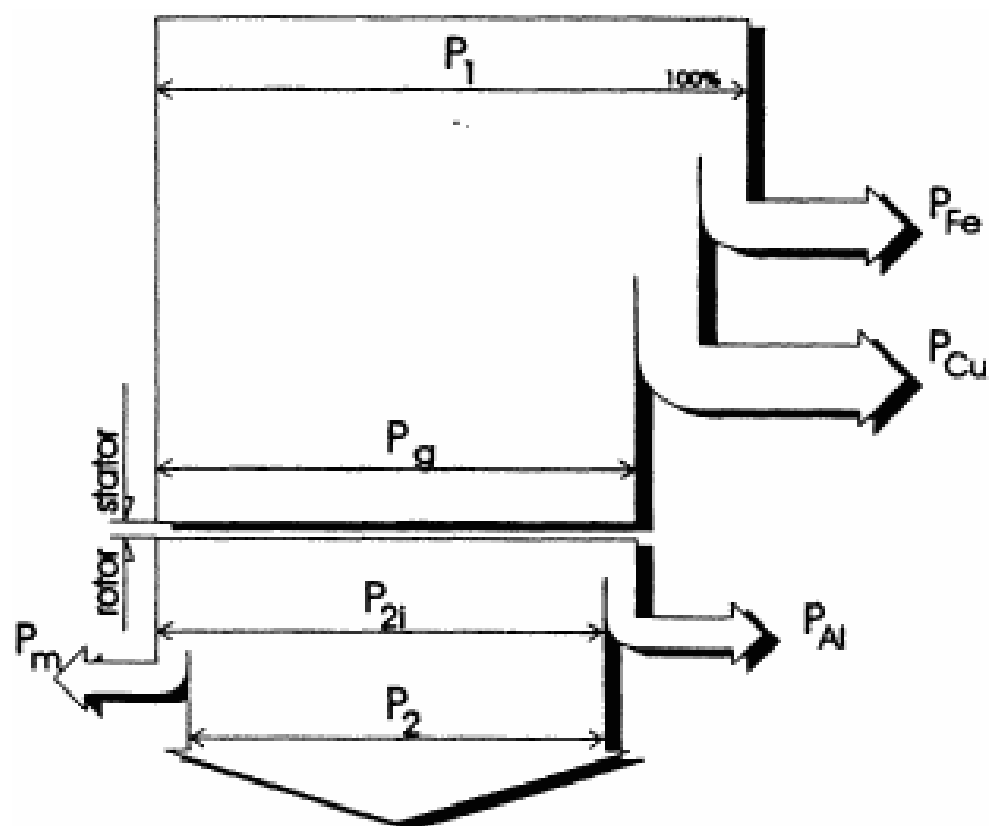


圖 2.2 非同步電機的功率流程圖

P_1	輸入功率
P_{Cu}	定子銅損
P_{Ai}	轉子電器損

P_m	摩擦與氣隙損
P_{Fe}	鐵損
P_g	氣隙功率
P_{2i}	轉換功率
P_2	輸出功率

2.2 轉子阻抗的決定

如果我們假設轉子的槽漏磁通是由馬達的幾何結構來決定的，那馬達的預期表現就可單獨由轉子的電阻來決定。為了讓磁阻及鐵損的影響降至最小，大部份的文獻都會建議電阻的測試必須在轉子堵住的狀態下實施。量測時，為了確保不會超過額定電流，我們必須維持額定頻率及降低試驗電壓。

單相馬達的主繞組在定子中，僅會產生一個交變磁場。在轉子堵住測試中，並非所有轉子鋁棒都要被定子磁場所含蓋(見圖 2.3)。如果轉子的電磁特性並不對稱，那轉子與定子磁場相對於不同位置點的功率不相同也是可想而知的。透過低轉速及高頻多迴轉數平均功率測量的安排，可緩和這個問題並給予精確的測量值。

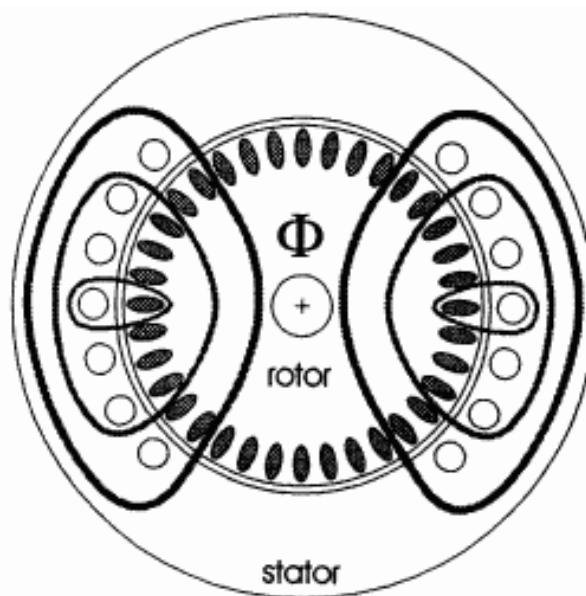


圖 2.3 單相繞阻的磁場

在電阻量測時，繞阻溫度的影響是不能忽略的。銅和鋁會隨著攝氏一度

的變化而有 0.4% 電阻的變化。為了補償轉子電阻至 20 的狀態，以下所列的變數應該被知道或測量：

被測值：	轉子溫度	I_R	[]
	定子溫度	I_S	[]
	功率	P_1	[W]
	定子電壓	V_1	[V]
	電流	I_1	[A]

已知值：	定子電阻	R_{s20}	[Ω]
	鐵損	P_{30}	[W]
	定子繞組的溫度系數	α_s	[K ⁻¹]
	轉子的溫度系數	α_R	[K ⁻¹]

因為量測是在降低電壓的狀況下進行，所以必須將鐵損值推算至相同的電壓等級。矽鋼片原料供應商也應提供在指定電壓下的鐵損值。或許藉由無載測試找出鐵損值是較容易的方法。因為鐵損與電壓的關係是一個二次方程式，因此在 30V 時的值能直接由 $P=f(V^2)$ 的曲線圖中找出。為了量測過程的精確，轉速必須維持一定，所以固定的摩擦及氣隙損也會存在。圖 2.4 顯示出在 30 時的鐵損如何被決定。

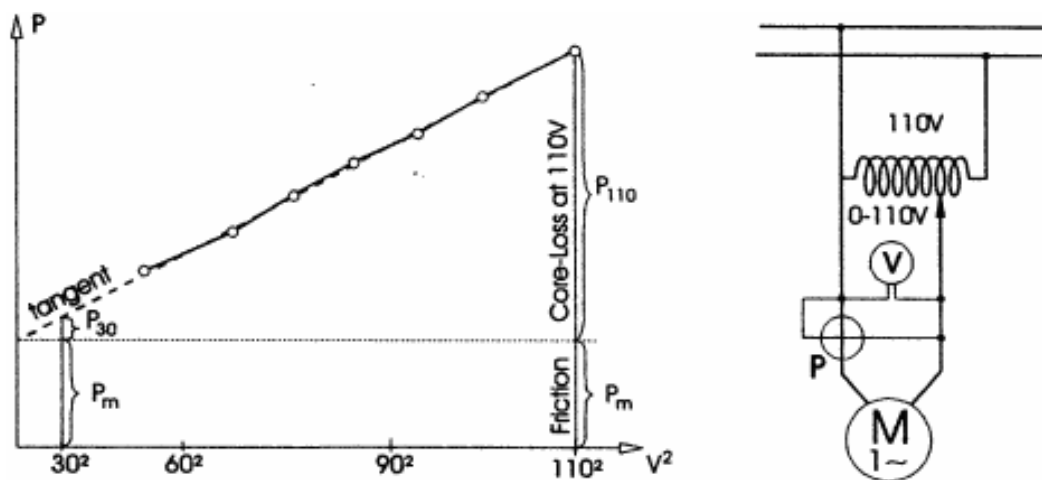


圖 2.4 非同步電機鐵損的決定

轉子阻抗的計算：

定子電阻@ I_s : $R_s = R_{s20}[1 + \alpha_s(I_s - 20)]$

定子銅損: $P_{cu} = R_s I_1^2$

鐵損: $P_{Fe} = P_{30}(V_1/30V)^2$

氣隙功率: $P_G = P_1 - P_{cu} - P_{Fe}$

轉子電阻@ I_R : $R_2' = P_G/I_1^2$

轉子電阻@20 : $R_{R20} = R_2'/[1 + \alpha_R(I_R - 20)]$

2.3 阻抗在操作特性上的影響

由電路模式的理論，我們可以得到以下的關係:

轉子電阻愈大，起動扭力愈強
轉子電阻愈小，效率愈佳

以上兩項關係，只有在轉子的槽漏磁通不隨轉速改變的理想狀況下才會成立。而大部份的情況下，漏磁通會隨著轉速集膚效應而有所改變(見圖 2.5)。其結果是鋁棒電阻顯著增加，尤其在低轉速的情況下更可看出其改變。

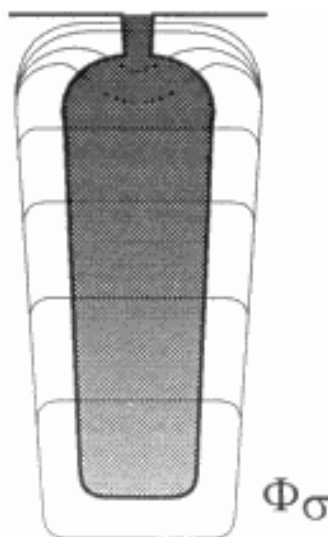


圖 2.5 轉速隨著漏磁通而有所改變，"集膚效應"

對馬達製造商而言，轉子的電阻有一個容許範圍。在不考慮馬達特殊應用的情況下，則沒有必要要求過高或過低的阻抗。

如前面所述，電阻的量測就整個轉子測試而言僅是一般性條件。像劣質鋁合金、末端圓環的穿孔、及鋁棒與末端圓環的接觸不良等瑕疵，都可被判定。然而，一般評估的方法是選取少數發生間歇性瑕疵的轉子，然後求出平均值。

3. 感應的量測

電阻量測法的缺點之一是僅用一個數值來評估轉子。無論是斷槽、末端圓環穿孔、或是斜角不良等問題，並無法單由電阻量測的方法就可以判斷出來。除此之外，瑕疵如果牽涉到焊接或是起動扭力時，通常無法由電阻量測法來判斷。因此，對轉子鋁棒而言，一個單獨的電磁特性檢測方法來彌補電阻評估法之不足是需要的。

3.1 基本檢測原理

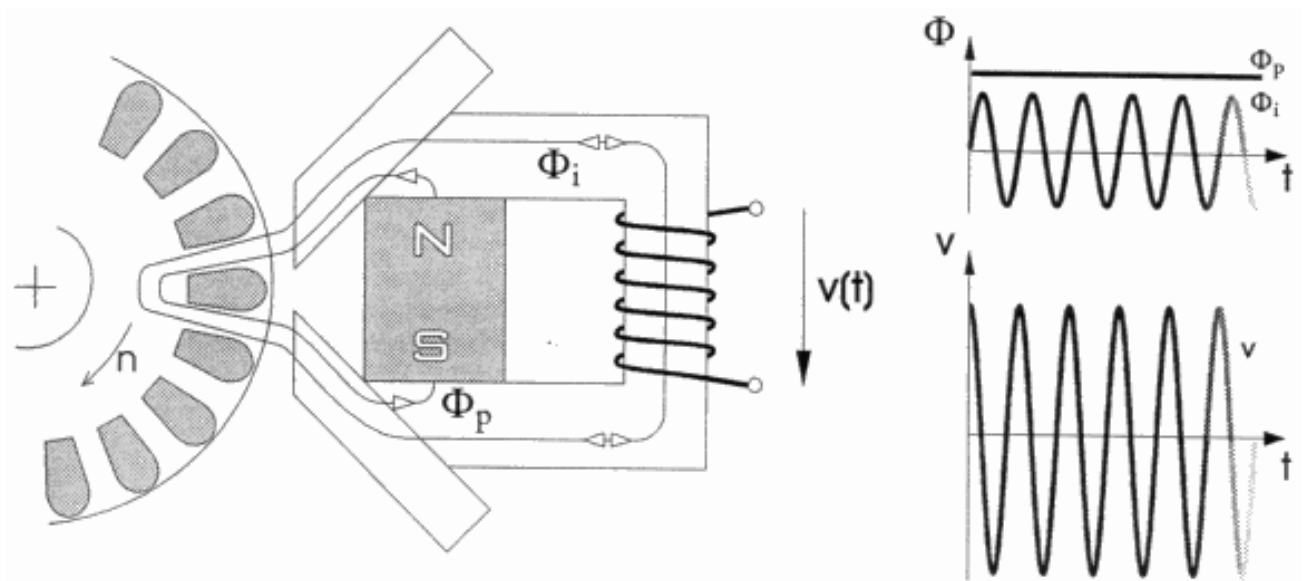


圖 3.1 感應量測的基本原理

電阻量測需要用到定子，而轉子的感應量測則不需要用到定子。轉子在一感應磁場中，以原先預定的轉速定速旋轉，此磁場相當接近轉子外圍，而使轉子鋁棒可受到磁場的感應，此時鋁棒會生成一個感應電勢。二次電流經由鋁棒兩端之圓環短路流通，而渦電流同時在鋁棒中生成，這些交變電流會在轉子中生成一個磁場，然後傳至感測器。感測器的檢測線圈則會生出一個感應電壓，此電壓之波形為正弦波，其每一週期代表壹支鋁棒；轉子旋轉一圈後，檢測即完成，感測器的信號會以數位方式

傳至電腦分析。圖 3.1 即為感應量測的基本原理。

3.2 影響感應量測的因素

3.2.1 轉子與感測器的間隙

轉子與感測器之間的距離，直接影響到信號的振幅，距離如果太小，信號將會過度調變。另一個問題是二次磁場強度的增加，可視為轉子與感測器之間的距離變小。因為距離的改變直接影響到信號的強弱，所以除了檢測電磁特性之外，也能量測轉子的偏心及機械偏差。

特別注意的是，可張開軸的機械偏差及旋轉的機構必須是非常精確。經驗告訴我們，在轉子與感應器之間最小要有一公釐的距離。為了量測的精確，轉子應該在測試前就開始運轉。

3.2.2 轉速

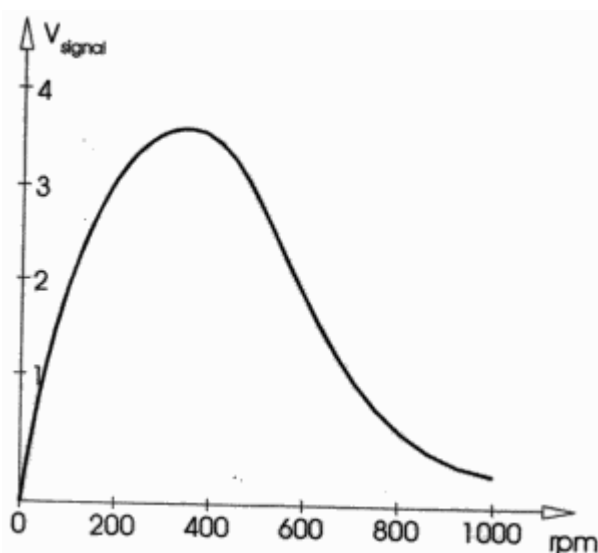


圖 3.2 轉速與信號強度的關係

首先假設轉速的提升會使感測器的信號增強，在某些特定點中，這個假設是可以成立的。當轉速上升時，感應電勢的頻率也會跟著上升，但當磁感應超越感測器的反應臨界點時，感應信號強度就會下降，從圖 3.2 也可看出，此結果與非同步機的直流煞車曲線圖非常接近。

3.2.3 感測器與轉子的斜槽角度

通常轉子的斜槽設計讓定子繞組與轉子產生反藕合。當轉子的斜槽與感測器的角度一致時，我們可獲得最大的振幅及靈敏度。不同感測器位置

的裝設能分辨不同種類的瑕疵，如果要找出特定個別的鋁棒問題，則感測器和斜槽的角度須一致，而使感測器的靈敏度最高，若要找出起動扭力的問題時，感測器的設定應該要儘可能與斜槽垂直。因為通常不只一個轉子鋁棒在感測器的感應區內，所以波形通常會重疊。如此會降低對每一鋁棒偵錯的等級。圖 3.3 為不同感測器與斜槽之角度對信號強度的影響。

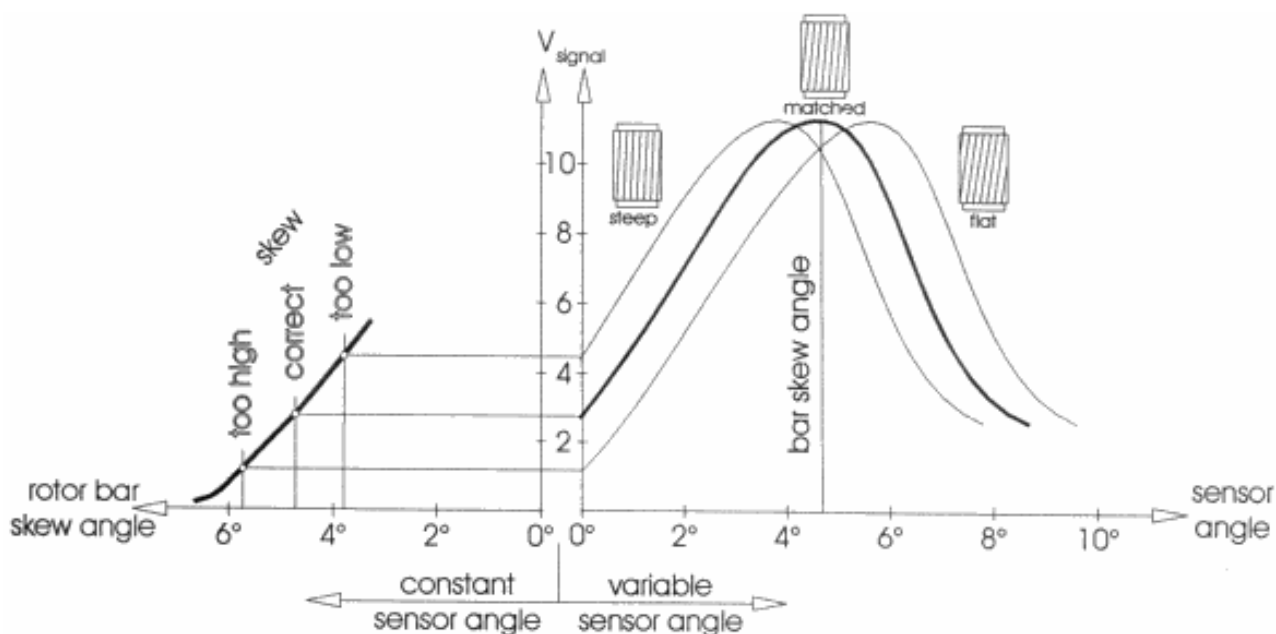


圖 3.3 感測器與斜槽之角度對信號強度的影響

透過信號振幅的分析，可將角度不正確的斜槽檢測出來。如果感測器與轉子斜槽的角度不同，感應電勢的振幅則會隨斜槽的角度與感應器的設定角度加強或減弱。不管那一種狀況，當轉子不良的斜槽被判定後，只有藉著調整感測器的角度而得到最大的感應信號，才能進一步調查得知角度偏大或是偏小。

3.3 波形的數學評定

感測器信號的獲得是由轉子感應而來，因此轉子的旋轉機構必須能維持一個穩定的速度。之前我們討論過，轉速必須理想化才能產生最強的信號，所以決定取樣頻率使之夠快足以得到完整的波形是個重要的關鍵。

如圖 3.4 所示，一個理想的轉子感應波形應該是正弦波。

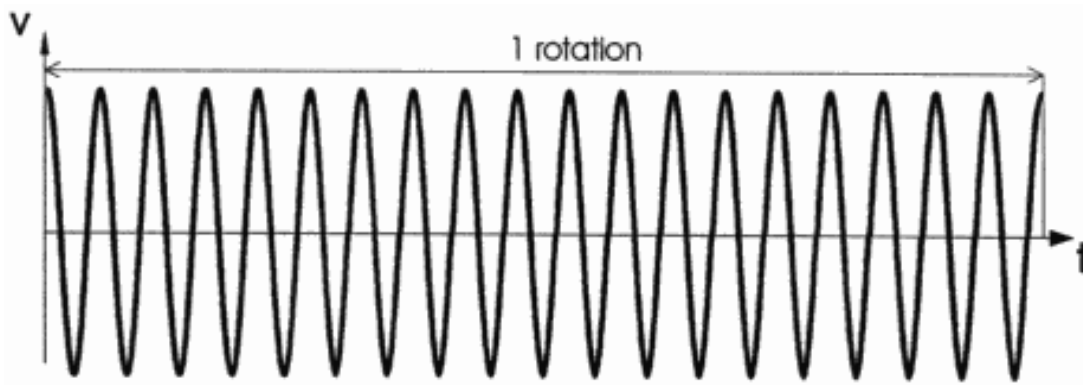


圖 3.4 理想轉子的感應波形

3.3.1 斷槽 (Broken bar)

斷槽是常發生在鼠籠式轉子的瑕疵之一。由於溫度、壓力、黏度、時間等關係，轉子製造過程中，鋁漿常會發生注入不均勻的現象。通常轉子槽在未能完全充填滿鋁合金時，會造成所感應出來的電壓有幾個波形不完整，經由計算零交叉點的數目，即可輕易檢出此種問題。圖 3.5 即為斷槽所產生的波形。

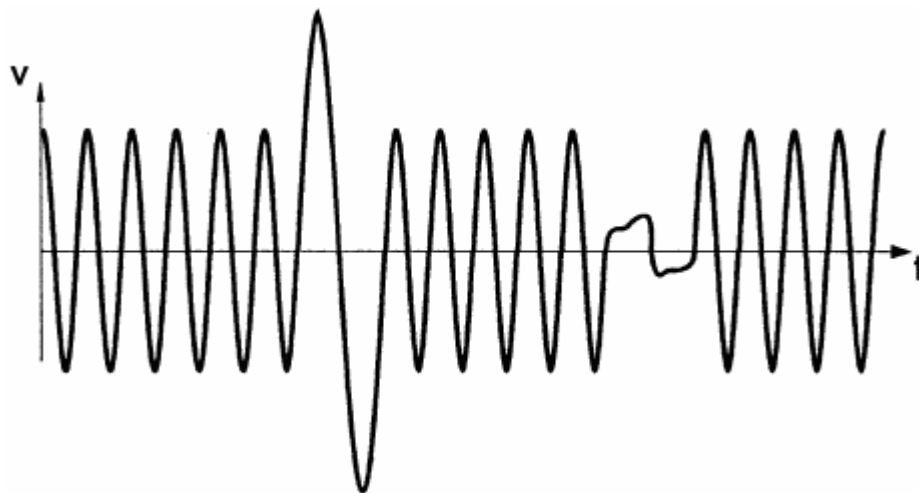


圖 3.5 轉子鋁棒有斷槽時的感應波形

3.3.2 半波長 (Halfwave length)

從一轉子的每一個鋁棒所感應出的半波長，其正半週與負半週的長度並不一定都要有相同。依照積層的幾合特性和與鐵與氧之間的氧化濃密程度，是可能會有不同的振幅與半波長的；然而，我們可以假設，對每一條鋁棒而言，正半週波長與負半週波長的長度和是一樣的。

對一個轉子的簡易評估而言，由每一個正半週波長與負半週波長所得之平均值，將可得到每一正負半週波長的容許偏移量。

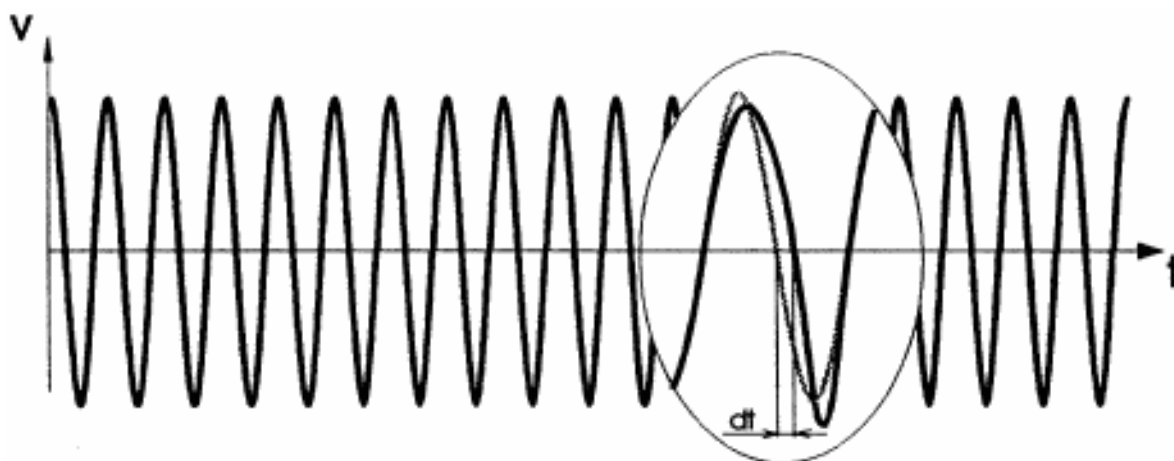


圖 3.6 半波長的波形偏移

3.3.3 振幅 (Amplitude)

當轉子鋁棒內含氣隙或出現瘡孔的現象時(非轉子鋁棒斷槽現象)，會造成轉子鋁棒所感應的振幅有明顯下降的情形。其原因如下:當轉子鋁棒內含氣隙或出現瘡孔的現象時，其內電阻會上升，因此感應電流會下降。此時，振幅也全部會衰減(鋁的條件不佳、壓鑄不良或斜槽不正確也會有此現象)。因為正負半週期振幅有不對稱的情形，因此應該將正負半週期分開來看。每個半波生成後，最小波形的絕對值就是偏差值。

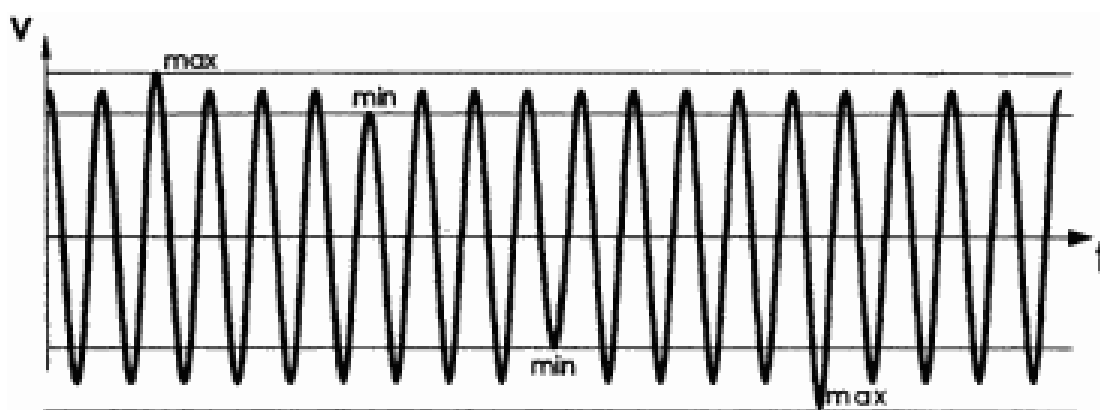


圖 3.7 波形的振幅評定

為了要評估轉子內部的一致性，我們也應分析最大振幅到最小振幅的比值，無論是對正半週或負半週振幅，均須大於或等於選定的偏差容許值

。這個方法也可用於篩檢所產生振幅過大的轉子。

3.3.4 不良斜率 (Slope error)

評估波形的斜率或梯度可用來偵測轉子鋁棒與鋁棒之間的瑕疵，諸如錫焊過度使薄片與鋁心之間的絕緣不良而形成短路或是不良薄片的氧化作用，由圖 3.8a 即可看出。

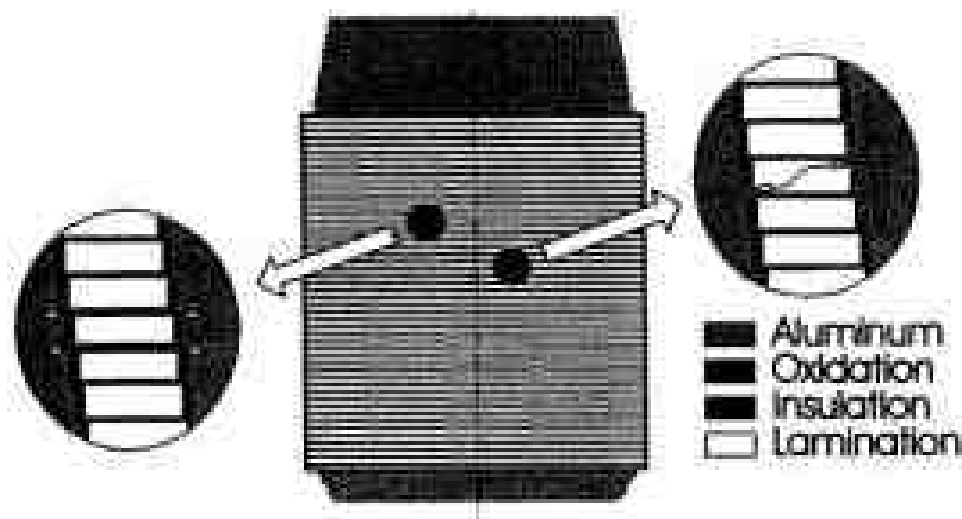


圖 3.8a 不良斜率(梯度)可能發生的原因

不良斜率的評估，以圖示最為簡單，如圖 3.8b 所示

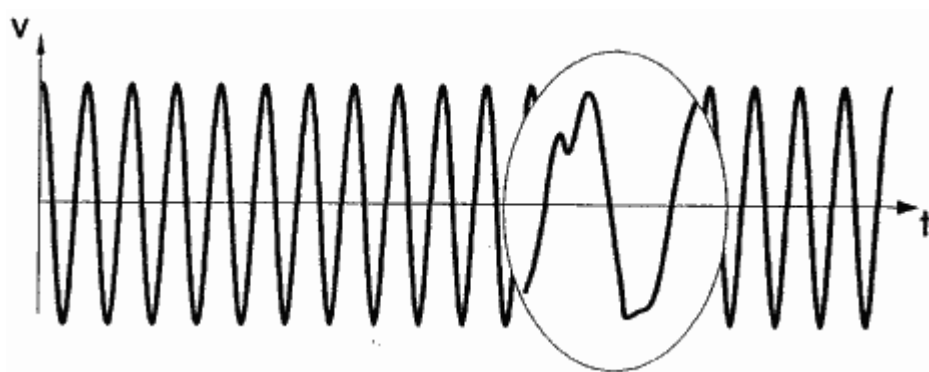


圖 3.8b 有不良斜率時的波形

即使波形不是一個完整的正弦波，至少在最大正負波峰之間，會有一個一致性的斜率趨勢。圖 3.8c 與 3.8d 即為轉子含有不良斜率的典型例子。

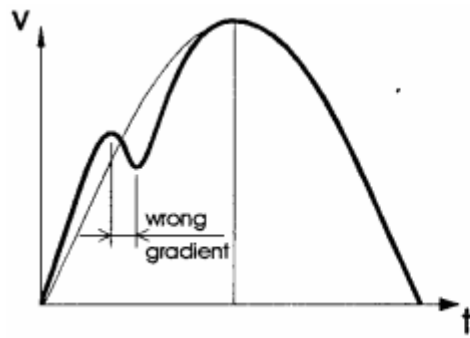


圖 3.8c

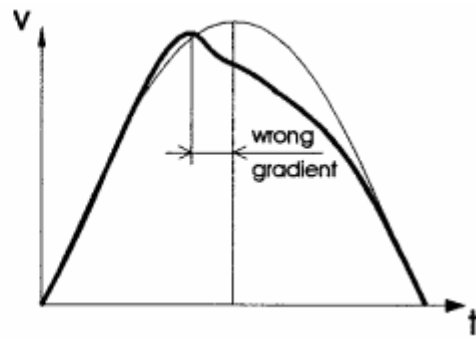


圖 3.8d

3.3.5 偏心

轉子轉軸位置不精確的鑽孔，會導致轉子軸在轉子變成無法對稱，這可能導致偏心或垂直定向偏差的問題。這兩種情況下，都將使介於感測器與轉子表面的氣隙寬度呈現不均勻的現象，將使感應波形成為如同諧振一樣。因為在評估轉子鋁棒的不一致時需要用到振幅，所以評定偏心時要用到另外一種分析技術。

對每一個週期而言，波形的最高點與最低點可以很容易被運用，就好像在波形上有許多特定點一樣。自然的，這些點使傅立葉分析變的較容易。從這些點所連成的波形可以用來分析轉子的偏心現象。圖 3.9a 與 3.9b 即為機械误差與波形的關係。

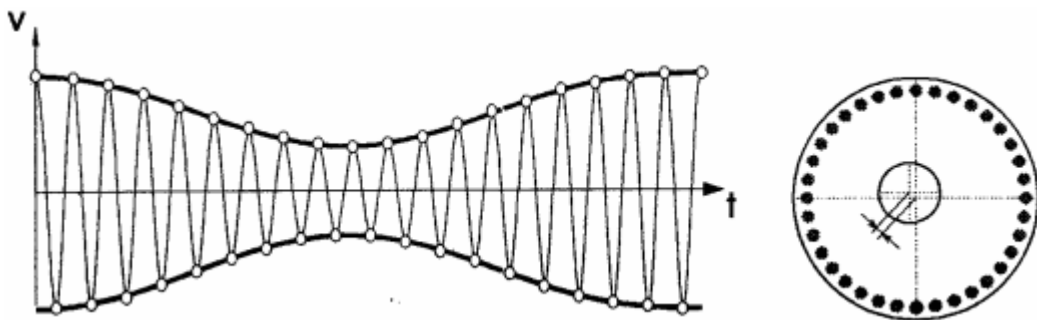


圖 3.9a 由於中心軸偏離之偏心的波形

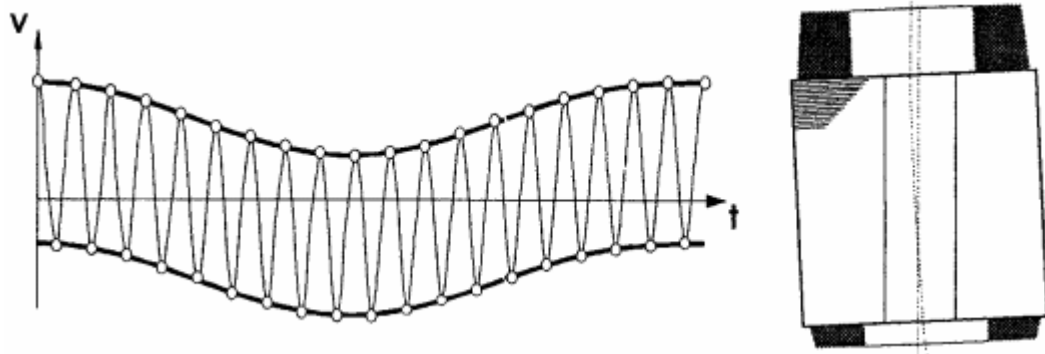


圖 3.9b 垂直定向偏差而偏心的波形

偏心測試也用來鑑定未經對稱性調整的轉動(從波形看來，一相會特別寬，相對的另一相則特別窄)。

3.3.6 整體比較值

到目前為止所談到的各種評估技術，都是針對各種單獨的瑕疵來討論；但是，實際的狀況而言，轉子通常不只有一種瑕疵的存在。所以我們如果想真正了解問題的所在，必須將各種方法所得到的值，在一個整流過的波形下(見圖 3.10)，做一個全盤的比較。

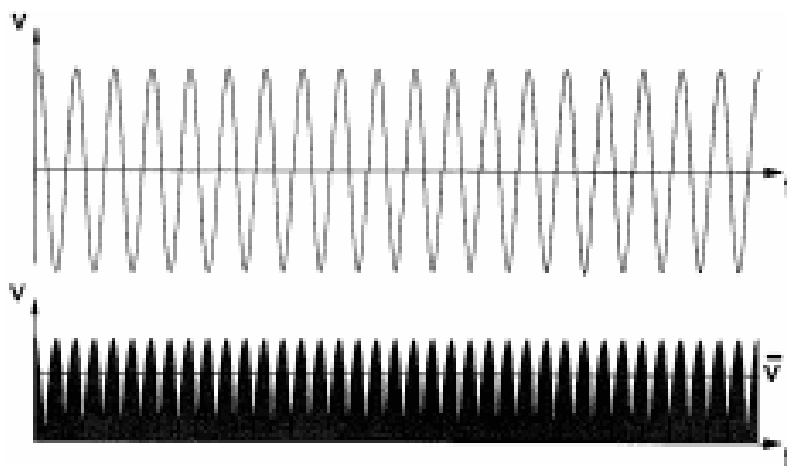


圖 3.10 用來作為整體比較的檢測波形與矯正信號

整體比較值可以鑑定出轉子全部包含的瑕疵(例如轉子鋁質不良、轉子鋁棒的穿孔、及不良的退火)。這一類的瑕疵平均出現在整個轉子，卻常為單一性檢測法所忽略。

4. 結論

從經驗中得知，針對某一項特定缺失是很難直接歸咎於製造過程的那一個步驟出了問題。而對於所生產的任何一型轉子，都要從製作過程中學到那一方面的知識。另一個重點是要知道計劃中所生產的產品，是按照那一方面的特性表現來決定該產品是被接受還是退回，例如對壓縮機而言，強勁的起動扭力是重要的依據，而洗衣機則需要較佳的效率。

總而言之，這種檢測技術是一種有效率的品質控制工具，它用來幫助生產者全面控制轉子(或馬達)的生產過程。快速回授迴路及轉子製造過程的錯誤鑑識，可大大的降低成本並提高產品的品質。



技術資料提供

 佳準科技股份有限公司