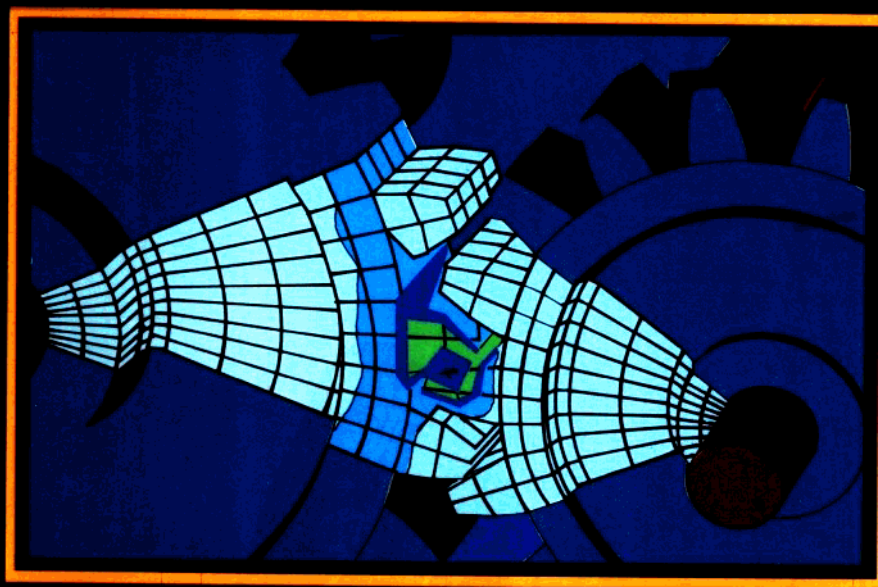
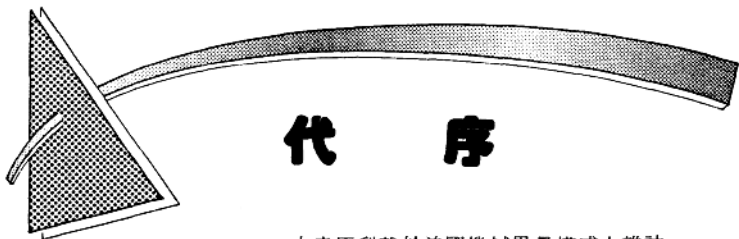


軸承與潤滑

林維新 編譯



☀ 機械技術出版社 印行
📖 全華科技圖書股份有限公司 總經銷



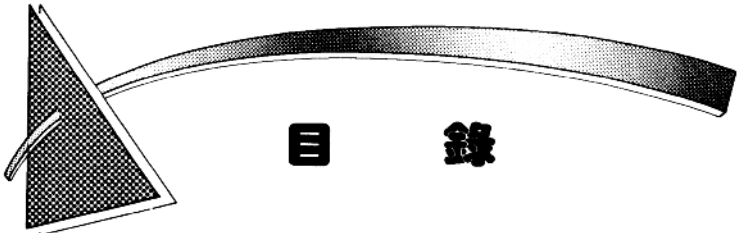
代 序

本書原刊載於美國機械界最權威之雜誌 MACHINE DESIGN月刊，由於內容簡明扼要、編排、製作皆屬上乘之作，故歷久而不衰，多年來一直在傳動元件年鑑（drive component issue）扮演重要角色；機械技術月刊在七四年創刊之初，有鑑於此乃聘請林維新先生編譯、整理，分期連載，以享廣大讀者，歷時近載，一直受到許多的讀者熱烈回響，為便利機械界從業人員之查閱，並順應衆多讀者要求，乃將原稿重新整理、編排，印成單行本。

林維新先生畢業於台灣大學機械研究所，曾從事現場設計工作多年，今任教於國立雲林工專，可謂學識、經驗丰硕之青年才俊，以其老練的譯筆加以適度的補充敘述，和圖表並茂之說明，易看易懂，對於從事機械相關之人員，實為不可缺少之秘笈。

本書付梓之際，恰逢機械技術雜誌之週年慶，實負有深長之時代意義，往後我們更會陸續把許多實用之叢書回饋給您；「技術」常隨時間而變化，唯有不斷「充電」，才跟得上潮流，希望本書亦與機械技術雜誌一樣，對您有最大之幫助。

機械技術編輯群



目 錄

1 軸承基本原理	1
1.1 負 載	2
1.2 衝擊負載	3
1.3 負載和運動	3
1.4 撓 曲	3
1.4-1 自潤軸承	4
1.4-2 套筒軸承	4
1.4-3 滾動軸承	4
1.4-4 液靜軸承	4
1.5 摩 擦	4
1.6 噪 音	5
1.7 所需空間大小	5
1.8 成 本	5
1.8-1 硬體成本	5
1.8-2 設計成本	6
1.8-3 製造成本	6
1.8-4 維護成本	6
1.8-5 置換成本	6
1.8-6 損壞成本	6
1.9 軸承型式	7
1.9-1 滑動軸承	7
1.9-2 滾動軸承	7
1.10 液靜軸承	7

1.11 軸承潤滑指南	8
1.12 增進軸承裝置性能之設計要點	9

2 滑動軸承 13

2.1 液動軸承	13
2.2 球軸承的選擇因素	14
2.2-1 負載量	14
2.2-2 偏 斜	15
2.2-3 材料組合	15
2.2-4 運轉溫度	15
2.2-5 耐腐蝕	15
2.2-6 相容性	15
2.2-7 潤 滑	16
2.2-8 成 本	16
2.3 滑動軸承分類	17
2.3-1 軸頸或套筒	17
2.3-2 液靜軸承	17
2.3-3 止推軸承	18
2.3-4 氣體軸承	18
2.3-5 球軸承	19
2.3-6 寶石軸承和樞軸承	19
2.4 潤 滑	19
2.4-1 液靜潤滑	20
2.4-2 液動潤滑	20
2.4-3 邊界潤滑	20
2.5 滑動軸承設計	21
2.5-1 液動軸承	22
2.5-2 液靜軸承	23
2.6 摩 擦	24
2.7 磨 耗	24
2.8 熱 量	25

3.1	巴氏合金	27
3.1-1	錫基巴氏合金	28
3.1-2	鉛基巴氏合金	28
3.2	青銅和銅合金	28
3.2-1	銅 - 鉛合金	29
3.2-2	含鉛青銅	29
3.2-3	錫青銅	31
3.2-4	鋁青銅	31
3.3	鋅合金向青銅挑戰	31
3.3-1	鋅軸承的設計要點	34
3.4	鋁	34
3.5	其他金屬	35
3.6	多孔性金屬	36
3.6-1	多孔金屬軸承之PV值	37
3.7	塑膠	38
3.7-1	酚樹脂	38
3.7-2	尼龍	39
3.7-3	聚四氟乙烯	39
3.7-4	縮醛	40
3.7-5	聚亞胺、聚砜、聚硫苯	40
3.7-6	超高分子量聚乙烯	40
3.8	其他非金屬	40
3.8-1	碳精	40
3.8-2	橡膠	41
3.8-3	木材	41
3.8-4	燒結瓷金及陶瓷材料	41
3.8-5	藍寶石及玻璃	42
3.9	非金屬軸承之設計	42
3.10	套筒軸承合金比較	43

3.11 自潤軸承簡介	45
3.12 單纖維編織複合軸承之壽命	47

4 滾動元件軸承 49

4.1 滾珠軸承	49
4.1-1 徑向滾珠軸承	49
4.1-2 斜角滾珠軸承	52
4.1-3 止推軸承	54
4.1-4 薄斷面軸承	55
4.2 滾動軸承	55
4.2-1 圓柱滾子軸承	56
4.2-2 球面滾子軸承	57
4.2-3 滾錐軸承	59
4.2-4 滾針軸承	60
4.3 選擇因素	62
4.4 負載定額	63
4.5 軸承材料	63
4.5-1 全面硬化材料	64
4.5-2 表面滲碳硬化材料	64
4.5-3 真空熔解鋼	64
4.6 低速率軸承之定義	65
4.7 製造過程	67
4.8 保持器或籠	67
4.9 軸承選擇要點	68

5 組合軸承 71

6 專用軸承 75

6.1 滾動件儀器軸承	75
6.1-1 速率	77
6.1-2 負載	78

6.1-3 撓 曲	79
6.1-4 潤 滑	80
6.1-5 扭 矩	81
6.1-6 裝 置	82
6.2 特殊儀器及導軸承	84
6.3 滾動件線性運動軸承	87
6.3-1 行程限制	87
6.3-2 設計考慮因素	87
6.3-3 平槽式線軸承	88
6.3-4 軸線性軸承	90
6.4 大直徑軸承	91
6.5 未研磨滾珠軸承	94
6.5-1 典型未研磨軸承	95

7

潤滑劑

99

7.1 滑 脂	99
7.2 選擇正確的軸承滑脂	101
7.3 潤滑油	101
7.4 潤滑油及滑脂添加劑	103
7.5 結合乾薄膜	104
7.6 固質潤滑劑	106
7.7 混合之接合塗層	108
7.8 合成潤滑劑	110

8

潤滑系統

113

8.1 分離式或手操作潤滑	113
8.1-1 自潤滑	113
8.1-2 單點裝置	113
8.2 中央系統	114
8.3 獨立系統	116
8.4 何時使用自動潤滑系統	117
8.5 潤滑系統的警告裝置	118

軸承基本 原理

1.1	負 載	2
1.2	衝擊負載	3
1.3	負載和運動	3
1.4	撓 曲	3
1.5	摩 擦	4
1.6	噪 音	5
1.7	所需空間大小	5
1.8	成 本	5
1.9	軸承型式	7
1.10	液靜軸承	7
1.11	軸承潤滑指南	8
1.12	增進軸承裝置性能之設計要點	9

軸承對之兩面間，能夠在極低的摩擦情況下，非常圓滑地移動；此種移動現象可能是旋轉運動（軸在承架內旋轉），也可能是線性運動（一個面在另一個面上移動）。

軸承之動作可以為滑動，也可以為滾動；兩種情形都有一個要求，也就是要有足夠的潤滑以使軸承面間能被一層油膜或潤滑劑隔開；軸承面間若沒有直接接觸的話，則軸承可以具有相當長的使用壽命。

軸承之運動方式為滾動動作者稱為滾動元件軸承；雖然“滑動”（plain）這個名詞，在設計上使用的頻率沒有像滑動軸承中之套筒軸承及頸軸承為多，軸承運動之方式為滑動（sliding）者仍然稱為滑動軸承（plain bearing）。滑動軸承也遵從潤滑原理，但潤滑方式與滾動軸承却有很大的不同，例如，滾動軸承與滑動軸承中之液膜軸承，其潤滑方式就可很明顯地區別出來。

一般來講，滑動軸承的成本比滾動元件軸承低，尤其是大量生產時。在中或小批量生產，且滑動軸承沒有自潤裝置，而需要特殊的潤滑或特別的設計時；由價格的觀點來講，則滾動軸承較具有競爭性。

滑動軸承除了某些因工程上需要有高品質精密裝置，而使用較複

雖的潤滑系統以外，一般都使用簡單地低成本型式；因此，感覺上滾動軸承就被認為是可靠性較高而品質較好者。

兩種型式的軸承其術語都不盡相同；例如，軸承之傳送負載可能沿著旋轉軸方向，也可能垂直於旋轉軸；對於兩種型式的軸承，傳送負載沿著旋轉軸方向者都稱為止推軸承(thrust bearing)；但是對於運送負載為垂直於旋轉軸者，滾動元件軸承稱為徑向負載軸承，而滑動軸承則稱為頸軸承或套筒軸承。

軸承之選用是基於它能夠傳送多大負載，在何種速率下它能夠傳送這些負載，以及在這些特定情況下，它能夠使用多久而決定。摩擦、起動扭力、承受衝擊或粗糙環境的能力、剛性、尺寸、成本及複雜性等都是軸承設計時必須考慮的因素。

1.1 負載

不同的軸承受到負載及操作速率的影響都不一樣；在某一負載及速率下，滾動元件軸承及套筒軸承都有其特定的使用壽命，此種使用壽命是利用統計原理，由許多樣品測試結果，選取只有 10 % 破壞率（90 % 可信賴度）時之壽命當做標準，此種使用壽命標準稱為 B_{10} 。

或 L_{10} 壽命。

液動軸承及液靜軸承却相反，它們在某一臨界負載及速率下，軸承要具有無限長的使用壽命（除非起動——停止也包括在內）。對於自動式油潤滑（液動）套筒軸承，由於旋轉增進潤滑膜的支撐，因此可承受的負載容量隨著速率而直線增加。

對於利用外部壓力（液靜）之套筒軸承，為了達到無限壽命其負載容量為某一特定值，雖然有時候會有液動效果產生，但本質上負載容量是不因速率改變而變化。

對於液動及液靜套筒軸承，假如負載超過無限壽命值時，面間開始進入擦摩接觸狀況，此種潤滑情形稱為邊界潤滑。邊界潤滑常導致軸承的加速磨耗及損壞，尤其在高速運轉時；但無論怎樣，軸承可予以設計滿足邊界模式而操作。

由於交互作用的結果，滾動元件軸承對於負載變動的感應性比滑動軸承差，而且不用依賴速度來維持其液體薄膜，因此低速運轉時能承受較重的負載。假如負載是隨著速率增加而增大，或承受到動態負荷時，則選用液膜軸承可以得到較好的結果。

換句話說，脈衝重負載作用在靜止的滾動元件軸承上面時，會產

生勃氏壓痕效應；同時，EHD 膜厚度及負載能量都是速率的函數。

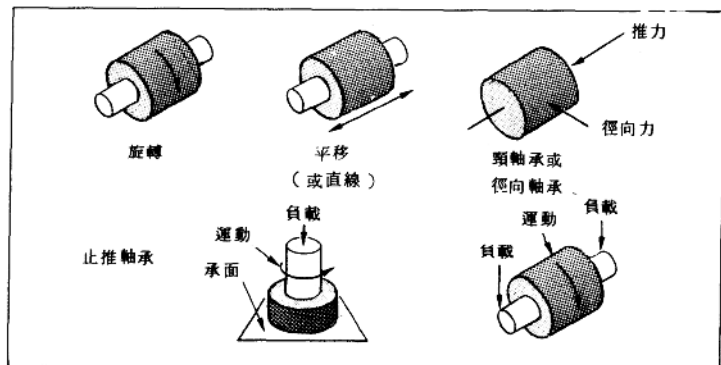
1.2 衝擊負載 (Impact Load)

滾動元件軸承及滑動軸承受到嚴重的衝擊負載時即可能產生損傷，滾動元件軸承由於是點或線的接觸，因此受到衝擊時產生的接觸應力較高，較容易損傷；而滑動軸承受到衝擊時，其液體薄膜相當於一緩衝墊，可以減少衝擊力量。事實上，軸承所能承受的衝擊負載完全

看其保留能量多少而定，爲了承受高衝擊負載，設計時必須特別注意。

1.3 負載和運動 (Loading and Motion)

軸承之運動可能爲旋轉，也可能爲平移，若沒有特殊說明，一般都是指旋轉而言；平移軸承一般都叫做直線軸承，對直線軸承而言，其負載是垂直於運動方向；而對於旋轉軸承而言，其負載可能垂直於轉軸（徑向負載），也可能與旋轉軸一致（推力負載）。



1.4 撓曲 (Deflection)

沒有一種特定的軸承其剛性 (stiffness) 是最完美的，每一種軸承其所能提供的剛性視負載及速率而定：例如，低負載時，外壓式套筒軸承之剛性最佳，其次是滾動

元件軸承及自動式套筒軸承。負載增加時，滾動元件軸承之撓曲超過自動式套筒軸承，負載再增加時，外壓式套筒軸承之撓曲也超過自動式套筒軸承，在輕負載時剛性最差的軸承，在重負載時反而變爲剛性最好。滾動元件軸承之剛性可因採

用斜錐式滾柱軸承或預負載之斜角滾珠軸承而增加。

軸承之變形，或軸承——軸系統中負載作用點之變形是相當重要的，尤其是在工具機或精密裝置上。外伸負載之變形尤其要注意，因在負載作用點的剛性常常比軸承其他部位的剛性低 10 %。

1.4-1 自潤軸承 (self-lubricating bearing)

邊界潤滑及自潤軸承由於已經承受重負載，所以具有相當高的剛性，但在輕及中負載時，它們的剛性却最差。此種軸承使用在某些機器心軸上，情況相當滿意，但是碰到由於表面潤滑變異而產生不規律之扭矩效應或桿——導槽操作時就有困難。

1.4-2 套筒軸承 (sleeve bearing)

軸在液膜內由於負載而產生撓曲，此種移動情形是可以預測得到的，用套筒軸承支撐的機器心軸其運轉時之位置與靜止時雖然不同，此種差異可以計算出，而使心軸在撓曲狀況時仍能很圓滑的運轉。

1.4-3 滾動軸承 (rolling bearing)

此種軸承一般比類軸承能夠提供較精密的軸位置，預負載斜角滾珠軸承或斜錐式滾柱軸承具有極佳剛性，常用在工具機上；雖然承受變異負載，軸位置仍能夠很精密地預測出，因此，軸在運轉時之位置和靜止時之位置幾乎相同。

由於滾動元件軸承會產生不良的彈性撓曲，而且由於元件之真圓度不良而產生過度的波動，因此，極精密的裝置就不能使用滾動元件軸承，此時就要採用外壓式軸承。

1.4-4 液靜軸承 (hydrostatic bearing)

此種軸承提供極低的撓曲及極精密的軸位置，而且操作時相當圓滑，工具機採用此種軸承來研磨工件時可達到 $2 \mu\text{in}$ 之真圓度及 $1 \mu\text{in}$ 之表面粗度。其壓力系統可以為氣體式，也可以為液體式；氣體系統常用在輕負載方面（例如量測裝置），而液體系統通常都用在重負載系統。

1.5 摩擦 (Friction)

使軸承由靜止開始運動所需的扭矩常常比軸承在旋轉狀態下，維持其運轉所需的扭矩為大，起動摩擦影響到驅動系統所需的動力。

外壓式軸承的起動扭矩相當低

，滾動軸承的起動扭矩也相當低；無壓力式套筒（液膜）軸承之起動扭矩就相當高，自潤軸承之起動摩擦係數變化相當高，從 0.04 到 0.16。

液膜軸承由於速率上昇時要經過邊界潤滑階段，所以起動扭矩相當高，當運轉產生液動膜時，液膜軸承之摩擦性質跟滾動元件軸承相近。

在正常運轉速率下，不同軸承型式的摩擦性質非常複雜，外壓式軸承運轉時摩擦很低，但在自潤式套筒軸承摩擦就變化很大，完全視應用情形而定。

滾動元件軸承的轉動摩擦比起動摩擦低，假如設計時扭矩特性為極重要要素的話，最好做個實驗測量起動及運轉時之摩擦特性。

假如軸承必須在重負載下重覆地起動，則選用滾動元件軸承會比套筒軸承好，假如允許增加複雜裝置時，則選用外壓式（液靜）軸承為最好者；假如起動負載輕，而運轉後負載會隨著速率增加而逐漸增加時，則傳統的液動套筒軸承最佳。

1.6 噪音 (Noise)

不論何時，機器的噪音要求越低越好，而軸承常是被考慮的主要因素之一；縱使軸承不會產生噪音

，但經常是噪音的傳遞者。

一般，滾動元件軸承的噪音常比液膜軸承大，由於滾子或軸承環的配合微差便可能產生音響，經由機械結構予以放大便形成噪音；增進軸承精度可以減少此種效應。

液膜軸承承受穩定的徑向負載時一般不會產生噪音，但假如逆轉太過頻繁而沒有足夠的潤滑劑充滿軸承時，便可能產生噪音，液膜軸承運轉在不穩定的渦流模式時也可能產生噪音。

1.7 所需空間大小 (Size)

利用獨立壓力潤滑系統之軸承，須求的總空間較自潤式者大，軸承使用分開的壓力潤滑系統者比獨立自足式 (self-contained) 軸承需要較大的總空間，真正負載支撐點所需要的相對空間就很不明確；外壓式軸承在負載支撐點的相對空間可能比自足式緊密。

獨立自足式軸承中，套筒軸承所需要的徑向空間比滾動元件軸承為小，但軸向空間却稍大。滾針軸承所需要的空間大概要頸軸承相近。

1.8 成本 (Cost)

1.8-1 硬體成本 (hardware cost)

在大量生產時，套筒軸承及軸

襯之成本比滾動元件軸承為低；小量生產時，兩種型式軸承之價錢幾乎相近；但需要特殊設計之小量生產時，滑動軸承的成本就比滾動元件軸承高。無潤膜及邊界潤滑軸承由於需要特殊的材料，所以價格昂貴；而粉末金屬軸承的價錢就比較便宜。

1.8-2 設計成本

(design cost)

滾動元件軸承及乾式潤滑 (dry-lubricated) 軸承對使用者而言所需花費的工程成本最低；尤其是滾動元件軸承的製造者，由於有完整資料的設計手冊，節省了很多成本。

自動式套筒軸承就顯著地不同，除了使用在輕負載或使用上已有相當的經驗外，使用者必須花很多的心力在設計上。

外壓式軸承可以經由簡單的計算而預測出其轉動情況，但要設計得很完善就須花費相當地精力在設計上。

1.8-3 製造成本 (shop cost)

滾動元件軸承由於需要較精密的軸承殼及軸，因此所需花費的機械加工成本較高；而套筒軸承在機械加工表面粗度不甚良好的情況下

就可以運轉的很好，很多滑動軸承甚至於在車床加工完成之軸頸上就可使用。

1.8-4 維護成本

(maintenance cost)

假如軸承之潤滑型式為獨立自足者，其維護成本則視其要求的密閉情形而定；全壓潤滑軸承之維護成本則視避免污染所需的過濾次數而定；一般，滾動元件軸承由於對潤滑的要求較低，所以維護成本最少，與自潤式軸承組合起來而能夠提供足夠的使用壽命者僅需要極少的維護成本。

1.8-5 置換成本

(replacement cost)

此種成本視設計功能而非視軸承型式而定，一般，滑動軸承比滾動元件軸承好更換；兩種型式的軸承都可能由於裝置不當而損壞；滑動軸承經常在桿棒車削改變其尺寸而更換。

1.8-6 損壞成本

(cost of failure)

滾動元件軸承在接近損壞時都會顯出明確的警告（運轉時噪音會增加），它們一般都是由於疲勞而損壞；而滑動軸承運轉性能一直保

持良好，沒有任何損壞跡象，直到損壞之瞬間才急速發生。

滾動元件軸承在高速運轉時損壞，經常都是整個損壞掉；頸軸承就不會那麼嚴重，只要稍微磨光就可再使用，但滑動軸承也可能整個完全損壞而無法修復。

(本文譯自 Machine Design/
June, 28, 1984 Mechanical
Drives Reference Issue)

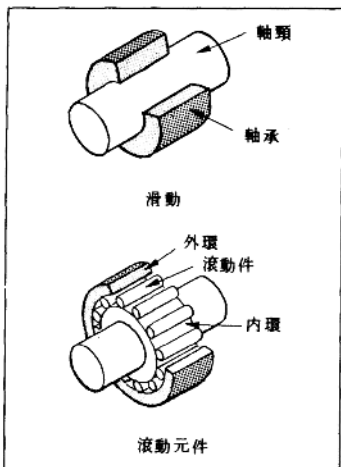
1.9 軸承型式 (Bearing Type)

1.9-1 滑動軸承 (plain)

相對運動為滑動，可使用於旋轉及平移運動兩種，也能承受徑向及推力負載。在低負載及低速率下可以不用潤滑劑而乾運轉，不過使用潤滑劑可以增進使用性能；最好任何情況下都使用全液膜潤滑。

1.9-2 滾動軸承 (rolling-element)

相對運動是通過球或滾子，這些滾動元件是用隔片或籠 (cage) 予以固定住 (未示出)；滾動元件總是保持在潤滑狀態，其潤滑行為稱為彈液動 (EHD) 作用。所有的軸承都是為某些目的而設計，因此其使用範圍便受到了限制，尤其是

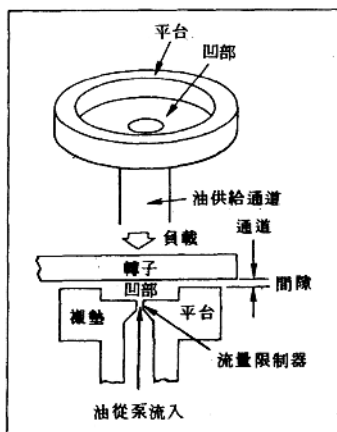


滾動元件軸承，在使用時必須慎重選擇。

1.10 液靜軸承 (Hydrostatic Bearings)

液靜軸承系統包含有外部壓力供給器、流量限制器、壓力機墊及餘隙空間，油從泵流入凹部及平台，產生足夠的壓力而將負載 (轉子) 舉起，避免轉子與平台直接接觸；縱使轉子沒有移動，餘隙仍然維持著，因此雖然在起動時及低速運轉時都不會有磨耗發生。

每一個機墊所能支撐的負載幾乎跟凹部面積與機墊面積的比值成線性關係；比值愈大時，所能支撐的負載愈高；因此，流出機墊的量

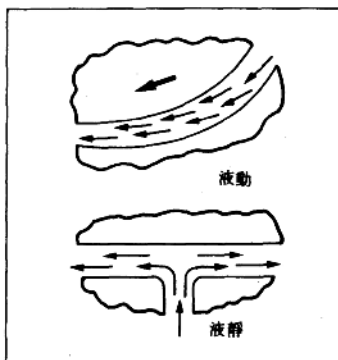


(由泵唧得到者) 隨著比值增高而增加，流量幾乎與間隙大小立方成比例。襯墊若能予以適當地設計，則凹部面積與襯墊面積的比值可以得到一最佳值，使由泵送出的液體壓力可以減少。

1.11 軸承潤滑指南(Short Guide to Bearing Lubrication)

流動薄膜 (fluid-film) 或液膜潤滑 (常稱為全液膜) 有兩種型式，液動液膜潤滑為潤滑劑在軸和軸承之間自然的連續流動，而液靜液膜潤滑則需要依賴外來的泵作用。

液動液膜軸承為滑動軸承最希望得到的潤滑型式，此種軸承使用時，不能超過某一臨界負載，也不

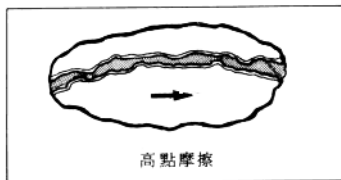


能低於某一最小的相對速度。運轉時，旋轉軸偏向軸承的某一側，造成不均勻的間隙，而產生楔形流路以供潤滑液通過。

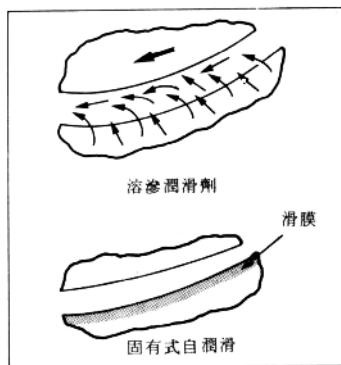
在楔形流路中產生了潤滑壓力以支撐軸，避免其與軸承接觸。此種潤滑方式不能使用於低速移動及重負載情況，液靜潤滑可以使用空氣或氣體以取代油潤滑，箔軸承便是應用液靜潤滑原理，在相當輕負載下高速運轉，而可獲得相當長的壽命。

邊界 (boundary) 潤滑有時為液動或自潤軸承在不利的運轉情況所不願意得到的結果。隨著負載的增加，潤滑膜逐漸減薄，直到兩相對面之高點部位開始互相摩擦，此時之潤滑情形便是邊界潤滑，會增加軸與軸承之摩擦和磨耗。有些軸承開始運轉時是在邊界潤滑情況

，然後會有一些磨耗而進入液動狀態。大部份的邊界潤滑軸承都是設計其開始起動時為此種潤滑模式；此種型式的軸承通常是重負載、緩慢移動或擺動軸承。在軸承面上一層極薄的半固體作用膜可以防止金屬與金屬的直接碰觸而避免過度的磨耗。

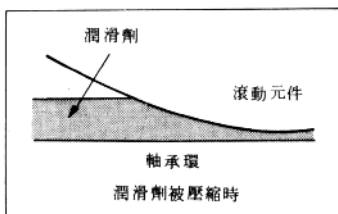


自潤式 (self-lubricating)：潤滑劑藉由溶滲法或複式潤滑法而進入軸承面，軸承運轉時才由軸承內滲出到軸承的內表面而潤滑；或者是潤滑劑被應用到軸承上，當做軸承的一層薄膜或一層被覆。很



多情形，軸承材料本質上就具有自動潤滑作用而不需添加潤滑劑，油潤式自動潤滑軸承其運轉時之潤滑模式可能為邊界潤滑、混合膜式潤滑或是液動潤滑。

彈液動 EHD (elasto hydro dynamic) 潤滑於滾動元件軸承很自然的發生（而且是成功地運轉於必須達到的要求），潤滑劑連續地進入滾動元件接觸區，產生極大的壓力而使潤滑劑能承受高接觸應力，避免軸承的相對面發生碰觸。同時，由於壓力增加而使接觸面發生彈性變形而擴大了支撐面積。在高負載及低速率時，EHD 膜變成極薄；EHD 膜的厚度決定了軸承的使用壽命及破壞模式。



1.12 增進軸承裝置性能之設計要點 (Desing Tips for Improved Bearing Mountings)

軸承裝置時，在設計上常發生的錯誤為限制過緊，軸承架設計時

