

磨 潤 學

原 理 與 應 用

Principles and
Applications of Tribology

原著者：Desmond F. Moore

譯述者：楊 春 欽

科技圖書股份有限公司

磨 潤 學

原 理 與 應 用

Principles and
Applications of Tribology

原著者：Desmond F. Moore

譯述者：楊 春 欽

科技圖書股份有限公司

原 序

磨潤學 (tribology)，被定義為，一門研究有關在運動中各種工程表面所起的摩擦、潤滑與磨耗的科學與技術。在近十年來，廣泛地被認為是各種不同科技訓練所必需的課程。由於與物理、化學、冶金、材料科學、質流學、潤滑學、彈性學、黏彈性學、彈性液動學、熱力學以及熱傳遞等科學間的複雜關連，而成為研究一般性表面摩擦的重要科學。全世界能源的三分之一至二分之一，經人們估計，現正被消耗在這些形式上。故有關摩擦與磨耗的研究在現階段中，實不可等閒忽視。

本書企圖用一本書來描寫有關磨潤學的全部內涵，有人認為這是一件不可能的工作。就筆者的意見，目前的工程學生，所學得的，只能對某一目標，作一簡潔而一致的傳授為已足。在這錯綜複雜的目標下，將其分成原理與應用兩篇。本書寫作時以機械工程為主，先將其原理作一基本的瞭解，使在實際應用時能得心應手。

整本書雖依順序寫出，但所有章节的內涵則各自獨立。講授者可依課程的範圍與要求，不按順序施教，並不致失去連續性。第一章是說明磨潤學的內容及其在近代技術方面的應用。第二章是整個表面構造的評估與測定方法。第三、四與五章對金屬、彈性體以及其他材料的摩擦基本觀念。有關液體動力潤滑原理則寫在第六章，而界面與彈液動潤滑的更詳細討論，則分別在第七、八兩章中敘述。第九章說明有關金屬與彈性體的磨耗與磨擦現象的一般性討論。在第二至第八章中未論及的表面間作用，與固體、液體及氣體的內摩擦等，均在第十章內說明。第十一章簡單而完整的說明磨潤學研究的實驗方法。其餘的五章，分別涉及特殊的應用，包括製造方法、汽車、運輸與運轉、軸承設計以及其他雜項應用等。

由於涉及的項目過多，有關磨潤學範圍在本書中不免略去不少。

總之，希望本書能供習機械工程學生，對磨潤學一科存有良好影象，鼓舞其對此一門新增工程科學倍加興趣。爲企圖完成這個目的，除羅列基本磨潤原理外，儘量加添不少實例與說明，以求充實。

筆者謁誠感謝美國賓州大學W. E. Meyer 教授，荷蘭台爾夫工技學院H. C. A. van Eldik Thieme 教授，與德國慕尼黑技術大學A. W. Hussmann 教授們等，不斷鼓勵我從事此項工作。此外，同事兼摯友慕義赫大學W. Geyer 博士，在三年中的不絕協助與指教，出版公司的編輯D. W. Hopkins 先生代爲校閱原稿，Geraldine Warren 小姐的細心打字，內子Miriam在寫作期間的不斷照拂等，使本書能早日出版，特誌謝意。

D. F. Moore 慕爾

都柏林

磨潤學原理與應用

第一篇 原 理

第一章 緒 論

1.1 磨潤學的定義與範疇	1
1.2 互視與微視觀點	3
1.3 內摩擦與外摩擦	4
1.4 乾燥與潤滑的表面	5
1.5 應用範圍	6
1.6 磨潤學所面臨的挑戰	8

第二章 表面形態學

2.1 紋理測定	11
2.2 外形測定法	11
2.3 繪圖法	14
2.4 照相法	15
2.5 組織深度	16
2.6 外流計	17
2.7 表面複印法	20
2.8 統計性質法	21
2.9 數學表示	24
2.10 參數的選擇	26
2.11 模式與理想表面	31
2.12 雜亂度的要求	33
2.13 表面間的真正接觸	34

第三章 金屬的摩擦

3.1	古典摩擦定律	36
3.2	一般摩擦理論	37
3.3	金屬的彈性接觸	38
3.4	彈塑性接觸	41
3.5	摩擦的基本機制	43
3.6	熔接 - 剪斷 - 犁割理論	45
3.7	境界生長	46
3.8	加工硬化	48
3.9	摩擦的犁割分量	49
3.10	摩擦的黏着分量	52
3.11	表面污染物	54
3.12	金屬的傳遞	55
3.13	滑動摩擦的熱形成	56
3.14	滑動速度的影響	59
3.15	金屬的硬化	63
3.16	真空狀況	65

第四章 彈性體的摩擦

4.1	基本的摩擦機制	67
4.2	黏着項	69
4.3	遲滯項	71
4.4	黏滯彈性	73
4.5	黏着理論	76
4.6	黏着作用爲一接觸問題	81
4.7	遲滯摩擦理論	83
4.8	廣義的遲滯摩擦係數	87
4.9	平均壓力的影響	88
4.10	巨視與微視遲滯	89

4.11 黏着項與遲滯項的分離·····	89
4.12 W-L-F轉換·····	91

第五章 各種材料的摩擦

5.1 層片固體的摩擦·····	94
5.2 鐵佛龍的摩擦·····	100
5.3 金剛石的摩擦與磨耗·····	103
5.4 冰的黏着作用·····	106
5.5 脆性固體的摩擦·····	109
5.6 木材的摩擦·····	109
5.7 紗線與纖維的摩擦·····	113

第六章 液動潤滑

6.1 簡 介·····	114
6.2 廣義化Reynolds 公式·····	115
6.3 速度分佈·····	118
6.4 負荷支持的機制·····	120
6.5 擠壓薄膜·····	123
6.6 液靜潤滑·····	135
6.7 穴 蝕·····	137
6.8 雜 類·····	143

第七章 邊界潤滑

7.1 緒 論·····	145
7.2 金屬的邊界潤滑·····	147
7.3 彈性體的邊界潤滑·····	149
7.4 邊界潤滑劑的分子結構·····	151
7.5 金屬薄膜的一般性質·····	156
7.6 潤滑劑的吸收作用·····	158
7.7 潤滑能力與接觸角·····	161

4 磨潤學原理與應用

7.8 固體潤滑劑	164
7.9 黏着 - 滑動現象	166

第八章 彈性液動潤滑

8.1 緒 論	169
8.2 一般的反複程序	170
8.3 基本參數	173
8.4 正向接近	175
8.5 相對滑動	180
8.6 壓力阻	182
8.7 彈性液動數	184
8.8 巨視彈性液動	187
8.9 彈性液動與遲滯	190
8.10 結 論	192

第九章 摩擦與磨耗

9.1 金屬的磨耗機制	193
9.2 潔淨金屬的磨耗	198
9.3 鬆動磨耗碎屑	199
9.4 彈性體的磨耗機制	201
9.5 磨耗的測定	203
9.6 真實與圖案的摩擦	204
9.7 磨碰磨耗	205
9.8 疲勞磨耗	211
9.9 由捲縮形成的磨耗	212
9.10 速率與溫度的影響	215
9.11 結 論	219

第十章 內摩擦

10.1 物質的分子結構	221
--------------	-----

10.2 固體的內摩擦·····	223
10.3 決定內摩擦的方法·····	224
10.4 Fitzgerald 內摩擦測試儀·····	229
10.5 內摩擦的主要理論·····	231
10.6 液體的內摩擦：黏滯度·····	235
10.7 黏滯度的測定·····	239
10.8 紊 流·····	242
10.9 氣體的內摩擦·····	245

第十一章 實驗方法

11.1 旋轉圓盤裝置·····	249
11.2 外圓筒與內圓筒設備·····	250
11.3 平皮帶儀器·····	252
11.4 磨耗與磨磋機·····	254
11.5 擠壓薄膜儀器·····	255
11.6 衝擊或動力試驗機·····	257
11.7 橫向圓柱體儀器·····	258
11.8 四球滾動機器·····	259
11.9 干涉儀設備·····	260
11.10 電子繞射與電子顯微鏡·····	263
11.11 其 他·····	264

第二篇 應 用

第十二章 製造程序

12.1 金屬車削·····	267
12.2 金屬切削中的摩擦·····	269
12.3 熱的形成·····	272
12.4 刀具磨耗·····	277
12.5 潤滑液的作用·····	279

6 磨潤學原理與應用

12.6	車削程序的分類	281
12.7	摩擦熔接	287
12.8	擠製程序	291
12.9	其 他	293

第十三章 汽 車

13.1	充氣輪胎的性能	295
13.2	煞車機制	310
13.3	引擎摩擦	319
13.4	其 他	322

第十四章 運輸與運轉

14.1	路面與跑道表面組織	324
14.2	鐵軌與車輪的黏着作用	332
14.3	陸上運輸	343
14.4	其他運輸論題	349

第十五章 軸承設計

15.1	滑件承墊	356
15.2	軸頸軸承	364
15.3	薄片軸承	373
15.4	滾動接觸軸承	375
15.5	其 他	377

第十六章 結 論

16.1	柔性油封	381
16.2	橫梁的層片阻尼作用	384
16.3	摩擦阻尼	386
16.4	人體與動物關節的潤滑	390
16.5	其 他	396

附 表	399
-----------	-----

參考書目	403
------------	-----

第一章 緒 論

1.1 磨潤學的定義與範疇

磨潤學 (tribology)，被定義為在互相作用表面作相對運動的科學與技術。其名稱源自希臘字 tribos，意即摩擦 (rubbing)。這是一門研究工程表面的摩擦 (friction)、潤滑 (lubrication) 與磨耗 (wear) 的科學，目的在於詳細瞭解表面的相互作用，然後改良應用的性質。事實上，磨潤學的範疇比其定義要寬廣得多。依 Salomon 博士〔國際期刊“磨耗”(Wear)的前發行人〕謂，磨潤學意指一種思想與藝術狀態。由各方學者精心研究出的科技合作。對極具經濟重要性的問題作操作分析的藝術，亦即從事於科技設備的可靠性、維護與磨耗等，其範圍自太空船至家庭用品。磨潤學者的工作，是將各學科間的互相運用，由物理學、化學、力學、熱力學、與材料科學結為一體，包括具有相對運動表面的機械設計、可靠性與性能的廣大而複雜的結合。

目前估計，世界能源大約有三分之一損失在摩擦現象上。對現今機械化的社會而言，這代表儲存動力的一種不必要的損失。研究磨潤學的目的，在於使涉及表面摩擦的科技中不必要的能源浪費減至最小，或將其消除。事實上，滑動與滾動表面，是決定科技方法能否頗具效率的關鍵。

2 磨潤學原理與應用

讀者可能有一個疑問；摩擦表面使世界各國的經濟遭受些什麼損失？無人能提出正確的數字，但在 1968 年，英國曾對這種損失作了一個估計。依照 1965 年在英國召開的磨潤學會議的報告，單是英國本土每年磨耗件的損失，即達 50 億鎊之多。因工業界對表面作相互運動所發生的現象未能充分瞭解，因而，使英國、蘇俄、與若干西歐國家、與美國等的政府與工業界，均致力於許多有關磨潤學計畫的擬訂。

因第二次世界大戰以後，科技的快速進步促使有關表面磨擦的研究必需作重大發展。明顯的研究方法集中在如何探尋油、油脂或如何去潤滑表面等方面。傳統的潤滑，計涉及有：

- (1) 在標準規格的允許下評價潤滑劑。
- (2) 合成潤滑劑，以配合新狀況。
- (3) 決定潤滑劑對冷、熱、核子放射、其他環境、及被潤滑材料的反應。

許多與摩擦表面有關的科技，仍遵循上列程序，包含傳統的潤滑。事實上，遠在 1950 以前，大多數機械裝置，主要是用礦油、與肥皂加稠的礦油脂來潤滑，至於潤滑劑的選擇，則純憑經驗。但至今日，合成材料（synthetic material）已被發現，可增加潤滑的作用，並廣泛的研究計畫與發展，已能迎合特殊或逐漸嚴格的要求，設計出適當的潤滑劑（lubricants）。複雜的系統，如核子潛艇、超音速飛機、或阿波羅太空船等，需要解決最急的潤滑問題。故進步的科技，使我們必需探究摩擦表面所引起的各種現象。在機械化的環境中，新的學科——磨潤學——扮演著逐漸重要的角色。

磨潤學的重要目的之一是，依照需要，將摩擦力減至最小（例如對機器而言）或最大（例如在反滑動表面的情況）。但必需強調，該目的僅在對所有溫度、滑速、潤滑、表面光製、與材料性質的狀況下的摩擦程序，已有一個基本瞭解後，才能達到。本書的編著，是以最簡明的文字來解釋磨潤學的基本，並以日常應用實例來說明基本概念。

1.2 巨視與微視觀點

在具相對切淺運動的兩物體間所產生的摩擦力；可視為巨視或微視機制 (macroscopic or microscopic mechanism)。依讀者的興趣與方針而定。微視或分子機制，亦可敘述為原因機制 (causative mechanism)。因滑動對 (sliding pair) 表面分子的相互作用，係以某些細節來處理，並對各種實驗狀況，設定摩擦機制的真正原因。這種方法，對物理學者或物理化學者而言，顯然較為投合興趣。反之，巨視機制通常被視為一種結果，係用相當粗略的模擬摩擦事件為基礎，並遵循簡單但甚適當的模式來代表。此處，對工程師的應用方面，作簡單處理，並強調其興趣，遠勝於探究其發生原因。

本書的目的，並非在強調其中任一方法，而不顧另一方法。事實上，兩種機制必需同時處理。每一機制可充分地補充另一機制，故可充分瞭解磨潤學所涉及的原理。本書即針對此目的編寫。大多數已被接受的最常見金屬摩擦的熔焊 - 剪斷 - 犁割 (welding - shearing - ploughing) 理論⁽¹⁾，可分類成巨視機構，因其並未提及表面分子的活性。反之，大多數的彈性摩擦的現存理論⁽²⁾，將黏着 (adhesion) 視為熱激勵的分子 - 運動交換機構，故採用微視觀點。

巨視與微視方法間的重要差異，除事件的大小外，為連續與真實性間的區別。在摩擦界面的頂部，每一表面分子遍佈在比原子大小要大的體積內，並因熱能而產生連續的振動與扭曲。這些分子的相互交換，使表面本身的分子有一部份被配合表面所吸收。當然，這種事實將引起黏着擦擦 (adhesional friction)。但對一定表面面積而言，這種分子活性所產生的自由度數目非常大，即使利用最新的電算機亦無法解答。故採用兩種方法的任一種：

- (1) 應用統計方法，估計分子運動與作用力的平均值或中間值，或
- (2) 完全忽略分子的活性，將滑動材料視為仍擁有相同的一般性質，如同實驗所觀察的結果。

所以，將微視方法作為表面相互作用的代表是相當正確的。但在

4 磨潤學原理與應用

實際應用上，會受到相當程度的限制。巨視方法則卻具相反的特性。機械模式（mechanical models）〔以不同的方法來組合彈簧與緩衝筒（dashpots）〕，廣泛地應用在連續行為的模擬上。且必需瞭解，這僅是預測黏彈性體動力性能的工具。我們可作一般的結論：在確定實際應用的巨視模式的效率時，摩擦過程的微視理解是一個無法估計的值。

1.3 內摩擦與外摩擦

在此階段，希望將物體的內摩擦與外摩擦作一個區分。一般而言，表面間相互作用很明顯地可歸屬於外摩擦（external friction），而發生在材料物體內的分子 - 運動事件（molecular - kinetic events）與統體能量逸散（bulk energy dissipation），則分別是內摩擦（internal friction）的發生原因與結果。物理學者將表面定義成，厚度等於零的邊界，而且實際上並不存在。故必需將此定義加以修正，允許表面擁有極微小的厚度，可用單位埃（Angstrom）來測定。“表面”摩擦力的起源，是前述的分子 - 運動間相互交換，這發生在兩個滑動元件的外層內。此外層的厚度，可用儀器測知。以實際說法，該合成活性層的厚度近於零。

固體的內摩擦，是在平衡狀態下統體分子受到強制運動的直接結果，分子緊密排列，並表現出強烈的相互吸引或排斥（見第十章）。這種運動會在物體材料內引起內剪力作用，而導致內熱的生成。通常將內摩擦表成阻尼容量（damping capacity）、損失正切（loss tangent）或正切模數（tangent modulus）。在液體與氣體情況下，內摩擦被表成絕對或運動黏滯度（kinematic viscosity）。充氣輪胎可能是內摩擦與外摩擦最明顯的例子。在正常滾動過程期間，因輪胎胎面接觸與離開路面所起的連續撓度與恢復，而使輪胎本身的溫度上昇。同時，在滾動、煞車、驅動與轉彎時，胎面橡膠在路面突出物上的局部“扭曲”（squirming），會引起外摩擦分量。此分量是控制車輛與使車輛轉向的主要因素。在此例中，內摩擦與外摩擦機

構的相對大小，與車輛運用方式及實驗狀況有相當密切的關係。

1.4 乾燥與潤滑的表面

由設計的觀點，在已知應用中，最重要的準則（criterion）是滑動界面（interface）為乾燥或潤滑的狀況。在許多應用中，例如機器，已知僅有一種狀況將佔優勢（通常是潤滑狀態）。雖然許多潤滑區域可能存在，但，有某些情況，無法更進一步地得知交界面為乾燥或潮濕，此時顯然較難進行任何設計。這種現象的最常見例子，仍為充氣輪胎。在乾燥狀況下，希望藉着使輪胎與路面的接觸面積變為最大，而使摩擦的黏着分量*（adhesion component）為最大。此可由平滑胎面與平滑路面獲得。但這種組合，在潮濕狀況下，將產生極低的摩擦係數。在後者的情況，充分的胎面圖案與適當築造的路面，可提供最佳的狀況，雖然這種組合在乾燥天氣時，僅能得到較低的摩擦係數。

現存的幾種潤滑範式，可分類成液動（hydrodynamic）、邊界與彈性液動（elastohydrodynamic）等三種。今日所使用的不同軸承形式（軸頸軸承、滑件軸承、推力軸承、與薄片軸承），是完全液動行為的最佳例子。此時滑動表面完全被交界潤滑薄膜所分隔。邊界或混合潤滑（boundary or mixed lubrication）作用是運動表面間的液動接觸與固體接觸的組合。並在一已知成品設計中，當不發生液動潤滑作用時，一般假設該範式佔着優勢。例如，軸頸軸承的設計，係在完全液動範式中，以已知的負荷與速度運轉。但由速度的下降或負荷的增加，會導致軸頸與軸承表面間發生部份固體與部份液動潤滑狀況。這種邊界潤滑狀況是不穩定的。通常會恢復至完全液動潤滑行為，或惡化至表面完全卡死。薄潤滑劑薄膜所造成的壓力，其值可達能使潤滑劑邊界面變形。那時，在滑動界面的狀況可分類成彈性液動狀況。今日，彈性液動接觸狀況已被承認存在。迄今為止仍

* 摩擦含有兩個主要分量，黏着與變形，在第三章將會提及。

不嚴謹地被認為屬於液動或邊界潤滑範式的各種應用中；例如，配合齒輪輪齒的接觸，或滾珠軸承在經歷中的接觸，或在經過車削的旋轉軸上的唇狀油封（lip seal）等。固體潤滑劑表現着一種乾燥與潤滑狀況間的調和作用，雖然接觸界面通常是乾燥的，固體潤滑劑材料的作用會使它們看起來好像最初便是濕潤一般，這是在特定負荷與滑動狀況下，物理 - 化學相互作用發生在固體潤滑劑襯墊表面上的結果。這些結果將產生同等的潤滑效果。

1.5 應用範圍

區分磨潤學應用的一個有用方法，是依剛性 - 剛性、剛性 - 可撓性、可撓性 - 可撓性等表面配對來區分。如表 1-1 所示。剛性 - 剛性配對是最常見的型式，其有效的應用是金屬與金屬的摩擦。表 1-1 顯示磨潤學原理在製造法方面的應用。中間欄指出所考慮的特定製造程序，與其有關的工業，列在右端一欄中。剛性 - 可撓性種類，一般具體表現出彈性體或塑膠在剛性基表面上的摩擦，而纖維對纖維的摩擦，則屬於可撓性 - 可撓性表面配對種類。由表 1-1 可得一個結論：製造技術的可能應用範圍及有關範疇，是相當大的，本書僅考慮與磨潤學直接相關的主要工業。

工業上金屬摩擦的典型應用，可歸納如下：

- (1) 往復機器的潤滑作用。
- (2) 製造操作中的車刀設計。
- (3) 金屬線的拉製（drawing）、模具潤滑、與擠製（extrusion）。
- (4) 齒輪齒與滾子軸承間的接觸應力。
- (5) 鐵與鋼的機械加工程序。

最常見的彈性體 - 剛性表面（elastomer - rigid surface）配對：

- (1) 汽車輪胎的滑行與滑動。
- (2) 機器內彈性油封與 O 形環的動漏洩（dynamic leakage）。