

· 機工叢書 ·

PRINCIPLES OF GEARING

# 齒輪的原理和應用

黃春盛編譯 · 萬里書店出版



41  
4

# 齒輪的原理和應用

黃春盛編譯

香港萬里書店出版

---

應用物理學

黃春盛編譯

出版者：萬里書店有限公司

香港北角英皇道486號三樓

電話：5-632411 & 5-632412

承印者：協成柯式印刷廠

九龍官塘巧明街95號二樓

定價：港幣十四元

版權所有 \* 不准翻印

---

(一九八〇年二月版)

# 前言

---

你知道齒輪是怎樣的嗎？

兩個高中畢業生說：“齒輪是咔嚓咔嚓地運轉的東西。”

一個大學畢業生說：“鐘錶裏就裝滿了齒輪，它們的圓周上有許多鋸齒。”

一個中學的數學老師說：“齒輪是通過反比例計算而製造出來的。”

這些回答是十分粗淺的，不過並不值得奇怪，因為回答者都是外行人。

即使是在工場工作的人，也未必熟悉齒輪。近年來，因為考慮精度的維持及安全等問題，所以許多車床的齒輪結構都被安裝在齒輪箱裏或者加蓋蓋上，致使人們與齒輪的距離遠了。有時，即使藉着某個機會打開了主軸箱，也只能見着那構成減速的齒寬面很大的齒輪，却不明白為什麼馬力相同，越接近後段的地方，齒寬就越大的道理。

我就職的工場鄰近的一間廠房裏，有一部滾齒機，這也是我最初接觸到的切齒機。我許久也不明白有關滾齒機製造齒輪的道理。當然，這已經是二十五年前的事了。

舊式的滾齒機顯然比現在的滾齒機落後得多。現在是大批量地生產齒輪。

一次午休時，我看見滾齒機還在運轉，便急忙走過去，目不轉睛地順序觀察。由於全部齒輪都在旋轉，用手觸摸是有危險的。齒輪的旋轉速度也不一樣，其中有的是自兩軸向同一方向旋轉的齒輪——這應該是所謂的差動齒輪了。

說來好笑，我整個午休時間都花在觀察這部運轉中的滾齒機上面了。

在同一個工場的另一個特別的角落裏，放置着兩台格里森式插齒機。這種插齒機有兩張 G 形刀刃，操作時，它們一邊發出輕微的咔嚓咔嚓聲響，一邊作交替的往復運動，齒輪及使刀具作往復運動的全體部件也在旋轉。

當時我並不知道這就是所謂漸開曲線創成運動，只要有空，我都不厭其煩地進行觀察，有時，我看得入了迷，用雙手去模仿兩張切刃的動作，別人驟眼看來，還以為我是模仿蒸氣機車的動作哩！

不過，我也不僅是觀察，為了徹底搞清楚機械的作用及其道理，我讀了許多有關切齒的書。

經過多年的研習和實踐，我終於對齒輪有了一定的認識，縱使艱辛備嘗，也是值得的。

這是一本關於「齒輪的原理和製造」的書，裏面提供了一切有關這些方面的知識，希望對讀者有所幫助，能少走一點彎路，獲得更大的成功。

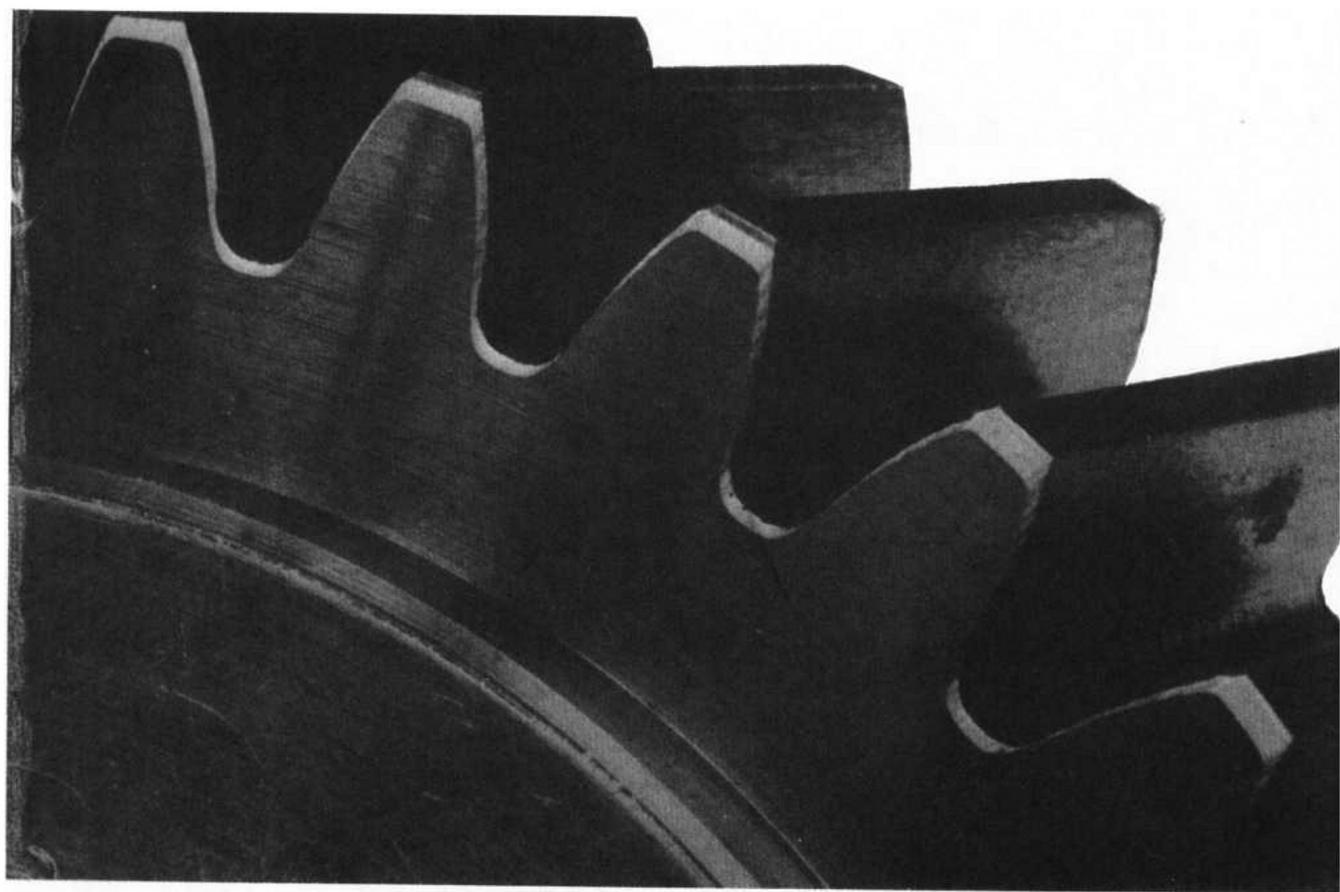
# 目 次

|                |    |
|----------------|----|
| 前 言            | I  |
| 第一章 齒輪的歷史和用語   | 1  |
| 1—1 齒輪的歷史      | 2  |
| 1—2 齒形的變化      | 4  |
| 1—3 齒輪製造法的進步   | 5  |
| 1—4 關於“齒輪”這個詞  | 8  |
| 1—5 齒輪的專用名詞解釋① | 9  |
| 1—6 齒輪的專用名詞解釋② | 11 |
| 1—7 齒輪的參數符號    | 12 |
| 第二章 齒輪的基本條件    | 15 |
| 2—1 從摩擦輪到齒輪    | 16 |
| 2—2 滾動和滑動      | 17 |
| 2—3 角速度        | 18 |
| 2—4 齒形的考慮方法    | 19 |
| 2—5 漸開線曲線      | 22 |
| 2—6 擺線曲線       | 24 |
| 2—7 圓弧齒形及其他齒形  | 26 |
| 2—8 漸開線齒形      | 26 |
| 2—9 模 數        | 28 |
| 2—10 徑 節       | 31 |
| 2—11 變位齒輪      | 33 |
| 2—12 奇特的變位齒輪   | 35 |
| 2—13 齒的干涉和最小齒數 | 37 |
| 2—14 壓力角       | 39 |

|            |                         |           |
|------------|-------------------------|-----------|
| 2-15       | 齒的受力狀況                  | 41        |
| 2-16       | 嚙合係數                    | 43        |
| 2-17       | 獨齒齒輪                    | 45        |
| 2-18       | 斜齒輪——人字齒輪——螺旋齒輪         | 47        |
| 2-19       | 傘形齒輪                    | 49        |
| 2-20       | 輪齒的修正                   | 51        |
| <b>第三章</b> | <b>齒輪的製圖</b>            | <b>53</b> |
| 3-1        | 齒輪的製圖                   | 54        |
| 3-2        | 正齒輪                     | 55        |
| 3-3        | 斜齒輪、斜齒內齒輪和人字齒輪          | 56        |
| 3-4        | 傘齒輪（包括直齒傘齒輪、螺旋傘齒輪、海波齒輪） | 59        |
| 3-5        | 蝸桿、螺輪和螺旋齒輪              | 60        |
| 3-6        | 兩軸平行的嚙合齒輪①              | 62        |
| 3-7        | 兩軸不平行的嚙合齒輪②             | 64        |
| 3-8        | 齒的位置                    | 66        |
| <b>第四章</b> | <b>齒輪的種類和用途</b>         | <b>67</b> |
| 4-1        | 圓柱齒輪                    | 68        |
| 4-2        | 傘形齒輪                    | 70        |
| 4-3        | 錯軸齒輪                    | 72        |
| 4-4        | 動力傳遞和運動傳遞               | 74        |
| 4-5        | 減少轉速和增加轉速               | 76        |
| 4-6        | 轉變運動方式和轉變旋轉方向           | 79        |
| 4-7        | 齒輪減速箱                   | 81        |
| 4-8        | 行星齒輪裝置                  | 84        |
| 4-9        | 行星齒輪裝置的應用               | 86        |
| 4-10       | 差動齒輪裝置                  | 88        |
| 4-11       | 蝸輪蝸桿減速箱                 | 90        |
| 4-12       | 可變形的齒輪減速裝置              | 92        |
| 4-13       | 齒輪泵                     | 95        |
| 4-14       | 非圓齒輪                    | 97        |
| 4-15       | 大齒輪和小齒輪                 | 99        |
| 4-16       | 間歇傳動齒輪                  | 101       |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| <b>第五章 齒輪的製造法</b> .....    | 103 |
| 5—1 齒輪坯的加工.....            | 104 |
| 5—2 齒輪的熱處理.....            | 106 |
| 5—3 軸孔的磨削加工.....           | 107 |
| 5—4 成形切齒.....              | 108 |
| 5—5 創成切齒.....              | 110 |
| 5—6 滾切的原理.....             | 112 |
| 5—7 應用滾齒刀切齒.....           | 114 |
| 5—8 應用齒條刀切齒.....           | 117 |
| 5—9 應用插齒刀切齒.....           | 119 |
| 5—10 應用G形刀具切齒.....         | 121 |
| 5—11 螺旋傘齒輪的切齒.....         | 123 |
| 5—12 蝸輪的切齒.....            | 126 |
| 5—13 蝸桿的切齒.....            | 127 |
| 5—14 剃 齒.....              | 128 |
| 5—15 齒面的磨削.....            | 130 |
| 5—16 齒輪的滾軋.....            | 132 |
| 5—17 齒輪的鍛造.....            | 134 |
| 5—18 齒輪的其他製造法.....         | 135 |
| 5—19 塑料齒輪.....             | 137 |
| <b>第六章 齒輪的精度及其測定</b> ..... | 139 |
| 6—1 齒輪的精度.....             | 140 |
| 6—2 齒形誤差的測定.....           | 142 |
| 6—3 齒向誤差的測定.....           | 144 |
| 6—4 節距誤差的測定.....           | 147 |
| 6—5 弦齒厚的測定.....            | 149 |
| 6—6 公法線齒厚的測定.....          | 152 |
| 6—7 齒槽偏差的測定.....           | 154 |
| 6—8 齒輪的嚙合試驗.....           | 155 |
| 6—9 輪齒接觸狀況的檢查.....         | 156 |
| 6—10 齒 隙.....              | 158 |
| 6—11 齒面的損傷.....            | 159 |

|      |               |     |
|------|---------------|-----|
| 6-12 | 齒的折損和虧損.....  | 160 |
| 6-13 | 齒輪的磨損和變形..... | 162 |
| 6-14 | 齒輪的保養和潤滑..... | 164 |



## 第一章 齒輪的歷史 和用語

齒輪和人類的關係是悠久的，隨着人類歷史的推移，齒輪也經歷了很多變革。另一方面，在人類應用齒輪的過程中，如果齒輪的名稱各不相同，專門用語也各不一樣，勢必十分麻煩，因此人們就根據各地齒輪的共同點，把齒輪的名稱和專門用語統一起來，這樣，使用時就方便多了。

## 1 - 1 齒輪的歷史

在人類的歷史上，究竟從什麼時候開始應用齒輪，我們已經無法考證，但是在希臘人阿里斯多德所著的“機械問題”一書裏已有關於青銅製和鐵製齒輪的記載，儘管阿里斯多德當時並沒有考慮到有關製造齒輪的問題，然而由此已經反映出大約在2300年前人類已在使用金屬製的齒輪了。

大約過了一百年之後，同樣是希臘人阿基米德所著的書裏也有關於齒輪的記載，他談到了阿里斯多德未曾提到的蝸輪蝸桿，並且對於利用這種蝸輪蝸桿的捲揚機作了說明。

以後又有2、3個人對經過改進的捲揚機作了進一步的圖解說明。這些捲揚機都是一種利用人力來帶動，據此得到大力傳動的機器。

稍後，又出現了一種作為傳遞動力或者傳遞運動機構的齒輪。例如，從出土的羅馬時代的遺跡中發現的燈籠形齒輪、印度的脫棉子機中的齒輪，以及從瑞典古城中發現的石製斜齒傘齒輪等等都屬於上述齒輪。此外，據文獻記載還有各種各樣的齒輪，有關學說也五花八門。

到了中世紀，齒輪被用於鐘錶上。這種齒輪已經逐漸地接近於今天的齒輪了。到了13~14世紀，歐洲各地已經懂得利用平衡錘的作用來製作鐘錶，但是，這時還只限於在一些特殊的地方使用齒輪，真正較為普及地



圖 1 - 1 科學工作者、藝術大師達芬奇 (Leonardo Da Vinci) 曾經設計了各種各樣的齒輪。

使用齒輪是在15世紀。不過，齒輪進入家庭中去，還是後來的事。

到了15世紀後半葉，著名的科學工作者、藝術大師達芬奇 (Leonardo Da Vinci) 對齒輪的發展作出了極大的貢獻，這是在齒輪技術發展史上值得人們大書特書的光輝一頁。這時無論是齒輪的種類，還是齒輪的形狀都已經很齊全了。情形如圖 1 - 2 所示，有螺旋齒輪，傘齒輪，而蝸輪蝸桿，也是球

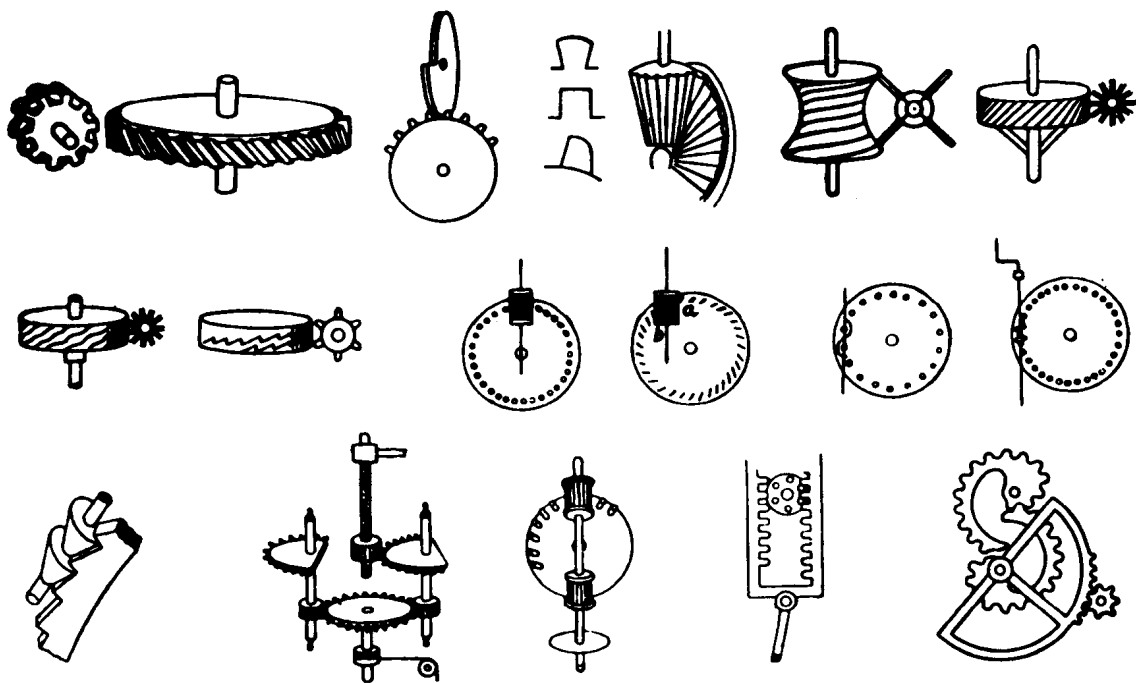


圖 1 - 2 達芬奇用草圖的形式表示了各種齒輪裝置

面蝸桿，還有半軸齒輪，海波齒輪等等。

此外，在通過單方向回轉來作左右擺動的機構，以及借助於水力來作旋轉運動的軋機等等，結構中都應用了齒輪。其次，在螺紋加工機上也配置了變速齒輪。

進入16世紀時，又有幾本書記載了把齒輪組合在一起的各種機構。

另一方面，因為在鐘錶上要求齒輪正確地傳動，於是人們開始探討齒輪，到了17世紀，更開展了對齒輪的齒形理論的廣泛和系

統的研究。

在18世紀時，由於機械工業的進步，緊接着發生了一場產業革命，於是近代的、正規的機械工業也隨之成長起來了，齒輪的製作方法也隨之獲得巨大的發展。

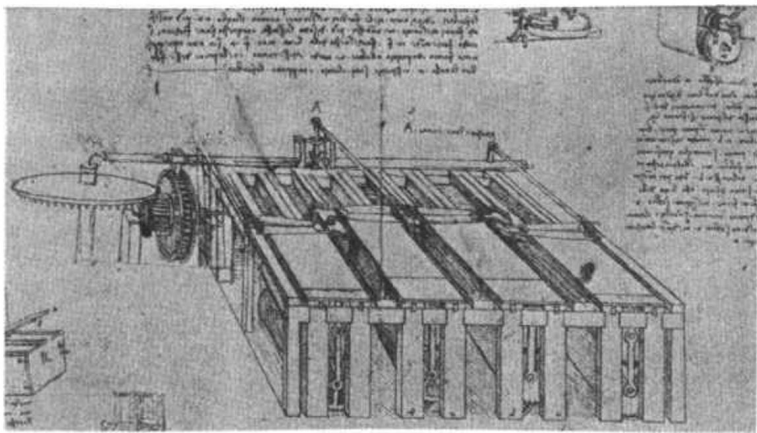


圖 1 - 3 達芬奇的剪斷機草圖

## 1 - 2 齒形的變化

在齒輪問世的最初階段，人們並沒有認識到齒形的重要性，因而，只要求齒和齒能嚙合傳動就行了。至於齒形如何、齒節怎樣，就沒有給予足夠的重視。

可是，當齒輪被用到鐘錶上時，因為要求齒輪能準確地旋轉，因此便開始注意到齒形和節矩的問題了。然而，因一時缺乏理論根據，只好光憑經驗去製作齒輪，但也能相當準確地傳動。

由於最初是和針狀齒嚙合傳動的，因此人們總是研究同一個角度下旋轉的齒形。這就是所謂擺線曲線的外擺線齒形（請參看 2 - 6 節）。在 17 世紀時，丹麥人歐拉普里邁和法國人菲律普托萊路都分別發表了他們對上述齒形的研究結果。

結論是，就進行等角速度運動的齒形來說（參看 2 - 3 節），以擺線作為齒形曲線是最為合適的。自此才從理論上弄清了齒形。

此後到了 1733 年，法國人茄米佑又進一步闡明了有關兩個齒輪嚙合下接觸點的軌跡概念。

另外，於小齒輪的齒數較少，嚙合率較低的場合，在由齒根面趨向中心的直線上，會使齒頂面沿着由外擺線所構成的齒形方向推進。雖然當時已有部份人把外擺線齒形的齒輪應用到鐘錶上，但是唯有茄米佑對該齒形作了理論上的說明。

外擺線齒形至今仍然被採用，其詳細情況如 2 - 6 節中所述。

雖然，對擺線齒形進行了研究，但是當時在齒輪上還沒有交換性，比方說，同樣是 6 個齒的小齒輪，在它和 36 個齒的齒輪以及和 60 個齒的齒輪嚙合時，其齒形是不相同的。

基於當時對上述齒輪關係的認識，由英

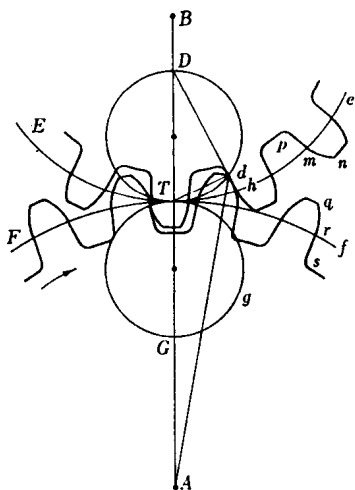


圖 1-4 交換性的擺線齒形 (威里仕)

國人威里仕作了有關交換性擺線齒形的說明，這就是：“對於相同齒距的齒輪，在節圓周上定下了滾圓之後，如果節圓的外側取外擺線，內側取內擺線，那麼這種齒形的齒輪無論怎麼組合，都能嚙合”。

交換性的某一個復合擺線齒形就是這樣形成的。不久，美國的布朗夏甫公司便製作了一種適應於上述齒輪關係的切齒用銑刀。因為在市面上公開出售，所以這種齒形很快就普及到世界各地去。

另一方面，有關漸開線齒形的各種優點又由萊路和埃萊等人作了闡明。

由於應用威里仕的交換性擺線齒形時，即使中心距多少有些變化，角速度比也能保持不變，可見交換性齒輪有其獨特的優點。因此布朗夏甫公司按該原理又製成了成形齒

輪的銑刀。

有關漸開線銑刀的詳細情形如 5-4 節中所述。由 12 個齒到齒條，用 8 個就可以蓋住，而擺線銑刀則要用 24 個才能蓋住，兩種銑刀有這種差別。

對威里仕齒形來說，還有另一個嚙合角的問題（參看 2-14 節），對齒輪徑節（參看 2-10 節）也要事先加以考慮整理。

為了便於計算，嚙合角取  $\sin 14.5^\circ = \frac{1}{4}$ ，蝸桿和梯形螺紋的角度同樣取  $29^\circ$ ，這都是根據上述關係計算出來的。

由於徑節和周節的關係，為了避免節圓直徑出現無理數，就以 3、4、5、6 和 7……這些數值來作為齒的大小標準。

漸開線齒形和擺線齒形相比，前者應用的最多。這是因為在 20 世紀時，發明了創成切齒（參看 5-5 節），用直式刀刃可以確保成形漸開線齒形的緣故。

其次，我們在木偶機構中所見到的木製齒輪都呈簡單的三角形齒形。

### 1-3 齒輪製造法的進步

在齒輪的製造問題中，主要是切齒法。對於“齒輪的歷史”一節中所舉出的古代齒輪，我們並不知道它是怎樣製作的。

使用於鐘錶和木偶上的木製小齒輪都是用一片木板切出來的。對於聯繫水車動力的齒輪必須具有承受相應載荷的強度，由於齒形的磨損，還需要修補。

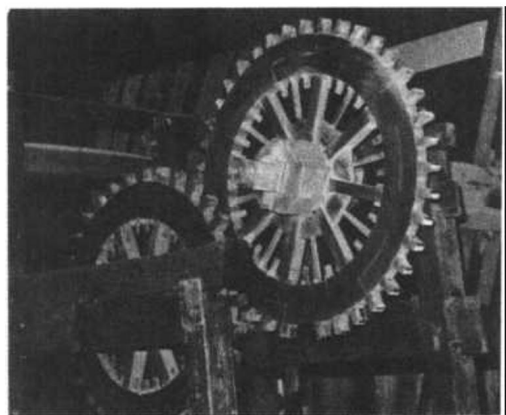


圖 1 - 5 植齒組裝式齒輪

圖 1 - 6 這是上圖中植齒組裝式上的齒。它是一只楔子。



這種木製齒輪都是由插入齒組裝而成的，齒輪上的每個齒都可以隨時更換。古代水車上的木製齒輪並沒有使用一根釘子，這歸功於水車木匠們的高超手藝。

即使是歐洲的金屬製齒輪，最初也全是用手進行加工的。可是，隨着齒形的變化，作圖也相應地困難起來。

鐘錶上所用的齒輪是通過機械加工的。在斯德哥爾摩博物館，至今還保留着18世紀初由瑞典人玻魯赫姆所製造的上述齒輪。該齒輪上的每個齒是通過齒槽成形銼刀上下移動切削出來的。

接着由法國人基克托巴山遜製成了齒槽成形的回轉刀具。這種回轉刀具與其說是回轉刀具，不如說是旋轉式的銼刀。

應用銼刀來切齒是19世紀的事情。這是由瑞士人波托邁和英國人威托謹仕發明的。由於當時還沒有製成鏟齒銼刀，因此銼刀的壽命很短。

像現在所使用的可以隨時重新磨刃的鏟齒銼刀是布朗夏甫公司首先創造的。

因為有了布朗夏甫公司製造的萬能銼床和成形銼刀，於是實現了成形切齒法（請參看 5 - 4 節）。

此後，各種帶有自動分度機構的切齒機（即切齒專用銼床）便相繼由許多廠商製造出來了。

隨之又發明了創成切齒法（參看 5 - 5 節）。

最初是用齒輪滾刀對蝸輪蝸桿進行切齒。該滾刀的形狀相當於帶齒的蝸桿。這種在滾刀和齒輪環之間按一定關係作強制運動的切齒法產生於19世紀後半葉，其作用方式和現在的滾齒機類似。

後來又經過多次改進，到本世紀才開始形成如今的滾齒機。

另一方面，在應用切齒法以前，已經廣泛採用了各種齒條刀具來切齒了。儘管是一

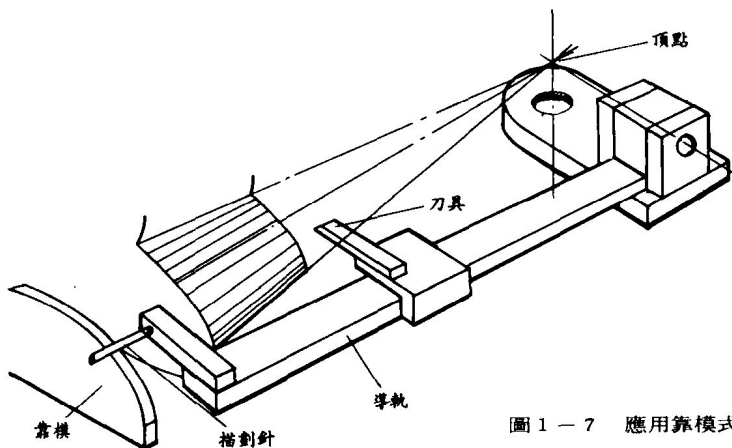


圖 1-7 應用靠模式加工傘齒輪的機構示意圖

種齒條刀具，但開始時，這種刀具也只是一種帶有和基圓上齒槽寬度相等的兩個刀刃的齒條。到了19世紀後半葉才有齒頂寬度的齒條刀具。

在20世紀初，人們開始成功地應用齒條刀具來切齒。

1911年又發明了變位齒輪法。

另外，在20世紀初，隨着正齒輪、斜齒輪的切齒法、成形切齒法以及創成切齒法同時出現的還有磨齒法。不過正規的磨齒法也在1913年出現了。

至於改變回轉軸方向的齒輪切齒法就比較複雜。比較近似的是銷輪。究竟從什麼時候開始有傘齒輪呢？至今還不清楚。至於像今天所使用的傘齒輪可能是18世紀後半葉就已經出現了。傘齒輪一般都是通過鑄造成型的。

由於通過成型銑刀法不能獲得正確的齒

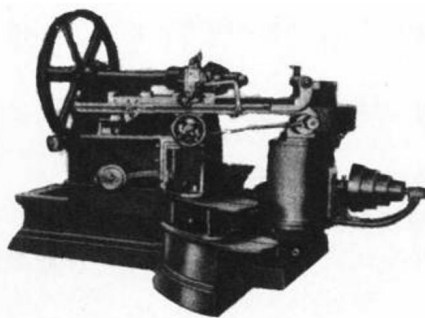


圖 1-8 格里森的 1 號傘齒輪刨床

形，因此即使是正齒輪，也曾經一度是採用靠模加工法來成形的。傘齒輪則要按比例沿長度方向進行加工。到了19世紀後半葉才出現了由格里森公司製作的傘齒輪刨床。

傘齒輪的創成切齒法則發明於1872年。

## 1-4 關於“齒輪”這個詞

在JIS B0102有關齒輪的用語中，齒輪是指“通過齒的逐個嚙合而起傳遞運動的機械零件偶或者個體零件”而言的。

有的人習慣於把齒輪稱之為Gear，這是齒輪的英語名稱。但是英語有時也把齒輪叫做Toothed wheel。

小齒輪英語叫做Pinion。特別對於小齒輪和齒條（Rack）組成一體的場合，對其中的齒條也應該看作大齒輪，因為齒條是齒輪的一種變形，它相當於直徑無窮大的一種齒輪。

與小齒輪相對應，大齒輪英語稱之為Gear。在英語名稱方面，Pinion和Gear、Pinion和Rack都是成對的齒輪關係。

應用齒輪的最主要目的是為了減速。從這個意義上講，小齒輪理所當然地應該是驅動齒輪，大齒輪則是從動齒輪。即使兩者大小相差無幾，也有驅動側和從動側之分，即Gear和Pinion之分。而傘齒輪對也同樣有上述的區別。

可是，英語Gear這個詞並不是單指齒輪的，例如飛機的著陸架就叫做Landing Gear。總而言之，和甚麼機構連動的裝置，英語都廣稱為Gear。所以除了機械以外，Gear這個詞就不是指齒輪。

Pinion和Rack的關係也是如此，除了齒輪之以，還有別的含義。

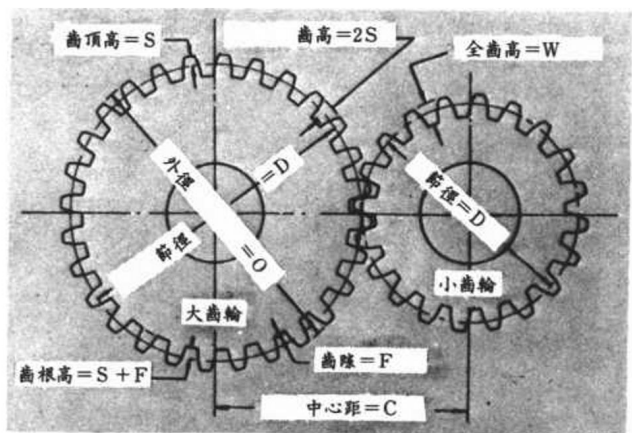


圖 1-9 這是美國有關的齒輪書對大小齒輪的解釋，分別叫做Gear和Pinion。

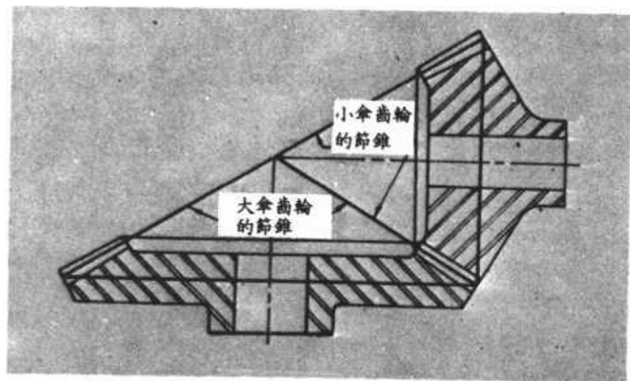


圖 1-10 在傘齒輪對中對大小傘齒輪也分別叫做Gear和Pinion