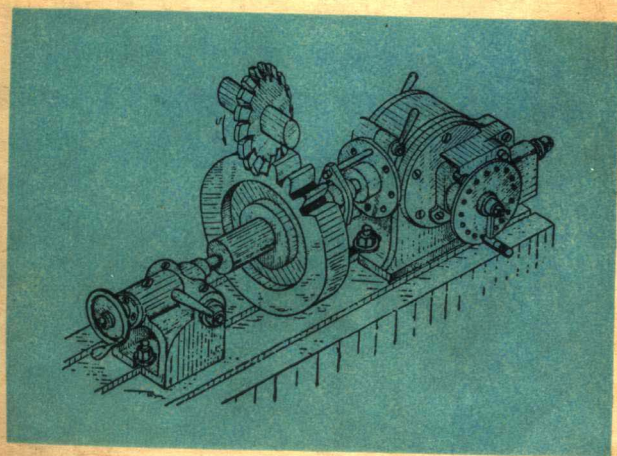


克里莫夫著

齒輪加工



機械工業出版社

蘇聯 В. И. Климов 著 ‘Обработка зубчатых колес’ (Машгиз
1953 年第一版)

*

*

*

著者：克里莫夫 譯者：方志豪

書號 0695 (工業技術)

1954 年 12 月第一版 1954 年 12 月第一版第一次印刷

787×1092^{1/32} 38 千字 1^{11/16} 印張 0,001—9,000 冊

機械工業出版社(北京盛甲廠 17 號)出版

機械工業出版社印刷廠印刷 新華書店發行

北京市書刊出版業營業許可證出字第 008 號

定價 2,100 元

出版者的話

蘇聯國立機器製造書籍出版社出版“機床工人科學普及叢書”的目的是爲了幫助機床工人提高他們的理論知識和實際知識。這套叢書系統地講解了金屬切削加工的基本原理。每一小冊深入淺出地敘述一個問題，文字通俗易懂，插圖多用立體圖，很適合工人閱讀。我們認爲這套叢書對我國機床工人系統地提高理論水平有很大幫助，所以決定把它陸續翻譯出版。

這套叢書分成三組，共 26 輯。第一組敘述有關金屬切削的一般問題，共 10 輯(1~10)；第二組說明金屬加工的各種方法，共 10 輯(11~20)，最後一組介紹各種金屬切削機床，共 6 輯(21~26)。

本書譯自這套叢書的第二組第 15 輯。在這一本書裏，作者通俗地敘述了齒輪嚙合，圓柱齒輪現代的切削法和切削時所用的切齒刀具的構造以及在高度生產率的齒輪切削方面的新成就。

本書可供四、五級以上現場實際製造齒輪工人的學習材料，也可供初級技術人員參考。

目 次

一	引言.....	3
二	怎樣完成齒輪傳動.....	7
三	在漸開綫嚙合中牙齒齒形是怎樣構成的.....	11
四	按倣形法切削齒輪.....	19
五	按範成法切削齒輪.....	26
六	切齒刀具的磨損和壽命.....	38
七	高度生產率的齒輪切削法.....	46
八	結 論.....	53

一 引言

在機械加工的各式各樣的表面中，例如平的、圓柱形的、成形的、錐形的、花鍵的、螺紋的和其他的內外表面，大概要算齒輪上齒部表面的加工是比較最複雜的了。而牙齒表面在機械製造中有很廣泛的應用。大多數的現代機器中都有齒輪。金屬切削機床、飛機、汽車、軋鋼機、汽輪機、電動計算機、鐘表、千分表、捲揚機、電刨、機械壓床、起重吊車和很多其他機器都非有齒輪傳動不行。

齒輪的主要用途是把旋轉運動從一個軸傳動到另外一個軸；齒輪和齒條形式的傳動可以把旋轉運動變為往復運動。齒條傳動在機床操縱的機構中採用很廣。例如：變速箱中滑動齒輪的移動，在工具機床的縱向進刀機構中都有應用；在測量儀器和顯微鏡中，光學鏡頭也就是靠齒條傳動來把它調整到所需要的位置的。

齒輪發展的歷史已經有幾千年了，一談到關於齒輪，我們就會提到生於二千多年以前的阿里斯多提里的。

第一個齒輪是用木材製造的。直到現在我們在老式的水磨上還能看到木製的齒輪。一個比較大的木輪在慢慢地旋轉着，在木輪沿圓周的外圈上裝着一些木梢——這就是木輪的牙齒，這個齒輪裝在帶有水輪的一個軸上，同時把旋轉運動傳動到第二個齒輪，這個齒輪和磨盤連在一起，不過轉得比較慢，這樣的嚙合叫做針輪嚙合；而牙齒——大輪子上的木梢——就是輪針。後來針輪式嚙合在形式上有些改變，在製造第一台金屬切削機床時曾應用過，圖 1 所示是一台手動機床，在中世紀時代採用來鑿銼刀的刀口；旋轉運動從手柄經過針輪傳至絲槓。

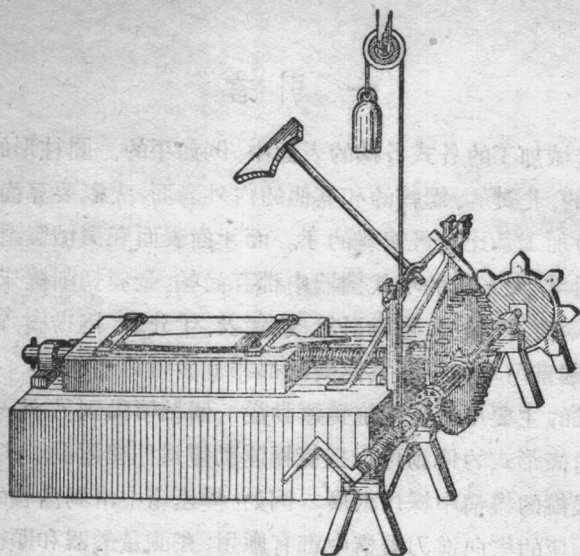


圖1 中世紀鑲銼刀刀口用的機床。

然而木製齒輪磨損很快，也不能傳動較大的動力，隨着冶金的發展，在十八世紀末期，在軋鋼機架上開始應用鑄造的齒輪，牙齒部分是和輪子同時鑄出來的，不再經過任何輔助加工。一直到上世紀的中期，常常採用一種合成式的鑄鐵齒輪。輪子的外圈是鑄鐵的而鑲上木製的牙齒，這時候傳動就比較柔和沒有聲音了。

但是鑄造齒輪只可應用於一些粗糙的機器中，比較精確的機構，齒輪的齒形就需要預先經過機械加工。開始的時候，牙齒是按劃線來加工的，後來爲了要加工鋼的齒輪，就採用了一種和牙齒齒間槽形狀一樣的刀具，然後再把刀具的齒形複製到齒輪上去，這樣，在製造齒輪的過程中就產生了做形的方法。

著名的俄羅斯機械師安德列依·康士坦丁諾維奇·納爾托夫在1709~1712年製造了第一台金屬切削機床，在裏面已經採用了經

過加工的齒輪，牙齒經過加工後，齒輪的質量大大提高了。同時也為採用比從前尺寸更小的齒輪以及用強度較高的材料——鋼來製造齒輪，提供了條件，傳動也就可以更為緊湊了。

隨着機器製造的發展，對於齒輪傳動的要求也提高了，機器也變得動力更大和更為快速。例如海船上的汽輪機，在上世紀的末期，其齒輪傳動的圓周速度已經達到 12 公尺/秒，傳動的動力已超過 10000 馬力，用倣形法來加工牙齒的方法已不能再滿足機器製造的要求，因為它已經不能保證所必需的精度。這種傳動在工作的時候，發生極大的噪聲並且齒輪很快就損壞了。所以代替倣形法而產生了另外一種方法，這種方法才使製造快速齒輪有了可能，才能傳動更大的動力，這個切削方法就叫做範成法，有時也叫做滾動法。

按範成法工作的滾齒機(用滾刀)，是在上世紀的 90 年代開始有的，範成法不但提高了齒輪精度，而且生產率也比較高了。新的加工方法對於選擇齒輪牙齒齒形也有了影響。從前在齒輪傳動方面，同時成功地採用了兩種齒嚙合方式：擺綫嚙合和漸開綫嚙合，由於出現了範成法，漸開綫齒形就佔有了優勢。擺綫齒形的齒輪現在已經很少採用。

在現代機器中，齒輪傳動的應用是非常廣泛的，齒輪的直徑可達到巨大的尺寸——到 7 公尺以上，但是也可以遇到直徑只有 3~4 公厘的齒輪。模數是代表牙齒大小比例的一個數值，有些齒輪，模數只有 0.07 公厘，而在重型的和動力大的機器中可以達到 50 甚至 70 公厘。

在圖 2 甲中，表明了一個齒輪和一個滾刀，這個齒輪是用這個滾刀切削出來的。從圖上可以很清楚地看到，這個齒輪和滾刀可以很寬裕地裝入一個火柴盒中，在圖 2 乙中是一個現代高速汽輪機的齒輪。第一個齒輪(圖 2 甲)——是千分表中的一個小齒輪，這個

千分表要使讀數精確到0.002公厘,所以這個齒輪必須特別精確地來製造。對於高速齒輪一點也不能減低其嚴格的要求,汽輪機的傳動,其圓周速度通常達到50~60公尺/秒;有的可以達到90公尺/秒(在這裏爲了對比的說明一下,砂輪旋轉的圓周速度是30~40公尺/秒,也就是比它幾乎小到二分之一,而速度到50公尺/秒的磨削已經認爲是高速磨削了),高速的齒輪傳動對於牙齒各部尺寸在製造時所容許的誤差是最敏感的,這些誤差會引起振動和巨大的噪聲以及會使得牙齒很快地磨損,所以在進行加工的時候往往要有較高的精確度,要達到15~20公忽;甚至巨大的幾噸重的齒輪牙齒也是如此,很顯然這種加工就需要精度更爲高級的工具和機床了。

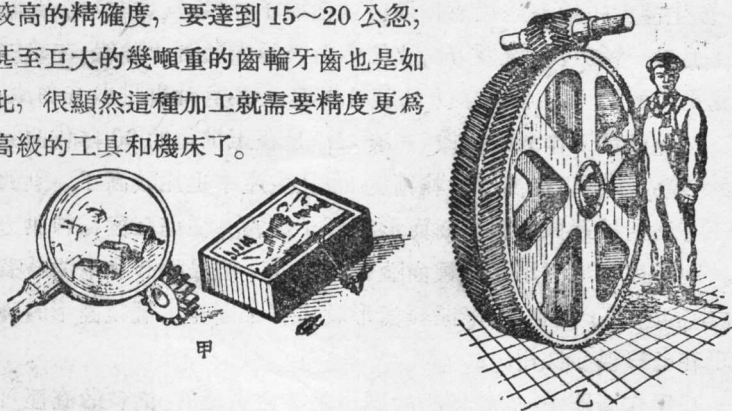


圖2 現代齒輪的尺寸比較:
甲—千分表小齒輪; 乙—汽輪機齒輪。

齒輪的本身構造說明它的加工是比較複雜的,在牙齒結構方面就包括有:複雜的齒形,較高的精確度以及很大的加工餘量,所以,齒輪的切削過程比其他較爲簡單的表面加工是有很大的困難的。例如,爲了加工一些齒輪必須花費到460小時的機動時間,也就是接近於20天連續不斷的晝夜工作。

在我們這本書裏敘述到關於齒輪嚙合、關於切削圓柱齒輪的

現代方法、關於最合理的齒輪切削刀具的構造以及關於蘇聯高度生產率的齒輪切削技術方面的成就。

二 怎樣完成齒輪傳動

要傳動比較大的動力和嚴格地使主動軸和被動軸的轉數比例保持不變，那就只有靠齒輪傳動了。

圓柱齒輪傳動起源時是由兩個光滑的圓柱形滾筒靠摩擦來相互轉動的。光滑圓柱的傳動在製造時非常簡單，但是儘管如此，它在現在極少採用，問題是在於兩個圓柱表面相接觸的地方是很窄的平面，在理論上是一條直線（圖 3 甲）。在這樣很小的平面上，不可能產生足夠的摩擦力來傳動即使是很小的動力，所以主動圓柱就不免要打滑。爲了要消除這種現象，在圓柱上面就做上一些正確地依次排列的凸塊——牙齒和齒間槽（圖 3 乙），當工作的時候一

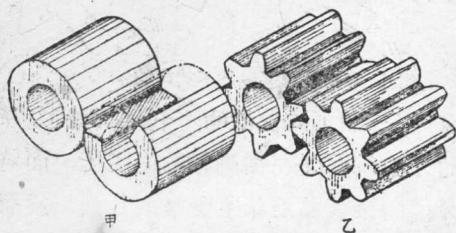


圖 3 圓柱滾筒和齒輪：

甲—光滑圓柱表面接觸是一條直線；

乙—爲了不打滑，圓柱上要具有牙齒。

個齒輪的牙齒插入另一個齒輪的齒間槽，就靠主動軸的牙齒側面將壓力加在從動輪的牙齒側面上，這樣來傳動旋轉，這樣的輪子就叫做齒輪。

可是要正確地構成齒輪傳動，牙齒的側面

必須要有嚴格規定的齒形。我們來想像一下，假使一個牙齒是任意形狀的齒形，圖 4 所示是一個主動齒輪和一個從動齒輪，它們的牙齒側面是畫成直線的，這種齒輪傳動是不會有的，但是我們來看一看，假使製造了這樣二個齒輪，他們將怎樣工作。

主動輪均勻地以等速旋轉，齒輪上離開中心距離不同的各個

點將要以不同的直線速度而移動，離開中心距離愈遠的點，直線速度也就愈大，請你想一下，就像將整齊的遊行行列展開一樣：當把一行的一端作為迴轉中心，這一端在轉向時幾乎在原地不動，可是在這一行的另外一端的人，為了保持行列的整齊，必須要加大步伐，加快速度，而在齒輪方面也是一樣，在牙齒頂部的直線速度要比在底部大些。

在我們的例子中，從動輪究竟將怎樣被傳動呢？

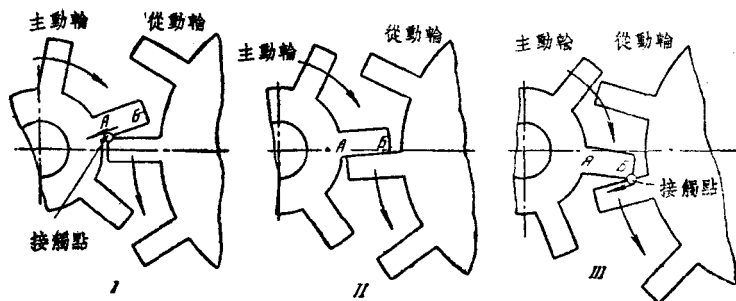


圖4 牙齒是任意形狀的齒輪，傳動旋轉運動是不均勻的。

圖4所示是這樣地啮合，在三個不同位置的一刹那的情形。在第一個位置，主動輪自己的牙齒側面壓在從動輪的齒尖上，而將旋轉運動傳動給從動輪，牙齒的接觸點沿着主動輪的牙齒側邊而移向主動輪中心，這時從動輪的速度不斷地減低。在第二個位置，兩個齒輪的牙齒側面重合了，在這個時候速度就急劇改變——發生衝擊，從動輪的速度驟然上升，因為接觸點在剎那間從牙齒底部(A點)移到牙齒頂部B，現在已經是主動輪的齒尖沿着從動輪牙齒表面離開從動輪的中心而滑動(第三個位置)，從動輪的速度又不斷地減低了。

從這個例子可看出，任意齒形的齒輪是不會有均勻地傳動的，而均勻地傳動是現代機器，特別是快速運轉的機器所必須達到的。

齒輪牙齒齒形曲綫應用的有二種，這在前面已經說過，就是擺綫齒形和漸開綫齒形。

這些齒形是相當複雜的數學曲綫，但是它能保證牙齒均勻地嚙合，以及在每一個嚙合瞬間能均勻地傳動運動。

擺綫形狀的牙齒側面在過去首先得到廣泛的應用，但是現在它已經差不多完全被漸開綫齒形所代替了。理由是因爲擺綫嚙合，必須要嚴格地保持嚙合齒輪的中心距離，而在漸開綫嚙合這就不需要了。此外，當製造漸開綫齒輪時，也容易達到較高的精度。

齒輪不但是按其牙齒齒形來分類，而且也按其牙齒方向來分類，正齒輪由於設計和製造都比較簡單，所以採用得最多，正齒輪牙齒方向是平行於齒輪軸心的（圖5甲），然而這種齒輪的嚙合質

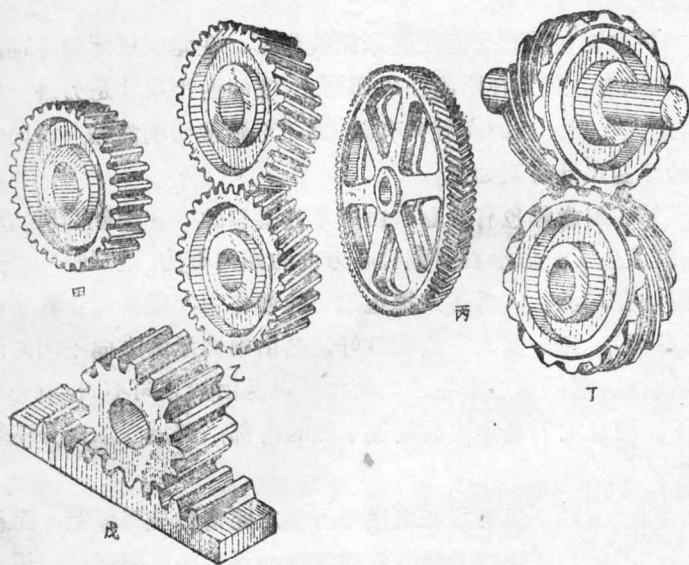


圖5 齒輪的各種類型：

甲—正齒輪；乙—斜齒輪；丙—人字齒輪；丁—螺旋齒輪；戊—正齒輪和齒條。

量在傳動時常常不能令人滿意，尤其是當需要由較小的齒輪傳動旋轉運動至另外一個較大的齒輪時，當那個齒輪的直徑比小齒輪大 5 倍和 5 倍以上時就更不好了。

在這種情況下，斜齒輪就可以工作得比較均勻（圖 5 乙），斜齒輪可以很容易地想像為由很多極薄的齒輪所組成，再把這些齒輪沿着同一個方向互相轉動一下而形成的。在一對斜齒輪中，其中一個必須是右旋的，而另外一個是左旋的，兩個齒輪牙齒的螺旋角在數量上是相同的，斜齒輪工作的勻調性是由於每一個牙齒是逐漸地開始接觸和逐漸地離開的，而不像正齒輪是一下子在牙齒全部長度上嚙合，斜齒輪牙齒的一端離開的時候，可是另一端還在嚙合中，因為那一端進入作用比較遲一些——總的接觸時間因此就加長了。

斜齒輪在端面切面上有漸開綫齒形，在垂直於牙齒方向的切面上，或者也就是在所謂法向切面上，它的齒形尺寸是另外一個大小，這大小與牙齒的螺旋角有關。為了正確地切削齒輪，法向切面上的牙齒尺寸必須知道。

然而斜齒輪也有缺點，由於牙齒是斜的，在傳動圓周力的時候，就產生了一個沿着齒輪軸心方向的端向壓力，這個壓力必然地要附加在軸承上，為了去掉這個力的壞作用，就採用了人字齒輪（圖 5 丙），每一個人字齒輪就好像是由兩個牙齒方向不同的斜齒輪所組成，它們雖然產生了軸向力，但是由於方向不同，就相互平衡了，而且它們是作用於齒輪本體的內部，對於支承部分不發生影響。

圓柱齒輪不但可以在兩根平行軸之間傳動旋轉運動，而且也可以在兩根相交的軸上傳動旋轉運動，這時候就要採用螺旋齒輪了（圖 5 丁），螺旋齒輪與斜齒輪幾乎沒有分別；而它們的差別只是

一對螺旋齒輪，它們的牙齒螺旋角可以不相等，牙齒的傾斜方向不一定要正好相反。而這個條件在斜齒輪上正是必要的；也就是說，在斜齒輪上牙齒螺旋角必須相等，牙齒傾斜方向必須相反。一對嚙合的螺旋齒輪，牙齒螺旋角可以是任意的，但是它們的代數總和總是要等於兩根軸之間的角度，螺旋齒輪的牙齒側面是一點接觸，所以螺旋齒輪磨損很快，因此它在機器製造方面的應用是有限制的。有的情形是在短時間工作而長時期停止，或者當需要傳動不大的力量時才採用。

齒條嚙合是齒輪嚙合的個別情形（圖 5 戊），齒條可以看做是一個齒數無窮大的齒輪。

隨着齒數增加，齒輪直徑也就增大，而曲率度減小了，齒輪也就漸漸變直而成齒條，這時牙齒齒形也在逐漸變直。在漸開綫齒形中，齒條的齒形是一個直邊梯形。

三 在漸開綫嚙合中牙齒 齒形是怎樣構成的

前面說過，早先是利用光滑的圓柱滾筒來傳動旋轉運動的，當一個滾筒和另外一個滾筒在不滑動的狀況下滾動時，傳動比就等於兩個滾筒的直徑比，換句話說，一個滾筒比另一個滾筒直徑大多少倍，那末它的轉數一定也比另外那個滾筒的轉數小同樣的倍數。

爲了消除滑動現象，在滾筒上做上牙齒，齒頂部分在滾筒圓周的外面，而齒底在滾筒圓周的裏面，滾筒的外圓直徑就加大了，要比原來的直徑加上 2 倍齒頂的高度。

這樣，光滑的圓柱滾筒就變成了齒輪，而這時齒輪的傳動比例，還是和在光滑滾筒時一樣。

任意一對齒輪我們也可以把它這樣來看，也就是說把這對齒

輪用一對圓筒來代替，這對圓筒相互滾動而不滑動，並且以齒輪同樣的轉數在轉動，所以可以說在任何一對齒輪中，我們可以找到兩個假想的圓，而且每一個圓都在本身齒輪上面，而當齒輪旋轉的時候，這兩個圓相互滾動而不滑動，齒輪上的這樣兩個假想的圓，就叫做節圓。

因此，構成齒輪的圓柱滾筒可以認為是節圓柱。

我們現在來看一下，最廣泛應用的一種嚙合——漸開綫嚙合。

什麼是漸開綫？

漸開綫是一種曲綫，它是由 A 點所畫出來的（圖 6 甲）， A 點在一條直綫上，當直綫沒有滑動地沿圓周伸直時就畫出漸開綫來，另外漸開綫也叫做圓的展開（在拉丁語言中，漸開綫這個字就是說展開，伸開的意思），假使我們看下一個簡單的畫漸開綫的方法，那末這個名詞的意義就可以瞭解了。

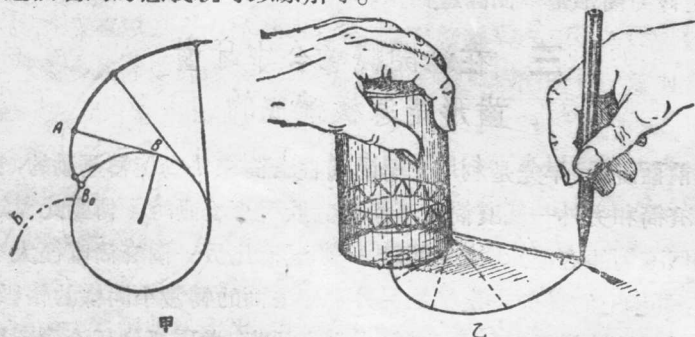


圖 6 漸開綫：

甲—漸開綫；乙—畫漸開綫的簡單方法。

請拿一個圓形的東西，例如茶杯，把它倒放在一張紙上，在茶杯上繞上一根綫，在綫的一端的綫圈中插一枝鉛筆，而綫的另一端，爲了它不發生滑動，緊緊地壓在茶杯口下面，在這個位置，把綫展開來，用鉛筆畫成了一條綫。

你在紙上得到的曲線就叫做漸開綫(圖 6 乙)。從漸開綫上一點 A 到和圓柱相切的一點 B 之間的直綫 AB 的長度, 就等於弧綫 B_0B 的長度, 因為直綫曾經緊緊地繞在圓柱上, 也就是說我們圓周的 B_0B 部分展開成了直綫 AB 。

漸開綫 B_0A 是由被展開圓周的一端所畫成的, 假使綫繞在相反的一面, 那末當展開的時候, 漸開綫的方向也就反射到對第一條漸開綫相反的一面去(在圖 6 甲中這條漸開綫用虛綫表示)。我們就是採用這種漸開綫曲綫作為牙齒的齒形的, 漸開綫 A 用來作為牙齒齒形的一邊, 漸開綫 B ——做齒形的另一邊。

從上面展出漸開綫的圓就叫做基圓, 漸開綫完全由基圓直徑所決定, 在構成漸開綫的過程中, 被展開的直綫就叫做基綫, 這條直綫和基圓相切, 並與漸開綫垂直。

主動輪傳動旋轉運動到從動輪, 是靠主動輪牙齒側面壓在從

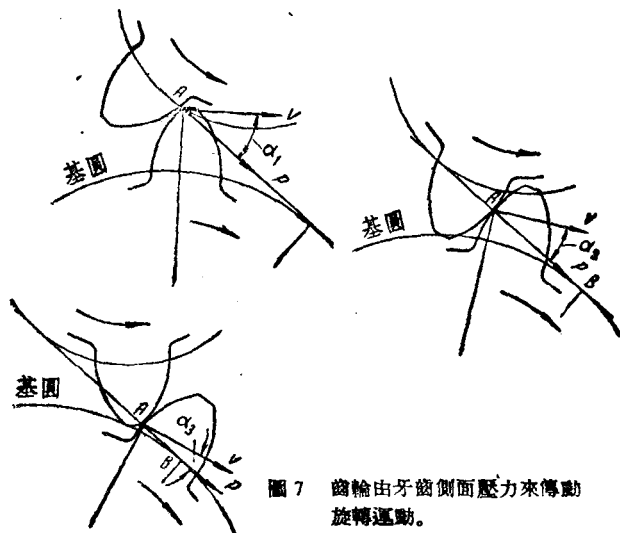


圖 7 齒輪由牙齒側面壓力來傳動旋轉運動。

動輪牙齒側面上(圖 7)。從力學中知道,壓力的傳動是垂直於表面的,那末,壓力將垂直於漸開綫,也就是說,方向是沿着基綫而與基圓相切的,由於這個力的作用牙齒就動了。然而牙齒移動的方向並不跟力的作用方向一致:力量是沿着基圓的切綫方向的,而牙齒上的各點是按照它自己的圓而旋轉的,壓力的方向 P 和牙齒上一點的移動方向 V 之間的角度就叫做壓力角 α 。在牙齒上不同的各點,它們的壓力角也是不相同的,從圖 7 中我們可以看到,在外圓處壓力角數值最大,而在底圓處則最小,在基圓處壓力角等於零,這很明顯:在基圓處力的作用方向是跟牙齒上這一點的移動方向相重合的。壓力角通常用希臘字母 α (阿爾發)來代表,並註明這個壓力角的直徑,壓力角在沿着牙齒的高度內,在相當大的範圍內變化。譬如,一個標準齒輪 $M=4$,齒數是 40,那末在節圓處壓力角 $\alpha=20^\circ$,在外圓處壓力角將是 $26^\circ 30'$,而在底圓處是 $8^\circ 26'$ 。

在節圓處的壓力角叫做傳動的嚙合角。

在漸開綫齒輪中,嚙合角和節圓一樣,只是對一對齒輪來說的。假使單獨拿一個齒輪來說是沒有嚙合角的。不過我們有時候也說到單獨一個齒輪的嚙合角,這時候,嚙合角就是指分度圓處的壓力角。

嚙合角和模數一樣,是標準化的,在蘇聯採用 20° 作為標準嚙合角,有時也可以見到採用 $14^\circ 30'$, $17^\circ 30'$, 25° 和其他角度作為嚙合角的。

嚙合角對於傳動工作有很大的意義,早先用 15° 嚙合角認為在畫牙齒時比較合適,所以曾經廣泛採用,但是在用這個嚙合角的時候,小齒輪[●]的齒數必須不少於 30,否則就會有牙齒沉割和使牙齒變為細弱的現象。而齒數多會使機械變得笨重,假使把嚙合角

● 小齒輪是指一對嚙合齒輪中齒數比較少的一個齒輪。——譯者

加大到 $20^{\circ} \sim 25^{\circ}$ ，就可能使齒輪齒數減少而不會發生牙齒沉割。

然而加大嚙合角也有它相反的一面，隨着嚙合角的加大同時就減少了工作齒數，這樣就有些不利於嚙合，這就是為什麼我們要採用 20° 角來作為標準嚙合角的緣故。

我們現在來試畫一個齒輪，我們從節圓開始畫，在嚙合齒輪中二個節圓半徑我們是知道的，就是：二個節圓半徑加起來應該等於這對齒輪的中心距離。而主動輪和從動輪的半徑大小與傳動比有關，也就是跟從動輪比主動輪旋轉得慢或者快多少倍有關，譬如從動輪的轉數比主動輪慢一半，從動輪的節圓半徑則比主動輪的節圓半徑大 1 倍。

基圓直徑 d_0 跟所採用的嚙合角 α 有關，按下面公式計算：

$$d_0 = d \cos \alpha。$$

式中 d ——節圓直徑。

知道了基圓直徑之後，我們就可以畫牙齒的一個側面齒形了。但是牙齒的另外第二面我們現在還不能畫，因為我們不知道它相對於第一面的位置和齒厚，我們不知道牙齒尺寸，但是我們現在還可以知道主動輪和從動輪的齒數，一個輪子上的齒數同時也可以說明牙齒大小的特徵，很明顯的，在同樣大小一個輪子上，小牙齒的齒數要比大牙齒的齒數來得多。譬如，主動輪有 20 齒，這時在我們的例子中從動輪比它大 1 倍，將要有 40 齒。

為了要畫出全部牙齒的齒形，必須把節圓被齒數分一下，同時通過每一個等分點畫一個牙齒齒形，用這個方法來畫齒輪。節圓就算作分度圓，我們就可以看出，節圓和分度圓只有在標準齒輪時才是重合的。

在分度圓上，兩個牙齒之間的弧綫距離，叫做分度圓節距，在標準齒輪上，分度圓上的齒厚，等於齒間槽寬度，也就是等於節距