

哈 尔 濱 工 業 大 學 講 義

金 屬 切 削 機 床 運 動 學

孫 靖 民 編

1957

金屬切削机床運動學

孫 靖 民 編

1 9 5 7

編 者: 孙 靖 民
出版者: 哈 尔 濱 工 業 大 学
印刷者: 哈 尔 濱 工 業 大 学 印 刷 厂

1957年1月出版 工本費 0.65元

前 言

本讲义系根据苏联技术科学副博士阿·尼·赫里柯夫副教授对我校机床刀具专业学生的讲课内容、参考有关文献并结合编者几年来讲授此课程的体会编写而成。

机床上各种运动的定义及各机械传动方法形成的方法只是编者的不成熟的见解。

鉴于机床运动学的基本理论方面目前参考资料较少，所以在讲义中关于这一部分叙述得较详细。具体机床的运动及传动的分析写得较简要，因为有关这方面的参考资料较多。

机床制造科学技术发展的结果，以致机械零件、液压零件和电器零件都可以用做运动的传动零件。考虑到液压传动和电力传动的原理将在机床液压传动和电力装备中讨论，所以讲义中只分析了一些用机械零件传动的机床。

传动链的传动精度是一个重要的问题，在讲义中已加以叙述，但还不够具体。

本讲义蒙章炎同志校阅，甄熙棠和張曙同志帮助整理，特此致谢。

由于编者科学水平的限制，缺点和错误在所难免，望读者指正。

編 者

1956年12月

引 言

机床設計師不僅要掌握現有的机床，更重要的是要能創設新机床。創設新机床必須以分析現有机床的傳動及構造為基礎。只有這樣，才能批判地吸取在机床制造中所積累的經驗。机床运动學給我們有关在机床上用切削方法加工時，表面的形成方法及其所需的各種运动和這些运动間的聯系與組合等机床傳動分析方面的知識，借以掌握運動複雜的机床（如齒輪加工机床等）的應用和設計。

机床运动學是一門新的科學，是「金屬切削机床」課程的一個組成部份。蘇聯在第一個五年計劃期間，需要掌握很多新式机床的使用及生產問題。由於這種需要，格、姆、戈洛溫教授首創了「机床运动學」。他在自己的著作机床运动學（Кинематика Станков. Часть I и II）中詳細地論述了机床运动學的基本理論。

戈洛溫教授的理論在當時完全滿足了掌握机床的應用的需要。目前，机床製造業的發展，對机床运动學提出了新的任務，即要通過對机床傳動及傳動精度的分析，創設新的精確度高的機構和机床，以提高產品的質量。

戈洛溫教授的基本理論是：為數極多的現有各種類型的机床僅僅是一些基本的原始機構的轉化結果。如將這些原始機構的組成件看成是刀具和工件，並分別給予運動，則即轉化成為一部机床。這種原始機構即蝸桿——蝸輪族傳動。例如車床是絲槓——螺母機構的轉化結果；齒輪加工机床是蝸桿——蝸輪機構或齒輪傳動機構的轉化結果。

根據這種說法，則現有的千百種不同類型的机床只是為數極少的幾種原始機構的不同轉化結果而已。所以只要研究由原始機構轉化成的幾種主要机床，即可掌握其餘机床。

戈洛溫教授還分析了差動換置的問題。

現在用螺絲車床來說明戈洛溫教授的基本理論。

圖 a 是一個普通螺絲車床的傳動原理圖。其換置量公式為

$$i_x = \frac{t}{t_x} = \frac{a}{b} \frac{c}{d}$$

根據 $i_x = \frac{t}{t_x}$ 選擇交換齒輪 a、b、c 和 d 的齒

數，有時不能達到所需的換置精度。此外，對於精密的螺絲或絲槓必須先淬火，然後研磨。然而在淬火

時，會產生變形誤差。為了提高加工精度，補償這類在制造過程中所產生的誤差，可以將 i_x 分解為 i_{x1} 和 i_{x2} 兩部份。如此，則換置量值的選擇範圍擴大，從而可以提高換置精度，補償變形的誤差。圖 6 所示的傳動原理圖可以滿足 $i_x = i_{x1} + i_{x2}$ 的需要。此時 $i_{x1} + i_{x2} = \frac{t}{t_x}$ 或 $t_x (i_{x1} + i_{x2}) = t$ 。這實質上就是在刀具的基本運動之外加一個附

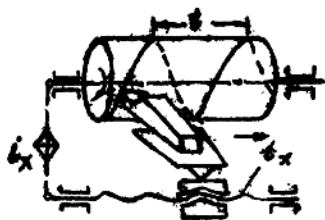


圖 a

加运动。因此，刀具的运动是一个合成运动。一个运动件同时接受来自两个运动源的运动，必须借助于运动的合成机构。这里，丝杠-螺母机构即担负运动合成的任务，而 $i_{x_1} + i_{x_2} = i_x$ 即为合成的换置量。

同理，可将 t_x 分成 t_1 和 t_2 两部份。此时

$$i_x = \frac{t}{t_x} = \frac{t}{t_1 + t_2} \quad \text{或}$$

$$i_x (t_1 + t_2) = t$$

圖 6 所示的传动原理圖可以实现这种传动。

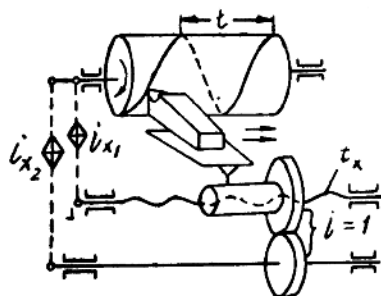


圖 6

动。

从上面的例子中可以看出，虽然每一种螺絲車床的構造都不同，但它們所完成的工作却都是一样的，都是从基本的最簡單的螺絲車床轉化出來的。此外，在第二个例子中

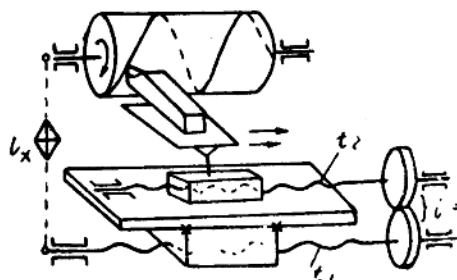


圖 7

采用了合成（差动）机构。这说明并不是不采用合成机构就不能实现加工的目的。也就是说，在床机上需要借合成机构进行差动换置的加工，可以不用合成机构的无差动换置代替。此时，传动链缩短，传动精度提高，机床的构造简化；但是换置复杂了。

目 录

引 言

第一章 机器制造中所用的表面及其形成方法

§ 1. 机器制造中所用的表面.....	1
§ 2. 表面的形成方法.....	2

第二章 机床上的運動及傳動

§ 1. 机床上的运动及其联系.....	6
§ 2. 机床上传动組的組合.....	9
§ 3. 机床传动鏈的換置及換置機構在传动鏈中的位置.....	14

第三章 圓柱齒輪加工机床的傳動分析及其換置

§ 1. 用做型法的齒輪加工机床.....	17
§ 2. 用漸切法的圓柱形齒輪加工机床.....	19

第四章 傘齒輪加工机床的傳動分析及其換置

§ 1. 用漸切法加工直齒傘齒輪的机床.....	33
§ 2. 用漸切法加工圓弧齒傘齒輪的机床.....	37
§ 3. 用漸切法加工漸開線形齒傘齒輪的机床.....	41

第五章 齒輪精加工机床的傳動分析及其換置

第六章 螺紋加工机床的傳動分析及其換置

第七章 非机械的傳動在机床上的應用

第八章 机床的傳動精度

§ 1. 传动鏈中傳动件誤差的傳遞規律.....	55
§ 2. 传动鏈的傳动誤差測量方法.....	57
§ 3. 关于提高传动鏈精度的簡單結語.....	61

第一章 机器制造中所用的 表面及形成方法

任何一部机床在用切削方法加工时，被加工的工件与切削刀具之间必须有相对运动。例如，车外圆（图 1）时须有被加工工件与刀具之间的相对回转 B 和移动 Π 。此

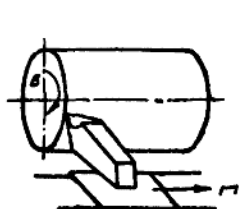


图 1

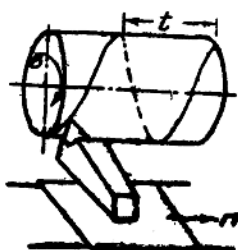


图 2

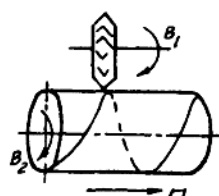


图 3

时，两个运动可以各有自己的速度，相互间没有限制。因此两者各为简单的运动。

图 2 为车螺纹表面之例。此时两个运动相互有限制，运动必须要能满足工件 1 转车刀移动 t 公厘的要求。因此，两者组成一个复合的运动。

图 3 为用螺纹铣刀铣切螺纹表面之例。此时，共有两个运动；一个是铣刀的回转 B_1 ，为简单的运动；而工件的回转 B_2 和移动 Π 为另一个复合的运动。

运动可以只加于刀具或工件，也可以同时加于刀具和工件二者。

在机床上用切削方法加工时，所需运动的类型、性质及数量因表面的形成方法而不同。

§ 1. 机器制造中所用的表面

机器制造中常遇到的用切削方法形成的表面是在机床上制造时既经济而又能获得所需精度的表面，这些表面可概括为三类。

1. 回转体表面

1) 发生线（或称母线）为直线，发生线的运动轨迹（或称准线）为圆（如图 4），或相反的情形；

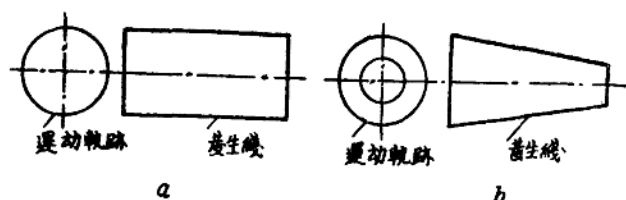


图 4

2) 發生線為特形線，其運動軌跡為圓或螺旋線（如螺紋表面），此時發生線對於回轉軸線有均勻的相對運動，如圖 5。



圖 5

2. 縱向表面

1) 發生線及其運動軌跡皆為直線。

2) 發生線為特形線，其運動軌跡為直線或相反的情形（如圖 6）。



圖 6

3. 特形表面——發生線及其運動軌跡可為任意形狀。如汽車的外殼、各種沖模等。在機床上加工這類表面時需要複雜的運動，故多用模板。

在機器製造中很多零件的表面是由局部表面（它可以是回轉體表面也可以是縱向表面）所組成。例如齒輪、齒條、花鍵及多線螺紋表面等都是。

上述表面可為封閉的和不可封閉的；可逆的和不可逆的；包容的和被包容的。

發生線或其運動軌跡若為封閉曲線則為封閉表面，否則為不可封閉表面。

發生線與其運動軌跡可以互換的表面稱可逆的表面，否則即為不可逆的表面。因此，圓柱形為可逆的表面，而圓錐形為不可逆的表面。

內孔及沖模為包容表面，外表面及沖頭為被包容表面。

§ 2. 表面的形成方法

在金屬的切削加工中，所用刀具的刀刃有三種輪廓形狀。

1. 刀刃形狀與表面發生線的形狀和長短完全相吻合（如圖 7 (a)），模數銑刀、成形車刀等都屬於此類；

2. 刀刃為不與表面發生線的形狀和長短相吻合的線段（如圖 7



圖 7

(6)为直线)，齒輪插刀、滾刀等属于此类；

3. 刀刃为一个切削点（实际上是很短的切削線——如圖 7 (B)）。

在金屬的切削加工中，当刀刃的輪廓形状与表面發生線的形狀和長短完全相吻合时，發生線运动軌跡的形成方法有三种。

1. 漸切法——如圖 8 發生線（或表面）沿其运动軌跡滾動（无相对滑动），發生線（表面）在滾動过程中的一系列几何位置的展成線即形成軌跡線（面）。

用这种方法加工时，刀具与工件之間必須有一个复合的运动，即漸切运动。

2. 軌跡法——如圖 9。軌跡面为發生線的运动軌跡。

用这种方法加工时，只需一个运动；可以是簡單的也可以是复合的（視軌跡面或軌跡線的形狀而定）。

3. 相切法——如圖 10。軌跡面为一系列的輔助面的切面，而此輔助面为發生線的回轉所形成。

用这种方法加工时，需要两个运动。其中一个为簡單运动，用于形成輔助面；另一个可以是簡單的，也可以是复合的（視軌跡面的形狀而定）。

表面發生線的形成方法有四种。

1. 做型法——刀刃的輪廓形状与表面發生線的形狀及長短完全吻合。顯然，此时不需要运动。

2. 漸切法——当刀刃的輪廓形状为不与表面發生線的形狀和長短相吻合的線段时，發生線須借漸切的运动形成（如圖 11 (6) 和 (r)）。

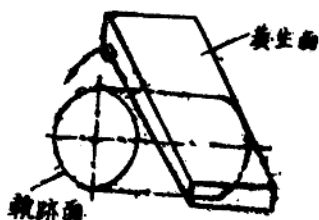


圖 8

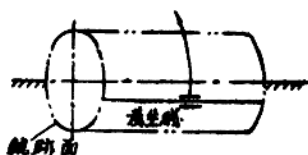


圖 9

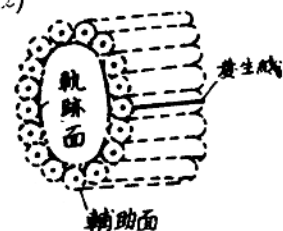
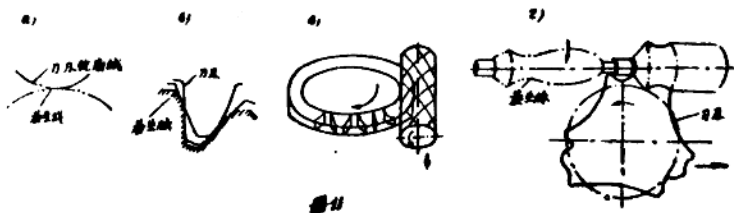


圖 10



3. 軌跡法——当刀刃为切削点时，發生線为刀刃沿發生線运动的軌跡（如圖 12）。

4. 相切法——發生線为回轉的刀刃所形成一系列的輔助線的切線（如圖 13）。

表面是發生線沿其运动軌跡的运动所形成。当刀具不回轉（可以是往復的移动）时，刀刃沿着發生線运动軌跡的运动速度为切削速度；当刀具为回轉运动时，则为進給速度。当發生線过長和过于复雜因而刀刃过長和过于复雜时，可用窄的，簡單的刀刃（或尖刀

刃)。此时，在切削过程中必须有形成發生線的运动（進給运动）。所以，表面的形成方法可以看成是被加工表面的發生線及其运动軌跡的形成方法的組合。因此，当已知被

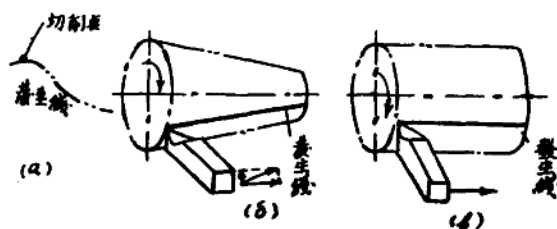


圖 12

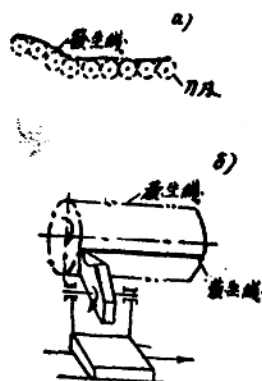


圖 13

形成的表面形狀、刀刃的輪廓形狀及發生線與其运动軌跡的形成方法以后，即可決定加工时所須的运动数量及其性質。

表 1 为在現有各种类型机床上加工时表面發生線及其运动軌跡的形成方法。

第二章 机床上的运动及传动

§ 1. 机床上运动及其联系

在机床上用切削方法进行加工时，必须有形成表面发生线及其运动轨迹的运动。这是任何一部金属切削机床上都不可缺少的运动。这种运动称为表面形成运动。以如图14 (a) 和 (b) 的车外圆为例，可知 B 及 B 和 Π 为表面形成运动。此时 B 和 Π 皆可

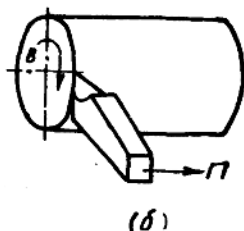
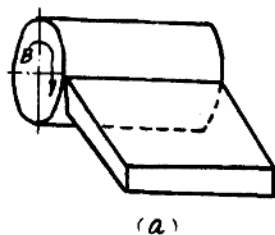


圖 14

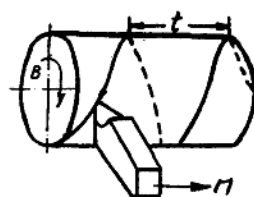


圖 15

有自己的运动速度，相互之间无限制，因此为简单的表面形成运动。

图 15 为用成形车刀切螺纹。为了保证工件 1 转车刀移动 t 公厘，则 B 和 Π 必须是一个复合的表面形成运动，由 B 和 Π 两个简单运动所组成。

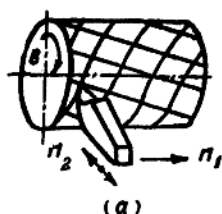
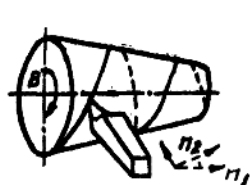


圖 16

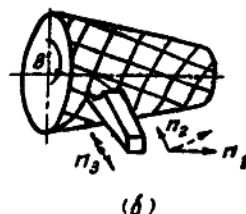


圖 17

同理，图 16 的车锥面螺纹是由三个简单运动所组成的复合表面形成运动；图 17 (a) 和 (b) 的圆锥柱形及圆锥形滚刀齿背时的表面形成运动是由三个及四个简单运动所组成的复合表面形成运动。

所以，表面形成运动是形成表面的发生线及其运动轨迹的刀具与工件的运动。它可以是简单的回转或直线往复运动，也可以是由 2—4 个简单运动所组成的复合运动。表面形成运动是任何机床上都不可缺少的运动。从表 1 可知，表面的形成是依靠 1—3 个表面形成运动实现的。表面形成运动可以是切削速度的运动，也可以是进给运动。当加工时只有两个表面形成运动时，其中一个为切削速度的运动，另一个为进给运动；当有三个表面形成运动时，则其中的两个为进给运动，另一个为切削速度的运动；当只有一个表面形成运动时，则没有进给运动。

一般的情形下，單借表面形成運動只能使被加工表面獲得一個輪廓形狀(如圖18)。必須反復將刀具退出(運動B)返回(運動Γ)切入(運動Δ)並重復其表面形成運動(A和B)直至獲得所須的精確尺寸為止。

運動B和Γ為反復進行表面形成運動創造了條件，這類運動稱為輔助運動。

運動Δ保證被加工表面獲得所須的尺寸，這類運動稱為切入運動。圖19(a)、(б)和(в)中的Δ也都是切入運動。切入運動通常

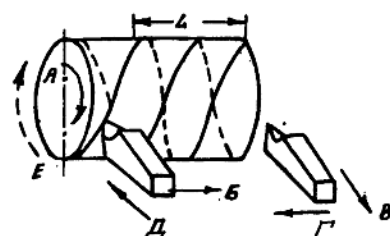


圖18

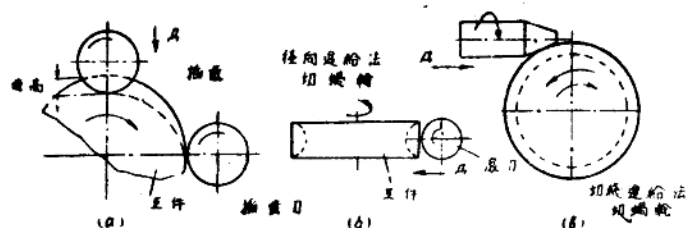


圖 19

都是簡單的運動。

並不是在所有的情況下都須要有輔助運動和切入運動。由於加工方法或刀具的構造原因，這兩種運動可以包含在表面形成運動中，如拉削就是一種。

加工由局部表面所組成的零件表面時，須要有分度運動。用齒輪插刀、齒條刀及滾刀加工齒輪時，分度運動是包含在表面形成運動中的(此時系連續分度)。當用模數銑刀銑齒輪時，則需要單獨的週期分度運動。如圖18的切多頭螺紋時，當切好一個螺紋表面後，須要使工件回轉 $\frac{360}{Z}$ 的角度或車刀移動 $\frac{L}{Z}$ 的距離(Z為螺紋的頭數，L為導程)，再進行下一螺紋表面的切削。此時須要單獨的週期分度運動E。

分度運動可以用手搖(如圖20(a)和(б))，也可以是機動的(如圖20(в)和(г))。

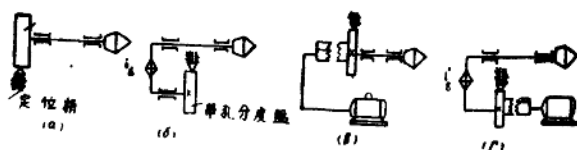


圖 20

所以，分度運動是當加工由局部表面所組成的表面時，使表面形成運動得以週期地連續進行的運動。它可以是獨立的運動，也可以包含在表面形成運動中；可以是回轉的，也可以是直線的；可以是簡單的，也可以是複合的。

分度运动可以因所用的刀具構造特殊而改變性質或甚至被取消，后者如用拉刀拉花鍵孔。

在机床上，还有控制运动（如接通或断开某个傳动鏈、改變运动的方向及速度等的运动）。控制运动通常是簡單的回轉或往复运动。普通机床的控制运动多为手动；而自动及半自动机床的控制运动则为机动。

在磨床上須要有校正砂輪的校正运动，这是獲得刀具輪廓形狀的表面形成运动。因此，在磨床上有兩組表面形成运动。一組用于獲得工件表面形狀；一組用于獲得刀具形狀。校正运动可以是手动的，也可以是机动的。

綜上所述，可知在金屬切削机床上用切削方法加工时，可能有下列六种运动。即表面形成运动，分度运动，切入运动，控制运动，輔助运动及校正运动；而最基本的、任何切削加工方法中都不可缺少的是表面形成运动。分度运动也是形成表面过程中的主要运动，但只有当被加工表面是由局部表面所組成时才是必需的。

在机床上为了实现上述各种运动，都有將运动自运动源傳送到机床工作部件上去的傳动鏈，这种傳动鏈称为外联系傳动鏈。

簡單的及复合的运动都需要有保証各有关工作部件运动規律的內联系傳动鏈。当簡單运动时，內联系傳动鏈通常是一对实现回轉或往复运动的傳动副，如主軸及其軸承、刀架及其溜板導軌等。

外联系傳动鏈和內联系傳动鏈組成傳动組。通过傳动組可以根据已定規律实现工件与刀具間的相对运动。

机床上加工时需要多少个运动就有多少个傳动組。全部傳动組組成整个机床的傳动。

顯然，机床的傳动組数愈少，傳动組中的組成傳动鏈愈少，机床的傳动愈簡單，構造愈簡單。

从表1可知，同一种表面可以用不同的表面形成方法。选择何种方法决定于表面的形狀、切削的动力条件、所須的表面質量（光潔度及精確度）及其他的工藝的和經濟的因素。任何一个因素在不同的情况下都可能成为决定性的因素。但是，不管怎样，最好是选择表面形成运动数量最少的一种。因为表面形成运动的数量对机床的生產率及構造影響很大。

若不考慮一些工藝上的因素（如光潔度及几何精度等），則用刀刃輪廓形狀与被加工表面的形狀和長短完全吻合的刀具（做形刀具）加工时，生產率最高。此时所須运动的數量最少。因此，当刀刃較短，同时又能獲得足够的几何精度及光潔度时，則用做型刀具加工可獲得最高的生產率。由于刀具材料的改進，使刀具的抗磨、抗振能力提高，这就为采用高生產率的加工方法創造了条件。

为了便于研究机床的傳动，用簡單的傳动原理圖代表复雜的傳动圖。此时，机床的各运动件（工作部件）（如主軸、刀架、电动机等）用簡圖表示；各运动間的傳动联系用虛線連接。例如圖21(a)表示加工螺紋表面时的一个外联系的傳动鏈，表示运动由电动机傳送到主軸，使其獲得回轉运动B。圖21(b)表示加工螺紋表面时的內联系傳动鏈。圖21(c)則表示加工螺紋表面时的傳动組。

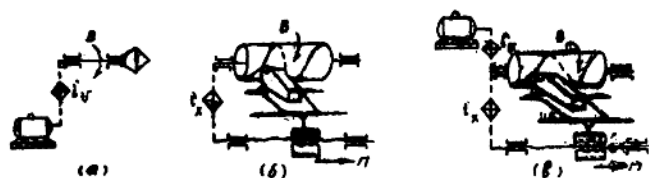


圖 21

因为在同一部机床上要有不同材料、尺寸和构造的刀具加工不同材料和尺寸的工件，所以决定运动的因素必须改变。图 21 中的方框即表示改变运动因素的换置机构，其旁的 l_v 、 l_x 等表示换置量。

运动有五个因素，即运动的起点、运动的方向、运动的轨迹、运动的速度及运动的路程。有时这五种因素都要改变。

运动轨迹的换置机构通常在内部联系传动链中（如图 21 (b) 和 (c) 中的 l_x ）。

运动的速度、方向及路程的换置机构在外联系传动链中。图 22 为直齿伞齿轮机床的传动原理图，其中的 l_v 和 l_s 为速度换置量，为 l_o 路程换置量。三者皆在外联系传动链中。

有时路程换置机构在控制运动传动组中。

运动起点的换置机构可以在外联系传动链中，也可以是一个在传动链之外的简单机构。

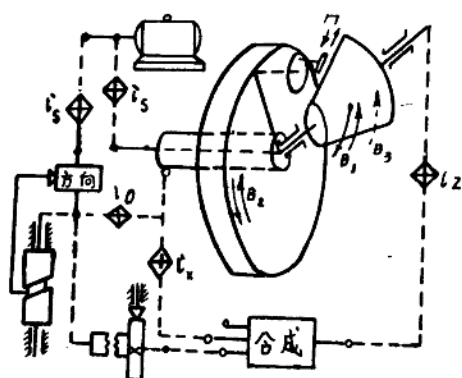


圖 22

§ 2. 机床上传动组的组合

机床的传动原理图系由传动组所组成。有表面形成运动传动组，分度运动传动组，切入运动传动组，控制运动传动组，辅助运动传动组及校正运动传动组。表面形成运动传动组是机床传动原理图的基本部份。

根据表面形成运动传动组的组合方式，现有机床可以分为三大类：

1. 只有简单的表面形成运动传动组的机床；
2. 只有复合的表面形成运动传动组的机床；
3. 既有简单的又有复合的表面形成运动传动组的机床。

图 23 (a)、(b) 和 (c) 为只有简单表面形成运动传动组的机床传动原理图。

各传动组中只有一个单独的运动件（一个传动链），传动链的内部联系是一对传动副所组成的简单的机械联系，借以实现回传及往复运动。

只有复合的表面形成运动的机床其传动组有两种组合方式。

第一种组合方式中，机床的任何一个运动件（如主轴、刀架等）只属于一个复合

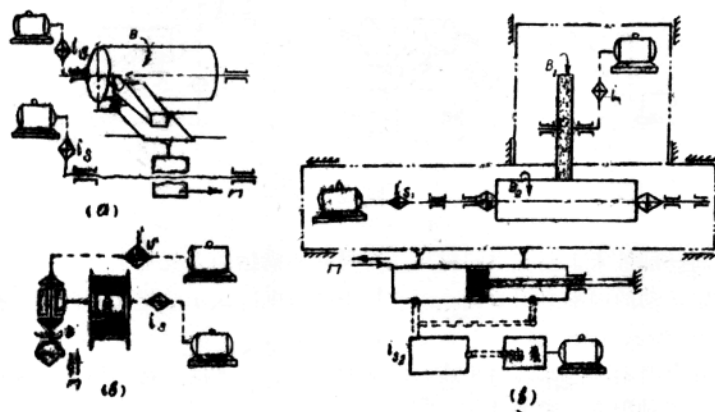


圖 23

的表面形成运动。

圖 21 (B) 及圖 24 (a) 和 (b) 为只有一个复合的表面形成运动传动組的机床的例子。

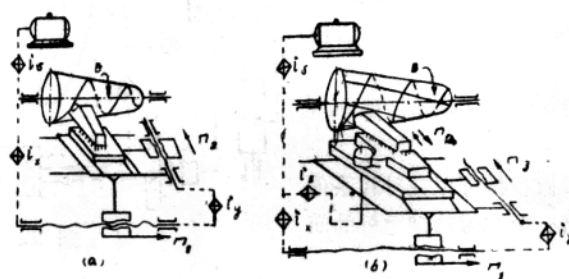


圖 24

圖 25 为有两个复合的表面形成运动 (B 和 Π_1 及 Π_2 和 Π_3) 传动組的机床的例子。

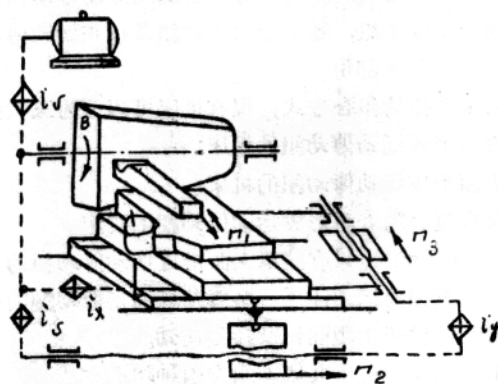


圖 25