

# 機 械 原 理

上 册

清华大学机械原理与另件教研組

1959.9.

# 機 械 原 理

## 目 錄

### 第一章 緒 論

§1-1. 機械原理課程的任務及其在國民經濟建設中的作用.....	1
§1-2. 本課程的發展簡史.....	1
§1-3. 本課程在教學計劃中的地位.....	2
§1-4. 本課程的學習方法.....	2
§1-5. 常用機構簡介.....	2

### 第二章 機構的組成及分類

§2-1. 研究機構組成及分類的目的.....	7
§2-2. 元件和構件.....	7
§2-3. 運動副及其分類.....	7
§2-4. 運動鏈。機構.....	11
§2-5. 運動鏈和機構的一般組成公式和分類.....	11
§2-6. 消極約束和多余自由度.....	13
* §2-7. 組及機構形成的原理.....	13
* §2-8. 以低副運動鏈來替代三族平面機構中的高副.....	16
* §2-9. 進行低副平面機構結構分析的規則.....	17
* §2-10. 例題.....	18

### 第三章 平面連桿機構的運動分析

§3-1. 平面連桿機構的運動分析.....	24
§3-2. 機構運動分析的目的.....	24
§3-3. 用瞬時中心法求平面機構各點的速度.....	24
§3-4. 用相對速度法求平面機構各點的速度.....	28
§3-5. 平面機構上各點加速度的分析.....	31
§3-6. 法向加速度的幾何圖介.....	36
* §3-7. 三級平面機構的運動分析.....	37
§3-8. 低副機構的分析運動學.....	39

§3-9 例題	42
---------	----

### 第四章 機構中的摩擦

§4-1. 作用于機構中的力	49
§4-2. 摩擦現象和乾摩擦定律	49
§4-3. 平面滑動摩擦	51
§4-4. 斜面滑動摩擦	52
§4-5. 效率和自鎖	55
§4-6. 楔形滑塊的摩擦	56
§4-7. 方紋螺旋和三角螺旋的摩擦	57
§4-8. 新止推軸承的摩擦	61
§4-9. 跑合止推軸承的摩擦	62
§4-10. 有間隙的徑向軸承的摩擦	64
§4-11. 無間隙新徑向軸承的摩擦	65
§4-12. 無間隙跑合徑向軸承的摩擦	66
§4-13. 柔韌體的摩擦	67
* §4-14. 滾動摩擦概述	69
* §4-15. 例題	71

### 第五章 平面機構動態靜力學

§5-1. 研究動態靜力學的目的	85
§5-2. 構件慣性力的決定	85
§5-3. 構件的質量替代	89
§5-4. 機構中平衡力的確定	92
* §5-5. 力多邊形法求平衡力	92
* §5-6. 絛索多邊形法	94
§5-7. 虛位移原理及茹科夫斯基槓桿法	95
* §5-8. 考慮摩擦力時機構中平衡力的確定	100
* §5-9. 例題	102

### 第六章 平面連桿機構的設計

§6-1. 連桿機構的應用及其設計的基本問題	107
§6-2. 鉸鏈四桿機構及其演化	110
§6-3. 機構中構件的迴轉條件	113
§6-4. 根據構件上M點的運動軌跡設計機構	114
§6-5. 根據構件的幾何位置設計機構	115

## 第七章 齒輪機構及其設計

§7-1. 緒言	125
<b>第一部份 平面齒輪機構</b>	
§7-2. 齒輪各部名稱及尺寸	125
§7-3. 輪齒定律	128
§7-4. 漸開綫性質及其函數	129
§7-5. 漸開綫齒廓符合于輪齒定律。 漸開綫齒輪的可分離性	131
§7-6. 漸開綫齒輪的正確嚙合條件	132
§7-7. 齒側間隙	134
* §7-8. 任意半徑上的齒厚	135
§7-9. 標準齒輪的正確安裝與分離後的結果	136
§7-10. 標準漸開綫齒輪画法	139
§7-11. 齒輪傳動的質量指標之一——重迭系數	144
§7-12. 齒輪傳動的質量指標之二——齒面滑動係數	148
§7-13. 齒輪傳動的質量指標之三——幾何壓力係數	153
* §7-14. 各種參數對質量指標的影響	156
§7-15. 齒輪製造方法概述	159
§7-16. 輪齒的根切	162
§7-17. 不產生根切時標準齒輪的最小齒數 $Z_{min}$	163
§7-18. 齒輪修正的目的	164
§7-19. 最小移距係數及修正後的齒輪尺寸	164
§7-20. 無齒側間隙嚙合方程式	166
§7-21. 齒輪傳動的類型	168
§7-22. B類正傳動（不等移距修正）	168
§7-23. *類負傳動（不等移距修正）	172
§7-24. B類零傳動	173
§7-25. A類零傳動	174
§7-26. 已知中心距的齒輪傳動設計	175
§7-27. 各種傳動類型的優缺點	177
§7-28. 傳動類型及移距係數的選擇	179
§7-29. 擺齒輪齒的形成	183
§7-30. 擺齒輪的螺旋角，模數，周節和壓力角	184
§7-31. 擺齒輪各部尺寸計算	186

§7-32. 扭齒輪的重迭係數.....	188
§7-33. 扭齒輪的當量齒數 (選刀齒數) .....	189
§7-34. 螺旋角的选择.....	190
§7-35. 扭齒輪与正齒輪的比較.....	191
* §7-36. 摆綫及摆綫齒輪.....	192
* §7-37. 摆綫齒輪的优缺点 (与漸开綫齒輪相比較) .....	194
* §7-38. 例題.....	195

### 第二部份 空間齒輪機構

§7-39. 螺旋齒輪傳动的分析.....	200
§7-40. 螺旋齒輪傳动的計算.....	201
§7-41. 螺旋齒輪的优缺点.....	201
* §7-42. 蝸輪蝸桿机构的形成与蝸桿曲綫.....	202
* §7-43. 蝸輪蝸桿机构的轉速比.....	204
* §7-44. 蝸輪蝸桿机构的优缺点.....	205
§7-45. 錐体齒輪的轉速比.....	206
§7-46. 錐体齒輪各部名称及尺寸.....	206
§7-47. 錐体齒輪的球面漸开綫.....	208
§7-48. 背錐及當量齒數.....	209
§7-49. 錐体齒輪的范成和修正.....	211

## 第八章 輪系的速比、效率与齒數分配

§8-1. 輪系的功用及其分类.....	213
§8-2. 普通輪系的轉速比.....	214
§8-3. 周轉輪系的应用及其轉速比.....	216
§8-4. 普通輪系效率.....	220
* §8-5. 行星輪系的效率.....	222
* §8-6. 行星輪系中各輪齒數的分配.....	227
* §8-7. 例題.....	233

## 第九章 凸輪機構及其設計

§9-1. 凸輪机构概述.....	243
§9-2. 凸輪机构的类型.....	244
§9-3. 从动桿的运动規律与凸輪曲綫. 轉化运动法.....	247
* §9-4. 定径凸輪. 定宽凸輪. 主回凸輪.....	251
§9-5. 从动桿运动曲綫的图介微分与图介积分.....	252

§ 9—6. 凸輪机构中作用力与最大压力角的选择	256
§ 9—7. 从动桿常用运动規律的选择	260
§ 9—8. 尖頂从动桿平板凸輪	260
§ 9—9. 平板凸輪的最小尺寸	266
§ 9—10. 滾子从动桿之平板凸輪	271
§ 9—11. 滾子从动桿的单园弧凸輪。园弧凸輪近似替代假拋物綫等加速凸輪的理論基础	272
§ 9—12. 滾子从动桿等加速度的四园弧凸輪	274
§ 9—13. 平底从动桿的单园弧凸輪	279
§ 9—14. 平底从动桿近似等加速度的四园弧凸輪	281

## 第十章 特种机构簡介

§ 10—1. 万向联轴节的轉速比	286
§ 10—2. 多万向节的等速传动	291
* § 10—3. 等速万向联轴节	295
* § 10—4. 馬尔他十字机构	299

## 第十一章 机械的运转和調速

§ 11—1. 研研机械运转和調速的目的	301
§ 11—2. 机械的运动和运动方程式	301
§ 11—3. 等效力和等效力矩	303
§ 11—4. 等效質量和等效轉动慣量	305
§ 11—5. 在已知力作用下机械組合的运动	308
§ 11—6. 机械运转的不均匀性及其調节	312
§ 11—7. 机械运转的平均速度和不均匀系数	313
§ 11—8. 飞輪設計的基本問題	315
§ 11—9. 飞輪轉动慣量的近似求法	318
§ 11—10. 依綫图 $E = E(J_n)$ 决定飞輪的轉动慣量。維謙巴威尔 (Виттенбауэр) 法	319
§ 11—11. 依綫图 $E_m = E_m(\Phi)$ 决定飞輪的轉动慣量——密尔查洛夫及古奇亚 (Мерцалов—Гутьяр) 法	320
§ 11—12. 飞輪各部尺寸的确定	323
§ 11—13. 調速器概述	326
§ 11—14. 离心調速器的动态靜力学	327
* § 11—15. 調速器的穩定性和灵敏度	329

## 第十二章 機械的平衡

§12-1. 機械平衡的目的.....	332
§12-2. 同一平面內迴轉質量的平衡.....	333
§12-3. 靜平衡試驗法.....	335
§12-4. 平行平面內迴轉質量的平衡.....	336
* §12-5. 動平衡機.....	340
* §12-6. 往復質量平衡的概念.....	343

## 第一章 緒 論

### § 1-1. 机械原理課程的任务及其在國民經濟建設中的作用

本課程是在数学、力学的基础之上,对机械的构造、机械的运动与机械的受力等进行研究的課程。所謂『机械』是指各构件有确定的运动,並在运动过程中可以轉变能量的形式,或对人們作有用功的一种組合物。随着工业与机械制造业的发展,今天的机械形式是数不胜数,要想对所有机械逐一进行研究是不可能的。因此我們把組成机械的各个有确定运动的构件的組合由机械中分析出来,而对这些組合进行研究。这些构件的組合称为『机构』。机构的定义为具有一个固定桿件,並有确定运动的构件組合称为机构。机械原理这一課程的任务就是研究組成机械的这些机构的受力、运动、設計及机械动力学等問題。

作为一个机械工程师來說,應該在生产崗位上能够充分地熟悉、运用与改进复杂机械設備的能力。这个要求当然还需要具备很多的专业知識才能达到,而本課程的內容在很多方面則是給专业課作基础的。但是也有一部分的内容是可以直接为生产服务的,例如凸輪,飞輪等部分的内容就是这样。

现代工业生产的主要特点,乃是以高度机械化的生产方式来代替一切落后的生产方式,以大量的机械来代替繁重的人的劳动。換句話說,机械在人类的生活里,日益佔着更重要的位置。今天在我們的国家里,在社会主义的原則下,是鼓励人們的每一个足以改进生产提高产量的創造。因此,在我們面前就展开了一条研究机械、創造机械与改进机械的广闊前途。

要使国家繁荣富强,有巩固的国防以保衛祖国的安全和世界的和平,有充足的产品来不断提高人民的生活水平,就必需大量採用各种机械,努力提高生产能力,因此,发展机械工业,提高工业机械化的程度,使大量的机械为各种工业服务,乃是我国当前的重要任务。大量机械被广泛地应用于各种工业的这一工作,无疑地将有极为广闊的前途。

机械原理是有关机械的最基本而又极重要的一門課程。学好这門課程,将为国家經濟建設發揮更大的作用,这就是我們今天应有的認識。

### § 1-2. 本課程的發展簡史

目前机械原理所研究的内容的一部分,在十九世紀末和二十世紀初叶是包括于力学中的。随着二十世紀工业的飞跃发展,对机械中的运动学与动力学提出了更多的要求,因而更名为应用力学,并进而脫离力学而成为一門独立的基礎技术課,称之为机械与机构原理,或简称为机械原理,以有别于探討一般原理的理論力学。

我国古代在机械原理方面的貢獻是很巨大的,諸如記里車、司南車等都是較复杂的齿



輪組合。這些史實散見於各種文獻中。劉仙洲先生即著在這些史料的整理方面作了重要的貢獻。所可惜的是由於中國長期封建制度歧視技術的結果，使得我們這樣一個具有悠久歷史和文化的民族貢獻，未能進一步地發展起來。繼續發揚光大日有的，創造新穎的機械的這一光榮使命就落在今天解放了的人民的肩上。

機械原理這一課程的急劇發展，是與俄國和蘇聯學者的研究分不開的。例如在機械動力學方面有俄羅斯航空之父——茹柯夫斯基（Н. Е. Жуковский, 1847—1921）的簡化動力分析法的卓越貢獻，使得機械動力學的研究大大地向前發展了一步；阿蘇爾（Л. В. Ассур, 1878—1920）在機構的分類方面得到了科學的結果，使得在創造機構、分析機構的運動與受力等方面有合理的途徑可循。

### § 1—3. 本課程在教學計劃中的地位

本課程是學生在大學里首先接觸到的涉及工程技術的課程。它是建立在數學、物理和力學基礎之上，所以必需在修完上述課程之後來學習它。但是並非理論力學的延續，而是把理論力學中的一些內容具體地應用到機械中去。另一方面，這門課也是為後續課程作基礎，例如機器零件，夾具、刀具等，以及其他有關機械的專業課，例如機床設計、農業機械、拖拉機底盤設計、發動機設計等。所以在教學計劃中是處於承先啟後的地位。這門課程學得好，對於後續課程的學習則將會得到很多的益處。

### § 1—4. 本課程的學習方法

這是一門技術基礎課，其研究的對象為各種實用的機械與機構，隨著各種機構基本性質的不同，我們應該用各種不同的方法進行研究。在理論力學課程中我們可以把運動學，動力學等由幾個定理幾個普通公式概括起來；而在機械原理課程中正因為它所研究的對象是多樣性的，所以不可能如理論力學一樣把所有內容歸納成幾個簡單定理和公式，而是針對每種機構的特性進行研究的。

此外，由於它是一門有關技術的課程，所以應該更多地從實際的角度着眼，而不能陷於『理論』的牛角尖里去。每一個公式，每一個定理都是有其實際上所必需的前提和假設，在學習的時候就應該很好地注意、領會和掌握這些前提和假設。對於每一個結論、每一個公式都要知道它的實際應用的條件和範圍。

由於很重視實際的問題，所以在這門課中大量地採用實際工程中所常用的圖解法。圖解法的優點是明晰、簡捷；但是另一方面，它的缺點是不如數學分析法精確。但在一般來說，工程中通常並不需要極精確的結果，因為過於精確的結果一般並沒有什麼實用的價值，所以我們要通过這門課來使我們掌握實用的圖解法。

### § 1—5. 常用機構的簡介

目前在機械中常常採用的機構可分為六大類。

(I) 連桿機構：在近代的機械中廣泛地採用連桿機構。所謂連桿機構，就是一些桿子藉鉸鏈等連接而成的機構。最簡單的連桿機構為兩桿機構，如圖 1—1 所示。構件①為固定桿，②繞桿①桿作轉動。電動機的轉子與機身是這種機構的變形。

較复杂的連桿机构为四桿机构，如图 1—2 所示，图中①为固定桿，②，③，④为活动桿。其中②桿作整周轉动，称为曲柄，③桿作摆动运动称为搖桿，④桿連曲柄和搖桿，称为連桿。大多数的連桿是作复杂运动的。

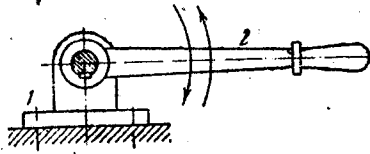


图 1—1

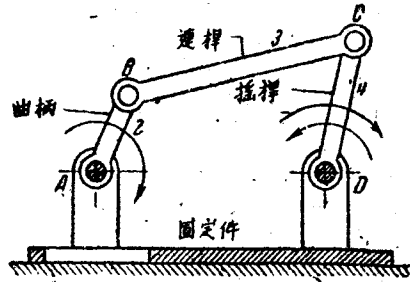


图 1—2

图 1—2 中的三个运动桿都是在平行于紙面的平面内运动，称为平面四桿机构。图 1—3 所示的机构则称为球面四桿机构。

此外，常用的变化后的四桿机构为曲柄滑块机构（也称为曲柄連桿机构），如图 1—4 所示。

图 1—5 所示机构则称为导轨机构或导桿机构。

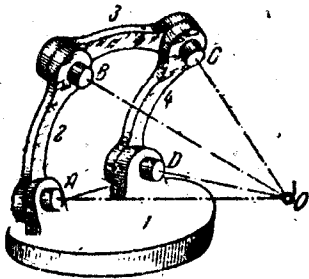


图 1—3

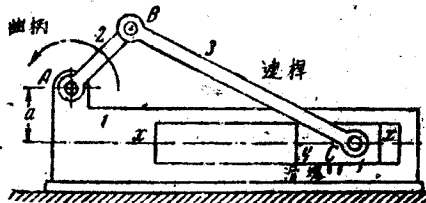


图 1—4

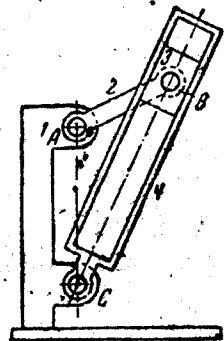


图 1—5

(2) 凸輪机构：由已知运动规律的物体，藉其表面的特殊曲綫来获得另一构件的指定往复运动，这种机构称为凸輪机构，而具有特殊曲綫的物体则称之为凸輪，随之而动的构件称为从动桿。图 1—6 所示为平面凸輪，图 1—7 所示为空間凸輪。

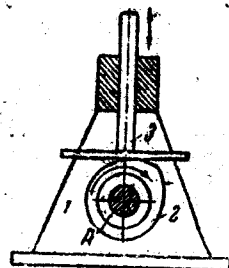
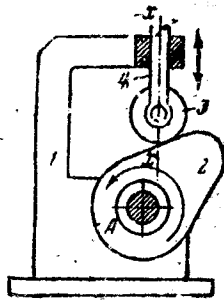
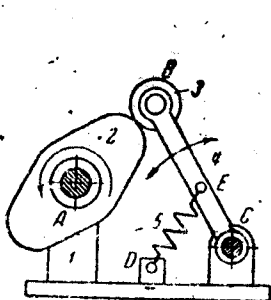


图 1—6

在近代自动化的机械中，大量的采用凸輪以达到从动桿某种特殊的运动，最为經濟和简单。

(3) 摩擦輪机构：藉着两接触点表面足够的摩擦力来传达运动的机构称为摩擦机构，如图 1—8 所示。

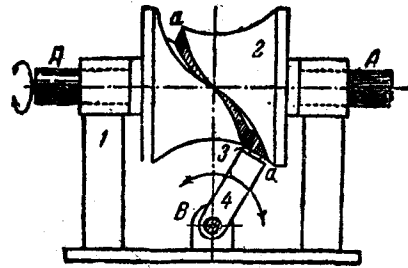


图 1-7

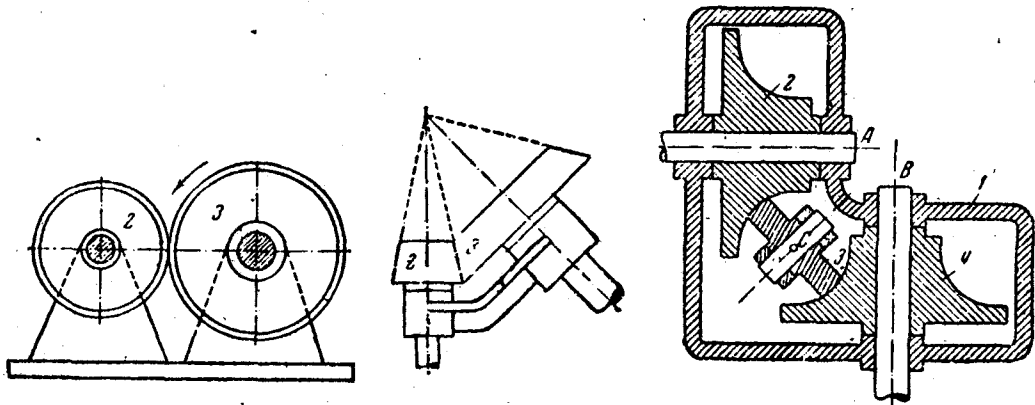


图 1-8

(4) 齿輪机构：为了防止摩擦机构中由于摩擦不足或負荷較大时发生滑动现象，可在摩擦体表面以刻成凸凹的部分，使其互相咬合而传动，是为齿輪机构。在絕大多数的机械中均需应用齿輪，所以是我們将着重討論的机构之一。图 1—9 所示为平面齿輪机构。图 1—10 则为錐体齿輪机构。当平面齿輪的半径增加至无限大时，則成为齿条，如图 1—11 所示。

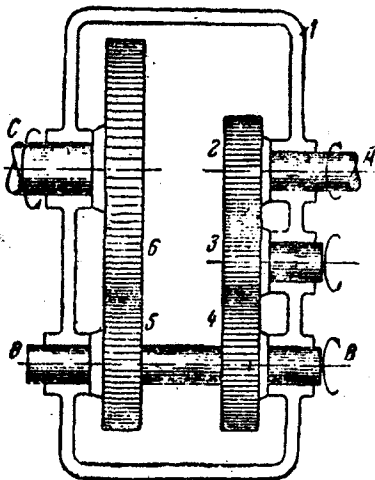


图 1-2

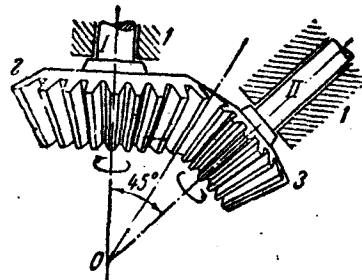


图 1-10

图 1—12 所示者为内齿輪机构。图 1—13 所示为传达不平行不相交轴运动的螺旋齿輪机构。图 1—14 所示则为蜗桿机构，它可以传达很大的轉速比。

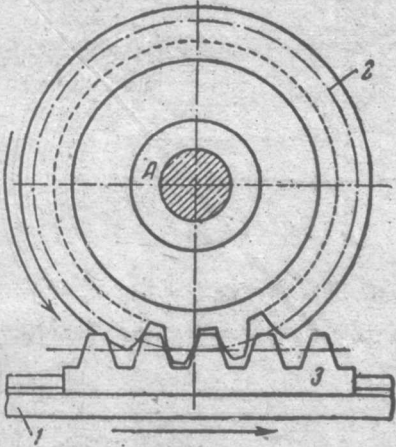


图 1—11

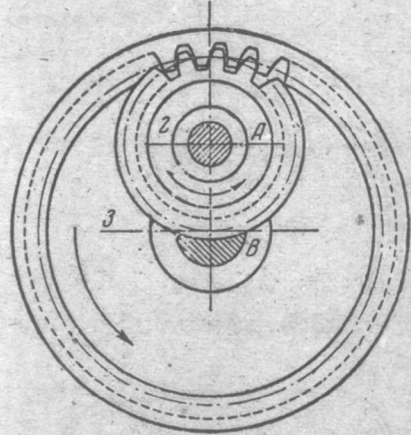


图 1—12

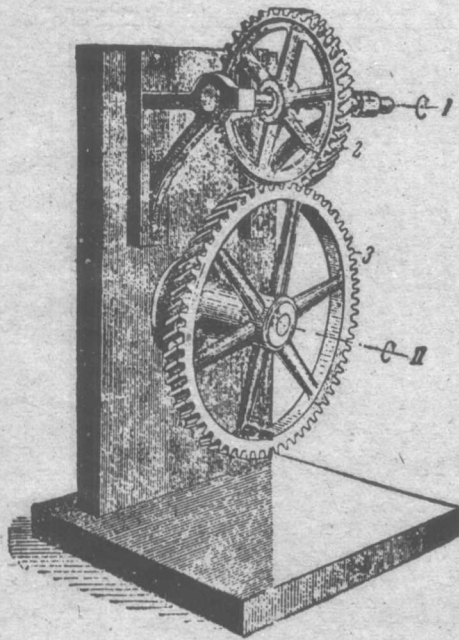


图 1—13

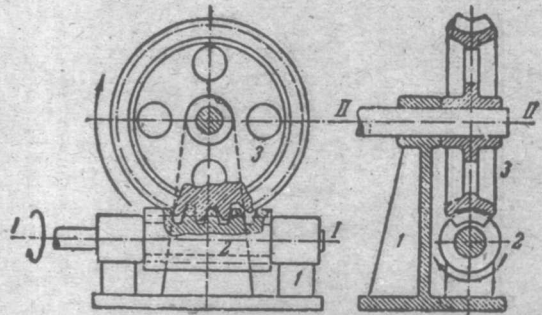


图 1—14

(5) 斜面与螺旋机构：利用斜面来传达运动的机构称为斜面机构。螺旋机构在本質上也就是斜面机构。图 1—15 表示斜面机构，图 1—16 表示螺旋机构。这种机构在很多場合中是用来夹紧或調节工作物用的。

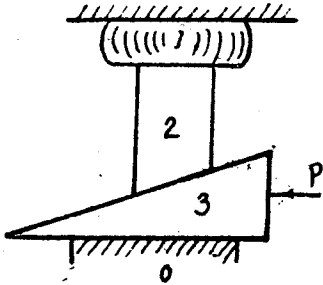


图 1-15

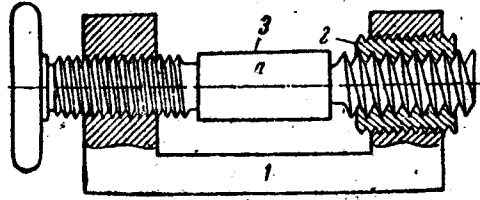


图 1-16

(6) 挠性传动机构：利用挠性体来传达运动的机构称为挠性机构。最常见的挠性体为皮带和繩索。这种机构通常用在动力較小，距离較远的传动中。另外有鏈传动。

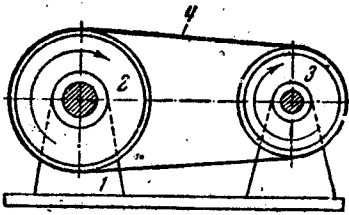


图 1-17

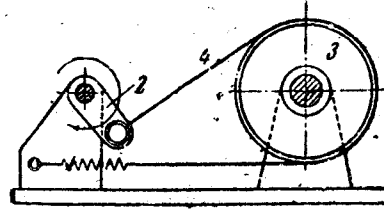


图 1-18

以上是六种常用机构的簡單介紹。

## 第二章 機構的組成及分類

### § 2—1. 研究機構組成及分類的目的

機械原理課程的基本任務就是研究機構的各種性質。對已有的機構進行分析研究，把分析所得的結果加以歸納和綜合，以便給新機構的設計提供資料。

機構在運動時的運動和動力性質決定於機構的組成，即它的各構件間連接方法的性質。為了系統的研究所有已存在的和可能存在的機構，則必須將機構加以合理的分類，使每類機構在結構組成上是同樣的，這樣就可以應用同一的方法去研究同類機構的運動和動力問題。同時合理的分類也是為創設新機構時所必需的，所以需要按機構的組成進行分類。有關這方面的各種原理和法則組成了『機構的構造學』。

俄國的學者（Жуковский、Чебышев等）和蘇聯的學者（Ассур、Добровольский、Малышев、Артоболевский等）在這方面都有很多出色的貢獻。其中特別值得稱道的是Ассур和Добровольский教授的工作。Ассур教授給平面鉸銷機構的分類建立了科學的基礎；並對德國學者們的不合理的分類方法給予深刻的批判。Добровольский教授則在機構構造原理的基礎上發展了立體機構的原理。

由於在實際工作中，目前遇到最多的是平面機構，因之本章只對平面機構構造及分類方面作一簡單介紹，更簡略的提一下空間機構。

### § 2—2. 元件和構件

機械或機構中，有很多由於機構上製造上或使用上的原因，而附加有一些另件，例如鍵、軸銷、法蘭盤、搖手柄、固定螺釘等，它們對機械或機構的運動特性並不發生影響，稱之為元件或另件。例如輪與輪軸總是分開製造，然後用鍵把它們聯接起來，使輪與輪軸在工作時沒有相對運動；但是不用鍵而用鉚接的方法把輪和軸鉚在一起，或是輪和軸根本就是一個物體，也能使輪和軸在工作時沒有相對運動。因此，鍵的本身存在與否，對機械或機構的運動是沒有影響的。總之，在機械或機構工作時，作為一個整體參與工作的物體可能由好幾個物體所組成，這些物體就是元件或另件，而該整體則稱為構件。

在機械原理中圖表表示構件時，常不用其本來的結構圖而用簡圖。如圖2—1所示在機械原理中構件常看作為剛體。

### § 2—3. 運動付及其分類

兩個構件之間本來是互不相關的，它們之間有六個自由度：沿 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 軸的三個相對移動自由度和繞 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 軸的三個相對轉動自由度。如果把這兩個構件用某種方式直接

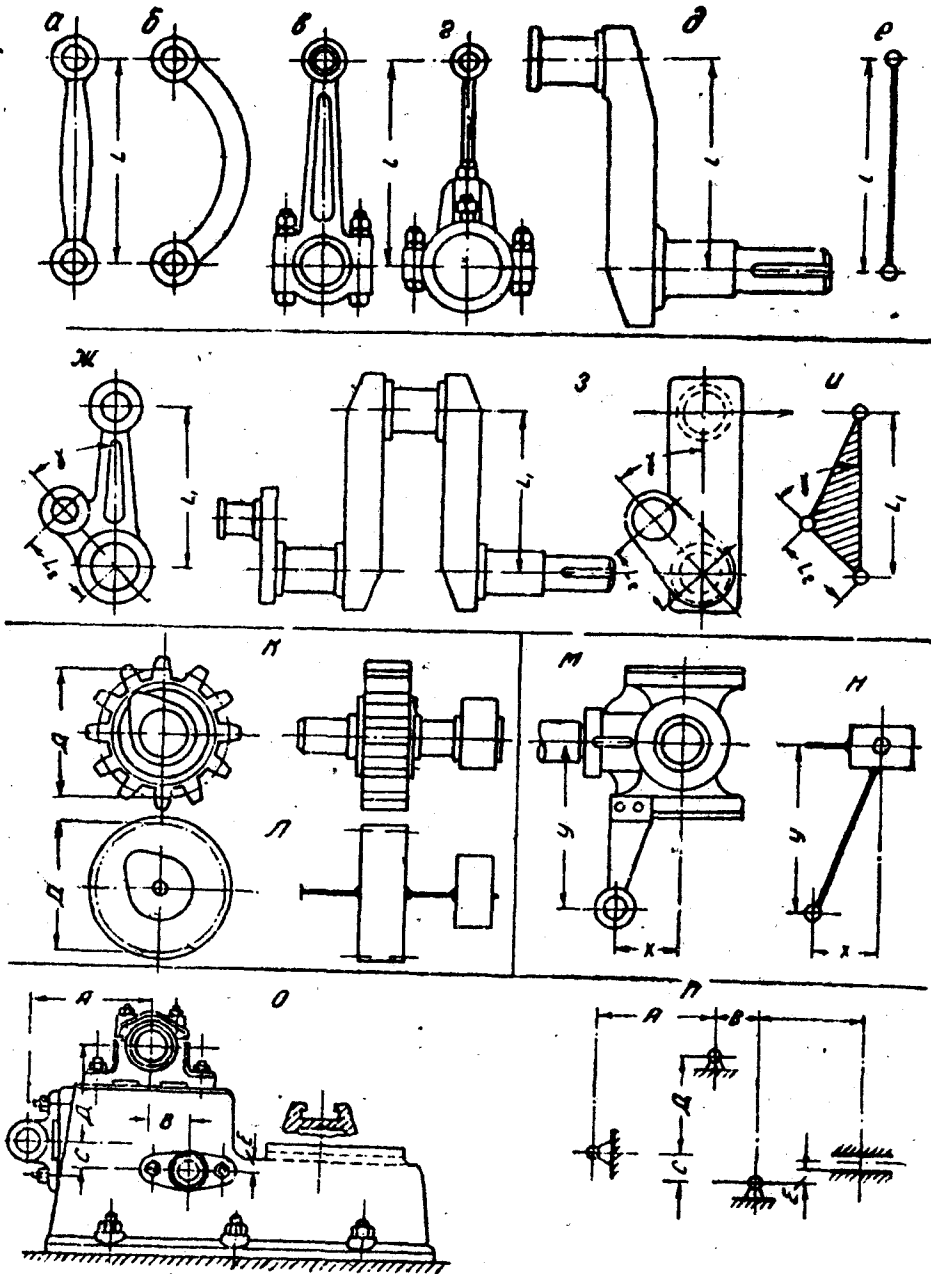


图 2—1 各种类型构件及它们的简图表示法

接触，它們之間將互相約束，限制了某些相對運動，這二件就形成了運動付。二件之接觸處稱為運動付元素。所以一運動付由二運動付元素組成。如圖2—2所示，運動副能使A、B兩構件只有繞x—x軸迴轉自由度；圖2—3所示的運動副能使A、B兩物體只有繞x、y、z三軸迴轉的自由度。換一句話說，運動副使兩物體之間產生了約束條件，使得

原来的六个相对自由度减少若干个。例如图2-2中的运动副就产生了五个约束条件，而图2-3中的运动副产生了三个约束条件。正是靠着这些约束条件，才有可能使互不相关的各个构件有一定的相对运动，最后形成机构或机械。运动付元素可以是点、线或面，如图2-2，2-3所示为面，2-4所示即为点，图2-5为线。

运动付的性质不决定于参与运动付的构件的整个形状，面只决定于其直接接触部分即运动付元素。

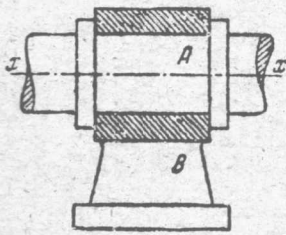


图 2-2

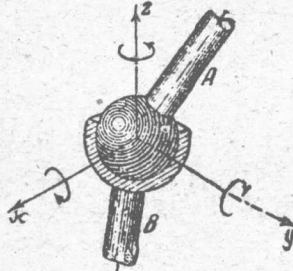


图 2-3

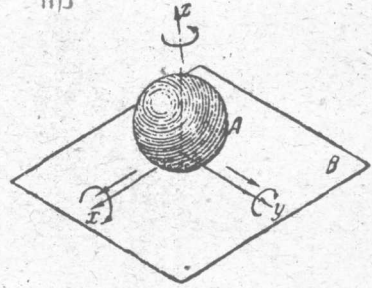


图 2-4

常根据运动付元素是点、线还是面而将运动付分为两大类：前者即接触处为点或线的称为高付，如图2-4，2-5，2-6，2-9等。而后者称为低付。如图2-3，2-8，2-10，2-11，2-12，2-13等。因为二者在性质上各有其特点，例如高付由于为点或线接触，单位压力大，易磨损，但高付比低付灵活，能产生更多样性的相对运动规律。因之这种分法一直到现在还具有其实际意义。

但在现代更严格的分类法是按构件以运动付相速后所失去的相对自由度数目来分，这种分法在研究机构的结构组成时是方便的。可以按此法将运动付分为五种：

(1) 失掉一个自由度的运动副，称之为一级副：

(a) 失掉一个平动自由度的运动副，如图2-4所示；

(b) 失掉一个转动自由度的运动副，现尚未发现。

(2) 失掉两个自由度的运动副，称之为二级副：

(a) 失掉两个平动自由度的运动副，如图2-5所示；

(b) 失掉一个平动和一个转动自由度的运动副，如图2-6所示；

(b) 失掉两个转动自由度的运动副，现尚未发现。

(3) 失掉三个自由度的运动副，称之为三级副：

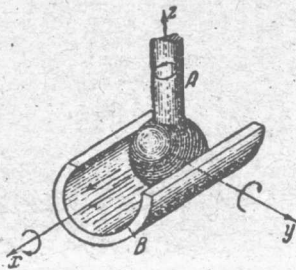


图 2-5

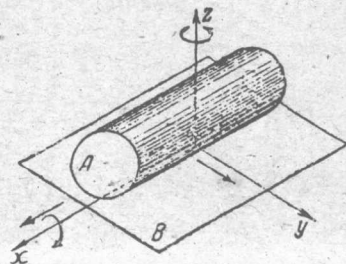


图 2-6



- (a) 失掉三个平动自由度的运动副，如图2—3所示
- (b) 失掉两个平动和一个转动自由度的运动副，如图2—7所示；
- (c) 失掉一个平动和两个转动自由度的运动副，如图2—8所示；
- (r) 失掉三个转动自由度的运动副，现尚未找到。

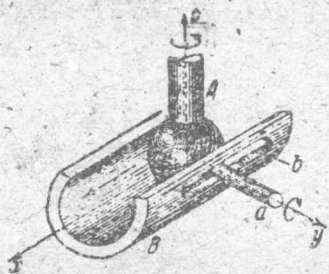


图 2-7

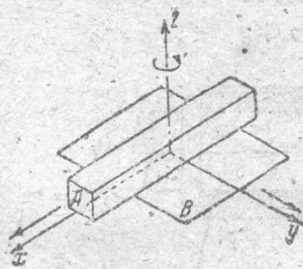


图 2-8

(4) 失掉四个自由度的运动副，称之为四级副：

- (a) 失掉三个平动和一个转动自由度的运动副，如图2—9所示；
- (b) 失掉两个平动和两个转动自由度的运动副，如图2—10所示；
- (c) 失掉一个平动和三个转动自由度的运动副，现尚未发现。

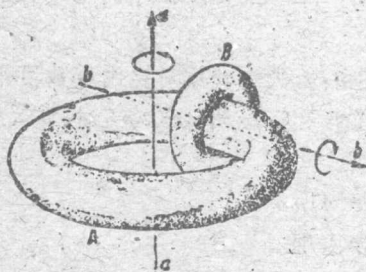


图 2-9

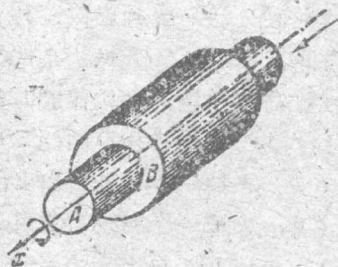


图 2-10

(5) 失掉五个自由度的运动副，称之为五级副：

- (a) 失掉三个平动和两个转动自由度的运动副，如图2—11所示；
- (b) 失掉两个平动和三个转动自由度的运动副，如图2—12所示；
- (c) 螺旋运动副，如图2—13所示。

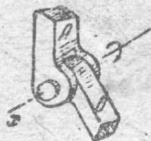


图 2-11

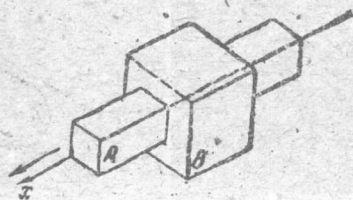


图 2-12

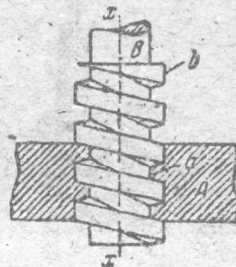


图 2-13