

高等学校试用教材

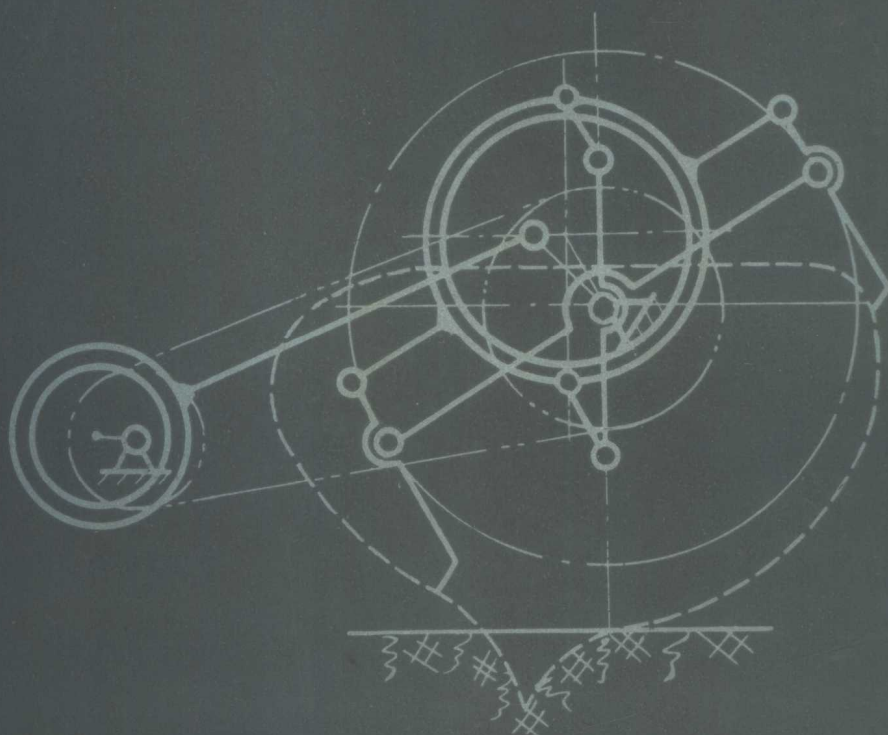
- 594106

575  
45577  
T.1

# 机械设计

上册

华中农学院 镇江农业机械学院 华南农学院 合编  
武汉工学院 西南农学院  
华中农学院 主编



人民教育出版社

高等学校试用教材

50

# 机 械 设 计

上 册

华中农学院 镇江农业机械学院 华南农学院  
武 汉 工 学 院 西 南 农 学 院 合编  
华中农学院 主编

人 民 教 育 出 版 社

本书分上、下两册，共二十四章。上册为机械原理部分，包括机构的结构分析、平面机构的运动分析、平面机构动态静力分析、机械中的摩擦、连杆机构、凸轮机构、平面轨迹副机构、齿轮啮合原理、轮系、其他机构、机构的组合设计、机械的平衡、机器的运转和调速等十三章；下册为机械零件部分，包括带传动、链传动、齿轮传动、蜗杆传动、螺纹联接及螺旋传动、键及花键联接、轴、滚动轴承、滑动轴承、联轴器、离合器与制动器、弹簧等十一章。

本书可作为高等学校农业机械类各专业的试用教材，也可供其他有关专业师生及从事农业机械等有关的工程技术人员参考。

高等学校试用教材

## 机械 设计

上册

华中农学院 镇江农业机械学院 华南农学院 合编  
武汉工学院 西南农学院  
华中农学院 主编

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

湖北省新华印刷厂印装

开本 787×1092 1/16 印张 22 字数 480,000

1980年7月第1版 1980年7月湖北第1次印刷

印数 1—4,600

书号 15012·0217 定价 1.80 元

# 前 言

本书是按照一九七七年十二月教育部委托召开的高等学校工科基础课机械原理、机械零件、机械设计、工程热力学、传热学教材会议上讨论的农机类《机械设计》教材编写大纲编写的。

考虑到学科的系统性和便于教学,本书分上、下两册出版。上册为机械原理部分,包括机构的分析、常用机构的原理与设计以及机械动力学的基本知识等方面的内容;下册为机械零件部分,包括机械传动设计的基本原理与方法及其他通用零件的设计与选型等方面的内容。本书注意了加强基础理论,内容及设计计算方法有所更新。根据农业机械的特点,本书着重阐述了机构的分析与设计,并编写了空间连杆机构、平面轨迹副机构、组合机构以及机构的组合设计等内容。齿轮传动、带传动、链传动及滚动轴承等的设计计算采用了较新的方法。考虑到各专业的要求不尽相同,本书编写的内容较多,其中用小号字排印的部分建议作为选学内容,使用时可根据各专业的具体情况加以取舍。本书采用了国际单位制。

本书可作为高等学校农业机械类各专业的试用教材,也可供其他有关专业师生及从事农业机械等有关的工程技术人员参考。

参加本书上册编写的有:镇江农业机械学院马履中(第一章)、范乃沧(第二、三、四章),华南农学院李昆玉、曾中坚(第五、六、七章),武汉工学院刘竞生、张淑文(第八章),华中农学院李青国(第九、十、十一、十二、十三章),由李青国主编。参加下册编写的有:华中农学院余礼明(第十四、十五、十七、十八、十九、二十章),武汉工学院黄乃公(第十六章),西南农学院郑砚荪(第二十一、二十二、二十三、二十四章)。由余礼明主编。

本书初稿完成后,在广西南宁召开了审稿会。出席会议的审稿单位有:北京农业机械化学院、吉林工业大学、福建农学院、广西农学院、洛阳农业机械学院。上册由北京农业机械化学院孙可宗、董学珠、刘世元主审;下册由吉林工业大学孟慧琴等主审。与会同志对初稿提出了很好的意见和建议。本书在编写过程中还得到了湖南农学院、贵州农学院、云南农业大学、北京钢铁学院、天津大学、上海机械学院、郑州机械研究所、《机械工程手册》编写组等单位的支持。在此一并致以深切的谢意。

由于我们水平有限、经验不足,书中还会有不少缺点和错误,殷切期望读者批评指正。

编 者

一九七九年十一月

# 目 录

## 第一篇 机械原理

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 第一章 机构的结构分析 .....                     | 4  |
| § 1-1 机构结构分析的目的和内容 .....              | 4  |
| § 1-2 运动副及其分类 .....                   | 4  |
| § 1-3 运动链及其自由度 .....                  | 8  |
| § 1-4 机构活动度的计算及机构具有确定运动的条件 .....      | 10 |
| § 1-5 计算机构活动度时应注意的事项 .....            | 12 |
| § 1-6 平面机构中高副用低副代替的方法及平面机构的组成原理 ..... | 14 |
| § 1-7 机构运动简图及机构运动示意图 .....            | 19 |
| 第二章 平面机构的运动分析 .....                   | 21 |
| § 2-1 概述 .....                        | 21 |
| § 2-2 机构的位置图及构件上各点的轨迹和位移的求法 .....     | 22 |
| § 2-3 速度瞬心及其在机构速度分析上的应用 .....         | 23 |
| § 2-4 相对运动图解法在机构速度分析上的应用 .....        | 27 |
| § 2-5 平面机构运动分析的解析法 .....              | 37 |
| § 2-6 机构的运动线图·图解微分法和图解积分法 .....       | 40 |
| 第三章 平面机构的动态静力分析 .....                 | 45 |
| § 3-1 概述 .....                        | 45 |
| § 3-2 构件惯性力的计算 .....                  | 46 |
| § 3-3 质量代换法求构件的惯性力 .....              | 48 |
| § 3-4 平面机构动态静力分析的图解法 .....            | 51 |
| § 3-5 茹可夫斯基杠杆法 .....                  | 55 |
| § 3-6 平面机构动态静力分析的解析法 .....            | 57 |
| 第四章 机械中的摩擦 .....                      | 65 |
| § 4-1 概述 .....                        | 65 |
| § 4-2 移动副中的摩擦·机械效率及自锁条件 .....         | 66 |
| § 4-3 回转副中的摩擦 .....                   | 72 |
| § 4-4 螺旋副中的摩擦 .....                   | 80 |
| § 4-5 柔韧体的摩擦 .....                    | 81 |
| § 4-6 机组的机械效率 .....                   | 83 |
| 第五章 连杆机构 .....                        | 86 |
| § 5-1 概述 .....                        | 86 |
| § 5-2 平面铰链四杆机构 .....                  | 88 |
| § 5-3 含有移动副的平面四杆机构 .....              | 92 |
| § 5-4 平面四杆机构设计的基本问题 .....             | 98 |

|        |                             |     |
|--------|-----------------------------|-----|
| § 5-5  | 按照给定的运动规律用图解法设计四杆机构 .....   | 99  |
| § 5-6  | 按照给定轨迹设计四杆机构——回转中心曲线法 ..... | 106 |
| § 5-7  | 解析法设计平面四杆机构简介 .....         | 109 |
| § 5-8  | 实验法设计平面四杆机构 .....           | 110 |
| § 5-9  | 空间连杆机构 .....                | 111 |
| 第六章    | 凸轮机构 .....                  | 119 |
| § 6-1  | 概述 .....                    | 119 |
| § 6-2  | 凸轮机构从动件常用的运动规律 .....        | 121 |
| § 6-3  | 凸轮机构的压力角与基圆半径 .....         | 131 |
| § 6-4  | 盘形凸轮轮廓曲线的设计 .....           | 141 |
| § 6-5  | 圆柱凸轮 .....                  | 145 |
| § 6-6  | 圆弧凸轮简介 .....                | 149 |
| § 6-7  | 解析法设计凸轮——凸轮廓线方程式 .....      | 153 |
| 第七章    | 平面轨迹副机构 .....               | 158 |
| § 7-1  | 概述 .....                    | 158 |
| § 7-2  | 平面轨迹副机构的类型 .....            | 160 |
| § 7-3  | 平面轨迹副机构的设计 .....            | 161 |
| § 7-4  | 平面轨迹副机构位置和轨迹的确定 .....       | 170 |
| 第八章    | 齿轮啮合原理 .....                | 174 |
| § 8-1  | 齿轮传动的应用和分类 .....            | 174 |
| § 8-2  | 齿轮的齿廓曲线 .....               | 175 |
| § 8-3  | 渐开线及其性质 .....               | 177 |
| § 8-4  | 渐开线标准圆柱齿轮各部分名称及几何尺寸计算 ..... | 182 |
| § 8-5  | 渐开线圆柱齿轮的啮合传动 .....          | 189 |
| § 8-6  | 齿轮与齿条啮合·内齿轮啮合 .....         | 195 |
| § 8-7  | 渐开线齿轮的加工原理及根切现象 .....       | 200 |
| § 8-8  | 渐开线直齿圆柱齿轮的径向变位 .....        | 207 |
| § 8-9  | 渐开线斜齿圆柱齿轮传动 .....           | 227 |
| § 8-10 | 渐开线圆柱螺旋齿轮传动 .....           | 238 |
| § 8-11 | 渐开线圆锥齿轮传动 .....             | 241 |
| 第九章    | 轮系 .....                    | 253 |
| § 9-1  | 轮系的功用和分类 .....              | 253 |
| § 9-2  | 定轴轮系的传动比及其符号 .....          | 255 |
| § 9-3  | 周转轮系传动比的计算 .....            | 258 |
| § 9-4  | 混合轮系传动比的计算 .....            | 261 |
| § 9-5  | 行星轮系传动的效率 .....             | 262 |
| § 9-6  | 行星轮系的设计 .....               | 264 |
| § 9-7  | 其他行星减速器简介 .....             | 269 |
| 第十章    | 其他机构 .....                  | 276 |
| § 10-1 | 概述 .....                    | 276 |
| § 10-2 | 棘轮机构 .....                  | 276 |
| § 10-3 | 槽轮机构 .....                  | 281 |
| § 10-4 | 不完全齿轮及星轮机构 .....            | 285 |

|                                    |            |
|------------------------------------|------------|
| § 10-5 非圆形齿轮机构 .....               | 287        |
| § 10-6 组合机构 .....                  | 290        |
| <b>第十一章 机构的组合设计</b> .....          | <b>295</b> |
| § 11-1 机构组合设计的目的和内容 .....          | 295        |
| § 11-2 根据机械的工作原理确定执行构件所需要的运动 ..... | 296        |
| § 11-3 合理选择实现执行构件所需运动的机构 .....     | 297        |
| § 11-4 运动循环图的编制 .....              | 304        |
| § 11-5 机构组合设计实例分析 .....            | 305        |
| <b>第十二章 机械的平衡</b> .....            | <b>313</b> |
| § 12-1 机械平衡的目的及分类 .....            | 313        |
| § 12-2 回转构件平衡的类别与方法 .....          | 314        |
| § 12-3 回转构件的平衡计算 .....             | 315        |
| § 12-4 回转构件的平衡试验及许用不平衡度 .....      | 318        |
| § 12-5 平面机构的静平衡 .....              | 322        |
| <b>第十三章 机器的运转和调速</b> .....         | <b>328</b> |
| § 13-1 研究机器运转和调速的目的 .....          | 328        |
| § 13-2 等效构件、等效质量与等效力 .....         | 329        |
| § 13-3 在已知外力作用下机器的运动 .....         | 333        |
| § 13-4 机器运转速度的不均匀性及其调节 .....       | 336        |
| § 13-5 飞轮设计 .....                  | 339        |

# 第一篇 机械原理

《机械设计》是研究机械中常用机构和通用零、部件的基本原理和设计计算方法的课程。它包括研究机械的结构、运动学和动力学及机械零件的强度、工艺性方面的一般规律。通常把研究机械的结构、运动学和动力学方面理论和设计计算方法的学科称为“机械原理”。

## 一、“机械原理”研究的对象

“机械原理”以机械为研究对象。所谓机械，就是机器和机构的总称。

机器的种类很多，其形式、构造、性能和用途各不相同，如图 0-1 所示内燃机，它由曲轴 1，连杆 2，活塞 3，气缸 4，阀门 5、6，推杆 7、8、9，凸轮 10、11 以及五个齿轮所组成。当燃气推动活塞 3 移动时，通过连杆 2 使曲轴 1 转动。为了保证曲轴连续回转，要求燃油、空气定时进入气缸和排除废气，因而曲轴 1 又带动齿轮、凸轮、推杆和阀门以控制进气和排气。则整个机器各部分都具有完全确定的运动，并完成将燃料的热能变换为曲轴回转的机械能的工作。

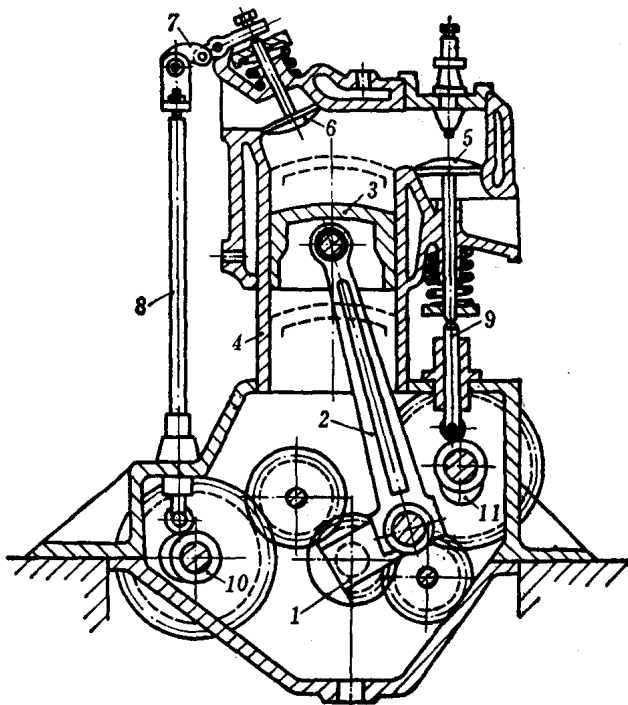


图 0-1

对别的机器也作如上分析，便可得知，机器有以下三个共同特征：

(1) 机器是由许多构件组合而成（机器中的各个相对运动部分称为构件。

如图 0-1 所示，内燃机是由曲轴、连杆、活塞等构件组成）；

(2) 组成机器的各构件之间具有确定的相对运动（即各构件按一定的规律相对其他构件运动，而不会出现运动混乱的现象）；

(3) 机器能代替人的劳动去变换机械能（各种原动机）或完成有用的机械功（各种工作机）。

凡是具有以上三个特征的就称为机器。

仅仅具有机器前两个特征的称为机构。即机构也是由许多构件所组成，其各构件之间具有确定的相对运动。与机器不同的是，机构只用来传递或变换运动，而不能单独做功或变换能量。如图 0-1 所示内燃机中曲轴 1，连杆 2，活塞 3 和气缸 4 为一个四构件的组合物，它能将活塞的往复移动变换为曲轴的回转运动，但单用它不能将热能变换为机械能，所以它只是

一个机构(即曲柄滑块机构)。要使内燃机能够工作,还必须再配上作传动的齿轮机构和控制进、排气的凸轮机构等。

组成机构的构件可以是一个零件,也可以是由若干个零件联接成的刚性体(故将构件视为刚体)。如连杆是一个构件,但它是由连杆体、连杆头、螺栓及螺母等零件刚性联接而成的。

机构中必有一个固定的构件,称为机架。机架本身或者是固定不动(如各种固定在地基上的机器的机架),或者是相对地面运动(如汽车、拖拉机、插秧机、收割机等)的机架)。但在研究机器中个别机构的运动时,一般都以机架为参考系,即假定它是静止的。机构中运动规律已知的构件(一般是指驱动机构的外力所作用的构件)称为原动构件或主动构件,而所有其余的构件称为从动构件。把同一机构中的不同构件做原动件,可以作为不同用途的机构。如当曲柄滑块机构中的滑块做原动件时,即用作蒸汽机、内燃机中的主体机构,而当曲柄做原动件时,便为冲床,收割机中的主体机构。

## 二、“机械原理”研究的内容、目的

“机械原理”研究的内容包括以下几个方面:

### 1. 机构的结构分析

如上所述,机构是具有确定相对运动的若干构件的组合物。机构的结构分析,就是研究构件之间怎样相连接才能成为机构及其具有确定运动的条件,进而归纳出机构的组成原理和结构分类,以便能有系统地来进行机构的运动和力的分析及探讨可能创造出来的新机构。

### 2. 机构的运动分析

既然机构中各构件具有确定的运动,那么当其中某一构件的运动规律已知时,则其他各构件的运动规律便可以确定。对机构的运动分析,就是根据已知原动件的运动,研究如何确定从动件的运动;或者相反,要求从动件完成给定的运动,而确定原动件应赋予何种运动。即研究机构构件的角速度、角加速度,点的轨迹、位移、速度和加速度的求法。

### 3. 机构的力分析及机械动力学

机构运动时,其各构件均受力作用。对机构的力分析就是根据作用于机构上的外力,研究如何确定作用于其各构件上某处的力的大小和方向(包括平衡力、构件之间的反作用力及惯性力)。这些力的大小、方向和作用点是进行构件的强度、刚度计算,决定相应构件的尺寸与结构形状和机器动力配置的主要依据。也为改进和合理使用现有机械提供资料。

又机械工作时,作用在各构件上的力均在作功,完成变换和利用能量的工作。由于构件之间的反作用力,故在其接触处产生摩擦,消耗能量,同时构件也受到磨损,使机械的效率降低,可靠性和耐久性受到影响。此外,机械中过大的惯性力及由于功能的变化引起的运转速率过大的波动,都将使机械的工作性能变坏甚至不能正常工作。因此必须设法对其过大的惯性力予以平衡及对其过大的速率波动加以调节。机械动力学所研究的问题就包括机械中的摩擦与机械效率、机械和构件的平衡以及机械的运转与速率波动的调节等。这些知识不论对于掌握现有机械的性能以便改善其工作,还是设计精确、优质、高效的新机械都是必不可少的。

### 4. 常用基本机构的分析与设计

现代机械的种类繁多,构造和用途也各不相同。但不论是哪一种机械,也不论其构造如何复杂,无非是由连杆机构、凸轮机构、齿轮机构等一些常用的基本机构所组成(包括常用在农业机械上实现点的预定轨迹的机构——轨迹副机构)。掌握这些基本机构的性能特点与设计方法是做好机械设计的基础。因此,要能够对常用基本机构的工作原理,运动及工作特性进行分析,并根据各种已知条件(运动要求和工作要求)设计这些机构。

#### 5. 机构的组合设计

现有的机器,为了完成一定的生产任务,应具有实现某一生产过程所要求的各个运动。因此,在多数情况下,机器并不只由某一种机构组成,而是由多种机构组合成的完整的机械系统。进行这种机械系统的设计,就称为机构的组合设计。研究了基本机构以及机构组合设计的步骤和方法后,除了能完成常用基本机构的设计与分析外,还能进行整机运动简图的设计与分析。

综上所述,机械原理包括机构的结构及组成原理,机构的运动和机械动力分析以及常用基本机构和机构组合设计计算方法等内容,可见它研究的是各种机械共同的、最基本的规律。因此,它是机械类专业主要的技术基础课之一。为以后学习其他技术基础课及专业课打好机械方面的理论基础。由于它所研究的一方面是对已有机构的分析,另一方面是实现所需运动的新机构的设计(或称为机构的综合)的内容,这些知识对从事机械技术工作的人员起着直接的指导作用,当掌握了这些知识以后,就有可能根据需要创造出新机械的方案或根据分析掌握机械的性能特点,以便更合理地使用、管理现有机械以及改进现有机械设备使其发挥更大的效能。

《机械设计》下册是机械零件部分。它将从工作能力(强度、刚度等)、结构工艺性及使用维护等方面来研究机器中通用的零件和部件的设计原理和计算方法,以达到能正确地设计、运用和改进这些零、部件的目的。

农业机械化课题极广,从耕、耙、播、收到植物保护、排灌、加工及农田基本建设等都要求尽快地由手工操作改变为机械作业。目前国外农业机械正向大功率、宽幅度、高效能方面发展;加上田间作业工作条件复杂,要求机械有很好的适应性,这就对机械的结构、运动和动力性能、零、部件的工作能力等提出了更高的要求,这些问题正是《机械设计》所研究的范围。为了创造适应各种农作要求的新机械,合理地运用和改进现有的农业机械设备,加速实现农业机械化,努力学好《机械设计》课程,更显得十分重要了。

# 第一章 机构的结构分析

## § 1-1 机构结构分析的目的和内容

### 一、机构结构分析的目的

#### 1. 了解机构运动的可能性和确定性

机构是具有确定的相对运动的构件组合。显然,许多构件的任意组合不一定能使机构具有确定的相对运动。在设计新机构时,首先就需要分析判断所设计的机构能否按预定的运动要求运动,也就是说需要了解该机构能否运动,以及在什么条件下才能具有确定的相对运动。

#### 2. 为研究机构的运动和动力特性提供方便

设计或分析机构时往往还需要对机构进行运动分析和动力分析,以便找出某处的速度、加速度以及所受到的力、力矩等。进行机构结构分析,将各种机构按其结构组成形式加以分类,从而可以建立它们运动分析和动力分析的一般方法。

#### 3. 了解机构的组成原理以便于分析现有机构和创造新机构

实际应用的许多机构常由形状和构造都较复杂的构件装配而成的,机构结构分析要在保持原有机构运动特性的情况下,撇开构件的复杂外形,来研究机构的组成原理,以便归纳出机构组成的共同原则。了解机构的组成原理就便于分析现有机构,也为创造新机构开辟了途径。

### 二、机构结构分析的内容

机构结构分析的主要内容有:

#### 1. 机构活动度计算及机构的确定运动条件;

#### 2. 机构的组成原理。

此外,为了便于对机构进行结构分析,运动分析及动力分析,往往需要把现有机构用规定的符号并根据构件的尺寸按比例或不按比例地画出来。这种图形,前者叫机构运动简图,后者叫机构运动示意图。图中已把那些与分析无关的构件外形和特殊构造撇开,这样就便于对它进行分析研究。在设计新机构时,通常也是先拟订机构运动方案,画出简图,根据运动要求确定机构构件的主要几何尺寸,而后再进一步考虑形状构造以及强度刚度等问题。因此本章还将介绍机构运动简图及机构运动示意图的画法。

## § 1-2 运动副及其分类

机构中每个构件总是与另一构件相连接的,这种连接既不能分开,又不能使构件形成刚性系统。我们把两个构件直接接触而又能产生一定相对运动的连接称为运动副。例如:轴与轴承的连接、滑块与导路的连接以及轮齿与轮齿的连接(即两轮齿的啮合)等等均为运动副。

构件和构件之间的这种连接总是通过点、线或面的接触来实现的。例如：相互啮合的轮齿之间为线(或点)接触；滑动轴承中轴与轴承或滑块与导路之间为面接触等。

两构件组成运动副时各构件所具有的相对运动数目及其相对运动的性质是由它们的连接情况决定的，下面将逐步加以分析。

如图 1-1 所示，在空间有两个构件 1 和 2，当构件 1 未与构件 2 组成运动副之前，构件 1 对构件 2（设坐标  $xyz$  固定于构件 2 上）共有六个独立的相对运动（沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴的三个移动和绕  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴的三个转动）。构件的这种独立运动数称为自由度。在未组成运动副之前构件 1 的自由度为 6。当其与构件 2 组成运动副后，由于两者的互相接触，其某些原有的独立的相对运动不可能再产生，亦即使其相对运动受到约束。对构件一个独立运动的限制称为一个约束条件。构件受到约束后其自由度减少，减少的数目等于其由于构成运动副而带入的约束数。由于运动副为两构件的活动连接，而自由度与约束数两者之总和应等于 6，因此对每个构件的约束数最多为 5。设构成运动副后所保留的自由度为  $H$ ，约束数（也就是被约束条件所消除了的自由度）为  $S$ ，则

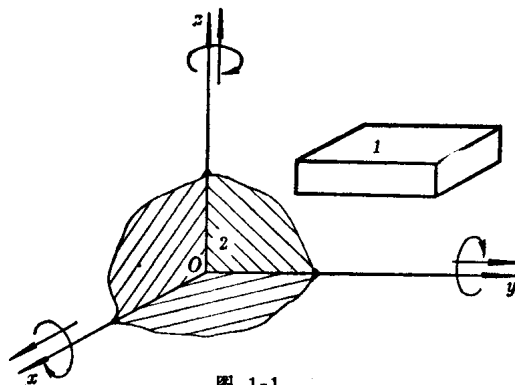


图 1-1

$$H + S = 6 \quad \text{或} \quad S = 6 - H$$

运动副可以按其提供的约束条件的数目来分级：提供一个约束条件的，称为Ⅰ级运动副（简称Ⅰ级副）；提供两个约束条件的，称为Ⅱ级运动副（简称Ⅱ级副），依次类推。

表 1-1 常用运动副的分类及其代表符号

| 名 称     | 图 形<br>简 图 | 约 束<br>条件数 | 自 由<br>度 数 | 级 别 | 符 号   | 名 称   | 图 形<br>简 图 | 约 束<br>条件数 | 自 由<br>度 数 | 级 别 | 符 号   |
|---------|------------|------------|------------|-----|-------|-------|------------|------------|------------|-----|-------|
| 球 面 高 副 |            | 1          | 5          | Ⅰ   | $P_1$ | 圆 柱 副 |            | 4          | 2          | Ⅱ   | $P_2$ |
|         |            |            |            |     |       |       |            |            |            |     |       |
| 圆 柱 高 副 |            | 2          | 4          | Ⅱ   | $P_2$ | 回 转 副 |            | 5          | 1          | Ⅲ   | $P_3$ |
|         |            |            |            |     |       |       |            |            |            |     |       |

(续表)

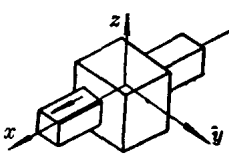
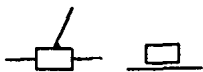
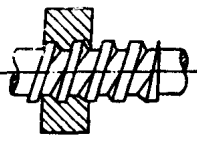
| 名 称  | 图 形                                                                               | 约 束<br>条件数 | 自 由<br>度数 | 级 别 | 符 号   | 名 称 | 图 形                                                                                | 约 束<br>条件数 | 自 由<br>度数 | 级 别 | 符 号   |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------|-----|-------|-----|------------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------|-----|-------|
|      | 简 图                                                                               |            |           |     |       |     | 简 图                                                                                |            |           |     |       |
| 球面低副 |  | 3          | 3         | Ⅱ   | $P_3$ | 移动副 |  | 5          | 1         | Ⅴ   | $P_5$ |
|      |  |            |           |     |       |     |  |            |           |     |       |
| 球销副  |  | 4          | 2         | Ⅳ   | $P_4$ | 螺旋副 |  | 5          | 1         | Ⅴ   | $P_5$ |
|      |  |            |           |     |       |     |   |            |           |     |       |

表 1-1 列出了依据约束条件数的不同而分的各级运动副。其中Ⅴ级副为机械中所常见的。Ⅴ级副中两构件只能作相对转动的称为回转副；两构件只能作相对移动的称为移动副。螺旋与螺母组成的运动副称为螺旋副，其间的相对运动虽然既有转动又有移动，但两者有一定关系（每转一圈，移动一个导程）而不是相互独立的，其独立的相对运动只有一个，因此螺旋副也属Ⅴ级副。

运动副除了按其所提供的约束条件数分级外，通常还可以根据运动副的接触情况及相对运动的性质而分为：高副和低副；闭式运动副和开式运动副；平面运动副和空间运动副。

以点或线接触的运动副称为高副；以面接触的运动副称为低副。高副中两构件之间的相对运动有滚动、滑动及滚动兼滑动三种，如表 1-1 中所示的Ⅰ级副及Ⅱ级副都是高副。低副中两构件之间的相对运动只能是滑动，如回转副、移动副、螺旋副、圆柱副、球销副及球面低副等。

高副连接的两构件的相对运动特性是不同的，例如图 1-2a 所示，当构件 1 沿构件 2 作纯滚动时，构件 1 上的  $P_1$  点画在构件 2 上的轨迹  $\alpha\alpha$  是摆线。反之，当构件 2 相对于构件 1 作纯滚动时，构件 2 上的  $P_2$  点画在构件 1 上的轨迹  $\beta\beta$  却是渐开线。而低副连接的两构件的相对运动特性总是相同的，例如图 1-2b 中所示，当构件 1 与构件 2 作相对转动时，构件 1 上的  $P_1$  点及构件 2 上的  $P_2$  点的相对运动轨迹都是圆，其轨迹相同且重合。所以说高副连接的两构件中，当固定不同构件时所得的相对运动轨迹通常不相同，更不重合，即相对运动不可逆，叫作高副无可逆性。而低副

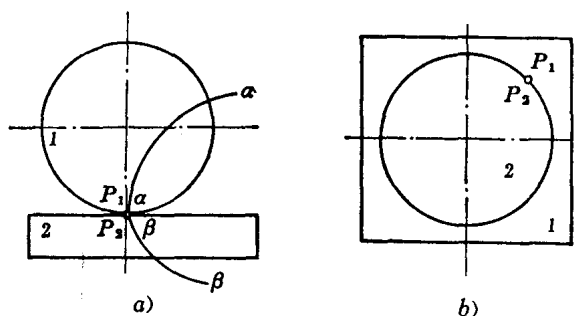


图 1-2

相对运动轨迹都是圆，其轨迹相同且重合。所以说高副连接的两构件中，当固定不同构件时所得的相对运动轨迹通常不相同，更不重合，即相对运动不可逆，叫作高副无可逆性。而低副

连接的两构件中,当固定不同构件时所得的相对运动轨迹相同且重合,即相对运动可逆,叫作低副有可逆性。

由几何形状保证接触的运动副称为闭式运动副;靠外力(重力或弹簧力等)保证接触的运动副称为开式运动副。例如图 1-3 所示凸轮机构中低副(回转副  $A$  及移动副  $C$ )通常为闭式运动副。但是凸轮高副  $B$  可以做成闭式运动副(图 1-3a 所示),也可以做成开式运动副(图 1-3b 所示)。前者凸轮轮廓几何形状做成槽形,从动件 2 向下运动是靠凸轮槽的外轮廓保证从动件 2 与凸轮轮廓接触。而后者从动件 2 向下运动是靠重力来保证其与凸轮轮廓相接触。

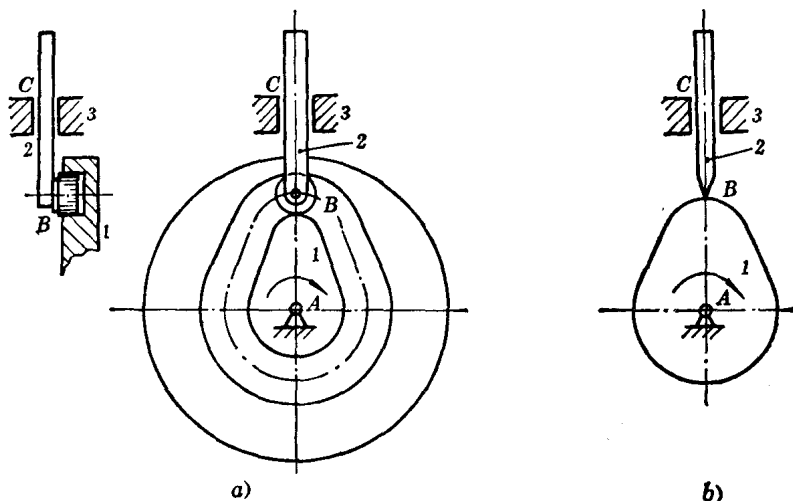


图 1-3

若构成运动副的两构件是在同一平面或相互平行的平面内作相对运动,称为平面运动副;若构成运动副的两构件是在空间作相对运动,则称为空间运动副。在平面机构中只能采用平面运动副,而在空间机构中两者均可以采用。表 1-1 中所列 I 至 IV 级运动副均是空间运动副。螺旋副因其转动与移动不在同一平面内故也属空间运动副。表中所列 V 级副中的回转副和移动副均是平面运动副,由于它们是面接触的形式故为平面低副。此外,在平面运动副中还有如图 1-3 所示凸轮机构中构件 1 与 2 在  $B$  处的接触,以及一对直齿圆柱齿轮轮齿之间的接触,组成运动副的两构件也在同一平面内作相对运动,而且是线接触的形式故为平面高副。

通常,在研究机构的运动和动力特性时不涉及强度问题,因此可以撇开构件的复杂外形和运动副的具体构造,而用简单的符号来表示构件和运动副。表 1-1 即为按照 GB 138—74 及习惯画法绘出的部分运动副的简图形式。

下面着重来讨论平面运动副。当构件 1 和 2 组成回转副时,通常可以用图 1-4a 的简图来表示;当两构件组成移动副时,可以用图 1-4b 中的简图来表示。如果两构件之一为机架(图中构件 1),则把作为机架的构件画上阴影线以便与活动构件相区别。当两构件组成平面高副时,通常应给出其形成高副的轮廓曲线,以便在进行运动分析或动力分析时求出接触点的曲率中心。如图 1-4c 所示为齿轮高副的表示方法。当只研究齿轮的转速比时,习惯上只用两齿轮的节圆来表示齿轮副。图 1-4d 所示为凸轮高副的表示方法。

当用简图表示组成运动副的构件时,只需要表示出构件上运动副的种类及其位置(即决定其运动特征的因素)即可。例如:对于仅具有两个平面低副的构件,不管其外形如何都可用

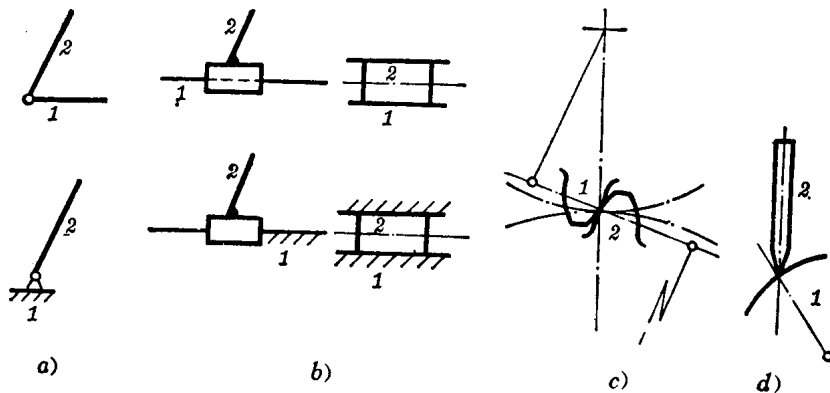


图 1-4

图 1-5a 所示的一种形式来作相应的表示；对于具有三个平面低副的构件可以用图 1-5b 的形式作相应的表示。应注意的是在简图中，两回转副中心间的距离应与实际长度成比例；移动副的导路与相对移动方向应一致，其运动副之间的相对位置尺寸亦必须与实际尺寸成比例。上述这些内容在 § 1-7 中再作详述。

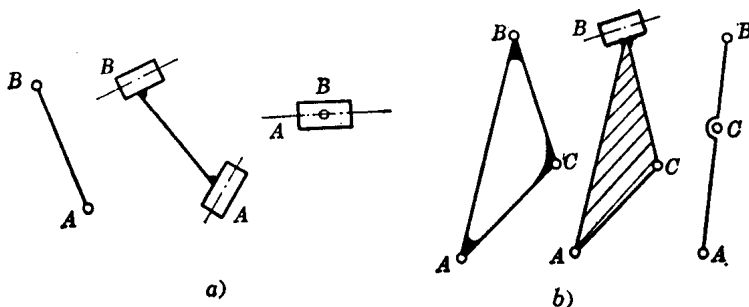


图 1-5

### § 1-3 运动链及其自由度

两个或两个以上的构件用运动副相连接而组成的系统，称为运动链。若链中每一个构件上的运动副不多于两个时，则该运动链称为单式运动链(如图 1-6a 及图 1-7a 所示)；若链中有一个(或一个以上)构件上的运动副多于两个时，则该运动链称为复式运动链(如图 1-6b 及图 1-7b 所示)。又在运动链中若有构件只组成一个运动副者，则称为开式运动链(如图 1-6 所示)；如运动链中每一构件至少组成两个运动副者，则称为闭式运动链(如图 1-7 所示)。根据运动链中各构件之间的相对运动是平面运动或是空间运动，运动链又可分为平面运动链及空间运动链。

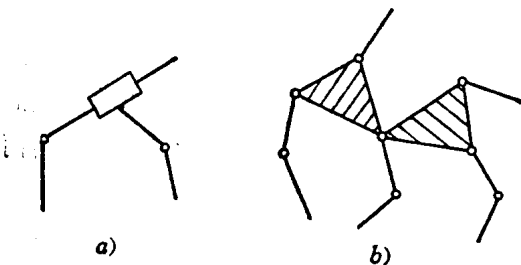


图 1-6

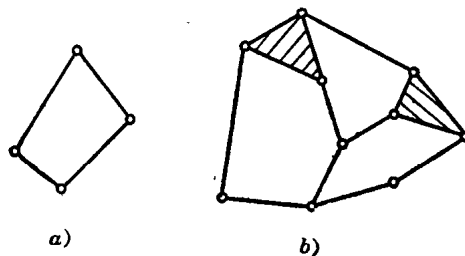


图 1-7

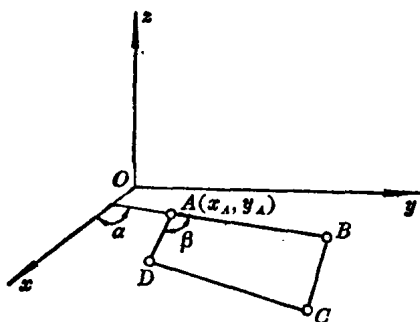


图 1-8

确定运动链位置时所需的独立参变数目，称为运动链的自由度。其值不仅与构件数目有关，而且也直接与运动副的数目和运动副的种类有关。如图 1-8 所示，在  $xOy$  面内运动的平面运动链  $ABCD$ ，确定该运动链的位置有四个独立参变数，即  $A$  点坐标  $x_A, y_A$ ， $AB$  杆与  $x$  轴的夹角  $\alpha$  以及  $AB$  杆与  $AD$  杆之间的夹角  $\beta$ 。所以说该运动链的自由度为 4。运动链自由度的计算公式可推导如下。

设运动链的自由度为  $H$ ，组成运动链的构件数目为  $K$ 。当未构成运动链时，每个构件各有 6 个自由度，可见共有  $6K$  个自由度。当它们用运动副连接成运动链后，因其各级运动副分别提供不同数目的约束条件，故其自由度必将减少。设该运动链含有  $P_5$  个 V 级副、 $P_4$  个 IV 级副、 $P_3$  个 III 级副、 $P_2$  个 II 级副及  $P_1$  个 I 级副，则其所消除的自由度（亦即各级运动副所提供的约束条件数） $S$  应为

$$S = 5P_5 + 4P_4 + 3P_3 + 2P_2 + P_1$$

因此，运动链的自由度  $H$  应为未构成运动链时的自由度总数  $6K$  减去构成运动链后所消除的自由度总数  $S$ ，即：

$$H = 6K - S = 6K - 5P_5 - 4P_4 - 3P_3 - 2P_2 - P_1 \quad (1-1)$$

对于平面运动链而言，其中各个构件只能在同一个平面或相互平行的平面内运动。例如图 1-8 中的平面运动链  $ABCD$  的各构件均以  $xOy$  坐标平面为其运动平面。这样，对于每一个构件就已经消除了三个独立运动的可能性（图示为沿  $z$  轴的移动和绕  $x$ 、 $y$  轴的转动），而只剩下了三个独立运动（图示为沿  $x$ 、 $y$  轴方向的移动和绕  $z$  轴的转动）。因此，计算平面运动链的自由度时，其每个自由构件的自由度数为 3， $K$  个构件的自由度总数应为  $3K$ 。又平面运动链中的运动副显然只能是 IV 级副（即平面高副，如两轮齿的啮合，凸轮与其从动件的接触等）或 V 级副（即平面低副，如回转副、移动副）。但应注意，这些 IV 级副或 V 级副所提供的四个或五个约束条件中，已有三个约束条件（图 1-8 所示为沿  $z$  轴的移动和绕  $x$ 、 $y$  轴的转动）被包含在平面运动的约束条件中。即这时 IV 级副（平面高副）实际有的约束条件数为 1，如图 1-9 所示，构件 1 和 2 组成平面齿轮副，轮齿 1 可以在接触点  $A$  处作相对转动，同时沿切线  $tt$  方向可作相对滑动。只有公法线  $nn$  方向的移动被限制。由以上分析可知齿轮副或凸轮高副等这类平面高副的约束条件数为 1。这时的 V 级副（平面低副）实际有的约束条件数为 2，如表 1-1 所示：回转副两构件之间只能绕  $z$  轴作相对转动， $x$  轴方向和  $y$  轴方向的移动被限制；移动副两构件之间只能沿  $x$  轴方向移动，沿  $y$  轴方向的移动及绕  $z$  轴的转动被限制。因此，平面运动链的自由度的计算公式应为

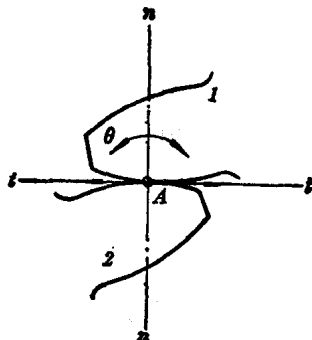


图 1-9

$$H = 3K - 2P_5 - P_4 \quad (1-2)$$

## § 1-4 机构活动度的计算及机构具有确定运动的条件

将运动链的一个构件加以固定, 如果当它的另一个或几个构件相对于此固定构件作独立运动时, 其余构件即随之作确定的运动, 则这种能作确定运动的具有固定构件的运动链便是前述的机构。与运动链相同, 组成机构的各构件都在相互平行的平面内运动的机构称为平面机构, 否则称为空间机构。

在前面已讲到, 组成机构的构件通常可以分为机架、主动构件及从动构件三类。机构中的固定构件是用作支承其他构件和作为研究机构运动的参考坐标, 该构件即为机架; 由外界赋予确定的独立运动的构件即为主动构件(又称原动构件); 其余被迫作确定运动的构件即为从动构件, 它们的运动规律决定于主动构件的运动规律和机构的结构。主动构件和从动构件相对于机架而言都是活动构件。例如图 1-10 所示发动机曲柄滑块机构中缸体 1 是机架, 活塞(即滑块)2 是主动构件; 连杆 3 和曲柄 4 是从动构件。

决定机构位置时所需的独立参变数, 即机构相对于机架所能产生的独立运动的数目就是机构的自由度, 特称为机构的活动度, 以  $W$  表示。由于机构是一种能作确定运动的具有一个固定构件的运动链, 因此, 其计算活动度的公式可由计算运动链自由度的公式中导出。空间机构的活动度由式 (1-1) 中减去 6, 平面机构的活动度由式 (1-2) 中减去 3, 即

空间机构的活动度

$$\begin{aligned} W &= H - 6 = 6(K - 1) - 5P_5 - 4P_4 - 3P_3 - 2P_2 - P_1 \\ &= 6n - 5P_5 - 4P_4 - 3P_3 - 2P_2 - P_1 \end{aligned} \quad (1-3)$$

平面机构的活动度

$$\begin{aligned} W &= H - 3 = 3(K - 1) - 2P_5 - P_4 \\ &= 3n - 2P_5 - P_4 \end{aligned} \quad (1-4)$$

式中  $n$  为机构中活动构件的数目,  $n = (K - 1)$ 。

通常将式 (1-3) 称为空间机构的结构公式, 将式 (1-4) 称为平面机构的结构公式。

此外还有一些特殊的空间机构, 如单万向联轴节这样一类球面机构(图 1-11 所示), 由于

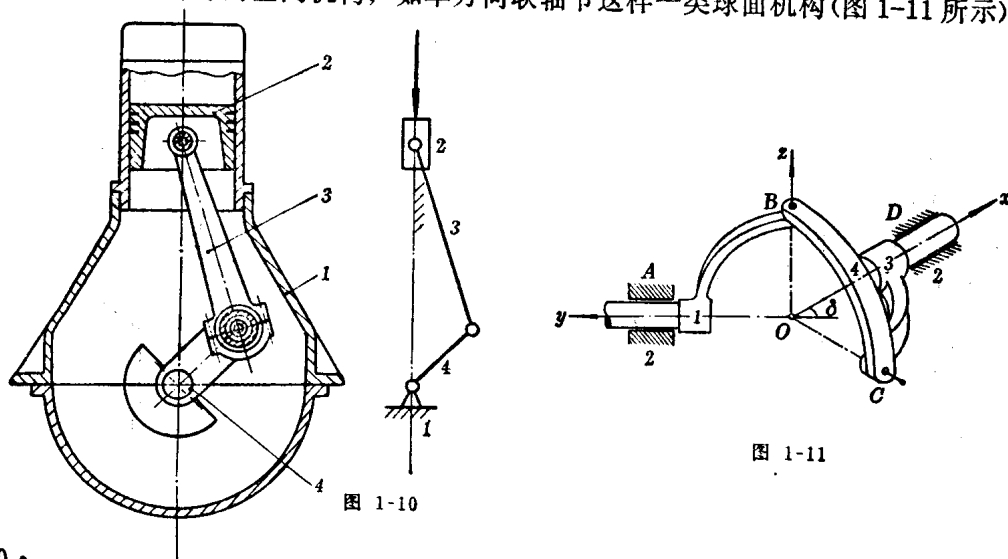


图 1-11