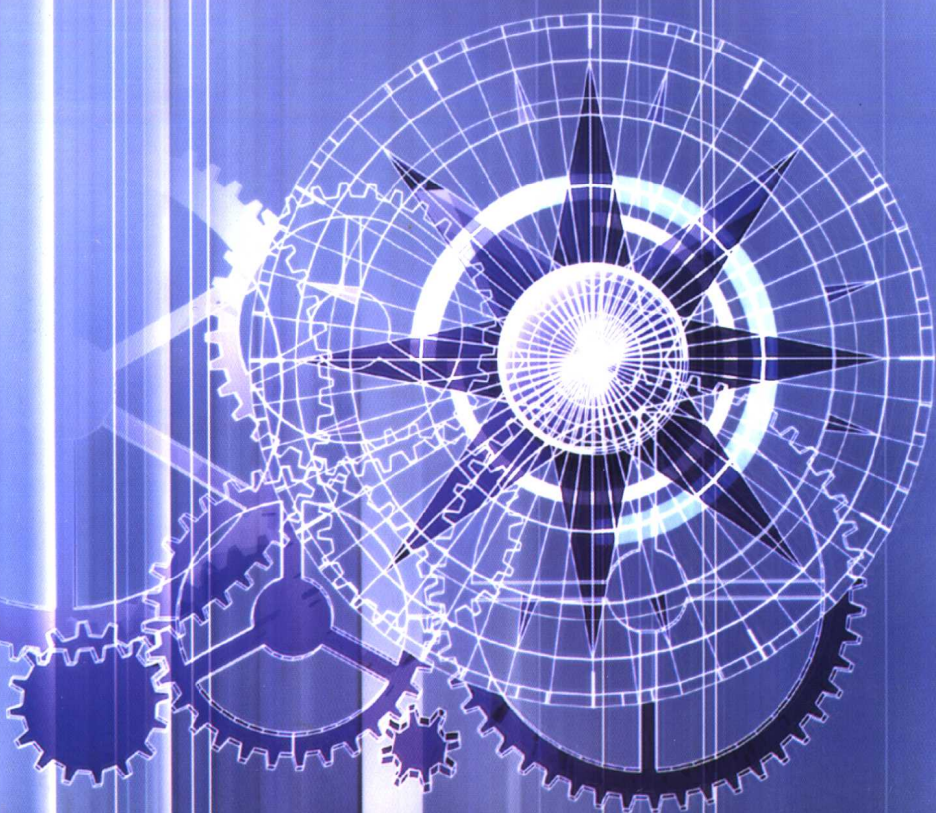


机械原理复习精要 与习题精解

陆 宁 编著

同济大学出版社



机械原理复习精要与习题精解

陆 宁 编著

同济大学出版社

内 容 提 要

这是一本学习《机械原理》和《机械设计》的辅导书,内容包括机构的结构分析、机构的运动分析、连杆机构、凸轮机构、齿轮机构、轮系、转子的平衡和转子速度波动的调节。每章均由三部分组成:内容提要、常见疑难问题解析和典型习题解答。

本书可作为高等工科院校机械类学生复习用书,也可供有关工程技术人员及教师参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械原理复习精要与习题精解/陆宁编著. —上海:
同济大学出版社, 2003. 10
ISBN 7-5608-2688-1

I. 机… II. 陆… III. 机构学-高等学校-教学
参考资料 IV. TH111

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 056134 号

机械原理复习精要与习题精解

陆 宁 编著

责任编辑 解明芳 责任校对 郁 峰 封面设计 潘向葵

出 版	同济大学出版社
发 行	(上海四平路 1239 号 邮编 200092 电话 021-65985622)
经 销	全国各地新华书店
印 刷	同济大学印刷厂印刷
开 本	787mm×1092mm 1/16
印 张	7
字 数	179000
印 数	1—3000
版 次	2003 年 10 月第 1 版 2003 年 10 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 7-5608-2688-1/TH·55
定 价	12.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换

前 言

“机械原理”和“机械设计基础”是高等工科院校机械类学生的主干课程,也是报考研究生的重要科目,为了帮助广大学生学习好这些课程,编写成此书。根据编者多年的教学经验及学生常见的错误,经过梳理和归纳,将内容按以下三部分编写:

1. 内容提要:梳理和归纳主要知识点,对不易理解的内容配以图文并茂的补充讲解,介绍解题技巧。

2. 常见疑难问题解析:分析学生常犯错误,分析考试中遇到的难点,介绍考试中应注意的问题。

3. 典型习题解答:例举大量有代表性的习题和试题,详细列出解答过程。

为满足学生的不同要求,书中某些较难的题标注有▲号,对于大多数本科生在初学时可不必理会,仅供学有余力的学生以及报考硕士生的学生参考。

希望本书能给读者在本科学习阶段中或报考研究生时有所帮助。

作 者

2003 年 3 月 2 日

目 录

前言

1 机构的结构分析 (1)	5.1 内容提要 (51)
1.1 内容提要..... (1)	5.2 常见疑难问题解析 (56)
1.2 常见疑难问题解析..... (5)	5.3 典型习题解答 (61)
1.3 典型习题解答..... (7)	6 轮系 (70)
2 机构的运动分析 (14)	6.1 内容提要 (70)
2.1 内容提要 (14)	6.2 常见疑难问题解析 (73)
2.2 常见疑难问题解析 (16)	6.3 典型习题解答 (74)
2.3 典型习题解答 (18)	7 转子的平衡 (85)
3 连杆机构 (27)	7.1 内容提要 (85)
3.1 内容提要 (27)	7.2 典型习题解答 (88)
3.2 常见疑难问题解析 (34)	8 转子速度波动的调节 (90)
3.3 典型习题解答 (35)	8.1 内容提要 (90)
4 凸轮机构 (43)	8.2 常见疑难问题解析 (92)
4.1 内容提要 (43)	8.3 典型习题解答 (93)
4.2 常见疑难问题解析 (46)	自测题 (98)
4.3 典型习题解答 (47)	自测题参考答案 (102)
5 齿轮机构 (51)	主要参考文献 (103)

1 机构的结构分析

1.1 内容提要

1.1.1 机构学的若干基本概念

(1) 机器 机器是人为实物的组合体,各实物间具有确定的相对运动以完成有用功、转换能量或处理信息,从而代替或减轻人的劳动。

(2) 机构 机构是一个人为实物的组合体,各实物间具有确定的相对运动,用以传递或变换运动。

(3) 机械 机械是机器和机构的总称。

(4) 构件 构件是作为一个整体参与机构运动的刚性单元。构件可以是不能拆开的单一整体,也可以是由若干个零件固定装配而成的刚性体。在一个机构中,输入运动的构件称原动件,用以支持和安装其他构件的构件称机架。在一个机构中,必有且仅有一个机架,而原动件至少是一件。

(5) 零件 零件是加工制造的单元。

(6) 运动副 构件间的可动连接称运动副,即两构件相接触且彼此有确定的相对运动。

(7) 运动链 若干个构件通过运动副组成的构件系统称运动链。只有有确定运动的运动链才称为机构。

1.1.2 运动副的分类及运动简图的绘制

两构件间的相互接触无外乎点、线、面三种。在平面机构中,两构件以面接触的可动连接称低副(彼此作用时,压强值较小),而以点、线接触的可动连接称高副(彼此作用时,压强值较大)。如果组成低副的两构件的相对运动轨迹为直线,则称之为移动副,如果组成低副的两构件的相对运动轨迹为圆弧,则称之为转动副。

去除与运动无关的构件外形、断面尺寸等因素而用专门的符号和简单线条表示构件和运动副,并按比例定出图上运动副的相对位置。这种表达机构的简化图形称运动简图。

在绘制运动简图时,应注意按以下步骤进行:

(1) 找出原动件和机架。

(2) 找出构件间的接触关系,看出两两直接接触构件的运动副性质。

(3) 按比例画出各转动副的位置,应注意的是:转动副要画在两构件相对转动的转动中心上。

(4) 确定各构件的画法,画出各构件,连成图。应注意各移动副的方向必须与两构件相对直线运动的方向一致,而位置可以平移。

以图 1.1a)的机构为例,绘制其运动简图如图 1.1b),为了使绘制过程思路明确,可绘制如图 1.1c)的草图,列出各构件的直接接触关系及次序,根据两两接触构件相对运动轨迹判

定其运动副性质并标注在图中(对转动副用小圆表示,移动副用滑块和导杆表示),在画图时,可先把转动副 A, B, C 的小圆画好,随后就可以轻易地画出各构件了,对于只有转动副的构件,只需把表示转动副的小圆用直线连起来就表达完了,而对于组成移动副的两构件,可把一个构件画成滑块(长方形)而将另一构件画成导杆即可。

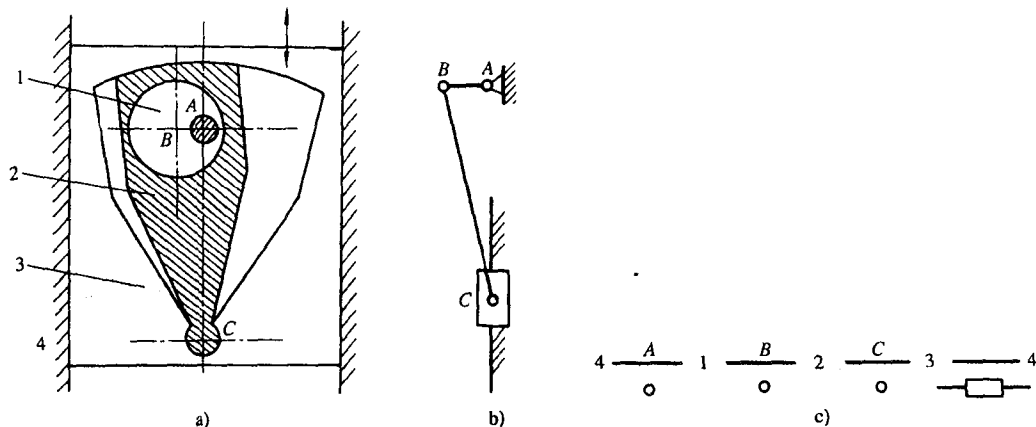


图 1.1 运动简图

读者可自行分析图 1.2a) 机构的运动简图, 见图 1.2。

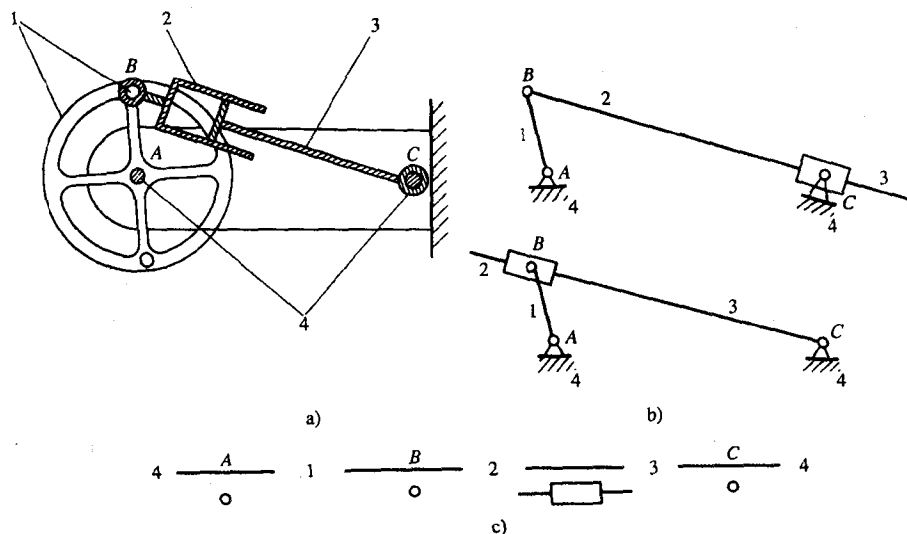


图 1.2 运动简图

1.1.3 机构的自由度计算

构件所具有的独立运动的数目(即确定其位置的广义坐标的数目),称为自由度数。一个可自由作平面运动的构件有三个自由度,每引入一个低副,系统就减少两个自由度,每引入一个高副,系统就减少一个自由度。我们称对构件独立运动的限制为约束。据此可知运动链的自由度数:

$$F = 3n - 2P_L - P_H \quad (1-1)$$

式中 n ——机构中的活动构件数(不包括机架);

P_L ——机构中低副的个数;

P_H ——机构中高副的个数。

一个机构具有 F 个自由度,就说明该机构需要 F 个广义坐标才能确定所有构件的位置,而原动件和机架组成低副之后,每个原动件只有一个自由度。既然每个原动件可输入机构一个坐标参数, F 个自由度的机构就需有 F 个原动件。如果 $F \leq 0$,则机构会变成不可动的桁架;如果原动件少于 F ,则机构中的某些构件的运动将是不确定的;如果 F 小于原动件数,则构件间的运动将会彼此矛盾而使机构被卡死或造成某些构件损坏。

在自由度计算中,会出现几种特殊情况:

(1) 局部自由度 与机构中其他构件的运动无关的自由度称局部自由度。在本科课程中,主要是为减少从动件磨损而设置的圆轮滚子。

(2) 复合铰链 各个构件若在同一处形成重合转动副,则由 n 个构件组成的复合铰链有 $n-1$ 个转动副。

在考试中,如以上两种情况在同一处出现时,转动副按复合铰链计算,而局部自由度可视为属于组成复合铰链的各个构件中的任一个。例如,图 1.3a) 中有两个转动副和一个局部自由度、一个高副,见图 1.3b)。

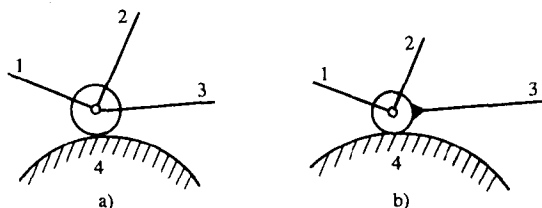


图 1.3 复合铰链与局部自由度

(3) 虚约束 虚约束是指机构中重复出现的不起真正约束作用的约束。判断虚约束是机构中结构分析的难点,但有以下线索可供大家参考:

1) 两构件在不止一处组成运动副。例如,图 1.4a) 为真实约束,图 1.4b) 中两构件组成一处以上的平行移动副,图 1.4c) 中两构件组成同轴转动副,图 1.4d) 中两构件组成两处公法线平行的高副,这些情况都会产生虚约束。

2) 两构件有重复传动的关系,如图 1.5 所示。

3) 机构中有平行四边形的结构,如图 1.6 所示。

4) 机构中有对称结构,如图 1.7 所示。

判定虚约束结构,有时是较复杂和困难的,初学者应进行必要的习题训练才能达到熟能生巧的程度。对上述 3)、4) 两种情况,往往在机构中存在有某一个构件,该构件与两个以上的构件组成运动副,而其中任意两个运动副已足以确定该构件的运动轨迹。这时如再有其他运动副使之沿相同运动轨迹运动,则产生虚约束,例如,图 1.6、图 1.7 中的上下往复运动构件和图 1.6b) 中的 AB 杆。

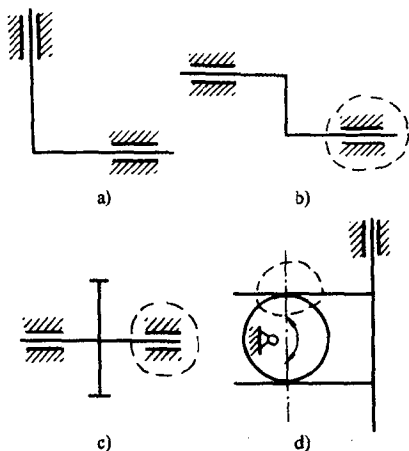


图 1.4 两构件组成两处运动副

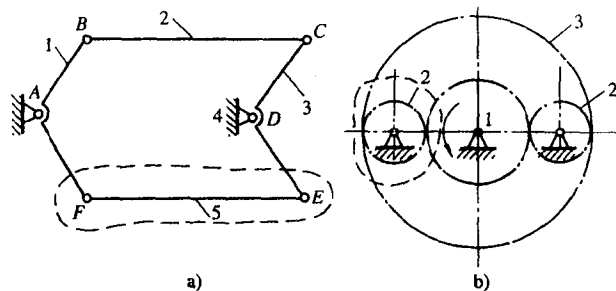


图 1.5 重复传动

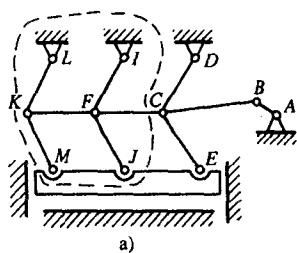


图 1.6 平行四边形结构

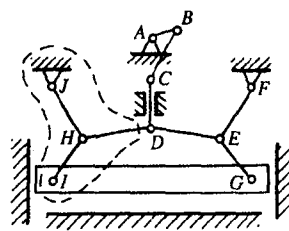


图 1.7 对称结构

1.1.4 用低副替代高副的方法

为使研究平面低副机构的分析方法适用于分析平面高副机构,可以用低副替代高副,但须满足以下两个条件:

- (1) 代替前后,两机构的自由度不变。
- (2) 代替前后,两机构的瞬时速度与瞬时加速度不变。

具体方法是:用两个新引入的低副和一个虚设构件代替一个高副。替代中的常见典型情形见图 1.8。在两构件组成高副的曲率中心各引入一个新的转动副。该两个转动副各归曲率中心所在的原构件,在两个转动副之间新引入一个虚设构件。

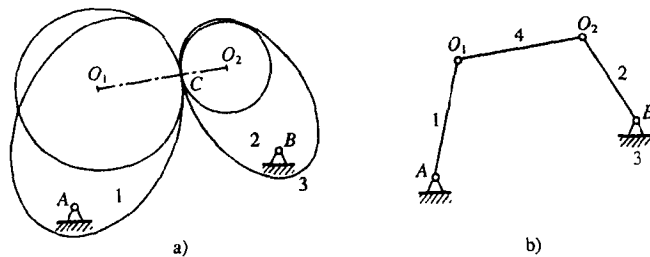


图 1.8 两曲线组成的高副

可以把直线看成是曲率中心位于无穷远的曲线。此时转动副演化为移动副,如图 1.9 所示。

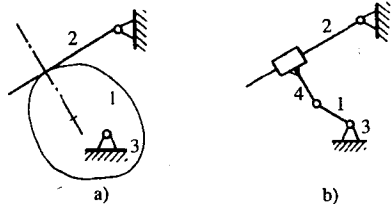


图 1.9 直线与曲线组成的高副

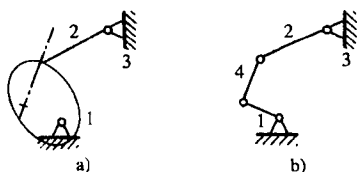


图 1.10 曲线与尖点组成的高副

尖底是曲率半径无穷小的曲线,其曲率中心就位于尖点处,如图 1.10 所示。

尤其要注意的是:高副低代之后,原构件上的各个运动副,要和在该构件与其他构件组成高副的曲率中心新增的那个低副表达为同一构件,而把原高副的构件轮廓擦去。

1.1.5 机构的组成原理

既然机构中与机架组成低副的每个原动件的自由度为 1,而机构的自由度数又等于原动件数,那么,去除了原动件的机构,剩余运动链的自由度数必为零。称自由度为零且不可再拆分的运动链为杆组。所谓不能再拆,就是说:如果再拆去构件或运动副,则自由度不再为零。

拆分杆组一定要在高副低代后进行,由于构件和运动副数不能有非整数解,常见的有两杆三副的Ⅱ级杆组和四杆六副的Ⅲ级杆组。拆分杆组应遵循以下原则:

- (1) 原动件不参加拆分,原动件不同,拆分结果就不同。
- (2) 只有拆不出更低一级杆组时,才试拆更高一级杆组。
- (3) 每拆去一个杆组,机构自由度不变。
- (4) 每个构件和运动副只能属于一个杆组。

1.2 常见疑难问题解析

(1) 判断图 1.11 所示两个运动简图是否表示同一机构。

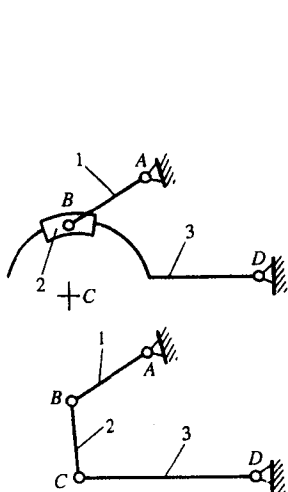


图 1.11 同构异形转化 1

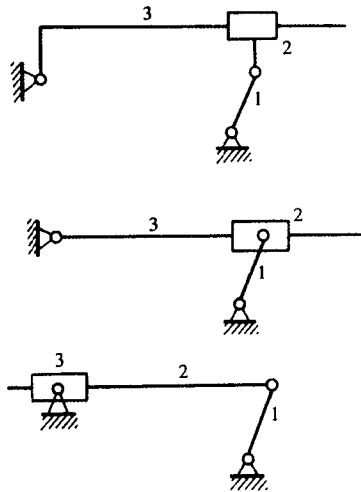


图 1.12 同构异形转化 2

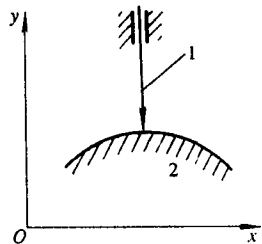


图 1.13 高副的约束

解 是。构件 2,3 在 C 点组成转动副。

注意 判定两构件运动副的性质要依据其相对运动轨迹,而不是表面上看到的外形。否则会误认为构件 2,3 组成移动副。

(2) 判断图 1.12 所示的三个运动简图是否表示同一机构。

解 是。移动副可以平移,但方向不能变,且在画运动简图时,对于组成移动副的两个构件可把其中任意一个画为导杆,另一个画为滑块(或摇块)。

(3) 有学生问:“在上课时,老师讲到高副的引入会减少一个自由度。组成高副的两构件不能沿其公法线方向移动,对于图 1.13 所示机构,如果把构件 1 沿公法线方向上移不是完全可以吗?”

解 不可以。因为这将使运动链解体,运动副将由于构件 1,2 不再接触而不存在。在实际设计中,总会采用必要的锁合方式避免这样的情况发生。在组成高副两个构件不分离的情况下,设曲线 2 的方程为 $y=f(x)$,则仅自变量 x 为主动变量,构件 1 尖底的位置仅一个主动变量。此外,在构件 1 尖底不动的情况下,构件 1 可绕尖底转动,所以,仅 y 坐标不是主动变量,不具有独立参变量资格。因此高副的引入只减少一个自由度。

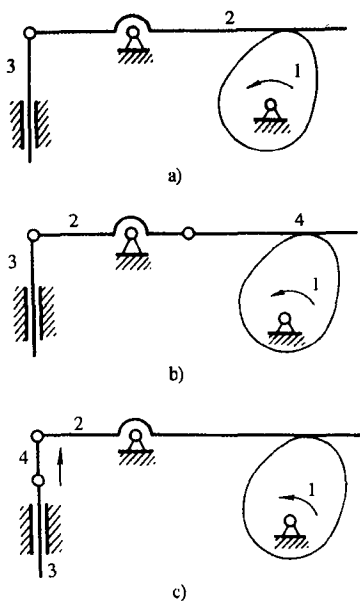


图 1.14 局部桁架

(4) 图 1.14 所示的三个机构,设计者的目的是通过凸轮 1 的转动使构件 3 作上下往复运动。问这三个机构中哪一个方案是正确的?

解 图 1.14c) 是正确的。图 1.14a) 的机构自由度为零,所以不会动。图 1.14b) 虽然自由度数为 1,但只能得到构件 4 的上下摆动,而构件 2,3 和机架组成了一个三构件与三低副的桁架,使构件 2,3 都不能动。这也是一些同学常犯的错误。

注意 如果机构中某些构件与机架组成的封闭运动链的自由度为零,则这些构件都不能动。

(5) 图 1.15 的机构中有两种拆分杆组的方案,你认为哪一种是正确的?

解 图 1.15c) 的方案是正确的,图 1.15d) 的方案是不少学生在解题中常犯的错误。从图 1.15d) 中可见:选择这一方案的学生只注意使各个杆组自由度为零,却忽略了每拆去一个杆组,机构的自由度不变这一重要的先决条件。这样,在拆去构件 4,5 后,事实上,构件 3,4 所构成的移动副已不存在,剩余的机构由构件 1,2,3,6,7 组成,自由度不再为 1。

为避免犯类似错误,一般在拆杆组中不应存在只有一个运动副的构件(如图 1.15d)中构件 4),或只属于一个构件的运动副。

在本题中还应注意构件 1,2 和机架在 A 点组成复合铰链,构件 5,6,7 在 B 点构成复合铰链。由于复合铰链处有两个转动副,所以可属于两个杆组。由于复合铰链判定不明而做错的学生也为数不少。复合铰链的转动副数为组成铰链的构件数减 1。

(6) 问图 1.16 中,有几个移动副? 几个转动副? 几个构件?

解 图中共计有移动副 2 个(机架 6 与滑块 4、滑块 4 与滑块 5),转动副 5 个(A, B, C 不

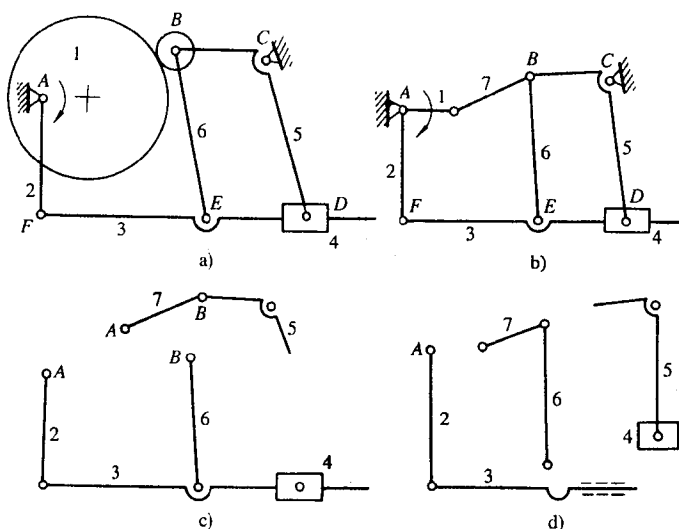


图 1.15 拆分杆组实例

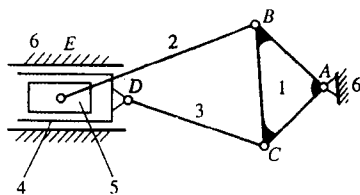


图 1.16 自由度计算实例

是复合铰链), 构件 5 个(指活动构件), 其自由度为:

$$F = 3 \times 5 - 2 \times 7 = 1$$

1.3 典型习题解答

题 1.1 绘制图 1.17 所示四个机构的运动简图。

解 图 1.17a) 中, 机架 4 与构件 1 在 A 点组成转动副; 构件 1 与构件 3 组成移动副(构件 3 只能在构件 1 上相对直线滑动), 构件 3 与构件 2 组成转动副而构件 2 与机架 4 在 B 点组成转动副。

图 1.17b) 中, 机架 1 与构件 2 在 A 组成转动副, 构件 2 与构件 3 在 B 组成转动副, 而构件 4 与 3, 1 均为移动副。

图 1.17c) 中, 构件 1 与机架组成 O 点的转动副, 构件 2 与 1 在 A 点组成转动副而与构件 3 在 AB 方向组成移动副, 构件 3 与机架在 B 点组成转动副。

图 1.17d) 中, 构件 1 与机架在 O 点组成转动副, 在 A 点与构件 2 组成转动副, 构件 2 与 3 在 BA 方向组成移动副而构件 3 与机架在 B 点构成转动副。

图 1.17 各机构的运动简图见图 1.18。

题 1.2 试绘制图 1.19 中两机构的运动简图, 答案已给出, 请读者自行分析, 见图 1.20。

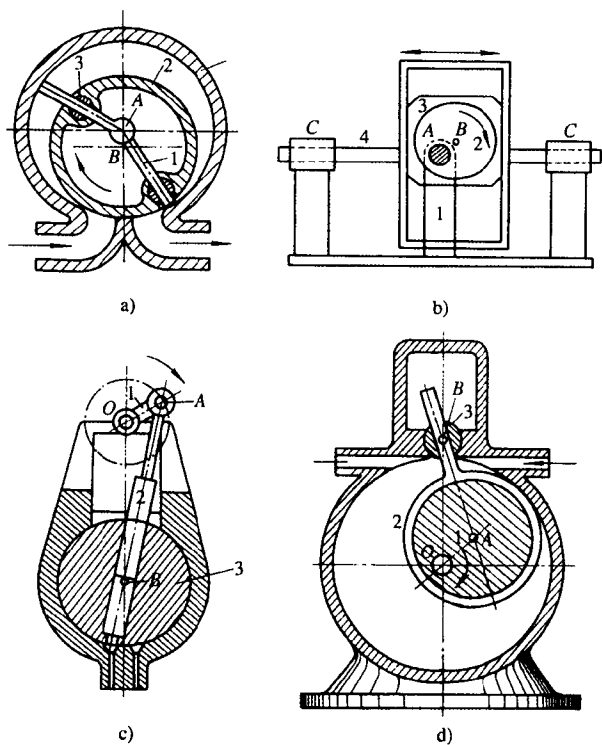


图 1.17

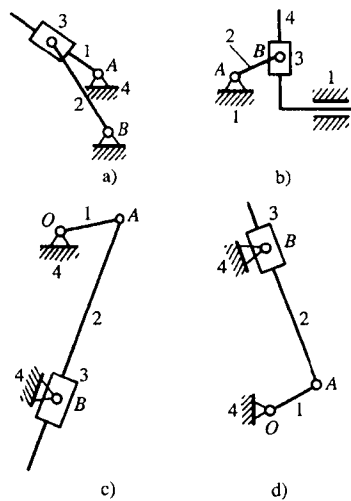


图 1.18

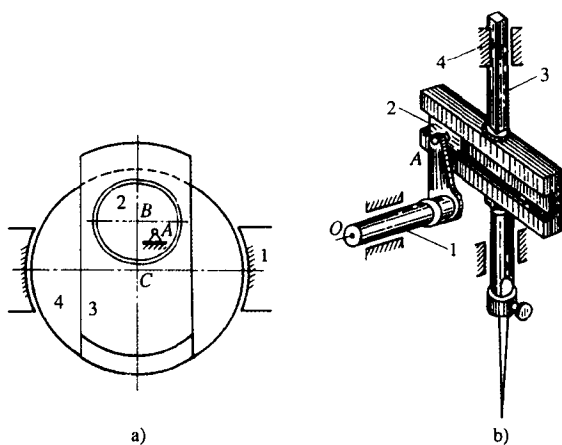


图 1.19

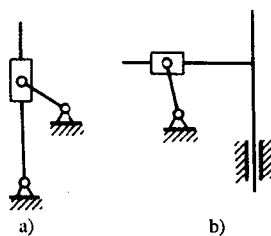


图 1.20

▲题 1.3 分析图 1.21a) 所示机构及其运动简图, 答案已给出 (图 1.21b)), 可由读者自行分析。

题 1.4 计算图 1.22 所示机构的自由度。

解 在计算本题中应注意: 大齿轮与凸轮都安装在一根轴上, 同步转动, 因此是同一构件。构件 3, 4, 5 组成的复合铰链有两个转动副, 构件 9 上的滚轮有局部自由度。图中齿轮之间、凸轮与滚轮间一共有两处高副。

自由度计算：

$$F=3 \times 9-2 \times 12-2=1$$

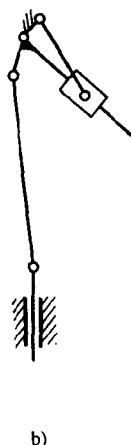
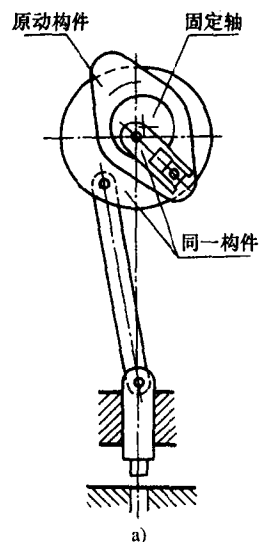


图 1.21

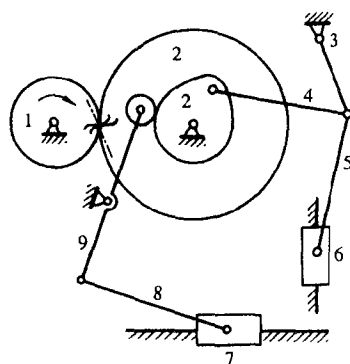


图 1.22

题 1.5 计算图 1.23 所示机构的自由度。

解 图中构件 2 上的滚子有局部自由度且构件 2 与构件 3, 1 均形成公法线平行的两处高副, 有虚约束。

自由度计算：

$$F=3 \times 4-2 \times 4-2=2$$

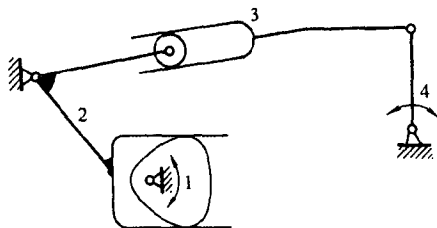


图 1.23

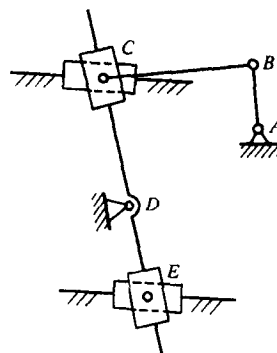


图 1.24

题 1.6 计算图 1.24 所示机构的自由度。

解 在 C 点的杆 BC 与两滑块形成复合铰链, 而 E 点是一个转动副和两个移动副, 不存在复合铰链。

自由度计算：

$$F=3 \times 7-2 \times 10=1$$

题 1.7 把图 1.25a) 所示的机构高副低代并计算自由度。

解 构件 1, 5 在 C 点组成高副, 构件 5 在 C 点是直线, 所以与增设构件 3 成移动副, 构件 1 在 C 点曲线的曲率中心在 E 点, 故与增设构件在 E 点组成转动副。

构件 1 与 2 在另一处组成的高副由构件 1 上的圆柱滚子与构件 2 的弧形滑槽组成。在接触点上, 构件 1 的曲率中心在 F 点, 构件 2 在接触点的曲率中心在 O 点。因此, 在 F 点和 O 点之间设一增加的构件 4, F, O 点各增设一个转动副分别是由构件 1, 4 和构件 2, 4 组成的。

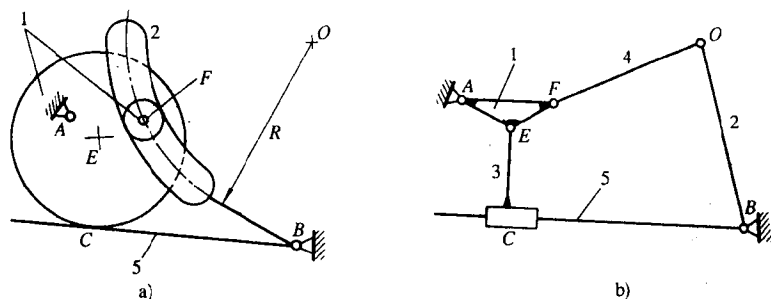


图 1.25

注意 新增的转动副 E, F 和原有转动副 A 均为构件 1 的运动副元素, 应表示为同一构件, 擦去原有表示高副的构件轮廓。同理, 转动副 O, B 同为构件 2 的运动副元素 (O 为构件 2 在原高副位置的曲率中心), 表示为同一构件, 擦去原高副的轮廓, 见图 1.25b)。自由度计算:

图 1.25a) $F = 3 \times 3 - 2 \times 3 - 2 = 1$

图 1.25b) $F = 3 \times 5 - 2 \times 7 = 1$

题 1.8 把图 1.26a) 中的机构高副低代并计算自由度。

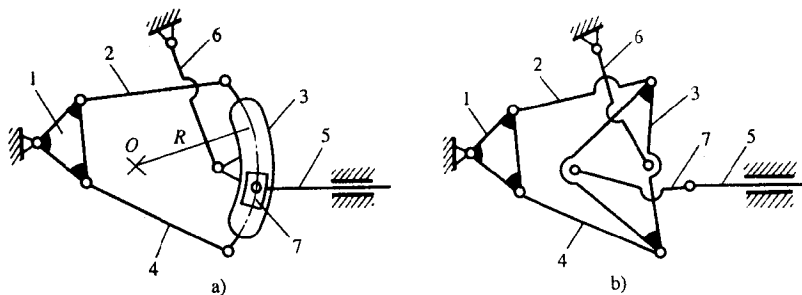


图 1.26

解 构件 3 与构件 7 的相对运动规迹为绕 O 点转动, 所以, 两构件在 O 点组成转动副。这一新增转动副应与构件 3 上其他运动副元素表示为同一构件, 见图 1.26b)。

自由度计算:

$$F = 3 \times 7 - 2 \times 10 = 1$$

题 1.9 把图 1.27a) 所示的机构高副低代。

解 见图 1.27b)。

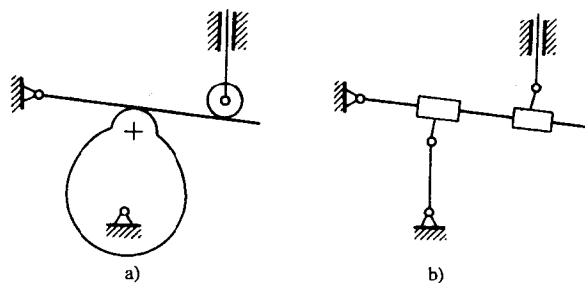


图 1.27

▲题 1.10 把图 1.28a) 的机构高副低代并拆分杆组, 取构件 1 为原动件。

解 构件 1, 2 两齿廓组成高副, 曲率中心分别在 C, B 。故增设构件 6 于 C, B 间且与构件 1, 2 分别在 B, C 形成转动副。构件 2, 3 在滚轮与滑槽间形成高副, 曲率中心分别位于 E, D 。故增设构件 5 于 E, D 间, 且与构件 2, 3 分别于 E, D 形成转动副。构件 1 的运动副元素为 O_1, A, B , 构件 2 的运动副元素为 O_2, C, E , 分别表示为同一构件, 见图 1.28b)。杆组拆分见图 1.28c)。

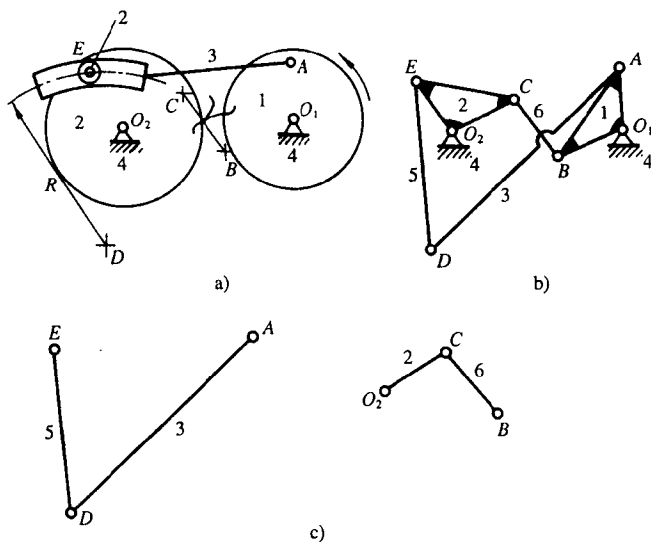


图 1.28

题 1.11 求图 1.29a) 所示机构的自由度, 随后高副低代并拆分杆组 (近机类学生仅要求计算自由度)。

解 构件 4 上的滚子有局部自由度, 构件 3 与机架有两处平行的移动副, 其中一处视为虚约束。

自由度计算:

$$F = 3 \times 6 - 2 \times 8 - 1 = 1$$

构件 3 与 4 组成高副, 构件 3 的曲率中心在 O 点, 因此, 高副低代后构件 3 有一个移动副和两个转动副。其高副低代机构见图 1.29b)。杆组拆分方案见图 1.29c)。

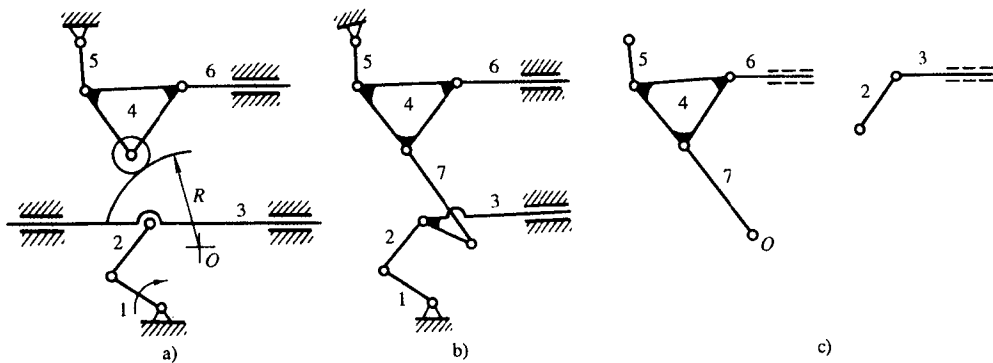


图 1.29

题 1.12 求图 1.30a) 所示机构的自由度, 随后高副低代并拆分杆组 (近机类学生仅要求计算自由度)。

解 $F = 3 \times 7 - 2 \times 9 - 2 = 1$

其中, 构件 4, 5, 6 构成一处复合铰链, 构件 2 上的滚子有局部自由度。

高副低代的方法见图 1.30b), 拆分杆组的方案见图 1.30c)。

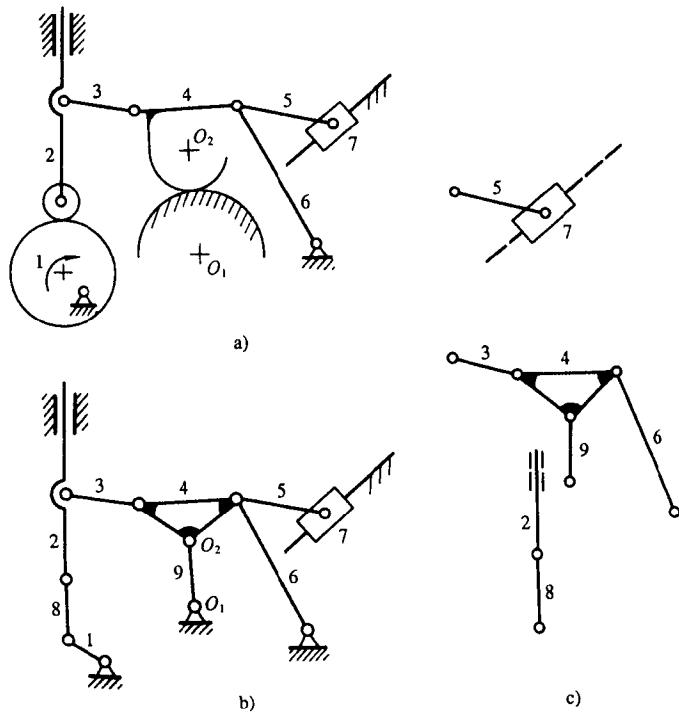


图 1.30

题 1.13 求图 1.31a) 所示机构的自由度, 随后高副低代并拆分杆组 (近机类学生仅要求计算自由度)。

解 $F = 3 \times 6 - 2 \times 8 - 1 = 1$