

普通高等教育  
兵工类规划教材

# 精密机构与结构设计

盛鸿亮 等 编著

北京理工大学出版社

# 精密机构与结构设计

盛鸿亮 等 编著

北京理工大学出版社



## 出版说明

遵照国务院国发[1978]23号文件精神，兵器工业总公司承担全国高等学校兵工类专业教材的规划、编审、出版的组织工作。自1983年兵工教材编审室成立以来，在广大教师的积极支持和努力下；在国防工业出版社、兵器工业出版社和北京理工大学出版社的积极配合下，已完成两轮兵工类专业教材的规划、编审、出版任务。共出版教材211种。这批教材出版对解决兵工专业教材有无问题、稳定教学秩序、促进教学改革、提高教学质量都起到了积极作用。

为了使兵工类专业教材更好地适应社会主义现代化建设需要，特别是国防现代化培养人才的需要，反映国防科技的先进水平，达到打好基础、精选内容、逐步更新、利于提高教学质量的要求，我们以提高教材质量为主线，完善编审制度、建立质量标准、明确岗位职责，建立了由主审审查、责任编委复审和教编室审定等5个文件。并根据兵工类专业的特点，成立了九个专业教学指导委员会和两个教材编审小组。以加强对兵工类专业教材建设的规划、评审和研究工作。

为贯彻国家教委提出的“抓好重点教材，全面提高质量，适当发展品种，力争系统配套，完善管理制度，加强组织领导”的“八五”教材建设方针。兵工教材编审室在总结前两轮教材编审出版工作的基础上，于1991年制订了1991~1995年兵工类专业教材编写出版规划。共列入教材220种。这些教材都是从学校使用两遍以上、实践证明是比较好的讲义中遴选的。专业教学指导委员会从兵工专业教材建设的整体考虑对编写大纲进行了审查，认为符合兵工专业培养人才要求，符合国家出版方针。这批教材的出版必将为兵工专业教材的系列配套，为教学质量的提高、培养国防现代化人才，为促进兵工类专业科学技术的发展，都将起到积极的作用。

本教材由陈贵耕主审，经兵器工业总公司光学技术专业教学指导委员会复查，兵工教材编审室审定。

限于水平和经验，这批教材的编审出版难免有缺点和不足之处，希望使用本教材的单位和广大读者批评指正。

中国兵器工业总公司教材编审室

1991年8月

# 前 言

本书是根据机械电子工业部教材出版计划和工科高校仪器仪表类专业的教学需要,在《精密机械设计基础》1986年修订版的基础上,按照新的编写主导思想和编写大纲重新撰写的。

本书撰写的主导思想是突出仪器设备中精密机械系统与结构设计最核心的精度问题,并将此作为一条主线贯穿全书。为此,进一步充实和加强了机构精度分析与精度设计的有关内容,使之更趋系统和完整,以体现精密机械设计的特点。同时,为了反映现代仪器设备的技术发展特点,除专门撰写了现代仪器设备中广泛用于信息传递的走带机构一章外,还与本书主要作者的电教录像作品《精密机械概览》相互呼应,在各章中以精密机械系统与结构在现代仪器设备中机电相互联系的大量应用实例和图例,更新替代了以往教材中较为陈旧的传统实例和图例。并从中引出精密机构与结构需要解决的设计问题进行分析、论述。使传统的机械学科增添了新的活力。

本书主要讨论仪器设备中精密机械运动系统的组成、功能、原理、结构、精度及其分析、计算、设计方法等方面的问题。但由于教材字数规定所限,仅就其中最重要、最基本、最常遇到的问题分为十章,着重从几何关系、运动关系和精度观点、结构观点进行比较系统、集中的论述。并汇集了大量应用图例和部分例题,力求例论结合、理论联系实际。对于未能编入的有关内容,可引导学员在课堂教学、课程设计、毕业设计和工程技术实践过程中,通过查阅参考书和设计手册拓宽知识面,以利于培养和提高学员运用参考文献资料、解决工程实际问题的独立工作能力。

本书也可作为从事仪器仪表、精密设备等有关专业工程技术人员的业务参考书。

参加本书撰写的有北京理工大学精密机械教研室盛鸿亮(第一、五、六、八、九章)、王惠敏(第三、四、七章)、太原机械学院程官太(第二章)、常州无线电工业专科学校任亿君(第十章)。杨文运为部分章节收集、整理和提供了很有价值的素材,苑敏燕绘制了本书全部插图图稿。全书由盛鸿亮负责主编,由装甲兵工程学院陈贵耕教授担任主审,高凤武教授进行复审。

本书的撰写和出版得到了北京理工大学樊大钧、丁汉章、查立豫、彭利铭、温业光等老师的关心和支持,精密机械教研室各位老师给予了协助与配合。本书教学中所需的习题及其例解,由王仲彬老师负责整理、采编,已列入北京理工大学出版计划。在此,谨向教材审稿人和对本书撰写、出版给予关心、支持和协助的各位同事,致以深切谢意。

由于撰写水平和时间所限,书中错误、疏漏和不妥之处在所难免,欢迎同行专家和广大读者批评指正。

编者

1991年11月于北京

# 目 录

## 第一章 设计概论

§1.1 概述 .....	1
一、精密仪器设备中机械系统与结构的功能和应用 .....	1
二、精密仪器设备产品结构的组成 .....	3
三、精密仪器设备对机械系统的基本要求 .....	3
§1.2 仪器设备中的运动系统 .....	4
一、机构的概念和组成 .....	4
二、机构具有确定运动的条件 .....	5
三、机构的基本类型 .....	7
§1.3 产品机械结构设计的基本原理和原则 .....	11
一、产品机械结构设计的运动学原理 .....	11
二、产品机械结构设计的工艺原则 .....	14
三、产品机械结构设计的价值原则 .....	16
§1.4 仪器机械系统与结构的精度 .....	16
一、基本概念 .....	16
二、误差分类与机构精度的含义 .....	17
三、机构精度计算的基本方法 .....	19
四、机构误差合成的基本方法 .....	23
五、机构精度分配的基本方法 .....	26
六、提高精度的基本途径 .....	28
七、尺寸链公差及其与机构精确度的关系 .....	33

## 第二章 仪器中的弹簧

§2.1 概述 .....	37
一、仪器中弹簧的功能 .....	37
二、仪器中弹簧的类型 .....	38
三、仪器中弹簧的材料及其许用应力 .....	39
§2.2 拉伸与压缩螺旋弹簧 .....	41
一、工作特点、应用实例与结构形式 .....	41
二、拉簧与压簧的结构参数及其计算公式 .....	44
三、拉簧与压簧的应力与变形 .....	46
四、弹簧力的电量变换 .....	50
§2.3 扭转螺旋弹簧 .....	55
一、工作特点、应用实例与结构及其参数 .....	55
二、扭转螺旋弹簧的应力与变形 .....	57
§2.4 片簧与游丝 .....	59
一、片簧 .....	59

二、游丝 .....	62
§2.5 热敏双金属片簧 .....	65
一、功能、原理和特性 .....	65
二、热敏双金属片簧的材料和应用 .....	66
三、热敏双金属片簧的设计计算 .....	68
§2.6 仪器中弹簧的特性误差 .....	70
一、弹簧的特性误差分析 .....	70
二、拉簧与压簧的精度等级及控制偏差的途径 .....	71

### 第三章 支承与轴系

§3.1 概述 .....	73
一、支承的组成和类型 .....	73
二、对支承的要求 .....	73
§3.2 滑动摩擦支承 .....	74
一、圆柱形支承 .....	74
二、其它形式支承 .....	80
§3.3 滚动摩擦支承 .....	84
一、标准滚动轴承 .....	84
二、非标准滚动轴承 .....	97
§3.4 精密轴系 .....	100
一、轴系的功能和要求 .....	100
二、评定轴系回转精度的指标 .....	101
三、几种常见的精密轴系及误差分析 .....	102
§3.5 流体静压支承简介 .....	109
一、液体静压支承 .....	109
二、气体静压支承 .....	112

### 第四章 直线运动导轨

§4.1 概述 .....	113
一、导轨的功能、组成和类型 .....	113
二、对导轨的基本要求 .....	114
三、导轨副的基本单元及组合 .....	114
§4.2 滑动摩擦导轨 .....	118
一、结构形式和特点 .....	118
二、推力方向和作用点对导轨工作的影响 .....	119
三、温度变化对导轨间隙的影响 .....	121
四、滑动摩擦导轨结构设计要点 .....	122
§4.3 滚动摩擦导轨 .....	124
一、滚动摩擦导轨的结构形式和特点 .....	124
二、滚动摩擦导轨主要参数的确定 .....	127
三、滚动导轨的材料和技术要求 .....	129
四、滚动导轨移动所需推力的计算 .....	130

§4.4 导轨精度分析 .....	131
一、燕尾形滑动摩擦导轨的精度分析 .....	131
二、V-平开式滚珠导轨的精度分析 .....	134
三、导轨副精度计算示例 .....	138

## 第五章 螺旋传动

§5.1 概述 .....	141
一、螺旋传动机构的组成、功能和类型 .....	141
二、螺旋传动机构的特点和应用实例 .....	141
§5.2 滑动螺旋的机构分析 .....	144
一、螺纹的类型和主要参数 .....	144
二、滑动螺旋副的形成及其运动规律 .....	144
三、滑动螺旋机构的运动形式 .....	145
四、滑动螺旋副的摩擦和效率 .....	147
§5.3 螺旋传动的精度与空回 .....	149
一、螺旋传动误差与空回误差的概念 .....	149
二、螺旋副的固有误差及其影响 .....	150
三、螺旋机构的装置误差及其影响 .....	154
四、螺旋机构中的变形及其影响 .....	155
五、提高螺旋传动精度与减少空回的方法 .....	156
§5.4 滑动螺旋传动设计 .....	159
一、滑动螺旋传动参数的选择和确定 .....	159
二、螺旋副的耐磨性与强度校核 .....	160
三、滑动螺旋副的材料与螺纹公差 .....	162
四、滑动螺旋传动的典型结构 .....	163
§5.5 滚珠螺旋副的结构 .....	165
一、滚珠螺旋副的结构形成 .....	165
二、滚球螺旋副的结构参数 .....	168
三、材料与热处理 .....	168
§5.6 滚珠螺旋副的性能和精度 .....	169
一、滚球螺旋副的性能 .....	169
二、滚珠螺旋副的精度 .....	172
三、滚珠螺旋副的标记代号 .....	173

## 第六章 齿轮传动

§6.1 概述 .....	175
一、齿轮传动的功能和应用 .....	175
二、齿轮传动的类型 .....	177
三、齿轮传动的特点和设计的基本要求 .....	178
§6.2 齿轮啮合原理 .....	179
一、齿廓啮合基本定律 .....	179
二、渐开线及其性质 .....	180

三、渐开线齿廓符合齿廓啮合基本定律 .....	181
四、渐开线齿廓啮合的优点 .....	181
§6.3 直齿圆柱齿轮传动 .....	182
一、齿轮的基本参数与几何尺寸计算 .....	182
二、渐开线齿轮的正确啮合条件 .....	183
三、根切现象与最少齿数 .....	185
四、直齿圆柱齿轮副设计 .....	186
§6.4 其它形式的齿轮传动 .....	187
一、齿轮齿条传动 .....	187
二、斜齿圆柱齿轮传动 .....	188
三、螺旋齿轮传动 .....	189
四、蜗杆蜗轮传动 .....	190
五、圆锥齿轮传动 .....	192
§6.5 齿轮传动系统的能量传递 .....	195
一、齿轮传动系统中的力矩和效率 .....	195
二、最佳总传动比 .....	198
三、总传动比的选择 .....	199
四、驱动电机及其选择注意的问题 .....	200
§6.6 齿轮系统传动方案与结构设计 .....	203
一、普通齿轮系统传动比的计算 .....	204
二、总传动比的分级和分配 .....	205
三、齿轮传动形式的选择 .....	208
四、齿轮传动系统的结构设计 .....	209
§6.7 齿轮传动的精度与空回 .....	212
一、齿轮传动的精度 .....	212
二、齿轮传动的空回 .....	215
三、提高齿轮传动精度与减少空回的方法 .....	217
§6.8 行星传动 .....	219
一、渐开线行星传动 .....	219
二、渐开线少齿差行星传动 .....	221
三、谐波传动 .....	222

## 第七章 挠性传动

§7.1 概述 .....	224
一、挠性传动的工作原理和特点 .....	224
二、挠性传动的类型和应用 .....	224
§7.2 胶带传动 .....	226
一、胶带传动的特性和应用 .....	226
二、传动部分的几何关系 .....	227
三、胶带传动过程中的受力分析 .....	228
四、胶带传动中的应力分析 .....	230
五、胶带传动的运动分析 .....	231

六、微型V带的设计计算	232
§7.3 绳传动	235
一、绳传动的特点和应用	235
二、绳传动的材料和结构	236
§7.4 弹簧带传动	237
一、弹簧带传动的特点和应用	237
二、设计计算	237
§7.5 同步带传动	240
一、同步带传动的特点和应用	240
二、同步带的结构、主要参数和规格	242
三、带轮的尺寸	244
四、同步带传动的安装要求	247
五、同步带传动的设计计算	247
六、同步带传动设计举例	253

## 第八章 凸 轮 机 构

§8.1 概述	255
一、凸轮机构的组成、功能及特点	255
二、凸轮机构的应用实例	255
三、凸轮机构的类型	256
四、凸轮机构的主要参数与基本要求	257
§8.2 推杆常用运动规律的选择	258
一、推杆位移线图与运动规律的选择原则	258
二、常用运动规律	259
§8.3 凸轮轮廓设计	262
一、凸轮轮廓设计的图解法简介	262
二、凸轮轮廓设计的解析法	264
三、推杆位移计算的增量系数法	266
§8.4 凸轮机构参数的确定	269
一、凸轮机构的压力角	269
二、压力角与基圆半径的关系	269
三、压力角的校核	270
四、滚子半径与凸轮最小曲率半径	270
§8.5 凸轮机构的误差分析	271
一、滚子直动推杆盘形凸轮机构误差分析	271
二、滚子摆杆盘形凸轮机构误差分析	271
§8.6 凸轮机构的结构	272
一、凸轮的结构及其与轴的联接	272
二、推杆尖底与滚子的结构	273
三、凸轮机构的闭合方法与结构	274
四、凸轮机构的材料及其热处理	274
§8.7 三角凸轮与心形凸轮及其应用	275

一、三角凸轮 .....	275
二、心形凸轮 .....	276

## 第九章 间歇运动机构

§9.1 槽轮机构 .....	278
一、槽轮机构的工作原理、应用及特点 .....	278
二、槽轮机构的运动特性和运动参数 .....	279
三、槽轮机构的结构与几何尺寸计算 .....	281
§9.2 棘轮机构 .....	283
一、棘轮机构的工作原理和类型 .....	283
二、棘轮机构的应用与转角的调整方法 .....	285
三、棘轮机构参数的选择与几何尺寸计算 .....	288
四、棘轮机构的结构和材料 .....	289
§9.3 其它类型间歇运动机构简介 .....	290
一、不完全齿轮机构 .....	290
二、凸轮间歇运动机构 .....	290
三、擒纵机构 .....	291

## 第十章 走带机构

§10.1 概述 .....	292
一、走带机构的功能和组成 .....	292
二、走带机构的类型和应用实例 .....	293
三、设计走带机构的基本要求 .....	295
§10.2 带的类型与信息记录方法 .....	295
一、带的类型 .....	295
二、记录信息的方法 .....	297
§10.3 输带部件 .....	300
一、摩擦轮输带部件 .....	300
二、啮合式输带部件 .....	303
§10.4 收带部件和供带部件 .....	305
一、收带部件——卷绕装置 .....	306
二、供带部件 .....	308
三、制动部件 .....	309
§10.5 导向部件和带速控制方法 .....	313
一、导向部件 .....	313
二、带速控制方法 .....	314
附录 .....	318
附录表 1 常用材料的线膨胀系数 .....	318
附录表 2 常用金属材料热处理后可能达到的硬度值 .....	318
附录表 3 光滑圆柱体优先配合的选用说明 .....	319
附录表 4 精密机械用配合 .....	320
附录表 5 表面粗糙度数值的应用范围 .....	321
主要参考文献 .....	323

# 第一章 设计概论

## §1.1 概 述

### 一、精密仪器设备中机械系统与结构的功能和应用

在生产和科学实验过程中，精密仪器设备越来越广泛地应用在工业、农业、国防和科学技术现代化建设的各个领域，成为具有信息采集、处理、传递、转换、存储、显示和控制等各种功能的高级工具。随着微电子技术、传感技术、激光技术和计算机应用技术的发展，现代精密仪器设备正沿着自动化、光机电一体化和智能化的方向蓬勃发展，成为光、机、电、算多种技术应用的综合技术系统。目前，纯机械的仪器设备虽已不能适应高技术发展的需要，但精密机械系统与结构依然是现代精密仪器设备发展的基础和必不可少的重要组成部分。各种科学的最新成果和先进的技术系统欲成为具有实用价值的仪器设备，都不可能完全脱离机械系统与结构而独立存在。大量技术实践证明，在仪器设备的研制、生产和使用过程中，精密机械系统与结构的质量优劣直接影响仪器设备的性能指标和可靠性。可以认为，没有精密的机械系统与结构，就不可能产生高质量的精密仪器设备。因而在仪器设备中，精密机械系统与结构占有无可置疑的重要地位。

组成精密机械系统与结构的零部件和机构种类繁多，它们各自的功能和作用多种多样，但可概括为两个主要方面：

a. 通过各种传动机构及其相互组合，构成精密仪器设备中具有确定运动规律的执行机构或相对活动系统，以实现运动、能量和信息的传递、转换、控制、显示和记录，以及完成精密仪器设备功能所要求的各种动作。

b. 通过机座、机壳等各种基体零部件和紧固件的组合，构成精密仪器设备中机构的机架和支承系统，以实现仪器设备中各种元器件的刚性或弹性联接、固定和调整，保证各元器件获得所要求的、确定的和稳定的相对位置。

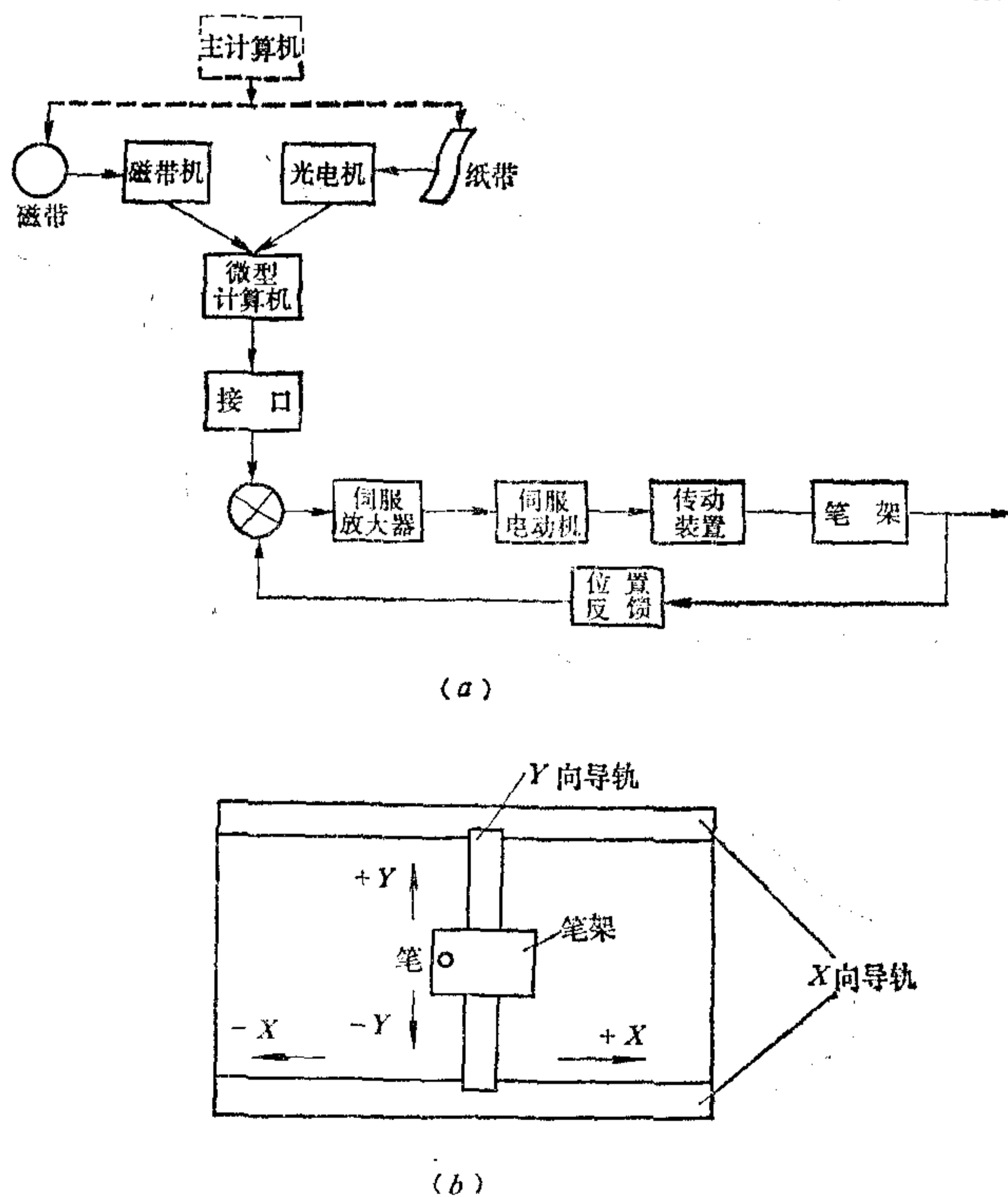


图 1-1 数控绘图仪原理示意图

精密机械系统与结构的应用实例之一是数控绘图仪中的机械装置。数控绘图仪是根据电子计算机输出的离散数字信息，经过处理，高速度、高精度地将原来的连续模型以绘制图形的形式输出的装置。它的出现和应用对设计工作是一大飞跃，它既可作为主计算机的一种终端联机使用，也可与主计算机脱机使用，其系统原理图如图 1-1(a) 所示。主计算机将处理过的图形信息存储在磁带或穿孔纸带上。自动绘图时，绘图仪就将这些图形信息通过磁带机或光电机输入，与绘图仪配套的微型计算机进行信息处理，然后通过插补器发出一系列 X、Y 方向的指令脉冲，经过伺服放大器、伺服电动机、传动装置，最后使笔架上的画笔进行 X、Y 方向的合成运动，绘出图形。图 1-1(b) 所示为平台式数控绘图仪构造示意图，它主要由绘图平台、X 向导轨、Y 向导轨、传动装置和笔架等部分组成。其中

a. 绘图平台：台面通常由硬质橡胶构成，上面有许多小孔、与真空吸附装置相通，以便固定图纸。

b. 导轨与横梁：X 向导轨位于平台两侧，Y 向导轨装在横梁上，横梁由两端的滑座支承在 X 向导轨上。

c. 传动装置：X 向传动装置由齿轮减速器和齿轮齿条机构组成，Y 向传动装置由齿轮减速器和滚珠螺旋机构组成。

d. 笔架：笔架支承在 Y 向导轨上，它在导轨上的移动是由电机驱动并通过滚珠螺母在螺杆上的移动而实现的。它与由电机驱动使横梁在 X 向导轨上的移动组合实现画笔的绘图。

而笔架按计算机的指令要求可自动抬笔和落笔。

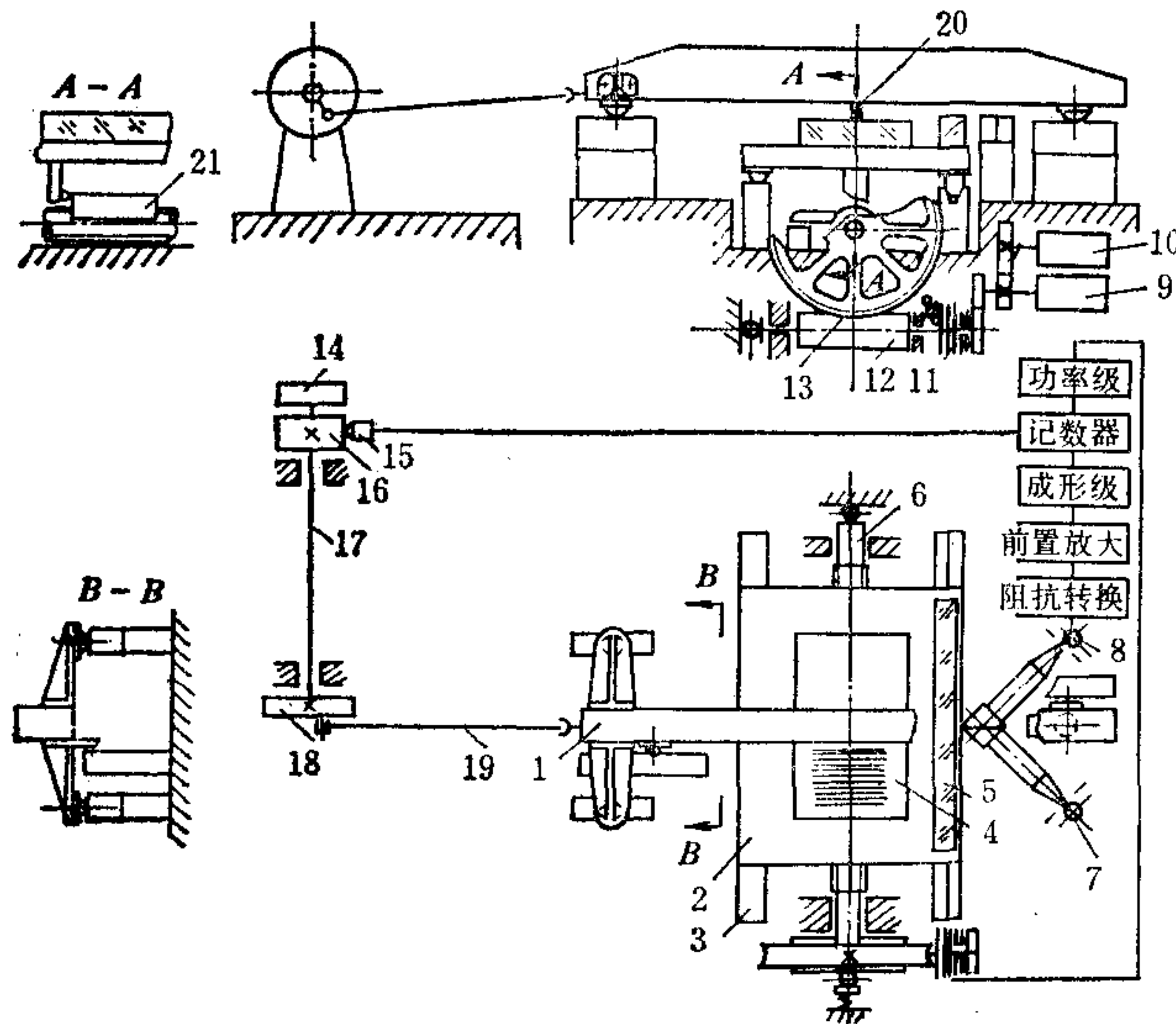


图 1-2 衍射光栅刻划机示意图

精密机械系统与结构的应用实例之二是衍射光栅刻划机的机械装置。衍射光栅刻划机是刻划衍射光栅(物理光栅)高精度的精密设备之一。图 1-2 所示为长春光学精密机械研究所研制的衍射光栅刻划机结构原理示意图，它由刻线系统和分度系统两大部分组成。刻线系统是由电动机 14 带动曲柄滑块机构中的曲柄盘 18、连杆 19，使刀桥 1 与小刀架及钻石刻刀 20 作往复直线移动。工作行程时划线，回程时抬刀。分度系统采用光电控制、使光栅毛

坯作间歇分度。当小刀架刻线终了抬刀后，由电动机 14 带动的惯性轮 16 上的凸块触动开关 15，使离合器 11 吸合，由力矩电动机 9 通过齿轮传动与离合器 11 带动蜗杆 12，蜗轮 13 和螺杆 6 转动，并使承载光栅毛坯的工作台 2 沿导轨 3 作微量进给移动。当工作台上的光栅尺 5 移动到规定距离，计数器发出信号切断开关，使离合器脱开，工作台停止微量进给移动，从而实现分度系统的间歇分度。此时刀桥刚好开始刻线，然后又触动开关，继续下一个工作循环。

从以上两个应用实例简介中，不难初步了解精密机械系统与结构在仪器设备中的基本功能和作用。

## 二、精密仪器设备产品结构的组成

任何一部比较复杂的精密仪器设备产品，按照结构和工艺的观点，均可视为由若干零件、部件和组件组成。

(1) 零件 又称元件，是产品的基础，是组成产品的最基本成分，是一个不经破坏不可分解的单一整体，是一种不采用装配工序而制成的成品。零件通常是用一种材料经过所需的各种加工工序制成的，如螺钉、弹簧、轴等。

(2) 部件 又称器件，是生产过程中由加工好的两个或两个以上的零件，以可拆联接或永久联接的形式，按装配图要求装配而成的一个单元。其目的是将产品的装配分成若干初级阶段，也可以作为独立的产品，如滚动轴承、直线导轨、减振器等。

(3) 组件 又称整件，是由若干零件和部件按装配图要求，装配成的一种具有完整机构和结构，能实施独立功能，能执行一定任务的装置，从而将比较复杂产品的装配分成若干高级阶段，或作为独立的产品，如减速器、计数器、限动器、阻尼器等。

(4) 整机 是由若干组件、部件和零件按总装配图要求，装配成的完整的仪器设备产品。整机能完成技术条件规定的复杂任务和功能，并配备所需的一切配套附件，如录放机、复印机、摄像机、放映机等。

## 三、精密仪器设备对机械系统的基本要求

一般来说，精密仪器设备中的机械系统与结构与普通机械设备的结构并没有截然不同的区别，即它们具有某些共同特征。因此，衡量精密仪器设备中机械系统与结构的质量标准，同样也是技术性能指标和经济指标的两个方面。技术性能指标主要是针对产品的系统和结构能否满足技术条件规定的功能和使用技术性能要求；经济指标则主要是针对产品的结构能否经济地进行生产、满足成本和经济效益的要求。但是，由于精密仪器设备与普通机械设备的功能和使用环境条件不同，因此，技术性能指标和经济指标两方面的内容和侧重点，各有其不同的特点。通常精密仪器设备对机械系统与结构的基本要求，可概括为以下几个方面：

(1) 功能特性要求 是最基本的技术要求。对于机械系统主要体现为执行机构运动规律和运动范围的要求。

(2) 精度要求 是最重要的技术性能要求。对于机械系统主要体现为对执行机构输出部分的位置误差、位移误差和空回误差的严格控制。

(3) 灵敏度要求 执行机构的输出部分应能灵敏地反映输入部分的微量变化。为此，必须减小系统的惯量、减少摩擦、提高效率，以利于系统的动态响应。

(4) 刚度要求 构件的弹性变形应限制在允许的范围之内，以免由弹性变形引起运行误差和影响系统的稳定性及动态响应。

(5) 强度要求 构件应在一定的使用期限内不产生破坏，以保证运动和能量的正常传递。

(6) 各种环境下工作稳定性要求 系统和结构应能在冲击、振动、高温、低温、腐蚀、潮湿、灰尘等恶劣环境下，保持工作的稳定性。

(7) 结构工艺性要求 结构应便于加工、装配、维修；应充分贯彻标准化、系列化、通

用化等经济原则，以降低成本、提高效益。

(8)使用要求 结构应尽量紧凑、轻便，操作简便、安全，造型美观，携带、运输方便。

无论是新产品的研究设计或对已有产品的改进或改装，它们的机械系统与结构都应满足技术性能和经济性两个方面所提出的各种基本要求。这些技术性能要求和经济性要求中，有些往往是互相矛盾的。设计工作就在于通过多方面的调查、研究、参阅文献资料、分析、论证、构思、试验、评估、择优等过程，确定出合理的功能原理方案。再经过选择、计算、绘图等交错进行的工作，完成定性、定量设计的全部技术图纸和资料文件，全面地满足产品和结构各方面的质量指标和各种要求。然后，经过试制、试验，进一步修改设计，使之更趋完善。

## §1.2 仪器设备中的运动系统

### 一、机构的概念和组成

仪器设备的运动系统是根据并为实现仪器设备的功能要求而设计、选择的若干具有确定

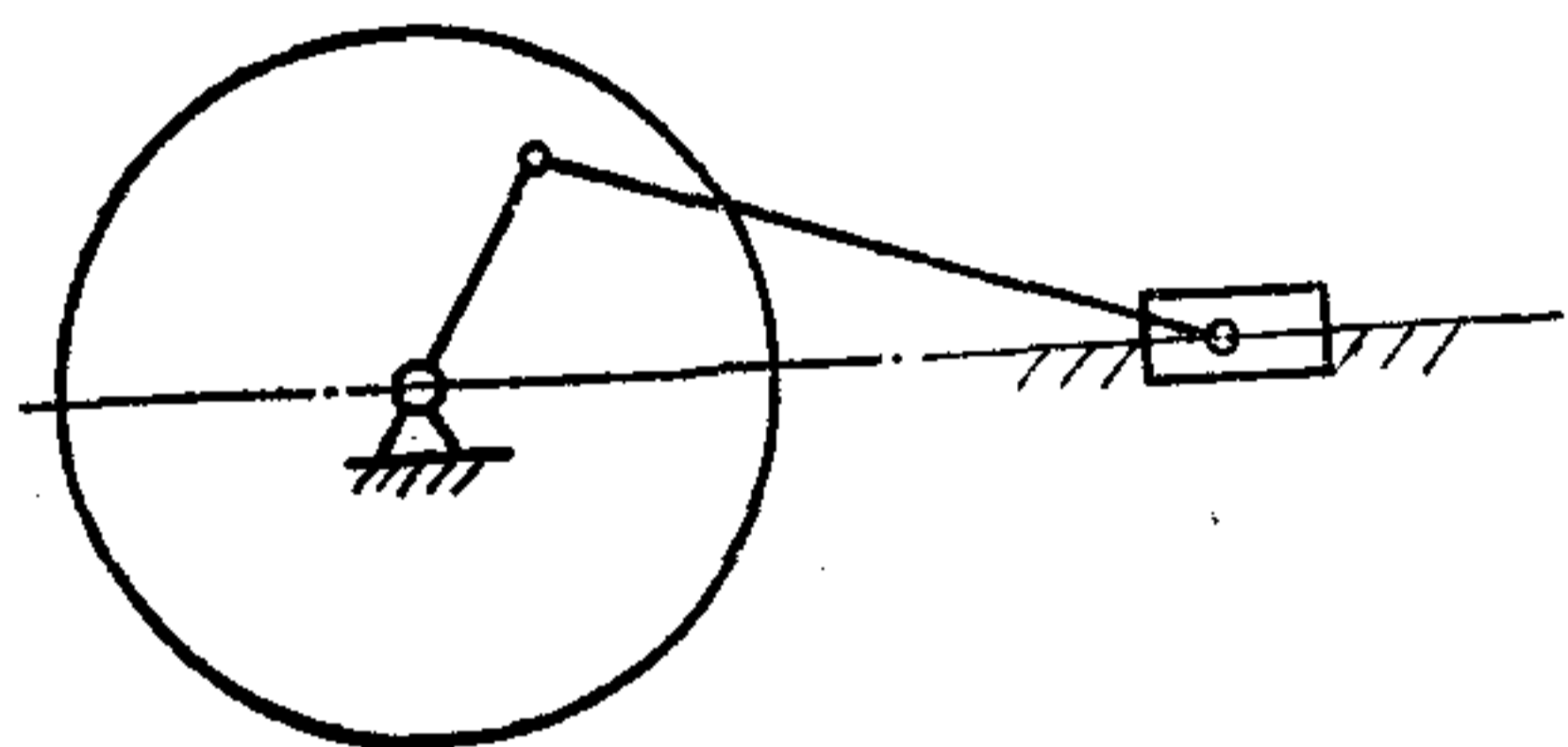


图 1-3 曲柄滑块机构简图

运动规律的构造组合，即运动系统是—种或若干种机构的相互组合。机构是机械系统的运动基础和重要组成部分，没有机构便不成为机械。所谓机构是一种人为的实物组合，其各组成部分之间具有确定的相对运动关系，其作用是传递或变换运动。同时也传递力和能量。

图 1-2 所示衍射光栅刻划机中，由曲柄盘 18、连杆 19、刀桥 1 和机座组成的曲柄滑块机构简图，如图 1-3 所示。组成机构的各相对运动部分均称为构件。构件可以是单一的零件，也可以是由若干彼此不能产生相对运动、刚性连接的零件所组成。构件是运动的单元，而零件则是制造的单元。

机构中固定不动或相对固定不动、并支承运动部分的构件称为机架，或称固定构件(如机座)。当整个机构或随其整机相对于地球运动时，通常仍将机架视为相对静止，即仍以机架为基准来研究机构各构件的相对运动关系。

机构中所有相对于机架运动的构件均称为运动构件。受驱动外力直接作用的运动构件称为原动件，或称起始构件(如图中曲柄)。原动件总是直接与机架构成活动连接。在原动件的推动下，其余所有被直接或间接推动的构件均称为从动件。

机构中的每一构件至少必须与另一构件相连接。凡使两构件直接接触而又能保留一定相对运动的连接称为运动副。组成运动副的活动连接是通过构件之间点、线、面的接触来实现的。运动副按接触情况的不同可分为低副和高副。凡为面接触的运动副称为低副，凡为点或线接触的运动副称为高副。

将若干构件用运动副连接后称为运动链，首尾构件相连的运动链称为封闭运动链。若将封闭运动链中的某一构件固定，当其中一个或两个构件相对于固定构件按已知规律运动时，其余构件均作确定运动，该运动链即成为机构。

## 二、机构具有确定运动的条件

### 1. 自由度与约束

两个构件在组成运动副前是完全独立并且互不相关的。决定平面运动构件位置的独立参变数有三,如图 1-4(a)所示。即构件上任一点  $A$  的坐标  $x$ 、 $y$  及其上任一直线  $\overline{AB}$  的倾角  $\alpha$ 。当三个参变数变化时,构件相应地有三个独立运动,即沿  $X$ 、 $Y$  两轴的移动和绕  $A$  点转动。构件的独立运动称为它的自由度,亦即平面运动的独立构件具有三个自由度。而决定空间运动构件位置需要六个独立参变数,分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  和  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ ,如图 1-4(b)所示。亦即空间运动构件对任一选定的坐标系都具有六个自由度。

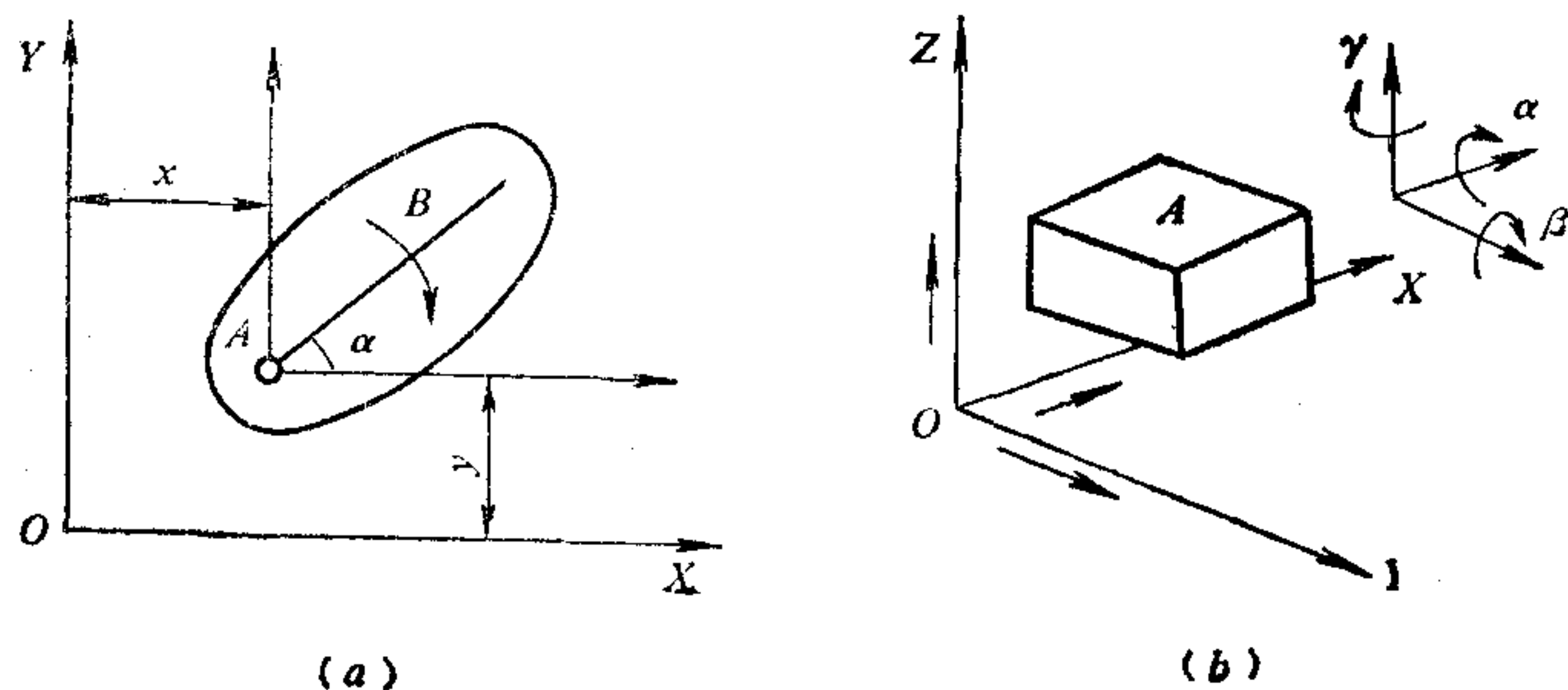


图 1-4 决定构件位置的独立参变数

当两构件组成运动副后,使其独立运动受到某些限制,从而自由度随之减少。这种加于构件独立运动的限制称为约束。对独立构件每引入一个约束,构件便失去一个自由度。对于平面运动构件,如以  $R$  表示对构件引入的约束数,  $F$  表示构件保留的自由度数,则有

$$F + R = 3 \text{ 或 } F = 3 - R$$

当两构件组成运动副后,所引入的约束数应满足:  $0 < R < 3$ 。具有两个约束而保留一个自由度的运动副如图 1-5 所示。图(a)中两构件组成的运动副沿圆柱面接触,仅能绕  $X$  轴相对转动,称为转动副。图(b)中两构件组成的运动副沿矩形柱面接触,仅能沿  $X$  轴方向相对移动,称为移动副。由于两者均为面接触,均属平面低副以  $P_L$  表示。可见平面低副 或为转动副,或为移动副。二者必居其一。具有一个约束而保留两个自由度的运动副如图 1-6 所示。

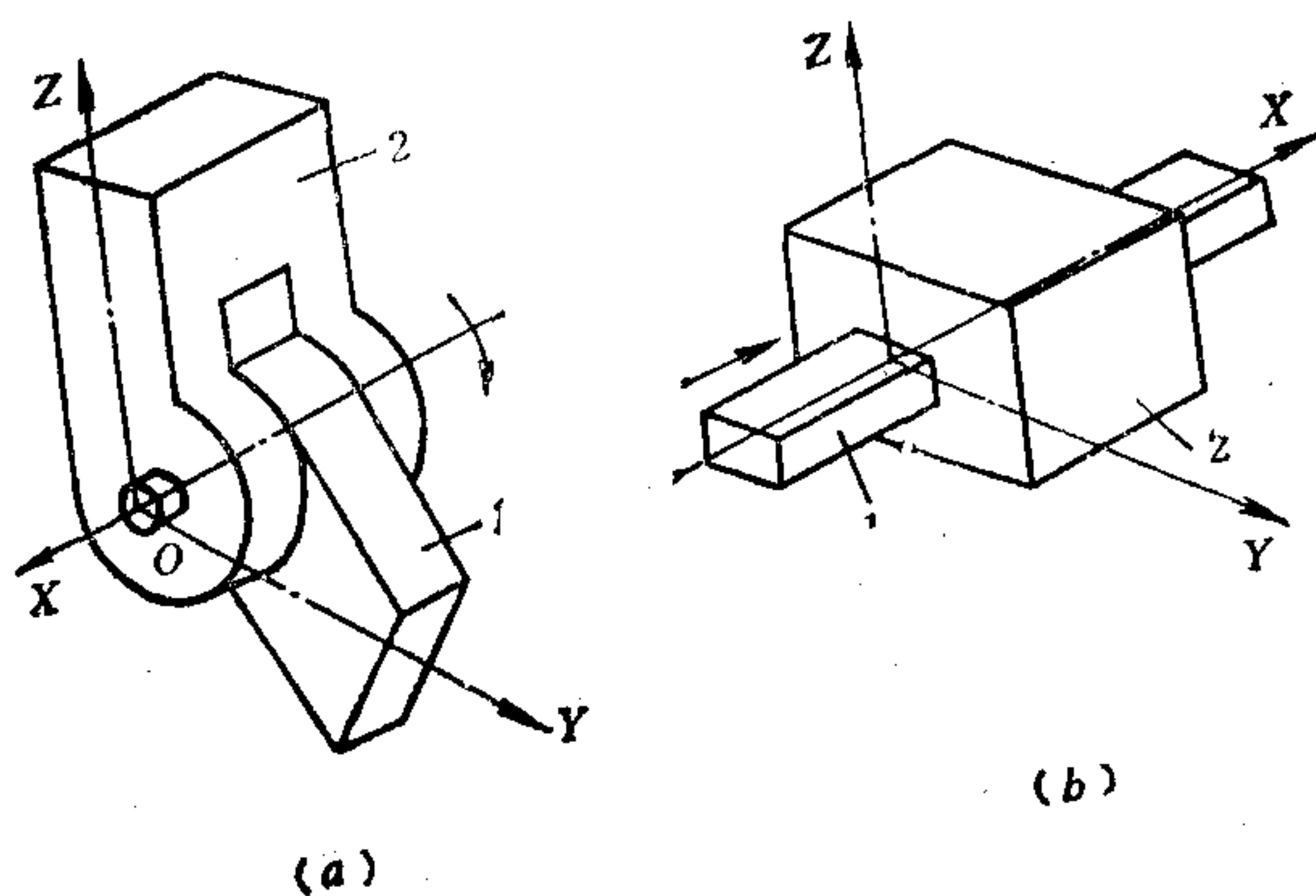


图 1-5 具有一个自由度的平面低副

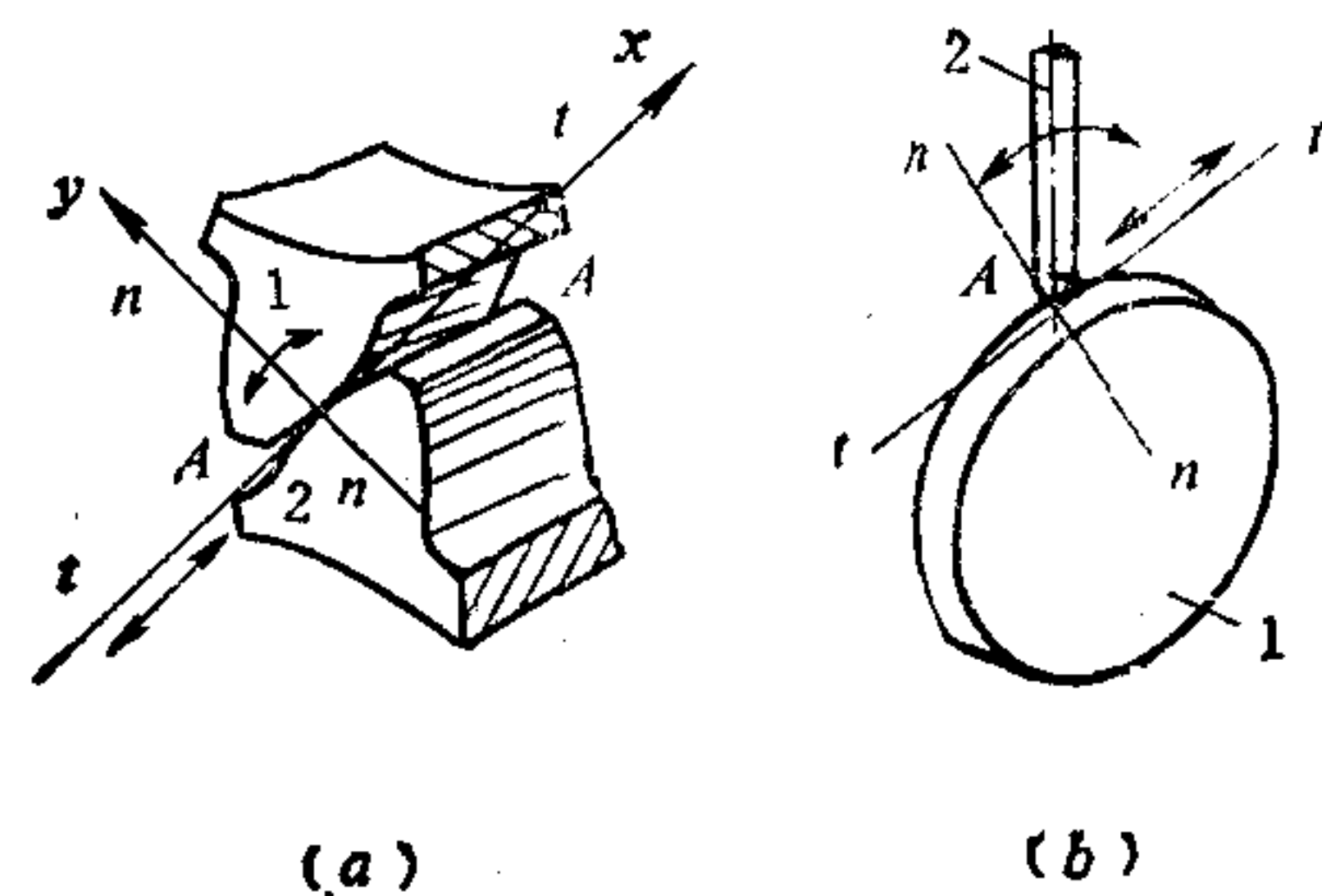


图 1-6 具有两个自由度的平面高副

图(a)中由一对齿轮的两个轮齿以直线接触组成的运动副,沿接触线公法线  $n-n$  方向的移动受到约束,而保留沿公切线  $t-t$  方向移动和绕接触线  $\overline{AA}$  相对转动的两个自由度。图(b)中凸轮

1 轮廓曲面与尖底推杆 2 以点接触组成的运动副，沿接触点法线  $n-n$  方向的移动受到约束，而保留沿切线  $t-t$  方向移动和绕接触点  $A$  转动的两个自由度。由于它们分别为线接触和点接触，故均属平面高副，以  $P_H$  表示。

## 2. 机构的自由度

设平面封闭运动链中具有  $n$  个运动构件，在未组成运动副和运动链之前具有  $3n$  个自由度。若组成运动链时由  $P_L$  个平面低副引入了  $2P_L$  个约束，由  $P_H$  个平面高副引入了  $1P_H$  个约束。则该运动链相对于机架的自由度称为机构的自由度，以  $W$  表示。则有关系式

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

称为平面机构的结构公式。

图 1-7(a) 所示铰链四杆机构中， $n=3$ ， $P_L=4$ ， $P_H=0$ ，由式(1-1)得机构的自由度

$$W = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 3 - 2 \times 4 - 0 = 1$$

图 1-7(b) 所示尖底直动式凸轮机构中， $n=2$ ， $P_L=2$ ， $P_H=1$ ，由式(1-1)得机构的自由度

$$W = 3n - 2P_L - P_H = 3 \times 2 - 2 \times 2 - 1 = 1$$

上述两机构的自由度均为 1，即只有一个独立运动。而机构中每个原动件也只有一个独立运动。亦即该机构只有一个原动件。只要给定原动件 1 任意转角  $\psi$ ，其余从动件的位置均可随之确定。机构即可获得确定的运动。

当机构活动度数大于原动件数时，运动链的运动不确定<sup>[5]</sup>；当机构活动度数小于原动件数时，运动链将不能运动，成为桁架。如迫使原动件运动时，运动链的薄弱环节将受到破坏<sup>[5]</sup>。

综上所述可知，机构具有确定运动的条件是：机构的自由度必须大于零，且机构中的原动件数应等于机构的活动度数<sup>[6]</sup>。

## 3. 确定机构自由度时应注意的问题

确定机构自由度时应注意处理好以下问题。

(1) 局部自由度 在图 1-7(b) 所示凸轮机构中，为改善点接触高副的摩擦和磨损情况，用滚子 4 代替推杆的尖底，如图 1-8(a) 所示。根据式(1-1)，计算得  $W = 3 \times 3 - 2 \times 3 - 1 \times 1 = 2$ ，表明需要两个原动件，机构运动才能确定。但实际上滚子绕其自身轴线的自由转动并不影响机构从动件的运动规律，计算结果与实际不符，因而这种对整个机构运动无关的自由度称为局部自由度。在确定机构自由度时应除去不计，并将滚子与推杆视为一体，如图 1-8(b) 所示，对机构的运动规律毫无影响。根据式(1-1)再计算机构自由度得  $W = 3 \times 2 - 2 \times 2 - 1 = 1$ ，与尖底情况相符。

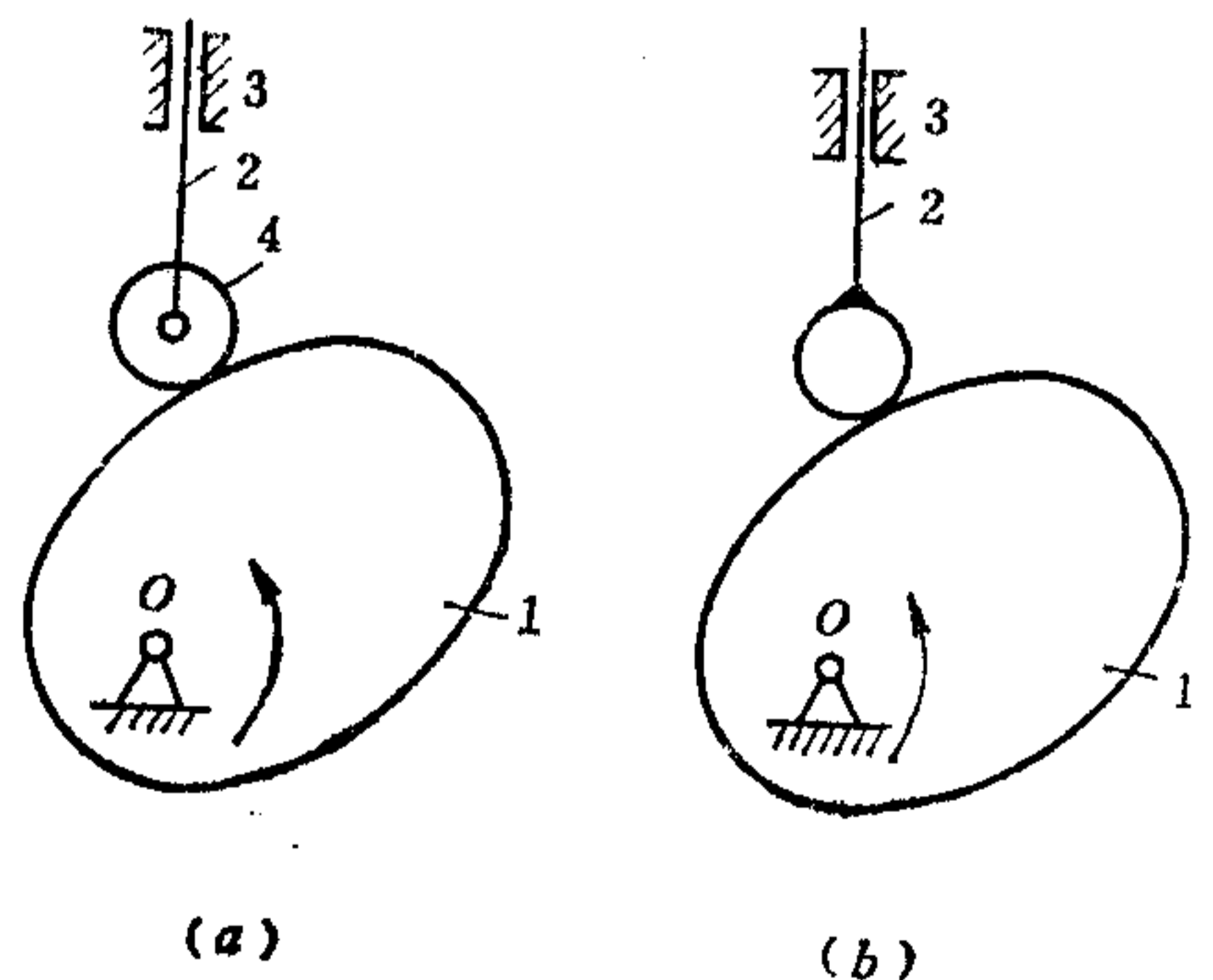


图 1-8 滚子构件的局部自由度

(2) 复合铰链 由两个以上的构件在同一轴线上活动连接组成的转动副称为复合铰链，如图 1-9(a) 六杆机构中的铰链 C 所示。如作为一个转动副，根据式(1-1)计算得  $W = 3 \times 5 -$