

# 精密机械

401室

北京工业学院

1974年6月

# 毛主席语录

我们的教育方针，应该使受教育者在德育、智育、体育几方面都得到发展，成为有社会主义觉悟的有文化的劳动者。

教育必须为无产阶级政治服务，必须同生产劳动相结合。

不破不立。破，就是批判，就是革命。破，就要讲道理，讲道理就是立，破字当头，立也就在其中了。

学制要缩短。课程设置要精简。教材要彻底改革，有的首先删繁就简。

练兵方法，应开展官教兵、兵教官、兵教兵的群众练兵运动。

政治和经济的统一，政治和技术的统一，这是毫无疑义的，年年如此，永远如此。这就是又红又专。

自然科学是人们争取自由的一种武装。……人们为着要在自然界里得到自由。就要用自然科学来了解自然，克服自然和改造自然，从自然界里得到自由。

## 前 言

遵照毛主席“学制要缩短。课程设置要精简。教材要彻底改革，有的首先删繁就简。”的教导，经过下厂调查研究，我室为军用光学仪器机械结构专业编写了这本教材。内容以瞄准、观测、摄影等专业仪器中机械零件、组件的设计和计算为主。

为了适应工农兵学员自学，探索编写经验，各章编写时的逻辑方法并未统一，拟经试用后，逐步统一。

本教材的主要辅助工具书是《精密机械设计手册》，因此，许多设计表格、公式、数据、参考结构都未列入教材中，设计实践需要时，可查阅手册。

由于我们对毛主席的无产阶级教育革命思想领会不深，对国内生产实际调查不够，对工农兵学员了解还少，加上时间仓促，教材中一定有不少错误、缺点，请予批评，指正。

# 目 录

## 绪 论

§ 1 仪器及其基本组成部分.....	1
§ 2 仪器机械结构设计的基本要求.....	1
§ 3 运动学结构设计.....	2
§ 4 强度分析和计算.....	8
§ 5 刚度分析和计算.....	11
§ 6 误差分析和估算.....	14
§ 7 结构工艺性.....	17

## 第一篇 联 接

### 第 一 章 可拆联结结构设计

§ 1-1 概述.....	20
§ 1-2 广义螺纹联接.....	21
§ 1-3 销钉联接结构设计.....	39
§ 1-4 键、花键联接结构设计.....	42

### 第 二 章 永久联接结构设计

§ 2-1 焊接结构设计.....	45
§ 2-2 铸合联接结构设计.....	49
§ 2-3 压合联接结构设计.....	50
§ 2-4 铆接结构设计.....	52
§ 2-5 胶接结构设计.....	54

### 第 三 章 光学零件固紧结构设计

§ 3-1 概述.....	55
§ 3-2 圆形光学零件固紧结构设计.....	55
§ 3-3 非圆形光学零件固紧结构设计.....	69
§ 3-4 光学零件的胶接固定.....	71

## 第二篇 弹性元件

### 第四章 螺旋弹簧设计

§ 4-1 基本知识·····	76
§ 4-2 拉力弹簧设计·····	83
§ 4-3 压力弹簧设计·····	94
§ 4-4 扭力弹簧设计·····	97
§ 4-5 圆柱形螺旋弹簧表格设计·····	101

### 第五章 片板弹簧设计

§ 5-1 基本知识·····	103
§ 5-2 片簧设计说明·····	105
§ 5-3 蜗线弹簧(发条)设计·····	105

## 第三篇 机械传动

### 第六章 摩擦传动

§ 6-1 基本知识·····	114
§ 6-2 定速比摩擦传动设计·····	119
§ 6-3 变速比摩擦传动设计·····	121

### 第七章 弹簧带传动

§ 7-1 基本知识·····	125
§ 7-2 设计计算分析·····	129

### 第八章 齿轮传动

§ 8-1 基本知识·····	131
§ 8-2 轮齿强度计算基础·····	131
§ 8-3 速比和速比分配·····	148
§ 8-4 小功率传动齿轮设计·····	157
§ 8-5 齿轮传动误差分析和估算·····	164
§ 8-6 两个重要问题·····	177
附 录·····	179

## 第九章 螺旋传动

§ 9-1 基本知识	190
§ 9-2 计算基础	192
§ 9-3 误差分析和结构改进	197
§ 9-4 差动螺旋	203

## 第十章 轴

§ 10-1 计算轴的理论根据	205
§ 10-2 设计实例分析和结构改进	207

## 第十一章 联轴节及离合器

§ 11-1 概述	214
§ 11-2 几种联轴节的结构和特点	214
§ 11-3 几种离合器的结构和特点	223

# 第四篇 运动支承

## 第十二章 滑动轴承

§ 12-1 概述	226
§ 12-2 圆柱形滑动轴承	227
§ 12-3 圆锥形滑动轴承	234
§ 12-4 滑动轴承的润滑	238
§ 12-5 轴系典型结构	240

## 第十三章 滚动轴承

§ 13-1 概述	247
§ 13-2 仪器中常用的标准滚动轴承	248
§ 13-3 滚动轴承的精度等级和游隙	249
§ 13-4 球轴承中钢球受力及摩擦力矩分析	250
§ 13-5 滚动轴承的选择方法	256
§ 13-6 滚动轴承组合结构	261
§ 13-7 非标准(散装)滚动轴承	271

## 第十四章 直线运动导轨

§ 14-1 概述	279
-----------	-----

§ 14-2 滑动摩擦导轨·····	281
§ 14-3 滚动摩擦导轨·····	286

## 第五篇 仪器常用组合件

### 第十五章 限动器及定位器

§ 15-1 概述·····	291
§ 15-2 螺旋限动器·····	291
§ 15-3 垫圈限动器·····	292
§ 15-4 齿轮凸块限动器·····	296
§ 15-5 蜗杆、蜗轮限动器·····	304
§ 15-6 定位器·····	305

### 第十六章 调速器

§ 16-1 基本知识·····	308
§ 16-2 制动式调速器·····	309
§ 16-3 带有制动式调速器的特性分析·····	313
§ 16-4 调速器结构参数的确定·····	316
§ 16-5 擒纵式调速器·····	318
§ 16-6 无固有振动擒纵调速器·····	319

### 第十七章 减震器

§ 17-1 概述·····	323
§ 17-2 减震器的工作原理·····	323
§ 17-3 减震器的安装位置·····	327
§ 17-4 减震器的类型及选择·····	327

### 第十八章 示数装置

§ 18-1 概述·····	331
§ 18-2 度盘和指针的结构·····	333
§ 18-3 度盘设计·····	336
§ 18-4 示数装置的误差·····	345
§ 18-5 几种示数装置的典型结构·····	348

## 绪 论

### § 1 仪器及其基本组成部分

仪器作为一种斗争工具，广泛应用于社会生活的各个领域，扩大了人类征服自然界和斗争的能力。例如：在工业生产、科学研究上，在军事、国防上常利用各种仪器进行观测、计量、瞄准、记录、演算、分析、计算、控制。此外，在医疗卫生、文教、宣传等各条战线上，仪器也得到了广泛应用，成为社会生产斗争、阶级斗争和科学实验三大革命斗争中极其重要的工具。

仪器的用途很广、类型很多，工作原理也有所不同。但如从仪器的内部构造进行概括，则不外由光学系统（包括光电转换系统）、电路系统和精密机械三部分所组成。

完全由机械构件组成的仪器，如螺旋测微器、百分表等，通常称为精密机械仪器。

由光学系统和一定数量的机械构件组成的仪器，如显微镜、望远镜、照相机等，通常称为光学机械仪器。

由电路系统和一定数量的机械构件组成的仪器，如雷达、指挥仪等，通常称为机电仪器。

实际上，目前很多新型的、复杂的精密仪器，往往是由光学系统（包括光电转换系统）、电路系统和精密机械三部分共同组成。如近代化的航空摄影机、轰炸瞄准具以及光学导引仪器等。通称为自动化精密仪器。

一般说来，仪器和机器在构造上并没有截然区别。但由于用途不同，使用要求不同，同机器相比，仪器一般具有以下特点：精度较高、功率较小、重量较轻、体积较小、结构紧凑、工作灵便等。对于军用仪器，以上各点都具有十分重要的意义。当然，以上特点并不是绝对的，也并不是所有仪器都完全具有以上特点，例如：有的天文望远镜和弹道经纬仪，重量可达几吨或几十吨，高度可达几米或几十米。

### § 2 仪器机械结构设计的基本要求

在目前条件下，任何仪器都不可能脱离机械结构而具有实用价值。在绝大多数仪器中，机械结构同光学系统、电路系统一起，共同保证着整个仪器技术性能的实现。虽然它们在同一仪器中所起的作用不同，但它们是一个统一体，它们所起的作用相互密切联系，直接影响仪器的技术性能。因此，在设计仪器时从整体要求出发，合理协调三者间关系十分重要。

仪器结构设计是在原理方案、主要技术要求得到充分论证，以及必要的实验基础上进行



的（改进旧产品时，如原理方案不改变，技术要求可不论证）。进行仪器结构设计时，必须紧密结合仪器的整体要求。不同用途和不同使用条件的仪器，对结构设计的要求也不完全相同，概括起来主要是以下几方面：

- 一、仪器活动部分应满足规定的运动关系和运动范围。
  - 二、仪器结构应满足在一定使用期限内的强度、刚度和精度。
  - 三、仪器结构应有良好的工艺性，力求加工、装配、调整、检验、维修简便。
  - 四、仪器结构应在使用时（包括观察、读数、操作）安全、简便。
  - 五、仪器结构应在高、低温、淋雨、颠簸、震动、腐蚀等特定环境条件下工作稳定。
  - 六、仪器结构应紧凑、外形匀称、尺寸小、重量轻、工作灵敏、运输方便。
- 前三项要求是基本的，后三项要求对于军用仪器常常具有特别重要的意义。

仪器结构设计就是要针对不同仪器的具体情况，全面地、合理地满足以上各方面的要求。为此，在仪器结构设计过程中，需要解决以下几个基本问题：

- 一、机构选择和设计；
- 二、运动学结构设计；
- 三、强度分析和计算；
- 四、刚度分析和计算；
- 五、精度分析和计算；
- 六、结构工艺性。

机构选择和设计是仪器结构活动部分设计的基础，如果运动关系和运动范围不能满足要求，仪器就不能正常工作。所谓机构选择和设计，就是通过选用或设计一定运动规律的机构，来实现所要求的运动关系和运动范围。例如：改变运动的形式、速度、方向和位置，以及将旋转运动改变为特殊轨迹的运动等。如图 0-1 所示曲柄摇杆机构。

一般情况下，往往根据《机械原理》课程所学知识，选用现有各种机构，如齿轮机构、螺旋机构、凸轮机构，以及各种平面杆机构。只有特殊情况才需设计新的或特殊的机构，进行运动分析。

仪器结构设计的其它问题分别叙述如下：

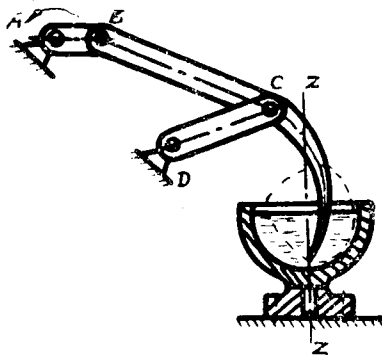


图 0-1 曲柄摇杆机构

### § 3 运动学结构设计

仪器中的机械结构都是由一些零件所组成，有的相对固定，有的相对运动。为使相对固定的零件位置确定；相对运动的零件具有确定的运动；结构易于获得较高的经济加工精度，

消除温度附加应力对结构的影响。则须研究运动学结构设计问题。

### 一、运动学原理:

运动学原理亦即定位原理,是运动学结构设计的理论基础。现将有关基本概念叙述如下:

#### A. 自由度与定位点:

任一刚体 A 在空间都具有六个自由度,即沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴的移动和绕三轴的转动。如图 0-2 所示。要完全确定刚体的空间位置,必须限制其六个自由度。这种加于自由刚体运动上的限制称为约束条件。或称定位点。要限制刚体的一个自由度,就应该相应地有一个定位点。

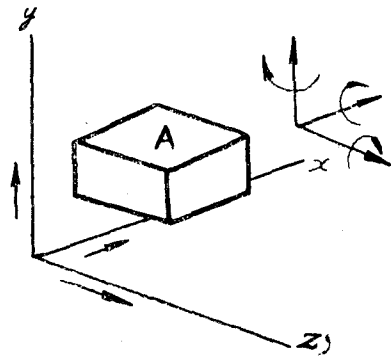


图 0-2 空间刚体的自由度

当两构件形成运动付时,由于互相接触,相对运动受到限制,自由度

就减少了。由于运动付的接触情况不同(如图 0-3 所示),所形成的约束条件即定位点的数目不同,因而所限制的自由度的数目也就不同。

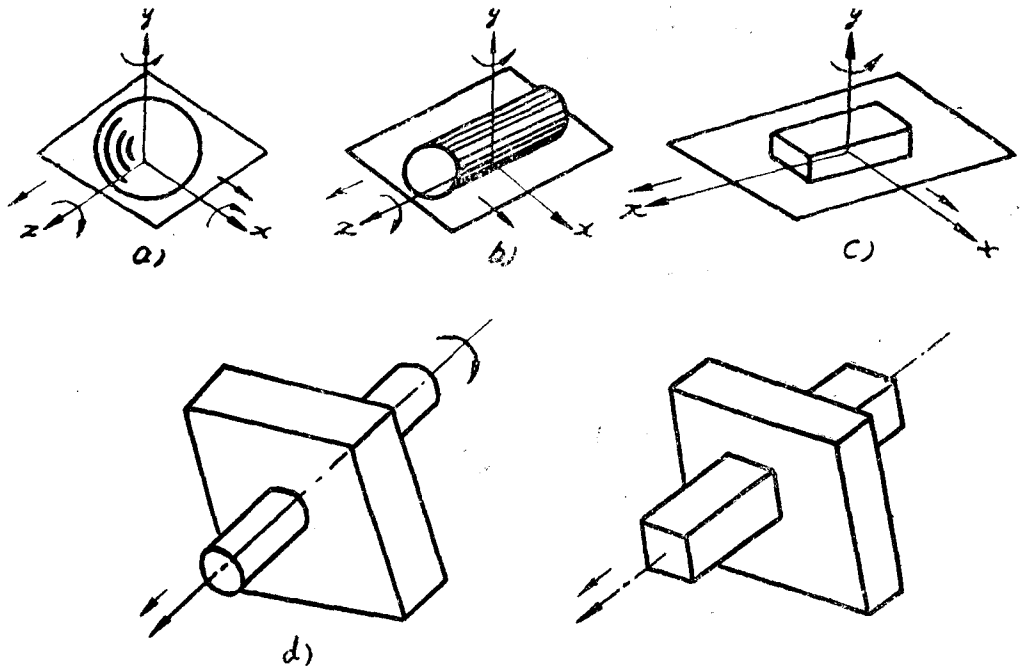


图 0-3 不同自由度与定位点的运动付

如球与固定平面所组成的运动付(图 0-3a),球具有五个自由度,所以可认为具有一

个定位点。如圆柱体与固定平面所组成的运动付(图0-3b),圆柱体具有四个自由度,所以可认为具有二个定位点。如平面接触所组成的运动付(图0-3c)立方体具有三个自由度,所以可认为具有三个定位点。如圆柱面接触所组成的运动付(图0-3d),圆柱体具有两个自由度,所以可认为具有四个定位点。如棱柱面接触所组成的运动付(图0-3e),棱柱体具有一个自由度,所以可认为具有五个定位点。

#### B. 定位点的形成和分布:

在各种运动付中,除球与平面接触(如均为刚体)可认为是一点接触外,其余都是线接触与面接触。但是根据点、线、面之间的几何特性,空间任一直线是由该直线上任意两点所决定的;空间任一平面是由该平面内不在一直线上的任意三点所决定的。而圆柱面是由不在一平面内的四个点所决定的。因此,各种运动付都可认为是不同数量的点接触。所以,线接触只能认为有两个定位点;平面接触只能认为有三个定位点;而圆柱面接触只能认为有四个定位点。

实际上除刚体点接触外,任何一种接触的微观情况,接触点都很多,然而并不是所有接触点都能起到定位点的作用。实际上是接触点多于定位点,如果从限制自由度的数目来看,除相应数量的定位点外,其余的点都是没有意义的。

对于具有不同自由度的运动付,其定位点的数量必须与被限制的自由度的数目相等,才能保证运动付的相对运动关系。对于需要完全定位的任一刚体,必须有六个定位点,才能完全确定其空间位置。但如定位点分布不恰当,仍不能起到应有的约束作用。

对于任一刚体,要完全确定其空间位置,六个定位点应合理地分布在相互垂直或相交的三个平面内,但任一平面内都不能多于三个定位点,三个定位点又不能分布在一条直线上。如图0-4所示。



图 0-4 定位点的分布

图0-4a所示为棱柱形的零件(例如平行六面体)六个定位点的分布情况;图0-4b所示为圆柱形零件六个定位点的分布情况。

按照上述定位点的分布规律,对于各种不同自由度的运动付,只要将与所需限制的自由度数目相同的定位点合理地分布在需要被约束的位置和方向上去,而保留需要的自由度,就能保证运动付的相对运动关系。

### C. 定位与封闭

对于空间任一构件，如果定位点的数量及分布都很合理，就可以认为它的相对位置或运动关系是确定的。然而，这里并没有考虑力的作用。因此，在实际的机构或结构中，如果它们的空间状态发生变化，或外力在垂直方向的分力大于构件自重，或水平方向的分力大于摩擦力，则原有的定位点将全部或部分失效，构件的相对位置和运动关系均将改变，如图 0-5 所示。

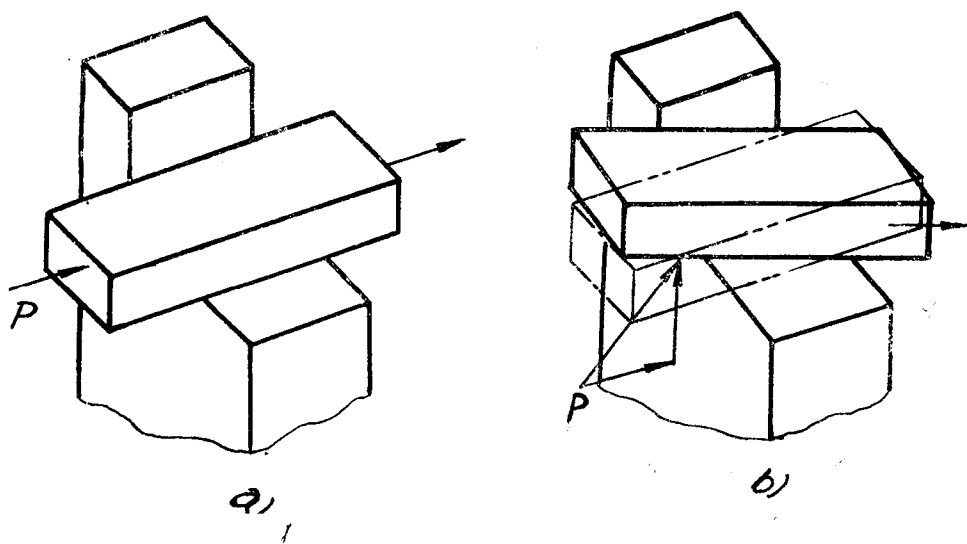


图 0-5 空间状态和外力的影响

为使构件的相对位置和运动关系不因空间状态及外力作用而变化，必须使结构或运动付“封闭”。“封闭”可分力封闭与结构封闭两类。力封闭又分重力封闭与外力封闭两种。

例如一个圆轴放在“V”形块上，圆轴仅保留了两个自由度，圆轴依靠自身的重力紧靠于“V”形块上，构成“重力封闭”。如图 0-6a 所示。如将“V”形块倒置，圆轴就会掉落，原有定位点全部失效。

如利用弹性元件在圆轴上预加一定的力，其大小等于或略大于圆轴的重力。这时“V”形块即使倒置，圆轴也不会掉落，仍保留着两个自由度，这就是“外力封闭”。如图 0-6b 所示。

如将弹性元件改为刚性构件，装配时不附加压紧力，而使其与圆轴始终保持接触，也可同样达到目的，这就是“结构封闭”。如图 0-6c 所示。

重力封闭构造最简单，但只有在运动付或结构空间状态不变化，而且没有不利附加外力时，才可以采用。

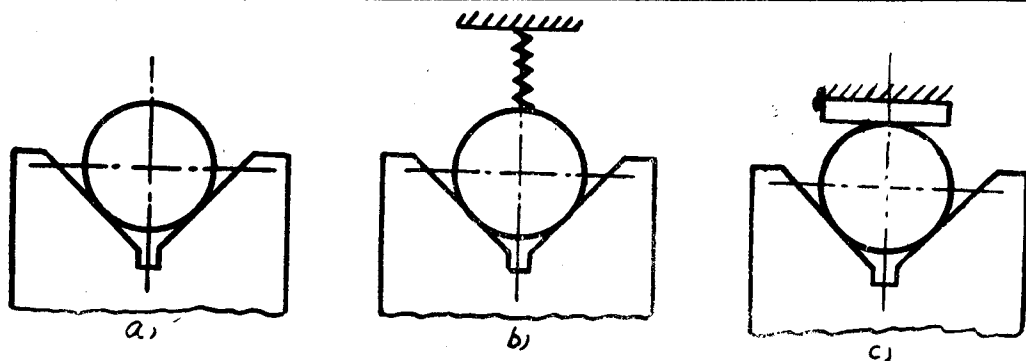


图 0-6 结构封闭的种类

## 二、运动学结构设计：

根据运动学原理，处理结构设计中构件的相对固定和相对运动等问题，常称为运动学结构设计。

现以镜筒支承结构为例（图 0-7），如要求镜筒绕垂直于轴线的某一横轴旋转，也就是要求镜筒仅保留一个相对于横轴的旋转自由度。为此，结构通常可设计成如图 0-8 所示。结构中圆轴与轴孔的配合面可限制四个自由度，利用轴肩的端面限制轴向移动自由度，其中一端起定位作用，一端构成“封闭”。这种结构虽然可以满足要求的相运动关系，但由于运动付是圆柱面接触，所以并不是运动学结构。

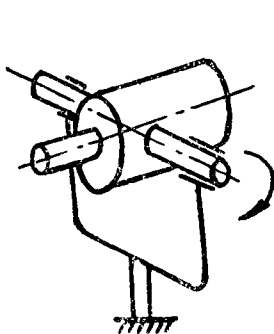


图 0-7 镜筒支承示意图

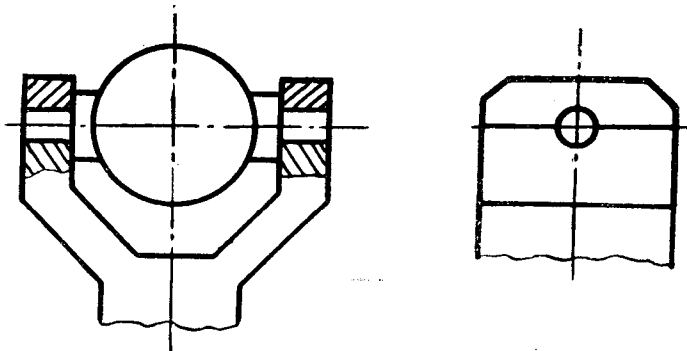


图 0-8 镜筒支承结构图

如果把圆柱形轴孔改为“V”形槽（图 0-9），其余结构形状不变，则同样可以满足相对运动关系。但运动付已改为近似直线接触。如进一步将“V”形槽平面改为圆弧面（图 0-10），则运动付成为近似点接触，而结构仍可满足要求的相对运动关系。

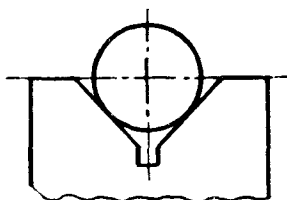


图 0-9 “V”形槽支承

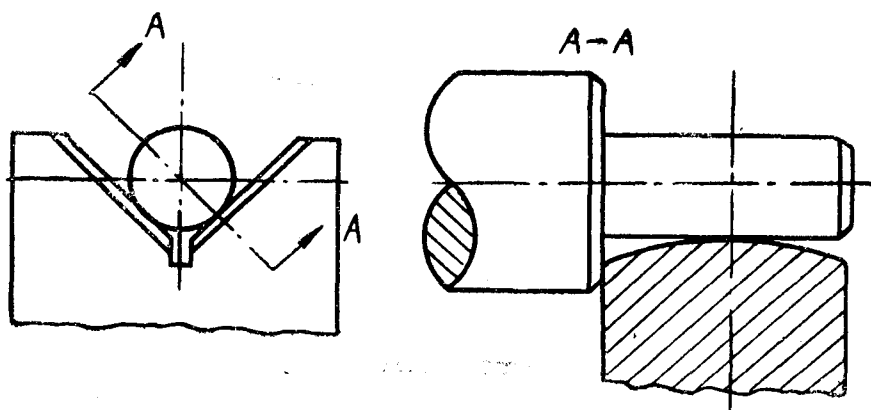


图 0-10 弧面“V”形槽支承

上述结构形状的改变，只是合理地减小了接触面积，接触部分更近于点状，使所需定位点与实际接触点数目相等，即用五个点限制五个自由度，用一点构成“封闭”。保证相对运动关系。按照这一原理设计的结构，就是所谓运动学结构。

运动学结构设计的基本要点是：

1. 定位点数应与所需限制的自由度数相等，且分布应该合理；
2. 接触点（除构成“封闭”外）在数量上应等于定位点，位置也应适当；
3. 接触点应分布在相互垂直的平面内，以减小误差的影响，如图 0-11 所示； $\delta h' > \delta h$ ；
4. 结构多采用“力封闭”，以减小温度变化及磨损的影响。

运动学结构的特点是易于获得较高的经济加工精度，减少精加工面；避免了多余的接触点，不会出现“过定位”现象；避免了配合间隙所引起的误差及温度变化所带来的双重影响（卡紧或晃动）。但是这种结构也存在着难以根除的缺点，即点接触（实际是小面积接触）；在接触部分将会引起极大的接触应力，易于发生严重磨损；且润滑极为困难。所以运动学结构只适用于负载小，相对运动速度低，工作精度要求高的仪器。

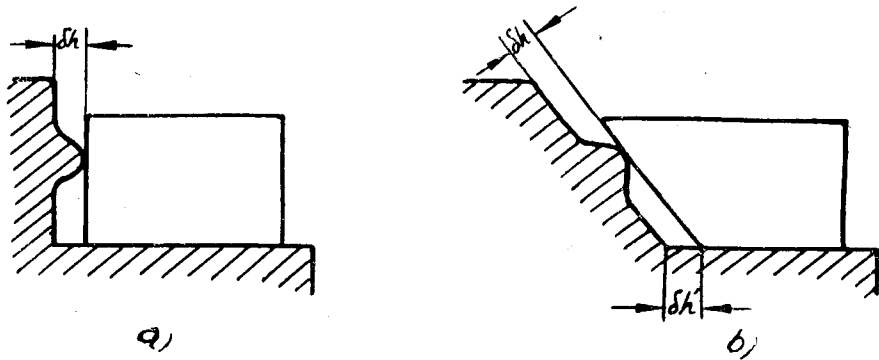


图 0-11 定位点分布对误差的影响

为了扩大运动学结构的用途，可以小面积接触或线接触代替点接触而起定位作用，（如图 0-9 示），就能改善接触情况与润滑状态。这就成为所谓半运动学结构。

运动学结构与半运动学结构广泛用于实验室用的精密测量仪器及某些大地测量仪器中。

图 0-8 所示虽然不是运动学结构，但在实际应用中也可以大量看到。这主要是由于它的结构形状简单，加工制造简易，且能承受较大的负载，便于润滑，所以在一般精度要求不很高的情况下，具有广泛的实用价值。

根据以上所述不难看出，运动学结构虽然在使用上有一定的局限性，但是作为运动学结构设计基础的运动学原理，亦即定位原理，对结构设计则有着普遍的指导意义。

#### § 4 强度分析和计算

机械结构中每一构件都必须承受一定的负载（包括外加负载和构件的自重），当负载超过一定限度时就会引起构件破坏。因此，仪器中的构件同机器一样，必须满足一定使用期限内的强度要求，没有必要的强度就不能保证仪器安全可靠地工作。在仪器结构设计中，通常由于承受的负载较小，所以一般均按照结构条件确定构件的尺寸，然后进行必要的强度校核。少数情况才根据强度计算决定构件的尺寸。

强度计算和校核仍以《材料力学》为基础，根据所选择的材料和许用应力，求出构件在外载荷作用下危险截面的尺寸；或者求出构件在外载荷作用下危险截面上所产生的最大应力，然后同材料的许用应力相比较。基本计算公式如下：

$$\text{拉、压 } \sigma = \frac{Q}{A}, \quad \sigma \leq [\sigma]$$

$$\text{弯曲 } \sigma_B = \frac{M_B}{W}, \quad \sigma_B \leq [\sigma]_B$$

$$\text{剪切} \quad \tau = \frac{P}{A}; \quad \tau \leq [\tau]$$

$$\text{扭转} \quad \tau_T = \frac{M_T}{W\rho}; \quad \tau_T \leq [\tau]_T$$

式中: Q、P——载荷; 公斤

A——承载面积; 毫米<sup>2</sup>

M<sub>B</sub>——弯曲力矩; 公斤·毫米

M<sub>T</sub>——扭转力矩; 公斤·毫米

$\sigma$ ——拉、压应力; 公斤/毫米<sup>2</sup>

$\tau$ ——剪切应力; 公斤/毫米<sup>2</sup>

$\sigma_B$ ——弯曲应力; 公斤/毫米<sup>2</sup>

$\tau_T$ ——扭转应力; 公斤/毫米<sup>2</sup>

$[\sigma]$ ;  $[\tau]$ ;  $[\sigma]_B$ ;  $[\tau]_T$ ——许用应力; 公斤/毫米<sup>2</sup>

W——抗弯截面矩量; 毫米<sup>3</sup>

W $\rho$ ——抗扭截面矩量。 毫米<sup>3</sup>

从以上公式可以看出: 构件在外载荷的作用下, 是否引起破坏, 除载荷的大小、性质外, 还取决于构件的结构尺寸和材料。三者之间紧密联系而又互相影响, 强度计算就是协调载荷、结构尺寸和材料三者之间的关系。现分别简述如下:

### 一、载荷和应力的种类:

载荷根据不同的工作情况分为静载荷、脉动载荷和反复动载荷三类。载荷不随时间而改变, 或者变化很小而缓慢, 称为静载荷; 载荷随时间变化而改变, 但符号不变, 称为脉动载荷; 载荷随时间变化而改变, 符号亦随之改变, 称为反复动载荷。后两者亦统称为交变载荷。这三类载荷一般简称为 I 类, II 类, III 类载荷。

在载荷作用下, 构件内部各截面上均产生应力。一般情况应力与载荷是相适应的, 即静载荷产生静应力, 交变载荷产生交变应力。但在某些情况下, 静载荷也可能产生交变应力。

由于静应力和交变应力所引起的破坏有本质的不同, 前者是由于断裂或产生过大的残余变形而破坏。后者是由于产生微观的疲劳裂纹, 裂纹随应力循环次数增加而逐渐扩大, 最后破坏。因此, 根据载荷特性和构件工作特性来判断应力特性十分重要。

### 二、结构形状对应力的影响

当构件的结构形状发生突然变化时, 例如轴上横孔(图 0-12a)、轴上台阶(图 0-12b), 对构件截面上的应力分布可产生很大影响。在构件形状突然变化处的应力显著增大, 这种现象称为应力集中。



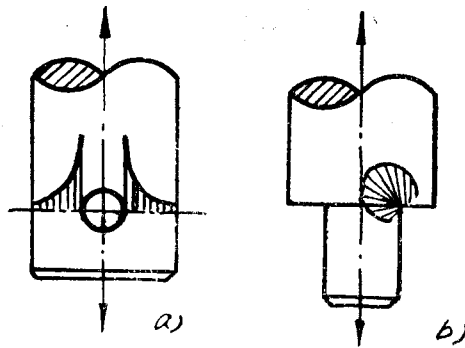


图 0-12 应力集中现象

### 三、材料的性质

材料性质在基本计算公式中表现为许用应力。许用应力即设计和校核时所根据的最高条件应力，常用 $[\sigma]$ 、 $[\tau]$ 表示。但是，同一材料在不同的工作条件下却不一定具有相同的许用应力值。由于材料质量、零件形状、比例尺寸、表面状态、工作温度、载荷特性、光洁度及受腐蚀情况等因素，都会使许用应力值降低。由此可见，影响计算应力的因素有的也是影响许用应力的因素，只是表现形式不同。前者说明零件在承受外载荷后实际应力比名义计算应力要高；后者说明零件材料的许用应力低于材料的极限应力。如把以上因素分别详细考虑比较困难，但如都用“降低许用应力值”这一方法把它们统一起来，就可使问题简化。即用包括上述各因素的大于1的系数去除极限应力，求出许用应力。这个大于1的系数称为安全系数，用符号 $n$ 表示。对于塑性材料，极限应力应为屈伏极限，其许用应力是

$$[\sigma] = \frac{\sigma_s}{n}, \quad \text{公斤/毫米}^2$$

对于脆性材料，极限应力应为强度极限，其许用应力是

$$[\sigma] = \frac{\sigma_b}{n}, \quad \text{公斤/毫米}^2$$

许用应力和安全系数的选取非常复杂非常重要。但目前还没有一个十分圆满的精确确定方法。

目前选取许用应力和安全系数主要是部分系数法和查表法。

部分系数法是根据已知的材料特性，用判断零件工作情况的一系列大于1的系数的乘积来确定总的的安全系数。

查表法是根据大量的实践和理论分析，把用一定材料制造的、在一定情况下工作的某些零件的许用应力做出具体规定。目前设计部门和企业管理部门，已针对这些部门中某些零件的工作特点，制定出一些许用应力的表格列入“规范”之内。这种表格具有简单、具体、可靠等优点，但每一种表格都只能用于较狭窄的范围，对于其它零件或是同一零件而工作性质