

苑 舜 编著

高压断路器弹簧操动机构



机械工业出版社
China Machine Press

高压断路器弹簧操动机构

苑 舜 编著



机械工业出版社

前 言

高压断路器的发展主要包括两个方面的：一方面是灭弧室新的灭弧形式和结构的发展；二是操动机构的结构、高可靠和小型化的研究。弹簧操动机构是高压断路器操动机构中最常见且使用最广的形式之一，它具有设计灵活，易满足动力配合要求、维护方便等特点。然而，从高压断路器的故障统计表明，我国操动机构的设计和制造水平较低，尤其对如何设计满足断路器性能要求的操动机构没有系统的理论基础和配套设计的基本思想，虽然许多专家多次阐述要以动力配合为依据进行断路器整体设计，但仍经常出现以拼凑的方式来组合形成断路器，这经常出现大马拉小车的现象而使断路器寿命大打折扣。追究其原因有两个：一是没有系统的设计理论的指导；二是只求简单，研制时间短。本书的目的就是为高压断路器弹簧操动机构提供系统的设计理论而编写的。

本书第一章对高压断路器类型和特点进行了阐述，并提出与之相配合的操动机构，同时也指出应根据断路器的要求设计操动机构；第二章对弹簧操动机构的优化设计理论进行介绍，为具体设计打下基础；第三章对典型的弹簧操动机构的工作原理和结构进行分析，以使读者对弹簧操动机构有个全面的了解；第四章对弹簧操动机构的储能结构进行分析并重点对储能机构的构思和选择可靠的方式进行论述；第五章对凸轮机构的设计理论和优化设计进行分析，以满足断路器的动力配合要求；第六章对脱扣和锁扣机构的优化设计及电器控制回路进行分析和阐述；第七章对弹簧操动机构的整体优化进行阐述，以实现较理想的整体结构；第八章对运行中的故障及机构的机械参数进行论述，这为设计人员和电力系统检修人员提供优化和维护依据。

作者总结了工作以来的设计经验，尤其是设计真空断路器时的弹簧操动机构的设计经验，以及在弹簧操动机构设计中曾获得的几项专利，也在本书中做部分介绍。本书同时也介绍了国内外的多种弹簧操动机构，希望成为工厂设计人员、电力系统检修人员、高校师生和科研院所技术人员的参考书。书中不足之处望同仁和专家给予批评指正，来信请寄：辽宁省沈阳市辽宁省电力有限公司生产部（邮编：110006），谢谢！

编著者

目 录

前言

第一章 高压断路器及其操动机构的种类和发展	1
第一节 高压断路器的种类和结构	1
第二节 断路器的基本动作形式	3
第三节 断路器触头运动特性	6
第四节 高压断路器对操动机构的要求	8
第二章 弹簧操动机构优化设计的基础理论	11
第一节 机构的组成	11
第二节 机构的运动分析	18
第三节 机构的动力分析	29
第四节 机构的优化理论	30
第三章 高压断路器弹簧操动机构结构和工作原理	35
第一节 弹簧操动机构的基本结构	35
第二节 典型弹簧操动机构的结构和工作原理	38
第四章 弹簧操动机构的储能机构	75
第一节 储能机构的构成	75
第二节 弹簧	76
第三节 齿轮机构	89

第四节 蜗杆和蜗轮传动	93
第五节 棘轮机构	96

第五章 凸轮机构设计	98
第一节 连杆机构	98
第二节 凸轮机构设计	101
第三节 弹簧操动机构中凸轮优化设计方法	109
第四节 凸轮设计中的其他问题	114
第六章 脱扣机构和电控回路	116
第一节 脱扣机构设计	116
第二节 脱扣机构的计算	118
第三节 操动机构的控制回路	127
第七章 弹簧操动机构的整机优化	128
第一节 弹簧操动机构的设计要点	128
第二节 弹簧操动机构的设计计算基本方法和思路	129
第三节 传动机构优化分析	147
第八章 运行中常见故障及参数测试	153
第一节 运行中常见故障及排除方法	153
第二节 断路器机构参数的测量	153
第三节 操动机构特性的测量方法	154

第一章 高压断路器及其操动机构的种类和发展

随着电力系统要求的提高和制造工业的进步，高压断路器得到了迅猛发展。新型高压断路器的出现使其在长寿命和小型化方面有了长足的进步。下面对高压断路器的种类及结构进行简单介绍，并对其操动机构的种类进行介绍和对比。

第一节 高压断路器的种类和结构

对于不同的电压等级所使用的断路器不同，且相应选择的操动机构各有偏重，这主要取决于断路器的灭弧特性和操动机构参数配合。下面根据灭弧形式对断路器进行分类。

一、磁吹断路器

磁吹断路器主要适用于中压领域，装于 3~15kV 的高压断路器柜中。其灭弧室为大气狭缝式，利用电弧自身产生的电磁力将电弧引入灭弧室中被拉长和去游离，因而熄弧时间长、电弧电压高。为使断开的空气间隙有足够的绝缘恢复强度，要求在分闸过程中电弧能迅速转移到弧角上，而且动触头要有较高的分闸速度，允许分闸行程时间短于燃弧时间，开距由绝缘水平决定。在开断小电流时，因电磁力极小，还须依靠与动触头联动的吹气装置，帮助电弧进入灭弧室中，此装置消耗操作功，但在行程后期也起分闸缓冲作用。

磁吹灭弧室中的触头接触为插入式，其接触超程为动触头分闸时准备了一个较长的加速过程，同时合闸亦可吸收动触头多余的动能。

磁吹断路器一般用在配电设备中，适宜于在小容量的保护、控制和频繁操作的场合使用。在这种使用条件下，其结构较为简单，监视和维修方便，合闸动力相对较小。所以，磁吹断路器的操动机构多用电磁操动机构和弹簧操动机构，而基本不用液压机构。

二、压缩空气断路器

压气式灭弧室利用压缩空气气流对电弧去游离并建立弧后绝缘的装置。开断电流与压缩空气的压力和流量成正比。这种灭弧室的特点是从燃弧开始，气吹就十分强烈，电流过零以后，介质绝缘强度的恢复开始较缓慢，最后则总绝缘强度高。因而，对于开断空载线路极为有利，能给灭弧室并联电阻起到增容效果。

灭弧室的吹弧方式有横吹和纵吹之分，横吹灭弧室仅用于 20kV 以下的产品中，压缩空气气流方向垂直于触头行程，将电弧吹入绝缘的灭弧栅内，并不断地拉长和使其冷却，因而大部分电弧表面承受的是纵向气流，只有小部分承受的是横向气流，但是后者在电弧的熄灭中仍起主要作用。

在高压和超高压压缩空气断路器中使用的大多是纵吹灭弧室。其操动机构多用气动机构，但压缩空气断路器现在已很少使用，它已被油断路器和 SF₆ 断路器所取代。

三、油断路器

油断路器是发展最早的一种断路器，它以矿物油或合成油作为灭弧和绝缘介质。它是一种完全利用电弧自身产生的能量促使其灭弧的结构，电弧的能量与电流和电弧压降的大小以

及燃弧时间的长短有关。当电弧能量足够大时，电弧的熄灭较为顺利，燃弧时间短。如果电弧能量不足，则燃弧时间超长，因而燃弧时间与开断电流成反比关系，但当开断电流甚小时，因弧道去游离化微弱，电弧是不容易熄弧的，所以在开断特性上出现了临界电流值，其燃弧时间达到最长。

在燃弧期间，灭弧室中的油被剧烈汽化而形成熄弧的气流，因此油量耗损与开断电流成比例，同时构成灭弧室的绝缘材料亦有较大的烧损。因而在额定短路电流的条件下，进行重合闸成为一种严格的考核，灭弧室内的油量必须在第二次分闸前恢复到可以正常开断状态。

油断路器的燃弧时间比其它断路器要长一些，目的是适应临界电流的开断，即使额定容量下的开断，一般都不会超过 25ms，但在以后的行程中，动触头的运动应当放慢，以便多积累一些电弧能量，以熄灭小电流。为此，必须采用油缓冲器，其缓冲行程和特性参数应当结合灭弧室的需要加以深入地分析和谨慎地设计。

至于动触头的合闸运动，应以合闸前的预击穿和接触以后的电动力为考虑依据。由于灭弧的绝缘介质劣化严重，常会导致过长的预击穿距离，以致因电弧能量过大而招致灭弧室的破坏。接触以后，短路电流的电动力起着阻碍合闸到底的作用，速度不足和过高都是不利的。

油断路器的机构多用弹簧操动机构和液压操动机构，尤其是高压和超高压油断路器的操动机构均为液压操动机构。

四、SF₆ 断路器

SF₆ 断路器目前在高压和超高压中应用最为广泛的是单压式灭弧室结构，灭弧室由压气缸和活塞组成。这里活塞是静止的，而压气缸与动触头固定在一起，是可动的，随着动触头的打开，压气缸使 SF₆ 气体的流速和密度依压气缸内的压强而定，这是灭弧的主导因素；喷嘴的合理设计和断口间的电场分布，决定着电流开断的成败。

当电弧对喷嘴起热阻塞作用时，上游电弧的能量排泄不甚畅通。当阻塞严重时，虽零区附近排放条件较好，亦会影响零区绝缘的恢复。因而，严重的阻塞，将导致电流开断的失败。然而对 SF₆ 断路器来说，与压缩空气断路器有很大的不同，适当的阻塞不但不影响开断性能，反而提高了开断能力，原因是阻塞使气缸的气压增高而获益，而在压缩空气灭弧室中，则往往认为阻塞是开不断的征兆。由此可知，SF₆ 断路器喷嘴喉部的直径，在同样的开断电流下，远比压缩空气灭弧室的小，这点给予 SF₆ 断路器的设计以极大的方便，使得活塞直径、灭弧室直径相应地小，操动机构的操作功也小。

由于 SF₆ 灭弧室的这种特点，在中压断路器中利用电磁驱动力使电弧在触头表面向外径旋转，充分利用电弧能量使灭弧室内的 SF₆ 气体加热膨胀用来熄灭电弧，因而出现了自吹式灭弧室。这种灭弧室触头烧损小，开距相对也小，所以分闸功相对也小。然而用于小电流时电磁驱动力不足以使电弧旋转，或者旋转速度极低，因而尚需备有小功耗的压气缸。

单压式 SF₆ 断路器的灭弧系统消耗能量最大，约为少油、空气和双压式 SF₆ 断路器消耗能量的一倍，当单压式 SF₆ 断路器刚刚出现的时候，操动机构都采用压缩空气式，采用弹簧操动机构和液压操动机构很少，到 1983 年以后，采用液压和弹簧操动机构才占大多数，而压缩空气机构居少数地位，许多制造厂家转而生产液压操动机构是因为它能适应能量需要，且具有合分闸缓冲简单、运动质量小及操作时间短等优点。

五、真空断路器

真空断路器是通过对接式触头进行合分操作的，由于真空度好的间隙绝缘强度很高，所以，其最大触头开距很小，相对操作功也不大。为更好地开断电流，触头结构设计为带有不同形式的磁场方式。研制初期，还只限于小容量，随着真空断路器技术和理论的不完善，触头结构和断路器结构的不断发展和深入，真空断路器正向高压、大容量方向发展。

影响真空断路器开断能力的因素很多，其中主要有灭弧室内的触头结构及材料、触头直径、真空度、触头开距、外加磁场等。众所周知，对触头结构而言，产生横向或纵向磁场的电极结构其开断能力明显高于平板型电极；对触头材料而言，目前 CuCr 材料比较理想。真空断路器的极限开断电流与电极直径近似成正比。

触头间隙减小时，触头间绝缘强度降低。而且触头间隙小，金属粒子的热扩散性能下降，电极受热粒子撞击次数增多，虽然触头间纵向磁场有所增强，但磁场分布并不均匀，且金属粒子在小间隙内不易向外扩散，真空电弧将处于高粒子密度电弧状态，阴极和阳极磨损均很严重。但此时弧压并不高，且无高频分量出现。电流过零时，虽间隙中粒子由电极吸附的能力有所增强，但过零时电极热量通过导电杆的热量传导速度有限，表面温度仍然较高，同样有热粒子附着在电极表面使间隙绝缘水平下降。总之，间隙内介质恢复强度由电极吸附粒子和粒子向真空中扩散的综合效应决定。当吸附与扩散皆处于最佳状态时，介质恢复时间最短，故在一定的开断电流下存在最佳开距段。

在研究中发现，触头刚分速度对触头烧损和灭弧室开断性能有很大影响。触头为杯状纵磁结构，在两种开断速度（0.5m/s 和 1.0m/s）下一次开断 84kA（峰值）电流后，触头表面烧损程度前者明显比后者严重。

随着电压等级的提高，触头间隙也随之加长。对于双断口 110kV 真空断路器来说，每个断口开距为 40~45mm。这么长的开距会使触头间隙处磁场减弱很多，这必将导致电弧收缩现象严重，若想成功地开断电流，动触头必须具有良好的运动特性。

根据以上特点，加上真空断路器的机械寿命达万次之多，而且操作功不大，所以最佳操动机构为弹簧操动机构或电磁操动机构。

第二节 断路器的基本动作形式

断路器是在电力系统不同工况下进行合分，以保证电力系统可靠供电和切除故障线路。断路器除单一合闸和分闸外，还要求具有快速的重合闸、重合分和合分动作。

一、分闸

分闸操作是断路器最基本的功能。由于断路器分闸，可开断高压回路，或切断负荷电源，或隔断高压电源，或切断故障电源。

1. 开距

高压断路器分闸到底时，动触头与静触头之间形成一定长度的绝缘间隙以保证线路能彻底断开。断路器处于分闸状态时，此时触头之间的绝缘间隙被称为开距。开距的大小与高压断路器的额定电压和开断性能要求有关，也与绝缘介质的特性和灭弧装置的设计有关。

2. 行程和超行程

行程是指高压断路器分闸过程中动触头所走过的距离，行程包括了触头之间的开距和触头接触行程。为保证足够的接触压力，补偿触头受电弧的烧损以及获得必要的分闸速度，动

端需要超行程来保证。

3. 分闸速度

高压断路器分闸过程中，动触头的运动随时间或行程而变化，一般分闸速度是指分闸过程中触头分离之后半个周波内动触头的速度的平均值。以这个数值为标称分闸速度其意义在于：在这个期间内动触头的速度对高压断路器的熄弧和熄弧间隙承受恢复电压将起到决定性作用，因为高压断路器的燃弧时间约为半个周波到一个周波之间（如三相断路器指首相燃弧情况）。但是为了测量的方便，工厂往往给出刚分速度的数据，这是指触头刚分瞬间的平均速度，大致是刚分之前半波和刚分之后半波的测量值的平均值。分闸速度因不同的灭弧室设计、不同的灭弧介质和断口的数目多少而不同。它是操动机构设计主要的依据之一。

4. 固分时间

固分时间是指分闸过程中从操动机构接到分闸命令时起，到断路器触头侧分离的一段时间。这段时间包括操动机构和高压断路器本身在触头分离以前的执行电气命令和机械动作的时间，具体说，由以下几部分组成：

(1) 启动时间 从脱扣机构受电到脱扣器动作并使操动机构解扣时止或者分闸动力控制系统的初级阀门触动时止的时间。

(2) 分闸控制时间 从分闸动力控制系统受能到机构传动触动的时间，对于机械连杆式操动系统，无分闸动力控制，故无此项时间。

(3) 分闸寄生时间 从机械传动触动开始到触头开始运动的时间。

(4) 逆超程时间 从触头开始运动到触头分离时止的时间。

上述第三部分的时间是指机构运动链的间隙位移和弹性变形引起的时间消耗。对于机械传动来说，运动链在合闸位置处于受力的紧张状态，链中各个环节有一定的弹性变形，当解扣时，在触头获得运动之前，这些环节由于力的松弛，应变消失而需要一定的时间。只有应变消失之后触头才能从分闸动力获得相应的运动（假设不产生反向应变）。这种由于弹性应变而引起的时间延迟约为 $1 \sim 3\text{ms}$ 。

5. 全开断时间

全开断时间是指在全开断电流下，分闸过程从操动机构接到分闸命令时起到电弧熄灭时止的时间，也就是固分时间加燃弧时间。燃弧时间与起弧相角有关，其下限称短燃弧时间，其上限称长燃弧时间。三相断路器在单相试验时，既要求用短燃弧时间验证首相的开断性能，同时还要求一长燃弧时间验证后两相开断的性能。后两相的电流过零比首相开断过零的时间滞后一定的电角度（如在三相不接地短路试验中为 90° ）。又考虑三相之间的相位差，故长燃弧时间与短燃弧时间的时间差可认为是 8.33ms （在三相不接地短路试验中），而 IEC 目前的规定是 7ms ，这只能理解是多种形式短路的综合反映。

缩短断路器的全开断时间对提高电力系统的稳定性和提高输电线路的输送容量有很大好处。对 60 周交流来说为 33.3ms ，若考虑现代断路器的长燃弧时间为一周波左右，则此种断路器的固分时间对于 50 周或 60 周系统来说，相应地分别要求为 20ms 左右或 16.6ms 左右。

二、合闸

线路的正常送电，负荷的倒换，电压的引入等都必须由断路器的合闸动作来完成。合闸以后，断路器本身就处于警戒状态，在它所保护的范围内出现任何故障，随时可以受命跳闸。

断路器在合闸状态下，必须保证具有足够的长期通流能力和经受短路电流和电动力作用能力，而这些性能与机构的设计有密切的联系。若机构设计不当，或操动系统不能制锁，则在短路电动力作用下，断路器触头会自行脱开；或因机构的输出力矩不够，触头的轻微熔焊造成断路器不能开断，均将酿成事故。因而合闸状态下的可靠性亦是十分重要的。

1. 合闸速度

合闸速度是指断路器触头以前半波内的平均速度。它标志着断路器的运动系统在趋近于合闸时所应具有的动能水平。待触头接触以后，由于阻力突然增大，动触头的运动速度受到很大的阻力而降低。合闸速度还影响预击穿特性，当合闸速度高时，预击穿距离就小，其阻碍断路器关合的作用也小；反之，影响就大。

合闸速度是在合闸装置的动力处于额定参数下所测得的数据，可是在运行中，动力源的特性参数常常偏离其额定值。对液压操动机构来说流体输出功有随操作负荷大小而变化的适应性，因而动力额定参数的变化而导致运动系统的功能的差异不很大。

2. 合闸时间

合闸时间是指从发合闸令到断路器的主触头刚合时止的这段时间。在制造和运行过程中，测定合闸时间往往可以得知断路器的操动系统是否处于正常状态。

合闸时间由以下几部分组成：

- (1) 启动时间 从启动电磁铁的线圈受电到电磁铁刚顶开控制阀门时止的时间。
- (2) 合闸控制时间 从合闸控制装置得电到合闸装置触动的的时间。
- (3) 合闸寄生时间 从合闸装置触动到断路器的主回路动触头触动的的时间，此为消耗于机构的间隙和机构传动的弹性变形的时间。
- (4) 逆开距时间 从动触头触动到与静触头刚接触的时间。

上述四部分时间之中，占主要的是逆开距时间，因为动触头触动时，其速度为零，只有在合闸过程中才能得到加速。所以刚接触时，往往要经过一段较长的时间。在合闸的前一段行程中速度在预击穿距离内才有意义，而这时动触头恰已加速到需要的速度，当代的新型断路器行程都很小，因而合闸时间亦缩短，合闸时间的缩短给断路器的操动带来很大的好处，即合闸的分散性可以缩小，因而电力系统的稳定性可以提高。

从机构设计的角度去缩短合闸时间，主要从缩短启动时间和控制时间入手。采用快速启动装置可以将启动时间从 10ms 缩短到 2ms。合理地选择控制系统的结构参数，改善控制阀的运动特性可以获得最短的控制时间。但若对合闸时间没有严格的要求，过分地追求的合闸时间，可能不是合理的办法，因为由此可能引入导致操动不可靠的因素。

三、合分

高压断路器在合闸过程中可能遇到线路故障（如短路）而要求它立即跳闸的情况，因而断路器应具有及时跳闸反应的能力，即当断路器合到底立刻能进行无任何延迟的正常分闸。这种反应能力依赖控制系统和机构传动系统的适应性。

断路器合闸之后，立即进行分闸，则线路接通的时间很短。在电力系统中，希望短路合闸时断路器以最快的动作将短路断开，以保证系统运行的稳定性，因而对断路器合分时的接通时间，有一定的要求，而此时间成为金属短接时间。最短的金属短接时间应由下列部分组成：

- (1) 关合超程时间 合闸过程中，从触头刚接触开始到合到底停止之间的时间。

(2) 停顿时间 从合到停止到断路器因执行分闸命令而触动时止的这段时间。

(3) 逆超行程时间 分闸过程中，从动触头触动到与静触头脱离时止的这段时间。

断路器的金属短接时间与运行中的继电保护时间有相互交叉的关系，因而在合分任务中要确定电力系统承受短路的时间需对设备和保护作详细的分析才能获知，而且设备的调整必须得当。

四、重合和重合闸

在高压电力系统中常要求断路器在事故跳闸后进行快速重合闸，以获得高的系统稳定性。这种重合闸往往能排除系统中的一段偶然性的短路事故而获得成功。但当重合后短路仍未消除时，断路器在继电保护装置的作用下又可立即跳闸，这时的操作任务为重合闸，即分闸以后再一个合分，如需再次强送电，则可再设置一个合分，即为分-合分-合分，后一个合分前的时延要长一些，由具体的系统保护确定。

第三节 断路器触头运动特性

断路器触头运动特性包括触头合闸和分闸。合闸和分闸运动速度特性是满足断路器灭弧室内的电器性能的保证，而且对于不同类型和不同电压等级的断路器，触头运动特性也不相同。这是因为不同断路器的灭弧机理不同、灭弧室的结构不同、触头结构不同等因素所限。

交流电流的开断是电流过零前的电弧熄灭和过零以后的绝缘恢复过程，两者是相互关联的连续过程，体现在灭弧室的动作上是连续运动过程。过程中的变化对象是时间和行程，因而速度成为最恰当的特征值。从机构动力学方面看，速度决定了一定运动质量所具有的动能。速度的变化反映出作用力和阻尼力的变化，这些都是断路器操作的基本参数；从热力学和流体力学分析，速度决定燃弧期间电弧释出的功率，对于气体断路器决定灭弧室中气流参数，直接影响熄弧能力的强弱。

断路器的合闸速度直接影响预击穿燃弧时间的长短、触头能否关合到底，冲击和回弹等均依赖于速度及其特性。具有良好的开断特性，不具有相应的关合能力，只能降低容量使用，这时合闸运动过程成为矛盾的主要方面。

断路器的分闸速度直接影响开断性能，所以，分闸速度又分为刚分速度和平均速度。刚分速度是影响触头刚分开时的电弧引燃过程，同时，与电流在刚分时过零的触头间隙绝缘恢复性能和电压恢复特性的比较，从中可见，是否会发生再击穿重燃现象。平均分闸速度代表分闸过程，分闸速度的高低与介质恢复强度和最后分闸到底的反弹有直接关系。

一、触头最小熄弧间隙

触头最小熄弧间隙是指断路器能开断额定短路电流时的最小间隙，即在此间隙下电弧能可靠熄灭。触头最小熄弧间隙的数值由灭弧室的形式、结构和绝缘介质决定。多次开断电流后会改变绝缘介质质量和触头表面状态，这种变化将改变触头最小熄弧间隙。在真空断路器灭弧室中，最小间隙改变不大，但触头表面的烧蚀会改变开断性能，而开断间隙越大开断能力会下降，但间隙小到一定程度会使绝缘下降，所以这种矛盾的综合恰恰使触头运动特性在多次开断后基本不变。对于油灭弧室中，油在电弧作用下分解，酸值增加，碳粒子增加，耐压水平下降，同时构成灭弧室的有机绝缘材料亦会出现碳化现象，导致沿面闪络电压的下降。因此，触头最小熄弧间隙应是断路器多次开断以后的保证值。目前，对少油断路器的电

寿命要求达到满容量开断 10 次，额定电流开断数百次（由制造厂决定）；而 SF_6 断路器则需满容量开断 20 次，额定电流开断次数更高。

在横吹油灭弧室中，封闭气泡的阶段是自身能量积聚的阶段，而后必须开放横喷口才能形成强烈气吹，因而触头最小间隙大于横喷口开放的间隙。而在纵吹油灭弧室中，系一边开通气流通道，一边积聚电弧能量，最低限度应是相当于开通气道或建立气流的时间内动触头所达到的某一间隙。

在动喷口的 SF_6 灭弧室中，建立气吹的相应间隙，应是继形成上游电弧开放喷口部之后，在下游段造成足够的排放截面使电弧热量在电流过零之前绝大部分得以排出。因此，最小触头间隙至少是上游尺寸、喉部长度和形成熄弧气流的必要下游尺寸之和。而在固定喷口的 SF_6 灭弧室中，下游电弧是随气流而不断拉长的，与触头位置有关，两只喷口之间的距离是固定的，不论动触头的运动如何，其最小触头间隙总是等于喷口之间的固定距离。

对于真空灭弧室中，可通过弧后的绝缘距离定最小触头间隙。

对于不同的断路器可以定出燃弧时间，通过最小触头间隙和燃弧时间可以定出在此间隙内的平均速度，从而确定后续行程和速度，可初定触头的运动特性。

二、分闸速度特性

分闸速度特性是指分闸过程速度对时间的变化曲线，这条曲线是设计操动机构的依据。分闸速度特性的确定要考虑机构运动与各种开断要求相适应。并在此基础上注意运动特征参数（速度、加速度、动力）之间的关系和变化，以求得有一个配合良好的机构。

在触头分离前，动触头的运动是加速过程，此过程大致要延续到短燃弧终了，速度达到最大值时为止。越过最大值之后，运动过程应是减速过程，表现为速度不断地下降，其间有缓冲器参与动作到运动终止。在某些设计中，缓冲器的动作还提前到最大速度点之前发生。在分闸曲线上，最大速度是在加速度为零点，在这之前加速度为正，在这点之后加速度为负。若要求速度在触头分离后速度保持不变是不可能的，在技术上也是不合理的，因为最大速度对于电流过零后的介质绝缘恢复具有实质性的意义，只不过不能过大，否则对断路器不利。若一方面无谓地追求提高最大分闸速度，另一方面又加强缓冲过程，使更多地吸收动能并降低短燃弧区以后的能量，这虽然也能得到较满意的分闸速度曲线，但所花费的代价太大，这是设计的失败。

刚分速度（瞬时值）若落在最大速度点前到一个短燃弧时间之处，它与最大速度决定此燃弧时域内的开断性能，相当于（并不等价）IEC（国际电工委员会）的分闸速度所表达的意义。显然可以看到，刚分速度受接触反向超程时间和加速度的控制，若接触超程短，则为得到一定的刚分速度，加速度必须大，即分闸力要大；反之分闸力可小。在设定的分闸力下，调整接触超程的大小，可以调整刚分速度与最大速度之间的时间关系。

长燃弧末了的速度应较低，时差为 7~8.5ms。调整这减速阶段的曲线形状，起主要作用的是阻尼力，其中缓冲器为首要。过了这一点是运动系统受到剧烈缓冲而趋于停止区间。

有以上三点速度，分闸速度曲线可以初定。

三、合闸速度特性

在断路器设计中，合闸特性与分闸特性同样重要，致使在合闸时出现以下问题：

- 1) 由于触头熔焊而在分闸时不能顺利分开，从而影响开断特性。
- 2) 由于操作机构的合闸功不够，断路器合不到底，或不能顺利地合到底，动触头中途

出现明显停顿。

产生以上问题的原因是电动力的作用，且在设计中没有考虑电动力的影响，在油断路器中有预击穿使灭弧室压力过大的问题。

预击穿造成触头接触前一段产生电弧，在短路关合时电流过大，油断路器中的油的汽化，在动触头上产生附加的反力，阻止触头合闸。预击穿距离的大小与短路相位角有关，如相角为零时发生预击穿，非周期性分量过零时，电压处于峰值，击穿距离最大。这种情况下，油灭弧室考验最严格，因为预击穿电弧的能量最多，油的汽化造成压力增高的陡度最大，当相角在 0 和 $\pi/2$ 时，击穿距离按相角的增大而减小，可是非周期分量则按相角的增大而增大，当相角为 $\pi/2$ 时，理论上短路电流的峰值可达周期分量数值的两倍。此时电流对接触点的弹跳和熔焊是最严重的，但电弧能量较小。击穿距离中的电弧能量与时间成正比，因而需要减少缩短预击穿的燃弧时间，减少燃弧时间是提高合闸速度，这样不但燃弧时间可缩短，而且超程中的运动时间也可缩短，电动力的功耗相应会减少，油气造成的合闸阻力亦减少，只是操作的合闸功增加，然而这完全是必要的。

超程时间的缩短除提高合闸速度外，还可由直接缩短超程来实现。有人提出，在考虑合闸速度时，应当使动触头在电流峰值到来之前完成关合过程，这可以理解为：

当非周期分量为 100% 时，要求 10ms。

当非周期分量小于 100%，时间介于 5~10ms 之间，但电流峰值也相应减小。实际上触头不是在电压过零时接触。预击穿或长或短是存在的，非周期分量不可能达到 100%，电流第一半波从零升至峰值的时间小于 10ms。

各类接触的接触超程应当由以下因素决定：

- 1) 额定电流需要足够的纵向接触长度。
- 2) 避免耐烧触头与正常接触面相接触而必须预留的尺寸。
- 3) 要满足分闸过程中产生足够加速度的要求。

一般来说，对接式触头的超程比插入式的小，但其通流能力和动稳定较差，但对一些容量不大的断路器，采用对接式触头能降低操作机构的合闸功，获得尺寸小而紧凑的结构。

第四节 高压断路器对操动机构的要求

对操动机构的要求很严格。作为电网主要保护和控制元件的高压断路器，其动作可靠性是极为重要的。断路器该动时不动，不该动时乱动，都会造成线路事故，给电力系统带来巨大的损失。在电力设备中，断路器及其操动机构的机械故障比之其它设备要多。这主要是：

- 1) 操动机构的润滑系统差，动作环节多。故出现故障的可能性就大。
- 2) 高压断路器工作条件比较恶劣。
- 3) 断路器工作状态是非连续性的，有时甚至一年也动不了几次，这样，隐患不易及时发现。
- 4) 断路器及其操动机构类型多，结构差异大，因此，在制造和维修方面积累经验比较困难。

因此，在设计操动机构时，必须特别注意下述几个动作的性能及其动作的可靠性：

1. 合闸

在电网正常工作时，用操动机构使断路器关合，这时电路中流过的是工作电流，关合是比较容易的。但在电网事故情况下，如断路器关合到有预伏短路故障的电路上时，电路中出现短路电流，断路器导电回路将受到较大电动力的作用，电动力 F 可用下式表示：

$$F = 1.02 \times 10^{-7} C I_{\max}^2 \quad (3-1)$$

式中 C ——回路系数，数值在几十至几百之间；

$I_{\max}$ ——短路电流最大值 (A)。

由式可见，当电流 $I_{\max}$ 在几千安以下时，断路器导体间的电动力通常可以略而不计。而在短路故障时，电流可达几万安以上，此时，电动力的数值就很可观了，有时可达几千牛顿以上。另一方面，从断路器导电回路的布置以及触头的结构来看，电动力的方向又常常是妨碍断路器关合的。因此，在关合有预伏短路故障的电器时，由于电动力过大，断路器有可能出现不能可靠关合，如触头合不到底，则会引起触头严重烧伤，甚至断路器爆炸等严重事故。因此，操动机构必须是以克服短路电动力的阻碍，也就是具有关合短路故障的能力。同时要具备手动储能，即手动合闸的功能。

2. 保持合闸

由于在合闸过程中，合闸命令的持续时间很短，而且操动机构的操作功也只在短时间内提供，因此操动机构中必须有保持合闸状态的装置，以保证在合闸命令和操动功能消失后使断路器保持在合闸位置。

3. 分闸

操动机构要能够进行电动或手动分闸。为满足灭弧性能的要求，断路器还应具有一定的分断速度。使分断时间尽可能缩短，以减少短路故障存在的时间。

4. 自由脱扣与防跳跃

自由脱扣的含义是：在断路器合闸过程中如操动机构又接到分闸命令，则操动机构不应继续执行合闸命令而应立即分闸。

当断路器关合有预伏短路故障的电路时，若操动机构没有自由脱扣能力，则必须等到断路器的触头关合到底后才能分闸。这样有可能使断路器连续多次合、分短路电流，这一现象称为“跳跃”。出现“跳跃”现象时，会造成触头严重烧伤乃至爆炸事故。对具有自由脱扣的操动机构，则不管触头关合到什么位置，也不管合闸命令是否解除，只要接到分闸命令，断路器触头即执行分闸动作。所以，操动机构中必须要有自由脱扣装置。

高压断路器操动机构有弹簧操动机构、液压操动机构、电磁操动机构、手动操动机构、气动操动机构、电动机操动机构、永磁操动机构等。各类操动机构的特点对比如表 1-1。

表 1-1 各类操动机构的优缺点

型 式	主 要 优 点	主 要 缺 点	备 注
手动操动机构	1. 结构简单，价廉 2. 不需要电源用作合闸能源	1. 不能遥控和自动合闸 2. 合闸能力小 3. 就地操作，不安全	用于 10kV 以下小容量的断路器
电磁操动机构	1. 结构简单，加工容易 2. 运行经验多	1. 需要大功率的直流电源 2. 耗费材料多	当前 110kV 以下的油断路器大部分采用电磁操动机构，但不是发展方向

(续)

型 式	主 要 优 点	主 要 缺 点	备 注
电动机操 动机构	可用交流电源	要求电源的容量较大（但小于 电磁操动机构）	只用于容量较小的断路器，国 内很少生产
弹簧操动 机构	1. 要求电源的容量小 2. 交、直流电源都可用 3. 暂时失去电源时仍能操作一 次	1. 结构较复杂 2. 零部件加工精度要求高	用于中小型断路器，是发展方 向
气动操动 机构	1. 不需要直流电源 2. 暂时失去电源时仍能操作多 次	1. 需要空压设备 2. 对大功率的操动机构，结构 比较笨重	适用于有空压设备的场所
液压操动 机构	1. 不需要直流电源 2. 暂时失去电源时仍能操作多 次 3. 功率大，动作快，操作平稳	1. 加工精度要求高 2. 价格较贵	适用于 110kV 以上超高压断路 器，是发展方向
永磁操动 机构	1. 结构简单 2. 加工容易 3. 操作功小	1. 出力小 2. 永磁材料必须选退磁小的材 料	适用于中小型断路器

第二章 弹簧操动机构优化设计的基础理论

第一节 机构的组成

一、机构组成要素

如图 2-1 所示，曲柄、连杆、滑块和机架组成曲柄滑块机构，从图中可见，组成这一机构的要素（与运动有关的要素）是构件和运动副。

1. 构件

构件是机构学中的术语，它是机构中的运动单元体。它可由一个零件组成或多个零件组成，但对于机构来说是一个最基本的单元。

2. 运动副

机构中具有相对接触运动的两个相邻构件称为一对运动副。机构中各构件间都有一定的相对运动，为此，必须对各构件的运动加以约束，这种约束一般是通过机构中相邻构件上一定几何形状的两部分相互接触来实现的。运动副又分为：

移动副、转动副、滚动滑动副、球面副和螺旋副。

(1) 转动副 如图 2-1 所示，曲柄被机架的轴承孔所约束，其结构如图 2-2 所示，相对轴向的移动由两端约束，使轴只能绕轴线转动，主要约束面的特征为一对圆柱表面，这一对圆柱表面即组成一个转动副的两个元素。

(2) 移动副 如图 2-1 中的滑块（动触头）和机架被一对平面所约束，如图 2-3 所示，使滑块只能沿 x 方向作直线运动（ y 方向为另一对平面所约束）。所以，一对平面是组成移动副的两个元素。移动副的运动特征为沿导轨方向运动；主要约束的特征是一对平面。所以表征这个特征的简图有两种，如图 2-4 所示。

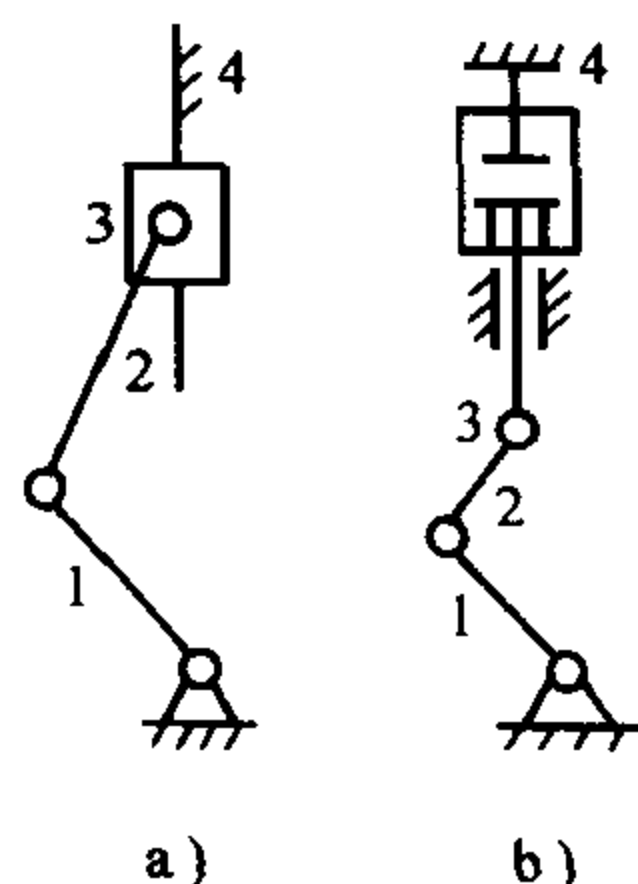


图 2-1 曲柄滑动机构

1—曲柄 2—连杆 3—滑块 4—机架

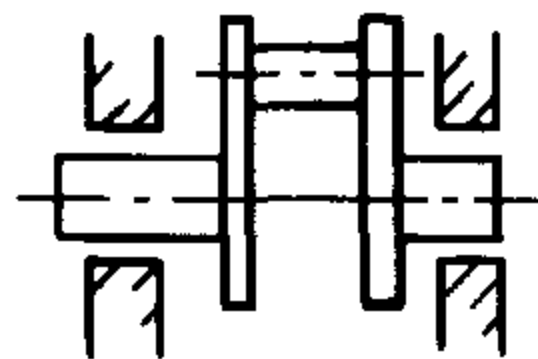


图 2-2 转动副

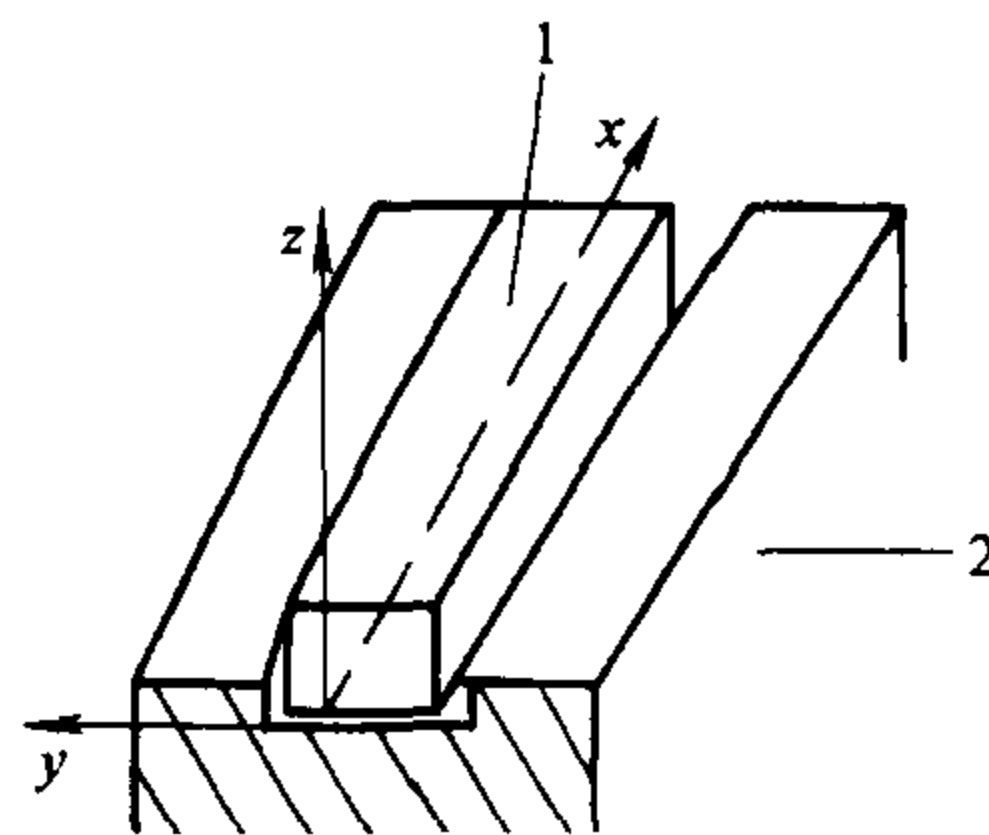


图 2-3 移动副

1—滑块 2—机架

(3) 滚动滑动副 如图 2-5 所示的凸轮机构，凸轮上不同半径的曲面和推杆的圆柱表面接触，它们组成滚动滑动副。这对表面由弹簧使之相互接触；这两柱形表面的轴线平行，所以它们成线接触；这对表面允许作相对滑动和相对滚动，所以称为滚动滑动副。滚动滑动

副的运动特征与接触曲面有关, 所以其简图应画出曲线的几何形状, 表征这形状的几何参数是曲率中心的位置和曲率半径的大小。

(4) 球面副和螺旋副 图 2-6 所示为球面和球座的结合, 允许两杆件绕 x 、 y 、 z 轴相对转动, 不允许两构件有离开轴线交点的相对移动, 这种运动副称为球面副。图 2-7 所示为阴阳螺纹的结合, 使两构件间作相对螺旋运动 (按螺旋线的规律作轴向相对运动), 这种运动副称为螺旋副。

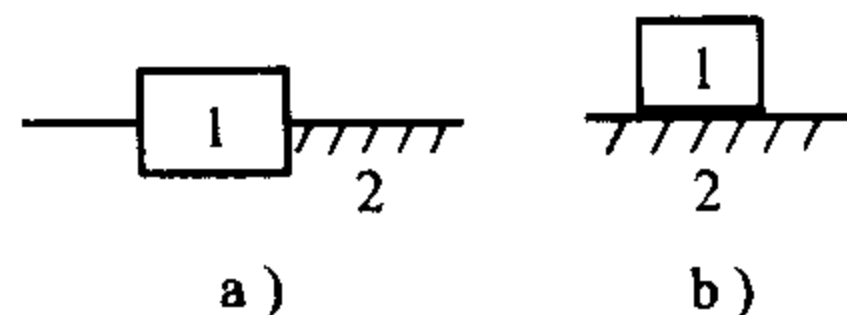


图 2-4 转动副简图
1—滑块 2—机架

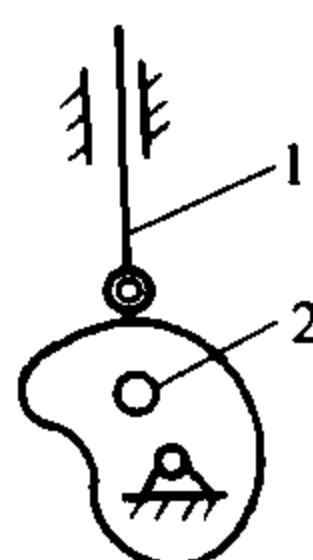


图 2-5 凸轮机构
1—推杆 2—凸轮

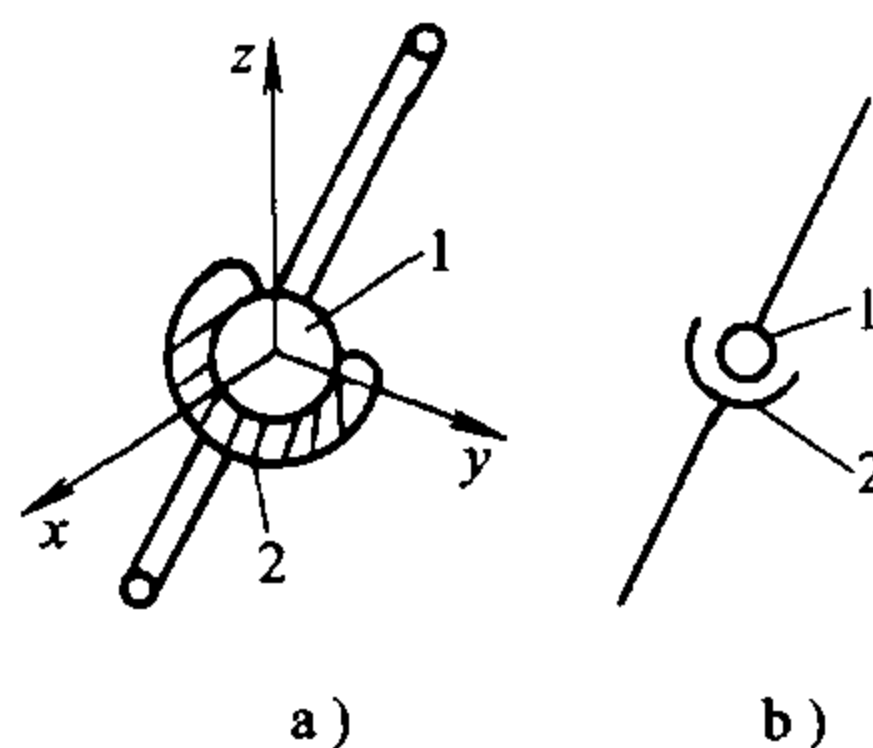


图 2-6 球面副
1—球面 2—球座

电器机构中常见的运动副与上述基本相同。这些运动副中, 理论上作面接触的运动副称为低副 (单位面积应力较低), 如转动副、移动副、球面副和螺旋副等; 作点或线接触的运动副称为高副 (单位面积接触应力较高), 如滚动滑动副等。

3. 运动链及形成机构的条件

运动链就是构件通过运动副连接起来的完成一定规律运动的整体。如图 2-8 所示, 四杆机构的 1、2、3、4 四个构件通过 A 、 B 、 C 、 D 四个运动副构成一闭环的运动链。运动链是运动过程的简图。要想实现这一运动链所要完成的运动方式, 还需要以下几个必要条件:

(1) 需要一个机架 一般选择相对于地固定的构件为机架, 它是研究机构中各构件运动的参考坐标系。

(2) 具有足够的主动件 (外界给予一定运动规律的构件) 使其余构件有确定的相对运动。

(3) 具有从动件 即运动的目标和目的。

如图 2-8 所示, 使机架 4 固定作为机架, 若使构件 1 与原动机相联, 或手操纵而成主动件, 则当转至任一位置时, 构件 2、3 的位置就随之确定 (即以 B 、 D 为圆心, BC 、 DC 长为半径作弧相交点 C)。这样, 只要给一个主动件的旋转的运动即足够了。这时, 运动链就形成了机构。从这里也可以看出, 机构的运动是与运动副的形状和位置有关, 而与构件的形状无关。

二、机构的自由度计算

机构的运动自由度是指确定机构中各构件相对机架的位置 (或运动), 所需给定的独立参变量数目。若一个构件给一个独立参变量, 则机构的自由度数就是机构所需的主动件数。

本节研究断路器机构中常见的平面机构的自由度。所谓平面机构是指机构均在同一平面或互相平行的平面内运动。

1. 在平面中运动的构件所具有的自由度

对于一个平面坐标系来说, 一个构件在平面内运动, 要确定构件的位置需要给定三个独立变量: x 方向、 y 方向以及与 x 方向的夹角 φ (见图 2-9)。这也就是说构件可在 x 方向、

y 方向运动和绕 A 点转动, 故作平面运动的构件具有三个自由度。

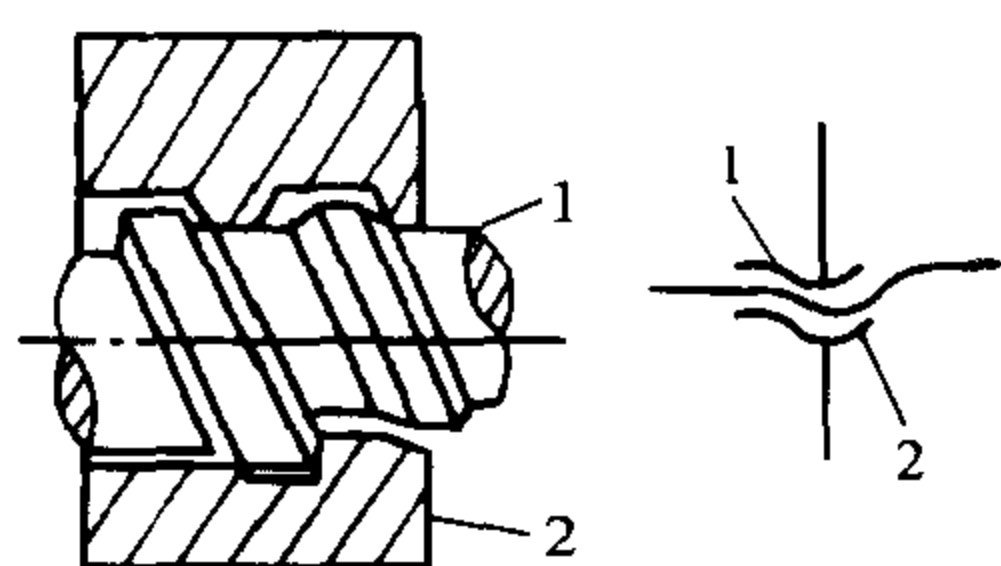


图 2-7 螺旋副

1—螺杆 2—螺母

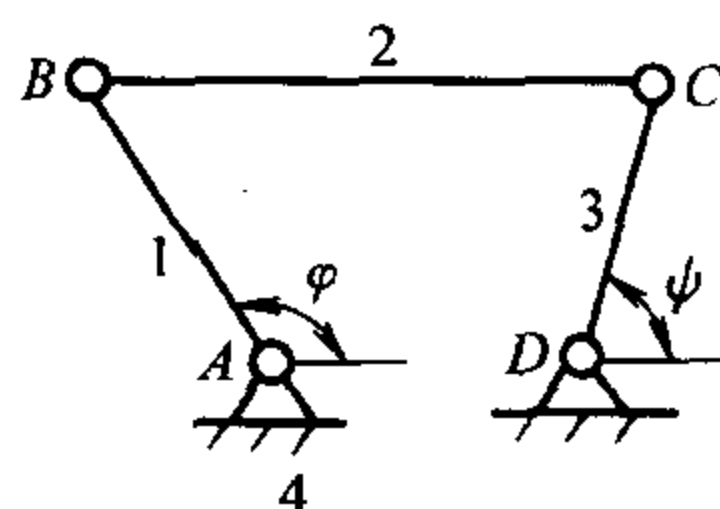


图 2-8 运动链

1、2、3—连杆 4—机架

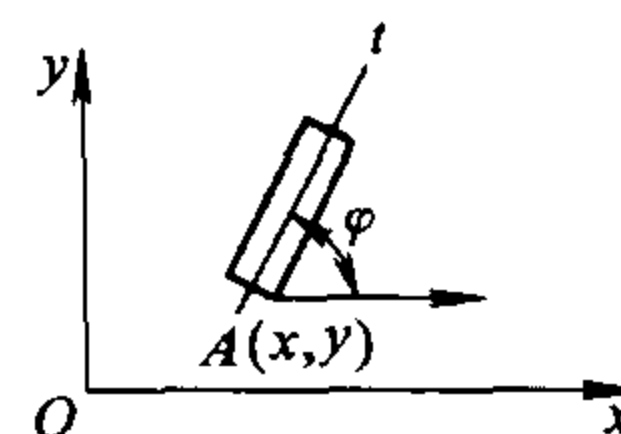


图 2-9 构件作平面运动的自由度

2. 运动副对构件的约束条件

两构件通过运动副相联以后, 相互约束了构件在某些方向上的自由运动, 即产生了约束条件, 减少了构件的自由度。

(1) 转动副的约束 设一构件原有三个自由度, 它与固定构件 (机架) 组成转动副后, 只剩下一个相对 A 转动的自由度, 即转动副约束了构件上点 A 在 x 、 y 方向的移动 (见图 2-10)。所以组成一个转动副, 须引入两个约束条件, 即失去了两个自由度。

(2) 移动副的约束 如图 2-4 所示, 两构件组成移动副后, 只保留了沿导轨方向 (x 方向) 相对移动的自由度, 所以移动副也是引入两个约束条件。

(3) 滚动滑动副的约束 如图 2-5 所示, 两构件组成滚动滑动副, 阻止了构件相对于另一构件沿公法线方向移动, 而保留了沿公切线方向的移动和绕本身曲率中心的转动两个自由度, 滚动滑动副引入了一个约束条件。

3. 平面机构的自由度计算

设一个机构共有 N 个构件, 其中 $N-1=n$ 个构件为运动构件, 有 P_5 个转动副和移动副, P_4 个平面滚动滑动副, 则按照上述分析, 该机构中所有运动件的自由度 ($3n$) 减去运动副引入的约束条件数 (转动副或移动副为 $2P_5$ 、滚动滑动副 P_4), 就得机构的自由度数 W , 所以

$$W = 3n - 2P_5 - P_4 = 2P_4$$

图 2-11 是一个五杆机构, 它有四个构件 (1、2、3、4) 和五个转动副 (A 、 B 、 C 、 D 、 E), 机构的自由度为

$$W = 3 \times 4 - 2 \times 5 - 0 = 2$$

这就是需要给定两个独立的参变量, 各构件才有确定的运动。给定构件 1 长度和位置及构件 2 长度和位置, 其他构件的位置方可确定。

图 2-12 为凸轮机构, 有两个运动构件 (1、2), 一个转动副, 一个移动副, 一个滚动滑动副, 机构自由度数

$$W = 3 \times 2 - 2 \times (1 + 1) - 1 \times 1 = 1$$

给定凸轮位置 ϕ 后, 构件 2 就有确定的位置。

对一些特殊情况应进行特殊处理, 常见的有以下几种。

(1) 复合铰链 转动副也称铰链, 当有两个以上构件用同一个转动轴作为转动中心时, 该处的转动副称为复合铰链。如图 2-13a 所示, 三个构件组成转动副 O , 可将其化为图 2-13b 的结构, 实际上它们组成两个转动副。所以, K 个构件铰接在一起时, 应看成有 $K-1$