

离心分离理论及设备

〔苏〕В. И. 索柯罗夫 著

机械工业出版社

离心分离理论及设备

〔苏〕B. И. 索柯罗夫 著

汪泰临 孙启才 陈文梅 译

孙启才 校



机械工业出版社

离心分离是极为重要和普及的工艺过程，而现代离心机则是各部门广泛使用的生产设备。本书主要探讨离心分离各种过程的理论基础及其实际应用。阐述根据生产要求和被分离的物料性质选择离心机的原则。最后专辟一章介绍利用离心机进行分散分析的方法及其应用。

本书可供企业的工程技术人员、各有关部门的研究和设计人员以及高等学校师生参考。

ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЕ

В.И.Соколов

МОСКВА ИЗДАТЕЛЬСТВО «ХИМИЯ»

1976

离心分离理论及设备

〔苏〕В.И. 索柯罗夫 著

汪泰临 孙启才 陈文梅 译

孙启才 校

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业登记证出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $13^{1/4}$ · 字数 350 千字
1986年10月北京第一版·1986年10月北京第一次印刷
印数 0,001—2,800 · 定价 3.85 元

统一书号：15033·6362

译 者 的 话

本书系根据苏联化学出版社 1976 年出版的 В. И. Соколов 教授著《Центрифугирование》一书译出，В. И. Соколов 教授是从事离心分离研究的著名学者，在离心过滤过程与离心沉降和分离过程的机理与分离原理、离心力场中的流体动力学等方面均有独到的见解，发表过很多论文，至于专著，自 1950 年出版《Центрифуги》一书后，大约每五年有一本专著问世，但自本书出版以来，近 10 年未见著者其他专著出版。本书内容不但积累了著者多年的研究成果，还涉及苏联及其他国家许多学者有关的研究成果和生产实践经验，内容较全面而丰富，对科研、设计、生产、教学均有较高的参考价值，故译出以飨读者。

本书由汪泰临（第一、四、六、八、九章）、孙启才（第三、五、七章）、陈文梅（第二章）翻译，孙启才校。原书排印错误较多，译文中均已改正。但由于译、校者水平有限，错误难免，请读者指正。

译 者

1985 年 4 月

前 言

离心分离过程在许多技术部门里普遍使用。在化学工业中离心分离用来精确地净化各种溶液以清除其中悬浮的杂质，从母液分离出结晶产品和非定形产品，分离乳浊液、浓缩悬浮液等。离心分离也是物理化学分析的一个重要组成部分。本书专门探讨这些最重要的问题。

近来有些著作详细地研究了工业离心机的结构、操作问题和离心机在实际应用中的选用问题。本书研究离心分离的理论问题，指出离心分离各过程的非同义性和多样性。叙述离心澄清和离心沉降、离心过滤（其中包括形成滤渣的过滤，滤渣的压紧和机械干燥）各过程，以及过渡过程和相邻过程。

本书与以前出版的书籍不同之处是详尽地探讨了离心分离时进行的流体力学各过程。离心机转鼓中的液流性质有许多特点，这些特点常被忽略。其实这些液流的构成在很大程度上影响着离心分离的效率。因此，在本书中不仅要探讨离心力场中液体流动的理论问题，而且要探讨许多试验结果。此外详细地阐明离心机的生产能力指数问题和澄清数问题。

本书引用了作者和他的同事们的研究结果，首先汇集了苏联研究人员 П. Г. Романков, Е. М. Гольдин, В. С. Каминский, С. А. Плюшкин, Л. С. Зарубин, Л. С. Борц, Д. Е. Шкоропад, П. И. Белянин, Ю. И. Бочков 等人的资料并加以系统化。

目 录

前言

✓第一章 离心分离原理	1
一、离心分离过程的分类	1
二、离心机的分类	4
三、离心分离物料的可分离性特性曲线	10
四、离心力场的某些性质	20
五、离心分离过程的一般规律	30
六、生产能力指数——离心机的主要特性	32
✓第二章 离心机的流体动力学	45
一、柱坐标系中的连续方程	45
二、离心力场中欧拉平衡微分方程	47
三、离心力场的伯努利方程	53
四、回转坐标系中的奈维-斯托克斯微分方程	61
五、回转液体中产生的特殊现象	68
六、离心机转鼓中液体的出流	78
七、离心力场中液流的临界深度	84
八、开式液流坡降曲线形状	87
九、转鼓内呈圆筒状的液流	92
十、离心机螺旋形通道中的液流	109
十一、碟片间液流的流体动力学	119
✓第三章 沉降状况下的离心分离	134
一、过程的种类	134
二、固相浓度低的悬浮液中单分散颗粒在离心力场中的沉降规律	138
三、离心分离的极限	145
四、从转鼓沉降表面上冲刷固相颗粒	149
五、分离单分散悬浮液时澄清和沉降离心机的生产能力	154
六、沉降离心分离工况下多分散悬浮液的分离	166

七、离心沉降时沉渣的压实	183
第四章 沉降离心机	188
一、螺旋卸料沉降离心机	188
二、连续作用的水力旋流卸料沉降离心机	203
三、间歇作用的机械卸料沉降离心机	209
四、管式和室式澄清离心机	210
✓第五章 薄层沉降离心分离	215
一、过程机理	215
二、理想的薄层沉降离心分离过程	217
三、颗粒固定在碟片表面上的条件	224
四、薄层沉降离心分离时被分离的悬浮液中颗粒的相互作用	227
五、多分散系薄层分离的规律性	236
六、随机过程的悬浮液离心分离	247
第六章 薄层分离沉降离心机	253
✓第七章 离心过滤	274
一、过程机理	274
二、离心过滤的规律性	282
三、薄层离心过滤	327
第八章 过滤离心机	332
一、人工和机械卸料立式离心机	332
二、刮刀和刮板卸料卧式离心机	340
三、螺旋卸料过滤离心机	343
四、脉动卸料离心机	347
五、振动脉冲卸料离心机	361
六、惯性力卸料离心机	365
✓第九章 离心分离在分析方面的应用	373
一、测定蛋白质的分子量和分离溶液中的组分	373
二、在专用离心机上用离心分离作悬浮液的分散分析	379
三、用管式高速离心机(超速离心机)进行分散分析	398
参考文献	415

第一章 离心分离原理

一、离心分离过程的分类

离心力场的创立和运用是科学和技术的成就之一，离心力场对在离心机中分离非均相物系来说是极为有效的。这种分离叫做离心分离，它是许多新的工业过程的基础。借助于离心机可以相当精确地，同时迅速地分离极不相同的非均相液态物系，如原油和聚氯乙烯树脂悬浮液、润滑油和铵盐、煤泥和淀粉悬浮液、变压器油和酵母悬浮液。

离心分离过程是一种极其复杂的工艺过程，离心机是一种极其复杂的工艺设备。但是，并不是离心机所有的工作理论问题都得到足够的发展和阐述。用离心机分离非均相物系的效果尚不能精确地预计。

仅为力场所联合的并在力场中进行的离心分离各过程是不同的，并具有不同的规律性。悬浮液、矿浆、乳浊液、溶液和气溶胶的离心分离是不同的。

工业悬浮液和矿浆可以用两种方法进行离心分离，第一种方法是利用分散相的体积力分离；第二种方法是利用分散介质和部分分散相的体积力分离。第一种情况用无孔的转鼓完成离心分离，第二种情况用有孔的转鼓完成离心分离。

尽管离心力场的特性决定了这些过程进行中的重大差异，但仍可把无孔转鼓的分离与重力场中的澄清相比。有孔转鼓的离心分离是一种独特的过程，其各个单元与矿浆等的过滤、压滤过程相似。

用无孔转鼓离心分离悬浮液和矿浆的过程可以分成离心澄清和离心沉降。

离心澄清是指借助于离心机最仔细地清除液体中含有的，为

数不多的（不多于5%）杂质的过程而言。这一过程可以看作是 在离心力场作用下液体中固相颗粒的自由沉降。从清漆和润滑油中清除污垢和杂质，以便使清漆和润滑油再生；从丁醇中离析氧化钛，从液体中分离出细菌等都可以称做离心澄清。

离心沉降是分离含有大量固相的悬浮液过程。从煤泥中分离出水分，从污水中离析出固相等都是离心沉降。离心沉降一般有三个过程：1. 固相沉降；2. 沉渣压实；3. 从沉渣孔隙中部分清除液体。

用有孔转鼓离心分离悬浮液和矿浆的过程叫做离心过滤。它是由惯性离心力作用到所处理的物料上而进行分离的。在一般情况下，有下列三个过程：1. 过滤和形成滤渣，即在液体通过离心机转鼓多孔壁时把悬浮于液体中的颗粒分离出来；2. 从所形成的滤渣中压出液体；3. 从滤渣中排出分子力所保留的液体。

形成滤渣的离心过滤与普通过滤类似。过滤后随即从滤渣中压出液体，同时将滤渣压实。然后将颗粒各接触处和颗粒表面上所保留的液体排除。从洗涤液中分离间硫氮杂茛苈硫醇-〔2〕和从母液中分离亚硝基酚就是经过上述三个过程的离心过滤的实例。

由挤压与分离薄膜液体和毛细管液体组成的过程叫做离心挤压。例如硫酸铵的离心分离过程。

我们把只进行排出薄膜液体和毛细管液体的过程叫做离心干燥。在这种情况下，除薄膜液体和毛细管液体流出外，液体也因蒸汽被流经转鼓壁的空气流带走而蒸发。

乳浊液的离心分离通常叫做乳浊液分离。这一过程的目的在于分离乳浊液或者将其浓缩。这一过程是在无孔转鼓内进行的，可以把它比作是在重力场中澄清乳浊液。从润滑油中把水分分离出去就是一例。

溶液的离心分离还未普遍推广。许多溶液目前还不能做到完全分离，因为在现代离心机上产生的离心力场强度还不足以克服扩散力。

图 1-1 上为说明上述离心分离过程分类的示意图。

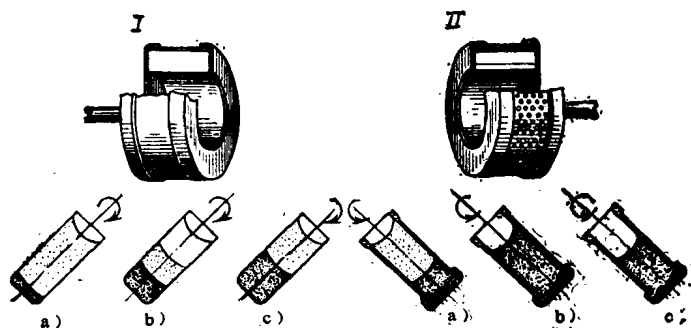


图1-1 离心分离过程分类示意图

I—无孔转鼓的离心分离 a) 澄清 (各别固态颗粒的沉降) b), c) 离心沉降 [b) 固相沉降 c) 压实沉渣] II—有孔转鼓的离心分离 (离心过滤) a) 形成滤渣 b) 压实滤渣 c) 排除薄膜液体和毛细管液体

离心分离过程也象其他工艺过程一样，可以分为间歇的、连续的和混合的。

间歇过程时，其各个阶段或工序是在一台设备或机器上，但在不同时间里实现的。间歇离心分离时，从装料到卸料之间的时间里，液相不断地从旋转着的转鼓中排出。间歇过程的某些参数随时在变化。例如，离心分离过程的速度降低，则废液——分离液中的固相浓度也变化等。

用卧式刮刀卸料离心机离心分离浓缩过的悬浮液，就是富有代表性的间歇离心分离过程的实例。在缓慢旋转时，把物料装入离心机转鼓。然后转鼓旋转达到最高速度。当转鼓等速旋转时，实现离心分离和洗涤产品。最后，制动转鼓，利用刮刀或刮板从转鼓中将渣刮下。然后重新重复这一生产循环。

连续过程的特点是所有各阶段同时进行，状态稳定和连续卸出最终产品。在理想情况下，连续过程时由于所处理的物料任何一点上或在设备的任何截面上状态都是稳定的，所以在过程进行的全部时间里物理量或参数始终是不变的。连续离心分离时，转鼓的旋转速度是恒定不变的。离心机连续和断续地卸出由分离所

得的产品，而离心机的生产能力和过程的速度一直不变。用螺旋卸料沉降离心机处理悬浮液，用碟式分离机和管式高速离心机分离乳浊液都是连续离心分离的例子。

用间歇地从周边将集聚在转鼓内的沉渣卸出的碟式分离机连续澄清液体是混合离心分离过程的例子。我们可以把用管式高速离心机澄清液体看做是混合离心分离过程，它在很长时间中连续地澄清液体，在间歇停车时卸出沉渣。

二、离心机的分类

离心分离在各个技术领域里都得到广泛地使用。所以不必探讨离心机的全部使用情况和其结构。我们只探讨一下化学工业部门和相近工业部门使用的离心机。

离心机可以分成生产用的和分析用的。作为一种工艺设备，生产用离心机的最有代表性的标志是分离原理、工艺用途、过程的进行方式（连续的或间歇的）。离心机的结构特征是：轴的配置、轴的支座装置和支座的配置、卸渣方法、密封程度和防爆等级。

离心机产生的离心力场的加速度很能代表离心机的特点。但是，在实践中便于探讨的不是这个值，而其与重力场加速度的无因次比，即所谓离心机分离因数。

$$Fr = \omega^2 R / g \quad (1-1)$$

加大角速度（被迫缩小转鼓半径时）在实践中可以取得分离因数的最大值。自然， ω 和 R 取决于离心机的结构特性。增大分离因数就要对与强度条件、稳定性条件等有联系的结构提出特殊要求。

分离因数常常决定着离心机的结构特点。因此可以有条件地把离心机分成两类：常速离心机（ $Fr < 3500$ ）和高速离心机（ $Fr > 3500$ ）。每一类离心机的结构形式在不久前还是各具特点的，但是，现在它们之间的界限已开始消失。

根据分离原理，离心机可以分为过滤的、沉降的和组合的。

过滤离心机可供在要求滤渣深度脱水 and 高度洗涤时分离悬浮液用，以及供压滤其孔隙完全或部分为液体所填充的非流动物料用。

沉降离心机既可用于分离易于过滤的悬浮液，又可用于分离不易过滤的悬浮液。根据工艺用途，沉降离心机可以细分为脱水离心机、通用离心机、澄清离心机和分离机，供分离乳浊液用。

脱水沉降离心机用于对沉渣脱水程度要求很高时，分离中等分散性的高浓度悬浮液，通用离心机用于对分离液纯度和沉渣湿度要求适宜时，分离中等和低浓度的悬浮液。澄清离心机供从低浓度悬浮液中分离出高分散的固相之用。

根据渣的卸出方法离心机可分为人工卸料离心机、螺旋卸料离心机、料斗卸料离心机、重力卸料离心机、脉动活塞卸料离心机、活塞推料离心机、惯性力卸料离心机、刮刀卸料离心机、机械气动和液力卸料离心机。

人工卸料离心机是间歇作用的。这种机器的小时生产能力取决于转鼓容积和循环时间。澄清漆和油漆用的管式离心机（图 1-2 a）就是一个例子。化学工业中也普遍使用人工上部卸料（图 1-2 b）和人工下部卸料（图 1-2 c）的上悬式和三足式（吊悬在支脚上）离心机。

现在工业中力求避免手工劳动。三足式离心机正在试装效率较高的卸料机构。可以预料，上悬式离心机将逐渐不适用于化学工业，而三足式离心机将在化学生产设备中占重要位置（如在卸料机械化方面能证明预计是良好的话）。

由于改进了人工下部卸料离心机，而制出所谓自卸式离心机，这种离心机主要用于制糖工业，滤渣在重力作用下（重力卸料）从离心机中卸出。这种机器的转鼓由圆柱部分和锥形部分组成。卸料时，滤渣沿底部斜面滑动并落入料斗中。

螺旋卸料离心机具有重大的实际意义。这种离心机利用的是两个同心转鼓差动旋转的原理，在外转鼓中进行离心分离，而内转鼓用于固定螺旋带或沿螺旋线布置的叶片。在两个转鼓的转速

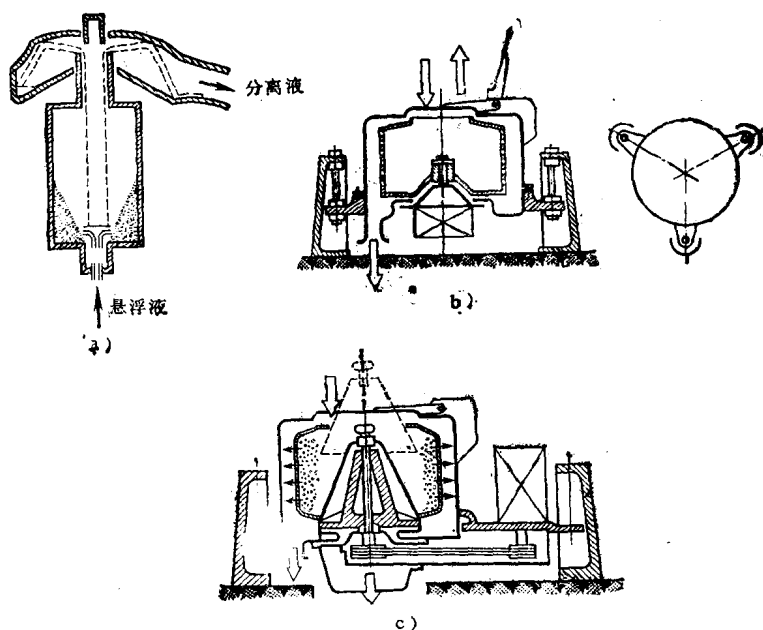


图1-2 人工卸料离心机

a) 管式离心机 b) 上卸料离心机 c) 下卸料离心机

相差不多时，在外转鼓壁上形成的沉渣被螺旋带或叶片运至卸料口，沉渣通过卸料口被抛入收集器中。

螺旋卸料离心机的主要优点是可以连续工作。悬浮液在转鼓中从小端向大端流动的同时，形成的沉渣被螺旋向相反的方向输送。同时在输向卸料的途中沉渣通过干燥区，在那里失去部分液体（图 1-3 a）。

螺旋沉降离心机主要用于分离悬浮液用，也可作分级器用。调节机器的生产能力，就可以得到含有一定分散度的固相的分离液；含少量细颗粒组分的干燥沉渣从转鼓中排出。

螺旋卸料的过滤离心机的转鼓可制成圆柱形和圆锥形。圆锥形时滤渣从转鼓小端输送到大端（图 1-3 b）。因而减少了卸料所用的非生产能源的消耗，而滤渣被粉碎的程度较小。但是，大

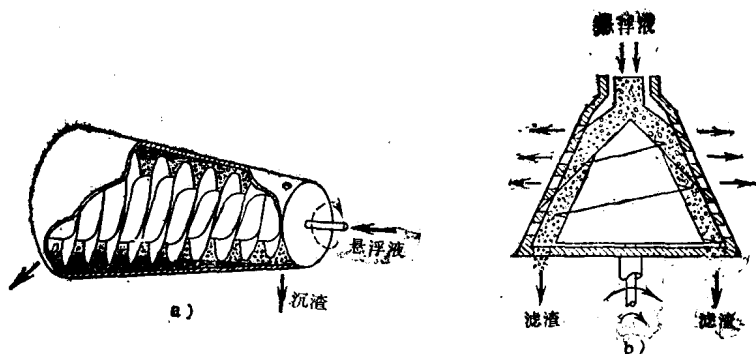


图1-3 螺旋卸料离心机的转鼓示意图

a) 沉降离心机的转鼓 b) 过滤离心机的转鼓

多数这种离心机的结构的严重缺点，仍是离心分离的物料粉碎得太细和过滤面孔隙的堵塞。由于有上述缺点和现代的差动传动装置的结构太复杂，所以该型离心机在卸渣过程中容许滤渣颗粒有某些破坏的情况下，适于处理中等粒度的，且浓缩过的物料。

脉动活塞卸料的离心机都是过滤离心机（图1-4）。在连续进料的同时，滤渣被分批推出。这一过程依靠在轴向上作往复运动

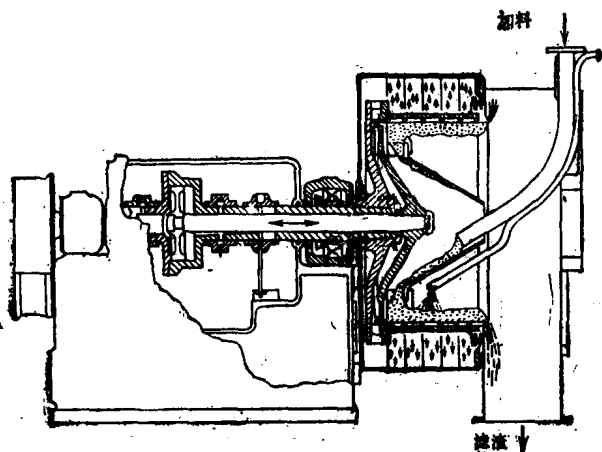


图1-4 脉动活塞卸料的离心机示意图

的圆盘或活塞来实现。这种类型离心机的缺点是滤液不清，滤渣易碎和卸料要耗用非生产能源。因此，这种离心机适于在滤液容易为固相所污染时，处理大粒度和中等粒度、易于失去流动性的物料用。

活塞推料离心机在速度降低时，从转鼓中间歇地把滤渣推出。这种型式的离心机是间歇作用的离心机。

用刮刀和刮板卸料的离心机是间歇作用的，主要是制成带过滤转鼓的，而较少制成带沉降转鼓的。这种型式离心机的结构，可以保证在全速时或降低转速时，在运行中用专用的刮刀机构卸出滤渣。这时滤渣落入槽中，并经过转鼓敞开的边缘排出（图1-5）。一般这种机器都是用专用调节器控制循环的电动、液动或气动装置来操纵的。

因此，虽然在这种情况下，过程也不是连续的，但是机械化和自动化程度很高。此外，在运行中进料和卸料有助于缩短工作周期。这种型式的离心机可在滤渣耐磨性不高且容许粉碎时，在各种固相和液相比的条件下，用于处理中等粒度和细粒度物系。

在刮刀和气动卸料的组合离心机中，刮刀和气动循环系统相连接。刮下的滤渣被空气流或惰性气流托起，并从转鼓中吸出。

惯性力卸料离心机不需要为运送滤渣消耗非生产用能量。滤渣在运行中，在离心力场作用下或借助转鼓的振动，从机器中排出。滤渣沿锥形转鼓母线或沿各个叶片运动。

该型过滤离心机是连续作用的机器。阻碍扩大这种离心机使用范围的主要缺点是物料在转鼓中的停留时间难于调节，从而造成不能完全排除液相。连续作用的进动离心机和振动离心机没有上述缺点，但是它们的分离因数低，这就使它们的使用范围受到限制。

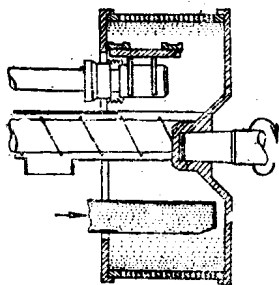


图1-5 刮刀或刮板卸料的离心机示意图

在离心力作用下卸渣的沉降离心机一般都是间歇作用的机器。转鼓中形成的沉渣经过间歇开启的窗口或缝隙卸出。

也使用兼具脉动卸料和振动卸料工作原理的离心机。

悬浮液的固相需要浓缩时，可使用液力卸料。离心分离时浓缩过的固相不断地从配置在转鼓周边的喷嘴排出（图1-6）。

使用下列卸料方法：螺旋卸料、脉动活塞卸料、在惯性力作用下卸料（过滤离心机），液力卸料时，离心机都是连续作用的。其余的离心机是间歇作用的，并可完全或部分自动化。

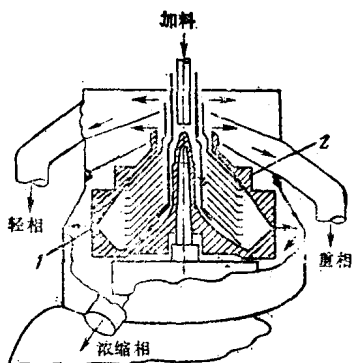


图1-6 液力卸料离心机示意图

1—喷嘴 2—转鼓

离心机结构极为不同。结构的主要差别在于轴的支座装置和配置，在于转鼓的结构，在于离心机轴线的配置。离心分离过程的进行情况在颇大程度上取决于滤渣从离心机转鼓中的卸出方法。例如，当滤渣沿转鼓锥形表面运动时，滤渣的渗透性和过程的运动力的大小均在改变。卸料方法常决定着对原料和成品特性的要求等。因此，从离心机卸出分离产品的方法是离心机最重要的特性之一。

离心机轴线在空间的配置常与卸料方法有关，它在很大程度上决定着离心机的结构型式。根据支座装置和轴线的位置，离心机可以分成：1. 有上驱动装置和转鼓上方有弹性铰接支座的立轴上悬式离心机；2. 弹性悬挂在支脚上的，有下驱动装置的三足式（摆式）离心机；立轴的支座装在共用的刚性机壳上；3. 立式离心机，它的轴在转鼓下面有刚性的或弹性的支座（有支撑轴）；4. 轴的支座为刚性或弹性的卧式离心机；5. 轴的支座为刚性或弹性的倾斜式离心机；6. 管式离心机——有立轴和长的

管状转鼓。

人工卸料、重力卸料、液力卸料以及借助离心力卸料（过滤离心机）和螺旋卸料时，离心机可以制成悬吊式的。

人工卸料，刮刀卸料和机械气动卸料时，主要是制成悬挂在支脚上的三足式离心机；而用人工卸料，以及借助惯性力卸料、用脉动活塞和螺旋卸料时，可制成带有支撑轴的立式离心机。

用脉动活塞、螺旋、惯性力、刮刀和刮板卸料时，离心机可制成卧式的。

只用刮刀和刮板卸料的情况时，离心机才制成倾斜式的。

三、离心分离物料的可分离性特性曲线

必须指出，决定离心分离过程进行情况和效果的是物料的主要物理性质和物理化学性质。对离心分离过程来说，分散物系最重要的性质是由组成多相物系的组分的面界面决定的。但是不必研究分散相颗粒的绝对表面积，而是研究比表面积，即颗粒表面积与其体积的比，要更方便些。尺寸相同的球状颗粒的比表面积（ m^{-1} ）为

$$s = \frac{6\pi d^2 n}{\pi d^3 n} = \frac{6}{d} \quad (1-2)$$

颗粒按尺寸分布的累积曲线微分曲线都可以做为物系分散性的特性曲线。绘制累积曲线时，以颗粒直径 d 为横坐标，小于或大于该尺寸的所有颗粒组分的含量（%）做为纵坐标。

使用数学统计术语，应当把颗粒的直径看做是一元的随机变量。分散物系的性质最好是用分布函数 $\Phi(d)$ ——按颗粒直径分布的物料质量来描述。函数 $\Phi(d)$ 等于直径小于（或大于） d 的所有颗粒的质量与分散物料总质量的比（%）。分布函数以分布曲线形式用图表示出。为此，按一定比例，以一元的随机量值做为横坐标，在我们这种情况下，就是把颗粒直径 d 或其某一函数值，例如，颗粒在重力作用下在液体中的沉降速度做为横坐标。直径小于（或大于） d 的所有颗粒质量含量（%）做为纵坐标。