

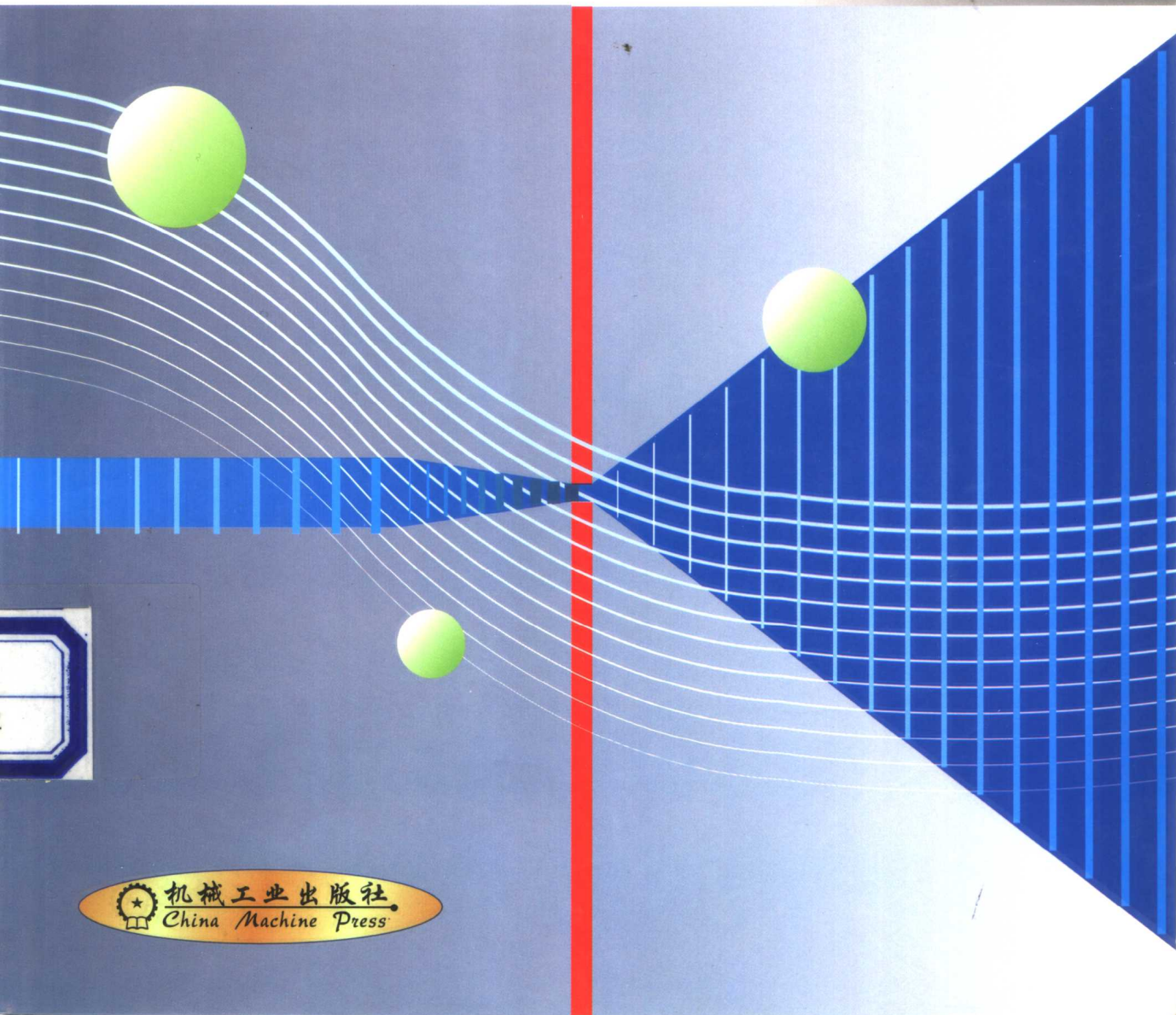
3

普通高等教育机电类规划教材

# 流体机械原理

下册

华中理工大学 张克危 主编



 机械工业出版社  
China Machine Press

普通高等教育机电类规划教材

# 流 体 机 械 原 理

下 册

主 编 张克危  
副主编 冯全科 林洪义  
参 编 邢子文 毛楚方  
主 审 ~~常近时~~



机 械 工 业 出 版 社

本书系统地讲述了各种流体机械的工作原理，分上、下两册出版。上册介绍叶片式流体机械，下册介绍容积式流体机械。本书为下册。

下册包括：往复式泵与压缩机的作用原理与结构类型，往复泵、往复式压缩机的工作过程与性能参数，往复式压缩机与泵的动力学分析，往复压缩机的结构方案设计，回转压缩机和回转式容积泵。

本书是高等院校“热能与动力工程”专业的规划教材，也可作为其他相关专业流体机械的教学参考书，还可供从事流体机械的研究、设计和生产的工程技术人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

流体机械原理/张克危主编. —北京: 机械工业出版社,  
2001. 1  
普通高等教育机电类规划教材  
ISBN 7-111-07596-X

I. 流… II. 张… III. 流体机械—高等教育—教材  
IV. TH3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 79326 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)  
责任编辑: 邓海平 版式设计: 霍永明 责任校对: 刘志文  
封面设计: 姚毅 责任印制: 路琳

北京市密云县印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001 年 4 月第 1 版·第 1 次印刷  
787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·14.5 印张·354 千字  
0 001—3 000 册  
定价: 19.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换  
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677—2527

# 前 言

流体机械是动力工程中最重要、应用最广泛的一类机械设备。目前，在我国高等院校的动力工程类专业中，有关流体机械的课程和教材为数相当多，这种分散的情况已难以适应我国高校的教学改革和专业调整的需要。为适应我国高等教育改革和专业调整的需要，全国高等学校动力工程类专业教学指导委员会于1996年11月在西安会议上决定编写一本统一讲述各种流体机械的教材，继而在1997年4月的镇江会议上，由流体机械教学指导小组审定了本书的编写大纲。原机械工业部于1998年批准将本书列为机械工业部“九五”重点规划教材。

本书系统讲述了各种流体机械的工作原理，对应用最广泛的泵、风机、压缩机和水轮机的设计计算也以适当的篇幅作了介绍。

本书下册由华中理工大学张克危教授担任主编，由西安交通大学冯全科教授和江苏理工大学林洪义教授担任副主编。参加本书编写的人员还有西安交通大学的邢子文副教授和江苏理工大学的毛楚方教授。其中冯全科编写第一章的一部分、第三、第四和第五章；毛楚方编写第二章和第一章的一部分；邢子文编写第六章；林洪义编写第七章；全书最后由张克危统稿。

本书由中国农业大学常近时教授主审。

本书的编写过程中，得到了各兄弟院校以及流体机械教学指导小组的大力支持，编者在这里衷心地表示感谢。

在一本篇幅有限的教材中统一讲解各种流体机械的原理，这对编者来说还是一种新的尝试。尽管我们为此付出了很大的努力，但错误和不尽人意之处在所难免。编者恳请读者予以指正。

编 者  
于武汉

## 常用符号一览表

$A$	面积, $m^2$ 齿轮中心距, mm	$q_v$	体积流量, $m^3/s$
$A_p$	活塞面积, $m^2$	$q'_v$	瞬时体积流量, $m^3/s$
$a$	加速度, $m/s^2$	$q_m$	质量流量, $kg/s$
$B$	转子宽度, 齿宽, m	$R$	气体常数, $J/(kg \cdot K)$
$C$	弹簧刚度, $N/m$		支反力, N
$c$	绝对速度, $m/s$	$r$	半径, m
$c_p$	比定压热容, $J/(kg \cdot K)$	$s$	活塞行程, m
$c_v$	比定容热容, $J/(kg \cdot K)$	$T$	热力学温度, K
$D, d$	直径, m		导程, mm
$E$	能量、动能, J	$t$	时间, s;
$F$	力, N		齿距、螺距, mm
$F_s$	弹簧力, N	$u$	速度, $m/s$ ;
$G$	重力, N		质量内能, $J/kg$
$g$	重力加速度, $m/s^2$	$u_m$	活塞平均速度, $m/s$ ;
$H$	水头、扬程, m	$V$	体积, $m^3$
$H_s$	吸上高度, m	$V_h$	行程容积, $m^3$
$H_a$	大气压力 (水柱高), m	$v$	质量体积, $m^3/kg$
$H_w$	汽化压力 (水柱高), m	$W$	功, J
$h$	比焓, $J/kg$ 齿顶高		单位质量介质的功, $J/kg$
$h_i$	惯性水头, m	$w$	速度, $m/s$
$I$	惯性力, N	$z$	级数、缸数、齿数、螺纹头数;
$J$	飞轮惯性矩, $kg \cdot m^2$		气体压缩性系数
$K$	系数、作用数	$z$	高度, m
$l$	长度, m	$\alpha$	系数;
$M$	力矩, $N \cdot m$		压力角
$m$	齿轮模数, mm	$\beta$	连杆摆角, 度
$n$	多变指数; 转速, $r/min$ ;		剩余液量系数
	活塞往复次数, $min^{-1}$	$\beta_v$	充满系数
$N$	法向力, N	$\Delta q_v$	泄漏体积流量
$p$	压力, Pa	$\Delta q_m$	泄漏质量流量
$P$	功率, kW	$\delta$	相对压力损失
$Q$	热量, J		间隙, mm
$q$	单位质量流体的热量, $J/kg$ 排量, $m^3$	$\delta_p$	压力不均匀系数
		$\delta_q$	流量不均匀系数
		$\epsilon$	压缩比
		$\zeta$	流动损失系数
		$\eta$	效率

# VI

$\eta_h$	流动效率、水力效率	$ad$	绝热过程
$\eta_i$	指示效率	$d$	活塞杆
$\eta_m$	机械效率	$e$	转子外圆, 有效的
$\eta_v$	容积效率	$f$	转子根圆
$\theta$	曲柄转角, 度	$h$	水平的
$\kappa$	绝热指数, 定熵指数	$i$	指示的
$\lambda$	沿程阻力系数; 吸入系数	$in$	进口
$\mu$	动力粘度, $N \cdot s/m^2$ ; 流量系数	$j$	节圆
$\nu$	运动粘度, $m^2/s$	$m$	平均
$\rho$	密度, $kg/m^3$	$p$	高压端, 压力, 活塞
$\tau$	排挤系数, 阻塞系数	$r$	径向
$\varphi$	相对湿度; 转子转角, ( $^\circ$ )	$s$	低压端, 吸入端, 行程 定熵过程
$\Psi$	程径比	$T$	定温过程
$\omega$	角速度	$t$	理论的
下标:		$u$	周向, 切向
1	机器进口, 叶片进口	$V$	体积
2	机器出口, 叶轮出口	$v$	铅直的
		$va$	汽化、饱和
		$z$	轴向

# 目 录

## 前 言

### 常用符号一览表

## 下篇 容积式流体机械

### 第一章 往复式泵与压缩机的作用原理与结构类型 ..... 1

- 第一节 作用原理与工作特点 ..... 1
- 第二节 结构类型及应用 ..... 3
- 习题与思考题 ..... 7

### 第二章 往复泵 ..... 8

- 第一节 机动往复泵的主要性能参数 ..... 8
- 第二节 机动往复泵的工作过程 ..... 20
- 第三节 机动往复泵的性能 ..... 23
- 第四节 空气室 ..... 25
- 第五节 泵阀的基本理论 ..... 32
- 第六节 往复泵的结构形式 ..... 38
- 第七节 往复泵主要结构参数的选择 ..... 44
- 第八节 蒸汽直接作用泵 ..... 47
- 习题与思考题 ..... 50

### 第三章 往复压缩机的工作过程与性能参数 ..... 51

- 第一节 往复压缩机级的工作循环 ..... 51
- 第二节 往复压缩机的进气系数与循环指示功 ..... 55
- 第三节 多级压缩 ..... 61
- 第四节 排气量与排气系数 ..... 66
- 第五节 排气压力、排气温度、功率与效率 ..... 72
- 习题与思考题 ..... 78

### 第四章 往复压缩机与泵的动力学分析

- ..... 79
- 第一节 曲柄连杆机构的作用力分析 ..... 79
- 第二节 切向力与飞轮矩的确定 ..... 88
- 第三节 往复惯性力的平衡 ..... 93
- 习题与思考题 ..... 103

### 第五章 往复压缩机的结构方案设计 ..... 104

- 第一节 往复压缩机的结构分析与方案选择 ..... 104
- 第二节 制冷压缩机的总体结构特性 ..... 112
- 第三节 往复压缩机的主要结构参数 ..... 121
- 习题与思考题 ..... 124

### 第六章 回转压缩机 ..... 126

- 第一节 回转压缩机的工作过程 ..... 126
- 第二节 螺杆压缩机 ..... 131
- 第三节 其他类型回转压缩机 ..... 147
- 第四节 回转压缩机的喷液 ..... 157
- 习题与思考题 ..... 162

### 第七章 回转式容积泵 ..... 163

- 第一节 概述 ..... 163
- 第二节 回转式容积泵的泵内间隙与吸入条件 ..... 166
- 第三节 齿轮泵 ..... 169
- 第四节 螺杆泵 ..... 192
- 第五节 旋转活塞泵 ..... 214
- 第六节 挠性泵 ..... 221
- 习题与思考题 ..... 222

### 参考文献 ..... 223

# 下篇 容积式流体机械

## 第一章 往复式泵与压缩机的作用原理与结构类型

### 第一节 作用原理与工作特点

#### 一、作用原理

利用活塞（或柱塞）在柱形缸体内的往复运动来改变其封闭容积大小，借以实现液体输送和气体压缩的机械分别称为往复式泵和压缩机。活塞可以用不同的方法驱动，例如可用发动机通过曲柄连杆机构、曲柄滑块机构或凸轮机构等驱动，也可以用其他流体（如高压蒸汽、压缩空气、高压液体等）推动。这里以图 1-1 所示的应用最为普遍的曲柄连杆机构驱动活塞往复运动的泵和压缩机为例，说明其工作原理。

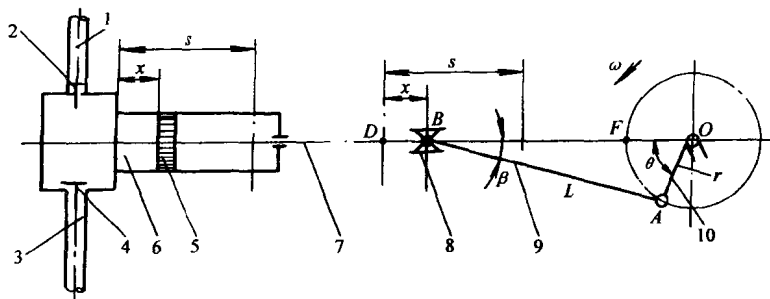


图 1-1 往复式泵与压缩机作用原理简图

1—排出管 2—排出阀 3—吸入管 4—吸入阀 5—活塞 6—工作腔 7—活塞杆 8—十字头 9—连杆 10—曲柄

在图 1-1 中的缸体上装有流体进入阀和排出阀。由曲柄连杆机构驱动的活塞向右侧（轴侧）运动时，排出阀处在关闭状态，吸入阀自动打开将流体吸入缸内；当活塞向左侧（盖侧）移动时，缸内流体压力升高，吸入阀处在关闭状态，排出阀则在缸内流体压力高于排出阀后的压力时自动打开，流体通过排出阀排出。这样，缸内流体从开始吸入到排出，完成了一个工作循环，被送到排出管路中去。随着曲柄  $OA$  的旋转，活塞往复运动周而复始地进行，往复式机构就不断地把低压流体压送到高压区域。

在往复泵的领域，通常把压送流体的液体缸、活塞（柱塞）、吸入阀和排出阀等部件组成的系统称为液力端；把曲轴、连杆、十字头等部件组成的系统称为传动端。

#### 1. 活塞往复运动的位移 $x$ 与曲柄转角 $\theta$ 的关系

通常取坐标系的位置与方向如图 1-1 所示，设  $r$  为曲柄半径。当  $x=0$  时，活塞所处的



位置称为外止点； $x=2r$  时，活塞所处的位置称为内止点。内外止点之间的距离称为活塞行程，用  $s$  表示，显然有  $s=2r$ 。

按照图 1-1 所示的几何关系， $B$  点的位移（即活塞的位移） $x$  为

$$x = L + r - (L \cos \beta + r \cos \theta) \quad (1-1)$$

式中  $\beta$ ——连杆摆角，它是连杆杆体中心线与气缸中心线的夹角。

由于  $\beta$  是  $\theta$  的函数，故活塞位移  $x$  可表示为

$$x = r \left[ (1 - \cos \theta) + \frac{1}{\lambda} (1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \theta}) \right] \quad (1-2)$$

式中  $\lambda$ ——曲柄连杆比， $\lambda = r/L$ 。

如果把式 (1-2) 中的  $\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \theta}$  按二项式定理展开成级数，略去级数中的平方项以后的高次项，式 (1-2) 可近似简化成为

$$x \approx r \left[ (1 - \cos \theta) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\theta) \right] \quad (1-3)$$

## 2. 活塞速度和加速度

将式 (1-3) 对时间  $t$  求一阶导数和二阶导数，可得到活塞运动速度  $u_p$  和加速度  $a_p$

$$u_p = r\omega \left( \sin \theta + \frac{\lambda}{2} \sin 2\theta \right) \quad (1-4)$$

$$a_p = r\omega^2 (\cos \theta + \lambda \cos 2\theta) \quad (1-5)$$

式中  $\omega$ ——曲轴旋转角速度 (1/s)。一般认为往复式泵和压缩机中曲轴的旋转是等速的，故有  $\omega = \pi n / 30$ ， $n$  为曲轴每分钟转数 (r/min)。

式 (1-3) 相对于式 (1-2)，位移  $x$  的最大误差发生在  $\theta = 90^\circ$  时，当  $\lambda = 1/5$  时，误差为 1%；当  $\lambda = 1/4$  时，误差为 2%；

## 3. 往复式泵和压缩机的动力学特性

在往复式泵和压缩机的工作过程中，其作用力的类型、力的作用方式、作用力变化的规律基本上都是相同的。两类机器的往复惯性力、往复惯性力矩、旋转惯性力、旋转惯性力矩以及曲轴转矩分析方法和平衡手段都是完全一样的。因此，往复泵中曲柄连杆机构作用力分析，可完全按照第四章给出的往复压缩机的动力学内容进行。

## 二、往复式泵与压缩机的工作特点

与透平式和回转容积式流体机械相比，往复式泵与压缩机有如下特点：

1) 适用的压力范围广，不论流量大小都能达到所需压力。目前工业上已达到 350MPa，在实验室已能达到 1000MPa 的高压；

2) 效率较高；

3) 适应性较强，流量不受压力高低的影响，特别在小流量的范围内，几乎能满足工程上的任何使用要求；

4) 转速较低，机器大而重；

5) 结构复杂，易损件多，维修工作量大；

6) 流体的吸入和排出不连续，容易造成吸排管道内的压力脉动。

鉴于上述优缺点，往复泵的扬程  $H$  与流量  $q_V$  的适用范围如图 1-2 所示；往复压缩机的工作压力  $p$  与流量  $q_V$  的应用范围如图 1-3 所示。

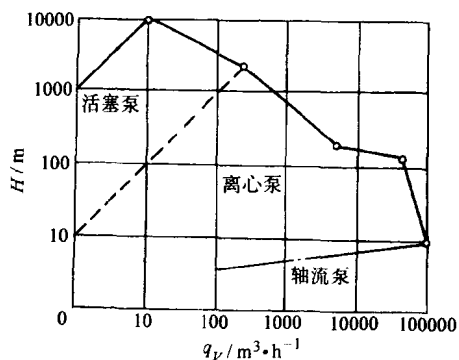


图 1-2 往复泵的工作范围

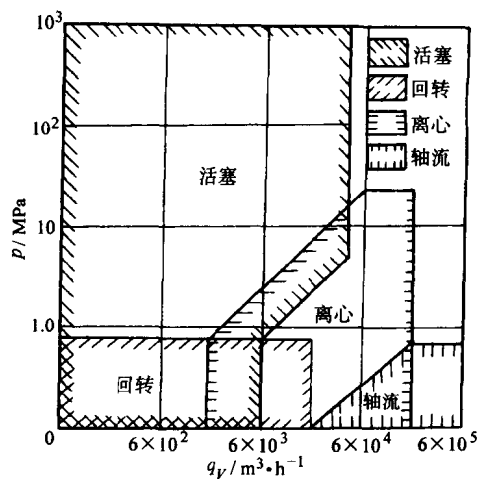


图 1-3 往复式压缩机的工作范围

## 第二节 结构类型及应用

### 一、往复泵的分类

往复泵的种类很多，可以按下述几种方法进行分类：

#### 1. 根据液力端的特点分类

1) 按与输送介质接触的工作机构分类

a) 活塞泵；b) 柱塞泵；c) 隔膜泵

2) 按往复泵的作用特点分类（见图 1-4）

a) 单作用泵；b) 双作用泵；c) 差动泵

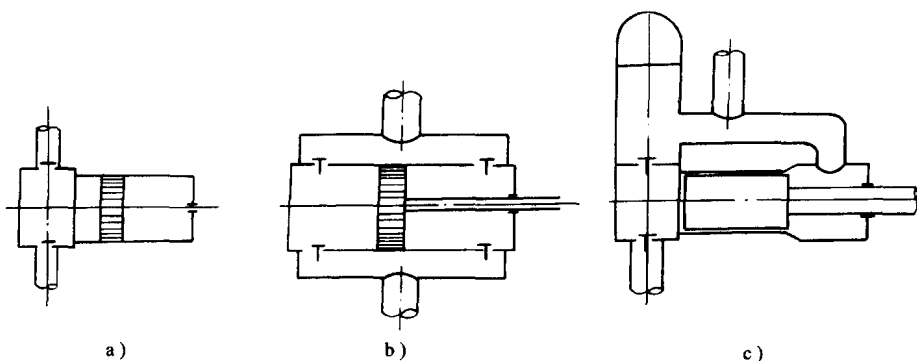


图 1-4 单作用泵、双作用泵和差动泵示意图

a) 单作用泵 b) 双作用泵 c) 差动泵

#### 3) 按液缸数分类

a) 单缸往复泵；b) 双缸往复泵；c) 三缸往复泵；d) 多缸往复泵

#### 2. 根据传动端的结构特点分类

a) 曲柄连杆机构往复泵；b) 凸轮轴机构往复泵；c) 无曲柄机构往复泵

### 3. 根据动力分类

- a) 机动泵（包括电动机驱动的泵和内燃机驱动泵）；  
b) 直接作用泵（包括蒸汽、气、液压直接驱动的泵）；c) 手动泵

### 4. 根据排出压力 $p_2$ 的大小分类

- a) 低压泵  $p_2 < 1\text{MPa}$ ；b) 中压泵  $p_2 = 1 \sim 10\text{MPa}$ ；c) 高压泵  $p_2 > 10\text{MPa}$

### 5. 根据活塞（柱塞）每分钟往复次数 $n$ 分类

- a) 低速泵  $n \leq 80\text{min}^{-1}$ ；                    b) 中速泵  $80\text{min}^{-1} \leq n \leq 250\text{min}^{-1}$   
c) 高速泵  $250\text{min}^{-1} \leq n \leq 550\text{min}^{-1}$ ；d) 超高速泵  $n \geq 550\text{min}^{-1}$

此外，往复泵还可以根据输送液体的种类，流量调节的方式等进行分类。

## 二、往复压缩机的分类

往复式压缩机按其工作特性和结构特点有五种不同的分类方式：

(1) 按所能达到的排气压力分类（表 1-1）。

表 1-2 按排气量范围分类

(2) 按排气量范围分类（表 1-2）。

表 1-1 按排气压力分类

分类名称	排气压力范围
鼓风机	$< 0.30\text{MPa}$
低压压缩机	$0.30 \sim 1.0\text{MPa}$
中压压缩机	$1.0 \sim 10\text{MPa}$
高压压缩机	$10 \sim 100\text{MPa}$
超高压压缩机	$100\text{MPa}$

分类名称	排气量范围（按进气状态计）
微型压缩机	$< 1\text{m}^3/\text{min}$
小型压缩机	$1 \sim 10\text{m}^3/\text{min}$
中型压缩机	$10 \sim 60\text{m}^3/\text{min}$
大型压缩机	$> 60\text{m}^3/\text{min}$

(3) 按气缸排列方式分类（见图 1-5）（表 1-3）

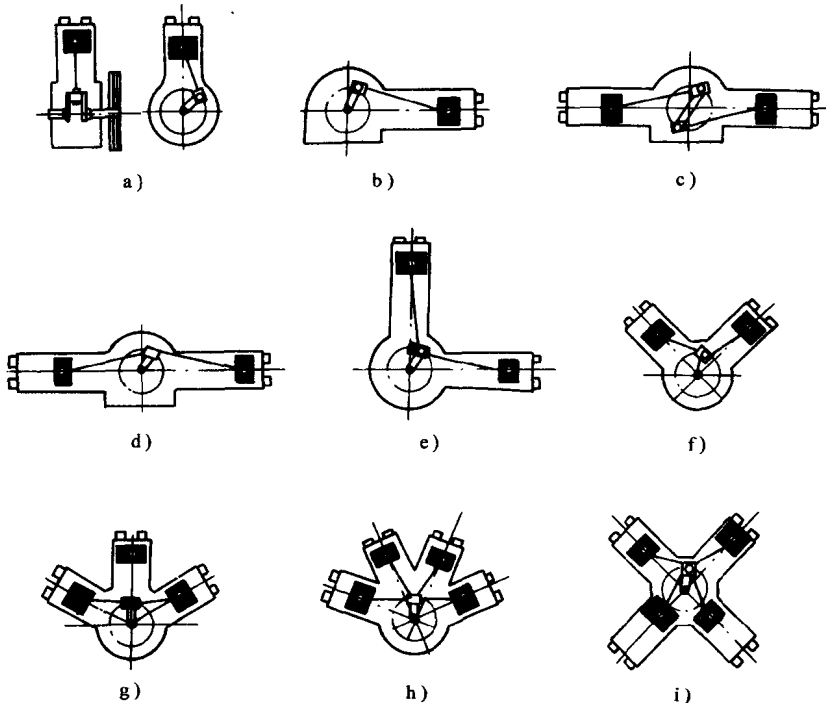


图 1-5 气缸中心线相对地平面不同位置的各种配置

表 1-3 按气缸排列方式分类

分类名称	气缸中心线位置
立式压缩机	气缸中心线垂直于地面 (图 1-5a)
卧式压缩机	气缸中心线平行于地面 (图 1-5b, 当气缸布置在曲轴一侧时, 为一般卧式)
对动式压缩机	气缸中心线平行于地面, 气缸分布在曲轴两侧, 且两侧活塞运动两两对称 (图 1-5c)
对置式压缩机	气缸中心线平行于地面, 气缸分布在曲轴两侧, 但两侧活塞运动不对称 (图 1-5d)
H 型压缩机	对动式或对置式压缩机, 电机位于四列气缸之间
M 型压缩机	对动式或对置于压缩机, 电机位于四列气缸的一侧
角度式压缩机	气缸中心线相互成一定角度 (图 1-5e~i)

对于角度压缩机, 按其所呈形状又可分为:

分类名称	形状
L 形压缩机	气缸中心线呈立卧结合 (图 1-5e)
V 形压缩机	两条气缸中心线呈 V 形 (图 1-5f)
W 形压缩机	三条气缸中心线呈 W 形 (图 1-5g)
扇形压缩机	四条气缸中心线呈扇形 (图 1-5h)
星形压缩机	气缸中心线在圆周方向均布呈放射形 (图 1-5i)

(4) 按气体达到终了压力所需的级数分类 (表 1-4)

表 1-4 按级数分类

分类名称	特 点
单级压缩机	气体经一级压缩达到终压
两级压缩机	气体经两级压缩达到终压
多级压缩机	气体经三级以上压缩达到终压, 并往往按级数称呼, 如三级压缩机、六级压缩机等

(5) 按气缸容积的利用方式分类 (见图 1-6) (表 1-5)

表 1-5 按气缸容积分类

名 称	特 点
单作用式压缩机	仅在活塞一侧有气缸容积 (图 1-6a)
双作用式压缩机	活塞两侧均有相同级次的气缸容积交替工作 (图 1-6b)
级差式压缩机	大小活塞组合在一起, 构成不同级次的气缸容积 (图 1-6c)

此外, 还可以按压缩机气缸是否采用润滑油润滑, 分为有油润滑压缩机和无油润滑压缩机; 按压缩机具有的列数 (气缸中心线数), 分为单列压缩机、两列压缩机和多列压缩机 (此时也多按列数称呼); 按曲柄连杆机构中有无十字头, 分为有十字头压缩机和无十字头压缩机; 按气缸冷却方式, 分为风冷式压缩机和水冷式压缩机; 按机器工作地点固定与否, 分为固定式压缩机和移动式压缩机等。

由于活塞压缩机的品种繁多, 为了统一, 其型号编制方法已被列为标准。

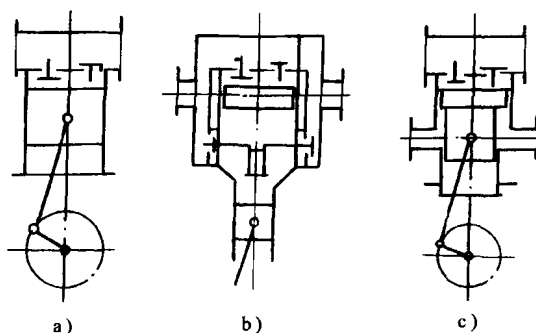


图 1-6 气缸容积的利用方式  
a) 单作用式 b) 双作用式 c) 级差式

### 三、往复式泵与压缩机的用途

#### (一) 往复泵的应用

往复泵适于输送流量较小、扬程较高的各种介质，尤其是特殊性介质，如高粘度、强腐蚀、易燃、易爆、有毒等类介质。当流量小于  $100\text{m}^3/\text{h}$ 、排出压力大于  $9.81\text{MPa}$  时，更能显示往复泵具有较高的效率和良好的运行性能。

在石油化学工业中，合成橡胶、合成塑料、合成纤维、合成氨生产中，往复泵用来加压输送液体原料、催化剂以及各种工艺用液。如尿素生产中需要用往复的高压甲铵泵，乙烯聚合过程中需要催化剂注射用泵，其排出压力达到  $216\sim 343\text{MPa}$ 。合成氨生产中需用输送铜液的往复泵。石油矿场用往复泵是石油工业的关键设备，钻井泥浆泵和油井压裂用泵是钻探和采油工程方面必不可少的设备。随着石油工业的发展，近海和深海油田大量开发，管道输送增加，往复泵逐步向高压、大功率方向发展。

将往复泵作为计量泵，在化工流程中得到广泛应用。这种泵除了输送液体之外，还具有连续测量的功能和控制器的作用。因此，很多部门把计量泵作为一种精密的工业仪表使用。计量泵特别适用于将一种或多种介质按一定的比例量进行混合。如造纸工业中按调整的比例混合明矾、胶料、瓷土、铝酸钠、颜料和其他添加剂；食品工业中，在糖果和饮料的液体和半液体产品的连续生产中，对拼料进行混合；纺织工业中对漂白纺织物的过氧化氢、过氧化钠和硅酸钠进行处理，对染料配比，对颜料和粘胶进行连续配比；石油工业中把树脂抑制剂和其他添加剂加到石油、燃料油和润滑油中去；对城市或工业用水添加腐蚀抑制剂、灭菌剂、凝结剂等；对锅炉给水进行化学处理，包括 pH 值的调节等等。计量泵根据液力压送元件的结构分为柱塞式计量泵、机械隔膜计量泵和液压隔膜计量泵等几种。

往复式杂质泵在大功率、大流量、远距离输送悬浮固体物的过程中，起十分关键的作用，其功率已达  $2200\text{kW}$ ，年输送能力可达  $80\text{亿 t}\cdot\text{km}$ 。这在采煤、采矿工业中输煤浆、金属矿浆及建筑业中输送混凝土灰浆等方面，得到推广应用。

往复泵作为大型锻压机械的主要动力设备，要求提供的工作介质压力高、流量大且流动脉动小。另外，往复泵在电站、机械制造、医疗医药、化学分析等各个部门也得到了广泛的应用。

#### (二) 往复压缩机的应用

往复压缩机在国民经济中的应用可以分成如下四个主要方面：

(1) 动力用压缩机 利用压缩空气作为动力风源，具有安全、经济、效率高的特点。因此，在机械、矿山、建筑等工业领域广泛利用压缩空气来驱动各种风动工具（如风镐、风钻、气力扳手、气力喷砂等）。压缩空气也可以用来控制仪表、各种机动车辆的制动刹车和门窗启闭、食品和制药工业中的浆液搅拌，纺织工业中的纬纱吹送以取代梭子织布，以上的这些应用场合所需的空气压缩机排出压力都在  $1\text{MPa}$  以下。

此外，在大中型发动机启动，油井压裂，高压空气爆破采煤、鱼雷发射、潜艇沉漂及沉船打捞、卫星发射等都要用到不同中、高压力的压缩空气。因此，空气压缩机在这些工程领域就成为必不可少的设备。

(2) 化工工艺用压缩机 在化学工业中，将气体压缩至高压有利于化学反应的进行。在中小化肥企业的合成氨生产过程中，氮氢混合气由压缩机压缩输送至合成塔中合成为氨，目前常用的合成压力为  $26\sim 32\text{MPa}$ 。对于在合成塔中未发生反应的氮气和氢气，则需要用循

环压缩机再次加压送入合成塔。尿素是由二氧化碳和氨合成，其合成压力常为 21MPa。因此，就需要二氧化碳压缩机。

高压聚乙烯是将乙烯气体压缩到 280MPa 聚合而成，因此就离不开高压聚乙烯压缩机。石油加工过程中，需要加氢以使油的重组分裂解成轻组分的碳氢化合物，常用的氢气压缩机排气压力为 7~32MPa。

(3) 制冷和气体分离用压缩机 常用的冰箱、空调器和大型的冷藏、冷冻设备有许多都用往复压缩机来压缩制冷工质。

最常见的气体分离设备是将空气压缩、冷却、膨胀，以获得深度低温，按氧气和氮气等不同的液化温度以制取各种单质气体。所用的压缩机有空气压缩机、氧气压缩机和氮气压缩机等。利用氮气压缩机制冷的深度低温（20K 以下）设备，用于冻结环境中的多种气体以达到高度真空（ $10^{-6}$ Pa 以下）。

(4) 气体输送用压缩机 例如远距离的天然气、石油气、煤气输送管道，需要用压缩机加压送气。另一种气体输送方式是用压缩机将气体加压装罐输送。

由以上所述看出，压缩机的用途极广，几乎遍及国民经济的各个领域。

### 习题与思考题

1. 分别列举往复泵与压缩机应用的主要工业部门和场合。
2. 往复泵与压缩机的主要区别在哪里？能否用前者代替后者，或者用后者代替前者工作？为什么？
3. 往复泵和压缩机与透平式泵和压缩机相比，有哪些优缺点？
4. 除了曲柄连杆机构能把旋转运动转换成往复运动之外。还有哪些动力机构能使活塞产生往复运动？
5. 对转速为  $\omega$ 、曲柄半径为  $r$ 、连杆长度  $L$  的曲柄连杆机构，写出活塞运动的速度、加速度的最大值和最小值表达式。
6. 对压缩机按功率大小分类与按流量大小分类会有什么不同结果？
7. 往复泵和压缩机的排出压力是如何建立的？

## 第二章 往 复 泵

### 第一节 机动往复泵的主要性能参数

机动往复泵的主要性能参数包括流量、扬程（压力）、功率、效率、活（柱）塞每分钟的往复次数及允许真空度等。

#### 一、流量

叶片泵的叶轮作等角速旋转运动，吸排液是连续进行的。其流量是连续均匀的，故平均流量和瞬时流量相同。机动往复泵的活塞为变速运动，吸入和排出过程是交替进行的。所以，平均流量和瞬时流量不同。

##### 1. 理论平均流量

理想情况下，工作腔完全被液体所充满且泵没有泄漏损失，其理论平均流量  $q_{Vt}$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) 为：

$$\text{对单作用泵} \quad q_{Vt1} = \frac{znV_h}{60} = \frac{znsA_p}{60} \quad (2-1)$$

$$\text{对双作用泵} \quad q_{Vt2} = \frac{znV_h}{60} = \frac{zns(2A_p - A_d)}{60} \quad (2-2)$$

式中  $V_h$ ——行程容积 ( $\text{m}^3$ )；

$z$ ——液缸数；

$n$ ——活塞每分钟往复次数 ( $\text{min}^{-1}$ )；

$A_p$ ——活（柱）塞的截面面积 ( $\text{m}^2$ )；

$A_d$ ——活塞杆的截面面积 ( $\text{m}^2$ )；

$s$ ——活塞行程 ( $\text{m}$ )。

引入作用数  $K$  和排挤系数  $\tau$  后，可得出机动泵理论平均流量的通用计算公式

$$q_{Vt} = \frac{KznsA_p\tau}{60} \quad (2-3)$$

式中  $K$ ——作用数，对单作用泵  $K=1$ ，双作用泵  $K=2$ ；

$\tau$ ——排挤系数，表示活塞杆截面面积对流量影响的系数，对单作用泵， $\tau=1$ ，对双作

$$\text{用泵} \quad \tau = 1 - \frac{A_d}{2A_p}。$$

##### 2. 理论瞬时流量

往复泵工作循环中，吸入和排出过程是交替进行的，而且活（柱）塞作变速运动，所以瞬时理论流量也是变化的。将液体介质视为不可压缩的，则泵的理论瞬时流量就等于活塞面积与活塞速度的乘积，以  $q'_{Vi}$  表示。

对单缸单作用机动往复泵（图 1-1），其活塞速度由式（1-4）给出，故瞬时理论流量为

$$q'_{Vi} = -A_p u_p = -A_p r \omega (\sin\theta + \frac{\lambda}{2} \sin 2\theta) \quad (2-4)$$

数值为负值时表示吸入流量，正值则表示排出流量。

单缸双作用机动往复泵在两个行程中均有吸入和排出，但是需考虑活塞杆面积  $A_d$  对流量的影响，其瞬时理论流量为

$$q'_{vt} = \begin{cases} -A_p r \omega (\sin\theta + \frac{\lambda}{2} \sin 2\theta) \\ (A_p - A_d) r \omega (\sin\theta + \frac{\lambda}{2} \sin 2\theta) \end{cases} \quad (2-5)$$

多缸泵的瞬时理论流量，是将各个液缸同瞬时的理论流量叠加之后得到的。

### 3. 流量曲线

理论瞬时流量  $q'_{vt}$  与曲柄转角  $\theta$  间的关系曲线，称为流量曲线。一般仅绘出理论瞬时排出流量曲线。

根据式 (2-4) 可给出单缸单作用泵的流量曲线  $q'_{vt}-\theta$ ，如图 2-1 所示。此曲线与活塞运动速度曲线相类似，也是由曲柄转角  $\theta$  的一阶正弦曲线和二阶正弦曲线所合成，只是符号与之相反，数值乘上一个面积  $A_p$ 。

双缸、三缸、四缸等多缸泵的流量曲线：各缸的流量均可用式 (2-4) 表示，但各缸的相位不同。可在考虑各缸的相位差以后，对各缸的流量求和得总的流量曲线。

双缸单作用泵的流量曲线如图 2-2 所示。

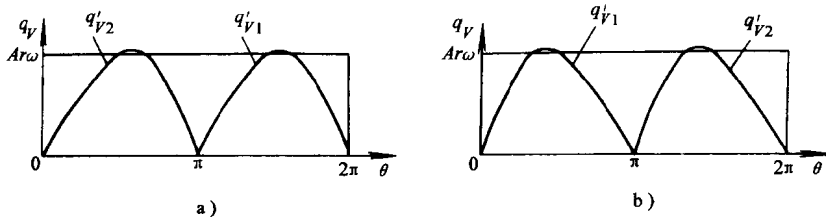


图 2-1 单缸单作用泵流量曲线 ( $\lambda = 1/4$ )  
a) 排出 b) 吸入

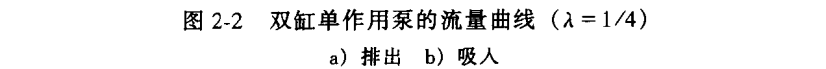


图 2-2 双缸单作用泵的流量曲线 ( $\lambda = 1/4$ )  
a) 排出 b) 吸入

三缸单作用泵的流量曲线如图 2-3 所示。

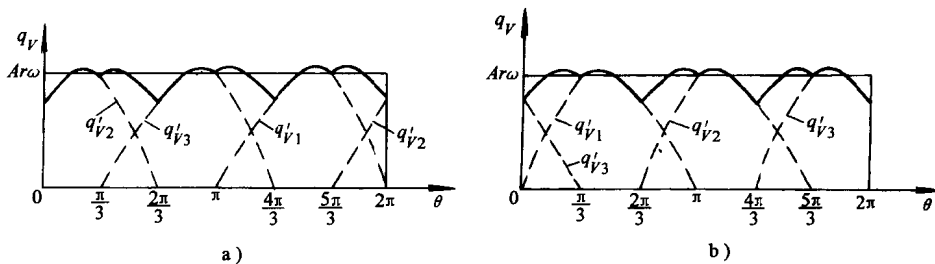


图 2-3 三缸单作用泵的流量曲线 ( $\lambda = 1/4$ )  
a) 排出 b) 吸入

四缸单作用泵的流量曲线如图 2-4 所示。

由此可以看出，液缸数越多，泵的理论瞬时流量就越趋向于均匀，且奇数缸比偶数缸的



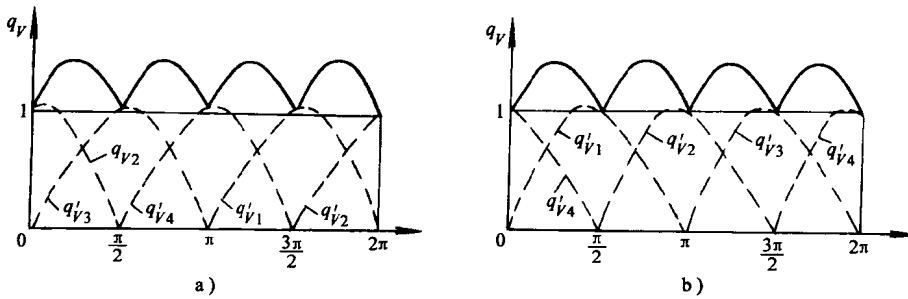


图 2-4 四缸单作用泵的流量曲线 ( $\lambda = 1/4$ )

a) 排出 b) 吸入

效果更明显；但是液缸数越多，往复泵的结构就越复杂，制造和维修就越困难。而且，过多的增加缸数对减小流量脉动的作用也越来越小。所以，通常使用较多的是单缸单作用泵、单缸双作用泵、双缸双作用泵和三缸单作用泵。

4. 流量不均匀系数

往复泵的流量脉动程度可以用流量不均匀系数  $\delta_{q1}$  和  $\delta_{q2}$  来表示。

$$\delta_{q1} = \frac{q'_{v_{i\max}} - q_{v_i}}{q_{v_i}} \tag{2-6}$$

$$\delta_{q2} = \frac{q_{v_i} - q'_{v_{i\min}}}{q_{v_i}} \tag{2-7}$$

式中  $q'_{v_{i\max}}$  ——最大理论瞬时流量；  
 $q'_{v_{i\min}}$  ——最小时理论瞬时流量。

由于二阶简谐运动的影响，最大活塞运动速度  $u_{p\max}$  已不在  $\theta = 90^\circ$  和  $270^\circ$  处，致使最大理论瞬时流量对应的转角  $\theta$  也产生相同的变化。数值  $q'_{v_{i\max}} \neq Ar\omega$ 。且  $\lambda$  越大偏离也越大。

令  $du_p/d\theta = 0$ ，可求出最大活塞运动速度即最大理论瞬时流量所对应的转角  $\theta$  为

$$\theta = \arccos \left( \frac{\sqrt{1 + 8\lambda^2} - 1}{4\lambda} \right) \tag{2-8}$$

将此  $\theta$  代入式 (2-4)，可算出单缸单作用泵的  $q'_{v_{i\max}}$ 。多缸泵的  $q'_{v_{i\max}}$  和  $q'_{v_{i\min}}$  可由流量曲线得出。 $q_{v_i}$  则由式 (2-3) 计算得出。由此得到的不同缸数单作用往复泵的  $\delta_{q1}$  和  $\delta_{q2}$  如表 2-1 所示。双缸双作用往复泵的  $\delta_{q1}$  和  $\delta_{q2}$  则如表 2-2 所示。

表 2-1 不同缸数单作用泵的  $\delta_{q1}$  和  $\delta_{q2}$

$\lambda$	$\delta_q$	缸数 z					
		1	2	3	4	5	6
0	$\delta_{q1}$	2.14	0.57	0.05	0.11	0.02	0.05
	$\delta_{q2}$	1.00	1.00	0.09	0.21	0.04	0.09
0.10	$\delta_{q1}$	2.18	0.58	0.05	0.11	0.02	0.05
	$\delta_{q2}$	1.00	1.00	0.14	0.21	0.04	0.09
0.15	$\delta_{q1}$	2.18	0.59	0.06	0.11	0.02	0.05
	$\delta_{q2}$	1.00	1.00	0.16	0.21	0.05	0.09
0.20	$\delta_{q1}$	2.20	0.60	0.07	0.11	0.02	0.05
	$\delta_{q2}$	1.00	1.00	0.18	0.21	0.06	0.09
0.25	$\delta_{q1}$	2.23	0.62	0.08	0.11	0.02	0.05
	$\delta_{q2}$	1.00	1.00	0.21	0.21	0.06	0.09