

机械工程手册

第 76 篇 通风机、鼓风机、压缩机

(试 用 本)

机械工程手册
电机工程手册 编辑委员会



机械工业出版社



机械工程手册

第76篇 通风机、鼓风机、压缩机

(试 用 本)

机械工程手册
电机工程手册

编辑委员会



机械工业出版社

本篇主要介绍各种型式通风机（离心式和轴流式）、鼓风机和压缩机（活塞式、离心式和轴流式）的原理、结构、特性和设计的基本内容，主要经验以及常用公式和数表。同时对它们的用途、使用及发展趋向也作概要介绍。

机械工程师手册
第76篇 通风机、鼓风机、压缩机
(试用本)

沈阳鼓风机研究所
合肥通用机械研究所 主编
上海汽轮机研究所

*

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许可证出字第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 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $9 \frac{3}{4}$ · 字数 274 千字
1979年9月北京第一版·1979年9月北京第一次印刷
印数 00,001—61,000 · 定价 0.74元

*

统一书号: 15033·4630

编辑说明

(一) 我国自建国以来，机械工业在毛主席的革命路线指引下，贯彻“独立自主、自力更生”和“洋为中用”的方针，取得了巨大的成就。为了总结广大群众在生产和科学技术方面的经验，同时采用国外先进技术，加强机械工业科学技术的基础建设，适应实现“四个现代化”的需要，我们组织编写了《机械工程手册》和《电机工程手册》。

(二) 这两部手册主要供广大机电工人、工程技术人员和干部在设计、制造和技术革新中查阅使用，也可供教学及其他有关人员参考。

(三) 这两部手册是综合性技术工具书，着重介绍各专业的理论基础，常用计算公式，数据、资料，关键问题以及发展趋势。在编写中，力求做到立足全局，勾划概貌，反映共性，突出重点。在内容和表达方式上，力求做到深入浅出，简明扼要，直观易懂，归类便查。读者在综合研究和处理技术问题时，《手册》可起备查、提示和启发的作用。它与各类专业技术手册相辅相成，构成一套比较完整的技术工具书。《机械工程手册》包括基础理论、机械工程材料、机械设计、机械制造工艺、机械制造过程的机械化与自动化、机械产品六个部分，共七十九篇；《电机工程手册》包括基础理论、电工材料、电力系统与电源、电机、输变电设备、工业电气设备、仪器仪表与自动化七个部分，共五十篇。

(四) 参加这两部手册编写工作的，有全国许多地区和部门的工厂、科研单位、大专院校等五百多个单位、两千多人。提供资料和参加审定稿件的单位和人员，更为广泛。许多地区

的科技交流部门，为审定稿件做了大量的工作。各篇在编写、协调、审查、定稿各个环节中，广泛征求意见，发挥了广大群众的智慧和力量。

(五) 为了使手册早日与读者见面，广泛征求意见，先分篇出版试用本。由于我们缺乏编辑出版综合性技术工具书的经验，试用本在内容和形式方面，一定会存在不少遗漏、缺点和错误。我们热忱希望读者在试用中进一步审查、验证，提出批评和建议，以便今后出版合订本时加以修订。

(六) 本书是《机械工程手册》第76篇，由沈阳鼓风机研究所、合肥通用机械研究所、上海汽轮机研究所主编，参加编写的有西安交通大学、长沙鼓风机厂、华中工学院、上海压缩机厂、沈阳气体压缩机厂等单位。许多有关单位对编审工作给予大力支持和帮助，在此一并致谢。

机械工程手册
电机工程手册
编辑委员会编辑组

目 录

编辑说明

常用符号表

第1章 概 述

- 1 分类与特点.....76-1
- 2 主要用途.....76-1

第2章 活塞式压缩机

- 1 结构及主要参数的选择.....76-3
 - 1.1 分类及特点.....76-3
 - 1.2 级数的选择.....76-11
 - 1.3 列数的选择.....76-12
 - 1.4 行程与转速.....76-12
- 2 排气量与功率.....76-14
 - 2.1 指示图.....76-14
 - 2.2 排气量.....76-14
 - 2.3 功率与效率.....76-16
- 3 主要零部件.....76-22
 - 3.1 气缸.....76-22
 - 3.2 气阀.....76-24
 - 3.3 活塞.....76-29
 - 3.4 活塞环.....76-30
 - 3.5 填料.....76-31
- 4 附属设备.....76-33
 - 4.1 冷却与冷却器.....76-33
 - 4.2 脉动与消振装置.....76-36
 - 4.3 润滑系统.....76-37
 - 4.4 气量调节装置.....76-39

第3章 回转式压缩机

- 1 滑片式压缩机.....76-41
 - 1.1 特点及主要结构参数.....76-41
 - 1.2 排气量.....76-42
 - 1.3 内压缩及进排气孔口.....76-42
 - 1.4 功率、效率及性能曲线.....76-42
 - 1.5 滑片材料.....76-43
- 2 罗茨式鼓风机.....76-43
 - 2.1 特点.....76-43

- 2.2 排气量.....76-44
- 2.3 功率、效率与温度.....76-44
- 2.4 主要结构参数.....76-45
- 2.5 作用在转子上的力和力矩.....76-46

- 3 螺杆式压缩机.....76-47
 - 3.1 结构及特点.....76-47
 - 3.2 齿形.....76-47
 - 3.3 主要参数的选择.....76-49
 - 3.4 排气量.....76-51
 - 3.5 内压力比及内压缩转角.....76-51
 - 3.6 进排气孔口.....76-52
 - 3.7 功率、效率及性能曲线.....76-53
 - 3.8 作用在转子上的力和力矩.....76-57
- 4 其他型式.....76-58
 - 4.1 液环式压缩机.....76-58
 - 4.2 滚动转子式压缩机.....76-59
 - 4.3 单螺杆式压缩机.....76-59
- 5 喷油压缩机系统.....76-59
- 6 排气量调节.....76-60
- 7 噪声及其控制.....76-60
 - 7.1 噪声源及频谱特性.....76-60
 - 7.2 噪声控制途径.....76-61

第4章 通 风 机

- 1 分类与特性.....76-62
 - 1.1 分类.....76-62
 - 1.2 相似条件及相似性能换算基本公式.....76-62
 - 1.3 性能计算.....76-63
 - 1.4 性能曲线.....76-64
- 2 离心通风机.....76-65
 - 2.1 基本结构型式.....76-65
 - 2.2 叶轮.....76-65
 - 2.3 机壳.....76-72
 - 2.4 设计计算举例.....76-74
- 3 轴流通风机.....76-77
 - 3.1 组成和分类.....76-77
 - 3.2 叶轮.....76-78

3.3 定子.....76-82
 3.4 按孤立翼型吹风试验数据设计
 举例.....76-83
 3.5 按平面叶栅吹风试验数据设计.....76-85
 4 通风机性能调节76-88
 5 特殊用途通风机76-89

第5章 透平式鼓风机和压缩机

1 离心式鼓风机和压缩机76-89
 1.1 组成与分类.....76-89
 1.2 基本原理.....76-91

1.3 主要零部件的结构与计算.....76-95
 1.4 辅机与辅助设备76-104
 1.5 相似换算与设计计算76-106
 1.6 运行76-116
 1.7 离心鼓风机、压缩机结构实例76-117
 2 轴流式压缩机76-119
 2.1 组成与结构76-119
 2.2 轴流式压缩机的级76-121
 2.3 计算方法.....76-125
 2.4 特性线估算76-139
 2.5 调节与防喘振76-147

符 号 说 明

A ——功热当量 kcal/(kgf·m)
 a ——声速 m/s
 B ——角厚度 rad
 b ——叶片弦长, 子午面流道宽度 mm
 c ——绝对速度 m/s
 c_p ——定压比热 kcal/(kg·°C)
 c_v ——定容比热 kcal/(kg·°C)
 D ——外径、直径 m
 d ——内径、直径 m
 F, f ——面积 m²
 F_s ——气体作用于流片的力 kgf/kg
 G ——质量流量 kg/s
 g ——重力加速度 m/s²
 g_c ——换算因子 9.81kg·m/(kgf·s²)
 h ——能量头 kgf·m/kg; 焓降 kcal/kg
 I ——惯性力 kgf
 i ——冲角 °; 模化系数; 焓 kcal/kg
 J ——惯性矩 cm⁴
 l ——叶片高度 mm; 长度 m
 k_c ——流量修正系数
 k_η ——效率修正系数
 M ——马赫数; 力矩 kgf·m
 m ——质量 kg
 N ——功率 kW
 n ——转速 r/min, r/s; 多变指数
 P ——气体作用力 kgf
 p ——压力 kgf/cm²
 Q ——容积流量 m³/min
 R ——半径 m; 气体常数 kgf·m/(kg·K)
 r ——半径 m
 s ——焓 kcal/(kg·K); 行程 mm
 T ——温度 K
 t ——温度 °C; 节距 mm
 V ——排气量 m³/min

v ——比容 m³/kg; 速度 m/s
 u ——圆周速度 m/s
 W ——比功 kgf·m/kg
 w ——相对速度 m/s
 Z ——压缩性系数, 叶片数
 z ——级数
 α ——绝对速度的气流角 °
 β ——相对速度的气流角 °
 γ ——叶型安装角 °
 δ ——气流落后角 °
 ϵ ——气流转折角 °
 ϵ ——压力比
 η ——效率
 θ ——叶型弯曲角 °
 κ ——绝热指数
 λ ——排气系数, 临界声速比
 ν ——轮毂比
 ξ ——损失系数
 ρ ——密度 kg/m³; 反作用度
 φ ——流量系数
 ψ ——作功量系数
 Ω ——减功系数
 ω ——角速度 rad/s
 $\pi(\lambda), \tau(\lambda), e(\lambda)$ ——气动函数(查第5篇流体力学)
 下角标
 a ——大气条件
 ad ——绝热过程
 c ——整机
 cr ——临界
 d ——排气状态
 de ——设计点
 g ——几何
 h ——叶根
 i ——轴向序号

76-VI 符号说明

is——等温过程
j——径向序号
la——末级、末序号
M——机械、模型
m——平均
mb——动叶
opt——最佳
pol——多变过程
R——转子
ref——基准值
s——等熵过程，进气状态
sb——静叶

sh——轴的
st——级
su——喘振
t——叶尖
th——理论
u——周向
x——变工况
z——轴向
0, 1, 2, 3……截面序号
下角标
*——滞止参数，名义值

使用单位制的补充说明

根据国务院1977年颁发的《中华人民共和国计量管理条例（试行）》，我国计量单位制将逐步采用比较科学的国际单位制（SI），故本篇采用质量作为基本单位（kg）。而力的单位，国际单位制用牛顿（N），即 $1\text{N} = 1\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$ 。

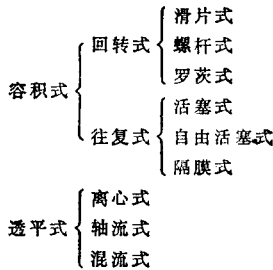
考虑到国内实际情况，仍沿用重力单位制中力的单位，即公斤力（kgf）。由于同时采用两种单位制，在具体计算中将引入牛顿与公斤力的换算因数 $g_c \approx 9.81\text{kg}\cdot\text{m}/(\text{kgf}\cdot\text{s}^2) = 9.81\text{N}/\text{kgf}$ 。

第1章 概 述

1 分类与特点

按作用原理分容积式和透平式两类。前者靠气缸内作往复或旋转运动的活塞的作用，使气体体积缩小而提高压力；后者靠高速旋转叶轮的作用，提高气体的压力和速度，随后在固定元件中使一部分速度能进一步转化为气体的压力能。

按结构分类



按机械达到的压力区分为通风机、鼓风机、和压缩机（见表 76·1-1）。通风机和鼓风机主要用于输送气体，压缩机主要用于提高气体压力。

表76·1-1 通风机，鼓风机和压缩机的压力范围

分 类	排 气 压 力 范 围
通风机	$p_d \leq 1500 \text{ mmH}_2\text{O}$
鼓风机	$1500 \text{ mmH}_2\text{O} < p_d \leq 2 \text{ kgf/cm}^2$
低压缩机	$2 \text{ kgf/cm}^2 < p_d \leq 10 \text{ kgf/cm}^2$
中压缩机	$10 \text{ kgf/cm}^2 < p_d \leq 100 \text{ kgf/cm}^2$
高压缩机	$100 \text{ kgf/cm}^2 < p_d \leq 1000 \text{ kgf/cm}^2$
超高压压缩机	$p_d > 1000 \text{ kgf/cm}^2$

各种形式的通风机、鼓风机和压缩机所达到的压力和气量范围见图 76·1-1。

活塞式与透平式压缩机特点的比较见表 76·1-2。回转式压缩机兼有两者的某些优点，但只适用于中低压。

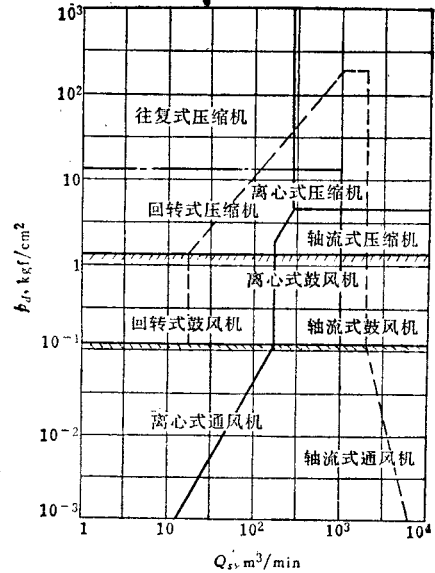


图76·1-1 各种型式压缩机的压力和气量范围

表76·1-2 活塞式和透平式压缩机的特点

活 塞 式	透 平 式
1. 气流速度低，损失小，效率高	1. 气流速度高，损失大
2. 压力范围广，从低压到超高压范围都适用	2. 小流量，超高压范围还不适应
3. 适应性强，排气压力在较大范围内变动时，排气量不变。同一台压缩机还可用于压缩不同的气体	3. 流量和出口压力的变化由性能曲线决定。若出口压力过高，机组进入喘振工况而无法运行
4. 除超高压压缩机外，机组的零部件多用普通金属材料	4. 旋转零部件常用高强度合金钢
5. 外型尺寸及重量较大，结构复杂，易损件多，排气脉动性大，气体中常混有润滑油	5. 外型尺寸及重量较小，结构简单，易损件少，排气均匀无脉动，气体中不含润滑油

2 主要用途

见表 76·1-3。

表76-1-3 通风机、鼓风机和压缩机的主要用途

应用场合	压缩气体	工作压力① kgf/cm ²	应用场合	压缩气体	工作压力① kgf/cm ²			
冶金工业	高炉鼓风	空气	石油化工	合成塑料	氯气	5		
	高炉喷煤粉	空气			乙烯	1500~3500		
	化铁炉、锻冶炉鼓风	空气		合成纤维	二氧化碳	4		
	烧结机抽烟	烟气			空气	3.5~12		
	矿井、隧道通风	空气		乙炔	12			
	空气分离	空气		5~8, 25, 220	合成橡胶	生成气	16	
	氧气	30	丙烯	20				
	氮气	40	硝酸生产	硝酸气	2~9.6			
氧气充瓶	氧气	150						
稀有气体充瓶	稀有气体	220	氮肥工业	合成氨	氮氢混合气	150, 200, 320, 600		
石油开采	钻井	空气			空气	35		
				二氧化碳	50~130	氮	25~35	
			天然气	70~90	氢	15		
			天然气输送	70~90				
油田气输送	油田气	16, 25, 40	尿素	二氧化碳	150, 210			
炼油	催化裂化	裂解气	动力装置	燃气轮机	空气	3~14		
		空气			2.5, 3.5	柴油机增压	空气	1.4~3.2
	重整	烃			27.5		锅炉鼓、引风	空气、烟气
		氢气+烃			70, 110, 160	锅炉煤粉输送		空气
脱硫	氢气	26~36, 70~90, 150, 320	电站冷却塔通风	空气	(10~27)			
加氢精炼	氢气		供作动力	驱动风动工具	空气	8		
石油化工	气体提纯	烃		车辆制动	空气	6~8		
		丙烯			18.2	空气	4~6	
		乙烯	15		制冷工业	制冷及空调	氟	8~12
	乙烯装置	裂解气	37	氟里昂		8~12		
		丙烯	17	其他		城市煤气输送	煤气	5
	乙烷	19	纺织厂通风		空气		(30~90)	
丙烯腈	空气	2	船舶通风		空气		(20~450)	
	丙烯	20	纺织、船舶、电站控制		空气		30, 40, 60	
甲醇(低压合成)	合成气	50	排尘		空气与木质、碎屑、纤维、尘土混合	(50~180)		
	循环气	50	水压机配套		空气	150, 350		
液化天然气	丙烷	16		充气、喷漆、食品	空气	5~7		
	混合制冷剂	43						

① 工作压力皆指表压力，括号中数值的单位为 mmH₂O。

第2章 活塞式压缩机

1 结构及主要参数的选择

活塞式压缩机(图76·2-1)由曲柄连杆机构将驱动机的回转运动变为活塞的往复运动,气缸和活塞共同组成压缩容积。活塞在气缸内作往复运动,使气体在气缸内完成进气、压缩、排气等过程,由进排气阀控制气体进入与排出气缸。在曲轴侧的气缸底部设置填料,以阻止气体外漏,活塞上的活塞环阻止活塞两侧气缸容积内的气体互相穿漏。

为保证压缩机的正常运转,还应有级间冷却器、缓冲器、液气分离器、安全阀以及向运动机构和气缸的摩擦部位供润滑油的油泵和注油器等附属设备。

活塞式压缩机多用电动机驱动。中、小型固定式压缩机用异步电动机,大型用同步电动机,小型移动式压缩机用柴油机驱动,有些大型压缩机用煤气发动机或汽轮机驱动。

1.1 分类及特点

按气缸中心线的配置位置分,卧式、立式、对称平衡式、对置式、角度式(L型、V型、W型、S型等)。

按运动机构的特点分:带十字头压缩机(多用于固定式装置)和无十字头压缩机(多用于移动式装置)。

按轴功率大小分:微型(轴功率 $N_{\text{轴}} < 10\text{kW}$),小型($10 \leq N_{\text{轴}} \leq 50\text{kW}$),中型($50 \leq N_{\text{轴}} \leq 250\text{kW}$),大型($N_{\text{轴}} \geq 250\text{kW}$)。

卧式压缩机(图76·2-2)有单列或双列,且都在曲轴的一侧。运动机构装拆方便;运动部件和填料较少;惯性力不能平衡,故转速的增加受到限制,导致压缩机、驱动机和基础的重量和尺寸大。多级压缩时,只能采用多缸串联,因而气缸、活塞的装拆不方便。设计大、中型压缩机时已不采用,但因结构紧凑,零件少,避免采用高压填料等的优点,小型高压的机器中仍采用。

立式压缩机(图76·2-3)活塞环和填料的润滑、磨损均匀;机身受力简单;往复惯性力垂直作用在基础上,基础的尺寸较小;机器的占地面积小;不易变型;大、中型结构的压缩机操作维修不方便。

对称平衡式压缩机(图76·2-4)两主轴承之间,相对两列气缸的曲柄错角为 180° ,惯性力可完全平衡,转速能提高;相对列的活塞力能互相抵消,减小主轴颈的受力与磨损;多列结构中,每列串联气缸数少,安装方便;产品变型较卧式和立式容易。多列时零件的数目较多,机身和曲轴较复杂;两列时需配置较大的飞轮。

对置式压缩机气缸在曲轴两侧水平布置,相邻的两相对列曲柄错角不等于 180° ,并分两种:一种为相对两列的气缸中心线不在一直线上,制成3、5、7等奇数列;另一种曲轴两侧相对两列的气缸中心线在一直线上,成偶数列,相对列上的气体作用力可以抵消一部分,用于超高压压缩机。图76·2-5为该型式的运动机构。

角度式压缩机气缸中心线具有一定夹角,但不等于 180° 。有W型、V型、L型和扇型等,气阀装拆、级间冷却器和级间管道设置方便,结构紧凑,平衡性佳。多用作小型移动式装置。

W型结构(图76·2-6),当各列往复质量相等而且气缸中心线夹角为 60° 时动力平衡性最好。

V型结构(图76·2-7),当各列往复质量相等而且气缸中心线夹角 90° 时平衡性最佳,夹角为 60° 时,结构最紧凑。

L型结构(图76·2-8),当两列往复运动质量相等时,机器运转的平稳性比其他角度式优,大多用作固定式动力用空气压缩机。

扇型压缩机结构复杂,只在特殊情况下应用。

各种型式压缩机的惯性力和惯性力矩平衡的程度,对基础的大小和机器运转的平稳程度影响极大。不同转速固定式压缩机基础沿顶面允许的振幅值见表76·2-1。

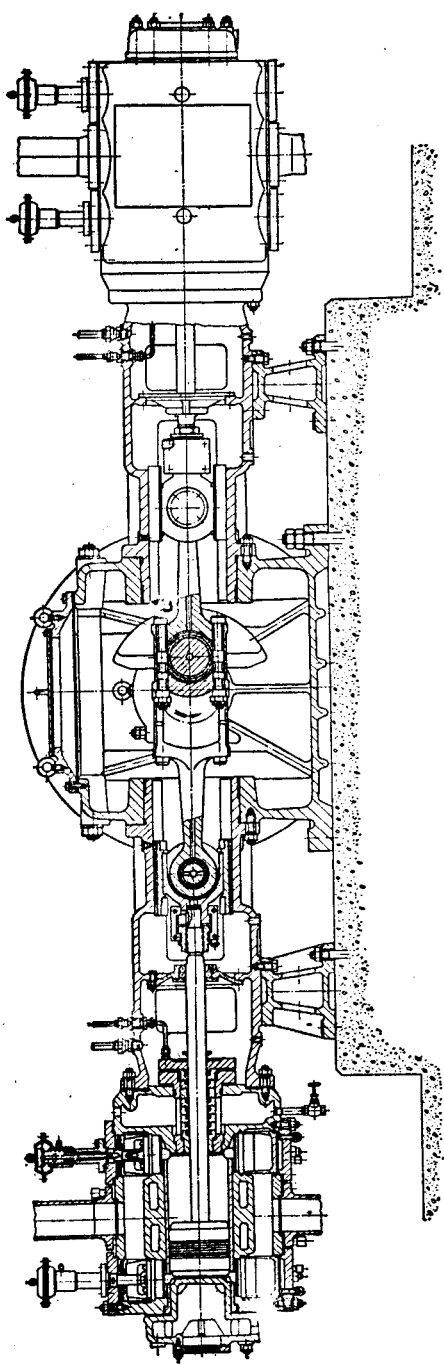


图76-2-1 活塞式压缩机结构

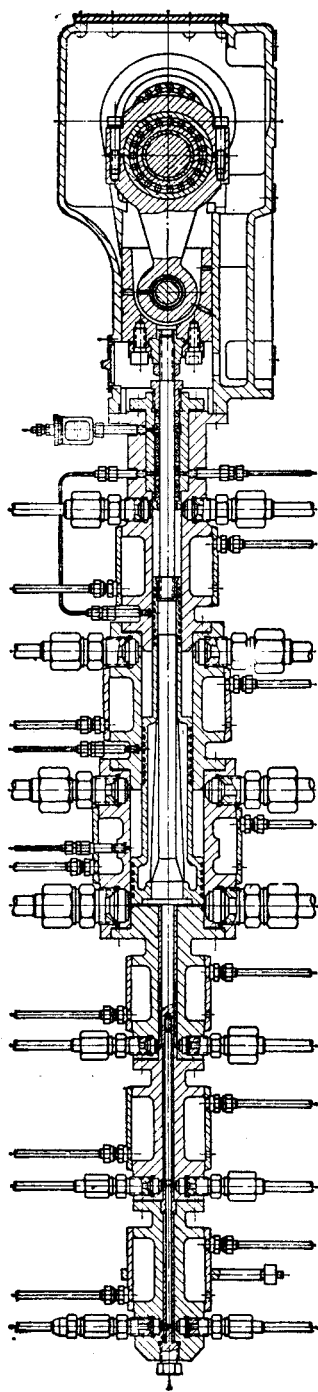


图76-2-2 单列卧式CO压缩机

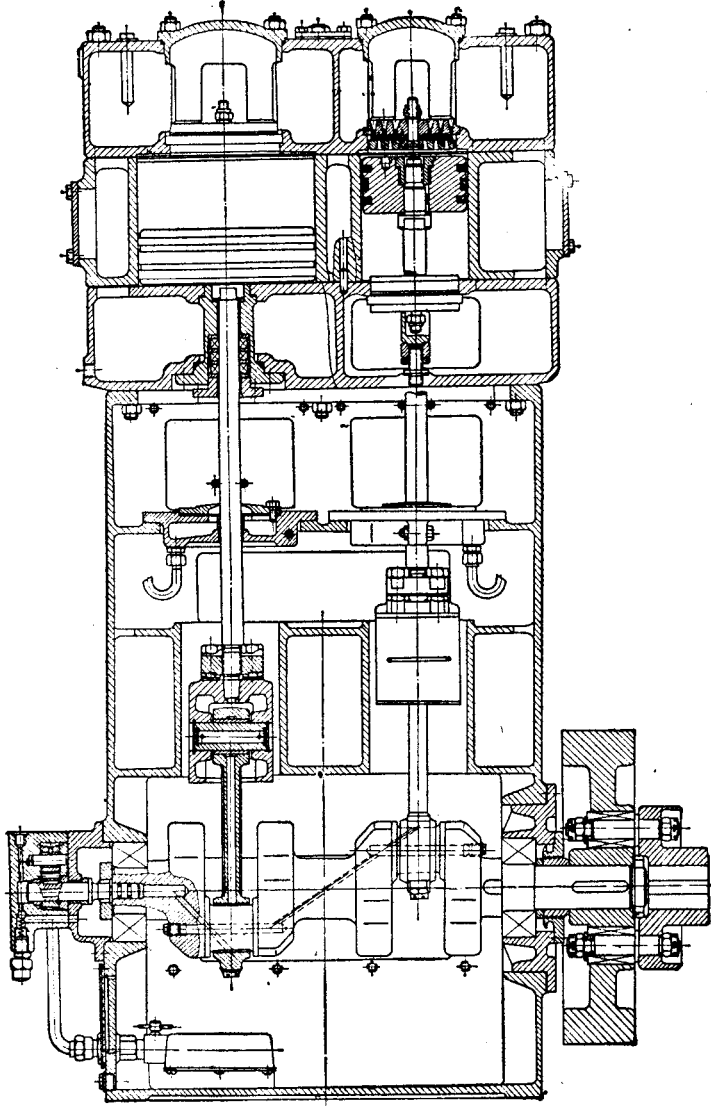
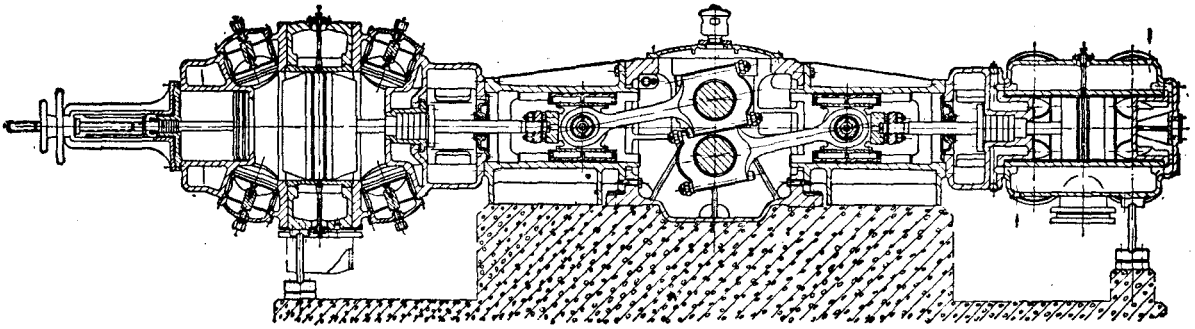
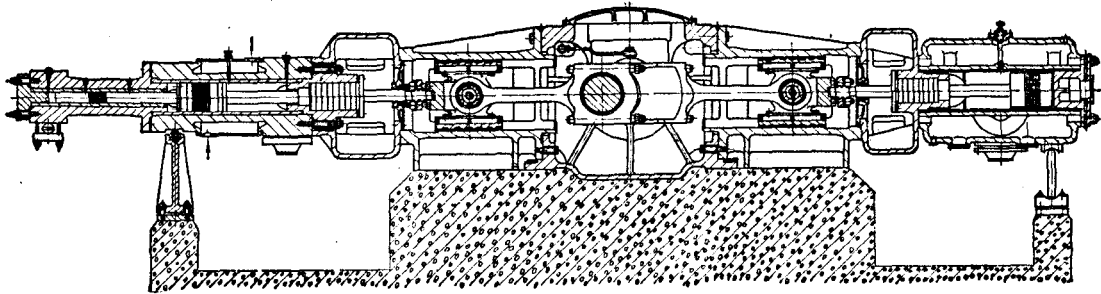


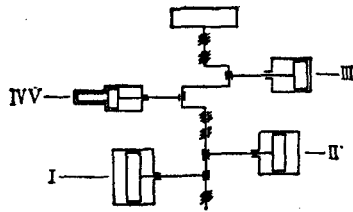
图76·2-3 立式压缩机



III-IV V 纵剖面



I-II 纵剖面



方案示意图

图76-2-4 对称平衡式压缩机

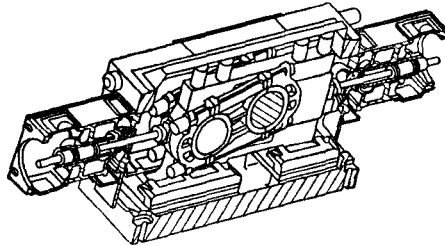


图76-2-5 对置式压缩机的运动机构

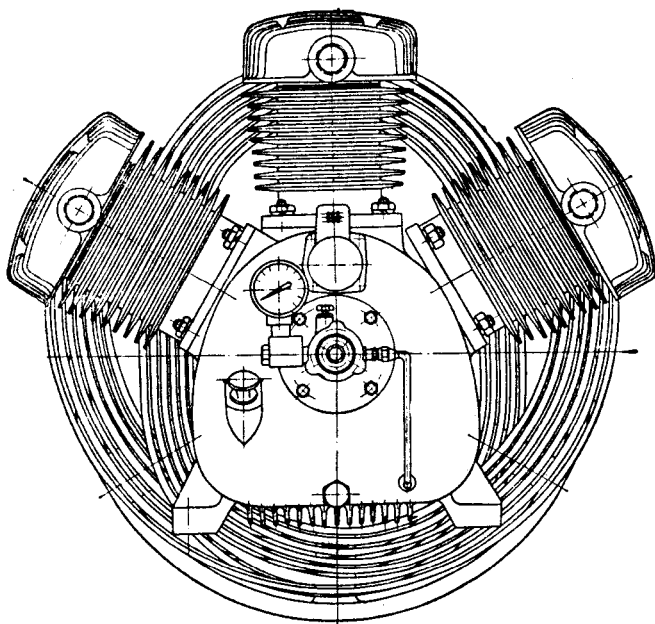


图76-2-6 W型空压机

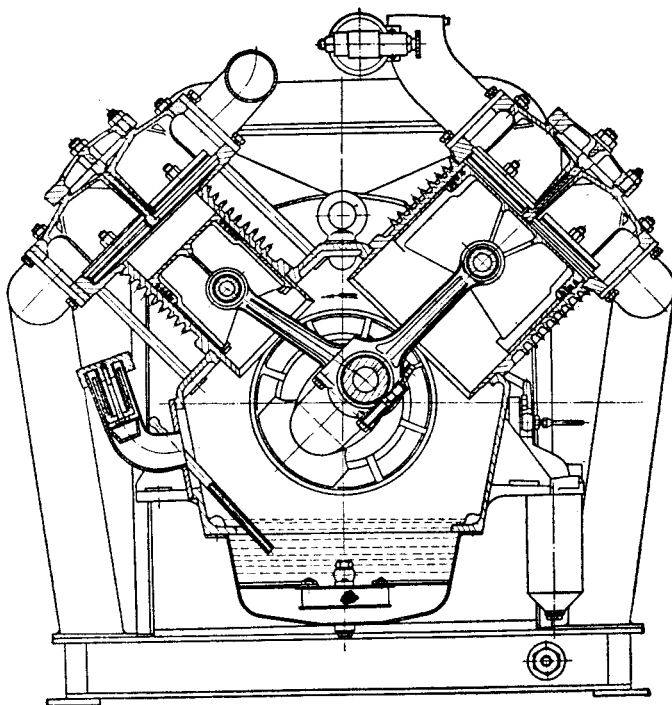


图76-2-7 V型空压机

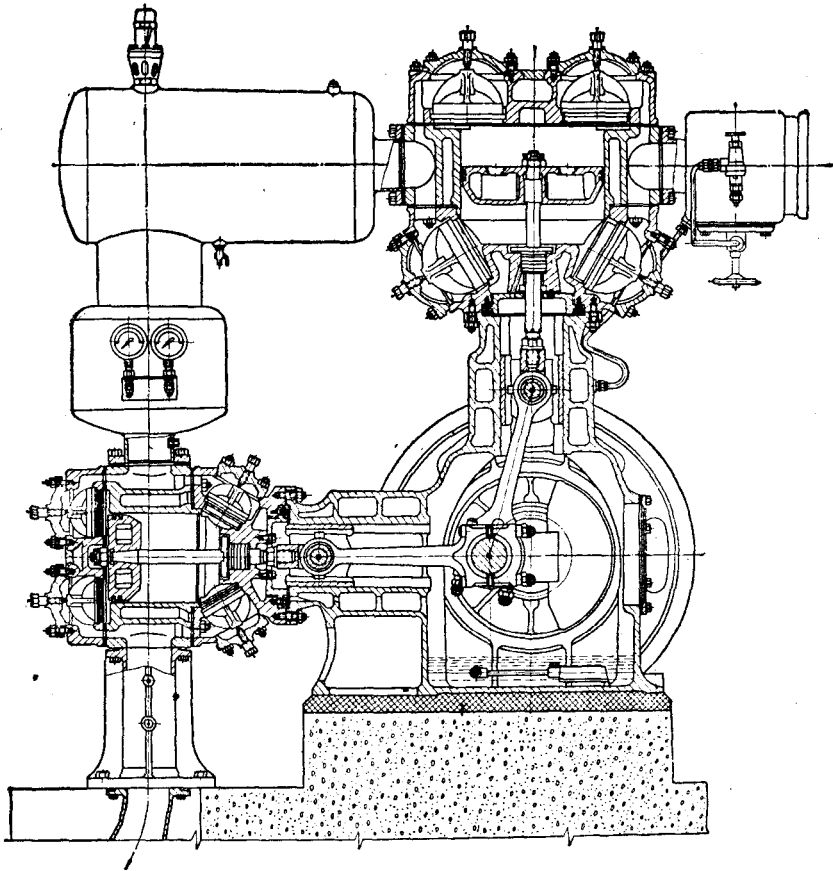


图76·2-8 L型空压机

表76·2-1 压缩机基础振幅允许值 m m

振动类别	每分钟振动频率					
	500以下	500	750	1000	1500	3000
垂直的	0.15	0.12	0.09	0.075	0.06	0.03
水平的	0.20	0.16	0.13	0.11	0.09	0.05

单列压缩机的往复惯性力 I_r 不能平衡。

多列立式、对称平衡式压缩机往复惯性力 I_r 和惯性力矩 M_r ，通过选择适当的列数和合理配置曲柄错角 δ ，部分或全部平衡。

角度式压缩机通过合理选择气缸中心线之间的夹角 γ ，可平衡部分往复惯性力，配置适当的平衡重，可平衡一部分或全部一阶往复惯性力 I_{r1} 。

对未平衡的离心力 I_c 和离心力矩 M_c ，可设置适当的平衡质量予以平衡。

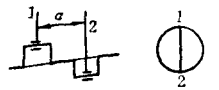
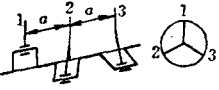
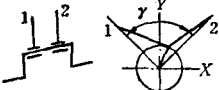
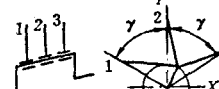

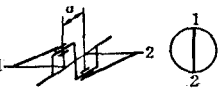

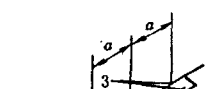
表76·2-2 为各种型式压缩机在各列往复质量相等时惯性力和惯性力矩的最大值。

气缸不用液体润滑的压缩机型式：

(1) 接触式无润滑压缩机(图76·2-3) 常用固体自润滑材料聚四氟乙烯为基体，加各种填充物(如青铜粉、玻璃纤维、石墨、二硫化钼等)制成活塞环和密封圈。中小型多取立式结构，大型多用对称平衡式结构，为避免运动部件的润滑油带入填料，填料下部设隔油装置，且活塞杆的长度要比有油润滑压缩机长一个行程值。

(2) 非接触式(迷宫)压缩机(图76·2-9) 只能作立式带十字头的结构。图上角为活塞、气缸上的迷宫槽形状。活塞与气缸之间保持很小的间隙，气体的泄漏在曲折密封中受到阻止，密封活塞杆的填料密封圈上，也开设齿状环形的沟槽。压缩的介质能保持纯净，但制造安装要求高，效率低，应用较少。

表76·2-2 各种型式压缩机惯性力和惯性力矩的最大值

型 式	未平衡的惯性力和力矩					
	旋 转 惯 性 力 I_r	旋 转 惯 性 力 矩 M_r	一 阶 惯 性 力 I'	一 阶 惯 性 力 矩 M'	二 阶 惯 性 力 I''	二 阶 惯 性 力 矩 M''
立 式  $\delta = 180^\circ$	0	$m_r r \omega^2 a$	0	$m_s r \omega^2 a$	$m_s r \omega^2 \lambda$	0
式  $\delta = 120^\circ$	0	$\sqrt{3} m_r r \omega^2 a$	0	$\sqrt{3} m_s r \omega^2 a$	0	$\sqrt{3} m_s r \omega^2 \lambda a$
角 度  $\gamma = 90^\circ$	$m_r r \omega^2$	0	$m_s r \omega^2$	微小不计	$\sqrt{2} m_s r \omega^2 \lambda$	微小不计
式  $\gamma = 60^\circ$	$m_r r \omega^2$	0	$\frac{3}{2} m_s r \omega^2$	微小不计	$\frac{3}{2} m_s r \omega^2 \lambda$	微小不计
式  $\gamma = 60^\circ$	$m_r r \omega^2$	0	$\frac{3}{2} m_s r \omega^2$	微小不计	$\sqrt{\frac{3}{2}} m_s r \omega^2 \lambda$	微小不计
对 称 平 衡 型  $\delta = 180^\circ$ $\gamma = 180^\circ$	0	$m_r r \omega^2 a$	0	$m_s r \omega^2 a$	0	$m_s r \omega^2 \lambda a$
式  $\delta = 90^\circ$ $\gamma = 180^\circ$	0	$\sqrt{2} m_r r \omega^2 a$	0	$\sqrt{2} m_s r \omega^2 a$	0	0
对 置 式  $\delta = 120^\circ$ $\gamma = 180^\circ$	0	$\sqrt{3} m_r r \omega^2 a$	0	$\sqrt{3} m_s r \omega^2 a$	$2 m_s r \omega^2 \lambda$	$\sqrt{3} m_s r \omega^2 \lambda a$

注：1.表中 δ 为相邻曲拐平面间的夹角； γ 为相邻气缸中心线的夹角。

2.表中 m_r 为每一拐的不平衡旋转质量； m_s 为每一列的往复运动质量。

3.表中 r 为曲柄半径； ω 为曲轴旋转角速度； λ 为曲柄半径与连杆长度之比； a 为列间距。