

离心式压缩机

第一册 原理

西安交通大学透平压缩机教研室 合编
沈阳鼓风机厂工人大学

离心式压缩机

第一册

原理

西安交通大学风机教研室
沈阳鼓风机厂工人大学 合编

江苏工业学院图书馆
藏书章

西安交通大学印刷

1973

离心式压缩机 第一册 原理

编辑： 西安交大透平压缩机教研室
沈阳鼓风机厂工人大学

印刷： 西安交通大学印刷厂

印数：3,500册 定价：1.85

出版日期：1973年7月

离心式压缩机

第一册 原 理

目 录

前言

绪论

§0-1 压缩机的分类	2
§0-2 透平压缩机的应用	4
§0-3 离心式压缩机的基本工作原理	5
§0-4 离心式压缩机的最近发展	6
§0-5 我国透平压缩机的发展	7

第一章 级中气体流动的基本概念

§1-1 叶轮进出口的气流速度三角形	9
§1-2 叶轮对气体的作功	10
§1-3 级的总耗功和功率	15
§1-4 级中能量分析	17
§1-5 级效率	32
§1-6 级的通流能力	37

第二章 级中能量损失

§2-1 流动损失	41
§2-2 冲击损失	58
§2-3 级的性能曲线	61
§2-4 轮阻损失	65
§2-5 漏气损失	69

第三章 叶 轮

§3-1 叶轮典型结构比较	78
§3-2 能量头、周速系数的计算	86
§3-3 叶轮的主要结构参数	91
§3-4 叶轮主要参数的确定	94
§3-5 半开式叶轮	111
* §3-6 混流式叶轮	115
* §3-7 理想气体在叶轮中的运动速度	118

第四章 固定元件

§ 4-1 吸气室	128
§ 4-2 扩压器	133
§ 4-3 弯道及回流器	150
§ 4-4 蜗壳(排气室)	153

第五章 离心式压缩机设计

§ 5-1 离心式压缩机的中间冷却与分段	160
§ 5-2 离心式压缩机的设计	165
* § 5-3 气体冷却器	175

第六章 离心式压缩机的相似及其应用

§ 6-1 透平压缩机的相似条件	188
§ 6-2 相似设计方法(模化法)	201
§ 6-3 离心式压缩机的性能换算	202
一、符合相似时的性能换算	
*二、近似相似时的性能换算	

第七章 离心式压缩机的性能曲线和调节方法

§ 7-1 离心式压缩机的性能曲线	214
§ 7-2 离心式压缩机和管网联合工作	217
§ 7-3 离心式压缩机的串连和并联工作	219
§ 7-4 离心式压缩机的调节方法	221

第八章 各种不同气体的压缩机计算特点

§ 8-1 气体常数 R 和绝热指数 k 值对压缩机设计的影响	228
* § 8-2 真实气体的计算特点	230

*第九章 离心式通风机

§ 9-1 概说	245
§ 9-2 通风机的主要性能参数	246
§ 9-3 通风机的无因次性能曲线与相似换算	248
§ 9-4 通风机的比转数	251
§ 9-5 叶轮	255
§ 9-6 进口固定元件	263
§ 9-7 蜗壳	266
§ 9-8 对数座标性能选择曲线的作法和应用	268
附录 I 各种通风机、鼓风机和压缩机产品例图	273
附录 II 各种气体的热力特性表	283
附录 III 离心式压缩机计算例题(一)	284
附录 IV 离心式压缩机计算例题(二)	292

参考资料

前 言

遵照伟大领袖毛主席有关教育革命的指示和“教材要彻底改革，有的首先删繁就简”的教导，我们编写了离心式压缩机教材。分为二册。第一册为原理；第二册为强度计算。为了教学上的方便，在第二册中还编入了轴流式压缩机强度计算方面的内容。

这本教材编写的对象主要是风机专业的学员。其次适当考虑当前的社会需要。为此在教材中注有“*”的章节，不作为教学大纲规定的内容，仅供读者进一步学习参考之用。

文化大革命前，风机专业的离心式压缩机原理和强度计算存在着理论脱离实际和繁琐哲学的弊病。并且极少反映我国的生产实践。

在这次新教材的编写过程中，我们初步总结了风机行业重庆通用机器厂和开封空分设备厂二个工人大学的教学经验。同时，进行了一些调查研究。对旧教材开展革命的大批判，认识到教材编写必须要划清理论脱离实际与必要的基本理论知识之间的界限；专业知识的必要系统性和繁琐哲学之间的界限；“洋为中用”与洋奴哲学、爬行主义之间的界限等。教材编写中，我们虽然注意问题的分析，以培养学员分析问题和解决问题的能力。并且力求贯彻“少而精”的原则。但是，由于我们马列主义，毛泽东思想水平不高，业务知识又很缺乏，加上时间短促，调查面有限，这本教材中肯定存在不少缺点和错误，我们诚恳地欢迎读者批评指正。

编写过程中，我们得到了许多工厂和单位的大力支持。他们提供了不少有益的资料。这对于我们完成编写工作是极其有力的帮助和鼓舞。在此我们表示感谢。

西安交通大学风机教研室

沈阳鼓风机厂工人大学

一九七三年五月

緒 論

§ 0—1 压缩机的分类

伟大领袖毛主席教导我们：“在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。”劳动人民经过了长期的生产实践，对压缩机作了很大的发展。目前使用得最广泛的压缩机通常分为二类：一类是容积式压缩机（包括活塞式压缩机、迴转式压缩机等）；另一类是透平式压缩机。从能量观点来看，压缩机是把原动机的机械能转变为气体能量的一种机械。

一、容积式压缩机：容积式压缩机气体压力的提高是利用气体容积的缩小来达到的。

1. 活塞式压缩机：图 0—1 表示了这种压缩机的基本构造。它的简图与工作原理示于图 0—2 中。它是由气缸和活塞组成，而活塞则由连杆、曲轴带动，在气缸里作来回运动。活塞

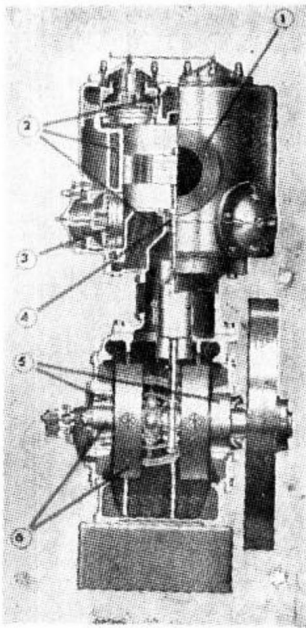


图 0—1 活塞式压缩机

在图上所示的方向移动时，由于气缸中的气体容积缩小，使气体压力上升。气体的吸气及排气则由气缸上的进、排气阀进行控制。

2. 迴转式压缩机：迴转式压缩机在其气缸内有一个或两个转子，转子旋转就使气体容积缩小以致实现气体的压缩。目前应用较广的是滑片式和螺杆式二种。

滑片式压缩机的气缸是元筒形的（图 0—3），上面开有进排气孔口，缸内有一个偏心安置的转子，转子

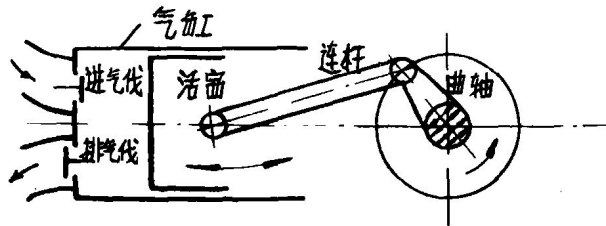


图 0—2 活塞式压缩机简图

上开有若干径向滑槽，内置滑片。当转子旋转时，滑片在离心力的作用下紧压在气缸的内壁上，并将气体自进气口输至排气口。

图 0—4 所示为一个螺杆式压缩机，它的气缸成 8 字形，内置两个转子——阳螺杆和阴螺杆。当转子旋转时，转子凹槽与气缸内壁所构成的容积不断变化，从而实现气体的吸入、压缩及排出。

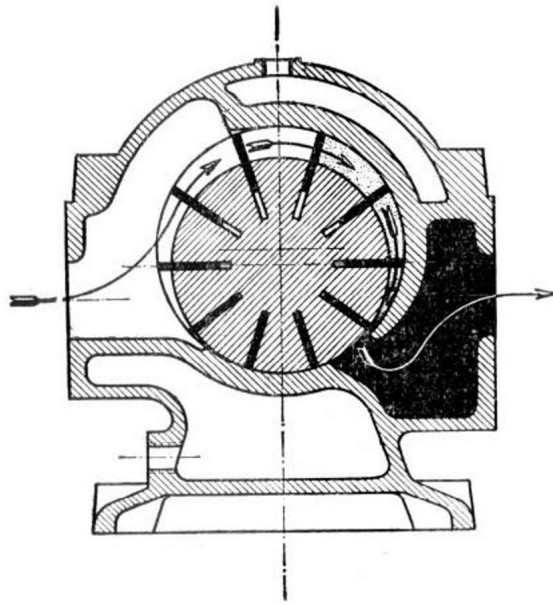


图 0-3 滑片式压缩机

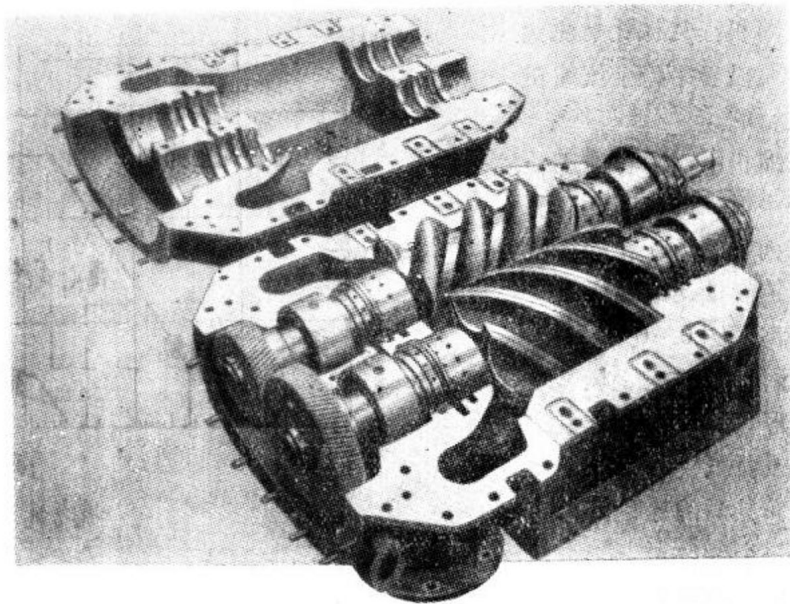


图 0-4 螺杆式压缩机

迴转式除上述两种外，经常用到的还有图 0-5 所示的罗茨式。

二、透平式压缩机：透平式压缩机是一种叶片旋转式机械。在透平式压缩机中气体压力的提高是利用叶片和气体的相互作用来达到的。它一般分轴流式和离心式二种。并且大致可按压力的大小又可区分为通风机、鼓风机和压缩机。对于风压小于或等于1000~1500毫米水柱的称通风机，风压在1000~1500毫米水柱以上到3~3.5公斤/厘米²的称鼓风机，风压在3~3.5公斤/厘米²以上的称压缩机。

1. 离心式压缩机：气体在离心式压缩机中的运动是沿着垂直压缩机轴的径向方向进行的。

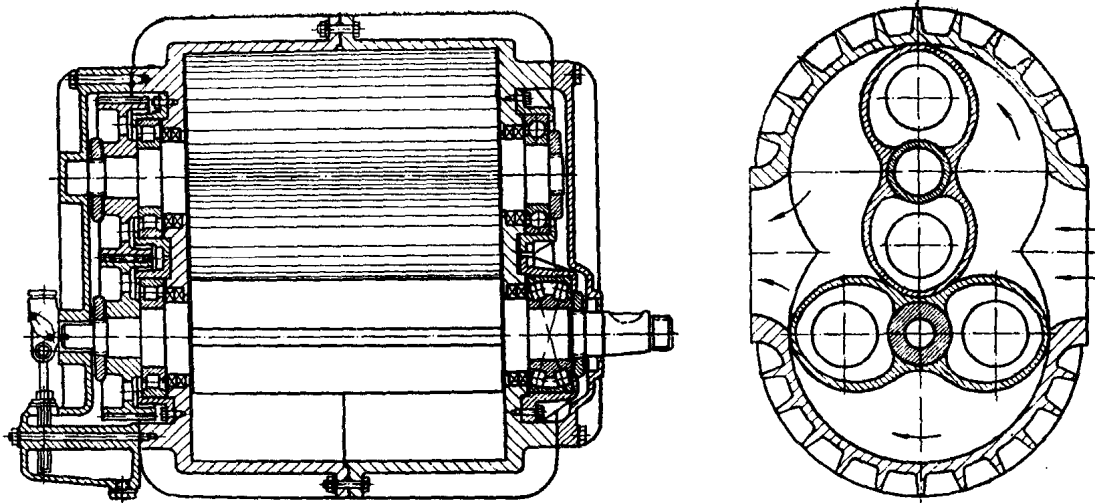


图 0-5 罗茨式鼓风机

离心式压缩机中气体压力的提高是由于气体流经叶轮时，由于叶轮旋转使气体受到离心力的作用而产生压力；与此同时气体获得速度，而气体流过叶轮、扩压器等扩张通道时气体的流动速度又逐渐减慢而变成气体压力的提高。

2.轴流式压缩机：气体在轴流式压缩机中的运动是沿着平行于压缩机轴的轴向方向进行的。

在轴流式压缩机中，同样由于转子旋转使气体产生很高的速度，而当气体流过依次排列着的动叶和静叶栅时，气体的流动速度就逐渐减慢而变成气体压力的提高。图 0-6 为轴流式压缩机的构造。轴流式压缩机一般由吸气室、进气导流叶片排、级组、出气整流叶片排及排气室等组成。其中每一排动叶栅和其后的静叶栅构成轴流式压缩机的一个级。

在使用方面，一般迴转式压缩机宜用于低压力，中、小流量的场合；

活塞式压缩机宜用于高压力，中、小流量的场合；相反，透平式压缩机则宜用于低、中压力，大流量的场合。在图 0-7 中表示了各类压缩机的使用范围。

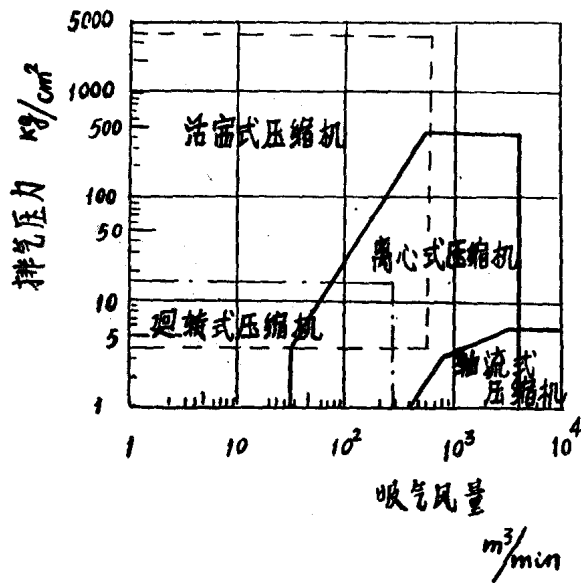


图 0-7 各类压缩机的使用范围

§ 0-2 透平压缩机的应用

随着航空、冶金、石油、化工、电力、采矿、纺织等工业的发展，相应地通风机，透平鼓风机和压缩机的生产和技术水平获得迅速提高。特别是透平压缩机的理论与制造技术得到了新发展，跨入了从来被活塞式压缩机所占据的高压领域，从而急剧地扩大了应用范围。透

平鼓风机和压缩机已成为钢铁、石油、化工等部门用来保证生产过程进行和强化生产过程的
心脏设备。

目前，透平鼓风机和压缩机，它主要应用在高炉炼铁、烧结矿、炼焦、氧气顶吹炼钢，
有色金属冶炼与化工用制氧、制冷，氮肥和尿素生产、制酸、制碱、石油化工（包括三大合
成），管路气体输送、大型空气动力站，燃气轮机和内燃机的增压以及国防工业中航空风洞
实验、原子能工业的惰性气体压缩和核工业中特殊元素的制取等方面。

通风机主要应用在矿井、地下铁道、隧道、地下电站通风，火力发电站的锅炉鼓引风，
煤粉输送和冷却塔强制通风，各种工业炉鼓风，冶金、石油、化工中高温、腐蚀性的气体推
送，车间和大型建筑物的空调以及大型舰艇和原子防护设备的通风等方面。

关于它们的详细应用业已在透平压缩机概论中阐述。

§ 0—3 离心式压缩机的基本工作原理

为了逐步建立起对离心式压缩机的认识，现在我们比较详细地对 DA120—61 离心式压
缩机的典型构造进行介绍。在图 0—8 上表示了 DA120—61 离心式压缩机的纵剖面构造图。
压缩机的设计流量为 125 米³/分，出口压力 6.35 公斤/厘米²，由 800 千瓦电机驱动，通过
增速齿轮箱增速到 13900 转/分。整个压缩机是由一个带有六个叶轮的转子及与其相配合的
固定元件所组成。为了节省压缩机的耗功和不使气体温度过高，压缩机被分为二段，每段由
三个叶轮及与其相配合的固定元件组成。空气周向进入吸气室，经过第一段压缩后，由蜗壳
把空气从压缩机中引出，引向中间冷却器进行冷却。冷却以后，再由吸气室进入第二段进行
压缩，使空气压力升高到所需要的出口压力。压缩机转子支承在两端滑动轴承上。

在压缩机的每个段里，常常是由几个或者由一个压缩机级所组成。每个级是由一个叶轮
及与其相配合的固定元件所构成。对于离心式压缩机级来说，从其基本结构上来看，它可分
为中间级和末级二种。

图 0—9 (a) 表示了中间级的型式，它是由叶轮 1、扩压器 2、弯道 3 和迴流器 4 等组
成，气体经过中间级后，将直接流到下一级去继续进行增压。在离心式压缩机的每一个段里，
除了段中的最后一级外，都属于这种中间级。图 0—9 (b) 表示了末级的型式，它是由叶
轮 1、扩压器 2、蜗壳 5 等组成。气体经过这一级增压后，将排出机外，流到冷却器进行冷却，

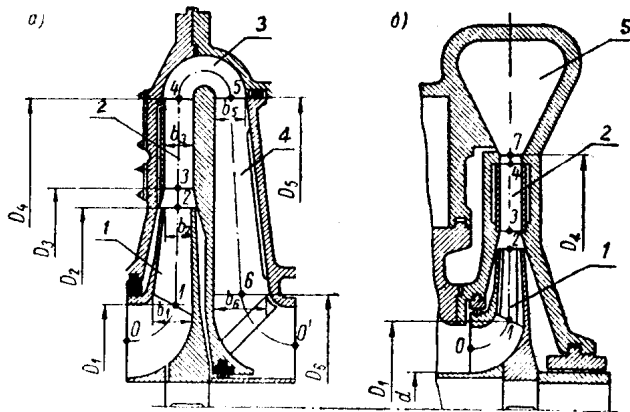


图 0—9 a) 离心压缩机中间级 b) 离心压缩机末级

或送往排气管道输出。对于这二种级的结构型式来说，叶轮1是这二种级所共同具有的，而只是在固定元件上有所不同。对于末级来说，它是以蜗壳5取代中间级的弯道3和迴流器4，有时还取代了级中的扩压器2。

下面我们介绍吸气室与级中叶轮、固定元件的作用（见图0-8）。

1. 吸气室

吸气室是用于把所需压缩的气体，由进气管道或中间冷却器的出口，均匀地引入叶轮去进行增压。因此，在每段压缩机的第一级进口都设置了吸气室。

2. 叶 轮

叶轮也称为工作轮，它是压缩机中一个最重要的部件。气体在叶轮叶片的作用下，跟着叶轮作高速的旋转。而气体由于受旋转离心力的作用，以及在叶轮里的扩压流动，使气体通过叶轮后的压力得到了提高。此外，气体的速度能也同样是在叶轮里得到了提高。因此，可以认为叶轮是使气体提高能量的唯一途径。

3. 扩压器

气体从叶轮流流出时，它具有较高的流动速度。为了充分利用这部分速度能，常常在叶轮后面设置了流通截面逐渐扩大的扩压器，用以把速度能转化为压力能，以提高气体的压力。扩压器一般有无叶、叶片、直壁形扩压器等多种型式。

4.5. 弯道与迴流器

为了把扩压器后的气体引导到下一级叶轮去继续提高压力，在扩压器后面常常设置了使气流拐弯的弯道4，以及把气体均匀地引入下一级叶轮进口的迴流器5。

6. 蜗 壳

蜗壳的主要目的是把扩压器后面或叶轮后面的气体汇集起来，把气体引到压缩机外面去，使它流向气体输送管道或流到冷却器去进行冷却。此外，在汇集气体的过程中，在大多数情况下，由于蜗壳外径的逐渐增大和通流截面的渐渐扩大，也使气流起到一定的降速扩压作用。

在离心式压缩机中，除了级的组成部分外，为了减少压缩机的外部和内部漏气，在压缩机的机壳二端设置了前轴封7和后轴封8，在隔板内孔和叶轮轮盖进口端分别设置了密封9和密封10。此外，为了减少作用在止推轴承上的轴向推力，常常设置了平衡盘11。

§ 0—4 离心式压缩机的最近发展

近几年来，随着石油化学工业的发展，压缩各种气体的离心式压缩机日益增多，特别是高压小流量离心式压缩机获得很大的发展。从而使离心式压缩机和活塞式压缩机应用范围之间的界线正在发生深刻的变化。虽然离心式压缩机具有效率低的缺点。但是离心式压缩机比活塞式压缩机具有重量轻、投资省、尺寸和占地面积小、操作维修简单和运转率高等优点。如果我们合理地考虑石油化工厂的热能综合利用，则采用离心式压缩机生产过程的总热效率

也可与活塞式压缩机相媲美。

目前,大功率(最大功率已达 52900 千瓦)高压离心式压缩机一般用高速工业蒸汽轮机拖动,多数采用单列一端串联或两列串联驱动。它的出口压力已可达 150~350 公斤/厘米²,最高可达 420 公斤/厘米²。转速为 10000~16000 转/分,最高可达 25000 转/分。连续运转时间可达 18 个月以上。在高压离心式压缩机上则成功地采用了高压液体浮环式密封,多油楔径向轴承、浮动式止推轴承、筒形气缸等结构;在工艺方面,对于叶轮出口较宽的($b_2 > 7 \sim 8$ 毫米)广泛采用全焊接结构代替铆接结构,对于狭流道叶轮的制造则使用电蚀加工,对转子动平衡的要求更高;在设计上则合理地考虑转子的轴向推力平衡,多缸的临界转速和提高转子刚度、以及根据工质的不同性质来选择各另部件的材料等问题,并且正在逐步提高小流量级的空气动力性能和采用三元叶轮以及摸清高压下实际气体的性质;对于高速运转时的振动和压缩化工气体机器的性能试验和换算也是当前应被重视的问题。值得注意的是国外正在研究试制压力为 2500~3200 公斤/厘米² 的超高压离心式压缩机,以适应高压聚乙烯生产的需要。

此外,随着交通运输、国防等工业部门的发展,在小功率燃气轮机中的离心式压气机上广泛采用高强度的材料,其单级压比一般已达 4.5~6.5,并正在试制研究单级压比为 12,转速为 130,000 转/分,级效率达 78.5% 的离心式压气机级。

§ 0—5 我国透平压缩机的发展

“中国是世界文明发达最早的国家之一”。勤劳勇敢的中国人民,在很早以前就懂得了离心式风机的原理制造了结构轻巧、使用方便的磨谷风车。但是由于封建地主的长期统治和一百多年来帝国主义和官僚资本主义的残酷压榨,使我国人民的才能和智慧得不到发展,造成了我国的贫穷和落后。解放前,透平压缩机制造工业也和其它工业一样都是非常落后的,除了沿海大城市还能生产少量低压通风机外,根本谈不上透平鼓风机和压缩机的生产。少数工业用的风机则都是依靠进口。

1949 年 10 月 1 日在毛主席和中国共产党的领导下,推翻了压在中国人民头上的三座大山,成立了中华人民共和国。并开始进行大规模的经济建设,透平压缩机工业也相应地逐步发展壮大起来。在第一个五年计划期间,先后建立了一些专业生产通风机、鼓风机的工厂,如沈阳鼓风机厂(开始时称沈阳扇风机厂)、上海鼓风机厂、重庆通用机器厂等。开始大量生产通风机和鼓风机。同时某些汽轮机厂也兼业生产一些透平鼓风机和压缩机。他们满足了国民经济一些部门的要求。虽然在此期间,我们基本上处于仿制阶段,但却使我国透平压缩机、鼓风机、通风机制造工业从无到有,迅速地填补了这个空白。在生产实践中培养和训练了透平压缩机专业的大批革命职工和工程技术人员,为后来的大发展准备了条件。

1958 年在毛主席的“鼓足干劲、力争上游、多快好省地建设社会主义”的总路线指引下,全国掀起了群众性的大炼钢铁运动,呈现一派欣欣向荣的景象。钢铁工业的发展促进透平压缩机工业的发展。于是在大跃进的年代里,透平压缩机、鼓风机、通风机生产在全国各地普遍地发展起来。专业工厂从少数几个发展到十几个,产品从一般通风机、鼓风机提高到大型透平压缩机和鼓风机的生产。并且逐步走上我国自己发展透平压缩机、鼓风机、通风机工业的道路。在 60 年代前期,沈阳鼓风机厂的工人和革命技术人员自行设计和制造了我国第一台 DA120-121 高压离心式压缩机,该机为双缸结构,进口流量 125 米³/分,出口压力

22 绝对大气压，转速 13800 转/分；随后又生产了供炼油厂催化车间用的石油气离心式压缩机三机。上海汽轮机厂则开始生产轴流式压缩机。在通风机方面，则研制了具有先进水平的 4-72、4-73 通风机系列，效率达 90% 以上。至此，仿造阶段逐渐结束而开始了独立自主地自行设计和制造的时期。

但是，叛徒、内奸、工贼刘少奇为了复辟资本主义的罪恶目的，推行了一整套反革命修正主义路线，抵制和破坏毛主席革命路线的贯彻。刘少奇一伙对于 58 年大跃进年代里按毛主席“独立自主”、“自力更生”方针发展起来的地方风机工业进行大砍大杀，特别是致使透平压缩机的生产进展得缓慢，远远没有满足经济建设的要求。

伟大领袖毛主席亲自发动的无产阶级文化大革命的胜利，彻底摧毁了刘少奇的反革命修正主义路线。“无产阶级文化大革命是使我国社会生产力发展的一个强大的推动力。”透平压缩机工业的广大革命职工，在毛主席革命路线的指引下，坚持走“独立自主”、“自力更生”发展工业的道路，使我国透平压缩机、鼓风机、通风机生产迅速向前发展。目前单就专业制造厂来说，就已发展到 32 个之多。我国已能生产供石油化工、动力、钢铁、国防，制冷等各个工业部门用的多种类型的透平压缩机、鼓风机、通风机。这里要特别指出的是武汉鼓风机厂自行设计和制造了容积流量 50000 标准立方米/小时、转速 10500 转/分、压力为 70~90 大气压的氢气离心式压缩机；南京化工机械厂自行设计和制造了压力为 300~330 绝对大气压的高压离心式循环压缩机；最近，有关单位还正在试制压力为 320 大气压的高压离心式压缩机。此外，上海汽锅所研制成功了具有先进水平的“东风 I 型”轴流式压缩机级；上海汽轮机厂则自行设计和制造了供高炉冶炼用的轴流式压缩机；杭州透平机械厂自行设计和制造了单级压比达 3.8 的小功率燃气轮机用离心式压气机；在通风机方面则成功地制造了 20 米大型轴流通风机和可调动叶隧道通风机。一些新工艺和新材料如精密铸造叶轮、电蚀加工、高速模锻叶片、玻璃钢叶片等也正在或开始应用于透平压缩机、鼓风机、通风机生产。还有的单位则陆续系统地进行了新的模型级试验。同时系列化工作也正在开展。上述进展充分标志着我国透平压缩机、鼓风机、通风机的生产已进入了一个崭新的水平。整个透平压缩机制造业的革命群众作出了应有的贡献。所有这些成就都是毛主席无产阶级革命路线的伟大胜利，都是毛泽东思想的伟大胜利。

但是，“事物总是一分为二的。”应该看到，无论是在品种、质量和数量上当前透平压缩机生产还不能满足我国现代工业、现代农业、现代科学技术和现代国防的要求。而且，一些科研工作还必须有待开展。因此，我们必须加倍努力，使透平压缩机的生产在不远的将来赶上和超过世界先进水平。

第一章 级中气体流动的基本概念

离心式压缩机由级组成，因此我们从本章至第四章首先讨论一个级。

当原动机拖动离心式压缩机时，压缩机的叶轮就旋转起来。此时叶轮就对气体做功，把能量传给气体，从而使气体的压力、温度升高，比容缩小。因此叶轮是离心式压缩机的主要部件。在本章里，我们首先研究叶轮对气体的做功大小，它与气体流动之间的内在规律性，即欧拉方程。然后应用热力学和流体力学知识——可压缩流动的能量方程及伯努利方程，着重讨论在级中气体能量的分配以及气体压力、温度、比容的变化。在级中能量分析的基础上，还叙述级效率的概念与表示方法。

这里要指出的是，由于离心式压缩机级流道形状的复杂，并存在气流的摩擦和附面层，气流参数不仅沿流道每一截面变化，而且在任一截面上的各点，参数亦是变化的。这就是说，级中气体是一个三元流动。另外由于叶轮的叶片数是有限的，在气流所占空间的任一点上，气体的参数周期地随时间而变化，换句话说，气流的运动是周期地不稳定的。

在气流作三元不稳定运动的情况下，要研究级中气体的流动是十分复杂的。因而在工程中我们常常作一些假设，首先假设沿流道的每一截面上气流参数是相同的，并用某一平均值来表示。这就是把气体的流动作为一元流动来处理。同时，在取了气流平均参数后，可以统观地认为气流的运动是稳定的。实践证明，经过这样的简化假设后来研究级中气体的流动是比较简便的。

§ 1—1 叶轮进出口的气流速度三角形

因为叶轮对气体做功，所以叶轮进口到出口截面气体运动速度就有变化。为此在研究叶轮的做功大小时，我们必须首先讨论气体在叶轮中的运动速度，而在初步讨论时，只需对叶轮进口和出口气体流动速度进行讨论就够了。这里要说明一点，我们所讨论的气流速度均指流道每一截面上的平均速度。

我们来看图 1-1 气体在叶片后弯式叶轮中的元周速度（或称线速度）、相对速度和绝对速度。图 1-1 a 表示出叶轮不转动，叶轮进出口不堵死，气体流动时的情况。这时气体沿两叶片间流道作相对于叶轮的 \vec{w} 运动，气体有相对速度 \vec{w} （由于叶轮不转动，这时的 \vec{w} 就是绝对速度 \vec{c} ）。因为叶轮的截面积从进口到出口是逐渐增大的，故叶轮从进口截面处到出口截面处的相对速度是逐渐减小的。图 1-1 b 表示出叶轮进出口堵死，气体不流动，而当叶轮转动时的情况。这时气体受到叶片的推动，作与圆周相切的圆周运动。气体有圆周速度 \vec{u} 。在不同半径上，气体的圆周速度是不同的。叶轮出口截面处气体的圆周速度最大，叶轮进口截面处气体的圆周速度最小。图 1-1 c 表示出上面两种气体运动同时存在，即叶轮转动，并且

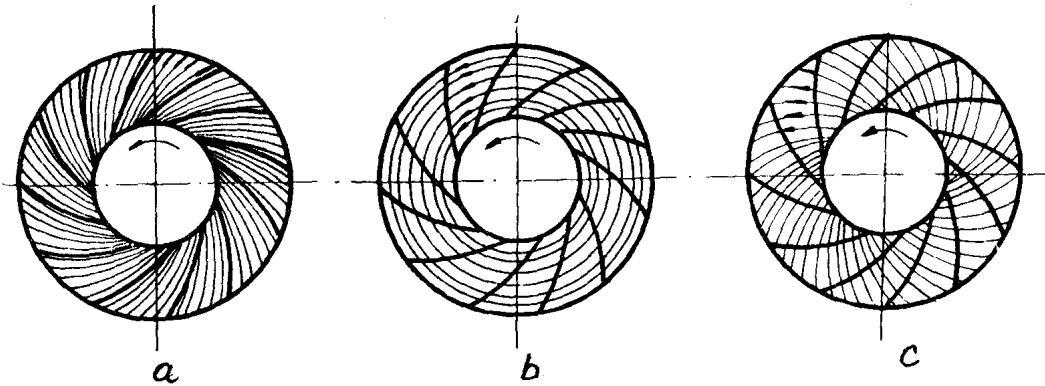


图 1-1 气体在叶轮中运动的圆周速度、相对速度、绝对速度

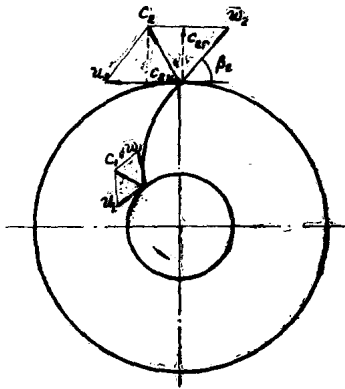


图 1-2 叶轮进出口速度三角形

大， c_{2u} 就增大， β_2 减小， c_{2r} 就减小。

叶轮进出口也不堵死时的情况。这时气体对于机壳有绝对速度 \vec{c} 。

为了清楚表示气体运动时的圆周速度、相对速度和绝对速度，我们常常把这三个速度画成一个速度三角形。图 1-2 表示了叶轮进口和出口的速度三角形。图中 β_2 表示叶轮出口处气流相对速度的方向，即相对速度与圆周速度反方向间的夹角。此外，常把 c_2 分成二个分速度：圆周分速度 c_{2u} 和径向分速度 c_{2r} ，从图上可以看出：

$$c_{2u} = u_2 - c_{2r} \operatorname{ctg} \beta_2 \quad (1-1)$$

从上式中可以看出，当 u_2 、 c_{2r} 一定时，角 β_2 增

§ 1-2 叶轮对气体的作功

在讨论了叶轮进出口速度三角形以后，我们就可进而讨论叶轮的作功大小了。关于叶轮对气体作功的计算对离心式压缩机来说是一个十分重要的问题。我们知道，由原动机传递给压缩机叶轮的功率为 $N = M\omega$ 。其中 M 为传给叶轮的转矩， ω 为叶轮的旋转角速度。传给叶轮的转矩可用动量矩定理求得。

根据动量矩定理：单位时间叶轮内气流动量矩对某一固定轴线的变化等于外力对同一轴线的力矩之和。

现在我们用截面 1-1 及 2-2 将某一部分充满在叶轮流道中的气体划出（见图 1-3）。经过很短的一段时间 Δt ，被划出来的气体质量在叶轮内移动并占有截面 1'-1' 及 2'-2' 之间的空间。

为了求得被研究气体质量单位时间内动量矩的变化，应该将截面 1'-1' 及 2'-2' 内的气体动量矩减去位于截面 1-1 及 2-2 间的气体对于同一轴线的动量矩，并将所得的差值除以时间间隔 Δt 。因为，气体在压缩机级中的流动被认为是稳定的，因而在截面 1'-1' 及 2-2 之间的气体状态保持不变，而所求的动量矩差值将为包含在截面 2-2 和 2'-2' 及截面 1-1 和 1'-1' 内的气体质量的动量矩差。

在稳定运动时，包含在截面 2-2 及 2'-2' 之间的气体质量和截面 1-1 及 1'-1' 之间的气体质量彼此相等，并且等于流过叶轮的每秒气体质量流量 $m = \frac{G}{g}$ 乘以时间 Δt 。那末，流出叶轮的气体相对于转轴的动量矩将等于

$$\frac{G}{g} c_{2u} r_2 \Delta t$$

流入叶轮的气体相对于转轴的动量矩等于

$$\frac{G}{g} c_{1u} r_1 \Delta t$$

这样，单位时间内动量矩的变化为

$$\frac{1}{\Delta t} \left[\frac{G}{g} c_{2u} r_2 \Delta t - \frac{G}{g} c_{1u} r_1 \Delta t \right] = \frac{G}{g} c_{2u} r_2 - \frac{G}{g} c_{1u} r_1$$

根据动量矩定理，它应等于外力对同一轴线的力矩。因为外力矩就是传给叶轮的转矩 M ，于是

$$M = \frac{G}{g} (c_{2u} r_2 - c_{1u} r_1) \quad (1-2)$$

这样传给叶轮的功率就为

$$N = M \omega = \frac{G}{g} (c_{2u} r_2 \omega - c_{1u} r_1 \omega)$$

因为 $u_2 = r_2 \omega$ ， $u_1 = r_1 \omega$ ，故

$$M \omega = \frac{G}{g} (c_{2u} u_2 - c_{1u} u_1)$$

对于一公斤气体而言，上式就变成

$$\frac{M \omega}{G} = \frac{1}{g} (c_{2u} u_2 - c_{1u} u_1)$$

这里 $\frac{M \omega}{G} = L_{th}$ 它表示叶轮对一公斤气体所作的功。最后得

$$L_{th} = \frac{1}{g} (c_{2u} u_2 - c_{1u} u_1) \quad [\text{公斤} \cdot \text{米} / \text{公斤}] \quad (1-3)$$

上式就是离心式压缩机的一个基本方程式，也叫欧拉方程式。它告诉我们，如果知道了叶轮进出口气体的速度，就可以计算叶轮对一公斤气体做功的大小，而可以不管叶轮内部的气体流动情况。应该指出，欧拉方程式对于黏性可压缩或不可压缩气体均是适用的。

因为根据能量转换与守恒定律，传给叶轮的功就转换成气体的能量，故对于一公斤气体所获得的能量就为

$$h_{th} = L_{th} = \frac{1}{g} (c_{2u} u_2 - c_{1u} u_1) \quad (1-4)$$

我们称 h_{th} 为一公斤气体所得到的能量头。因为 h 等于 L ，故为了简单起见，以后我们均用符号 h 来表示功或气体能量头的大小。

当没有预旋绕时，一般在离心式压缩机级中气体按 $\alpha_1 \approx 90^\circ$ 进入叶轮。（ α_1 表示叶轮进

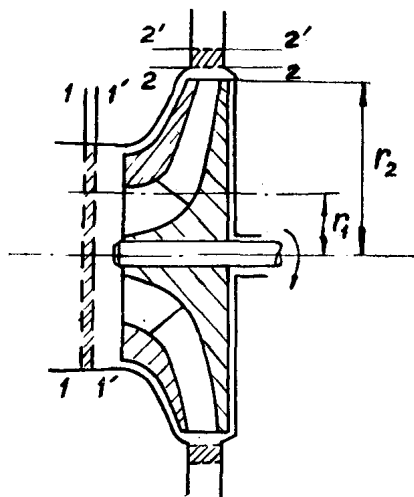


图 1-3 导出动量矩变化的引证图

口处气流绝对速度的方向, 即绝对速度与圆周速度间的夹角)。于是 $c_{1u} \approx 0$, 在这种情况下

$$h_{t_h} = \frac{1}{g} c_{2u} u_2 \quad \left[\frac{\text{公斤} \cdot \text{米}}{\text{公斤}} \right] \quad (1-5)$$

因为 $u_2 = \frac{\pi D_2 n}{60}$ (式中 D_2 —— 叶轮外径; n —— 叶轮每分钟转数), $c_{2u} = u_2 - c_{2r} \text{ctg} \beta_2$,

所以当 c_{2r} 一定时, 增大 D_2 、 n 和 β_2 时, 能使 h_{t_h} 增大。

利用进出口速度三角形, 可得

$$w_2^2 = u_2^2 + c_2^2 - 2u_2 c_2 \cos \alpha_2 = u_2^2 + c_2^2 - 2u_2 c_{2u}$$

$$w_1^2 = u_1^2 + c_1^2 - 2u_1 c_1 \cos \alpha_1 = u_1^2 + c_1^2 - 2u_1 c_{1u}$$

或

$$u_2 c_{2u} = \frac{1}{2} (u_2^2 + c_2^2 - w_2^2)$$

$$u_1 c_{1u} = \frac{1}{2} (u_1^2 + c_1^2 - w_1^2)$$

将上式代入(1-4)式得

$$h_{t_h} = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2g} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2g} \quad (1-6)$$

式(1-6)是欧拉方程式的又一表达形式。它有清晰的物理概念。式中第一项相当于气体在径向封闭的旋转叶轮流道内因离心力所产生的静压能提高。这静压能的提高是与圆周速度的平方差成正比。

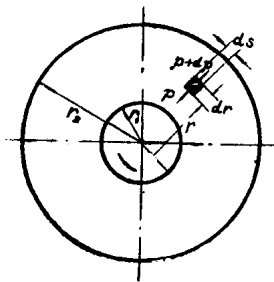


图 1-4 离心力作用产生压力梯度说明图

我们看图 1-4, 取气体基元质量

$$dm = \frac{\gamma}{g} b ds dr$$

式中 b —— 叶轮宽度;

ds —— 基元弧度;

dr —— 基元半径长度。

此质量的离心力为

$$dR = \frac{\gamma}{g} r \omega^2 b ds dr$$

该离心力应被径向压力差所平衡

$$dR = b ds dp$$

由 r_1 积分至 r_2 , 并忽略比重变化

$$\Delta p = \int_{r_1}^{r_2} dp = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\gamma}{g} r \omega^2 dr = \frac{\gamma}{g} \omega^2 \left(\frac{r_2^2 - r_1^2}{2} \right) = \frac{\gamma}{2g} (u_2^2 - u_1^2)$$

或

$$\frac{\Delta p}{\gamma} = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g}$$

式(1-6)中的第二项是由于叶轮流道横截面积的变化而使气体的静压能提高。因为叶轮流道的横截面积是由进口到出口增加的, 故气流的相对速度减小; 式(1-6)中的第三项是叶轮中动能的增加, 这个动能可在随后的固定元件中转变为静压能。

从公式(1-5)看出, h_{t_h} 是由叶轮出口气流圆周分速度 c_{2u} 和叶轮外缘的圆周速度 u_2 的