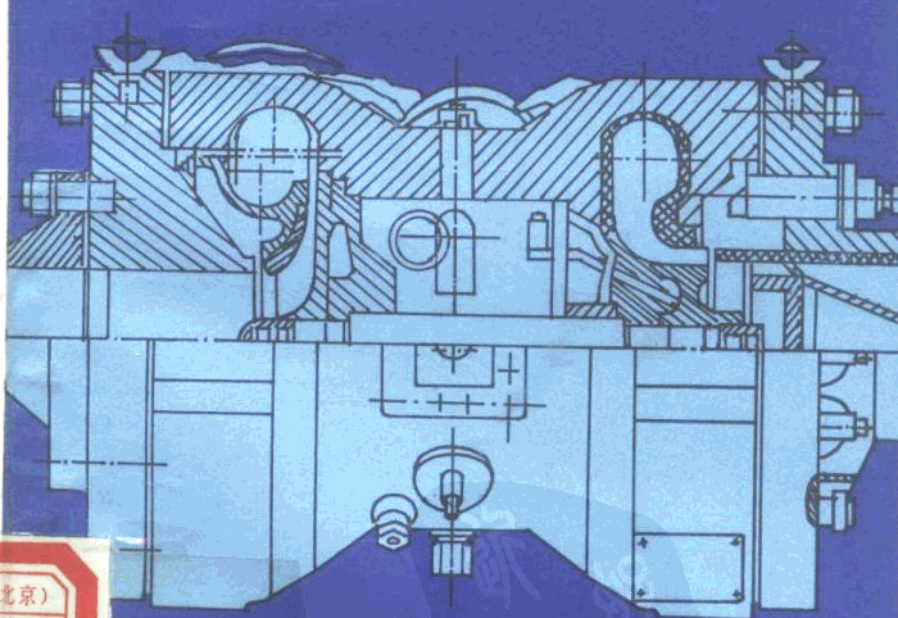


册

天然气涡轮膨胀机

袁修干 编



北京)

石油工业出版社

前 言

天然气加工中采用涡轮膨胀机，具有流程简单、设备数量少、操作简单、维护费用低、对原料气及产品组分的变化适应性强、公用设施少、投资低、占地面积小以及运用率高等一系列的优点。因此，它目前已成为天然气加工业的主要液化方法。近十几年来，美国和苏联的天然气加工装置中，广泛采用涡轮膨胀机。在加拿大、阿尔及利亚、墨西哥、委内瑞拉、澳大利亚、印尼以及我国的天然气加工中，也相继广泛使用涡轮膨胀机制冷装置。

为了适应天然气加工业的发展及进一步改善涡轮膨胀机组的技术经济指标，需发展改进机组的结构及提高机组的效率、扩大机组的有效工作范围和提高其工作可靠性。这些问题受到了生产研制部门的关切和重视。

为了在天然气加工中推广使用涡轮膨胀机制冷装置，1984年3月石油工业部辽河油田管理局主办了“涡轮膨胀机原理及在天然气加工中的应用”专题讲座。我为此作了课程讲授并编写了教材。讲座结束后，来自各油田参加讲座的同志和石油部有关同志，希望将“涡轮膨胀机原理及在天然气加工中应用”教材补充内容后正式出版。这是编者出版此书作为抛砖引玉的缘故。

全书共分五章。第一章是天然气涡轮膨胀机构造，是了解天然气涡轮膨胀机工作原理构造特点、使用维护所必需的。第二章是涡轮机械的流体力学及热力学基础知识，它是掌握涡轮机和压气机的工作原理、主要性能参数计算、试验结果分析所应具备的基本理论知识。第三章是径向涡轮原理。第四章是离心式压气机原理。这两章中分别着重讨论了气流流经涡轮机和压气机的参数变化规律，效率、流量及压力比等性能参数的影响因素，数字计

算方法及试验方法，为有关的工程设计计算提供了相应的条件。第五章是涡轮压气机的共同工作及焓特性，它提供了涡轮压气机共同工作的基本条件和估算方法，同时对涡轮和压气机的焓效率和有关焓特性作了简要介绍，可作为今后涡轮膨胀装置使用焓分析的入门知识。

在本书的编写过程中，航空工业部有关部门的杨燕生、王启珍、郑邦助、贾友祥、徐长发、黄溪水、雷良韦、饶治宗、杨全福、陈元先等同志，以及石油工业部有关部门的万芳林、黄嘉麟、朱天昇等同志，积极为本书提供技术资料和他们本人的工作成果等，使本书能以顺利完稿，在此表示感谢。

因编者水平所限，书中的错误和缺点在所难免，请读者批评指正。

编者 1987年6月

目 录

前 言

第一章 天然气涡轮膨胀机构造	(1)
第一节 涡轮膨胀机在制冷工程中的应用	(1)
第二节 涡轮膨胀机类型	(6)
一、轴流式涡轮机械	(6)
二、径流式涡轮机械	(7)
三、涡轮风扇式机械	(10)
四、涡轮压气机式机械	(10)
第三节 涡轮膨胀机典型结构	(11)
第四节 涡轮膨胀机构造的几个问题	(17)
一、天然气涡轮膨胀机构造演变的主要影响因素	(17)
二、转子平衡	(19)
三、转子临界转速	(24)
四、轴承载荷及轴向力平衡	(30)
五、气流中液滴及固体微粒的处理	(34)
六、轴承型式、润滑冷却及密封	(35)
七、气体轴承	(39)
第二章 涡轮机械的流体力学及热力学基础知识	(42)
第一节 基本定义及定律	(42)
一、系统	(42)
二、闭口和开口系统	(42)
三、状态、状态参数及能量	(42)
四、焓与熵	(43)
五、热力学第一定律和第二定律	(44)
六、等熵过程和多变过程	(46)
七、非流动过程和容积功	(46)
八、流动过程和技术功	(47)
九、气动函数	(48)

第二节	实际气体	(50)
一、	实际气体状态方程	(50)
二、	实际气体热力过程	(53)
三、	实际气体的膨胀功和压缩功	(63)
四、	实际气体音速	(64)
第三节	连续方程	(64)
第四节	欧拉方程	(66)
一、	欧拉方程的推导	(66)
二、	欧拉第二方程	(69)
第五节	一元稳定流能量方程	(71)
一、	一元稳定流能量方程的建立	(71)
二、	应用举例	(74)
第六节	相对坐标系的一元稳流能量方程	(76)
第七节	机械能形式的能量方程(伯努利方程)	(78)
第八节	气流在喷管中的流动	(80)
一、	喷管截面积变化规律	(80)
二、	气体在喷管中的等熵流动	(84)
三、	气体在喷管中的实际流动	(89)
四、	气体在喷管斜切口内的流动	(92)
五、	喷管效率	(93)
第九节	气流在扩压器中的流动	(94)
一、	扩压流动	(94)
二、	扩压器效率	(95)
第十节	涡轮效率定义	(97)
第十一节	压气机效率定义	(101)
第三章	径向涡轮原理	(104)
第一节	工作过程分析	(104)
第二节	涡轮反力度	(110)
第三节	蜗壳及喷管环	(113)
一、	蜗壳	(113)
二、	喷管环	(113)
第四节	涡轮叶轮	(117)
一、	气体在叶轮中流动	(117)

二、	叶轮功及叶轮中能量损失	(119)
三、	叶轮出口气流参数	(120)
第五节	涡轮效率	(121)
一、	轮周效率 η_u	(121)
二、	涡轮内效率 η_i	(122)
三、	涡轮有效效率 η_e	(127)
四、	反力式径向涡轮效率预测	(127)
第六节	速比及轮周效率方程	(129)
第七节	轮周效率影响因素及涡轮比转速	(131)
一、	轮周效率影响因素	(131)
二、	涡轮比转速	(132)
第八节	涡轮特性曲线	(135)
一、	涡轮效率特性	(136)
二、	涡轮流量特性	(137)
三、	涡轮转速特性	(140)
四、	涡轮通用性能图	(140)
第九节	两相工质在涡轮机中膨胀	(142)
一、	引言	(142)
二、	油田气涡轮机降温过程	(143)
三、	气液两相涡轮效率估算	(144)
四、	油田气涡轮机计算举例	(149)
第四章	离心式压气机原理	(156)
第一节	压气机的工作过程	(156)
第二节	压气机效率	(159)
一、	多变效率	(159)
二、	等熵效率	(161)
第三节	气体在进气管中的流动	(161)
第四节	气体在叶轮中的流动	(162)
一、	气流流入叶轮	(163)
二、	气流在叶轮通道中流动	(164)
三、	功率系数	(165)
四、	叶轮功	(168)
五、	叶轮的实际耗功	(170)

六、	叶轮出口气流参数	(171)
第五节	气体在扩压器中的流动	(172)
一、	无叶扩压器	(172)
二、	叶片式扩压器	(174)
第六节	蜗壳	(177)
第七节	离心式压气机特性曲线	(179)
一、	特性曲线的表示	(179)
二、	压气机特性曲线的分析	(183)
三、	离心式压气机的喘振	(185)
四、	离心式压气机的通用特性	(189)
第五章	涡轮压气机的共同工作及焓特性	(193)
第一节	升压式涡轮压气机共同工作	(193)
第二节	涡轮和压气机的焓特性	(196)
一、	焓的基本概念	(196)
二、	焓平衡方程式	(198)
三、	膨胀及压缩过程焓参数在温熵图上的表示	(200)
四、	焓效率	(202)
附录A	主要单位换算表	(205)
附录B	理想气体在喷管中的实际流动	(211)
参考文献		(214)

第一章 天然气涡轮膨胀机构造

第一节 涡轮膨胀机在制冷

工程中的应用

涡轮膨胀机的发展历史应从公元前人们使用水轮机械算起。所以，它距今的历史已相当悠久了。但是引入“turbine”（涡轮，透平）这一词汇却始于1822年，这是由法国的Claude Burdin引自拉丁文“turbo”和“turbinis”。

提出涡轮膨胀机作为制冷机械的设想，大约已有近140多年时间。早在1844年，法国的克雷姆和杰热尔就发表了以空气为工质的涡轮膨胀机用于制冷工程的设想。将涡轮膨胀机用于空气调节工程的实际工作，大约始于1927年。1930年有南非某矿井的空气调节系统采用了空气涡轮膨胀机制冷的报导。该涡轮膨胀机是由西德林德公司制造的。从19世纪至今，涡轮膨胀机的性能、结构及其工业应用，都已取得了很大的发展。

涡轮膨胀机在制冷及低温工程中的主要应用有：

- (1) 空气调节系统；
- (2) 低温环境试验及工艺过程的快速冷却；
- (3) 气体液化及低温分离装置。

涡轮膨胀机在空气调节系统中的应用有：飞机空气调节系统及矿井空气调节系统等。涡轮膨胀机制冷在飞机空气调节系统中的应用大约始于1939年，并在现代飞机的空气调节系统中得到广泛应用。图1-1为涡轮膨胀机在飞机空调制冷系统中的应用举例。来自座舱增压气源的压缩空气，先流过初级热交换器HE1并放出压缩热；然后流过由涡轮机驱动的同轴压气机进一步压缩并流过次级热交换器HE2排出该压缩热，最后流入涡轮机膨胀降温而获得空调用的冷气流。图示涡轮膨胀机，通称为升压式涡轮膨胀

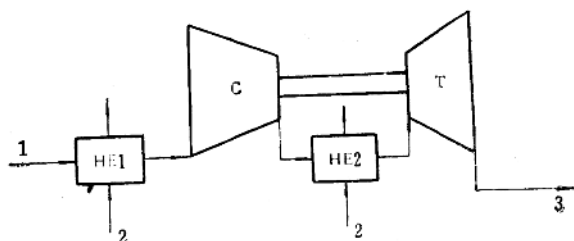


图 1-1 涡轮膨胀机在飞机空调制冷系统中的应用

C—压气机；T—涡轮机；HE1—初级热交换器，
HE2—次级热交换器；1—来自座舱增压气源空
气；2—热交换器的冷却气流；3—通向飞机座舱

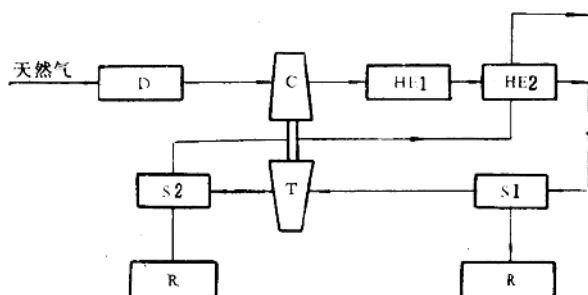


图 1-2 涡轮膨胀机在轻烃回收装置中的应用

D—干燥塔；C—压气机；HE1—空冷散热器，
HE2—回冷热交换器（冷箱）；S1—一级分离
器；S2—二级分离器；T—涡轮机；R—储液罐

机，其主要特点为：涡轮机驱动一同轴的压气机；流过涡轮机的气流，同时流过该同轴压气机，以提高气流在涡轮机的入口压力。

对于高温高湿条件、开采复杂并要求有防爆条件的场合，例如矿井作业，可以采用涡轮膨胀机制冷的空气调节系统。

在天然气加工、氢和氮的液化以及空气低温分离装置中，涡轮膨胀机制冷技术得到了广泛的应用。

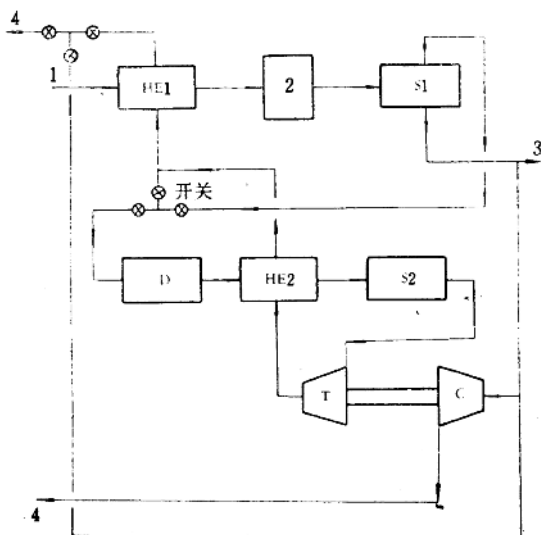


图 1-3 涡轮膨胀机在轻烃回收装置中的应用

1—经增压分离后的天然气； 2—氮制冷装置；
3—通向脱乙烷塔； 4—干气； C—压气机；
D—干燥器； T—涡轮机； HE1—贫富气热交换器；
HE2—回冷热交换器（冷箱）； S1—一级分离器； S2—二级分离器

表 1-1 油田气涡轮膨胀制冷轻烃回收装置规格表

序 号	型 号	系 统 型 式	配套膨胀 机型号	处理量 (万标米 ³ /天)	装置进口 压力 MPa	装置出口 压力 MPa	装置进口 温度 (°C)	膨胀机出口 温度 (°C)	使用单位	投 产 日 期	备 注
1	SE102	正升压	FW904	5	0.31	0.15	30	≤-40	中原文一联	81.7.	
2	SE103	正升压	FW904A	5	0.25	0.15	40	≤-20	杏北二 大庆南二	82.7.	脱水装置
3	SE104	逆升压	FW906	3.0	2.4	0.15	40	≤-20	大庆南亚		脱水装置
4	SE104A	逆升压	FW906A	6	0.44	2.0	40	≤-20	大庆中区	83.5.	脱水装置
5	SE105	正升压	FW906A	8	0.31	0.15	30	-40~-50	中原濮一联	82.12.	
6	SE106	正升压	FW906A	20	0.3	0.11	30	-40~-70	大港	83.7.	
7	SE107	逆升压	FW907 FW907A	3.5~7	2.0	0.39	-36	-85	华北任丘		机组
8	SE108	逆升压	FW908	120	1.42	1.0	-20~-24	-40	大港		机组
9	SE109	逆升压	FW907A	5	1.86	0.59	-15~-17	-70~-75	南阳江河 液化工厂	83.10.	

10	SE110	正升压	FW909C	10	0.56	0.25	40	<-35	大庆七厂	
11	SE111	逆升压	FW909	7~8	0.79	0.25	30	-40~-50	胜利	84.
12	PYZ112	逆升压	FW909C	10	0.69	0.25~0.3	30	-50~-80	辽河原一联	84.
13	PYZ113	逆升压	FW909D	20	0.69	0.25~0.3	30	-50~-80	辽河	84.
14	PYZ114	逆升压	FW909B	6	0.69	0.25~0.3	30	-50~-80	辽河	
15	PYZ115	正升压	FW909A	20	1.6	0.5	-59	<-90	大庆	机组
16	PYZ116	正升压	FW906A	5	0.3	0.15	30	-30~-50	中原文二联	84.
17	PYZ118	正升压	FW906A	16	0.62~0.54		42~44	<-40	大港	84. 机组
18	PYZ119	逆升压	FW907C	4.2~1.6	1.7	0.15	5~-20	-75	江苏油田	85.
19	PYZ120	正升压	FW912 FW909E	80	1.6	0.4~0.5	30	<-50	中原油田 柳屯	85.
20	SE105改	正升压	FW909	16	0.5	0.15	30	<-60	中原油田	84.

第一台用于天然气加工的涡轮膨胀机，大约是在1964年投产的。这是由美国的Fluor公司为美国的San Antonio工厂设计建造的。图1-2所示是航空工业部609研究所为濮阳油田设计建造的我国第一台通过鉴定的轻烃回收装置。图1-3示装置，是609研究所为南阳油田设计建造的中压轻烃回收装置流程图。表1-1为609研究所为我国有关油田设计建造的轻烃回收装置系列及其性能数据。目前，我国其它生产厂也相继为油田设计建造了一些性能良好的轻烃回收装置。

第二节 涡轮膨胀机类型

涡轮机、压气机和风扇皆属于涡轮机械。涡轮机械分动力式及容积式两大类，本书只讨论动力式涡轮机械。动力式涡轮机械是依靠转子的作用，以改变流过涡轮机械流体的能量大小。

涡轮机把流过流体的能量转变为机械功输出，所以它是产生动力（机械功）的装置。例如，蒸汽涡轮、燃气涡轮、风力涡轮以及制冷用涡轮机等等。涡轮机的输出轴功率，是由减小流过涡轮机流体的压头和能量大小而获得的。涡轮机必须配有吸收涡轮轴功率的耗功装置。根据使用要求的不同，耗功装置可以是压气机、风扇、发电机以及泵等等。

压气机、风扇和泵，是提高通过流体能量（压力、压头、温度等等）的装置。它们的驱动力可以是涡轮机和电动机等等。

涡轮膨胀机具有不同的分类方法。按照流体在涡轮机叶轮中流动特点的不同，可以分为轴流式涡轮机械和径流式涡轮机械两类；按照涡轮负载特点的不同，可分为涡轮风扇式及涡轮压气机式两类。根据不同的需要，还可以采用其它的分类方法。

一、轴流式涡轮机械

天然气涡轮膨胀机可采用轴流式涡轮机设计方案，例如苏联油田气轻烃回收装置，较多使用轴流式涡轮膨胀机。消耗涡轮功的压气机，一般不采用轴流式压气机。

图1-4为轴流式涡轮机原理图。气流从蜗壳引入喷管(嘴)环通道,然后流经叶轮转子通道流出。在轴流式涡轮中,通道中气流速度的径向分速及其变化是很小的。所以,气流主要是沿轴向,即沿与转轴平行方向流动。故通称为轴流式涡轮机。

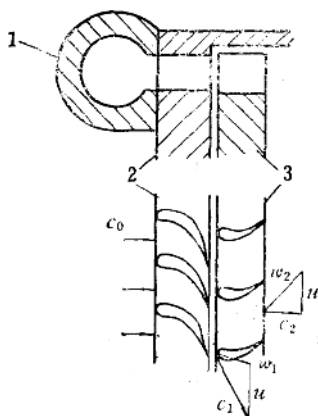


图 1-4 轴流式涡轮机

- 1—蜗壳; 2—喷管环;
3—叶轮; u —叶轮圆周速度;
 c_0 —喷管环入口气流速度;
 c_1 —喷管环出口气流速度;
 c_2 —叶轮出口气流绝对速度;
 w_1 —叶轮入口气流相对速度;
 w_2 —叶轮出口气流相对速度

轴流式涡轮机的主要优点有: 适用于大流量; 气流在通道中流程短、转弯平缓, 所以流动损失小, 并具有较高的效率。轴流式涡轮机的主要缺点是叶型制造工艺比较复杂。

苏联乌克兰天然气科学研究所, 于1967年研制的T-3型天然气涡轮膨胀机, 采用了轴流式涡轮机, 其天然气流量可达 $122000 \sim 165000 \text{ Nm}^3/\text{h}$, 功率为 $269 \sim 817 \text{ kW}$ 。在此基础上, 发展了轴流式天然气涡轮膨胀机系列。欧美国家的天然气涡轮膨胀机, 几乎都不采用轴流

式涡轮机的设计方案。

二、径流式涡轮机械

在径流式涡轮机械中, 气体主要是沿垂直于转轴的半径方向流动, 故称为径流式涡轮机械。

径流式涡轮机械, 可分为向心式和离心式两类。向心式的气体沿叶轮外径径向流入叶轮, 朝轴心方向流动; 离心式的气体由叶轮轴心向叶轮外径方向流动。压气机和风扇, 因它们是用来提

高通过流体的压力和能量，故采用离心式。图1-5为离心式压气机的示意图。气流从压气机入口流入叶轮。气流流过叶轮通道时，叶轮将其输入轴功加给气流，使通过气流的能量和压力提高。然后，气流经扩压器把大部分动能转变为压力能后，再由集气蜗壳流出。

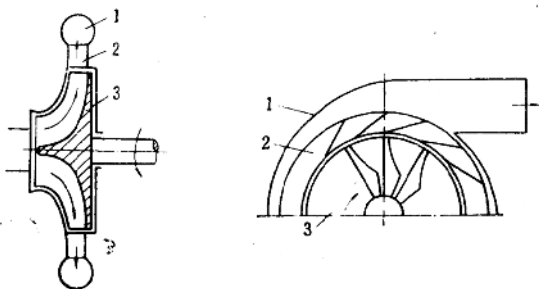


图1-5 离心式压气机示意图

1—蜗壳；2—扩压器；3—叶轮

由于向心涡轮可比离心涡轮获得更多的叶轮功并具有较小的流动损失，因此一般都采用向心式径流涡轮。图1-6为向心径流式涡轮机原理图。高压气流流入蜗壳，并由蜗壳均匀地引入喷管环。由喷管环流出的高速气流驱动叶轮旋转，将气流的能量转换为机械功由叶轮转轴输出。由于气流膨胀做功，使离开叶轮的气流成为低温低压状态。图1-6示向心径流式涡轮机，气流由径向流入叶轮并由叶轮通道转变为轴向流出，通称为径轴式向心径流涡轮。当叶轮出口没有使气流转为轴向流出的叶轮通道部分时，则称为纯径式向心径流涡轮。图1-7为纯径式向心径流涡轮示图。径轴式向心径流涡轮与纯径式向心径流涡轮相比较，其主要优点为效率高，但结构紧凑性比纯径式差。

向心式径流涡轮机与轴流式涡轮机相比较，其主要特点和区别有：

(1) 向心径流式涡轮机适用于较小流量及较小功率，而轴流式涡轮机适用于较大流量及较大功率情况。

(2) 向心径流式涡轮机的气流流道比轴流式涡轮机的长，而且气流转弯的剧烈程度也较大。所以，向心径流式涡轮的气流流动损失比轴流式涡轮的大，效率比轴流式涡轮的也要低一些。

(3) 由于向心径流式涡轮的叶轮具有较高的承载能力，所以与轴流式涡轮相比，向心径流式涡轮叶轮允许有较高的圆周速度。

(4) 向心径流式涡轮的离心力有助于将流体能量转化为机械功。因此在相同轮级数时，向心径流式涡轮可比轴流式涡轮承受更高的膨胀比。

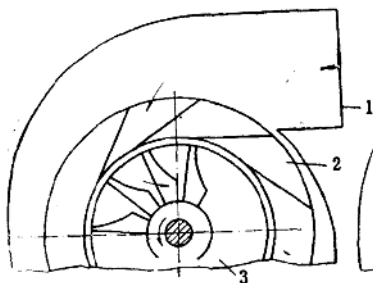


图 1-6 向心径流式涡轮机
(径轴式)

1—蜗壳； 2—喷管环； 3—叶轮

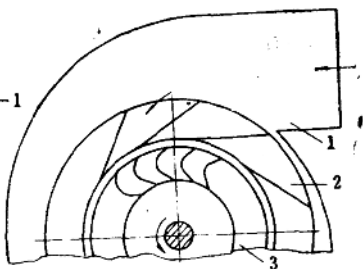


图 1-7 向心径流式涡轮机
(纯径式)

1—蜗壳； 2—喷管环； 3—叶轮

(5) 向心径流式涡轮叶轮的工艺性比轴流式涡轮的好。

从以上比较可知，由于向心径流式涡轮具有单级轮级允许膨胀比大（焓降高）、工艺性好、结构简单、紧凑、重量轻以及效率较高等特点，所以它在小流量、小功率涡轮机中得到了广泛应用。例如，低温涡轮膨胀机、飞机空调中的涡轮冷却器、动力涡轮以及涡轮增压器等等，一般均采用向心径流式涡轮。

天然气涡轮膨胀机，多采用向心径流式涡轮。Rotoflow公司是美国天然气涡轮膨胀机的著名生产厂家。该公司的产品一般均采用向心径流式涡轮以及离心式压气机的设计方案。单级向心径流式天然气涡轮的常用工作参数范围为：

功率: 75~1492 kW

涡轮入口压力: 4.9~9.8MPa (50~100kg/cm²);

涡轮出口压力: 1.5~4.9MPa (15~50kg/cm²);

效率: 84~86%;

涡轮膨胀比: 2~4。

向心径流式涡轮的轮级数, 常采用单级, 也有采用2级, 但很少采用3级或3级以上的设计方案。

三、涡轮风扇式机械

风扇作为吸收涡轮功的负载, 称之为涡轮风扇式机械。风扇可以采用离心风扇或轴流风扇。

图1-8是以离心风扇作为制动式负载的涡轮膨胀机。风扇抽吸大气空气, 只起消耗涡轮功的作用。由于制动式负载没有有效利用涡轮功, 目前已很少采用这种设计方案。

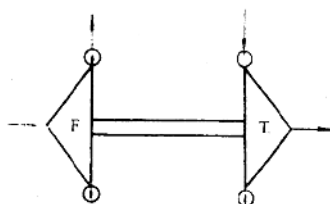


图1-8 离心风扇作为制动式
负载的涡轮膨胀机

T—涡轮; F—离心风扇

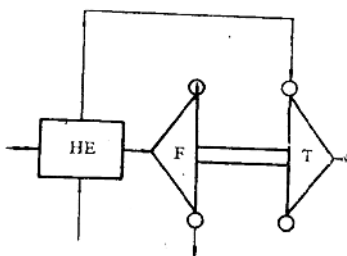


图1-9 通风冷却风扇式
涡轮膨胀机

F—风扇; T—涡轮; HE—热交换器

图1-9所示的涡轮风扇式机械, 其离心风扇既作为制动式负载, 同时又对热交换器提供通风冷却空气。风扇抽吸的环境气流过热交换器, 使流入涡轮机前的气流得到冷却。风扇可以采用离心风扇或轴流风扇。

四、涡轮压气机式机械

压气机作为吸收涡轮功的负载者, 称之为涡轮压气机式机