

# 节能型向心式蒸汽轮机

## —热电联产工程系列报告之一

虞洪庆 叶兆谷 强国芳

(哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所无锡分部)

〔摘要〕从热电联产工程角度出发,全面介绍了新研制的节能型向心式蒸汽轮机的原理、性能、结构、布置,并分析其经济性和可靠性。

关键词 向心式涡轮机 经济性 可靠性

### 1 前言

随着工业生产的发展,动力和环境工作者正面临着两个新的问题,一是能源消耗的增加及随之而来的价格上涨;二是环境污染日趋严重。不管是工业先进国家也好,发展中国家也好,都在致力于节能和降低环境污染。我国能源部近年来也一再重申,积极发展热电联产和集中供热是节约能源、减轻环境污染的重要途径。凡供热容量在 $10\sim 20t/h$ 以上、有稳定热负荷、年利用小时在4000小时以上的企业和单位,都要安排热电联产。可以说,热电联产是热能动力工程领域中一个新的长期的发展方向和方针。

两年前,我们开始摸索国内石油、化工、化肥、制药、制糖、造纸、纺织、印染、橡胶、木材加工领域以及发酵、烹调等食品工业中实行联产的问题。我们发现,自八十年代初期以来,向心式汽轮机似乎是异军突起。由于它具有高效、紧凑、简单、可靠等优点,已迅速地在国外上述行业中找到了广阔的用武之地。

本文是小热电工程系列报告之一,全面

介绍新研制的节能型向心式汽轮机的原理、性能、结构、布置,并对这类小汽轮机发电机组的经济性和可靠性作简明的分析。

### 2 原理和性能

向心透平的原理是人所共知的,它是径流透平的一种,其工质流向恰与离心压机相反。由图1可知,工质从外径处沿径向进入静子(或进气无叶蜗壳),而在内径处沿轴向离开转子(轮盘)。

可以看出,与轴流透平相比,两者的通流部分有以下主要差别:

1. 级数 轴流透平的级数可以很多,而向心透平则通常只有1~2级;
2. 叶片的展弦比 轴流透平的 $l/b$ 通常为1~8之间,而向心式则仅为0.1~0.5。即向心透平转子叶片通道是既窄又长;
3. 透平外径 轴流透平的总直径比转子直径大出不多,向心式的则大出很多。

正因为工质从外径向轮毂,流线的径向位置不断变化( $r$ 减小),故向心透平的流动过程与轴流式的有相当大的区别。

从量能方程式(1)可知,单位重量工

收稿日期:1991-04-16 收二稿:1991-05-30

本文联系人 虞洪庆 无锡 117信箱 214151

质所输出的功比轴流式透平增加了  $\frac{1}{2gJ} (u_1^2$

$-u_2^2)$  一项:

$$L_u = \frac{1}{2gJ} [(C_1^2 - C_2^2) - (W_1^2 - W_2^2) + (u_1^2 - u_2^2)] \quad (1)$$

或者说, 在总焓降和作功量相同的情况下, 向心透平转子中工质的相对速度  $W_1$  和  $W_2$  比较低, 使得其中的流动损失小出许多, 这就是向心透平效率较高的一个原因。或者也可以这样说, 向心透平的一大优点是可以利用较大的焓降。图 1 亦示有进出口速度三角形和焓焓图上表示的工作过程。

向心透平(涡轮)在航空和导弹辅助动力系统、柴油机增压器废气涡轮及其它如制冷、天然气液化等动力系统中早有应用, 其效率高、结构紧凑、制造简便、工作可靠等优点是明显的。

至于向心式蒸汽轮机, 问世以来也有三十多年了, 但直到七十年代末期, 其应用并不广泛。究其原因, 主要是七十年代末期以前能源价格相对比较便宜, 对环境污染的治理也没有现在这样强调, 而且那时的材料和工艺条件也没有现在这样更能满足高转速向心叶轮和高传动比齿轮的要求。

根据一般分析, 在同样的进汽量和初、终参数下, 向心式汽轮机与轴流式相比, 输出功率约大出(15~50)%; 在同等功率下, 机组效率可从轴流式的(30~60)%提高到(62~77)% (最高达80%)。向心式汽轮机效率高的主要原因还有: 由于采用了高转速(通常为20 000~46 000r/min), 使速比达到了最佳, 随着转速的提高, 通流部分的高度增加了, 而且可以全周进汽, 这样, 轮阻鼓风损失, 端部二次流损失及漏汽损失也都降低了。与此相反, 轴流式小汽轮机因加工能力小而常常不得不采用双列复速级, 从而导致了很低的效率。向心式汽轮机对于在生产工艺过程中所使用的低压和低过热温度蒸汽(其流量也不大)来说, 其吸引力便更明显了。

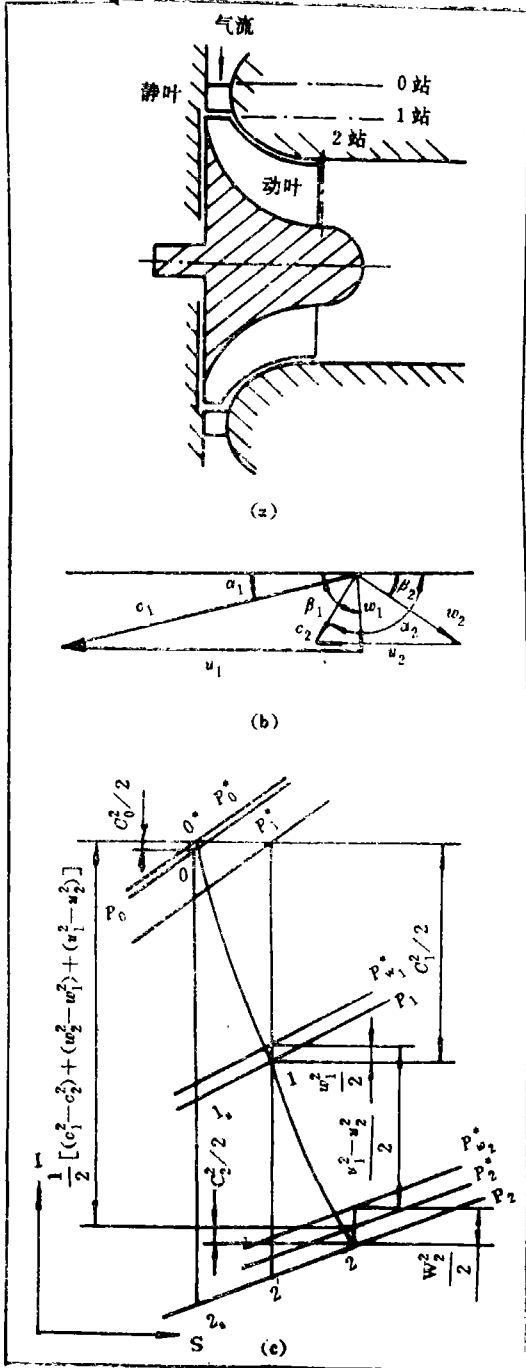


图 1 向心式汽轮机横剖面图 (a)  
速度三角形图 (b)  
焓焓图 (c)

目前国际上商业应用的向心式汽轮机,功率通常在300~3 000kW之间,个别有做到5 000 kW的。转速最高可达20 000~46 000 r/min,蒸汽初参数最高约6.4 MPa和450℃,背压则常在0.12~1.6 MPa之间变化。

与国内用户安装使用最多10t/h的工业锅炉相配,德国Kühnle Kopp & Kausch(简称KKK)公司生产有CFR系列向心式蒸汽轮机,它们的有关数据如表1所示。

表1 德国KKK公司的向心式蒸汽轮机  
(流量10t/h)

参数	单位	CFR5 G4	CFR5 G4	CFR5 G3	CFR5 G3
进汽量	t/h	10	10	10	10
初压	MPa	1.275	1.275	1.275	1.275
初温	℃	280	280	280	280
功率	kW	810	660	520	400
背压	MPa	0.12	0.2	0.3	0.4
排汽温度	℃	105	147	164	186
重量(连发电机)	t	7.0	6.8	5.7	5.5
总长度	m	3.7	3.7	3.7	3.7
工厂交货期	月	11	11	11	11
中国海港 CIF价格	万马克	51.5	50.4	48.3	46.2

### 3 结构和布置

我们新研制的XQ系列高效节能型向心式汽轮机有B0.4-13/5、B0.8-13/5和B0.25-13/5三种型号,其中B0.4-13/5型400kW向心式汽轮机与无锡工业锅炉厂的SHL 10-1.275/300型10t/h快装式锅炉配套。其主要参数示于表2。

如图2所示,汽轮机是双级向心式的,分别外悬在减速齿轮箱的两端,蒸汽的流向使两个叶轮上的轴向力方向相反,以求局部抵销。汽轮机本体与减速齿轮箱安置在公共的底盘油箱上。自主蒸汽管道来的蒸汽经主汽阀和调节阀后进入第一级进汽无叶蜗壳,然后依次在向心叶轮中膨胀做功,最终由第

表2 XQ系列B0.4-13/5向心式汽轮机

参数	单位	XQ B0.4-13/5
进汽压力(绝对)	MPa	1.275(13ata)
进汽温度	℃	300
排汽压力(绝对)	MPa	0.49(5ata)
排汽温度	℃	210
汽轮机转速	r/min	25 000
齿轮箱输出轴转速	r/min	3 000
总重量(不包括发电机)	t	5
总尺寸(连发电机)	m	3.4×2.5×2.2

二级排出到蒸汽分配器供生产过程利用。调节部分是采用全液压式调节系统,分别配有调速器和调压器装置,以满足用户按电负荷和热负荷运行的要求。为了确保机组的安全可靠运行,汽轮机的保安系统设有危急遮断器、轴向位移控制器、磁力断路油门等装置。这些,与一般汽轮机是相似的。可以看

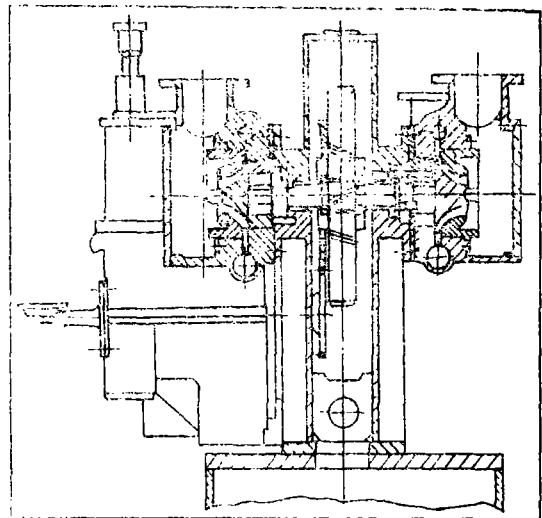


图2 向心式汽轮机纵剖面图

出,这样的布置使得向心式汽轮发电机组的轴向长度大大缩短了(不包括发电机时只有1.7 m)

齿轮箱的减速比为8.33,采取平行轴齿轮单级卧式布置。为降低成本,我们用双圆弧齿形来代替硬齿面渐开线齿轮。减速箱的设计允许长期连续工作,并自带润滑、密封

和调节系统，设计中采取一切措施确保低噪声和高效率。

整个汽轮机本体（包括进汽和排汽蜗壳在内）用螺栓固定在减速器壳体的两侧。高速转子采用高速轻载摆块式滑动轴承，剩余的轴向力是通过小齿轮两侧的承力环传递到低速轴，由其上的止推轴承吸收。这样的整体快装式布置具有机械损失小、占地面积少、安装周期短等优点。

图3示有XQ系列 B0.4—13/5 向心式汽轮发电机组的外形布置。

为了确保整台机组的安全可靠运行，需要我们对其主要部套和关键部件、系统进行精心的设计，包括参数选择、材料选用、设备选型、强度和振动计算、轴向力的平衡、转动件的静平衡和动平衡、汽缸和蜗壳的液压试验、轮盘的超速试验、保安装置的试验……等。此外，在滑油泵和油滤等辅机附件的配置方面也考虑到机组的可维护性和应急能力。

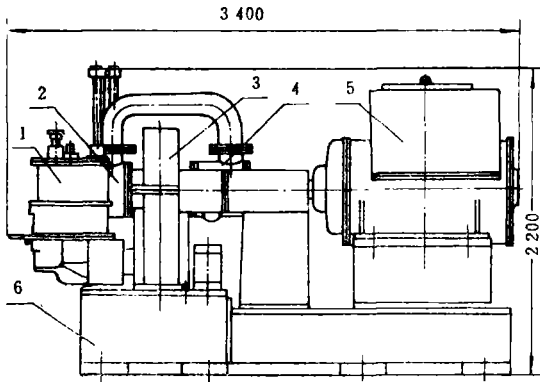


图3 XQ系列B0.4—13/5外形布置图

- 1. 调节系统    2. 第一级汽轮机    3. 减速齿轮箱
- 4. 第二级汽轮机    5. 发电机    6. 底盘油箱

#### 4 与轴流式汽轮机的比较

由于向心式汽轮机被用来进行差压发电以达到热电联产和节能的目的，我们把比较的重点放在经济性和可靠性方面。

表3示有国内几型功率为300~500kW、蒸汽初参数为1.275MPa的轴流式背压汽轮机的性能和尺寸参数。

表3 三型轴流式小汽轮机的参数

参数	单位	广汽厂	广汽厂	东汽厂
型号		B0.3—13/5	B0.5—13/5	B0.45—13/3
额定功率	kW	300	500	450
进汽压力	MPa	1.275	1.275	1.275
进汽温度	°C	320	250	340
排汽压力	MPa	0.49	0.49	0.294
排汽温度	°C	246	180	235
额定汽耗	kg/(kW·h)	28.7	33.84	20.3
额定进汽量	t/h	9.735	16.92	9.0
本体重量	t	4.07	5.1	5.5
外形尺寸	m	2.8×1.9×1.9	2.8×1.9×1.9	2.8×2.2×1.9

把表3的数据与我们研制的XQ系列B0.4—13/5向心式汽轮机的相关参数相比较，可以看出：与广汽厂的B0.3-13/5机组相比，向心式汽轮机的功率大出30%左右，额定汽耗（向心式机组为24.43kg/(kW·h)）低出15%左右。从初温和终温的变化（分别为300°C→210°C和320°C→246°C）也可看出向心式汽轮机的效率要比轴流式的高出不少。根据XQ系列B0.4—13/5机组的热力计算，由于选择了最佳反动度和速比，级的轮周效率可达84%左右，透平轴效率也有75%左右，对小机组来说，这是很理想的。

同样，从东汽厂的B0.45—13/3机组来看，在初温加大40°C、背压降低0.196MPa (2ata)的情况下，功率也只增加了50kW，结论是相似的。

从重量指标来看，似乎向心式汽轮机与轴流式相差不多。这是由于阀门、润滑系统、调节保安系统等不少辅机和附件是基本相似的缘故。但向心机组的重量是包括了油箱和冷油器等在内的，实际上向心式机组还是轻一些。

从外形尺寸来看，在同样不包括发电机

的情况下,向心式汽轮机的轴向长度只有1.7m,要比轴流式机组短出1.1m左右,这是很可观的。当然,在宽度方向,由于阀门和蜗壳的关系、尺寸是有所增大,但总的还是向心式机组来得紧凑。

最后,再比较一下汽轮机的变工况性能。图4示有轴流式双列速度级轮周效率 $\eta_u$ 和带无叶蜗壳向心透平内效率 $\eta_{oi}$ 随速比 $u/c_1$ 的变化特征的比较,无叶蜗壳向心透平的

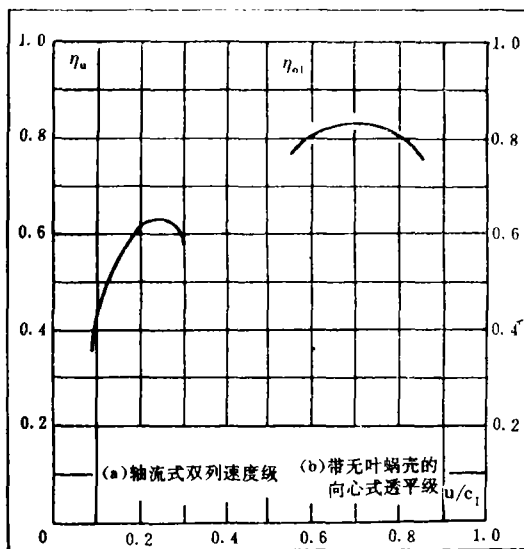


图4 轴流式和向心式透平级变工况性能比较

变工况性能要比双列速度级的轴流式透平好得多。

## 5 结束语

向心式蒸汽轮机对于热电联产工程来说,是一个有吸引力的技术,具有广阔的应用前景。

由哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所无锡分部、东方公司南京公司及南京透平工作者协会共同研制的XQ系列B0.4-13/5向心式汽轮机是国内首创的填补空白的新产品,估计在1992年上半年即可问世。

向心式汽轮机在各种工业领域中的实际使用方案及其技术经济可行性分析,将在系列报告之二中讨论。

这项工作得到了西安交大向一敏教授的支持和指导,本研究所黄瑞芬工程师做了大量细致的计算,陈金宝和方洪祖高工提供了不少有用资料,谨表感谢。

## 参 考 文 献

- 1 李燕生, 陆桂林. 向心透平与离心压气机. 机械工业出版社, 1987
- 2 Glassman A J. Turbine Design and Application. NASA SP-290, 1975
- 3 向一敏, 宋德耀, 闵大伏. 向心式透平无叶蜗壳. 西安交大学报, 1964(3)
- 4 Athearn FH, Burton D C. Cogeneration utilizing high efficiency radiol inflow steam turbines. Turbomachinery International, 1981(6)
- 5 中外小汽轮机样本

## Energy-saving Centripetal Steam Turbine

— One in a Series of Reports on Cogeneration projects

Yu Hongqing, Ye Zhaogu, Qiang Guofang

(Wuxi Branch of Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute)

### Abstract

From the perspective of cogeneration power engineering aspects this paper provides a comprehensive description of the newly developed energy-saving centripetal steam turbine, highlighting its theory, performance and lay-out. In addition, an analysis of its economic operation and reliability is also given.

Key words: centripetal turbine, economic analysis, reliability