

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.04.013

# 低参数大流量单级背压工业汽轮机优化设计

楼上游, 郭一朝, 郑飞逸

(杭州汽轮机股份有限公司, 浙江 杭州 310022)

**摘要:** 针对大结构尺寸汽轮机与有限布置空间以及低能量值的余热蒸汽与给水泵的必要出力问题, 基于经典的透平原理和工程经验, 通过研究分析, 提出了一种在经典单级背压工业小汽轮机基础上, 采用了双分流结构形式的解决方案。采用新设计的工业汽轮机后, 企业的工业余热蒸汽得到了充分利用, 解决了给水泵的动力和系统的回热以及冬天的供水供热等问题。在双分流工业汽轮机新设计中, 对其主要部件的制造工艺性、材料特性与强度、产品通用性等方面, 均给出了合理的解决方案。相对传统经典单级背压工业小汽轮机而言, 在制造成本, 基建成本, 布置空间方面, 具有明显的优越性。研究表明, 产品设计符合产业导向和节能环保理念, 在低品位蒸汽的余热利用以及大流量、小机型工业汽轮机应用领域前景广泛。

**关键词:** 工业汽轮机; 单级背压; 大流量小机型; 双分流; 性能和结构

中图分类号: TH122; TK11\*5 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2015)04-0501-05

## Optimization of larger flow single stage and back pressure industrial steam turbine

LOU Shang-you, GUO Yi-chao, ZHEN Fei-yi

(Hangzhou Steam Turbine Co., Ltd, Hangzhou 310022, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of the large dimensions of a turbine, the limited layout space arises and low heat value of steam, a reasonable scheme was proposed for utilization of waste heat for steel industries. The scheme is based on a structure of double bypass steam to backpressure industrial steam turbine. With the new steam turbine, the exhaust heat could be sufficient exploited, enough power can supplied to the pump. Lower manufacturing cost, lower construction cost and compact space is needed, thermal water could be gained. Additional, the technique of manufacturing including material property and strength had been taken into consideration in this scheme. The results indicate that, this art of backpressure industrial steam turbine might be applied to territory of low grade steam at utilization of waster heat.

**Key words:** industrial steam turbine; single stage and back pressure; larger flow and smaller unit type; double bypass steam; performance and structure.

## 0 引言

工业汽轮机是指工矿企业采用的用于驱动泵、风机、压缩机、热电联产等机械的汽轮机。它可以充分利用企业在生产流程中的低品位的余热蒸汽, 给水泵、压缩机等设备提供动力; 反之, 它也可以选用背压式或抽汽式的工业汽轮机, 将不同压力等级的蒸汽供

给企业的工艺流程使用或者提供给热用户。工业汽轮机在企业内的合理使用, 可以提高企业的热能综合利用和经济效益, 并且有利于环境保护。特别是在钢铁化工行业中, 利用低品位余热蒸汽做工的汽轮机运用非常广泛<sup>[1-3]</sup>。

余热蒸汽最大特点就是低参数、大流量、焓降小, 单位体积的做功能力比较低, 因此利用余热蒸汽的这类汽轮机的结构尺寸会比较大, 总级数少。在余热蒸

汽比较多的企业中,应用比较广泛,例如:东北某钢铁企业的节能技术改造项目,就是一个典型的大流量余热蒸汽利用案例。在该案例中,根据企业提出的具体参数和实际需求,运用汽轮机设计原理,结合相关经验,经过大量的计算、分析、比对等工作后,决定在单级背压汽轮机经典机型的基础上,引入了双分流结构设计。双分流结构是解决低参数、大流量问题的最佳方法之一<sup>[4]</sup>。

针对某钢厂的实际情况,本研究具体叙述该案例的结构优化设计及其优越性。

## 1 大流量低参数工业小汽轮机方案选择

### 1.1 某企业在节能技术改造中提出的具体问题

在该企业的生产工艺流程中,有参数为:压力0.6 MPa,温度170 °C,流量为90 t/h的余热蒸汽。以前的技术是通过减温减压器,把一部分汽源参数改变为压力0.2 MPa,温度120 °C,作为回热系统的工作蒸汽,另一部分直接排入凝汽系统。在冬天,部分蒸汽并入供热用户的管网,如果在夏季,这个汽量用不完,还有不得已排空的情况。因此存在能源的极大浪费和环境污染等问题。企业的技改要求是:取消减温减压器装置,利用这个热源解决3 000 kW给水泵的动力问题,替换原来的电动机。同时,该汽轮机的尾汽作为原回热系统中的工作蒸汽和冬天的用户供热需要。由于要在原安装电动机位置上布置汽轮机,显然,布置空间条件也十分苛刻。为了解决以上难题,本研究首先要经过热力计算设计,然后是整体方案的选择、比较、确定等过程。给水泵的转速是2 950 r/min。

### 1.2 汽轮机热力计算和方案设定

根据透平热力学理论<sup>[5]</sup>,结合以上问题的具体数据,得出必要的计算结果如下。

根据焓熵图得到:

汽轮机的绝热焓降:  $h = 197 \text{ kJ/kg}$ ;

新蒸汽比容:  $V = 0.3256 \text{ m}^3/\text{kg}$ 。

根据焓熵图和计算得到:

汽轮机的有效焓降:  $h_s = 137 \text{ kJ/kg}$ ;

根据企业数据得到:流量为  $G = 25 \text{ kg/s}$ 。

喷嘴出口流速的公式为:

$$c = \sqrt{2h \times 10^3} \quad (1)$$

最大容积流量公式为:

$$G_v = G \times V \quad (2)$$

汽轮机的有效功率公式为:

$$N_e = N_i \times \eta_m \times \eta_g = G \times h_s \times \eta_m \times \eta_g \quad (3)$$

喷嘴临界流量公式为:

$$G_{cr} = 0.647 \mu A_{cr} \sqrt{\frac{p_0}{V}} \quad (4)$$

式中:  $N_e$ —汽轮机的有效功率, kW;  $N_i$ —汽轮机内功率, kW;  $\eta_m$ —机械效率, 设定为0.97;  $\eta_g$ —齿轮箱效率, 设定为0.976;  $G$ —汽轮机的总流量, kg/s;  $h_s$ —汽轮机的有效焓降, kJ/kg;  $h$ —汽轮机的绝热焓降, kJ/kg;  $G_v$ —容积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $V$ —新蒸汽比容,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;  $c$ —喷嘴出口流速;  $G_{cr}$ —喷嘴临界流量;  $p_0$ —新蒸汽压力;  $A_{cr}$ —喷嘴通流面积, 流量系数  $\mu = 0.945$ <sup>[6]</sup>。

结合钢厂实际数据,通过公式(3)计算得到汽轮机有效功率为:

$$N_e = 3\,242 \text{ kW} \quad (5)$$

计算结果表明,用这个余热蒸汽热源的汽轮机,可以拖动该给水泵,替代电动机。此外因为蒸汽具有低焓降和大流量特点,可以初步设定:汽轮机的结构形式为全周进汽、单级背压式冲动式汽轮机。

### 1.3 结构方案的分析选择

基于透平原理和式(2)得出,容积流量:  $G_v = 7.56 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

基于透平原理和式(1)得出,喷嘴出口流速:  $c = 627.8 \text{ m/s}$ ;

基于透平原理和式(4)得出,喷嘴的节圆直径为1 600 mm。

又根据金属材料的强度理论和蒸汽的临界流量理论得出汽轮机的结构参数如表1所示<sup>[7]</sup>。

从表1中看出,动叶叶轮的直径要大于1 600 mm,显然,该尺寸是大于6 000 kW汽轮机的主要外径参数。通常来说,2 000 kW以下汽轮机的喷嘴节圆直径要小于700 mm为佳<sup>[8]</sup>。而且被替代的电动机的位置空间比较小,只能安装常规1 500 kW的汽轮机,具体对比如表2所示。所以,必须要用1 500 kW汽轮机机型来解决3 000 kW的出力问题。另外,就该案例的低

表1 初步方案的汽轮机主要结构参数

喷嘴高/mm	喷嘴宽/mm	喷嘴节距/mm	喷嘴喉部节圆直径/mm	喷嘴节圆直径/mm	动叶节圆直径/mm
27	22	24.8	6.3	1 600	1 601

表2 常规典型汽轮机与电机外形尺寸对照

设备名称	1 500 kW 汽轮机	3 000 kW 汽轮机	6 000 kW 汽轮机	3 000 kW 电动机
外型尺寸(长×宽×高)/mm	2 800×1 300×1 500	3 300×2 500×2 500	3 800×2 900×2 900	3 000×1 300×1 300

参数汽轮机来说,其外形尺寸要比表2还要大很多。

以汽轮机的结构设计经验来说,如果用喷嘴节圆直径大于1 600 mm来设计一个3 000 kW单级背压汽轮机,是很不合理、不经济的,特别在强度和震动方面,尤其会出现问题。

本研究经过进一步核算比较后,确定喷嘴节圆直径定为650 mm,其他结构数据同表1,全周进汽,汽轮机转速为4 500 r/min。该汽轮机的最大流量可以达到45 t,功率可以到达1 621 kW。可以看出,能满足一半出力要求。但是,必须用2台汽轮机给水泵的布置形式。这样,虽然可以解决汽轮机的出力问题,但是会造成投入成本大,管理复杂,最主要的还是安装空间不允许。

因此,本研究决定在常规工业小汽轮机的基础上,尝试采用双分流的机构形式的汽轮机来满足企业的实际要求<sup>[8-9]</sup>。

## 2 双分流大流量单级工业小汽轮机

### 2.1 常规形式的单级背压工业小汽轮机结构

常规形式的单级背压工业小汽轮机如图1所示。

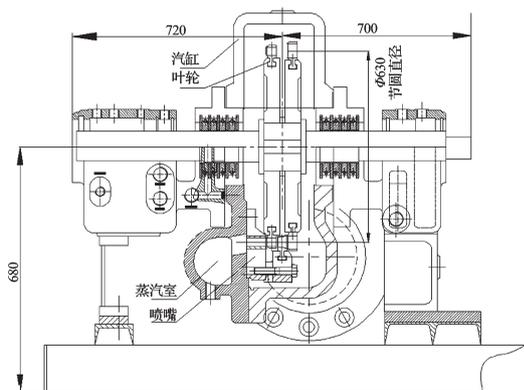


图1 B63-24/5型工业小汽轮机

这是一个比较典型单级被压拖动小汽轮机的机型,其外形尺寸比常规多级1 500 kW汽轮机要略小一些。

B63-24/5的基本参数是:单级,复速级,背压,进汽压力区间为0.5 MPa~3.5 MPa,排汽压力区间为0.102 MPa~0.9 MPa,功率范围为30 kW~900 kW,喷嘴节圆直径为630 mm,转速范围为1 500 r/min~12 000 r/min。最大进汽量为23 t/h,半周进汽。

显然,该机型外形尺寸符合小空间的特殊要求,但是满足不了汽轮机的出力要求,为了解决该问题,笔者决定在该机型的基础上,结合该案例的大流量特

殊要求,采用双分流结构方案重新设计,机型号设定为:SB65-6/2。

### 2.2 双分流单级背压工业小汽轮机主要特点

在B63-24/5机型基础上,重新设计的双分流单级背压工业小汽轮机,其主要结构如图2所示。

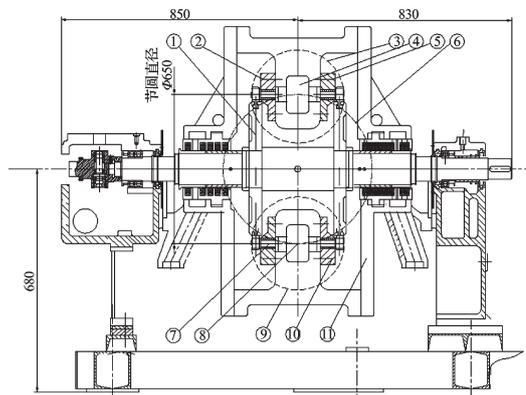


图2 SB65-6/2双分流工业小汽轮机

1—左侧叶轮;2—左侧上喷嘴组;3—上进汽法兰;4—上蒸汽室;5—右侧上喷嘴组;6—排汽法兰;7—左侧下喷嘴组;8—下蒸汽室;9—下进汽法兰;10—右侧下喷嘴组;11—汽缸

其性能参数为:双分流,单级,背压,喷嘴节圆直径为650 mm,全周进汽;进汽压力为0.6 MPa,排汽压力为0.102 MPa~0.2 MPa,排汽温度为108℃~120℃;转速为4 500 r/min,功率为1 300 kW~3 200 kW,最大进汽量为90 t/h<sup>[10-12]</sup>。

为了反映新机型汽轮机与原机型汽轮机区别,本研究给出的主要参数对照表如表3所示。

相对于单级背压工业小汽轮机来说,双分流单级背压工业小汽轮机主要特点如下:

(1) 在B63-24/5型工业小汽轮机结构外形的基础上,保持径向尺寸基本不变,增加轴向尺寸260 mm,把蒸汽室布置在中部,并分上下两室,见图2序号4、8,全周进汽。两进汽法兰分布在背面,上、下布置,见图2序号3、9,分别由两个管道调节阀控制进汽量来得到相应的负荷要求。当负荷小于1 500 kW时,只要开启一个调节阀,半周进汽,从而保证汽轮机的低负荷时具有良好的效率性能。

(2) 做功后的蒸汽经过汽缸的左右两侧,汇合后从正面排汽法兰排出,见图2序号6。

(3) 两叶轮左右对称布置,结构参数完全一致,动叶方向相反。从理论上说,它几乎没有轴向推力,有利于提高汽轮机的整体性能。

表3 新机型汽轮机与原机型汽轮机主要参数对照

机型	外型尺寸/mm	进汽方式	进汽量/t	最大功率/kW
B63-24/5	1 540×1 000×1 200	半周	23	900
SB65-6/2	1 800×1 100×1 300	全周	90	3 400

(4) 汽缸是具有水平中分面,分前、中、后 3 部分,见图 2 序号 11。这个结构一方面保证了汽轮机的性能,又确保它有良好的加工工艺性。中部汽缸部分采用耐高温合金钢材料,材料牌号为 ZG20CrMoA,前后汽缸部分材料牌号为 ZG25A<sup>[13]</sup>。

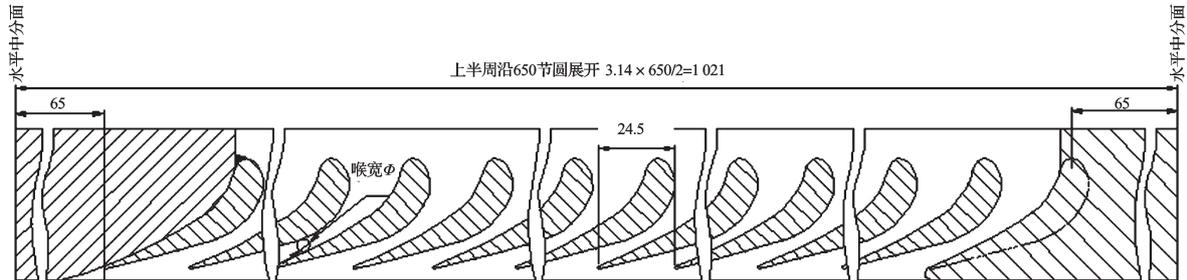


图 3 单个喷嘴组导叶沿节圆展开结构示意图

(6) 汽轮机的进、排汽采用了左、右侧布置,使得汽轮机可以单层布置,从而降低了基建成本。

(7) 采用进汽双分流结构,使得小型汽轮机在增加比较小制造成本的前提下,其出力能力成倍提高,并且,节省了布置空间和基建成本,特别适合各种小空间的特殊场合。

(8) 新设计的 SB65-6/2 型双分流工业小汽轮机外形尺寸:1 800 mm × 1 100 mm × 1 300 mm,可以在原电机基础上布置。

(9) 采用左、右对称设计,很多部件大同小异,通用性比较好,减少了设计制造成本和维护成本。

(10) 汽轮机转速为 4 500 r/min,而泵的转速是 2 950 r/min,所以增加了齿轮箱。

(11) 该方案的一次性投资约为人民币 150 万元~200 万元,粗率估计是常规机型投资的四分之一,体现其良好的经济性。

(12) 新设计的 SB65-6/2 型双分流工业小汽轮机考虑到机械损失等耗功后,有效出力为 3 100 kW,可以替代电动机拖动给水泵。解决了工艺流程中 90 t 余热低品位蒸汽的利用问题,极大的提高了热能利用效率;在汽轮机运行中,背压可以在 0.102 MPa~0.2 MPa 之间,尾汽可以作为各低参数回热系统的工作蒸汽和热用户供热;它也体现了节能环保的特点<sup>[14]</sup>。

### 2.3 关键零部件的强度分析

根据金属材料特性和本机型的特点,强度最薄弱环节就是动叶。所以本研究必须对动叶的强度进行分析校核。

动叶主要数据是:叶高为 30 mm,叶宽为 25 mm,叶型为 HQ25-1090,叶根为 TG-10,节距 13.89 mm,每个叶轮的动叶数量为 147 只;材料为 2Cr13-5,其屈服极限为 620 MPa<sup>[15]</sup>。其他主要数据:总功率为 3 000 kW,

(5) 4 个喷嘴组分别固定在汽缸中部的两侧面,见图 2 序号 2、7。分为左、右各两组,上、下布置,是焊接喷嘴,4 个喷嘴组结构尺寸完全一致,导叶方向两两相反。单个喷嘴组导叶沿节圆展开结构示意图如图 3 所示。

叶片前后最大压差为 0.498 MPa。

本研究用以上数据通过 ANSYS 分析软件得到的结果如图 4 所示。

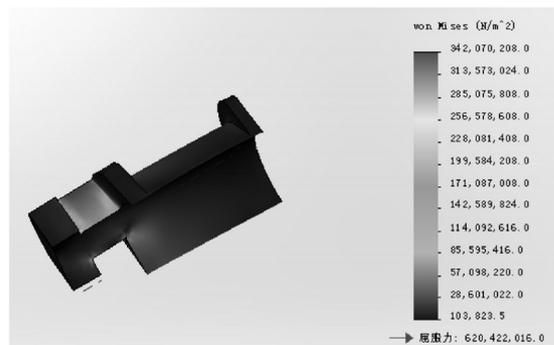


图 4 强度分析结果

从分析结果中得出,动叶片的最大应力是 342 MPa,而材料的极限应力是 620 MPa,所以叶片的安全系数为:  $S = 620/342 = 1.81$ 。又根据汽轮机强度设计规范,安全系数满足了大于 1.5 倍的要求,因此动叶的强度符合要求<sup>[16-17]</sup>。

## 3 结束语

因为低品位蒸汽的特点就是低参数、大容量,与常规参数的汽轮机比较,在同等输出功率的前提下,低参数汽轮机的整体结构会比较大,所需的布置空间也比较大,基建成本和汽轮机的制造成本也比较高。为了避免以上不利因素,双分流结构设计就是一个比较理想的选择。

一般在大型或超大型汽轮机设计中广泛采用了双分流结构,但在目前汽轮机行业中,单级小型工业汽轮机还没有用过双分流结构设计。本研究为解决该类问题提出了一个新思路和新途径。

综上所述,显示单级双分流结构的小型工业汽轮机具有良好的使用性能。从其应用途径看,它也是节能环保产品,符合国家产业导向,具有广泛应用前景。由于其结构紧凑,布置合理,从而达到降低一次性投资,最大限度地节省布置空间等优势。尤其在布置空间要求特别高的军工舰船领域,更有其良好的应用空间。

#### 参考文献(References):

- [1] 伍爱民. 工业汽轮机市场需求结构与预测 [J]. 工程建设与设计,2000(2):8.
- [2] 祝 钢. 小型工业汽轮机在化工企业余热利用中的应用 [J]. 应用科技,2007,34(12):50-51.
- [3] 赵效海. 工业汽轮机在小型热电厂热网系统的节能应用 [J]. 通用机械,2011(6):26-27,31.
- [4] 马晓飞. PTA装置余热利用型汽轮机的研究[J]. 热力透平,2009,38(2):92.
- [5] 王乃宁,张志刚. 汽轮机热力设计[M]. 北京:水利电力出版社,1987.
- [6] 康 松,杨建明,胥建群. 汽轮机原理[M]. 北京:中国电力出版社,2000.

#### 本文引用格式:

楼上游,郭一朝,郑飞逸. 低参数大流量单级背压工业汽轮机优化设计[J]. 机电工程,2015,32(4):501-505.

LOU Shang-you, GUO Yi-chao, ZHEN Fei-yi. Optimization of larger flow single stage and back pressure industrial steam turbine[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering,2015,32(4):501-505.  
《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第500页)

进措施。当消除生产瓶颈之后,系统再根据电子看板实时显示瓶颈重复消除瓶颈的过程,最终达到持续改善的目的。

## 4 结束语

本研究通过介绍TOC与OEE的特点,将两者结合起来,提出一个基于TOC理论的OEE应用模型,并通过工厂实验来验证了这套模型的可行性。最后为了减少分析的数据的工作量,提高企业的整体效率,该方案以电子看板的方式实现及时监测瓶颈机台,并可以有效地应对瓶颈的动态转移。电子看板以图形化的方式展示关键的生产信息,可以帮助企业生产管理人员及时作出调整和改进的措施,并在第一时间得到信息反馈。

在实际生产过程中,生产要素并非处于理想状态,在不断地变化,所以还会存在一些问题有待研究和解决。如实际生产时发现的物料质量问题,电子看板系统还没有专门的处理办法,因此电子看板系统的实施将是一个逐步改善的过程,还有大量的研究和开发工作等待研究人员继续去完成。

- [7] 沈士一. 汽轮机原理[M]. 北京:水利电力出版社,1992.
- [8] 沈炳正,黄 程. 透平机械原理[M]. 北京:机械工业出版社,1990.
- [9] 蔡颐年. 蒸汽轮机[M]. 西安:西安交通大学出版社,1988.
- [10] 吴厚钰. 透平零件结构和强度计算[M]. 西安:西安交通大学,1982.
- [11] 吴宗泽. 机械结构设计[M]. 北京:机械工业出版社,1988.
- [12] 濮良贵,纪名刚. 机械设计[M]. 北京:高等教育出版社,2005.
- [13] 朱佳生. 透平机械制造工艺学[M]. 北京:机械工业出版社,1980.
- [14] General-purpose steam turbines for Petroleum, Chemical, and Gas Industries Services [S]. API STANDARD 611 FOURTH EDITION, JUNE 1997.
- [15] 汽轮机金属材料实用手册[Z]. 哈尔滨:哈尔滨汽轮机厂中央材料试验研究所,1996.
- [16] 吴高阳. solidworks2010 有限元分析[M]. 北京:机械工业出版社,2010.
- [17] SAEED MOAVENI. Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS [M]. New Jersey: S. Moaveni, 2005.

[编辑:洪炜娜]

#### 参考文献(References):

- [1] 门田安弘. 新丰田生产方式[M]. 3版,王瑞珠,李莹,译. 石家庄:河北大学出版社,2008.
- [2] 朱 虹,钱省三. 基于TOC理论的OEE的应用[J]. 半导体技术,2005,30(8):38-45.
- [3] MCMULLEN J, THOMAS B. Theory of Constraints (TOC) Management System [M]. Boston: The St. Lucie Press/APICS Series on Resource Management, 1998.
- [4] 赵春燕. 基于TOC的企业生产控制的应用研究[D]. 大连:东北财经大学工商管理学院,2012.
- [5] 何文锦,鲁建厦,李修琳. 基于生产物流瓶颈的生产排程研究[J]. 轻工机械,2013,31(1):101-105.
- [6] 李 洋. OEE理论在生产线管理系统中的应用研究[J]. 现代经济信息,2010,3(1):3-7.
- [7] 沈静超. 设备综合效率OEE的计算方法及实际运用[J]. 装备制造技术,2013,12(2):11-13.
- [8] 梁 静,钱省三. 半导体制造中的设备效率(OEE)[J]. 电子工业专用设备,2004(7):76-78.
- [9] 李葆文. 全面规范化生产维护:从理念到实践[M]. 2版. 北京:冶金工业出版社,2005.
- [10] 胡国金,张 峰,李坤兵. 精益电子看板的研发背景、内涵及应用前景分析[J]. 机械设计与制造工程,2013(2):55-60.

[编辑:洪炜娜]