

为什么汽轮机乏汽不直接送至锅炉加热再做功？

刘继婵

内蒙古汇能煤化工有限公司，内蒙古 鄂尔多斯 017000

摘 要： 随着中国工业化进程的进步，科学技术进步和资源的综合开发利用以及新材料、新技术、新设备、新工艺不断地引进，我国电力、石油化工工业也得到了飞速发展，逐渐形成了电力、石油化工装置设备的新特点，即大型化、单系列、自动化、智能化和连续化，进口汽轮机与国产的工业汽轮机两架马车在电力、石油化工装置中都得到了广泛的利用^[1]。汽轮机被广泛的应用在石油化工、金属冶炼和电力领域。在化工领域，汽轮机常被用作拖动压缩机或膨胀机的原动机，应用在空气分离装置、冷媒压缩装置以及工艺气液化等装置。在电力领域，汽轮机最主要的用途就是拖动发电机组，克服电磁阻力，通过电磁感应实现做功发电。当然，一些中小型的辅助设备，考虑节能降耗，有些装置也使用汽轮机作为原动机，例如汽动给水泵就是利用汽轮机作为原动机拖动高压给水泵将给水升压后供锅炉使用的辅助设备。

关 键 词： 汽轮机；乏汽；回收

Why is the Exhaust Steam of the Steam Turbine Not Directly Sent to The Boiler for Heating and Then Doing Work?

Liu Jichan

Inner Mongolia Huineng Coal Chemical Co., Ltd. Ordos, Inner Mongolia 017000

Abstract： With the progress of China's industrialization process, the comprehensive development and utilization of scientific and technological progress and resources, as well as the continuous introduction of new materials, new technologies, new equipment and new processes, China's power and petrochemical industries have also developed rapidly, gradually forming new features of power and petrochemical plant equipment, namely large-scale, single series, automated, intelligent and continuous. The two carriages of imported turbines and domestic industrial turbines have been widely used in power and petrochemical plants. Turbines are widely used in petrochemical, metal smelting and power fields. In the chemical industry, steam turbines are often used as prime movers for drag compressors or expanders, and are used in air separations, refrigerant compressors, and process gas liquefaction. In the field of power, the most important use of steam turbines is to drag the generator set, overcome electromagnetic resistance, through electromagnetic induction to achieve power generation. Of course, some small and medium-sized auxiliary equipment, considering energy saving, some devices also use the steam turbine as the prime mover, such as the steam feed pump is to use the steam turbine as the prime mover to drag the high-pressure feed pump to boost the feed water for the auxiliary equipment used by the boiler.

Keywords： steam turbines; waste gas; recycling

一、汽轮机概论与能量转换

工业汽轮机是以蒸汽为工质，将蒸汽热能转变为转子旋转机械能的动力机械，它具有单机功率大、效率高、转速高、调速方便、使用寿命长、运行安全可靠等优点，因此，被广泛应用于电力、石油化工、冶金等行业。^[2]

石油化工装置大多采用工业汽轮机作为原动机来驱动压缩机、风机、泵及发电机等工作机械。为了提高石油化工装置的独立性，减少对电网的依赖性，提高开工率，一般都建有汽轮机发电机组的自备电站，既供热又供电，这样可减少远距离输电和送汽，既解决本装置生产和生活的用汽，又可综合利用本装置资源，如生产过程

的余热、余料等，这种热电联合的自备电站经济效益很明显，自备发电与公用发电并存，如有裕量还可向公用电网送电。^[3]

1. 工业汽轮机的定义

工业汽轮机是指工业企业中驱动用汽轮机与自备电站发电用汽轮机的总称，即指除公用电站汽轮机和船舶用汽轮机以外的各种类型的汽轮机。^[4]

工业汽轮机应用范围：

(1) 厂矿企业的自备供热发电用的汽轮机；^[5]

(2) 石油化工、冶金等行业装置中用于驱动泵、鼓风机、压缩机等工作机械的汽轮机；^[6]

(3) 自备电站用于驱动锅炉给水泵和风机的汽轮机；^[7]

作者简介：刘继婵（1983.07—），男，汉族，群众，大专学历，研究方向为机电一体化，化学工程与工艺专业，电力系统中级职称，现就职于内蒙古汇能煤化工有限公司。

(4)船舶用的各类辅助动力用汽轮机。^[8]

2.工业汽轮机的特点

工业汽轮机的应用范围十分广泛,使用场合各不相同,对进排汽参数、功率、转速以及布置型式和调节特性等方面,也都有各种不同的要求,因此品种非常繁杂,型式多样。目前工业汽轮机产品已系列化生产,最大程度地满足用户对工业汽轮机的需求,其主要特点是:

(1)使用领域宽广,易实现转速调节,具有较大的转速调节范围,通常为额定转速的-10%~+15%,特殊情况可达额定转速的-40%~+30%,增加了调节手段或操作的灵活性;

(2)汽轮机的转速高,变转速范围大,转速范围可达3000~16000r/min,可用来直接驱动工作机械;

(3)适用于各种工作环境,满足防尘、防爆和防腐蚀等的特殊要求,无易燃、易爆危险。

3.汽轮机的做功过程

在电力火化工生产领域中,燃料的化学能转变为热机的机械能,或者化工余热副产蒸汽直接冲动汽轮机做功,进而转换为电能,能量转化是通过蒸汽动力循环来实现的。能量转换过程的效果主要取决于循环过程的完善程度。蒸汽动力循环是以朗肯循环为基础,因此,我们从研究朗肯循环入手来研究汽轮机能量转化的热经济性。朗肯循环工质的循环经历了四个热力过程,首先,工质在锅炉中定压加热、汽化、过热的过程,然后蒸汽在汽轮机中等熵膨胀做功,接着汽轮机乏汽排入凝汽器中定压放热,最后是凝结水在水泵中等熵压缩的过程^[9]。朗肯循环的热效率表示1KG蒸汽在汽轮机中产生的理想功与循环吸热量之比,纯凝汽式(无回热、再热)发电厂的热经济性是很低的。根据热力学第一定律的实质即能量守恒与转换定律在热力学上的一种特定应用形式,他说明了热能与机械能相互转换的可能性及数值关系^[10](热量法)可知,提高发电厂热经济性的途径是减少冷源损失;根据热力学第二定律(做功能力损失法),提高发电厂热经济性的途径是减少锅炉传热温差,提高锅炉的给水温度,从而降低温差传热而产生不可逆传热损失,汽方法是采用回热、再热、热电联产等来提高发电厂的热经济性。

4.蒸汽终参数对电厂热经济性的影响

在蒸汽初参数一定的情况下,降低蒸汽终参数 p_c 。将使循环放热过程的平均温度降低,根据 $\eta=1-T_c/T_1$ 可知,理想循环热效率将随着排汽压力 P_c 的降低而增加。降低排汽压力 P_c ,使汽轮机比内功 W_i 增加,理想循环热效率增加。

在决定热经济性的三个主要蒸汽参数初压、初温和排汽压力中,排汽压力对机组热经济性影响最大。经计算表明在蒸汽初参数为9.0MPa、490℃时,排汽温度每降低10℃,热效率增加3.5%;排汽压力从0.006MPa降低到0.004MPa,热效率增加2.2%。由此可知,排汽压力越低,工质循环的热效率越高。^[11]

排汽压力 P_c 降低,对汽轮机相对内效率不利。随着排汽压力的降低,汽轮机低压部分蒸汽湿度增大,影响叶片的寿命,同时湿汽损失增大,汽轮机相对内效率下降。过分地降低排汽压力,则会使热经济性下降。因为随着排汽压力的降低,排汽比体积增大,在余速损失为一定的条件下,就得用更长的末级叶片或多个

排汽口,凝汽器尺寸增大,投资增加。若排汽面积一定,则排汽余速损失会增加。当 P_c 降至某一数值时,带来的理想比内功的增加等于余速损失增加时, P_c 达到极限背压,当 P_c 小于极限压力后,再降低 P_c 则会使机组热经济性下降。因此,在极限背压以上,随着排汽压力 P_c 的降低热经济性是提高的。

实际情况下,汽轮机排汽的饱和温度,必然大于以下两个极限:理论极限——排汽的饱和温度必须等于或大于自然水温,绝不可能低于这个温度;技术极限——冷却水在凝汽器内冷却汽轮机排汽的过程中,由于冷却蒸汽的凝汽器冷却面积不可能无穷大的缘故,排汽的饱和温度应在自然水(冷却水)水温的基础上加上冷却水温升和传热端差。汽轮机的排汽压力应对应于排汽饱和温度所对应的压力,在运行中它的大小取决于冷却水的进口温度,冷却水量的大小和铜管的清洁度,空冷机组取决于散热翅片的脏污程度。

在设计时,凝汽器内的最佳蒸汽压力(即最佳真空),是根据各种方案进行复杂的技术经济比较后确定的。制造厂提供的动力设备铭牌上的排汽压力,并不是为个别发电厂的具体条件而设计的,而具有较广泛的通用性。对具体的电厂来说,由于各地的自然条件和燃料价格等的不同,成批生产的通用设备的排汽压力并不一定是最经济的,这就要求根据电厂的具体情况来确定凝汽器的最佳真空。

二、汽轮机乏汽的直接回收在实际工业生产过程中是否切实可行?

根据前述热力学第一定律(热量法)描述,减少冷源损失的关键就是回收汽轮机乏汽的汽化潜热,因此提出,将汽轮机乏汽直接送至锅炉加热后再做功的观点,从总体能量转化的观点是没有问题的,但是应用到生产实际中是否可行呢?今天,我们就着重论述关于乏汽是否能直接回收至锅炉加热后重新做功在实际应用是否可行。

研究和分析蒸汽动力循环对提高火电厂的经济性是非常重要的。汽轮机作为化工和电力领域广泛使用的重要设备,其使用工质为水蒸汽,不同之处仅是不同的水蒸汽参数应用在不同工况下的汽轮机。但是对于纯凝机组来说,做完工的乏汽基本大同小异,只是乏汽冷凝使用的冷媒不同,在南方水资源丰富的地区,一般都用水作为冷媒间接换热冷凝乏汽;在北方干旱地区,近年来,大力推广使用直接空冷器,用环境空气作为冷媒冷却乏汽。考虑到工艺流程中都有乏汽的冷凝,不少人提出这样的疑问,为什么汽轮机乏汽不直接送至锅炉加热再做功呢?这个想法很有道理,节约能源、高效利用,做完功以后的乏汽非要被水或空气冷却一下才往锅炉里面送,大量的气化潜热被送到冷却介质里,占了整个蒸汽工质焓值的一半,实在可惜。所以提出把乏汽直接送入锅炉的想法绝对是好的,是有思想的。大大的一个但是,通过查阅《工程热力学》《汽轮机运行》《汽轮机运行与检修1000问》《工业汽轮机技术》等相关专业资料,也没有找到关于这一问题的直接论述,尤其通过对热力循环的基础——朗肯循环仔细地重新学习,也没找到答案,所以沿着问题的思路反向思考,出现了一个新的问题——如果将汽轮机做完功的乏汽直接送到锅炉里会发生什么情况?如何尽可能地减少热量损失?

1. 直接用压气机将乏汽提压送到锅炉里。

百十年来，用水蒸气作为工质的热机基本都是一个模式，做功后的乏汽进入换热器被冷却成凝结水，然后用通过高压给水泵打到锅炉里重新加热。

现在我们试试用压气机将未经冷却的乏汽直接送到锅炉里看结果是怎样：

通过工程热力学的有关知识我们可以知道，具有压力 p_1 温度 t_1 的水蒸汽进入汽轮机做功，汽轮机排出的乏汽压力为 p_2 温度为 t_2 ，且 $p_1 > p_2, t_1 > t_2$ 。现在我们用压气机将乏汽压力提高到 p_1 ，看看会发生什么情况？

从焓熵图上看，乏汽从点 (p_2, t_2) 经压气机压缩到达 p_1 等压线某点 (p_1, t') ，很显然，不管熵增大小， t' 都远远大于 t_2 ，压缩提压过程的焓增都远远大于汽轮机做功过程的焓降。也就是说乏汽不经冷却而提压进入锅炉，所付出的代价将远远大于汽轮机的输出功。简单来说就是，付出百分百的努力，仅仅得到百分之10的回报，俗称就是亏本买卖。

2. 用带有中间冷却的压气机将乏汽提压

实际工程上采用的压缩机基本都带中间冷却的，气体被压缩之后温度会上升。例如，很多科普文章把飞船返回大气层遇到的高热解释为摩擦生热，其实是高速运动的物体压缩了前面的空气造成温度急剧上升，行话叫绝热滞止过程，摩擦热放到这里相对来说就是小巫见大巫了。

下面分析一下正常的、工程上用的、带中间冷却的压气机将乏汽提压的情况，前提是冷却过程中水蒸气不能变成水、工质不损失气化潜热，否则这个讨论就没有意义了。

简单分析：

1) 提压幅度过大，从汽轮机的乏汽压力 0.0053MPa 提升到锅炉压力十几、二十几兆帕，过程压缩级数过多，效率高不到哪儿去。

2) 压缩过程从点 (p_2, t_2) 沿着 $x=1$ 干度线到达 p_1 等压线，你会发现压缩过程的终点 p_1 对应的饱和温度离 t_1 已经没多远，锅炉加热过程的焓升空间已经没多少，也就是说基本上没锅炉什么事。你做的功大多数是用来驱动压气机的。整个系统净输出功率较低。

3) 从温熵图上简单勾了几笔，发现无法和朗肯循环进行比较，因为无法定性比较两种循环的平均放热温度和平均吸热温度比值 T_2/T_1 ，后来在准备用实际参数在温熵图上进行图上作业，求出两种循环的 T_1 和 T_2 ，考虑到朗肯循环是个理想循环，拿实际参数作比较无法作出有效对比，所以最终放弃，因为“此时朗肯循环的热效率相当低。

从实际出发，如果想尽可能利用乏汽的热量，不丢失气化潜热，现有的蒸汽轮机设计必须改变：

1) 选择一种工作温度远远高于饱和温度的工质，采用多级压缩中间冷却。

2) 尽可能提高 t_1 ，提高系统效率，否则不划算。

3) 和蒸汽轮机一样，再热、回热循环同样可以利用到新的蒸汽轮机上。

3. 燃气轮机情况

根据以上的分析，我们考虑燃气轮机的情况，显然燃气轮机

符合以上所说的三个条件。但是，燃气轮机排出的废气还能再灌到燃机里面去吗？氧气减少了燃气怎么燃烧呢？

直接看看——燃气轮机循环—闭式循环：

“工质循环使用，由透平排出的工质，不再在大气中作等效冷却，而是经冷却器冷却后重新被压气机吸入，再次参加循环过程。压缩后的气体工质在气体锅炉（或加热器）中被加热。闭式循环中，工质可用空气或其他气体。闭式循环的主要缺点是包括气体锅炉在内的换热器尺寸大、成本高和 T_3 温度低等，因而应用不多。若采用气冷反应堆作为加热气体工质（用 He 或 N_2 等）的热源，就组成了核动力闭式循环装置，其效率可高于采用汽轮机的核动力装置。”

三、总结

1. 乏汽不经冷却直接送往锅炉（加热器）是不可行的，因为气体经压缩后回到初始压力，其付出的代价远远高于其对外输出的功。

2. 乏汽经冷却但不丢失气化潜热（不凝结成水）是可以的。但对于目前大规模应用的、工质为水蒸气的蒸汽轮机不适合。目前最合理的办法仍然是将乏汽冷凝成水用高压给水泵升压送入锅炉。

3. 闭式循环气燃气轮机（氦气轮机）接近主题所说的设想，最大限度地保留了乏汽的热量，但仍然需要将乏汽冷却，冷却的目的是为了将气体压缩。

4. 人们很早就认识到乏汽把气化潜热扔到水里的问题，采取的措施就是采用回热循环，用做过功的乏汽去加热锅炉给水，尽量减少乏汽冷凝成水的量，减少损失。

参考文献

- [1]《工业汽轮机》/王学义编。——北京：《中国石化出版社》，2010年9月 ISBN 978-7-5114-0574-6.
- [2]《汽轮机设备与运行》/张磊，马明礼主编。——北京：《中国电力出版社》，2008年4月第一版 2009年2月北京第二次印刷 ISBN 978-7-5083-6330-1.
- [3]《汽轮机运行》/《火电厂生产岗位技术问答》编委会编。——北京：《中国电力出版社》，2010年8月 ISBN 978-7-5123-0556-4.
- [4]参考文献《汽轮机运行与检修1000问》/姚莹，杨翠仙编。——北京：《中国电力出版社》，2005年1月第一版 2007年9月北京第三次印刷 ISBN 978-7-5083-2369-5.
- [5]《工程热力学》/张净玉编。——北京：《北京航空航天大学出版社》，2022年1月 ISBN 978-7-5124-3637-4.
- [6]《单元机组运行》/杨飞主编。——北京：《中国电力出版社出版社》，2004年1月 ISBN 7-5083-0762-3.
- [7]《热力发电厂》/叶涛主编。——北京：《中国电力出版社出版社》，2012年4月 ISBN 978-7-5123-32931-7.
- [8]《汽轮机运行值班员》/门丕勋、虞硕亮、刘卫、陈传光、孙斌编写。——北京：《中国电力出版社出版社》，2006年10月 统一书号 155083 · 308
- [9]《锅炉设备运行》/刘润来、郭林虎主编。——北京：《中国电力出版社出版社》，2005年3月 ISBN 7-5083-2441-2.
- [10]《锅炉技术问答》/丁明舫、催百成、陆其虎、薛继承、时静茹主编。——北京：《中国电力出版社出版社》，2002年2月 ISBN 7-5083-07725-9.
- [11]《锅炉设备运行》/郭连邦、刘润来主编。——北京：《中国电力出版社出版社》，2004年3月 ISBN 7-80125-188-1.