能量回收液力透平的研究进展*

杨军虎** 张雪宁 王晓晖 孙庆冲 张建华
(兰州理工大学)

摘 要 从液力透平本身的性能、回收装置的配置和装置运行工况的调节3个方面研究了液力透平能量回收装置,指出了3种液力透平各自的优势,并描述了其研究进展及后续研究中应关注的问题。

关键词 液力透平 配置 调节 能量回收
中图分类号 TQ051.1 文献标识码 A 文章编号 0254-6094(2011)06-0655-05

液力透平能量回收装置是把流体压力能转化为机械能或电能的装置,凡是存在液体压力差的地方,都有能量可以回收利用。工业生产中的余压能是可再生能源,用液力透平代替减压阀,避免了余能的浪费。充分回收余压能、提高装置的回收效率是人们普遍关心的问题。笔者从透平本身的性能、回收装置的配置和运行工况的调节3个方面对液力透平能量回收装置进行了研究。

1 液力透平

液力透平按设计方法的不同可分为液力涡轮、反转泵和专用液力透平。

1.1 液力涡轮

液力涡轮是一种涡轮机械,其工作原理与普通水轮机相似。国外公司多按涡轮机理论设计液力涡轮,其特点是效率高、工作稳定性好;国内也有直接采用水轮机作液力透平使用的研究与应用,这种形式的透平有冲击式、轴流转桨式及混流式等。

冲击式透平用于小流量、高水头(300m以上)的工况,最高效率超过80%,其体积庞大、常安装在高塔上;轴流转桨式透平多为立轴结构,桨叶可调,能适应流量与水头的变化,多用于水头较低(小于80m)、流量大的工况;混流式透平流动状态好,适用工况范围较宽,用于中高水头(25~200m)的工况,效率最高可达到85%[1]。

随着计算机技术应用于透平机械设计制造、性能预测及流动分析等环节,涡轮机的研究方法和手段已经发生了巨大的变化[2]。借助CAD、CAM等软件研制涡轮机,提高了涡轮机产品的质量和工作效率。采用流体动力学仿真软件CFD预测透平的性能,取代了原来的模型机实验,缩短了产品的开发周期。流场可视化技术的发展使得对涡轮机的研究深入到流场内部,各种流动现象的结论通过观察均得以证实。

液力涡轮设计方面,在应用二元叶栅理论的同时,也采用准三元理论来进行反问题的研究[3]。应用Matlab、C++等编程技术作为辅助,各种设计理论与方法的实践、应用也成为现实。

涡轮机特性研究方面,利用三维造型软件建立涡轮机过流部件或全流道实体模型,应用FLUENT、CFX、PHOENICS及STAR-CD等软件进行数值模拟。具体是划分体网格离散几何体,选用湍流流动模型(如k-ε模型)、流场网格节点求解方法(如压力修正算法SIMPLE)和动网格技术或旋转坐标系进行计算。通过模拟结果分析内部流动的动力学特征、非设计工况特性及多相流特性等。

1.2 反转泵

反转泵使用最为广泛,其优点是普遍、经济且运行工况符合工业流程要求。对反转泵的研究讨论也比较多,主要研究方向是确定正反转两种模式性能参数的关系。文献[4,5]中研究了反转泵的径向推力、飞逸转速等特性,分析了叶轮进出口

* 国家自然基金项目(51169010)和浙江省科技计划资助项目(2009C31145)。
** 杨军虎,男,1962年12月生,教授。甘肃省兰州市,730050。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

流态，比较了透平与泵工况的性能。

Shahram D 等[6~8]研究了不同比转速离心泵两种模式下最优工况流量、水头等无量纲参数比值变化趋势和非设计工况性能预测关系式，建立了叶轮结构参数的目标函数，用梯度算法优化设计叶轮水力模型，比转速在 35 ~ 500 之间的普通泵都可作为透平使用。文献[9]中给出的离心泵正反转模式水头比值 H_t/H_p 和流量比值 Q_t/Q_p 在 2.2 ~ 1.1 之间；效率比值 η_t/η_p 在 0.92 ~ 0.99 之间。根据回收功率的大小可将液力透平分为单级透平和多级透平，单级透平回收功率大于 22kW，多级透平回收功率大于 75kW。根据叶轮结构又可分为径流式、混流式和轴流式，径流式与混流式泵常作透平使用。

普通泵作透平使用时往往需要对其结构加以改进，以提高透平工况的性能。例如，修圆叶轮叶片头部和前后盖板边，以减少进口水力撞击损失；进水室增加固定或活动导叶，改变液流流动特性，避免对叶轮有直接冲击；对于特定的工况条件（如气 - 液混合物流），设计时加大转轮出口面积，使气体在转轮出口膨胀逸出。李文广[10]对此作了详细的阐述。

1.3 专用液力透平

普通水轮机做液力透平使用时，液流一般为法向出口，出口压力很低，而化工工艺流程则要求液流出口具有 0.2 ~ 0.3MPa 的压力。直接采用普通水轮机做透平使用时，不能较好地满足工艺流程要求。反转泵在使用时工作不稳定、效率较低，且存在结构强度不足等问题，因而采用新的理论与方法设计适用于工业流程的液力透平是目前研究的热点。

对于小流量、高水头的工况来说，需要专门的小型高速透平来回收能量，现已成功开发的高性能叶轮有径向叶轮、可逆式叶轮等。为进一步缩小透平结构、减少容积损失及机械损失，美国 PEI 公司研制了运行安全可靠、总体效率高的一体式结构透平增压泵、透平发电机等。

1.4 液力透平特性与比较

透平性能研究的内容包括：建立透平运行的试验台，全面测试透平的能量特性、汽蚀特性及工作稳定性等；理论分析旋转叶轮内流动参数、几何参数与性能参数的关系。

液力透平的主要特性是当流量增加到一定值 Q_k 时，才有功率输出并逐渐增加，流量达到 Q_k 之前所通过的液流主要用来克服机械摩擦损失。存在最小水头点 H_k，该点之前无功率输出，水头能量用于克服转动阻力。转速为零时无功率输出，水头能量用于克服转动阻力；转速达到一定值 n_{max} 后也无功率输出，液流能量消耗在转动上，出现飞逸现象。

性能方面，透平输出功率大小与流量、压差和转速有关，即 $N=f(H,Q,n)$。效率是衡量透平性能高低的主要参数：

$$\eta=\frac{T\omega}{\gamma Q_t H_t}$$

2 能量回收装置配置

2.1 布置方式

能量回收装置的基本布置方式有直驱式和辅助驱动式两种。透平输出功率大于负载时用直驱式，如透平驱动风机、发电机及泵等机械，最简单的布置是同轴直联，只要有功率输出，就可带动负载工作；输出功率小于负载时用辅助驱动式，辅助式中透平是第二动力设备，其转速高于负载转速时联入系统，与第一动力设备共同带动负载，例如与电动机或蒸汽机联合驱动式结构（图 1），电动机能自动补偿功率输出的不足，达到节约电量的目的。

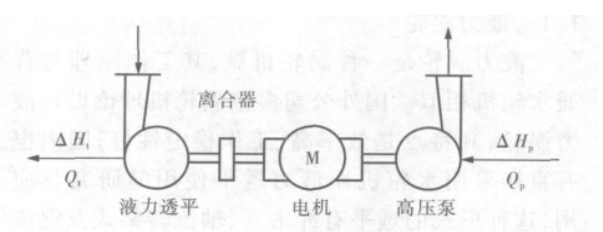

图 1 液力透平辅助驱动式结构示意图

透平外形结构与普通泵相似，布置于轴端，为悬臂式结构，由于运行工况为高水头、小流量，液流对叶轮和主轴的冲击力较大。可采用双吸式进口平衡轴向力或双蜗壳结构平衡径向力，减少对轴和轴承的损坏。

2.2 联接传动装置

透平轮轴与电机或泵主轴之间由超越离合器或液力偶合器联接。超越离合器是机械式的单向离合器，利用棘轮 - 棘爪的啮合传递扭矩；液力偶合器通过壳体间的液体传递动力，特点是柔性传

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

动、起动性能好。使用离合器联接时可控制转速、保持透平稳定、拆装简便灵活，但效率与同轴直联相比较低。各种配置形式都有其特有的优、缺点和适用条件，文献[11~19]对各类型液力透平的联接方式、流程工况及适用环境等做了比较。根据不同的工作条件和实现的功能选择透平类型、布置方式和联接装置。

2.3 性能参数匹配

液力透平能量回收装置设备配置的基本要求中功率是主要的匹配参数，若功率不匹配，会出现透平出力不足或超负荷工作的现象。最优工况转速等于工作机的额定转速，转速还随流程参数与负载容量的变化而发生变化。工业流程中，回收装置也是一个单元，流量、水头均需符合系统工况。以图1所示布置为例，系统的相关参数见表1。

表1 能量回收系统参数表

项目	功率 N	转速 n	流量 Q	水头 H
液力透平	N_t	n_t	Q_t	ΔH_t
高压泵	N_p	n_p	Q_p	ΔH_p
电动机	N_m	n_m	–	–
流程工况	–	–	Q_{st}、Q_{sp}	ΔH_{st}、ΔH_{sp}

注：ΔH_{st}、Q_{st}分别是系统在透平段水头、流量；ΔH_{sp}、Q_{sp}分别是系统在高泵压段水头、流量。

具体的参数匹配条件是：

$$\begin{cases} n_m = n_t = n_p; \\ N_m = N_p - N_t; \\ Q_t = Q_{st};\ Q_p = Q_{sp}; \\ \Delta H_t = \Delta H_{st};\ \Delta H_p = \Delta H_{sp} \end{cases}$$

其中下角t表示液力透平，p表示高压泵，m表示电动机。

回收装置的总效率：

$$\eta_z = \eta_t \cdot \eta_c \cdot \eta_p$$

其中η_t、η_c、η_p分别为透平效率、机械传动效率、耗能设备效率。

人们常用回收功率作为评价回收装置性能的一项指数，通过测量电动机电流的变化计算所节约的电能：

$$\Delta P_m = \Delta I \times U \times 1.732 \times 0.89$$

式中 ΔI——使用透平前后电动机电流的变化；

U——电动机的电压。

回收功率是对于整个回收系统而言，正确配置回收装置的相关设备，回收功率相应提高。

3 运行工况调节

3.1 能量回收系统

能量回收系统包括调节阀、调速器及超速保护器等调节控制装置。其中节流阀用于调节流向液力透平的流量，如果液流中富含气体，节流阀可释放气体；若液力透平达到飞逸转速，超速保护装置能迅速切断液流；在透平启动前，备用泵可向系统供应物流或在透平功率降低时向高压容器输送物流。

3.2 系统工况调节

流程参数发生变化时，装置运行工况也要作相应的调节，这种调节可能会使回收效率降低，文献[16]中把调节分为变转速调节和恒转速调节两种，并对两种调节方式做了相应的对比。

变转速调节中，当系统流量小于设计流量时，调节透平转速能使流量处于最优工况点，回收效率等于透平效率，即$\eta_s = \eta_t$；当系统流量大于设计流量时，通过旁流阀分流多余流量可以保证流量、压差、转速在最优工况点，回收效率为$\eta_s = \eta_t \times \frac{Q_{opt}}{Q_s}$。

恒转速调节中，当流量小于设计流量时，由减压阀释放部分压力，回收效率为$\eta_s = \eta_t \times \frac{H_{opt}}{H_s}$；当系统流量大于设计流量时，通过旁流阀分流多余流量，回收效率为$\eta_s = \eta_t \times \frac{Q_{opt}}{Q_s}$。

除了回收效率外还应考虑系统的可靠性和复杂程度。系统越复杂，原始成本越高，维护费用相应地越高，可靠性降低。此外，变速调节系统需要滑环发电机、功率电子仪和调速回路系统，而恒速调节只需要鼠笼发电机和一些常规的管路阀门，变转速调节的装置复杂，造价高。就目前来说，适合采用恒速调节方式，即牺牲一些效率来换取较高的可靠性。

4 液力透平的应用

液力透平能量回收装置应用于石油化工、冶金、煤炭以及废水处理等行业的生产过程中。化工厂高压加氢装置脱硫塔压降为11~15MPa；海水淡化系统排放的浓盐水有5.5~6.0MPa压力，这些都可采用透平回收余压能。炼钢厂采用冲击式透平回收冷却系统的能量；采矿井中透平用于

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

二次循环水系统;水力资源丰富的山区,建立分散的小水电站,把多级泵反转作水轮机使用以发电照明。

液力透平的研究中存在一些问题,如:普通泵反转做透平使用时,性能换算的精确性还有待提高,泵叶轮结构还需做局部优化;透平运行不稳定,转速常达不到配套电机的转速而不能回收能量,对透平额定转速的设计和控制调节仍要做进一步研究;在高水头、小流量或大流量及低水头等特殊工况下,回收工业过程中的余压能需开发新型专用液力透平;由于透平机械尺寸越小效率越低,关于研制小型透平同时提高透平效率的问题也亟待解决。此外,还有其它类型的能量回收装置,它们都有各自的特点与优势,例如浙江工业大学研制的活塞式液压能回收装置、美国 ERI 公司制造的专用于海水淡化的压力交换机(PX)。能量回收装置的多元化使得回收装置能应用到多种工业流程中。

5 结束语

液力透平能量回收装置的研究朝着专门化、特殊化、多样化的方向发展。采用新的理论与方法研制用于各种特殊工况(如高水头、高速度、变流量工况)的透平并且提高其效率,是一项重大的课题,目前国内还不能自主研制这类专用透平,使用过程中,透平发挥作用的大小与工作的条件有直接关系,正确配置设备及系统参数,并在运行工况偏离设计点时选择合理的调节方式便能充分回收余压能。

参 考 文 献

[1] 曹鹍,姚志民. 水轮机原理及水力设计[M]. 北京:清华大学出版社,1991:109~132.

[2] 栾云,张立丽,闫振龙等. TPS 与 TRICON 技术结合实现透平机组的控制[J]. 化工自动化及仪表,2010,37(10):115~117.

[3] 冯子明,刘洪河,姜明政. 冲角变化对涡轮叶栅的气动性能影响数值仿真[J]. 化工机械,2010,37(1):70~72,92.

[4] 刘甲凡. 泵作水轮机运行的特性分析[J]. 农业机械学报,1997,28(3):20~24.

[5] Hitoshi I, Junichiro F, Yoshiyuki N. Study of Reverse Running Pump Turbine [C]. Proceedings of FEDSM99,3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference. Tokyo: FEDSM99,1999:345~349.

[6] Shahram D, Ahmad N. Experimental Study of Characteristic Curves of Centrifugal Pumps Working as Turbines in Different Specific Speeds[J]. Experimental Thermal and Fluid Science,2008,32(4):800~807.

[7] Shahram D, Bijan M, Ahmad N. Efficiency Improvement of Centrifugal Reverse Pumps[J]. Journal of Fluids Engineering,2009,131(2):204~209.

[8] 周玉丰,燕杰春,方毅. 基于 ANSYS 的离心泵叶轮优化设计[J]. 化工机械,2010,37(2):165~169.

[9] 化工部化工设备设计技术中心站机泵技术委员会. 工业泵选用手册[M]. 北京:化学工业出版社,1998:456~459.

[10] 李文广. 工业用离心泵设计与应用[M]. 兰州:甘肃工业大学水机教研室,1993:236~240.

[11] Ventrone G, Ardizzon G, Pavesi G. Direct and Reverse Flow Conditions in Radial Flow Hydraulic Turbomachines[J]. Proc Instn Mech Engrs,2000,214(A6): 635~644.

[12] Bansal P, Marsh N. Feasibility of Hydraulic Power Recovery from Waste Energy in Bio-gas Scrubbing Processes[J]. Applied Energy,2010,87(3):1048~1053.

[13] Mirza S. Reduction of Energy Consumption in Process Plants Using Nanofiltration and Reverse Osmosis[J]. Desalination, 2008,224(1/3):132~142.

[14] 余良俭,陈允中. 液力能量回收透平在石化行业中的应用[J]. 石油化工设备技术,1996,17(4):27~31.

[15] 杨守智,王遇冬. 天然气脱硫脱碳富液能量回收方法的研究与选择[J]. 石油与天然气化工,2006,35(5):364~367.

[16] Antwerpen H J, Greyvenstein G. Use of Turbine for Simultaneous Pressure Regulation and Recovery in Secondary Cooling Water Systems in Deep Mines[J]. Energy Conversion and Management,2005, 46(4):563~575.

[17] 汪小洪,曹志锡. 液体压力能回收技术[J]. 新技术新工艺, 2002,(6):17~19.

[18] 鞠茂伟,常宇清,周一卉. 工业中液体压力能回收技术综述[J]. 节能技术,2005,23(6):518~528.

[19] 赵万勇. 两级石油化工流程泵的结构设计及应用[J]. 化工机械,2000,27(3):151~152,169.

(收稿日期:2010-12-11)

(下转第 696 页)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

拉伸破坏分成不同的阶段，不同破坏阶段具有不同的损伤模式，产生不同特征的声发射信号。复合材料的损伤破坏存在多种机制，纤维铺层方式对材料拉伸破坏模式影响较大。

3.2 从声发射数据的幅度统计分析可以看出，无论铺层角度是多少，低幅值事件在整个过程中所占得比例都很大，幅值的增长(40～100dB)也是随着各个阶段的不同出现，不同阶段声发射信号的幅度所占得比例不同。

参 考 文 献

[1] 舒卫国. 复合材料在航空工业中的应用综述[C]. 第十七届玻璃钢/复合材料学术年会论文集. 北京: 中国硅酸学会玻璃钢分会，2008: 286～288.

[2] 宁宁，袁慎芳，沈真等. 在役航空复合材料结构的无损检测技术[J]. 航空制造技术，2008，(15): 50～52.

[3] 陈慧媛. 基于声发射技术的化工容器检测研究[J]. 制造业自动化，2010，32(2): 52～54.

[4] 李伟，刘黎明，龙飞飞等. 增强型复合材料受力损伤过程的仿真分析[J]. 化工机械，2010，37(1): 111～114，110.

[5] 刘怀喜，张恒，闫耀辰. 声发射技术在复合材料中的应用及研究进展[J]. 纤维复合材料，2002，19(4): 50～52.

[6] 刘怀喜，张恒，马润香. 复合材料无损检测方法[J]. 无损检测，2003，25(12): 631～634，656.

[7] 李伟，丁蕾，赵俊茹等. FRP 复合材料拉伸过程的声发射特性实验研究[J]. 化工机械，2009，36(6): 542～546.

[8] 邵晓根. 基于神经网络的超声波检测流量控制系统[J]. 化工自动化及仪表，2010，37(6): 62～64.

[9] 《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材》编审委员会. 声发射检测[M]. 北京: 机械工业出版社，2005.

(收稿日期: 2010-08-13)

Experimental Study on FRP Composite Material Damage Based on Acoustic Emission Testing Technology

LI Wei, WANG Yu, WU Chao-qun, JIANG Peng, WANG Yan-ru

(*College of Mechanical Science and Engineering, Northwest Petroleum University, Daqing* 163318, *China*)

Abstract Basing on acoustic emission and making use of broadband sensors to record acoustic signals of composite materials which boasting of different fiber angles and damaged in tensile operation, the tensile damage and fracture behavior of FRP composite materials were investigated, and acoustic characteristics of damaged FRP composite materials were analyzed with 3D parameter method. Statistical analysis of the acoustic emission signal amplitude reveals the development process of FRP composite materials with tensile damage in different angle.

Key words FRP composite materials, acoustic emission technology, 3D parameter analysis, damage mechanism

(上接第 658 页)

Progress in Energy Recovery Hydraulic Turbine Research

YANG Jun-hu, ZHANG Xue-ning, WANG Xiao-hui, SUN Qing-chong, ZHANG Jian-hua

(*Lanzhou University of Technology, Lanzhou* 730050, *China*)

Abstracts Starting from hydraulic turbine performance, energy recycling equipment configuration and process unit operation, the energy recovery hydraulic turbine was studied and the three-turbine superiority were pointed out, including the progress in research and that should be concerned in later study.

Key words hydraulic turbine, configuration, adjustment, energy recovery

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net