

合成氨脱碳系统能量回收透平增压泵设计

纪运广, 刘彤, 李晓霞, 薛树旗*, 李洪涛

(河北科技大学机械工程学院, 河北石家庄 050018)

摘要:以合成氨脱碳工艺系统参数为设计条件, 设计了高效能量回收透平增压泵的透平侧和泵侧模型。基于两侧水力模型相关流量、转速、轴功率等参数给出变工况下两侧模型高效匹配规则。通过匹配规则设计的透平增压泵回收效率可达到60.6%, 高效率区间为 $0.84Q_{BEP} \sim 1.23Q_{BEP}$ 。

关键词: 能量回收; 合成氨; 脱碳; 透平增压泵; 高效率; 匹配规则

中图分类号: TH31

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2019)06-0190-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2019.06.040

Design of hydraulic turbochargers for pressure energy recovery of decarburization process in ammonia synthesis system

Ji Yun-guang, Liu Tong, Li Xiao-xia, Xue Shu-qi*, Li Hong-tao

(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

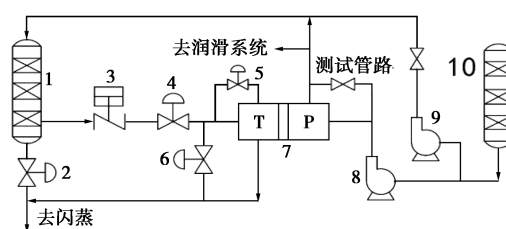
Abstract: The models for turbine-side and pump-side of the hydraulic turbocharger for high-efficiency energy recovery are designed based on parameters of the decarburization process in ammonia synthesis system. The high efficiency matching rule for two sides models is established on the basis of hydraulic parameters such as flow rates, rotation speeds and shaft powers. The hydraulic turbocharger designed by the matching rule can achieve a recovery efficiency of 60.6%, and the high-efficiency flow-rate range is from $0.84Q_{BEP} - 1.23Q_{BEP}$.

Key words: energy recovery; synthetic ammonia; decarburization process; hydraulic turbocharger; high-efficiency; matching rule

现代化学工业工艺过程中存在大量未利用的液体压力能, 将这部分能量回收利用可有效降低能源消耗和减少污染物排放^[1]。液体余压能量回收装置现较多采用液力透平、电机及增压泵三合一的装置回收能量, 存在着设备故障率高、效率损失大的问题^[2]。透平增压泵通过轴把透平与泵直连, 省去了离合器和外密封, 可有效提高能量回收效率和设备可靠性^[1,3]。设计透平增压泵的一般流程为, 首先根据系统工况参数选择或设计透平侧水力模型, 然后基于扬程和流量要求选择或设计同转速下的泵模型, 再经过流场分析和参数优化得到较高效率的两侧水力模型, 最后进行样机生产和测试。在以上设计流程中, 一般只考虑两侧模型参数在设计工况点的匹配, 未充分考虑变工况下两侧参数的匹配。本文中以合成氨脱碳工艺系统为例, 研究能量回收透平增压泵两侧模型高效匹配规则, 并基于匹配规则设计适用该工艺系统的高效率透平增压泵。

1 带透平增压泵合成氨脱碳工艺系统

如图1所示, 根据合成氨碳丙烯液脱碳的工艺特点和参数要求, 增加适应其工艺参数的透平增压泵。相较于原有脱碳工艺系统, 将耗能高的减压阀和高压贫液循环泵线路改为备用, 以透平增压泵线路作为主要工作管路, 新的工艺系统增压采用贫液



1—脱碳吸收塔; 2—液位调节阀; 3—快速切断阀; 4—节流阀; 5—辅助泵; 6—旁通阀; 7—透平增压泵; 8—循环供料泵 1#; 9—循环供料泵 2#; 10—脱碳再生塔

图1 带透平增压泵的合成氨脱碳工艺系统

收稿日期: 2019-02-02; 修回日期: 2019-04-11

基金项目: 河北省高层次人才资助项目 (E2016100006); 河北省留学人员科技活动择优资助项目 (CL201607); 2017年河北省引进国外智力项目; 石家庄市重点研发计划项目 (181260164A)

作者简介: 纪运广 (1972-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为流体机械与节能技术, jiyg@hebust.edu.cn; 薛树旗 (1962-), 男, 本科, 教授, 研究方向为工业自动化与节能技术, 通讯联系人, 2540662947@qq.com。

增压泵与透平增压泵泵侧共同增压,以达到原高压贫液增压泵的压力值。透平增压泵回收了原工艺通过减压阀减压排放的高压富液能量用于贫液的增压^[1]。

以需增压流量为 500 m³/h 的碳丙烯液脱碳工艺系统为例,设计工艺系统参数,并根据工艺系统参数设计透平增压泵的透平侧及泵侧水力模型。

针对工艺特点设计泵侧与透平侧,泵侧流量 500 m³/h,需增压到 2.3 MPa,透平侧排空 15% 流量作调节备用,可供透平使用的流量为 425 m³/h,工艺系统需要最低的 0.4 MPa 压力,可利用压降为 1.4 MPa。利用以上参数对透平增压泵进行设计,如表 1 所示。

表 1 透平增压泵的工艺参数

参数	数值	参数	数值
系统工艺流量/(m ³ ·h ⁻¹)	500	透平出口压力/MPa	0.4
透平流量/(m ³ ·h ⁻¹)	425	泵流量/(m ³ ·h ⁻¹)	500
透平进口压力/MPa	1.8	泵出口压力/MPa	2.3

2 两侧模型设计及模拟

2.1 透平侧模型

为了提高透平侧水力模型的效率及实现较宽的高效率流量区间,在转速选择时选择高效率比转速模型。转速选择为 3 000 r/min,为了拓宽透平侧的高效率区间,透平侧的水力模型采用专用径向液力透平设计^[3]。依据表 1 工艺给定的设计参数,对专用径向液力透平模型优化后得到的叶轮主要几何参数见表 2。

表 2 液力透平叶轮的主要几何参数

名称	数值	名称	数值
叶轮出口直径 D_1 /mm	140	叶轮进口角度/(°)	90
叶轮进口直径 D_2 /mm	304	叶轮出口角度/(°)	37.5
进口宽度 b_2 /mm	26	叶轮叶片数	6

2.2 透平侧模拟计算

利用 BladeGen 导出的图形在 Solid Works 中建模并且装配,整体的流域包括叶轮、蜗壳、尾水管 3 部分。蜗壳采用侧面出口的圆形截面蜗壳,叶轮出口后接的直管段部分采用叶轮出口直径 4 倍长度的直管段。将整体的过流部件在图形中装配完成后如图 2 所示。对叶轮、蜗壳及尾水管进行网格划分,叶轮采用 T-gird 进行结构化网格划分,划分结果如

图 3 所示^[4]。

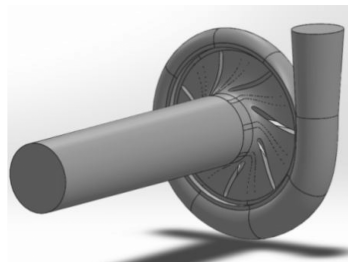


图 2 透平侧全流场计算模型装配图

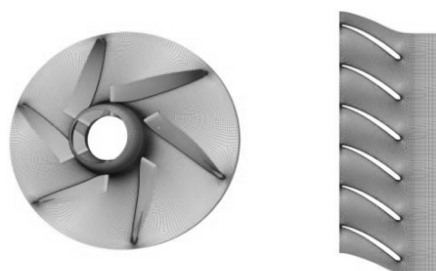


图 3 结构化网格划分

2.2.1 网格无关性检查

全流场网格进行了网格无关性检查,当总网格数量在 85 万以上的时候,轴功率和效率的偏差在 0.5% 以内,因此本文中用于数值计算的网格在 85 万以上。

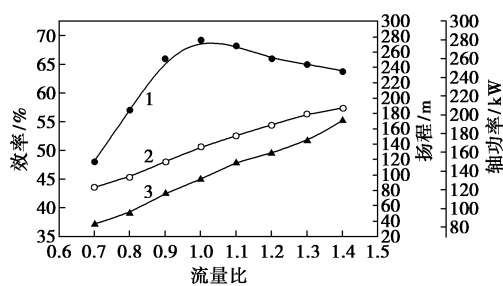
2.2.2 CFX 求解设置

利用 WORKBENCH-CFX16.0 模拟透平增压泵的透平侧模型进行包括蜗壳、叶轮及尾水管 3 部分组成的全流域定常数值分析。

使用 Turbo Mode 设置透平,选用 Radial Turbine 模式,分析状态选择定常分析。之后定义叶轮为转子 R1,蜗壳与扩散管设置为定子 S1、S2。固壁面为无滑移边界,近壁区应用标准壁面函数,叶轮转速为 3 000 r/min,动静交接面 (Inter-face) 为 Frozen Rotor,过流表面的粗糙度为 50 μm,收敛残差标准为 10⁻⁵。设置压力进口、质量流量出口边界条件,介质为 25℃ 的水,改变流量大小,模拟透平过流部分在不同流量压力下的性能。

2.2.3 透平外特性曲线

数值模拟得到了不同流量下的透平侧外特性数值,利用数值绘制透平侧的外特性曲线,如图 4 所示。设计工况点为最佳效率点,最高效率为 69.5%,压力水头降低 141 m,输出轴功率 136.1 kW;图 5 显示透平进口最大压力值为 1.77 MPa,满足工况设计要求。



1—透平侧效率;2—透平侧扬程;3—透平侧轴功率

图 4 透平侧外特性曲线

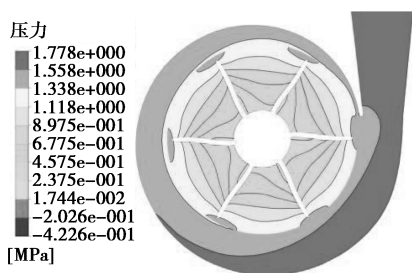


图 5 透平侧内部流场压力云图

在 Q_{BEP} 流量点处的扬程为 141 m, 输出轴功率为 136.1 kW, 由式(1)计算可以得到泵侧扬程为 74.8 m, 当泵侧扬程小于 74.8 m 时透平输出功率可以满足泵侧所需功率。泵侧与 1 个中压泵串联共同达到 2.3 MPa 的增压值, 在透平增压泵泵侧前需要 1 个扬程为 160 m 的增压泵, 泵侧所需要的压力水头增加为 70 m。依据可增压值与工艺系统参数设计泵侧水力模型参数, 见表 3。

$$H = 1000P\eta/\rho gQ \quad (1)$$

表 3 透平增压泵泵侧叶轮参数

名称	数值	名称	数值
叶轮出口直径 D_1 /mm	170	叶轮出口角度/(°)	22.5
叶轮进口直径 D_2 /mm	260	叶轮叶片数	6
进口宽度 b_2 /mm	44		

2.3 泵侧模拟计算

透平增压泵的泵侧模型同样利用 WORKBENCH-CFX16.0 进行包括蜗壳、叶轮及尾水管 3 部分组成的全流域定常数值分析。图 6 为用于模拟计算的泵

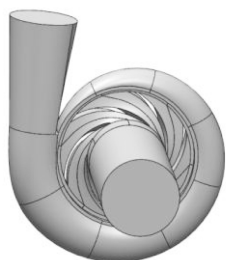
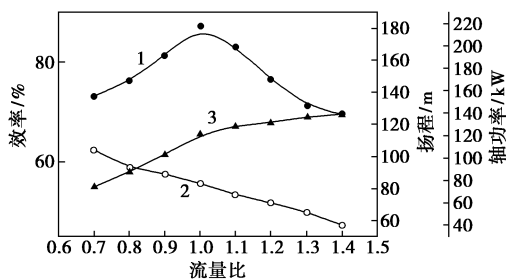


图 6 泵侧全流场装配图

侧全流场装配图。

泵侧的模拟过程设置与透平侧相同, 转速设置为 3 000 r/min, 改变流量大小, 模拟泵侧过流部分在不同流量压力下的性能。

如图 7 所示, 设计得到的泵侧模拟结果在设计工况流量处达到最高效率 87.2%, 扬程可达 76 m, 如图 8 所示, 泵侧出口压力最高为 2.37 MPa, 满足设计的 2.3 MPa 的增压值要求。



1—泵侧效率;2—泵侧扬程;3—泵侧轴功率

图 7 透平增压泵泵侧外特性曲线

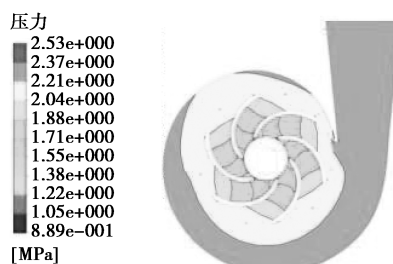


图 8 泵侧内部流场压力云图

3 透平增压泵两侧匹配关系

决定透平增压泵的能量回收效率因素有 2 点: 第一点是透平增压泵透平侧与泵侧两侧的水力模型效率。能量从透平侧液体压力能转化为透平增压泵转子动能, 动能再转化为泵侧液体的压力能, 提高两侧水力模型效率可有效提升透平增压泵的能量回收效率。第二点是通过两侧的相关的流量与轴功率参数关系保证透平增压泵两侧同时在高效率区间内运行。

3.1 两侧流量关系

根据碳丙烯液脱碳工艺流量的数据, 进入泵侧需增压的流量为 500 m³/h, 进入透平侧的流量为 425 m³/h, 留有 15% 的流量排空作为调节余量, 当泵侧流量发生变化时, 透平侧流量与泵侧流量比例不变, 比值为 85%, 通过此比值可将透平侧与泵侧模型的模型工况对应起来。

3.2 轴功率关系

透平侧通过刚性轴连接泵侧并传递能量,两侧转速相同。透平输出的扭矩需大于泵侧所需扭矩才能实现泵侧对过流液体的增压要求。

$$P = M\omega \quad (2)$$

当角速度相同时,则需要透平侧输出轴功率大于泵侧所需轴功率,即可实现透平助推的目的。

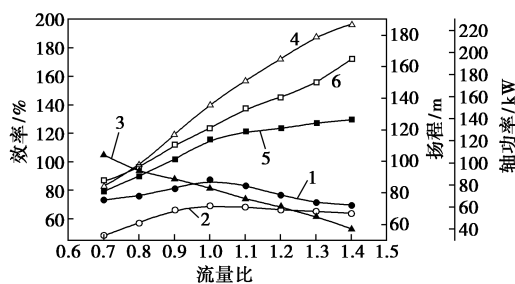
3.3 泵侧及透平侧外特性曲线

在获得高效率区间的泵侧轴功率变化区间后,参考离心泵原动机功率计算公式,汽轮机与液力透平的功率余量系数取值近似,系数取值为1.1,一体化设计为一体式传动方式,传动装置效率选择直联传动效率,传动效率为1.0。可计算出泵侧所需的透平侧轴功率^[5]:

$$P_T = (k/\eta_i)P_p \quad (3)$$

式中, P_p 为泵侧所需轴功率; P_T 为透平侧输出轴功率; H_i 为传动效率; η_i 为传动装置效率; k 为余量系数。

以 $0.84Q_{BEP} \sim 1.23Q_{BEP}$ 高效率区间的泵侧轴功率范围94.2~135.3 kW,按式(1)~(3)计算可得到泵侧所需功率范围为103.6~148.8 kW,通过计算得到的各对应点绘制泵侧所需轴功率的曲线。对比泵侧所需轴功率曲线与透平侧输出轴功率曲线可知,透平输出功率曲线始终在泵侧所需轴功率曲线上方,满足透平侧始终助推的动力要求。透平侧可输出轴功率区间109.6~163.4 kW满足泵侧所需的功率。透平增压泵两侧外特性曲线见图9。



1—泵侧效率;2—透平侧效率;3—泵侧扬程;
4—透平侧扬程;5—泵侧轴功率;6—透平侧轴功率

图9 透平增压泵两侧外特性曲线

3.4 透平增压泵能量回收效率计算

整体对比两侧外特性曲线后,在两侧水力模型高效水力效率区间为 $0.84Q_{BEP} \sim 1.23Q_{BEP}$,保证工况处于此区间内可以使得透平增压泵两侧都在一个高效率区间运行。

$$\eta = (Q_p H_p) / (Q_t H_t) \quad (4)$$

式中, Q_p 为泵侧流量; Q_t 为透平侧流量; H_p 为泵侧

扬程; H_t 为透平侧扬程。

当泵侧与透平侧介质相同时,透平增压泵的能量回收效率可由式(4)计算得出,同等时间内泵侧过流液体增压值与液体的流量乘积为已回收能量,透平侧的压降值与液体的过流流量乘积为可用能量^[6]。这两项的比值即为透平增压泵回收能量的效率,计算可得本文中设计的透平增压泵能量回收效率为58.8%;利用两侧模型效率相乘,可算出透平增压泵最佳效率为60.6%,二者误差为3.06%,验证了基于数值模拟的透平增压泵设计方法的可靠性和准确性。

4 结论

在现有合成氨脱碳工艺系统基础上增加了透平增压泵能量回收装置,依据系统参数设计了可满足工艺要求的透平增压泵,给出了透平增压泵两侧水力模型高效率匹配规则,得到了以下结论。

(1)按照合成氨碳丙烯脱碳工艺系统的要求设计优化了透平增压泵透平侧水力模型,并绘制了其外特性曲线,对模型进行了数值模拟和分析验证。设计得到的透平侧水力模型效率最高可达69.5%,扬程141 m,输出轴功率可达136.1 kW,利用可提供的轴功率值计算得泵侧可增压值0.7 MPa,设计得到泵侧水力模型效率最高可达87.2%,扬程76 m,满足该工艺系统参数要求。

(2)基于两侧同时满足高效区间时的轴功率匹配要求,利用两侧水力模型转速相同、流量比为0.85参数关系,确定了两侧的对应工况,进而得到了透平增压泵高效率匹配规则。在两侧模型的对应工况的 $0.84Q_{BEP} \sim 1.23Q_{BEP}$ 高效率区间内,泵侧所需轴功率103.6~148.8 kW,透平侧输出轴功率109.6~163.4 kW,满足高效率区间的动力匹配需求。

参考文献

- [1] 纪运广,徐洋洋,薛树旗,等.透平增压泵在合成氨碳丙烯脱碳工艺中的应用研究[J].现代化工,2017,37(11):158-161,163.
- [2] 王晓晖,杨军虎,史凤霞.能量回收液力透平的研究现状及展望[J].排灌机械工程学报,2014,32(9):742-747.
- [3] 王桃,孔繁余,袁寿其,等.前弯叶片液力透平专用叶轮设计与实验[J].农业机械学报,2014,45(12):75-79.
- [4] Tamer AEI-Sayed, Amr A Abdel Fata. Performance of hydraulic turbocharger integrated with hydraulic energy management in SWRO desalination plants[J].Desalination,2016,379:85-92.
- [5] 关醒凡.现代泵理论与设计[M].北京:中国宇航出版社,2011.
- [6] 纪运广,刘彤,李洪涛,等.透平增压泵在垃圾渗滤液处理工艺中的应用[J].水处理技术,2018,44(6):94-96,100. ■