



行星变频调速技术应用于电厂给水泵节能改造的探索

朱振荣¹, 刘子军², 张哲宏³, 郑红旗²

(1. 中国船舶集团有限公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150078; 2. 晋控电力塔山发电山西有限公司, 山西 大同 037000;
3. 晋控电力新疆综合能源项目部, 新疆 哈密 839000)

摘 要:针对电泵机组液力耦合器调速效率低的问题, 研制了首台全国产化行星变频调速装置, 与高压变频调速技术对比, 该技术在综合调速效率、可靠性及改造便利性方面均领先。塔山电厂 600 MW 燃煤机组 1B 给水泵组实施行星变频调速技改实例表明: 该装置全负荷工况下综合调速效率在 91% 以上, 最高调速效率可达 96%, 节能效果非常显著。除火电领域的泵与风机节能应用外, 该型设备还可应用于石油化工、天然气传输等需求大型泵、风机等调速节能领域, 应用前景广阔。

关 键 词: 电厂给水泵; 行星齿轮; 调速; 液力耦合器

中图分类号: TM621 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2022.05.020

[引用本文格式] 朱振荣, 刘子军, 张哲宏, 等. 行星变频调速技术应用于电厂给水泵节能改造的探索[J]. 热能动力工程, 2022, 37(5): 143-148. ZHU Zhen-rong, LIU Zi-jun, ZHANG Zhe-hong, et al. Research on planetary frequency conversion speed regulation technology applied in energy saving transformation of feed water pump[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(5): 143-148.

Research on Planetary Frequency Conversion Speed Regulation Technology applied in Energy Saving Transformation of Feed Water Pump

ZHU Zhen-rong¹, LIU Zi-jun², ZHANG Zhe-hong³, ZHENG Hong-qi²

(1. No. 703 Research Institute of CSSC, Harbin, China, Post Code: 150078; 2. JINNENG Tashan Power Generation Shanxi Co., Ltd, Datong, China, Post Code: 037000; 3. JINNENG Xinjiang Comprehensive Energy Project Department, Hami, China, Post Code: 839000)

Abstract: In view of the low speed regulation efficiency of the hydraulic coupling of the electric feed pump unit, the first national planetary frequency conversion and speed regulation device is developed. Compared with the high-voltage frequency conversion and speed regulation technical transformation, this technology is leading in terms of comprehensive speed regulation efficiency, reliability and transformation convenience. The example of planetary frequency conversion and speed regulation technical transformation of 1B feed pump unit of 600 MW coal-fired unit in Tashan power plant shows that the comprehensive speed regulation efficiency of the unit under full load condition is more than 91%, and the maximum speed regulation efficiency can reach 96%. The energy-saving effect is very remarkable. In addition to the energy-saving applications of thermal power pump and fan, it can also be used for energy-saving and speed regulation of large-scale pump and fan in the fields of petrochemical industry and natural gas transmission with broad prospect.

Key words: generating station feed pump, planet gear, speed regulation, hydraulic coupling

引 言

在电力发展新形势下,火电产业形势严峻,煤电产能过剩、电力市场竞争日趋激烈。“3060”双碳目标的提出将对我国现行以煤为主的能源结构带来冲击,可再生新能源电力在3~5年内将会大规模替代煤电^[1],机组利用小时数大幅下降,且调峰频繁,煤电机组大部分时间处于低负荷区间运行,参与深度调峰^[2-3]。煤电的竞争力被进一步削弱,使燃煤发电企业的运行成本大幅增加,面临巨大的经营压力,因此对火电机组的能耗水平提出更高的要求。

给水泵是火电机组的核心设备之一,也是火电厂最大的辅助设备,亚临界直接空冷机组电动给水泵的耗电率一般在3%左右^[4],对应机组供电煤耗约10 g/(kW·h)^[5],电动给水泵组的经济性对机组整体的经济性影响较大。另外,电网公司采用对机组发电出力进行调度的方式,厂用电率对机组上网电量的影响较大,直接影响电厂的售电收入。因此,通过技术手段降低给水泵耗电率可有效降低机组供电煤耗,提高上网电量,提升企业经济效益^[6-8]。

1 给水泵组改造必要性

1.1 给水泵组能耗矛盾分析

晋控电力塔山电厂(以下简称塔山电厂)电动给水泵通过液力耦合器驱动和调速,电动给水泵组布置如图1所示。

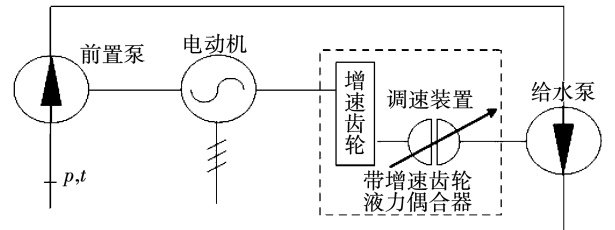


图1 电动给水泵组示意图

Fig.1 Schematic diagram of electric feed pump set

前置泵和给水泵由电动机同轴驱动,前置泵定速运行,给水泵则根据机组负荷及运行优化曲线,通过液力耦合器进行调速,改变泵组出口流量和压力,匹配机组运行需要。液力耦合器是电动给水泵实现调速的关键。

电动给水泵组的能量传递过程为:

$$P_{dj} = \frac{P_{mpyx}}{\eta_{dj} \times \eta_{ohq} \times \eta_{mp}} + \frac{P_{qpyx}}{\eta_{dj} \times \eta_{qp}} \tag{1}$$

式中: P_{dj} —电动机输入功率,kW; P_{mpyx} —给水泵有效功率,kW; P_{qpyx} —前置泵有效功率,kW; η_{dj} —电机效率,%; η_{ohq} —液力耦合器效率,%; η_{mp} —给水泵效率,%; η_{qp} —前置泵效率,%。

根据式(1),机组负荷一定,即给水泵有效功率和前置泵有效功率已确定,决定电动给水泵组耗功的因素是电机效率、液力耦合器效率、给水泵效率和前置泵效率。

目前,电动机、给水泵和前置泵的设计水平、制造工艺、安装调试以及日常运行维护与检修已相当成熟,极少存在效率偏低的现象。因此,决定电动给水泵组耗功的最主要矛盾在于液力耦合器的效率。

1.2 塔山电厂1A给水泵性能试验结果

塔山电厂委托中广核苏州热工院(简称热工院)对1A给水泵(液力耦合器调速给水泵组)进行了性能试验,结果如表1所示。

表1 塔山电厂1A电泵液力耦合器性能试验结果
Tab.1 Performance test results of 1A electric pump hydraulic coupling in Tashan power plant

工况/ MW	机组负 荷/MW	运行 模式	给水泵 流量/ t·h ⁻¹	给水泵 扬程/m	给水泵 转速/ r·min ⁻¹	液偶勺 管开 度/%	液偶传 动效 率/%
580	573.3	双泵	975.9	2 035.4	4 599	67.37	89.34
520	523.3	双泵	859.3	1 920.7	4 380	61.15	83.53
470	470.0	双泵	775.1	1 907	4 306	59.42	81.74
405	401.8	单泵	1 370.95	1 716.6	4 776	71.69	92.47
350	352.9	单泵	1 143.76	1 505.5	4 259	61.2	78.69
270	270	单泵	905.82	1 433.9	3 882	53.86	71.67

电厂1号机组在270~405 MW工况区间,给水泵采用单泵运行模式,液力耦合器勺管开度为53.86%~71.69%,效率为71.67%~92.47%;机组在470~580 MW工况区间,给水泵采用双泵运行模式,液力耦合器勺管开度为59.42%~67.37%,效率为81.74%~89.34%。

1.3 改造的必要性分析

分析表1中数据可以得出以下结论:

(1) 液力耦合器的传动效率与转速成正比关系,即转速越高,效率越高,这与液力耦合器的传动

原理相符^[9]。

(2) 在 405 MW 工况下,单泵运行,液力偶合器最高效率达到了 92.47%,接近其额定效率。这说明塔山电厂的液力偶合器选型合适,液力偶合器已达效率上限^[10],在不改变调速方式的前提下已无优化空间。

(3) 在试验的几个负荷下,液力偶合器效率为 71.67%~92.47%,仍有较大的提效空间。并且,随着将来新能源占比进一步扩大,火电厂负荷持续走低,液力偶合器效率进一步线性降低,效率提升空间进一步增大。

2 行星变频调速技术介绍

2.1 行星变频调速原理

行星变频调速是通过行星齿轮差动传递原理实现的。所谓差动,通俗理解就是两个输入,一个输出,两个输入中一个定速运行,一个变速运行。行星变频调速装置本体中主要构件有齿圈、行星架和太阳轮,如图 2 所示。齿圈连接输入轴,输入轴由工频电机驱动,充当行星齿轮差动轮系的一个输入,定速运行;行星架连接调速轴,由变频小电机驱动,充当行星齿轮差动的另一个输入,变速运行;两个输入通过行星齿轮差动轮系的传动耦合关系将功率合流至太阳轮,太阳轮连接输出轴,输出至给水泵轴。通过调节行星架转速,可无级调节太阳轮输出轴转速,行星差动轮系各构件转速之间的关系遵循:

$$n_s = (1 + k)n_c - kn_r \tag{2}$$

式中: n_s —太阳轮转速, r/min; k —行星齿轮传动轮系的特性常量参数,无量纲; n_r —齿圈转速,即工频电机输出转速, r/min; n_c —行星架转速,由变频小电机控制, r/min; 从公式可以看出, n_s 可实现无级调速。

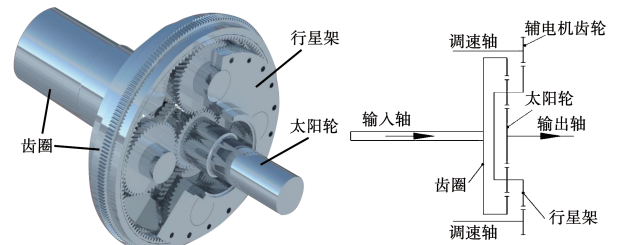


图 2 行星变频调速示意图

Fig. 2 Schematic diagram of planetary frequency conversion speed regulation

2.2 行星变频调速装置

行星变频调速装置是将机械传动的高效率、高可靠性与变频调速的高效性两种技术优势结合而研发的一种装置,如图 3 所示。行星变频调速装置由变频小电机与行星齿轮本体两部分组成。约 75% 的功率通过纯机械的方式实现传递,由工频主电机直接驱动齿圈,通过行星齿轮啮合关系刚性传递至太阳轮输出轴(给水泵轴),这部分功率的传递损失极小,传递效率高于所有其他调速方式,且可靠性极高;约 25% 的功率以变频的方式进行调速,这部分功率的传递效率与传统高压变频相当,整个行星变频调速装置传递效率加权计算后,其综合传递效率极高。简而言之,行星变频调速技术基于行星差动功率分流原理,保证大部分功率不参与调速而是直接刚性传递,负责调速的为小功率变频电机。

当给水泵在较高转速范围工作时,小功率变频电机作为电动机向行星齿轮输出功率;当给水泵运行在较低转速范围内,小功率变频电机作为发电机,回收一部分原本应转化为热能的能量(回收冷源损失),使得原本就高效的行星变频调速方式更加高效。



图 3 行星变频调速装置组成

Fig. 3 Composition of planetary frequency conversion speed regulation device

3 高压变频与行星变频技改方案对比

3.1 效率对比

高压变频与行星变频技术方案效率计算结果对比如表 2 所示。高压变频技改方案机组效率(不含给水泵)在 30% THA~100% THA(热耗率验收工况)下皆低于行星变频技改方案。分析原因:行星变频技改方案中绝大部分功率(约 75%)不参与调速而是无能量转换、直接刚性传递至给水泵^[10],其传递效率是任何调速方式无法比拟的;而剩余小部

分参与调速的功率传递保持与高压变频技术方案相当的效率。

表 2 高压变频与行星变频技术方案效率对比
Tab.2 Comparison of efficiencies between high voltage frequency conversion and planetary frequency conversion technical schemes

工况	效率/%	
	高压变频	行星变频
100% THA	90.96	93.27
75% THA	89.07	92.80
50% THA	87.17	92.34
30% THA	85.28	91.87

计算说明:高压变频机组效率(不含给水泵) = 变频器效率 × 电动机效率 × 齿轮箱效率;行星变频机组效率(不含给水泵) = 75% × 电动机效率 × 行星齿轮箱 1 效率 + 25% × 变频器效率 × 辅助电机效率 × 行星齿轮箱 2 效率;电动机与辅助电机效率统一取定值 0.96, 齿轮箱效率取定值 0.987, 行星齿轮箱 1 效率取定值 0.985, 行星齿轮箱 2 效率取定值 0.97;高压变频器与小变频器效率取值相同,随着主机工况下降,变频器效率也下降,100% THA 工况取值 0.96,75% THA 工况取值 0.94,50% THA 工况取值 0.92,30% THA 工况取值 0.90。

3.2 可靠性对比

行星变频技改方案只有约 25% 功率参与调速,这意味着配套的变频器容量为常规高压变频方案的 1/4。变频器的可靠性与其容量成线性反比关系,故在变频调速模块,行星变频技改方案的可靠性是高压变频的 4 倍^[11]。另外,行星变频技改方案中约 75% 功率为纯机械齿轮传动,可做到 30 年无故障。综合来说,行星变频技改方案的可靠性优于高压变频方案。

3.3 改造便利性对比

行星变频调速改造布置可实现 1:1 替换,即行星变频调速设备可根据现场条件进行定制化设计,保证新设备的轴向尺寸、接口与原液力耦合器一致,给水泵组中电机、主给水泵、前置泵和管道等设备位置无需变动,大大减少了改造的工作量。

行星变频技改方案改造工程量显著少于高压变频技改方案,如表 3 与图 4 所示。

表 3 两种技改方案改造便利性对比
Tab.3 Comparison of transformation convenience between two technical transformation schemes

行星变频技改方案	高压变频技改方案
增加定制化的行星变频设备,尽量利用旧装置,接口保持与原液力耦合器一致,以替换原液力耦合器;	液力耦合器改造为工/变频切换型液力耦合器或更换全新齿轮箱 ^[12] ;
增加小容量变频器,就近布置,无需单独建变频器室;	增加全容量变频设备,增设单独变频器室,铺设动力电缆;
增加辅助电机地基。	增加前置泵电机与地基,某些情况下还需改管路 ^[13] 。

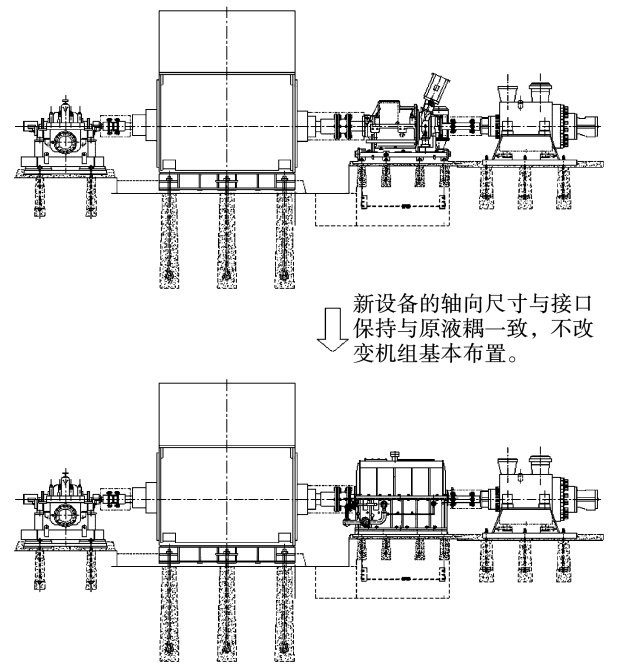


图 4 给水泵行星变频改造 1:1 替换示意图
Fig.4 Schematic diagram of 1:1 replacement of planetary frequency conversion transformation of feed pump

综合比较效率、可靠性和改造的便利性,最终选择了技术方案更优的行星变频技改方案。

4 行星变频技改工程

塔山电厂 1B 给水泵行星变频改造于 2020 年 11 月 17 日开始,至 2020 年 12 月 23 日结束。由于

该项目为国内首个 600 MW 机组给水泵行星变频改造项目,改造周期为 37 天,若刨除浪费的时间,行星变频技改工程改造周期应可控制在 30 天内。图 5 为塔山电厂 1B 行星变频调速装置电动给水泵组实物图。



图 5 塔山电厂 1B 行星变频调速装置电动给水泵组

Fig.5 Electric feed pump set of 1B planetary frequenay conversion speed regulation device in Tashan power plant

为了验证行星变频调速改造的节能效果,塔山电厂委托中广核苏州热工院在机组正常运行负荷范围(270 ~ 580 MW)内对 1A、1B 给水泵组进行性能对比测试(1A 为未技改的液力偶合器调速机组、1B 为技改后的行星变频调速机组)。

依据测试数据及计算结果,结合试验期间观察到的机组运行状况,得出结论^[14]:

(1) 行星变频调速装置在机组正常运行负荷范围内调节顺畅、响应迅速,完全满足机组正常运行期间的给水流量调节要求。

(2) 在机组正常运行负荷范围(270 ~ 580 MW)内,行星变频调速装置的综合调速传动效率(包含机械系统、变频电机系统、润滑系统和冷却系统等损失)在 91% 以上,最大效率超过 95%,详细数据见表 4。

(3) 行星变频调速装置的传动性能相比液力偶合器而言,无论在高负载率还是低负载率下,前者的传动效率均高于后者;而且,随着负载率的下降,两者的效率差距急速加大,或者说后者的传动效率对负载率非常敏感,随负载率的下降而急剧降低,但前者的传动效率相对稳定,当负载率下降时,传动效率缓慢下降。

表 4 性能试验数据表

Tab.4 Performance test data sheet

工况/ MW	机组负 荷/MW	运行 模式	给水流 量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	给水泵 扬程/m	给水泵转 速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	行星模 拟勺管 开度/%	行星变 频传动 效率/%
580	573.3	双泵	952.38	2 034.6	4 624	65.2	95.17
520	523.3	双泵	847.39	1 920.1	4 400	59.97	94.94
470	470.0	双泵	776.39	1 906.7	4 324	58.25	94.84
405	404.8	单泵	1 397.86	1 692.9	4 830	70.09	95.14
350	349.9	单泵	1 154.87	1 515.5	4 322	58.29	92.59
270	270	单泵	889.05	1 473.2	3 940	49.48	91.01

根据试验数据,并参考塔山电厂 1 号机组 2020 年负荷情况,1B 给水泵组实施行星变频调速技术改进后,年节约厂用电 573.48 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$,详细数据见表 5。节约的厂用电量若变成售电量,上网电价按 0.35 元/ $(\text{kW} \cdot \text{h})$ 计,则新增年收益为 200.72 万元。

表 5 1B 给水泵组技术改造后的年节约电量估算

Tab.5 Estimation of annual power saving after technical transformation of 1B feed pump set

负荷区 间/MW	运行时 间/h	时间节电 量/ $\text{kW} \cdot \text{h}$	单区间累计节 电量/ $\text{kW} \cdot \text{h}$
550 ~ 600	254	392.76	99 792
490 ~ 550	1 191	695.23	828 014
430 ~ 490	966	775.08	748 568
370 ~ 430	1 913	338.44	647 508
310 ~ 370	1 467	953.72	1 398 885
240 ~ 310	1 594	1 262.63	2 012 071
合计	7 385	—	5 734 838

塔山电厂给水泵原配的液力偶合器在单泵高负载运行工况下实测传动效率接近额定值,这表明液力偶合器的选型较为合理,但给水泵中、低负载运行时,液力偶合器效率迅速下降。总体来说,液力偶合器综合传动效率较低,技改后节能与收益效果明显。

另外,对于大部分液力偶合器选型过大的电厂与参与深度调峰的电厂来说,实施行星变频调速装置替代后,节能和收益效果将更为显著。

5 结 论

行星变频调速装置应用于电厂给水泵节能改造的应用实践,是给水泵节能领域的一项新突破,实现了电厂机组全负荷工况下综合调速传动效率达 91% 以上,最高调速传动效率超过 95%,大大提高给水泵组调速传动效率,节能效果显著。经热工院实测,单台给水泵组实施技术改进后年可节约用电 573.48 万 kW · h;新增年收益 200.72 万元。

行星变频调速装置是目前性能最好、效率最高的调速设备之一,具备完全自主知识产权,设备中所有元部件都立足国产化,不存在“卡脖子”风险,是我国少有的完全自主、性能优越的高端精品装备。行星变频调速装置在晋控电力塔山发电成功投运意味着我国在火电高端设备领域又打破并领先一项进口设备垄断,节省了大量外汇。除火电领域的泵与风机节能应用外,该型设备还可应用于石油化工、天然气传输等需求大型泵、风机等调速节能领域^[15-17],应用前景广阔。

参考文献:

[1] 袁家海,宋 岩.“十四五”电力行业煤炭消费控制政策研究[J].中国煤炭,2021,47(7):9-16.
YUAN Jia-hai,SONG Yan.Reserch on coal consumption control policies of the power industry during the 14th Five-Year Plan period [J].China Coal,2021,47(7):9-16.

[2] 郝木凯,查 浩,刘 嘉,等.促进大规模新能源消纳的综合技术措施研究[J].中国能源,2017,39(8):39-42.
HAO Mu-kai,ZHA Hao,LIU Jia,et al.Study on technical solutions of large-scale renewable energy grid integration[J].Energy of China,2017,39(8):39-42.

[3] 刘 鹏.火电厂参与调峰辅助服务策略研究[J].东北电力技术,2018,39(4):34-37.
LIU Peng.Research on coal fired generator participating in peak valley dispatching ancillary service strategy[J].Northeast Electric Power Technology,2018,39(4):34-37.

[4] 任治民,刘 俊.600 MW 亚临界直接空冷机组电泵改汽泵经济性分析[J].华北电力技术,2015(11):30-33.
REN Zhi-min,LIU Jun.Economic analysis on feed-water pump transformation for 600 MW subcritical direct air cooling unit[J].North China Electric Power,2015(11):30-33.

[5] 康朝斌,陈淑琴,杨 斌.300 MW 直接空冷机组电泵改汽泵可

行性探讨[J].山西电力,2014,185(4):50-52.
KANG Chao-bin,CHEN Shu-qin,YANG Bin. Discussion on feasibility of changing electric pump to steam pump for 300 MW direct air cooling unit [J]. Shanxi Electric Power, 2014, 185 (4): 50-52.

[6] 周正道,包伟伟,秦英武,等.600 MW 机组电动给水泵变频改造及经济性分析[J].浙江电力,2020,39(6):63-67.
ZHOU Zhen-dao,BAO Wei-wei,QIN Ying-wu,et al. Frequency conversion renovation of electric feedwater pump of 600 MW unit and the economic efficiency analysist[J].Zhejiang Electric Power, 2020,39(6):63-67.

[7] 谢 龙.塔山电厂 2 号机组电动给水泵变频调速系统的改造及效益[J].机电信息,2017(12):72-73.
XIE Long.Transformation and benefit of variable frequency speed regulation system for electric feed pump of unit 2 in Tashan power plant[J].Mechanical and Electrical Lnformation,2017(12):72-73.

[8] 曹锐杰.300 MW 机组电动给水泵变频改造应用[J].山西电力,2015(2):62-65.
CAO Rui-jie. Application of frequency conversion transformation of electric feed pump of 300 MW unit [J]. Shanxi Electric Power, 2015(2):62-65.

[9] 李春生,董 泳.高速大功率液力传动装置及其调速运行经济性[J].机床与液压,2014,42(1):63-67.
LI Chun-sheng,DONG Yong. High speed and big power hydrodynamic transmission device and its economy of variable speed governing operation [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2014, 42 (1): 63-67.

[10] 王爱林,吴广卫.火电厂电动给水泵调速方式的研究和应用[J].电力设备,2021,97(8):96-98.
WANG Ai-lin,WU Guang-wei. Research and application of speed regulation mode of electric feed water pump in thermal power plant [J]. Electric Equipment,2021,97(8):96-98.

[11] 余建宏.某中压变频器系统可靠性模型及预计案例分析[J].环境适应性和可靠性,2020(10):68-73.
YU Jian-hong. Reliability model and prediction case analysis of medium voltage converter system [J]. Environmental Adaptability & Reliability, 2020(10):68-73.

[12] 张鹏飞,权 凯.给水泵变频改造液偶功能是否保留问题的探讨[J].南方能源建设,2020,7(S2):107-112.
ZHANG Peng-fei,QUAN Kai. Feed water pump frequency conversion transformation function of fluid coupling the discussion on whether to retain [J]. Southern Energy Construction, 2020, 7 (S2):107-112.