

# 机电一体化行星齿轮调速与变频调速应用探讨

张鹏飞<sup>✉</sup>, 樊越

(深圳市汇川技术股份有限公司, 广东 深圳 518101)

**摘要:** [目的] 通过介绍行星齿轮调速与变频调速在火力发电厂液力耦合器调节的锅炉电动给水泵组节能改造的应用情况, 分析两种方案的适用性。[方法] 对行星齿轮调速本身能耗及实际应用案例进行分析, 同时与变频调速实际运行情况进行对比, 从安全、适用、可调范围、节能等方面, 判断火力发电厂液力耦合器调节的锅炉电动给水泵组节能改造是采用行星齿轮调速还是变频调速。[结果] 火力发电厂液力耦合器调节的锅炉电动给水泵组节能改造采用变频调速比行星齿轮调速节能率高、可调范围广、更适用且安全性也有足够保证。[结论] 火力发电厂液力耦合器调节的锅炉电动给水泵组节能改造, 变频调速更为适用。

**关键词:** 行星齿轮调速; 变频调速; 液力耦合器; 给水泵; 火力发电

中图分类号: TM611; TM621

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)S2-0059-09

开放科学(资源服务)二维码:



## Discussion on Application of Mechatronics Planetary Gear Speed Regulation and Frequency Conversion Speed Regulation

ZHANG Pengfei<sup>✉</sup>, FAN Yue

(Shenzhen Inovance Technology Co., Ltd., Shenzhen 518101, Guangdong, China)

**Abstract:** [Introduction] The applicability of the two schemes is analyzed through the application of planetary gear speed regulation and frequency conversion speed regulation in the energy-saving retrofit of the boiler electric feed pumps regulated by hydrodynamic couplings in the fossil-fuel power station. [Method] Through the analysis of the energy consumption of the planetary gear speed regulation itself and the practical applications, and the comparison with the actual operation of the frequency conversion speed regulation, from the aspects of safety, applicability, adjustable range and energy saving, this paper discussed whether to use planetary gear speed regulation or frequency conversion speed regulation for energy-saving retrofit of boiler electric feed pumps regulated by hydrodynamic couplings in the fossil-fuel power station. [Result] In the application, the frequency conversion speed regulation has a higher energy saving rate, wider adjustable range, and adequate safety guarantee, and is more applicable than the planetary gear speed regulation. [Conclusion] The frequency conversion speed regulation is more suitable for the energy-saving retrofit of the boiler electric feed pumps regulated by hydrodynamic couplings in the thermal power station.

**Key words:** planetary gear speed regulation; frequency conversion speed regulation; hydrodynamic coupling; feed pump; thermal power generation

2095-8676 © 2022 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

### 0 引言

液力耦合调速电动给水泵是发电厂生产过程中的主要辅机之一, 因液力耦合器相对于定速泵+调节阀的控制方式有着无级调速的优点, 因此, 我国在上

个世纪七十年代末期, 开始从国外引进并逐步有了国产化产品。考虑到性价比问题, 国产液力耦合器一段时期广泛应用于火力发电机组中。作为电厂最大辅机设备的电动机驱动给水泵, 虽然配有液力耦合器, 但给水泵耗电率一直居高不下, 直接影响到全

厂经济技术指标和节电效益。燃煤火力发电机组锅炉全配置的液力耦合器调速电动给水泵耗电量约占单元机组发电量的 2.5%~4% (因纯凝、供热、空冷、压力等因素不同而不同), 是机组辅机中最大的耗电设备<sup>[1]</sup>, 尤其是空冷机组, 厂用电率高达 10% 左右。以常规 330 MW 亚临界煤粉锅炉机组为例, 2 台给水泵电机容量相当于送风机、引风机和 1 次风机 6 台风机容量的总和, 耗去 35% 左右的厂用电。电动给水泵耗电的电功率除了正常所需外, 液力耦合器滑差调节产生的热耗损失了部分功率, 直接影响到全厂的供电煤耗、发电成本等指标。

按行业规定, 锅炉给水泵容量的选择都是根据机组最大连续工况来确定设计选型点, 确保机组长期运行后仍能维持额定出力, 并为给水泵从静止状态进入正常运行工况提供足够的启动动力, 辅机额定功率通常要比额定工况出力高出 10% 左右。为了保证机组能够适应各种负荷下的运行工况, 平衡辅机动力超出实际出力的偏差, 就要对辅机进行必要的出力调节。另外, 机组或辅机都有一个最佳的经济运行曲线, 设备的特性不同、调节手段、方式不同, 形成的实际运行工况会影响设备偏离经济运行曲线, 偏离多少将产生不同能量消耗, 所以, 改造给水泵非常必要。

一种被公认为是节能、高效的交流调速方式, 在工业领域内被广泛应用。用变频器替代液力耦合器控制锅炉给水泵也许是兼顾了投资和节电 2 个方面最合适的改造方法。变频调节给水泵转速与液偶间接调速不同, 变频器通过改变给水泵电动机的供电频率直接调节给水泵的转速, 始终让电动机具有较高的工作效率。同时, 电动机的功率消耗也与给水泵的转速有了 3 次方的关联关系 (当然实际给水泵组运行还受到系统工况的影响, 节能量未必和理论完全相符, 但节能的方向是确定的), 如果再改变液力耦合器的工作方式或干脆采用机械方式传递动力到给水泵, 液力耦合器的热损耗也被消除了。高压变频器直接调节给水泵电动机可降低给水泵组的用电损耗。因此, 给水泵变频节能改造方案作为首推最优方案应用于火力发电厂电动给水泵节能改造中<sup>[1]</sup>。

电动给水泵节能改造考虑的出发点不同, 改造方案也层出不穷, 广州某 300 MW 机组在给水泵节能改造中采用直接针对液力耦合器的方案, 将液力

耦合器 (型号 R16K400M) 替换为行星齿轮调速装置 (型号 VECO Driver/RE450-F5-42), 此型号行星齿轮调速装置<sup>[2]</sup> 在该电厂给水泵上的应用是全球的首个案例。目的是为了给水泵的节能, 但选择的方案值得认真商榷。要发掘给水泵节能空间, 首先要对整套给水泵组当前能耗进行分析。

为探讨行星齿轮调速装置与变频调速 2 种方案的实际适用性, 通过对液力耦合器能耗分解, 得出液力耦合器耗能点, 其次对给水泵变频调速与行星齿轮调速的设备本身数据进行比对、运行工况进行分析, 且结合采用变频调速进行节能改造的给水泵的实际运行情况。综合探讨液偶调节的锅炉电动给水泵组调速改造, 行星齿轮调速与变频调速哪种方案更为适用。

## 1 锅炉给水泵调速液偶改变频

### 1.1 液力耦合器调节的给水泵组能量损耗

液偶调速锅炉电动给水泵组的原理如图 1 所示。按现行设计标准规定, 锅炉给水泵选型点容量比机组 ECR 铭牌出力要高出 20% 左右。那么, 机组正常运行中, 机组即便在额定负荷运行, 电动给水泵仍然有 20% 的富裕容量。按电动机设计原理, 当轴功率偏离电动机额定功率时, 其功率因数和效率都将偏离电动机的最佳工作点, 将产生额外的能量损耗, 偏离额定功率, 损耗越大, 这部分损耗占电动给水泵组总损耗的 60%~75%。液力耦合器同样有能量损耗, 占比 25%~40%, 主要因为液偶调速时工作油摩擦

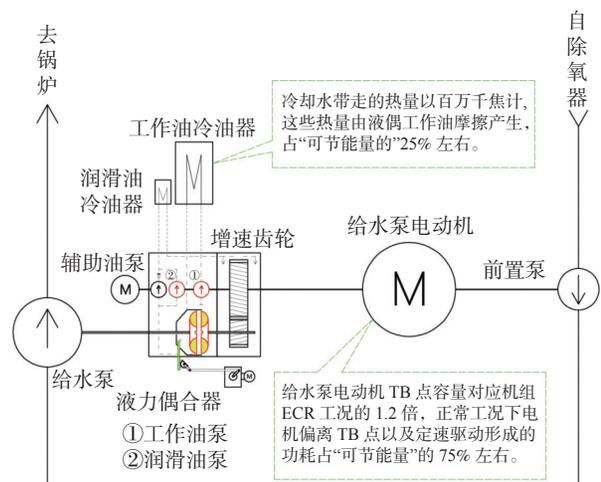


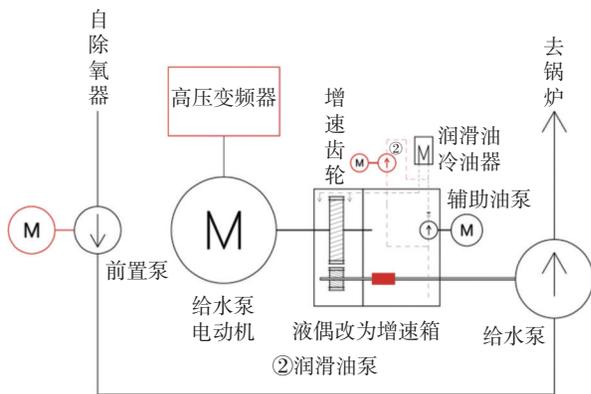
图 1 锅炉液偶调速电动给水泵能耗分析

Fig. 1 Energy consumption analysis of boiler electric feed pumps regulated by hydrodynamic couplings

生热产生的<sup>[3]</sup>。采用给水泵电动机增配高压变频器来实现给水泵的调速节能, 方案有多种。节能的理论依据是“泵与风机相似性定律”中的“电机功率与转速的 3 次方成正比”, 实际在组成给水泵泵组后, 系统特性对泵与风机相似性定律有一定偏移, 电机转速下降, 功率下降并没有达到 3 次方的函数关系, 但节能率在 12% ~ 40%(对应机组负荷率 100% ~ 60%) 毋庸置疑。

### 1.2 液偶调节的给水泵改变频调速方案

国内给水泵变频调速案例较多, 电厂里典型应用有以下两种: 一种是“纯电调”改造(图 2); 另一种是“电液并存”改造(图 3)<sup>[4]</sup>。纯电调改造有以下优点: 第一, 有最高的节能效果, 降低厂用电率可达 0.85% ~ 1.0%(年平均负荷 60% ~ 85% ECR); 第二, 具有与给水泵组改造前相同的调速范围(25% ~ 100%) 和全工况安全性能。纯电调方案尤其适配于 300 MW 以上机组。

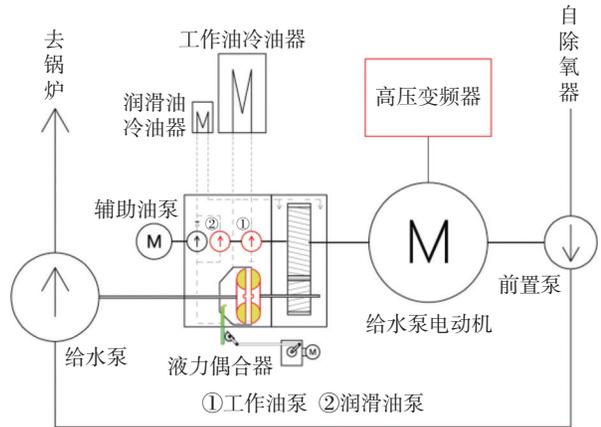


方案 1: 液偶改为增速箱, 纯电调调节方式, 前置泵独立定速工作

图 2 液偶改纯电调变频调速原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the principle of shift from hydrodynamic coupling to electric frequency conversion regulation

电液并存改造方案, 给水泵电动机增配变频器, 液偶保留, 泵组运行时, 液偶维持液力联轴器功能<sup>[5-6]</sup>。该种方案优点是改造相对简单, 相比纯电调方案整体节能效果低 25%。在极端运行工况下, 例如机组大幅度甩负荷, 安全性能与改前相比降低, 变频调速范围只有 60% ~ 100%, 液偶调速维持原有性能, 25% ~ 100%。国内给水泵纯电调方案最长已安全运行 14 年(电机额定功率 5.4 MW/6 kV), 纯电调改造单台给水泵电动机容量最大的为 11 MW/10 kV, 安全运行也有 5 年时间。



方案 2: 保留液偶功能, 电液并存调节方式, 前置泵驱动方式不变, 变转速工作

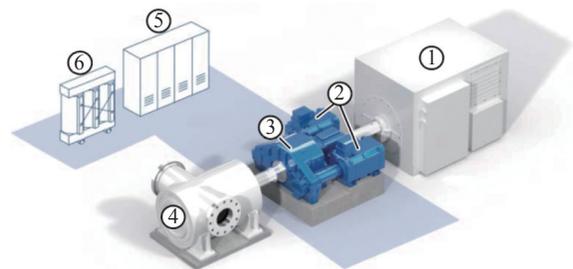
图 3 液偶改电液并存调速原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the principle of shift from hydrodynamic coupling regulation to a combination with electrohydraulic regulation

## 2 锅炉给水泵液偶调速改一体化行星齿轮调速

### 2.1 液偶调节给水泵改行星齿轮调速方案

在给水泵变频节能改造方案作为首推最优方案大量应用于火力发电厂电动给水泵节能改造之时, 市场上出现一套自认为最新的机电一体化行星齿轮转机调速方案, 利用行星齿轮调速替换原有液力耦合器, 一体化行星齿轮调速装置原理如图 4 所示。



注: 1—驱动电机; 2—伺服电机; 3—减速机; 4—工作机; 5—变频器+Voith control unit; 6—MV/LV 变压器。

图 4 机电一体化行星齿轮调速原理示意图

Fig. 4 Mechatronics planetary gear speed regulation principle schematic diagram

采用一体化行星齿轮调速替代原来液力耦合器调速的方案, 其改造完成后的原理如图 5 所示。行星齿轮调速装置的提供商公开资料显示采用的这一创新解决方案由机械行星齿轮和变频伺服电动机组成, 机电一体化行星齿轮调速装置是最为高效的转

速调节方式, 总体组件效率高达 90% 以上。据此, 该公司给出了机电一体化行星齿轮调速系统(型号 VECO Driver/RE450-F5-42)与 VFD 高压变频调速系统应用效率对比曲线, 从图 6 可见行星齿轮调速装置比高压变频器的效率高 2.5% ~ 3%。若果真如此, 采用该行星齿轮调速系统代替高压变频器对液偶调速给水泵组进行改造肯定更为节能, 但下结论之前有几个关键技术问题必须要进行分析。

## 2.2 机电一体化行星齿轮调速方案分析

首先, 我们把锅炉给水泵液偶调速与行星齿轮调速装置进行系统对比, 如图 7 所示, 利用行星齿轮调速装置调速取代液偶调速, 如果给水泵电动机没有增配高压变频器, 那么, 从能耗分析的角度看, 给水泵电动机原有的能耗损失依旧存在。道理很简单,

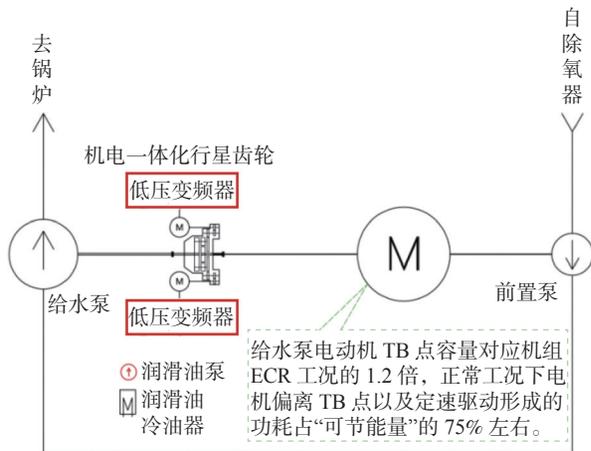


图 5 液偶调速改机电一体化行星齿轮装置调速原理示意图  
Fig. 5 Schematic diagram of the speed regulation principle of shift from hydrodynamic coupling to mechatronics planetary gear

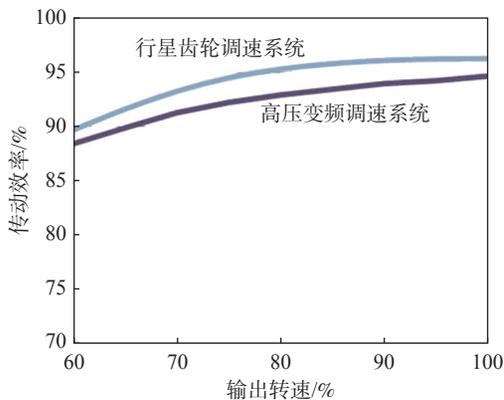


图 6 行星齿轮调速装置与高压变频器应用效率对比曲线图  
Fig. 6 Comparison curve diagram of application efficiency between planetary gear speed regulation device and high-voltage inverter

给水泵电动机没有做任何改动, 和原来的运行方式完全一样, 能耗损失自然不会减少。

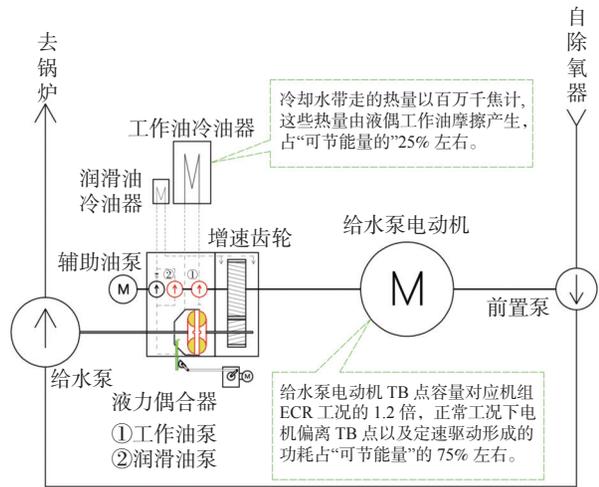


图 7 机电一体化行星齿轮调速与液偶调速对比

Fig. 7 Comparison of speed regulation of mechatronics planetary gear and hydrodynamic coupling

其次, 行星齿轮调速装置的工作效率再高, 即便为 100%, 节能效果也只能是行星齿轮调速装置和液力偶合器相对比, 节能的最大值就是液偶能量损耗的份额(占给水泵组总损耗的 25%), 如图 7 所示。既然用行星齿轮装置调速替换液力偶器调速, 就要与液力偶器进行全面技术比对, 液力偶器的效率要比行星齿轮装置调速低。但是, 液偶的调速范围是 25% ~ 100%, 要看行星齿轮调速装置是否能够与液偶的转速调整范围相同。如果行星齿轮变矩调速器调速范围是 55% ~ 105%, 给水泵启动初期的运行方式就需要仔细探讨, 内容涉及管道、再循环阀以及并泵方式等。

再者, 比较两者必须采用相同的边界条件、相同

的工作环境、相同的功能,如图 8 和图 9 所示。再看行星齿轮调速装置与高压变频器应用效率对比曲线,如图 6 所示,该曲线有明显的误导性。给水泵组节能改造,是系统性改造,单独 1 台设备的特性在成为系统中的一员后,特性会发生变化,加之起到的作用不同,对系统节能的贡献就要从系统整体效果来进行评价。就算是高压变频器比行星齿轮调速装置的设备效率低 2.5%~3%,但因变频器调节的是给水泵电动机转速,所以给水泵电动机的能量损耗可占给水泵组总损耗的 75%。电动机变频调速节能有理论根据也有实践证明,行星齿轮调速装置设备效率再高,节能效果也只能在给水泵组总损耗的 25% 范围内做文章。所以,离开具体的系统,具体的作用来谈单台设备的效率,给用户的视觉印象,机电一体化行星齿轮调速装置比电动机变频调速更节能,这并不

是单纯的技术性对比,如此会偏离基本事实。

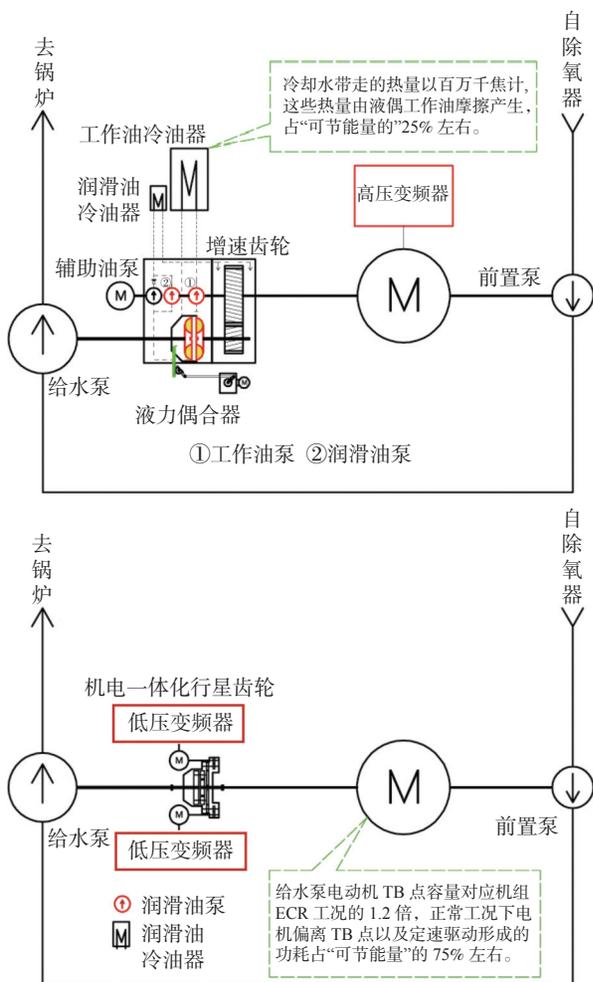


图 8 机电一体化行星齿轮装置调速与电机变频对比

Fig. 8 Comparison of speed regulation of mechatronics planetary gear device and motor frequency conversion

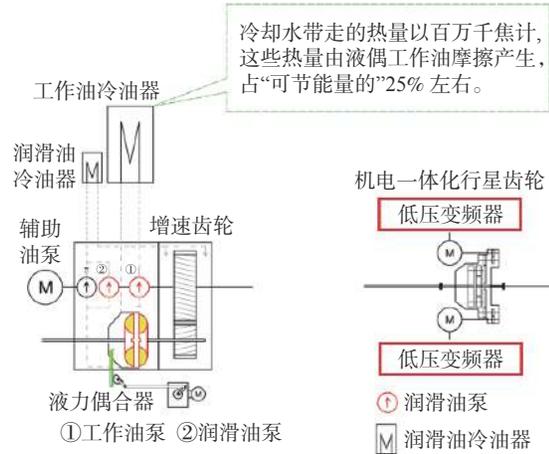


图 9 机电一体化行星齿轮装置与液力偶合器同比较

Fig. 9 Comparison of mechatronics planetary gear device and hydrodynamic coupling

最终,采用机电一体化行星齿轮调速装置调速方案,相当于更换了 1 台液力偶合器。但实际上改造的工程并非仅此而已,给水泵液偶调速泵组原有的液偶输入轴和输出轴并不同轴,水平间距 400 多 mm,而行星齿轮调速装置输入、输出同轴,改造是要大动干戈的,设备、基础都要动<sup>[7-8]</sup>,存在问题如下:

- 1) 行星齿轮调速装置比液力偶合器在设备和工程造价高;
- 2) 这种改造是否算过何时能够收回成本;
- 3) 行星齿轮调速装置长期的维护、检修费用是否考虑。(注:既然号称全球首台业绩,那么目前或短期内国内无人能检修,行星齿轮调速装置提供商派人来修,需沟通好价格,根据同类型设备比对,单单一项人工费就能让人惊到。当然,若不考虑费用,则一切自由。)

上述这些问题其实已仁者见仁智者见智。通过国内上百台的给水泵增配变频器方案比对,3 年左右,至多 5 年,即可收回投资成本。行星齿轮调速装置方案的成本回收时间大于给水泵增配变频器方案的成本回收时间。

### 3 节能效果比较

根据国内给水泵液偶调速改变频接近 200 台成功案例,以及对照液偶调速能耗分析,以节能效果最好的纯变频电调方案比液偶改行星齿轮调速装置(给水泵电机恒速)方案节电率要高出 75%<sup>[1]</sup>,两种方

案节能改造效果的对比图如图 10 所示。

## 4 机电一体化行星齿轮调速方案衍生问题

### 4.1 增加额外设备

行星齿轮调速装置替换原有液力耦合器<sup>[9]</sup>之前,电动给水泵启动采用工频直接启动,启动之时液力耦合器勺管一般开至 5% 位置,如此设置可使启动给水泵之时电动机输出功率小,电动机瞬间启动电流可控,待行星齿轮调速装置替换原有液力耦合器方案实施之后,调速范围只有 55%~100%,直接启动输出功率大,给水泵电动机启动瞬间冲击电流不可控,对厂用电网冲击很大,长年累月,大概率会发生因电动机启动电流大而导致电动机故障情况,电动机维修费用高,且修复周期长,影响机组安全运行,所以此种方案还要需要增配固态软启设备,如图 11 所示。

液力耦合器的英文名称是: GEARED VARIABLE SPEED COUPLING, COUPLING, 既可以翻译成“耦合”,也可以翻译成“联轴器”,因此,液偶实际上有一项重要的功能就是“联轴器”,那么行星齿轮调速装置也是联轴器,与液偶的功能基本一致,即便行星齿轮的传递效率高一些,但调速范围只有 55%~100%,而液偶的调速范围是 25%~100%<sup>[9]</sup>,行星齿轮的调速性能并不如液偶的调速性能。行星齿轮调速装置替换原有液力耦合器方案,给水泵电动机未增配高压变频器,却额外的增加高压固态软启,实际正

常运行中固态软启退出,多花了不该花的费用,还增加许多本不应该增加的维护成本,实不可取。

### 4.2 安全裕度降低

机电一体化行星齿轮装置是通过 Distributed Control System(DCS)、Voith Control Unit(VCU)及低压变频器相应电机模块单元之间的通信,实现从动轴的转速调节。通过分散式控制系统(DCS)从外部指定的转速额定值经过 VCU 处理,然后作为扭矩额定值传输至电机模块单元。扭矩额定值由电机模块单元处理,频率和电流经过相应设置。伺服电机把扭矩通过行星支架传输至行星齿轮,由此设置相应的从动转速。

简而言之,图 11 中 2 台 B 伺服电动机通过 2 台低压变频器+VCU(图 4 中的⑤)调节,根据负荷需要调节低压变频器更改伺服电机的转速从而控制从动轴(图 12 中的②)的输出转速,如果 2 台低压变频器中的任何 1 台变频器出现故障,那么该台行星齿轮装置便彻底失去调节能力,相比于高压变频调节方案的只增加 1 台高压变频器,此种改造方案增加 2 台低压变频器,故障风险明显增加。另外,高压变频器一般都具有单元旁路功能,即变频器中单元体出现故障,高压变频器会执行单元自动旁路功能,不影响高压变频器继续正常运行,然而低压变频器一旦发生故障,就立即停止输出,没有对应的预防措施,所以采用行星齿轮装置方案明显比高压变频调速方案安全裕度低。

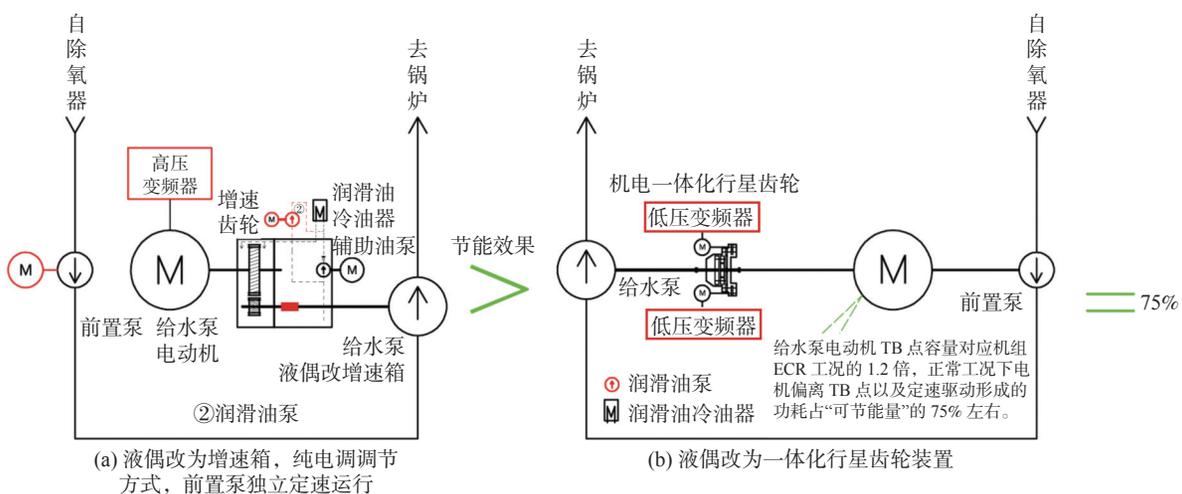
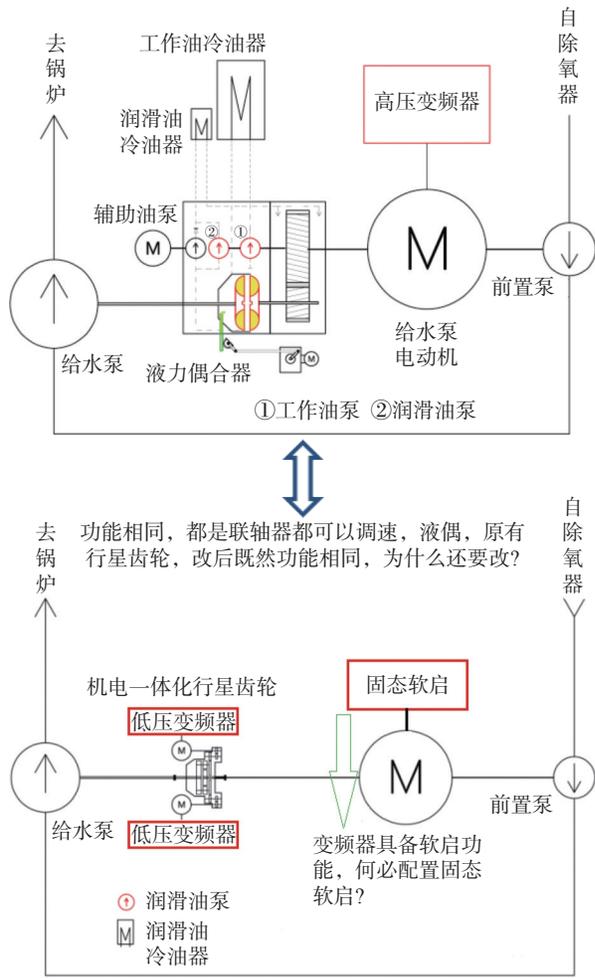
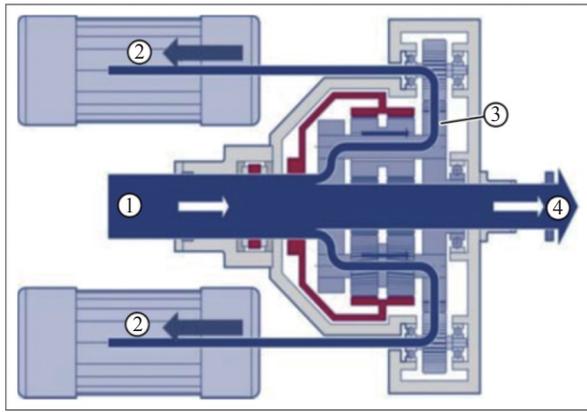


图 10 两种方案节能改造效果对比

Fig. 10 Comparison of energy-saving retrofit effects of two schemes





注: 1—传动侧; 2—伺服电机; 3—行星齿架; 4—从动侧。

图 14 发电机模式功率流向示意图

Fig. 14 Schematic diagram of power flow in generator mode

发电机模式下一部分功率根据运行状况通过伺服电动机经变频器馈电至电网,从能量平衡角度来讲没有能量损失,但是伺服电动机以及变频器都有额定效率,并且效率不可能为 100%,那么整个能量传递过程中必然存在能量损失,也就是说在整体调节过程中,输出轴转速低于回转点时,存在能量效率损失,而且是持续性的。

## 5 结论

1)随着国内电力电子技术的不断突破与发展,高压变频器的可靠性和维护便利性完全满足电长期运行安全的要求,在满足给水泵的调速性能方面,高压变频器优于机电一体化行星齿轮调速装置<sup>[2]</sup>。

2)投资费用高压变频器低于行星齿轮调速,给水泵变频改造中采用高压变频器调节方案节能效果比行星齿轮调速方案至少高出 75%,而且不会产生调节过程中的能量反馈情况,从而因传递效率问题产生的能量无故损失。

3)从投资、安全、节能以及施工难度多方面考虑,高压变频器在火力发电厂锅炉液偶调速电动给水泵的节能改造应用中比机电一体化行星齿轮调速装置更为合适。

### 参考文献:

[1] 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 R J. 300 MW unit of electric water pump frequency conversion transformation application [J]. Shanxi Electric

Power, 2015(2): 62-65.

- [2] 欧卫海. 液偶调速电动给水泵节能改造方案解析——行星齿轮变矩调速器与变频器方案对比 [J]. 南方能源建设, 2016, 3(增刊1): 22-26. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.S1.006.  
OU W H. Boiler feed water pump hydraulic coupler energy saving retrofit scheme——compare of planetary gear torque speed solution and variable frequency drive solution [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3(Supp. 1): 22-26. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.S1.006.
- [3] 周云健. 火力发电厂电动给水泵调速系统变频改造可行性探讨 [J]. 科技创新导报, 2016, 13(14): 35-36+38. DOI: 10.16660/j.cnki.1674-098X.2016.14.035.  
ZHOU Y J. Thermal power plant electric feed water pump speed control system of inverter feasibility study [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2016, 13(14): 35-36+38. DOI: 10.16660/j.cnki.1674-098X.2016.14.035.
- [4] 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(增刊2): 107-112. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.S2.017.  
ZHANG P F, QUAN K. Feed water pump frequency conversion transformation function of fluid coupling the discussion on whether to retain [J]. Southern Energy Construction, 2020, 7(Supp. 2): 107-112. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.S2.017.
- [5] 林灿铭, 陈暖文. 给水泵变频改造应用实例 [J]. 广东电力, 2010, 23(3): 76-79. DOI: 10.3969/j.issn.1007-290X.2010.03.019.  
LIN C M, CHEN N W. Case study of frequency control transformation of feedwater pump [J]. Guangdong Electric Power, 2010, 23(3): 76-79. DOI: 10.3969/j.issn.1007-290X.2010.03.019.
- [6] 徐甫荣. 发电厂锅炉给水泵变频改造方案分析(下) [J]. 变频器世界, 2014(5): 71-73+80.  
XU F R. Power plant boiler feed water pump frequency conversion retrofit scheme analysis (bottom) [J]. The World of Inverters, 2014(5): 71-73+80.
- [7] 张武志, 陈国松. 带前置泵的电动给水泵变频改造 [J]. 发电与空调, 2017, 38(2): 46-49.  
Zhang W Z, CHEN G S. With The Electric Feed Water Pump Booster Pump Frequency Conversion Transformation [J]. Power Generation & Air Condition, 2017, 38(2): 46-49.
- [8] 李乐, 张莉红, 张建茹. 液力耦合器能量回收系统 [J]. 发电与空调, 2015, 36(3): 14-17.  
LI L, ZHANG L H, ZHANG J R. Hydraulic Coupling Energy

Recovery System [J]. Power Generation & Air Condition, 2015, 36(3): 14-17.

- [9] 郜培刚. 300 MW发电机组电动给水泵变频技术改造 [J]. 同煤科技, 2015(3): 4-6.

GAO P G. Conversion Technology Transformation of Electric Feed Water Pump in 300 MW Generator Set [J]. Tongcoal Science and Technology, 2015(3): 4-6.

- [10] 李弘. 电动给水泵变频改造技术分析 [J]. 神华科技, 2018, 16(3): 51-53+81.

LI H. Analysis of Frequency Conversion Transformation Technology of Electric Feed Pump [J]. Shenhua Science and Technology, 2018, 16(3): 51-53+81.

作者简介:



张鹏飞

张鹏飞 (第一作者, 通信作者)

1989-, 男, 陕西西安人, 本科, 工程师, 自动化专业, 主要从事电力电气系统及设备改造项目研究及项目管理施工工作 (e-mail) zpf1989111@163.com。



樊越

樊越

1993-, 男, 陕西宝鸡人, 本科, 工程师, 电气工程及其自动化专业, 主要从事电力行业辅机节能改造项目推广工作 (e-mail) 371499020@qq.com。

(编辑 孙舒)