

智慧型凝结水泵在超超临界燃煤发电二次再热技术中的应用

智慧型凝结水泵是节能减排的重要途径,通过对监控系统的设计,实现设备远程操作与凝结水量的精确控制,提升凝结水泵的全生命周期——高效智能化简称智慧型,其不是简单将凝结水泵与电动机、变频器、控制器等等进行组合,而是将它们集成一体,实现高度智能化。本文结合广东大唐国际潮州发电有限责任公司一期(2×1 000 MW)工程3×50%容量设计生产制造的大型凝结水泵运行管理智能化实施应用案例,通过信息技术、先进控制技术和人工智能技术等实现设备维护和运行管理的智能化,从而摆脱过于依赖操作人员来完成设备维护和运行管理,提升设备智能化管理平台。

文 / 郝迎宇

目前超超临界发电技术主要有3个发展方向:新一代高效一次再热技术、二次再热技术、更大单机容量如1 200 ~ 1 300 MW或更大。

二次再热技术,就是汽轮机超高压缸排汽经过两次在锅炉重新提高蒸汽温度,再送回汽轮机做功的一种技术,如图1所示。简单地说,就是超超临界蒸汽经过两次“再回炉”,让电厂效率更高、能耗更低、指标更优。

二次再热技术是公认的一种可以提高燃煤机组效率和节能环保的有效方法。与一次再热相比,二次再热是在一次再热基础上增

加一个再热过程,提高发电循环的平均吸热温度,从而提高发电效率,减少CO₂、氮氧化物等的排放量。

我国超临界和超超临界发电技术比发达国家起步晚,限于当时技术条件和由易到难的渐进发展规律,采用600℃一次再热的

技术路线,但凭借国内巨大的市场,通过前期的技术转让和后期的自主开发,600℃超超临界发电建成机组居世界首位。拥有了先进的设计制造技术平台、全球最多的600℃超超临界燃煤发电电动机组设计运行经验,这些为我国发展630℃二次再热乃至700℃高效

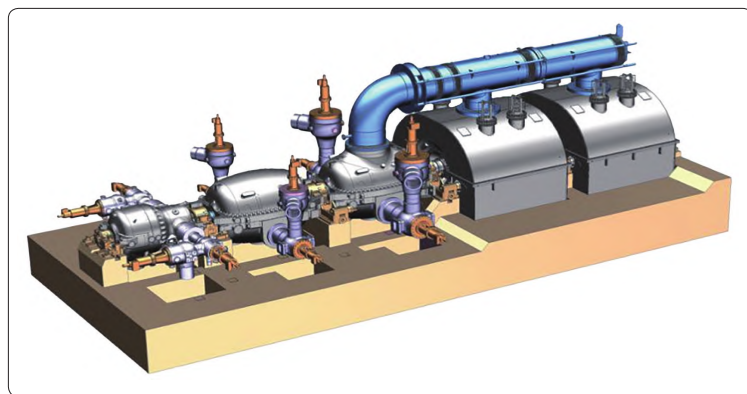


图1 二次再热技术(超超临界蒸汽经过两次“再回炉”)

本文作者供职于沈阳工业泵制造有限公司。

超超临界燃煤发电电动机组奠定了良好的基础。

凝结水泵是火力发电厂凝结水系统的重要设备,其结构为立式筒袋型多级离心泵。其作用是收集汽轮机排出的凝结水和低压加热器的疏水,经凝结水泵升压后经过低压加热器送至除氧器除氧,如图2所示,用来维持除氧器的水平衡,从而保证锅炉连续的水源供给;同时,当发电电动机组负荷频繁变化时,凝结水系统也参与压力的调节,凝结水泵能否连续、安全、稳定和经济地运行,关系着机组的安全、稳定和经济运行。因此,凝结水泵运行的安全性尤为重要。

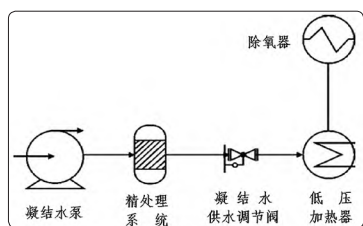


图2 凝结水系统简图

我国初期超临界和超超临界(600MW或以上)燃煤发电电动机组所选用的凝结水泵,基本都是国外品牌产品。近些年来,国内在凝结水泵理论与制造工艺均有突破,提升了市场份额,也陆续有产品出口。

本文结合节能智慧型凝结水泵在600MW、1000MW超临界、超超临界燃煤发电电动机组成功应用的案例,做一下技术总结,以供读者参考。

凝结水泵配置与负荷调节功能

凝结水泵通常以 $2 \times 100\%$ 或 $3 \times 50\%$ 形式配置,采用定速或变频电动机驱动。定速泵特性不可调节,随着机组低负荷运行时减小流量的需求,将导致泵的出口

压头提高。为了与管路系统阻力匹配,通常用泵出口调节阀节流方式来实现水量调节控制,调整阀门节流造成了巨大的能量损失。

而二次再热燃煤发电电动机组凝结水参与负荷调节是根据环保需要而实施的新工艺。它是指快速改变凝结水泵及凝结水流量,从而自发地改变低加抽汽量,使得进入汽轮机低压缸做功的蒸汽量发生变化,引起机组负荷变化,通过凝结水调节参与负荷调节和优化锅炉燃烧率控制来加快负荷响应,实现凝结水参与负荷调节的功能。满足电网AGC变负荷性能要求。而凝结水调节需要凝结水泵来实现,因此对凝结水泵的运行安全可靠提出了更高更苛刻的要求。

1000MW或1350MW二次再热630℃超超临界机组,日常运行采用2台(100%容量立式筒袋型凝结水泵)或3台(50%容量立式筒袋型凝结水泵)运行方式。1台变频运行,1台工频备用是100%容量立式筒袋型凝结水泵的标准配置。2台变频运行,1台工频备用是50%容量立式筒袋型凝结水泵的常用配置。

设计特点

9.5LDTNB-7PS是为广东大唐国际潮州发电有限责任公司一期(2×1000 MW)工程 $3 \times 50\%$ 容量设计生产制造的大型凝结水泵。参数为流量 $Q=1500 \text{ m}^3/\text{h}$,转速 $n=1480 \text{ r/min}$,入口压力为真空,扬程 $H=325 \text{ m}$,必需汽蚀余量 $NPSH_r > 4.5 \text{ m}$,效率 $\eta < 84\%$,配套电动机功率 $P=1500 \text{ kW}$,结构图如图3所示。

机组安装3台50%容量的凝结水泵,2台并列运行,1台备用,采用变频调节。凝结水泵采用立式、抽芯式结构,泵的部件可拆装更换。泵壳设计成全真空型。

凝结水泵设计特点

1. 为改善汽蚀特性,泵做成筒型,同时采用双吸式第一级叶轮,减少了必需汽蚀余量,也使筒体高度缩短30%,泵轴也相应缩短。不仅可以满足入口比转速的标准,而且减少了整个运行范围内汽蚀的可能性。

2. 为了提高泵的效率,泵的特性曲线设计得比较平坦。这样,无形之中在大流量区域内使压头提高25%~30%,减少了压头损失,节约了有用功率。

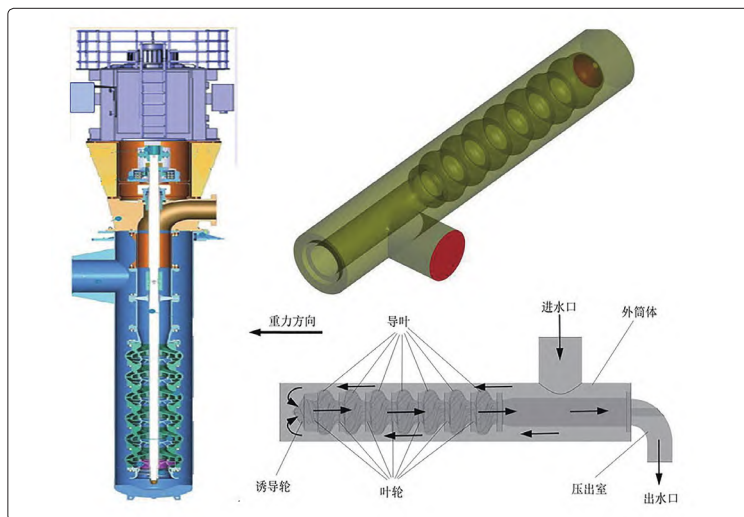


图3 9.5LDTNB-7PS 凝结水泵结构简图

3. 泵轴根据长径比 L/D ，一般按软轴设计。即泵轴第一临界转速低于运行转速，而第二临界转速高于运行转速。而 500 MW 以上机组的凝结水泵要求临界转速均在运行转速之上，须采用硬轴设计。

4. 中间级叶轮采用键和两半定位环来固定，其键用来传递转矩，定位环用来轴向定位并传递轴向推力。这种取消轴上的螺纹的新型设计，提高了可靠性。

5. 泵轴各段间的联接轴，采用长平键和两半扣环的设计，没有螺纹，通过键传递扭矩，这种设计还

利于检修时的拆卸。

6. 泵和电动机连接的联轴器为刚性可调式，精制加工而成。

7. 泵轴设计的应力水平低，且表面经磨光处理，轴的挠曲变形较小，有利于减小振动，延长轴承的寿命。

8. 长轴下端的自位式、缓冲支座可以避免泵体的移动，防止在低流量运行期间或系统失常时轴承的过度磨损。

9. 中间级、壳段、法兰间加有密封垫，既避免了中间级的漏泄，也防止了法兰表面因水流划道造成过早的损坏。

10. 泵出口管头的基频和电动机铁芯的临界频率均经分析计算，避免因共振引起振动。

11. 泵壳、叶轮及有关零件均留有 3.175 mm (1/8in) 供腐蚀用的富裕量。

12. 对泵的推力平衡设计有独特的考量。通常，泵的每级叶轮或者加上平衡装置或者设置平衡孔。但此凝结水泵不考虑采用平衡设计，因为一个向下的推力反倒提升了泵在整个运行范围内的稳定性，只是电动机的推力轴承选择大一些，此项费用对于电厂的可靠运行是值得的。

13. 推力轴承设置在电动机内部。电动机推力轴承可以平衡大部分泵轴向推力，省去泵推力轴承，总高度降低，节省空间，便于检修。

智能化监控

凝结水泵是火力发电厂主要动力设备之一，对机组安全型有着重大影响，其功能是将热力循环中凝汽器中的工质水提升压力，注入除氧器。凝结水泵通常以 $2 \times 100\%$ 或 $3 \times 50\%$ 形式配置，采用定速电动机直连驱动，定速泵特性不可调节，随着机组低负荷运行时减小流量的需求，将导致泵的出口压头提高。为了与管路系统阻力匹配，通常采用泵出口阀调节控制水量，势必造成了巨大的能量损失。

智能立式筒袋型凝结水泵，主要作用于火电热力系统中输送凝汽器内的凝结水，凝结水泵主要由以下几部分组成：泵筒体、工作部、出水部分和推力装置部分。而影响凝结水泵健康状态的主要部件是轴承。目前，对凝结水泵设备的轴承进行健康状态的检测采用的是传统的人工手持设备检测方法，通过点巡检的模式进行健康状态估计。但是这种点巡检

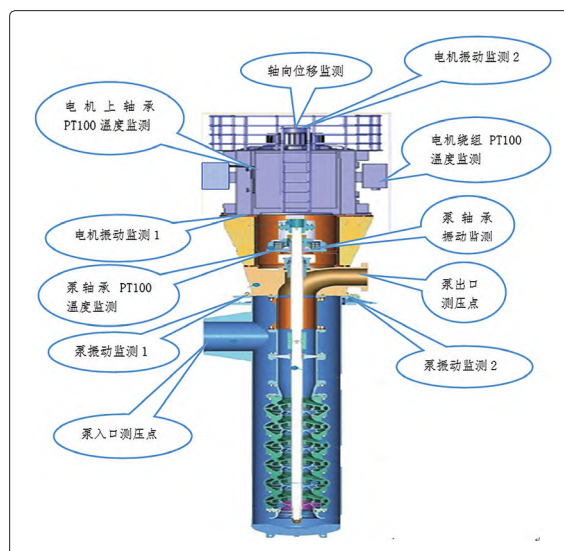


图4 智能化凝结水泵监测简图

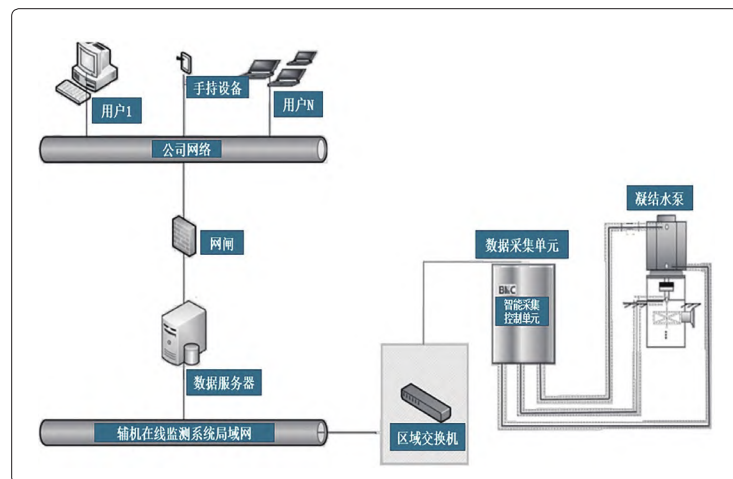


图5 凝结水泵运行状态检测系统

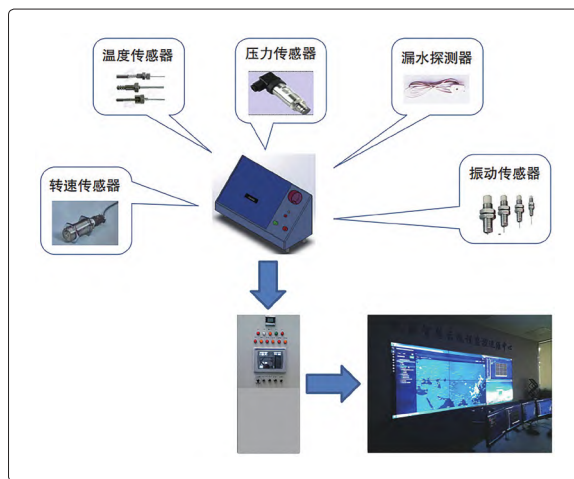


图6 凝结水泵运行状态检测系统（传感器接入状态）

的方法获取的采样数据有限，难以形成系统化的评估，并且对健康状态的评估更加依赖于人员的经验配合设备的出厂参数信息与资料来进行，往往在发现问题时，已经造成了不可挽回的损失。

由此可看出，现有技术没有完整又精准的评估依据，在异常发生时无法得到及时准确的反馈，对设备管理更得不到有效管控。因此，智能化可以实时监测凝结水泵的健康状态，在问题还处于萌芽阶段提供预警。如图 4 所示，为智能化凝结水泵监测简图。

以下是运行状态检测监控的几种手段、方法。

- 1. 凝结水泵运行状态检测系统及方法，以实时监测凝结水泵的健康状态，并给出故障类型进行预警，如图 5 所示。
- 2. 通过监控数据，可以确保设备一直在高效运行，满足客户的节能要求，如图 6 所示。
- 3. 增设如下监测和控制点，保证凝结水泵运行更平稳，使用寿命更长，见表 1。

应用与实践

智能化的 9.5LDTNB-4PS 在广东大唐国际潮州发电有限责任公司一期（2×1000 MW）工程系统中已安全、平稳运行，得到了用户的好评。2020 年通过了中国机械工业联合会主持的科技成果鉴定，2021 年获得了辽宁省科技进步奖，已在国内 5 大电力推广应用并出口国外。

智能化设计理念及成熟单元技术已延伸应用在新开发研制的 12LTDNB-4PS 凝结水泵（ $Q=2\,368\text{ m}^3/\text{h}$, $H=346\text{ m}$ ）上，现场图如图 7 所示。

总结

所谓高效智能化是指在能量

表 1 智慧监测功能

序号	监测点和设备	功能	优势
1	轴承温度监测（如稀油润滑增设油温和油位监测）	判定轴承的工作状态（过载、润滑），联动设置轴承冷却措施，调节冷却水量，是轴承处于最优的运行环境。	延长轴承使用寿命，避免缺油、冷却不及时对轴承的破坏。
2	轴承的振动监测	检测出轴承在 X、Y、Z 的 3 个方向的振幅和频率，从而判定轴承所受力为冲击载荷还是固定载荷	延长轴承使用寿命，避免轴承因振动造成破坏
3	转速监测	通过对转速的监测，从而判定水泵的工作状态（变频控制作用凸显）	保证水泵处于高效区内运行，更节能
4	出口压力监测	判定水泵工作状态和联动操作数据采集	综合判定水泵工作状态
5	电动机电流检测（含三相平衡检测）	保护电动机	保护电动机不致因缺相、三相不平衡、超流和水泵卡阻对电动机造成损坏
6	机封腔水温监测	判定机封得到有效润滑和冷却，联动冲洗管路阀门增加和减少冲洗水量	保证机封得到有效冷却，延长机封使用寿命
7	自动变频控制	根据采集数据自动变频	通过变频控制使水泵运行高效、节能
8	机封泄漏量监测	判定机封是否损坏和机封寿命	避免因泄漏对环境的破坏和原液的流失

流和信息流两个维度的高度集成。在能量流方面，通过将变频器、电动机、凝结水泵等作为一个整体进行统一建模，并进行优化设计，实现系统高效性；在信息流方面，利用现代信息技术、人工智能技术、大数据技术和故障诊断与预警技术等实现系统控制、管理和维护保养的高度集成化和智能化，从而在实际工程项目中为用户提供控制器、变频器、电动机以及泵等整体解决方案，实现发挥系统最大优势，更好地为用户提供一揽子解决方案。

高效智能化不是简单将电动机、变频器、控制器和凝结水泵进行组合，而是将它们进行统一考虑，实现高度有机体，具有如下特征。

系统能效与性能控制双优化

在实现的电动机驱动系统应用中，除了追求节能、高效性外，还必须提升泵、机阀等设备应用的系统性能，而实际上这些泵、阀等设备应用的系统都有着一定的特殊性，而是通过设备制造层面不给予解决，在实际工程中系



图 7 立式筒袋式凝结水泵现场图

统设计及运行环节就不可能给予解决。

设备维护与运行管理的智能化

通过信息技术、先进控制技术、人工智能以及 5G 等技术实现设备维护和运行管理的智能化，从而摆脱过于依赖有经验的工程师来完成设备维护和运行管理，加快设备市场推广和应用。

总之，凝结水泵智能化是节能减排重要途径，也是提升工业自动化水平重要技术手段，代表着未来驱动系统和工业系统集成技术的发展方向。