

# 论循环水系统节能技术的应用

王 杰\* 张生安 燕增伟

(山东海科化工集团有限公司)

**摘 要** 分析了目前循环水泵能耗高的原因、改造途径以及“3+1”流体输送高效节能技术的原理和特点。对循环水泵进行改造后,千吨水节电率达到 15.3%,节约了大量的运行成本,带来了巨大的经济效益。

**关键词** 循环水泵 叶轮 高效节能 流体输送 三元流动 经济效益

**中图分类号** TH 31

## 0 前言

随着国际能源紧缺的日益严重及环境破坏的加大,建设资源节约型和环境友好型社会已成为国家发展的战略目标,节能减排成为我国政策支持的重中之重,也成为我国基本国策。据统计,目前我国能源利用效率仅为 30%左右,比发达国家低 10 个百分点,产值能耗比世界平均水平高 2 倍多,是世界上产值能耗最高的国家之一。据有关单位研究,我国的节能潜力为 3 亿 t 标准煤,相当于去年全国能源消费总量的 15.2%。若按每 t 标准煤 600 元计,节能市场可达 1 800 亿元之巨。

水泵是我国工业领域最主要的耗能设备之一,其用量大,涉及面广,产品广泛应用于石油、化工、电力、冶金、环保和市政等国民经济各领域。而据不完全统计,全国水泵装机约 3 000 万台,总容量约 24 000 MW,耗能总量约占全国发电量的 20%~25%。初步估计,提高水泵系统运行效率的节能潜力可达 250 亿 kWh/a~350 亿 kWh/a,相当于 4~7 个装机容量为 1 000 MW 级的大型火力发电厂的年发电总量。由此可见,水泵系统的节能潜力十分巨大。

## 1 水泵系统的节能技术

### 1.1 导致水泵系统高能耗的主要原因

引起水泵系统高能耗运行的原因是多方面的,诸如设计规范合理性、设计计算准确性、水泵产品质量、工程安装质量及运行管理等等,主要体现在以下几个方面:

(1) 由于设计、制造工艺的落后,使水泵、电机本身设计效率偏低。

(2) 系统设计选用的水泵偏大(“大马拉小车”现象),致使水泵处于“大流量、低效率、高能耗”的不利工况下运行,严重偏离了最佳工况点,不但增加了系统的能耗,还会引起一系列不良后果——振动大、噪音高、水泵产生严重汽蚀现象、电机过载发热,有的因过载严重,水泵根本无法启动,导致电机烧坏等。

(3) 由于全年不同时段水泵进水池水位(适用于开式系统)不同或供水需求不同,引起泵组运行模式改变,从而造成变工况运行。这时往往需要调节阀门,增加阻力,于是产生了额外的扬程能耗。

(4) 对于有多台水泵并联或串联的较为复杂系统,运行配置不合理。

\* 王杰,男,1979年2月生,工程师。东营市,257105。

(5) 管路系统设计、施工不合理，系统回路水力严重不平衡，或存在局部阻力偏高的不正常现象，从而增加了扬程能耗。

(6) 系统回路渗漏，水流旁通，增加无效流量，增加水泵能耗。

(7) 系统不能根据工艺实际需要科学调度，增加了无效能耗。

(8) 系统维护管理不当，未及时更换备件，从而增加了内部泄漏损耗。

(9) 电气系统设计不合理，电网功率因数偏低。

## 1.2 水泵节能改造的经济魅力

一台轴功率 100 kW 的水泵，每年运行 8 000 h，以电费每 kWh 为 0.8 元计，一年运行费用为 64 万元。如降耗 10%，一年可节支 6.4 万元。经研究发现，一套泵系统在其终身使用过程中，它的购置成本仅占总成本的 5%~8%，维护成本占总成本 10%~15%，运行电费成本占总成本的 75%~85%。由此可见，提高水泵系统的运行效率是何等重要！泵系统节能改造，魅力无穷。

## 1.3 水泵节能改造的途径

由于引起泵组高能耗的原因各不相同，节能改造方案需根据不同的实际情况而定。其最佳节能改造方案必须以合理的水送能耗指标做指导，以系统优化、最佳工况运行为目的，从降低系统阻力、提高水泵效率、调整合理流量、科学运行调度入手。目前，比较常用的节能改造方法有以下几种：

(1) 通过切割叶轮的方法直接降低水泵的流量，降低水泵的运行功率，从而达到节能的目的。这种方法适用于泵组电流过载现象比较严重的情况。水泵叶轮切割可以降低流量、扬程，但叶轮切割有一定的局限性，超出切割定律范围则无法用切割叶轮的方法实现节能，且切割叶轮后水泵的效率也随之降低。

(2) 采用变频节能技术。根据频率与转速、流量成线性关系，与功率成三次方关系的原理，以改变频率进而改变转速，达到降低功耗的目的。但变频仅从流量入手，无法改变低效率运行，无法降低管路阻力，对有问题或较为复杂的系统，起不到节能作用。变频幅度不能太低，频率在 36 Hz~45 Hz 之间最佳，低于 36 Hz 会引起水泵效率急剧下降而导致大幅提高水泵能耗，同时引起电机风扇转速太慢而影响电机散热，导致电机烧坏。其它改变

水泵转速的节能技术与之原理一致，均适用于变负载的水泵机组。

(3) 采用系统完全匹配技术，即“3+1”流体输送高效节能技术。该技术可以彻底解决切割叶轮和变频节能技术无法实现系统彻底节能的技术难题，标本兼治，达到最佳节能效果。

## 1.4 “3+1”流体输送高效节能技术原理及特点

### 1.4.1 二元流动理论

离心式水泵主要由叶轮、泵体、轴、轴承和密封等零部件组成。其中叶轮是决定水泵性能好坏的一个最重要部件。目前水泵叶轮的设计仍沿用二元流动理论。二元流动理论认为，叶轮流道及流体流态在叶道截面上呈线性变量关系，即叶轮周围水流流动在同一截面不同高度位置呈有规律的变化，在接近轮盘处它的流速最大，而向上越接近盖盘流速越小。然而，实际的叶轮流道及流体流态却呈射流和尾迹（漩涡）的流动特征，传统的二元流动理论不能完全反映泵内流体的真实流动状态，依据该理论设计的水泵，工作效率始终难以提高。

### 1.4.2 三元流动理论

应用我国著名科学家吴仲华院士的“叶轮机械三元流动理论”，把叶轮内部的三元立体空间无限地分割，通过对叶轮流道内各工作点的分析，建立起完整、真实的叶轮内流体流动的数学模型。依据三元流动理论设计的叶片形状为不规则曲面形状，叶轮叶片的结构可适应流体的真实流态，能够控制叶轮内部全部流体质点的速度分布。因此，应用三元流动理论设计的水泵，运行效率得以显著提高。

### 1.4.3 三元流叶轮与二元流叶轮的区别

(1) 子午流道三元流叶片加宽了许多，特别是轮毂减小，可使流通能力增大；

(2) 子午流道三元流叶轮直径减小，而出口宽度增大；

(3) 三元流叶片的扭曲度较二元流的大很多；

(4) 三元流叶片边向来流进口伸展，减少了进口损失；

(5) 由两个单吸叶轮组合而成的三元流叶轮，采用相邻叶片相互交错的结构，使水流脉冲下降到扬程的 $\pm 4\%$ 以内，水流更加平稳，效率更高，必须汽蚀余量更低。

### 1.4.4 三元流高效水泵与变频调速节能的区别

单一变频技术根据水泵出口压力信号调节水泵

电机的转速, 尽管能耗下降了, 但流量也减少了, 更严重的是水泵的工作特性曲线已严重偏离最佳效率工作区, 实际上水泵的工作效率在下降, 而且变频改造的投资大、施工复杂。因此对于大型离心水泵其最佳的节能措施是尽量提高水泵的工作效率, 使水泵的高效率工作点尽量与水泵的实际工况相接近。应用三元流动理论, 重新设计高效水泵或高效叶轮, 直接更换现役水泵或叶轮, 可以实现高效节能增容的目的。

三元流技术和变频技术, 对水泵都可达到节能目的。变频技术是在电机上做文章, 根据用水负载的变化来调整电机输出功率; 而三元流技术是在叶轮上做文章, 目的是提高叶轮的實際工作效率。当然, 对于变负载的水泵机组, 要想充分节能, 最好是两项节能技术都实施; 对于负载相对恒定的水泵机组, 变频技术就没有用武之地了, 只能采用三元流节能技术。

#### 1.4.5 “3+1”流体输送高效节能技术的核心和重点

“3+1”流体输送高效节能技术包括 3 个核心、1 个重点。

核心 1: 高效节能水泵的设计与制造技术。

(1) 采用三元理论对水力模型及流道进行变分有限元三元流动分析, 采用 CFD 分析和试验研究, 对水力模型进行筛选和修正。目前已开发多个国内领先, 覆盖离心泵、混流泵和轴流泵的高效水力模型。

(2) 水力部件全部采用精密铸造, 以提高其表面质量和型线尺寸精度; 中、大型叶轮采用焊接工艺制造, 其中叶片为模锻或数控加工。

(3) 转子部件精细加工, 提高零件尺寸精度, 减少密封间隙。

(4) 过流部件表面喷涂特殊涂料, 提高表面光洁度。

核心 2: 泵系统数据采集、诊断分析和优化改造技术。

(1) 专业技术人员利用高精度仪器仪表表现场采集数据。

(2) 由计算软件诊断分析, 提出优化改造方案。

核心 3: 泵系统故障诊断、实时监控、高效经济运行与优化调度技术。

(1) 根据泵系统的设备参数和工艺要求, 通过在线软件实时监控, 自寻优给出满足工艺要求的、

实时电耗最低的运行调度方案。

(2) 实时监控设备振动、轴承温度等, 进行故障诊断, 确保设备安全运行。

1 个重点: 水泵故障诊断、维修保养技术。

采用专业设备诊断水泵故障, 同步解决振动、噪音、泄漏、轴承发热和汽蚀等运行故障, 改善运行环境。

“3+1”流体输送高效节能技术包含了数据检测技术、系统高耗能诊断分析技术、系统优化改造技术、高效节能泵或叶轮设计制造技术和泵系统故障诊断、实时监控、高效经济运行与优化调度技术。它集先进技术、优良产品、严谨实施方法、系统科学匹配于一体, 是所有节能技术中最彻底、最安全、最可靠的高效节能技术。

## 2 “3+1”技术在循环水泵系统中的具体应用

### 2.1 工程的基本概况

山东海科化工集团有限公司重催车间循环水泵系统于 2007 年投入生产运行。原设计为 3 台泵, 水泵铭牌参数具体如下: 型号 KQSN450-N13/428, 设计点流量  $Q=2\ 280\ \text{m}^3/\text{h}$ , 设计点扬程  $H=45\ \text{m}$ , 汽蚀余量  $9.5\ \text{m}$ , 生产厂家为上海凯泉泵业有限公司。配套电机型号为 Y400-4, 功率  $P_e=400\ \text{kW}$ , 额定电流  $I=47.6\ \text{A}$ , 额定电压  $U=6\ \text{kV}$ , 额定转速  $1\ 480\ \text{r}/\text{min}$ , 电机功率因数  $\cos\varphi\approx 0.86$ , 额定效率  $\eta\approx 94\%$ , 生产厂家为南阳防爆电机厂。

此系统供重催车间循环用水之用。一般运行工况为二用一备, 各水泵出口蝶阀开度不到 60%, 母管要求压力为  $0.445\ \text{MPa}$ , 运行时能耗较大。运行过程中三台泵均有不同程度的汽蚀现象。由于汽蚀原因, 原泵运行 6 个月左右就造成叶轮穿孔, 流量减少, 时常需增加泵的运行台数来满足生产要求, 造成能耗浪费, 维护成本高。根据现场情况分析, 造成汽蚀的主要原因是现场安装的吸入管路较复杂, 吸入阻力损失较大, 进水水位比较低, 水泵流量大、转速高。

### 2.2 水泵系统高能耗的主要原因

重催车间循环水泵系统, 原泵由于设计得不合理, 且与系统要求不相匹配, 出口阀门开度只能达到 60% 左右, 开度加大就会产生过流现象, 使管路阻力大大增加, 造成大量的能耗损失在阀门上; 水泵偏离了最佳工况点, 运行成本高, 同时泵的低效

运行造成维护成本高。

技改前原水泵运行工况如表1所示。现场装置如图1所示。

表1 技改前原水泵运行工况

泵组	泵出口压力 /MPa	运行电压 /kV	电机电流 /A	电机输出功率 /kW	电机输入功率 /kW	备注
A	0.4	6.1~6.2	44	369.6	393.2	
B	/	/	/	/	/	备用
C	0.445	6.1~6.2	47	394	420	

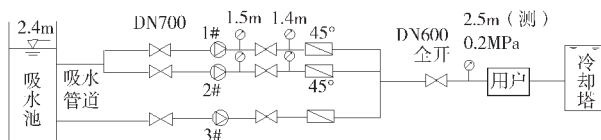
两台泵运行,  $\Sigma Q=4664\text{ m}^3/\text{h}$ 。

技改前 kt 水电耗为:  $(393.2+420)/4.664=174.4\text{ kWh/kt 水}$ 。

说明: 表中电流、电压为该公司仪器仪表读数, 压力表读数为我公司精密仪表读数;

计算电机输出功率依据如下: 功率因数  $\cos\varphi$  和电机效率  $\eta$  系根据电机铭牌上额定参数计算所得; 轴功率与根据水泵在压力表所示压力下运行参数计算的水泵轴功率基本吻合;

电机输入功率为电机输出功率除以电机效率。



注: 以地面为基准, 吸水水位标高+2.4 m, 设计值为+2.7 m, 最高用水高度 23 m, 管径为 DN150, 水泵出口压力表测压力处管径为 DN700。

图1 循环水泵系统

### (1) 泵的运行参数计算分析

根据现场采集数据, 泵 A 各运行参数详细计算分析如下:

$$H_p=0.4 \times 102=40.8\text{ m}$$

$$H_g=1.5-2.4=-0.9\text{ m}$$

按测试  $Q=2400\text{ m}^3/\text{h} \approx 0.78\text{ m}^3/\text{s}$

$$V=4 \times 0.78 / (3.14 \times 0.7^2) \approx 2.0\text{ m/s}$$

$$H_v=2^2 / (2 \times 9.81) \approx 0.2\text{ m}$$

经详细推算, 吸入损失  $\Delta h_s \approx 0.3\text{ m}$

$$H=40.8-0.9+0.2+0.3=40.4\text{ m}$$

根据电流计算:

$$P_a=1.732 \times 44 \times 6 \times 0.86 \times 0.94 = 369.6\text{ kW}$$

水泵运行时的水功率

$$P_{\text{水}}=9.81 \times 2400 \times 40.4 / 3600=264.2\text{ kW}$$

水泵实际运行效率  $\eta=264.2/369.6 \approx 71.4\%$

泵 C 各运行参数详细计算分析如下:

$$H_p=0.445 \times 102=45.4\text{ m}$$

$$H_g=1.4-2.4=-1\text{ m}$$

按测试  $Q=2200\text{ m}^3/\text{h} \approx 0.61\text{ m}^3/\text{s}$

$$V=4 \times 0.61 / (3.14 \times 0.7^2) \approx 1.6\text{ m/s}$$

$$H_v=1.6^2 / (2 \times 9.81) \approx 0.13\text{ m}$$

经详细推算, 吸入损失  $\Delta h_s \approx 0.3\text{ m}$

$$H=45.4-1.0+0.13+0.3=44\text{ m}$$

根据电流计算:

$$P_a=1.732 \times 47 \times 6.09 \times 0.86 \times 0.94 = 400.7\text{ kW}$$

水泵运行时的水功率

$$P_{\text{水}}=9.81 \times 2200 \times 44 / 3600=263.8\text{ kW}$$

水泵实际运行效率

$$\eta=263.8/400.7 \approx 66\%$$

### (2) 系统高能耗的原因

- (a) 水泵偏工况运行, 实际运行效率较低;
- (b) 水泵出口阀门开度很小, 使管路阻力大大增加, 系统能耗增大;
- (c) 水泵非最新高效节能泵, 泵本身效率偏低;
- (d) 水泵的使用时间比较长, 长期的腐蚀和磨损使得水泵的表面光滑度降低、流道形状变形和间隙增大, 从而增加了额外的损失, 水泵效率下降。

### 2.3 “3+1” 流体输送高效节能技术在本系统中的应用

经我公司多次与长沙翔鹅节能公司探讨, 决定采用翔鹅公司“3+1”流体输送高效节能技术对调查数据资料进行系统分析、研究, 结合该系统管路流体力学特性, 设计本节能技改方案: 整改目前系统存在的不利因素, 按最佳运行工况参数采用高效节能泵替代原处于不利工况、低效率运行的水泵, 降低“无效能耗”, 提高输送效率, 以达到最佳的节能效果。技改后运行工况分析如下:

为保证冷却设备制冷效果, 2 台水泵并联运行, 单台水泵流量均按泵 A 和泵 C 的母管流量进行节能水泵设计。经翔鹅公司技术人员和我公司事业部对现场运行数据综合分析, 现 2 台泵运行时单台水泵流量取  $2500\text{ m}^3/\text{h}$ , 2 台泵运行时总流量  $\Sigma Q=5000\text{ m}^3/\text{h}$ 。取  $\Sigma Q=5000\text{ m}^3/\text{h}$  进行节能水泵设计, 要求母管压力  $p$  为  $0.45\text{ MPa}$ , 吸入水位为  $+2.4\text{ m}$ , 改造后节能水泵出口阀门全开, 水泵运行扬程可取  $38\text{ m}$ 。按翔鹅公司现有高效节能水泵模型, 该系统水泵运行参数可为: 流量  $Q=2500$

$\text{m}^3/\text{h}$ , 扬程  $H=38\text{ m}$ , 效率  $\eta=80\%$ , 轴功率  $P_a = 9.81 \times 2\,500 \times 38 / (3\,600 \times 80\%) \approx 323.5\text{ kW}$ 。

以三元流理论进行三维设计, 量身定做翔鹅公司的高效节能三元流水泵, 替换技改前的原水泵。技改后水泵的运行参数如表 2 所示。

表 2 技改后水泵的运行参数

泵号	泵出口 压力 /MPa	出口 阀门 K <sub>2</sub> 开度	运行 电流 /A	电机 电压 /kV	计算电机 输入功率 /kW	备注
1#	0.45	全开	40	6.1~6.2	363.2	
2#	/	/	/	/	/	备用
3#	0.45	全开	40	6.1~6.2	363.2	

保证母管压力  $p$  的要求值  $0.45\text{ MPa}$ , 两台泵运行,  $\Sigma Q=4\,914\text{ m}^3/\text{h}$ 。

技改后  $\text{kt}$  水电耗为:  $(363.2+363.2)/4.914=147.8\text{ kWh/kt 水}$ 。

## 2.4 改造后公司的节电收益分析

### (1) 技改后系统每小时节电量

由表 1、表 2 数据计算可得:

$$N=393.2+420-363.2 \times 2=86.8\text{ kW}$$

### (2) 技改后年总节电量 = 技改后系统每小时节电量 $\times$ 水泵全年运行时间

$$N_s=86.8 \times 8\,640=75 \times 10^4\text{ kWh}$$

### (3) 技改后节电率

$$\text{节电率} = \frac{\text{技改后每小时节电量}}{\text{技改前每小时系统总耗电量}} \\ = 86.8 / (393.2+420) = 11\%$$

### (4) 年节电金额 = 年总节电量 $\times$ 当年电价

$$\Delta N=75 \times 0.59=44\text{ 万元}$$

### (5) 按水泵使用寿命 15 年计算, 本系统 15 年可节约 $44 \times 15=660$ 万元。

同时每年多送水

$$(4\,914 - 4\,664) \times 8\,640=216 \times 10^4\text{ m}^3$$

### (6) 按 $\text{kt}$ 水电耗计算节能率

$$\text{节能率} = \frac{\text{技改前 kt 水电耗} - \text{技改后 kt 水电耗}}{\text{技改前 kt 水电耗}} \times 100\% \\ = \frac{174.4 - 147.8}{174.4} \times 100\% = 15.3\%$$

更换高效节能泵, 并不能消除汽蚀。由于节能泵流量大、转速高, 要从设计上大幅降低汽蚀余量有很大难度。高水泵效率和低汽蚀余量是矛盾对立的, 要提高水泵效率就必须减少水泵叶轮进口直径, 而减小水泵叶轮进口直径就会提高汽蚀余量。节能水泵设计时兼顾考虑到高效率 and 低汽蚀余量,

但仍会产生汽蚀现象。为避免汽蚀给水泵造成的损害, 高效节能泵的叶轮、密封环和轴套均采用了抗汽蚀性能好的不锈钢材料制造, 并且对叶轮叶片进行特殊打磨处理来抵抗汽蚀。因此, 即使有汽蚀发生, 也不会对水泵造成大的损害, 也不会影响系统的正常运行。为了彻底地解决这一汽蚀问题, 在不影响生产的情况下, 通过提高进水水位的方法从而解决汽蚀的发生, 使系统运行更加平稳, 系统更合理更节能。

由此可见, 通过此系统节能改造, 将给海科化工集团带来巨大的经济效益。

## 3 总结

“3+1” 流体输送高效节能技术是目前泵系统最为先进的节能技术之一, 它在水系统的广泛应用彻底地解决了高能耗的问题, 达到了标本兼治。国务院印发的发展改革委员会同有关部门制定的《节能减排综合性工作方案》, 明确了 2010 年中国实现节能减排的目标任务和总体要求。《方案》指出, 到 2010 年, 中国万元国内生产总值能耗将由 2005 年的 1.2 t 标准煤下降到 1 t 标准煤以下, 降低 20% 左右; 单位工业增加值用水量降低 30%。“十一五”期间, 中国主要污染物排放总量减少 10%。到 2010 年, 二氧化硫排放量由 2005 年的 2 549 万 t 减少到 2 295 万 t, 化学需氧量 (COD) 由 1 414 万 t 减少到 1 273 万 t; 全国设城市污水处理率不低于 70%, 工业固体废物综合利用率达到 60% 以上。同时国家明文规定了在全国范围内对 1 000 家高能耗企业进行监控及下达了节能减排的硬性指标, 国家在 2010 年 8 月份还下发了淘汰产能企业名单。这足以表明国家在节能减排工作上的决心和信心, 节能减排刻不容缓。

目前山东海科化工集团有限公司共有 10 个循环水系统, 如果在其他循环水系统中对此技术加以广泛应用, 必将为集团公司节约大量的运行成本, 带来巨大的经济收益, 利国利民利企。

## 参考文献

- [1] 杨凡行. 努力提高电站循环泵的设计水平[J]. 中南水泵.
- [2] 路金喜, 杜贵荣. 泵站节能措施研究 [J]. 排灌机械, 2002(4):31-33.
- [3] 关醒凡. 现代泵技术手册[M]. 北京: 宇航出版社, 1995.

(收稿日期: 2010-10-10)