

Dissipation Energy of Auxiliary Equipment and Its Influence on Energy Conservation for Large Pumping Stations

Xingli Yang¹, Baoyun Qiu^{1*}, Xiaoli Feng¹, Weidong Xie², Gen Huang¹

¹ School of Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, China, 225127

² Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou, China, 225009

*Email: yzdxqby@sohu.com

Abstract: Auxiliary equipment of pumping stations consumes energy that services major pump units. The researches for energy saving of pumping stations only focus on major pump systems and flow passages previously and only few researches are about auxiliary equipment. In order to know dissipation energy and energy saving potential of auxiliary equipment, the auxiliary equipment was divided into 2 types: continuous duty and interval duty, and the computational methods of those two types of dissipation energy were put forward systematically. Four typical pumping stations being taken as examples, the total dissipation energy of auxiliary equipment, its components and its proportion to total energy consumption of the whole pump station were calculated and analyzed. The results show that about 0.5%-3% of the total energy consumption in pump stations was consumed by auxiliary equipment, and dirt clean-up dissipation energy, ventilation dissipation energy and lighting dissipation energy share a large proportion of total auxiliary equipment dissipation energy, so those three parts have greater energy saving potential.

Key words: large pump stations; auxiliary equipment; dissipation energy; energy saving

大型泵站辅助设备能耗及其对泵站节能的影响

杨兴丽¹, 仇宝云^{1*}, 冯晓莉¹, 谢伟东², 黄根¹

1.扬州大学能源与动力工程学院, 扬州, 中国, 225127

2.江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 扬州, 中国, 225009

*Email: yzdxqby@sohu.com

摘要: 大型泵站辅助设备为主机组的可靠运行服务, 同时也消耗能量。以往对泵站节能的研究只针对主机组和泵站流道, 而对辅助设备研究很少。为掌握辅助设备的能耗和节能潜力, 将辅助设备分为持续运行和间歇运行两种类型, 系统提出了两类辅助设备能耗的计算方法。以典型的大型泵站为例, 计算分析了辅助设备能耗占泵站总能耗的比例及辅助设备各部分能耗比例。结果表明, 辅助设备能耗占泵站总能耗的 1%~3% 左右, 其中, 用于主机组开停机的辅助设备能耗很小; 清污能耗、电机通风能耗和照明能耗比较大, 具有较大的节能潜力。

关键词: 大型泵站; 辅助设备; 能耗; 节能

1 引言

大型泵站辅助设备是为保证泵站正常、安全、稳

定运行为主机泵服务的附属设备, 泵站在运行期间, 除主机泵及进出水流道耗能外, 辅助设备也需消耗一部分能量。研究表明, 在目前的水平下, 要想再显著提高主机泵及进出水流道效率比较困难^[1]。而另一方面, 一直以来, 对泵站辅助设备能耗及其节能研究甚少。

通常根据辅助设备输送流体的性质, 分为油、气、水三大系统^[2]。传统的辅助设备分类, 在范围和内容

基金项目: 全国百篇优秀博士学位论文作者专项基金资助项目 (2007B41); 国家自然科学基金资助项目 (51079125); 江苏省“333 高层次人才工程”专项基金资助项目 (2008108)

Project Supported by Author Special Foundation of National Excellent Doctoral Dissertation of China (Grant No. 2007B41); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51079125); Project Supported by “333 high rank talent” Foundation of Jiangsu Province of China(2008108)

上均未能全面反映辅助设备的能耗情况。本文从能耗角度，将泵站辅助设备重新划分为新的油、气、水、其他耗能设备四大系统，计算分析典型大型泵站辅助设备的能耗及其对泵站能耗的影响。

2 泵站辅助设备设置

大型泵站根据主机组的结构形式和需要设置辅助设备。主机组的结构形式不同，辅助设备的设置也有所差异。

2.1 水系统

水系统主要有供水系统、排水系统和站前拦污清污装置。

(1) 供水系统。供水系统的主要供水对象有：电机推力轴承和导轴承的油冷却器冷却用水；电机空气冷却器冷却用水；水泵水润滑导轴承的润滑用清水；虹吸出水水道泵站抽真空系统水环式真空泵的工作用水和压缩空气系统水冷式空气压缩机冷却用水等^[3]。其中，真空泵和空压机在机组运行期间不运行。

(2) 排水系统。排水系统的主要排水对象有：技术供水排水，渗漏排水，检修和调相排水和清扫回水排水。以上水体汇至泵站最下层的排水廊道或集水坑，由排水泵排出。站房渗漏水量较小，难以准确计算，可以忽略不计；机组运行期间排水对象主要是设备冷却水回水。其中，位置较高的用水设备，可自流排水；循环冷却水系统无排水。

(3) 清污系统。泵站运行期间特别是排涝期间，清污机经常处于运行状态。清污能耗与污物量、清污模式等因素有关^[4]。

2.2 油系统

油系统主要设置有润滑油系统、压力油系统和油处理系统。

在油系统中，仅有压力油系统与机组运行有关。水泵叶片液压调节机构、液压减载装置、液压顶车装置、以及快速闸门液压启闭系统等都是为了保证主机组开停机安全可靠服务的。

2.3 气系统

气系统主要包括中压空气系统、低压空气系统、抽真空系统、电机通风系统和站房通风系统。

中压空气系统主要用于向叶片调节系统油压装置的压力油罐补气。低压空气系统主要作用：(1) 停机时向制动闸供气；(2) 停机时向虹吸式出水水道真

空破坏闸供气。计算时，空压机能耗可平均分配到机组运行期内。

大型泵站电机一般采用风机强迫通风方式，主泵机组运行期间，电机通风机一直处于运行状态。

2.4 其他耗能设备

大型泵站其他耗能辅助设备主要包括站用变压器、泵站照明系统、机械式叶片调节装置等。

站用变压器在为泵站其他辅助设备服务的同时，本身也消耗掉一部分电能，此项能耗在机组运行期和非运行期一直存在。泵站夜晚的照明功率大于白天的照明功率。

3 机组运行期间主要辅助设备能耗

3.1 供水系统能耗

大型泵站一般都是用同一台供水泵同时供给电机推力轴承和导轴承冷却用水 Q_T ，电机空气冷却器冷却用水 Q_K ，水泵水润滑导轴承一般采用河水润滑，少数采用清水润滑，因此供水泵流量

$$Q_{gs} = Q_K + Q_T \quad (1)$$

机组运行期间供水系统能耗

$$P_{gs} = \frac{\rho g Q_{gs} H_{gs}}{\eta_{gsb}} \quad (2)$$

$$= \frac{\rho g (Q_K + Q_T) H_{gs}}{\eta_{gsb}}$$

式中 H_{gs} 为供水泵扬程； η_{gsb} 为供水泵效率； Q_T 、 Q_K 量的确定见参考文献^[2]

3.2 清污系统能耗

实际工作情况下，清污能耗量与泵站流量有关，其表达式为

$$P_{qw} = \frac{P_{qwj} + P_{pdssj}}{n_z \times Q_{zd}} \times (Q \times n_y) \quad (3)$$

式中 P_{qw} 为泵站在实际工作情况下清污能耗量，kW； Q_{zd} 为水泵最大流量， m^3/s ； Q 为单台水泵在实际工况下的流量， m^3/s ； n_z 为泵站机组总台数； n_y 为机组运行台数； P_{qwj} 为清污机功率，kW； P_{pdssj} 为皮带输送机功率，kW。

3.3 电系统能耗

3.3.1 站用变压器能耗

变压器损耗包括空载损耗和负载损耗。变压器综合功率损耗是指变压器运行中的有功功率损耗和因其

消耗无功功率使电网增加的有功功率损耗之和^[5-7]。其表达式为：

$$\Delta P_z = P_{Oz} + \left(\frac{S}{S_N}\right)^2 P_{Kz} \quad (4)$$

式中 P_{Oz} 为空载综合损耗, kW, $P_{Oz} = P_O + KQ_O$; P_{Kz} 为额定负载综合损耗, kW, $P_{Kz} = P_K + KQ_K$; S 为变压器负载容量, kVA; S_N 为变压器的额定容量, kVA; P_O 为空载有功损耗, kW; P_K 为负载损耗, kW; Q_O 为空载无功损耗, kvar, $Q_O = I_0\% S_N \times 10^{-2}$; Q_K —短路无功损耗, kvar, $Q_K = U_K\% S_K \times 10^{-2}$; I_0 为空载电流, 常用百分比 $I_0\%$ 表示; U_K 为短路阻抗, 常用百分比 $U_K\%$ 表示; K 为无功经济当量, kW/kvar, 通常取 0.01 kW/kvar。如果站变负荷容量为 S_z , 则变压器综合功率损耗为：

$$\begin{aligned} \Delta P_{zb} &= P_{Oz} + \left(\frac{S_z}{S_N}\right)^2 P_{Kz} \\ &= P_O + KI_0\% S_N \times 10^{-2} + \left(\frac{S_z}{S_N}\right)^2 P_K \\ &\quad + KU_K\% S_N \times 10^{-2} \end{aligned} \quad (5)$$

3.3.2 泵站照明能耗

泵站照明能耗在机组运行期间是确定的, 据调查统计, 已建成的泵站照明功率大约在 20~70kW 之间, 白天, 站上只有部分照明设备处于启用状态, 夜间, 照明设备全部开启。因此估算, 平均照明功率为设计值的 1/2 左右。

4 机组开、停机辅助设备能耗

用于机组开、停机的辅助设备有：用于真空破坏阀断流和机组制动的低压空压机和用于叶片调节的压力油泵和中压空压机等设备。

4.1 空压机能耗

(1) 真空破坏阀耗气量

机组停机一次, 真空破坏阀开启一次, 每只真空破坏阀打开一次的耗气量为

$$Q_v = (V_v + 0.83V_g)k \frac{P_v}{P_a} \quad (6)$$

式中 V_v 为真空破坏阀活塞行程容积, $V_v = \pi D_v^2 h_v / 4$, m^3 ; V_g 为电磁阀以下管道容积, m^3 ; P_v 为真空破坏阀工作压力, MPa, 通常取为 0.65Mpa; P_a 为大气压力, 取为 0.1 MPa; k 为漏气系数, 取为 1.4。

因管道内原已有大气, 所以在计算其充气容积时, 要将原有大气体积扣除在外, 故式中 V_g 要乘以系数 0.83

(2) 制动闸耗气量

应用直管式出水流道的水泵机组每停机一次, 制动闸工作一次, 每台机组制动一次的耗气量为

$$Q_z = (V_z + 0.83V_g)k \frac{P_z}{P_a} \quad (7)$$

式中 V_z 为制动闸活塞行程容积, $V_z = \pi D_z^2 h_z / 4$, m^3 ; ; P_z 为制动气压, MPa, 取值同 P_v ; V_g 、 P_a 、 k 意义同 (1) 所述。

(3) 空压机能耗

低压储气罐的压力下限为真空破坏阀工作压力, 即为 0.65 MPa, 设压力上限为 1.0 MPa, 泵站低压贮气罐容积为 V_0 m^3 。向储气罐充气, 自压力下限充气到压力上限, 所耗标准状态下的空气的体积为

$$V_1 = \frac{(1.0 - 0.65) \times V_0}{0.1} = 3.5V_0 \quad (8)$$

空压机对储气罐充气的过程为多变过程, 则空压机理论上对空气所作功为

$$\begin{aligned} W &= \int_{p_1}^{p_2} V dp = \int_{p_1}^{p_2} V_1 \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{n}} dp \\ &= p_1 V_1 \frac{n}{n-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \end{aligned} \quad (9)$$

式中 n 为多变指数, $1 < n < 1.41$, 取为 1.3; V 为压力为 p MPa 的空气的体积, m^3 ; V_1 为标准状态下空气的体积, m^3 ; p_1 为标准状态下空气的压力, 0.1 MPa; p_2 为储气罐的上限压力, 1.0 MPa。

空压机的实际工作情况, 由于存在着气缸余隙容积及进气和排气阀门的阻力影响, 它实际所耗功量应大于理论耗功量, 假设空压机效率为 η_k , 并设电机效率为 η_d , 则空压机实际所耗功量为

$$W_{sj} = \frac{p_1 V_1 \frac{n}{n-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]}{\eta_k \times \eta_d} \quad (10)$$

机组停机一次, 真空破坏阀打开一次, 制动闸工作一次, 因此空压机充气一次可供两设备工作次数 m 为

$$\begin{aligned} m &= \frac{(1 - 0.65) \times V_0 / 0.1}{Q_v + Q_z} \\ &= \frac{3.5 \times V_0}{(V_v + 0.83V_g)k \frac{P_v}{P_a} + (V_z + 0.83V_z)k \frac{P_z}{P_a}} \end{aligned} \quad (11)$$

每台机组停机一次所耗功为：

$$W_1 = \frac{W_{sj}}{m} = \frac{p_1 V_1 \frac{n}{n-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]}{\frac{\eta_k \times \eta_d}{3.5 \times V_0}} \quad (12)$$

$$(V_v + 0.83V_g)k \frac{p_v}{p_a} + (V_z + 0.83V_z)k \frac{p_z}{p_a}$$

假设泵站每半个月开、停机一次，则将低压空气系统所耗功分配在机组半个月运行时间内的功率为：

$$P_d = \frac{W_1}{T} \quad (13)$$

4.2 高压油泵能耗

机组开机一次，液压调节机构从正常运行角度到最小角度往返各工作一次，水泵叶轮接力器用油量可按下式计算

$$V_p = \frac{\pi d_p^2 s_p}{4} \quad (14)$$

式中 d_p 为接力器直径，m； s_p 为接力器活塞行程，m。

受油器的充油量约为叶轮接力器充油量的 20%。

我国生产的油压装置的额定油压主要是 $P=25 \times 10^5 \text{Pa}$ ，且因油的体积基本不随压力的变化而变化，假设油泵及其配套电机的效率为 $\eta_{jb}=50\%$ ，则液压调节机构往返工作一次，所耗功为

$$W_y = \frac{0.4V_p P}{\eta_{jb}} \quad (15)$$

假设泵站没半个月开机一次，则将液压调节机构所耗功分配在机组半个月运行时间内的功率为

$$P_y = \frac{W_y}{T} = \frac{0.4V_p P}{\eta_{jb} T} \quad (16)$$

5 典型泵站辅助设备能耗计算分析

选择江苏省内四座典型泵站：宝应泵站，江都第二抽水站，江都第四抽水站，大套第三抽水站，四座泵站具体情况如表 1 所示。以这四座大小不同，形式不一的泵站为例，说明几座泵站自辅助设备设置情况，并对其能耗情况做了计算分析。

Table 1 Performance parameters of four typical pump stations
表 1 四座典型泵站性能参数

泵站名称	水泵型号	设计流量 (m ³ /s)	设计扬程 (m)	机组台数
宝应泵站	3500HDQ34-7.6	133.6	7.6	4
大套三站	1600ZLB10.2-4.4	50	3.7	5
江都二站	1.75ZLQc-6	81.6	6.8	8

5.1 辅助设备设置与工作情况

5.1.1 辅助设备设置情况

1、大套三站

(1) 大套三站技术供水系统为独立闭式循环系统，即每台主机泵设有各自独立的供水设备。(2) 排水系统设置两台潜水泵，置于排水廊道中，水泵在机组运行期间几乎不开启，计算能耗时可忽略不计。(3) 泵站清污设置有4台回转式清污机及皮带输送机。(4) 电机通风采用环形风道风机拔风强迫通风方式，每台电机风道独立，单独设置通风机，通风机在机组运行期间处于运行状态。(5) 设置低压空压机。(6) 设置润滑油系统。(7) 设置泵站照明设备和站用变压器。

2、宝应泵站

(1) 供水系统从站下游进水侧取水，采用直接供水方式。(2) 设置排水泵。(3) 泵站清污设置有4台回转式清污机及皮带输送机，排涝时，24小时连续运行；向北送水时，间断开机。(4) 每台水泵配2台通风机；主变配2台通风机，GIS配2台通风机；励磁配2台通风机，且通风道阻力损失很小。夏天24小时开机，正常至少开12小时。(5) 设置低压空气系统。(6) 设置润滑油系统及液压油系统(7) 设置泵站照明设备和站用变压器。

3、江都二站

(1) 供水系统采用直接供水方式。(2) 设置排水泵，机组运行期间排水泵能耗可忽略。(3) 清污系统为江都四个站公用，共设有清污机 12 台套，皮带输送机一台套，机组运行期间全部运行。(4) 泵站设置沾边风机，水泵层风机，站变风机开机时连续运行，水泵层通风机很少使用。(5) 设置低压空气系统。(6) 泵站采用液压中置式全调节机构，齿轮油泵在开停机前后使用一小段时间，设置润滑油系统。(7) 设置泵站照明设备和站用变压器。

4、江都四站

(1) 技术供水系统采用间接供水与直接供水相结合的方式，供水采用供排结合系统，必要时供水泵可入排水运行。(2) 设置排水泵，机组运行期间排水泵能耗可忽略。(3) 清污如二站所述(4) 电机通风采用环形风道风机拔风强迫通风方式，每台电机设置两台通风机，通风机在机组运行期间处于全部开启状态。

(5) 设置中压和低压空气系统，(6) 设置润滑油系统和压力油系统。(7) 泵站照明设备和站用变压器。

5.1.2 泵站运行期间辅助设备工作情况

泵站运行期间辅助设备工作情况如表 2 所示

Table 2 Operating mode of auxiliary equipment during pump station operating period
表 2 泵站运行期间辅助设备工作情况

泵站	水系统			气系统		液压油系统	站变与照明
	供水	排水	清污	通风	中、低压气		
宝应泵站	运行	间断短时运行	连续运行	连续运行	间断短时运行	1#系统连续运行 2#系统间歇运行	运行
大套三站	运行	间断短时运行	连续运行	连续运行	间断短时运行	无	运行
江都二站	运行	间断短时运行	连续运行	连续运行	间断短时运行	无	运行
江都四站	运行	间断短时运行		连续运行	间断短时运行	机组启动前后运行	运行

5.2 辅助设备能耗计算

以大套三站为例，计算在设计工况下，机组全部运行时辅助设备各部分能耗。

(1) 单台机供排水耗能：

$$P_{dt} = \frac{\rho g Q H}{\eta} = 0.656 \text{ kW}$$

五台全部运行总功率为

$$P_{gps} = 0.656 \times 5 = 3.28 \text{ kW}$$

(2) 清污耗能：

$$P_{qw} = \frac{P_{qwj} + P_{pdssj}}{n_z \times Q_{zd}} \times (Q \times n_y) = 24.96 \text{ kW}$$

(3) 站变损耗功率：

$$\Delta P_{zb} = P_{OZ} + \left(\frac{S_{zt}}{S_N}\right)^2 P_{KZ} = 2.90 \text{ kW}$$

(4) 电机通风功率确定，大小为每台机 5 kW，舞台全开为 25 kW。泵站照明功率确定，大小为 20kW。低压空气能耗量很小，可不计。

(5) 机组开、停机能耗：

$$P_y + P_d = 0.46 \times 10^{-3} + 0.94 \times 10^{-3} = 1.4 \times 10^{-3} \text{ kW}$$

由计算结果可知，机组开、停机能耗很小，故忽略不计。

以上四座泵站辅助设备能耗、辅助设备各部分能耗占辅助设备总能耗百分比及辅助设备总能耗占泵站所耗功率百分比如表 3 所示。

Table 3. Percentages of parts to total dissipation energy of auxiliary equipment and total dissipation energy of auxiliary equipment to total energy consumption of the pump station during operating period

表 3 泵站运行期辅助设备各部分能耗占辅助设备总能耗百分比及辅助设备总能耗占泵站总能耗的百分比

泵站	供排水能耗 P_{gps}/kW	供排水能耗占总能耗百分比 %	清污能耗 P_{qw}/kW	清污能耗占总能耗百分比 %	通风能耗 P_{dtf}/kW	通风能耗占总能耗百分比 %	站变损耗与泵站照明能耗 $P_{zm} + P_{zs}/\text{kW}$	站变损耗与泵站照明能耗所占总能耗百分比 %	辅助设备总功率 P_{tz}/kW	占泵站所耗功率百分比 $P_{tz}/P_{bz}/\%$
大套三站	3.28	4.30	24.96	32.79	25	32.84	2.88+20	30.06	76.12	2.75
宝应泵站	16.86	20.09	45.65	54.40	3.5	4.17	7.92+10	21.35	83.92	0.67
江都二站	6.97	7.36	40.73	43.00	13.52	14.27	16+17.5	35.36	94.73	1.43
江都四站	41.07	19.508	104.83	49.792	38.5	18.287	11.135+15	12.4	210.534	0.95

5.3 泵站辅助设备能耗分析

辅助设备各项能耗占辅助设备总能耗的百分比如表 3 所示。清污能耗占各泵站辅助设备总能耗比例都较大；照明能耗在各泵站中所占比例也比较大；如电机通风采用环形风道风机拔风强迫通风方式，通风道阻力较大时，则通风能耗所占比例比较大。因此，在辅助设备节能方面，通过选择合理的清污方式并制定

经济清污模式和减少电机通风道损失对节能会有比较明显的效果，另外供水系统采用闭式循环直接供水方式可能应比其他供水方式节能。

6 结论

(1) 大中型泵站耗能的辅助设备主要有供、排水泵、清污机及皮带输送机、通风机、泵站照明设施和站用变压器。

(2)辅助设备能耗占泵站总能耗的1%~3%左右,辅助设备耗能中清污能耗、电机通风能耗、站变损耗功率所占比例较大。

(3)大中型泵站可通过选择配套合理的辅助设备,制定正确的运行方案,达到辅助设备节能的目的。

References (参考文献)

- [1] FENG Xiao-li, QIU Bao-yun, HUANG Hai-tian, Study on optimal operation of Jiangdu of South to North Water pump stations in Eastern Route Diversion Project[J], Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27 (4) ,P130-134 (Ch)
冯晓莉,仇宝云,黄海田等,南水北调东线江都排灌站优化运行研究[J],水力发电学报,2008,27(4),P130-134
- [2] PAN Xian Ang. Auxiliary Equipment and Automation of pump station[M], Beijing, Water Conservancy and Electric Power Press, 1989:4-109 (Ch)
潘咸昂,泵站辅助设备及自动化[M],北京,水利电力出版社,1989,P4-109
- [3] Hydraulic Engineering Management Office of Jiangsu Province. Jiangdu Pumping Station[M], The Second Edition, Beijing: Water Resources and Hydropower Press, 1979:P256-298 (Ch)
江苏省水利工程管理处.江都排灌站[M].第二版,北京,水利水电出版社,1979, P256-298
- [4] GAO Zhao-hui, QIU Bao-yun, WEN Ze-hang, Research progress on trash rack and feculence-clearing for pump station[J], Drainage and Irrigation Machinery, 2006, 24 (2) , P10-15 (Ch) .
高朝辉,仇宝云,闻泽杭,泵站拦污栅及其清污研究进展[J],排灌机械,2006,24(2),P10-15
- [5] XIA Chun-yan, Analysis and application of transformer economic operation[J], Transformer,2007, 44 (12) , P 24-28 (Ch)
夏春燕.变压器经济运行分析与应用[J].变压器,2007,44(12):24-28
- [6] J.C.Olivares, J.Canedo, P.Moreno, J.Driesen, R.Escarela, S.Palanivasagam. Experimental study to reduce the distribution-transformers stray losses using electromagnetic shields[J]. Electric Power Systems Research, 2002, 63 (1) , P 1-7
- [7] A. Basak, A. J. Moses, M. R. Yasin. Flux distribution and loss in a 100 kV A 3-phase wound amorphous transformer core. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1996, 160,P 210-212