工程与管理科学
Engineering and Management Science
第 8 卷◆第 10 期◆版本 1.0◆2026 年
文章类型：论文|刊号（ISSN）：2705-0637(P) / 2705-0645(O)

基于多源运行数据的梯级泵站分层能耗核算与运行能效评价

柴威* 雷振如 徐东文 李珍珍 袁文一
山西万家寨引黄水务集团有限公司 山西省太原市 030012

DOI：10.32629/ems.v8i10.22606

[摘 要] 基于万家寨引黄工程总干一、二、三级泵站的运行与计量数据，分层核算机端及 400 V 回路用电，结合同期输水量评价运行能效。2025 年 6—7 月，总一用电居前的 5 号、4 号机组分别占本站机端电量的 18.45%、17.01%，总二 9 号、8 号分别占 19.78%、18.91%，总三 5 号、1 号分别占 22.02%、21.43%。纳入核算的 400 V 回路电量相当于各站同期机端电量的 0.602%、0.648%和 0.673%。7 月三站机端单耗较 6 月分别增加 2.48%、3.02%和 0.88%，其中总二平均进水流量降幅大于平均机端功率降幅，单耗增幅最大。6 组同台数历史对照中，按每输送 100 万 m³ 折算，总三保留 4、7、10 号机组、以 5 号替换 1 号时，机端电量差最大，少用 4.20 MWh、缩短 0.20 h。总三单台运行时，7 号较 5 号少用 3.53 MWh、缩短 0.54 h，用时差最大。结果可为梯级泵站用电核算、运行方式比较和节能管理提供参考。

[关键词] 梯级泵站；多源运行数据；分层能耗核算；单位水量电耗；机组组合；运行能效

引言

万家寨引黄工程为缓解山西受水区水资源短缺而建，从万家寨水库取水，经总干线三级提水，在下土寨分送南、北干线[1]。泵站运行需协调上游来水、级间调蓄和下游供水[2]。

已有研究涉及梯级系统时空分解及串并联能耗[3-4]、主机损耗与辅助用电[5-7]，以及机组组合优化和水位调度[8-9]。由于万家寨引黄工程进线、主变与机端的计量范围存在包含关系，抄表与水量统计时段也有差异，所以需依据供电关系划分边界并统一统计时段。

本文分层核算了各站用电，并以同期水电量分析单耗变化，比较同台数组合完成同等输水任务的电量和用时。

1 梯级泵站分层能耗核算与运行能效评价方法

1.1 计量边界与同期水电量计算

依据接线图划分进线、主变、驱动、机端及 400 V 回路的计量边界，上下游电量分别核算。按测点和时标对齐功率与流量，在共同有效区间内作梯形积分。

$$E_b=\frac{1}{2000}\sum_i(P_{b,i}+P_{b,i+1})\Delta t_i \tag{1}$$

$$V=1800\sum_i(Q_i+Q_{i+1})\Delta t_i \tag{2}$$

式中，E_b为边界 b 的电量（MWh），V为水量（m³），P_b和 Q为有功功率（kW）和流量（m³/s），i 为有效区间左端序号，Δt_i为区间时长（h）。

1.2 分层用电构成与设备损耗估算

各机组同期机端电量之和为本站机端总电量。第 u 台机组的用电占比为

$$s_u=100\frac{E_u}{E_{\mathrm{mot}}} \tag{3}$$

式中，s_u为机组用电占比（%），E_u与 E_{mot}分别为第 u 台机组及本站全部主机的同期机端电量（MWh）。

主变损耗由空载损耗和负载损耗组成，后者按负载率平方折算。变频器损耗按手册对应运行点的输出功率和效率估算。

$$P_{\mathrm{loss,tr}}=P_0+\beta^2P_{\mathrm{k}} \tag{4}$$

$$P_{\mathrm{loss,drv}}=P_{\mathrm{out}}\left(\frac{1}{\eta_{\mathrm{drv}}}-1\right) \tag{5}$$

式中，P_0和 P_{k}分别为主变空载损耗和额定负载损耗，β为负载率，P_{out}和 η_{drv}分别为变频器输出功率和效率，功率单位均为 kW。

1.3 单位水量电耗与同水量任务评价

以泵站为统计单元，将有效时段内主机组电量之和与同期输水量相对应，可计算单位水量的机端电耗：

$$e=\frac{1000E_{\mathrm{mot}}}{V} \tag{6}$$

式中，e为单位水量机端电耗（kWh/m³）。

工况配对后，以各时段输水量为权重对比单耗；结合分段水量与流量计算运行用时与有效流量，进而折算特定开机组合完成同等输水任务的机端电量与总用时：

$$E_{\mathrm{task}}=\frac{eV_0}{1000} \tag{7}$$

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

文章类型：论文|刊号（ISSN）：2705-0637(P) / 2705-0645(O)

$$t_{\text{task}}=\frac{V_0}{3600Q_{\text{eff}}} \tag{8}$$

式中，V_0为基准输水量，Q_{eff}为有效流量（m³/s）；E_{task}和 t_{task}分别为完成输水任务所需的机端电量(MWh)和用时(h)。

2 工程对象、数据与结果

2.1 工程对象与数据

总干一、二、三级泵站每站均装设 10 台主机组，监控系统提供的整点运行记录主要包含有功功率、流量、水位以及频率，接线图和设备描述用于明确测点所对应的设备。

研究时段取自 2025 年 6 月 1 日 00:00 至 8 月 1 日 00:00。在此期间，三座泵站均有 1464 h 的机端功率、400V 回路功率及流量的共同有效监测记录。月度电量核算选取自具备完整监测记录的启停工况，而机组组合对照样本筛选自 2025 年稳定运行记录。

2.2 分层用电构成与设备损耗

2025 年 6—7 月，三站机端总电量分别为 60177.11、59837.47 和 32670.00MWh，已测 400V 回路电量分别为 362.29、387.78 和 219.92MWh，分别相当于各站同期机端电量的 0.602%、0.648%和 0.673%（如表 1 所示）。

从各泵站的用电分布来看，机端电量占比位居前两位的机组分别为：总一 5 号和 4 号、总二 9 号和 8 号、总三 5 号和 1 号。占对应泵站总电量的比例依次为 18.45%和 17.01%、19.78%和 18.91%、22.02%和 21.43%（如图 1 所示）。上述数据反映了各机组在统计期内的用电负荷分布。此外，在已测 400V 回路中，总一 23B 开关累计用电 185.38MWh，占该站 400V 回路总电量的 51.17%。

表 1　2025 年 6—7 月三站同期水电量与机端单耗

泵站	月份	时长/h	机端电量/MWh	水量/万 m³	机端单耗/(kWh/m³)	400 V 电量/MWh	低压比值/%
总一	6 月	720	30 097.60	6 985.78	0.43084	180.66	0.600
	7 月	744	30 079.51	6 812.93	0.44151	181.63	0.604
总二	6 月	720	29 860.63	7 000.70	0.42654	193.62	0.648
	7 月	744	29 976.84	6 822.15	0.43940	194.15	0.648
总三	6 月	720	16 448.45	6 877.56	0.23916	113.20	0.688
	7 月	744	16 221.55	6 723.34	0.24127	106.72	0.658

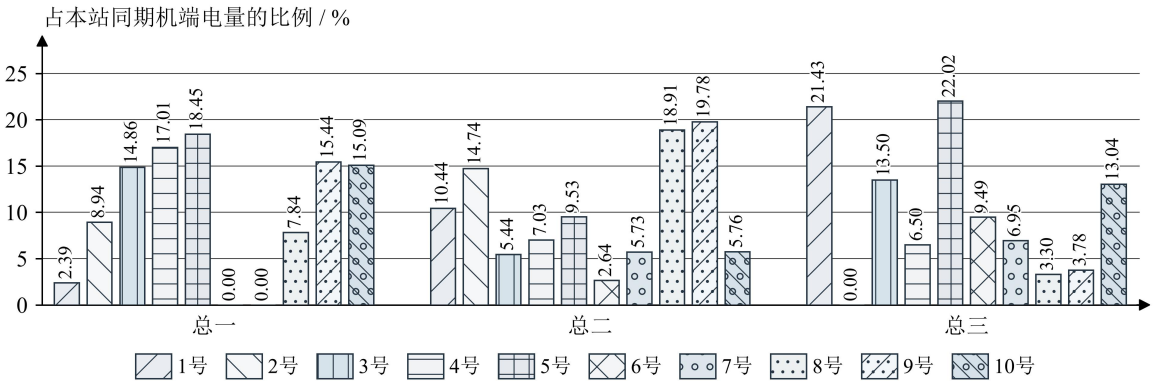


图 1　2025 年 6—7 月各机组占本站机端电量的比例

总二和总三同期双回进线电量为 60 363.26 和 32 775.55 MWh，扣除机端和纳入核算的 400 V 回路电量后，差额分别为 138.01 和 −114.38 MWh，占各站进线电量的 0.229%和 −0.349%。总三差额为负，需复核计量尺度及支路归属。

按负载率 50%、功率因数 0.95 估算，总一、总二的 1B 或 4B 单台主变损耗约占其输入功率的 0.31%，总三同编号单台约为 0.35%。按手册额定输出 6 800 kW 及效率 98.89%估算，总三变频器损耗为 76.33 kW，占输入功率的 1.11%。

2.3 同站月度机端单耗变化

7 月三站机端单耗较 6 月分别增加 2.48%、3.02%和 0.88%（表 1）。总二平均进水流量由 27.01 降至 25.47 m³/s，降幅大于平均机端功率由 41.47 降至 40.29 MW 的降幅，故单耗增幅最大。

总二 6 月稳定工况均为 4 台运行，7 月为 3～6 台，其中 3 台运行约占稳定记录的一半。

2.4 同台数机组组合的历史对照

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

文章类型：论文|刊号（ISSN）：2705-0637(P) / 2705-0645(O)

6 组同台数历史对照统一折算为每输送 100 万 m³ 所需的机端电量与用时，差值按原组合减替换组合计算（图 2）。

总三保留 4、7、10 号机组时，5 号较 1 号折算少用 4.20 MWh、缩短 0.20 h，电量差最大。该组 405 个原组合小时匹配到 10 个不同参照小时。单台运行时，7 号较 5 号少用 3.53 MWh、缩短 0.54 h，用时差最大。

总一以 4、8 号替换 5、10 号，折算少用 3.18 MWh、缩短 0.015 h。总二单台运行时，5 号较 1 号少用 3.30 MWh、缩短 0.196 h。总三保留 4、7、10 号时，1 号较 3 号少用 2.16 MWh。保留 3、5、6 号时，10 号较 1 号少用 1.35 MWh。

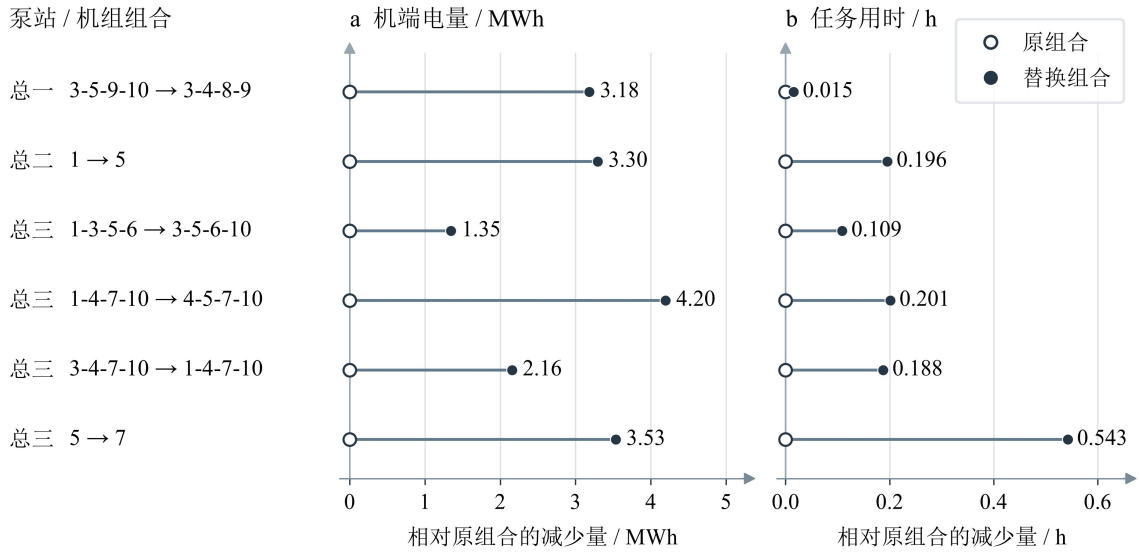


图 2　不同机组组合输送 100 万 m³ 水的机端电量与用时比较

3 结论

（1）2025 年 6—7 月期间，三泵站机组中最大用电占比分别为 18.45%、19.78%和 22.02%；同期，各站 400V 回路电量与泵站总电量之比均低于 0.7%。

（2）受输水量影响，三泵站 7 月机组能耗较 6 月均有所增加。其中总二泵站能耗增幅最大，为 3.02%。

（3）在相近水位、相同开机台数的历史工况下，总三保留 4、7、10 号机组时，搭配 5 号较 1 号每输送 100 万 m³ 水耗电减少 4.20MWh、用时缩短 0.20h；单机工况下，运行 7 号机组较 5 号耗电减少 3.53MWh，用时缩短 0.54 h。等输水量下的电量与用时对比，可为泵站相似工况下的优化调度提供参考。

[参考文献]

[1]刘群. 万家寨引黄入晋工程泵站出水系统水力学计算研究[J]. 水利水电技术, 1997(11): 58－63.

[2]马韧韬, 高普新. 引调水工程泵站节能评估要点分析[J]. 水电站机电技术, 2020, 43(1): 65－67.

[3]董加新, 王智, 王玉川, 等. 多级泵站系统能耗的计算方法[J]. 中国农村水利水电, 2021(5): 43－48.

[4]桑国庆, 张双虎, 张林, 等. 基于时空分解的梯级泵站输水系统运行效率计算方法与应用[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 67－75.

[5]陆永泉, 朱庆元, 仇宝云, 等. 大套第三抽水站辅助设备能耗计算分析[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(4): 340－343.

[6]张伟, 毕树德, 赵立宾, 等. 引黄济青王道泵站系统能耗计算与效率特性分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(S2): 45－52.

[7]叶婷, 朱晓元, 卢飞. 淮安四站泵站能耗研究与效率分析[J]. 江苏水利, 2025(7): 70－72.

[8]肖若富, 龚诗雯, 周玉国, 等. 泵站站内机组运行组合的优化研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(12): 164－166.

[9]杜梦盈, 张召, 李谷涵, 等. 大型水利工程梯级泵站短期优化调度方案[J]. 排灌机械工程学报, 2024, 42(2): 194－200.

作者简介：柴威（1979.7.21），男，籍贯：山西襄汾，汉族，学历：本科，职称：高级工程师，职务：山西万家寨引黄水务集团有限公司副总经理，研究方向：水利工程、泵站工程、水利节能与运行优化。

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.