

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221399

# 基于并联泵组全生命周期的多目标能效优化控制模型

张 杰, 高 强, 王 涛, 闫宏伟, 王辰昊

(中北大学机械工程学院, 山西 太原 030051)

**摘要:** 目前国内对于并联泵组大多采用单目标控制模型, 在使用过程中只注重运行工况的能效优化和运行成本, 无法根据泵组在全生命周期中的综合能效状态来自适应调整泵组实时工况下的运行策略。为此, 提出一种可在全生命周期中根据当前泵组的能效状态, 自主调节3个目标函数权重系数的多目标泵组能效优化控制模型, 从而提高泵组在全生命周期中的能效并延长泵组的使用周期, 并利用理想点数值和距离偏差法确定目标函数, 借助于LINGO求解多目标理想点模型, 得到最高系统总效率、最低泵组比能耗和最高系统可靠性的最优解。试验结果表明, 改进后的多目标理想点模型能根据泵组实时状态调整目标权重组合, 从而调整泵组实时控制策略。

**关键词:** 并联泵组; 能效优化; 全生命周期; 多目标; LINGO

**中图分类号:** TV675; TH38; TP278

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)04-0211-05

## 1 引言

离心泵作为最流行的抽运设备, 用于80%~90%的全水处理, 大多数中型和大型的离心泵提供65%~85%的额定效率, 甚至更小<sup>[1]</sup>。同时, 不断增长的能源市场和不断增加的能源成本要求泵送技术提供新的解决方案, 以提高能源效率。因此, 泵送系统的能量效率问题一直为关注热点。近年来在多泵系统的能源效率问题<sup>[2,3]</sup>中, 一部分将效率作为主要的质量指标, 同时, 维护和维修也占泵组生命周期成本的很大一部分。这些均会受到泵的可靠性的影响<sup>[4]</sup>。ZHOUNIAN L等<sup>[5]</sup>采用遗传算法优化单泵机组, 以提高其可靠性, 但未考虑到优化准则仅为泵机组的最大使用寿命, 亦未考虑在可靠性与能耗之间进行权衡的可能性; OSHURBEKOV S等<sup>[6]</sup>在考虑可靠性约束的情况下, 对两台5.5 kW并联运行的泵系统进行了能耗分析, 发现在综合考虑能源成本和维护维修成本的情况下, 提出的平衡控制方法能最大限度地降低并联泵系统的总寿命成本。本文针对目前并联泵组常见的单目标控制模型只注重运行工况和运行成本的能效优化, 无法根据泵组在全生

命周期中的综合能效状态来自适应调整泵组实时工况下运行策略的问题, 提出了一种可在全生命周期中根据当前泵组的能效状态, 自主调节3个目标函数权重系数的多目标泵组能效优化控制模型, 从而使并联泵组在全生命周期的前期(低磨损阶段)实现高效能, 在全生命周期的中后期(高磨损阶段)实现高可靠性。

## 2 泵组多目标能效优化控制模型

在2台并联的型号为CDLF4-100FSWSC的离心泵不同转速试验中, 发现初始离心泵产品说明书上均会有其额定工况效率曲线图, 但往往不够精确。为求得较准确的效率图, 对单台离心泵展开试验, 图1为CDLF4-100FSWSC型离心泵在不同转速(50、40、30、20 Hz)下的效率曲线图。

由图1可知: ①在此调速范围内, 泵基本符合相似定律, 且能保持较高的效率; ②白色虚线和白色实线分别为离心泵的等效率曲线和实际效率趋势线, 在曲线上的一个范围内, 可近似将工况点的效率看成是相等的, 而实际效率趋势线与等效率曲线相比, 存在一定程度的误差, 但细分到各频率下来看, 两曲线的变化情形趋于相同<sup>[7]</sup>; ③泵的最

**收稿日期:** 2022-06-10, **修回日期:** 2022-07-15

**基金项目:** 山西省自然科学基金项目(20210302123038); 山西省科技合作交流专项项目(202104041101001)

**作者简介:** 张杰(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电气自动化, E-mail: 1139400625@qq.com

**通讯作者:** 高强(1975-), 男, 副教授, 研究方向为流体机械与控制, E-mail: gaoqiang@nuc.edu.cn

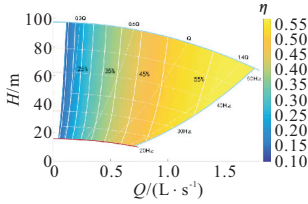


图 1 CDLF4-100FSWSC 的变转速效率图

Fig. 1 Variable speed efficiency diagram of CDLF4-100FSWSC

高效率点处于  $1.5Q_0$  ( $Q_0$  为水泵的额定工况点) 处,在此基础上若一味地追求离心泵的高效率性,则大概率会使电机出现过载现象,不仅存在安全隐患,还会极大地影响离心泵的使用周期。因此,试验中采用  $1.5Q_0$  作为离心泵的流量上限。其特性曲线  $Q-H$  可用幂函数拟合,即:

$$H = a - bQ^\lambda \quad (1)$$

式中,  $H$  为泵的当前扬程;  $a$  为泵的关断扬程;  $b$ 、 $\lambda$  均为离心泵特性曲线方程的拟合系数;  $Q$  为离心泵的当前流量。

为使泵组系统能根据实时工况与目标工况的差距,对目标函数权重系数进行自适应调整,以降低泵组在全生命周期的运行成本,提出了一种可在全生命周期中根据当前泵组的能效状态,自适应调整控制策略的多目标泵组能效优化模型。泵组系统见图 2。

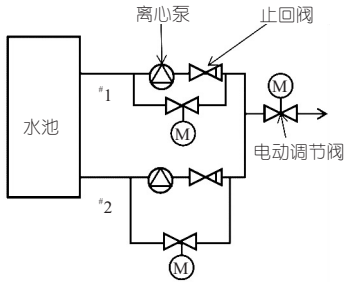


图 2 并联离心泵系统

Fig. 2 Parallel centrifugal pump system

选 2 台 CDLF4-100FSWSC 离心泵并联,并对单泵和并联泵组分别工作在 25、50 Hz 时进行分析<sup>[8]</sup>,并联泵组变频调速下的工作范围见图 3。图 3 中,P1~P5 为管网曲线上流量 0.5~2.5 L/s 的 5 个目标工况。由图 3 可知,P5~P1 工况下泵

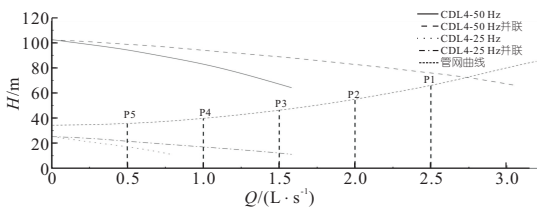


图 3 并联泵组变频调速下的工作范围

Fig. 3 Working range of parallel pump group under frequency conversion speed regulation

组的流量和扬程均相应逐渐增大,磨损逐渐加剧,其中选定 P1 为高磨损阶段的代表工况,P5 为低磨损阶段的代表工况。

多目标模型相较于单目标模型来说,求解过程稍微复杂些,通常先将其简化为单目标模型,再进行求解计算。在并联泵组全生命周期中,为使离心泵系统在加入其他目标后依旧能保持高效可靠,泵组系统应根据实时工况的不同自适应调节控制模型中各目标函数的权重系数,由于系统的总体效率是实时工作状态和目标工作状态之间的相对偏差,因此可将目标工作状态视为一个理想状态,即采用理想点法。另一方面,并联泵组能效优化的控制策略向可靠性方向倾斜时,可理解为在并联泵组的全生命周期中,并联泵组在工作的中后期磨损加剧,此时需从构建的理想点模型中着重选取优化可靠性的解集。本文选取两台同型号的离心泵,采用并联的方式将其连接起来,查阅资料后可知此时的系统在两台离心泵的流量相同时最佳,将实际用水量平分,在此基础上,并联泵组的控制系统就可简化为两台独立的离心泵进行控制优化,求得的目标函数为:

$$\min [\alpha D_{\text{sys}} + \beta D_{\text{es}} + \theta D_{\text{re}}] \quad (2)$$

其中  $D_{\text{sys}} = (Q_m H_m - Q_n H_n) / (Q_n H_n)$

$$D_{\text{es}} = |(E_s - E_{s,\text{min}}) / E_{s,\text{min}}|$$

$$D_{\text{re}} = |(F - F_{\text{min}}) / F_{\text{min}}|$$

$$\alpha + \beta + \theta = 1$$

式中,  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\theta$  分别为系统总效率、离心泵比能耗、系统可靠性的权重系数;  $D_{\text{sys}}$ 、 $D_{\text{es}}$ 、 $D_{\text{re}}$  分别为系统总效率、最佳比能耗运行状态、最佳可靠性的相对数值偏差;  $Q_m$  为单泵供给的主回路流量;  $H_m$  为单泵当前实际扬程;  $Q_n$ 、 $H_n$  分别为单泵的目标运行状态;  $E_{s,\text{min}}$  为理想比能耗;  $F_{\text{min}}$  为理想叶轮载荷。

### 3 泵组控制模型的求解与优化

#### 3.1 约束条件

##### 3.1.1 目标工况约束

对于两个或两个以上同型号离心泵采用并联方式组成的泵组系统来说,该系统处于最高效率时,单个水泵的运行状态大致相同,即:

$$Q_A = \sum_{i=1}^n X_i Q_n = N Q_n \quad (3)$$

式中,  $Q_A$  为系统总体的目标供给水量;  $i$  为水泵编号,  $1 \leq i \leq n$ ;  $X_i$  为第  $i$  个水泵的运行状态,启动为 1,停止为 0;  $Q_n$  为单一水泵的目标流量;  $N$

为正在工作的水泵总数。

确定目标供给水量后,在求目标扬程时,可通过管网曲线进行求解,但若管网曲线所提供的数据不够清晰时,还可通过泵的实际运行状态来求解目标扬程,公式为:

$$H_n = H_A = d + eQ_A^2 \quad (4)$$

其中  $e = (H_{m2} - H_{m1}) / (N_2^2 Q_2^2 - N_1^2 Q_1^2)$

式中,  $H_n$ 、 $H_A$  分别为单一水泵、系统的目标扬程;  $d$  为静扬程;  $e$  为管网阻力系数;  $Q_1$ 、 $Q_2$  分别为当前单泵 # 1、# 2 在主回路的流量;  $H_{m1}$ 、 $H_{m2}$  分别为当前单泵 # 1、# 2 在主回路的扬程;  $N_1$ 、 $N_2$  分别为当前泵组启动水泵 # 1、# 2 的数量。

其中,单泵的主回路流量、扬程与该泵供给的总流量的关系公式为:

$$\begin{cases} Q_m = Q + Q_{by} \\ H_m = s^2 a - bQ_m^2 \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $Q_m$  为单泵的总流量;  $Q_{by}$  为单泵的旁通流量;  $s$  为水泵调速比;  $a$ 、 $b$  均为拟合系数。

为了达到目标运行状态,单一水泵需满足的约束条件为:

$$\begin{cases} H_m \geq H_n \\ Q \geq Q_n \end{cases} \quad (6)$$

### 3.1.2 计算约束

并联泵组系统除了主回路流量控制外,还有节流控制和旁通流量控制,此时需要新的约束条件,以避免求得无效解集,公式为:

$$\begin{cases} e = (H_m - d) / (N^2 Q^2) \geq e_0 \\ 0 \leq Q_{by} \leq Q_{bymax} \\ Q_{bymax} = \sqrt{H_m / f} \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $e_0$  为泵组在无节流控制情况下的主回路阻力系数;  $Q_{bymax}$  为泵组当前运行状态下的最大旁通流量;  $f$  为旁通阀开到最大的阻力系数。

### 3.2 模型的求解

系统总效率、比能耗和系统可靠性的权重设定将极大地影响最优解的选取。为研究不同的权重组合对模型求解结果产生的影响,使各权重系数在  $[0.1, 0.8]$  中取值,且  $\alpha + \beta + \theta = 1$ ,为了能更直观地观察泵组在全生命周期中的能效状态,使各权重系数以 0.1 为间隔进行研究,并在全部的 36 种权重组合中找出满足泵组当前运行状态的最佳工况,取 P1(2.5, 66.25)、P3(1.5, 46.25)、P5(0.5, 36.25) 三种工况为泵组不同时期的不同目标工况。

为简化模型,令式(2)中  $E_{smin}$ 、 $F_{min}$  为全局最优值,此时可建立模型 1。通过 LINGO<sup>[9]</sup> 求解

并联泵组在不同运行状态下的解集分布见图 4(a)~(c)。由图 4(a)~(c)可知,模型 1 中的 P1、P3 两种工况下,任意改变权重系数组合,所得解集的分布均未出现变化,此时模型 1 的权重系数不起作用。整体来看,P3 工况下不同的权重系数组合均使泵组系统的单泵超出了其运行范围,此时系统的供给流量满足要求,为匹配此流量,并联泵组系统需提高扬程,此时提高系统阻力即可。而 P5 工况下的解集结果良好,伴随着  $\alpha$  系数的逐渐增大,泵组的系统总效率也在逐渐提高,流量也逼近该工况下的理想值,且此时  $\beta$  也在相应地减小,即同时拥有较低的比能耗;而随着  $\beta$  与  $\theta$  的增大,流量值也逐渐向比能耗和叶轮载荷较小的方向靠拢,系统总效率也有增无减。但由于 P1、P3 两种工况的劣解性,因此该模型并不适合并联泵组全生命周期的动态调整。

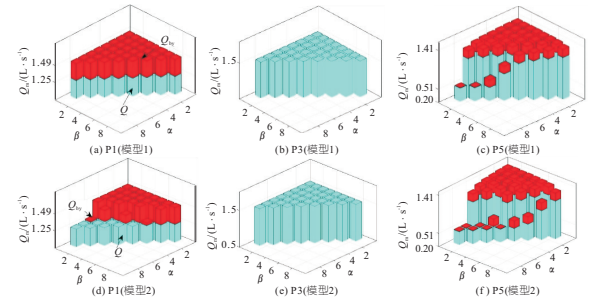


图 4 模型 1、2 的解分布

Fig. 4 Solution distribution for model 1 and model 2

由于 P1、P3 的结果不太理想,使  $E_{smin}$ 、 $F_{min}$  在相同的扬程下局部最优,从而建立模型 2 并求得泵在不同运行状态下的最优解,见图 4(d)~(f)。由图 4(d)~(f)可知,模型 2 相比模型 1 改进很大,但 P3 解依然不变,因此考虑对模型进行改进。

### 3.3 模型的改进

由模型 1、2 的解分布可看出,离心泵各项指标的数值偏差偏大,为了尽可能缩小这个差距,使用离心泵实际运行状态与理想运行状态的距离偏差来代替,获得模型 3、4,目标函数为:

$$\begin{cases} D_{sys} = \sqrt{\left(\frac{Q_m - Q_n}{Q_n}\right)^2 + \left(\frac{H_m - H_n}{H_n}\right)^2} \\ D_{es} = \sqrt{\left(\frac{Q_m - Q_{es}}{Q_{es}}\right)^2 + \left(\frac{H_m - H_{es}}{H_{es}}\right)^2} \\ D_{re} = \sqrt{\left(\frac{Q_m - Q_{re}}{Q_{re}}\right)^2 + \left(\frac{H_m - H_{re}}{H_{re}}\right)^2} \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $Q_{es}$ 、 $H_{es}$  分别为在只考虑泵组的比能耗时,理想状态下系统最优比能耗对应的水泵的流量、扬程;  $Q_{re}$ 、 $H_{re}$  分别为在只考虑泵组的可靠性时,理想状态下系统最优可靠性对应的水泵的流量、

扬程。

模型 3、4 的解集分布见图 5。由图 5 可看出,模型 3 在 P1、P3、P5 下均只有一个解,明显不符合实际工况下的泵组动态调整;模型 4 与模型 2 的解集分布大致相同,但相对来说整体有效解的数量减少。采用距离偏差构建的模型在整体上比数值偏差构建的模型要差。但使用距离偏差构建的模型,在缩小  $D_{sys}$  等参数的范围差距方面反而有良好的表现,其中模型 4 在 P1 工况下的各参数见图 6。模型 3、4 在解的数量、解集分布上均不如模型 2,这也验证了只改变  $D_{sys}$  等参数范围差距的情况下,构建的模型对权值系数的影响力并未提高太多。即在实际的泵组工作中,此模型不能根据泵组所处工作状态的不同而自动调整控制策略。

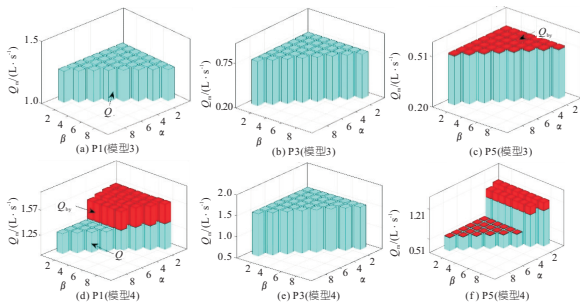


图 5 模型 3、4 的解集分布

Fig. 5 Solution set distribution of model 3 and model 4

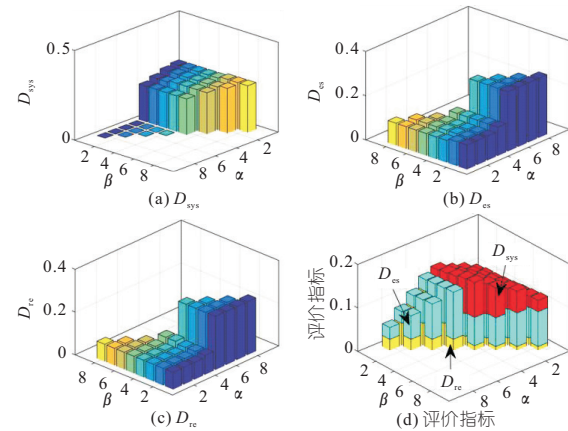


图 6 模型 4 在 P1 工况下的指标分布

Fig. 6 Index distribution of model 4 under P1

### 3.4 泵组最终控制模型确立

4 种模型中,模型 2 最佳,但仍有部分瑕疵,因此进一步改进模型 2,将泵组 3 个指标进行归一化处理,得到新的目标函数为:

$$\min \left[ \alpha \frac{D_{sys}}{D_{sysmax}} + \beta \frac{D_{es}}{D_{esmax}} + \theta \frac{D_{re}}{D_{remax}} \right] \quad (9)$$

式中,  $D_{sysmax}$ 、 $D_{esmax}$ 、 $D_{remax}$  分别为泵组系统实际运行状态下的效率、比能耗、可靠性最大偏差值,也可用比能耗在理想运行状态或可靠性在理想运

行状态下的泵组系统效率的最大偏差值代替。

求解后与原模型 2 对比,结果见图 7~9。由图 7~9 可知,P1 工况下,原模型 2 与改进后的模型 2 的不同解数量相当,区分不大;P3 工况下,改进后的模型 2 除了  $N$  取 1 的解,在  $\alpha$  较小时取得了  $N$  为 2、 $D_{sys}$  为 0 的解;P5 工况下,改进后的模型 2 在解的数量、解集的整体分布方面均比原模型 2 表现好,且改进后的模型 2 不同解的过渡亦更好。总体来说,改进后的模型 2 优于原模型 2。这也意味着改进后的模型若用于泵组系统实际生产中,面对不同的工况条件,泵组系统能做出一个较好的反应,不仅可降低泵组整个生命周期的运行成本(如因高磨损而造成的维护成本),还能维持高效率工作。

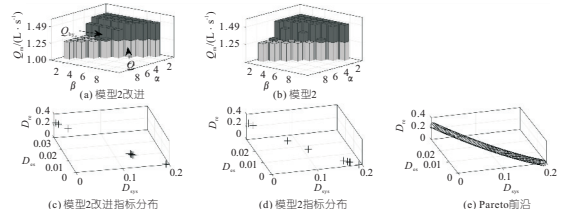


图 7 P1 工况下模型结果对比

Fig. 7 Comparison of model results under P1

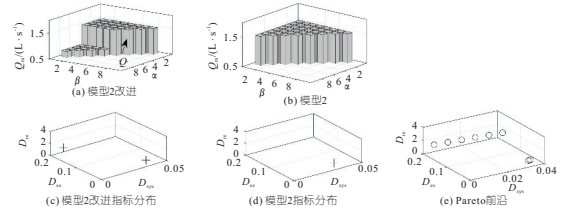


图 8 P3 工况下模型结果对比

Fig. 8 Comparison of model results under P3

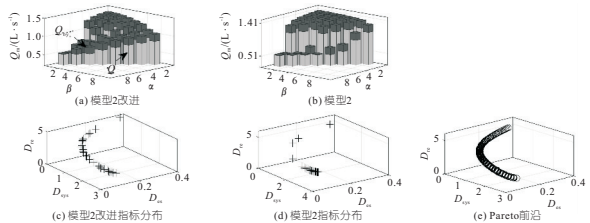


图 9 P5 工况下模型结果对比

Fig. 9 Comparison of model results under P5

## 4 结论

a. 针对目前无法根据泵组在全生命周期中的综合能效状态来自适应调整泵组实时工况并同时相应调整泵组运行策略的问题,提出了一种可在泵组全生命周期中根据当前泵组的能效状态,自主调节 3 个目标函数权重系数的多目标泵组能效优化控制模型。

b. 改进后的模型 2 在保证求解速度的情况下,结构较简单,在权重系数变化时,所得解集在

数量、分布上均表现良好,这也使本文研究的控制策略能自动且全面地适应并联泵组在其全生命周期中的各种运行状态,从而使并联泵组在使用前期(低磨损)具有较低的目标偏差和比能耗(即高能效),在使用中后期(高磨损)拥有较低的叶轮载荷(即高可靠性),提高了泵组在全生命周期中的效率并尽可能减少其在使用期的运行成本。

#### 参考文献:

- [1] KINI P G, BANSAL R C. Effect of voltage and load variations on efficiencies of a motor-pump system[J]. IEEE transactions on energy conversion, 2010,25(2):287-292.
- [2] 都佳,肖刚,杨敬,等. 起重机泵阀协同复合控制液压系统能效特性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2021,52(2):389-399.
- [3] 李鹏和,冯克温,郝云晓,等. 闭式泵控液压机运行

- 与能效特性[J]. 液压与气动,2022,46(4):79-85.
- [4] 赖周年,杨帅,武鹏,等. 基于泵阀联合调节的并联离心泵组高可靠性优化[J]. 排灌机械工程学报,2018,36(12):1205-1210,1221.
- [5] ZHOUNIAN L, PENG W, SHUAI Y, et al. A control method to balance the efficiency and reliability of a time-delayed pump-valve system[J]. Mathematical problems in engineering,2016:5898209.
- [6] OSHURBEKOV S, KAZAKBAEV V, PRAKHT V, et al. Increasing service life and system efficiency of parallel pumps using combined pump regulation[J]. Water, 2021,13(13): 1808.
- [7] 王辰昊,高强,毛梦娜,等. 并联泵组的多目标控制策略[J]. 人民长江,2019,50(12):198-203.
- [8] 侯慧敏,周冬蒙,田俊姣,等. 变频调速水泵装置变速特性试验研究[J]. 水电能源科学,2020,38(6):154-157.
- [9] 吴有平,刘杰,何杰. 多目标规划的 LINGO 求解法[J]. 湖南工业大学学报,2012,26(3): 9-12.

## Multi-objective Energy Efficiency Optimization Control Model Based on the Whole Life Cycle of Parallel Pump Group

ZHANG Jie, GAO Qiang, WANG Tao, YAN Hong-wei, WANG Chen-hao

(School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** At present, most of the domestic parallel pump groups adopt a single-objective control model, and only pay attention to the energy efficiency optimization of operating conditions and operating costs in the process of use, and cannot adjust the operation strategy under the real-time working conditions of the pump group according to the comprehensive energy efficiency state of the pump group in the whole life cycle. A multi-objective pump group energy efficiency optimization control model can be independently adjusted according to the energy efficiency state of the current pump set in the whole life cycle. The weight coefficients of three objective functions can be autonomously adjusted, which improves the energy efficiency of the pump set throughout its life cycle and extends the life of the pump set. The objective function was determined by the ideal point value and distance deviation method. The multi-objective ideal point model was solved by LINGO. The optimal solution with the highest total system efficiency, the lowest pump group specific energy consumption and the highest system reliability was obtained. Experimental results show that the improved multi-objective ideal point model can adjust the target weight combination according to the real-time state of the pump group, so as to adjust the real-time control strategy of the pump group.

**Key words:** parallel pump group; energy efficiency optimization; full life cycle; multi-objective; LINGO

\*\*\*\*\*  
(上接第 210 页)

## Research on Intelligent Fault Diagnosis Method of Hydroelectric Generating Unit Based on CNN-SVM

HE Kui-dong<sup>1,2</sup>, WANG Wei-yu<sup>1,2</sup>, JIN Yan<sup>1,2</sup>, LI Chong-shi<sup>1,2</sup>, LIU Wu-shuang<sup>3</sup>, CHEN Qi-juan<sup>3</sup>

(1. Wuling Power Corporation LTD., Changsha 410004, China; 2. Hydropower Industry Innovation Center of State Power Investment Corporation, Changsha 410004, China; 3. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** In previous researches on intelligent fault diagnosis methods of the hydroelectric generating unit, the subjectivity of the artificial selection of the fault classification characteristics and the limitations of small sample data have important impacts on the accuracy of fault diagnosis results. To solve this problem, a CNN-SVM method for the fault diagnosis of the hydroelectric generating unit was proposed by combining with the feature extraction advantages of convolutional neural network (CNN) and the excellent ability of support vector machine (SVM) in processing small sample. In this method, the time-domain diagram of the vibration signal of the hydroelectric generating unit was used as the model input, and the CNN method was employed to extract the signal features. Then, the extracted feature vector was input to the SVM method to realize the final fault diagnosis of the unit. Finally, the advantages of the diagnosis method proposed in this paper were verified through a specific example analysis.

**Key words:** hydroelectric generating unit; fault diagnosis; vibration signal; convolutional neural network; support vector machine