

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.09.010

平行坐标技术在并联泵机组节能运行中的应用

彭程¹, 陈欢欢², 路文梅¹, 孔淑芹³, 高波¹

(1. 河北水利电力学院 电气工程学院, 河北 沧州 061000; 2. 河北水利电力学院 计算机科学与信息工程学院, 河北 沧州 061000; 3. 河北水利电力学院 水利工程学院, 河北 沧州 061000)

摘要: 针对供水系统相同工况不同运行方式下能耗差距较大、数据可视化表现形式较为单一等问题,提出采用平行坐标技术对并联机组运行台数、频率、流量与电耗进行可视化分析的方法。通过将理论分析与MATLAB数值拟合相融合,设计了平行坐标人机交互技术,更有效地展现固定流量下机组运行台数、频率和电耗三者之间的关系。对沧州地区三个泵站进行了现场测试和数据分析,其结果验证了结论的有效性和通用性,并进一步修正了机组运行台数、频率和电耗三者之间的关系。在多种机组运行方式满足供水需求的条件下,当不同运行方式间频率差 $f > 4$ Hz时,可选择机组台数多的运行方式实现最优运行;而当运行频率差 $f < 4$ Hz时,采用机组台数少的运行方式可实现最优运行。

关键词: 多泵供水泵站; 变频调速; 并联运行; 节能; 平行坐标技术

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)09-0064-06

Application of Parallel Coordinate Technology in Parallel Pump Unit Energy Saving Operation

PENG Cheng¹, CHEN Huan-huan², LU Wen-mei¹, KONG Shu-qin³, GAO Bo¹

(1. School of Electrical Engineering, Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou 061000, China; 2. School of Computer Science and Information Engineering, Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou 061000, China; 3. School of Water Conservancy Engineering, Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou 061000, China)

Abstract: Water supply systems under the same working conditions and different operational modes have large gaps in energy consumption, and the data visualization form is relatively single. A method for visualizing the number, frequency, flow rate and energy consumption of parallel units based on parallel coordinate technology was proposed. By combining theoretical analysis with MATLAB numerical fitting, a parallel coordinate human-computer interaction technology was designed for more effectively showing the relationship among the number, frequency and energy consumption of pump units under a fixed flow. The field test and data analysis of three pumping stations in Cangzhou region verified the effectiveness and universality of the conclusions, and the relationship among the number, frequency and

基金项目: 河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2021328); 河北省水利科研与推广计划项目(2020-66、2016-69)
通信作者: 陈欢欢 E-mail: 935644394@qq.com

energy consumption of the pump units was further modified. When the multiple pump unit operational modes met the water supply demand and the frequency difference f among different operational modes was greater than 4 Hz, the operational mode with multiple pump units could be selected to achieve the optimal operation. When the operating frequency difference f was less than 4 Hz, the optimal operation could be achieved by choosing the operational mode with fewer pump units.

Key words: multi-pump water supply system; variable frequency; parallel operation; energy saving; parallel coordinate technology

近年来,多台同型号变频调速泵并联供水的方式成为主流,但相同工况不同运行方式的能耗存在较大差别,为降低能耗、提高供水的可靠性,寻求最优运行方式成为企业节能的关键问题。由于泵站的能耗与供水量、管网阻力、变频器、电动机、水泵的效率及泵组的运行方式有关,其中已投运泵站的运行方式是否合理直接影响节能效果。

张礼华等^[1]建立了多机组日变速优化运行非线性模型,并提出了对各阶段水泵转速进行试验选优和开机台数线性整数规划优化方法求解;冯晓莉等^[2]采用多层分解-离散与粒子群优化算法,研究了复杂并联梯级泵站系统的运行优化;王轩^[3]建立了水泵机组并联运行的效率模型,通过数学分析法得到效率最优控制策略,并采用改进后的差分进化算法进行寻优,仿真及试验结果验证了可行性;麻栋兰等^[4]推导了泵机组最小功率时开机台数与调速的计算公式,实现了同型号多台调速泵的优化调度。但上述研究均存在计算复杂、可视化差的特点。路文梅等^[5]提出了相同工况不同运行方式下的效率模型,为确定最佳运行方案提供了思路;杨英明^[6]通过枚举法确定了泵组总功率最小时水泵的调速率和运行台数。上述研究能在特定泵站选取最优运行方式,但通用性不强。杨和茵^[7]的研究表明,泵组运行电耗跟机组运行台数、频率的关系呈现非绝对非线性关联状态,但其未对试验数据进行深度挖掘。

基于此,笔者将理论分析与MATLAB数值拟合相融合,提出采用平行坐标技术对固定流量需求下并联机组运行台数、频率与耗能进行可视化分析的方法,得出了三者之间的内在关联,并以可视化的方式确定了满足流量需求下的最佳运行方式,通过对多个泵站现场测试,验证了结论的有效性和通用性。

1 并联机组节能运行

1.1 变频调速系统组成及效能分析

变频泵站由变频器、电动机、水泵等设备组成,根据泵与风机学的相似定律,输出扬程正比于转速的平方,功率消耗正比于转速比的三次方。随着水泵转速增加,功率增量远大于流量增量。转速降低,功率减小量远大于流量减小量。当用水需求量及管网压力变化时,通过调整变频器的工作频率,使电机拖动水泵低于额定转速运行,以满足不同负荷需求。对泵站而言,在满足供水需求的前提下,耗电量是最重要的经济指标之一,但单方水的耗电量^[5,8]并非与供水量呈线性关系。耗电量与泵站机组效率、管网特性及机组运行数量有关,而机组效率又取决于变频器、电机、水泵的运行工况,且随运行频率的变化而变化。泵站机组综合效率与流量和变速比的关系见式(1)。

$$\eta = \frac{A}{k} Q + \frac{B}{k^2} Q^2 + \frac{C}{k^3} Q^3 \quad (1)$$

式中: η 为机组总效率; k 为变速比; Q 为水泵流量; A 、 B 、 C 为相关系数。

1.2 并联机组运行特性分析

泵站中单台泵无法满足用户供水需求或经济性需求时,常设计多台同型号水泵并联工作,以满足供水、运转特性平稳及经济性的需求。两泵并联运行时,总流量为各泵流量之和,但总出水流量小于单台水泵运行时出水流量的2倍,其关系由式(2)表示。

$$\begin{cases} Q_M = 2Q_N \\ Q_S > Q_N \\ Q_M < 2Q_S \end{cases} \quad (2)$$

式中: Q_M 为并联运行时总流量; Q_N 为并联运行时单台机组流量; Q_S 为独立运行时单机组流量。

泵站中多台变频机组并联运行时,当所需水的

流量低于设计流量时,存在多种运行方式。不同运行方式下单方水的耗电量差别较大,因此在计算时应分别计算各种方式下单方水的耗电量,并联运行时单机效率见式(3)。

$$\eta_i = \frac{A_i}{k} \cdot \frac{Q}{m} + \frac{B_i}{k^2} \left(\frac{Q}{m} \right)^2 + \frac{C_i}{k^3} \left(\frac{Q}{m} \right)^3 \quad (3)$$

式中: η_i 为多机并联运行时的单机效率; m 为并联机组运行台数; A_i 、 B_i 、 C_i 为相关系数。

机组并联运行时,流量与工作频率和运行机组台数有关。相同频率下,流量与运行机组台数的关系见式(4)。

$$Q_z = am^3 + bm^2 + cm + d \quad (4)$$

式中: Q_z 为并联运行机组总流量; a 、 b 、 c 、 d 为相关系数。不同泵站根据设计流量的差异,系数取值不同,但已投入运行的泵站,其系数为固定值。

对广州市西江引水工程下陈取水泵站数据^[7]进行提取,并进行深入分析,结果如图1所示。

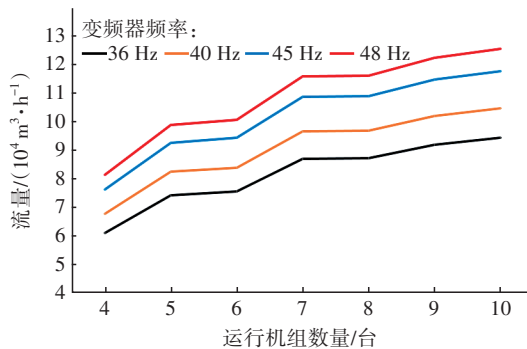


图1 不同频率下运行机组数量与流量的关系

Fig.1 Relationship between the number of units and the flow rate at different frequencies

根据拟合结果,当变频器频率为40、45 Hz时,流量与运行机组数量的关系分别见式(5)和式(6)。

$$Q_1 = 123.3m^3 - 3381m^2 + 34220m - 22190 \quad (5)$$

$$Q_2 = 138.7m^3 - 3805m^2 + 38500m - 24980 \quad (6)$$

式中: Q_1 、 Q_2 表示变频器频率分别为40和45 Hz时 m 台机组并联运行的总流量。

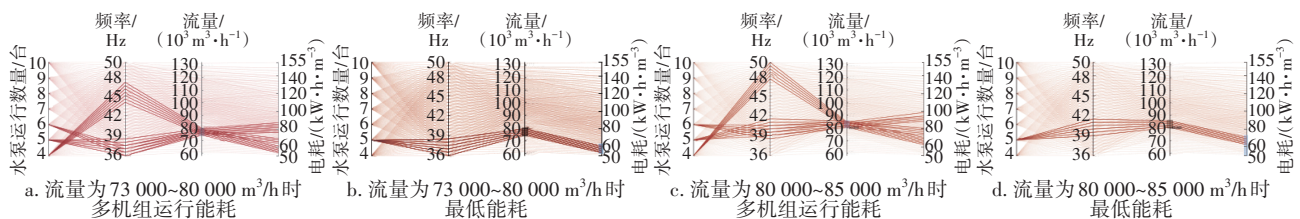


图3 多机组运行能耗(流量为73 000~85 000 m³/h)

Fig.3 Operating energy consumption of multiple pump units (the flow rate of 73 000~85 000 m³/h)

多台机组并联运行时,由于各支路电气设备自身性能及管路的差异,导致相同频率下增加开机台数后,流量并非线性增加,而是表现为开机台数越多增幅越小,通过对式(5)进行计算亦可得出此结论。故而相同频率下不同运行台数单方水的耗电量也会变化,且随运行机组台数的增加而变大。

2 平行坐标技术在并联机组节能中的应用

平行坐标^[9]的基本思想是:为了表示多维空间数据,将多维数据的点映射为 N 条平行线之间的折线。其中坐标轴之间是平行且等距的,每组数据变量对应于一条坐标轴,变量值对应轴上的位置,同时将描述不同变量的各点连接成折线,反映变化趋势和各变量之间的相互关系。

广州市西江引水工程下陈取水泵站^[7]取水泵组采用卧式单级双吸离心泵(SFWP40-1000):供水流量为21~40.51 m³/s,扬程为16.3~42 m,配套电机为AMI 630L10L BAFH,变频器为ABB-Power Flex 7000系列产品。对文献^[7]中表4-3、表4-5以及表4-6中的数据进行了整理,并采用平行坐标进行能耗分析,结果如图2所示。

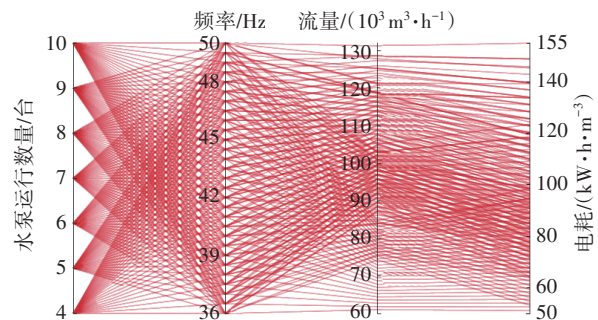


图2 不同工况下泵组的能耗

Fig.2 Energy consumption of pump units under different working conditions

根据平行坐标技术,对固定流量为73 000~85 000 m³/h进行区域选择,在此流量区间存在三种运行工况满足需求,如图3所示。

由图3(a)可知,当流量为73 000~80 000 m³/h时,4~6台机组并联运行均处于允许运行频率范围内,但5台(36~38.5 Hz)和6台(36~37.5 Hz)机组并联运行时频率十分接近,同流量下频率差 $f < 0.5$ Hz,而4台(44~47 Hz)和5台、6台机组相比频率差距较大,同流量下频率差 $f > 5$ Hz。根据平行坐标技术,对固定流量下最小功耗进行区域选择,易知5台机组同时运行时耗能最低,如图3(b)所示。

由图3(c)可知,在流量为80 000~85 000 m³/h条件下,当运行机组数量分别为4、5、6台时,工作频率分别为47.5~50、38.5~42、38.5~41 Hz。相同流量

下,4台运行频率大于5台和6台,而5台和6台机组的工作频率相对较低,且频率差 $f < 1$ Hz,图3(d)表明5台机组运行的耗能最低。

根据分析可知,图3(a)、(b)与图3(c)、(d)存在的关系极为相似,可假设存在如下推论:在满足流量需求条件下,若存在多种机组并联运行方式,当运行频率差 $f > 5$ Hz时,选择台数多的运行方式;而当运行频率差 $f < 5$ Hz时,采用台数少的运行方式。

对流量为89 700~124 700 m³/h进行分段区域选择,不同流量区间运行机组数量存在多种情况可满足需求,如图4所示。

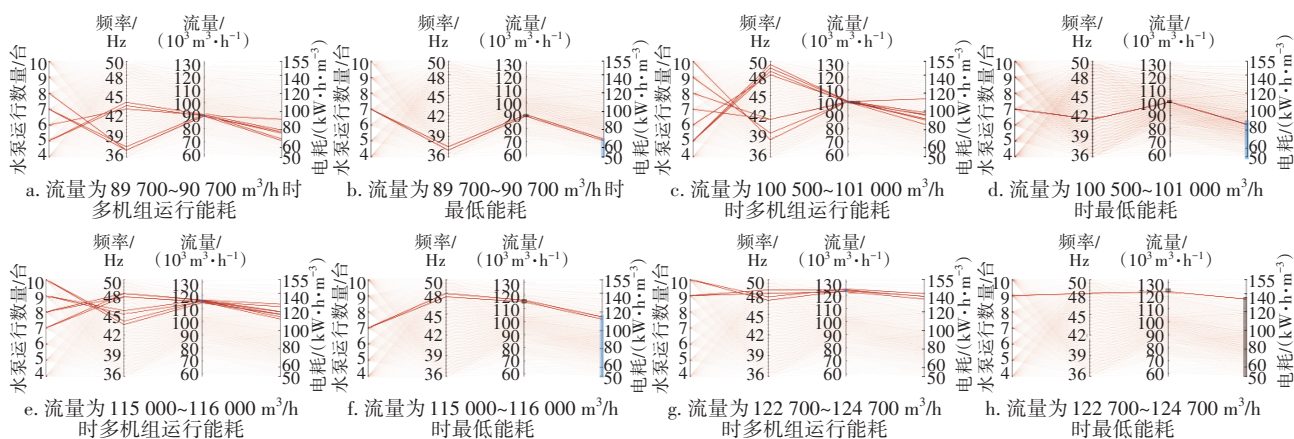


图4 多机组运行能耗(流量为89 700~124 700 m³/h)

Fig.4 Operation energy consumption of multiple pump units (the flow rate of 89 700~124 700 m³/h)

由图4(a)可知,当流量为89 700~90 700 m³/h时,5~8台机组并联均处于允许运行频率范围内,相应的工作频率分别为43.5~44、43.5、37~37.5、37 Hz,运行频率差 f 均小于5 Hz,而7台和8台机组并联运行时频率差 $f < 1$ Hz。根据推论,采用7台机组运行耗能最低,见图4(b)。

由图4(c)可知,当流量为100 500~101 000 m³/h时,5~10台机组并联运行均处于允许运行频率范围内,相应工作频率分别为48.5~49.5、48、41.5、41.5、39.5、38.5 Hz,机组运行频率差 f 均小于5 Hz,根据推论应选台数多的机组,即7~10台机组并联运行。7~10台机组运行的工作频率为38.5~41.5 Hz,频率差 $f < 3$ Hz。根据推论,7台机组运行时耗能最低,见图4(d)。

由图4(e)可知,当流量为115 000~116 000 m³/h时,7~10台机组并联均处于允许运行频率范围内,相应工作频率分别为47.5~48、47.5~48、45~45.5、43.5~44 Hz,运行频率差 f 均小于5 Hz。根据推论应

选台数少的运行方式,即选7台或8台机组并联运行。而7台和8台机组并联运行时频率差 $f < 1$ Hz。根据推论,7台机组运行时耗能最低,见图4(f)。

由图4(g)可知,当流量为122 700~124 700 m³/h时,9台、10台机组并联均处于允许运行频率范围内,相应工作频率分别为48~48.5、47~47.5 Hz,并联运行时频率差 f 均小于2 Hz。根据推论,9台机组运行时耗能最低,见图4(h)。

3 工程验证

为验证上述推论的适用性,对沧州泊头加压泵站、东光加压泵站及引大入港输水工程供水泵站进行分析。三个泵站均采用一对一变频控制,其中泊头加压泵站、东光加压泵站均采用单级双吸卧式离心泵4台(3用1备)。泊头加压泵站水泵型号为300S-12,额定扬程为12.5 m,额定流量为774.0 m³/h;电动机型号为XDYSP225S-4,功率为37 kW;变频器型号为ASC510-01-072-4。东光加压泵站水泵型号为350S-44A,额定扬程为30.5 m,额定流量

为1 294.8 m³/h;电机型号为XDYSP315L1-4,功率为160 kW;ABB变频器型号为ASC510-01-290A-4。引大入港输水工程的供水泵站装设6台卧式离心水泵电动机组,水泵型号为KQSN300-M9/445,电

机功率为185 kW,正常工作模式为4台运行2台备用。上述三个供水泵站中变频器的工作频率为30~50 Hz,为确定最佳运行方式方案,对各供水泵站相同工况下不同运行方式进行分析,结果见表1。

表1 三个泵站运行数据及能耗

Tab.1 Operation data and energy consumption of three pumping stations

项 目	测试时间	运行机组 数量/台	管线压力/ MPa	瞬时流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	累计供水 量/m ³	机组工作 时间/h	工作频 率/Hz	累计用电量/ (kW·h)	耗电量/ (kW·h·m ⁻³)
东光加压 泵站	2019年11月11日	2	0.207	2 500	50 247	22	46.5	2 205	0.043 9
	2019年10月27日	3	0.216	2 557	35 800	14	41.0	1 192	0.033 3
引大入港 输水工程	2018年 6月3日	4	0.360	3 624	3 624	1	48.3	698	0.192 6
		5	0.360	3 630	3 630	1	43.2	635	0.174 8
		6	0.360	3 628	3 628	1	39.1	617	0.170 1
泊头加压 泵站	2018年1月 20日—30日	2	—	1 083	151 649	140	39.0	11 140	0.073 5
		3	—	1 053	82 179	78	33.0	7 680	0.093 5

由表1可知,对于东光加压泵站,当流量为2 500 m³/h时,2台和3台机组运行都可满足供水需求,此时2台和3台机组的工作频率分别为46.5和41.0 Hz,两种运行方式的频率差 $f > 5$ Hz。根据推论,采用3台机组工作能耗更低。耗电量分析结果表明,3台机组运行能耗低,因此推论正确。

引大入港输水工程的供水泵站流量为3 600 m³/h,1 h的运行结果表明,4台机组运行时的工作频率(48.3 Hz)高于5台(43.2 Hz)和6台(39.1 Hz)的,频率差 $f > 5$ Hz,应选择5台或6台机组更节能。5台与6台机组的运行频率差 $f < 5$ Hz,根据前面的假设推理,5台机组运行的能耗更低,然而实测分析6台机组运行能耗更低,与前面的假设不符。但经分析,二者偏差为4.1 Hz,能耗差较小,且均运行于最佳频率(35~46 Hz)内,推论仍基本满足要求,但需进一步修正,可将频率差值设定为4 Hz。

泊头加压泵站的流量为1 053~1 083 m³/h,2台和3台机组运行都可满足供水需求,工作频率分别为39.0、33.0 Hz,频率差 $f > 4$ Hz。根据推论,应选择3台机组运行,而2台机组的能耗更低,与推论不符。经分析,推论前提为机组工作频率 > 35 Hz,当低于35 Hz时机组工作效率较低^[5],故而耗能较高,2台机组运行时变频器、电机及水泵的工作效率均较高,故单方水的耗电量更低。故对上述推论进行修正,增加机组运行频率处于35~46 Hz范围内。

4 结论

① 在变频机组满足最优运行频率35~46 Hz

的条件下,并且多种机组运行满足同工况流量需求时,运行频率差 $f > 4$ Hz,选择机组台数多的运行方式;而当运行频率差 $f < 4$ Hz时,选择运行机组台数少的运行方式,该结论基本适用于所有多机组并联泵站,但是具体泵站频率差 f 可以进行微调以增强其适应性。

② 对已建好投运的泵站,在满足上述结论的前提下,建议将备用机组投入使用以降低电耗,若泵站长期运行于接近额定流量或为达到流量需求,泵站设计机组都运行且频率均超过46 Hz时,可考虑增加机组数量以实现节能,同时增加可靠性。

参考文献:

- [1] 张礼华,程吉林,张仁田,等.基于试验-整数规划方法的泵站多机组变速优化[J].农业工程学报,2011,27(5):156-159.
ZHANG Lihua, CHENG Jilin, ZHANG Rentian, et al. Research on optimal operation for multi-units with variable speed in one pumping station based on the theory of experimental and integer programming method [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(5):156-159(in Chinese).
- [2] 冯晓莉,仇宝云,杨兴丽,等.大型复杂并联梯级泵站系统运行优化研究[J].水利学报,2012,43(9):1058-1065.
FENG Xiaoli, QIU Baoyun, YANG Xingli, et al. Optimal operation for large complex parallel step pumping station system based on multilayer iteration [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43 (9) : 1058-1065 (in

- Chinese).
- [3] 王轩. 并联泵组变频恒压供水系统能效控制策略研究与实现[D]. 武汉:华中科技大学,2019.
WANG Xuan. Study and Realization of the Energy-efficiency Control Strategies for Variable-frequency Constant Pressure Multi-pump Parallel Water-supply System[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2019 (in Chinese).
- [4] 麻栋兰,汪建华,华剑. 变频调速泵并联运行最优调度策略分析[J]. 长江大学学报(自然科学版),2017,14(1):48-51.
MA Donglan, WANG Jianhua, HUA Jian. Analysis of optimal dispatching strategies for frequency variation and speed regulating pumps in parallel [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2017, 14(1):48-51 (in Chinese).
- [5] 路文梅,彭程,陈欢欢,等. 供水泵站变频调速系统节能运行研究[J]. 水电能源科学,2018,36(11):165-168,80.
LU Wenmei, PENG Cheng, CHEN Huanhuan, *et al.* Research on energy-saving operation of variable frequency speed regulation system for water supply pumpstation[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(11):165-168,80(in Chinese).
- [6] 杨英明. 变频离心泵并联节能运行最优解的计算与应用[J]. 暖通空调,2016,46(8):64-69.
YANG Yingming. Calculation and application of optimized energy saving operating solution of variable speed centrifugal pumps in parallel [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2016, 46(8):64-69(in Chinese).
- [7] 杨和茵. 供水泵站变频水泵节能控制方式研究[D]. 广州:华南理工大学,2017.
YANG Heyin. Study on Water Pump by Frequency Control and Energy Saving in Water Supply Pump Station [D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2017(in Chinese).
- [8] 张玉胜,吴建华,刘慧如,等. 具有变频泵的泵站经济运行方式研究[J]. 水电能源科学,2015,33(4):163-166.
ZHANG Yusheng, WU Jianhua, LIU Huiru, *et al.* Study on economic operation mode of pumping station with variable frequency pump[J]. Water Resource and Power, 2015, 33(4):163-166(in Chinese).
- [9] 聂俊岚,陈欢欢,郭栋梁,等. 多维数字战场态势可视分析研究[J]. 小型微型计算机系统,2014,35(3):626-629.
NIE Junlan, CHEN Huanhuan, GUO Dongliang, *et al.* Research on visual analytics for multidimensional digital battlefield situation [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2014, 35(3):626-629 (in Chinese).

作者简介:彭程(1986-),男,河北唐县人,硕士,讲师,主要研究方向为新能源发电技术、泵站节能运行。

E-mail:pengcheng_608@163.com

收稿日期:2020-03-29

修回日期:2020-04-18

(编辑:任莹莹)

加强水土保持, 打造绿水青山