doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.07.016

光伏离心泵负载匹配研究*

刘厚林　崔建保　谈明高　吴贤芳
(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

摘要: 为优化离心泵负载与光伏系统的匹配特性,首先根据晴天光照分布特征通过系统配置估算方法得到所需离心泵负载在最高光照时的基本配置参数,然后根据离心泵运行的流量和扬程特性,采取不同额定流量与最大流量之比与系统匹配,分别对不同匹配下的系统性能进行分析,最后选取较优性能下的负载参数对泵选型并进行实验。结果表明:流量扬程特性曲线较斜的离心泵更适合于光伏水泵全工况运行,系统效率随离心泵的最大光照时流量与额定流量比值增大而增大,比值在 1.1 ~ 1.2 的离心泵,其系统全天具有较高的效率。研究结果可为光伏离心泵负载选型及优化提供参考。

关键词: 光伏　离心泵　匹配
中图分类号: TH311　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2014)07-0098-05

引言

光伏水泵系统是由太阳能电池板将接受的光能转化为电能来驱动电动机和水泵运行的系统。光伏水泵系统通常包含电池板、电力电子控制器、电动机和水泵等设备,是多学科综合应用的设备,它是发展新能源利用和节能减排的重要手段和成果。

光伏水泵系统经过不断改进和完善,近些年已大量应用在农村灌溉、饮水及城市景观中。光伏水泵系统对解决偏远地区用水、缓解传统能源依赖和节能减排有着重要意义。自产生之日起,国内外学者从系统的配置研究[1-3]、性能预测[4-5]、系统优化及评价[6-8]等方面作了大量的研究,但少有对太阳能水泵系统关键装置之一的水泵进行专门研究的文献。这些研究一般都是直接从现有的水泵产品中进行选型,因而与光伏系统的性能匹配常常达不到最佳。本文从光伏水泵系统晴天运行特性入手,首先通过负载配置估算得到初始负载特性,然后结合系统对离心泵负载的要求通过改变额定流量与最大流量之比对泵与系统的匹配性能进行选型优化,最后通过实验验证优化的结果。

1　光伏水泵负载配置估算及优化

1.1　光伏水泵负载配置估算

光伏水泵系统主要由光伏(Photovoltaic)阵列、电力电子转换器、电动机和离心泵负载组成。如图 1所示,光伏阵列将光能转化为电能为系统提供能源。其本身的电流与电压($I-U$)特性使功率输出具有非线性,通常要用控制器来跟踪最大功率点(MPPT),不同光照下最大功率与光照强度近似呈线性关系[5]。控制器除了通过调整占空比来实现光伏阵列的最大功率跟踪外,对于交流水泵负载还要实现逆变功能。系统各个部分都有本身的运行特点,因此,从光照到输出的流量间有着复杂的数学模型,呈现出强烈的非线性特点,使得系统配置较常规水泵系统更为复杂。

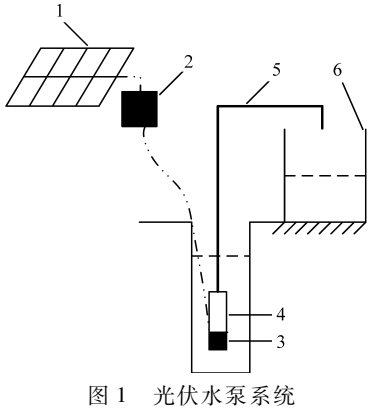


图 1　光伏水泵系统

Fig. 1　Photovoltaic pumping system

1. 光伏阵列　2. 控制器　3. 电动机　4. 水泵　5. 管路　6. 水箱

根据一般光伏水泵系统运行特性,系统的光照强度 G 与流量 Q 关系近似为[9-10]

收稿日期: 2013-07-24　修回日期: 2013-09-08
* 国家自然科学基金资助项目(51109095)、国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA100506)和江苏高校优势学科建设工程项目

作者简介: 刘厚林,研究员,博士生导师,主要从事现代泵设计理论与方法研究,E-mail: liuhoulin@ujs.edu.cn

$$Q=\frac{-b+\sqrt{b^2+4a(G-c)}}{2a} \tag{1}$$

式中　a、b——常数

c——临界光照强度，即扬水阈值

通常情况下，b 的值接近于零，因此可简化为

$$Q=\sqrt{\frac{G-c}{a}} \tag{2}$$

对于给定晴天光照强度随时间的分布 $G(t)$，则一天出水量 Q_D 计算公式为

$$Q_D=\int_{t_1}^{t_2}\sqrt{\frac{G(t)-c}{a}}\mathrm{d}t \tag{3}$$

式中　t_1、t_2——开始、停止出水时刻

一天出水量 Q_D 应大于需水量 Q_R，给出临界光照强度 c 值，则可反求出 a 值进而求得最大光照强度时的流量 $Q_{\max}$。

初始配置估算以最大流量 $Q_{\max}$ 作为泵负载额定运行点 Q_d。

负载扬水所需功率

$$P_{hyd}=\rho g Q_{\max}(H_{st}+\Delta H) \tag{4}$$

式中　ρ——水的密度　　g——重力加速度

H_{st}——系统静扬程　　ΔH——管路损失

则所需电池板峰值功率

$$P_{pv}=\frac{P_{hyd}}{\eta_{\mathrm{pump}}\eta_{\mathrm{motor}}\eta_{\mathrm{MPI}}} \tag{5}$$

式中　η_{pump}、η_{motor}、η_{MPI}——负载、电动机、控制器效率

结合具体使用条件以实例说明。在给定条件 $H_{st}=17.5$ m，管路系数 0.015 ，需水量 $Q_R=70$ m^3，光照强度分布 $G(t)=1\,000\sin(\pi t/12)$，根据上述负载估算方法，根据一般扬水阈值功率估算[11]取临界光照强度 $c=300$ W/m^2，由式(1)～(3)得 $Q_{\max}=11.9$ m^3/h，并以之作为额定流量点 Q_d。

一般情况，取泵额定效率 60%，电动机效率 80%，控制器效率 92%，则根据式(4)、(5)得到电池板峰值功率 1 500 W，泵最大功率约 1 100 W，最大功率时泵扬程 H 约为 19.6 m。

1.2　负载特性优化

根据一般离心泵效率曲线特点[11-13]，设额定转速下效率

$$\eta=\alpha Q+\beta Q^2+\gamma Q^3 \tag{6}$$

式中　α、β、γ——常数，与泵特性有关

且最大转速不超过额定转速，应有 $\eta'|_{Q=Q_d}=0$，$\eta|_{Q=Q_d}=60\%$。

而最大光照时的流量应满足功率约束，即

$$P_{\max}=\frac{\rho g Q_{\max}H_{\max}}{\eta_{Q=Q_{\max}}}=1.1\ \mathrm{kW} \tag{7}$$

式中　$H_{\max}$——泵最大光照时流量所对应的扬程

同时，离心泵轴功率一般可表示为

$$\frac{P}{P_N}=k\frac{Q}{Q_N}+\frac{P_0}{P_N} \tag{8}$$

式中　P_0——额定转速下关死点功率

Q_N——额定转速下泵流量

P_N——额定流量点功率

P——离心泵轴功率

运行要求无驼峰现象，k 取 0.5。

这样可得到各流量下的扬程

$$H=\frac{P\eta}{\rho g Q} \tag{9}$$

即可得到此条件下的 $H-Q$ 关系，通常满足

$$H=d+eQ+fQ^2 \tag{10}$$

式中　d、e、f——常数

光照强度降低，则水泵变转速运行，通常转速变化在 0.5 倍范围之内，应用泵相似定律换算的性能误差较小[14]。不同转速下泵 $H-Q$ 特性为

$$\left(\frac{n_N}{n}\right)^2H=d+e\left(\frac{n_N}{n}Q\right)+f\left(\frac{n_N}{n}Q\right)^2 \tag{11}$$

式中　n_N——额定转速　　n——泵运行转速

对于确定好管路特性的系统，可求得每个转速下对应的流量，并由比例定律可以反推出该流量在额定转速时等效工况点的流量，根据相似定律换算到额定转速下的效率

$$\eta=\alpha+\beta\left(\frac{n_N}{n}Q\right)+\gamma\left(\frac{n_N}{n}Q\right)^2 \tag{12}$$

而光照分布与转速的关系[15]，通常可表示为

$$n=\varepsilon\sqrt[3]{G} \tag{13}$$

式中　ε——常数

给定晴天光照强度分布

$$G(t)=G_{\max}\sin(\pi t/T) \tag{14}$$

式中　$G_{\max}$——全天最高光照强度

T——光照时长

依使用条件，ε 取 258 r·m^2/J，$G_{\max}$ 取 1 000 W/m^2，光照时长取 12 h。通过上式可计算得到效率随光照强度 G 和时间 t 的关系，则全天平均效率[16-17]

$$\overline{\eta}=\frac{\int_{t_1}^{t_2}\eta(t)\,\mathrm{d}t}{12} \tag{15}$$

初始估算时，使 $Q_{\max}=Q_d$ 得到 $Q_{\max}=Q_d=11.9$ m^3/h，然后取不同的 Q_d 取值，通过上述计算可分别求出不同 $Q_{\max}/Q_d$ 下的全天平均效率。

1.3　优化结果

不同 Q_d 取值情况下得出的 $H-Q$ 特性曲线结果如图 2 所示。

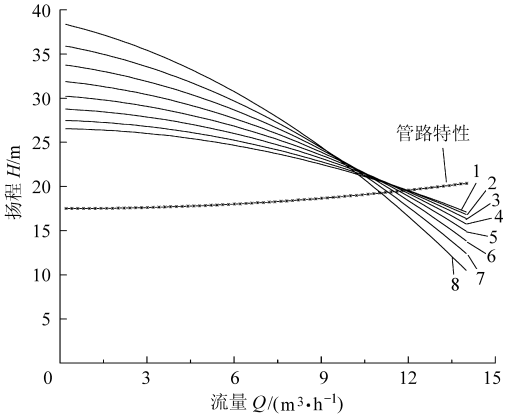


图 2 不同额定流量下泵流量扬程曲线

Fig. 2 Pump $H-Q$ characters under different rated flow values

1. Q_d = 11.9 m³/h 2. Q_d = 11.5 m³/h 3. Q_d = 11.0 m³/h
4. Q_d = 10.5 m³/h 5. Q_d = 10.0 m³/h 6. Q_d = 9.5 m³/h
7. Q_d = 9.0 m³/h 8. Q_d = 8.5 m³/h

从图 2 中给出的取不同额定流量时 $H-Q$ 特性可以看出,在系统最大功率的约束下,随着额定流量取值减小,最大流量随之减小,但 Q_{max}/Q_d 的值逐渐增大,关死点扬程提高,曲线斜率越来越大。

分别计算不同 Q_d 取值下泵效率随光照的变化,选取 4 个组,如图 3 所示。

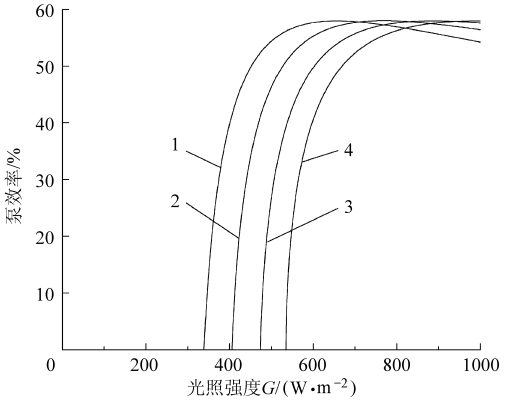


图 3 不同 Q_d 取值下泵效率随光照变化曲线

Fig. 3 Pump efficiency changes with illumination intensity under different rated flow values

1. Q_d = 9.0 m³/h 2. Q_d = 10.0 m³/h
3. Q_d = 11.0 m³/h 4. Q_d = 11.9 m³/h

从图 3 中可以看出,随着额定流量取值的增大,扬水阈值光照逐渐增大,这就意味着需要更高的功率才能使泵出水,但同时在高光照时其效率降低,相当于高效区向强光照区域移动。

为反映泵与系统全天的匹配关系,泵全天平均效率同泵特性参数的关系如图 4 所示,图中 H_0 为关死点扬程,H_d 为额定流量点扬程。

如前所述,随着 Q_d 减小,Q_{max}/Q_d 逐渐增大,Q_{max}/Q_d 从 1.0 增大到 1.3,全天效率先快速增大,而后在 1.15 左右增长逐渐减缓,逐渐趋于平坦。而关

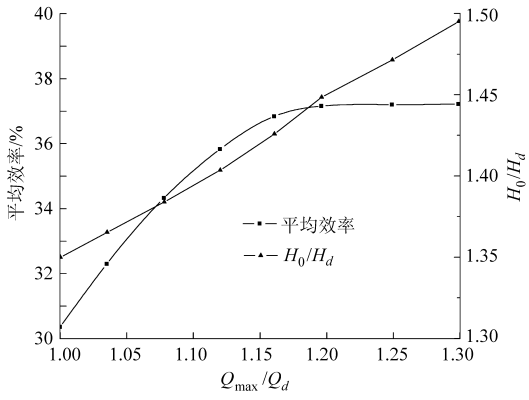


图 4 平均效率随额定流量的变化曲线

Fig. 4 Average efficiency changes with rated flow

死点扬程与额定扬程比(H_0/H_d)则随 Q_{max}/Q_d 呈线性逐渐增大,说明一定范围内 $H-Q$ 曲线斜率较大的泵更适合用于此种变工况运行。

考虑到随着 Q_d 逐渐增加,其扬水阈值光照也在相应增加,意味着要放弃更多的低光照工况,这样将不利于长期运行,综合考虑,选择 Q_{max}/Q_d = 1.1 ~ 1.2 作为 $H-Q$ 特性曲线。

2 光伏离心泵系统运行实验

根据以上分析,选择在 1.1 ~ 1.2Q_d 达到泵最大功率 1 100 W 的离心泵作为实验对象。选取的离心泵为 100QJD 型,离心泵额定转速 2 850 r/min,额定转速下泵外特性实验值如图 5 所示,泵额定流量为 10 m³/h,扬程 23.8 m,效率 58.2%,关死点扬程32.4 m。

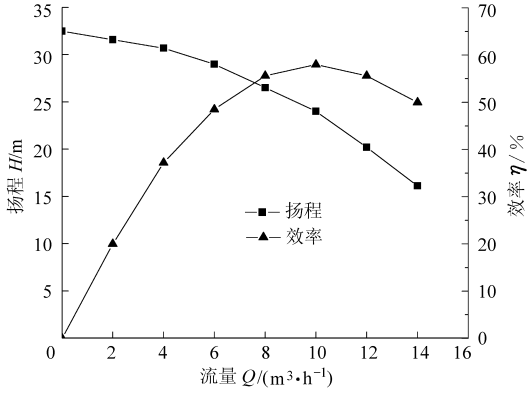


图 5 实验泵外特性

Fig. 5 Pump character used for experiment

光伏水泵系统实验台装置如图 6 所示,为获得稳定光照下电池板的输出特性,采用 Chroma 的 62000H 系列光伏阵列模拟器,电池板峰值功率 1 500 W,参考光照 1 000 W/m² 下开路电压 U_{oc} = 374.68 V,短路电流 I_{sc} = 4.444 A,最大功率点电压 298.85 V,电流 4.012 A,控制器带有最大功率跟踪(MPPT)控制,并实现逆变功能。开式实验台管路配有压力变送器来测量泵出口压力,测量范围为

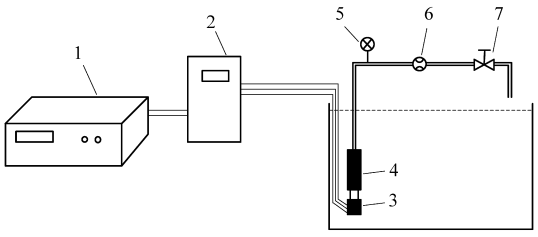


图 6　光伏水泵实验台

Fig. 6　Experimental setup of photovoltaic pumping system

1. 光伏阵列模拟器　2. 控制器　3. 电动机　4. 水泵　5. 压力变送器　6. 流量计　7. 闸阀

－100 ~ 100 kPa，测量精度 0.2 级；采用 KEF 电磁流量计测流量，精度 0.5 级，流量计系数为 134.815 3 L^{-1}；采用闸阀调节管路特性和运行工况。

不同光照强度下子系统运行于电池板最大功率点，如图 7 所示。

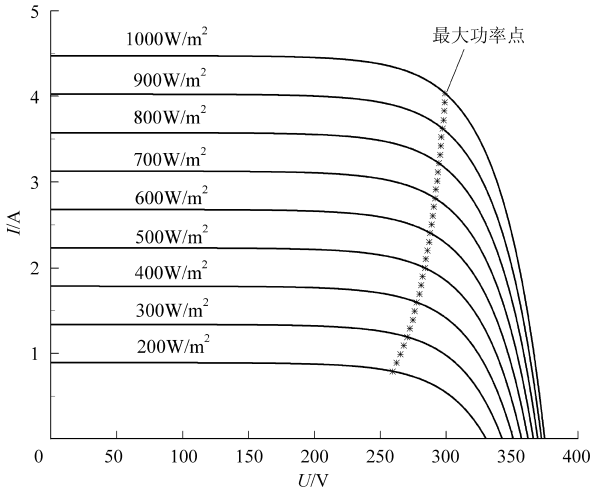


图 7　电池板 $I-U$ 特性与最大功率点

Fig. 7　PV array $I-U$ characters and MPPT points

对不同光照及扬程下的流量进行测量，测得的流量特性及系统效率等值线如图 8 所示。

由图 8 可以看出，不同扬程下光照-流量曲线由扬水阈值光照开始呈抛物线状，且不同扬程下曲线形状相似。而系统效率等值线由中间向两边降低。光伏水泵 1 d 内光照经历由低到高再降低的过程，其流量和效率也不停变化。

用平均效率 $\overline{\eta}_{sys}$、$\overline{\eta}_{pump}$ 分别表示系统和泵的时间段内的平均效率。不同扬程下泵和系统平均效率如图 9 所示。可以看出，系统效率受泵效率变化的影响，与泵效率呈相同变化趋势。其最优扬程约为 18 m，泵平均效率为 34.3%，系统效率为 3.9%，晴天全天出水量 74.2 m^3，满足大于需水量 Q_R = 70 m^3 设计要求。通过管路与泵额定转速下的 $H-Q$ 可知，此时两交点位于 Q = 11.7 m^3/h，此时 Q_{max}/Q_d = 1.17。处于 1.1 ~ 1.2 之间，这与前述相符合。

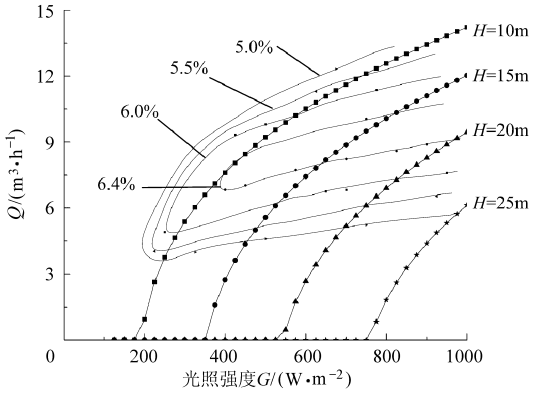


图 8　光伏水泵系统效率等值线

Fig. 8　Efficiency contours of photovoltaic pumping system

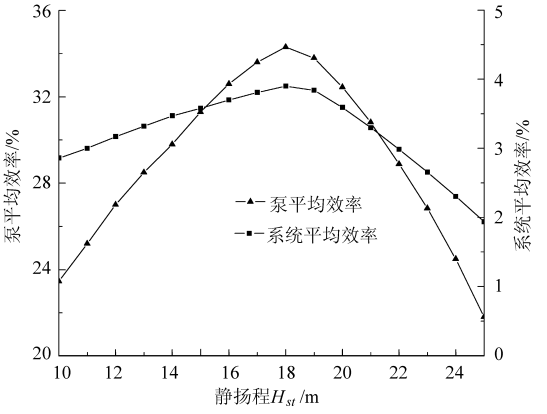


图 9　离心泵与系统平均效率

Fig. 9　Average efficiencies of pump and system

3　结论

（1）光伏离心泵负载随光照变工况运行，泵负载流量-扬程特性斜度较大的更适合光伏水泵全工况运行。

（2）晴天光照分布条件下，光伏水泵系统效率随所配置泵的最大光照时流量与额定流量比值增大而增大，运行于 1.1 ~ 1.2 倍额定流量的离心泵，其与系统匹配较好，系统全天具有较高的效率。

参　考　文　献

1　Applebaum J. The quality of load matching in a direct-coupling photovoltaic system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1987, 2(4): 534 - 541.

2　Odeh I, Yohanis Y G, Norton B. Influence of pumping head, insolation and PV array size on PV water pumping system performance [J]. Solar Energy, 2006, 80(1): 51 - 64.

3　谢磊，余世杰，王飞，等. 光伏水泵系统配置优化的实验及仿真研究[J]. 太阳能学报，2009，30(11)：1454 - 1560.
Xie Lei, Yu Shijie, Wang Fei, et al. Experimental and simulation research on configuration optimization of photovoltaic pumping

system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2009,30(11):1454 - 1460. (in Chinese)
4 Amer E H,Younes M A. Estimating the monthly discharge of a photovoltaic water pumping system: model verification[J]. Energy Conversion and Management,2006, 47(12): 2092 - 2102.
5 Arrouf M, Ghabrourb S. Modelling and simulation of a pumping system fed by photovoltaic generator within the Matlab/Simulink programming environment[J]. Desalination, 2007,209(4):23 - 30.
6 Benlarbi K, Mokrani L, Nait-Said M. A fuzzy global efficiency optimization of a photovoltaic water pumping system[J]. Solar Energy, 2004, 77(2): 203 - 216.
7 Mozaffari Niapour S,Danyali S, Sharifian M B B, et al. Brushless DC motor drives supplied by PV power system based on Z-source inverter and FL-IC MPPT controller[J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(4):3043 - 3059.
8 盛男,苏建徽,张国荣. 光伏水泵系统 SVPWM 控制的研究[J]. 电力电子技术,2010,44(4):82 - 84.
Sheng Nan, Su Jianhui, Zhang Guorong. Research of photovoltaic water pumping system based on SVPWM control[J]. Power Electronics, 2010, 44(4):82 - 84. (in Chinese)
9 Abdulrahman MoHammd. Optimize select of direct-coupled photovoltaic pumping system in solar domestic hot water systems[D]. University of Wisconsin Madison, 1997.
10 Vilela O C, Fraidenraich N. A methodology for the design of photovoltaic water supply systems[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications,2001,9(1):349 - 361.
11 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京:宇航出版社, 2010.
12 杨军虎,郭斌,王玥,等. 无过载离心泵设计参数与性能关系研究[J]. 农业机械学报,2012,43(11):119 - 122.
Yang Junhu,Guo Bin,Wang Yue,et al. Relationship of performances and design parameters for non-overload centrifugal pumps [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(11):119 - 122. (in Chinese)
13 吴贤芳,刘厚林,谈明高,等. 离心泵关死点内部流动数值模拟[J]. 农业机械学报,2013,44(11):48 - 52.
Wu Xianfang,Liu Houlin,Tan Minggao,et al. Numerical simulation for centrifugal pump at shut-off condition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(11):48 - 52. (in Chinese)
14 Thierry Martire, Christian Glaize, Charles Joubert, et al. A simplified but accurate prevision method for along the sun PV pumping systems[J]. Solar Energy, 2008, 82 (5):1009 - 1020.
15 Fraidenraich N, Vilela O C. Performance of solar systems with non-linear behavior calculated by the utilizability method: application to PV solar pumps[J]. Solar Energy, 2000, 69(2): 131 - 137.
16 Ghoneim A A. Design optimization of photovoltaic powered water pumping systems[J]. Energy Conversion and Management, 2006,47(3):1449 - 1463.
17 Yahia Bakelli, Amar Hadj Arab, Boubekeur Azoui. Optimal sizing of photovoltaic pumping system with water tank storage using LPSP concept[J]. Solar Energy ,2011,85(5):288 - 294.

Investigation on Load Matching Characteristics of Photovoltaic Centrifugal Pumps

Liu Houlin Cui Jianbao Tan Minggao Wu Xianfang
(*Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*)

Abstract: With the aim to optimize the centrifugal pump load matching characteristics with a photovoltaic system, a method to estimate the system configurations was established at first. In sunny conditions, the basic parameters of centrifugal pumps in the highest solar radiation level were obtained through this method. Several sets of centrifugal pumps with different ratios between rated flow and maximum flow were matched with the PV system, and the system performances in different conditions were analyzed. According to the results of comparisons, a group of load characteristic parameters were selected for selecting pump model and testing. Results show that the more oblique of the characteristic curve of centrifugal pumps, the more suitable for the PV system. The efficiency of this system increases with the ratio between maximum flow and rated flow, and is higher when the ratio is between 1.1 ~ 1.2. This study provides a reference for PV centrifugal pumps load model selection and optimization.

Key words: Photovoltaic Centrifugal pump Matching