

文章编号:1672-9331(2017)03-0079-05

# 特高压直流换流站地表水源可靠性分析

洪 峰

(湖南省电力公司, 湖南 长沙 410007)

**摘 要:** 特高压换流站外接水源的高可靠性是换流站稳定正常运行的重要条件。通过阐述特高压换流站外接水源可靠性分析方法, 指出采用概率曲线计算流域最小日平均流量频率、最小瞬时流量频率、逐日平均流量累计频率可全面分析换流站外接水源的可靠性, 为换流站外接水源选取提供了理论依据。并以 $\pm 800$  kV 韶山换流站为例进行了水源可靠性分析, 论证了韶山换流站地表水源的可靠性。

**关键词:** 换流站; 地表水源; 可靠性; 日平均流量频率; 瞬时流量频率; 逐日平均流量

中图分类号: TV213.9+TM723

文献标识码: A

## Analysis of reliability of HVDC converter station surface water source

HONG Feng

(State Grid Hunan Electric Power Company, Changsha 410007, China)

**Abstract:** The high reliability of the HVDC converter station external water source is an important condition for the stable operation of the converter station. This paper introduces the reliability analysis method of the external water source of the HVDC converter station. It is pointed out that using probability curve calculating the minimum daily average flow frequency, the minimum instantaneous flow frequency and the daily average flow cumulative frequency can comprehensive analyze the reliability of converter station external water source. And the water source reliability analysis is carried out with  $\pm 800$  kV Shaoshan converter station as an example. The reliability of surface water source in Shaoshan converter station is demonstrated.

**Key words:** converter station; surface water source; reliability; daily average flow frequency; instantaneous flow frequency; daily average flow cumulative frequency

特高压直流输电是近年来我国远距离输电的主要手段, 特高压直流输电往往输送功率较大, 1条 $\pm 800$  kV 特高压输电线路最大输送功率可达8 000 MW, 是湖南省最大用电负荷功率的 $1/3 \sim 1/4$ 。特高压换流站的安全稳定运行是关系到国计民生的重要课题, 与普通变电站不同, 以换流阀为核心设备<sup>[1]</sup>的特高压换流站需要持续的冷却水

供应<sup>[2]</sup>, 特高压换流站的冷却水源的可靠性将直接影响换流站的正常运行。因此, 换流站的地表水源可靠性成为制约换流站水源可靠程度的重要因素<sup>[3]</sup>。

《 $\pm 800$  kV 直流换流站设计规范》(GB/T 50789-2012)要求, 换流站应有可靠的水源, 并优先选用自来水或地下水。当采用上述水源有困

收稿日期: 2017-08-12

作者简介: 洪 峰(1984-), 男, 辽宁北镇人, 湖南省电力公司工程师, 博士, 主要从事电力系统分析及电网建设技术方面的研究。

难时,可采用地表水作为供水水源,但应充分考虑水源水质、水量变化的影响。《高压直流换流站设计技术规定》(DL/T522 3—2005)中规定,当采用地表水作为供水水源时,其枯水流量的保证率取97%。因此,作者从水源枯水流量的可靠性方面进行分析。

特高压换流站水源可靠性分析的研究较少,但是火电厂、核电厂项目的水源可靠性分析与特高压换流站比较类似<sup>[4,5]</sup>,主要研究方法为采用概率分布的方法对外接水源进行径流量频率分析计算。目前,P-Ⅲ型曲线被广泛应用于洪峰和枯水流量的频率计算。《电力工程水文技术规程》(DL/T 5084—2012)3.1.12也规定,枯水理论频率曲线线型可采用P-Ⅲ型频率曲线,特殊情况经分析论证后也可采用其他线型。近年来,径流量频率分析的研究主要集中在三个方面:一是频率分析模型的改进,提出了基于Copula函数<sup>[6]</sup>、初值优化的灰色—马尔科夫<sup>[7]</sup>、对数P-Ⅲ、GL分布<sup>[8]</sup>、泊松和指数(Po-Ex)混合<sup>[9]</sup>等模型的频率分析方法;二是研究不同流域各种模型的计算比较,在不同流域的水源分析采用不同的计算模型,有文献表明,陕西境的泾、洛、渭河干流和东江流域用三参数对数正态分布进行拟合效果较好<sup>[10]</sup>;泊松和指数(Po-Ex)混合模型拟合更适用于湖北省内的流域<sup>[9]</sup>;文献<sup>[11]</sup>用几种模型对长江中下游地区水域的枯水流量模拟进行对比,认为用P-Ⅲ型曲线模拟效果最优;三是受气候变化与人类活动的影响,传统的频率分析法受到挑战,需采用新的概率模型对水源径流量及干枯进行分析<sup>[12,13]</sup>。在特高压换流站的水源分析方面,通常建议按照规程采用P-Ⅲ曲线,如果流域有特有的特性或者由于水库建设近年有较大变化,则采用其他模型进行分析。

特高压换流站用水具有不间断特性,需要通过最小日平均流量频率、最小瞬时流量频率、逐日平均流量累计频率三个角度对特高压换流站外接水源可靠性进行分析。为此,作者提出了特高压换流站水文分析方法,并以±800 kV韶山换流站为例进行地表水源可靠性分析,结合射埠水厂的供水能力,以论证韶山换流站地表水源的可靠性。

## 1 特高压换流站地表水源可靠性分析方法

特高压换流站除外接水源外,根据《±800 kV直流换流站设计规范》中“当仅有一路水源时,宜设置容积不小于3 d用水量的生产用水储水池”的规定,当换流站储水池容量足够时,只需保证水源逐日平均流量累计频率达标即可;当换流站储水池容量或存水不足时,外接水源需保证最小日平均流量频率达标;当换流站无储水池、储水池清洗或检修时,外接水源需保证最小瞬时流量频率达标。同时,由于换流站取水是一个系统工程,其取水水厂设备的可靠性也是需要考量的一个方面。因此,换流站外接水源分析方法如下。

1) 特高压换流站取水水厂供水能力应满足换流站日用水需求,且水厂水处理设备应可靠且重要设备双重化配置。

2) 采用频率曲线对外接水源最小日平均流量频率、最小瞬时流量频率和逐日平均流量累计频率进行计算,流量大于换流站需求的频率需大于97%。

3) 频率计算模型一般采用P-Ⅲ曲线,特殊情况可根据水源流域特点选取。

## 2 P-Ⅲ型频率分布函数

P-Ⅲ型频率分布的概率密度函数为:

$$p(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (x - a_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-a_0)} \quad (1)$$

其数字特征为:

$$E(\xi) = \frac{\alpha}{\beta} + a_0 \quad (2)$$

$$D(\xi) = \sigma^2 = \frac{\alpha}{\beta^2} \quad (3)$$

$$C_v = \frac{\sqrt{\alpha}}{\alpha + \beta a_0} \quad (4)$$

$$C_s = \frac{2}{\sqrt{\alpha}} \quad (5)$$

由式(1)~(5)可解得:

$$\alpha = \frac{4}{C_s^2} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{\sqrt{\alpha}}{\sigma} = \frac{2}{E(\xi)C_vC_s} \quad (7)$$

$$a_0 = E(\xi) \left( 1 - \frac{2C_v}{C_s} \right). \quad (8)$$

式中:  $E(\xi)$  为数学期望;  $\sigma$  为均方差;  $C_s$  为偏态系数;  $C_v$  为变差系数。

这些数字特征的估计量分别为:

$$\hat{E}(\xi) = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (9)$$

$$\hat{C}_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^3}{\left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{\frac{3}{2}}}. \quad (10)$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (11)$$

$$\hat{C}_v = \hat{\sigma} / \hat{E}(\xi). \quad (12)$$

以上各统计量中, 偏态系数  $\hat{C}_s$  含有三阶样本矩, 故抽样误差较大, 样本实测值  $\hat{C}_s$  与其真实值  $C_s$  之间可能有比较大的差异。为了获得理想的分布曲线, 需要对拟合的线型进行验证, 并对  $\hat{C}_s$ 、 $\hat{C}_v$  进行适当的调整。枯水系列的经验频率可按下列方法计算:

$$P_m = \frac{m}{n+1} \times 100\%. \quad (13)$$

式中:  $P_m$  为在实测枯水系列中按递减顺序排位的等于或大于某一变量的经验频率;  $m$  为由大到小排位的序号;  $n$  为枯水系列的总年数。

部分文献<sup>[11]</sup>用几种模型对长江中下游地区水域的枯水流量模拟进行对比, 认为用 P-III 型曲线模拟效果仍是最优。

### 3 韶山换流站水源可靠性分析

#### 3.1 韶山换流站用水分析

换流站用水主要由综合生活用水、生产用水和消防用水三部分组成。最大日综合生活用水量为  $28.35 \text{ m}^3/\text{d}$ 。生产用水由四部分组成, 包括换流阀外冷却水系统补充水、换流阀内冷却水系统补充水、阀厅的空调系统补充水和换流变喷淋降温用水, 其中, 内冷却水系统和空调系统均为闭式循环系统, 平时仅偶尔有极少量的补水<sup>[14,15]</sup>。因此, 生产用水量按换流阀外冷却水系统补充水量考虑, 共为  $1500 \text{ m}^3/\text{d}$ 。消防用水所需最大一次消防用水总量为  $296 \text{ m}^3$ , 消防用水贮存在消防水

池内, 消防水池容积  $300 \text{ m}^3$ , 按 48 h 充满考虑, 消防补充水量  $6.25 \text{ m}^3/\text{h}$ 。综上, 根据综合生活用水 ( $28.35 \text{ m}^3/\text{d}$ )、生产用水 ( $1500 \text{ m}^3/\text{d}$ ), 确定本换流站设计日用水量为  $1528.35 \text{ m}^3/\text{d}$ , 设计供水量按  $1530 \text{ m}^3/\text{d}$  考虑。

#### 3.2 换流站水源流域概况

韶山换流站地表水源来自涓水, 涓水为湘江一级支流, 发源于南岳衡山, 流经衡山后山、新桥、花石、射埠, 从河口流入湘江。涓水河道流经湘潭县域内为  $63.4 \text{ km}$ , 占流域全长  $53.6\%$ 。河流平均坡降  $0.82\%$ , 湘潭县境内河段平均坡降约为  $0.32\%$ 。涓水多年平均流量为  $32.7 \text{ m}^3/\text{s}$ , 多年平均径流量为  $10.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

换流站地表水源取自射埠水厂。涓水流域内有射埠水文站, 该站设立于 1972 年, 位于湘潭县射埠镇射埠村, 集水面积  $1404 \text{ km}^2$ , 流域内并配套设有荷叶、新桥、花石、射埠 4 个雨量站。射埠水文站有 1972—2016 年水位、流量和降水量资料。本研究的分析数据均来自射埠水文站。如图 1 的位置示意图显示, 射埠水文站对于射埠水厂取水口处的天然径流境况具有很好的代表性。



图1 韶山换流站、水厂及射埠水文站位置示意图

Fig. 1 Shaoshan converter station, water plant and Shebu hydrologic station position

#### 3.3 射埠水厂供水能力分析

射埠镇水厂位于射埠镇涓水河边上, 日供水规模达到  $3000 \text{ m}^3/\text{d}$ , 工程等级类型为 III 型。采用水处理能力为  $125 \text{ m}^3/\text{h}$  的絮凝沉淀池和无阀滤池, 取水泵机组 2 台套 (一主一备)。水厂主要建筑物设计防洪标准为 20 年一遇, 校核防洪标准为 50 年一遇, 临时建筑物的防洪标准为 5 年一遇。水厂取水口取水方式采用下沉式设计, 取水口设

在河床底部 6 m 以下。在瞬时流量  $0.14 \text{ m}^3/\text{s}$  时(相应日径流量为  $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ ),可以满足从河里取水  $3\,000 \text{ m}^3/\text{d}$  的取水要求。

### 3.4 最小日平均流量频率分析

采用工程水文气象分析制图系统 EHP v2.1 对射埠水文站 1972—2016 年历年最小日平均流量进行枯水频率分析。射埠水文站历年最小日平均流量柱状图见图 2。采用 P-Ⅲ型频率分布进行适线,结果见图 3。

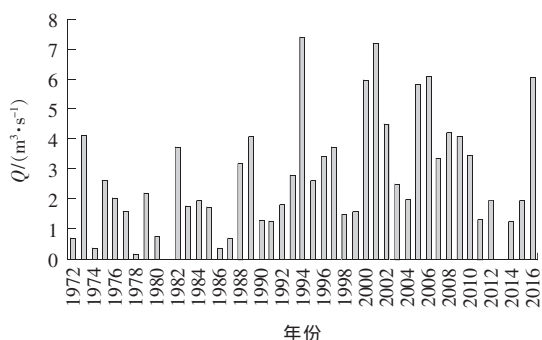


图 2 射埠水文站历年最小日平均流量

Fig. 2 Shebu hydrologic station minimum daily average flow

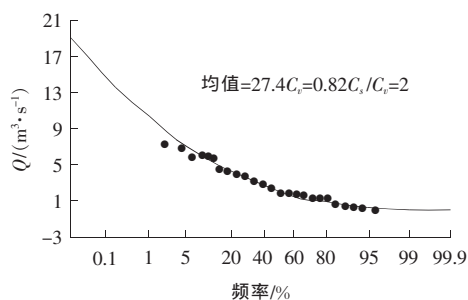


图 3 历年最小日平均流量 P-Ⅲ 频率分析适线图

Fig. 3 Minimum daily average flow P-Ⅲ frequency analysis

图 3 结果显示,在射埠水文站断面,97%保证率的日平均流量为  $0.22 \text{ m}^3/\text{s}$ ,相应的日径流量为  $1.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,大于水厂日供水  $3\,000 \text{ m}^3$  所需的最小日径流量  $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,意味着韶山换流站的日正常供水可靠性可达到 97%以上。

### 3.5 最小瞬时流量的频率分析

同样采用工程水文气象分析制图系统 EHP v2.1 对射埠水文站 1972—2016 年历年瞬时最小流量进行枯水频率分析,采用 P-Ⅲ型频率分布进行适线,结果见图 4。

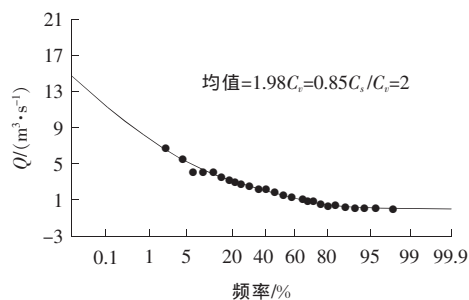


图 4 历年最小瞬时流量 P-Ⅲ 频率分析适线图

Fig. 4 P-Ⅲ Minimum instantaneous flow frequency analysis

图 4 结果显示,在射埠水文站断面,97%保证率的瞬时最小流量为  $0.14 \text{ m}^3/\text{s}$ ,相应的日径流量为  $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,同样满足水厂正常供水及韶山换流站正常用水要求。

### 3.6 逐日平均流量累计频率曲线

将射埠水文站 1972—2016 年共 45 年的逐日平均流量按从大到小的顺序进行排序,并绘制累积频率曲线(如图 5 所示)。统计结果显示,累积频率为 97%的日平均流量为  $3.11 \text{ m}^3/\text{s}$ ,相应的日径流量为  $26.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,证明从年度日均角度来看,射埠水厂可满足韶山换流站的供水要求。

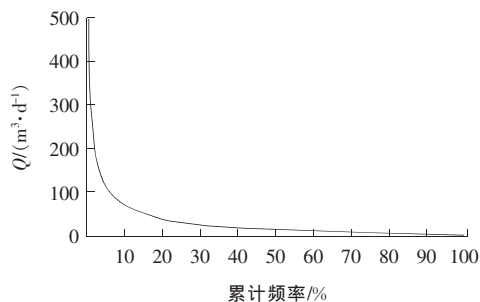


图 5 射埠水文站日平均流量累计频率曲线

Fig. 5 Shebu hydrologic station daily average flow cumulative frequency curve

## 4 结论

1) 本研究提出的方法可以对特高压换流站水源可靠性进行全面分析,示例中韶山换流站的取水方案满足可靠性要求。

2) 该方法采用最小日平均流量频率、最小瞬时流量频率、逐日平均流量累计频率三个指标论证换流站的取水可靠性,充分考虑了换流站的各种情况下的用水需求,满足换流站持续不间断供

水的要求。

3) 该方法可用于换流站选址、设计等阶段的水源可靠性论证,为换流站水源可靠性论证提供了理论基础,为换流站水源的选取提供了数据支撑。

4) 根据规程规范及现阶段研究情况,P-Ⅲ曲线适用范围较广,可保证本方法在大多数流域分析结果的正确性,但特殊流域需采用其他模型时,需针对所选模型进行专题论证说明。

#### 〔参考文献〕

- [1] 习贺勋,汤广福,刘杰,等.±800 kV/4 750 A 特高压直流输电换流阀研制[J].中国电机工程学报,2012,32(24):15-23.  
XI He-xun, TANG Guang-fu, LIU Jie, et al. Development of the ±800 kV/4 750 A ultra high voltage direct current converter valve[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(24): 15-23.
- [2] 许根富,尚立新.高压晶闸管换流阀外水冷系统分析[J].中国电力,2009,42(12):42-44.  
XU Gen-fu, SHANG Li-xin. Research on outside cooling system for high voltage thyristor valves[J]. Electric Power, 2009, 42(12): 42-44.
- [3] 胡劲松.高压直流换流站的关键建站条件[J].中国电力,2006,39(12):21-24.  
HU Jin-song. Key factors of site selection for a HVDC converter station[J]. Electric Power, 2006, 39(12): 21-24.
- [4] 龚来存,沈乐,郭红丽,等.多水源火电项目水资源论证实例分析:以大唐溧水燃机热电联产项目为例[J].地下水,2017,39(2):138-140.  
GONG Lai-cun, SHEN Le, GUO Hong-li, et al. Many water sources for water resources demonstration of thermal power project analysis — taking datang LiShui gas turbine cogeneration projects as an example[J]. Ground Water, 2017, 39(2): 138-140.
- [5] 黄军,谭炳卿,赵静.内陆核电选址阶段取水水源可靠性初步分析[J].中国水利,2013(11):13-15.  
HUANG Jun, TAN Bing-qing, ZHAO Jing. Reliability of water sources during site selection of inland nuclear power plant[J]. China Water Resources, 2013(11): 13-15.
- [6] 周念清,赵露,沈新平.基于 Copula 函数的洞庭湖流域水沙丰枯遭遇频率分析[J].地理科学,2014,34(2):242-248.  
ZHOU Nian-qing, ZHAO Lu, SHEN Xin-ping. Copula-based probability evaluation of rich-poor runoff and sediment encounter in Dongting lake basin[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(2): 242-248.
- [7] 潘俊,梁海涛,马悦,等.基于初值优化的灰色—马尔科夫傍河水源可靠性分析[J].水资源与水工程学报,2015,26(5):62-65.  
PAN Jun, LIANG Hai-tao, MA Yu, et al. Analysis of reliability of riverside water source of Grey—Markov based on optimization of initial value[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015, 26(5): 62-65.
- [8] 刘洁,陈华,王金星,等.P-Ⅲ、对数 P-Ⅲ和 GL 分布线型比较研究[J].水文,2013,33(3):1-4,17.  
LIU Jie, CHEN Hua, WANG Jin-xing, et al. Comparison among theoretical frequency distributions of P-Ⅲ, Log P-Ⅲ and GL[J]. Journal of China Hydrology, 2013, 33(3): 1-4, 17.
- [9] 方彬,郭生练,肖义,等.基于低定量取样的枯水频率分析[J].武汉大学学报:工学版,2006,39(2):1-4.  
FANG Bin, GUO Sheng-lian, XIAO Yi, et al. Low flow frequency analysis based on LUT sampling[J]. Journal of Wuhan University: Engineering, 2006, 39(2): 1-4.
- [10] 黄国如,陈永勤,解河海.东江流域枯水径流的频率分析[J].清华大学学报:自然科学版,2005,45(12):1633-1635.  
HUANG Guo-ru, CHEN Yong-qin, XIE He-hai, et al. Low flow frequency analysis in Dongjiang Basin [J]. Journal of Tsinghua University: Sci and Tech, 2005, 45(12): 1633-1635.
- [11] 徐亚男,荣艳淑,贺晓婧,等.大通站枯水流量特征及概率拟合分析[J].水电能源科学,2015,33(12):32-36.  
XU Ya-nan, RONG Yan-shu, HE Xiao-jing, et al. Analysis of low flow and probability fitting model at Datong station [J]. Water Resources and Power, 2015, 33(12): 32-36.
- [12] 涂新军,陈晓宏,赵勇,等.变化环境下东江流域水文干旱特征及缺水响应[J].水科学进展,2016,27(6):810-821.  
TU Xin-jun, CHEN Xiao-hong, ZHAO Yong, et al. Responses of hydrological drought properties and water shortage under changing environments in Dongjiang River basin[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(6): 810-821.

(下转至第96页)

- YANG Yang. New electro-hydraulic braking system for pure electric vehicle [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [5] 王耀南, 刘东奇. 电动汽车机电复合制动力分配策略研究[J]. 控制工程, 2014, 21(3): 347-351.
- WANG Yao-nan, Liu Dong-qi. A study of mechanical and electrical compound braking force distribution strategy for electric vehicle [J]. Control Engineering of China, 2014, 21(3): 347-351.
- [6] 刘丽君, 姬芬竹, 杨世春, 等. 基于 ECE 法规和 I 曲线的机电复合制动控制策略[J]. 北京航空航天大学学报, 2013 (1): 138-142.
- LIU Lin-jun, JI Fen-zhu, YANG Shi-chun, et al. Control strategy for electro-mechanical braking based on curves of ECE regulations and ideal braking force [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013 (1): 138-142.
- [7] 潘盛辉, 宋仲达, 王系朋. 基于模糊控制的纯电动汽车机电复合制动控制策略研究[J]. 电脑知识与技术, 2015(2): 251-255.
- PAN Sheng-hui, SONG Zhong-da, WANG Xi-peng. A study of strategy for electro-mechanical braking of electric vehicle based on fuzzy control [J]. Computer knowledge and Technology, 2015(2): 251-255.
- [8] 石庆升, 张承慧, 崔纳新. 一种新型的电动汽车再生制动力分配策略[J]. 电工技术学报, 2007, 22(2): 125-129.
- SHI Qing-sheng, ZHANG Cheng-hui, CUI Na-xin. A new model of renewable braking force assignment for electric vehicles [J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2007, 22(2): 125-129.
- [9] Gao Y, Ehsani M. Electronic braking system of EV and HEV-integration of regenerative braking, automatic braking force control and ABS [R]. USA: SAE, 2001.
- [10] 任黎明, 张凤营, 于红. 基于模糊-PID 智能化控制系统的應用[J]. 艺术科技, 2012(6): 227-227.
- REN Li-ming, ZHANG Feng-ying, YU Hong. Application of fuzzy-PID intelligent control system [J]. Art Science and Technology, 2012(6): 227-227.
- [11] 赵正黎, 于惠钧, 张发明, 等. 基于模糊 PID 控制的直流电机调速系统[J]. 湖南工业大学学报, 2015 (2): 38-43.
- ZHAO Zheng-li, YU Hui-jun, ZHANG Fa-ming, et al. DC motor speed control system based on fuzzy PID control [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2015(2): 38-43.
- [12] 杜冠磊, 马向华. 基于模糊逻辑的混合动力汽车制动力动态分配控制策略研究[J]. 自动化技术与应用, 2013, 32(3): 17-20.
- DU Guan-lei, MA Xiang-hua. Research of control strategy for braking force distribution of hybrid electric vehicle based on fuzzy logic [J]. Techniques of Automation and Applications, 2013, 32(3): 17-20.
- [13] Wipke K B, Cuddy M R, Burch S D. ADVISOR 2002 2.1: a user-friendly advanced powertrain simulation using a combined backward/forward approach [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1999, 48(6): 1751-1761.

(上接第 83 页)

- [13] 李伶杰, 宋松柏, 王银堂, 等. 变化环境下石羊河流域年径流频率计算[J]. 水文, 2016, 36(4): 19-25.
- LI Ling-jie, SONG Song-bo, WANG Yin-Tang, et al. Frequency analysis of annual runoff for shiyanghe river in a changing environment [J]. Journal of China Hydrology, 2016, 36(4): 19-25.
- [14] 曾亮, 毛成校. 浅谈闭式循环阀冷设备在韶山换流站换流阀系统中的应用[J]. 湖南电力, 2017 (37): 91-94.
- ZENG Liang, MAO Cheng-xiao. The application of closed cycle valve cooling equipment in Shaoshan converter station [J]. Hunan Electric Power, 2017 (37): 91-94.
- [15] 刘晓波, 许鸿飞, 刘源. 酒湖工程阀水冷系统设计优化分析[J]. 湖南电力, 2017(37): 77-82.
- LIU Xiao-bo, XU Hong-fei, LIU Yuan. Design optimization analysis for valve cooling system of Jiuhu DC Project [J]. Hunan Electric Power, 2017 (37): 77-82.