

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.2013.02.010

## 多能互补发电系统抽水蓄能模型及运行策略

任岩<sup>1</sup>, 郑源<sup>2</sup>, 周兵<sup>3</sup>, 郭齐珂<sup>4</sup>

(1. 华北水利水电学院电力学院, 河南 郑州 450011; 2. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098; 3. 国家知识产权局专利审查协作中心, 北京 100091; 4. 红河广源水电开发有限公司, 云南 蒙自 661100)



任岩

**摘要:** 根据多能互补发电系统的特点和作用,建立了系统中抽水蓄能的数学模型,提出了系统中抽水蓄能的运行策略,即按给定负荷运行,具体在本系统中即为按系统净负荷运行.由此提出系统中抽水蓄能的控制方式.当系统净负荷大于0时,抽水蓄能机组运行在水轮机工况,分3种情况:当系统净负荷小于水轮机工况的启动功率时,抽水蓄能机组不运行;当系统净负荷大于水轮机工况的启动功率而小于水轮机工况的额定功率时,抽水蓄能机组按净负荷功率运行在水轮机工况;当系统净负荷小于水轮机的额定功率时,抽水蓄能机组按水轮机工况的额定功率运行.当系统净负荷小于0时,抽水蓄能机组运行在水泵工况,分2种情况:当系统净负荷小于水泵工况的额定功率时,抽水蓄能机组不运行;当系统净负荷大于水泵工况的额定功率时,抽水蓄能机组按水泵工况的额定功率运行.

**关键词:** 多能互补发电系统;抽水蓄能;数学模型;运行策略

**中图分类号:** S210.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2013)02-0137-05

## Model and operation strategy of pumped-storage in hybrid power system

Ren Yan<sup>1</sup>, Zheng Yuan<sup>2</sup>, Zhou Bing<sup>3</sup>, Guo Qike<sup>4</sup>

(1. Institute of Electric Power, North China University of Water Conservancy and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450011, China; 2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 3. Patent Examination Cooperation Center of Sipo, Beijing 100091, China; 4. Red River Hydropower Development Co. Ltd. in Guangyuan, Mengzi, Yunnan 661100, China)

**Abstract:** Based on the characteristics of hybrid power system, a mathematical model of pumped-storage was established. According to its function, the pumped-storage operation strategy was put forward, that is, to operate as per given load and specifically in the hybrid wind-PV-pumped-storage system, to operate as per net load. A control model of pumped-storage was accordingly proposed: as the net load was greater than zero, the pumped-storage unit operated under the turbine operating conditions could be classified into three situations. Firstly, as net load was less than the starting power of turbine, pumped-storage units were not operating. Secondly, as net load was greater than the starting power and less than the rated power of turbine, pumped-storage units were operating at the turbine condition as net load power. Thirdly, as net load was less than the rated power of turbine, pumped-storage units were operating as the rated power of turbine. When net load was less than zero, pumped-storage units operated under the pump operating conditions could be classified into two situations. Firstly, as net load was less than the rated power of pump, pumped-storage units were not operating. Secondly, as

收稿日期: 2012-10-02

基金项目: 国家863计划项目(2009AA05Z429); 国家自然科学基金资助项目(51076041)

作者简介: 任岩(1979—),女,河南南阳人,讲师,博士(renyan@ncwu.edu.cn),主要从事新能源、流体机械研究.  
郑源(1964—),男,山东日照人,教授,博士生导师(zhengyuan@hhu.edu.cn),主要从事流体机械研究.

net load was greater than the rated power of pump, pumped-storage units were operating as the rated power of pump.

**Key words:** hybrid power system; pumped-storage; mathematical model; operation strategy

在风力发电和太阳能发电系统中,通常采用的蓄能方式有蓄电池、飞轮、抽水、压缩空气、电解水制氢蓄能等几种<sup>[1]</sup>.其中,抽水蓄能<sup>[2-4]</sup>能够大量储存电能,且启动迅速、爬坡卸荷速度快、运行灵活可靠,既能削峰又可填谷,其快速转变的灵活性可弥补风力发电和太阳能发电的随机性和不均匀性等不足,为系统提供更多的调峰填谷容量和调频、调相、紧急事故备用电源等,同时具有能量生产可靠和环保等优点.因此,文献[5]提出了风-光-抽蓄复合发电系统.该多能互补发电系统是将风力发电、太阳能发电和抽水蓄能有机地结合起来,利用风电和太阳能发电并作为系统的电源,供给负荷,利用抽水蓄能实现风电和太阳能发电与负荷之间的平衡<sup>[6]</sup>.

Stefanos 等<sup>[7]</sup>建立了孤岛风-抽蓄复合发电系统,并建立了系统的仿真模型. Khatibi 等<sup>[8]</sup>分析了风电场接入电网后给电网带来的冲击,提出利用抽水蓄能减小这种冲击,提高其稳定性,并对系统进行了灵敏度测试. Li 等<sup>[9]</sup>提出了风-光-抽蓄复合发电系统,分析了转换器和控制器的性能,并对系统进行了优化配置. Dustin 等<sup>[10]</sup>以空气和水为介质,储存多能互补发电系统的能量,分别分析了可压缩流体和不可压缩流体储存能量的特性.通过分析可以看出,大多数研究都只是针对系统进行建模仿真,而没有建立系统中抽水蓄能的具体数学模型,也没有讨论不同情况下抽水蓄能的仿真模型及其运行方式.抽水蓄能作为系统的储能装置,其特性直接影响系统的平衡性、稳定性和优化运行等,因此,文中着重研究多能互补发电系统中抽水蓄能的仿真模型与运行策略.

## 1 多能互补发电系统的净负荷

净负荷同时兼顾了风能资源、太阳能资源和负荷的变化规律,为系统中抽水蓄能机组的配置提供了能量依据.为了同时考虑系统中风能资源、太阳能资源的不稳定性和负荷的变化性,首先建立净负荷  $P_j$  的数学模型为

$$P_j = P - n_w P_w - P_{pv}, \quad (1)$$

式中: $P$  为风-光-抽蓄复合发电系统的负荷, kW;

$n_w$  为风力发电机的台数;  $P_w$  为风力发电机组的输出功率<sup>[6]</sup>, kW;  $P_{pv}$  为光伏阵列的输出功率<sup>[6]</sup>, kW.

当  $P_j > 0$  时(用符号  $P_{jz}$  表示),即表明风力发电量和太阳能发电量之和不足以供给负荷;当  $P_j < 0$  时(用符号  $P_{ji}$  表示),即表明风力发电量和太阳能发电量之和大于负荷.

## 2 仿真模型

系统中抽水蓄能机组采用可逆式水泵水轮机,其数学模型根据净负荷建立,在水轮机工况和水泵工况下分别讨论.

### 2.1 水轮机工况下的发电过程

当风-光-抽蓄复合发电系统的净负荷  $P_j > 0$  时,不足电能由抽水蓄能机组发电供给,控制抽水蓄能机组运行在水轮机工况.

参数设置:取抽水蓄能电站水库的正常蓄水位为最大水位  $Z_{max}$ ,死水位为最小水位  $Z_{min}$ ,第  $i$  时刻的水位为  $Z_i (i=0, 1, 2, \dots, i_{max})$ ,所对应的库容分别为  $V_{max}, V_{min}, V_i$ . 设发电过程的参数:上下水库的水位分别为  $Z_u$  和  $Z_d$ ;水头为  $H_i$ ;流量为  $Q_i$ ;水量为  $W_i$ ;功率为  $P_{gi}$ ;效率为  $\eta_i$ ;时间步长为  $\Delta t$ ;水力损失为  $\Delta h = KQ^2$  ( $K$  为与抽水蓄能机组及管道有关的系数).

初始条件和约束条件:初始条件为上下水库的初始水位分别为  $Z_{u0}$  和  $Z_{d0}$ ,对应的库容分别为  $V_{u0}$  和  $V_{d0}$ ;约束条件为水库水位  $Z_{min} \leq Z_i \leq Z_{max}$ .

#### 2.1.1 发电过程的 $t_0$ 时刻

$$\text{水头: } H_0 = Z_{u0} - Z_{d0} - \Delta h_i.$$

输出功率:根据水头  $H_0$ ,查可逆式水泵水轮机的水轮机工况运转综合特性曲线<sup>[2]</sup>,找到出力限制线上对应的功率  $P_{c0}$ ,即为输出功率.① 当  $P_{jz} > P_{c0}$  时,表明当前水头下可逆式水泵水轮机的水轮机工况的发电量不足以供给风-光-抽蓄复合发电系统多余负荷的用电,不足电能为  $P_{jz} - P_{c0}$ ,则不足电能由蓄电池供给,此时,水轮机工况的输出功率为  $P_{c0}$ .

② 当  $P_{jz} = P_{c0}$ ,表明当前水头下可逆式水泵水轮机的水轮机工况发电量与风-光-抽蓄复合发电系统多余负荷需要的用电量相等,此时,水轮机工况的

输出功率为  $P_{c0}$ 。③ 当  $P_{jz} < P_{c0}$ , 表明当前水头下可逆式水泵水轮机的水轮机工况最大发电量大于风-光-抽蓄复合发电系统多余负荷的用电量, 此时, 调节导叶, 将水轮机工况的出力调整至  $P_{jz}$ , 以满足复合发电系统多余负荷的用电, 因此水轮机工况的输出功率为  $P_{jz}$ 。

效率: 根据水头  $H_0$  和功率  $P_{g0}$ , 查可逆式水泵水轮机的水轮机工况运转综合特性曲线<sup>[2]</sup>, 可得到效率  $\eta_0$  和导叶开度  $a_0$ 。

流量: 根据可逆式水泵水轮机的水轮机轴上的功率公式, 可计算得到流量值为  $Q_0 = \frac{P_{g0}}{9.81H_0\eta_0}$ 。

水量:  $W_0 = Q_0 \cdot \Delta t$ 。

### 2.1.2 发电过程的 $t_1$ 时刻

$t_1$  时刻即  $t_0$  经过 1 个时间步长  $\Delta t$  后的时刻。

水量: 上水库水量为  $V_{u1} = V_{u0} - W_0$ ; 下水库水量为  $V_{d1} = V_{d0} + W_0$ 。

水位: 利用水库水位-库容曲线<sup>[2]</sup>, 根据上下水库的水量, 可查到上下水库的水位分别为  $Z_{u1}$  和  $Z_{d1}$ 。

水头:  $H_1 = Z_{u1} - Z_{d1} - \Delta h_1$ 。

重复  $t_0$  时刻的过程, 可得到  $t_1$  时刻的效率  $\eta_1$ 、流量  $Q_1$ 、水量  $W_1$ 、导叶开度  $a$ ; 重复上述过程, 可得到任意时刻的水头  $H_i$ 、流量  $Q_i$ 、导叶开度  $a_i$ 。由此可绘制抽水蓄能机组在水轮机工况下发电的水头变化曲线、导叶开度变化曲线。根据导叶开度变化曲线, 可对可逆式水泵水轮机的水轮机工况导叶开度进行控制调节。

## 2.2 水泵工况下的抽水过程

当风-光-抽蓄复合发电系统的净负荷  $P_j < 0$  时, 将多余电能转换为水能蓄起来, 控制抽水蓄能机组运行在水泵工况进行抽水。抽水蓄能机组水泵工况的输入功率  $P'_r$  与复合发电系统的净负荷  $P_{jr}$  (在可逆式水泵水轮机的水泵工况的讨论中只取  $P_j$  的数值, 忽略其负号, 并将其称为复合发电系统的多余电能) 有关。

参数设置: 水库的特征水位和库容及水力损失同水轮机工况。设抽水过程的参数为上下水库的水位分别为  $Z'_{ui}$  和  $Z'_{di}$  ( $i=0, 1, 2, \dots, i_{\max}$ ); 扬程为  $H'_i$ ; 流量为  $Q'_i$ ; 水量为  $W'_i$ ; 功率为  $P'_{gi}$ ; 效率为  $\eta'_i$ ; 时间步长为  $\Delta t$ ; 实际运行中可逆式水泵水轮机在水泵工况下的出力为  $P'_c$ 。

初始条件和约束条件: 初始条件为上下水库的

初始水位分别为  $Z'_{u0}$  和  $Z'_{d0}$ , 对应的库容分别为  $V'_{u0}$  和  $V'_{d0}$ ; 约束条件为水库水位  $Z'_{\min} \leq Z'_i \leq Z'_{\max}$ 。

抽水过程: ① 当  $P_{jr} = P'_r$  时, 可逆式水泵水轮机在水泵工况下运行的功率为  $P'_r$ , 正好可以将复合发电系统的多余电能全部转换为水能; ② 当  $P_{jr} > P'_r$  时, 可逆式水泵水轮机在水泵工况下运行的功率为  $P_{jr}$ , 满足抽水条件之后仍有多余电能  $P_{jr} - P'_r$ , 可将此部分多余电能用蓄电池蓄起来; ③ 当  $P_{jr} < P'_r$  时, 则可逆式水泵水轮机不运行, 多余电能  $P'_r$  给蓄电池充电蓄能。

### 2.2.1 抽水过程的 $t_0$ 时刻

扬程:  $H'_0 = Z'_{u0} - Z'_{d0} + \Delta h'_0$ 。

功率: 根据当前扬程  $H'_0$ , 查可逆式水泵水轮机的水泵工况运转综合特性曲线<sup>[2]</sup>, 得到抽水所需功率为  $P'_{r0}$ 。① 当  $P_{jr} > P'_{r0}$  时,  $P'_{c0} = P'_{r0}$ ; ② 当  $P_{jr} = P'_{r0}$  时,  $P'_{c0} = P'_{r0}$ ; ③ 当  $P_{jr} < P'_{r0}$  时,  $P'_{c0} = 0$ 。

效率: 当  $P_{jr} \geq P'_{r0}$  时, 根据扬程  $H'_0$ , 查可逆式水泵水轮机的水泵工况特性曲线<sup>[2]</sup>, 可得效率  $\eta'_{r0}$ , 则  $\eta_0 = \eta'_{r0}$ 。

流量: 当  $P_{jr} \geq P'_{r0}$  时, 根据公式  $Q'_{r0} = \frac{P'_{r0}\eta'_{r0}}{9.81H'_0}$ , 求得流量  $Q'_{r0}$ , 则  $Q'_{c0} = Q'_{r0}$ 。

水量:  $W'_0 = Q'_{r0} \cdot \Delta t$ 。

### 2.2.2 抽水过程的 $t_1$ 时刻

水量: 上水库水量为  $V'_{u1} = V'_{u0} - W'_0$ ; 下水库水量为  $V'_{d1} = V'_{d0} + W'_0$ 。

水位: 利用水库水位-库容曲线, 根据上下水库的水量, 可查到上下水库的水位分别为  $Z'_{u1}$  和  $Z'_{d1}$ 。

水头:  $H'_1 = Z'_{u1} - Z'_{d1} + \Delta h'_1$ 。

重复  $t_0$  时刻的过程, 可得到  $t_1$  时刻的出力  $P'_{c1}$ 、效率  $\eta'_1$ 、流量  $Q'_1$ 、水量  $W'_1$ 。重复上述过程, 可得到任意时刻的水头  $H'_i$ 、流量  $Q'_i$ 、出力  $P'_{ci}$ 。由此可绘制抽水蓄能机组在水泵工况下发电的水头变化曲线、出力变化曲线。

## 3 抽水蓄能的运行策略

可逆式水泵水轮机可按给定出力运行和按给定流量运行。因为多能互补发电系统中抽水蓄能用于平衡系统的功率, 因此, 按给定出力运行。给定的出力即为多能互补发电系统的净负荷  $P_j$ 。为了说明可逆式水泵水轮机的运行控制过程, 假设净负荷曲

线如图1所示.图中, $P_e$ 为水轮机工况的额定功率, $P'_e$ 为水泵工况的额定功率, $P_q$ 为水轮机工况的启动功率和停机功率.

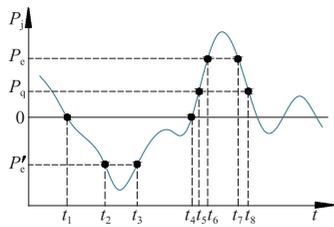


图1 复合系统净负荷曲线

Fig. 1 Net load curve in hybrid systems

1) 当  $P_j > 0$  时,抽水蓄能机组运行在水轮机工况,分3种情况:① 当  $P_{jz} < P_q$  时,抽水蓄能机组不运行;② 当  $P_q \leq P_{jz} < P_e$  时,抽水蓄能机组按净负荷功率  $P_j$  运行在水轮机工况;③ 当  $P_e \leq P_{jz}$  时,抽水蓄能机组按水轮机工况的额定功率  $P_e$  运行.

其中,抽水蓄能机组按净负荷功率  $P_j$  运行在水轮机工况的具体控制方式:① 跟踪复合系统的净负荷  $P_j$ ,如图2所示;② 根据水轮机工况的数学模型,计算水轮机水头  $H$ ,流量  $Q$ ,导叶开度  $a_0$ ,图3为导叶开度变化曲线;③ 按导叶开度  $a_0$  控制.

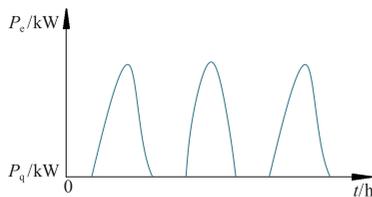


图2 复合系统的净负荷(大于0)

Fig. 2 Net load of hybrid system (more than zero)

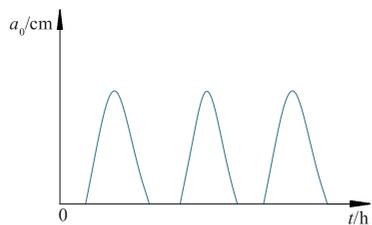


图3 导叶开度变化曲线

Fig. 3 Guide vane opening degree curve

2) 当  $P_j < 0$  时,抽水蓄能机组运行在水泵工况,分2种情况:① 当  $P_{jz} < P'_e$  时,抽水蓄能机组不运行;② 当  $P_{jz} \geq P'_e$  时,抽水蓄能机组按水泵工况的额定功率  $P'_e$  运行.

## 4 实例

如图4为某风光抽蓄多能互补发电系统的净负

荷曲线和抽水蓄能机组输出功率曲线.其中,抽水蓄能机组的水轮机工况额定功率  $P_e = 315$  kW,水泵工况额定功率  $P'_e = 525$  kW,水轮机工况的启动功率和停机功率  $P_q = 31.5$  kW.图中红线为净负荷  $P_j$  曲线,绿线为抽水蓄能机组的输出功率  $P_{cc}$  曲线.

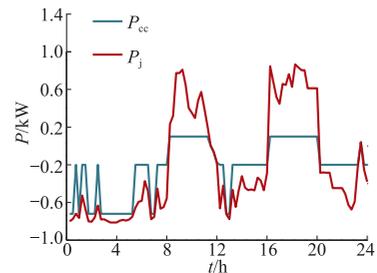


图4 某风光抽蓄多能互补发电系统的净负荷曲线和抽水蓄能机组输出功率曲线

Fig. 4 Net load and pumped-storage output power curve of hybrid wind/PV/pumped-storage power system

1) 当  $P_j > 0$  时,抽水蓄能机组运行在水轮机工况,分3种情况:① 当  $P_{jz} < 31.5$  kW 时,抽水蓄能机组不运行,则其输出功率为0;② 当  $31.5$  kW  $\leq P_{jz} < 315$  kW 时,抽水蓄能机组按净负荷功率  $P_j$  运行在水轮机工况,即抽水蓄能的输出功率曲线与净负荷功率曲线重合;③ 当  $315$  kW  $\leq P_{jz}$  时,抽水蓄能机组按水轮机工况额定功率  $P_e = 315$  kW 运行,即抽水蓄能机组的输出功率等于315 kW.

2) 当  $P_j < 0$  时,抽水蓄能机组运行在水泵工况,分2种情况:① 当  $P_{jz} < 525$  kW 时,抽水蓄能机组不运行,即其输出功率为0;② 当  $P_{jz} \geq 525$  kW 时,抽水蓄能机组按水泵工况的额定功率  $P'_e = 525$  kW 运行,即其输出功率  $P_{cc} = 525$  kW.

## 5 结论

1) 为了同时考虑系统中风能资源、太阳能资源的不稳定性和负荷的变化性,提出了净负荷的概念,并建立了净负荷的数学模型.净负荷能同时兼顾风能资源、太阳能资源和负荷的变化规律,为系统中抽水蓄能机组的配置提供了能量依据.

2) 多能互补发电系统中,抽水蓄能机组在水轮机工况下和水泵工况下数学模型的建立方式不同.在水轮机工况下,根据当前水头查水轮机运转综合特性曲线,得到其出力限制线上所对应的出力,与当前净负荷比较,建立其数学模型;在水泵工况下,直接比较水泵的抽水输入功率与净负荷的大小,建立其数学模型.

3) 多能互补发电系统中,抽水蓄能机组按给定出力运行,即多能互补发电系统的净负荷运行.当系统净负荷大于0时,抽水蓄能机组运行在水轮机工况;当系统净负荷小于0时,抽水蓄能机组运行在水泵工况.

多能互补发电系统中抽水蓄能机组运行策略的建立,为多能互补发电系统的仿真建模、优化配置及优化运行等提供了理论依据.

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] 王承煦. 风力发电 [ M ]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [ 2 ] 梅祖彦. 抽水蓄能发电技术 [ M ]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [ 3 ] Qian Zhijun, Osama Abdel-Rahman, Christopher Hamilton. An integrated four-port converter for compact and efficient hybrid power systems [ C ] // Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems: Nano-Bio Circuit Fabrics and Systems, 2010: 2207 - 2210.
- [ 4 ] Anagnostopoulos J S, Papantonis D E. Simulation and size optimization of a pumped-storage power plant for the recovery of wind-farms rejected energy [ J ]. Renewable Energy, 2008, 33 ( 7 ): 1685 - 1694.
- [ 5 ] 任岩. 风光互补发电储能装置: 中国, 201110048421. 8 [ P ]. 2012 - 07 - 25.
- [ 6 ] 任岩, 郑源, 李延频. 风/光/抽蓄复合发电系统的建模与仿真 [ J ]. 排灌机械工程学报, 2011, 29 ( 6 ): 518 - 522.
- [ 7 ] Ren Yan, Zheng Yuan, Li Yanpin. Modeling and simulation of hybrid wind/PV/pumped-storage system [ J ]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29 ( 6 ): 518 - 522. ( in Chinese )
- [ 8 ] Stefanos V Papaefthymiou, Eleni G Karamanou, Stavros A Papathanassiou, et al. A wind-hydro-pumped storage station leading to high RES penetration in the autonomous island system of ikaria [ J ]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2010, 1 ( 3 ): 163 - 172.
- [ 9 ] Khatibi M, Jazaeri M. An analysis for increasing the penetration of renewable energies by optimal sizing of pumped-storage power plants [ C ] // Proceedings of IEEE Electrical Power & Energy Conference-Energy Innovation, 2008.
- [ 10 ] Li Ruisheng, Wu Bingxin, Li Xianwei. Design of wind-solar and pumped-storage hybrid power supply system [ C ] // Proceedings of 2010 3rd IEEE International Conference Science and Information Technology, 2010: 402 - 405.
- [ 11 ] Dustin Shively, John Gardner, Todd Haynes, et al. Energy storage methods for renewable energy integration and grid support [ C ] // Proceedings of IEEE Energy 2030 Conference, 2008: 17 - 18.

(责任编辑 朱漪云)

(上接第 136 页)

- [ 15 ] Vatankhah Ali R, Valiani A. Analytical inversion of specific energy-depth relationship in channels with parabolic cross-sections [ J ]. Hydrological Sciences Journal, 2011, 56 ( 5 ): 834 - 840.
- [ 16 ] Valiani A, Caleffi V. Depth-energy and depth-force relationships in open channel flows. II: Analytical findings for power-law cross-sections [ J ]. Advances in Water Resources, 2009, 32 ( 2 ): 213 - 224.
- [ 17 ] Vatankhah Ali R. Comments on "Depth-energy and depth-force relationships in open channel flows. II: Analytical findings for power-law cross sections" by A. Valiani, V. Caleffi [ J ]. Advances in Water Resources, 2009, 32 ( 6 ): 963 - 964.
- [ 18 ] 清华大学水力学教研室. 水力学 [ M ]. 北京: 人民教育出版社, 1980.
- [ 19 ] 邓建中, 刘之行. 计算方法 [ M ]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [ 20 ] 王正中, 刘计良, 冷畅俭, 等. 含参变量超越方程及高次方程迭代法求解的初值选取方法 [ J ]. 数学的实践与认识, 2011, 41 ( 15 ): 117 - 120.
- [ 21 ] Wang Zhengzhong, Liu Jiliang, Leng Changjian, et al. Selection method for initial values of iteration for solving transcendental equations and higher ordered equations with parametric variables [ J ]. Mathematics in Practice and Theory, 2011, 41 ( 15 ): 117 - 120. ( in Chinese )

(责任编辑 徐云峰)