

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.05.005

抽水蓄能电站同发同抽等流量运行岔管水力特性

陈青生¹, 马 追^{1,2}, 董 壮¹, 刘 肖¹, 董胤楚³

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032;
3. 中建钢构有限公司, 广东 深圳 221116)

摘要: 为研究抽水蓄能电站不同机组间同发同抽运行时的岔管水力特性, 基于某抽水蓄能电站岔管的体型及设计参数, 采用水动力模型对抽水蓄能电站同一水力单元内同发同抽等流量运行时的岔管段水力特性进行数值模拟研究。结果表明: 研究范围内, 同发同抽运行时岔管段水流会发生回流及低压区, 最大的水头损失系数为 0.5; 与常规的运行工况相比, 同一水力单元中进行同发同抽等流量运行时岔管内的水流流态会发生恶化、水头损失增大的现象, 但从水力学的角度没有产生非常不良的流态。

关键词: 抽水蓄能电站; 同一水力单元; 同发同抽; 岔管; 水头损失; 数值模拟

中图分类号: TV743 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2020)05-0413-06

Hydraulic characteristics of bifurcated pipe running at flow rates of same discharge and same pumping in pumped storage power station

CHEN Qingsheng¹, MA Zhui^{1,2}, DONG Zhuang¹, LIU Xiao¹, DONG Yinchu³

(1. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. CCCC Third Harbor Consul Tants Co., Ltd., Shanghai 200032, China;
3. China Construction Steel Structure Company, Shenzhen 221116, China)

Abstract: In order to study the hydraulic characteristics of bifurcated pipes in pumped storage power station when different units are pumped at the same time, combined with the shape and design parameters of bifurcated pipes in a pumped storage power station, the hydraulic characteristics of bifurcated pipes in the same unit with the same pumping and discharge were numerically simulated by using the hydrodynamic model. The results show that, within the scope of the study, the return flow and low pressure zone will occur in the bifurcated section of the same pumping operation, and the maximum head loss coefficient is 0.5. Meanwhile, the flow pattern in the bifurcated pipe will deteriorate and the head loss will increase when the same hydraulic unit operates with the same pumping flow, but it is feasible from the hydraulic point of view.

Key words: pumped storage power station; same hydraulic unit; same discharge and same pumping; bifurcated pipe; head loss; numerical simulation

岔管是抽水蓄能电站输水系统的关键部位,其结构复杂,具有双向水流特点,水头损失集中^[1]。因此,岔管的体型是否合理,直接关系到电站的运行效率和长期效益^[2]。目前,主要通过水力模型试验和数值模拟 2 种方法对岔管内水流流动进行研究^[3-4]。水力模型试验是研究岔管水流流态和水头损失、岔管体型的重要手段。Klasinc 等^[5]通过水力模型试验研究了抽水蓄能电站发电、抽水分别运行时岔管段水流双向流动的水力特性。黄智敏等^[6]通过广州抽水蓄能电站上游引水岔管模型试验初步探讨了抽水蓄能电站岔管群的

作者简介: 陈青生(1964—),男,教授,博士,主要从事水工水力学、环境水力学研究。E-mail:qschen-dragon@163.com
引用本文: 陈青生,马追,董壮,等. 抽水蓄能电站同发同抽等流量运行岔管水力特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(5):413-418.
CHEN Qingsheng, MA Zhui, DONG Zhuang, et al. Hydraulic characteristics of bifurcated pipe running at flow rates of same discharge and same pumping in pumped storage power station[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020,48(5):413-418.

水力特性。李玉梁等^[7]对抽水蓄能电站渐扩形衔接对称岔管的水力特性进行试验研究。李玲等^[8]进行了抽水蓄能电站尾水岔管水流运动及阻力特性试验研究。姚敏杰等^[9]对洪屏抽水蓄能电站内加强月牙肋钢岔管进行原型水压试验研究。近年来,随着数值计算与计算机技术的进步,利用数学模型模拟岔管处的水流运动的水平也有了长足发展^[10]。蔡付林等^[11]利用三维流线迎风有限元计算了月牙肋岔管在发电工况下的水流状态。毛根海等^[12]对卜型岔管不同工况下水流特性进行了水力模型试验与数值计算研究。董壮等^[13]对某抽水蓄能电站的引水岔管和尾水岔管采用三维紊流数学模型对其不同体型进行流态、流速、压力分布的研究。杨校礼^[14]结合西龙池抽水蓄能电站对带有月牙肋板的三岔管水流进行数值模拟研究,较好地复演了三岔管管内水流的流速场。

随着区外来电低谷消纳及新能源装机容量的增加,电网可能发生突然性的电力不平衡现象。抽水蓄能电站除承担目前的用电量削峰填谷、事故备用功能外,其运行工况的快速变化特性对电网调频、调相的功能日益突出^[15-17]。

通常,抽水蓄能电站共用一条有压引水隧洞的机组、输水管道、进出水口为一个水力单元。目前学者们对岔管段水力特性的研究都是在单机发电、单机抽水、双机发电、双机抽水等常规工况下,且抽水蓄能电站承担调频、调相和电网电力参数及时调整功能一般是考虑抽水蓄能电站不同水力单元之间的机组同发同抽运行^[18]。为探讨同一水力单元间机组同发同抽运行的可行性,笔者采用数值模拟方法对此运行方式发电与抽水机组等流量运行工况进行了岔管段水力特性研究,以期能为抽水蓄能电站同发同抽运行提供参考。

1 岔管段水头损失影响因素无量纲分析

抽水蓄能电站运行时,岔管段水头损失主要与岔管体型、来流及当地重力加速度有关,岔管体型主要包括主管及支管管径、分岔角等,水流特性主要为水的密度、流量、动力黏度等,所以岔管段的水头损失与水的密度 ρ 、支管断面平均流速 u 、主管管径 D 、支管管径 d 、动力黏度 η 、重力加速度 g 、分岔角 β 等因素有关。根据量纲分析理论^[19-20],选取 $L、T、M$ 为基本单位系,取 $\rho、u、d$ 为基本物理量,对其他物理量进行量纲分析,从而可以得到岔管段水头损失公式为

$$h_f=f_1\left(\frac{1}{Fr^2},\frac{1}{Re},\frac{D}{d},\beta\right)d \tag{1}$$

式中: Fr ——管道端口断面弗劳德数; Re ——管道端口断面雷诺数; $D、d$ ——管道端口断面主管、支管管径。

由式(1)可知,岔管段水头损失与管道端口断面 Fr 及 $Re、\frac{D}{d}、\beta$ 有关。

2 数学模型的建立与验证

2.1 数学模型

假定岔管内水体为不可压缩流体,其控制方程为根据经典牛顿力学建立的连续性方程和动量方程。针对岔管段水流复杂的情况,采用了修正的可实现的 $k-\varepsilon$ 模型,该模型湍流引入了与旋转和曲率有关的内容,更加精确地模拟强逆压力梯度、射流扩散率、分离、回流、旋转等特性^[21]。

可实现的 $k-\varepsilon$ 模型中,关于 k 和 ε 的输运方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k-\rho \varepsilon \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+\rho C_1 E \varepsilon-\rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k+\sqrt{\nu \varepsilon}} \tag{3}$$

其中

$$C_1=\max\left(0.43,\frac{\eta}{\eta+5}\right) \qquad \eta=\left(2E_{ij}E_{ij}\right)^{\frac{1}{2}}\frac{k}{\varepsilon} \qquad E_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$$

式中: μ ——变形速率张量; μ_t ——湍流黏度; $\sigma_k、\sigma_\varepsilon$ —— $k、\varepsilon$ 方程的湍流 Prandtl 数, $\sigma_k=1.0、\sigma_\varepsilon=1.2$; G_k ——由层流速度梯度产生的湍流动能; E ——变形率; C_2 ——模型常数,为1.9; ν ——运动黏滞系数。

模型求解采用二阶迎风格式,并利用有限体积法进行数值离散。

2.2 网格划分

利用前处理软件 ICEM CFD 对岔管段模型进行网格划分,利用流体计算软件 Fluent 进行三维数值计算。

分别采用网格尺度为 80 cm、70 cm、60 cm、50 cm、40 cm、30 cm 的空间四面体非结构化网格在相同边界条件下进行数值模拟,通过比较双机抽水不同网格尺度下的岔管段断面 0—0(图 1)的流速计算结果进行网格无关性验证。验证结果表明:当网格尺度小于 40 cm 时,计算结果趋于稳定(表 1)。为保证计算精度及计算效率,网格处理时网格尺度选取为 40 cm,岔管段网格总数为 90.8 万。

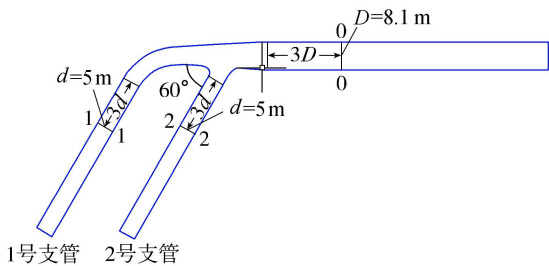


图 1 模型计算域

Fig.1 Model computing domain

表 1 网格无关性分析结果

Table 1 Analysis result of grid independence		
网格尺度/cm	网格数/万	$u_{0-0}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
80	12.0	4.381
70	17.6	4.366
60	27.7	4.363
50	47.2	4.361
40	90.8	4.360
30	269.4	4.360

2.3 模型验证

选取福建某抽水蓄能电站引水岔管的物理模型试验结果对数学模型的可靠性进行验证。该电站 $D=6.5\text{ m}$ 、 $d=3.8\text{ m}$ 、 $\beta=51.08^\circ$ (图 2)。发电机组额定流量为 $80.2\text{ m}^3/\text{s}$,抽水机组额定流量为 $72.4\text{ m}^3/\text{s}$ 。

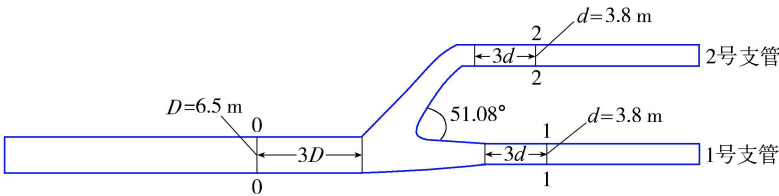


图 2 福建某抽水蓄能电站引水岔管模型计算域

Fig.2 Calculation domain of diversion bifurcation model for a pumped storage power station in Fujian Province

单机抽水、单机发电、双机抽水、双机发电方案下数学模型与物理模型水头损失、水头损失系数结果相对误差都在 10% 内(表 2),因此数学模型精度可以满足要求。

表 2 不同运行方案数学模型计算与物理模型试验结果对比

Table 2 Comparison of numerical and physical model test results for different operation schemes

方 案	水头损失						水头损失系数					
	物理模型结果/m		数学模型结果/m		计算相对误差/%		物理模型结果		数学模型结果		计算相对误差/%	
	1 号支管	2 号支管	1 号支管	2 号支管	1 号支管	2 号支管	1 号支管	2 号支管	1 号支管	2 号支管	1 号支管	2 号支管
单机抽水	0.29	1.02	0.29	0.96	0	-5.17	1.20	2.82	1.20	2.77	0	-1.67
双机抽水	0.23	0.40	0.25	0.41	5.03	1.37	0.24	0.41	0.25	0.42	8.19	4.42
单机发电	0.33	0.51	0.31	0.49	-5.24	-2.69	1.10	1.71	1.04	1.67	-4.85	-2.51
双机发电	0.49	0.80	0.44	0.85	-9.72	5.39	0.41	0.66	0.37	0.71	-8.88	6.37

3 岔管段水力特性影响因素分析

3.1 研究对象

卜型岔管在实际抽水蓄能工程中应用较为广泛,结合已建某抽水蓄能电站引水岔管体型及设计参数进行建模计算。该电站引水岔管主管直径 8.1 m、支管直径 5.0 m、分岔角为 60° (图 1);发电机组额定流量为 $111.36\text{ m}^3/\text{s}$,抽水机组额定流量为 $96.9\text{ m}^3/\text{s}$ 。计算分析的岔管范围为各主、支管的 10 倍管径,相关水力参数的计算断面为 0—0、1—1、2—2(图 1)。入流为定流量边界,出流为自由边界,假定管道计算断面处水流流动充分发展,各物理量趋于稳定。近壁处采用壁面函数处理,采用无滑动边界条件。为保证计算精度,采取 2 阶精度,收敛条件设定为迭代相对误差小于 1×10^{-4} 。

通过改变不同支管相应机组运行流量改变岔管段弗劳德数和雷诺数的大小;通过改变 2 个支管的管径

改变管径比 D/d 的数值;通过改变 β 的数值研究分岔角对于岔管段水头损失的影响。

参照所依托的某抽水蓄能电站的参数,计算中假定抽水蓄能电站同发同抽同一流量运行时单台机组的发电或抽水流量为 $50\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $100\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $150\text{ m}^3/\text{s}$;岔管主管直径为 8.1 m ,支管直径分别拟定为 4 m 、 4.5 m 、 5 m 、 5.5 m ,主支管管径比分别为 1.47 、 1.62 、 1.80 、 2.03 ;岔管段支管间分岔角分别采用 50° 、 60° 、 70° 、 80° ,1号管弯管弯曲角与分岔角相等。

3.2 水头损失计算

选择断面 1—1、2—2 计算水头损失,抽水管道计算断面与发电管道计算断面间的水头损失为

$$h_f = \left(z + \frac{p_{in}}{\rho g} + \frac{u_{in}^2}{2g} \right) - \left(z_{out} + \frac{p_{out}}{\rho g} + \frac{u_{out}^2}{2g} \right)$$

(4)

式中: z ——断面中心高程; p_{in} 、 p_{out} ——进水口、出水口断面平均压强。

岔管段水头损失系数为 $\lambda = h_f/E_{in}$,其中 E_{in} 为进水口流速水头。

3.3 同发同抽等流量运行岔管段水力特性分析

抽水蓄能机组运行时可根据实际状况调整机组运行功率,同一水力单元内发电与抽水机组等流量运行可以满足电网对于同发同抽运行工况的要求,本文研究同发同抽等流量运行时的岔管段水力特性。

3.3.1 Fr 、 Re 对岔管段水头损失的影响

同发同抽等流量运行时两支管端口断面 Fr 、 Re 相等,随着两支管入口与出口流量的增大,端口断面的 Fr 、 Re 增大,水流紊乱程度增加,水头损失随之增大; Fr 、 Re 的增大,进口断面的流速水头也相应增大,水头损失系数随之减小;相比于1号机抽水2号机发电运行,1号机发电2号机抽水运行不仅受到主管内水体的作用,还受到管壁的作用,故1号机发电2号机抽水运行时,水头损失和水头损失系数相比于1号机抽水2号机发电运行时都要大(表3)。

表3 同发同抽等流量运行不同 Fr 、 Re 水头损失及水头损失系数

Table 3 Head loss and head loss coefficients of different Fr and Re in operation with same pumping flow

方案	1—1 断面			2—2 断面			h_f/m	λ
	流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	Fr	$Re/10^6$	流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	Fr	$Re/10^6$		
1号机发电	50	0.36	12.7	50	0.36	12.7	0.14	0.43
2号机抽水	100	0.73	25.4	100	0.73	25.4	0.54	0.41
	150	1.09	38.1	150	1.09	38.1	1.17	0.40
1号机抽水	50	0.36	12.7	50	0.36	12.7	0.13	0.39
2号机发电	100	0.73	25.4	100	0.73	25.4	0.49	0.38
	150	1.09	38.1	150	1.09	38.1	1.09	0.37

相同流量下1号机发电2号机抽水与1号单机发电、2号单机抽水相比,水头损失及水头损失系数增大;相同流量下1号机抽水2号机发电与1号单机抽水、2号单机发电相比,水头损失及水头损失系数增大(表3、表4)。

3.3.2 D/d 、 β 对岔管段水头损失的影响

同发同抽等流量运行时,管径比越大,支管管径越小,管道内流速增大,紊乱程度增加,故水头损失、水头损失系数越大(表5)。同发同抽等流量运行时,分岔角越大,支管向另一支管的转弯半径越大,水流更容易趋向平稳,故水流的水头损失及水头损失系数都随着分岔角的增加而减小(表6)。

3.3.3 同发同抽运行岔管段流场及动水压强

由图3可知:1号机发电2号机抽水等流量下运行,水流平顺进入2号支管,受到管壁及主管内水体的作用流向1号支管,岔管段水流偏左(以水流方向为准),1号支管弯管处水流偏内侧,主管内产生回流现象。1号单机发电时,水流自主管流向1号支管,主管内来流平顺,在2号支管进口处产生小范围回流区。2号单机抽水时,水流自2号支管流向主管,在2号支管后的主椎管内形成一小范围回流区,进入主管后,受惯性影响,水流偏于左侧,在主管右侧存在一明显滞水区,范围较大并有一定程度回流,对机组运行可能有不利影响。相比于正常运行工况,1号机发电2号机抽水等流量下运行时流态更为平稳。

表 4 正常单机运行工况时水头损失、水头损失系数

Table 4 Head loss and head loss coefficient under normal single-unit operation conditions

方案	流量/(m ³ ·s ⁻¹)	<i>h_f</i> /m	λ
1 号单机发电	50	0.04	0.12
	100	0.15	0.11
	150	0.34	0.11
1 号单机抽水	50	0.05	0.15
	100	0.18	0.14
	150	0.39	0.13
2 号单机发电	50	0.03	0.10
	100	0.13	0.10
	150	0.28	0.09
2 号单机抽水	50	0.10	0.33
	100	0.42	0.32
	150	0.94	0.32

1 号机抽水 2 号机发电等流量下运行,水流平顺进入 1 号支管,在弯管处主流偏内侧,受主管水体作用折向 2 号支管,水流进入 2 号支管主流偏左,在分岔处有轻度回流。1 号单机抽水时,水流平顺进入 1 号支管,主管内水流平稳,在 2 号支管进口处产生小范围回流区。2 号单机发电,水流自主管流向 2 号支管,在主椎管内形成一小范围回流区。相比于正常运行工况,1 号机抽水 2 号机发电相同流量下运行时流态有所恶化,但对于机组运行并无影响。

岔管段压力分布与流速分布吻合,流速大则压力小,流速小则压力大,符合水流能量分布规律。分析时假定 1 号管端口断面时均压强为 10 m 水柱,模拟显示岔管段无负压出现。

表 5 不同 *D*/*d* 对应的水头损失及水头损失系数

(流量为 100 m³/s)

Table 5 Head loss and head loss coefficient under different diameter ratios of main and branch pipe

(flow rate was 100 m³/s)

<i>D</i> / <i>d</i>	1 号机发电 2 号机抽水		1 号机抽水 2 号机发电	
	<i>h_f</i> /m	λ	<i>h_f</i> /m	λ
1.47	0.17	0.19	0.16	0.18
1.62	0.54	0.41	0.49	0.37
1.80	0.83	0.42	0.57	0.38
2.03	1.57	0.50	1.07	0.39

表 6 不同 β 对应的水头损失及水头损失系数

(流量为 100 m³/s)

Table 6 Head loss and head loss coefficient under different bifurcation angles (flow rate was 100 m³/s)

β/(°)	1 号机发电 2 号机抽水		1 号机抽水 2 号机发电	
	<i>h_f</i> /m	λ	<i>h_f</i> /m	λ
50	0.55	0.42	0.55	0.41
60	0.54	0.41	0.49	0.38
70	0.44	0.33	0.39	0.30
80	0.42	0.32	0.34	0.26

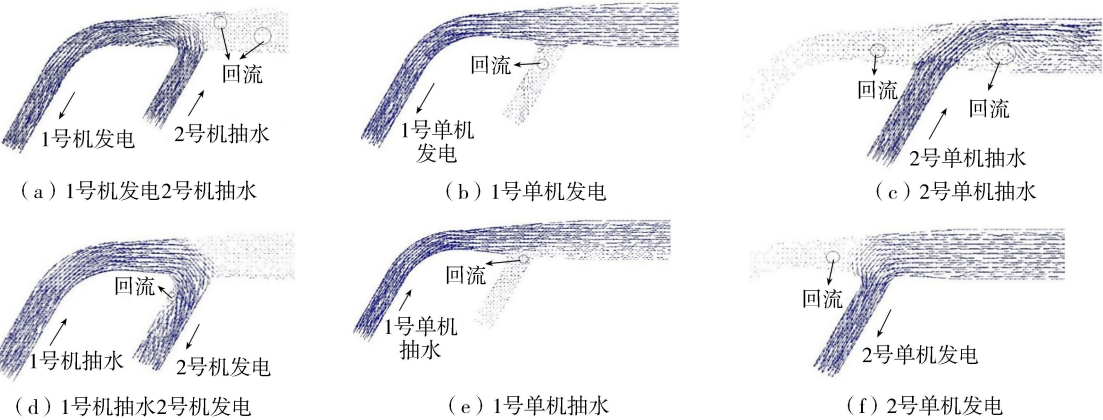


图 3 流量为 100 m³/s 时岔管段流场

Fig.3 Flow field diagram in bifurcated pipe with flow rate of 100 m³/s

4 结 论

- a. 无量纲分析可知,岔管段水头损失与管道端口断面弗劳德数及雷诺数、主管管径比、分岔角有关。
- b. 在抽水蓄能电站同一水力单元同发同抽等流量运行时,岔管段水头损失随着两支管端口断面弗劳德数和雷诺数的增大而增大,水头损失系数随着两支管端口断面弗劳德数和雷诺数的增大减小;岔管段水头损失及水头损失系数都随管径比的增大而增大;岔管段水头损失及水头损失系数都随分岔角的增大而减小;1 号发电 2 号抽水的水头损失、水头损失系数要大于 1 号抽水 2 号发电时的水头损失、水头损失系数,最大水头损失为 1.57 m,相应水头损失系数为 0.5。同正常运行工况相比,水头损失及水头损失系数都有所增大。
- c. 在抽水蓄能电站同一水力单元同发同抽等流量运行时,岔管段会出现回流及低压区,无负压出现。

d. 相比正常运行工况,抽水蓄能电站同一水力单元同发同抽等流量运行水头损失及水头损失系数增大,流态有所恶化,但对机组运行并无影响,从水力学角度分析可行。

参考文献:

- [1] 华东水利学院. 水工设计手册(第七卷)[M]. 北京:水利电力出版社,1989.
- [2] 陆佑楣,潘家铮. 抽水蓄能电站[M]. 北京:水利电力出版社,1992.
- [3] 李玲,李玉梁,黄继汤,等. 三岔管内水流流动的数值模拟与实验研究[J]. 水利学报,2001,32(3):49-53. (LI Ling, LI Yuliang, HUANG Jitang, et al. Numerical simulation and experimental study of water flow in three bifurcated pipes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(3):49-53. (in Chinese))
- [4] 徐准,吴时强. 抽水蓄能电站侧式进/出水口隔墩布置对水力特性的影响[J]. 水利水电科技进展,2020,40(3):21-27. (XU Zhun, WU Shiqiang. Influence of arrangement of division piers in lateral inlet and outlet of pumped storage plants on hydraulic characteristics[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(3):21-27. (in Chinese))
- [5] KLASINC R, KNOBLAUCH H. Head losses in the manifolds of pumped storage systems [C]//Anon. Proceedings of International Symposium on Pumped Storage. Amsterdam: Elsevier, 1994: 243-249.
- [6] 黄智敏,宗秀芬. 抽水蓄能电站岔管群特性的试验研究[J]. 广东水利水电,1991(3):28-35. (HUANG Zhimin, ZONG Xiufen. Experimental study on bifurcation characteristics of pumped storage power station[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 1991(3):28-35. (in Chinese))
- [7] 李玉梁,李玲,陈嘉范,等. 抽水蓄能电站渐扩形衔接对称岔管水流阻力特性试验研究[J]. 水力发电学报,2002,21(4):81-85. (LI Yuliang, LI Ling, CHEN Jiafan, et al. Experimental study on flow resistance characteristics of symmetrical bifurcation pipe in gradual expansion connection of pumped storage power station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2002, 21(4):81-85. (in Chinese))
- [8] 李玲,陆豪,陈嘉范. 抽水蓄能电站尾水岔管水流运动及阻力特性试验研究[J]. 水力发电学报,2008,27(3):101-104. (LI Ling, LU Hao, CHEN Jiafan. Experimental study on flow movement and resistance characteristics of tail-water bifurcation pipe in pumped storage power station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(3):101-104. (in Chinese))
- [9] 姚敏杰,高雅芬. 洪屏抽水蓄能电站内加强月牙肋钢岔管原型水压试验研究[J]. 水力发电,2016,42(6):92-96. (YAO Minjie, GAO Yafen. Study on prototype hydraulic test of reinforced crescent ribbed steel bifurcation pipe in Hongping Pumped Storage Power Station[J]. Water Power, 2016, 42(6):92-96. (in Chinese))
- [10] 高学平,张尚华,韩延成,等. 引水岔管水力特性三维数值计算[J]. 中国农村水利水电,2005(12):93-97. (GAO Xueping, ZHANG Shanghua, HAN Yancheng, et al. Three dimensional numerical calculation of hydraulic characteristics of diversion bifurcation pipe[J]. China Rural Water and Hydropower, 2005(12):93-97. (in Chinese))
- [11] 蔡付林,索丽生. 抽水蓄能电站岔管水力特性试验研究[C]//中国水力发电工程学会. 中国水力发电工程学会抽水蓄能电站建设学术交流会. 北京:中国水力发电工程学会,2007:1-5.
- [12] 毛根海,章军军,程伟平,等. 卜型岔管水力模型试验及三维数值计算研究[J]. 水力发电学报,2005,24(2):16-20. (MAO Genhai, ZHANG Junjun, CHENG Weiping, et al. Hydraulic model test and three-dimensional numerical calculation of bifurcation pipe[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(2):16-20. (in Chinese))
- [13] 董壮,罗龙洪,郑福寿. 岔管流动的数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2007,35(1):14-17. (DONG Zhuang, LUO Longhong, ZHENG Fushou. Numerical simulation of bifurcation flow[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2007, 35(1):14-17. (in Chinese))
- [14] 杨校礼. 三岔管水流数值模拟及水流特性研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2004.
- [15] 张娜,靳亚东,董化宏. 抽水蓄能电站的作用和效益[J]. 中国三峡,2010(11):25-28. (ZHANG Na, JIN Yadong, DONG Huahong. The function and benefit of pumped storage power station[J]. China Three Gorges, 2010(11):25-28. (in Chinese))
- [16] 白晓骏. 抽水蓄能电站保安电源配置分析[J]. 工程技术(引文版),2016(5):211. (BAI Xiaojun. Analysis of security power supply configuration of pumped storage power station[J]. Engineering(Cited Version), 2016(5):211. (in Chinese))
- [17] 孙建平,缪奇剑. 华东电网跨区电能消纳状况分析[J]. 华东电力,2007,35(5):106-108. (SUN Jianping, MIU Qijian. Analysis of power consumption in east China power grid[J]. East China Electric Power, 2007, 35(5):106-108. (in Chinese))
- [18] 叶林. 水电站同发同抽进/出水口布置结构:中国,201820350262.4[P]. 2018-03-15.
- [19] 谈庆明. 量纲分析[M]. 北京:中国科学技术大学出版社,2005.
- [20] 徐婕,詹士昌,田晓岑. 量纲分析的基本理论及其应用[J]. 大学物理,2004,23(5):54-58. (XU Jie, ZHAN Shichang, TIAN Xiaocen. The basic theory and application of dimensional analysis[J]. College Physics, 2004, 23(5):54-58. (in Chinese))
- [21] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京:清华大学出版社,2004.