



长尾水渠中电站日调节下泄 水流运动规律

左旋峰, 卢文蕾

(四川省交通运输厅交通勘察设计研究院, 四川成都610017)

摘要: 安谷枢纽工程以筑坝获取水头, 并采用长尾水渠进一步增加水头发电, 电站尾水渠与通航共用一渠。运用数模计算的方法, 研究了尾水渠通航条件等技术问题。研究了电站机组增(减)负荷产生的非恒定流尾水渠水流运动规律、尾水渠水力要素与机组启闭时间、流量的关系, 提出了改善措施。

关键词: 长尾水渠; 非恒定流; 通航条件

中图分类号: TV 91

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)01-0134-06

Law of motion on discharged unsteady flow from daily regulation of power station in long tailrace

ZUO Xuan-feng, LU Wen-lei

(Sichuan Communication Surveying and Design Institute, Chengdu 610017, China)

Abstract: Angu hydroelectric project gains hydraulic head with damming, and applies long tail channels to further increase hydraulic head, which also consider navigation. Utilizing the method of mathematical modeling, this paper carries out the research on technical problems such as increasing hydraulic head and hydraulic navigation condition, etc. According to the relationship between the unsteady flow tailrace water flow movement rule, tailrace hydraulic requirements, wave height, gradient, flow velocity caused by changing load on power plant units and unit opening and closing time, flow rate, this paper puts forward the improving measures, which may serve as reference for relevant professional design.

Key words: long tailrace; unsteady flow; navigation condition

四川省大渡河安谷枢纽采用了长尾水渠的开发模式, 即通常的混合式电站, 以筑坝获取水头, 并配合长尾水渠进一步获得水头。安谷枢纽工程是以发电、防洪、航运、灌溉和供水为主, 兼顾生态、环境和旅游业发展的综合性水利枢纽工程。水库正常蓄水位398.0 m, 电站总装机容量640 MW, 设计引用流量2 576 m³/s。

这种电站与航运共用尾水渠的开发模式, 之前在一些工程虽曾有采用, 但尾水渠长度一般都比较短, 像安谷枢纽近10 km的长尾水渠在国内还未见。安谷枢纽尾水渠布置见图1。了解电站日调节

产生的非恒定流在渠道中水流运动规律, 可为保证尾水渠内船舶通航安全提供技术支撑。

1 通航技术指标

根据国内外有关文献^[1-3]及工程应用的实践经验, 针对V级航道提出衡量通航水流条件的参考标准, 规定如下:

1) 电站调节时, 尾水渠内非恒定流的水面波动、比降及流速等水力特性, 不应影响船舶(队)在渠道内的航行、停泊的操作要求。

2) 对尾水渠通航提出满足航运的最小航深为

收稿日期: 2013-04-24

作者简介: 左旋峰(1965—)男, 高级工程师, 主要从事港口与航道工程设计研究工作。

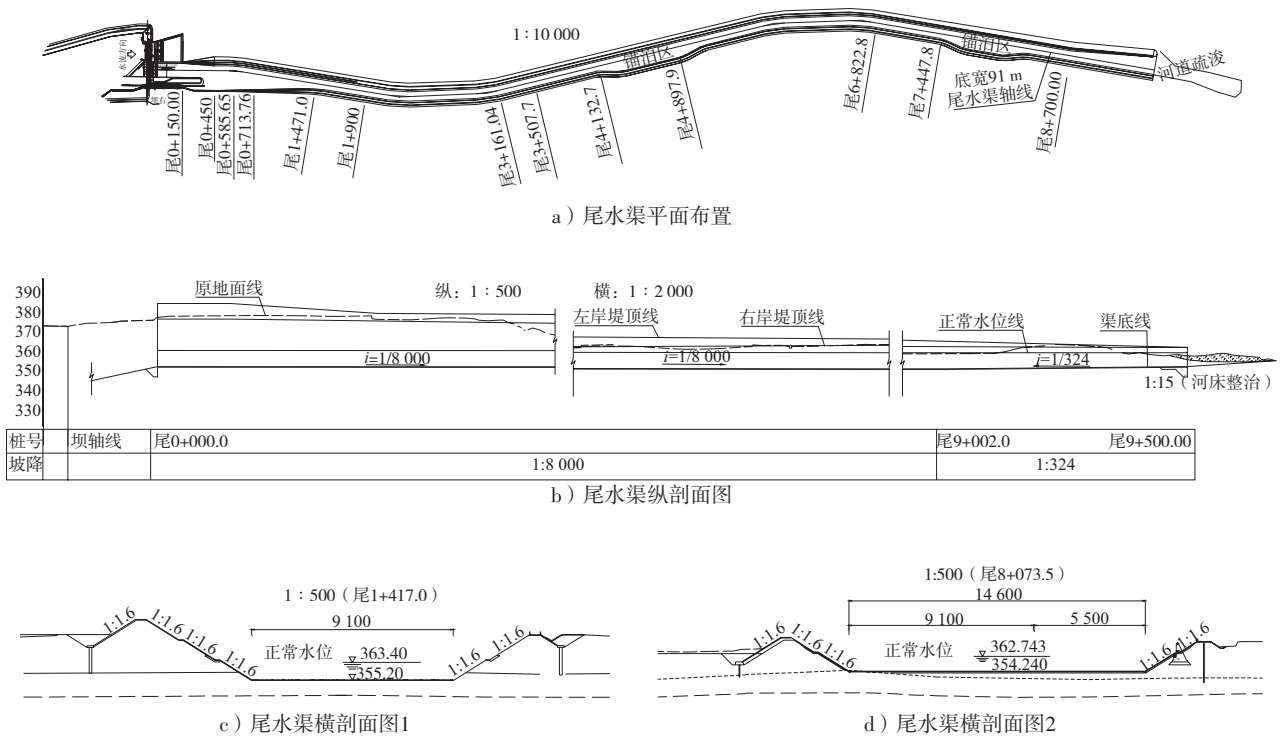


图1 安谷枢纽尾水渠平面布置

2.5 m, 最大流速2.5 m/s。

3) 尾水渠引航道内及船闸闸首处的波高 ≤ 0.5 m。

4) 船舶(队)的操舵角 $\delta \leq 25^\circ$, 漂角 $\beta \leq 10^\circ$ 。

2 水库与电站运行方式

1) 枯水期。当上游来流量 $Q \leq 2\ 576\ \text{m}^3/\text{s}$ 时, 水位维持正常蓄水位398.0 m运行, 电站进行日调节, 上游来流量满足4台机组满负荷的正常发电(表1)。

表1 发电机组与流量的关系

| 机组/台 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|-----|-------|-------|-------|
| 流量 $Q / (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ | 644 | 1 288 | 1 932 | 2 576 |

2) 洪水期: 当上游来流量 $2\ 576\ \text{m}^3/\text{s} < Q \leq 5\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$, 水库仍按正常蓄水位398.0 m运行, 上游来水流量超过电站满发引用流量, 泄洪冲沙闸局部开启下泄。

3) 洪水期当上游来水流量 $Q > 5\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 时, 泄洪冲沙闸全部开启泄洪, 电站停止发电。

3 电站调节时尾水渠波动特性、影响因素、控制条件及水力要素

1) 电站调节与波动特性。

电站调节时, 渠道内非恒定流所形成的长波运动使水面升高或降低, 水面在发生倾斜的同时伴随着水流的纵向运动, 它将对渠道内等待过闸和正在航行的船舶产生各种不利的影

响。渠道内非恒定流的水力特性: 对长度为无限长的矩形断面渠道, 电站调节的推进波高度 Δh 是与调节流量和输水流量 Q 成正比的。

2) 影响波动特性的因素。

①边界条件的影响: 推进波推进过程中波的变形、航道底部与侧壁边界摩阻对波的衰减作用、电站调节非恒定流流速对波速的影响、渠道底部高程与岸壁边界不规则导致波的反射等。电站调节推进波波高和水面比降与边界条件有关, 如渠道水面平均宽度 B_n 、水深 h 及断面面积 ω_n 等。

②水力特性的影响: 电站机组增(减)负荷的启闭时间 Δt 的长短, 机组台数(流量)等。

③船舶(队)影响: 船型、船舶组合形式, 船队总排水量、船舶允许系缆力标准、航行阻力

等。最终应以设计船型进行分析。

3) 电站尾水渠水力要素的控制条件。

①渠道推进波波高：当电站4台机组满负荷连续且同时运转，该流量产生的波高为控制条件。

②渠道水深：当电站4台机组减负荷连续且同时运转，若渠道水位最低时，负波波高为控制条件。

③渠道流速：当电站4台机组满负荷运转，与该水深断面之比率为控制条件。

④渠道水面比降：当电站增（减）负荷时，调节流量与启闭时间的平均流量增率最大为控制条件。

⑤电站机组开启与关闭的时间：波高、比降和流速与启闭时间的长短有关，时间短者为控制条件。

4) 尾水渠中水力要素的基本要求。

①波高或波幅：电站减负荷会在渠道内形成泄水波，要求不能影响通航水深；渠道边坡高度由波高和富裕高度确定。

②水面比降和纵向流速：对渠道内等待过闸的船舶产生动水作用力，不允许该力超过船舶允许系缆力。当流速方向和船舶行驶方向一致时，会影响其操作性；当水面比降和纵向流速与船舶行驶方向相反时，会增加船舶的航行阻力，影响船舶的航行速度。

4 尾水渠非恒定流水力要素的计算和试验

4.1 电站非恒定流尾水渠内水位变化

由非恒定流引起尾水渠内水位瞬时变化是影响船舶安全通航的一个重要因素，水位瞬时变化过大，会引起船舶航行的偏航、漂角和操舵角加大，对船舶航行十分不利。文献[4-5]对各种工况进行了计算和试验，并分析了电站增（减）负荷时最大水位变幅与启闭时间的关系、最大水位变幅与流量的关系、以及各运行工况渠道内最大水位变率等。

4.1.1 各工况下水位变幅（即波高）

机组增负荷开启时间为20 s, 2 min, 5 min, 减负荷关闭时间为14 s, 2 min, 5 min, 计算各运行工况在尾水渠内1, 2, 5, 10, 15, 20 min及稳定后的水位最大变幅情况，得到机组开启关闭时水位变幅的一般规律：

机组开启（关闭）幅度越大，水位最大变幅

越大，越不利于船舶航行；机组开启（关闭）时间越短，水位最大变幅越大，对船舶航行越是不利。需特别指出的是，电站的开启（关闭）是流量在短时间内的增加（减小），所产生的泄水波是单向的，不会产生往复性的非恒定流，对船舶航行的安全影响相对小些。

同时开启（关闭）3台，即由1台机组→4台机组或由4台机组→1台机组时非恒定流水位的变幅最大。随着机组的开启（关闭），尾水渠内非恒定流流量增加（减少），非恒定流传播所到之处水位抬高（降低），且尾水渠下游各测点水位发生变化的时间要晚于上游测点水位发生变化的时间，说明非恒定流水位变化在尾水渠内是自上游向下游传播的。

4.1.2 电站增（减）负荷时最大水位变幅与启闭时间的关系

将计算中水位变幅最大的工况，即3台机组同时增（减）负荷（即1台→4台和4台→1台），以不同启闭时间的最大水位变幅值 $\pm \Delta h_{max}$ 为纵坐标，以 t 为横坐标，点绘 $\pm \Delta h_{max}-t$ 关系曲线，见图2。从图2可以看出：1) 3台机组同时增减负荷，此时的流量 $Q=1\ 932\ m^3/s$ ，以不同的启闭时间 Δt (20, 120, 300 s) 开启，它的流量增率 $\Delta Q/\Delta t=96.6, 16.1, 6.44\ m^3/s^2$ ；关闭 (14, 120, 300 s) 时，它的流量减率 $-\Delta Q/\Delta t=138, 16.1, 6.44\ m^3/s^2$ ，水体进出尾水渠，造成水位的升高和降低，稳定后的 Δh 值与启闭时间没有关系。2) 电站增减机组、启闭时间对渠道内水位的升高和降低，影响的范围为0~15 min，在该范围内，水位的升高随启闭时间的增长而减少。

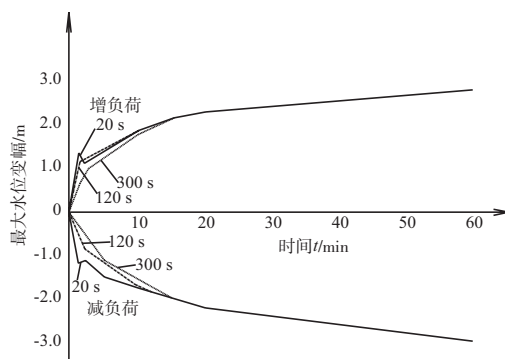


图2 增（减）负荷最大水位变幅与时间关系

4.1.3 电站增(减)负荷最大水位变幅与时间、流量的关系

以最大水位变幅 $\pm \Delta h_{\max}$ 为纵坐标, 流量为横坐标, 点绘 $\Delta h_{\max}=f(Q)$ 的关系(图3), 可以看出: 不管机组增负荷, 还是减负荷, 关系成正(反)比线性, 随着流量的增加而增大或减小。机组增(减)负荷, 1台机组、2台机组或3台机组, 它的起始条件不同, 即渠道流速、水深、断面积的变化不同, 可以得到 $\Delta h_{\max}=f(Q)$ 各自的关系。各运行组合的关系见表2。

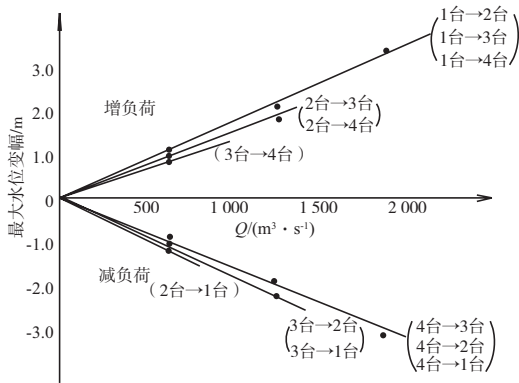


图3 增(减)负荷最大水位变幅与流量关系

表2 各运行组合最大水位变幅与流量的关系

| 增减负荷 | 机组变化 | 最大水位变幅与流量的关系 |
|------|---------------------|-------------------------------|
| 增负荷 | 1台→2台, 1台→3台, 1台→4台 | $\Delta h_{\max}=0.001\ 74Q$ |
| 减负荷 | 4台→3台, 4台→2台, 4台→1台 | $\Delta h_{\max}=-0.001\ 74Q$ |
| 增负荷 | 2台→3台, 2台→4台 | $\Delta h_{\max}=0.001\ 5Q$ |
| 增负荷 | 3台→4台 | $\Delta h_{\max}=0.001\ 3Q$ |
| 减负荷 | 3台→2台, 3台→1台 | $\Delta h_{\max}=-0.006\ 4Q$ |
| 减负荷 | 4台→3台 | $\Delta h_{\max}=-0.001\ 8Q$ |

4.2 电站非恒定流尾水渠比降变化分析

机组在增(减)负荷过程中, 流量自上游向下游传递。机组开启过程中, 随着流量的增加, 水位升高, 渠道内比降逐渐增大, 但随着流量的向下游传递, 所至之处水位升高, 渠道内比降逐渐减小, 直至最后稳定; 机组关闭过程中, 随着流量的减小, 水位降低, 渠道内比降逐渐增大, 但其方向为反向, 随着流量减小的传递, 下游水位也逐渐降低, 比降逐渐减小, 直至最后稳定。

以最大水面比降增负荷 ($+i_{\max}$) 和减负荷

($-i_{\max}$) 为纵坐标, 以机组启闭时间 Δt 和流量为横坐标, 分别点绘各运行工况的 $\pm i_{\max}=f(\Delta t)$ 和 $\pm i_{\max}=f(Q)$ 的关系曲线, 见图4和图5。

由图4,5可以看出: 1) 比降与机组启闭时间

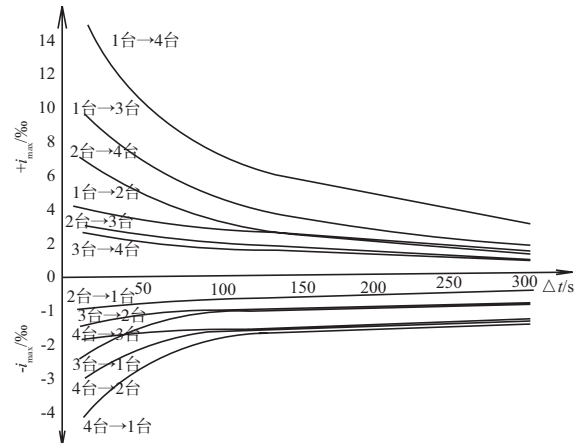
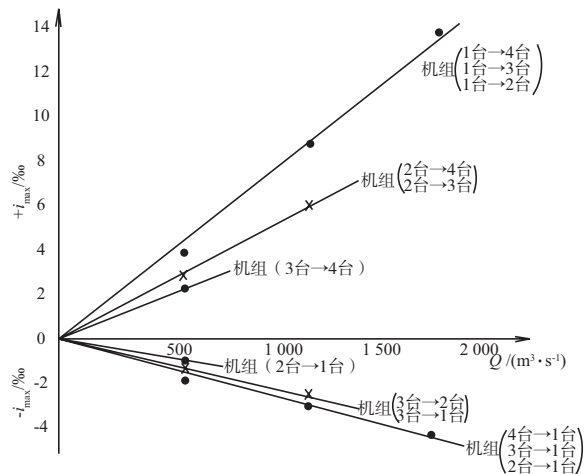
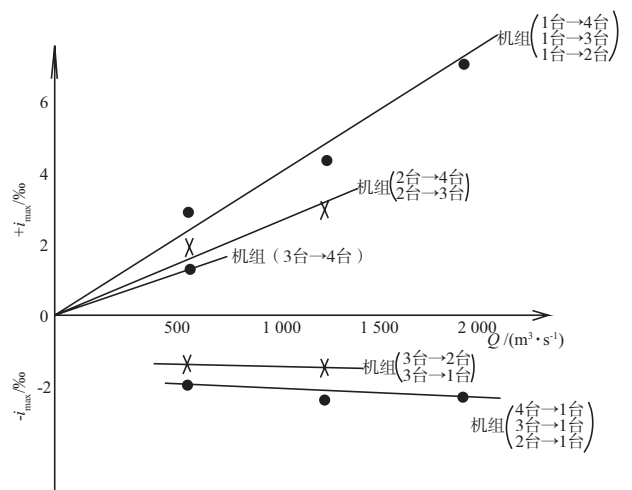


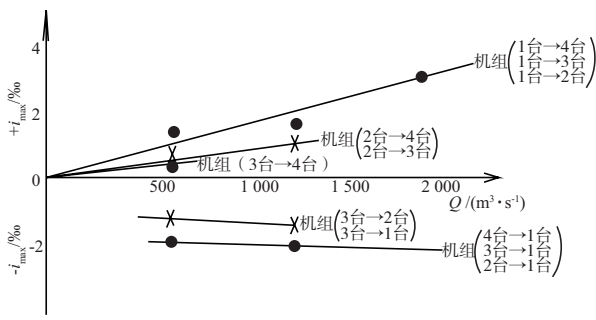
图4 $\pm i_{\max}=f(\Delta t)$ 关系曲线



a) 机组开启时间 $\Delta t=20\text{ s}$, 关闭时间 $\Delta t=14\text{ s}$



b) 机组开启闭时间 $\Delta t=120\text{ s}$



c) 机组开启闭时间 $\Delta t=300$ s
图5 $\pm i_{\max}=f(Q)$ 关系曲线

有关，随启闭时间的增加而减小；2) 比降随机组台数增加而增大，即与流量成正比；3) 相同机组增负荷的比降比减负荷大；4) 机组减负荷， $\Delta t=120$ s, 300 s时， $-i_{\max}$ 与机组的流量关系不大， $-i_{\max}$ 基本为常数。

4.3 电站机组增（减）负荷非恒定流渠道内流速变化分析

由非恒定流引起的尾水渠内流速变化也是影响船舶航行的一个主要因素，流速变幅越大，对船舶航行越不利。

1) 增（减）负荷时渠道最大流速与运行时间的关系。

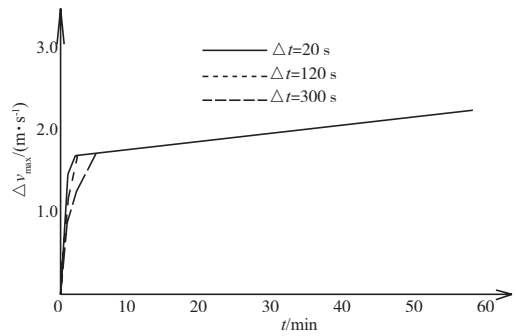
根据计算结果，以3台机组同时开启或关闭的数据资料为例，以最大流速 Δv_{\max} 为纵坐标，以运行时间为横坐标，点绘 $\Delta v_{\max}=f(t)$ 的关系（图6）。由图6可看出：①电站机组增减负荷，在机组台数相同的前提下，机组不同的启闭时间，影响尾水渠流速的时间约为15 min，当 $t > 15$ min，渠道内的流速变化与时间关系不大；②在 $t \leq 15$ min 范围内，机组启闭时间 Δt 长的影响较大；③不同的工况下，影响渠道内流速绝对值的规律是一致的。

2) 机组增（减）负荷时渠道内最大流速与流量的关系。

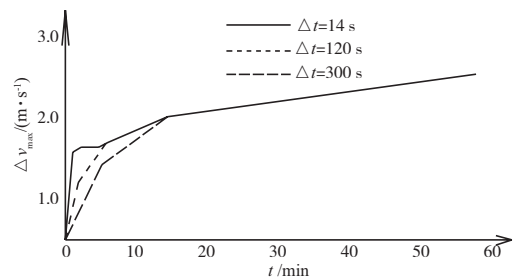
根据计算，以最大流速变幅 Δv_{\max} 为纵坐标，以流量为横坐标，点绘 $\Delta v_{\max}=f(Q)$ 的关系（图7）。由图7可见：机组增（减）负荷， $\Delta v_{\max}=f(Q)$ 的关系成正比线性，流速随流量的增加而增大。机组增负荷（1台机组）、（2台机组）或（3台机组），由于起始条件不同，即渠道流速、水深、断面积等的变化，会得到 $\Delta v_{\max}=f(Q)$ 各自的关系；同样减负荷也如此。各运行组合的关系见表3。

表3 各运行组合最大流速与流量的关系

| 增减负荷 | 机组变化 | 最大流速与流量的关系 |
|------|---------------------|----------------------------|
| 增负荷 | 1台→2台, 1台→3台, 1台→4台 | $\Delta v_{\max}=0.00140Q$ |
| 减负荷 | 4台→3台, 4台→2台, 4台→1台 | $\Delta v_{\max}=0.00125Q$ |
| 增负荷 | 2台→3台, 2台→4台 | $\Delta v_{\max}=0.00114Q$ |
| 减负荷 | 4台→3台 | $\Delta h_{\max}=-0.0018Q$ |

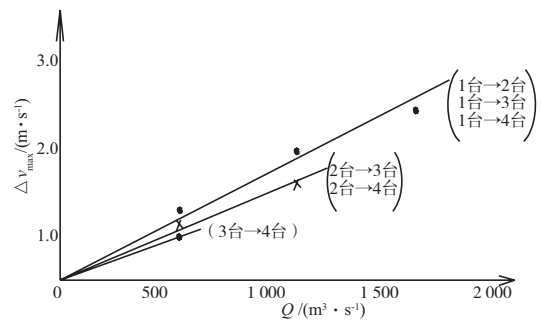


a) 增负荷

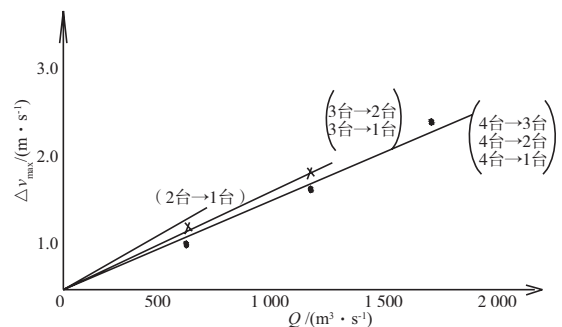


b) 减负荷

图6 增（减）负荷渠道 $v_{\max}=f(t)$ 关系曲线



a) 增负荷



b) 减负荷

图7 增（减）负荷渠道 $v_{\max}=f(Q)$ 关系曲线

3) 尾水渠非恒定流最大流速的变化幅度。

电站机组增(减)负荷, 各运行工况, 渠道内的水流运动都是由恒定流→非恒定流→恒定流

的过程, 渠道内的水位、流速则由稳定→不稳定→稳定。机组增(减)负荷各运行工况, 尾水渠内最大流速变幅见表4。

表4 机组增(减)负荷各运行工况尾水渠最大流速变幅 Δv_{\max}

| 启闭方式 | 运行工况 | 机组变化 | 流速变幅/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) | |
|------|----------|----------|---------------------------------------|-----------|
| | | | 最大 | 平均 |
| 开启 | 开启1台机组 | 1→2 | 1.25~2.22 | 0.90~1.58 |
| | | 2→3 | 2.22~2.96 | 1.58~2.11 |
| | | 3→4 | 2.96~3.68 | 2.11~2.61 |
| | 同时开启2台机组 | 1→3 | 1.25~2.96 | 0.90~2.11 |
| | | 2→4 | 2.22~3.68 | 1.58~2.61 |
| | | 同时开启3台机组 | 1→4 | 1.25~3.68 |
| 关闭 | 关闭1台机组 | 4→3 | 3.68~2.96 | 2.61~2.11 |
| | | 3→2 | 2.96~2.22 | 2.11~1.58 |
| | | 2→1 | 2.22~1.25 | 1.58~0.90 |
| | 同时关闭2台机组 | 4→2 | 3.68~2.22 | 2.61~1.58 |
| | | 3→1 | 2.96~1.25 | 2.11~0.90 |
| | | 同时关闭3台机组 | 4→1 | 3.68~1.25 |

注: 开启时间为20 s, 120 s, 300 s, 关闭时间为14 s, 120 s, 300 s。

从表4可看出: 流速变幅初与终分别为机组初期和终期恒定流时渠道内的最大流速, 而非恒定流的流速则是变化幅度。表4中数据为渠道内各测点流速平均值, 将平均流速作为流速的衡量依据, 有部分工况流速略超出规范所规定的限值, 对船舶航行有一定影响。

5 结语

1) 机组增负荷还是减负荷, 最大水位变幅与流量关系成正(反)比线性。随着流量的增加而增大或减小。为减少推进波波高或泄水波波高, 电站可以采用机组增(减)负荷及错时启闭的方式。

2) 比降与机组启闭时间有关, 随着启闭时间的增加而减小; 随机组台数增加而增大, 即与流量成正比; 相同机组增负荷的比降比减负荷大。应减小平均流量增率, 促使水面比降减小。

3) 流速变幅初与终分别为机组初期和终期恒定流时渠道内的最大流速, 而非恒定流的流速则是变化幅度。机组在相同开启(关闭)方式下, 其开启(关闭)时间越短, 流速最大变幅越大; 机组

开启时间相同, 增(减)负荷越大, 流速变幅也大; 相同的开启时间, 增(减)相同的负荷, 增(减)负荷前尾水渠内流量越小, 流速变幅越大。为减少瞬时流量变化, 电站应尽可能减少机组同时启闭的台数。

参考文献:

- [1] 孟祥玮. 三峡工程枢纽泄洪及船闸灌泄水对通航水流条件的影响及改善措施试验研究[R]. 天津: 天津水运工程科学研究所, 2001.
- [2] 闵宇翔. 三峡电站日调节对航运的影响[J]. 水运工程, 2002(5): 28-31.
- [3] 周华兴, 郑宝友, 王化仁. 船闸灌泄水引航道内波幅与比降研究[J]. 水道港口, 2005(2): 103-108.
- [4] 卢文蕾, 王敏芳. 山区河流枢纽下游利用尾水渠道通航关键技术研究[R]. 成都: 四川省交通厅交通勘察设计研究院, 2011.
- [5] 张丽, 冯小香. 山区河流枢纽下游利用尾水渠道通航数学模型研究报告[R]. 天津: 天津水运工程科学研究院, 2011.

(本文编辑 武亚庆)