

紫坪铺水库入库径流年际变化特征分析

黎永红, 薛晨

(四川省紫坪铺开发有限责任公司, 四川 成都 610091)

摘要:研究紫坪铺水库入库径流特征,对于充分发挥水库综合效益、保障都江堰灌区和成都市用水安全具有重要意义。基于岷江上游紫坪铺水文站1937~2016年的年径流资料,尝试采用Mann-Kendall法、Pettitt法、Morlet小波分析法检验径流量时间序列,并据此综合分析了紫坪铺水库入库径流年际变化特征。结果表明:1937~2016年紫坪铺径流量总体上呈下降趋势,并且存在5 a、13 a、24 a左右变化的显著周期性。建议在进行中长期年径流预报时采用13 a做建模数据依据;同时,由于年径流量在1949年发生了突变,因此应尽量避免1949年,以免影响预报精度。

关键词:紫坪铺水库;水文;径流特征;趋势;突变;周期

中图分类号:TV7;TV737;TV12

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2017)增2-0113-03

1 概述

紫坪铺水利枢纽工程位于四川省成都市西北60余km的岷江上游,其下游6km是举世闻名的都江堰渠首工程。岷江上游河长341km,流域面积23037km²,紫坪铺水库坝址以上控制河长335km、流域面积22662km²,占岷江上游面积的98%;多年平均径流量占岷江上游总量的97%;控制岷江上游暴雨区洪水的90%、上游泥沙来量的98%。工程以灌溉和供水为主,兼有发电、防洪和环境保护等综合效益,为特大型灌区都江堰灌区和成都市的主要水源工程。水库总库容为11.12亿m³,正常蓄水位库容9.98亿m³,电站装机容量为4×190MW,可以有效调节岷江上游水量,发展都江堰灌区面积(灌区现有灌面72.4万hm²,规划毗河灌区灌面20.9万hm²。1hm²=15亩),提高枯水期灌溉供水保证率,同时枯水期可提供成都市工业及生活用水流量50m³/s、生态环保用水流量20m³/s。

根据以往文献资料和水库调度运用实践,径流特性分析是做好径流预报的前提。2006年紫坪铺水库建成投产以来,受“5.12”汶川地震及灾后恢复重建、上游水库电站相继投产等影响,紫坪铺水库来水特征发生了显著变化,因此,准确地分析紫坪铺水库入库径流特征,对于科学调度运用紫坪铺水库、合理配置岷江上游水资源、保障都江堰灌区和成都市用水安全具有十分重要的意义。

收稿日期:2017-01-28

径流特性分析一般包括以下三部分内容:趋势分析、突变分析和周期分析。笔者选取岷江上游紫坪铺水文站(1936年8月设站,现位于紫坪铺坝址下游1.54km)1937~2016年年径流数据,尝试采用Mann-Kendall检验法、Pettitt突变检验法、Morlet小波法分别对紫坪铺水库年径流量变化趋势、突变特征、周期特征进行分析,以期对水库中长期入库径流预报提供支持。

2 径流特征

紫坪铺水库以上岷江流域跨越川西高原气候和四川盆地亚热带气候区,不仅具有大分区气候特征,也具有地方性气候特点。多年平均气温由流域西北的6℃左右增至东南15℃左右。多年平均降水量从西北的700~800mm减至茂县~汶川一带的500mm左右,在向南至渔子溪、紫坪铺一带急增到1200mm以上。岷江上游径流主要由降雨形成,其次为高山融雪和地下水补给。5~10月的径流主要由降雨形成;11月~次年3月的径流主要来源于地下水;4、5月的径流由降雨与融雪混合补给。

2.1 径流年内分配特征

岷江上游径流丰沛。据对紫坪铺水文站1937~2016年共80a资料进行统计得知:径流的年内分配不均,主要集中在丰水期5~10月,多年平均水量占全年水量的78.9%,其中主汛期6~9月占全年的58%;11月~次年4月为枯水期,多年平均水量占全年水量的21.1%,其中1~3月

占全年的 7.54%。

2.2 径流年代际变化

据对紫坪铺水文站 1937 ~ 2016 年的资料进行统计,岷江上游多年平均径流量为 142.27 亿 m³。1937 ~ 1939 年、20 世纪 40 年代、50 年代、60 年代,流域径流量多于多年平均值,分别比多年平均值偏多 22%、7%、5%、6%;20 世纪 70

年代、80 年代、90 年代及本世纪初、2010 ~ 2016 年,流域径流量低于多年平均值,分别比多年平均值减少 2.7%、3.8%、6.2%、10.4% 和 2.2%。本世纪初期十年最枯,除去上世纪 30 年代末三年,上世纪 40 年代最丰,1949 年径流量达到一个最丰值(192.05 亿 m³),比多年平均值偏多 35%。具体情况见表 1。

表 1 紫坪铺水库入库径流量年代际变化表

项 目	年 代								
	1937 ~ 1939	1940 ~ 1949	1950 ~ 1959	1960 ~ 1969	1970 ~ 1979	1980 ~ 1989	1990 ~ 1999	2000 ~ 2009	2010 ~ 2016
平均径流量 / 亿 m ³	173.76	152.32	149.17	151.06	138.44	136.87	133.40	127.41	139.07
比多年平均值增 (+)、减 (-) 百分比	+22%	+7%	+4.8%	+6.2%	-2.7%	-3.8%	-6.2%	-10.4%	-2.2%

3 紫坪铺水库入库径流年际变化规律分析

3.1 趋势分析

笔者采用 Mann - Kendall 法检验紫坪铺水库 1937 ~ 2016 年径流量变化趋势。该方法为非参数统计检验法,是判断一个随机系列是否出现显著性变化的方法。

对于径流量序列 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$,先确定所有对偶值 (x_k, x_j) 中 x_k 与 x_j 的大小关系,然后计算检验统计量 S 。

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (1)$$

式中 n 为径流量序列长度, $1 < k < j \leq n$, $\text{sgn}(x_j - x_k)$ 为函数符号。

若 $x_j - x_k > 0$, $\text{sgn}(x_j - x_k) = 1$; 若 $x_j - x_k = 0$, $\text{sgn}(x_j - x_k) = 0$; 若 $x_j - x_k < 0$, $\text{sgn}(x_j - x_k) = -1$ 。

径流量序列中数据是相互独立且服从正态分布的,则统计量 S 的均值为 0,方差为:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (2)$$

当 $n > 10$ 时,趋势检验统计量 Z 通过式(3)计算:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$Z < 0$,意味着序列有单调减少趋势; $Z > 0$ 则表示有单调增加趋势。在显著性水平 α 下,若 $|Z| \geq Z_{\alpha/2}$,则认为单调减或增趋势显著;若 $|Z| < Z_{\alpha/2}$,则认为变化趋势不显著。显著性水平 0.1、0.05、0.01 对应的 $Z_{\alpha/2}$ 分别为 1.64、1.96、2.58。

径流量序列的变化程度采用 Kendall 斜率 β 评估:

$$\beta = \text{Median} \left[\frac{x_j - x_k}{j - k} \right] \quad (4)$$

式中 $|\beta|$ 越大,变化程度越大。

当给定显著水平 $\alpha = 0.01$ 时,利用上述式(3)计算紫坪铺水库入库径流年际变化趋势检验统计量 Z 。

$Z = -4.34, Z_{\alpha/2} = 2.58, |Z| > Z_{\alpha/2}$,故径流量系列呈现单调下降趋势,且具有高度显著性水平。检验结果见表 2。

表 2 紫坪铺水库 1937 ~ 2016 年径流趋势分析表

名称	多年均值 / 亿 m ³	Z 值	显著性	斜率 $\beta / \text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$	年变化量占多年平均 / %
紫坪铺	142.27	-4.34	0.01	-0.312	0.22

由表 1 和表 2 可知:1937 ~ 2016 年紫坪铺水库年径流量多年均值为 142.27 亿 m³,径流量正以 0.312 亿 m³/a 的速率减少,统计意义上通

过了显著性水平 $\alpha = 0.01$ 的检验,认为减少趋势较显著,径流量年变化量占多年平均径流量的 0.22%。

3.2 突变分析

采用 Pettitt 法对紫坪铺水库年径流序列进行突变分析。该方法的核心是通过检验时间序列要素均值变化的时间来确定序列突变时间。突变点可能的显著性水平定义为 p ：

$$p \cong 2 \exp[-6(K''n)^2 / (n^3 + n^2)] \quad (5)$$

式中 K_n 为统计量, $K_n = \text{Max} |S|$ [S 按式(1)计算]。

表 3 Pettitt 突变检验结果表

序列	K	n	p	突变前年径流均值	突变后年径流均值	突变前后变化率
年径流	192 亿 m^3	1949	0.061	157.27 亿 m^3	139.36 亿 m^3	-11.39%

3.3 周期分析

采用 Morlet 小波分析法对紫坪铺水库年径流量进行周期性分析。对于 Morlet 小波函数 $\psi(t)$, 时间序列 $f(t) \in L^2(R)$ 的小波变换可以表示为：

$$W_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (6)$$

式中 尺度因子 a 和时间因子 b 分别反映小波的周期长度和时间平移; $\bar{\psi}$ 是复共轭函数, $\psi(t) = e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2}$ (ω_0 为常数, i 表示虚数); $W_f(a, b)$ 为小波变换系数, 反映关于时间序列变化的小波变化特征, 对其分析可识别径流量多时间尺度的周期变化特征。

鉴于径流量序列是离散的, 因此将式(6)写成离散形式:

$$W_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \Delta t \sum_{k=1}^N f(k\Delta t) \bar{\psi}\left(\frac{k\Delta t - b}{a}\right) \quad (7)$$

按式(8)计算小波方差, 其峰值对应的时间尺度即为径流量序列的主周期。

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (8)$$

将紫坪铺水库年径流序列距平(中心化)处理, 并把距平过程 $f(k\Delta t)$ ($k=1, 2, \dots, 80, \Delta t=1$) 和 $\psi(t)$ 代入式(6), 用不同的 a, b 计算变换系数 $W_f(a, b)$ 。由于 Morlet 小波是复小波, $W_f(a, b)$ 具有虚部和实部两部分。由小波变换理论知, 小波变换模部的平方同函数 $f(t)$ 在其小波变换域中能量的大小成正比。因此, 把反应年径流在小波变换域中波动的能量曲面以等值线的形式投影到以尺度 a 为纵坐标, 时移 b 为横坐标的平面上, 等值线上的每一点值都对应曲面上点的值, 而曲面上能量集中的顶点是其极值点, 其强弱用 $W_f(a, b)$ 模部的平方值反映。年径流在小波变换域

如果 p 小于给定的显著性水平(笔者给定的显著性水平 $\alpha=0.01$), 说明有显著突变点存在。

由紫坪铺水文站 80 a 统计资料和表 1 分析可知, 紫坪铺水文站年径流量在 1949 年发生了由多到少的变化, Pettitt 突变检验结果见表 3。突变前后的变化率为 -11.39%。年径流量的突变显著水平 p 为 0.061, 大于 0.01, 因此可以认为年径流量突变不显著。

中的波动特性用 $W_f(a, b)$ 的实部变化刻画(类似能量曲面的分析方法)。由上述方法绘制成图 1。

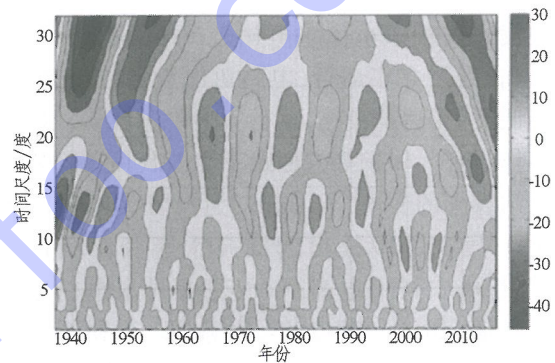


图 1 小波变换系数等值线图

从图 1 中可以看出: 年径流在小波变化域中其波动能量曲面上共有大小 10 多个能量中心, 它们代表年径流波动能量变化的特性。10~15 a、20~26 a 尺度的周期非常显著, 占据整个时段, 能量最强, 5 a 以下尺度的周期也较显著, 但能量较低。说明紫坪铺水文站年径流在整个时间域中主要存在以 5 a、13 a 和 24 a 左右为尺度的变化周期。

为进一步找出紫坪铺水文站年径流量的周期随时间变化的规律, 笔者采用小波方差图对紫坪铺水文站年径流量随时间变化主周期进行了研究和分析。将不同尺度下的小波系数代入式(8), 计算紫坪铺水文站年径流距平序列小波变换方差, 并以小波方差 Var 为纵坐标, 时间尺度 a 为横坐标绘制了小波方差图(图 2)。

由图 2 可以看出: 岷江上游紫坪铺水文站年径流序列 5 a、13 a 和 24 a 左右尺度小波方差的

(下转第 132 页)

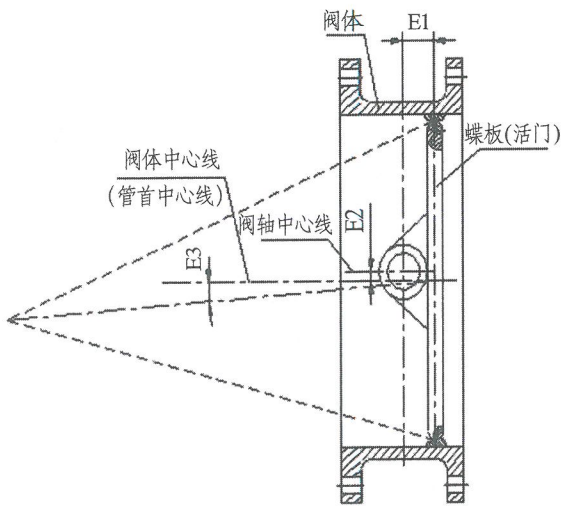


图4 1#新进水蝶阀三偏心结构原理图

动中对中进行位置补偿;压力补偿是指所采用的这种密封结构能将压力介质引入密封圈后面,随着介质压力的升高,密封圈外圆直径也随之增大,从而增大密封比压使密封更严密,形成压力补偿。

在新蝶阀更换过程中,根据新颁布的 GB/T14478-2012《大中型水轮机进水阀门基本技术条件》要求及多个电站的实践运行经验,对液压

和电气系统也进行了改造优化,提高了阀门开关阀的快速响应能力,动水关阀安全性也进一步得到提高。

6 结语

进水蝶阀作为水电站的重要辅助设备,对水轮发电机组的事故保护及机组检修安全具有非常重要的作用。更换后的撒多水电站3#进水蝶阀已安全运行近1年时间,阀门运行及密封效果良好,再未出现因密封损伤漏水而影响机组运行及检修的情况,后续1#、2#机组进水蝶阀将陆续投入改造。撒多水电站3#进水蝶阀改造的成功说明大口径、高水头、多泥沙水电站进水蝶阀主密封的选用非常重要,所取得的经验可为类似电站在进水阀门选用时借鉴。选用适合电站运行工况、可靠的主密封可以大大提高电站运行的经济效益。

作者简介:

万连彬(1982-),男,四川攀枝花人,工程师,学士,从事水电站机电技术与设备管理工作;

汪从俊(1979-),男,四川攀枝花人,工程师,学士,从事水电站机电技术与设备管理工作;

翟兴学(1970-),男,湖北襄阳人,高级工程师,工程硕士,从事阀门设计工作。(责任编辑:李燕辉)

(上接第115页)

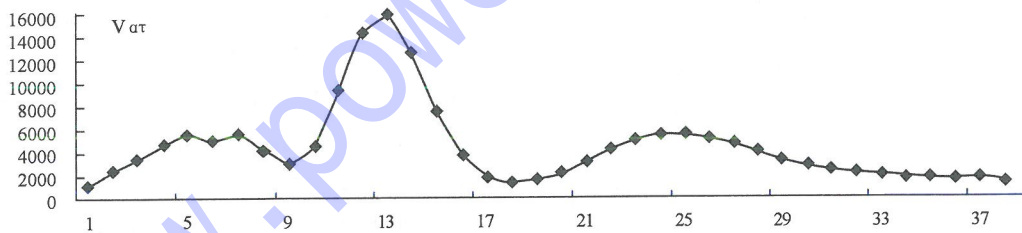


图2 小波方差图

极值表现的最为显著。说明紫坪铺水文站年径流过程存在以5 a、13 a和24 a左右变化的主周期,这三个周期的波动,决定着岷江上游年径流在整个时间域内变化的特性。特别是13 a周期的变化,决定着紫坪铺水库年平均径流丰枯变化趋势。

4 结语

(1)紫坪铺水库入库径流量年内变化大。丰水期5~10月入库径流量占全年水量的78.9%,11月~次年4月枯水期入库径流量占全年水量的21.1%。

(2)20世纪70年代以来的47 a间,紫坪铺水库径流量较多年平均减少5.17%。特别是本世纪初期10 a的入库径流量最枯,比多年平均减少

了10.4%,直到2010年才开始有所好转。

(3)在1937~2016年的80 a间,紫坪铺水库径流突变点在1949年,该年径流量达到一个最丰值,但突变不显著。

(4)1937~2016年80 a间,紫坪铺水库年径流呈现出下降趋势,主要存在5 a、13 a和24 a左右的变化周期。特别是13 a周期的变化,决定着紫坪铺水库年平均径流丰枯变化趋势。

作者简介:

黎永红(1969-),女,四川眉山人,工程师,从事水库调度管理工作;

薛晨(1991-),男,江苏南通人,助理工程师,硕士,从事水库调度管理工作。(责任编辑:李燕辉)