

# 电力抽水站受潮汐影响时的 流量计算方法与精度控制

孙正兰, 王玉芳

(江苏省江都水利工程管理处, 江苏 扬州 225200)

**摘要:**受潮汐影响时,为了使机组在高效区运行或以最大流量抽水,泵站抽水流量不仅随着水位的涨落而变化,还可能同时受到叶片角度调整和机组变动等因素的影响。以江都水利枢纽大型泵站为例,分析了泵站在运行的不同时期,用不同方法计算流量的特点。结果表明:以下方法计算日平均流量,精度均达到规范要求,即净扬程日变幅在 2 m 左右,用 1 d 电功度数计算日平均流量;用水力因素法计算日平均流量时,以叶片角度为参数的净扬程与单机流量的关系曲线之间,应不大于  $0.25^\circ$ ;合并效率法以 1 d 内 24 段制或 12 段制计算日平均流量,无需再考虑机组台数或叶片角度等大幅度调整。

**关键词:**电力抽水站;潮汐影响;流量计算;精度控制

中图分类号:TV123

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2019)07-0018-06

## Discussion on the flow calculation method and precision control affected by tide in electric pumping station

SUN Zhenglan, WANG Yufang

(Jiangdu Water Conservancy Project Management Office, Yangzhou 225200, Jiangsu)

**Abstract:** Under the influence of tide, in order to satisfy the unit's operation in high efficiency area or pumping at maximum flow rate, the pumping flow not only varies with the fluctuation of water level, but also affected by the adjustment of blade angle and the change of unit. Taking the large-scale pumping station of Jiangdu Water Control Project as an example, the characteristics of calculating the flow rate by different methods in different operation periods of the pumping station were analyzed. The results showed that the accuracy of the following methods was up to the standard. The 1d electrical power was used to calculate the daily average flow when the daily variation of net head should be about 2m. When calculating the daily average flow rate with hydraulic factor method, the relationship between net head with blade angle and single unit flow should be less than  $0.25^\circ$ . Using the combined efficiency method to calculate the daily average flow in the 24-segment system or 12-segment system within 1d was no need to consider the number of units or blade angle and other large-scale adjustments.

**Key words:** electric pumping station; affected by tide; flow calculation; precision control

电力抽水站是我国广泛用于提水的设备,通过电网输电利用安装的电动机和水泵进行抽水<sup>[1]</sup>,在由电能转换为扬程的过程中,影响抽水站出流大小

的主要因素是水泵的净扬程  $h$  和用电功率  $N_s$ 。

对电力抽水站流量影响的分析多集中于水位差和电功率产生的误差<sup>[2]</sup>,随着现代化水平的提

收稿日期:2019-02-01

作者简介:孙正兰(1968—),女,高级工程师,主要从事水文测验与管理工作。

高,仪器自动采集水位和电功率的精度都在可控范围内<sup>[3]</sup>。本文以江都抽水站大型泵站在加固改造前后运行期间,在不同工况下用不同方法计算流量的实践为例,分析了受潮水位影响时,因水位变化或机组台数变动或叶片角度调整,采用不同方法计算流量时产生的误差以及精度控制。

## 1 工程概况

江都水利枢纽是南水北调东线的源头,也是江苏省江水北调的源头,更是防汛抗旱的关键工程,工程位于江苏省扬州市江都区境内,地处京杭大运河、新通扬运河和淮河入江尾闾芒稻河的交汇处(见图1)。江都水利枢纽的主体为4座大型电力抽水站,既可抽引长江水,利用京杭大运河以及其平行的河道输水北送,又可通过新通扬运河抽排里下河地区涝水入江。自建成以来,累计抽引江水北送1420亿 $\text{m}^3$ ,抽排里下河涝水400亿 $\text{m}^3$ ,在防汛抗旱中发挥了巨大的社会效益。4座抽水站的上游为高水河,水位日变化较小;下游为感潮河段,最高水位控制在江都三站电缆沟顶高程4.5 m以下<sup>[4-5]</sup>,净扬程日变幅在2 m左右,扬程和效率的日变化是较大的。4座泵站的组成情况见表1。



图1 江都水利枢纽工程位置示意图

## 2 方法与特点

### 2.1 合并效率法

计算公式如下:

$$Q = \eta' N_s / 9.8h \text{ 或 } q = \eta' N / 9.8h \quad (1)$$

式(1)中, $Q, q$ 为总流量或单机流量( $\text{m}^3/\text{s}$ ); $N_s, N$ 为总功率或单机功率( $\text{kW}$ ); $\eta'$ 为装机效率

(%),即(有效功率/耗用功率) $\times 100\%$ ,包括电动机、水泵、传动、水管等效率; $h$ 为抽水站站上、下水位差( $\text{m}$ ),即净扬程,当出水管口淹没在水面下时,为站上、下水位差;当出水管口高于水面时,则为出水管中心高程与抽水池水体水位差。

以电功率为参数,根据实测资料率定 $h \sim \eta'$ 关系线推流,广泛适用于中高扬程抽水站的流量计算。

用式(1)计算日平均流量,由于瞬时功率的变化,理论上应将24 h分为很小的单位时长 $\Delta t$ ,实际工作中常简化为 $\Delta t = 1 \text{ h}$ 或 $\Delta t = 2 \text{ h}$ ,即1 d内按24或12段制摘录整点或偶数整点时的电功率和站上、下水位计算瞬时流量,再由面积包围法计算日平均流量,即使机组台数或叶片角度等大幅度调整,经多年运行实践计算分析比较,不影响日平均流量计算的精度。

### 2.2 水力因素法

计算公式如下:

$$Q = n \times q \quad (2)$$

式(2)中, $n$ 为开机台数。以叶片角度为参数,根据实测资料率定 $h \sim q$ 关系线推流。

水电站在发电机检修、空运行放水或电工仪表故障时<sup>[5]</sup>,无法按电功记录时常用此法推流。江都4座电力抽水站在加固改造前,各站叶片角度相对固定或不可调节,曾用此法推流,经实践检验,精度符合规范要求。当叶片角度相对固定或不可调节时, $h \sim q$ 关系线多为单一线,根据1 d水位变化转折点和机组台数变动时的净扬程 $h$ 得到单机流量 $q$ ,由开机台数 $n$ 乘以单机流量 $q$ 得到泵站瞬时流量 $Q$ 。

随着现代化、自动化程度越来越高,精准控制、高效安全运行的管理理念越来越体现于生产实践中。在确保机组安全的前提下,根据水流状况使机组在高效区运行或以最大流量抽水,根据工况调整叶片角度是最有效的方式。这也正是越来越多的电力抽水站安装可调节叶片水泵的缘故。

当机组叶片角度变动频繁或多台机组不以同一叶片角度运行时,理论上应按调整时刻对应叶片角度的 $h \sim q$ 关系线推算流量,为了保证流量的精度将导致日常计算工作量很大;如果以多台机组叶片角度的平均值作为参数进行流量计算,则要率定多条 $h \sim q$ 关系线,即增大了水位流量关系线率定的工作量,否则流量计算产生的系统误差难以满足规范要求。

表 1 江都 4 座大型泵站参数

站名	机组台数	电动机容量(kW)		立式轴流泵(流量 m <sup>3</sup> /s)			投产年份	迄今运行年数	更新改造年份
		单机容量	站总容量	设计扬程(m)	单机流量	站总流量			
江都一站	8	1000	8000	6.0	10.2	81.6	1963	56	1996
江都二站	8	1000	8000	6.0	10.2	81.6	1964	55	1999
江都三站	10	1600	16000	7.8	13.5	135.0	1969	50	2009
江都四站	7	3400	23800	7.8	30.0	210.0	1977	42	2010
合计	33		55800			508.0			

以上 2 种方法中,均根据瞬时流量由面积包围法计算日平均流量。

### 2.3 电功度数法

用电功度数计算日平均流量一般用于水电站,因其扬程(水头)和效率变化不大。也常用于 1 d 净扬程和合并效率变化不大、可视为常数时的电力抽水站的流量计算。

以合并效率法为例,日平均流量为:

$$Q_{\text{日}} = \frac{1}{T} \int_0^T Q(t) dt = \frac{1}{9.8T} \int_0^T \frac{\eta' N_s}{h}(t) dt \quad (3)$$

当 1 d 净扬程  $h$  和合并效率  $\eta'$  变化不大、可视为常数时,式(3)可改写为:

$$Q_{\text{日}} = \frac{\eta'}{9.8hT} \int_0^T N_s(t) dt \quad (4)$$

用电功度数  $W$  代入,则:

$$Q_{\text{日}} = \frac{\eta'}{9.8hT} W = \frac{\eta'}{9.8h} \cdot \frac{W}{T} \quad (5)$$

式(5)中,  $\frac{W}{T}$  为 1 d 耗用电功率,只要得知耗用电功度数  $W$  和日平均扬程  $h$ ,便可由上式直接算得日平均流量  $Q_{\text{日}}$ ;月、年流量极值通常在日平均值中挑选。

江都抽水站净扬程日变幅多在 2 m 左右,尽管变幅较大,因下游为半日潮型,相邻高、低潮的潮高几乎相等,每日的净扬程几乎对称于日平均扬程在上下 1 m 的范围内变化,以日平均水位差和 1 d 电功度数计算日平均流量,精度符合规范要求。

## 3 误差分析

### 3.1 不同方法的比较

江都三站泵站规模介于江都一站与江都四站之间,故以江都一站与江都四站典型运行实践为例,选用 2016 年汛期江都一站与江都四站运行期间,每月机组变动或叶片角度调整幅度最大日进行

不同方法计算结果的比较。两站选取的典型运行工况变化见表 2~3。除江都四站 9 月 6 日外,其余均有较大机组变动和叶片角度调整。

从典型运行工况可知,因下游受长江涨落潮的影响,净扬程日变幅在 0.31~2.13 m 之间,泵站运行的同一日中有机组台数变动和叶片角度调整。两站均以合并效率法  $\Delta t = 5 \text{ min}$  计算的结果作为标准值,不同方法计算比较的结果见表 4~5。

3 种方法计算的结果为:合并效率法中,在  $\Delta t \leq 2 \text{ h}$ ,两站日平均流量误差均不超过  $\pm 2\%$ ,日最大流量误差均不超过  $\pm 5\%$ ,符合规范精度要求;以叶片角度为参数,两站日平均流量计算的误差均不超过  $\pm 2\%$ ,日最大流量误差均不超过  $\pm 5\%$ ,达到规范精度要求,由于叶片角度变动的任意性,计算或流量率定的工作量较大;以电功度数为参数时,两站日平均流量计算的误差均不超过  $\pm 2\%$ ,符合规范精度要求,由于机组变动和叶片角度调整较多,对日最大瞬时流量的影响很大,因月、年瞬时流量极值在日平均值中挑选,日常运行中同时有机组变动和叶片角度调整的工况较少,故此法对月、年流量极值的影响较小。

在无机组变动和叶片角度调整的 9 月 6 日,上述 3 种方法计算日平均流量的精度均较高且满足规范要求,因此机组变动和叶片角度调整对流量精度的影响远比扬程大得多。

### 3.2 叶片角度的影响

图 2 是加固改造后的江都一站与江都四站实测的以叶片角度为参数、净扬程与单机流量的关系曲线。江都一站以本站叶片角度  $0^\circ$  关系线为参照标准,对  $+2^\circ$ 、 $-2^\circ$  关系线进行计算比较;江都四站以本站叶片角度  $-2^\circ$  关系线为参照标准,对  $0^\circ$ 、 $-4^\circ$  关系线进行计算比较(见表 6)。两站在叶片角度相差  $2^\circ$  时,相对误差的绝对值为  $7.0\% \sim 9.2\%$ ,

表 2 江都一站机组台数变动与叶片角度调整情况

时间	净扬程	流量	机组变动		叶片角度调整	
	变幅( m)	变幅( m <sup>3</sup> /s)	时间	台数	时间	叶片角度(°)
6 月 30 日	5.78 ~ 6.09	26.7 ~ 66.7	8:25 ~ 8:30	8 ~ 6	8:25 ~ 8:30	-4.4 ~ -4.8
	0.31	40.0	8:40 ~ 8:45	6 ~ 4	15:50 ~ 15:55	-4.8 ~ -4.0
7 月 1 日	5.89 ~ 6.58	26.9 ~ 68.8	22:10 ~ 22:15	4 ~ 6	15:50 ~ 15:55	-4.0 ~ -4.4
	0.69	41.9	22:25 ~ 22:30	6 ~ 8		
8 月 26 日	3.86 ~ 5.21	58.9 ~ 74.9	12:50 ~ 12:55	8 ~ 7	12:50 ~ 12:55	-4.7 ~ -4.9
	1.35	16.0				
9 月 4 日	4.25 ~ 5.92	65.2 ~ 78.1	11:15 ~ 11:20	7 ~ 8	11:05 ~ 11:20	-1.3 ~ -2.2
	1.67	12.9				

表 3 江都四站机组台数变动与叶片角度调整情况

时间	净扬程	流量	机组变动		叶片角度调整	
	变幅(m)	变幅(m <sup>3</sup> /s)	时间	台数	时间	叶片角度(°)
6 月 30 日	5.78 ~ 6.09	123 ~ 207	8:35 ~ 8:45	7 ~ 4	8:35 ~ 8:45	-5.7
	0.31	84.0				
7 月 1 日	5.89 ~ 6.58	121 ~ 213	14:55 ~ 15:05	4 ~ 6	14:55 ~ 15:05	-5.7 ~ -5.8
	0.69	92.0				
9 月 5 日	3.76 ~ 5.89	124 ~ 239	9:10 ~ 9:15	6 ~ 4	15:50 ~ 15:55	-4.4 ~ -1.9
			11:35 ~ 11:40	4 ~ 6	17:50 ~ 17:55	-1.9 ~ -4.4
			13:15 ~ 13:20	6 ~ 7	18:55 ~ 19:00	-4.4 ~ -5.8
			17:50 ~ 17:55	7 ~ 6	19:35 ~ 19:40	-5.8 ~ -1.9
9 月 6 日	4.52 ~ 6.03	175 ~ 201	无叶片角度调整和机组台数变动,全天以 6 台机组、-4.4°叶片角度运行			
	1.51	26.0				

表 4 江都一站流量计算结果比较

方法	时长	6 月 30 日流量( m <sup>3</sup> /s) 与相对误差( % )				7 月 1 日流量( m <sup>3</sup> /s) 与相对误差( % )			
		$Q_{\text{日}}$	误差	$Q_{\text{max}}$	误差	$Q_{\text{日}}$	误差	$Q_{\text{max}}$	误差
合	$\Delta t = 5\text{min}$	46.3		66.7		36.6		68.8	
并	$\Delta t = 1\text{h}$	45.9	-0.9	66.3	-0.6	37.0	1.1	67.4	-2.0
效	$\Delta t = 2\text{h}$	46.4	0.2	66.3	-0.6	37.0	1.1	67.4	-2.0
率	$\Delta t = 3\text{h}$	45.4	-1.9	66.3	-0.6	38.2	4.4	67.4	-2.0
法	$\Delta t = 4\text{h}$	47.2	1.9	66.3	-0.6	39.1	6.8	67.4	-2.0
	电度数法	47.2	1.9	47.2	-29.2	36.6	0.0	36.6	-46.8
	叶片角度法	45.4	-1.9	64.0	-4.0	37.3	1.9	66.0	-4.1
方法	时长	8 月 26 日流量( m <sup>3</sup> /s) 与相对误差( % )				9 月 4 日流量( m <sup>3</sup> /s) 与相对误差( % )			
		$Q_{\text{日}}$	误差	$Q_{\text{max}}$	误差	$Q_{\text{日}}$	误差	$Q_{\text{max}}$	误差
合	$\Delta t = 5\text{min}$	66.3		74.9		70.6		78.1	
并	$\Delta t = 1\text{h}$	66.0	-0.5	74.4	-0.7	70.9	0.4	77.2	-1.2

(续表 4)

方法	时长	8 月 26 日流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )与相对误差(%)				9 月 4 日流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )与相对误差(%)			
		$Q_{\text{日}}$	误差	$Q_{\text{max}}$	误差	$Q_{\text{日}}$	误差	$Q_{\text{max}}$	误差
效	$\Delta t=2\text{h}$	65.3	-1.5	74.4	-0.7	71.1	0.7	77.2	-1.2
率	$\Delta t=3\text{h}$	66.5	0.3	74.4	-0.7	71.3	1.0	76.9	-1.5
法	$\Delta t=4\text{h}$	66.8	0.8	74.4	-0.7	71.9	1.8	77.2	-1.2
	电功率法	66.6	0.5	66.6	-11.1	70.9	0.4	70.9	-9.2
	叶片角度法	65.5	-1.2	74.0	-1.2	70.3	-0.4	76.0	-2.7

表 5 江都四站流量计算结果比较

方法	时长	6 月 30 日流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )与相对误差(%)				7 月 1 日流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )与相对误差(%)			
		$Q_{\text{日}}$	误差	$Q_{\text{max}}$	误差	$Q_{\text{日}}$	误差	$Q_{\text{max}}$	误差
合	$\Delta t=5\text{min}$	155.0		207.0		147.0		213.0	
并	$\Delta t=1\text{h}$	155.0	0.0	205.0	-1.0	148.0	0.7	211.0	-0.9
效	$\Delta t=2\text{h}$	157.0	1.3	205.0	-1.0	148.0	0.7	211.0	-0.9
率	$\Delta t=3\text{h}$	153.0	-1.3	204.0	-1.4	150.0	2.0	211.0	-0.9
法	$\Delta t=4\text{h}$	160.0	3.2	204.0	-1.4	153.0	4.1	211.0	-0.9
	电功率法	158.0	1.9	158.0	-23.7	147.0	0.0	147.0	-31.0
	叶片角度法	152.0	-1.9	204.0	-1.4	146.0	-0.7	210.0	-1.4

方法	时长	9 月 5 日流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )与相对误差(%)				9 月 6 日流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )与相对误差(%)			
		$Q_{\text{日}}$	误差	$Q_{\text{max}}$	误差	$Q_{\text{日}}$	误差	$Q_{\text{max}}$	误差
合	$\Delta t=5\text{min}$	191		239		185		200	
并	$\Delta t=1\text{h}$	191	0.0	231	-3.3	185	0.0	200	0.0
效	$\Delta t=2\text{h}$	191	0.0	231	-3.3	185	0.0	196	-2.4
率	$\Delta t=3\text{h}$	194	1.6	216	-9.6	185	0.0	201	0.0
法	$\Delta t=4\text{h}$	199	4.2	231	-3.3	185	0.0	193	-4.0
	电功率法	193	1.0	193	-19.2	186	0.5	186	-7.5
	叶片角度法	192	0.5	231	-3.3	183	-0.9	191	-5.0

表 6 江都一站、江都四站叶片角度间流量计算误差

站名	叶片 角度	净扬程(m)					单线平均 (%)	误差绝对值单站 平均(%)
		3.0	4.0	5.0	6.0	7.0		
江都一站	-2°							
	0°	8.2	8.2	8.0	8.1	8.2	8.1	7.9
	-4°	-8.1	-7.3	-7.4	-7.4	-8.0	-7.7	
江都四站	-2°							
	0°	7.6	7.2	8.1	9.0	9.1	8.2	8.0
	-4°	-7.0	-7.5	-7.4	-8.6	-9.2	-7.9	

单站平均为7.9%~8.0%,按照叶片角度关系线之间近似等间距计算,叶片角度相差 $0.25^\circ$ 时,流量计算的系统误差即可能达到1%,即超过规范允许的精度要求。可见:叶片角度对流量的影响多为系统误差,叶片角度变动引起电功率发生较大变化,直接对流量产生很大影响。

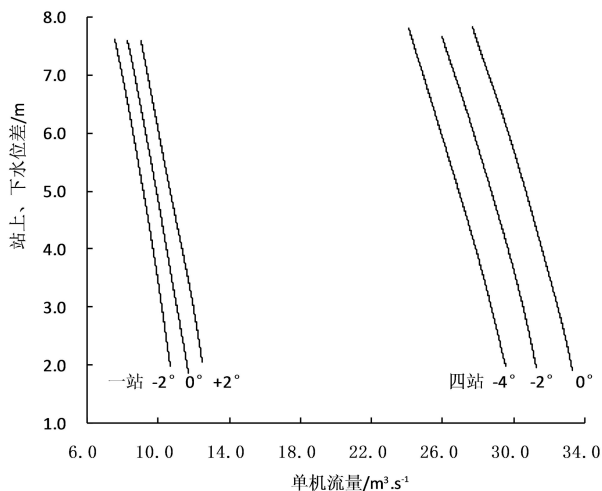


图2 江都一站、四站  $h \sim q$  关系线

## 4 结语

本文以江都抽水站运行实践为例,分析了受潮水影响时,净扬程、叶片角度调整和机组变动对流量的影响,机组变动和叶片角度调整都将引起电功率发生较大变化,直接对流量产生很大影响,远比扬程的影响大得多;叶片角度对流量的影响多为系统误差。针对不同的工况条件,使用不同的方法计算流量,才能确保流量精度,为防汛抗旱和水资源的优化调度等提供准确的技术资料。

## 参考文献:

- [1] 江苏省江都水利工程管理处. 江都排灌站[M]. 北京:水利电力出版社, 1974.
- [2] 任华. 电力抽水站水位差、电功率误差对推算流量的影响分析[J]. 科技信息, 2009(4):265.
- [3] 林祚顶, 朱春龙, 余达征, 等. 水文现代化与水文新技术[M]. 北京:中国水利电力出版社, 2008.
- [4] 江苏省江都水利工程管理处. 江苏水利枢纽志[M]. 2版. 南京:河海大学出版社, 2013.
- [5] 中华人民共和国水利部. SL247-2012 水文资料整编规范[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2012.