

大渡河安谷水电站水轮机选型设计

吕勤川¹, 何仕明²

(1. 四川省水利水电勘测设计研究院, 四川 成都 610072; 2. 中国水电建设集团圣达水电有限公司, 四川 乐山 614013)

摘要: 大渡河安谷水电站水轮发电机组为大型轴流转桨式机组, 合理选择水轮机参数, 对机组和电站的安全运行至关重要。对水轮机的参数选择进行了综合论证, 提出了较为合理的水轮机设计参数。

关键词: 安谷水电站; 水轮机; 设计参数; 选型

中图分类号: TV7; TV22; TV734 文献标识码: B 文章编号: 1001-2184(2018)01-0008-05

1 工程概述

安谷水电站工程是大渡河干流水电梯级开发中的最后一级, 坝址位于乐山安谷河段的生姜坡, 距上游沙湾水电站约 35 km, 下游距乐山市区约 15 km, 有省道 S103 从枢纽区左岸通过, 对外交通较方便。

安谷水电站的开发任务为发电、防洪、航运、灌溉和供水等。电站装机容量为 772 MW, 正常蓄水位高程 398 m, 正常蓄水位以下库容为 6 330 万 m³。其中大机组 4 × 190 MW, 额定水头 33 m, 设计引用流量 2 576 m³/s, 年利用小时数为 4 023 h, 多年平均发电量为 30.58 亿 kW · h, 保证出力 193 MW; 小机组 1 × 12 MW, 额定水头 21 m, 设计引用流量为 64.9 m³/s, 年利用小时数为 7 235 h, 多年平均发电量为 0.87 亿 kW · h, 保证出力 10 MW。电站采用一级混合开发方式, 即建坝壅水高 20 m, 河床式厂房, 厂后接长约 9 450 m 的尾水渠, 尾水渠利用落差 15.5 m。

2 电站基本设计参数

(1) 上游水位。

- 正常蓄水位高程 398 m
- 发电限制水位高程 397 m
- 设计洪水位高程 395.35 m
- 校核洪水位高程 397.55 m

(2) 电站水头。

- 最大水头 36.23 m
- 最小水头 31.14 m
- 额定水头 33 m
- 年加权平均水头 34.27 m

(3) 下游水位。

- 最低尾水位高程 361.18 m (Q = 644 m³/s)
- 正常尾水位高程 363.82 m (Q = 4 × 644 m³/s)
- 设计洪水位高程 380.84 m
- 校核洪水位高程 381.65 m

(4) 动能参数。

- 多年平均发电量 31.98 亿 kW · h
- 年利用小时 4 023 h
- 保证出力 193 MW

(5) 泥 沙。

- 多年平均含沙量 0.25 kg/m³
- 汛期多年平均含沙量 0.726 kg/m³
- 泥沙级配见表 1。

平均粒径为 0.012 9 mm。

莫氏硬度大于、等于 5 的硬矿物主要为石英、长石、角闪石, 各粒径组硬矿物含量为 33% ~ 72%。各粒径组硬矿物组成情况见表 2。

(6) 水 质。

表 1 泥沙级配表

项 目	粒 径 D /mm							
	0.007	0.01	0.025	0.05	0.1	0.25	0.5	1
< D 的沙重百分率	11.5	17.5	28.3	42.6	61.5	81.9	95.4	99.8

pH 值 8.23 ~ 8.49

收稿日期: 2017-09-25

表 2 各粒径组硬矿物组成情况表

项 目	粒径组 /mm				
	1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.1	0.1~0.05	<0.05
莫氏硬度大于、等于 5 的沙重百分数 /%	33	56	62	72	35

悬浮物 8.23~8.49 g/L
硫化物 0.008~0.45 mg/L
有机物 0.063~0.105 mg/L
(7)气 温。
多年平均气温 17.1 ℃
极端最高气温 36.8 ℃(1988 年 5 月 3 日)
极端最低气温 -2.9 ℃

则,按水头保证率在 75%~95% 之间拟定了 32 m、33 m、34 m 三个额定水头方案进行比较(表 4)。

表 3 机组台数比较表

项 目	台 数		
	3	4	5
单机容量/MW	253	190	152
水轮机出力/MW	258.2	193.88	155.1
额定水头/m	33	33	33
最大水头/m	36.23	36.23	36.23
最小水头/m	31.14	31.14	31.14
转轮直径/m	10	8.8	7.8
额定转速/r·min ⁻¹	75	83.3	93.8
额定流量/m ³ ·s ⁻¹	857.5	644	458.5
单位转速/r·min ⁻¹	130.56	127.6	127.36
单位流量/m ³ ·s ⁻¹	1.493	1.448	1.474
水轮机效率/%	93	93	93
吸出高度 H _s /m	-9.8	-9.8	-9.8
单台水轮机重量/t	1 561	1 429	1 266
单台发电机重量/t	1 966	1 515	1 206
电站水轮发电机组总重/t	10 581	11 776	12 360
总重差值/t	-1 195	+584	
机组总价差值/万元 (按 5 万元/t 计)	-5 975	+2 920	
相对投资/万元	-5 904	+8 067	
多年平均发电量/万 kW·h	-1 167	+432	

表 4 额定水头比较表

项 目	单 位	额 定 水 头 /m		
		34	33	32
装机容量	万 kW		76	
转轮直径	m	8.55	8.8	8.95
转速	r/min	88.2	83.3	79
电站引用流量	m ³ /s	2 500	2 576	2 657
年电量	万 kW·h	304 705	305 762	306 520
利用时数	h	4 009	4 023	4 033
相对投资 (不含生态机组投资)	万元	847 316	848 900	851 353
单位千瓦投资	元/kW	11 149	11 170	11 202
单位电能投资	元/kW·h	2.781	2.776	2.777
年电量差	万 kW·h	1 057	718	
投资差	万元	1 584	2 453	
增加单位电能投资	元/kW·h	1.499	3.416	

由表 4 可见,额定水头由 34 m 降到 33 m,电站年发电量增加 1 057 万 kW·h,投资增加 1 584

3 机组台数和单机容量选择

拟定装机 3 台、4 台、5 台机三个方案进行机组台数比较,单机容量分别为 253 MW、190 MW、152 MW。机组台数采用 ZZD345E 转轮进行比较。从机组台数初步比较表(表 3)中可以看出:三个方案中的水轮机转轮直径分别为 10 m、8.8 m、7.8 m,技术上三个方案均可行,水轮机制造难度相当;3 台机方案,发电机单机容量达到 253 MW。目前国内轴流转桨式机组中最大单机容量的电站为水口电站,单机容量为 200 MW,3 台机方案发电机推力轴承的负荷较大,推力轴承和发电机制造具有一定难度,故不推荐 3 台机方案。从经济上考虑,4 台机方案机组总重量比 3 台机方案机组总重量增加了 1 195 t,5 台机机组总重量比 4 台机方案机组总重量增加了 584 t,工程总投资 4 台机方案比 3 台机方案多 5 904 万元,5 台机方案比 4 台机方案多 8 067 万元,多年平均发电量 4 台机方案比 3 台机方案多 1 167 万 kW·h,5 台机方案比 4 台机方案多 432 万 kW·h。从技术经济比较看,4 台机方案明显优于 5 台机方案,同时,考虑到安谷水电站上游的沙湾、铜街子水电站的装机台数均为 4 台,按照上下游梯级电站协调同步运行要求,安谷水电站推荐 4 台机方案。

4 额定水头的选择

根据水能计算成果,尾水渠机组最大水头为 36.23 m,最小水头为 31.14 m,年加权平均水头为 34.27 m,汛期加权平均水头为 33.6 m。该电站受阻主要在 7~10 月四个月。结合汛期水头分布情况,本着控制电站受阻时间、减少电站引用流量,从而节约尾水渠工程量和投资的原

万元,增加单位电能投资 1.499 元/ kW · h,低于基本方案的单位电能投资,说明额定水头由 34 m 降到 33 m 是经济的;额定水头由 33 m 降到 32 m,电站年发电量仅增加 718 万 kW · h,投资增加 2 453 万元,增加单位电能投资达 3.416 元/ kW · h,高于基本方案的单位电能投资,说明额定水头不宜再降低。因此,安谷水电站额定水头选定为 33 m。

5 机组机型的选择

根据安谷水电站的运行水头范围,安谷水电站可以选择轴流转桨式水轮机和混流式水轮机。

目前,50 m 水头段比较典型的混流式水轮机 A551C 转轮(用于柘林电站)限制工况单位流量为 1 420 L/s,最优单位转速为 83.5 r/min,而轴流转桨式 D345E 水轮机(用于万安扩机和沙湾电站)限制工况单位流量为 1 800 L/s,最优单位转速为 125 r/min。两模型转轮比较情况见表 5,真机比较情况见表 6。从表中可以看出:A551C 混流式水轮机相比轴流转桨式 D345E 水轮机过机单位流量偏小,最优单位转速偏低,4 台机组总重量比转桨式重 6 592 t,机组造价和土建投资偏大,故该电站推荐选用轴流转桨式水轮机。

表 5 模型转轮比较表

序号	型号	推荐使用 水头/m	最优工况			限制工况		
			n_{10}/rpm	$Q_{10}^1/\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$	$\eta_0/\%$	$Q_{10}^1/\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$	$\eta_0/\%$	σ_m
1	D345E	40	125	990	92.8	1 800	89.4	0.65
2	A551C	50	83.5	1 150	93.05	1 420	89	0.168

表 6 真机机型比较表

项目名称	机 型	
	ZZD345E	HLA551C
装机容量/MW	190 × 4	190 × 4
水轮机额定出力/MW	193.88	193.88
额定水头/m	33	33
最大水头/m	36.23	36.23
最小水头/m	31.14	31.14
转轮直径/m	8.8	9.1
额定转速/r · min ⁻¹	88.2	55.5
额定流量/m ³ · s ⁻¹	644	573
单位转速/r · min ⁻¹	135.1	87.92
单位流量/m ³ · s ⁻¹	1.448	1.354
水轮机额定效率/%	93	93.5
吸出高度 Hs/m	-9.8	3.2
单台水轮机重量/t	1 429	2 550
单台发电机重量/t	1 459	1 986
电站水轮发电机组总重/t	11 552	18 144
机组相对投资/万元	-32 960(5 万元/t 计)	

6 水轮机主要参数的确定

表 7 为上海伏伊特西门子水电设备有限公司(以下简称 VOITH)、东方电气集团东方电机有限公司(以下简称东方电机)、哈尔滨电机厂有限责任公司(以下简称哈电)及浙江富春江水电设备有限公司(以下简称浙富)设计的安谷水电站水轮发电机组设计制造技术交流方案。

(1)额定转速的选择。

从各制造厂的方案看,所推荐的安谷水电站水轮发电机组的同步转速均为 88.2 r/min。东方电机、哈电和浙富认为同步转速 88.2 r/min 是稳

妥、先进的;VOITH 认为安谷水电站水轮发电机组的同步转速可以适当提高,结合发电机出口电压的选取,发电机出口电压如选取 15.75 kV,同步转速将提高到 90.9 r/min 较优,比转速 $n_s = 506 \text{ m} \cdot \text{kW}$,比速系数 $K = 2\,907$ 。

推荐安谷水电站水轮发电机组的同步转速为 88.2 r/min,则比转速 $n_s = 491 \text{ m} \cdot \text{kW}$,比速系数 $K = 2\,821$ 。

(2)额定点单位流量和最优单位流量的合理范围。

对于大多数性能优良的 5 叶片轴流式水轮

表 7 安谷水电站主机厂方案比较表

项目名称		VOITH	东方电机	哈 电	浙富
模型 转轮	转轮直径 D_1/mm	340	350	400	460
	最优单位转速 $n_{10}^1/\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	125	128.6	130	128.98
	最优工况单位流量 $Q_{10}^1/\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$	1 225	1 150	980	1 214
	最优工况效率 $\eta_0/\%$	92.5	92.5	93.15	92.97
	桨叶数	5	5	5	6
转轮型号		KT	ZZD658-LH-850	ZZA834-LH-870	ZZ-LH-875
额定 工况	额定水头/m	33	33	33	33
	最大水头/m	36.23	36.23	36.23	36.23
	最小水头/m	31.14	31.14	31.14	31.14
	转轮直径/m	8.8	8.5	8.7	8.75
	水轮机额定出力/MW	193.88	193.88	193.88	193.88
	额定流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	637.4	643	641.7	633.79
	额定转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	88.2	88.2	88.2	88.2
	单位转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	135.1	130.5	133.6	134.3
	单位流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	1.433	1.549	1.476	1.441
	水轮机效率/%	94.42	93.2	93.34	94.59
	水轮机最高效率/%	95	94.8	94.65	95.21
	临界空化系数 σ_c	0.45	0.47	0.535	0.474
	电站装置的空化系数 σ_p	0.55	0.588	0.588	0.585
	吸出高度 H_s/m	-8.02	-9.8	-9.8	-9.7
	比转速/ $\text{m} \cdot \text{kW}$	491	491	491	491
	比速系数	2 821	2 821	2 821	2 821

机,其最优单位转速大致在 125 ~ 135 r/min 之间,安谷水电站机组的同步转速为 88.2 r/min,转轮直径 $D_1=8.5\text{ m}$,则额定点单位转速 $n_{1r}^1=130.5\text{ r/min}$,最大水头下的单位转速 $n'_{1\min}=124.55\text{ r/min}$,最小水头下的单位转速 $n'_{1\max}=134.35\text{ r/min}$,则最优单位转速 $n'_{10}=126.7\text{ r/min}$ 是非常合适的,对应的设计水头为 35 m。 $n'_{1\min}/n'_{10}=0.983,n'_{1\max}/n'_{10}=1.06$,整个运行范围在最优点附近,是非常好的取值。

由于轴流转桨式水轮机具有双调节作用,因此,转轮在较大的范围内具有较高的效率,额定点单位流量和最优单位流量的比值范围相对较大。根据统计规律,额定点单位流量和最优单位流量的比值一般在 $Q'_{1r}/Q'_{10}=1.35\sim1.7$ 范围内。对于安谷水电站,推荐 $Q'_{10}=1.15\text{ m}^3/\text{s},Q'_{1r}=1.55\text{ m}^3/\text{s},Q'_{1r}/Q'_{10}\approx1.348$ 。

额定点单位流量的选择应考虑水轮机空化性能及泥沙磨损性能,由于额定水头较高,空化安全系数对吸出高度影响较大,根据经验,空化安全

系数应取 1.1 左右,故暂定安谷水电站水轮机安装高程(桨叶中心)为 351.38 m,额定点吸出高度为 -9.8 m,电站空化系数约为 0.588,故额定点临界空化系数应为 0.535 左右,相应额定点单位流量应为 1.5 m³/s 量级,兼顾各种负荷的性能,最优单位流量应为 1 m³/s 量级。从水轮机额定单位转速的选择观点看,对于各个水头段的可使用转轮,其模型最优单位转速变化不大,5 叶片转轮最优单位转速一般为 130 r/min 左右,6 叶片转轮最优单位转速一般为 120 r/min 左右。在模型水力参数一定的情况下,可以通过选择不同的真机转速来获得不同的比转速,从对稳定性要求出发,要控制最高水头对应的单位转速不小于 0.9 倍最优单位转速,如需要使用高比转速,可以选择最高水头对应的单位转速大于最优单位转速(这种方式已经在许多电站采用),但要注意最低水头下单位转速不要偏离最优单位转速太远,一般认为,1.5 倍最优单位转速以下的区域尾水管压力脉动指标较好,单位转速过高的运行区尾水管

压力脉动急剧增大。

最终确定的最优单位流量 Q'_{10} 为 $1 \sim 1.15 \text{ m}^3/\text{s}$, 额定点单位流量控制在 $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

(3) 转轮桨叶数的选择。

近十年来,已投运的或正在建设的轴流转桨式电站的实际情况表明:桨叶数为5片的转轮可以应用到40 m水头范围,根据水头的高低配以不同的轮毂比,完全能够满足强度、空化和稳定性的要求。已设计制造的、与安谷水电站机组水头接近的机组有高坝洲($H_{\max} = 40 \text{ m}$)、铜街子($H_{\max} = 39.5 \text{ m}$)均采用5叶片,运行良好。安谷水电站 $H_{\max} = 36.23 \text{ m}$,采用5叶片转轮是完全可行的。

对于37 m水头段轴流转桨式水轮机,采用5叶片或6叶片轴流转桨式转轮,水轮机的效率、空化、单位转速及单位流量均可获得较好水平。

从各制造厂推荐的方案看:VOITH、东方电机和哈电推荐5叶片转轮,浙富推荐6叶片转轮。对于37 m水头段轴流转桨式水轮机,采用5叶片或6叶片轴流转桨式转轮,水轮机的效率、空化、单位转速及单位流量均可获得较好水平。

笔者建议在招标文件中对安谷水电站水轮机转轮使用5叶片或6叶片不作限制。

(4) 水轮机安装高程的确定。

水轮机的安装高程将直接影响土建的开挖量、混凝土工程量和运行水轮机的汽蚀。特别是对于大型轴流转桨式水轮机,合理确定水轮机的吸出高度 H_s 和设计尾水位尤其重要。

吸出高度 $H_s = 10 - 363.18/900 - K_o \sigma_c H$ 。取临界空化系数 $\sigma_c = 0.47$, $K_o = 1.3$, $H_r = 33$, $H_s = -10.56 \text{ m}$ 。从各制造厂推荐的方案看,要求 $K_o = \sigma_p / \sigma_c$ 大于1.3,水轮机额定工况点的吸出高度要大于各主机厂提出的 -9.8 m ,推荐水轮机额定工况点的吸出高度 H_s 为 -10.8 m 。

按照水电站机电设计手册,装设四台机的电

站按一台机的水轮机过机流量确定设计尾水位。安谷水电站一台机的水轮机额定流量为 $644 \text{ m}^3/\text{s}$,对应下游水位高程为 361.18 m ,以该水位确定的机组安装高程为 350.38 m 。对于低水头轴流转桨式机组,以此水位作为确定安装高程的设计尾水位过于保守。

安谷水电站机组空蚀最不利的工况为额定工况。机组额定水头33 m,电站上游发电限制水位高程397 m,电站水头损失为 0.82 m ,确定安装高程的设计尾水位为高程 $397 - 0.82 - 33 = 363.18 \text{ (m)}$ (相当于四台机满发时的尾水位),将水轮机安装高程(桨叶中心)最终确定为 352.38 m ,较按水电站机电设计手册确定的安装高程提高了 2 m ,因此而减少了大量的土建工程量。

(5) 蜗壳形式的选择。

推荐采用蜗壳包角在 $210^\circ \sim 220^\circ$ 范围内可以使蜗形部分流速分布均匀并具有合理的流速系数。蜗壳断面采用T型,可以使蜗壳断面中的流速分布比较均匀。如果采用Γ型蜗壳,则由于蜗壳断面下伸太大,使断面中、上部流速大,下部流速小,存在很大的流速差,水力损失大。

7 结 语

合理选择水轮机参数对机组和电站的安全运行至关重要。笔者对水轮机的参数选择进行了综合论证,提出了较为合理的水轮机设计参数,为安谷水电站水轮发电机组安全、稳定、高效运行奠定了基础。现安谷水电站机组已全部投产发电,机组运行稳定、可靠。其水轮机安装高程的确定方法对低水头轴流转桨式机组具有广泛的借鉴意义。

作者简介:

吕勤川(1968-),男,四川成都人,高级工程师,学士,从事水利水电工程水力机械设计与研究工作;

何仕明(1964-),男,四川西充人,主任,高级工程师,学士,从事水电站机电工程技术与管理工作。

(责任编辑:李燕辉)

金沙江苏洼龙水电站实现大江截流

2017年11月21日上午11时,金沙江上游干流核准开工的第一个项目、国家“西电东送”接续基地的重要内容和先导工程——苏洼龙水电站成功实现大江截流。苏洼龙水电站位于四川省巴塘县与西藏芒康县交界的金沙江干流上,是金沙江上游河段13级开发规划中的第10级,总装机容量为120万千瓦,年发电量54亿千瓦时,由华电金沙江上游水电开发有限公司负责开发。苏洼龙水电站是西南水电开发国家重点工程,于2015年11月获得国家发改委核准,计划于2020年底首台机组投产发电,2021年全面建成投产。电站截流是水电工程建设的重要里程碑节点。苏洼龙水电站成功截流,标志着电站建设全面转入主体工程施工阶段,为进一步安全度汛、基坑开挖及大坝填筑打下了良好基础,对电站如期投产发电,加快建设“西电东送”接续能源基地、促进藏区脱贫攻坚具有重要意义。