

广西柳江红花水电站 灯泡贯流式水轮机主要参数选择

翁映标, 杨类琪

(中水珠江规划勘测设计公司, 广东 广州 510610)

摘要:红花水电站于 1998 年 3 月完成初步设计工作, 推荐采用 6 台灯泡贯流机组, 单机容量 38.34 MW, 额定水头 12.80 m, 转轮直径 6.10 m (转轮桨叶 4 个), 额定转速 100 r/min, 水轮机比转速 816 m·kW。2003 年 7 月完成重新编制初步设计报告, 结合初设工作, 参照当时国内外灯泡贯流机组的转轮资料, 对水轮机的主要参数进行选择。

关键词:灯泡贯流式水轮机; 主要参数; 选择; 红花水电站

中图分类号:TV734.21 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-9235(2008)02-0056-04

1 工程概况

红花水电站是广西柳江规划的最后一个梯级, 是以发电、航运为主, 兼顾灌溉、旅游、养殖的综合利用工程。电站正常蓄水位 77.50 m, 装机容量 220 MW, 最大毛水头 17.0 m, 加权平均水头 14.48 m, 最小净水头 10.42 m, 通航基流 192 m³/s, 电站保证出力 27.44 MW。水库具有日调节能力, 电站枯水期可投入系统调峰运行, 调峰能力为 220 MW。

红花水电站于 2003 年 7 月完成重编初步设计报告, 机组整备设备拟采用国内招标, 可采用进口转轮, 机组参数按当时国内外具有的设计和制造灯泡机组能力的水平进行选择。

电站基本参数如下:

上游校核洪水位 ($P = 0.1\%$) 91.52 m, 设计洪水位 ($P = 1\%$) 86.43 m, 正常蓄水位 77.5 m。

下游校核洪水位 ($P = 0.1\%$) 90.95 m, 设计洪水位 ($P = 1\%$) 86.05 m, 正常尾水位 63.94 m (额定水头对应的下游水位), 最低尾水位 60.73 m (相应于最小通航流量 192 m³/s, 已考虑下游下切影响)。

电站最大毛水头 17.0 m, 加权平均水头 14.48 m, 设计水头 13.30 m, 最小净水头 10.42 m。

厂房布置型式为河床式, 装机容量 220 MW, 多年平均发电量 88 029 万 kW·h, 年利用小时数 4 001 h。

2 水轮机主要参数选择

初步设计阶段, 经技术经济比较, 本电站确定采用 6 台机组方案, 单机容量 36.67 MW, 额定水头为 13.30 m。

2.1 可采用的转轮型号

本电站的运行水头为 17.0 ~ 10.42 m, 宜采用灯泡式贯流机组。适用于本电站水头段的灯泡机转轮有国内早期的 GZTF07、GZSK111B、GZF02 型转轮; 国内合资公司采用的国外转轮 GZ4BN31; 国内厂家与国外厂家技术合作采用的国外

转轮 GZ996、GZB14、GZD320 等, 这些转轮的模型参数见表 1。GZTF07、GZSK111B、GZF02 这 3 个型号的国产转轮以及源于马迹塘电站引进的 K89/4 II a 转轮, 其参数相当于国外 20 世纪七八十年代的水平。以 GZTF07 转轮与 GZ996、GZB14、GZ4BN31、GZD320 等转轮相比, 参数水平较低, 主要表现在模型效率低, 最优工况模型效率约低 1% ~ 1.5%, 一般设计计算工况约低 0.85% ~ 3.0%, 而空化系数也高。

GZ996、GZB14、GZ4BN31、GZD320 等转轮已应用于国内大中型灯泡贯流式电站, 可以作为初设阶段本电站水轮机参数选择的依据。

表 1 适用于红花电站的部分灯泡机转轮模型参数

| 项目 | 转轮型号 | | | | | |
|------------|---------------------------------|-------|---------|-------|--------|-------|
| | TF07 | GZB14 | GZ4BN31 | GZ996 | GZD320 | |
| 推荐使用水头 /m | 18 | 18 | 20 | 20 | 18 | |
| 转轮叶片数 | 4/16 | 4/16 | 4/16 | 4/16 | 4/16 | |
| 轮毂比 | 0.40 | 0.38 | 0.38 | 0.38 | 0.38 | |
| 模型转轮直径 /mm | 300 | 365 | 350 | 350 | 340 | |
| 最优 工况 | $n_{10}' / (r \cdot \min^{-1})$ | 157 | 148 | 160 | 158 | 154 |
| | $Q_{10}' / (m^3 \cdot s^{-1})$ | 1.80 | 1.78 | 1.70 | 1.76 | 1.70 |
| | $\eta_{Tm0} / \%$ | 92.6 | 94.0 | 94.09 | 94.0 | 93.85 |
| | σ_{om} | 0.77 | | | 0.7 | |

2.2 比转速及比速系数选择

水轮机比转速 n_s 和比速系数 K 是衡量水轮机能量特性、经济性和先进性的综合性指标, 也反映设计、制造技术的水平。大容量机组为缩小机组及厂房尺寸, 节省投资, 提高电站的经济效益, 在可能的条件下, 倾向于选择较高的比转速 n_s 和比速系数 K 。因此, 随着水轮机设计制造水平的提高, 水轮

收稿日期: 2006-12-14

作者简介: 翁映标, 男, 广东汕头人, 主要从事水利水电工程设计工作。

机比转速和比速系数有所提高。但是比转速 n_s 的提高受到水轮机强度、空化性能、泥沙磨损、运行稳定性等因素的制约,不能单方面追求过高的指标。所以需要针对电站的具体情况,对水轮机比转速 n_s 值及比转速系数 K 进行综合分析比较,确定合适的指标。

表2列出国内部分大型灯泡贯流机组的比转速 n_s 值和 K 值,其中比转速 n_s 值在 801 ~ 995 $m \cdot kW$ (其相应机组额定水头为 14.0 ~ 9.70 m),比速系数 K 值在 2 751 ~ 3 099 之间。机组额定水头越高,比转速越低,但随着时间的推移有不断增大的趋势。

表3列出国内部分制造厂家为红花水电站提供的机组主要参数,其中比转速 n_s 值在 776.9 ~ 883.2 $m \cdot kW$ 之间。

按四叶片的经验公式 $n_s = 2\,500 H^{-0.4}$, 可得 n_s 值为 887.9 $m \cdot kW$ 。

考虑到目前国内引进转轮的比转速约为 858 ~ 996 $m \cdot kW$,且本电站的额定水头比较高,经分析比较,本电站水轮机的比转速 n_s 值宜选定在 890 $m \cdot kW$ 左右,比速系数 K 值为 3 245 左右。

2.3 单位转速及单位流量的选定

根据确定的比转速 n_s 和比速系数 K ,按公式 $n_s = 3.13n_1' \sqrt{Q_1' \eta_r}$, 计算出水轮机的单位流量 Q_1' 和单位转速 n_1' 。为了减小发电机尺寸,宜加大单位转速,为了减小转轮直径,应提高 Q_1' 值,但 Q_1' 值较大将引起 σ_r 值较大,从而引起较大的开挖量和土建投资,因此单位流量 Q_1' 和单位转速 n_1' 应进行合理的匹配,使电站的投资节省,运行安全稳定。

从表2列出的国内部分已运行或拟运行的大型灯泡贯流机组的参数可以得出,单位转速为 171.7 ~ 199.6 r/min ,单位流量为 2.351 ~ 3.305 m^3/s 。

从表3可以看出,国内部分制造厂家为红花水电站提出的单位转速为 160 ~ 177.2 r/min ,单位流量为 2.554 ~ 2.723 m^3/s 。

按国外专家推荐的计算公式 $n_1' = (620 - 10H_p)/3$, $Q_1' = (n_1' - 55)/50$, 可得 n_1' 为 162.3 r/min , Q_1' 为 2.147 m^3/s , 计算结果参数偏低。结合转轮轴面流速 V_m 和转轮轮毂比 d 的取值范围 (V_m 取 13 ~ 15 m/s , d 取 0.38), Q_1' 值可取 2.394 ~ 2.763 m^3/s 。

表2 国内部分已投产或即将投产的大型灯泡式机组主要参数

| 参数 | 电站名称 | | | | | | |
|--------------------------------|----------------------------|------------|------------------|------------|-------------|------------------|-------|
| | 百龙滩 (广西) | 京南 (广西) | 桐子壕 (四川) | 尼那 (青海) | 飞来峡 (广东) | 金银台 | |
| 转轮型号 | GZB34 | | GZD320 | GB4BN31 | GZKR4/20 | | |
| 桨叶/导叶(数) | 4/16 | 4/16 | 4/16 | 4/16 | 4/16 | 4/16 | |
| 水轮机额定出力/MW | 33.0 | 35.40 | 37.1 | 40.8 | 35.73 | 40.8 | |
| 台数 | 6 | 2 | 3 | 4 | 4 | 3 | |
| 水头 | 最大水头/m | 18.0 | 14.50 | 14.80 | 18.1 | 14.06 | 15.9 |
| | 额定水头 H_r /m | 9.70 | 11.0 | 10.0 | 14 | 8.53 | 13 |
| | 最小水头/m | 3.0 | 3.0 | 4.20 | | 3.61 | 3.0 |
| 转轮直径 D_1 /m | 6.40 | 6.30 | 6.80 | 6.0 | 7.0 | 6.3 | |
| 额定转速 $n_r/(r \cdot \min^{-1})$ | 93.80 | 88.24 | 83.3 | 107.1 | 83.3 | 100 | |
| 额定流量 $Q_r/(m^3 \cdot s^{-1})$ | 377.5 | 351.1 | 405 | 316.7 | 425 | 341.35 | |
| 水轮机最高效率/% | 95.20 | 95.20 | | 96.08 | 95.70 | 95.06 | |
| 飞逸转速 $(r \cdot \min^{-1})$ | 310 | 240 | /250 | | | | |
| 吸出高度 H_s /m | -12.0* | | -12.6 | | -7.45 | | |
| 额定参数 | 单位转速 $(r \cdot \min^{-1})$ | 192.75 | 167.61 | 179.1 | 171.7 | 199.6 | 174.7 |
| | 单位流量 $(m^3 \cdot s^{-1})$ | 2.959 | 2.667 | 2.7697 | 2.351 | 3.305 | 2.385 |
| | 水轮机效率/% | 91.87 | 93.75 | 93.38 | 94.60 | 90.55 | 94.45 |
| | 模型空化系数 σ | | | | | 2.60 | |
| | 比转速 $n_s/(m \cdot kW)$ | 995 | 829.6 | 901 | 801 | 1080 | 820 |
| 比速系数 K | 3099 | 2751 | 2849 | 2997 | 3154 | 2957 | |
| 发电机 | 单机额定容量/MW | 32 | 34.5 | 36 | 40 | 35 | 40 |
| | 额定效率/% | 97.0 | 97.0 | 98.0 | 98.1 | 98 | 98.1 |
| | 额定功率因数 | 0.95 | 0.92 | 0.92 | | 0.90 | 0.92 |
| 水轮机制造厂家 | 日本富士/ 中国双富 | 伏依特 (奥) | Andritz/ 东方电机 | 天津 阿尔斯通 | 奥钢联 | Andritz/ 东方电机 | |
| 投产时间 | 1996年 | 1997年 | 正在制造 | 正在制造 | 1998年10月 | 正在制造 | |

* 计算至转轮中心以上 ($D_1/4$) 处

表3 国内部分制造厂家为红花水电站提供的机组主要参数

| 参数 | 制造厂家 | | | |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------|------------------------|-------|
| | 天津 阿尔斯通 | 东方电机 | 双富公司 | |
| 转轮型号 | GZ4BNHH | GZD320 | GZB14 | |
| 桨叶/导叶 | 4/16 | 4/16 | 4/16 | |
| 水轮机额定出力/MW | 42.738* | 37.6 | 42.607 | |
| 台数 | 6 | 6 | 6 | |
| 水头/m | 最大 | 17.0 | 17.0 | |
| | 额定 | 12.80 | 12.80 | |
| | 最小 | 14.42 | 14.42 | |
| 转轮直径/m | 6.30 | 5.80 | 5.60 | |
| 额定转速/(r·min ⁻¹) | 90.91 | 107.1 | 115.4 | |
| 额定流量/(m ³ ·s ⁻¹) | 362.6 | 319 | 311.4 | |
| 水轮机最高效率/% | 95.28 | 95.75 | 95.3 | |
| 飞逸转速/(r·min ⁻¹) | 268 | 320 | 353 | |
| 允许吸出高度 (至主轴中心线)/m | -11.0 | -13.0 | -14.12 | |
| 额定参数 | 单位转速/(r·min ⁻¹) | 160 | 173.6 | 177.2 |
| | 单位流量/(m ³ ·s ⁻¹) | 2.5535 | 2.651 | 2.723 |
| | 水轮机效率/% | 94.24 | 94.1 | 93.13 |
| | 模型空化系数σ | | | |
| | 比转速/(m·kW) | 776.9 | 858.2 | 883.2 |
| 发电机型号 | SFWG41.7 - 66/6760 | SFWG36.7 - 56/6450 | SFWG36.67 - 52/5950 | |
| 发电机 单机容量/MW | 41.67 | 36.67 | 36.67 | |
| 额定效率/% | 97.5 | > 98 | 97.0 | |
| 发电机功率因数 | 0.95 | 0.95 | 0.95 | |

* 天津阿尔斯通提供的资料为电站装机容量250 MW,装机台数6台的机组主要参数

由于本站的水文特点,机组在较高水头运行的时间较长,单位转速 n_1' 的选择应使水轮机在较高水头运行时处于高效率区。同时,单位流量 Q_1' 的选择应使水轮机在额定工况点运行时具有较高的效率,运行稳定,且空化性能好。根据选定的比转速值890 m·kW左右,以及现阶段国内相同水头段水轮机的使用情况、国内水轮机的制造水平及国内部分制造厂家为本电站提供的资料,结合本站的水质情况。经分析比较,确定本站水轮机额定工况的单位转速为180 r/min,单位流量为2.70 m³/s。

2.4 水轮机效率水平

表2所列的国内部分已投产或即将投产的大型灯泡式水轮机额定工况的原型效率为91.87%~94.45%,最优工况原型效率为95.06%~96.08%。国内部分制造厂家为本电站提出的水轮机额定工况原型效率为93.13%~94.24%,最优工况原型效率为95.28%~95.75%。按国内外研究制造水平,模型最优效率均已超过93.5%,因此,本水轮机模型预期最优效率应不低于94%,模型水轮机额定点效率不低于91.9%。

水轮机效率按最优点等值修正,暂取效率修正值为1.8%,相应原型水轮机额定点效率为93.70%,原型最高效率为95.8%。

发电机的额定点效率暂取为97.6%。

2.5 转轮直径选取

根据转轮直径的计算公式 $D_1 = \sqrt{N/(9.81Q_1'H_t^{1.5}\eta_r\eta_f)}$, 得 $D_1 = 5.589$ m

式中单机容量 $N = 36\ 670$ kW,单位流量 $Q_1' = 2.70$ m³/s,取 $D_1 = 5.60$ m,相应单位流量 $Q_1' = 2.689\ 6$ m³/s。

额定工况单位流量与最优工况单位流量之比主要都集中在1.65左右,初选本站模型水轮机的最优单位流量 Q_{10} 约为1.65 m³/s左右。

2.6 额定转速的确定

根据 $n_s = 890$ m·kW, $n_s = 3.13n_1' \sqrt{Q_1'\eta_r}$, 则 $n_1' = 179.1$ r/min, 以此选择机组转速 $n = \frac{n_1' \sqrt{H_t}}{D_1} = 116.6$ r/min,可供选用的额定转速有115.4 r/min和125 r/min二档,对应的比转速 n_s 分别为880 m·kW和954 m·kW, K 值分别为3 209和3 479。其中125 r/min转速对应的参数偏高。

为了进一步验证机组额定转速的合理性,本阶段选择107.1 r/min、115.4 r/min和125 r/min 3个转速方案进行技术经济比较,结果列于表4。

表4 机组额定转速比较

| 项目 | 转速方案 | | |
|----------------|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| | 107.1 /(r·min ⁻¹) | 115.4* /(r·min ⁻¹) | 125 /(r·min ⁻¹) |
| 安装高程/m | 49.59 | 49.59 | 49.29 |
| 机电设备投资差值/万元 | +364 | - | -370 |
| 金属结构投资差值/万元 | 0 | - | +31 |
| 静态总投资差值/万元 | +364 | - | -339 |
| 多年平均电量差值/万kW·h | +58 | - | -555 |

* 推荐方案

通常,随着转速的提高,允许的安装高程也随之降低,土建工程量和金属结构工程量略有增加,机电设备投资和年均电量略有减少。经比较,本站机组额定转速对电站实际安装高程没有实质性影响,土建投资基本相同。从比较结果可以看出,与115.4 r/min方案相比,107.1 r/min方案的年均电量虽能增加58万kW·h,但发电机造价也约增加364万元;而125 r/min方案的电站静态投资虽可减少339万元,但相应的电站年均电量也约减少555万kW·h。

因此,取 $n_s = 115.4$ r/min,相应的额定工况单位转速 $n_1' = 177.2$ r/min。

对于灯泡贯流式机组,额定工况单位转速宜高于最优单位转速,一般取 $n_1' = (1+k)n_{10}$,由于本站最低水头相对较高,大部分时间在高水头段运行,最优单位转速 n_{10} 宜逼近最大水头工况,最大净水头16.74 m,对应的单位转速为

157.9 r/min。取 $k = 0.10$, 则最优单位转速 $n_{10}' = 161$ r/min。

2.7 安装高程的确定

灯泡式贯流机组的安装高程应同时满足在各种可能出现的运行工况下避免空蚀的要求及尾水管出口最小淹没深度的要求。由于本电站的水头较高, 机组安装高程由避免空化的条件决定。

结合参与红花机组研讨会各制造厂提供的资料, 确定本电站水轮机吸出高度计算公式 ($H_s = 10 - \nabla / 900 - K\sigma_m H$) 中的 $K = 1.05$, $\sigma_m = 1.5$, 水轮机空蚀应考虑至转轮顶点 ($D_1/2$), 安装高程 $AN = \nabla_{\text{下}} - H_s - D_1/2$ 。

对电站各种特征运行工况的计算分析表明, 以正常发电工况 (上游水位为正常高 77.5 m, 相应下游尾水位 63.94 m) 6 台机组额定工况运行对应的吸出高度最小, 允许安装高程也是最低的, 考虑到电站下游冲刷后水位下降, 以及厂房地质条件需要深挖回填等因素, 安装高程暂定为 49.59 m (机组轴线高程)。

为了进一步论证安装高程的合理性, 本阶段分别对安装高程为 49.59 m、49.09 m 及 48.59 m 3 个方案的多年平均电量及相应的厂房土建投资进行比较, 结果列于表 5。

表 5 安装高程比较

| 项目 | 方案 1 | 方案 2 | 方案 3 |
|----------------|-------|-------|-------|
| 安装高程 / m | 49.59 | 49.09 | 48.59 |
| 年电量差值 / 万 kW·h | -105 | | +103 |
| 年均电量收入差值 / 万元 | -42 | | +41.2 |
| 厂房土建投资差值 / 万元 | -352 | | +314 |

降低安装高程的目的主要是汛期可以增大机组的过机流量, 减少弃水, 获得更多的汛期电量。由于本电站低水头大流量弃水发电工况的时间较短 (净水头 10.42 m 以下因水库调度而弃水, 水头迅速减低, 机组停止运行), 且降低安装高程后水轮机的过流量受导叶开度的限制, 能增加的电量有限, 比较结果表明, 随着安装高程的降低, 年均电量和厂房土建投资均有增加, 经济效益不明显。同时, 考虑到本电站下游洪水水位较高, 为减少机组负荷时的轴向反推力, 安装高程又不宜定的太低。

经与相关专业协商、综合评比后, 本电站的安装高程确定为 49.59 m。

2.8 模型水轮机转轮参数

综合以上分析, 本电站预期的模型水轮机转轮参数如下:

a) 最优点工况。转轮桨叶数 $Z = 4$ 个, 最优单位流量 $Q_{10}' = 1.65$ m³/s, 最优单位转速 $n_{10}' = 161$ r/min, 最高模型效率 $\eta_{\max} = 93\%$ 。

b) 额定工况。比转速 $n_s = 880$ m·kw, 比转速系数 $K = 3209$, 单位流量 $Q_1' = 2.6896$ m³/s, 单位转速 $n_1' = 177.2$ r/min, 模型效率 $\eta_m = 91.9\%$, 装置空蚀系数 $\sigma_s \leq 1.60$ 。

2.9 初设阶段选定的原型水轮机主要参数

初设阶段选定的原型水轮机主要参数: 水轮机型号 GZ(

880) - WP - 560, 转轮桨叶数 4 个, 转轮直径 D_1 为 5.60 m, 水轮机额定出力 $P_1 = 37572$ kW, 水轮机台数 6 台, 最大毛水头 H_{\max} 为 17.0m, 额定水头 H_r 为 13.30 m, 最小水头 H_{\min} 为 10.42 m, 额定流量 Q_r 为 307.3 m³/s, 额定转速 n_r 为 115.4 r/min, 水轮机最高效率 η_{\max} 为 95.80%, 水轮机额定效率 η_R 为 93.70%, 飞逸转速 n_f 为 219 r/min、358 r/min (非协联工况), 安装高程为 49.59 m。

3 水轮机的最终参数

2003 年 8 月, 红花机组进行招标, 电站装机容量由初设阶段的 22 MW 提高为 23 MW, 水轮机额定水头为 13.20 m, 最终确定东方电机股份有限公司和哈尔滨电机厂责任有限公司分别中标 3 台套, 主要参数列于表 6。

表 6 红花水电站机组主要参数

| 参数 | 制造厂家 | | |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------|------------------|
| | 东方电机 | 哈电公司 | |
| 转轮型号 | GZD320 | GZK4/0.38 | |
| 轮毂比 | 0.38 | 0.38 | |
| 桨叶 / 导叶 | 4/16 | 4/16 | |
| 水轮机额定出力 / MW | 38.974 | 38.974 | |
| 台数 (机组序号) | 1 号、3 号、5 号 | 2 号、4 号、6 号 | |
| 最大水头 / m | 16.74 | 16.74 | |
| 额定水头 / m | 13.20 | 13.20 | |
| 最小水头 / m | 10.42 | 10.42 | |
| 转轮直径 / m | 5.90 | 5.90 | |
| 额定转速 / (r·min ⁻¹) | 107.1 | 107.1 | |
| 额定流量 / (m ³ ·s ⁻¹) | 320 | 320.6 | |
| 飞逸转速 / (r·min ⁻¹) | 315 | 349 | |
| 允许吸出高度 (至主轴中心线) / m | -12.5 | -13.1 | |
| 最优工况 | 单位流量 / (m ³ ·s ⁻¹) | 1.70 | 1.565 |
| | 单位转速 / (r·min ⁻¹) | 154 | 158.8 |
| | 模型效率 / % | 93.80 | 93.61 |
| | 原型效率 / % | 95.75 | 95.7 |
| 额定工况 | 单位转速 / (r·min ⁻¹) | 173.9 | 173.9 |
| | 单位流量 / (m ³ ·s ⁻¹) | 2.530 | 2.535 |
| | 模型效率 / % | 94.45 | 92.15 |
| | 原型效率 / % | 94.45 | 94.24 |
| | 临界空化系数 σ | 1.46 | 1.47 |
| | 比转速 / (m·kW) | 841.6 | 840.3 |
| | 发电机型号 | SFWG38 - 56/6500 | SFWG38 - 56/6400 |
| 发电机 | 单机容量 / MW | 38 | 38 |
| | 额定效率 / % | 98.02 | 98.0 |
| | 发电机功率因数 | 0.85 | 0.85 |

4 结束语

红花水电站的 1 号、3 号机组 (东电机组) 和 2 号机组 (哈电机组) 已于 2006 年 10 月成功投入商业运行。目前, 3 台机组运行状况良好。

(责任编辑: 王德志)