

Analysis of Geothermal Power Generation and a Case Study

Ze Zheng QIU^{1,2,3}, Yulie GONG^{1,2}, Zhijian WU^{1,2}, Weibin MA^{1,2}

¹Guangzhou Institute of Energy Conversion, CAS, Guangzhou, China

²Key Laboratory of Renewable Energy and Gas Hydrate, CAS, Guangzhou, China

³Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

Email: gongyl@ms.giec.ac.cn

Abstract: This paper uses the corresponding model to calculate four kinds of systems which usually used in Geothermal Power Generation. Under the given water temperature of 100°C to 200°C, shown by calculation, capacity and efficiency of two stage flash system is higher than other three systems, when the temperature is lower than 130°C, single stage flash system is better than binary cycle. Otherwise a case of medium temperature geothermal power generation is calculated, and point out that in the cascade utilization model with the same temperature of tail water, the economic efficiency of two stage flash system is better than single flash system.

Keywords: geothermal power generation; flash system; single stage flash system;

地热发电系统研究及案例分析

邱泽正^{1,2,3}, 龚宇烈^{1,2}, 吴治坚¹, 马伟斌^{1,2}

¹中国科学院广州能源研究所, 广州市, 中国, 510640

²中国科学院可再生能源与天然气水合物重点实验室, 广州市, 中国, 510640

³中国科学院研究生院, 北京市, 中国, 100049

Email: gongyl@ms.giec.ac.cn

摘要: 本文根据相应的系统模型计算分析了四种不同系统在给定热水温度(100°C—200°C)和冷凝温度下的发电量及效率。结果表明两级闪蒸系统优于其他三种系统, 在较低温度下(<130°C), 单级闪蒸系统优于双工质系统。另外, 本文针对一个中温地热水发电案例进行计算, 结果表明在梯级利用模式、相同发电尾水温度下, 使用两级闪蒸系统比单级闪蒸系统经济效益好。

关键词: 中低温地热发电; 闪蒸系统; 单级闪蒸;

1 引言

我国地热资源丰富, 据初步估计, 我国地热可采储量约相当于 4626.5 亿吨标准煤, 资源潜力占全球总量的 7.9%。根据开发利用目的, 可将水热型地热资源分为高温(>150°C)及中低温(中温 90~150°C, 低温<90°C)两类。目前我国已发现的温泉有 3200 多处, 但是高温资源较少且分布较为集中, 而中低温地热资源分布较广。因此利用好中低温地热资源对节能减排的实施有着深远的意义。

目前常见的中低温地热水发电有两种基本的能量转换系统, 即闪蒸系统和低沸点双工质循环系统。前

*基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(No. 2007AA05Z442)

者是通过闪蒸器将热水降压产生部分蒸汽, 后者是通过加热器由热水把某种低沸点工质加热成蒸汽, 然后通过郎肯(Rankine)循环在汽轮机中先将热能转换为机械能, 然后汽轮机再带动发电机发电, 将机械能再转换为电能。这些不同的种能量转换过程, 各有优缺点, 可根据地热水资源的情况不同, 来选择不同的能量转换系统^[1]。

2 系统热力计算及分析

2.1 系统分类及经济性指标

闪蒸和双工质循环又分为单级和多级系统, 一般来说级数越多发电量就越大同时成本也增加, 对于两

级以上的系统发电量增加有限，所以多级系统多为两级^[2]，常见的系统有单级闪蒸、两级闪蒸、单级双工质、两级双工质系统等。

常用的地热发电的热力学性能和经济性指标如下各项表示：

- 每吨热水净发电量：

$$Ne = \frac{P_{net}}{q_m}$$

- 电站净效率 η_{net} (%) 是指电站输出净功率的热当量与地热流体的循环加热量之比，即

$$\eta_{net} = \frac{3600P_{net}}{\phi}$$

- 资源利用效率 η_u ，为电站净功率 P_{net} (kW) 的热当量与热水最大可用功 W_{max} {kJ/kg} 之比：

$$\eta_u = \frac{3600P_{net}}{q_m w_{max} \times 10^3} = \frac{3.6Ne}{w_{ma}}$$

- 汽耗率 d [kg/ (kWh)] 是指电站每发出 1kWh 电所消耗的蒸汽量，即

$$d = \frac{q_m \times 10^3}{P_{net}}$$

- 电站净输出每千瓦投资 I (万元 /kW)：

$$I = \frac{R}{P_{net}}$$

式中：

P_{net} ——电站净输出功率 (kW)；

Φ ——电站循环加热量 (kJ/h)

q_m ——地热流体 (或蒸汽)质量流量 (t/h)；

w_{max} ——地热流体最大可用功 (kJ/kg)

R ——投资总额 (万元)。

单位转换：1 kWh = 3600 kJ；1 t = 103 kg.

2.2 热力计算

本节针对以上讨论的四种常见系统进行热力计算。假定计算参数如表 1。

计算结果如图 1—3 所示。

由图 1 可以看出各种系统的发电量均随着热水温度的升高而升高，在相同的情况下，两级闪蒸系统净发电量最高，温度较低时 (<130℃) 单级闪蒸净发电量高于两级双工质和单级双工质系统，两级双工质系统在温度较高的情况与两级闪蒸系统的发电量接近。由此可见在中低温热水发电系统中使用闪蒸系统较为

有利合理。

Table 1. System assumes parameter
表 1. 系统假定参数

参数名	假定值
温度范围	100℃—200℃
双工质系统冷凝温度	48℃
闪蒸系统冷凝温度	40℃
厂用电率	0.2
$\eta_{oi} * \eta_m * \eta_g$ (双工质)	0.78*0.98*0.97
$\eta_{oi} * \eta_m * \eta_g$ (闪蒸)	0.768*0.98*0.97

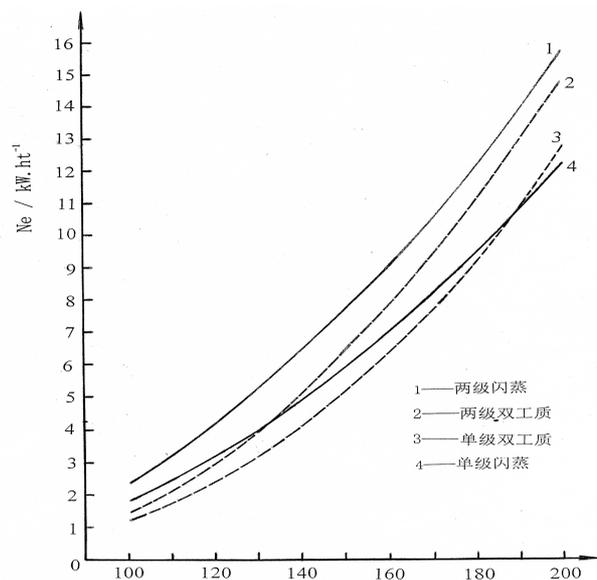


Figure 1. The changes of Net power output per ton water when supplied with different temperature
图 1.净发电量随地热水温度的变化

由图 3 可以看出四种系统中单级闪蒸电站净效率最低，在中低温段两级双工质、单级双工质、两级闪蒸三种系统的电站净效率比较接近，这是由于从能量利用角度来看，无论采用多少级闪蒸，在最后一级闪蒸器重总是不可避免的要大量热水的可用能废弃。所以其净效率较低。而双工质系统则可有效的避免这种情况，但是双工质系统需要加大换热面积，经济效益有待评估。

3 某地地热资源发电系统选型案例分析

3.1 资源概况及地热水参数

当地年平均气温 7.1℃，最低温度-14.7℃，最高温度 27.2℃，采暖季 5 个月。泉水携带出的总热量为 4.0×10^{15} J/a。地热水多沿断裂带成带状有规律分布，

温、热泉出露多，温度高，且毗邻城区，交通便利，充分利用可以在地热发电的同时有效的解决当地居民冬天取暖问题。

最高温度 96℃，按照国内地热资源分析，对应地热水出口温度约为 135℃。

3.2 系统方案选择分析

本案例属于中低温地热水发电范畴，闪蒸系统和双工质系统均能满足要求。但是考虑到该地地热水中不凝气体含量低、水温较低，同时闪蒸循环发电系统技术成熟、设备简单，且运行安全、初投资低等因素。本文着重从单级闪蒸和两级闪蒸两个方面分析。

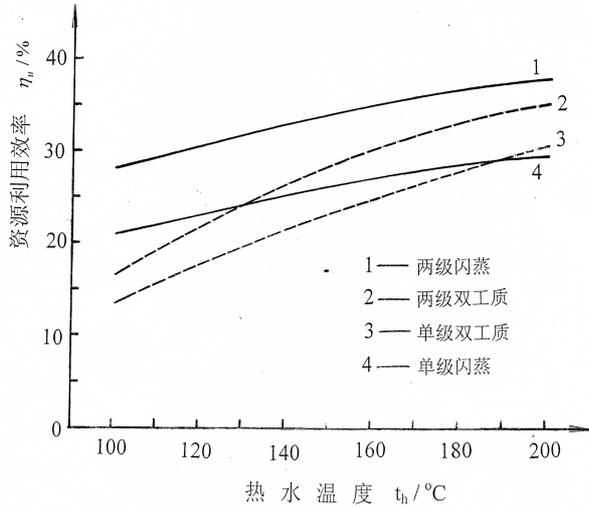


Figure 2. The changes of Resource efficiency when supplied with different temperature
图 2.资源利用效率随地热水温度的变化

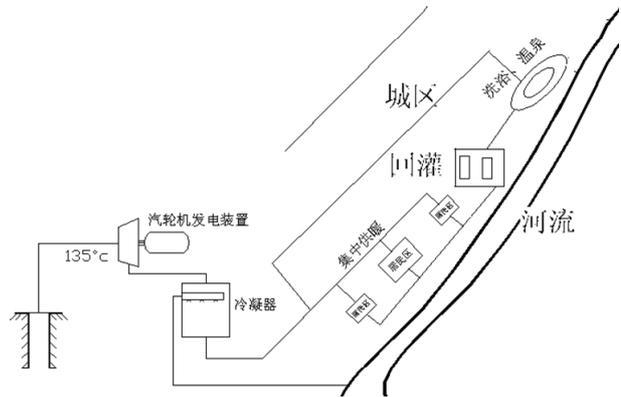


Figure 4. Geothermal utilization plan.
图 4. 地热综合利用图.

另外考虑到该地热源毗邻城区，且年平均气温低供暖期长，适宜将地热发电尾水做供暖或洗浴温泉使用。以便在闪蒸系统发电的基础上加以综合利用，使资源利用最大化，系统规划如图 4 所示。地热水在经过发电后直接再送入城区供供暖或洗浴用。

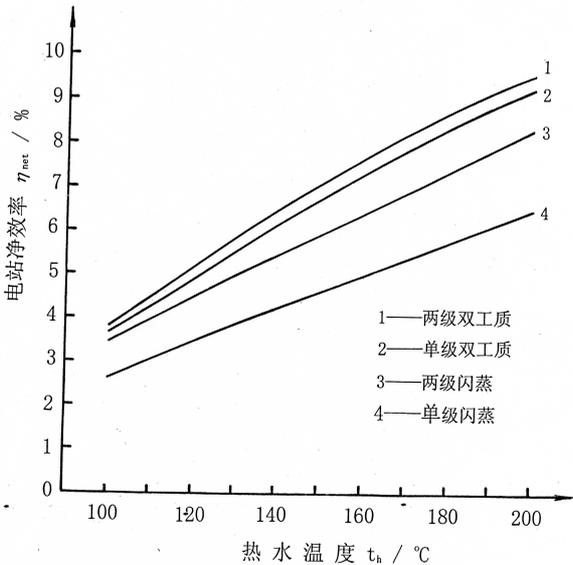


Figure 3. The changes of Power Plant net efficiency when supplied with different temperature.
图 3.电站净效率随热水温度的变化.

根据地热流体典型样品分析，以氮和二氧化碳为主，氮占 60%—80%，二氧化碳占 14%—15%，地热资源多为中低温，高温地热资源较少。目前已发现的温矿泉 100 余处，重要的有 12 处，总流量达 207 L/s，

3.3 系统计算及评价

3.3.1 系统计算

为了比较单级闪蒸与两级闪蒸在该案例中利用状况，假定年发电 8000 小时，分别对两种系统进行计算，系统最佳闪蒸温度确定如式 1—3^[1]。

单级闪蒸最佳闪蒸温度：

$$T_1 = \sqrt{T_h T_c} \quad (1)$$

两级闪蒸最佳闪蒸温度：

$$\text{第一级 } T_1 = \sqrt[3]{T_h^2 T_c} \quad (2)$$

$$\text{第二级 } T_2 = \sqrt[3]{T_h T_c^2} \quad (3)$$

Table 2. Design parameters
表 2. 设计参数

参数	数值	参数	数值
地热蒸汽温度	135℃	厂用电率	0.1
地热蒸汽流量	600t/h	冷却水进口温度	20℃
冷却水出口温度	30℃	汽轮机效率	76%

由表 3 可知在最佳蒸发温度下，两级闪蒸发电量高出单级系统 30.2%，其资源利用率也较单级系统高。但是，由于两级闪蒸的压力都较低（尤其是第二级），整个机组都在负压下运行，蒸汽的质量体积很大，将造成设备体积很大及设备造价过高；同时两级系统尾水排放温度较低难以胜任当地供暖需求。如果将两级闪蒸系统尾水排放温度提升至与单级系统相同 79℃，则比单级系统发电量大 20%。

Table 3. System parameters.
表 3. 系统参数.

参数	单级闪蒸	两级闪蒸	两级闪蒸
		(最优蒸发温度)	(尾水 79℃)
装机功率	4.16MW	5.4MW	5.0MW
净输出功率	3.74MW	4.87MW	4.5MW
每吨热水净发电量	6.23kwh	8.11kwh	7.5kwh
机组热效率	0.051	0.066	0.061
资源利用效率	0.294	0.383	0.355
尾水温度	79℃	61.6℃	79℃
年发电量 (Kwh)	29920000	38960000	36000000

3.3.2 单级闪蒸与两级闪蒸的经济性比较

由于两种系统均能满足相应地热水梯级利用要求，两级闪蒸系统发电效率较高、发电量大，但设备要求高，体积也较大。对于本案例来说，两种系统其地下部分投资相同，若采用相同的尾水温度（79℃），则其下游供暖、温泉等梯级投资回报也相同。所以两者初投资的差额就在于地面的发电系统部分，根据地

热发电模型式 4^[4]。

地面上发电系统投资：

$$M_1 = (-0.9 \pm 4.6) + (1.0 \pm 0.1) \times P \quad (4)$$

其中：M——投资额，百美万元

P——装机容量，MW

两种系统取相同系数，美元对人民币汇率 6.8，上网电价为 0.689 元，电站劳务成本及机组年维护费 200 万元。计算得到取相同尾水温度时两种系统年发电量差值为 608 万千瓦时，若使用两级闪蒸系统，2.6 年即可回收机组投资，而单级闪蒸系统需要 3 年时间回收机组成本。由此可见该小型地热发电站，使用两级闪蒸系统较为合理。

4. 结论

- 计算结果表明，在本文的假定工况下两级闪蒸系统的单位热水发电量、资源利用效率、电站净效率均高于单级闪蒸系统、单级双工质系统和两级双工质系统；
- 对于热水温度较低 (<130℃) 的地热发电系统，单级闪蒸净发电量高于两级双工质和单级双工质系统；
- 本文针对某地热发电案例分析得出，对于该小型地热电站，两级闪蒸系统比单级闪蒸系统经济效益好。

References (参考文献)

[1] Zhi-jian WU. New energy and renewable energy utilization [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2006.P237—243
吴治坚，新能源和可再生能源的利用[M]，北京，机械工业出版社，2006，P237-243

[2] GAO Xue-wei, LI Nan, KANG Hui, The Development Status of Geothermal Power Technology[J], *Electric Power Survey & Design* 2008,06(03),P59-62
高学伟，李楠，康慧，地热发电技术的发展现状[J]. 电力勘测设计, 2008,06(03), P59-62

[3] WU Zhi-jian, GONG Yu-lie, The single stage energy conversion system in waste heat power generation[J]. *Renewable Energy Resources*, 2009,27(6), P105-108
吴志坚，龚宇烈等，余热发电单级能力转换系统[J]. 可再生能源, 2009,27(6), P105-108

[4] Valgardur Stefansson, Investment cost for geothermal power plants[J], *Geothermics*, 2002,31, P263-272.