

2121 2
34219

Huai lai

Direfadian



为适应长期连续运行和试验工作的要求，一九七三年进行了设备改装和完善。主要是更换凝汽器，修建简易喷水池，改进汽轮机进汽机构等。自一九七三年十月至一九七四年一月完成了1800小时的连续运行。进行了变工况运行试验（并网、变负荷、孤立、调相）、换热器试验、喷水池试验、运行事故处理、汽机密封考核等多种试验项目。电站最大出力达285瓩（厂用电率31%），共发电31万度（除试验外，满负荷运行约1400小时），除厂用电、检修及生活用电外，向电网净输出电量17万度。在长期运转中，机组平稳，汽机及凝结泵密封状态良好，继电保护反应灵敏，动作可靠。至一九七四年七月，共开机九十余次，累计运行三千四百余小时，总发电量为57万度，净输出27万度。

怀来地热试验电站的第一阶段，以氯乙烷为工质的试验任务基本完成。证明以低于100℃地热水为能源的低沸点工质法电站可以发电，发正电，能持续供电，有可能发展扩大。几年来的科学实践为我国地热发电事业积累了些有用的资料，解决了某些问题，但它是一座小型试验装置，地热水发电仍处于研究阶段，工作仅仅是开始。有关工质选择、换热系统改进、电站效率的提高、运行经济性的核定等问题，是怀来电站今后的试验任务。希各级领导同志和全国从事地热发电的广大同志们批评和帮助。

毛主席语录

要认真总结经验。

在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。

前 言

随着工农业的发展,对电力的需要量逐日增加。当前我国电力主要来自火力发电厂,燃烧煤或石油,使所产生的热能转换成电能以供应用。我国有蕴藏丰富的煤和石油,但自然分布并不均衡,而且又是宝贵的化工原料,所以研究利用地热等新能源是很有意义的。

地球是一个庞大的热库。据估计,平均每年地球内部所含有的长半衰期元素(半衰期为100万年至100亿年)产生 5×10^{20} 卡热,约相当七亿吨煤的发热量,仅地表以下三公里内所储存的热量就等于两万九千亿吨煤。所以,近十几年来,地热发电引起了世界上许多国家的重视。

我国地热资源很丰富,各种不同成因类型的热泉遍布全国各地,据不完全统计,仅涌出地表的就有二千多处。世界上产生天然蒸汽的地区比较少,大多是100℃以下的地热水,因此,研究利用地热水发电是开发利用地热能的重要方面。

一九七一年二月在国务院科教组领导下,成立了有关部、局、厂、所、院、校参加的怀来地区地热调研组,展开了对河北省怀来县境内的后郝窑地热田的普查勘探和开发利用工作。由水电部具体负责,水电部科研所、下花园发电厂、北京电力局中心试验所、河北电力学院、北京大学等单位组成怀来地热发电组,着手建立怀来地热试验电站。四年来,地热发电组的全体同志,在毛主席革命路线的指引下,认真读马列的书和毛主席著作,以大庆为榜样,发扬“一不怕苦,二不怕死”的彻底革命精神,坚持“自力更生”,“艰苦奋斗”,“破除迷信,解放思想”。实行生产单位、科研机关、大专院校及工人、干部、科技人员两个三结合,建成了电站,开展了试验工作。

怀来地热试验电站的主要任务是进行工业性的地热水发电试验,取得数据,为研制合适的机组和建立更大容量的电站创造条件。本着因陋就简、先改后造的精神,电站十几种主要设备,除深井泵及一台蒸发器外,皆为修旧利废,改造而成。

电站以地下水为能源,以低沸点物质一氟乙烷为工质,设计要求85℃的地热水流量185吨/时,电站出力200瓩。一九七一年九月份建成投入运行,年底发电能力达到116瓩。于一九七二年十一月,经多次改进后,在地热水进厂温度为78℃左右(比设计值低7℃),水量180~200吨/时,循环水量仅为设计要求三分之二等不利条件和循环水温比设计值低7℃的有利条件下,达到了设计出力200瓩。此后多次进行了36小时、72小时、618小时等连续运行。在618小时的试运行中最大出力达240瓩(厂用电率36.3%),总发电量为13万度,向电网输出7万度以上。

目 录

前 言

一、热力系统的设计原理	(1)
1—1 发电方式	(1)
1—2 电站容量的估计	(2)
1—3 发电方式的比较与选择	(5)
1—4 工质的选择	(7)
1—5 氯乙烷焓熵图的制作及热力性质数据的外延	(8)
1—6 设计背压的选择	(11)
1—7 工质最佳初参数的选择	(13)
1—8 管道系统的设计	(14)
1—9 地热水电站的各种效率	(16)
二、热力系统的计算方法	(18)
2—1 单级蒸发系统的计算	(18)
2—2 变工况计算	(22)
三、汽轮机	(27)
3—1 汽轮机转速与级数的选定	(27)
3—2 通流部份的改造	(28)
3—3 反动度的核算	(31)
3—4 汽轮机进汽机构的改造	(33)
3—5 汽轮机改造部件的机械强度	(36)
3—6 改造中的几个问题	(38)
3—7 氯乙烷流量锥的绘制	(39)
四、密封问题	(41)
4—1 管路、阀门及汽缸接合面的密封	(41)
4—2 汽轮机、凝结泵、输液泵的轴端密封	(41)
五、换热器	(52)
5—1 换热器的计算	(52)
5—2 换热器的型式	(53)

5—3 换热方式	(54)
5—4 设计参数对换热面积的影响	(55)
5—5 设计换热器时换热端温压的选择	(57)
5—6 过热器	(60)
5—7 蒸发器联接方式的理论分析	(61)
六、化学问题	(65)
6—1 地热水成份分析	(65)
6—2 热力系统的腐蚀	(66)
6—3 防腐问题的探索	(68)
七、电气部份	(70)
7—1 电气主要设备的选择与布置	(70)
7—2 运行方式	(72)
八、运行情况及分析	(74)
8—1 一般情况	(74)
8—2 运行数据及分析	(75)
8—3 汽轮机运行情况	(78)
8—4 换热器运行情况	(81)
九、国内外地热发电简况	(83)
9—1 国内地热发电简况	(83)
9—2 国外地热发电简况	(87)
十、体会与设想	(91)
10—1 对地热水发电的看法	(91)
10—2 从怀来地热试验电站看地热发电的特点	(91)
10—3 怀来地热试验电站的特点、问题及今后任务	(92)
主要符号表	(93)
附表 1 氯乙烷 (C₂H₅Cl) 液体及饱和蒸汽性质表	(95)
附图:	
1 厂内外照片	(96)
2 怀来地热试验电站热力系统图	(98)
3 地热电站电气一二次系统图	(99)
4 怀来地热电站全貌	(100)
5 氯乙烷 (C ₂ H ₅ Cl) 蒸汽饱和区焓熵图	(101)

一、热力系统的设计原理

1-1 发电方式

利用低于 100℃ 的地下热水发电，目前基本上采用的有两种方式，即减压扩容法和低沸点工质法。在扩容法中（图 1），热水先被引入除气器中，维持与热水初温相应的饱和压力，抽除水中原含的不凝气体，然后进入扩容器。在扩容器中维持一定的真空，使热水进入后少部分变成水蒸汽，而其它液态水被降温排出。蒸汽由扩容器进入汽轮机做功，乏汽排入凝汽器与循环水直接混合被冷却成水后一起排出。

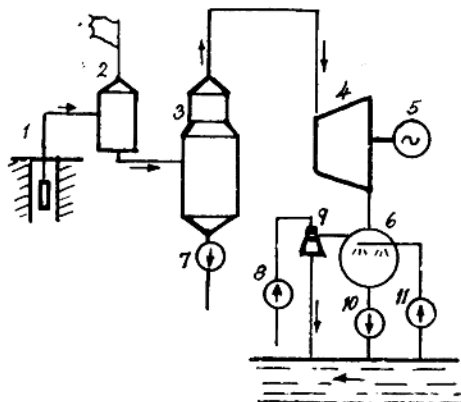


图 1 扩容法热力系统

- 1——热水井 2——除气器 3——扩容器 4——汽轮机
5——发电机 6——凝汽器 7——热水排水泵 8——工业水泵
9——抽气器 10——凝结泵 11——循环泵

低沸点工质法是利用某种低沸点物质（如氯乙烷、异丁烷、正丁烷或其它氟里昂类物质）作为汽轮机的工质（图 2），地热水只作为载热体，首先在蒸发器中加热低沸点工质，使之变成具有一定压力的蒸汽进入汽轮机做功，乏汽排入凝汽器被循环水冷凝成液体，由工质循环泵（或称凝结泵）将其送入蒸发器完成循环过程。为了充分利用从蒸发器中排出热水的热量，液体工质在进入蒸发器前先在予热器中进行予热，以回收部分排水的热量。

为了提高热水中热量利用率，可采用工质的多级蒸发方案（图 3）。热水先进入压力最高的蒸发器（或称第一级蒸发器），然后依次进入压力较低的蒸发器，工质分别在

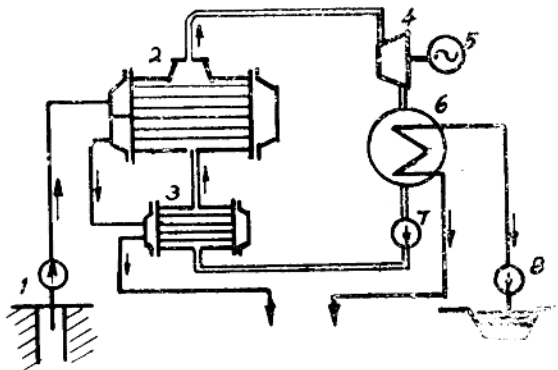


图2 低沸点工质法热力系统

- 1——热水井 2——蒸发器 3——予热器 4——汽轮机
5——发电机 6——凝汽器 7——凝结泵 8——循环水泵

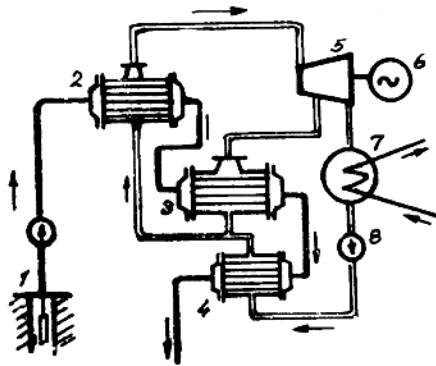


图3 两级利用方案热力系统

- 1——热水井 2——一级蒸发器 3——二级蒸发器 4——予热器
5——汽轮机 6——发电机 7——凝汽器 8——凝结泵

几个压力不同的蒸发器中蒸发，分别进入汽轮机作功。多级蒸发方案虽能提高热水利用效率，但增加了设备和运行的复杂性。级数太多时，每增加一级的收益渐减，因此，一般不超过二至三级。对于扩容法，由于设备尺寸大，热力系统负压运行，则使用多级方案更为困难。

基于上述，条件不同所用方法亦有变化，如某地热电站使用的中间介质法中，用蒸馏水作为工质，然后扩容形成蒸汽，导入汽轮机作功。

1—2 电站容量的估计

地热电站的容量依地热资源条件而定。

地热蒸汽与地热水在发电能力上有很大的差别，蒸汽的可用能比水大得多，损失较

小，且直接可作为工作介质。所以每吨蒸汽的发电能力提高，其值可由下式计算：

$$e_i = 1.16\eta_3 \left[(i_0'' - T_k S_0'') - (i_k' - T_k S_k') \right] \quad (1)$$

地热水的可用能低，在蒸发器或扩容器产生蒸汽的过程中亦有热损失。因此，每吨热水的发电能力比蒸汽小得多，其值可用下式估算：

$$e_T = 1.16\eta_3 \left[\frac{T_{00}}{T_k} - \frac{n+1}{\varphi_m} \left(\sqrt[n-1]{\frac{T_{00}}{T_k}} - 1 \right) - 1 \right] \quad (2)$$

对于扩容法： $T_{00} = T_{r1}$

对低沸点工质法： $T_{00} = T_{r1} - \Delta t_0$ ($\Delta t_0 = 3 \sim 5^\circ\text{C}$)

对于表面式凝汽器： $T_k = T_{x1} + 10$

对于混合式凝汽器： $T_k = T_{x1} + 5$

扩容法一般取 $T_k \geq 298^\circ\text{K}$

式(2)适用于临界温度高于热水初温 $30 \sim 40^\circ\text{C}$ 以上的各种工质。各种蒸发级数的估算误差在 $\pm 10\%$ 左右。

为便于估算，将式(2)的计算结果绘成图4和图5。图4适用于单级蒸发方案，

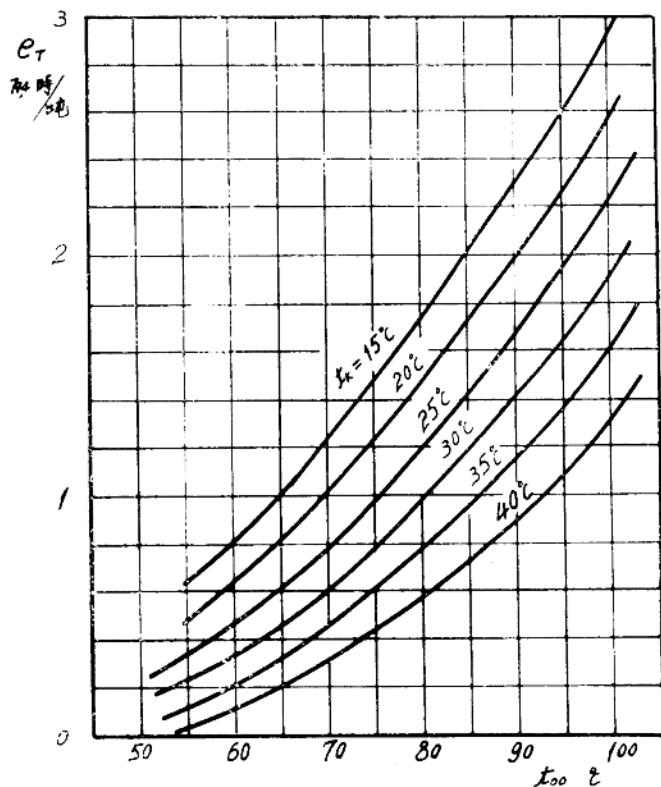


图4 单级蒸发方案每吨热水的发电量与温度的关系曲线。

取 $\eta_3=0.5$ ，可直接根据折合热水温度 ($^{\circ}\text{C}$) 和工质凝结温度 ($^{\circ}\text{C}$) 由图查出每吨热水的发电量。若为多级蒸发方案，则可借助图 5 查出 $\eta_k \eta_t \eta_3$ 值然后按下式求取：

$$e_T = 1.16 (t_{00} - t_k) \eta_k \eta_t \eta_3 \quad (3)$$

估算可取 $\eta_3=0.5\sim 0.7$

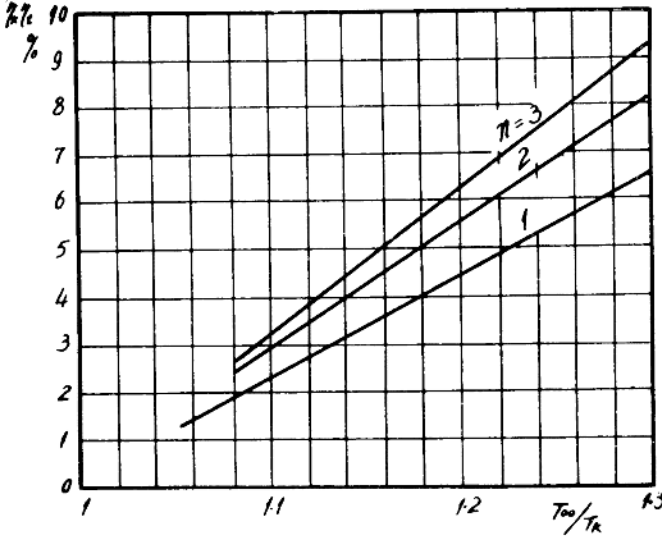


图 5 多级蒸发 $\eta_k \eta_t$ 曲线

怀来地热电站设计功率为 200 瓩，单级蒸发方案，取循环水初温 $t_{x1}=15^{\circ}\text{C}$ ，热水实际温度 $t_{r1}=77^{\circ}\text{C}$ ，折合热水温度 $t_{00}=t_{r1}-3=74^{\circ}\text{C}$ ，工质凝结温度 $t_k=t_{x1}+10=25^{\circ}\text{C}$ ，查图 4 可得 $e_T=0.98$ 瓩时/吨热水所以需热量 $B=\frac{N}{e_T}=\frac{200}{0.98}=206$ 吨/时，实际运行时热水量为 210 吨/时左右，估算值与实际运行值基本相同。

由图 4 图 5 可看出：

(1) 每吨热水发电能力的大小与热水初温有密切的关系。当 $t_k=25^{\circ}\text{C}$ 情况下，由图 5 可知，热水初温为 75°C 时 $e_T=1$ 瓩时/吨；热水初温为 60°C 时 $e_T=0.45$ 瓩时/吨。可见热水初温过低，发电的经济性大大下降。按图估算的是机组的毛发电量，如果再扣除厂用电消耗，则低温热水的发电经济性会进一步降低。

(2) 大气温度不同，对每吨热水发电能力影响也很大。当热水初温为 90°C ，由于大气温度的变化，工质凝结温度由 20°C 上升到 40°C 时，每吨热水的发电量由 1.97 瓩/时下降到 0.9 瓩/时。因此，地热水发电能力会因地区平均温度和季节的不同，发生较大的波动。

(3) 由单级蒸发变成多级蒸发方案可以显著地提高热水发电能力。若以热水初温 85°C 为例，从图 5 可知，由单级改为二级蒸发，发电能力可提高 25%。若采用三级蒸发，则进一步多发的电量相当于单级的 10% 左右。级数越多，每增加一级发电量增益渐

减，徒增投资和设备的复杂程度，故一般采用二至三级为宜。

1—3 发电方式的比较与选择

(1) 一般比较

a 在地热水水质允许时，采用扩容法可免除购买、运输、补充、储存低沸点工质等问题。对于离低沸点物质产地远，交通不便的地区，发展地热电站是有利的。

b 在扩容法中可用混合式蒸发器（扩容器）和混合式凝汽器，而低沸点工质法中需用具有较大换热面积的换热器。

c 由于扩容法在蒸发端和冷凝端均采用混合式换热器，换热端差 Δt_0 、 Δt_k 趋于零，使折合热水初温提高，工质凝结温度降低，可以提高发电能力。

设热水初温为 85°C ，循环水初温为 25°C 情况下两种方式发电能力的比较：

对于低沸点工质法（如有予热器）：

$$\text{折合热水初温 } t_{00} = 85 - 3 = 82^\circ\text{C}$$

$$\text{工质凝结温度 } t_k = 25 + 10 = 35^\circ\text{C}$$

由图 4 查得： $e_T = 0.85$ 千瓦时/吨

对于扩容法：

$$\text{折合热水初温 } t_{00} = 85^\circ\text{C}$$

$$\text{工质凝结温度 } t_k = 25 + 5 = 30^\circ\text{C}$$

同样由图 4 查得 $e_T = 1.17$ 千瓦时/吨

由上述可知，扩容法比低沸点工质法的发电能力高 30% 左右。

在扩容法中，工质凝结温度一般限制在 25°C 以上，低于此温度时，由于水蒸汽比容过大，真空度过高，在技术上存在一定困难。在低沸点工质法中，只要工质选择适当，则可有效地利用低温循环水。如设热水初温为 85°C ，当循环水初温为 5°C 时，由图 4 可知，低沸点工质法的发电量可达 1.72 千瓦时/吨，而扩容法仅为 1.4 千瓦时/吨，前者比后者高 22.8%。

d 厂用电消耗方面，扩容法凝汽泵消耗功率较小（由于水蒸汽焓降大、汽耗率低、泵扬程小），在同样的凝结温度情况下，循环泵的功率也较小，但需要电耗较大的抽气泵以维持凝汽器的真空。当热水含气量较高时，会更显著地增加厂用电的消耗。扩容法中还需增加热水的排水泵。

e 扩容法中的汽轮机或者叶轮大或是级数多，增加了汽轮机的复杂程度。单机极限功率较小，管道阀门粗大，不易制成容量较大的机组。在这方面，低沸点工质法显示了很大的优越性。

为了进行比较，以氟乙烷工质为例与扩容法作如下的分析。

(2) 汽轮机的复杂程度

为保证汽轮机的效率，要求有一定的叶轮尺寸和级数，这两者的关系用“柏生系数”来表示（图 6）。

$$\text{即: } y = \frac{\sum u^2}{H_0} \quad (4)$$

式中: $\sum u^2$ ——各级叶轮圆周速度的平方和

H_0 ——总的理想焓降大卡/公斤

由图6可知,为保证一定的机组效率就要求具有一定数值的柏生系数,对于同一柏生系数,不同的焓降就对应着不同的 $\sum u^2$ 。用扩容法时,其焓降比用氯乙烷工质的焓降要高5倍左右,即 $\sum u^2$ 要相应高5倍,这就意味着增加汽轮机的级数,或是加大汽轮机的叶轮直径,增加了制造上的困难。如果保持汽轮机的尺寸和级数一定,就必须提高转速以达到所要求的 $\sum u^2$ 值。这种方法的后果,使汽轮机单机极限功率大大下降。下面对极限功率进行比较。

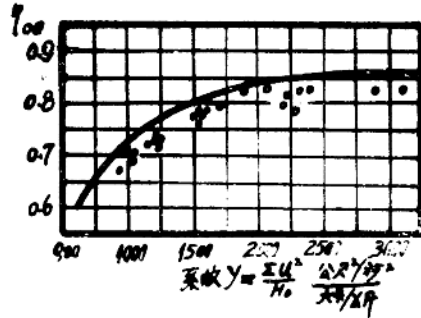


图6 透平效率与柏生系数的关系

(3) 汽轮机极限功率的比较

汽轮机末级叶轮平均直径 d_l 之最大允许值决定汽轮机的极限功率,可由下式表示:

$$N_{\max} = 4.19\pi(d_l)_{\max} \tau \frac{C_2^2}{v_2} H_0 \eta_{oi} \eta_M \quad (5)$$

根据地热发电的特点,以合理的速比来考虑 d_l 之最大值,则:

$$(d_l)_{\max} = \frac{3.06 \times 10^6}{n^2} X_1^2 \max(1-\rho) H_0 \frac{1}{\left(\frac{d}{l}\right)_{\min}} \quad (6)$$

以相同条件(热水初温=85°C,工质凝结温度=25°C, $\frac{d}{l} = 5$, 截面狭小系数 $\tau = 0.9$, $C_2 = 91.5\sqrt{0.04H_0}$, $\eta_{oi} = 0.8$, $\eta_M = 0.95$)对扩容法和氯乙烷工质法计算(表1),结果表明,低沸点工质法的汽轮机尺寸小而极限功率较大。

表1 汽轮机极限功率与相应末级叶轮直径的数值

电站方式	扩 容			氯 乙 烷			
	汽轮机型式 复速式	冲击式	反动式	复速式	冲击式	反动式	
极限功率	3000	288	735	735	570	2280	4560
吨	1500	1150	2940	2940	2280	9100	18300
末级叶轮直径	3000	1000	1600	1600	419	836	1180
毫米	1500	2000	3200	3200	838	1672	2360

(4) 主蒸汽管道阀门尺寸的比较

设两种发电方式的容量相同，工质蒸汽管路的相对压损相等，分别以角码“1”和“2”表示扩容法及低沸点工质法，其管道直径之比可用下式表示：

$$\frac{d_1}{d_2} = \sqrt{\frac{H_{02}}{H_{01}}} \sqrt[4]{\frac{p_2 v_1}{p_1 v_2}} \quad (7)$$

设热水初温为85°C，工质凝结温度为25°C，用上式计算可得：

$$\frac{d_1}{d_2} = 2.74$$

计算表明，扩容法的主蒸汽管路直径相当氯乙烷的2.74倍。怀来电站的主蒸汽管直径为240毫米，改用扩容法，则可达650毫米。如果建更大容量的扩容法电站，管路粗大的问题将更严重。

综合上述，扩容法的优点在于以水为工质，有可能使用混合式换热器，可能节约金属材料。但对地热水的品质要求较高，需含气量少，矿化度低，不易结垢。低沸点工质法的汽轮机容易制造，单机功率较大，并可获得较高的内效率。管道、阀门的尺寸也比较小。但需要较大的换热面积和合适的工质来源。

怀来地热电站采用低沸点工质法，目的在于研究这方面的问题，为我国设计、建造较大容量的机组积累资料。怀来电站所选用的工质来源方便，运输条件较好，价格适中。

1—4 工质的选择

采用低沸点工质法时，恰当的选取工质，对电站的投资、运行和效率都有重要影响。

在常压下，沸点低于水的物质可统称为低沸点物质。其中正丁烷、异丁烷、氯乙烷、氨及其他烷烃类（包括氟里昂系列）物质，皆可作为发电的工质。

选择低沸点工质应考虑以下几方面的条件：

- (1) 来源丰富，价格便宜，便于运输。
- (2) 化学性质稳定不易分解，质纯，不腐蚀设备。
- (3) 毒性小，不燃不爆，运行安全可靠。
- (4) 工作压力适中。蒸发端压力不太高，无需笨重的高压容器，凝结端在寒季也稍高于大气压力，可不设抽气器。
- (5) 热力性能良好。根据相同的条件（设地热水初温为70°C，循环水初温为20°C，机组效率为0.7等）对几种工质进行了发电性能的比较计算（表2）。工质不同，发电量各有差别。

热力系统中的热交换过程与工质的性质有关。选用的工质，应具有较大的传热系数，较高的液体重度 γ 值，较小的粘度系数 μ 和表面张力系数。以相同的给定条件（热水初温85°C，工质的蒸发温度为55°C、凝结温度为25°C，循环水进口温度为15°C、出口为

表 2

几种工质发电性能比较

项 目	工质名称	F-11	F-12	F-21	F-22	丙烷	丁烷	氯乙烷	F-113	F-114
蒸发温度 °C		46	50	45	50	45	50	50	50	50
工质量 公斤/吨热水		468	504	378	416	278	190	174	437	538
排水温度 °C		49.4	52.5	48.6	52.2	47.4	52.7	53.5	52.9	52.2
发电量 千瓦时/吨热水		0.805	0.87	0.87	0.90	1.00	0.822	0.81	0.806	1.04

20°C, 蒸发端水侧流速 0.5 米/秒、凝结端为 1 米/秒), 水侧按对流换热、管内受迫运动公式计算, 工质侧按通用的沸腾放热与凝结放热的简化式, 比较几种工质 (表 3), 可见其传热系数互不相同。

表 3

几种工质传热系数的计算比较表

工质名称	项目	沸腾放热简化计算式	蒸发端传热系数 K 大卡/米 ² ·°C·时	凝结端传热系数 K 大卡/米 ² ·°C·时
F-22		$\alpha_2 = 2.76q^{0.7}$	1340	1110
丙 烷		$\alpha_2 = 2.44q^{0.7}$	1160	900
F-12		$\alpha_2 = 2.24q^{0.7}$	1050	995
异丁烷		$\alpha_2 = 1.82q^{0.7}$	805	845
氯乙烷		$\alpha_2 = 1.78q^{0.7}$	780	1060
丁 烷		$\alpha_2 = 1.69q^{0.7}$	706	940

1—5 氯乙烷焓熵图的制作及热力性质数据的外延

工质热力性质数据是热力计算的依据, 使用焓熵图则更方便。按已有的数据, 我们绘制了氯乙烷焓熵图 (附图 5)。

氯乙烷可用做制冷剂, 我们所得的数据只限 50°C 以下的区域, 对地热电站的热力计算是不够的。因此, 我们在原有数据的基础上用近似法将氯乙烷的数据外延至 100°C。

(1) 饱和区焓熵图的绘制

绘制焓熵图的任务就是根据表列数据在 $i-s$ 图上绘出等温线、等压线、饱和蒸汽线、等乾度线、等容线等各等值线。

a 等压线及饱和蒸汽线。根据热力学基本定律, 任何工质的各参数存在下列关系:

$$Tds = di - Avdp$$

当 $dp = 0$ (即等压线)

$$\text{即: } \left(\frac{\partial i}{\partial s} \right)_P = T \quad (8)$$

式(8)说明了等压线上各点在*i-s*图上的斜率等于该点的绝对温度值。由于饱和区等压线上的温度不变,所以等压线上各点的斜率相等,即等压线为具有某一斜度的直线。压力值越高,斜度越大,诸等压线在*i-s*图上自左而右呈扩散状。等压线上的*T*不变,式(8)可写成:

$$\begin{aligned} \Delta i &= T \Delta s \\ \text{或 } i_{T_1}'' - i &= T_1 (s_{T_1}'' - s) \end{aligned} \quad (9)$$

式中*i*_{T₁}'', *s*_{T₁}'' 为 *T*₁ 温度下的饱和蒸汽的焓和熵,即确定了该温度下的饱和蒸汽点。任选一个 *s* 值,使 *s*' < *s* < *s*'', 从式(9)求得相应的 *i*, 所得的 *i* 和 *s* 确定了焓熵图上的另一点。将两点相联,即绘出了等温线 *T*₁ 和相应的等压线。同样绘出 *T*₂、*T*₃……等压线,相联各饱和蒸汽点,即得乾饱和蒸汽线。

b 等乾度线。任选一乾度值为 *X*, 则在等压线上的焓有:

$$i_x = i' + rX \quad (10)$$

将各点的 *i_x* 值相联,即为 *X* 值的等乾度线。

c 等容线。选完在某一压力下的 *v_x* 值,可按式:

$$X = \frac{v_x}{v''} \quad (11)$$

求得乾度 *X* 值,再由式(10)求得相应的 *i_x* 值,将各点 *i_x* 相联即为等容线。

(2) 氯乙烷饱和区热力性质的外延。

a 已知氯乙烷的数据有:

-30°C至55°C的氯乙烷饱和区热力性质表;

氯乙烷分子量 *M* = 64.52

临界温度 *t_{kP}* = 186.6°C

临界压力 *P_{kP}* = 53.7 ata

间隔较大的饱和压力和饱和温度的对应值(表4):

表4 氯乙烷的某些温度压力对应值

饱和压力 <i>P_s</i>	ata	1	2	5	10	20	30	40	50
饱和温度 <i>t_s</i>	°C	12.3	32.5	64	95.6	127.3	149.5	167.0	180.5

b 饱和压力和饱和温度关系的外延。饱和压力和饱和温度的关系可用下式表示:

$$\lg P_s = -\frac{A}{T_s} + B \lg T_s + C \quad (12)$$

用表 4 数据代入，可求得：

$$A = 830.4956$$

$$B = 3.08485$$

$$C = -4.66627$$

式 (12) 可写成：

$$\lg P_s = 3.08485 \lg T_s - \frac{830.4956}{T_s} - 4.66627 \quad (13)$$

用式 (13) 可求得各饱和温度下的饱和压力。

c 比容的外延。饱和蒸汽的比容可由下式求得：

$$v'' = \frac{ZRT_s}{P_s} \quad (14)$$

式中压缩因子 Z ，因工质不同而异。同一工质的 Z 也随温度、压力变化。在外延时我们所用的压缩因子曲线取自 J. H. Keenan 《Thermodynamics》第 20 章。

$$\text{氯乙烷的气体常数 } R = \frac{848}{M} = 13.1 \text{ 公斤} \cdot \text{米} / \text{公斤} \cdot \text{度}$$

d 饱和液体焓和熵的计算公式分别为：

$$i' = C_{pt_s} \quad (15)$$

$$S' = C_p \ln \frac{T_s}{273.2} \quad (16)$$

各资料所介绍的定压比热 C_p 值差别比较大，考虑到绘制 $i-s$ 图上饱和线的平滑性和比热随温度变化的特点，对于氯乙烷，我们取较高不变的数值 $C_p = 0.431$ 大卡/公斤 \cdot $^{\circ}\text{C}$ 。

e 饱和蒸汽的焓和熵可由下式求得：

$$i'' = i' + r \quad (17)$$

$$S'' = S' + \frac{r}{T} \quad (18)$$

对于各种物质汽化潜热 r 的变化有一定规律，在临界温度以下，处于相同温度点的两种物质之摩尔汽化潜热比值是一个常数。以水和氯乙烷为例，如果：

$$t_{kp1} - t_1 = t_{kp2} - t_2 \quad (19)$$

$$\text{则：} \frac{M_2 r_2}{M_1 r_1} = k \text{ (常数)} \quad (20)$$

以水为基准的氯乙烷 $k = 0.725$

这样，以水为基准先求得不同温度下氯乙烷的汽化潜热，再用式 (17) (18) 求得该温度下蒸汽的焓和熵。

按上述方法所得氯乙烷的 55°C 至 100°C 的热力性质数据列于附表 1。

1—6 设计背压的选择

工质凝结温度 t_k 取决于循环水初温 t_{x1} ，循环水在凝汽器中的温升 Δt_x 和换热温压 Δt_k ，其关系式为：

$$t_k = t_{x1} + \Delta t_x + \Delta t_k \quad (21)$$

当地热电站采用表面式换热器时， Δt_k 一般取 5°C 左右。因此，决定 t_k 的问题，实际上是如何选取循环水设计初温与设计温升的问题。

循环水初温 t_{x1} 因地区、气候条件变化而不同。一些地区全年温度变化平缓，则取年平均温为设计初温是合适的。另一些地区，夏季有较丰富可靠的水电，地热电站主要在冬季枯水季节发挥作用，可考虑较低的温度为设计初温。对于寒暑变化较大，又要求电站全年输出功率比较稳定的地区，则对于给定的热量按夏季平均温度设计似更合适。

地热水发电是“低位能”发电，因此，冷源情况的变化对机组出力影响很大。图7是怀来地热电站根据运行实测数据绘制的，循环水初温按年平均温度 15°C 设计，额定出力为200瓩；冬季循环水初温 0.5°C 背压为1.1ata，机组出力为285瓩；循环水初温 20°C 左右，出力下降到140瓩左右；夏季循环水初温可高达 30°C ，出力甚至在100瓩以下。为保证夏季有相当的净功率输出，减小全年功率的波动，按夏季平均温度设计是合理的，电站的额定容量应取夏季数值。

按夏季温度设计的另一优点是可以减小发电机的装机裕量，缩减换热面积和汽轮机末级尺寸，从而降低投资。

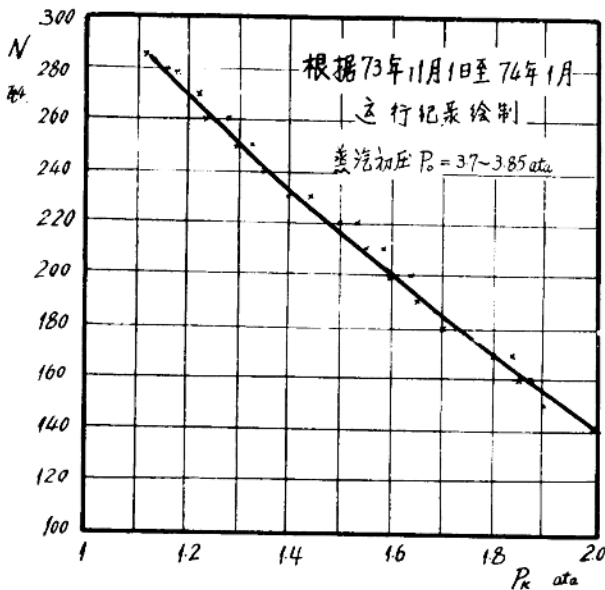


图7 背压与机组出力关系