

虹吸进水式电站机组过渡过程试验研究

陈其秋

(水电部成都勘测设计院)

内 容 提 要

本文介绍了新林、麻柳两电站虹吸断流甩负荷时的机组过渡过程现象，并对水轮机前未设进口阀的虹吸进水式电站，在断流甩负荷遇调速器失灵时，压力钢管排空及机组退出飞逸过渡过程的解析进行了探讨。对长压力管道的单管引水式虹吸电站，取消水轮机前进口阀的研究有一定意义。

一、前 言

虹吸式电站采用虹吸管喉部的抽气和充气来实现虹吸管的进水和断流。与设进水闸门比较，其设备简单，维护方便，运行可靠，且无进水口防冰冻的问题，故在中小型水电站得到广泛的应用。

虹吸管抽气以往采用真空泵或水力射流泵，峨边新林电站首次采用水箱的充放水来实现虹吸管抽气的新技术。这种抽气方式的特点是水箱布置方便，不受电站地形条件的限制，且机组可在无电源条件下启动，适合山区虹吸电站。

随着虹吸电站的增多，对虹吸断流甩负荷及机组过渡过程的研究也多起来。特别是长压力管道的单管引水式虹吸电站，为缩小厂房，节省投资，水轮机前往往不设进口阀。这种电站断流甩负荷时的水击压力及机组退出飞逸的问题，曾有过不少理论探讨，但都无试验验证。

笔者曾先后在新林、麻柳电站作了虹吸断流甩负荷试验，取得了虹吸进水式电站压力钢管断流排空和机组过渡过程原型试验的一些资料。根据这些资料，结合有关研究文献，进行了理论探讨，并从工程应用出发，得出了单管虹吸进水式电站水轮机前可否不设进口阀的简便判别式，为该类电站的设计提供了一定的定量分析计算依据。

二、新林、麻柳水电站断流甩负荷试验

1. 电站概况

新林、麻柳电站地处峨边山区，均系引水式电站。由于前池、厂房距离远，高差大，采用阀门取水运行维护均不方便，设计中经过反复研究和模型试验，最后确定采用适合电站具体条件的水箱抽气式虹吸进水方式。

表1为两电站的主要参数，图1是新林电站水箱抽气虹吸进水口剖面图。

表 1

电 站 名 称	新 林 电 站	麻 柳 电 站
装机容量 (kW)	2000 × 2	1250 × 2
压力钢管直径 (mm)	φ1200	φ900
压力钢管长度 (m)	465	278
虹吸真空破坏阀	D _g 200 闸阀	D _g 150 电动蝶阀
试验采用的真空破坏阀	D _g 150 电动蝶阀	D _g 150 手动球阀
水轮机型号	HL110-WJ-71	HL133-WJ-71
额定容量 (kW)	2174	1350
设计水头 (m)	127	155.5
设计流量 (m ³ /s)	2.01	1.01
额定转速 (r/min)	1000	1000
飞逸转速 (r/min)	1800	1698
调速器型号	YT-1000	YT-600
关闭时间 (s)	3.8	3.9

2. 甩负荷试验

为了研究甩负荷时虹吸断流削减水击波峰的作用, 新林电站先后进行了虹吸管充气断流与不断流的双机甩负荷试验。其过渡过程示波图(图4)上的接力器行程, 机组转速及蜗壳、钢管水压变化过程线几乎完全一样, 未显出虹吸断流的降压作用。究其原因虹吸管真空破坏阀尺寸小, 开启时间太长(电测 D_g150 电动蝶阀全开时间达 14 s, 而机组导水叶直线全关时间仅 3.8s)。

也就是说, 在真空破坏阀刚刚开启, 虹吸管内水流仍处满流的状态下, 导水叶已经全部关闭, 故二者水击压力无差别。

总结新林电站的经验, 为加速虹吸断流, 麻柳电站试验时在虹吸喉管顶部加装的一直径为 φ 150 mm 的手动球阀, 甩负荷时可手动瞬间全开。

图 2、图 3 为麻柳电站虹吸断流与不断流双机甩负荷机组各参数过渡过程示波图。表 2 为两次甩负荷各参数特征值的对比。

试验指出, 虹吸断流双机甩负荷的钢管、蜗壳水压, 机组转速上升值均较虹吸不断流时小。1*机蜗壳进口最高水压下降了 2.5%, 2*机下降了 3%, , 钢管(离蜗壳最近的1号测嘴)水压下降了 5.3%, 1*机转速下降 3%。显然, 若真空破坏阀过流断面加大, 补气充分, 断流时间缩短, 降压、降速作用将更大; 证明虹吸断流可以改善调保

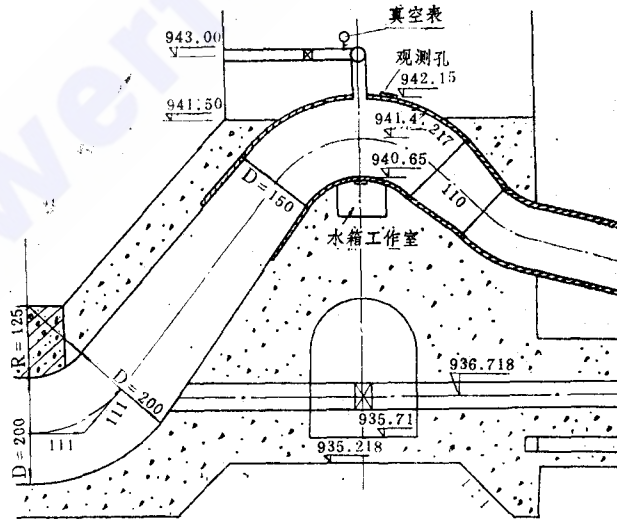


图 1 新林电站虹吸进水口剖面图

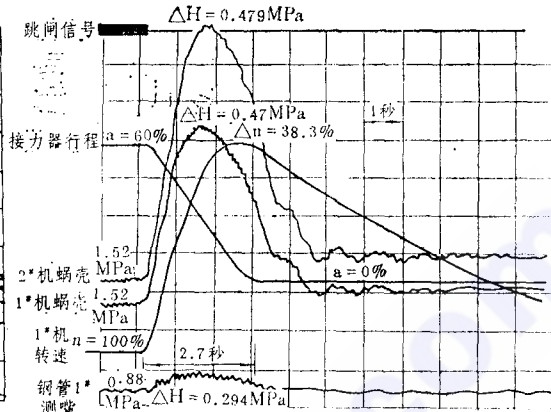
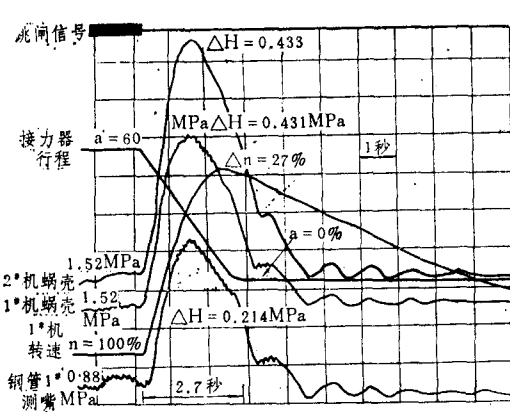


图2 双机甩全负荷过渡过程示波图(虹吸断流)

图3 双机甩全负荷过渡过程示波图(虹吸不断流)

参数。对过水流道长, 调保参数难以过关的单管引水式虹吸电站是很有意义的。

3. 虹吸断流飞逸试验

所谓“虹吸断流飞逸试验”, 是指甩负荷时在调速器失灵, 导水叶拒动的情况下, 采用虹吸管喉部迅速充气断流, 使机组退出飞逸的试验。试验时将调速器切为手动运行, 在油开关跳闸的同时, 手动瞬间全开真空破坏阀, 使虹吸迅速中断。

为确保机组安全, 本次仅作了

表2

项 目	虹吸不断流		虹吸断流	
	1* 机	2* 机	1* 机	2* 机
负 荷 (kW)	1250	1100	1250	1100
导水叶开度 (%)	60	63	60	63
导水叶关闭时间 (s)	2.7		2.7	
转速上升 (%)	30.3		27	
升速时间 (s)	2.3		2.1	
蜗壳水压上升 (MPa)	0.470	0.479	0.431	0.433
蜗壳进口最大水压 (Mpa)	1.990	1.999	1.951	1.953
钢管水压上升 (MPa)	0.294		0.214	
钢管最大水压 (MPa)	1.174		1.094	

表3 断流飞逸试验数据

项 目	两机同甩 100kW 负荷	2*机带 1100kW 负荷, 1*机甩 300kW 负荷, 1*机数据
	1*机数据	
负 荷 (kW)	100	300
导水叶开度 (%)	15	28(2*机为63%)
飞逸转速 (r/min)	1187	1352
转速升高 (%)	18.7	35.2
升速时间 (s)	18.2	10.4
最高转速持续时间 (s)	9	2
• 降速时间 (s)	153.7	100.3
甩前蜗壳进口水压 (MPa)	1.52	1.52
蜗壳水压上升 (MPa)	0.016	
钢管水压上升 (MPa)	0.013	
钢管1*测咀处断流时间 (s)		28.6

• 自最高转速降至额定转速的时间

部分甩负荷的飞逸试验。图4为双机同甩 100 kW 负荷的飞逸试验示波图。图5为1*机甩 300 kW 负荷虹吸断流飞逸试验示波图。甩负荷前, 2*机负荷为 1100 kW, 导水叶开度始终不变, 机组随管内余水排空而退出运行。试验数据见表3。

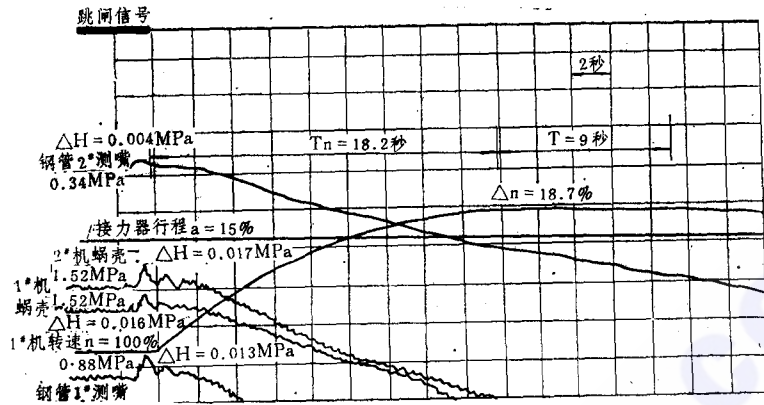


图4 1、2*机同甩100kW负荷飞逸试验示波图（虹吸补气断流）

由图4看出，甩负荷时，尽管1*、2*机导水叶均未动，但甩负荷瞬间，两机蜗壳、钢管水压虽均有升高，但上升值不大，仅1%左右。

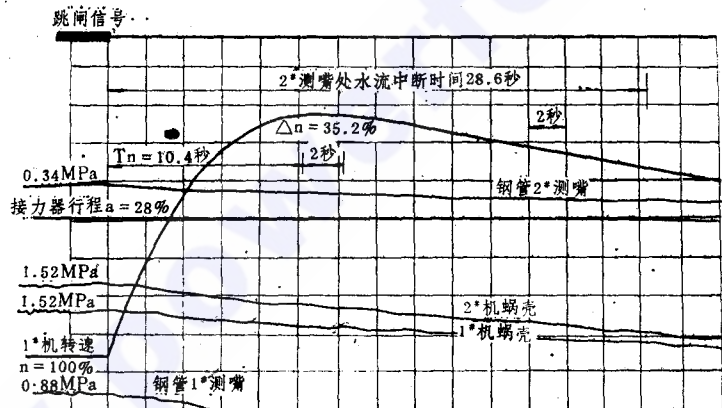


图5 1*机甩30kW负荷飞逸试验示波图（试验前2*机带1100kW负荷，试验时虹吸补气断流）

断流排空过程中，管内水流处于不稳定瞬变流，根据动量原理： $\Sigma P \Delta t = \Sigma m \Delta V$ ，可得断流排空过程中虹吸管末端即蜗壳进口的水击压力为：

$$\Delta H = L / g \cdot \Delta V / \Delta t \tag{1}$$

式中 L ——虹吸管内自由水面至蜗壳进口的水柱长度（m）；
 $\Delta V / \Delta t$ ——单位时间内水流速度变化值（ m/s^2 ）；
 g ——重力加速度（ m/s^2 ）

(1)式 ΔH 的正负视甩负荷水轮机流量的增减而定，即取决于水轮机的流量特性。

对于高水头低比转速水轮机，流量随转速上升而下降。图6为麻柳电站HL 113转轮综合特性曲线，图中等开度线上各点斜率 $\Delta n_1' / \Delta Q_1'$ 为负。甩负荷开始，水轮机工作水头变化很小，单位转速 $n_1' = n D_1 / \sqrt{H}$ 将随转速的上升而增加，单位流量随之减小，水轮机流量 $Q = Q_1' D_1^2 \sqrt{H}$ 相应减小，由式(1)可知，水击压力为正，故蜗壳水压上升。与之相反，低水头高比转速水轮机，流量随转速上升而增加，水击压力为负，

故高比转速轴流式水轮机甩负荷初（导水叶滞后动作的时段内），蜗壳水压是下降的。

上述水压上升现象与用闸阀代替水轮机的虹吸断流模型试验报告中的“仅开启通气孔断流完全不引起水击，压力平稳下降”的结论不一致，图7为不同断流状态下的水击压力对比试验成果，线(3)为通气断流，不关闭阀门的水压变化过程线，其水击压力 ΔH 为零，这显然是由于闸阀未能模拟水轮机特性所致。

从图4还可看到，由于其真空破坏阀的补气作用，虹吸管内压强随之变化，致使补气开始水压出现波动，但很快就平稳下来。

如前所述，水轮机前未设进口阀的单管引水式虹吸电站，当机组甩负荷遇调速器失灵，导水叶不能关闭时，机组将进入飞逸运转状态，即所谓“逸转”。同一般甩负荷转速过渡过程曲线一样，逸转曲线（图4、图5中1*机转速波形图）也有升速、稳定逸转及降速三个阶段。其最大逸转速度（一定导水叶开度下的最大飞逸转速）及逸转历时都与虹吸断流特性密切相关。断流快，余水排空时间短，机组最大逸转速度小，逸转时间短，这是众所期望的断流特性。

虹吸断流特性与虹吸管喉部真空破坏速度有关。即取决于真空破坏阀的通气孔面积，阀的开启速度及管内水流速度。本试验甩300 kW负荷时，手动快速全开 D_g150 球阀，开启时间不到1秒，从甩负荷瞬间球阀全开到钢管2*测嘴处断流，电测虹吸断流时间为28.6秒（图5），由此推算到虹吸管喉部的断流时间为21秒。显然，断流时间太长。仅是部分甩负荷的飞逸试验，若双机带满负荷，管内流速大，水流的挟气能力强，断流时间将会更长。

浙江水科所通过模型试验得出：喉部为圆形的虹吸管，只要真空破坏阀有足够的途径，当瞬时开阀补气断流时，虹吸断流时间为5~10秒，说明麻柳电站 D_g150 蝶阀尺寸太小，为加快虹吸断流，应采用 $D_g200\sim D_g250$ 的真空破坏阀。

实际上，由于阀的尺寸大，真空破坏阀不可能自动瞬间全开，一般自动操作的开启时间为十几秒以上。因此，如何采用自动方式，迅速可靠地进行虹吸断流，是目前的技术难题之一。

有的理论分析认为，最大飞逸转速是在虹吸断流后开始下降的。但由示波图5可以看到，甩负荷后第12.4秒，机组转速开始下降，而到第21秒，喉部才完全断流，转速下降比完全断流提前了8.6秒。这是因为虹吸管通气断流过程中，水流连续性已破坏，

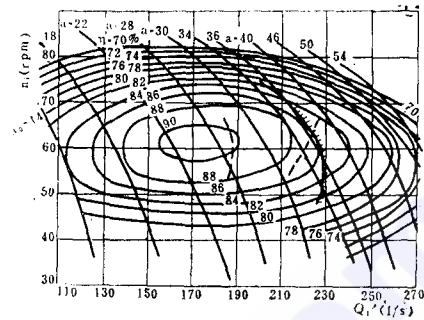


图6 HL133-80转轮综合特性曲线

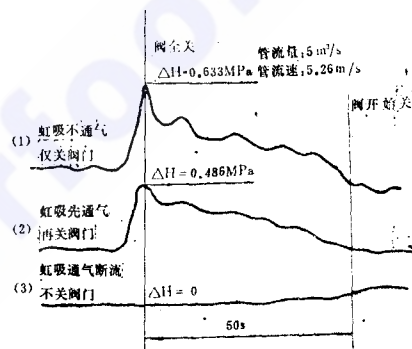


图7 虹吸断流模型试验
（水击压力对比）

管内水流处于堰流状态，因而水头、流量都在减小，即输入水轮机的能量随补气开始而减小，这与甩负荷时导水叶的关闭作用有相似之处，也是快速门防飞逸所做不到的。

三、机组退出飞逸的解析探讨

1. 计算界限

麻柳电站飞逸试验表明，机组甩负荷时，只要真空破坏阀正常动作，虹吸迅速中断，机组处于最大飞逸转速下的逸转时间就不长，且远小于制造厂保证机组零部件不发生有害变形的允许飞逸时间。但对于长压力管道，水轮机前又未设进口阀的虹吸式电站，虹吸断流后的余水排空时间往往较长，致使机组退出飞逸的逸转时间过长，机组旋转零部件就可能因材料疲劳而导致破坏。因此，设计电站时，对机组退出飞逸的问题应作必要的分析论证。

目前，退出飞逸的最低转速和逸转时间的界限尚无具体规定。笔者认为：“鉴于机组超速保护装置的整定值为115%额定转速，故可按115%额定转速作为机组退出飞逸的最低转速界限，而其相应的逸转时间则不应超过机组制造厂的允许飞逸时间，即机组自最大飞逸转速降至115%额定转速的逸转历时不应超过两分钟。

以机组退出飞逸的时间作为其逸转时间，未计及甩负荷后的升速时间 T_a 和稳定逸转时间 T_m 。因为 T_a 、 T_m 均很小，在机组甩满负荷调速器正常关闭导水叶时 T_a 一般为1~5秒， T_m 一般小于2秒，在调速器失灵，导水叶不能关闭，机组进入飞逸状态时，由于机组几乎在不变的起始加速力矩作用下，故加速更快，升速时间就会更短。具有长压力钢管的电站，由于甩负荷后钢管的余水排空时间长，机组退出飞逸的时间也长，在整个逸转历时所占比例很大。为工程应用便于计算，作前述处理是合适的，

2. 解析计算

虹吸断流后，钢管开始排空。在排空过程中，导水叶开度始终不变，水轮机处于相似飞逸工况下运行，其单位飞逸流量、单位飞逸转速保持不变，由此得

$$n_t = \frac{n_{1R'}}{D_1} \sqrt{H_t} \quad (2)$$

式中 n_t ——飞逸转速 (r/min) ;
 $n_{1R'}$ ——一定开度下的飞逸转速，由水轮机飞逸特性曲线查取 (r/min) ;
 D ——转轮直径 (m) ;

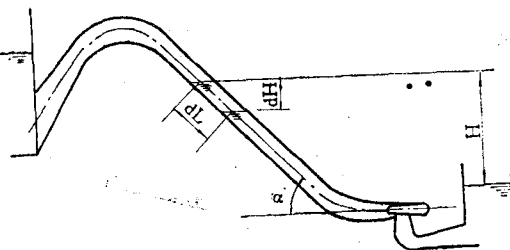


图8 余水排空计算示意图

H_t ——为管内水排空过程中，管内自由水面至下游水面的高差，即水轮机的装置水头 (m)、为便于计算，不考虑流道的水力损失和惯性水头 (麻柳电站实测最大 ΔH 值仅1%左右)， H_t 即为水轮机的工作水头。

在导水叶开度不变的情况下，根据水流连续性的原理，由图8可得

$$F d L = F d H / \sin \alpha = \mu A \sqrt{2g H} dt \quad (3)$$

式中 μ ——流量系数；
 F ——管道断面面积 (m^2)；
 A ——转轮出口断面面积 (m^2)；
 L ——管长 (m)；
 α ——管道倾角。

(3) 式可改写为

$$\frac{F}{\sin\alpha \cdot \mu \cdot A \cdot \sqrt{2gH}} dH = dt \quad (4)$$

(4) 式两边积分得

$$\frac{\alpha F}{\sin\alpha \cdot \mu \cdot A \cdot \sqrt{2g}} (\sqrt{H_{t-1}} - \sqrt{H_t}) = T \quad (5)$$

式中 H_{t-1} 、 H_t ——计算时段 T 起始和终了时的水轮机工作水头 (m)；
 T ——计算时段长，即水头从 H_{t-1} 降至 H 时的余水排空时间 (s)，
 一般取机组退出飞逸的历时。

$$\text{令 } K = \frac{\sin\alpha \cdot \mu \cdot A \cdot \sqrt{2g}}{\alpha F} = \frac{Q'_{1R} D_1^2 \sin\alpha}{\alpha F} \quad (6)$$

式中 Q'_{1R} ——一定导水叶开度下的单位飞逸流量 (m^3/s)，由水轮机飞逸特性曲线上查取。

(6) 式代入 (5) 式有

$$\sqrt{H_t} = \sqrt{H_{t-1}} - KT \quad (7)$$

将 (7) 式代入 (2) 式，令 $H_{t-1} = H_R$ ， $n_t = 1.15n_H$ ，并作适当变换后，可得机组退出飞逸的逸转时间 T 为

$$T = \frac{\sqrt{H_R} - 1.15n_H D_1 / n'_{1R}}{K} \quad (8)$$

式中 H_R ——导水叶一定开度下机组稳定逸转时的水轮机工作水头 (m)；
 n_H ——水轮机额定转速 r/min 。

3. 算例

PL 电站为单管引水式虹吸电站，压力钢管全长 465 m，管径 $\varphi 1.2 \text{ m}$ ，管轴线倾角 16° ，水轮机主要技术数据为：

水轮机型号	HL110-LJ-100	设计流量	4.02	m^3/s
额定出力	4348 kW	额定转速	750	r/min
设计水头	127			m

计算 K 值：

由 $Q'_1 = 0.354 \text{ m}^3/\text{s}$ ， $n'_1 = 63 \text{ r}/\text{min}$ ，查 HL110 转轮综合特性曲线得 $a_0 = 33.0 \text{ mm}$ ，由 a_0 查 HL110 飞逸特性曲线得： $n'_{1R} = 99.5 \text{ r}/\text{min}$ ，
 $K = Q'_{1R} D_1^2 \sin\alpha / 2F = 0.22 \times 1^2 \times 0.28 / 2\pi \times 0.6^2 = 0.0273$

计算退出飞逸的逸转时间 T

$$T = \frac{\sqrt{H_R} - 1.15n_H D_1 / n'_{1R}}{K} = \frac{\sqrt{127} - 1.15 \times 750 \times 1 / 99.5}{0.0273} = 95 \text{ s} < 120 \text{ s}$$

由计算可知该电站水轮机前不设进口阀, 只要虹吸迅速中断, 机组的逸转时间不会超过两分钟。

四、结 语

单管进水式虹吸电站, 当压力钢管较长, 水轮机前又未设进口阀时, 可按本文推导的简便公式来校验机组甩负荷后, 调速器失灵, 导水叶不能关闭时的逸转时间是否超过厂家保证的飞逸时间。这里的逸转时间是指机组退出飞逸的时间, 即从某一导水叶开度下的最高飞逸转速降至 115% 额定转速时的逸转历时, 而厂家保证的飞逸时间是指在最大飞逸转速下, 保证机组另部件不发生有害变形的飞逸时间。长时间的超额定转速运转, 也会造成机组另部件的疲劳损坏和事故隐患, 故对长压力钢管的电站进行前述校验计算是完全必要的。当然, 其计算下限尚可进一步斟酌, 不一定局限在 115% 额定转速。

虹吸真空破坏阀多采用电动蝶阀, 其全开时间一般达十多秒, 很不理想。比较适合的直接启闭式电磁阀, 该阀几乎是瞬时全开。但目前口径都较小, 满足不了要求的补气量。为使用负荷后虹吸迅速中断, 今后应设法提高虹吸真空破坏阀及其自动控制系统的可靠性和速动性, 是确保无进口阀单管虹吸进水式电站机组迅速退出飞逸的关键技术问题, 也有待进一步研究。

(上接74页)

六、结 论

1. 铜街子电站接入系统后, 网架结构较为紧密, 为提高暂态稳定水平及电网过负荷能力, 继电保护装置正确动作尤为重要, 因此每回线配置了两套全线速动保护的方案是正确的。

2. 铜街子 220 kV 系统继电保护设备选型, 结合铜街子电站的特点, 既考虑了安全、可靠、快速、灵敏, 又考虑了经济性及采用新技术的可行性, 经认真分析比较, 最后确定线路采用晶体管“四统一”线路保护屏, 旁路采用微型计算机线路保护屏是合适的。

3. 在设计中, 采用将线路“四统一”屏改为配 YBX-1 型收发讯机, 旁路代役时, 只将收发讯机切至旁路的方式, 完满地解决了旁路微机线路保护与“四统一”线路保护屏的接口问题。