

学术会议报告

关于超高压线路落供电弧自灭特性的研究

(試驗室中的模拟試驗)

曹榮江 朱拱照

袁逸群 牛志良

水利电力部电力科学研究院

1965.11

內 容 提 要

本工作报告分为两个部分。

第一部分介绍了关于潜供电弧自灭特性进行模拟試驗所得的結果，对試驗方案作了說明，分析了試驗結果，給出有关自灭特性的曲綫。

第二部分对本試驗中的若干問題进行了分析：如潜供电弧恢复电压中高频分量的影响；关于引弧电流的影响；起弧电位梯度的影响等。对330千伏綫路的情况进行了初步的估計；对电抗器的影响进行了定性的試驗。

目 录

(一)第一部分 試驗报告

第一节 前言

第二节 关于試驗方案的說明

第三节 关于单相潛供电弧自灭特性的模拟試驗

(二)第二部分 对模拟試驗中若干問題的分析

第四节 試驗室中的模拟試驗与系統試驗的比較

第五节 关于潛供电弧恢复电压的特性；恢复电压中高频分量的影响

第六节 引弧电流（即系統短路电流）对潛供电弧自灭時間的影响

第七节 起弧电位梯度对潛供电弧自灭時間的影响

第八节 330千伏綫路单相潛供电弧自灭特性的估标

第九节 採用电抗器补偿潛供电流值后，潛供电弧的自灭特性

第十节 模拟試驗中存在的問題

参考文献

附图 6 張

第一部分試驗报告

第一节 前言

单相自动重合閘是提高超高压綫路輸送能力的重要措施之一，潛供电弧的持續燃燒妨碍着这一措施的实现。关于潛供电弧参数（即潛供电流值和它的恢复电压）的計祿方法在水利电力部前技术改进局、1959、№41《电力技术报导》“关于防止单相接地时电弧持續措施的研究（第一部分）”一文已有詳尽介紹。在祿出潛供电弧的参数后，即需确定在这种参数下的潛供电弧的自灭特性。为此，前技术改进局（即現电力科学研究院）及清华大学电机系高压教研室均曾对开放性电容性电弧的自灭特性进行了探討。詳見水利电力部技术改进局1960·7·技术工作报告“关于开放性高压自由电弧自灭性能的研究”一文，以及清华大学电机工程系高电压技术专业研究生罗志昌同志 1963·11·畢業論文“单相自动重合閘动作时潛供电弧熄弧过程的研究。”本工作是我院在长江流域规划办公室机电处协助下于1965·2~1965·6期間繼續前一阶段工作所得之結果。

本工作是在10千伏綫路上对超高压綫路的潛供电弧的参数进行了模拟，測定了它的自灭特性。模拟綫路是根据清华大学上述文献中所介紹的綫路进行整定。对若干現象进行了新的概括和解釋。

为了論证本文所用模拟綫路的等价性，根据华东某220千伏綫路的参数整定了試驗回路，进行了校核性的对比試驗；並將試驗結果与在該綫上进行現場試驗（1964·5）所得之三次数据，以及1963·Tr·IEEE·№68·658頁上介紹的在Australia南部系統上所得的五次試驗数据进行了对比。結果表明，它們基本上相符。

本文所列举的其他对比例证足以表明，本文所用的模拟回路具有

相当的等价性，其结果可供参考。

第二节 試驗方案的說明

2-1 試驗条件分类

进行試驗时按照不同的試驗条件将各項試驗进行了分类。分类编号是按实际試驗的先后程序排列的；在书写时按其性质相同者列在一起，如表(2-1)所示。試驗条件中考虑了下列各項因素的变化：

潛供电流值变化在 1.4~6.5 安(有效)之間；

潛供电弧的恢复电压梯度 — 10 千伏/米上下；

风速 — 0~2.6 米/秒；

恢复电压中的高频分量(幅值“ α ”%) — 5~40%；

“ α ”的定义請閱本文第五节5.1

有沒有补偿电抗器(将原电容电流补偿至只有20, 25, 33 安(有效))；

引弧短路电流 — 60~150 安(有效)；

引弧电流的持續時間 — 0.15~0.23 秒。

由于上述各因素的錯綜組合，共分59类。为了能从分散性甚大的数据中得出較為确切的概念，尽可能做到每类試驗能有近20个的有效数据，总試驗次数达1065次。

2-2 試驗回路結綫方式

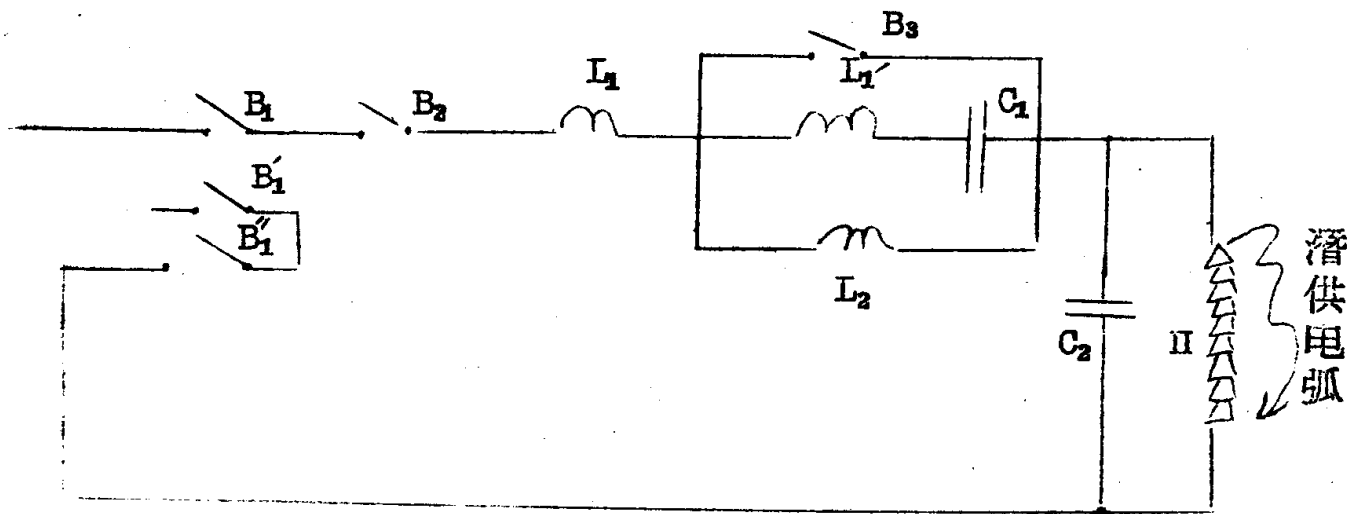


图 (2-1) 模拟試驗回路总图

其中 B_1 、 B_1' 、 B_1'' 分别为保护断路器的三相断口；

B_2 — 合閘断路器，借以實現短路；

L_1 — 模拟的系统等值电感；在本試驗中用以限制短路电流；

B_3 — 短接断路器，在試驗的初始阶段， B_3 在合閘位置，只有 L_1 接在系統中以获得电感性的短路电流；經過 $0.15 \sim 0.23$ 秒后， B_3 分閘，將 ($L_1' - C_1 - L_2$) 投入；

L_1' — 是 L_1 的一部分，用以調节恢复电压中高频分量的比例；

C_1 — 集中电容，用以模拟故障相与其他两相間的电容关系；

L_2 — 补偿 C_1 的並联电抗器；

C_2 — 分压电容，使在弧柱上形成所要求的工频恢复电压；

II — 引弧間隙，一串瓷瓶並以 2 安熔絲引弧。

各参数的求法見本文第四节，或参閱文献 1 · 3 。

关于具体的試驗过程見本文第四节 (4-3) 、 (4-4) 所述。

2-3 各类試驗线路的参数

根据不同的要求整定图 (2-1) 中的各項参数，詳見下表

表(2-1) 模拟试验各方案的总结参数

方案序号	2	4	5	6	7	8	9	10	11	16	41	42	12	13	14
风速 米/秒	0.5~1	1	1	2.1~ 2.2	2.1~ 2.2	1.6~ 2.2	0	0.6~ 0.7	1.3~ 1.47	0	2.46~ 2.59	2.53~ 2.5	1.33~ 1.5	1.35~ 1.4	0
起始弧长 厘米	65	65	37	65	37	65	65	65	65	65	65	50	65	65	35
ωL_2 欧	0			0						0			0		
ωL_1 欧	0			0						0			25		50
ωL_1 欧	108.8			83.8						83.8			83.8		83.8
C_1 微法	3.67 (870)			3.67 (870)						5.53 (576)			5.22 (610)		4.91 (649)
C_2 微法	1.8 (1775)			1.8 (1775)						3.14 (1017)			2.7 (1178)		2.4 (1330)
$I_{k \cdot 3}$ 安	92/85			119/110						119/110			119/110		119/114
I_{II} 安	13.13/1395			12.7/14						20.3/20			19.9/20		19.4/20
U_{II} 千伏	7.01/7.58			6.92/7.2						6.7/6.52			7.02/7.01		7.21/7.13
η %	9.65			7.22						10.9			14.35		17.4

方案类号	15	16	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	37	38
风速 米/秒	1.3 1.4	0	0.74 0.82	1.3 1.3	1.5 1.68	1.4 1.52	0.72 0.84	1.1 1.2	1.1 1.2	2.45 2.6	1.2 1.36	2.56 2.6	2.52 2.6	2.47 2.62	2.5 2.63
起始弧长 厘米	65	65	65	65	65	50	50	50	65	95	95	65	50	65	50
ωL_2 欧	∞														
ωL_1 欧	0														
ωL_2 欧	83.8														
C_1 (微法) (欧)	4.6 (693)	9.35 (341)	9.35 (341)	9.35 (341)											
C_2 (微法) (欧)	2.4 (1330)	3.82 (835)	3.82 (835)	4.6 (692.5)											
安 $I_{k \cdot 3}$ (有效)	119.4 109.5	119.4 109.5	119.4 109	119.4 110											
安 I_{Π} (有效)	19.6 19.8	38.9 41	38.9 41	38.9 40											
安 U_{Π} (有效)	7.23 7.12	7.63 8.0	7.63 8.0	7.3 8.0											
α %	21.8														

[illegible]

方 案 类 号	金属短路	48	49	50	51	52	53	54	55	56	金属短路	57	58	59	金属短路
风速 米/秒		1.44~ 1.66	1.55~ 1.63	1.46~ 1.65	1.52~ 1.62	1.1~ 1.4	1.46~ 1.54	1.48~ 1.55	1.47~ 1.55	1.51~ 1.6		1.48~ 1.53	1.48~ 1.5	1.47~ 1.5	
起始弧长 厘米		65	65	65	65	135	50	50	50	50		50	50	50	
ωI_2 欧	∞	∞	503.3	404.2	595.3	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
ωI_1 欧	0	0	0	0	0	0	155.1	51	0	0	0	0	0	0	0
ωI_4 欧	89.2	89.2	89.2	89.2	89.2	89.2	73.1	73.1	73.1	104.8	104.8	172.2	174.9	59.5	59.5
微法 G (欧)	13.12 (243.5)	13.12 (243.5)	13.12 (243.5)	13.12 (243.5)	13.12 (243.5)	13	4.28 (745)	4.3 (650)	5.53 (576)	5.21 (611)	5.21 (611)	4.6 (693)	4.6 (692)	5.84 (547)	5.84 (547)
微法 C_2 (欧)	6.14 (519)	6.14 (519)	6.14 (519)	6.14 (519)	6.14 (519)	11.94 (267.7)	2.29 (1390)	2.29 (1390)	2.56 (1243)	2.56 (1243)	2.56 (1243)	2.29 (1359)	2.29 (1359)	2.86 (1120)	2.86 (1120)
安 计标值 $I_{k.s}$ (有效) 测量值	112.2 113.5	112.2 104	112.2 102.5	112.2 105	112.2 102.5	112.2 104	137 125	137 127	137 125	95.5 109.8	95.5 104.5	58.1 57.3	57.3 61.4	168 149	168 135~150
安 (有效值) 测量值	—	64.9 64	26.15 25	19.1 19.5	30.98 33	64 60	19.4 20	19 20	19.9 20	19.75 20	—	19.4 17.5	19.3 20.5	20.5 21.0	—
千伏 计标值 U_{II} (有效值) 测量值	—	7.72 8.28	5.75 5.89	4.97 5.24	6.16 6.26	6.31 6.44	7.29 8.05	7.26 7.82	7.13 7.59	7.11 7.36	—	7.28 7.29	7.29 7.57	6.97 6.8	—
α %		39.5	12.4	7.92	15.6	30.2	28.9	16.1	9.95	14.0		22.2	22.6	8.25	

2-4 各方案参数的计算举例

方案49. $\left\{ \begin{array}{l} \ell_0 (\text{起始弧长}) = 65 \text{ 厘米} \\ \text{风速} = 1.55 \sim 1.63 \text{ 米/秒} \end{array} \right\}$

$$L_1 = 0; \quad \omega L_1 = 89.2 \text{ 欧};$$

$$\omega L_2 = 503.3 \text{ 欧}$$

$$C_1 = 13.115 \text{ 微法} (243.5 \text{ 欧}); \quad C_2 = 6.136 \text{ 微法} (519 \text{ 欧})$$

$$|I_{k.3}| = \frac{U_H}{X_{L1}} \frac{10^4}{89.2} = 112.2 \text{ 安 (有效)}$$

$$|I_{II}| = \frac{U_H}{X_{L1} + \frac{X_{C1} X_{L2}}{X_{C1} - X_{L2}}} \frac{10^4}{89.2 + \frac{243.5 \times 503.3}{243.5 - 503.3}} = +26.15 \text{ 安 (有效)}$$

$$|U_{II}| = \frac{U_H}{X_{L1} + \frac{X_{L2} X_{C1}}{X_{C1} - X_{L2}} - X_{C2}} (-X_{C2}) = \frac{10^4 \times 519}{-89.2 + \frac{243.5 \times 503.3}{503.3 - 243.5} + 519} = 5.75 \text{ 千伏 (有效)}$$

由于 $\frac{1}{\omega C_1} < \omega L_2$, 故回路阻抗是电容性的, 其 C_1 与 L_2 并联电路的等值电容为:

$$C'_1 = C_1 - \frac{1}{\omega^2 L_2} = (13.115 - \frac{10^6}{314 \times 503.3}) \times 10^{-6} = 6.79 \times 10^{-6} \text{ 法}$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{L_1 \frac{C_1' C_2}{C_1' + C_2}} = \frac{1}{0.284 \frac{6.79 \times 6.14 \times 10^{-6}}{6.79 + 6.14}} = 1.092 \times 10^6$$

$$L_1 C_1' = 0.284 \times 6.79 \times 10^{-6} = 1.93 \times 10^{-6}$$

$$\alpha\% = -\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \left(\frac{1 - \omega_0^2 L_1 C_1'}{1 - \omega^2 L_1 C_1'}\right) = -\frac{9.87 \times 10^4}{1.092 \times 10^6} \left(\frac{1 - 1.092 \times 1.93}{1 - 314^2 \times 1.93 \times 10^{-6}}\right)$$

$$= 0.0903 \times 1.375 = 0.124 = 12.4\%$$

其他方案的計标与此相似，本报告中从略。計标值見前頁表(2-1)。

試驗时以風扇在橫方向吹向弧柱。調整風扇位置的遠近與風力之大小以改變弧區的风速在 0 ~ 2.6 米/秒之間。在試驗过程中每隔 5 ~ 8 次試驗即对风速进行一次測量，以免发生較大的誤差。

第三节 关于潛供电弧自灭特性的模拟試驗

3-1 說明

將模拟試驗的結果及試驗条件分別整理成附图 2 3 張，見本文末(附图 1) ~ (附图 2 2)。附图中的实綫表示 90% 几率的曲綫，虛綫是标术平均值曲綫。整理方法如下：

- (1) 附图 1 是 1.4 安潛供电弧的自灭時間与风速間的关系曲綫；
- (2) 附图 2 是 2.0 安潛供电弧的自灭時間与风速間的关系曲綫；
- (3) 附图 3 是 3.0 安潛供电弧的自灭時間与风速間的关系曲綫；
- (4) 附图 5、6、7 是 4.0 安潛供电弧的自灭時間与风速間的关系曲綫；其起始弧长分別为 50、65、及 90 厘米；
- (5) 附图 9 是 6.5 安潛供电弧的自灭時間与风速間的关系曲綫；

(6)附图 8 是根据附图 5、6、7 中的 90% 的几率曲线和平均值

曲线综合而得；

(7)附图 10 是综合 14~65 安下所得 90% 几率的曲线；

(8)附图 11 是综合 14—65 安时所得平均值的曲线；

(9)再根据 14~65 安下的各种试验将横坐标改为电流值，风速分为 0.6~1.0 米/秒、1.3~1.68 米/秒、2.5~2.6 米/秒三类，由此可得在各种风速下潜供电流值与灭弧时间的关系曲线，如附图 12、13、14 所示；

(10)对带有电感补偿的潜供电弧的自灭特性的研究如附图 13 中的符号“×”所示，其详细的分析见本文第九节；

(11)综合附图 12 及附图 14 可得附图 15；

(12)为分析引燃电弧的短路电流对灭弧时间的影响进行的试验结果如附图 16 所示；

(13)为分析恢复电压中高频分量的影响而进行试验的结果如附图 17、18 所示，其详细分析请见第五节；

(14)由本报告中的各项数据与苏联 А.О. Майкопар 所搜集的资料而建议的灭弧时间上限包络线相互对比，可得附图 19、20、21 三曲线。由这些对比表明，本文所列结果与国外资料大致相符。综合 19、20、21 可得附图 22。

3-2 简短的分析与结论

(1)模拟的潜供电弧试验与实际线路上的潜供电弧之间有一定的等价性。根据本试验中所引证的对比资料表明，模拟试验的结果与某些现场试验资料相符，具有一定的参考价值，可供设计单位引用。详细论证参阅本文第四节。

(2)在影响潜供电弧自灭特性的各因素中，电流值与风速的影响最大，恢复电压的起始梯度与其中的高频分量之影响处于次要地位。

(3)試驗表明，引燃潜供电弧的短路电流值变化在60~150安（有效）之間时，它們对潜供电弧的发生与发展过程沒有显著的影响；又根据本試驗与国内外系統試驗的对比可知，弧前的短路电流变化在50~150~900~2000余安的范围內时，潜供电弧的自灭特性仍然彼此相符，說明它們的影响彼此是接近的。詳見本文第六节。

潜供电弧的燃燒特征因有短路电流引起的大量游离物之影响而趋向于比較稳定的燃燒状况，其外观与感应性开弧相似；但毕竟它是电容性电流形成的开弧，因而有可能在較短的时间內自灭，或发生数次重燃。总的說来，在我們所进行的試驗中，它接近于电感性电流形成的开弧特性。詳情請参閱本文第十节(3)、(4)。

(4)潜供电弧的恢复电压中具有高频分量，它的特点是：高频频率大时，此分量的幅值甚低；高频频率小至工频的2~3倍时，此分量的幅值較大。通常，长綫的高频频率較低，其幅值可达工频恢复电压分量幅值的50%以上或更多；短綫的高频频率虽然可高至数百周/秒，但其幅值，即 $\alpha\%$ 仅5%上下。

有关此高频分量的影响初步得出結論，詳見第五节。有关的試驗参閱附图17、18。

(5)試驗表明，风力影响甚大；风向的影响也不小。如下图(3-1)所示，风向与电动力之方向正好相反。試驗結果表明，电弧因电动力的影响企图向外扩张，但为风力所阻，从外观来看，电弧被阻滯在空中持續不灭。电流在30安，0.8米/秒风速下仍有

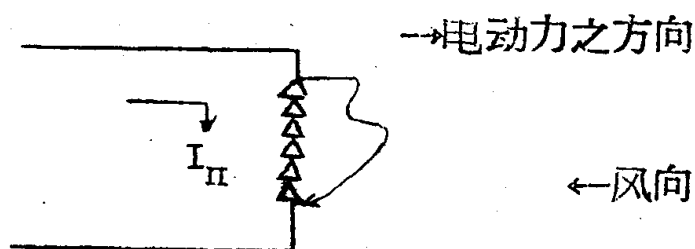


图 (3-1) 风向图

不能自灭的情况；当风速加大到 2.5 米/秒时，灭弧时间有高达 0.77 秒的（与附图 3 中的数据 0.4 相对应而言，即从 0.4 秒增至 0.77 秒）。在本文中所列的各项试验，均未考虑此反向风力的影响。

(6) 分析附图 10 可知，若按 90% 的几率曲线可得各种潜供电流值下的灭弧时间如下（当风力为 $1.5 \sim 2.6$ 米/秒时）：

1.4 安	—	$0.35 \sim 0.16$ 秒
2.0 安	—	$0.57 \sim 0.34$ 秒
3.0 安	—	$0.64 \sim 0.41$ 秒
4.0 安	—	$0.78 \sim 0.5$ 秒
6.5 安	—	$0.81 \sim 0.55$ 秒

由此灭弧时间的分析可知，当潜供电流值达 1.5 安后，其灭弧时间已有可能超过一般超高压线路所能允许的无电流间歇期之上限。

我们建议，如果自动重合时间整定在 0.4 到 0.5 秒时，希望潜供电流值大致在 1.4 安以下。

(7) 分析附图 15 可知，风速的影响甚大。根据国内外的有关资料，一般地，在离地面 $15 \sim 20$ 米的高空风速总在 1.5 米/秒以上；即使是多雾无风时，由于短路电流引起的热气流上升的自然

速度也达 1 米/秒左右。苏联 А·С·Макиопар 认为是 2~5 米/秒，华东試驗时为 1.5 米/秒上下，文 8 中为 2.24 米/秒以下。我們暫建議以 1.5~2.5 米/秒为准。将来将对此繼續給以注意。

(c)对利用相間电抗进行补偿的潛供电弧特性进行了試驗，結果表明，帶有补偿的电弧的自灭特性与无补偿时的同值电流特性相近，但其灭弧時間較短的几率大为增加，有利于单相重合的成功。

补偿度的确定，以能补偿至潛供电流值仅为 20 安为宜，由此去确定所需电抗器的容量。

(二)第二部分

对本試驗中若干問題的分析

第四节 試驗室模拟試驗与系統試驗之比較

4-1 模拟回路及其参数

根据第二节和文 3 所述，超高压綫路上的潛供电弧参数可由下述回路进行相应的模拟，图 (4-1) 中各参数的含意已如 2-2 节所述。为了明了自这个回路中所获得的电弧特性是否能反映出系統上的真实情况，特进行了对比試驗。

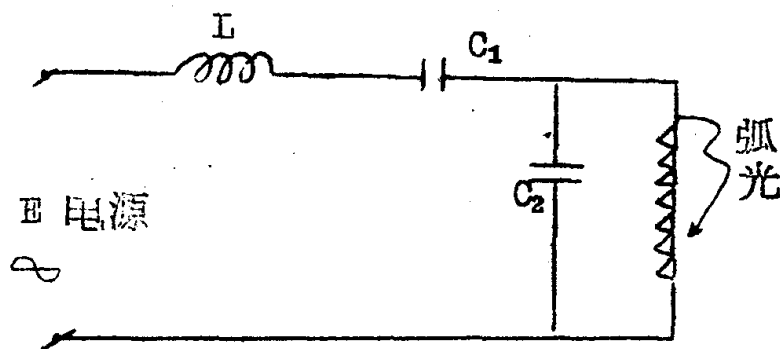


图 (4-1) 产生模拟弧光的等价回路

模拟对象是华东某 220 千伏线路。

根据文 2 中的资料，该线每相的参数如下：

线路对地电容 $C_0 = 5.72 \times 10^{-9}$ 法/公里

线间电容 $C_1 = 1.16 \times 10^{-9}$ 法/公里

$C = 2C_1 = 2.32 \times 10^{-9}$ 法/公里

导线半径 $r_0 = 1.47$ 厘米

全线大地电阻率（加权平均） $\rho = 12.7$ 欧/米³

线路自感系数 $L = 2$ 毫亨/公里

线路的相间互感系数 $M = 0.806$ 毫亨/公里

1964 年中在该线上进行试验时的条件为

线长 219 公里； 功率因数（估计） 0.96

线电压水平 223 千伏（有效）

输送容量（估计） $85 - j25 = 88.7 \angle -16.4^\circ$ 兆伏安/三相

由此可得下列各项数据

$$|\dot{U}_A| = 0.5 U_\infty = 64.3 \text{ 千伏（有效）}$$

$$|\dot{I}_A| = \text{线电流} = 229 \text{ 安（有效）}$$

$$C(\text{全线}) = 2C_1 = 2 \times 1.16 \times 10^{-9} \times 219 = 0.508 \text{ 微法} \quad (4-1)$$

$$C_0(\text{全线}) = 1.255 \text{ 微法}$$

$$M(\text{全线}) = 17.7 \text{ 毫亨}$$

$$L(\text{全线}) = 438 \text{ 毫亨}$$

根据文 1 中公式(4)(9)求出潜供电流的极大值 $\dot{I}_0$ 及恢复电压极大值 $\dot{U}_0$ 。

如下：