

文章编号: 1001-4322(2005)05-0746-05

磁绝缘传输线的有损线模型*

宋盛义, 仇旭, 王文斗, 谢卫平

(中国工程物理研究院 流体物理研究所 冲击波物理与爆炸物理实验室, 四川 绵阳 621900)

摘要: 开发了一种磁绝缘传输线(MITL)的电路模拟方法。以传输线模拟方法 TL CODE 为基础, 将 MITL 分成若干段有损传输线单元, 每个单元由一段无损传输线及一个对地损失电阻组成。根据磁绝缘准则判断单元的磁绝缘状况并计算相关参量, 推导丝阵负载条件下 MITL 末端界面电压的表达式, 阐述模型的求解方法及步骤; 用有损线模型计算阳加速器 MITL 得到的结果与实验结果基本吻合, 表明模型正确有效。

关键词: 磁绝缘传输线; 电路模拟; TL CODE 方法; 阳加速器

中图分类号: TL503 **文献标识码:** A

电路模拟是设计和分析真空磁绝缘传输线(MITL)的重要方法。电路模拟研究 MITL 一般采用两种方法:集中参数法和分布参数法。在一些具有短 MITL($l/c \ll \tau$, 其中 l 为 MITL 长度, c 为光速, τ 为脉冲上升沿)的装置中, 侧重研究负载对脉冲源的响应特性, 一般将脉冲源与负载之间的 MITL 处理成具有接地电阻的集中电感, 但不能描述 MITL 中脉冲传播及磁绝缘的形成规律; 而在长 MITL 装置、或侧重于研究磁绝缘规律的短 MITL 中, 一般要采用分布参数法, 将 MITL 处理成大量串联的、具有不同阻抗及微小电长度(几十 ps 到 100 ps)的有损传输线单元, 详细描述 MITL 的具体结构、传输脉冲特性及负载对磁绝缘形成过程的影响。前者只能对 MITL 作定性或半定量的分析, 可用于 MITL 的初始设计; 后者则能精确地模拟磁绝缘的瞬态效应, 可作为 MITL 定量设计及分析的精细方法。

美国为设计研究一些重要装置的 MITL, 先后开发了集中参数及分布参数的各种电路模拟方法^[1], 其中应用最广泛的是以 TL CODE^[2], SCREAMER^[3], BERTHA^[4] 等为代表的分布参数电路模拟方法。我们为某装置 MITL 的初始设计开发了分段集中电感的等效电路模型^[5], 本文将在已调试成功的 TL CODE 方法基础上^[6], 建立分布参数的 MITL 有损线模型, 并通过对比阳加速器 MITL 实验的模拟验证其有效性。

1 有损线模型的描述

如图 1 所示, 当电压脉冲 V_0 通过一段 MITL 驱动负载时, 电流在传播过程中有一定损失。有损线模型将 MITL 当作有损传输线进行研究, 可以定量地描述这种损失。模型将这样的有损传输线分成若干单元段, 每个单元段由一段理想传输线 T 与对地损失的电阻 R 组成。

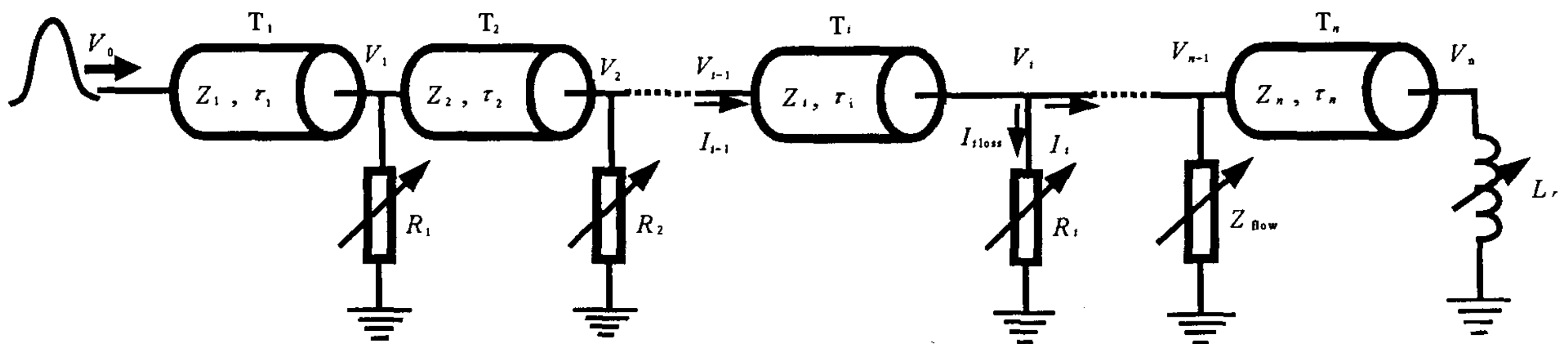


Fig. 1 Equivalent circuit of an MITL to drive a load

图 1 磁绝缘传输线驱动负载的等效电路图

任选其中一段传输线 T_i , 在时刻 t 时前端界面电压为 $V_{i-1}(t)$ 、电流为 $I_{i-1}(t)$, 后端界面电压、电流分别为 $V_i(t)$, $I_i(t)$ 。电压 $V_{i-1}(t)$ 作用在传输线 T_i 上, 根据传输线 T_i 的具体结构计算阴极表面场强 E_i , 如果这个场

* 收稿日期: 2004-10-25; 修订日期: 2004-12-24

基金项目: 国防科技基础研究基金资助课题

作者简介: 宋盛义(1967—), 男, 博士, 副研究员; 主要从事脉冲功率技术研究; 绵阳 919-108 信箱; E-mail: songshengyi@yeah.net.

强超过阴极表面电子发射阈值 E_c , 则必须对 T_i 的磁绝缘状况作出判断。

当根据 $Z_i, V_{i-1}(t)$ 算出的磁绝缘临界电流(或最小磁绝缘电流)^[7] $I_{ic}(t)$ 大于 $I_{i-1}(t)$, 表示传输线 T_i 未达到磁绝缘, 需要计算损失电流 $I_{i\text{loss}}$ 。而由文献[8]知道, 在已知传输线 T_i 的几何阻抗 Z_i 、电压 $V_{i-1}(t)$ 、传导电流 $I_{i-1}(t)$ 时可以计算 $I_{i\text{loss}}$ 。如果传输线 T_i 内空间电子的拉莫半径足够大(即阴极发射电子几乎垂直到达阳极表面), 可认为损失电流 $I_{i\text{loss}}$ 在 t 时刻将直接由电阻 R_i 损失掉, 即 $V_i(t) = I_{i\text{loss}} R_i$ 成立。显然 R_i 是随时间变化的。根据文献[6]的(9)式可以推导出

$$V_i(t) = \frac{Z_i E_{i+1} + Z_{i+1} E_i - I_{i\text{loss}} Z_i Z_{i+1}}{Z_i + Z_{i+1}} \quad (1)$$

由(1)式可以直接算出 t 时刻未达到磁绝缘的传输线 T_i 的后端界面电压 $V_i(t)$ 、界面电流 $I_i(t)$, 不必去计算损失电阻 R_i 。

当 $I_{ic}(t)$ 小于 $I_{i-1}(t)$ 时表示该段传输线已经达到磁绝缘, 则需要计算空间电子电流 $I_{i\text{flow}}$ 。其中阳极电压及总电流分别为 $V_{i-1}(t)$ 及 $I_{i-1}(t)$, 采用 C. W. Mendel 的电子压力平衡关系^[9]

$$V_{i-1} = Z_i \sqrt{I_{i-1}^2 - I_{i\text{flow}}^2} - \frac{mc^2}{2e} (I_{i-1}^2 - I_{i\text{flow}}^2) / I_{i-1}^2 \quad (2)$$

计算阴极电流 $I_{i-1}(t)$, 则 $I_{i\text{flow}}$ 等于总电流 $I_{i-1}(t)$ 与阴极电流 $I_{i-1}(t)$ 之差。此时由于传输线 T_i 已经磁绝缘, 应处理成无损传输线, 因此不存在闭合电流, 也就不存在损失电阻 R_i 。 $I_{i\text{flow}}$ 将沿功率流方向流动, 直到结构的突变区或所谓的“零磁位区(magnetic nulls)”, 电子电流将损失到该区域的阳极上^[10]。在一般的箍缩型脉冲功率装置中, 这样的真空区域一般靠近负载区, 因此如图 1 所示, 将电子电流损失电阻 Z_{flow} 取在 T_{n-1} 后面。在 t 时刻所有达到磁绝缘的传输线段均有一个空间电子电流。如果假设磁绝缘形成以后, 空间电子流在向前流动的过程中不再回到阴极, 则 t 时刻最终损失到 Z_{flow} 的空间电子电流, 等于所有达到磁绝缘的传输线段的空间电子电流的最大值。当脉冲上升沿远远大于整个 MITL 的电长度时这个假设总是有效的。仍然采用(1)式求传输线段 T_{n-1} 的后端界面电压 V_{n-1} 。

另外, 最大 $I_{i\text{flow}}$ 对应的传输线段离 Z_{flow} 总是有一段距离, 因此将最大 $I_{i\text{flow}}$ 在 t 时刻立即损失到 Z_{flow} 上是会带来误差的, 这点在编码设计中必须要注意。

2 有损线模型的求解

2.1 求解步骤

用 TLCODE 方法计算磁绝缘的有损线模型, 实际上归结于求损失电流 $I_{i\text{loss}}$ 或 $I_{i\text{flow}}$, 并用这个电流表示界面电压 $V_i(t)$ ^[6]。当全长度的 MITL ($T = T_1 + T_2 + \dots + T_n$) 两端的界面电压(即 $V_0(t)$ 和 $V_n(t)$) 条件给定, 按框图 2 所示步骤就可以求出 t 时刻全长度的 MITL 的 $V_i(t)$ 。按文献[6]中框图 3 的步骤, 并将其中的“连接方程”框用本文的框图 2 代替, 就可以求解设定时间长度内所有的界面电压, 则流过 MITL 的电流也很容易得到。

2.2 MITL 末端界面电压

TLCODE 方法求解有损线模型, 必须已知 MITL 输入端电压 $V_0(t)$ 和输出端的负载条件, 必须将负载条件与 MITL 的末端界面电压 V_n 联系起来。在文献[6]中已经分别推导了纯电阻、纯静态电感以及两者串联的混合型负载的 V_n , 为模拟阳加速器的丝阵内爆实验, 需要推导动态电感负载下 V_n 的表达式。

首先要将丝阵内爆动力学方程^[5] 改写成由两个一阶常微分方程组成的方程组, 用二阶龙格-库塔方法求解。采用精度为 $o(h^2)$ 的向后差分公式离散 $V_n = d(L_r I_n) / dt$ 。丝阵内爆速度 $v = dr / dt$, 则

$$v(t) = v(t-h) - \gamma(1+h/2)hI_n^2(t-h)/r(t-h) \quad (3)$$

$$r(t) = r(t-h) + (1+h/2)hv(t-h) \quad (4)$$

$$L_r(t) = L_{\text{single}} + L_{\text{return}} + \beta \ln[r_0/r(t)] \quad (5)$$

$$V_n(t) = \frac{V_{np}(t) - Z_n[4L_r(t-h)I_n(t-h) - L_r(t-2h)I_n(t-2h)]/[2Rh + 3L_r(t)]}{1 + Z_n/[R + 1.5L_r(t)/h]} \quad (6)$$

式中: R 是与丝阵串联的电阻; h, V_{np}, I_n 分别是 TLCODE 方法求解所用的时间步、传输线 T_i 的后端开路源电压以及负载电流; $L_{\text{return}} = \beta \ln(r_{\text{return}}/r_0)$ 为丝阵初始时刻与汇流罩形成的电感; $L_{\text{single}} = \beta \ln(r_{\text{return}}/Nd)/(N-1)$ 为丝阵互感; $\beta = \mu_0(N-1)l/2\pi N$, $\gamma = \mu_0(N-1)4\pi mN$, 其中 $N, l, r_0, r, m, d, r_{\text{return}}$ 和 μ_0 分别为丝阵根数、高度、

初始半径、动态半径、单位高度的质量、单丝直径、汇流罩半径及真空磁导率。

实际上通过设置 R 及 L 的值, (6) 式可以计算纯电阻、纯电感(包括静态和动态)及其串联组合的任意负载的 V_n 。例如负载为静态电感时, 则只需将 (6) 式中的 $L_r(t), L_r(t-h)$ 及 $L_r(t-2h)$ 替换成静态电感 L 即可。

3 有损线模型的验证

通过对阳加速器 MITL 驱动短路负载及丝阵负载实验的模拟, 对 MITL 的有损线模型进行了验证。

3.1 模型的描述

在采用 TLCODE 方法求解 MITL 有损线模型时, 必须要消除真空区反射脉冲对输入电压 V_0 的影响。因此, 建立图 3 所示的阳加速器 MITL 的有损线模型必须将变阻抗传输线(包括 I, II, III, IV 区)包括在内。

阳加速器的真空部分包括: 不存在磁绝缘问题的绝缘介质区(V 区)以及高阻抗真空区(VI 区)、共顶点同轴圆锥型 MITL(VII 区)、圆锥向同轴过渡型 MITL(VIII 区)、同轴圆筒型 MITL(IX 区)以及负载区(X 区)。模型将 I ~ IV 区域处理成无损传输线, VII ~ IX 区域因为存在磁绝缘问题、因而当作有损传输线。全部模拟区域划分成 981 个传输线单元; 所有具有常值阻抗的无损传输线均处理成一段传输线单元(如 I, III, V, VI), 而变阻抗段及 MITL 则处理成电长度与计算步长相等的若干传输线单元。有损传输线单元(图中双线框单元)

用于描述 MITL, 等效于一段理想传输线与一个阻值变化的接地电阻的组合。

根据实验可以判断, 阳加速器 MITL 在形成磁绝缘之后, 空间电流应该有两个损失区: 一个在真空的弧形过渡段, 一个在负载区入口端。因此, 设定两个流动阻抗 $Z_{flow 1}, Z_{flow 2}$ 分别用于损失 VII 区、VIII 区和 IX 区磁绝缘形成后的空间电子电流。

3.2 计算结果与分析

模拟 MARX 充电 60 kV 时的短路实验, 得到 I 区及 III 区末端的电压、负载电流分别如图 4(a)、图 4(b) 所示。将计算值与实验测试值(电压测点分别位于 I 区及 III 区的中部, 与计算测值点位置相差在 10 ns 以内)进行了比较, 电压模拟结果非常理想; 而电流模拟结果与实验结果稍有出入, 因为实验中总是存在局域性的尖端放电, 因而总会有空间电流损失。而计算认为短路实验真空区的电场强度很低, 以致阴极表面不发射电子, 因而不存在电流损失。

在进行丝阵内爆实验时, 负载是 32 根直径为 12 μm 的钨丝环形阵列, 组成半径、高度均为 1.5 cm 的钨丝阵, 汇流罩半径为 4.6 cm。图 5 给出了钨丝阵负载在 MARX 充电 45 kV 时, 内爆电流计算结果与实验结果的

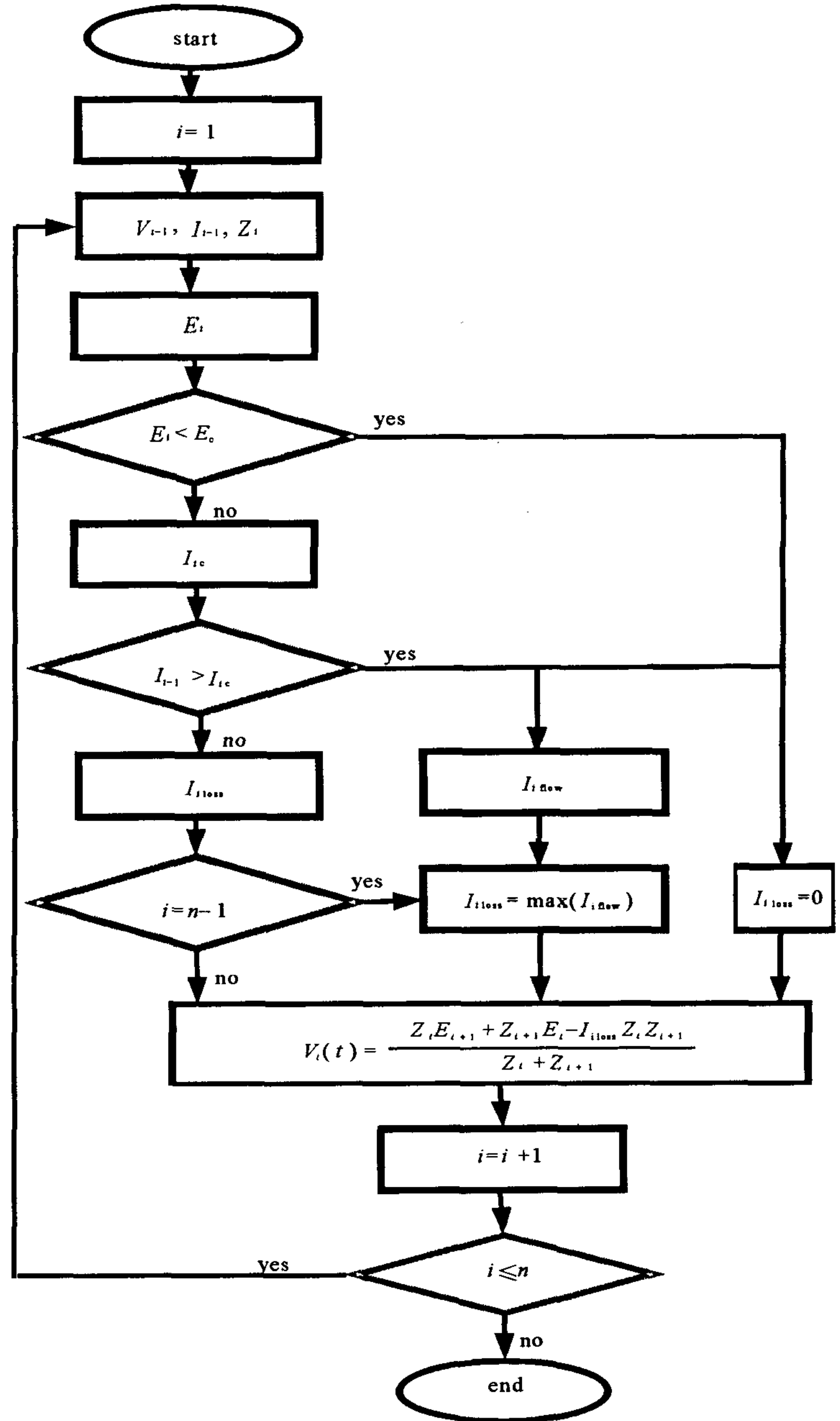


Fig. 2 Block diagram of the process of interface voltage solution

图 2 TLCODE 方法计算 MITL 界面电压的步骤框图

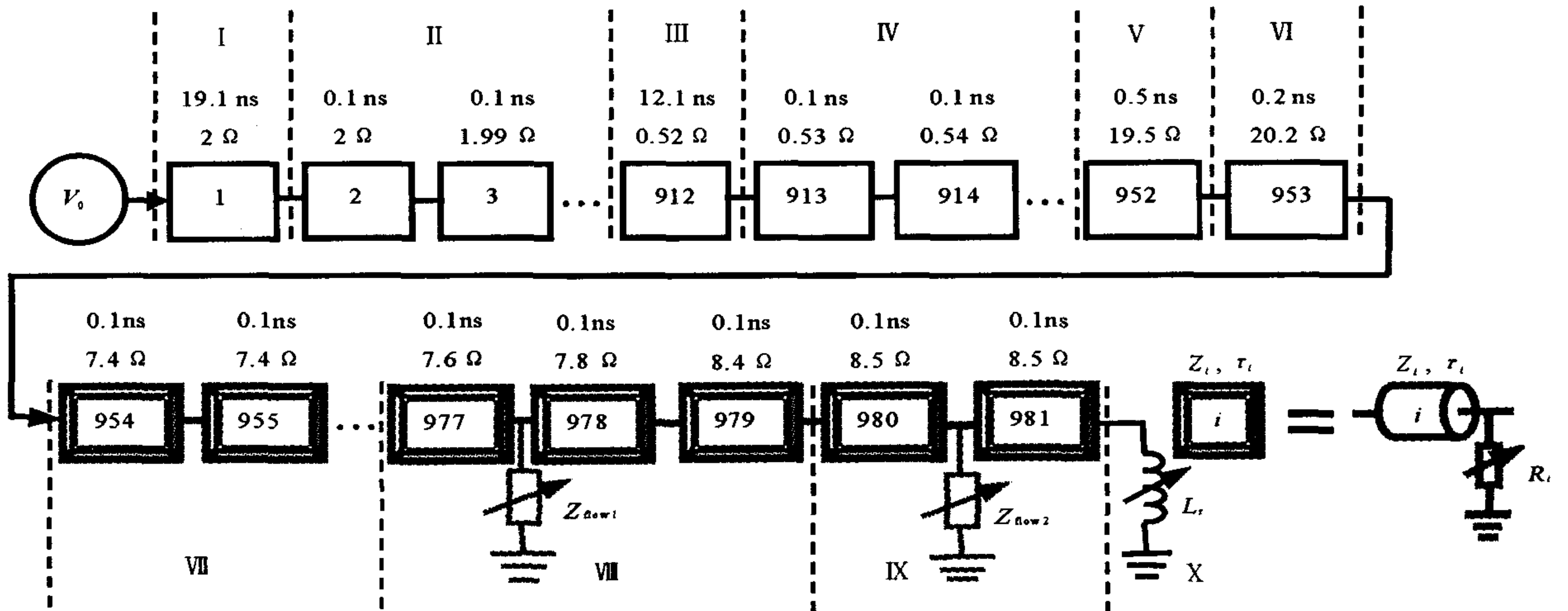


Fig. 3 Circuit model of YANG accelerator's MITL

图 3 阳加速器的有损线模型

比较。从图中可以看出,在上升阶段电流计算结果与实验结果基本一致。而峰值之后电流偏差的原因比较复杂,可能是由于后期真空中出现了大量的空间等离子体,对电流测试线圈以及负载区本身的阻抗特性造成了未知的影响所致。

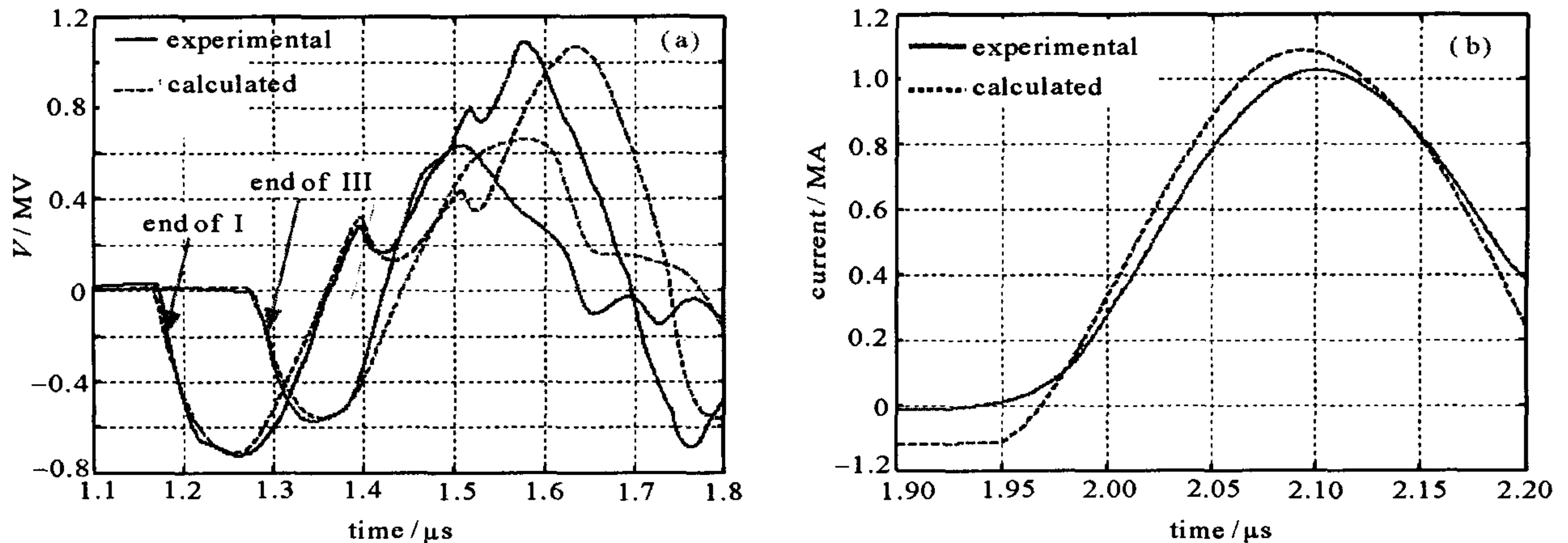


Fig. 4 Comparison of calculated voltages (a) and load current (b) by the model with experimental results

图 4 TLCODE 模拟计算得到的电压(a)、负载电流(b)与短路实验结果的比较

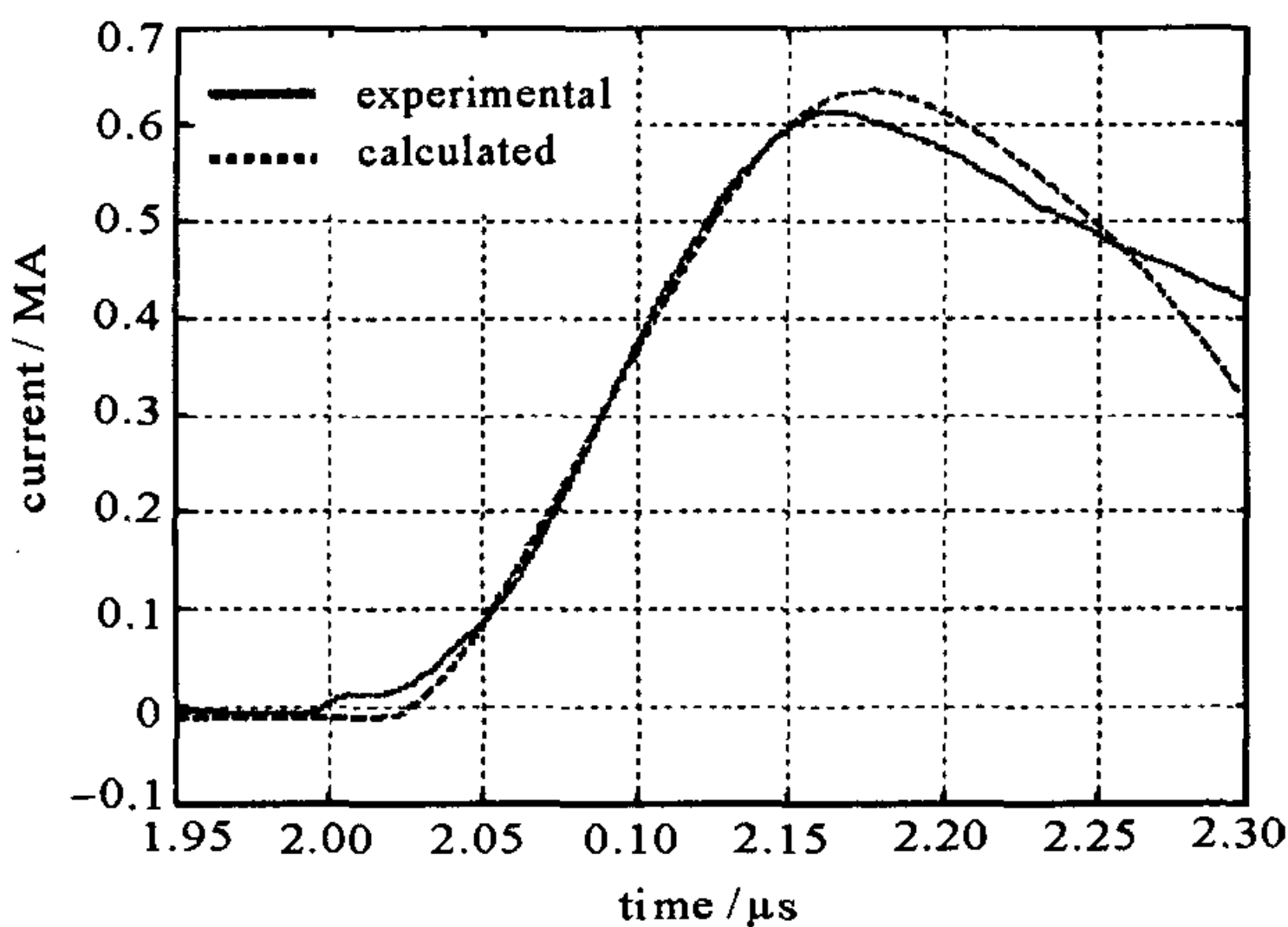


Fig. 5 Comparison of calculated result with experimental result for wire array implosion

图 5 丝阵负载内爆电流计算与实验结果的比较

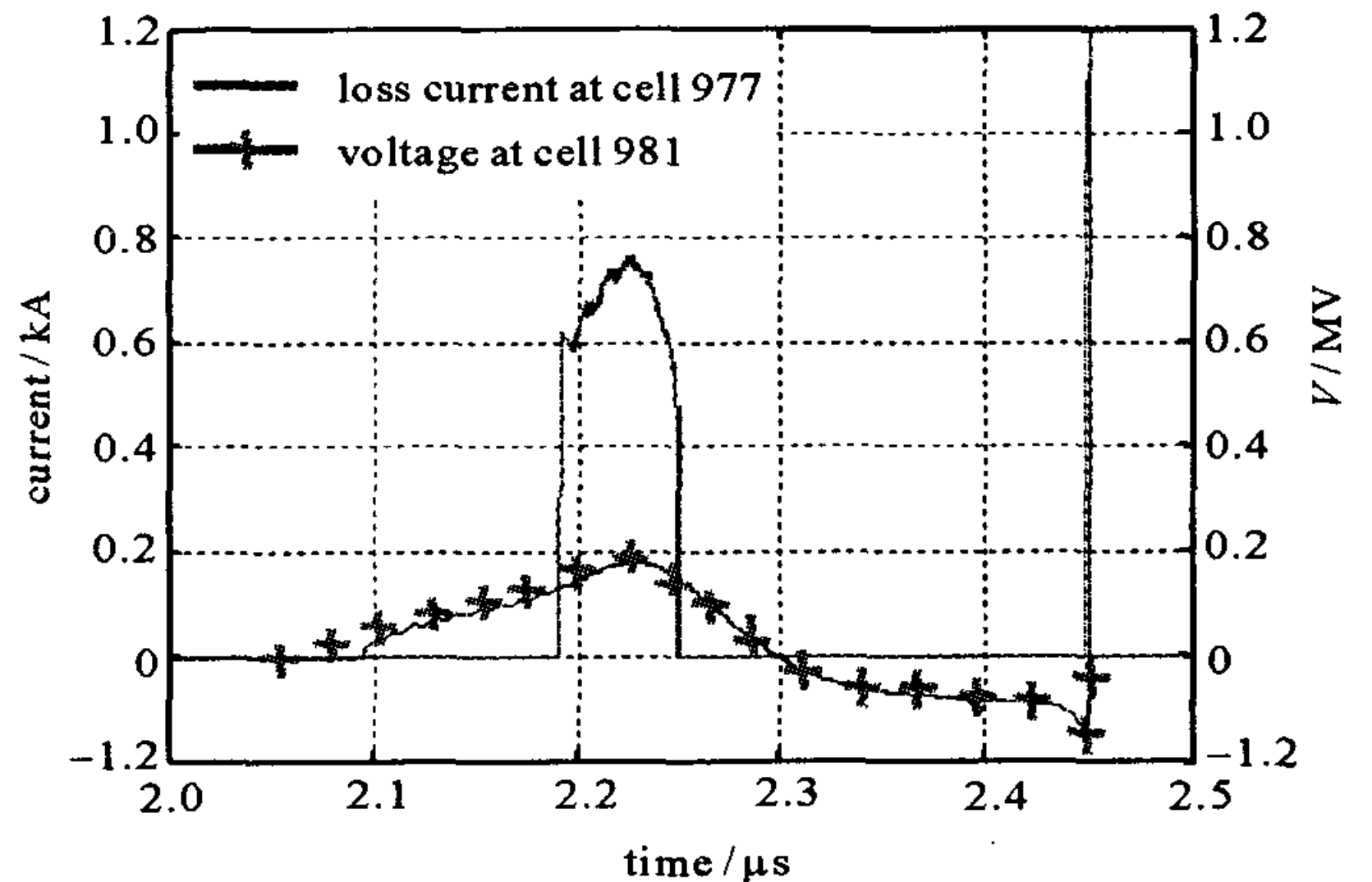


Fig. 6 Profiles of loss current at cell 977 and voltage at cell 981

图 6 计算的 977 号单元后的损失电流波形及 981 号单元的电电压波形

计算中发现,除设定的两个流动阻抗 Z_{flow1} , Z_{flow2} 外,Ⅶ~Ⅸ区间各 MITL 单元段的损失电阻上并无电流流过,说明在整个过程中所有的 MITL 单元段均满足磁绝缘条件,这是由于所有的 MITL 单元段在需要考虑磁绝缘问题的时候(以阴极表面场强超过电子爆发阈值 E_c 为界限,这里设 $E_c = 250 \text{ kV/cm}$),流过单元段的传导电流已经大于磁绝缘临界电流。实验后可以看到这些区域的电极表面也未出现打火痕迹,与计算结果一致。

流过 $Z_{\text{flow } 1}$, $Z_{\text{flow } 2}$ 损失的空间电子电流,只有在某些 MITLL 单元段的阴极表面场强超过电子爆发阈值,并且已形成磁绝缘时才存在。图 6 计算流过 $Z_{\text{flow } 1}$ 的损失电流,出现在两个时间位置:主脉冲电压的峰值时间段及内爆到心时刻,对应的实验结果也证实了空间损失电流的存在。在空间电子电流损失区域(Ⅷ~Ⅸ区)阳极内表面颜色发生了明显的变化,可以断定是由于空间损失电流轰击的结果。

4 结 语

MITL 的有损线模型是建立在 TLCODE 方法上的电路模拟方法,是考虑了空间分布参数对磁绝缘形成规律影响的精细模型,是 MITL 结构设计、参数优化的重要工具。本文用建立的模型对阳加速器的相关实验进行模拟,结果表明模型基本反映了实际过程。鉴于该模型的重要性,有必要进一步开展相关实验及数值模拟(如 PIC 分析)研究,进行多方面的验证或修正。

参 考 文 献:

- [1] Struve K W. Circuit-code modeling of the PBFA Z for Z-pinch experiments[A]. Proc 11th IEEE Int Pulsed Power Conf[C]. Baltimore, 1997. 162—167.
- [2] Weseloh W N. TLCODE -a transmission line code for pulsed power design[A]. Proc of the Seventh IEEE Pubed Power Conf[C]. Monterey, CA, 1989. 989—992.
- [3] Xiefer M L, Fugelso K L, Struve K W, et al. SCREAMER, a pulsed power design tool[Z]. Sandia Internal Document, 1995.
- [4] Ottingera P F, Schumer J W, Allen R J, et al. Modeling magnetically insulated power flow in mercury[A]. Proc 14th International Pulsed Power Conference[C]. Dallas, Texas, US, 2003. 849—852.
- [5] 宋盛义,王文斗,曹文彬,等. 四层圆盘锥形磁绝缘传输线的等效电路模型[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(6): 800—804. (Song S Y, Wang W D, Cao W B, et al. An equivalent-circuit modeling to a four-level-coaxial-circular-cone-like magnetically insulated transmission line. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(6): 800—804)
- [6] 宋盛义,仇旭. TLCODE 模拟方法介绍[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(4): 614—618. (Song S Y, Qiu X. An introduction to TLCODE simulation method. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(4): 614—618)
- [7] Di Capua M S. Magnetic insulation[J]. *IEEE Trans Plas Sci*, 1983, 11(3): 205—215.
- [8] 宋盛义,仇旭,王文斗,等. 空间电荷限制流与传导电流的定量关系[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(3): 441—446. (Song S Y, Qiu X, Wang W D, et al. Dependence of space-charge-limited flow on conducting current. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(3): 441—446)
- [9] Mendel Jr C W, Rosenthal S E. Dynamic modeling of magnetically insulated transmission line system[J]. *Phys Plasma*, 1996, 3(11): 4207—4219.
- [10] Hughes T P, Clark R E. 3-D calculations for the Z double-post-hole convolute[R]. MRC/ABQ-R-1975, Mission Research Corporation, 1998

Circuit model for magnetically insulated transmission line

SONG Sheng-yi, QIU Xu, WANG Wen-dou, XIE Wei-ping

(Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-108, Mianyang 621900, China)

Abstract: A circuit model for magnetically insulated transmission line (MITL) based on TLCODE was established. In the model the MITL is divided into lots of lossy transmission lines, each of which comprises of a segment a lossless transmission line and a grounded resistor. According to the insulation theories, the states of these lossy segments can be identified and the related variables can be calculated. The interface voltage at the end of the MITL, which is necessary for TLCODE, is deduced from a wire array load. The solution process of the model is described. The comparison of the calculated results of Yang accelerator's MITL by the model with the experimental results indicates that the model is validated and is suitable for design and analysis of MITL.

Key words: Magnetically insulated transmission line; Circuit model; TLCODE method; Yang accelerator