

脉冲变压器设计

王瑞华 编著

科学出版社

脉冲变压器设计

王瑞华 编著

科学出版社

1987

内 容 简 介

本书研究了高压脉冲变压器、铁氧体铁心小型脉冲变压器、峰值变压器及行输出变压器的理论与设计问题。介绍了现代脉冲变压器的结构，提供了设计所必需的大量参考资料。

本书可供雷达、高能物理、计算技术、自动控制、电视设备等部门的技术人员及高等院校相应专业的师生使用。

脉 冲 变 压 器 设 计

王瑞华 编著

责任编辑 唐友群

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1987年6月第一版 开本：850×1168 1/32

1987年6月第一次印刷 印张：10 3/4

印数：0001—4,600 字数：281,000

统一书号：15031·816

本社书号：4637·15—7

定价：3.05元

前 言

脉冲变压器是电子变压器的一种特殊类型,它所变换的不是正弦电压,也不是交流方波,而是接近矩形的单极性脉冲。

脉冲变压器现已极其广泛地应用于各种电子设备之中。它的主要用途是:升高或降低脉冲电压;改变脉冲的极性;使振荡器的输出阻抗与负载匹配;使变压器的初次级电路隔离;采用若干个次级绕组,以便得到几个不同幅值的脉冲;使电子管的板极回路和栅极回路,或晶体管的集电极与基极间形成正反馈,以便产生自激振荡;作为功率合成及变换元件等。

在不同的脉冲设备中,广泛地应用着各种各样的脉冲变压器。它们的参数包括:脉冲电压从几伏到几百千伏;脉冲电流从若干毫安到几十千安;脉冲功率从若干分之一瓦到数百兆瓦;脉冲宽度从毫微秒到数百毫秒;重复频率从单脉冲到几十千赫。其中高压大功率脉冲变压器主要应用在雷达、高能物理、量子电子学、变换技术等领域的设备中。低压小功率脉冲变压器主要应用在自动控制、计算技术、电视设备及工业自动化等方面的线路上。

为了提高电子设备的技术指标,目前,大功率脉冲变压器正向高功率、高压、高变比方向发展。脉冲功率为几十到几百兆瓦;电压一般达到几百千伏,个别达1兆伏;变比可从几十到几百。小功率脉冲变压器正向微型化、组装化、系列化方向发展。与此同时,对脉冲波形的要求也越来越高。脉冲平顶降落一般不超过0.5—2%;前后沿应不超过脉冲宽度的5—15%;不允许有上冲和反峰。此外还希望脉冲变压器重量轻、体积小、价格低、效率高。

要想制造出性能优良的脉冲变压器,以适应技术发展的需要,就必须研究这种变压器的新理论、新材料、新结构、新工艺。首先必须有先进的设计方法,确保设计出来的脉冲变压器的各项指标

都是最佳的。

本书从脉冲变压器的等值线路出发,分析了产生波形畸变的原因和无畸变地传输脉冲的条件,从而确定出保证允许波形畸变所必需的电磁参数,以及这些参数与脉冲变压器结构的关系.具体分析了负载非线性和变比对脉冲波形的影响.详细研究了脉冲变压器铁心中发生的物理过程.提出了充分利用材料的磁性能,缩小变压器体积减轻其重量的有效方法.介绍了饼式绕组和锥形绕组等现代脉冲变压器的结构.在推导脉冲变压器的基本关系时,考虑了寄生参数中储存的能量对变压器效率和波形的影响,从而保证了所设计的脉冲变压器的功率损耗与波形畸变最小,效率最高.详细介绍了脉冲变压器的设计步骤,提供了大量设计参考资料.利用本书提供的方法,能够设计出波形好、效率高、重量轻、体积小脉冲变压器。

本书还专门研究了铁氧体铁心小型脉冲变压器、峰值变压器及行输出变压器中的物理过程、结构特点、设计方法.最后介绍了脉冲变压器电磁参数的测量。

本书不研究毫微秒脉冲变压器。

本书在写作过程中得到高级工程师钱仲青、俞鼎铨两同志的帮助与指导,初稿经高级工程师邵介竞和徐棱同志审阅,提出不少宝贵意见,在此一并表示感谢!

由于编者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,欢迎广大读者批评指正。

一九八四年六月于蓉

目 录

前 言

第一章 脉冲变压器引起的波形畸变

- 1.1 普通电源变压器中的物理过程……………(1)
- 1.2 脉冲变压器的等值线路……………(4)
- 1.3 脉冲平顶的畸变……………(10)
- 1.4 脉冲前沿的畸变……………(15)
- 1.5 脉冲结束后变压器电路中的物理过程……………(25)
- 1.6 非线性负载下脉冲前沿的畸变……………(31)

第二章 脉冲变压器的电磁参数

- 2.1 磁化电感……………(36)
- 2.2 绕组的漏感……………(38)
- 2.3 绕组的动态电容……………(45)
- 2.4 绕组的电阻……………(50)

第三章 脉冲变压器的铁心

- 3.1 一般介绍……………(53)
- 3.2 脉冲变压器铁心中的磁感应增量……………(54)
- 3.3 降低剩余磁感应强度的方法……………(58)
- 3.4 脉冲磁化时的铁心损耗……………(67)
- 3.5 脉冲变压器的铁心材料……………(71)

第四章 脉冲变压器的绕组

- 4.1 同轴圆筒式绕组……………(80)
- 4.2 饼式绕组和锥形绕组……………(86)
- 4.3 变比对脉冲波形的影响……………(89)
- 4.4 绕组的屏蔽……………(104)
- 4.5 绕组的绝缘结构……………(107)

第五章 高压脉冲变压器的设计

- 5.1 设计要求与原始数据……………(113)

5.2	绕组线路的选择	(115)
5.3	电磁参数的确定	(116)
5.4	绝缘材料的选择及绝缘距离的确定	(118)
5.5	导线截面积的确定	(118)
5.6	磁感应增量及铁心材料带厚的选取	(120)
5.7	铁心截面积的确定	(122)
5.8	绕组匝数、绕线高度及平均磁路长度的确定	(125)
5.9	变压器电路的波阻抗	(126)
5.10	根据分布电容来修正变压器的结构参数	(127)
5.11	脉冲变压器的温升	(128)
5.12	脉冲后沿的宽度	(130)
5.13	脉冲变压器的经济指标	(130)
第六章 高压大功率脉冲变压器设计实例		
6.1	计算的原始数据	(132)
6.2	等值线路参数的计算	(133)
6.3	绝缘方式、绝缘距离及绕组导线的选取	(136)
6.4	铁心材料的选取及铁心截面积的确定	(139)
6.5	绕组匝数和平均磁路长度的确定。脉冲平顶降落的 验算	(141)
6.6	脉冲前沿畸变的检查	(143)
6.7	脉冲变压器的温升与经济指标	(146)
6.8	铁心去磁电路的计算及脉冲后沿宽度的检查	(148)
6.9	脉冲变压器的整体结构	(150)
第七章 小型脉冲变压器所用的铁氧体铁心		
7.1	铁氧体铁心的脉冲特性	(152)
7.2	铁氧体铁心的动态参数	(168)
第八章 铁氧体铁心小型脉冲变压器		
8.1	小型脉冲变压器的电磁参数	(193)
8.2	脉冲变压器的动态参数	(196)
8.3	脉冲参数的计算	(209)
8.4	铁氧体铁心小型脉冲变压器的设计	(213)
第九章 峰值变压器的设计		
9.1	峰值变压器的工作原理	(229)

9.2	峰值变压器的结构特点	(231)
9.3	峰值变压器的设计	(237)
9.4	设计实例	(256)
第十章 晶体管电视接收机行输出变压器的设计		
10.1	行输出变压器的输入信号	(268)
10.2	行输出变压器的负载	(278)
10.3	行输出变压器的调谐	(295)
10.4	行输出变压器的铁心	(305)
10.5	高效率行输出变压器的设计	(307)
第十一章 脉冲变压器的试验		
11.1	试验目的	(313)
11.2	铁心参数的测量	(313)
11.3	漏感和动态电容的测量	(316)
11.4	脉冲波形的检查	(318)
11.5	变比的测量	(319)
11.6	脉冲变压器的负荷试验	(319)
11.7	小型铁氧体铁心脉冲特性的测量	(322)
11.8	铁氧体铁心小型脉冲变压器的测量	(328)
主要符号说明		(331)
参考文献		(335)

第一章 脉冲变压器引起的波形畸变

本章分析脉冲波形畸变的原因及保证损耗和波形畸变最小所必需的条件。

1.1 普通电源变压器中的物理过程

用来变换电能,并把它从一个电路传输到另一个电路的静止电磁元件称为变压器。在交流电路中,变压器可用来变换电压、电流、频率、相数,改变信号极性,变换信号波形,使初次级电路彼此隔离或使电路阻抗匹配等。

变压器的主要结构零件是铁心和线圈。限定主磁场范围的闭合磁系统称为铁心。每个铁心一般都由铁心柱和铁轭两部分组成。装有线圈的那一部分磁路称为铁心柱,其余部分统称铁轭。常用铁心形式有壳式、心式、环形等。铁心由磁性材料做成。采用铁心的目的是减小变压器主磁路的磁阻。变压器的铁心具有很高的磁导率,因此,加铁心之后,产生一定的磁通所必须的磁势将显著下降。同时,还能增大绕组之间的电磁耦合,有利于从初级向次级的能量传输。

为了减小涡流损耗,变压器的铁心由一定厚度的硅钢片叠成。随着频率的升高,片的厚度要逐渐变薄。为了防止片间短路,硅钢片的表面涂有绝缘层。

形成变压器电路的匝数的总和称为绕组,绕组的总和称为线圈。常用变压器的线圈有圆筒式和饼式两种。变压器有干式和油浸式等不同的结构。

在变压器工作的过程中,铁心磁导率是变化的。因此,在分析变压器时,不能采用重叠原理。与变压器初次级绕组相交链的磁通,不能看作是自感磁通与互感磁通之和。在分析变压器的工作过

程时,通常直接利用磁场的合成。与变压器绕组相交链的磁通由三部分组成(图 1.1):

1. 变压器的主磁通 ϕ_0 , 该磁通沿铁心闭合, 并与初次级绕组的所有线匝相交链;

2. 初级绕组的漏磁通 ϕ_{1s} , 这部分磁通只与初级绕组相交链, 并沿空气隙而闭合;

3. 次级绕组的漏磁通 ϕ_{2s} , 该磁通只和次级绕组相交链, 并沿空气隙而闭合。

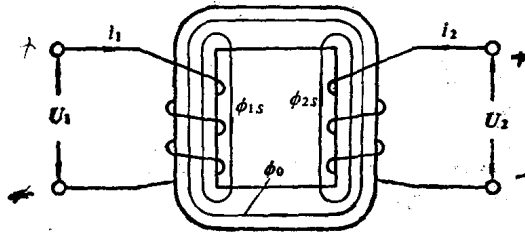


图 1.1 变压器的原理图

$$N \cdot I = H \cdot l$$

变压器主磁通确定的磁势等于初次级绕组磁势之总和:

$$F_0 = i_1 N_1 + i_2 N_2 \quad F_0 = H \cdot l$$

式中 N_1 和 N_2 分别为初次级绕组的匝数, i_1 和 i_2 分别为初次级绕组的电流。

P38

当 $i_1 N_1 + i_2 N_2 = 0$ 时, 变压器的主磁通等于零, 留下的只是漏磁通. 由于漏磁通主要是沿空气隙而闭合, 空气隙的磁导率是恒定的, 因此, 初次级绕组的漏磁链 ϕ_{1s} 和 ϕ_{2s} 与相应的电流成比例:

$$\phi_0 = \mu_0 \mu F_0 S / l$$

$$\phi_{1s} = L_{1s} i_1 \quad \phi_{2s} = L_{2s} i_2$$

式中 L_{1s} 和 L_{2s} 分别为初次级绕组的漏感。

这时, 初次级绕组总的磁链为

$$\Psi_1 = \phi_{1s} + N_1 \phi_0 = L_{1s} i_1 + N_1 \phi_0$$

$$\Psi_2 = \phi_{2s} + N_2 \phi_0 = L_{2s} i_2 + N_2 \phi_0$$

假定变压器初次级绕组的电压分别为 u_1 和 u_2 , 电阻分别为 r_1 和 r_2 , 则初次级电路的方程为

$$u_1 = r_1 i_1 + \frac{d\Psi_1}{dt} \quad - \frac{d\Psi_2}{dt} = r_2 i_2 + u_2$$

把 Ψ_1 和 Ψ_2 值代入, 则得

$$u_1 = r_1 i_1 + L_{1s} \frac{di_1}{dt} + N_1 \frac{d\phi_0}{dt}$$

$$-N_2 \frac{d\phi_0}{dt} = r_2 i_2 + L_{2s} \frac{di_2}{dt} + u_2$$

从第一个方程可知, 变压器初次级绕组的电压和初次级绕组的电阻压降及变压器主磁通和漏磁通在该绕组中的感应电势相平衡。

从第二个方程可知, 主磁通在次级绕组中的感应电势和次级绕组的电阻压降、负载电阻上的电压降、漏磁通在次级绕组中的感应电势相平衡。

绕组匝数之比 $N_2/N_1 = n$ 常称为变比。当 n 不等于 1 时, 变压器初次级电路的各个量难以比较, 因为电势

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi_0}{dt} \quad e_2 = -N_2 \frac{d\phi_0}{dt}$$

彼此不等。为了便于比较, 常把一个绕组的参数折算到另一个绕组。折算的实质是用匝数等于另一个绕组的等值绕组代替变压器的某一个绕组(初级或次级均可)。

下面分析次级折算到初级的情况。折算后绕组的所有参数都用带撇的符号表示, 并称为折算值。自然, 进行折算时应当保证初级电路的工作状态不变。为此, 必要而充分的条件是折算后次级绕组的磁势不变, 即应当保持条件:

$$i'_1 N_1 = i_2 N_2 \quad \text{或者} \quad i'_1 = \frac{N_2}{N_1} i_2 = n i_2$$

因为这时变压器的主磁通 ϕ_0 不变, 借助于该磁通实现了变压器初次级电路之间的耦合与相互作用。

主磁通 ϕ_0 在折算的次级绕组中感应的电势 e'_2 为

$$e'_2 = -N_1 \frac{d\phi_0}{dt} = \frac{N_1}{N_2} \left(-N_2 \frac{d\phi_0}{dt} \right) = -\frac{e_2}{n}$$

因而,折算之后主磁通在初次级绕组中感应的电势 e_1 和 e'_1 将彼此相等。

应特别注意,折算后次级的功率是不变的。因为

$$P'_1 = e'_1 i'_1 = \frac{e_2}{n} n i_2 = e_2 i_2 = P_2$$

为了说明折算后次级绕组参数的变化,在变压器次级电势的方程中代入 i_2 和 e_2 的折算值。这时可得

$$e'_1 = \frac{r_2}{n^2} i'_2 + \frac{L_{2\sigma}}{n^2} \frac{di'_2}{dt} + \frac{U_2}{n} = r'_2 i'_2 + L'_{2\sigma} \frac{di'_2}{dt} + U'_2$$

由此可知,当次级绕组的参数折算到初级时,次级绕组的电阻和漏感应除以 n^2 。类似地可以证明:接到次级绕组上的所有电阻和电感都要除以 n^2 ,所有电导和电容都要乘以 n^2 。

折算后,产生主磁通 ϕ_0 所必需的磁势为

$$i_1 N_1 + i_2 N_2 = i_1 N_1 + i'_1 N_1 = (i_1 + i'_1) N_1 = i_0 N_1$$

式中 $i_0 = i_1 + i'_1$ ——称为变压器的磁化电流。

当初级电压恒定时,变压器从空载变化到额定负载,铁心中的主磁通变化很少,确定主磁通的磁势也几乎不变。在 $i'_1 = 0$,即当变压器空载时,磁化电流等于变压器的初级电流。因此,磁化电流有时也称为空载电流。普通变压器的漏磁很少,可以忽略不计。这时,认为变压器的主磁通在任何负载下都是恒定的。这一结论完全适合于脉冲变压器。

1.2 脉冲变压器的等值线路

从上节导出的方程中可知,实际变压器可以用图 1.2 所示的理想变压器和电阻为 r_1 及 r_2 ,电感为 $L_{1\sigma}$ 及 $L_{2\sigma}$ 的两个电感线圈组成的线路来等值。所谓理想变压器是绕组电阻和漏感都等于零的变压器。

将次级折算到初级,从而得到两个绕组匝数相等的理想变

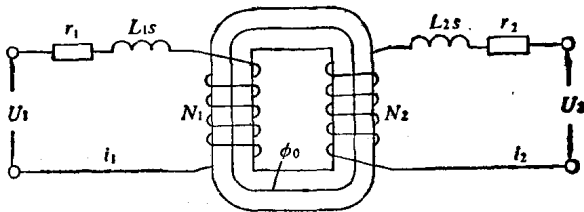


图 1.2 理想变压器的原理图

器(图 1.3)。由于折算变压器的方程为

$$u_1 = r_1 i_1 + L_{1s} \frac{di_1}{dt} + N_1 \frac{d\phi_0}{dt}$$

$$-N_1 \frac{d\phi_0}{dt} = r_2' i_2' + L_{2s}' \frac{di_2'}{dt} + u_2'$$

因而,这种等值是正确的。这时,理想变压器变换为电感线圈,变压器的磁通沿电感线圈的铁心而闭合,线圈中消耗的功率等于变压器的铁心损耗。

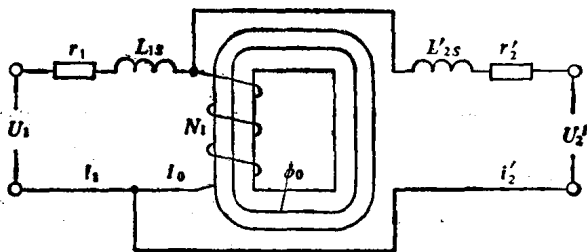


图 1.3 折算到初级的理想变压器

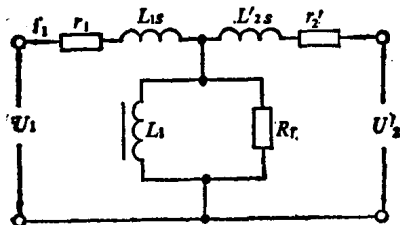


图 1.4 变压器的T形等值线路

因此,变压器可以用 T 形线路来等值(图 1.4)。漏感 L_1 和 L_2 用来考虑漏磁通; r_1 和 r'_2 表示初次级绕组的电阻; 变压器的磁化电流 $i_0 = i_1 + i'_2$ 经电感 L_1 流过, 因此, 该电感称为磁化电感, 用来考虑变压器的主磁通; 电阻 R_T 用来考虑变压器铁心中的磁滞与涡流损耗 P_T 。电感 L_1 和电阻 R_T 分别按下式确定:

$$L_1 = N_1 \frac{\phi_0}{i_0} \quad R_T = \frac{U_{11}^2}{P_T}$$

式中 U_{11} ——电压 U_1 的一部分, 该电压和主磁通 ϕ_0 在初级绕组的感应电势 e_1 相平衡。

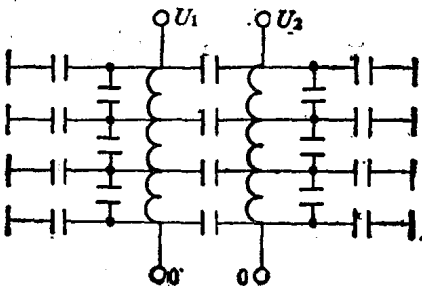


图 1.5 变压器中的分布电容

除了漏感和磁化电感外,在分析脉冲变压器的工作过程时,还必须考虑变压器结构元件间存在的寄生电容。寄生电容分布于各个元件之间,如图 1.5 所示。从该图可见,变压器结构元件间的寄生电容可以分成五类: 铁心和初级绕组间的寄生电容; 初次级绕组间的寄生电容; 初级绕组匝间的寄生电容; 次级绕组匝间的寄生电容。各种寄生电容都具有分布的特点, 因此, 也称为分布电容。具有分布参数的电路分析起来相当复杂。为了简化起见, 用接在高电位点之间的集中电容来代替分布电容。匝间分布电容通常很小, 一般忽略不计。这时, 变压器的线路如图 1.6 所示。

变压器的铁心通常与零电位相连。因此, 既考虑漏磁通, 又考虑分布电容时, 脉冲变压器的等值线路如图 1.7 所示。图中 C_{1B} , C_{12B} , C'_{2B} ——折算到初级的相应等值分布电容, 下面将利用该等

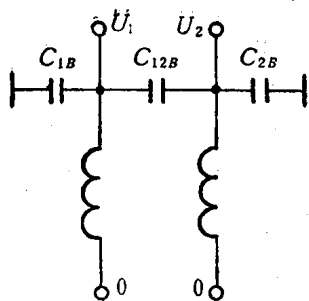


图 1.6 变压器中分布电容的简化表示方法

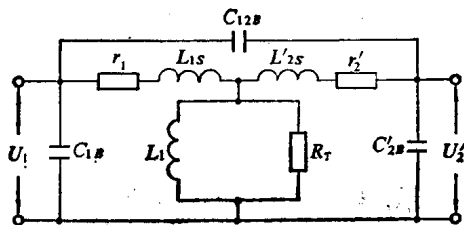


图 1.7 脉冲变压器的等值线路

值线路来分析脉冲变压器中的物理过程。

漏感和分布电容在脉冲变压器中起决定性作用。因此,考虑漏感和分布电容时的脉冲变压器是一个复杂的具有分布常数的系统.利用有限的几个集中参数元件组成的等值线路,不能精确地表示该系统的性能.因为,这时绕组电压和导线电流间不存在分布常数系统特有的动态耦合.从根本上来说,具有分布常数的系统和由有限个集中参数的元件组成的系统是不同的。因此,利用这种等值线路来分析脉冲变压器中的物理过程,必然产生一定的误差。

如果利用具有分布参数的等值线路来分析脉冲变压器中的物理过程,不仅使分析的过程大为复杂,而且也不可能得到工程实践中有用的结果。此外,脉冲变压器的设计实践表明,上述简化是允许的。

脉冲变压器是脉冲振荡器的重要组成部分,在线路中起阻抗匹配的作用。无论是脉冲振荡器,或者是负载,都可以用某个参数

来表示,该参数与变压器参数一起,确定了脉冲从振荡器到负载的传输条件。因此,在设计脉冲变压器时,不仅要考虑变压器本身的参数,而且要考虑脉冲振荡器和负载的参数。这种状况在分析变压器电路时要特别注意。脉冲振荡器的内阻及负载阻抗通常含有一定的容性分量。在某些情况下还要考虑阻抗的感性分量。

下面分析最常见的两种脉冲振荡器。在图 1.8 的线路中,储能器是完全放电式人工线;在图 1.9 的线路中,储能器是局部放电的电容器。这两个线路中的脉冲变压器的工作条件有些不同。在图 1.9 中,由于脉冲调制管的内阻很小,折算到变压器初级的负载电阻 R_f 远大于脉冲振荡器的内阻。同时,在储能器完全放电的脉冲振荡器中,振荡器内阻必须与折算的负载电阻相匹配和采用什么放电器件无关。

图中的 L_{1m} 和 L_{2m} 是引线电感; C_{1m} 和 C_{2m} 是引线电容;无论是引线电感,或者是引线电容,都是分布参数。但在等值线路中都用集中参数来表示。 C_{ak} 是换向器件的板极和阴极间电容。 C_f 是负载电容。可以用任何超高频器件——磁控管、泊管、速调管等——作为负载。

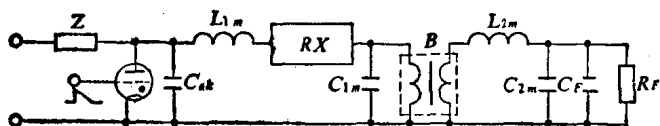


图 1.8 用人工线作为储能器的脉冲振荡器

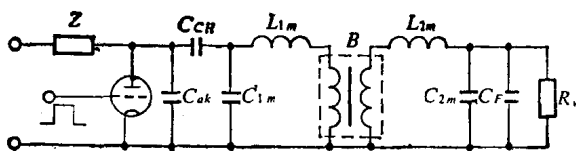


图 1.9 具有电容储能器的脉冲振荡器

假定图 1.9 中的 C_{ak} 和 C_{1m} 远小于储能电容器 C_{CH} 的容量,则既考虑脉冲振荡器参数,又考虑引线电感、引线电容及负载阻抗

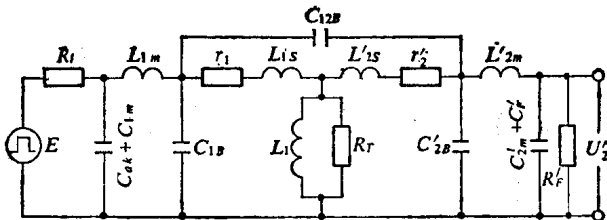


图 1.10 脉冲变压器的等值线路

的脉冲变压器等值线路如图 1.10 所示。

在图 1.10 的线路中,有九个独立的电抗性元件,它们都可以储存一定的电能.因此,脉冲变压器的过渡过程要用九阶微分方程来描述.所变换脉冲波形的畸变由该方程的解来确定.在已知线路参数和初始条件的情况下,该线路输入端加上脉冲电压时的过渡过程原则上是可以确定的。

然而,这种分析方法过于复杂,也得不到实际上有用的解.况且,通常很难求得九阶微分方程的系数与其特征方程根之间的关系.我们的任务不是分析等值线路,而是按照提出的脉冲特性——相当于已知过渡过程的特点——来综合等值线路。

这使问题更加复杂化.为了得到实际上比较有用的解,需要把变压器的等值线路进一步简化.把脉冲振荡器的内阻与绕组电阻合并,初次级漏感与引线电感合并,初级绕组电容和初级引线电容合并,次级绕组电容与次级引线电容合并,就可以达到简化的目的.当变比大于 1 时,即在升压变压器中,把变压器绕组间电容合并到次级电路.当变比小于 1 时,即在降压变压器中,把变压器绕组间电容合并到初级电路.经验表明,这样简化并不会引起显著的误差。

升压变压器的等值线路如图 1.11 所示,降压变压器的等值线路如图 1.12 所示.这两个线路都是经简化后导出的.在理想情况下,希望 $L_s = 0, C_1 = 0, C'_1 = 0, L_1 = \infty$,这种变压器不会引起波形畸变.因此,在设计脉冲变压器时,应力求满足这些条件。

实践表明,脉冲变压器的漏感 L_s ,分布电容 C_1 和 C'_1 对脉冲