



“十三五”普通高等教育本科重点规划教材  
高电压与绝缘技术系列教材

Overvoltage in Power System

# 电力系统过电压 (第二版)

解广润 主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

“十三五”普通高等教育本科重点规划教材  
高电压与绝缘技术系列教材



# 电力系统过电压

## (第二版)

主编 解广润

主审 司马文霞



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

北京 裕民路10号

邮政编码 100045 电话 010-63416688

## 内 容 提 要

本书内容分为理论基础、雷电过电压、内部过电压和电力系统绝缘配合四部分。书中着重介绍集中参数和分布参数电路的暂态分析方法,各种过电压的发生与发展机理,过电压保护装置的原理及其应用,电力系统过电压保护与绝缘配合的原理及措施。本书还扼要介绍了过电压的数值计算方法和处理随机变量的有关知识。

本书可作为高等院校相关专业的本科、研究生参考用书,也可供电力系统以及从事过电压及其防护工作的技术人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统过电压/解广润主编. —2版. —北京:中国电力出版社,2018.8

“十三五”普通高等教育本科重点规划教材 高电压与绝缘技术系列教材

ISBN 978-7-5198-1715-2

I. ①电… II. ①解… III. ①电力系统—过电压—高等学校—教材 IV. ①TM86

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 017904 号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址:<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:陈 硕(010-63412532)

责任校对:黄 蓓 郝军燕

装帧设计:郝晓燕

责任印制:吴 迪

印 刷:北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次:2018年8月第二版

印 次:2018年8月北京第一次印刷

开 本:787毫米×1092毫米 16开本

印 张:22.25

字 数:542千字

定 价:56.00元



版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

# 前 言

由解广润主编,陈慈萱和方瑜参编的,原“高电压技术及设备”专业使用的《电力系统过电压》教材,于1985年6月由水利电力出版社出版发行。该书1987年获水利电力部水利电力类专业优秀教材一等奖,至1997年累计印刷5次,发行16 530册,后因专业调整和规程修订而终止发行。该书迄今仍被诸多院校的相关专业选作本科生教材或研究生参考用书,并受到从事电气工程,特别是高电压工程等专业技术人员的关注。

为使该教材能继续服务于“电力系统过电压”课程的教学,决定对原书进行增补和修订。保留了原教材的结构体系,并在原教材“培养学生分析和解决工程问题能力”特点的基础上,融入了电力系统过电压及保护中的新技术以及国家和行业的新标准、新规定,为促进学生科技创新提供技术支持。

本书第一部分(理论基础)包括第一至三章,内容基本未变;第二部分(雷电过电压)包括第四至八章,由陈慈萱和蓝磊负责增补和修订;第三部分(内部过电压)和第四部分(电力系统绝缘配合)包括第九至十二章,由方瑜和张博负责增补和修订。全书由陈慈萱协助统稿。

本书由重庆大学司马文霞教授主审,谨致深切的谢意!

编 者  
2018年7月

# 第一版前言

本书是根据 1982 年 12 月全国“高电压技术及设备”专业教学计划及教材编审规划会议所通过的“电力系统过电压”课程的教学大纲编写的。

编者力图使学生在学完本书后能掌握集中参数及分布参数电路的暂态及稳态分析方法,以及产生过电压的机理;掌握过电压保护装置的原理及其应用;掌握电力系统过电压保护的基本方法;使学生有分析和解决工程问题的能力,并对有关规程有一定的理解。

在目录中打有\*的部分,其内容较深,一般可不讲授,只作为基础较好的学生自学之用。该部分也可以满足工程技术界的参考需要。

本书第一部分(理论基础)包括第一章到第三章,是由陈慈萱编写的;第二部分(雷电过电压)包括第四章到第八章,是由解广润编写的;第三部分(内部过电压)包括第九章到第十一章,以及第四部分(电力系统绝缘配合—第十二章)是由方瑜编写的。全书由解广润主编,王秉钧同志主审本书书稿。

本书内容参考了陈维贤同志编的《内部过电压基础》和吴维韩同志编的《输电线路暂态计算》讲义。在编写时还吸收了各兄弟院校及本院的多年教学经验和资料。王秉钧同志、陈维贤同志和程启武同志对书稿提出了很多宝贵意见。编者在此对他们表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限,书中不妥及错误之处在所难免,恳切希望读者批评指正。

编者  
1983 年 8 月

# 目 录

前言

第一版前言

## 第一部分 理 论 基 础

第一章 线性集中参数回路的过渡过程	1
第一节 由 $R$ 、 $L$ 、 $C$ 组成的电路在直流电压作用下的过渡过程	1
第二节 任意电压作用在 $L$ 、 $C$ 串联电路上的过渡过程	8
第三节 参数突变时的过渡过程	15
第四节 多网孔振荡回路的过渡过程	27
习题	35
第二章 分布参数回路的过渡过程	36
第一节 均匀无损导线的波过程	36
第二节 波的折射与反射	42
第三节 等值集中参数定理	50
第四节 波的多次折、反射	57
第五节 用特性线法(白日朗法)进行波过程计算	66
第六节 多导体系统的波过程	82
第七节 用模量变换法计算平行多导线系统的波过程	87
第八节 线路损耗对波过程的影响	96
习题	101
第三章 绕组内的波过程	103
第一节 无穷长直角波作用于 $L$ - $C$ - $K$ 分布参数回路时的过渡过程	103
第二节 任意波形的电压源作用于 $L$ - $C$ - $K$ 分布参数回路时的过渡过程	110
第三节 三相变压器绕组内的波过程及其内部保护	113
第四节 波在变压器绕组间的传播	118
第五节 旋转电机绕组内的波过程	120
习题	123

## 第二部分 雷电过电压

第四章 雷电过电压的产生	124
第一节 雷电放电过程	124
第二节 雷电参数	127
第三节 雷电过电压的形成	131

习题	134
<b>第五章 防雷保护装置</b>	135
第一节 避雷针与避雷线	135
第二节 保护间隙和排气式避雷器	138
第三节 阀式避雷器	140
第四节 金属氧化物避雷器	141
第五节 消弧线圈	146
第六节 电力系统的接地装置	148
习题	160
<b>第六章 输电线路的雷电过电压及其防护</b>	162
第一节 架空线路上的雷电感应过电压	162
第二节 架空线路上的雷电直击过电压	167
第三节 架空线路耐雷水平及雷击跳闸率的计算	169
第四节 架空线路防雷的基本原则及措施	176
第五节 雷电绕击输电线的电气几何分析模型	178
第六节 特高塔的直击雷电过电压计算	183
第七节 电缆线路防雷	189
习题	191
<b>第七章 变电站防雷</b>	193
第一节 发电厂、变电站的直击雷保护	193
第二节 发电厂、变电站的侵入波过电压	194
第三节 变电站的进线保护	200
第四节 变压器中性点保护	203
第五节 自耦变压器及三绕组变压器保护	204
第六节 配电变压器的保护	206
第七节 气体绝缘变电站的防雷保护	207
习题	209
<b>第八章 旋转电机防雷</b>	210
第一节 旋转电机防雷的特点	210
第二节 直配电机的防雷	211
第三节 非直配电机的防雷	218
习题	223

### 第三部分 内部过电压

<b>第九章 工频过电压</b>	224
第一节 长线路电容效应引起的工频过电压	225
第二节 不对称短路引起的工频电压升高	238
第三节 突然甩负荷引起的工频电压升高	240
习题	242

第十章 谐振过电压	243
第一节 概述	243
第二节 线性谐振过电压	244
第三节 含有非线性电感的电路	252
第四节 断线引起的铁磁谐振过电压	262
第五节 电磁式电压互感器饱和引起的过电压	267
第六节 超高压电网中的谐振过电压	273
第七节 参数谐振过电压	279
习题	282
第十一章 操作过电压	284
第一节 间歇电弧接地过电压	285
第二节 开断电感性负载时的过电压	290
第三节 开断电容性负载时的过电压	297
第四节 电力系统解列过电压	307
第五节 空载线路合闸过电压	308
第六节 接地故障及故障清除过电压	316
第七节 GIS 中的快速暂态过电压 (VFTO)	318
第八节 限制操作过电压的主要措施	322
习题	327

#### 第四部分 电力系统绝缘配合

第十二章 电力系统绝缘配合	329
第一节 中性点接地方式对绝缘水平的影响	329
第二节 绝缘配合的原则	329
第三节 绝缘配合的统计法	330
第四节 线路和变电站架空导线绝缘的选择	333
第五节 电气设备绝缘水平的确定	340
习题	344
参考文献	345



# 第一部分 理论 基础

## 第一章 线性集中参数回路的过渡过程

电力系统是各种电气设备(诸如电机、变压器、互感器、避雷器、断路器、电抗器和电容器等)经线路连接成的一个保证安全发供电的整体。从电路的观点看,电力系统除电源外,可以用R、L、C三个典型元件的不同组合来表示。其中,L、C为储能元件,它们是过电压形成的条件;R为耗能元件,一般可抑制过电压的发展<sup>①</sup>。当电路中元件及其连线的最大实际线性尺寸*l*比起我们所感兴趣的谐波的波长 $\lambda$ 小得多时,可以作为集中参数处理,否则应按分布参数分析。本章先讨论集中参数电路的过渡过程问题,有关分布参数电路的过渡过程问题将在下一章讨论。

### 第一节 由R、L、C组成的电路在直流电压作用下的过渡过程

#### 一、直流电压作用下L、C串联回路上的过渡过程

在电力系统中,过电压可以在回路中有串联的L、C时出现。作为分析复杂状态下过渡过程的基础,先来研究直流电压作用在L、C串联回路上的过渡过程以及由之而产生的过电压,并且着重讨论它的物理概念。

如图1-1-1所示,在未合闸时, $i=0$ , $u_C=0$ 。合闸后根据基尔霍夫电压定律,可写出

$$E = u_L + u_C \quad (1-1-1)$$

$$u_L = L \frac{di}{dt} \quad (1-1-2)$$

$$u_C = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int i dt \quad (1-1-3)$$

因此,电路方程可写成为

$$E = L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt$$

$$\text{或} \quad LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + u_C = E \quad (1-1-4)$$

式(1-1-4)的解为

$$u_C = E(1 - \cos \omega_0 t) \quad (1-1-5)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

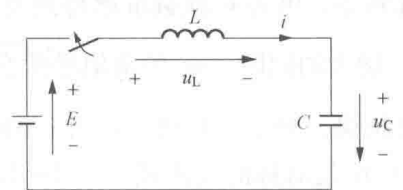


图1-1-1 直流电压作用在L、C串联回路上

<sup>①</sup> 在个别情况下,在电路中不适当地加入电阻,也可能导致过电压出现,参看本章第一节式(1-1-19)。

将式 (1-1-5) 代入式 (1-1-3), 并将式 (1-1-3) 改写为  $i=C \frac{du_C}{dt}$ , 则得

$$i = \frac{E}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \sin \omega_0 t \quad (1-1-6)$$

现在用物理概念来说明数学解的意义。由于电感中电流不能突变, 因此在  $t=t_1=0^+$  时 (见图 1-1-2),  $i_L=0$ 。又由于  $t=t_1=0^+$  时电容  $C$  上的电荷  $q$  为零, 即  $u_C=0$ ,  $u_L=E-u_C=E$ , 故有  $\frac{di}{dt}=\frac{E}{L}$ , 即  $t=t_1=0^+$  时  $i$  曲线将自零向上增长, 且在整个过渡过程中, 此时电

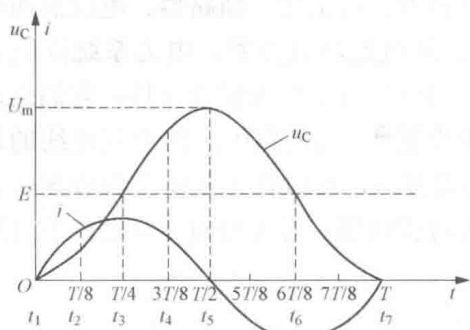


图 1-1-2 图 1-1-1 回路中  $i$  和  $u_C$  随时间的变化

流增长最快。到时刻  $t_2$  时, 由于  $q = \int_0^{t_2} i dt$  已有一定的数值, 即  $u_C = \frac{1}{C} \int_0^{t_2} i dt$  已上升到一定的数值。

此时,  $u_L=E-u_C$  的值必然下降, 因此  $\frac{di}{dt}=\frac{U_L}{L}$  也随之下降, 即  $i$  曲线向上增长的势头已渐趋平缓。到某一时刻  $t_3$ , 当  $u_C$  上升到电源电压  $E$  时, 将有  $u_L=E-E=0$ , 即  $\frac{di}{dt}=0$ , 此时  $i$  达到最大值, 不再

增长。由于电感中电流不能突变, 所以尽管电容上的电压已充至电源电压,  $i$  将继续经  $L$  向  $C$  流通, 即电源将继续对电容充电。在  $t_3 < t \leq t_5$  的时段中,  $u_C$  值会越来越大。但应注意到此时  $u_L=E-u_C$  已变为负值, 即  $\frac{di}{dt}$  为负, 所以随着  $t$  的加大, 电流  $i$  将逐渐下降。然而, 只要  $i$  未下降到零, 电容  $C$  就会继续得到充电,  $u_C$  就会继续增大, 只不过增大速度逐渐变慢而已。在  $u_C$  增大的同时,  $u_L$  的负值必然会越来越大, 即  $\frac{di}{dt}$  的负值越来越大, 这意味着  $i$  将下降得越来越快。到某一时刻  $t_5$ , 当  $i$  下降到零时,  $u_C$  将上升到最大值  $U_m$ 。由于电流由  $t_1 \sim t_3$  以及  $t_3 \sim t_5$  是对称的 [由式 (1-1-6) 可以看出此点], 所以由  $t_3 \sim t_5$  间  $C$  上电荷的增多必然等于由  $t_1 \sim t_3$  间  $C$  上电荷的增多, 因此到  $t_5$  时  $u_C$  的值必为  $t_3$  时  $u_C$  值的 2 倍, 即  $U_m=2E$  (当  $C$  上无初始电荷时)。

上述分析说明,  $C$  上电压  $u_C$  的最大值之所以会比电源电压  $E$  高出 1 倍, 是因为当电源通过电感  $L$  向电容  $C$  充电时, 除使  $C$  获得静电场能量  $\frac{1}{2}Cu_C^2$  外, 电源所提供的电流同时使电感  $L$  中储有磁能  $\frac{1}{2}Li^2$ 。当  $t=t_3$ ,  $C$  上电压  $u_C$  到达  $E$  时,  $i$  正好到达最大值, 即  $L$  中的磁能最大, 为  $\frac{1}{2}Li^2 = \frac{1}{2}L \left( E/\sqrt{\frac{L}{C}} \right)^2 = \frac{1}{2}CE^2$ 。此时, 电源供出的能量将为  $CE^2$ 。当  $t_3 < t \leq t_5$  时, 由于电流方向未变, 电源仍继续供给能量, 当  $t=t_5$  时,  $i=0$ , 电源供出的总能量  $2CE^2 = \frac{1}{2}C(2E)^2$  将完全以静电场的形式储存于电容中, 所以有  $(u_C)_m=U_m=2E$ 。

显然, 当  $t > t_5$  时电容将开始经过  $L$  向电源放电, 此时电流  $i$  将为负值 (放电电流)。与

前述充电过程一样，初时放电电流很小，随着时间的增长，放电电流将不断增加；同时，随着电容上电压的不断下降，放电电流的增加也将不断减慢。当电容上的电压下降到  $u_C = E$  时（图 1-1-2 中时刻  $t_6$ ），将有  $\frac{di}{dt} = 0$ ，此时放电电流将不再增加，也就是说电流到达负的最大值。同样，由于电感中电流不能突变，当  $t_6 \leq t < t_7$ ， $u_C \leq E$  时，电容还将继续经电感向电源放电，直到放电电流减小到零，电容上的电压也下降到零为止（图 1-1-2 中时刻  $t_7$ ）。

从  $t_7$  开始，电流和电压的变化将重复上述过程。由于回路中没有电阻存在，这一过程将一直重复下去，即回路中的电流  $i$  及电容上的电压  $u_C$  将发生周期性的振荡。实际上，回路中不可避免地要存在电阻，只要回路中有少量电阻  $R$  ( $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ ) 存在，则经过若干周期后，电容上的电压最终一定会衰减到它的稳态值——电源电压  $E$ 。

下面再来讨论直流电源  $E$  通过电感  $L$  作用到初始电压为  $u_C(0)$  的电容  $C$  上的情况 [见图 1-1-3 (a)]。显然，此时  $u_C$  的解为

$$u_C = E - [E - u_C(0)] \cos \omega_0 t \quad (1-1-7)$$

从上式可知， $u_C$  可以看作是由两部分叠加而成：第一部分为稳态值  $E$ ；第二部分为振荡部分，后者是由于起始状态和稳定状态有差别而引起的。振荡部分的振幅 = 稳态值一起始值。因此，由于振荡而产生的过电压可以用下列更普遍的式子求出

$$\begin{aligned} \text{过电压} &= \text{稳态值} + \text{振荡幅值} \\ &= \text{稳态值} + (\text{稳态值} - \text{一起始值}) \\ &= 2 \text{倍稳态值} - \text{一起始值} \end{aligned} \quad (1-1-8)$$

式 (1-1-8) 是最大过电压估算的基础，利用这个关系式，可以很方便地估算出由振荡而产生的过电压的值。例如，当电容  $C$  上的起始电压  $u_C(0) = -E$  时，由于稳态电压为  $E$ ，电容上出现的最大过电压将为  $3E$ 。 $u_C$  的波形如图 1-1-3 (b) 所示。

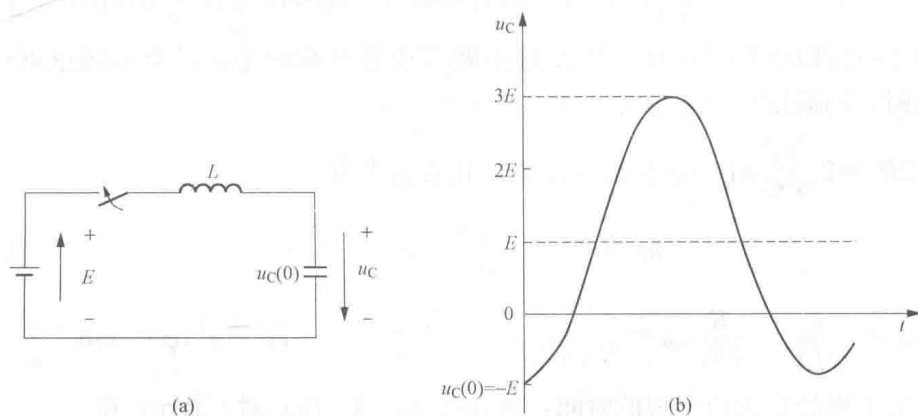


图 1-1-3 直流电源  $E$  通过电感  $L$  加到初始电压为  $u_C(0)$  的电容  $C$  上  
(a) 接线图；(b) 电容  $C$  上的电压

## 二、电阻对振荡的阻尼作用

为了抑制过电压的发展，可采用串联阻尼——在  $L$ 、 $C$  回路中串入电阻（见图 1-1-4），或并联阻尼——在  $L$  或  $C$  上并联电阻（见图 1-1-5）的方式。定量的分析要借助于回路的

特征方程和特征根。

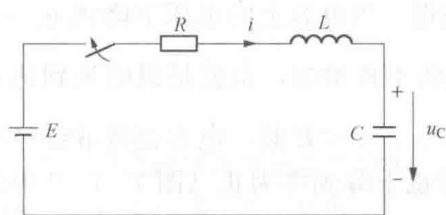


图 1-1-4 串联阻尼

### 1. 串联阻尼

仿照式 (1-1-4) 列出图 1-1-4 回路的微分方程

$$LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + RC \frac{du_C}{dt} + u_C = E$$

其特征方程为

$$LCp^2 + RCp + 1 = 0 \quad (1-1-9)$$

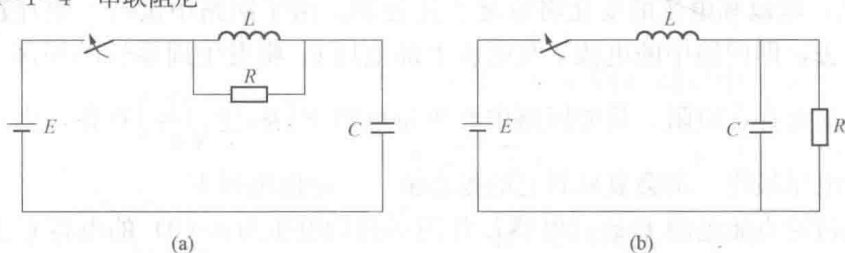


图 1-1-5 并联阻尼

(a) 在 L 上并联电阻; (b) 在 C 上并联电阻

其特征根为

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$$

取  $R_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$ , 上式可改写为

$$p_{1,2} = -\frac{1}{\sqrt{LC}} \times \frac{R}{2R_0} \pm \sqrt{\frac{1}{LC} \left(\frac{R}{2R_0}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$$

由上式可见, 当  $R \geq 2R_0 = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$  时,  $p_{1,2}$  均为实数根。此时振荡将完全被阻尼, 在电容上不会出现高出于电源电压的过电压, 因此这里就不作进一步讨论, 以下只讨论  $R < 2R_0$  的情况。在讨论时, 均假设初始条件为  $i=0$ 、 $u_C=0$ 。

当  $R < 2R_0 = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$  时,  $u_C$  呈衰减振荡, 其表达式为

$$u_C = E \left[ 1 - \frac{e^{-\alpha t}}{\cos\varphi} \cos(\omega t - \varphi) \right] \quad (1-1-10)$$

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{LC}} \times \frac{R}{2R_0}, \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} \left[ 1 - \left(\frac{R}{2R_0}\right)^2 \right]} = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}, \varphi = \tan^{-1} \frac{\alpha}{\omega}$$

为求电容上电压最大值出现的时间, 可将式 (1-1-10) 对  $t$  求导, 得

$$\frac{du_C}{dt} = \frac{E}{\cos\varphi} [\omega e^{-\alpha t} \sin(\omega t - \varphi) + \alpha e^{-\alpha t} \cos(\omega t - \varphi)] \quad (1-1-11)$$

令  $\frac{du_C}{dt} = 0$ , 得  $\frac{\sin(\omega t - \varphi)}{\cos(\omega t - \varphi)} = -\frac{\alpha}{\omega}$ , 即

$$\tan(\omega t - \varphi) = -\tan\varphi$$

由此可见, 电容上的电压最大值将出现在  $\omega t = \pi$  时, 其值为

$$(u_c)_m = E(1 + e^{-\frac{\alpha}{\omega}\pi}) \quad (1-1-12)$$

在这里, 串联电阻的作用是使电感中的磁能和电容中的电能在相互转换的过程中不断被消耗, 显然其值越大越好。

### 2. 并联阻尼

同样, 根据图 1-5 可得并联阻尼时回路的特征方程为

$$LCRp^2 + Lp + R = 0 \quad (1-1-13)$$

其特征根为

$$\begin{aligned} p_{1,2} &= -\frac{1}{2RC} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2RC}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \\ &= -\frac{1}{\sqrt{LC}} \times \frac{R_0}{2R} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{LC}} \times \frac{R_0}{2R}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \end{aligned} \quad (1-1-14)$$

由此可知, 在并联阻尼的情况下, 当  $R \leq \frac{1}{2}R_0 = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{L}{C}}$  时,  $p_{1,2}$  均为实根, 电容上将不会出现过电压, 而当  $R > \frac{1}{2}R_0 = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{L}{C}}$  时, 电容上的最大过电压仍可用式 (1-1-12) 表示, 只要取  $\alpha = \frac{1}{\sqrt{LC}} \times \frac{R_0}{2R}$ ,  $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} \left[1 - \left(\frac{R_0}{2R}\right)^2\right]}$  即可。在这里, 并联电阻的作用是直接消耗掉  $L$  (或  $C$ ) 中的能量, 使之不能全部转送到  $C$  (或  $L$ ) 中去, 因此它越小越好。

综上所述, 采用阻尼电阻后, 电容上的电压值均可按式 (1-1-12) 进行计算, 即过电压的值将由  $\frac{\alpha}{\omega}$  决定。由式 (1-1-12) 不难算出, 在不满足临界阻尼的条件下, 在串联阻尼时只要满足  $R \geq 1.4R_0$ , 在并联阻尼时只要满足  $R \leq \frac{1}{1.4}R_0$  就有  $e^{-\frac{\alpha}{\omega}\pi} \leq 0.05$ , 就可使  $(u_c)_m$  不超过  $1.05E$ 。

### 3. 串、并联电阻同时存在

此处再来讨论已存在串联阻尼电阻  $R$  后再设置并联电阻  $R_b$  的情况 (见图 1-1-6)。

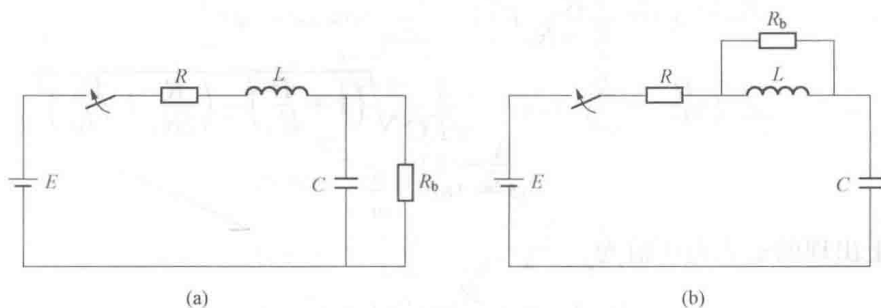


图 1-1-6 同时存在串联和并联电阻

(a) 在  $C$  上并联电阻; (b) 在  $L$  上并联电阻

图 1-1-6 (a) 为  $R_b$  和电容并联的情况, 其特征方程及特征根为

$$LCR_b p^2 + (CRR_b + L)p + R + R_b = 0 \quad (1-1-15)$$

$$p_{1,2} = -\frac{1}{\sqrt{LC}}\left(\frac{R}{2R_0} + \frac{R_0}{2R_b}\right) \pm \frac{1}{\sqrt{LC}}\sqrt{\left(\frac{R}{2R_0} + \frac{R_0}{2R_b}\right)^2 - \left(1 + \frac{R}{R_b}\right)} \quad (1-1-16)$$

图 1-1-6 (b) 为  $R_b$  和电感并联的情况, 其特征方程及特征根为

$$LC(R + R_b)p^2 + (CRR_b + L)p + R_b = 0 \quad (1-1-17)$$

$$p_{1,2} = -\frac{1}{\sqrt{LC}}\left(\frac{R}{2R_0} + \frac{R_0}{2R_b}\right)\left(\frac{R_b}{R + R_b}\right) \pm \frac{1}{\sqrt{LC}} \times \frac{R_b}{R + R_b} \sqrt{\left(\frac{R}{2R_0} + \frac{R_0}{2R_b}\right)^2 - \left(1 + \frac{R}{R_b}\right)} \quad (1-1-18)$$

可见, 无论  $R_b$  和电容并联还是和电感并联, 其不振荡的条件均为

$$R_b^2 R^2 - 2R_0^2 R_b R + (R_0^4 - 4R_0^2 R_b^2) \geq 0 \quad (1-1-19)$$

如取  $R$  为串联阻尼的临界值  $2R_0$ , 即  $R = 2R_0$ , 则式 (1-1-19) 可改写为

$$R_0 - 4R_b \geq 0$$

这一结果说明, 在已被串联电阻  $2R_0$  完全阻尼的  $L$ 、 $C$  串联回路 ( $R_b = \infty$ ) 中, 加并联电阻  $R_b$  后, 有时反而会引起振荡, 只有当  $R_b \leq \frac{1}{4}R_0$  时, 振荡才能消除。

如在式 (1-1-19) 中取  $R_b = \frac{1}{2}R_0$ , 则该式可改写为

$$\frac{1}{4}R - R_0 \geq 0$$

即在已被并联电阻  $\frac{1}{2}R_0$  完全阻尼的  $L$ 、 $C$  回路 ( $R = 0$ ) 中, 加串联电阻后也可能引起振荡; 而只有当  $R \geq 4R_0$  时, 振荡才会消除。

可见, 电阻不是在任何情况下都可以起到阻尼振荡的作用, 不正确地使用电阻有时反而可导致振荡。还需说明的是, 在已实现串联阻尼的条件下, 由于在电容上并联电阻或在电感上并联电阻而促使电容上电压重新振荡的机制是不同的。前者是由并联电阻  $R_b$  和  $R$  的分压使电容上的稳态电压降低所造成的, 振荡只是围绕稳态值  $\frac{R_b}{R + R_b}E$  进行, 其方程为

$$u_c = \frac{R_b}{R + R_b}E \left[ 1 - \frac{e^{-\alpha t}}{\cos\varphi} \cos(\omega t - \varphi) \right] \quad (1-1-20)$$

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{LC}}\left(\frac{R}{2R_0} + \frac{R_0}{2R_b}\right), \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}\sqrt{\left(1 + \frac{R}{R_b}\right) - \left(\frac{R}{2R_0} + \frac{R_0}{2R_b}\right)^2}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\alpha}{\omega}$$

此时, 电容上出现的最大电压值为

$$(u_c)_m = \frac{R_b}{R + R_b}E(1 + e^{-\frac{\alpha}{\omega}\pi}) \quad (1-1-21)$$

在  $R = 2R_0$ , 且  $R_b > \frac{1}{4}R_0$  的情况下所算得的与不同的  $R_b$  对应的  $\frac{(u_c)_m}{E}$  值列于表 1-1-1 中。由表 1-1-1 显见, 当  $\frac{R_b}{R_0} \rightarrow \infty$  时, 振荡将因幅值趋于零而消失, 当  $\frac{R_b}{R_0} \rightarrow \frac{1}{4}$  时, 振荡的幅值也将趋于零, 而当  $R_b = R_0$  时, 振荡发展最充分。然而, 虽然当  $R = 2R_0$  时, 在  $R_b > \frac{1}{4}R_0$

的所有范围内，回路都有振荡，但由于其稳态值 $\frac{R_b}{2R_0+R_b}$ 低且衰减又强，所以根本不会出现任何过电压。可见，振荡虽然常常会产生过电压，但它并不是形成过电压的充分条件。

表 1-1-1 在电容上并联电阻时的 $\frac{(u_C)_m}{E}$ 值

$R_b$	$\frac{R_b}{2R_0+R_b}$	$e^{-\frac{\alpha}{\omega}\pi}$	$\frac{(u_C)_m}{E}$
$\rightarrow \frac{1}{4}R_0$	$\rightarrow \frac{1}{9}$	$\rightarrow 0$	$\rightarrow 0.111$
$\frac{1}{3}R_0$	$\frac{1}{7}$	0.000 115	0.143
$\frac{1}{2}R_0$	$\frac{1}{5}$	0.001 867	0.200
$R_0$	$\frac{1}{3}$	0.004 334	0.335
$2R_0$	$\frac{1}{2}$	0.002 640	0.501
$4R_0$	$\frac{2}{3}$	0.000 675	0.667
$6R_0$	$\frac{3}{4}$	0.000 200	0.750
$8R_0$	$\frac{4}{5}$	0.000 068	0.800
$10R_0$	$\frac{5}{6}$	0.000 026	0.833
$\rightarrow \infty$	$\rightarrow 1$	$\rightarrow 0$	$\rightarrow 1$

在电感上并联电阻而引起电容上电压振荡的机制是： $R_b$ 与 $L$ 的并联加速了电源对电容的充电过程，它会使 $C$ 上产生过电压。 $L$ 上并联电阻后，电容上的电压仍可用式(1-1-10)表示，电容上出现的最大过电压值也可用式(1-1-12)表示。只是式中 $\alpha$ 、 $\omega$ 、 $\varphi$ 应取为

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{LC}} \frac{R_b}{R+R_b} \left( \frac{R}{2R_0} + \frac{R_0}{2R_b} \right)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \frac{R_b}{R+R_b} \sqrt{\left(1 + \frac{R}{R_b}\right) - \left(\frac{R}{2R_0} + \frac{R_0}{2R_b}\right)^2}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left[ \frac{\alpha}{\omega} - \frac{1}{\omega C(R+R_b)} \right]$$

在 $R=2R_0$ ，且 $R_b > \frac{1}{4}R_0$ 的情况下，在 $L$ 上并联不同的 $R_b$ 时所求得的 $\frac{(u_C)_m}{E}$ 值列于表1-1-2中。计算结果同样说明当 $\frac{R_b}{R_0} \rightarrow \infty$ 和 $\frac{R_b}{R_0} \rightarrow \frac{1}{4}$ 时振荡将消失，而且最严重的振荡发生在 $R_b=R_0$ 时。由于此时， $R_b$ 是与电感并联的，它不再能够使电容上的稳态电压得到降低，所以振荡可以使电容上的电压高出电源电压。虽然如此，由于振荡的衰减极快，所呈现的过电压值是极为微小的，最大不超过 $1.005E$ ，在工程上完全可以忽略不计。

表 1-1-2

在电感上并联电阻时的  $\frac{(u_C)_m}{E}$  值

$R_b$	$e^{-\frac{\alpha}{\omega \pi}}$	$\frac{(u_C)_m}{E}$
$\rightarrow \frac{1}{4}R_0$	$\rightarrow 0$	$\rightarrow 1.000\ 000$
$\frac{1}{3}R_0$	0.000 115	1.000 115
$\frac{1}{2}R_0$	0.001 867	1.001 867
$R_0$	0.004 334	1.004 334
$2R_0$	0.002 640	1.002 640
$4R_0$	0.000 675	1.000 675
$6R_0$	0.000 200	1.000 200
$8R_0$	0.000 068	1.000 068
$10R_0$	0.000 026	1.000 026
$\rightarrow \infty$	$\rightarrow 0$	$\rightarrow 1.000\ 000$

鉴于这种既有并联阻尼电阻又有串联阻尼电阻的回路衰减极快，所以通常将这种回路称为“超衰减回路”。其衰减系数为  $\alpha = \frac{1}{2\sqrt{LC}} = \left(\frac{R_0}{R_b} + \frac{R}{R_0}\right)$ 。在这种回路中，只要其中一个电阻能满足临界阻尼的条件，虽然仍有产生振荡的可能，但已不必担心产生过电压。

## 第二节 任意电压作用在 $L$ 、 $C$ 串联电路上的过渡过程

在实际情况下，作用在  $L$ 、 $C$  振荡回路上的电源电压可以具有各种不同的波形。在已知  $L$ 、 $C$  振荡回路在直流电压作用下的解（或阶跃函数下的响应）时，任意波形电压作用下的解就可以利用丢阿莫尔（Duhamel）积分求出。即将任意电压波形分解成作用时间相隔  $d\tau$  的无数阶跃函数（见图 1-2-1），分别求出各阶跃函数的解后叠加而得。其数学表达式为

$$u_C = e(0)y(t) + \int_0^t e'(\tau)y(t-\tau)d\tau \quad (1-2-1)$$

其中， $e(t)$  为任意电压波形， $y(t)$  为单位阶跃函数的解。

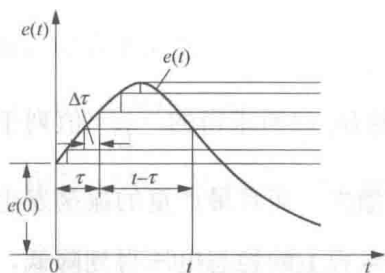


图 1-2-1 将任意波形分解为阶跃函数  $u_C$  上的电压为

下面来讨论过电压计算中常遇到的几种电压波形作用于  $L$ 、 $C$  振荡回路时的过渡过程及电容上可能出现的过电压。

### 一、波长为 $S$ 的矩形波电压作用于 $L$ 、 $C$ 振荡回路

由于这种波形比较简单，可以直接分解为两个幅值相同、极性相反、作用时间相差  $S$  的直流电压，如图 1-2-2 (a) 中虚线所示。因此，应用叠加定理很容易得出



$$\text{当 } t \leq S \text{ 时} \quad u_C = E(1 - \cos \omega_0 t) \quad (1-2-2)$$

$$\begin{aligned} \text{当 } t \geq S \text{ 时} \quad u_C &= E(1 - \cos \omega_0 t) - E[1 - \cos \omega_0 (t - S)] \\ &= 2E \sin \frac{\omega_0 S}{2} \sin \omega_0 \left( t - \frac{S}{2} \right) \end{aligned} \quad (1-2-3)$$

式中： $\omega_0$  为振荡频率， $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 。

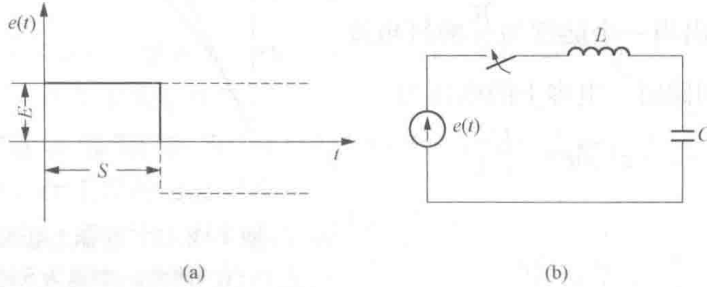


图 1-2-2 波长为  $S$  的矩形波电压作用于  $L$ 、 $C$  回路

(a) 电压波形；(b)  $L$ 、 $C$  回路

据此可得振荡周期  $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$ 。

由式 (1-2-2) 可知，如  $S = \frac{T}{2} = \frac{\pi}{\omega_0}$ ，则在  $\omega_0 t = \pi$ ，即  $t = \frac{\pi}{\omega_0} = S$  时，振荡恰好能得到完全发展，电容上电压恰达其最大值  $2E$ 。显然，在  $S > \frac{T}{2}$  的情况下，由于在  $t = \frac{\pi}{\omega_0} < S$  时，振荡已得到完全发展，所以电容上的电压可达最大值  $2E$ 。但如波长较短，即  $S < \frac{T}{2}$ ，则在  $t = S$  时，电容上电压还来不及上升到其最大值  $2E$ 。此时，电容上电压的最大值应根据  $t \geq S$  时的式 (1-2-3) 进行判定，也就是说电容上电压的最大值将出现在  $\omega_0 \left( t - \frac{S}{2} \right) = \frac{\pi}{2}$  或  $t = \frac{\pi}{2\omega_0} + \frac{S}{2}$  时，其值为

$$(u_C)_m = 2E \sin \frac{\omega_0 S}{2} \quad (1-2-4)$$

式 (1-2-4) 说明，在  $S < \frac{T}{2}$  时， $(u_C)_m$  与  $S$  的关系式由正弦函数决定，只有当  $\sin \frac{\omega_0 S}{2} \geq \frac{1}{2}$ ，即  $S \geq \frac{1}{3} \frac{\pi}{\omega_0} = \frac{T}{6}$  时， $u_C$  上才会出现高于电源电压的过电压。而当  $S$  增至  $\frac{T}{2}$  时， $u_C$  将达  $2E$ ，与由式 (1-2-3) 所得的结果相同。

由以上分析可知，由于振荡的发展需要时间，因此并不是所有有限波长的矩形波作用在  $L$ 、 $C$  振荡回路上都可以使电容上出现过电压。只有当波长和回路的自振频率相比满足  $S \geq \frac{T}{6}$  的条件时，才可能出现过电压。图 1-2-3 中的曲线  $a$  给出了有限长矩形波作用在  $L$ 、 $C$  振荡回路时波长和过电压的关系。