

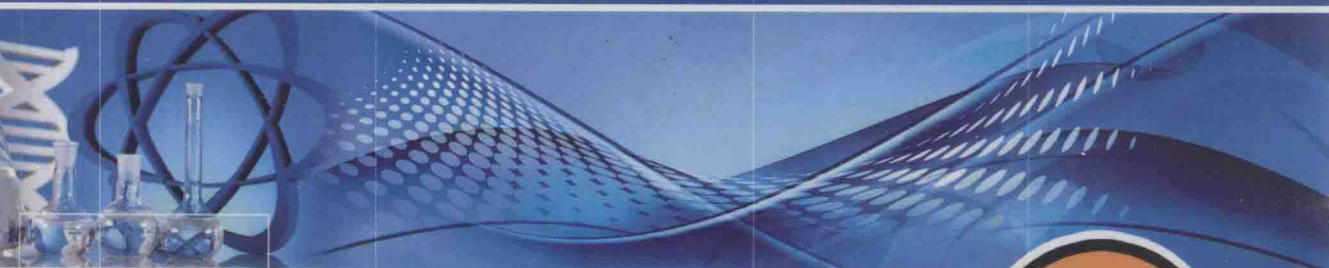


普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理实验

Experiments of University Physics

◎ 朱世坤 主编



提高篇



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理实验——提高篇

主 编 朱世坤
副主编 聂宜珍
参 编 杨先卫 沈金洲
辛旭平 杜晓超 熊 伟



机械工业出版社

本书共分三章, 含有三十二个实验。主要包括第一章物理实验素质提高、第二章工程技术素质提高、第三章物理与技术结合, 书末附有附录供学生参考用。

本书为各专业的普及课程, 各学校可根据自己的实验条件选择实验项目, 适用于理、工、医、农、商等各学科专业。

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理实验·提高篇/朱世坤主编. —北京:
机械工业出版社, 2014. 1 (2014. 2 重印)

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 111 - 45309 - 3

I. ①大… II. ①朱… III. ①物理学 - 实验 - 高等学校
- 教材 IV. ①O4 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 315545 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 张金奎 责任编辑: 张金奎 任正一

版式设计: 霍永明 责任校对: 任秀丽

封面设计: 张 静 责任印制: 张 楠

保定市 中画美凯印刷有限公司印刷

2014 年 2 月第 1 版·第 2 次印刷

184mm × 260mm · 10.25 印张 · 232 千字

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 45309 - 3

定价: 22.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

为适应我国科技、经济和社会发展的需要，必须积极探索高素质人才培养的规律。如何培养具有创新意识、创新精神和创新能力的人才，已成为高等教育的紧迫任务。物理实验是高校理、工科学生必修的、重要的基础课程，它在培养学生的素质和能力方面占有十分重要的地位。如何面对新的形势，在物理实验教学中创造有利的环境和条件，重视学生的创新意识和创新能力的培养，是进一步深化物理实验教学改革的重要课题。

近年来，我们以三峡大学省级物理实验示范中心的成立为契机，努力探索以培养创新人才为目标的课程体系，并积极开展教学内容和教学方法的改革，确立了“精选基础，加强提高，理工渗透，探索创新”的课程体系改革原则，重组实验课程结构，确立了新的大学物理实验课程体系，在此基础上编写了这套《大学物理实验——基础篇》和《大学物理实验——提高篇》改革教材。

“基础篇”定位为基础性物理实验，主要是关于仪器的使用、基本量测量、基本实验技能的训练和基本实验方法的学习等，涉及力学、热学、电磁学、光学、近代物理实验的一些基本实验技能和基本知识点，适用于理、工、医、农、商等各学科的学生，为各专业普及性课程。

“提高篇”定位为提高性实验，分别从物理实验素质提高、工程技术素质提高和物理与技术结合三个方面安排实验项目，适用于对数理知识和技能要求相对较高的理工专业的学生。

在本套教材出版之际，要特别感谢三峡大学物理实验示范中心的所有老师，这套教材是大家共同智慧的结晶，是三峡大学几十年物理实验教学经验的总结，更是这几年教学改革成果的体现。本套具有创新体系的实验教材，其编者都是在教学第一线工作的、具有丰富经验的教师，大家集体讨论教材编写方案，以协商分工、个人执笔的方式完成书稿，各部分撰写人的名单附在各自撰写部分之后。尽管一些老师未能直接参与教材的编写，但教材中也有他们多年的劳动和奉献。新实验体系在三峡大学经过多年教学实践的考验，不断完善，形成了符合学生实际情况的实验教学特色。

本套教材的出版得到了湖北教学名师冯笙琴教授的关心和支持，他对教材提出了许多指导性的建议和意见，使我们深受启迪，在此对他表示深深的谢意！

由于我们水平有限，书中难免存在疏漏及谬误之处，真诚欢迎使用本书的各位读者提出宝贵意见。

编者

于三峡大学理学院

目 录

前言

第一章 物理实验素质提高 1

- 实验一 RLC 电路暂态过程的研究 1
- 实验二 谐振电路研究 9
- 实验三 衍射光栅测波长 14
- 实验四 最小偏向角法测折射率 17
- 实验五 光的衍射现象的研究 22
- 实验六 金属逸出电势的测定 26
- 实验七 弗兰克-赫兹实验 30
- 实验八 电子比荷的测量 36
- 实验九 光偏振现象的研究 44
- 实验十 自组显微镜与望远镜 45
- 实验十一 制作全息光栅 46

第二章 工程技术素质提高 49

- 实验十二 动态法测弹性模量 49
- 实验十三 用波尔共振仪研究受迫振动 53
- 实验十四 不良导体热导率的测定 58
- 实验十五 交流电桥 62
- 实验十六 PN 结正向压降与温度
关系的研究 73
- 实验十七 电子束偏转与聚焦 79
- 实验十八 相对介电常数的测定 86
- 实验十九 螺线管内磁场的研究 89
- 实验二十 用焦距仪测透镜焦距与

分辨本领 97

实验二十一 透镜组基点的测定 102

实验二十二 非线性元件的伏安
特性的测定 105

第三章 物理与技术结合 108

实验二十三 霍尔效应及其应用 108

实验二十四 直流非平衡电桥电压
输出特性的研究 112

实验二十五 铁磁材料的磁滞回线与
基本磁化曲线 117

实验二十六 观测光的旋光现象 125

实验二十七 光敏电阻特性研究 129

实验二十八 光纤音频信号传输技术 131

实验二十九 非线性电路研究混沌现象 136

实验三十 透明物质折射率的测定 140

实验三十一 用金属箔式电阻应变片
做非平衡电桥的应用 147

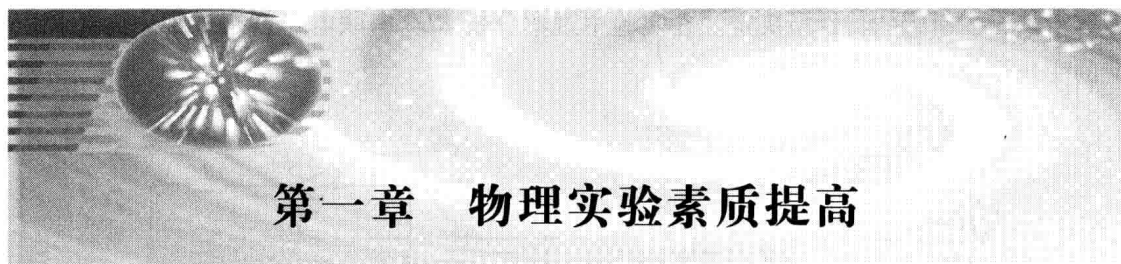
实验三十二 光纤位移传感器的
测速应用 153

附录 155

附录 A 物理学常量表 155

附录 B 中华人民共和国法定计量
单位 156

参考文献 159



第一章 物理实验素质提高

通过大学物理实验—基础篇的学习,学生初步掌握了物理实验的基本知识、基本技能和基本方法,接受了科学实验的初步训练。本章的教学目的是力图使学生的物理实验素质得到进一步的提高,为以后更高层次的学习奠定基础。

学习本章内容,学生要以实验设计者的角度去钻研、领会、审视各实验原理;比较、选择科学合理的实验方法;根据测量要求,合理选配测量仪器和实验装置;筛选出最佳测量条件,确定最佳实验参数;提出实验方案。

要达到这一目的,教学计划应遵循学生认识事物的规律,循序渐进,由浅入深,从感性到理性。第一阶段,学生在老师的指导下,认真地剖析每一个实验,分析每个实验如何建立物理模型,如何处理间接量与直接量的关系,如何回避不易测量的量,怎样减小测量结果的不确定度等。第二阶段,在实验过程中引导学生认真地观察实验现象,仔细测量实验数据,不要轻易放过异常现象和异常数据,要查明原因并得出合理的解释,培养学生发现问题、分析问题和解决问题的能力。

在此基础上,适当安排知识深度恰当、难度适中的实验项目让学生进行初步的设计,提出符合实验要求的实验方案,并将方案付诸实施,让学生学习实验、研究实验、亲手做实验,系统地学习实验知识,锻炼实验能力,提高物理实验素质。

实验一 RLC 电路暂态过程的研究

RLC 电路的暂态特性的实际工作中十分重要,例如,在脉冲电路中经常遇到元件的开关特性和电容充放电的问题;在电子技术中常利用暂态特性来改善波形或是产生特定波形。在某些情况下,暂态特性也会造成危害,例如,在接通、切断电源的瞬间,暂态特性会引起电路中电流、电压过大,造成电器设备和元器件的损坏,这是需要防止的。

一、实验目的

- (1) 观察 RC, RL 电路的暂态过程,理解电容、电感特性及时间常数 τ 的物理意义。
- (2) 观察 RLC 串联电路的暂态过程,理解阻尼振动规律。

二、实验原理

电压由一个值跳变到另一个值时称为“阶跃电压”,如图 1-1 所示。在阶跃电压作用下, RLC 串联电路由一个平衡态跳变到另一个平衡态,这一转变过程称为暂态过程。在此期间电路中的电流、电容及电感上的电压呈现出规律性的变化,称为暂态特性。这一过程

主要由电容、电感的特性所决定。在实验中观察分析 RLC 串联电路暂态过程中电压及电流的变化规律。

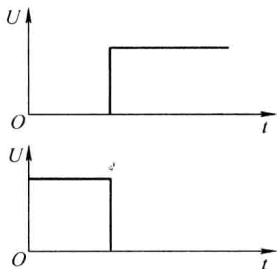


图 1-1 阶跃电压

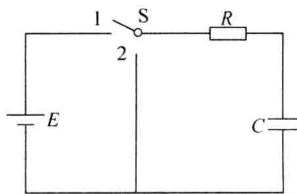


图 1-2 RC 电路的暂态过程电路图

1. RC 电路的暂态过程

电路如图 1-2 所示, 当开关 S 合向“1”时, 直流电源 E 通过 R 对电容 C 充电; 在电容 C 充电后, 把开关 S 从“1”合向“2”, 电容 C 将通过 R 放电。根据基尔霍夫电压定律, 分别得出充电和放电过程的方程为

$$\begin{cases} \text{充电过程} & U_C + iR = E \\ \text{放电过程} & U_C + iR = 0 \end{cases} \quad (1-1)$$

将 $i = C \frac{dU_C}{dt}$ 代入式 (1-1), 得

$$\begin{cases} \text{充电过程} & \frac{dU_C}{dt} + \frac{1}{RC} U_C = \frac{E}{RC} \quad (t=0 \text{ 时}, U_C=0) \end{cases} \quad (1-2)$$

$$\begin{cases} \text{放电过程} & \frac{dU_C}{dt} + \frac{1}{RC} U_C = 0 \quad (t=0 \text{ 时}, U_C=E) \end{cases} \quad (1-3)$$

方程的解分别为

充电过程

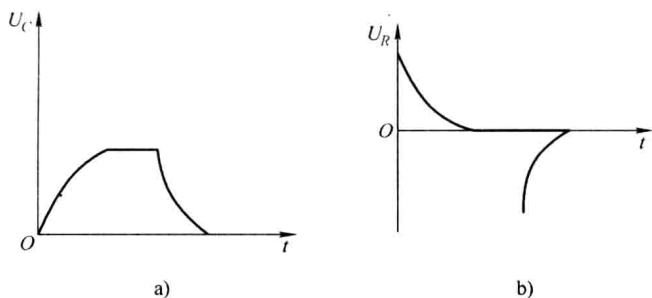
$$\begin{cases} U_C = E(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \\ i = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad \text{或} \quad U_R = E e^{-\frac{t}{RC}} \end{cases} \quad (1-4)$$

放电过程

$$\begin{cases} U_C = E e^{-\frac{t}{RC}} \\ i = -\frac{E}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad \text{或} \quad U_R = -E e^{-\frac{t}{RC}} \end{cases} \quad (1-5)$$

由上述公式可知, 在充电过程中, U_C 和 i 均按指数规律变化, 充电时 U_C 逐渐加大, 放电时则逐渐减小。式 (1-5) 中电流的负号表示放电过程的电流方向与充电过程相反。

实验中, 可通过 U_R 来观察 i 的变化。 U_C 和 U_R 随时间变化的曲线如图 1-3 所示。在阶跃电压作用下, U_C 不是跃变, 而是渐变接近新的平衡数值, 其原因在于电容 C 是储能元件, 在暂态过程中能量不能跃变。

图 1-3 U_C 和 U_R 随时间变化的曲线图

在充电瞬间, 充电电流 i 非常大, 这是因为 $i = \frac{CdU_C}{dt}$, 但同时 i 的变化也要受到电阻 R 的制约, 不可能无限大, 它由下式决定:

$$i = \frac{U_R}{R} = \frac{E - U_C}{R} \quad (1-6)$$

令 $\tau = RC$, τ 称为 RC 电路的时间常数。在式 (1-5) 中, 当 $t = \tau = RC$ 时, 有

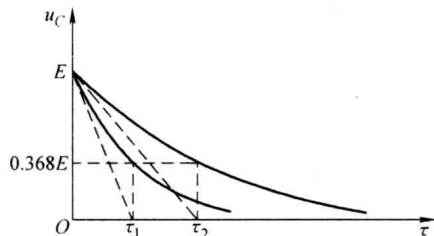
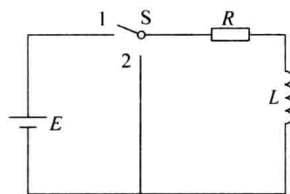
$$U_C = Ee^{-1} = 0.368E \quad (1-7)$$

可见, τ 表示放电过程中 U_C 由 E 衰减到 E 的 36.8% 所需的时间。 τ 值越大, U_C 变化越慢, 即电容 (充) 放电进行得越慢。图 1-4 给出了不同 τ 值的 U_C 衰减曲线。一般认为 $t = 5\tau$ 时, 基本达到新的稳定态, 这时 $U_C = Ee^{-5} = 0.007E$ 。

通过时间常数 τ , 电压 u_C 和时间 t 以及 R, C 数值之间建立了对应关系。根据这一特性可制成延时电路。该电路在实际中有广泛应用, 例如用于自动熄灭的节能灯。

2. RL 电路的暂态过程

电路如图 1-5 所示, 当开关 S 合向 “1” 时, 电路中有电流 i 流过, 但由于通过电感的电流不能突变, 电流 i 的增长有一个相应的变化过程。同理, 当开关 S 从 “1” 合向 “2” 时, i 也不会骤然降至零, 而只会逐渐消失。

图 1-4 不同 τ 值的 u_C 衰减曲线图 1-5 RL 电路的暂态过程电路图

方程为

$$\begin{cases} \text{电流增长过程} & L \frac{di}{dt} + iR = E \quad (t=0 \text{ 时}, i=0) \\ \text{电流消失过程} & L \frac{di}{dt} + iR = 0 \quad \left(t=0 \text{ 时}, i = \frac{E}{R}\right) \end{cases} \quad (1-8)$$

$$(1-9)$$

方程的解分别为

电流增长过程

$$\begin{cases} U_L = E e^{-\frac{tR}{L}} \\ i = \frac{E}{R} (1 - e^{-\frac{tR}{L}}) \quad \text{或} \quad u_R = E (1 - e^{-\frac{tR}{L}}) \end{cases} \quad (1-10)$$

电流消失过程

$$\begin{cases} u_L = -E e^{-\frac{tR}{L}} \\ i = \frac{E}{R} e^{-\frac{tR}{L}} \quad \text{或} \quad u_R = E e^{-\frac{tR}{L}} \end{cases} \quad (1-11)$$

可见, 不论是电流增长过程还是电流消失过程, U_R 和 U_L 都是按指数规律变化, 电路的时间常数 $\tau = L/R$ 。图 1-6a、b 分别画出了电流增长和电流消失两个过程的 $U_L - t$ 和 $U_R - t$ 曲线图形。

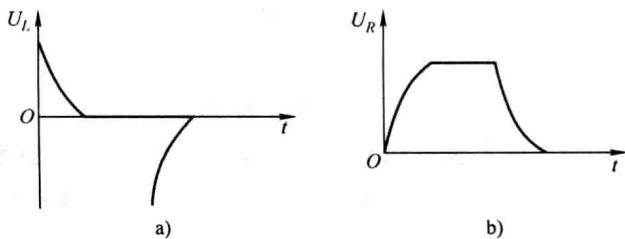


图 1-6 $U_L - t$ 和 $U_R - t$ 曲线图

3. RLC 串联电路的暂态过程

电路如图 1-7 所示。开关 S 合向“1”使电容充电至 E , 然后把 S 合向“2”, 电容在闭合的 RLC 电路中放电。此时, 电路方程为

$$L \frac{di}{dt} + Ri + U_C = 0$$

将 $i = \frac{CdU_C}{dt}$ 代入上式, 得

$$LC \frac{d^2 U_C}{dt^2} + RC \frac{dU_C}{dt} + U_C = 0 \quad (1-12)$$

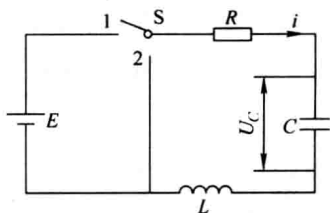


图 1-7 RLC 串联电路的暂态过程电路图

根据初始条件 $t=0$ 时, $U_C = E$, $\frac{dU_C}{dt} = 0$, 解方程。方程的解分为三种情况。

(1) $R^2 < \frac{4L}{C}$ 属于阻尼较小的情况, 其解为

$$U_C = \sqrt{\frac{4L}{4L - R^2 C}} E e^{-\frac{t}{\tau}} \cos(\omega t + \varphi) \quad (1-13)$$

式中, 时间常数为

$$\tau = \frac{2L}{R} \quad (1-14)$$

衰减振动的角频率为

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{R^2 C}{4L}} \quad (1-15)$$

U_C 随时间变化的规律如图 1-8 中曲线 I 所示, 即阻尼振动状态。此时振动的振幅呈指数衰减。 τ 的大小决定了振幅衰减的快慢, τ 越小, 振幅衰减越迅速。

如果 $R^2 \ll \frac{4L}{C}$, 通常是 R 很小的情况, 振幅的衰减很缓慢, 从式 (1-15) 可知

$$\omega \approx \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0 \quad (1-16)$$

此时近似为 LC 电路的自由振动, ω_0 为 $R=0$ 时 LC 回路的固有频率。衰减振动的周期为

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \approx 2\pi \sqrt{LC} \quad (1-17)$$

(2) $R^2 > \frac{4L}{C}$ 对应于过阻尼状态, 其解为

$$U_C = \sqrt{\frac{4L}{4L - R^2 C}} E e^{-\alpha t} \text{sh}(\beta t + \varphi) \quad (1-18)$$

式中, $\alpha = \frac{R}{2L}$; $\beta = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{R^2 C}{4L} - 1}$ 。

式 (1-18) 所表示的 $U_C - t$ 的关系曲线如图 1-8 中曲线 II 所示, 它是以缓慢的方式回零。可以证明, 若 L 和 C 固定, 随电阻 R 的增长, U_C 衰减到零的过程更加缓慢。

(3) $R^2 = \frac{4L}{C}$ 对应于临界阻尼状态, 其解为

$$U_C = E \left(1 + \frac{t}{\tau} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1-19)$$

式中, $\tau = \frac{2L}{R}$ 。它是从过阻尼到阻尼振动的过渡分界, $U_C - t$ 的关系如图 1-8 中的曲线 III 所示。

对于充电过程, 即开关 S 先在“2”, 待电容放电完毕, 再将 S 合向“1”, 电源 E 将对电容充电, 于是电路方程变为

$$LC \frac{d^2 U_C}{dt^2} + RC \frac{dU_C}{dt} + U_C = E \quad (1-20)$$

初始条件为 $t=0$ 时, $U_C=0$, $\frac{dU_C}{dt}=0$, 方程解为

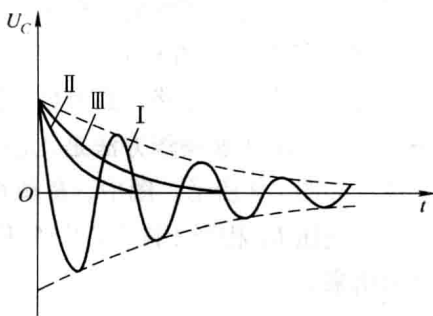


图 1-8 U_C 随时间变化的曲线图

$$\begin{cases} R^2 < \frac{4L}{C}, U_c = \sqrt{\frac{4L}{4L - R^2 C}} E e^{-\frac{t}{\tau}} \cos(\omega t + \varphi) \end{cases} \quad (1-21)$$

$$\begin{cases} R^2 > \frac{4L}{C}, U_c = \sqrt{\frac{4L}{4L - R^2 C}} E e^{-\alpha t} \operatorname{sh}(\beta t + \varphi) \end{cases} \quad (1-22)$$

$$\begin{cases} R^2 = \frac{4L}{C}, U_c = E \left(1 + \frac{t}{\tau}\right) e^{-\frac{t}{\tau}} \end{cases} \quad (1-23)$$

可见，充电过程和放电过程十分类似，只是最后趋向的平衡位置不同。

4. 观察暂态过程的方法（以 RC 电路为例）

本实验所研究的电路，其参数的暂态过程非常短暂，用扳动开关 S 记停表时间和读电压表数值这样的普通操作方法是无法观测的，因此这里采用的是“电子电路”法，其电路、仪器如图 1-9 所示。图中，R 和 C 串联构成待测电路。功率函数信号发生器输出方波信号，其电压 U_1 相当于图 1-2 中的 E 和周期性的转换开关 S； U_c 的暂态过程波形由示波器显示出来。

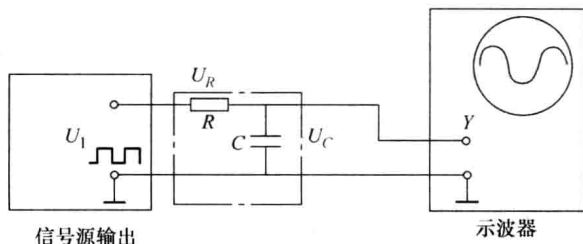


图 1-9 采用“电子电路”法观察暂态过程的电路图

图 1-10 是 U_1 、 U_c 的波形图。以 U_1 的第一个方波 $abcd$ 为例来说明实现的过程， U_1 包含着两个阶跃：上升阶跃 ab ，它对应的时刻为 t_1 ， t_2 为下降阶跃时刻（ cd ）。在 U_1 上升阶跃的“作用”下，产生了 U_c 的上升暂态过程，此过程经历了 t_1 至 t'_1 时间，这是电路的充电暂态过程。 t'_1 至 t_2 是电路的稳态期间。同样分析可得： t_2 至 t'_2 是电路的放电暂态过程， t'_2 至 t_3 是电路的稳态期间。

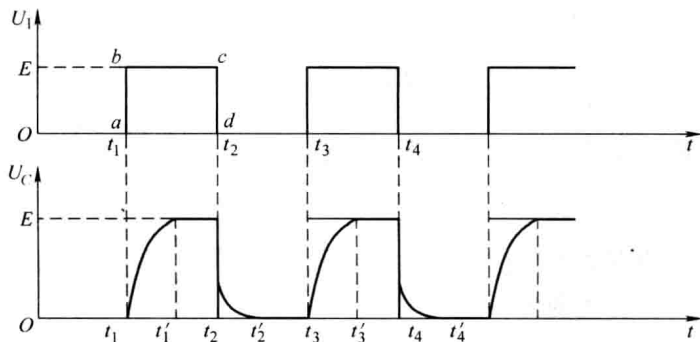


图 1-10 U_1 和 U_c 的波形图

示波器不但能显示 U_1 和 U_c 的波形，而且能测出有关的时间间隔。

5. 信号源为矩形脉冲时的暂态过程

如果将矩形脉冲（如方波）接到 RC 电路中，这时电容及电阻上的电压变化与前述直流电源作用下的结果有所不同。由于方波输出周期的变化 ($0 \rightarrow E \rightarrow 0 \rightarrow E \rightarrow \dots$) 使得电容不断充、放电，经过几个周期后，充放电过程趋于稳定，在荧光屏上看到的是达到稳定后的波形，如图 1-11 所示。充、放电过程中电容及电阻上的电压波形为

电容器充电过程

$$\begin{cases} U_C(t) = E \left(1 - \frac{e^{-\frac{t}{\tau}}}{1 + e^{-\frac{T}{2\tau}}} \right) \\ U_R(t) = \frac{E e^{-\frac{t}{\tau}}}{1 + e^{-\frac{T}{2\tau}}} \end{cases} \quad (1-24)$$

电容器放电过程

$$\begin{cases} U_C(t) = \left(\frac{E}{1 + e^{-\frac{T}{2\tau}}} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \\ U_R(t) = - \left(\frac{E}{1 + e^{-\frac{T}{2\tau}}} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \end{cases} \quad (1-25)$$

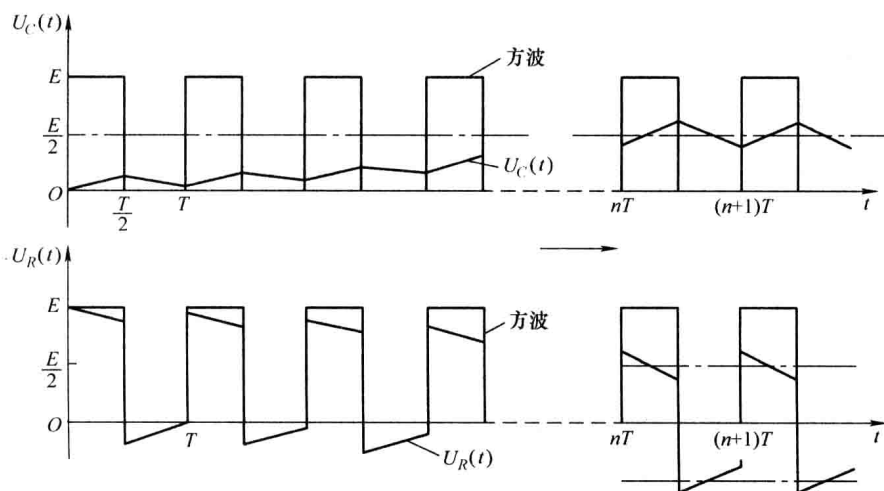


图 1-11 信号源为矩形脉冲时的波形

电容充电过程结束 $t = \left(n + \frac{1}{2}\right)T$ 时， U_C 和 U_R 的波形极值分别为

$$\begin{cases} U_C \left[\left(n + \frac{1}{2}\right)T \right] = \frac{E}{1 + e^{-\frac{T}{2\tau}}} \\ U_R \left[\left(n + \frac{1}{2}\right)T \right] = \frac{E e^{-\frac{T}{2\tau}}}{1 + e^{-\frac{T}{2\tau}}} \end{cases} \quad (1-26)$$

电容放电过程结束 $t = (n+1)T$ 时， U_C 和 U_R 的波形极值分别为

$$\begin{cases} U_C[(n+1)T] = \frac{Ee^{-\frac{T}{2\tau}}}{1+e^{-\frac{T}{2\tau}}} \\ U_R[(n+1)T] = -\frac{Ee^{-\frac{T}{2\tau}}}{1+e^{-\frac{T}{2\tau}}} \end{cases} \quad (1-27)$$

由式(1-26)、式(1-27)可见,方波作用下的波形极值与直流电源作用下的结果有明显不同。

三、实验仪器

功率函数信号发生器,双踪示波器,万用电表,可调电容箱,可调电感箱,旋转式电阻箱,单刀双掷开关,导线若干。

四、实验内容与要求

1. RC 电路的暂态过程的研究

(1) 如图 1-2 所示,连接电路,并把仪器调整在安全待测状态:①功率函数信号发生器的“幅度调节”旋钮转至输出电压最小处;②示波器的“辉度”旋钮居中;③预置 $R=6000\Omega$, $C=0.015\mu\text{F}$;④接通电源,方波频率可取 500Hz 。

(2) 用示波器观察 U_i, U_C, U_R 的波形图(显示的方波个数以少为好)。将 U_i 接在 CH_1 通道上观察方波波形,调整功率函数信号发生器“幅度调节”,使其幅值为 3V 。然后,分别观察 U_C, U_R 充放电波形。

取 $C=0.01\mu\text{F}$, R 为 $1000\Omega, 5000\Omega, 10000\Omega$ 时(供参考),记录 $U_C(t), U_R(t)$ 的波形图,标出充、放电过程;

自行确定 R, C 大小,利用示波器的时标测出 τ 值,并与理论计算值比较。要求将 R 和 C 值及其 τ 的理论值、实际值均按测量精度列于自行设计的记录表格中。

2. RL 电路的暂态过程的研究

(1) 参考图 1-5 连接好实验线路。

(2) L 取 0.1H , R 为 $1000\Omega, 2000\Omega, 5000\Omega$ 时(供参考),记录 $U_R(t), U_L(t)$ 充、放电波形,标出充、放电过程。

(3) 自行确定 R, L 大小,利用示波器的时标测出 τ 值,并与理论计算值比较。要求将 R 和 L 值及其 τ 的理论值、实际值均按测量精度列于自行设计的记录表格中。

3. RLC 串联电路的单次充、放电暂态过程

观察三种不同振动状态的 U_C 波形,自己确定电路及示波器输入通道的接法。

(1) 观察阻尼振荡波形。

取 $L=0.1\text{H}$, $C=0.001\mu\text{F}$, 并取合适的 R 数值,观察并测量阻尼振荡的周期,与用公式计算的结果进行比较。

测量电路的时间常数 τ 。电路处于阻尼振荡状态,振动的振幅呈指数衰减,时间常数 τ 决定了振幅衰减的快慢。由每次振荡的振幅 U_{C_n} 可测算出时间常数 τ 。定义开始的振幅为

U_{c_0} , 经过一次振荡后的振幅为 U_{c_1} , 第二次的振幅为 U_{c_2} , ……第 n 次振幅为 U_{c_n} , 由式 (1-13) 可以得到

$$\frac{U_{c_n}}{U_{c_0}} = e^{-\frac{n\tau}{T}}$$

用拟合法可求出时间常数 τ , 与用式 (1-14) 计算的结果进行比较。

(2) 观察临界阻尼状态。

增大 R 使波形刚刚不出现振荡, 记下此时的电阻值 R (应包括电感上的直流电阻及方波源的内阻), 并与由公式 $R^2 = \frac{4L}{C}$ 计算出的结果比较。

(3) 观察过阻尼状态。

(4) 将观察到的三种状态波形画在同一张图上。

五、思考题

1. τ 值的物理意义是什么? 如何测量 RC 串联电路的 τ 值?

2. 在 RC 电路实验中, 当时间常数比方波的脉冲宽度 (半个周期) 大得多或小得多时各有什么现象? 为什么?

3. 在 RLC 的实验中, U_c 的临界阻尼暂态过程的波形与欠阻尼、过阻尼有何差异? 采用什么方法可使 U_c 逼近临界阻尼暂态过程?

4. 在 RLC 电路中, 若方波发生器的频率很高或很低, 能观察到阻尼振荡的波形吗? 如何由阻尼振荡的波形来测量 RLC 电路的振荡周期 T ? 振荡周期 T 与角频率 ω 的关系会因方波频率的变化而发生改变吗?

(杨先卫)

实验二 谐振电路研究

在力学实验中介绍过弹簧的简谐振动、阻尼振动和强迫振动, 阐述过共振现象的一些实际应用。同样, 在电学实验中, 由正弦波信号源与电感、电容和电阻组成的串联电路, 也会产生简谐振动、阻尼振动和强迫振动。当正弦波电源输出频率达到某一频率时, 电路的电流达到最大值, 即产生谐振现象。谐振现象有许多应用, 例如, 电子技术中电磁波接收器常常用串联谐振电路作为调谐电路, 接收某一频率的电磁波信号; 利用谐振原理制成的传感器, 可用于测量液体密度及飞机油箱内液位高度等。当然, 在配电网中, 也要避免因电路谐振现象引起电容器或电感器的击穿。

一、实验目的

(1) 通过观察 RLC 串联电路的谐振现象, 加深对串联谐振电路谐振特征的了解。

(2) 测定 RLC 串联电路的频率特性曲线。

- (3) 了解电路品质因数 Q 值的意义。
- (4) 学习正确使用低频信号发生器和电子电压表（毫伏表）。

二、实验原理

1. 网络频率特性的测量方法

(1) 电压传输函数

图 1-12 所示的双口网络，在正弦信号激励下，输出响应相量 $\dot{U}_2$ 与输入激励相量 $\dot{U}_1$ 之比定义为该网络的电压传输函数。通常它是一个复数且是频率的函数，用 $H(j\omega)$ 表示，即

$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{U_2}{U_1} e^{j(\Phi_2 - \Phi_1)} = |H(\omega)| e^{j\Phi(\omega)}$$

式中， $|H(\omega)| = \frac{U_2}{U_1}$ ； $\Phi(\omega) = \Phi_2 - \Phi_1$ 。

$|H(\omega)|$ 为输出电压与输入电压之比，它随信号频率的变化而变化，称为网络的幅频特性。 $\Phi(\omega)$ 为输出相量 $\dot{U}_2$ 相对输入相量 $\dot{U}_1$ 的相移，也就是网络对信号的附加相移，它也随信号的频率变化而变化，称为网络的相频特性。幅频特性与相频特性统称为网络的频率特性。图 1-13 所示为低通网络的频率特性曲线。

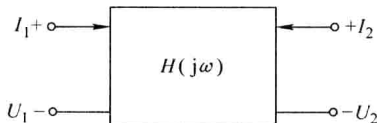


图 1-12 双口网络

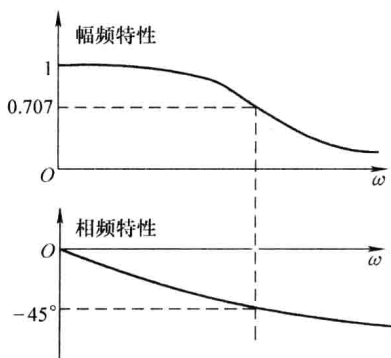


图 1-13 低通网络的频率特性曲线

(2) 网络频率特性的测量方法：点测法和扫频法

点测法的测量线路如图 1-14 所示。功率函数信号发生器可以产生电压和频率均可调节的正弦信号；电压表（或毫安表）用来测量输入、输出电压幅值，作为电压测量指示；相位差计或双踪示波器用来测量或观测正弦信号通过被测网络时发生的相移，作为相位差测量指示。在被测网络的整个测量频段内，选取若干个频率点，调节函数信号发生器使其在保持输出信号幅度不变的情况下信号频率等于所选测试点的频率值，逐点测出各相应频率的 U_1, U_2 值和相移 φ ，通过计算获得各 H 值，即可画出被测网络的幅频特性曲线和相频特性曲线。

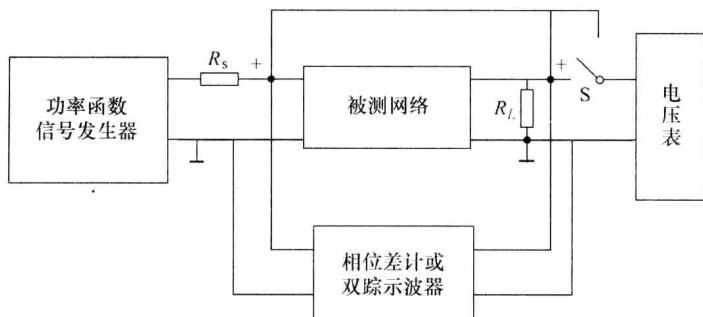


图 1-14 点测法测量网络幅频特性

扫频法测量网络幅频特性曲线的原理如图 1-15 所示。扫描发生器可以产生一定频率及幅度的锯齿波信号，将该信号分别送入扫频信号发生器（或功率函数信号发生器）的压控输入端和双踪示波器的外触发端，则扫频信号发生器产生的等幅正弦波，其频率将受到该锯齿波信号幅度的控制，与锯齿波电压同步增长，见波形②，此信号即为调频或扫频信号。假定被测网络的传输特性 $H(\omega)$ 是钟形的，它对低频和高频信号有较大的衰减。因此，当等幅的扫频信号经过该网络时，将变为具有钟形包络的信号（波形③）。该钟形包络即代表网络的幅频特性，它可用峰值检波器检出（波形④）。为了能将此波形展示出来，可将此钟形波形送入双踪示波器的 Y 通道，使示波器显示屏的纵向显示送入波形的幅值。而示波器横轴上加的是锯齿波信号（反映的是扫频信号的频率），显示的是输入波形的频率。示波器在锯齿波信号及钟形包络的共同作用下，就可将被测网络的幅频特性显示出来。

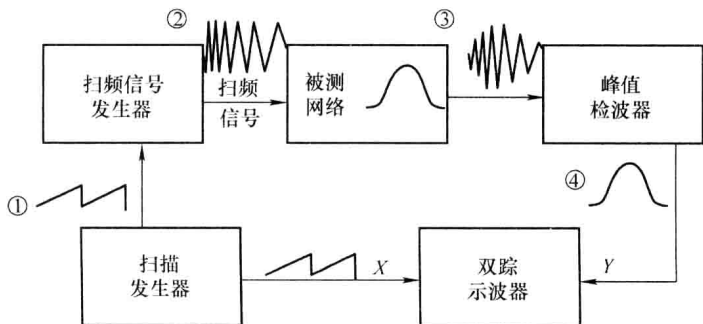


图 1-15 扫频法测量网络幅频特性

2. RLC 串联电路频率特性的测量方法

图 1-16 所示为由纯电容器、电感器和电阻与正弦波电源组成的串联电路。图中空心电感器用纯电感 L 和损耗电阻 R_L 表示， C 为纯电容器， R 为电阻。根据交流电路的欧姆定律，电源两端电压 U_i 与电路的电流 I 之间的关系为

$$I = \frac{U_i}{Z} = \frac{U_i}{\sqrt{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2 + (R + R_L)^2}} \quad (1-28)$$

式中, ω 为正弦波的角频率; $Z = \sqrt{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2 + (R + R_L)^2}$, 称作交流电路的阻抗。总电压 U_i 与电流 I 的相位差 φ 为

$$\varphi = \arctan \left[\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R + R_L} \right] \quad (1-29)$$

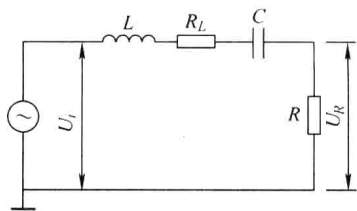


图 1-16 RLC 串联谐振电路图

由式 (1-28)、式 (1-29) 可知, 阻抗 Z 和相位差 φ 都是角频率 ω 的函数。当 $\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$ 时, 阻抗 Z 最小, 这时电流 I 达到最大值, 因而电阻 R 上的电压 U_R 为最大, 这时整个电路呈现电阻性。电路达到谐振时的正弦波的频率 $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$, 称为谐振频率。谐振频率也可写为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (1-30)$$

RLC 串联电路的谐振曲线如图 1-17 所示。在通用串联谐振曲线中, $\frac{I}{I_0} = \frac{1}{\sqrt{2}}$ 时, 对应

的频率为 f_2 (上限频率) 和 f_1 (下限频率), f_1 与 f_2 之间的频带宽度称为通频带 Δf , 即

$$\Delta f = f_2 - f_1$$

通常用 Q 值来表征电路选频性能的优劣, Q 值称为电路的品质因数, 即

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (1-31)$$

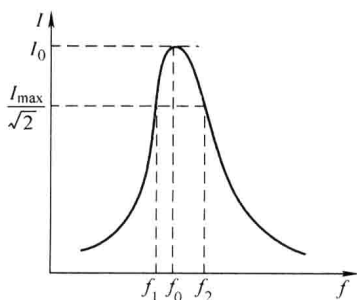


图 1-17 RLC 串联电路谐振曲线

由式 (1-31) 知, Q 值越大, 则 RLC 串联电路的频带宽度 $\Delta f = (f_2 - f_1)$ 越窄, 谐振曲线就越尖锐。

品质因数 Q 的另一含义是它标志电路中储存能量与每个周期内消耗能量之比。当电路处于谐振频率 f_0 ($\omega_0 = 2\pi f_0$) 时, 有

$$Q = \frac{\dot{I}^2 \omega_0 L}{\dot{I}^2 (R + R_L)} = \frac{\omega_0 L}{R + R_L} \quad (1-32)$$

因此, 在电路中电阻 $R + R_L$ 的值越小, 电路的品质因数 Q 越大。在相同的电感量 L 和电阻 $R + R_L$ 条件下, 电路谐振频率 f_0 越大, Q 值也越大。

从式 (1-32) 也不难得到, 在 $f = f_0$ 及电容损耗电阻, $r_c \approx 0$ 时, 有

$$Q = \frac{U_C}{U} \quad (1-33)$$

可见在谐振频率时, 电容 C 或电感 L 上的电压是电路输入电压 U 的 Q 倍。

RLC 串联电路中, 谐振时 $\varphi = 0^\circ$, 即电流与输入电压同相。当电源角频率从 0 增大到 ∞ 时, φ 与 ω 的关系曲线如图 1-18 所示, 称为相频特性。