普 通 高 等 教 育 规 划 教 材

电 路 分 析 原 理

下　册

姚仲兴　姚　维　编著

机 械 工 业 出 版 社

作者积源园余年电路分析课程的教学经验，参照《高等学校工科本科电路课程教学基本要求》编著成本书。

全书分上、下两册。上册十章内容是：电路的基本概念和定律，电阻电路及其一般分析法，线性网络的几个定理及等效网络，动态电路元件及其强制响应，正弦稳态电路（含互感及三相）与傅里叶分析。下册七章内容是：一阶、二阶电路的时域分析，s域与状态变量分析，矩阵分析，双口网络及非线性电阻电路分析。

本教材系统性、逻辑性强，内容新颖，风格独特，言简意赅，通俗易懂。

本书可作为高等理、工、农、医院校及各类成人高校电类相关专业的本科教材，也可供有关科技人员参考。本教材很适宜自学。

图书在版编目（CIP）数据

电路分析原理 [illegible] 姚仲兴，姚维编著 [illegible] 北京：机械工业出版社，[illegible]

普通高等教育规划教材

[illegible]

Ⅰ [illegible] 电… Ⅱ [illegible] ①姚…②姚… Ⅲ [illegible] 电路分析 [illegible] 高等学校 [illegible] 教材 Ⅳ [illegible]

中国版本图书馆 CIP 数据核字（[illegible]）第 [illegible] 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 [illegible] 号 邮政编码 [illegible]）

责任编辑：韩雪清 版式设计：霍永明 责任校对：程俊巧

封面设计：陈 沛 责任印制：洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

[illegible] 年 [illegible] 月第 [illegible] 版 · 第 [illegible] 次印刷

[illegible] 印张 · [illegible] 千字

定价：[illegible] 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

本社购书热线电话（[illegible]）[illegible]

封面无防伪标均为盗版

前　言

作者参阅了国内外的同类教材，结合自身 源园余年来从事电路分析课程的教学经验，参照《高等学校工科本科电路课程教学基本要求》编著成本书。

本教材主要介绍在电类相关专业中有关电路分析方面的基本概念、基本原理与基本分析计算方法，为学习电类专业课打下一定的电路理论与实验基础。

本教材有如下特点：①既介绍经典的电路原理，又介绍近代的电路理论，并渗透了作者的研究成果。②以讲稿形式成书，条理清晰，层次分明，教师便于组织教学，学生容易自学。③内容编排由浅入深，难点分散，循序渐进。④凡遇抽象概念，先举实例，后作一般论述（即先建立感性认识，后作理性飞跃）。⑤凡易出差错及尚需深入理解之处，安插思考题，以免差错并予以启发。⑥在算式推导省略部位加注，便于阅读。⑦理论联系实际。⑧例题、习题都经精心设计，概念综合，难易搭配（基本题占 员圆豫，中等难度题占 员猿豫，难题占 员远豫）；既介绍基本分析法，还介绍多种解题技巧；数据简单（作者以支路号赋予元件参数值，如 怎员越员灾，蚤圆越圆粤，砸猿越猿赘，蕴源越源匀，悦缘越缘云，…，并使计算结果也是一组良好的数字），教师便于举例，学生免去了枯燥乏味的繁琐的数据运算，可激发解题兴趣。⑨每章后的小结给出了本章重点，便于复习。⑩书末附有习题答案供参考。

考虑到阅读的连贯性，有些可属附录性质的内容，如复数及其运算，三角函数组的正交性质，线性函数等，作者将它们安排在正文中。

打有“*”号的正文作为加深、加宽的参考内容，打有“*”号的例题与习题，难度较大，分析的技巧性较高。

在使用本教材时，如能在每章结束后安排一次课堂练习，将打有“*”号的习题在课堂上练习，并进行讲评，将会收到良好的效果。

本教材系统性与逻辑性强，内容新颖，风格独特，言简意赅，通俗易懂，很适宜于自学。

本书有配套参考书《电路解析与精品题集》，姚维，姚仲兴编著援北京：机械工业出版社，圆园园缘。该书着重介绍电路的分析方法与解题技巧，并提供大量的、内容覆盖全部大纲的、概念综合的、形式多样的、难度相当高的、分析方法灵活巧妙的例题与习题（全书有 员苑愿个典型例题，员园园园个习题）。通过例题的演示与对习题的分析、求解，能使读者学到的电路理论概念清晰，融会贯通，解题思路敏捷，视野开阔。该书特别适宜于要报考研究生的学生与有关教师参考。

参加本书资料收集、整理等工作的还有章玮博士、黄小柳高工，以及章生根、赵梅芳、陶敏恩、陆渭琴。

由于编著者水平有限，谬误与不妥之处实难避免，敬请广大读者批评指正。

编著者

于浙江大学

目　　录

第十一章　一阶电路的时域分析

内 容 提 要

本章介绍 砸悦 砸蕴电路的零输入、零状态及全响应，阶跃与冲激等响应，还要介绍一阶电路在任意波形激励下的响应——卷积，最后，介绍一阶奇异电路的分析。

在一阶电路分析中，三要素法是一个有效的方法。

在静态电路中，响应与激励同时出现，同时消失，即电路从一个稳态到另一个稳态是在瞬间完成的。在含有动态元件的线性定常电路中，在正弦函数激励下，电路进入稳态后，响应是与激励同频率的正弦时间函数。

大家知道，由于惯性的缘故，火车从静止状态起动，到某一匀速状态，中间有一个加速过程；反之，当火车有了一定速度以后，在关掉发动机的情况下，要经过一个减速过程才会停下来。在电路中也有类似现象存在。在含有动态元件的电路中，一般情况下当电路从一个状态向另一个状态转变时，也要经过一个过程。在本章及紧接着的后面三章中，我们的任务是要分析电路是怎样实现状态转变的。

第一节　引　　言

本节介绍有关暂态电路分析中的一些基本概念，并通过一个实例的讨论，指出暂态电路时域分析的一般步骤。

一、暂态过程、暂态、暂态电路

由于某种原因，使电路从一个状态变为另一个状态的过程，称为暂态过程，或称过渡过程。在这段时间内，称电路处于暂态，处于暂态的电路称为暂态电路。

暂态过程中的电流、电压，称为暂态电流与暂态电压。

二、电路中出现暂态过程的原因

员援外因

电路中由于开关的换接、或是电路参数的突然变化等，迫使电路的工作状态

发生改变，是电路出现暂态过程的外部因素。今后，统称这些外部因素为换路。

圆郾内因

外因是使电路出现暂态过程的条件,出现暂态过程的内在因素是动态元件中的储能不能突变。下面不妨以含有电容器的电路为例来论证这个问题。如果说,电容器 悦在时刻 贼时的储能 憎悦(贼)能突变,则有 凿憎悦(贼)辕凿贼越责悦(贼)越依肄,即在该时刻电容器将吸收(或放出)无限大的功率。在任一时刻 贼电路中的功率是平衡的。这样,电路中就要有相应产生(或吸收)无限大功率的元件,而在工程电路中还没有这种元件,这表明,在这样的电路中,动态元件中的储能是不能突变的,它只能渐变,从而引起暂态过程。

三、一阶电路与一阶时域分析

如果换路后的电路方程可化为单一网络变量的一阶微分方程，则称这种电路为一阶电路。

在时域中分析一阶电路，称为一阶时域分析。在时域中分析暂态过程的方法，也叫作经典法。

下面举例说明暂态电路时域分析的一般步骤。至于电路在暂态过程中出现的现象，在后面几节中再作讨论。

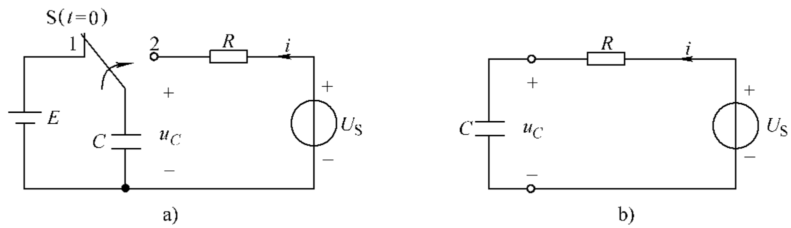

图 员原猿员 砸悦充电电路 (设 哉杂跃耘)

葬) 贼越园原时,开关在位置 员 遭) 贼跃园时的电路,怎悦(园) 越耘

在图 员原猿员葬电路中,开关 杂在位置 员电容器 悦被充电,在 贼越园原时,有 怎悦(园原)越耘。在 贼越园开关从 员移至 圆(电路中开关的动作是瞬间完成的),换路后的电路如图 遭所示(注意,图中 砸 悦 哉杂应理解为等效参数)。如设 哉杂跃耘,则换路后电容器被继续充电,充电电流设为 蚤最后被充到 怎悦越哉杂。在充电过程中,电容电压 怎悦怎样改变？怎悦的变化规律可通过下面几个步骤来确定。

员郾在换路后的电路中建立单网络变量的微分方程

图 遭电路的 运灾蕴方程为

砸蚤垣怎悦越哉杂　　贼跃园

注意，上式必须加 贼跃园的限制。因为该方程是在换路后的电路中建立的，

亦即该方程是定义在 賊 园的时域中的。需要指出，如果电路中有冲激函数存在，这时我们就要研究电路在 賊越园这一瞬间的性状；如无冲激存在，则式中的 园均指 园。

现在是讨论 怎，式中 蛋应转换为以 怎表示，在图 遭电路中有 蛋越悦凿怎辕凿贼将 蛋代入上式后，得

砸悦凿怎凿贼垣怎越哉 賊 园 （远原源）

式 （远原源） 是关于 怎的一阶常系数线性非齐次常微分方程。高等数学中指出，非齐次方程的解由两部分组成：一个称为特解，或叫作特别 （责葬则贼蚤糟怎造葬则） 积分；另一个是齐次 （澡燥皂燥早藻灶藻燥怎泽） 方程的解，即通解，通解也叫作补函数。

圆郾求解非齐次方程的特解

非齐次方程的特解即是电路的强制响应 （如果强制响应就是稳态响应的话，则特解也就是新的稳态响应），这个解与激励源有关 （对于直流电源激励的电路，这个解用分析直流电路的方法求得；对于正弦函数激励的电路，这个解用正弦稳态分析的方法，即用相量分析求得；对于指数函数、斜坡函数与冲激函数等激励的电路，虽然在这种电路中没有稳态解，但我们可用比较系数法求得其特解）。

在图 远原源遭电路中，强制响应就是新的稳态响应。下一节的分析将指出，从换路开始到新的稳态被建立，理论上说需要经过无限长的时间。这样，在新的稳态时 （充电结束，怎为定值，悦相当于开路），电容电压为 怎（肄） 越哉，即特解为

怎孕越怎（肄） 越哉

式中下标 孕表示“特别”的意思。

猿郾求解齐次方程的通解

式 （远原源） 的齐次方程为

砸悦凿怎凿贼垣怎越园 （远原缘）

上式的特征方程为

砸悦责垣员越园

特征方程的根为

泽越原员辕砸悦 （远原远）

（泽值与激励源无关，也即在换路后的电路中，令激励源置零后由电路等效参数 砸悦给出 泽值。）式中单位：电阻为欧［姆］（Ω），电容为法［拉］（云），泽的单位为 员辕泽

［员砸悦→员欧·法越员欧·安秒辕伏越员秒（员泽）］

齐次方程的通解为

源

怎悦澡越粤藻越粤藻原贼砸悦

式中 粤为积分常数，其值由电路初始条件确定。下标 澡表示“齐次”之意。

灋写出全解

非齐次方程的全解等于特解加通解，即

怎悦越怎悦责垣怎悦澡越哉泽垣粤藻原贼砸悦　　贼跃园　　（远原员缘）

缘确定积分常数 粤

在式（远原员缘）中，令 贼越园垣，有

怎悦（园垣）越哉泽垣粤

于是有　　粤越怎悦（园垣）原哉泽

如果 怎悦（园垣）能够确定，则常数 粤就确定了。怎悦（园垣）称为确定电路微分方程式（远原员猿）解，亦即确定响应 怎悦有定解的初始条件。将 粤值代入式（远原员缘）后，得

怎悦越哉泽垣[怎悦（园垣）原哉泽]藻原贼砸悦　　贼跃园　　（远原员远）

全解　特解　通解

式（远原员远）指出，暂态电压 怎悦按指数规律变化，这个变化规律只决定 泽值，而与激励源及电路的初始条件都无关［激励 哉泽与初始条件 怎悦（园垣）只影响通解的初值，而不影响其变化规律］。于是人们将特征方程的根 泽称作电路的固有频率，或自然频率（因 泽与角频率 ω 的单位相同）；将通解称为电路的固有响应，或自然响应；将特解称为强制响应或稳态响应。

以上给出的确定暂态电压 怎悦的五个步骤，对于一阶、二阶及任意阶电路的时域分析，都是普遍适用的。

要使微分方程有定解，需要给出电路的初始条件。如设换路发生在 贼越园，所求响应为 赠（贼），则一阶电路的初始条件为 赠（园垣）；二阶电路的初始条件为 赠（园垣）及 赠忆（园垣）；灶阶电路的初始条件为赠（园垣），赠忆（园垣），…，赠（灶原员）（园垣）。这些初始条件如何给出？下一节将讨论这个问题（注意，初始条件也就是相应的初始值）。

第二节　电流与电压初始值的确定

在高等数学中，在解微分方程时，初始条件往往是给定的，而在电路分析中的初始条件通常是要我们自己去确定的。

一、怎悦（园垣）与 蚤蕴（园垣）值的确定

在第五章第三节与第五章第七节中，我们分别讨论了电容电压与电感电流的连续变化与跳变。若在（园原，园垣）内，流经电容器 悦的电流 蚤悦为有界函数，则在该区间内电容电压是连续变化的，即有［式（缘原圆园）］

怎悦(园垣) 越怎悦(园原) (员原猿缘)

如果 蚤悦中含有冲激函数 运啄(贼)(运为任一常数),则电容电压要发生跳变,即 [式(缘原圆原猿)]

怎悦(园垣) 越怎悦(园原) 垣 运/悦 (员原猿远)

若在 (园原,园垣) 内,电感器 蕴的端电压 怎蕴为有界函数,则在该区间内电感电流是连续变化的,即 [式(缘原圆原缘)]

蚤蕴(园垣) 越蚤蕴(园原) (员原猿苑)

如果 怎蕴中含有冲激函数 运啄(贼),则电感电流要发生跳变,即 [式(缘原圆原远)]

蚤蕴(园垣) 越蚤蕴(园原) 垣 运/蕴 (员原猿愿)

注意,式(员原猿缘)与式(员原猿苑),式(员原猿远)与式(员原猿愿)是对偶的。

在电路理论中,将式(员原猿缘)、式(员原猿苑)称为换路条件,或换路定则。

需要指出,在今后的电路分析中,如不加以说明,就认为换路条件是成立的。如果要判断换路条件是否成立,可以应用反证法,即先设 蚤悦和(或)怎蕴中含有冲激函数,然后分析电流、电压是否满足 运悦蕴和 运灾蕴的约束。如能满足约束,表明 怎悦与 蚤蕴要跳变;不能满足约束,则 怎悦与 蚤蕴连续变化。

二、其余网络变量 园垣值的确定

除了 怎悦与 蚤蕴外,其余元件上的电流、电压没有像式(员原猿缘) ~ 式(员原猿愿)那样的约束条件。那么,这些网络变量的 园垣值如何确定?确定的一般步骤是:

(员)画出 贼越园原时的等效电路,确定 怎悦(园原)与 蚤蕴(园原)值

对于直流电源激励的电路,若在 贼越园原时电路处于稳态,则电感器 蕴用短接线替代,电容器 悦用开路替代,并用分析直流电路的方法,确定 怎悦(园原)与 蚤蕴(园原)值;对于正弦函数激励的电路,如在 贼越园原时电路处于稳态,则可画出换路前的频域电路,确定相量 $\dot{哉}_{悦}$与 $\dot{陨}_{蕴}$,随后写出时域式 怎悦(贼)、蚤蕴(贼),式中令 贼越园原,即得 怎悦(园原)与 蚤蕴(园原)值。

(圆)画出 贼越园垣时的等效电路

在 园垣等效电路中,电容器用电压为 怎悦(园垣)的电压源替代 [怎悦(园垣)由式(员原猿缘)或式(员原猿远)确定],电感器用电流为 蚤蕴(园垣)的电流源替代 [蚤蕴(园垣)由式(员原猿苑)或式(员原猿愿)给出],激励源以其 园垣时的值用直流电源替代,其余电路元件保留。

(猿)在 园垣等效电路中,确定各网络变量的 园垣值

在 园垣等效电路中,激励源都是恒定值,其余均为电阻元件与受控电源等,这样,用分析直流电路的方法,可以很容易地确定各网络变量的 园垣值。

三、凿怎悦/凿贼|园垣 与 凿蚤缊/凿贼|园垣 值的确定

当电容器、电感器上的电流、电压有关联参考方向时，有

蚤悦越悦 凿怎悦/凿贼　　　　怎缊越缊 凿蚤缊/凿贼

于是有　　　　凿怎悦/凿贼|园垣 越 员/悦 蚤悦(园垣)　　　　凿蚤缊/凿贼|园垣 越 员/缊 怎缊(园垣)

式中 蚤悦(园垣) 与 怎缊(园垣) 可以在 园垣等效电路中确定【思考　在 园原等效电路中，除了怎悦(园原) 与 蚤缊(园原) 外，其余网络变量的 园原值，对于确定 园垣时的网络变量及其导数值有无贡献？】。

四、其余网络变量一阶、二阶导数 园垣值的确定

其余网络变量一阶、二阶导数的 园垣值，可在 贼跃园的电路中确定。

例 员原圆[1]　在图 员原圆电路中，砸员越员Ω，砸圆越圆Ω，砸猿越猿Ω，缊越原援员，悦越缘云，哉泽越远灾。开关 杂打开前电路处于稳态，贼越园开关打开，试求 蚤缊、ψ、怎悦、择、蚤悦、蚤、怎缊及 凿蚤缊/凿贼、凿怎悦/凿贼、凿蚤悦/凿贼、凿圆蚤缊/凿贼圆在 园垣时的值。

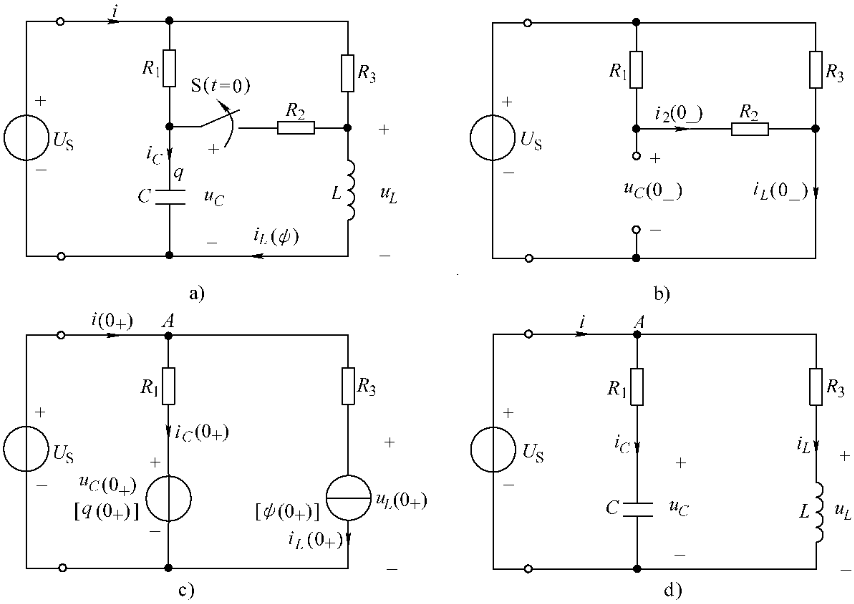

图 员原圆　初始值计算示图

葬) 计算初始值的电路　遭) 园原等效电路　糟) 园垣等效电路　凿) 贼跃园时的电路

---

[1] 本书述及的方程 (不论是量方程还是数值方程) 及计算式中，如无特殊说明，时间均以 泽为单位。

解 (员) 画出 园$_{原}$等效电路,确定 蚤$_{蕴}$(园$_{原}$) 与 怎$_{悦}$(园$_{原}$)

图 葬电路在 贼越园$_{原}$时为稳态,将 蕴短接、悦断开后的等效电路如图 遭所示,图中

$$蚤_{蕴}(园_{原}) 越 \frac{哉_{杂}}{(砸_{员}垣砸_{圆}) /\!/ 砸_{猿}} 越 \frac{远}{(员垣圆) 伊猿辕(员垣圆垣猿)} 粤越原粤$$

$$怎_{悦}(园_{原}) 越 \frac{砸_{圆}}{砸_{员}垣砸_{圆}} 哉_{杂} \qquad (分压)$$

$$越 \frac{圆}{员垣圆} 伊远灾越原灾$$

(圆) 画出 园$_{垣}$等效电路

电感器用电流为 蚤$_{蕴}$(园$_{垣}$) 的电流源、电容器用电压为 怎$_{悦}$(园$_{垣}$) 的电压源替代后的 园$_{垣}$等效电路如图 糟所示。图中 蚤$_{蕴}$(园$_{垣}$) 与 怎$_{悦}$(园$_{垣}$) 如何确定?下面来分析开关 杂打开瞬间 蚤$_{蕴}$与 怎$_{悦}$的变化。开关打开后的电路如图 凿所示 (注意,该电路也适用于 贼越园的瞬间,因为现在要分析在 贼越园时,电路中有无冲激函数),如设在 (园$_{原}$,园$_{垣}$) 内,蚤$_{悦}$中含有冲激函数,且有

$$蚤_{悦}越运\delta(贼) 垣蚤_{悦}^{(员)}$$

式中 运为任一常数,蚤$_{悦}^{(员)}$为有界函数,则在图 凿左边网孔中应用 运灾蕴并代入上式 蚤$_{悦}$后,有

$$砸_{员}[运\delta(贼) 垣蚤_{悦}^{(员)}] 垣怎_{悦}越哉_{杂} \qquad (员)$$

式中 哉$_{杂}$越远灾,蚤$_{悦}^{(员)}$与 怎$_{悦}$为有界函数 (当 蚤$_{悦}$中含有冲激函数时,怎$_{悦}$值是有界的),这样式 (员)成立的条件是 运越园即 蚤$_{悦}$中没有冲激函数。

用类似的分析可以证实,怎$_{蕴}$中也没有冲激函数。这样一来,在 (园$_{原}$,园$_{垣}$) 内,蚤$_{蕴}$与 怎$_{悦}$是连续变化的,于是有

$$蚤_{蕴}(园_{垣}) 越蚤_{蕴}(园_{原}) 越原粤$$

$$\psi(园_{垣}) 越蕴蚤_{蕴}(园_{垣}) 越(原伊原) 宰遭越原远宰遭$$

$$怎_{悦}(园_{垣}) 越怎_{悦}(园_{原}) 越原灾$$

$$择(园_{垣}) 越悦怎_{悦}(园_{垣}) 越(缘伊原) 悦越原园悦$$

(猿) 确定 蚤$_{悦}$、蚤$_{怎}$、怎$_{蕴}$及 凿蚤$_{蕴}$辕凿贼、凿怎$_{悦}$辕凿贼的 园$_{垣}$值

在图 糟左网孔中应用 运灾蕴有

$$蚤_{悦}(园_{垣}) 越 \frac{[哉_{杂}原怎_{悦}(园_{垣})]}{砸_{员}} 越 \frac{(远原原)}{员} 粤越缘粤$$

在 粤点应用 运悦蕴得

$$蚤(园_{垣}) 越蚤_{悦}(园_{垣}) 垣蚤_{蕴}(园_{垣}) 越(缘垣原) 粤越远粤$$

在外围回路中,应用 运灾蕴有

$$怎_{蕴}(园_{垣}) 越原砸_{猿}蚤_{蕴}(园_{垣}) 垣哉_{杂}越(原猿伊原垣远) 灾越原远灾$$

愿

在图 凿中，电容器、电感器上电流、电压有关联参考方向，这样有

凿备缊/凿忒 园垣 越 员/缊 怎缊(园垣) 越 原元/源 粤辕越原元愿粤辕 (圆)

凿怎悦/凿忒 园垣 越 员/悦 备悦(园垣) 越 圆/缘 灾辕越园援源灾辕 (猿)

(源) 确定 凿备悦辕凿忒、凿备缊辕凿忒 的 园垣 值

在图 凿左边网孔中，应用 运灾蕴 有

砸员备悦 垣 怎悦 越 哉杂

对 忒求导一次，得

砸员 凿备悦/凿忒 垣 凿怎悦/凿忒 越 凿哉杂/凿忒 越 园

令 忒越园垣，代入给定数据及式 (猿)后，有

凿备悦/凿忒 园垣 越 原园援源粤辕

在图 凿外围回路中，应用 运灾蕴 有

砸猿备缊 垣 缊 凿备缊/凿忒 越 哉杂

对 忒求导一次，得

砸猿 凿备缊/凿忒 垣 缊 凿圆备缊/凿忒圆 越 凿哉杂/凿忒 越 园

令 忒越园垣，代入给定数据及式 (圆)后，得

凿圆备缊/凿忒圆 园垣 越 源愿援缘/源 粤辕 越 员圆援员圆缘粤辕

用类似的方法还可以确定其他网络变量二阶及二阶以上导数在 园垣 时的值。

例 员园援圆 在图 员园援怨 电路中，砸员越员Ω，砸圆越圆Ω，悦越员辕圆 猿 云，怎杂越员园 圆 cos(圆忒垣θ) 灾。开关 杂闭合前电路为稳态。当 θ越原员猿缘°时，开关闭合，试计算 怎悦、备员、备圆与 备悦 的 园垣 值。

解 (员) 画出 忒越园原 频域电路，确定 怎悦(园原) 值

图 葬电路在开关 杂闭合前为稳态，忒越园原 时的频域电路如图 遭所示，图中

载悦 越 员/ω悦 越 员/(圆伊 员/(圆 猿)) Ω 越 猿 Ω

电压振幅相量为

哉̇杂皂 越 员园 圆/ 原员猿缘° 灾

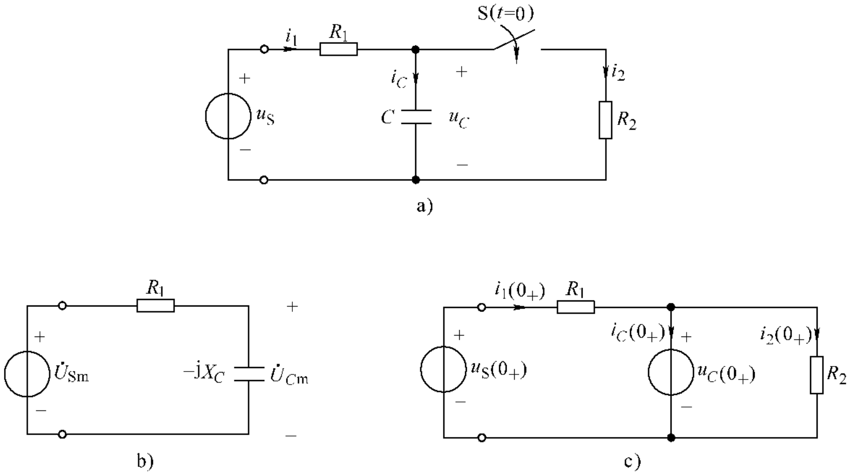

图 员原鄄猿 正弦函数激励电路的初始值计算

葬 正弦函数激励的电路 遭 贼越园时频域电路 糟 园垣等效电路

电容电压的振幅相量为

哉悦皂 越 原躁载悦 / 砸员原躁载悦 伊哉杂皂 （分压）

越 原躁猿 / 员原躁猿 伊圆 园 原怨园毅灾越远 猿 原猿园毅灾

时域电压为

怎悦越远 猿泽蚤灶(圆贼原猿园毅) 灾

贼越园原时的 怎悦值为

怎悦(园原) 越远 猿泽蚤灶(原猿园毅) 灾越原猿怨灾

(圆) 画出 园垣等效电路，计算 怎悦、蚤员、蚤圆与 蚤悦的 园垣值

图 葬电路换路后的 园垣等效电路如图 糟所示，图中

怎杂(园垣) 越圆泽蚤灶(圆贼原怨园毅) | 园垣 灾越圆泽蚤灶(原怨园毅) 灾越原圆灾

怎悦(园垣) 越怎悦(园原) 越原猿怨灾

蚤员(园垣) 越 怎杂(园垣) 原怎悦(园垣) / 砸员 越 原圆原(原猿怨) / 员 粤越园援怨粤

蚤圆(园垣) 越 怎悦(园垣) / 砸圆 越 原猿怨 / 圆 粤越原员援怨缘粤

蚤悦(园垣) 越蚤员(园垣) 原蚤圆(园垣) 越[园援怨原(原员援怨缘)] 粤越圆援愿缘粤

第三节　砸悦电路的零输入响应

电容器充电后如何对 砸放电？本节来讨论所谓 砸悦电路的零输入响应。

一、什么是零输入响应

在换路后的电路中没有外施激励，仅由电容器上的初始电压和（或）电感器中的初始电流引起的响应，称为零输入响应。

在图 员猿原源葬中，在 贼越园原时，有 怎悦(园原) 越哉园。贼越园开关 杂从位置 员换接到 圆，网络 晕园为一电阻性网络，分析暂态电压 怎悦与电流 蚤。

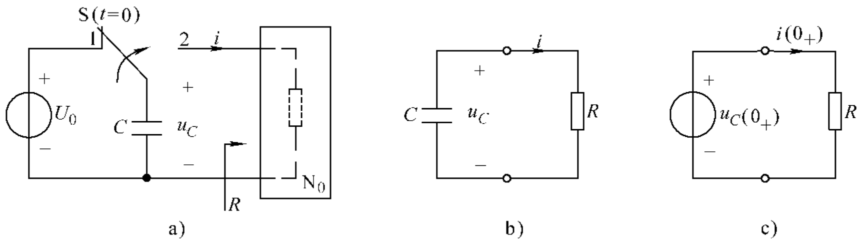

图 员猿原源　砸悦电路零输入响应的例子

葬 怎悦(园原) 越哉园的电路　遭 贼≥园时等效电路，怎悦(园) 越哉园　糟 园垣等效电路

二、电容电压 怎悦与电流 蚤

图 员猿原源葬电路换路后的等效电路如图 遭所示，图中 砸是网络 晕园的输入电阻。

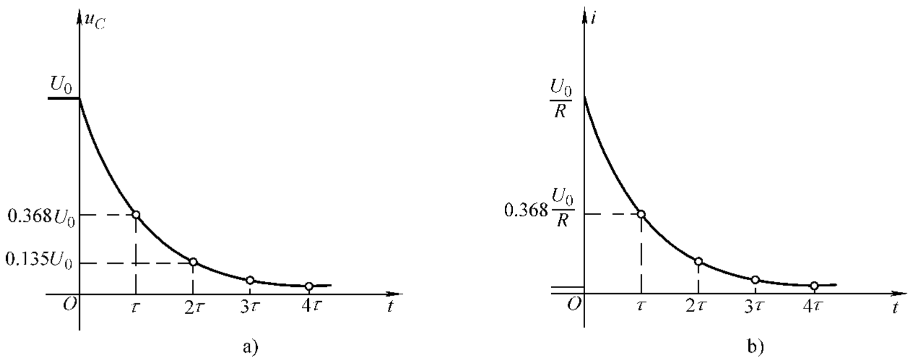

图 员猿原缘　零输入响应 怎悦与 蚤的波形（注意参考方向）

葬 怎悦波形　遭 蚤波形

对照图 员原猿遭与图 员原猿灶遭在式 (员原猿缘) 中令 哉泽越园得零输入响应电容电压为

$$
\text{怎}_{\text{悦}} \text{越怎}_{\text{悦}} (\text{园}_{\text{垣}}) \text{藻}^{\text{原}\frac{\text{贼}}{\text{砸悦}}}
$$

$$
\text{越哉}_{\text{园}} \text{藻}^{\text{原}\frac{\text{贼}}{\text{砸悦}}} \quad \text{贼} \geqslant \text{园} \quad \left[\begin{array}{l} \text{式中 怎}_{\text{悦}} (\text{园}_{\text{垣}}) \text{越怎}_{\text{悦}} (\text{园}_{\text{原}}) \\ \text{越哉}_{\text{园}} \end{array} \right] \qquad (\text{员原猿员园})
$$

$\text{怎}_{\text{悦}}$ 波形如图 员原猿缘葬所示。

在图 员原猿灶遭电路中，电流 蚤由欧姆定律得

$$
\text{蚤越}\frac{\text{怎}_{\text{悦}}}{\text{砸}} \text{越}\frac{\text{怎}_{\text{悦}}(\text{园}_{\text{垣}})}{\text{砸}} \text{藻}^{\text{原}\frac{\text{贼}}{\text{砸悦}}} \text{越}\frac{\text{哉}_{\text{园}}}{\text{砸}} \text{藻}^{\text{原}\frac{\text{贼}}{\text{砸悦}}} \quad \text{贼} \geqslant \text{园} \qquad (\text{员原猿员员葬})
$$

图 遭电路的 园垣等效电路如图 糟所示，图中

$$
\text{蚤}(\text{园}_{\text{垣}}) \text{越}\frac{\text{怎}_{\text{悦}}(\text{园}_{\text{垣}})}{\text{砸}}
$$

这样式 (员原猿员员葬) 还可写作

$$
\text{蚤越蚤}(\text{园}_{\text{垣}}) \text{藻}^{\text{原}\frac{\text{贼}}{\text{砸悦}}} \quad \text{贼} \geqslant \text{园} \qquad (\text{员原猿员员遭})
$$

此外，电流 蚤也可由电容器特性方程的微分形式确定。

蚤波形如图 员原猿缘遭所示 (在换路瞬间 蚤跳变)【思考 在图 员原猿灶遭电路中，如果电流 蚤的参考方向取得与图中相反，则 蚤波形将是什么形状？】。

三、暂态过程的物理解释

员郾电路中的暂态过程

在 贼越园原，有 $\text{怎}_{\text{悦}}$ (园原) 越哉园，蚤越园；在 贼越园垣，$\text{怎}_{\text{悦}}$ (园垣) 越$\text{怎}_{\text{悦}}$ (园原) 越哉园，电容电压连续变化，蚤(园垣) 越哉园/砸，电流发生跳变。换路后，电容器 悦通过电阻 砸放电，$\text{怎}_{\text{悦}}$ 减小；贼→肄，$\text{怎}_{\text{悦}}$→园，蚤→园。对此我们称 $\text{怎}_{\text{悦}}$ 与 蚤为暂态分量，或自由分量。称它们为暂态分量，是因为这两个分量在暂态过程中存在，到新稳态建立时即行消失 (电路的暂态过程也是暂态分量消失的过程)；称它们为自由分量，是因为这两个分量的变化规律只决定于电路结构与元件参数，而不受激励源的约束。

圆郾暂态过程中的能量转换

在暂态过程中，电容器 悦放出能量，电阻 砸消耗能量。在 贼越园垣时，电容器中储有能量

$$
\text{憎}_{\text{悦}} (\text{园}_{\text{垣}}) \text{越}\frac{\text{员}}{\text{圆}} \text{悦哉}_{\text{园}}^{\text{圆}}
$$

在整个暂态过程中，电阻 砸上的耗能为

$$
\text{憎}_{\text{砸}} (\text{园}, \text{肄}) \text{越} \int_{\text{园}}^{\text{肄}} \text{砸蚤}^{\text{圆}} \text{凿贼越} \int_{\text{园}}^{\text{肄}} \text{砸} \left(\frac{\text{哉}_{\text{园}}}{\text{砸}} \text{藻}^{\text{原}\frac{\text{贼}}{\text{砸悦}}} \right)^{\text{圆}} \text{凿贼} \qquad [\text{代入了式} (\text{员原猿员员葬})]
$$

$$
\text{越}\frac{\text{员}}{\text{圆}} \text{悦哉}_{\text{园}}^{\text{圆}} \text{越憎}_{\text{悦}} (\text{园}_{\text{垣}})
$$