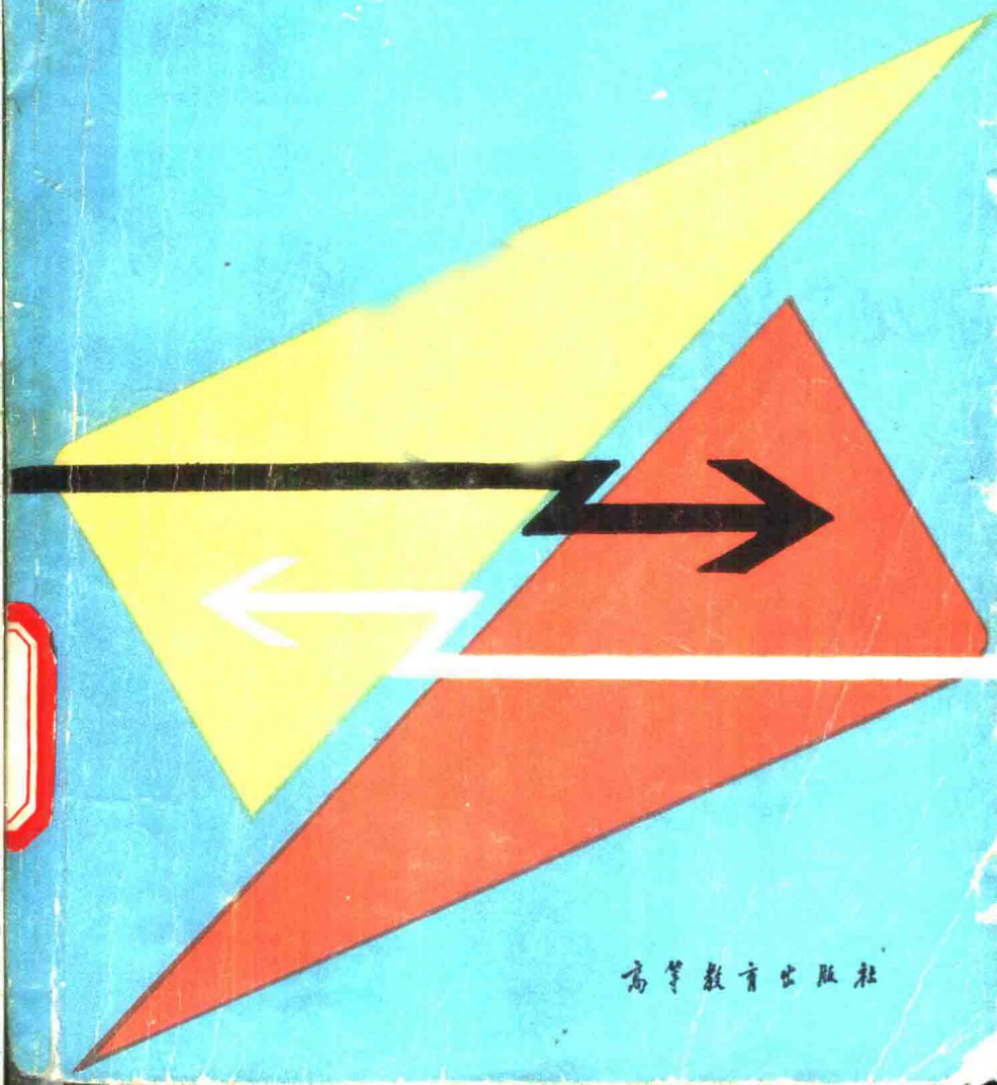


中等专业学校电工基础小丛书

# 等效电路和等效变换

曹彦芳 编



高等教育出版社

29086

ISBN7-04-001158-1/TM · 116

定价 0.97 元

中等专业学校电工基础小丛书

# 等双电路的功率变换

曹彦芳 编

高等教育出版社

## 内 容 简 介

本书是列入国家教委“七五”期间中等专业学校教材建设规划的电工基础教学小丛书之一。

本书将中等专业学校电工类《电工基础》和电子类《电路基础》课程中,有关等效电路与等效变换的内容加以整理、总结和提高,并适当增加了一些新的内容。全书分无源网络的等效电路和有源网络的等效电路两个部分。每节书后有少量习题,书末还有小结,把各种常见的等效网络参数的计算公式进行了系统整理,以利于读者复习、查阅,最后还附有练习答案,便于读者自学。

本书可作为中等专业学校(包括业余中专、职工中专学校)学生学习《电工基础》和《电路基础》的辅助读物,也可供对电路分析中有关等效电路和等效变换感兴趣的各类专业人员学习和参考。

中等专业学校电工基础小丛书  
**等效电路和等效变换**

曹彦芳 编

高等教育出版社出版  
新华书店上海发行所发行  
上海市印刷三厂印装

开本 787×1092 1/32 印张 4 字数 87 000

1989年10月第1版 1989年10月第1次印刷

印数 0 001—1,110

ISBN 7-04-001158-1/TM·116

定价 0.97 元

## 前 言

本书是列入国家教委“七五”期间中专教材建设规划的电工基础教学小丛书之一。

众所周知，在电路分析中，等效的概念是十分重要和有用的。为了使学生在初步掌握电路分析内容的基础上，巩固、加深并扩大等效电路的知识，使之能系统地了解、熟练地运用电路分析中的等效概念，以利于培养学生分析和解决实际问题的能力，本书把中专电工类专业《电工基础》和电子类专业《电路基础》课程中有关等效电路与等效变换的内容加以整理、总结和提高，并适当增加了以下一些等效电路的分析，如互感线圈的T型去耦等效电路，实际变压器的等效电路，密勒定理，非线性电阻电路的小信号分析法，电源串、并联的等效关系，置换定理，理想电源的转移等。每节书后均附有练习题，供读者学习时参考，书末小结中还有各种常见等效电路参数的计算公式，便于读者查阅。

本书承全国中等专业学校电工基础课程组丁道鹏老师审阅，对书稿提出了许多宝贵意见，在此表示衷心感谢。对全国中等专业学校电工基础课程组其它各位老师的关心和帮助，也表示深切的谢意。

由于编者水平有限，书中的缺点和错误在所难免，热忱欢迎广大读者批评指正。

编者

一九八七年八月

# 目 录

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| 引言 .....                               | 1   |
| 一 无源网络的等效电路 .....                      | 3   |
| § 1-1 电阻的串联和并联 .....                   | 3   |
| § 1-2 电感的串联和并联 .....                   | 8   |
| § 1-3 电容的串联和并联 .....                   | 11  |
| § 1-4 电阻的Y型联接与 $\Delta$ 型联接的等效变换 ..... | 15  |
| § 1-5 正弦稳态无源二端网络的等效电路 .....            | 25  |
| § 1-6 互感耦合线圈的去耦等效电路 .....              | 27  |
| § 1-7 变压器的等效电路 .....                   | 37  |
| § 1-8 二端口网络的等效电路 .....                 | 53  |
| § 1-9 密勒定理 .....                       | 63  |
| 二 有源网络的等效电路 .....                      | 68  |
| § 2-1 理想电压源、理想电流源的串联和并联 .....          | 68  |
| § 2-2 电源的等效变换 .....                    | 70  |
| § 2-3 置换定理 .....                       | 75  |
| § 2-4 等效电源定理——戴维南定理和诺顿定理 .....         | 80  |
| § 2-5 理想电源的转移 .....                    | 90  |
| § 2-6 非线性电阻电路的小信号分析法 .....             | 96  |
| 小结 .....                               | 102 |
| 练习答案 .....                             | 116 |
| 参考书目 .....                             | 121 |

## 引 言

在电路或电网络的分析中，广泛采用等效的概念。其目的之一，是将复杂电路用一与它等效的简单电路代替，使原电路的分析与计算得到简化。例如无源二端电阻网络用一等效电阻代替；有源二端网络用一等效电源代替；互感耦合电路用去耦等效电路代替，等等。其目的之二，是将一种联接形式的网络，等效变换为另一种联接形式的网络，以便对它作更进一步的分析与研究。例如无源三端电阻网络的Y- $\Delta$ 等效变换，经变换后，便于用串、并联方法求得整个网络某一部分的等效电阻。此方法还可以改变网络的节点数或网孔数，对网络采用更适宜的分析与计算方法。实际电压源与实际电流源的等效变换，经变换后，整个电路可得到进一步的简化。阻抗串联与导纳并联的等效变换，经变换后的电路便于分析其特点等等。

两个电路的互相等效，一般是指它们端部的伏安特性相同。若在互相等效的两个电路的对应端部，施加同样的电压源(或电流源)，端部将获得同样的电流(或电压)。如果是两个互相等效的有源网络，还可以在它们的对应端部接以相同的负载电阻，当负载电阻保持恒定及当负载电阻作同样改变时，它们的端部将分别有相同的电压和电流输出。两个电路的互相等效，是对电路引出端钮的外部来说的，对电路内部来说也可能是不等效的，而电路外部和内部的划分，则由分析对象的具体要求确定。

对于两个互相等效的电路，还具有这样的特点，若对它们

分别用基尔霍夫定律 (KCL, KVL) 和欧姆定律列出方程组, 经过整理后应该具有相同的形式。在寻求实际的等效电路时, 也常常采用这样的方法, 首先对原电路列出方程式, 再进行整理和化简, 按照整理后的方程式画出等效电路。必须指出, 这样的等效电路当然不是唯一的。利用等效电路来分析原电路中的问题将更为清晰和简单。

在采用等效电路的分析中, 要注意等效的目的和条件, 等效方法和适用场合, 最后能够画出等效电路, 求出等效参数。本书主要讨论由非时变线性无源元件、线性受控源和独立电源组成的线性网络的等效电路, 同时也介绍了置换定理和非线性电阻电路的小信号分析法, 它们在局部范围内或是在某一特定点上, 也具有电路的等效意义, 因此也列入本书内容。书中先讨论无源网络的等效电路, 再讨论有源网络的等效电路, 等效的概念将贯穿于电路分析的始终。

# 一 无源网络的等效电路

## § 1-1 电阻的串联和并联

一个无源二端电阻电路，总可以用一等效电阻代替。为了获得等效电阻，可以在电路端部假定一电压  $u$  (或电流  $i$ )，找出端部的电流  $i$  (或电压  $u$ )，则等效电阻  $R_{eq} = u/i$ 。如果电路内部的电阻具有串并联关系，等效电阻的计算具有下列一般规律。

### 1. 电阻的串联

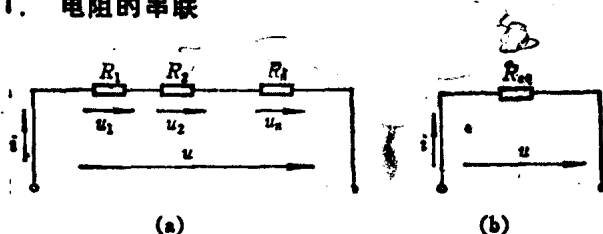


图 1-1-1 电阻的串联及其等效电路

图 1-1-1(a) 是  $n$  个线性电阻  $R_1, R_2, \dots, R_n$  串联的电路，通过各电阻的电流是同一个电流，应用欧姆定律和基尔霍夫电压定律 (KVL) 有

$$\begin{aligned} u &= u_1 + u_2 + \dots + u_n \\ &= R_1 i + R_2 i + \dots + R_n i \\ &= (R_1 + R_2 + \dots + R_n) i \end{aligned}$$

等效电阻

$$R_{eq} = \frac{u}{i} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

图 1-1-1(b) 是电阻串联的等效电路, 等效电阻等于各个串联电阻之和。显然, 图 (a) 和图 (b) 电路端部的伏安关系是相同的,  $n$  个串联电阻吸收的总功率, 等于它们的等效电阻所吸收的功率。因为功率

$$i^2 R_1 + i^2 R_2 + \cdots + i^2 R_n = i^2 (R_1 + R_2 + \cdots + R_n) = i^2 R_{eq}$$

所以等效电阻与这些串联电阻所起的作用相同, 分析电路时, 可以采用等效电阻替代这些串联电阻。电阻串联时的等效电阻大于其中任何一个被串联的电阻。当其中有一个电阻被开路时, 等效电阻即为无穷大。

正弦稳态电路中  $n$  个复阻抗  $Z_1, Z_2, \cdots, Z_n$  的串联, 其等效复阻抗的计算与此类似, 但需采用复数运算, 即等效复阻抗

$$Z_{eq} = Z_1 + Z_2 + \cdots + Z_n$$

## 2. 电阻的并联

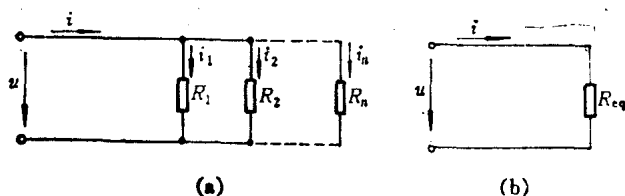


图 1-1-2 电阻的并联及其等效电路

图 1-1-2(a) 是  $n$  个线性电阻  $R_1, R_2, \dots, R_n$  并联的电路, 各电阻上的电压是同一个电压, 应用欧姆定律和基尔霍夫电流定律 (KCL) 有

$$\begin{aligned} i &= i_1 + i_2 + \cdots + i_n \\ &= \frac{u}{R_1} + \frac{u}{R_2} + \cdots + \frac{u}{R_n} \end{aligned}$$

$$= \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n} \right) u$$

等效电阻  $R_{eq}$  的倒数

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{i}{u} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n}$$

由于电导  $G=1/R$ ，用电导表示即为

$$G_{eq} = G_1 + G_2 + \cdots + G_n$$

$G_1$ 、 $G_2$ 、 $\cdots$ 、 $G_n$  为各并联支路的电导， $G_{eq}$  为等效电导。

图1-1-2(b)为电阻并联的等效电路，等效电阻的倒数等于各个并联电阻倒数之和。显然，图(a)和图(b)端部的伏安关系是相同的， $n$  个并联电阻吸收的总功率，等于它们的等效电阻所吸收的功率。因为功率

$$\begin{aligned} & \frac{u^2}{R_1} + \frac{u^2}{R_2} + \cdots + \frac{u^2}{R_n} \\ &= u^2 \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n} \right) = \frac{u^2}{R_{eq}} \end{aligned}$$

所以等效电阻与这些并联电阻所起的作用相同，分析电路时，可以采用等效电阻替代这些并联电阻。电阻并联时的等效电阻小于其中任何一个被并联的电阻。当其中有一个电阻为零时，等效电阻也为零，这就是电阻被短路的情形。当两个电阻并联时有

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_{eq}} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \\ R_{eq} &= \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \end{aligned}$$

三个或三个以上电阻的并联，不能沿用此公式计算，例如三

个电阻并联，写成  $R_{eq} = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$  是错误的。

• • •

正弦稳态电路中， $n$  个复阻抗  $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $\dots$ 、 $Z_n$  的并联，其等效复阻抗的计算与此类似，但需采用复数运算，即等效复阻抗的倒数

$$\frac{1}{Z_{eq}} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \dots + \frac{1}{Z_n}$$

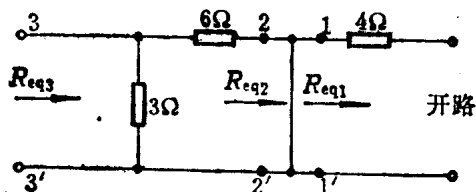
由于复导纳  $Y=1/Z$ ，用复导纳表示上式为

$$Y_{eq} = Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n$$

式中  $Y_1$ 、 $Y_2$ 、 $\dots$ 、 $Y_n$  为各并联支路的复导纳， $Y_{eq}$  为等效复导纳。

使用电阻串联及并联的等效电阻公式，可以计算电阻串联、并联或其混合联接时电路的等效电阻。对于较复杂的电阻联接，有时也可直接找出电路端部  $u/i$  的值求得等效电阻。

例1-1-1 在例图1-1-1中，求从1-1'、2-2'、3-3'端部向右边看电路的等效电阻  $R_{eq1}$ 、 $R_{eq2}$  和  $R_{eq3}$ 。



例图 1-1-1

解 1-1' 端部右边是  $4\Omega$  电阻与开路电阻（电阻为  $\infty$ ）串联

$$R_{eq1} = 4 + \infty = \infty$$

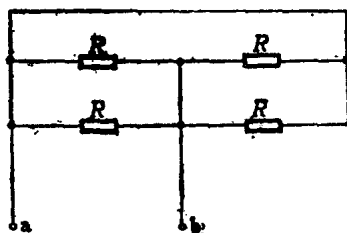
2-2' 端部右边是短路电阻（零电阻）与  $R_{eq1}$  并联

$$R_{eq2} = 0$$

3-3' 端部右边是  $6\Omega$  电阻与  $R_{03}$  串联后再与  $3\Omega$  电阻并联

$$R_{03} = \frac{6 \times 3}{6 + 3} = 2\Omega$$

例1-1-2 求例图 1-1-2 电路中 a、b 两端间的等效电阻

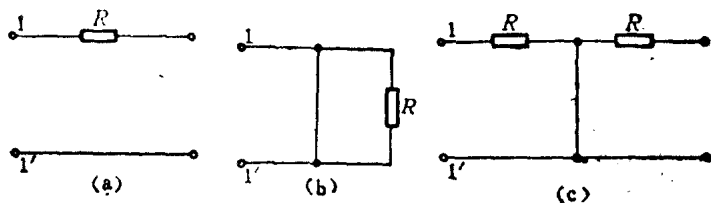


例图 1-1-2

解 四个电阻的一端接在一起，另一端也接在一起，所以是并联联接，等效电阻  $R_{04} = \frac{1}{4}R$

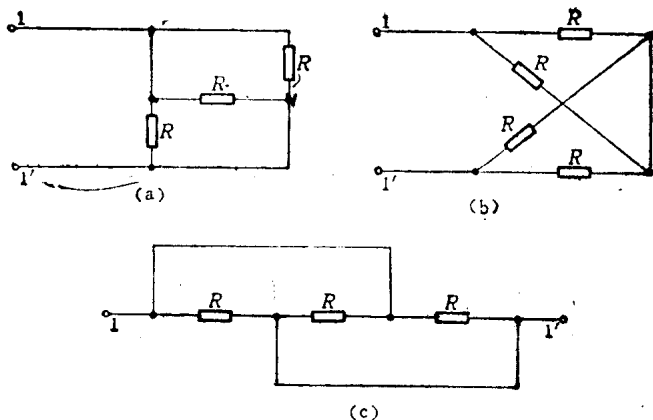
### 练习

题1-1-1 求题图1-1-1中端部 1-1' 间的等效电阻。



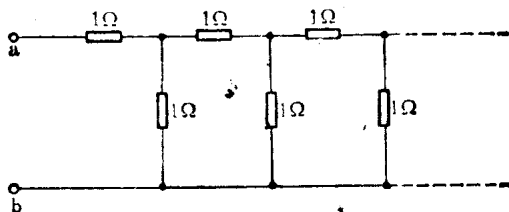
题图 1-1-1

题1-1-2 求题图1-1-2中端部 1-1' 间的等效电阻。



题图 1-1-2

题1-1-3 题图1-1-3中,  $1\Omega$ 的链式电阻有无限多个, 求端部a、b间的等效电阻。



题图 1-1-3

## § 1-2 电感的串联和并联

### 1. 电感的串联

图1-2-1(a)为  $n$  个线性电感  $L_1, L_2, \dots, L_n$  的串联 (只考虑线圈本身的自感, 不考虑线圈间的互感), 各电感通过同一个电流  $i$ , 应用KVL及电感元件的伏安关系, 则电压

$$u = u_1 + u_2 + \dots + u_n$$

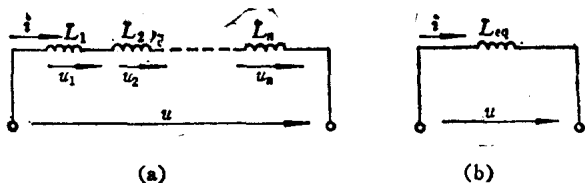


图1-2-1 电感的串联及其等效电路

$$\begin{aligned}
 &= L_1 \frac{di}{dt} + L_2 \frac{di}{dt} + \cdots + L_n \frac{di}{dt} \\
 &= (L_1 + L_2 + \cdots + L_n) \frac{di}{dt} \\
 &= L_{eq} \frac{di}{dt}
 \end{aligned}$$

式中  $L_{eq}$  为等效电感。

$$L_{eq} = L_1 + L_2 + \cdots + L_n$$

图1-2-1(b)为电感串联时的等效电路，等效电感等于各个串联电感之和，图(a)和图(b)端部的电压和电流关系是相同的。在分析电路时，可以用图(b)代替图(a)。当各电感有不同的初始电流时，串联后按总磁链不变的原则，初始电流被强制为同一数值  $i(0)$ 。

## 2. 电感的并联

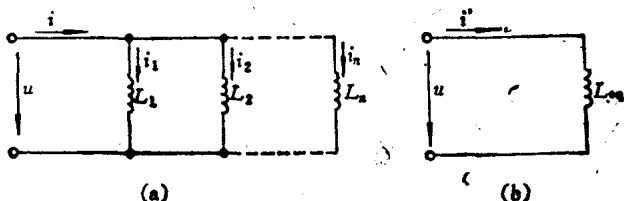


图1-2-2 电感的并联及其等效电路

图1-2-2(a)为  $n$  个线性电感  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $\cdots$ 、 $L_n$  的并联（只

考虑线圈的自感，不考虑线圈间的互感)，两端的电压设为  $u$ ，则通过各电感的电流为

$$\begin{aligned} i_1 &= \frac{1}{L_1} \int_{-\infty}^t u \, dt \\ &= i_1(0) + \frac{1}{L_1} \int_0^t u \, dt \\ i_2 &= i_2(0) + \frac{1}{L_2} \int_0^t u \, dt \\ &\dots\dots\dots \\ i_n &= i_n(0) + \frac{1}{L_n} \int_0^t u \, dt \end{aligned}$$

式中  $i_1(0)$ 、 $i_2(0)$ 、 $\dots i_n(0)$  为各个电感电流的初始值。按 KCL，总电流

$$\begin{aligned} i &= i_1 + i_2 + \dots + i_n \\ &= [i_1(0) + i_2(0) + \dots + i_n(0)] \\ &\quad + \left( \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n} \right) \int_0^t u \, dt \\ &= i(0) + \frac{1}{L_{eq}} \int_0^t u \, dt \end{aligned}$$

式中等效电感的倒数

$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n}$$

电流的初始值为

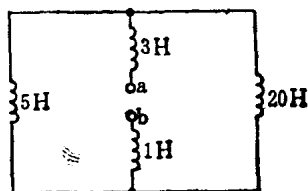
$$i(0) = i_1(0) + i_2(0) + \dots + i_n(0)$$

图1-2-2(b)为电感并联时的等效电路，等效电感的倒数等于各个并联电感倒数之和。图(a)和图(b)端部的电压和电流关系是相同的。在分析电路时，可以用图(b)代替图(a)。

从以上分析可知,在不考虑互感的情况下,电感串联和并联时等效电感的计算,与电阻串联和并联时等效电阻的计算相类似。

### 练习

题1-2-1 求题图1-2-1 电路 a、b 两端间的等效电感。

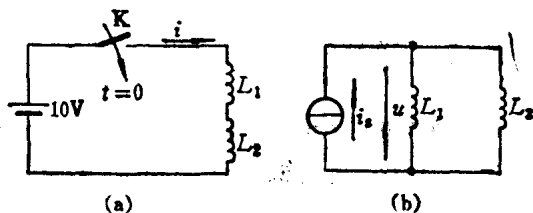


题图 1-2-1

题1-2-2 题图中,  $L_1=L_2=2\text{H}$ , 电感电流初始值均为零。

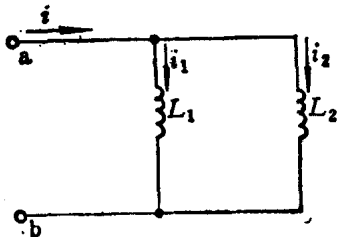
图(a)中, 时间  $t=0$  时, 开关K闭合, 求电流  $i$ 。

图(b)中,  $i_s(t)=5\sin 2t\text{ A}$ , 求电压  $u$ 。



题图 1-2-2

题1-2-3 题图1-2-3中, 已知  $L_1=2\text{H}$ ,  $L_2=3\text{H}$ , 初始电流  $i_1(0)=2\text{A}$ ,  $i_2(0)=1\text{A}$ , 求 a、b 端间的等效电感  $L_{ab}$  和初始电流  $i(0)$ 。



题图 1-2-3