

○ 钱博森 编著



负阻器件
负阻电路 及其应用



天津大学出版社

负阻器件及其应用 负阻电路

钱博森 编著

天津大学出版社

(津)新登字 012 号

内 容 提 要

本书共分六章，主要介绍国内外各种常用的两端、三端负阻器件，负阻电路，以及它们在工程中，特别是在电路和系统方面的应用。最后，叙述了目前流行的三种组合负阻电路的设计方法。

本书适用于从事研究电路、电工、控制、通讯、测量、仪器、电气工程、电子工程等领域的大学生、研究生、教师与工程技术人员。

DS82/23

负阻器件负阻电路及其应用

钱博森 编著

*

天津大学出版社出版
(天津大学内)

河北省永清第一胶印印刷厂印刷
新华书店天津发行所发行

*

开本：787×1092 毫米 1/32 印张：8 $\frac{3}{4}$ 字数：197 千字
1993 年 11 月第一版 1993 年 11 月第一次印刷

印数：1—3000

ISBN 7-5618-0486-5
TM-18

定价：6.80 元

0558178

前 言

负阻器件、负阻电路在导航、遥控、遥测、遥感、雷达、通讯、自动控制、计算机系统、化工安全系统、检测保险系统、电气工程、乃至日常生活用品中都有广泛的用途。因此，国内外许多著名的科研机构、高等学校，都正组织力量进行深入的研究。

自1918年A. W. Hull宣告第一个负阻器件——Dynatron（打拿）负阻管诞生以来，人类对于负阻的研究，便开始写下光辉灿烂的篇章。1958年Esaki研制成功第一个负阻固态器件——Tunnel diode（隧道二极管），该器件在上述各科技领域（文章开篇所述）发挥了巨大的作用。由此，Esaki于1973年荣获了诺贝尔奖金。隧道二极管问世后5年，即1963年秋，J. B. Gunn首次由实验观察到空间电荷偶极畴穿越半导体样品这一特定的模式，即“转移电子效应”。“转移电子效应”是以半导体负电导体效应作为基础的物理现象和基本理论。从此，开创了一门新的学科：“耿效应电子学”。它的出现，被美国著名物理学家B. G. Bosch（博施），R. W. H. Engelmann（恩格尔曼）称之为“是对微波领域一次革命性的冲击”。1984年中国科学院半导体研究所宣告：我国首创一种新型的负阻开关器件——双向负阻晶体管。我国许多学报、杂志对此纷纷做了报道，在国内外引起了巨大的反响。1986年12月，美国贝尔实验室郑重宣布：该实验室试制成功了第一个隧道晶体管（Tunnelling transistor）。1988年，我国访瑞典学者沈光地，许丹霞发现多台阶双向负阻电流输送现象，国内外新闻界很快做了报道。

尽管如此，目前国内还没有一本能系统介绍有关负阻这一技术、理论的著作，国外也缺少同类的专门著作。同时，作者

考虑到，人们对正阻了解的程度远远胜于对负阻的了解，由此产生了编著本书的念头。作者在参考国内外有关论文的基础上，特别是积作者多年来的研究成果，编著了这本著作，以飨读者。希望借助本书的出版，能向广大读者介绍这一领域的技术，并推动这一技术的进一步研究和发展。负阻技术仍属一个还在研究与发展的领域，还有许多问题尚需人们去探索。书中部分内容属本人研究的成果，有的已公开发表，并被国内外著名文摘，大辞典所收录。

在本书的编著和出版过程中，得到了天津大学自动化系杨山教授，钱巨玺副教授，天津理工学院卢伊教授，天津大学出版社张美珍副编审的大力帮助，作者在此表示衷心的感谢。最后，还必须指出，由于在编写过程中可借鉴的专著极少加之作者水平有限，缺点，错误在所难免，敬请广大读者批评指正。

钱博森

于天津大学自动化系

1992年7月

目 录

| | |
|----------------------------------|-------|
| 第一章 绪论 | (1) |
| 第一节 基本概念..... | (2) |
| 第二节 负阻产生的方式..... | (6) |
| 第三节 负阻元件和负阻电路的分类..... | (9) |
| 第二章 半导体两端负阻器件 | (11) |
| 第一节 隧道二极管 | (11) |
| 第二节 雪崩二极管 | (33) |
| 第三节 耿氏二极管 | (39) |
| 第四节 λ 二极管 | (47) |
| 第五节 其它两端负阻器件 | (55) |
| 第三章 半导体三端负阻器件 | (60) |
| 第一节 单结晶体管 | (60) |
| 第二节 双向负阻晶体管 | (74) |
| 第三节 负阻场效应晶体管 | (82) |
| 第四节 λ 双极型晶体管 | (88) |
| 第五节 λ 型 MOS 场效应晶体管 | (95) |
| 第四章 负阻电路 | (99) |
| 第一节 稳流型 (N 型) 负阻电路..... | (101) |
| 第二节 稳压型 (S 型) 负阻电路 | (104) |
| 第三节 负阻抗 (导纳) 转换电路..... | (108) |
| 第四节 多值负阻电路..... | (129) |
| 第五章 负阻器件、负阻电路的实际应用 | (151) |
| 第一节 在参量放大器中负阻的应用..... | (151) |

| | | |
|-------------|------------------------------------|-------|
| 第二节 | 负阻振荡器..... | (160) |
| 第三节 | 负阻器件在微波电路中的应用..... | (172) |
| 第四节 | 负阻器件构成的数字电路..... | (180) |
| 第五节 | 负阻器件存贮器..... | (187) |
| 第六节 | 使用负阻元件的脉冲电路..... | (195) |
| 第七节 | 负阻抗在市话通讯系统中的应用..... | (211) |
| 第八节 | 负阻抗在构成滤波电路、回转器、电感电 路等方面的应用..... | (225) |
| 第六章 | 负阻抗变换器和组合负阻电路的设计方法 | (235) |
| 第一节 | 负阻抗转换器的设计..... | (235) |
| 第二节 | 图特 (Todd) 法..... | (243) |
| 第三节 | 移相法..... | (254) |
| 第四节 | 功能集成负阻器件的设计..... | (258) |
| 参考文献 | | (268) |

第一章 绪 论

从 1918 年 A. W. Hull 发明世界上第一个负阻器件——Dynatron(打拿负阻管)算起^[1],到 1986 年 12 月贝尔实验室正式宣告世界上第一个隧道晶体管(Tunneling Transistor)已由他们试制成功为止,^[2]负阻器件和负阻电路从研制到开发已跨越了整整 70 个年头。

70 年前,当 Hull 提出“负阻”概念的时候,曾遭到许多学者的反对、怀疑。他们认为“负阻”的概念“不符合能量守恒定律”。但是,很快从打拿负阻管的伏安特性曲线上人们清楚地看到:原来负阻器件的负阻特性仅是表现在器件的某段动态工作范围内;对于静态,它还是一个耗能元件,还是一个“正阻”。没有人再怀疑了,再反对了。相反,恰恰由于在负阻器件的这段动态工作范围,发现了许多其它器件所没有的特点,人们利用这些特点,找到了它的价值,找到了它的很多应用。今天,负阻器件、负阻电路已经广泛地应用于计算机、化工安全、公用汽车、邮电通讯等系统;在日常生活用品中,诸如照相机、录音机、电视机等也都有它的用武之地。

随着“打拿负阻管”的诞生,人们很快发现了许多真空管也具有这种负阻特性。于是人们又纷纷利用真空管进行研究,著书立说,拟题作文开发应用^{[3]~[8]},持续了大约 40 年的光景。这可以说是负阻器件、负阻电路发展的第 1 个时期。

1948 年第一个晶体管的诞生,这促进了固态负阻器件的研究。由于固态负阻器件的物理特性复杂,直到 1958 年才由 L. Esaki 研制成功第一个固态负阻器件——Tunnel diode(隧道二极管)

管)^[9]。这种器件,使用方便,应用更加广泛,由此,Esaki 于 1973 年荣获诺贝尔物理奖。隧道二极管问世后 5 年,另一种新型的两端固态负阻器件——Gunn diode(耿氏二极管)诞生^[10],于此,一种新的物理效应——耿氏效应^[11],又轰动于世。固态负阻器件的出现,可以定为第 2 个时期。

70 年代,展现众多功能的集成负阻器件纷纷出现。利用双极型晶体管、JFET、MOSFET 和一些电阻的组合产生新的负阻器件和负阻电路也得到了广泛的研究^[12~16]。负阻电路的设计也日臻完善,愈加规范化。在生产、科研,以至人们的生活中,负阻器件、负阻电路以它固有的特点发挥了更大的作用。这是负阻器件、负阻电路发展的第 3 个时期。

我国对负阻器件的研究起步较晚。50 年代仅是一些学者对真空管的负阻效应展开研究。在党和政府的关怀下,从 60 年代开始,我国学者、专家把隧道二极管的研制技术引入国内,并对真空管的负阻效应和应用进一步予以大量研究^{[17]~[24]}。对于负阻电路的研究,我国学者早已开始。50 年代,在国内通讯系统部门,就开始采用负阻抗增音的原理^[25]。随着时代的进步,目前我国不仅早已成批生产隧道二极管系列、单结晶体管系列的负阻器件,而且由我国首创的一种新型的负阻器件——双向负阻晶体管也已问世^[26]。负阻器件不仅在控制系统、信号产生系统得到应用,而且已开始用在红外、激光器等方面得到应用。

第一节 基本概念

我们经常接触到的电阻,不论是炭膜电阻、线绕电阻和金属膜电阻,都是正电阻。通常都不考虑它们数值前的符号,认为它

们是正确的。那么,正电阻有哪些特点呢?归纳起来有以下几点:

(1)如图 1.1(a)所示,在电阻两端加上电压,就有电流流过电阻。所加电压愈大,通过该电阻的电流值也愈大。电阻上的电压和电流成正比关系,这种关系可用曲线表示,如图 1.1(b)所示。由图可见,R 愈大,电阻线的斜率愈大;如果电

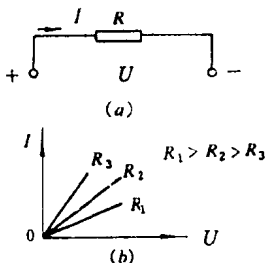


图 1.1 电压、电流、电阻关系图

压的增加方向为正,电流的增加方向也为正。同样,如果电压增加方向为负(即减小),则电流的增加方向也为负,两者的正负符号永远相同,电压和电流的比值 R 永远是正值,所以叫做正电阻。

$$R = \frac{U}{I} = \frac{-U}{-I} = \frac{u}{i} \quad (1-1)$$

这公式既适用于直流电,也适用于交流电。在交流的情况下,小写字母 u 和 i 表示电压和电流的瞬时值。

(2)当电流通过电阻时,电阻上耗损一定的功率

$$P = UI \quad \text{或} \quad p = ui \quad (1-2)$$

由于这种功率损耗,电阻会发热。这表明,该元件从与它相连的电源中取用了能量,所消耗的能量与流过电阻的电流平方成正比;同时,也和电阻值的大小成正比。

(3)根据欧姆定律,当电流流过电阻时,将在电阻两端产生电压降

$$U = IR \quad (1-3)$$

如图 1.2 所示,当电流值不变时,电阻值愈大,则所产生的电压降 U 值也愈大。

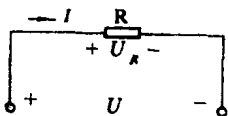


图 1.2 压降关系图

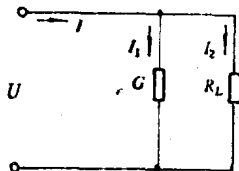


图 1.3 漏导关系图

(4)在一个有源电路中,当有电导 G 存在时,它将泄漏掉一部分电流 I_1 ,使通过负载电阻 R_L 上的电流减少,如图 1.3 所示。图中 $I_2 = I - I_1$ 。

现在讨论作为一个两端电阻元件的性质,其伏安特性曲线如图 1.4 所示,此特性曲线可分成 3 段。第 1 段相应于电压由零到 U_1 ,第 2 段相应于电压由 U_1 到 U_2 ,第 3 段相应于电压大于 U_2 的一段。如忽略第 1 段末端和第 3 段起点处轻微的非线性,

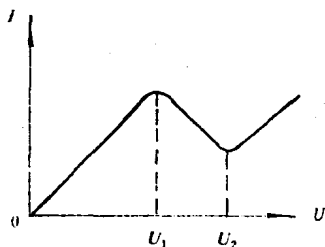


图 1.4 电阻的伏安特性曲线

便可认为,在这两段中,该两端元件的特性与上面已讨论过的普通正电阻相同。但当电压处在 U_1 到 U_2 这段间隔内时,两端元件的特性变了。在这段间隔内,随着电压的增加,电流不是增加,而是减少;随着电压的减少,电流不是减少,而是增加。由此可见,在这种情况下,电压增量与电流增量异号,呈现负电阻特性,这也就是负阻的定义。

负阻的特点有如下几个方面：

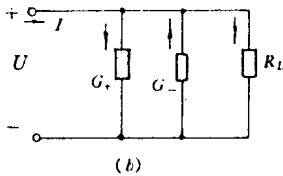
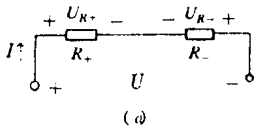
(1) 俗称的负阻器件，仅对交流电流和交流电压呈现负阻特性。在直流情况下它仍是一个正电阻。

(2) 负阻上的电压和电流存在 180° 的相位差，即

$$R_- = - \frac{\Delta u}{\Delta i} \quad (1-4)$$

式中，符号 R_- 代表负阻的参数值。在特性曲线的直线段 U_1-U_2 范围内，该阻值恒定不变。

(3) 如图 1.5(a) 所示，当交流电流流经负阻 R_- 时，非但不会产生电压降，反而会产生一个电位升，此时该负电阻 R_- 上的电压 U_{R_-} 的方向与电流流过正电阻 R_+ 上的电压 U_{R_+} 的方向相反，而与电源电压 U 的方向相同（两者成串联关系）。



(4) 如图 1.5(b) 所示，当交流电流流经负电导 G_- (G_- 为 R_- 的倒数) 时，负电导不但不会吸收电源电流，反而会产生一个与电源电流的方向一致的电流，流向两侧线路，因而使得负载电阻上的电流有所增加。

(5) 如前所述，正电阻消耗能量，但负电阻和负电导不仅不会消耗交流信号能电量，反而能提供交流信号能。当然，这种提供，是以其它能源（如直流电源）的消耗为代价的。

图 1.5 负电阻和负电导在电路里的关系

(6) 只有当电路上有电流流通时,才会产生负电阻(或负阻效应),没有电流流通时,就不存在负电阻。而正电阻则不论有没有电流流过总是存在的。

(7) 同样,电感元件有正电感性元件和负电感性元件之分;电容性元件亦有正电容性元件和负电容性元件之分。正电感性元件其电抗值随着频率的提高而增加;正电容性元件其电抗值随着频率的提高而减小。而负电感性元件其电抗值随着频率的升高而减小(即电抗的负值愈大);负电容性元件其电抗值随频率的升高而增加。

综上所述,负电阻既具有一般电阻的一些特性,又具有电源电势的一些特点。但是,它既不能用一般的 R 、 L 、 C 等无源元件代替,又不能用一般的电池、发电机等简单的有源元件模拟。恰当地说,它是一个能把一定的直流电能通过器件(或某种电路)转换成为一个等效负阻(或负电导)作用的有源二端网络。另外,严格地说,负阻按定义应称为负微分电阻。

第二节 负阻产生的方式

产生负阻的主要方法有 4 种:

(1) 直接制造负阻器件的方式。如前所述,1918 年 *A. W. HULL* 制造的打拿负阻管,1958 年 *L. Esaki* 制造的隧道二极管,1963 年制造的耿氏二极管,就是这种方式的典型例子。尔后,还有 *PNPN* 四层二极管,雪崩晶体管,雪崩复合低位开关等负阻器件,到了 70 年代,具有众多功能的集成负阻器件也已纷纷出现,例如 λ 二极管、 λ 双极型晶体管、 λ *MOSFET* 就是其中的一个代表^[16]。

(2)利用其它器件的负阻效应获得负阻。这里最早的例子是利用电子管获得负阻。例如,如让四极管帘栅极上加有超过板压的直流电压,就能得到四极管板极伏安特性曲线的下降段,即图 1.4 的第 2 段(U_1-U_2)。这时四极管处于发生负阻效应的状态。根据这个道理可制成负跨导管振荡器。对于五极电子管,当五极管各电极上的电压取某一定的值,而帘栅极电位的一切变化都传给抑制栅时,阴极——帘栅极之间区间也可呈现负阻特性。总之,只要有两个以上栅极的电子管,都可设法获得负阻^[27]。

许多电气装置和器件的情况也颇象负阻。例如,电弧和氖管(当外加电压在某一定范围内),磁控管,其它多极电子管等,都可属于负阻之列。在无回授电路的自激振荡器中,这些负阻效应的应用非常广泛,因为它们的结构和调整简单,振幅和频率稳定,频带较宽(从音频直到几十兆赫之间)。

60 年代著名负阻专家 *C. D. Todd* 在总结前人的基础上^{[28]~[30]},指出场效应晶体管在温度变化时,也可得到负阻效应^{[31]~[34]}。

(3)利用正反馈电路进行阻抗变换获得负阻。其主要原理是把一个正值阻抗或一个正值导纳移相 180° ,转换成为负值阻抗或负值导纳,然后再把它耦合到线路上去以形成负阻效应。

其方法又可分为串联型和并联型两种。

若将正值阻抗网络通过阻抗转换器移相 180° 后形成的负值阻抗串联到主电路上,则为串联型,其框图如图 1.6 所示。图中 Z_N 为正值阻抗, K 为阻抗转换器的转换系数, Z_A 为 Z_N 经过阻抗转换器后得到的负值阻抗,即 Z_- 。阻抗耦合器的作用是将阻抗转换器转换过来的负值阻抗平衡地串联到线路上去,它实际上是一只耦合变压器。从线路上看进去的等效入端阻抗为

$$Z_{1,2} = |K| \angle 180^\circ Z_N = -KZ_N \quad (1-5)$$

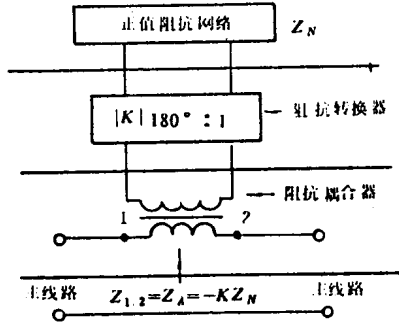


图 1.6 串联型阻抗转换器

$Z_{1,2}$ 就是正值阻抗 Z_N 经阻抗转换器转换为负值后反映到线路上的等效负阻抗。当然,这种阻抗转换器必须由正反馈电路构成。

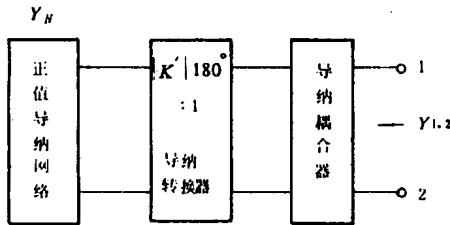


图 1.7 并联型导纳转换器

若将正值导纳网络通过导纳转换器移相 180° 后形成的负值导纳并联到主电路上,则为并联型,其框图如图 1.7 所示。图中 Y_N 为正值导纳, K' 为导纳转换器的转换系数, $Y_{1,2}$ 为 Y_N 经过导纳转换器后得到的负值导纳,即 Y_- 。导纳耦合器由变压器、电容器组成,其作用是将导纳转换器转换过来的负值导纳平衡地并联到主线路上去。从主线路往里看的入端导纳为

$$Y_{1,2} = |K'| \angle 180^\circ \cdot Y_N = -K'Y_N \quad (1-6)$$

$Y_{1,2}$ 就是正值导纳 Y_N 经导纳转换器转换为负值后反映到线路上的等效负值导纳。当然,这种导纳转换器也必须由正反馈电路构成。

(4)利用其它器件的组合获得负阻。形式是多种多样的,可分别用电阻、双极型晶体管、*JFET*、*MOSFET* 等器件进行适当的组合,形成负阻,详细内容将在第三章、第四章中介绍。

第三节 负阻元件和负阻电路的分类

若以 X 轴为电压、 Y 轴为电流表示伏安特性时,负阻元件和负阻电路可以分为如图 1.8(a)所示的 N 型负阻和图 1.8(b)所示的 S 型负阻两种。前一种叫做电压可控型或短路稳定型负阻元件,有时也叫做负阻管型负阻元件或稳压型负阻元件(电路)。后一种叫做电流可控型或开路稳定型负阻元件,有时也叫做放电管型负阻元件或稳流型负阻元件(电路)。

N 型负阻具有的特点是,对应于一个给定的端电流值,可能有 3 个端电压,但对应于一个给定的端电压值却只有一个端电流。具有这种特性的负阻器件或电路,通常是所加电压一增大就开始导通,并且在达到临 endpoint 电压之前,其电流将不断地增大。在达到临 endpoint 电压时,电流上升至最大值,而超过临 endpoint 电压时,电流便开始下降。在 N 型负阻元件中,最有代表性的是隧道二极管。

S 型负阻具有的特点是,对应于一个给定的端电压值可能

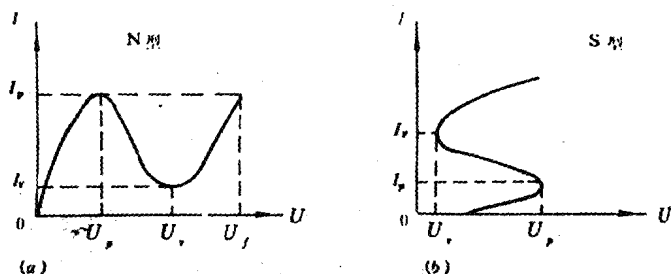


图 1.8 两种特性的负阻

有 3 个端电流,但对应于一个给定的端电流值却只有一个端电压。具有这种特性的负阻器件或电路在未达到临界的起燃电压之前,通常是不导电的,如果端电压一旦超过此临界电压,电流就突然增大。在 S 型负阻元件中,最有代表性的是 $PNPN$ 开关。