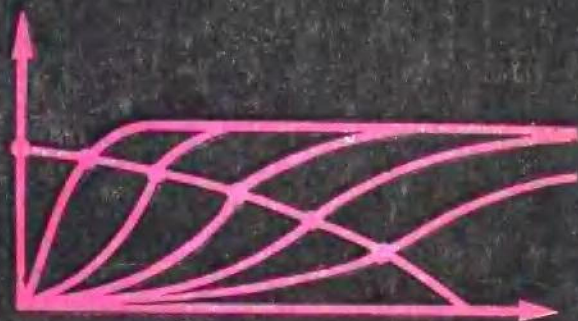


交流稳压器

吴汶麒 编 · 中国铁道出版社



44

JIADLIU WEN
YA
QI

交 流 稳 压 器

吴汶麒 编

中国铁道出版社出版

责任编辑 倪嘉寒 封面设计 刘景山

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本: 787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张: 6.25 字数: 135 千

1983年7月第1版 1983年7月第1次印刷

印数: 0001—12,000册 定价: 0.65元

内 容 简 介

本书详细地介绍了目前广泛使用的五种类型交流稳压器，即铁磁谐振式、磁放大器式、可控硅式、感应调压式以及自耦变压器式；着重讨论了它们的工作原理，并通过实际电路来进一步加以说明。本书对于各种类型稳压器的使用条件及选择方法也作了必要的叙述；对于近几年获得普遍重视的稳压变压器（CVT）本书介绍了它们的设计方法。

本书可供电气工作人员参考，也可作为有关院校相应课程的参考读物。

前 言

交流电源电压的稳定,对于许多技术部门(如无线电技术、电子测量、自动控制、电子计算机等)具有相当重要的意义,因此,交流稳压器(这里所指的是工频50赫220伏的稳压器)得到了广泛的重视。

自从本世纪30年代第一台磁饱和稳压器问世以来,随着科学技术的发展,交流稳压器的类型也逐渐增多。目前使用最普遍的有:铁磁谐振式(包括早期的磁饱和式及近年采用的稳压变压器)、磁放大器式、可控硅式、感应调压器式及自耦变压器式等*。本书详细地讨论了这五种类型交流稳压器的工作原理,并通过实际电路来进一步加以说明。对于近几年获得普遍重视的稳压变压器(CVT)本书还介绍了它们的设计方法。为了便于读者自学,凡涉及电工及电子技术基础知识的内容,都作了必要的说明。作者希望通过本书能使交流稳压技术得到进一步的推广与普及。

本书是根据作者在教学、科研工作中所积累的资料、数据与体会写成,限于水平与实践经验,书中难免有不妥之处,恳切希望广大读者批评指正。

本书承华东化工学院自动控制与电子工程系张大恒教授认真校阅,在此,致以衷心的感谢。

吴 汶 麒
于上海铁道学院

* 除上述五种类型之外,还有逆变器式及参数变压器式,前者使用不普遍,后者尚处于研究、试制阶段,因此,本书不拟述及。

结 论

在无线电通信、电子测量、自动控制、电子计算机等许多设备中，都要求供电电源电压比较稳定。通常，供电电源电压的波动将会直接影响到设备的质量和性能，在某些情况下，甚至可能彻底破坏设备的正常工作。例如，在电子示波器中，随着供电电压的波动，辉度、聚焦以及图象的时标和幅值都会发生变化；在电视机中，供电电压的波动也会引起图象大小、亮度、对比度的改变，尤其是当电源电压快变时，将会出现图象的跳动和闪烁；在铁路信号部门，供电电压的波动更是严重地影响信号设备的正常使用，从而直接影响行车安全。当供电电压过低时，电动转辙机不能起动，轨道继电器在调整状态下（即无车占用）不能正常吸起，信号灯的显示距离大为缩短（电压降低10%，照明强度减少40%）。当供电电压过高时，轨道继电器在分路状态时不能正常落下，信号灯泡的使用寿命大为缩短。由此可见，供电电源电压的稳定对于国防、工农业生产、铁路运输以及人民的日常生活都具有密切的关系。

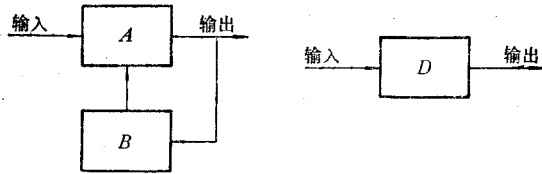
但是，由于各种因素，我国目前的供电电压具有相当大的波动范围。在大、中城市内，通常的波动范围为+10%~-20%（即180~240伏），而在小城镇或者农村地区，波动范围可高达+15%~-40%（即140~250伏）。因而，交流稳压器已成为许多部门的一种重要设备。

就大多数电子设备而言，由于电子元件的工作电压通常是直流电压，因此，在大多数电子设备及仪器中，都带有专

门的直流稳压设备。关于直流稳压的原理，在大多数电子技术书籍中都有详细的论述，故本书不拟重述。

至于交流稳压器，目前不论是在欧美、日本，还是在我国，都还在不断摸索和研制，而由于我国供电电压的波动较大，因此研制和使用交流稳压器就显得更为迫切。

目前，国内外普遍采用的交流稳压器大体上可以分为两大类，它们的工作框图如图 1 (a)、(b) 所示。



(a) 第一类交流稳压器 (b) 第二类交流稳压器

图 1 交流稳压器的工作框图

图 1 (a) 所示的第一类交流稳压器包括调整部分 A 、采样检测及控制部分 B 。如果交流输出电压的有效值发生变动，那么通过 B 的控制作用而使 A 对交流电压的有效值进行调整，这样就能达到保持输出电压有效值稳定的目的。这类交流稳压器的稳压精度可以通过调节 B 的灵敏度而加以控制，通常，稳压精度可达 $1\% \sim 3\%$ 。由于这类稳压器是对输出电压进行采样控制，因此，无论是对于因电网电压的波动所引起的或对于因本身负荷的改变所引起的输出电压有效值的变化，它都具有稳压作用。在这类稳压器中，所采用的调整设备种类较多，常用的有：磁放大器、可控硅元件、带伺服电动机的自耦变压器、感应调压器等。采样控制部分大多采用由晶体管或电子管构成的直流放大电路，有的场合还附有继电器控制电路。

在图 1 (b) 所示的第二类交流稳压器中, 采用了对于电压有效值具有“惰性”作用的设备 D 。由于 D 的“惰性”作用, 致使输出电压的有效值不随输入电压有效值的波动而改变。这类稳压器的突出优点是设备简单。它的缺点在于: 对于因本身负荷改变而引起的输出电压有效值变化则不能起到稳压作用。目前广泛采用的“惰性”设备大多是输出绕组的所在铁心处于磁饱和状态的特殊铁心变压器。正因为输出绕组的所在铁心处于磁饱和状态, 因此它的效率必然较低, 输出波形也必然有失真。

虽然从稳压性能上讲, 第一类交流稳压器优于第二类交流稳压器, 但是, 后者具有设备简单, 尤其是若能把调整设备与使用者所原有的电源变压器合为一体 (此即所谓稳压变压器), 既不增加设备, 又不明显增加体积的条件下起到交流稳压作用, 再加上设备可靠、维修极其方便等优点, 因此, 第二类交流稳压器在负荷变动并不剧烈, 对于输出电压的波形要求不高, 容量在 5 千伏安以下的部门, 得到了广泛的采用。

在我国目前生产和使用的交流稳压器中, 属于第一类的有磁放大器式, 可控硅移相调压式、感应调压器式、带伺服电动机的自耦变压器式四种; 属于第二类的有磁饱和式与稳压变压器式两种 (统称为铁磁谐振式)。本书将这几种交流稳压器从工作原理到实用线路进行详细的讨论, 在这里, 仅就这几种交流稳压器的主要特点作一些简要的说明。

(一) 铁磁谐振式交流稳压器

这是一种基于铁磁谐振原理的交流稳压器。目前使用很广泛的磁饱和稳压器以及最近几年出现的稳压变压器都是属于此列。

这两类交流稳压器都是依靠铁磁谐振而使输出线圈所在的铁心柱处于磁饱和状态, 从而达到稳压的目的。其中磁饱

和稳压器是一种专用的交流稳压设备，能够达到较高的稳压精度。而稳压变压器则是兼有稳压、变压两重功能，可以通过改造设备中原有的电源变压器使之兼有稳压功能。由于体积小、投资省，因此获得了迅速的发展*。

铁磁谐振式交流稳压器的缺点是：（1）供电电源的频率对稳压精度有很大的影响，供电频率每变化 ± 1 赫，输出电压将改变 $\pm 2\%$ ；（2）输出电压的波形发生畸变，近似为梯形波，如图2所示；

（3）当负荷电流变化剧烈时，由于它无法克服变压器输出绕组上的压降变化，因而在这种情况下的稳压精度将明显下降；（4）当负荷功率较大时，效率比较低，通常在 $65\% \sim 75\%$ 左右。

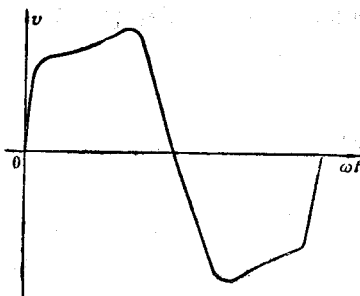


图2 铁磁谐振式交流稳压器的输出电压波形

（二）带有磁放大器的交流稳压器

这也是目前广泛使用的一种交流稳压器。如目前被许多部门采用的614-A型交流稳压器即是属于此列。这类交流稳压器对输出电压进行采样，经放大后对磁放大器的直流基磁电流进行控制，通过磁放大器的自动调节作用而使输出电压保持稳定。

这类交流稳压器由于采用了对输出电压采样以及放大等环节，因而不论是对供电电压的波动，还是对负荷电流的变化，都能具有较高的稳压精度。同时，输出波形的畸变也较小。

* 稳压变压器是由日本横河电机制作所在六十年代后期首先研制成功的。近几年来，我国在小功率稳压变压器的研制和生产方面也取得了一些进展。例如，WCD系列稳压变压器已有小批量生产，并在一些精密仪器中使用。

这类交流稳压器的主要缺点是：（1）所需的设备比较多，磁放大器的体积比较大（约为电源变压器的1.5~2倍）。采样电压的放大部分一般采用由电子管或晶体管组成的直流放大电路，前者体积大，耗电多，后者则较易损坏；（2）由于磁放大器具有惰性，因此当电源电压或负荷电流迅速变化时，稳压器不能迅速地作出反应，它的延滞时间往往长达十分之几秒；（3）输出功率不大，通常在5千伏安以下，一般只能用作精密电子仪器的辅助供电设备。

（三）可控硅交流稳压器

利用改变可控硅的导通角来调节输出电压的有效值即是这类交流稳压器的工作原理。

这类交流稳压器的稳压精度高，由于可控硅的控制反应快，所以不存在惰性。虽说仍然需要许多附加设备，但就相同的输出功率而言，它的重量只有磁饱和稳压器的一半，体积只有磁饱和稳压器的三分之一。

但是，这类交流稳压器也有一些明显的缺点：（1）电路比较复杂，调整与检修都比较困难；（2）输出电压波形严重失真，如图3所示，对通信设备可能产生干扰；（3）由于可控硅元件的使用寿命远不如电磁元件，所以在需要昼夜连续使用的场合，就不宜采用这类交流稳压器。

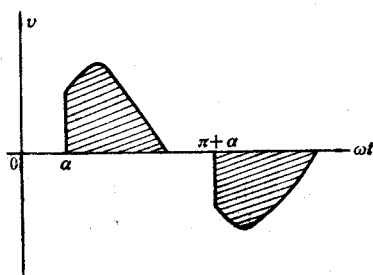


图3 可控硅交流稳压器的输出电压波形

（四）感应调压式交流稳压器

这是一种大功率的交流稳压器。它的关键性设备是一台结构类似于线绕式电机的感应调压器。感应调压器的容量很

大，由上海调压器厂生产的感应调压器，其最大容量可达几百千伏安。因此，往往可以把它用作作为一个车间，乃至中、小型工厂全厂的交流稳压设备。

它的输出电压波形几乎毫无失真，稳压精度可以随意调节，所以稳压性能是理想的。

但是，它的体积庞大，价格贵，设备自身的功率损耗较大。除了感应调压器外，还需配备专门的伺服电动机（单相或三相）以及一整套控制电路（由晶体管、继电器、接触器组成）。因此，在中、小功率场合，一般还是采用前述几种稳压方案为宜。

（五）带伺服电机的自耦变压器式交流稳压器

这类交流稳压器是依靠伺服电动机及一套机械传动装置来驱动自耦变压器的电刷，从而使输出电压维持稳定。

这类交流稳压器的稳压精度也可以随意调节，输出波形也无失真。在我国五、六十年代的一些产品中，常常可以看到这类交流稳压器（如在铁路信号专用的BSX-2型大站电源屏中）。

但是，这类交流稳压器在电压调整的过程中，自耦变压器的电刷上经常会发生打火现象，而且在频繁的调压过程中，炭质电刷极易磨损，加之整套机械传动装置十分笨重，因而在最近几年中，这类交流稳压器渐趋淘汰。

根据以上所述，五种交流稳压器各有利弊，目前我国，1千伏安以下的较多采用带磁放大器的交流稳压器；1~5千伏安较多采用磁饱和式交流稳压器；5千伏安以上，则采用感应调压器式交流稳压器。必须指出，稳压变压器是近十余年来的一项新的技术成果，虽说目前还只是在200伏安以下的小功率场合开始获得采用，但是可以预期，它的发展前途是十分广阔的。

目 录

绪 论	1
第一章 铁磁谐振式交流稳压器	1
第一节 铁磁谐振现象	1
第二节 铁磁谐振式交流稳压器的基本原理	7
第三节 磁饱和稳压器	12
第四节 稳压变压器	19
第二章 带有磁放大器的交流稳压器	49
第一节 磁放大器的工作原理	51
第二节 控制电路的工作原理	64
第三节 实用电路举例	75
第三章 可控硅交流稳压器	84
第一节 可控硅元件简介	85
第二节 可控硅交流调压器的工作原理	95
第三节 可控硅交流稳压器的实用电路举例	111
第四章 感应调压式交流稳压器	118
第一节 三相旋转磁场	120
第二节 感应调压器的工作原理	127
第三节 驱动电动机的工作原理及其正、 逆转控制电路	140
第四节 自动稳压器的控制电路	148
第五节 感应调压式交流稳压器实用电路 举例	162
第五章 自耦变压器式交流稳压器	166

第一节	自耦变压式调压器	167
第二节	控制电路与驱动电路	170
第三节	自耦变压器式交流稳压器实用电路 举例	175
第六章	交流稳压器的选择	180
第一节	类型的选择	180
第二节	额定容量的选择	180

第一章 铁磁谐振式交流稳压器

无论是目前普遍采用的磁饱和稳压器，还是最近几年才开始采用的稳压变压器，它们的工作原理都是基于铁磁谐振现象。因此，我们首先讨论一下铁磁谐振现象，然后再详细讨论这两种交流稳压器。

第一节 铁磁谐振现象

在线性电路中，线性电感和线性电容的串联或者并联，如图 1—1 (a) 与 (b) 所示，在一定的频率下能使电路出现谐振。在线性电感和线性电容相串联的电路中所产生的谐振称为串联谐振；在线性电感与线性电容相并联的电路中所产生的谐振称为并联谐振。不论是何种谐振，都可以用以下三种方式来进行调谐：

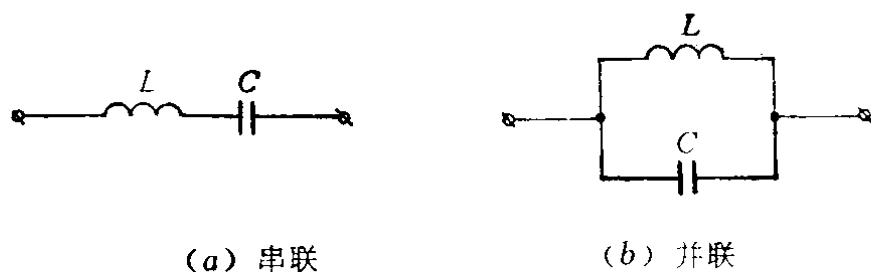


图 1—1 线性电感与线性电容的串联与并联

固定 L 和 C ，调节电源的频率 f ，使

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

则图 1—1 所示电路达到谐振。

固定 f 和 L ，调节电容器的电容值，使

$$C = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L}$$

也能使图 1—1 所示电路达到谐振。

固定 f 及 C ，调节线性电感 L ，使

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C}$$

同样也能使图 1—1 所示电路达到谐振。

在线性电路中，线性电感 L 的改变只能通过改变线圈的圈数或铁心的位置来实现，在绕组的圈数与铁心位置固定的条件下，改变 L 两端的电压并不会使 L 值发生变化。然而，如果线圈的铁心工作于磁化曲线的饱和区附近，那末， L 两端的电压有效值的改变将会引起 L 值的改变，这种电感称为非线性电感。显然，由非线性电感与线性电容器所组成的串联或并联电路，可以通过改变外加电压的有效值而使电路达到谐振，通常把这一种谐振称之为铁磁谐振。

严格地说，在含有非线性电感的电路中，由于电压（或电流）的波形将会产生畸变，因此用分析正弦交流电路的符号法与相量图来进行讨论就难以得到精确的结果。然而，精确的分析却又十分困难。为了能使讨论得以简化，我们仍然沿用大家熟知的相量图，虽说结果是粗略的，但却仍能反映出电路的特性。

图 1—2 表示非线性电感与线性电容器的串联电路。暂时先撇开铁心的铁损与绕组的铜损（即设线圈的等值电阻 $r = 0$ ），在外加正弦电压的条件下，电路中各部分电压、电流关系可以用相量图来表示（图 1—3）。显然，外加电压为线圈电压 $\dot{V}_L$ 与电容器电压 $\dot{V}_C$ 的相量和，就有效值来说，

$$V = |\dot{V}_L - \dot{V}_C|$$

铁心线圈中电压有效值与电流有效值之间的函数关系

(称为伏安特性) 与铁心材料的磁化曲线形状相似, 如图 1—4 中的 $V_L(I)$ 曲线; 对于线性电容器来说, 由于

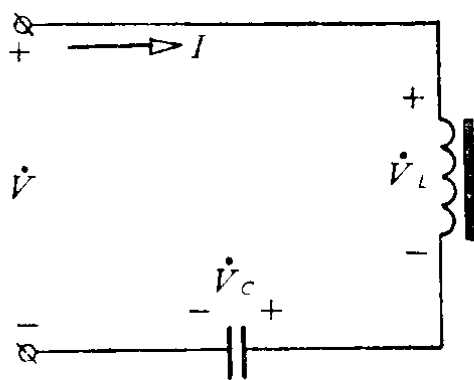


图 1—2 非线性电感与线性电容的串联电路

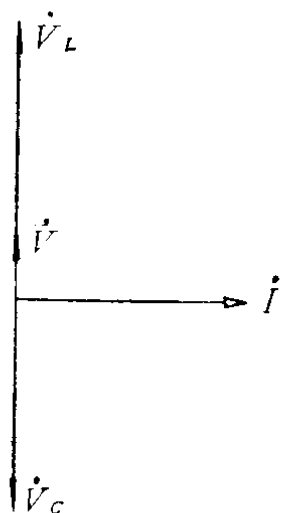


图 1—3 相量图

$$V_c = \frac{1}{\omega C} \times I$$

因此, 它的伏安特性应为一斜率是 $\frac{1}{\omega C}$ 的直线, 如图 1—4 中的 $V_c(I)$ 曲线。在应用图解法求外施电压 V 时, 应把 $V_L(I)$ 与 $V_c(I)$ 在同一横坐标下的纵坐标相减, 这样就得到了图 1—4 中的 $V(I)$ 曲线。由于有效值不能为负值, 因此无论是 $V_L > V_c$, 还是 $V_c > V_L$, $V(I)$ 曲线总是在横轴的上方。只要电容器 C 的大小适宜, $V_L(I)$ 与 $V_c(I)$ 总会有一个交点, 在这个交点 N 处,

$$V_L = V_c \quad \text{及} \quad I = I_0$$

此时电路呈谐振状态, 称之为**串联铁磁谐振**。

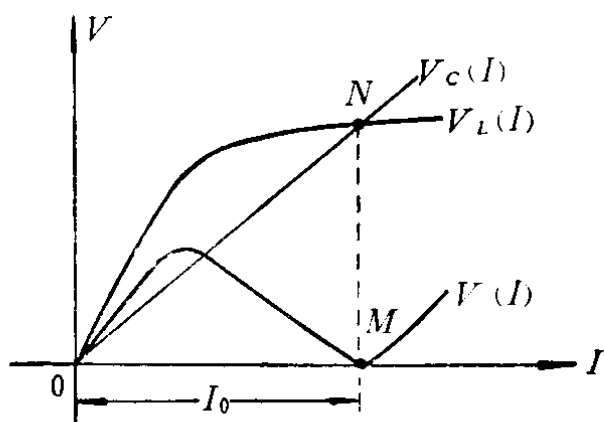


图 1—4 非线性电感与线性电容器相串联时的伏安特性

由于实际电路总是存在有功功率损失，即 $r \neq 0$ ，因此，整个电路的伏安特性 $V(I)$ 要比图 1—4 中的 $V(I)$ 曲线抬高一些，如图 1—5 所示。下面，我们就用此曲线（有时称为 N 形曲线）来分析一下：当外加电压变化时，电路中电流的变化情况。

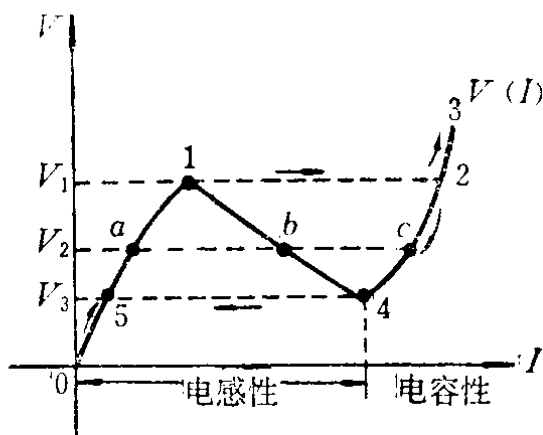


图 1—5 在 $r \neq 0$ 时的伏安特性

当外加电压的有效值由零开始增加时，工作点沿着 $05a1$ 曲线上升，待外加电压有效值超过 V_1 时，工作点由 1 骤然跳至 2，如图中虚线 1—2 所示，此时，电流的有效值发生了骤然的增加，* 同时，电流的相位也从滞后于外加电压而变为超前于外加电压（即电路从感性变为容性）。此后，若再增加电压，则工作点沿着曲线 2—3 继续移动。当外加电压的有效值从一较高的数值 ($>V_1$) 下降时，工作点沿曲线 32c4 移动，这时，外加电压有效值虽然经过 V_1 ，但工作点并不由 2 跳到 1。然而，当外加电压降至 V_3 时，工作点则由 4 骤然跳到 5，如图中虚线 4~5 所示。这时，电流的有效值骤然减少（线圈的铁心脱离了饱和区），它的相位也由电流超前于外加电压而改变为电流滞后于外加电压。

只需在图 1—2 所示电路中串接一交流电流表，外加电压通过单相调压变压器加到电路上，则能改变电路的输入电压，可得到图 1—5 所示的特性，也可以观察到电流跳变现象。

当外加电压的有效值为 V_2 时，工作点究竟是 a 、 b 、 c

* 从图 1—5 可见，在发生了电流骤变之后，线圈的铁心变为深度饱和。

中的哪一点呢？由上述讨论可知， b 点不可能是电路的工作点，即在电压源供电条件下，1~4 段曲线是得不到的。若外加电压的有效值在 $0 \sim V_1$ 范围内变动，则当 $V = V_2$ 时的工作点在 a 点；若外加电压的有效值曾超过 V_1 （即电路发生过电流跳变），然后再在 $V_3 \sim V_1$ 范围内变动，则当 $V = V_2$ 时的工作点在 c 点。显然， $I_c > I_a$ 。

在串联铁磁谐振电路中，图 1—5 上的 V_3 值是取决于电路中的功率损耗，所以通常是一个定值。而 V_1 值的大小则可通过改变电容器的电容值 C 来进行调节。若增加 C 值，由于电容器的容抗 $(X_c = \frac{1}{\omega C})$ 随之而减小，所以图 1—4 中的 $V_c(I)$ 曲线的斜率也将随之而减小，从而使谐振点右移，如图 1—6 (a)。同时， $V(I)$ 曲线将有所抬高，即 V_1 将增大，如图 1—6 (b) 所示。反之，若 C 值减小， $V_c(I)$ 的斜率随之增大，谐振点左移， $V(I)$ 曲线压低，即 V_1 将减小。

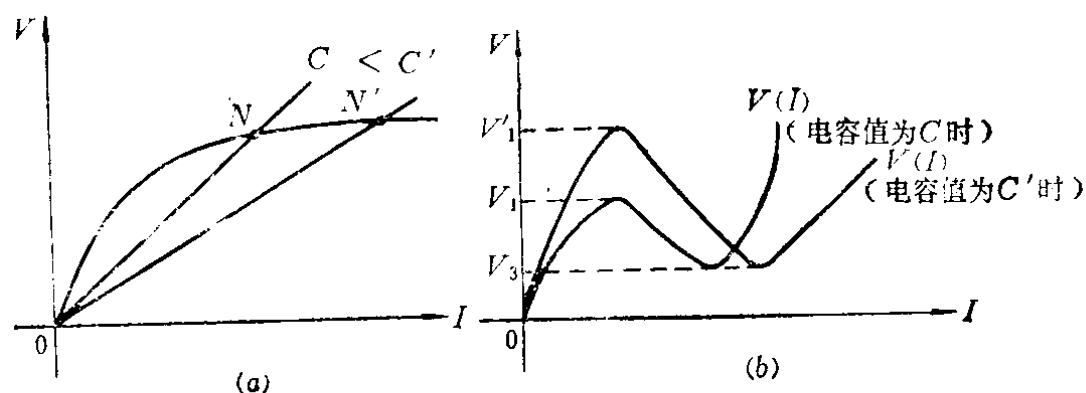


图 1—6 在不同 C 值条件下的伏安特性

以上讨论的是非线性电感 L 与线性电容 C 相串联的情况，下面用同样的方法来讨论由非线性电感 L 与线性电容 C 并联组成的铁磁电流谐振电路（图 1—7）。

与图 1—7 相对应的电流相量图如图 1—8 所示。非线