



高等学校教材

电路基础

(下册)

许道展 王铁奎 程桂敏编著 俞大光主审



中国计量出版社

高等学校教材

电 路 基 础

(下 册)

许道展 王铁奎 程桂敏 编著

俞大光 主审

中国计量出版社

内 容 提 要

本书是根据1980年教育部电工教材编审委员会审订的高等工业学校《电路教学大纲(草案)》和1987年国家教委颁布的《〈电路〉课程的教学基本要求》编写的电类专业教材。全书体现了电路原理的新体系,在保证系统性的前提下,重视选材新颖、精练、立论正确、推理严谨,突出基本内容的讲授。根据国家教委的要求,本书全面贯彻了量和单位以及电工图形符号的新的国家标准。

全书共十九章,分上下两册出版。上册为前十章,即电路基本概念,线性电路的一般分析法,电路定理及等效变换分析法,具有受控电源电路的分析,电路的矩阵分析法,简单非线性电阻电路的分析,电容元件和电感元件,线性电路暂态的分析基础,一阶电路的时域分析,二阶电路的时域分析。下册有九章,即正弦电流电路的基本概念,正弦电流电路的相量分析法,正弦电流电路中的功率,谐振电路,互感电路,三相电路,非正弦周期电流电路和信号的频谱,电路的复频域分析,二端口网络。每章起始有提要,章末有小结和习题,每节末有练习题,书末附有习题答案。

本书除可作高等工业学校教材外,还可供高等工业专科学校作参考教材,或供工程技术人员参考。

2031/25

高等学校教材 电 路 基 础 (下 册)

许道展 王铁全 程桂敏 编著

俞大光 主审

责任编辑 刘宝兰

—

中国计量出版社出版

北京和平里西街2号

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

—

开本 850×1168/32 印张 18.875 字数 497 千字

1991年5月第1版 1991年5月第1次印刷

印数 1—4000

ISBN 7-5026-0406-5/TB·328

定价 8.00 元

序 言

量和单位的国家标准 GB 3100、GB 3101 和 GB 3102.1~13 共十五个，早已于 1982 年发布，后又于 1986 年第二次发布（其基本内容相同）。国务院 1984 年 2 月 27 日向全国正式发布了《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》和《中华人民共和国法定计量单位》，在国务院批准的《全面推行我国法定计量单位的意见》中明确规定：从 1986 年 1 月 1 日起科技书籍和新编教材要全面采用法定计量单位。上列十五个国家标准就是贯彻法定计量单位的更具体的规定。它们都属于基础标准，应属于强制性标准。按照今年 4 月起已施行的《中华人民共和国标准化法》，它们是必须执行的。

教材中首先贯彻这些国家标准非常必要，因为这将促使教学中国家标准的贯彻，也使得受课学生在开始接触到一些新的物理量时就习惯于运用合乎国家标准的名称、符号和它的单位以及单位符号，这比先接触一些杂乱的名称符号到以后再要求去改要容易得多。而很多教师正是由于过去习惯已深，尽管也愿意贯彻新订国标，但困难相对说来要大一些。目前国内新出版的《电路》课程教材和教学参考书中还没有看到完全遵循这些新订国标的书籍，其中可能有这一因素的作用。万事开头难，如果能有些先导者作出范例，就能帮助教师克服这一困难。

北京工业大学许道展、程桂敏、王铁奎三位老师编的这套教材《电路基础》上、下册正是从这一考虑出发的。这套教材比较全面地认真贯彻了 GB 3100、GB 3101、GB 3102.1~13 等国标和 1985 年制定的国标 GB 4728.2《电气图用图形符号》，这说明在高等院校工科电类的这一主干技术基础课《电路》的教学中是能够贯彻这些新订国标的。当然，由于要区分量的方程和数

值方程,初看起来可能带来一些繁琐,但只要习以为常后就可以体会到这样做较严谨,有好处。对量的方程可以通过量纲检查出某些疏漏;而对数值方程中的符号是代表以什么单位计量而得的数值则是一目了然的。另外,表示物理量的斜体字母和表示单位的正体字母有时不易区分(特别是手写时),当它们夹杂在一个式子里时也就容易使读者眼花缭乱,分辨不清。本书第十八章中这个矛盾比较突出,遇到这种情况编者都采取了适当措施,既不违背原则又适当避免混淆。当然,这对排印、校对也提出了较高的要求。

本书在内容上满足国家教委1987年颁布的《电路》课程的教学基本要求,内容覆盖1980年6月审定的高等工业学校四年制电类各专业适用的《电路》教学大纲中的重点及一般内容,只是不包括分布参数电路,非线性电路要求也较低。对该大纲中的加深加宽内容亦适量编入。因此,用这套教材在高校工科四年制电类专业进行教学是能够满足要求的。本人愿意推荐给我国广大工科院校采用。

本书除贯彻我国法定计量单位、量和单位以及图形符号等国家标准为出发点外,还有特别重视基本内容讲授的特点,例如对电感、电容元件单独设章讲述它们的电压电流关系、能量关系和串并联时的等效参数;又如时域分析共用了三章约9万字的篇幅,其中最重要的一阶电路占用了此篇幅的一半;电阻电路分析亦分为两章,用了7万字的篇幅,这些内容大部分是属于“基本要求”范围内的。另外,对某些问题的讲解上也有独特之处,例如电路模型按近似程度分级;对网络独立 KC' 、 KVL 方程数的论述,推荐节点支路编号法;对空芯、铁芯和理想变压器,归在互感电路一章中,以便讲清它们之间的联系等。本书还附有大量的例题、练习题和习题,也将给教学提供方便。

期望着本书的出版将使《电路》课程教学中贯彻法定计量单位、量和单位等国家标准的步伐明显加快。教学实践中还必然会发现并提出一些国标规定中的缺陷,可为今后国标的再修订提供基础。

俞大光 1989年4月

前 言

1982年我国公布了量和单位的15个国家标准。1984年国务院公布了法定计量单位。1985年制定的国家标准GB4728,对电工图形符号作了新规定。此外还有不少有关国家标准正在制定和修改中。贯彻法定计量单位和国家标准是教材、教学中一项刻不容缓的任务。本书力图在电路课程教学中示范和探讨做好这一工作。

本书根据教育部电工教材编审委员会于1980年6月审订的高等工业学校四年制电类(不包括无线电技术类)各专业试用的《电路教学大纲(草案)》编写。同时考虑了国家教委1987年颁布的《〈电路〉课程的教学基本要求》。《大纲》上规定的加深加宽内容,本书如有涉及,则均用星号(*)标出。书中重要公式均加方框,重要名词和一些重要结论则用黑体字编排。同时本书每章起始有提要,每章之末有小结和习题,每节之末有练习题,书末附有习题答案。

本书下册由许道展、王铁奎主编,第十一章至第十三章由王铁奎编写,第十四章和第十七章由程桂敏编写,第十五、十六两章以及第十八、十九两章由许道展编写。北京联合大学北京机械工程学院电气工程系郭利亚同志为第十五、十六、十八和十九章提供了习题答案。

全书由国家教委电工课程教学指导委员会委员俞大光教授主审,并经国家教委电工课程教学指导委员会委员李翰荪教授、钟佐华教授及全国量和单位标准化技术委员会委员第二分委员会主任委员袁楠教授审阅。参加审阅的还有沈世锐同志(北京理工大学),罗中仙同志(北京航空航天大学),李望超同志(河北工

学院)，过静娴同志（西安交通大学）和农植伟同志（高等教育出版社）。他们都对本书提供了许多宝贵的意见和建议。特别是俞大光教授认真、细致的审阅和袁楠教授在贯彻法定计量单位和国家标准方面的悉心指导，更确保了本书的质量。为此我们对参加审稿的各位专家教授致以衷心的感谢！

限于编者水平，错误与不当之处一定不少，敬希各界不吝指教！对制定、修改和贯彻有关国家标准方面的意见和建议，我们则将汇总上报有关单位。来函请寄北京工业大学自动化系（邮政编码：100022）。

编者

1990年元月

于北京工业大学

目 录

第十一章 正弦电流电路的基本概念	(1)
11-1 正弦量的基本概念	(2)
11-2 复指数函数的几个性质	(15)
11-3 利用复指数函数求网络的稳态响应	(19)
本章小结	(23)
习题十一	(24)
第十二章 正弦电流电路的相量分析法	(26)
12-1 组合约束的相量形式	(26)
12-2 复数阻抗和复数导纳	(34)
12-3 相量分析法	(50)
12-4 正弦电流电路的相量分析	(59)
本章小结	(71)
习题十二	(72)
第十三章 正弦电流电路中的功率	(79)
13-1 一端口网络中的功率	(79)
13-2 RLC 串联电路中的功率	(92)
13-3 功率因数的提高	(102)
*13-4 最大功率传输	(106)
本章小结	(109)
习题十三	(110)
第十四章 谐振电路	(114)
14-1 串联谐振电路	(114)
14-2 并联谐振电路	(130)
*14-3 串并联谐振电路	(140)
本章小结	(144)
习题十四	(145)

第十五章 互感电路	(151)
15-1 互感	(151)
15-2 互感线圈的磁场能量及耦合系数	(168)
15-3 具有互感电路的计算	(174)
15-4 变压器及其电路模型	(187)
15-5 空芯变压器	(204)
本章小结	(215)
习题十五	(216)
第十六章 三相电路	(224)
16-1 三相电路的连接方式	(224)
16-2 Y-Y 连接对称三相电路的计算	(233)
16-3 Δ - Δ 连接对称三相电路的计算	(242)
16-4 不对称三相电路的计算	(261)
16-5 三相电路功率的计算及测量	(268)
*16-6 三相制电力系统的优点	(283)
16-7 三相电压相序的测定	(287)
本章小结	(296)
习题十六	(298)
第十七章 非正弦周期电流电路和信号的频谱	(303)
17-1 非正弦周期波概述	(303)
17-2 周期函数分解为傅里叶级数	(308)
17-3 非正弦周期信号的频谱	(326)
*17-4 傅里叶变换与连续频谱的概念	(341)
17-5 非正弦周期电流电路中的有效值和平均值	(346)
17-6 非正弦周期电流电路中的功率	(351)
17-7 非正弦周期电流电路的计算	(357)
*17-8 对称三相电路中的谐波	(370)
本章小结	(378)
习题十七	(380)
第十八章 电路的复频域分析	(388)
18-1 拉普拉斯变换的定义	(388)
18-2 拉普拉斯变换的基本性质	(391)
18-3 用部分分式法进行拉普拉斯反变换	(405)

18-4	复频域电路	(419)
18-5	用拉普拉斯变换法分析电路的暂态	(438)
18-6	网络函数	(459)
	本章小结	(479)
	习题十八	(481)
第十九章	二端口网络	(493)
19-1	二端口网络概述	(493)
19-2	二端口网络的 Z 参数和 Y 参数	(495)
19-3	二端口网络的 H 参数和 G 参数	(506)
19-4	二端口网络的 T 参数和 T' 参数	(513)
19-5	二端口网络各种参数间的关系	(521)
19-6	二端口网络的互联	(524)
*19-7	二端口网络的有效和失效连接	(540)
19-8	具有终端阻抗的二端口网络	(549)
*19-9	回转器和负阻抗变换器	(556)
	本章小结	(561)
	习题十九	(563)
	各章习题答案	(572)

第十一章 正弦电流电路的基本概念

〔提 要〕本章介绍正弦量的三要素，正弦量的有效值及正弦量的相量表示法。

本章还将介绍复指数函数的几个性质及利用复指数函数直接求解线性非时变网络在正弦电源激励下稳态响应的方法。

本书上册讨论的内容，大致可以分为两部分：一部分（第一章至第五章）是线性非时变电阻电路的分析，另一部分（第八章至第十章）是线性非时变电路（包含 R 、 L 、 C 等元件）暂态的分析。从本章开始至第十六章为止，将研究正弦电源激励下线性非时变电路响应中稳态分量的计算问题。通过本章的学习可以看出，若线性非时变电路中的所有激励均为同一频率的正弦函数，则电路中响应的稳态分量也将是与激励同频率的正弦函数。由于这时电路中所有的电流、电压、电动势等均为同一频率的正弦量，故称这种电路为**正弦电流电路**，工程上则泛称为交流电路。

第九章中曾计算过正弦电源激励下（线性非时变）一阶电路的完全响应，其中当然也包括计算其稳态分量。那时就曾指出，相量分析法将简化后者的计算。在本章及第十二章中，将系统地介绍这种分析方法。通过随后几章的学习不难看出，相量法（由斯坦因美兹在 1893 年提出）确实是分析正弦电流电路最简便的方法。这也正是相量分析法获得如此广泛应用的原因！

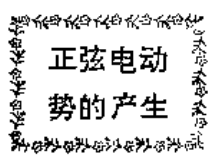
正弦电流电路在引用了相量法以后，便与电阻电路的分析在形式上类同。因此，电阻电路的所有分析方法对正弦电流电路来说均能适用。

借助于傅里叶级数，还可以把非正弦周期函数分解成为一系列不同频率正弦函数之和。因此，熟悉了正弦电流电路的分析方

法，也就为分析非正弦周期电流电路打下了必要的基础。

11-1 正弦量的基本概念

交流电压、交流电流的应用十分广泛。例如城乡居民的电力供应，就是以正弦电压、正弦电流的形式来实现的。无线电广播和电视技术中应用的载波，也都是正弦电压和电流。

 电路中的正弦电流是由正弦电动势驱动的。在电力工程中，后者一般又是由交流发电机产生的。图 11-1-1 为交流发电机的横剖面示意图。图中，能绕 O 轴旋转的圆柱体称为转子，而外面固定不动的部分则称为定子。转子和定子之间留有气隙。定子内侧圆周上开槽，槽中嵌有线圈。转子就是一对磁极。设计制造时，应使其磁通密度 B 在定子圆周表面上按正弦规律分布，如图所示。由图可知，当转子位于图示位置时，转子磁场的 S、N 极分别正对着矩形线圈的左、右边，从而使这两边处于最大磁通密度 B_m 的作用下。当转子转过任意一个角度后，虽然作用于线圈两边磁通密度的量值有了变化，但由于转子磁场的对称性，作用于这两边磁通密度的量值总是相等的。

当转子顺时针方向绕 O 轴匀速旋转时，其磁通密度线将由下而上（和由上而下）地扫过矩形线圈的左边（和右边）。设矩形线圈宽为 D ，转子旋转角速度为 ω ，则任一时刻磁通密度线扫过线圈左右两边的线速度均为 $v = \omega D/2$ 。令矩形线圈左右两边的有效长度均为 l ，再计及磁通密度、线圈左右边长、磁通密度线扫过线圈的线速度三者相互垂直，故任一时刻线圈左右两边感应电动势的量值均为

$$E_1(t) = B(t)lv = B(t)Dl\omega/2 \quad (11-1-1)$$

式中 $B(t)$ 为 t 时刻扫过线圈左右两边磁通密度的量值。当转子位于图示位置时，由于这时作用于线圈左右两边的都是最大磁通密度 B_m ，故线圈左右两边的感应电动势这时也最大，其量值为

$$E_{m1} = B_m Dl\omega/2 \quad (11-1-2)$$

如果以图示转子位置作为其初始位置，则在 t 时刻它转过的角度可表示为 $\beta = -\omega t$ 。这一时刻，作用于线圈左右两边磁通密度的值 $B(t)$ 为

$$B(t) = B_m \cos \beta = B_m \cos \omega t \quad (11-1-3)$$

将其代入式 (11-1-1)，可知这时线圈左右两边的感应电动势，其量值均可表示为

$$E_1(t) = \frac{B_m D l \omega}{2} \cos \omega t = E_{m1} \cos \omega t \quad (11-1-4)$$

应用右手三指法则不难确定，当转子位于图示位置时，矩形线圈左边感应电动势的实际方向向外、而右边向里，如图所示。由于矩形线圈左右两边是通过位于线圈远端的端部连接起来的，故不论转子旋转到什么位置，线圈左右两边的感应电动势都是相加的。如果以图示线圈中感应电动势的方向作为其参考方向，则这一匝线圈（包括左右两边和不产生感应电动势的远端及近端两个端部）合成电动势的表达式为

$$E(t) = 2 E_1(t) = E_m \cos \omega t = E_m \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (11-1-5)$$

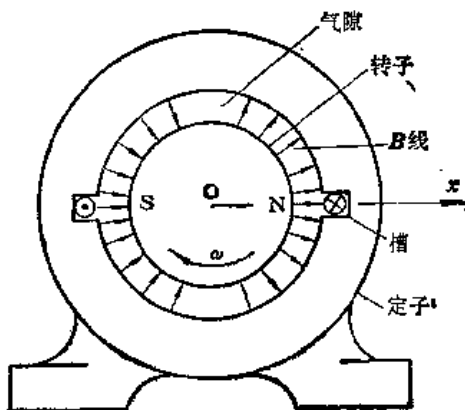
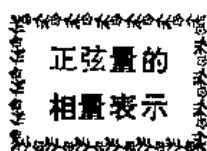


图 11-1-1

式中 $E_m = B_m D l \omega$ 为一匝线圈感应电动势的最大值。由此可见，线圈中的感应电动势 $E(t)$ 是时间 t 的正弦函数，称为正弦电动势。

为了提高利用率，实际上沿交流发电机定子内侧整个圆周都开了槽。每个槽中都嵌有线圈。每个线圈也不只一匝。这些线圈相互连接后的合成电动势，才是整个发电机的电动势。

通过上述分析还可看出：转子旋转一周，线圈内感应电动势的变动也完成一个循环。故若转子每秒钟旋转 n 周，则感应电动势的频率 f 即为 n 。



正弦量的 相量表示

凡是按正弦规律变动的电动势、电压、电流等，都称为正弦量。正弦量既可以用数学表达式来表示，也可以用波形图来表示。此外，还可以用旋转相量取实部或取虚部的办法来表示。

例如，某一正弦电压，其数学表达式为

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (11-1-6)$$

其波形图如图 11-1-2 (b) 所示。 U_m 是正弦量的幅值，即振幅； $(\omega t + \varphi_0)$ 是正弦量的辐角，简称相位。 φ_0 是 $t = 0$ 时的相位，称为初相位^①； ω 是正弦量的角频率，单位是弧度每秒 (rad/s)，它和正弦量的周期 T 及频率 f 的关系是（由于 T 是重复一个循环所需的时间）

$$\omega = 2\pi/T = 2\pi f \quad (11-1-7)$$

频率 f 是一个导出量，它的 SI 单位（应为 s^{-1} ）被给予了专门名称——赫[兹]，其符号为 Hz。

我国电力工业的频率（简称工频）为 50 Hz。苏联及欧洲各国的工频也是 50 Hz，而美国为 60 Hz。日本则同时存在 50 Hz 和 60 Hz 的电力系统。飞机上常采用 400 Hz 供电系统。无线电调幅 (AM) 广播所用的频率在 540~1 600 kHz 之间，而调频 (FM) 广播所用的频率则在 88~108 MHz 之间。电视机的 1~12 频道

① 初相位也用 α 表示。

接收范围位于甚高频 (VHF) 段 $30\sim 300\text{ MHz}$ 内, 而其 $13\sim 57$ 频道接收范围则位于超高频 (UHF) 段 $0.3\sim 3\text{ GHz}$ 内。

由式 (11-1-6) 可见, φ_0 和 ωt 都是正弦量相位的组成部分, 按理说它们应当采用相同的单位。但人们常以度 ($^\circ$) 作为 φ_0 的单位 (ωt 的单位则为弧度)。由于这样表示存在方便之处,

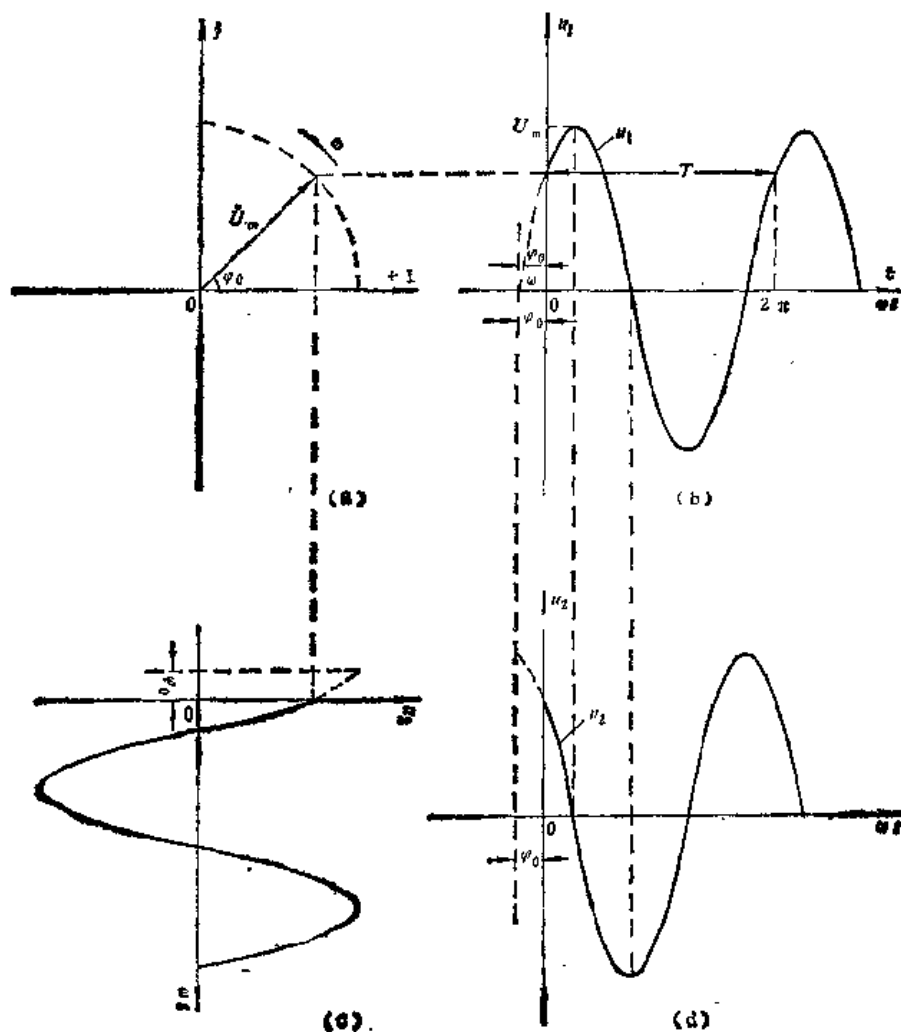


图 11-1-2

所以今后本书也将采用这种表示法。但应注意，如要将此两项的量值相加，则须先将它们的单位统一之后才能进行。例如， $\pi/2$ rad 与 45° 相加的结果，或为 $(3\pi/4)$ rad 或为 135° 。

任一正弦量，当其幅值、角频率（或频率）及初相位确定后，该正弦量就完全确定了。所以，幅值、初相位及角频率（或频率）称为正弦量的三要素。

在复数平面上定义一个相量^① $\dot{U}_m$ ，该相量的模等于正弦电压的幅值 U_m ，辐角等于正弦电压的初相位 φ_0 ，如图 11-1-2 (a) 所示。再设想该相量在复数平面上以原点 O 为圆心，以正弦量的角频率 ω 为角速度逆时针方向旋转。那么，它在复平面虚轴上的投影随时间 t 的变化规律就是正弦电压 $u_1(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi_0)$ 。对应于正弦量的相量 $\dot{U}_m$ 称为幅值相量；而以角速度 ω 旋转的幅值相量则称为旋转相量，其表示符号为 $\dot{u}$ ^②。旋转相量可以用复指数函数表示如下。

$$\begin{aligned}\dot{u} &= U_m e^{j(\omega t + \varphi_0)} \\ &= U_m e^{j\varphi_0} e^{j\omega t} \\ &= \dot{U}_m e^{j\omega t}\end{aligned}\quad (11-1-8)$$

显然，上式中 $\dot{U}_m = U_m e^{j\varphi_0}$ 就是幅值相量，而 $e^{j\omega t}$ 则称为旋转因子。这样，旋转相量与幅值相量和旋转因子的关系可表示为

$$\text{旋转相量} = \text{幅值相量} \times \text{旋转因子}$$

旋转因子 $e^{j\omega t}$ 是一个特殊的复数：其模恒等于 1，其辐角 ωt 是一个正比于时间 t 的变量。当 $\omega t = 0, \pi/2, \pi$ 和 $3\pi/2$ 弧度时， $e^{j\omega t}$ 分别等于 1、 j 、 -1 和 $-j$ 。当 $\omega t = 2\pi$ 弧度时， $e^{j\omega t}$ 又与实轴重合而等于 1。 t 继续增大，该复数又重复上面的循

①应注意“相量”（phasor）与“向量”不可混淆。前者是用以表示随时间作正弦规律变化的量的复数，这个量可以是标量也可以是矢量，后者则是矢量（vector）的同义记，是具有空间（二维、三维或多维）方向的量。

②请勿与第十章中状态变量 u 的一阶导数 $\dot{u} = \frac{du}{dt}$ 相混淆。

环。即当用平面矢量 A 表示这个复数，如图 11-1-3 所示时，则矢量 A 将以角速度 ω 逆时针方向不停地围绕坐标原点旋转。因此，称复数 $e^{j\omega t}$ 为旋转因子。图 11-1-3 所示复数平面则简称为复平面。

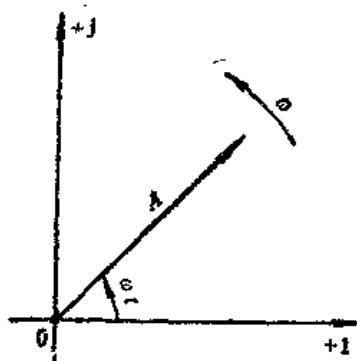


图 11-1-3

再研究一下虚数单位 $j = e^{j90^\circ}$ 的作用。用 j 乘 1 (虚部为零的复数)，就得到 j ，而在复平面上，将实数单位 1 逆时针方向转动 90° 就得到虚数单位 j 。由此可知，当用 j 乘某一复数，就等于将表示该复数的矢量在复平面上逆时针方向转动 90° 。所以，虚数单位 j 也可以看作一个旋转因子。它和 $e^{j\omega t}$ 的区别在于，用 $e^{j\omega t}$ 乘复数，则该复数将逆时针方向不停地绕原点旋转；而用 j 乘复数，则它只是逆时针方向转动一个 90° 而已。即 $e^{j\omega t}$ 对复数的作用是连续的、正比于 t 的，而 j 对复数的作用则是步进的、一次性的。不难推出，用 $j^2 (= -1)$ 或 $j^3 (= -j)$ 乘复数，就等于将表示该复数的矢量在复平面上逆时针方向转动 180° 或顺时针方向转动 90° 。

根据欧拉公式，复指数函数可以用三角函数表示为

$$\begin{aligned} U_m e^{j(\omega t + \varphi_0)} &= U_m \cos(\omega t + \varphi_0) + j U_m \sin(\omega t + \varphi_0) \\ &= \operatorname{Re}[U_m e^{j(\omega t + \varphi_0)}] + j \operatorname{Im}[U_m e^{j(\omega t + \varphi_0)}] \\ &= \operatorname{Re}[i\dot{u}] + j \operatorname{Im}[i\dot{u}] \end{aligned} \quad (11-1-9)$$

由上式可以看出

$$\operatorname{Re}[i\dot{u}] = U_m \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (11-1-10)$$

$$\operatorname{Im}[i\dot{u}] = U_m \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (11-1-11)$$

符号 $\operatorname{Re}[\]$ 是“取实部”的意思， $\operatorname{Im}[\]$ 是“取虚部”的意思。

由于复平面上虚轴和实轴正交，二轴之间夹角为 90° ，故旋