

RC 校正网络与 SD 补偿装置*

邵荣士

(沈阳飞机公司设计部)

摘 要

本文基于机械阻抗的分类和电学发展的需要,提出电阻抗的分类:电流阻抗(导纳);电荷阻抗(导纳)。通过对 RC(Resistance-Capacitor)支路的电流、电荷阻抗和导纳函数以及 SD(Spring-Dashpot)支路的位移、速度阻抗和导纳函数八者之间矛盾性的研究,经信号流图拓扑,提出**易位、翻转、相似**及其组合的网络变换方法,建立了八条变换法则;给出了电压、电流、电荷以及力、位移、速度补偿校正网络构形变换及其传递函数代数置换关系;将 RC 与 SD 网络组成一个完整体系,并指出若干文献不妥之处。阻抗(导纳)函数的类比和三种变换、八条法则的提出,丰富了模拟理论,并对其它科技领域的网络分析也有参考价值。

一、引 言

用以校正伺服系统品质的具有不同频率特征的电压校正网络,首先由 Harold Chestnut 提出^[1],文献 [2, 3] 等引用了这些成果。本文提出的网络变换,寻到了这些网络之间的内在联系,给出了电流、电荷以及 II 型电压校正网络,并建立了电压、电流、电荷校正网络之间的相互转换关系。

五十年代中期以后,各种非电量校正装置相继出现^[4-6],其中机械补偿器在现代伺服机构中得到发展^[6-9]。机械地产生控制函数的方法首先由 J. E. Gibson 提出^[5],文献 [2, 10, 11] 以及新著 [12-15] 也都有论及。所有上述文献给出的机械补偿器只限于对位移信号的校正,本文提出的变换法则,给出了速度和力补偿装置,建立了诸类机械补偿器和电校正网络之间的转换关系,并指出文献 [2, 5, 8, 10, 11, 13] 等将速度和位移补偿装置混同的错误。文中只论及 RC 与 SD 直流无源校正网络,与电校正网络中的 R、C 相对应,构成机械补偿器的两个基本元素是弹簧 S 和阻尼器 D。在对机械网络进行变换研究时,假定它们都是理想化元件¹⁾。

* 此文于 77 年 11 月收到,并在中国自动化学会 78 年年会上宣读。

1) 力求精确而毫无遗漏地考虑机械部件的分布参数及其与系统运动状态的非线性关系,会使问题极端复杂甚至不可解。因此在建立机械网络的数学模型并进行网络变换的理论研究时,只应考虑决定性的因素。本文把质量小弹性大的弹簧简化为不计质量的理想弹性体,而把质量小阻尼力大的阻尼器简化为不计质量和弹性(认为油液不可压缩)的纯阻尼元件,这对于荷体质量较大的实际系统是足够准确的,因为弹簧自振频率可达数百周甚至千周,阻尼器的自振频率也在数百周之上,而机械系统中的操纵信号常在几周以下。

本文还假定系统参数与运动状态无关并视为常数,弹性力正比于位移,阻尼力正比于速度。这在小位移和小速度下是完全正确的,因为只有当激振频率很高而进入弹簧共振区时,(动)刚度才急剧下降;而粘性液体在常用压力下通过毛细孔或窄缝的流动肯定是层流,只有当雷勒数超过 600-1000 时,层流才遭破坏,阻尼力与速度平方成正比。

二、机、电阻抗和导纳函数的类比

求 RC 与 SD 补偿校正网络的传递函数的简便方法是复阻抗法,为了寻求并建立各种机、电补偿校正网络的内在联系及其转换关系,首先从它们各自的阻抗和导纳函数的研究入手。

机械阻抗是电阻抗概念在力学中的移置,是机械部件或系统动态频率特征的描述.机械阻抗被描述为“对着运动方向的阻力”,它是激振力与运动响应量的复数比.机械导纳为运动响应量与激振力之比.对于本文所研及的内容,只引用:

$$\text{位移阻抗}^{1)} \quad Z_x(p) = \frac{F(p)}{X(p)} \quad (1)$$

$$\text{位移导纳}^{2)} \quad Y_x(p) = \frac{X(p)}{F(p)} \quad (2)$$

$$\text{速度阻抗} \quad Z_v(p) = \frac{F(p)}{V(p)} \quad (3)$$

$$\text{速度导纳} \quad Y_v(p) = \frac{V(p)}{F(p)} \quad (4)$$

式中 F ——力, X ——位移, V ——速度, p ——拉普拉斯算子。

在振动、冲击、压力、应变以及机械阻抗等测试系统中,都采用成对的诸如钛酷醋铅等压电晶片作为敏感元件,它受机械力的作用在晶体表面产生电荷,对于这种高阻抗电荷信号的传递,通常采用电荷放大器^[16]. 本文基于机械阻抗的分类,提出将电阻抗分类为:

$$\text{电流阻抗} \quad Z_i(p) = \frac{E(p)}{I(p)} \quad (5)$$

$$\text{电流导纳} \quad Y_i(p) = \frac{I(p)}{E(p)} \quad (6)$$

$$\text{电荷阻抗} \quad Z_q(p) = \frac{E(p)}{Q(p)} \quad (7)$$

$$\text{电荷导纳} \quad Y_q(p) = \frac{Q(p)}{E(p)} \quad (8)$$

式中 E ——电压, I ——电流, Q ——电荷, p ——拉普拉斯算子。

由 R 和 C、S (刚度为 k) 和 D (粘性阻尼系数为 b) 简单组合所构成的支路诸类阻抗和导纳函数,经反复排比对偶列在表 1 中. 这里需要指出:

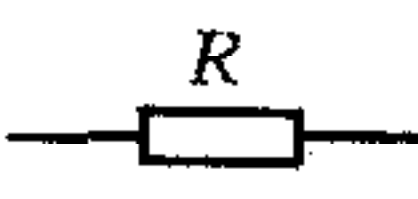
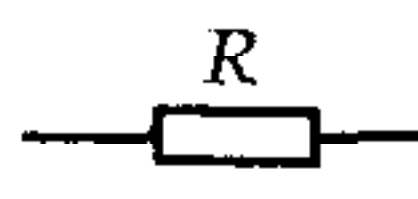
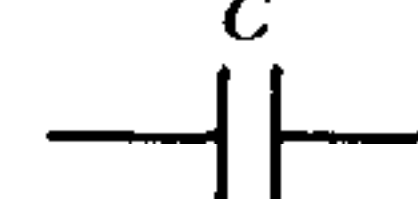
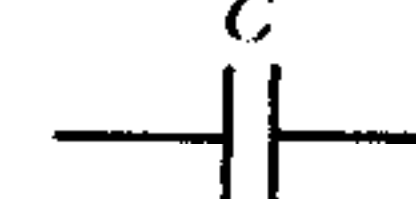

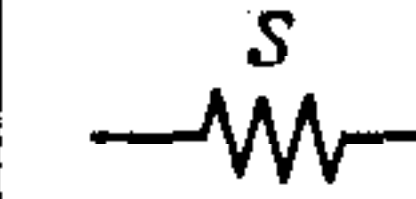
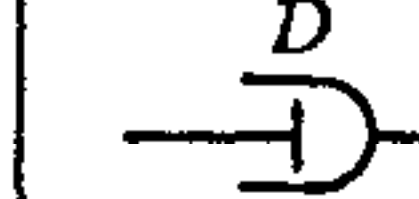
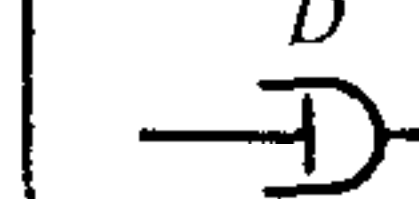

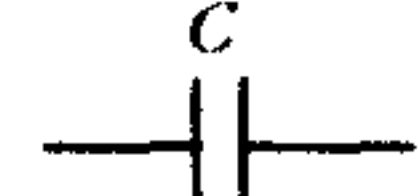
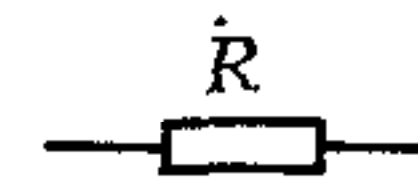
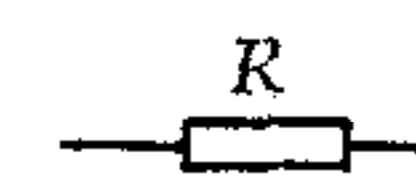
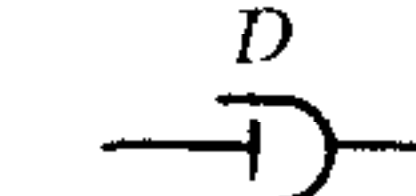
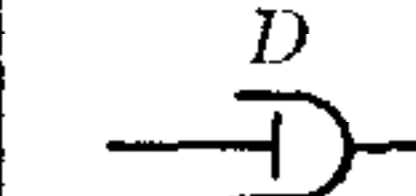

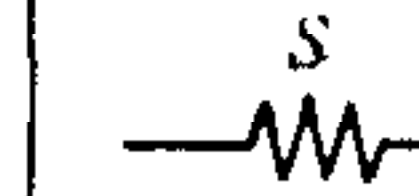
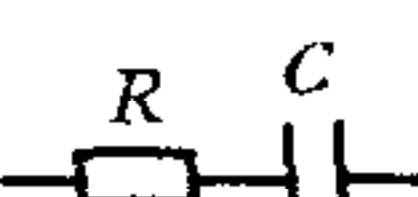
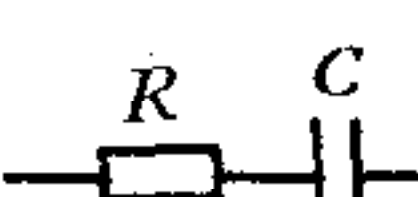
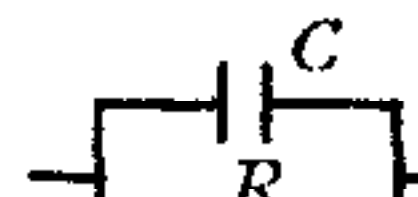
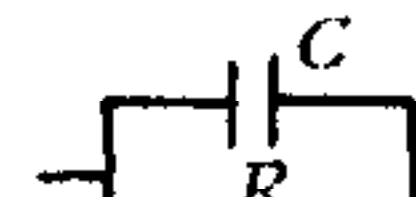


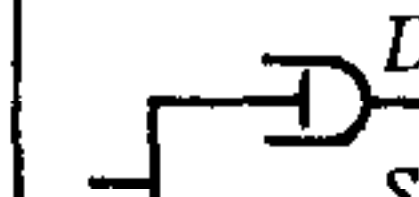
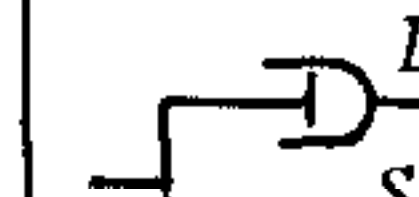
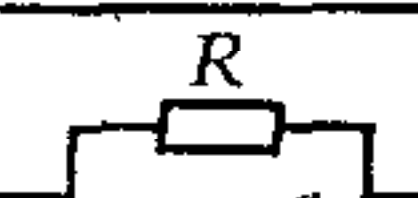
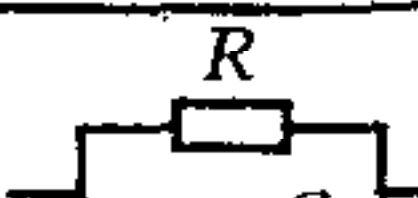




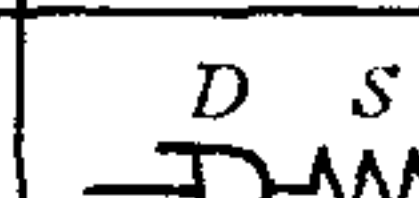
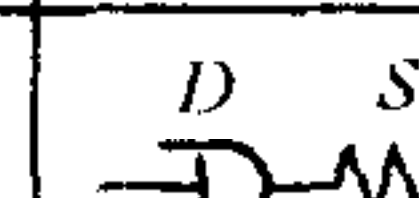
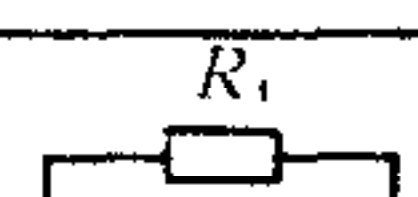
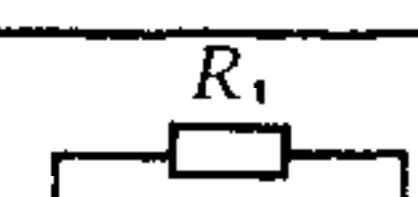
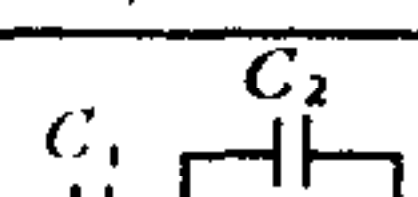
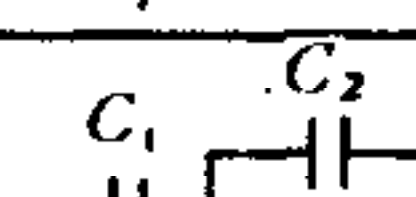


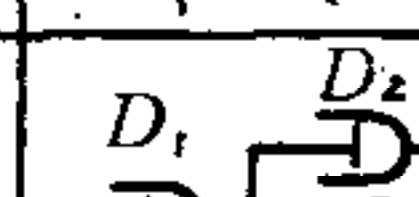
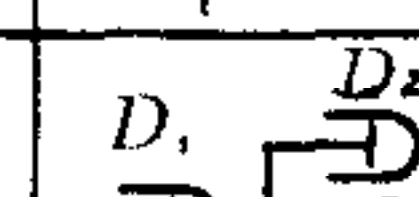
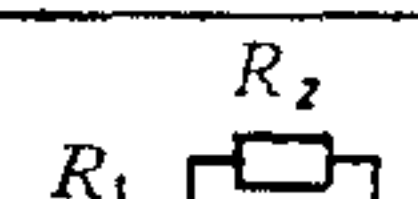
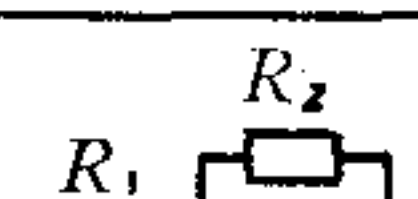
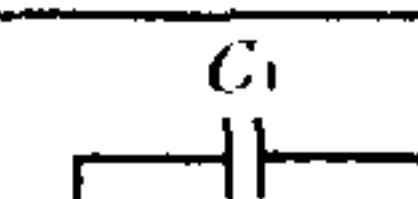
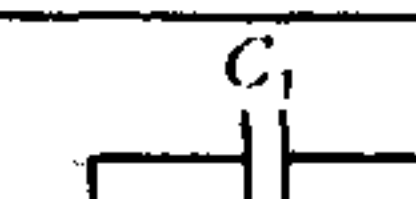
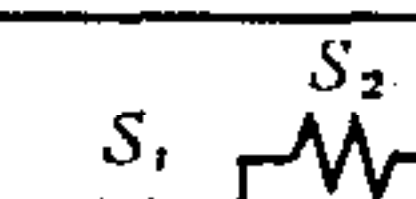
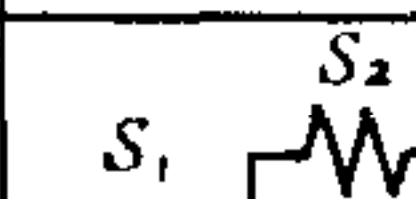

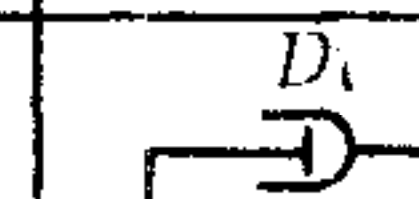
(1) 表 1 所列八类阻抗、导纳函数之间可能建立 28 种对偶类比关系(电-电、机-机的对偶各 6 种,机-电类比 16 种),这就大大超越了当今 L、R、C 与 M、D、S 三元素二种机电类比关系。

(2) 表 1 建立的是 RC-SD 支路诸类阻抗、导纳函数(含有算子 p 的复函数)的类比,这与机、电系统微分方程相似的数学模型同阶次对应项系数(描述被动元件特征的常数)

1) 位移阻抗也叫动刚度。

2) 位移导纳也叫动柔度。

表1 RC-SD支路阻抗、导纳函数对偶类比关系表

电 网 络				机 械 回 路			
①	③	⑤	⑦	④	②	⑧	⑥
电流阻抗	电流导纳	电荷阻抗	电荷导纳	位移阻抗	位移导纳	速度阻抗	速度导纳
电压源 E	电流源 I	电压源 E	电荷源 Q	力源 F	位移源 X	力源 F	速度源 V
电流 I	电压 E	电荷 Q	电压 E	位移 X	力 F	速度 V	力 F
$Z_i = \frac{E(p)}{I(p)}$	$Y_i = \frac{I(p)}{E(p)}$	$Z_q = \frac{E(p)}{Q(p)}$	$Y_q = \frac{Q(p)}{E(p)}$	$Z_x = \frac{F(p)}{X(p)}$	$Y_x = \frac{X(p)}{F(p)}$	$Z_v = \frac{F(p)}{V(p)}$	$Y_v = \frac{V(p)}{F(p)}$
 $Z_{iR} = R$	 $Y_{iR} = \frac{1}{R}$	 $Z_{qC} = \frac{1}{C}$	 $Y_{qC} = C$	 $Z_{xS} = k$	 $Y_{xS} = \frac{1}{k}$	 $Z_{vD} = b$	 $Y_{vD} = \frac{1}{b}$
 $Z_{iC} = \frac{1}{Cp}$	 $Y_{iC} = Cp$	 $Z_{qR} = Rp$	 $Y_{qR} = \frac{1}{Rp}$	 $Z_{xD} = bp$	 $Y_{xD} = \frac{1}{bp}$	 $Z_{vS} = \frac{K}{p}$	 $Y_{vS} = \frac{p}{K}$
 $Ri + \frac{1}{C} \int idt = e(t)$ $\frac{E}{I} = \frac{RCP+1}{CP}$ $Z_{i\#} = Z_{iR} + Z_{iC}$	 $Ri + \frac{1}{C} \int idt = e(t)$ $\frac{I}{E} = \frac{CP}{RCP+1}$ $Y_{i\#} = Y_{iR} \parallel Y_{iC}$	 $Ce + \frac{1}{R} \int edt = q(t)$ $\frac{E}{Q} = \frac{RP}{CRP+1}$ $Z_{q\#} = Z_{qC} \parallel Z_{qR}$	 $Ce + \frac{1}{R} \int edt = q(t)$ $\frac{Q}{E} = \frac{CRP+1}{RP}$ $Y_{q\#} = Y_{qC} + Y_{qR}$	 $\frac{1}{k} f + \frac{1}{b} \dot{f} dt = x(t)$ $\frac{F}{X} = \frac{bp}{\frac{b}{k}p+1}$ $Z_{x\#} = Z_{xS} \parallel Z_{xD}$	 $\frac{1}{k} f + \frac{1}{b} \dot{f} dt = x(t)$ $\frac{X}{F} = \frac{\frac{b}{k}p+1}{bp}$ $Y_{x\#} = Y_{xS} + Y_{xD}$	 $bV + k \int vdt = f(t)$ $\frac{F}{V} = \frac{\frac{b}{k}p+1}{\frac{1}{k}p}$ $Z_{v\#} = Z_{vD} + Z_{vS}$	 $bV + k \int vdt = f(t)$ $\frac{V}{F} = \frac{\frac{1}{k}p}{\frac{b}{k}p+1}$ $Y_{v\#} = Y_{vD} \parallel Y_{vS}$
 $C \frac{de}{dt} + \frac{1}{R} e = i(t)$ $\frac{E}{I} = \frac{R}{RCP+1}$ $Z_{i\#} = Z_{iR} \parallel Z_{iC}$	 $C \frac{de}{dt} + \frac{1}{R} e = i(t)$ $\frac{I}{E} = \frac{RCP+1}{R}$ $Y_{i\#} = Y_{iR} + Y_{iC}$	 $R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = e(t)$ $\frac{E}{Q} = \frac{CRP+1}{C}$ $Z_{q\#} = Z_{qC} + Z_{qR}$	 $R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = e(t)$ $\frac{Q}{E} = \frac{C}{CRP+1}$ $Y_{q\#} = Y_{qC} \parallel Y_{qR}$	 $b \frac{dx}{dt} + kx = f(t)$ $\frac{F}{X} = \frac{\frac{b}{k}p+1}{\frac{1}{k}}$ $Z_{x\#} = Z_{xS} + Z_{xD}$	 $b \frac{dx}{dt} + kx = f(t)$ $\frac{X}{F} = \frac{\frac{1}{k}}{\frac{b}{k}p+1}$ $Y_{x\#} = Y_{xS} \parallel Y_{xD}$	 $\frac{1}{k} \frac{df}{dt} + \frac{1}{b} f = v(t)$ $\frac{F}{V} = \frac{b}{\frac{b}{k}p+1}$ $Z_{v\#} = Z_{vD} \parallel Z_{vS}$	 $\frac{1}{k} \frac{df}{dt} + \frac{1}{b} f = v(t)$ $\frac{V}{F} = \frac{\frac{b}{k}p+1}{b}$ $Y_{v\#} = Y_{vD} + Y_{vS}$
 $Z_1 = Z_{R1} \parallel (Z_{R2} + Z_C)$ $\frac{E}{I} = \frac{R_1(R_2CP+1)}{(R_1+R_2)CP+1}$	 $Y_1 = Y_{R1} + (Y_{R2} \parallel Y_C)$ $\frac{I}{E} = \frac{(R_1+R_2)CP+1}{R_1(R_2CP+1)}$	 $Z_q = Z_{C1} + (Z_{C2} \parallel Z_R)$ $\frac{E}{Q} = \frac{(C_1+C_2)RP+1}{C_1(C_2RP+1)}$	 $Y_q = Y_{C1} \parallel (Y_{C2} + Y_R)$ $\frac{Q}{E} = \frac{C_1(C_2RP+1)}{(C_1+C_2)RP+1}$	 $Z_x = Z_{S1} + (Z_{S2} \parallel Z_D)$ $\frac{F}{X} = \frac{(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2})bp+1}{\frac{1}{k_1}(\frac{b}{k_2}p+1)}$	 $Y_x = Y_{S1} \parallel (Y_{S2} + Y_D)$ $\frac{X}{F} = \frac{\frac{1}{k_1}(\frac{b}{k_2}p+1)}{(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2})bp+1}$	 $Z_v = Z_{D1} \parallel (Z_{D2} + Z_S)$ $\frac{F}{V} = \frac{b_1(\frac{b_2}{k}p+1)}{(b_1+b_2)\frac{1}{k}p+1}$	 $Y_v = Y_{D1} + (Y_{D2} \parallel Y_S)$ $\frac{V}{F} = \frac{(b_1+b_2)\frac{1}{k}p+1}{b_1(\frac{b_2}{k}p+1)}$
 $Z_i = Z_{R1} + (Z_{R2} \parallel Z_C)$ $\frac{E}{I} = \frac{R_1R_2CP+R_2}{R_2CP+1}$	 $Y_i = Y_{R1} \parallel (Y_{R2} + Y_C)$ $\frac{I}{E} = \frac{R_2CP+1}{R_1R_2CP+R_2}$	 $Z_q = Z_{C1} \parallel (Z_{C2} + Z_R)$ $\frac{E}{Q} = \frac{C_2RP+1}{C_1C_2RP+C_1+C_2}$	 $Y_q = Y_{C1} + (Y_{C2} \parallel Y_R)$ $\frac{Q}{E} = \frac{C_1C_2RP+C_1+C_2}{C_2RP+1}$	 $Z_x = Z_{S1} \parallel (Z_{S2} + Z_D)$ $\frac{F}{X} = \frac{\frac{b}{k_2}p+1}{\frac{b}{k_1k_2}p + \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}}$	 $Y_x = Y_{S1} + (Y_{S2} \parallel Y_D)$ $\frac{X}{F} = \frac{\frac{b}{k_1k_2}p + \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}}{\frac{b}{k_2}p+1}$	 $Z_v = Z_{D1} + (Z_{D2} \parallel Z_S)$ $\frac{F}{V} = \frac{\frac{b_1b_2}{k}p + b_1 + b_2}{\frac{b_2}{k}p+1}$	 $Y_v = Y_{D1} \parallel (Y_{D2} + Y_S)$ $\frac{V}{F} = \frac{\frac{b_2}{k}p+1}{\frac{b_1b_2}{k}p + b_1 + b_2}$

的类比是不同的。

(3) 为了建立诸类补偿校正网络传递函数相似的数学模型, 表 1 是将微分方程数学模型相似的支路对偶成行, 由此建立各支路诸类阻抗、导纳函数的类比。这种类比所建立的支路结构对应关系打破了机电第 I 类比(串-串)及第 II 类比(串-并)的框束。

尚有二点需要说明(见表 1):

(1) 在电系统中, 串联元件的阻抗等于各元件阻抗之和; 而在机械系统中, 串联元件的导纳等于各元件导纳相加。即电阻抗与机械导纳具有相似的概念。机械阻抗只有对力引出时, 才能建立与电阻抗相似的概念。

(2) 同一物理量的阻抗-导纳函数都是互为倒数关系: $Y_i = Z_i^{-1}$, $Y_q = Z_q^{-1}$, $Y_x = Z_x^{-1}$, $Y_v = Z_v^{-1}$; 相同结构支路的电流-电荷、位移-速度的阻抗及导纳函数间有:

$$Z_q = pZ_i, \quad Y_i = pY_q, \quad Z_x = pZ_v, \quad Y_v = pY_x.$$

三、易位、翻转、相似及其组合的网络变换

观察并研究表 1 所列诸类阻抗、导纳函数发现: 激励源或响应量均有电压、电流、电荷以及力、位移、速度之分; 被动元件相似元有电阻、电容、弹簧和阻尼器; 支路构形有串对串、串对并、并对并; 复函数性质有相同(或相似)和互为倒数两种。本文基于它们之间矛盾特点的研究, 提出三种网络变换, 将这许多诸如此类差异矛盾的分支, 构成具有相同传递函数的诸类网络。所有变换都是以文献 [1—3] 五种构形不同的电压校正网络作为原型基准进行的(见表 2)。

1. 易位变换

将构成网络的各支路按一定规则作相互换位且伴随支路元素串-并联转换(即在原位串联的元素移至新位改为并联, 在原位并联的元素移位后改为串联), 这种变换称为易位变换。易位变换有二种:

(1) 不变元素易位: 组成支路的元素在易位过程中性质不变。例如原位的电阻移至新位仍是电阻, 原位的电容移至新位还是电容。

(2) 变元素易位: 组成支路的元素在易位过程中发生性质的转变。例如原位的电阻移至新位改为电容, 原位的电容移至新位变为电阻。

易位规则

Γ 型网络: 构成 Γ 形网络的两个支路相互换位。

双 Γ 型网络: 前、后二个 Γ 形彼此换位, 然后每个 Γ 形支路再易位。

三 Γ 型网络: 首、尾二个 Γ 形彼此换位(中间 Γ 形不动), 然后每个 Γ 形支路再易位。

桥 T 型网络: 以中心结点为对称点, 上下支路易位, 左右支路易位。

桥式双 Γ 型网络: 它是带负载的桥 T 网络, 也是桥 T 网络与双 Γ 型网络的叠加, 其易位规则是先将桥 T 网络易位, 再将输出支路移至输入端。

易位变换是针对表 1 中支路结构串联与并联的对应关系提出的, 凡是串联与并联的转换都要经过易位变换。易位变换的特点是相互换位和串-并转换。

2. 翻转变换

将五种形状不同的原型网络进行翻转(原型网络倒向, 即输出端变输入、输入端变输

表 2 五种类型网络的易位、翻转、相似变换对照表*

类型	Γ 型网络	双 Γ 型网络	三 Γ 型网络	桥式 T 型网络	桥式双 Γ 型网络
原型网络					
易位变位					
翻转变换					
相似变换					

*此网络变换表系经信号流图拓扑而获,其中每一位上可以是一个或几个 R.C.(相似变换是 S.D.)串、并联的组合。

表中相似变换系由原型引出,易位型及翻转型的相似变换未示出。

出),这种变换称翻转变换。

翻转变换是针对表 1 中支路构形相似(串-串、并-并)且函数模型互为倒数关系提出的。网络的翻转变换只发生被校量的改变,而其传递函数不变。

3. 相似变换

RC 与 SD 网络之间电阻对应弹簧、电容对应阻尼器而网络结构完全相似的变换称相似变换。

如果两支路复函数相似,支路结构相似(串-串、并-并),相似元是 R-S、C-D,则称此二支路完全相似。相似支路所构成的网络之间都有相似变换关系。相似变换只用于电校正网络与机械补偿器之间的转换。相似变换后的传递函数仍然相似,且都是电阻 R 对应弹簧刚度 k 的倒数,电容量 C 对应于阻尼系数 b 。

4. 组合变换

同时进行易位、翻转、相似之中两个以上的变换称组合变换。

组合变换是两个以上单一变换的组合,它可以解决表 1 中任意单一变换所不能完成的复杂对应关系问题。

四、机、电补偿校正网络及其相互转换的八条变换法则

1. I 型电压校正网络

文献 [1] 等所给出的电校正网络都属表 1 电流阻抗所引出的电压校正网络,为区别由电荷阻抗所引出的电压校正网络,前者称为 I 型,后者称为 II 型。

具有不同频率特征的 I 型电压校正网络(见表 6),按相频特征分为滞后、引前、滞后-引前、引前-滞后网络;按幅频特征分为低通、高通、带阻、带通滤波器;按时域特征又分别叫积分、微分、积-微分、微-积分环节。这些网络的内在联系由变换法则 1 提出。

变换法则 1 任意具有传递函数为 $G_1(R_m, C_n)^{1)}$ 的引前(或滞后)网络,经不变元素易位变换,则转为滞后(或引前)网络,变换后网络的传递函数 $G_2(p)$ 等于原传递函数 G_1 中 R_m 、 C_n 的每一项分别取其倒数并除以 p ,即

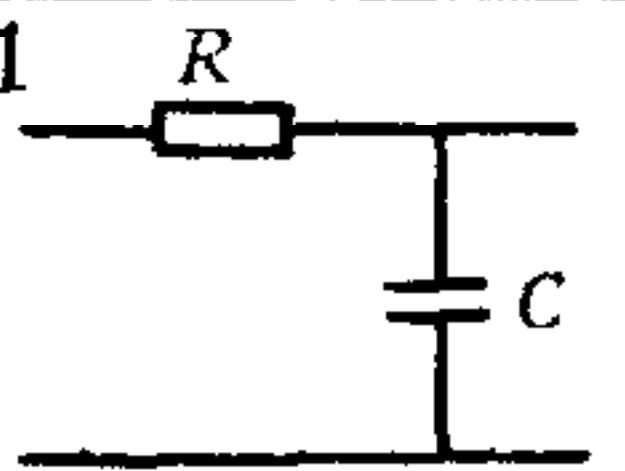
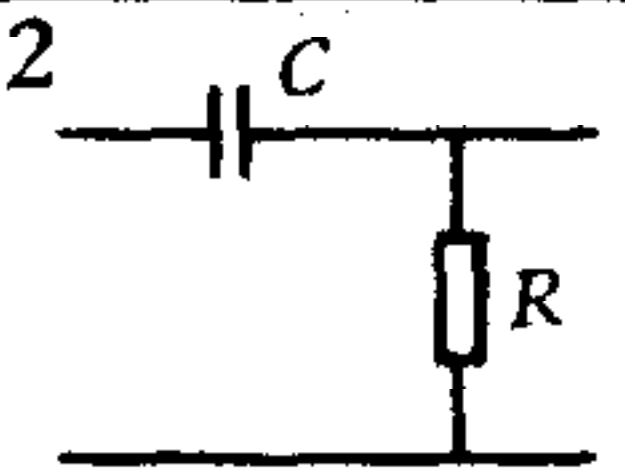
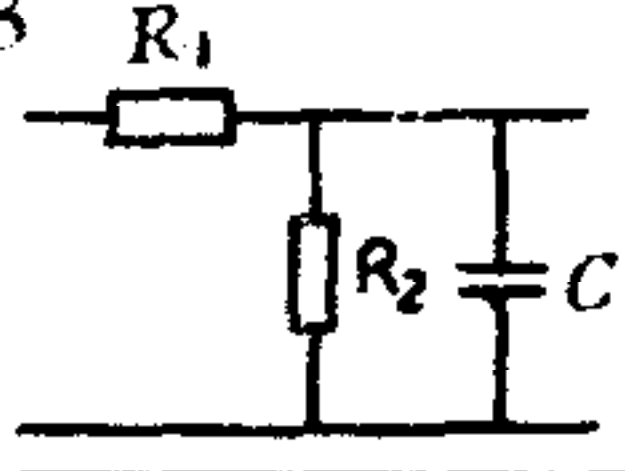
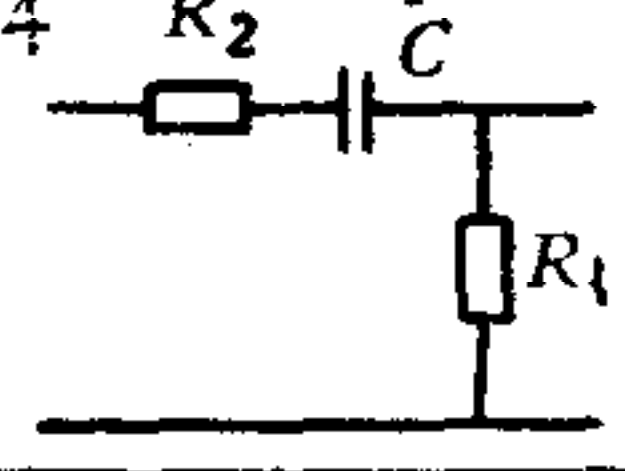
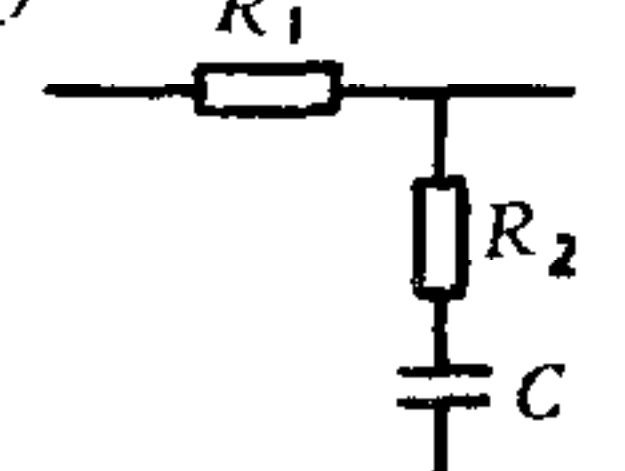
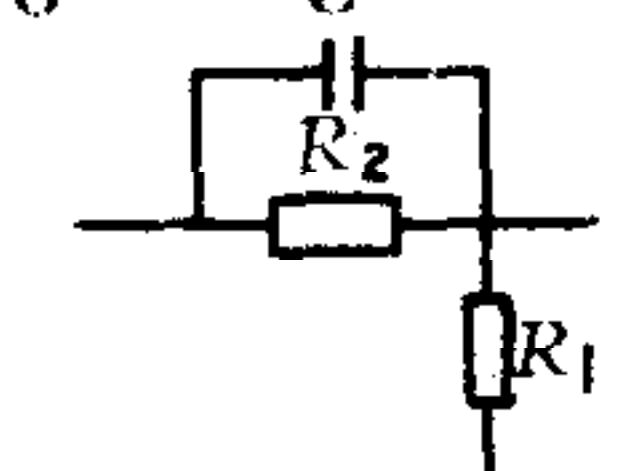
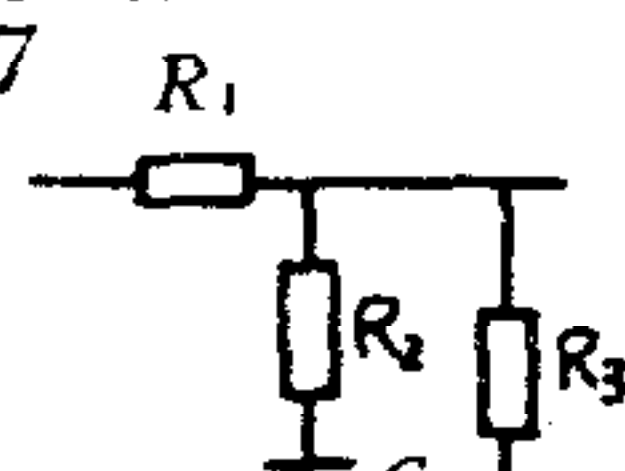
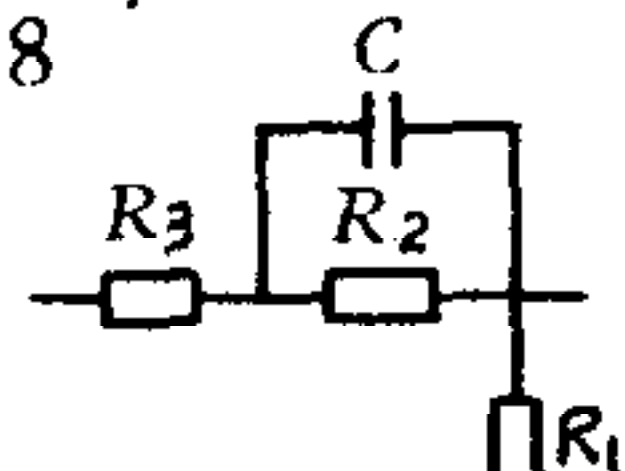
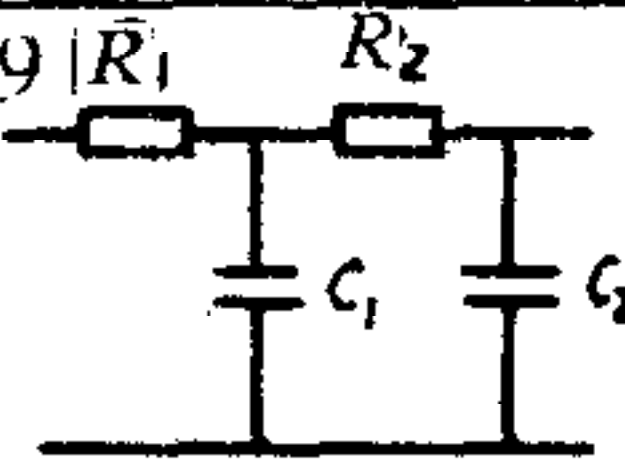
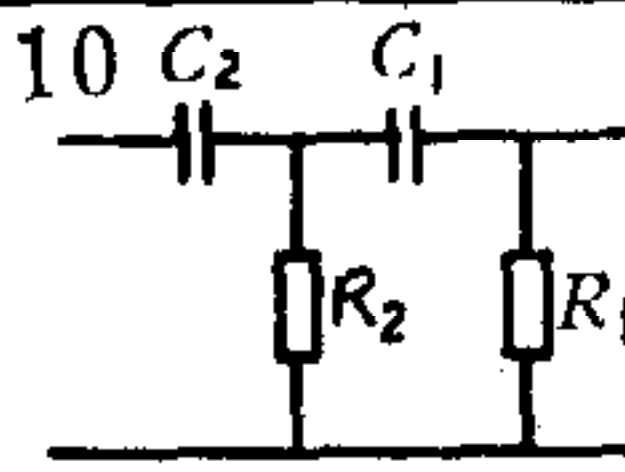
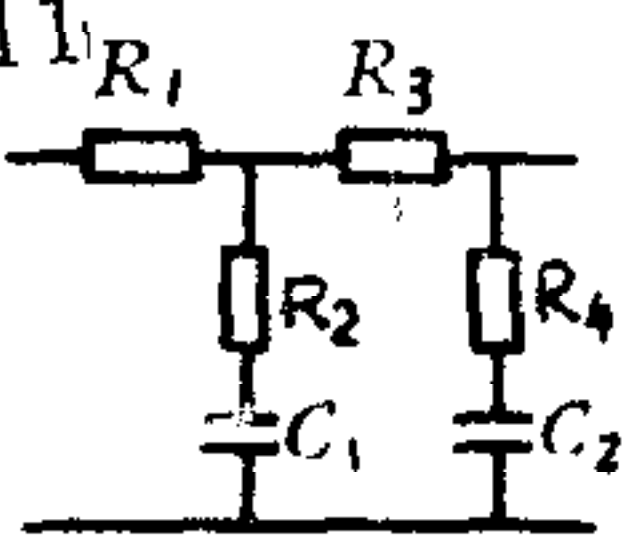
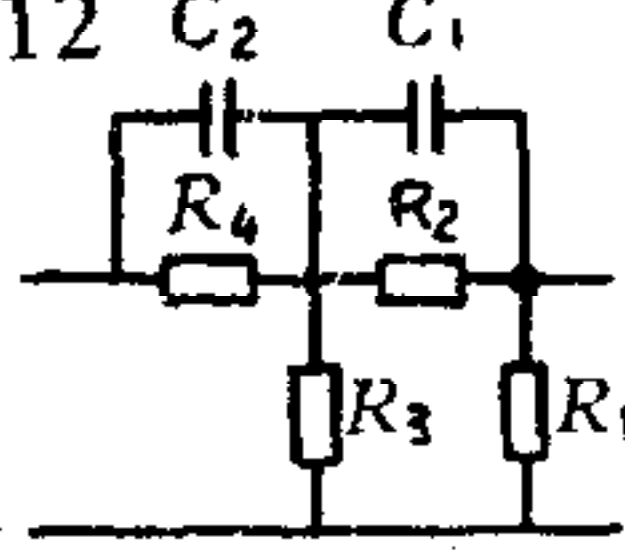
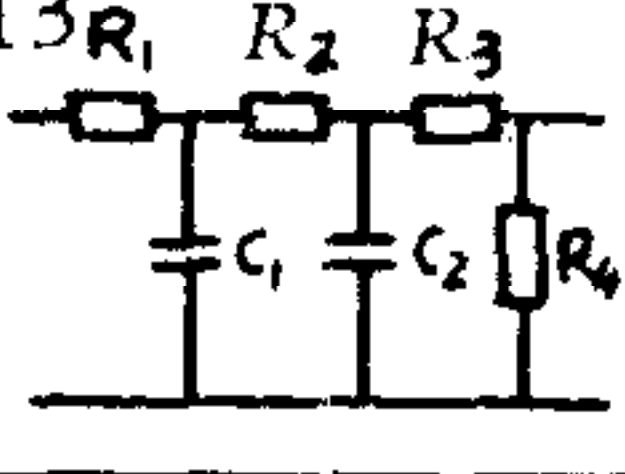
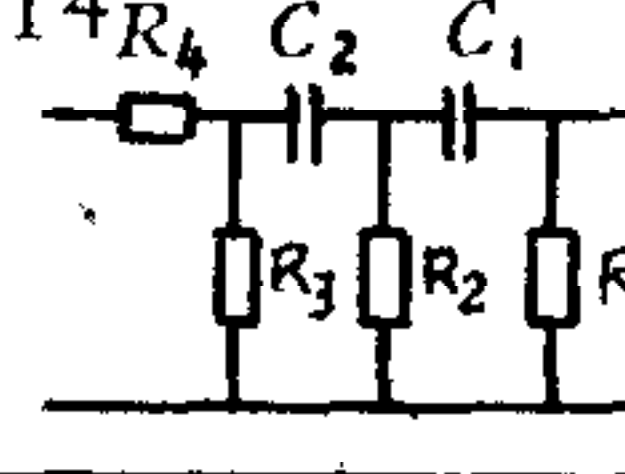
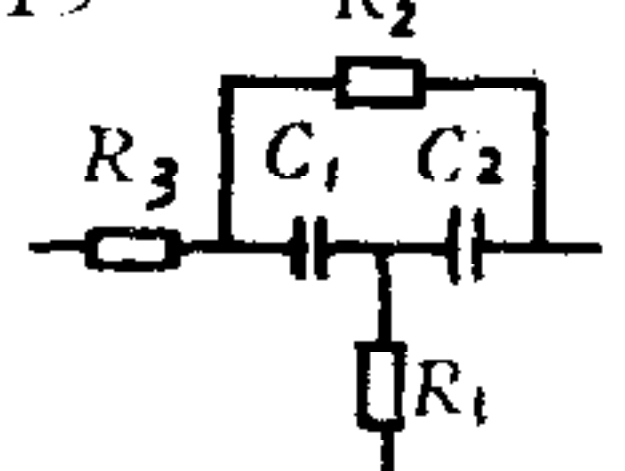
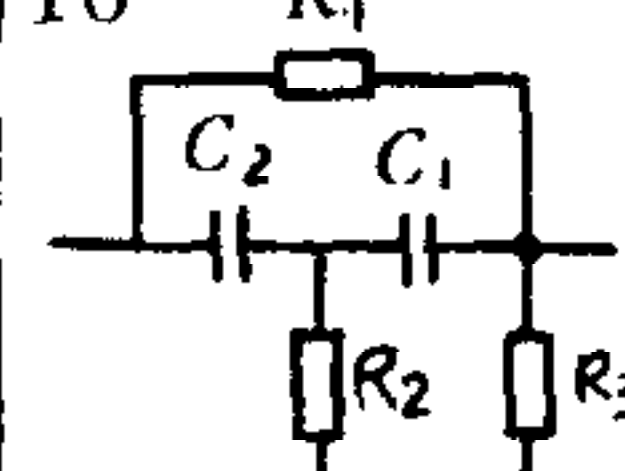
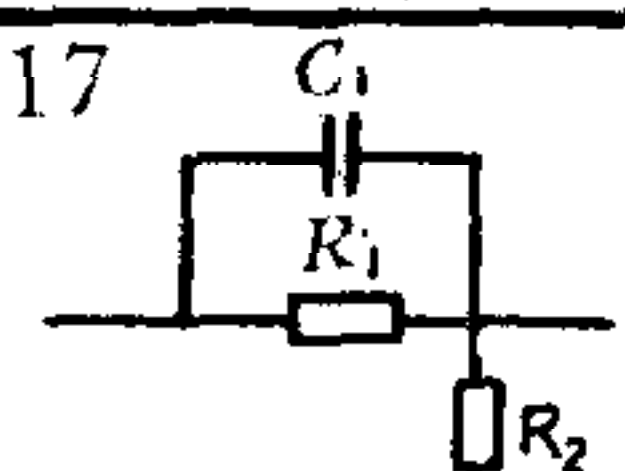
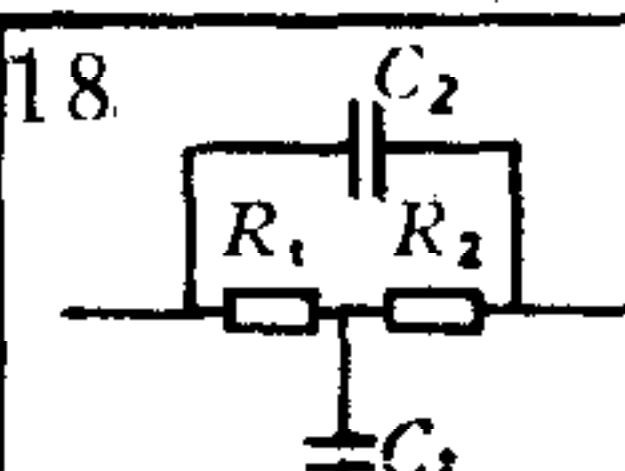
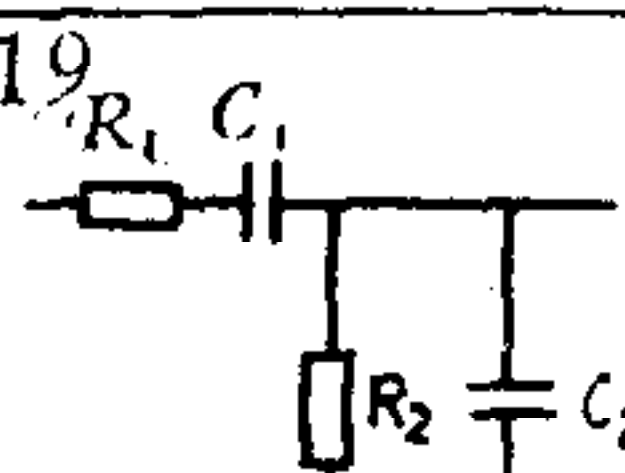
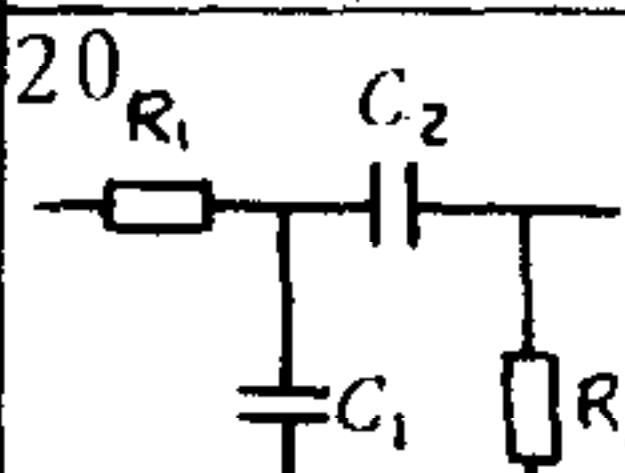
$$G_2(p) = G_1\left(\frac{1}{R_m p}, \frac{1}{C_n p}\right) \quad (9)$$

公式(9)的实际应用很简单,只要将 $G_1(p)$ 分子和分母多项式中的每一求和项都取倒数再求和即为 $G_2(p)$ 。反之 $G_2(p)$ 中的每一求和项都取倒数即为 $G_1(p)$ 。所有求和项只能逐项先取倒数再求和,切莫先求和后再取倒数。例 $(R_1 + R_2)$ 取 $\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}$, 莫取 $\frac{1}{R_1 + R_2}$; $\frac{1}{C_1 + C_2}$ 取 $\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$; $(R_1 C_1 + R_2 C_2)p$ 取 $\left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2}\right) \frac{1}{p}$ 等等。

表 3 给出了法则 1 的变换示例。表 6 示出了相应网络的特征曲线。由于法则 1 包含着算子 p 取倒数的变换,此变换将 $p = j\omega$, $\omega = 0 \rightarrow \infty$ 的正虚轴奈魁斯特路径变为负虚轴:

1) 在此变换中,变元为 $R_m, C_n (m = 1, 2, 3 \dots, n = 1, 2, 3 \dots)$, 算子 P 视为常数。

表 3 不变元素的易位变换对照表

滞后网络	传递函数 $G_1(p) = G_1(R_m, C_n)$	引前网络	传递函数 $G_2(p) = G_1(\frac{1}{R_m p}, \frac{1}{C_n p})$
1 	$\frac{1}{RCp + 1}$	2 	$\frac{RCp}{RCp + 1}$
3 	$\frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} Cp + 1}$	4 	$\frac{R_1 Cp}{(R_1 + R_2) Cp + 1}$
5 	$\frac{R_2 Cp + 1}{(R_1 + R_2) Cp + 1}$	6 	$\frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \frac{R_2 Cp + 1}{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} Cp + 1}$
7 	$\frac{R_3}{R_1 + R_3} \cdot \frac{R_2 Cp + 1}{(R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}) Cp + 1}$	8 	$\frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot \frac{R_2 Cp + 1}{\frac{R_2 (R_1 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3} Cp + 1}$
9 	$\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2 p^2 + (R_1 C_1 + R_1 C_2 + R_2 C_2) p + 1}$	10 	$\frac{R_1 R_2 C_1 C_2 p^2}{R_1 R_2 C_1 C_2 p^2 + (R_1 C_1 + R_2 C_1 + R_2 C_2) p + 1}$
11 	$\frac{R_2 R_4 C_1 C_2 p^2 + (R_2 C_1 + R_4 C_2) p + 1}{R_2 R_4 C_1 C_2 [(1 + \frac{R_1}{R_2})(1 + \frac{R_3}{R_4}) + \frac{R_1}{R_4}] p^2 + [R_2 C_1 (1 + \frac{R_1}{R_2}) + R_4 C_2 (1 + \frac{R_1}{R_4} + \frac{R_3}{R_4})] p + 1}$	12 	$\frac{R_2 R_4 C_1 C_2 p^2 + (R_2 C_1 + R_4 C_2) p + 1}{R_2 R_4 C_1 C_2 p^2 + \{R_4 C_2 (1 + \frac{R_2}{R_1}) + R_2 C_1 [1 + \frac{(R_1 + R_3) R_4}{R_1 R_3}]\} p + \frac{(R_1 + R_2 + R_3) R_4}{R_1 R_3} + \frac{R_2}{R_1} + 1}$
13 	$\frac{R_4}{R_1 R_2 (R_3 + R_4) C_1 C_2 p^2 + [R_1 (R_2 + R_3 + R_4) C_1 + (R_1 + R_2) (R_3 + R_4) C_2] p + R_1 + R_2 + R_3 + R_4}$	14 	$\frac{\frac{R_1 R_2 R_3}{R_3 + R_4} C_1 C_2 p^2}{R_1 R_2 C_2 (1 + \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}) p^2 + [(R_1 + R_2) C_1 + (R_2 + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}) C_2] p + 1}$
15 	$\frac{R_1 R_2 C_1 C_2 p^2 + R_1 (C_1 + C_2) p + 1}{(R_1 + R_3) R_2 C_1 C_2 p^2 + [(R_1 + R_3) (C_1 + C_2) + R_2 C_2] p + 1}$	16 	$\frac{R_3}{R_1 + R_3} \cdot \frac{R_1 R_2 C_1 C_2 p^2 + R_2 (C_1 + C_2) p + 1}{\frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 + R_3} C_1 C_2 p^2 + [\frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} C_1 + R_2 (C_1 + C_2)] p + 1}$
17 	$\frac{R_1 R_2 C_1 C_2 p^2 + (R_1 C_1 + R_2 C_2) p + 1}{R_1 R_2 C_1 C_2 p^2 + (R_1 C_1 + R_1 C_2 + R_2 C_2) p + 1}$	18 	$\frac{R_1 R_2 C_1 C_2 p^2 + (R_1 + R_2) C_2 p + 1}{R_1 R_2 C_1 C_2 p^2 + (R_1 C_1 + R_1 C_2 + R_2 C_2) p + 1}$
19 	$\frac{R_2 C_1 p}{R_1 R_2 C_1 C_2 p^2 + (R_1 C_1 + R_2 C_1 + R_2 C_2) p + 1}$	20 	$\frac{R_2 C_2 p}{R_1 R_2 C_1 C_2 p^2 + (R_1 C_1 + R_1 C_2 + R_2 C_2) p + 1}$

$$Z = \frac{1}{p} = j\omega'$$

当 $\omega = 0 \rightarrow \infty$ 时, $\omega' = -\infty \rightarrow 0$, 所以法则 1 实质上是把与 p 平面上奈魁斯特负虚轴路径相对应的频率特性负频段, 在 G 平面上展现出来。经此变换后网络的幅相频率特性相对实轴翻转(不一定完全对称), 对数幅频特性沿 ω 轴方向翻转。某些频率特性已经对称于实轴的网络, 列表 3 中 17—20, 其频率特性为对称于实轴的圆(见表 6 滞后-引前、引前-滞后网络), 法则 1 仍适用, 但失去变换意义。

2. 机械位移补偿装置

机械位移补偿装置是由机械元件弹簧和阻尼器所组成的对位移量进行补偿的装置。电路中 RC 网络对电压的校正作用, 是靠它对电流的阻抗作用随频率的变化建立起来的; 而在机械回路中 SD 装置对位移的补偿, 是由它对力的阻抗作用(力阻抗即位移导纳)所产生。表 1 中电流阻抗与位移导纳是完全相似的支路, 它们建立了电压对应位移, 电流对应力的类比关系, 由它们所构成的网络之间有相似变换关系。

变换法则 2 任意具有传递函数为 $G_1(R_m, C_n)$ 的 I 型电压校正网络, 通过 R-S、C-D、串-串、并-并的相似变换, 则转为位移补偿装置, 其传递函数 $G_2(p)$ 等于原传递函数 G_1 中 R_m 与 C_n 的每一项分别换以 $\frac{1}{k_m}$ 和 b_n , 即

$$G_2(p) = G_1\left(\frac{1}{k_m}, b_n\right) \quad (10)$$

变换示例见表 5 与表 6。

由位移导纳引出的机械位移补偿装置, 要求负载位移导纳为无穷大, 即负载力很小。一般对负载力的要求为: 驱动负载所需要的力, 不大于驱动补偿装置输出元件所需力的 1/10。如果需要两级校正, 为不使后级加载于前级, 致使构成两级的弹簧和阻尼器的参数差异很大, 所以将这两级分置于回路中的不同位置是合理的。采用机械补偿器要注意阻抗匹配和克服反传效应, 在工程实践中常与液压助力器联用匹配阻抗、防止反传和进行功率放大。

3. 电流校正网络

电流校正网络是由电流导纳所引出的对电流频率特征进行校正的网络。由表 1 可见, 电流阻抗和电流导纳函数是互为倒数关系, 采用表 2 所示翻转变换, 即可将 RC 电压校正网络转为具有同样传递函数的电流校正网络。

变换法则 3 任意具有传递函数为 $G_1(R_m, C_n)$ 的 I 型电压校正网络, 通过原型翻转变换, 则转为与原传递函数完全相同的电流校正网络, 即

$$G_2(p) = G_1(p) \quad (11)$$

法则 3 不仅可以轻而易举地得到与电压校正网络传递函数完全相同的电流校正网络, 且为无线电领域中 RC 选频电路(表 6, 3.19)的分析计算带来方便, 使许多电流网络采用翻转后求电压传递函数的方法, 去求得其输出、输入电流之间的传递关系来。

4. I 型力补偿装置

位移及速度阻抗可以分别引出两种不同类型的力补偿装置, 前者力的传递依靠位移, 称 I 型力补偿装置, 而后者力的传递是靠速度, 称为 II 型力补偿装置。

对比表 1 电流阻抗和位移阻抗,两者建立了电压与力的类比关系。这种似属机-电第 I 类比的阻抗模拟,理应建立串联与并联的对应关系。本文为保持它们的支路复函数互为倒数关系,凑成它们之间串对串、并对并的支路结构,使位移阻抗与电流导纳是完全相似的支路(支路复函数也相似),由它们引出的网络之间符合相似变换关系。

变换法则 4 任意具有传递函数为 $G_1(R_m, C_n)$ 的 I 型电压校正网络,经原型翻转和 R-S、C-D、串-串、并-并的相似变换,则构成 I 型力补偿装置,其传递函数是 G_1 中 R_m 、 C_n 的每一项分别换以 $\frac{1}{k_m}$ 和 b_n , 即

$$G_2(p) = G_1\left(\frac{1}{k_m}, b_n\right) \quad (12)$$

式(10)与(12)完全相同,说明机械补偿器正向位移的传递和反向力的传递具有完全相同的传递函数。所以在机械系统中要采取措施保证单向传递克服反传,液压助力器就是很好的隔离反传的装置。

5. II 型电压校正网络

II 型电压校正网络系由电荷阻抗所引出,与 I 型电压校正网络的区别是其电压的建立不依赖于电流而依靠电荷的分布。由于电容能收存、阻滞电荷而电阻能抵抗电荷的变化,所以在电荷阻抗中的“荷阻”是电容,而“荷抗”是电阻。II 型电压校正网络敏感电荷,适用于诸如压电晶片那种具有对电流有隔直作用的容性内阻的信号源。

对比表 1 中的电流与电荷阻抗函数,相似元是 R-C; 支路结构是串-并; 函数性质是互为倒数但 R 与 C 互换,这类矛盾依靠变元素易位可以达到统一。

变换法则 5 任意具有传递函数为 $G_1(R_m, C_n)$ 的 I 型电压校正网络,通过电阻变电容、电容变电阻、串联变并联、并联变串联的易位变换(变元素的易位变换),即转为对电荷敏感的 II 型电压校正网络,其传递函数 $G_2(p)$ 等于原传递函数中 R_m 和 C_n 的每一项分别换以 C_m 和 R_n , 即

$$G_2(p) = G_1(C_m, R_n) \quad (13)$$

变换法则 1 与 5, 两者虽都是易位变换,但法则 1 是不变元素,而法则 5 是变元素,前者导致频率特征的翻转,而后者频率特征不变。

6. 速度补偿装置

由电荷阻抗引出的 II 型电压校正网络,通过相似变换得到速度补偿装置,借以澄清速度与位移补偿装置的混同,也是本文引出电荷阻抗的原因。

速度补偿装置系由速度导纳所引出。参见表 1 电荷阻抗与速度导纳,它们具有完全相似的支路,所以速度补偿装置可由 II 型电压校正网络加作一次相似变换获得。

变换法则 6 任意具有传递函数为 $G_1(R_m, C_n)$ 的 I 型电压校正网络,通过变元素易位(得 II 型电压校正网络)加相似变换,则转为速度补偿装置,其传递函数 $G_2(p)$ 等于原传递函数中 R_m 和 C_n 的每一项分别被 b_m 和 $\frac{1}{k_n}$ 所取代,即

$$G_2(p) = G_1\left(b_m, \frac{1}{k_n}\right) \quad (14)$$

由 I、II 型电压校正网络经相似变换分别得到的位移和速度补偿装置之间与 I、II 型

电压校正网络之间的关系一样,都是变元素易位变换:

任意具有传递函数为 $G_1\left(\frac{1}{k_m}, b_n\right)$ 的位移补偿装置,经弹簧变阻尼器、阻尼器变弹簧、串联变并联、并联变串联的变元素易位变换,即转为速度补偿装置,其传递函数 $G_2(p)$ 等于原传递函数中 $\frac{1}{k_m}$ 、 b_n 的每一项分别换以 b_m 和 $\frac{1}{k_n}$,即

$$G_2(p) = G_1\left(b_m, \frac{1}{k_n}\right) \tag{15}$$

7. 电荷校正网络

电荷校正网络系由电荷导纳所引出的对电荷进行校正的网络,表 1 中电荷阻抗和电荷导纳之间都是支路构形相同、支路复函数互为倒数关系,所以由它们分别构成的 II 型电压校正网络与电荷校正网络之间是互为翻转变换。

变换法则 7 任意具有传递函数为 $G_1(R_m, C_n)$ 的 I 型电压校正网络,经电阻变电容、电容变电阻、串联变并联、并联变串联的变元素易位加翻转变换,即转为电荷校正网络,其传递函数 $G_2(p)$ 等于原传递函数中 R_m 和 C_n 的每一项分别换以 C_m 和 R_n ,即

$$G_2(p) = G_1(C_m, R_n) \tag{16}$$

式 (13) 与 (16) 完全相同,再次说明网络的翻转变换其传递函数不变的性质。保持空载下的校正特征,要求被校信号是电荷导纳很小(小电容)的电荷源,而输出端要求与电荷导纳很大(大电容)的负载相接。由法则 7 变得的部分电荷校正网络以开路形式示于表 6,必须在输出端并接电荷导纳很大的负载才能取出电荷信号来。

8. II 型力补偿装置

由速度阻抗可以引出 II 型力补偿装置。从表 1 可见,速度阻抗与电荷导纳的对应支路是完全相似的,由它们各自构成的电荷校正网络与 II 型力补偿装置之间是相似变换关系。

变换法则 8 任意具有传递函数为 $G_1(R_m, C_n)$ 的 I 型电压校正网络,通过变元素易

表 4 RC-SD 补偿校正网络变换体系表

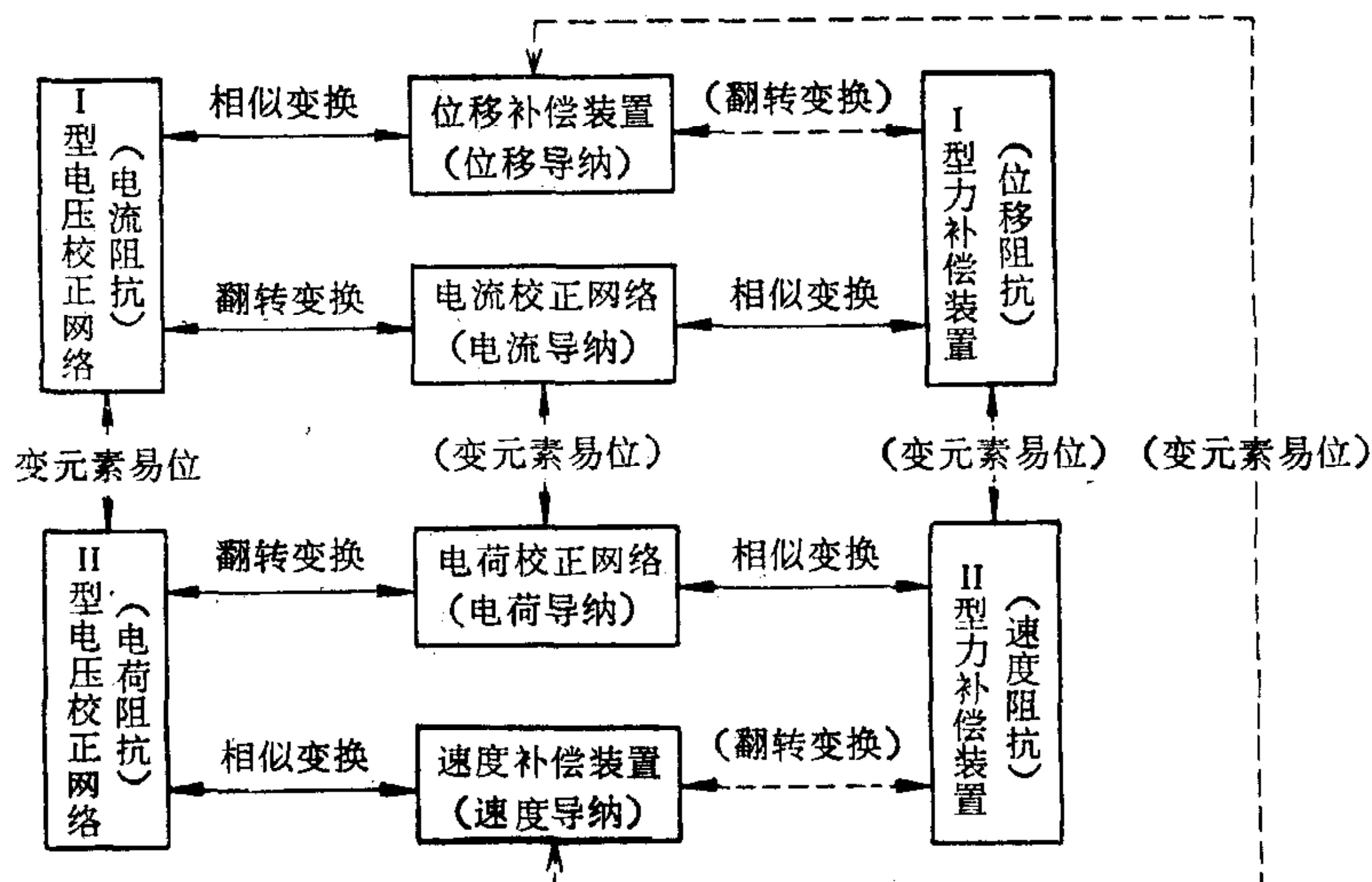
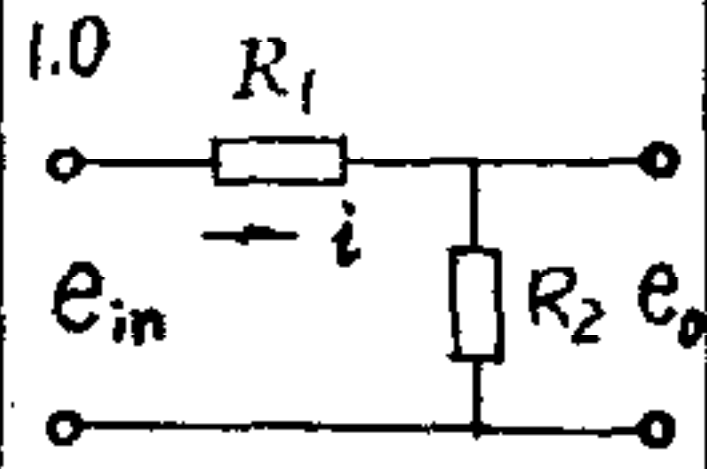
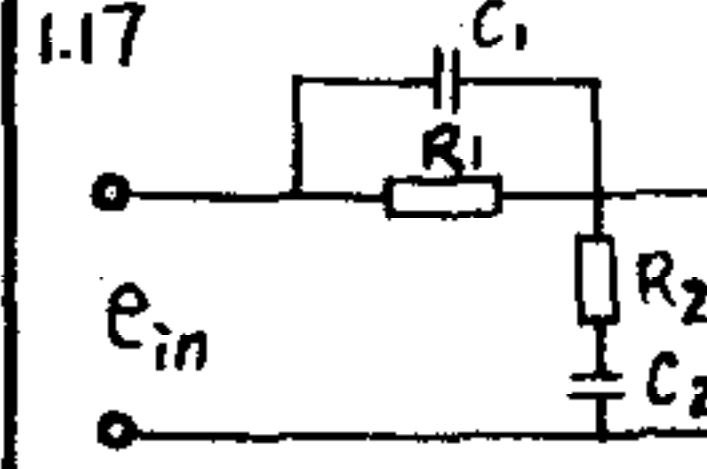
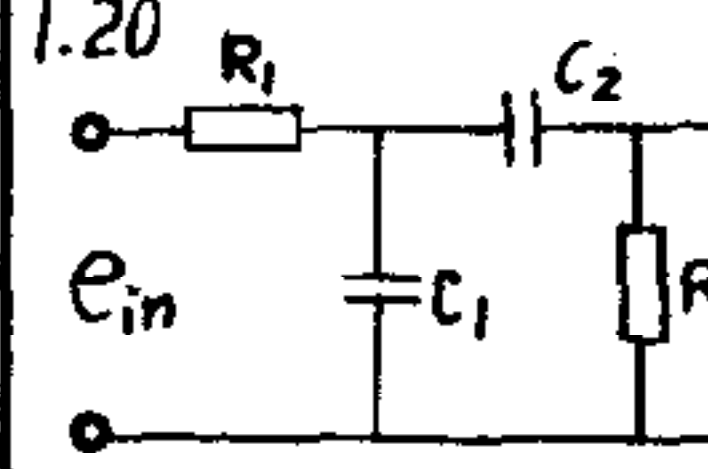
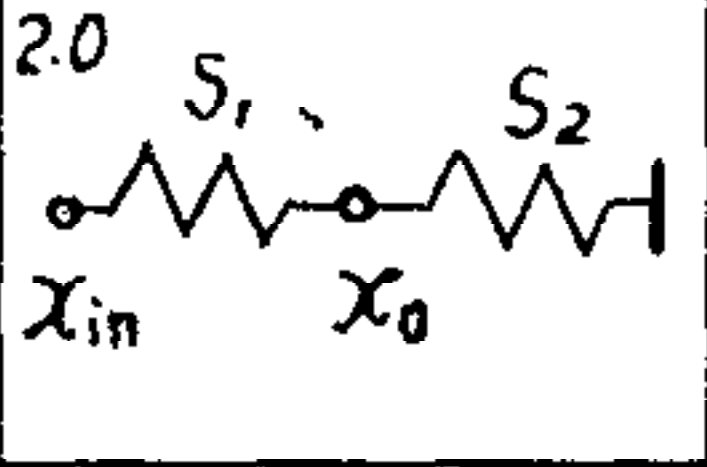
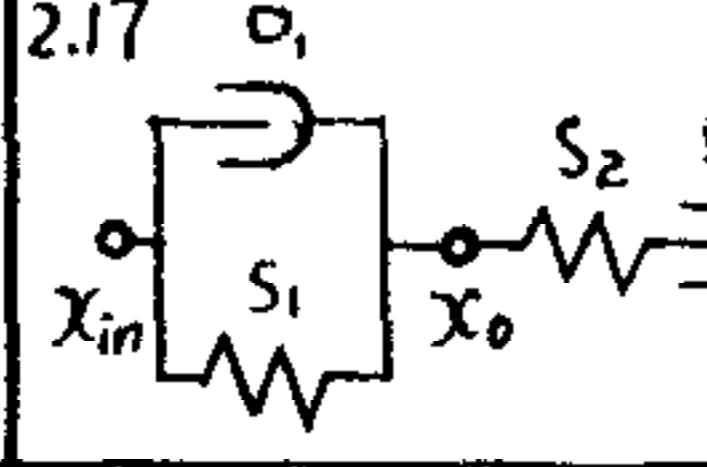
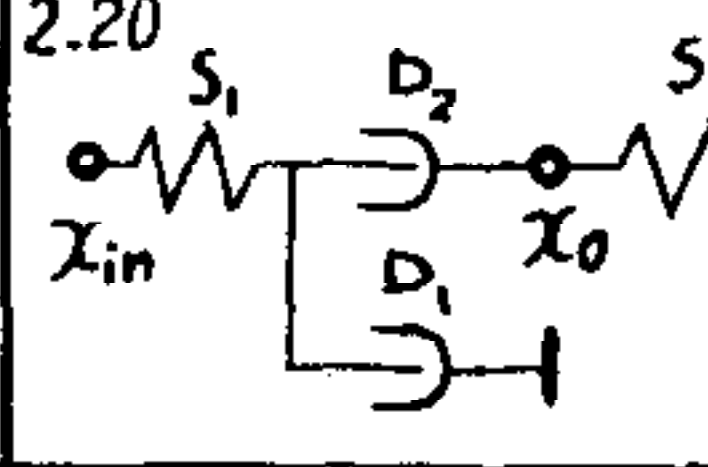
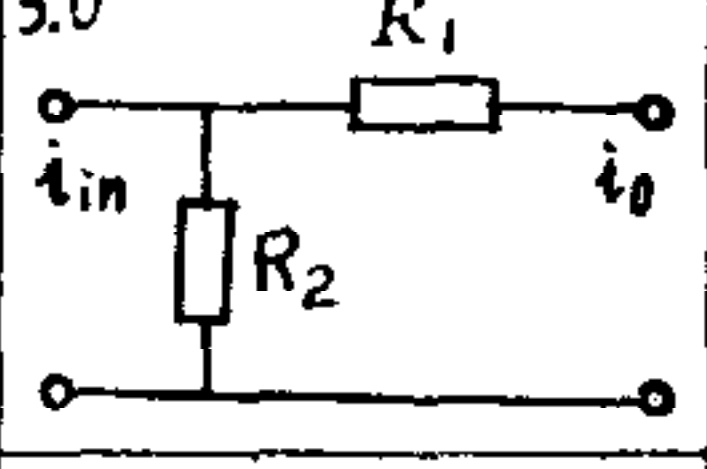
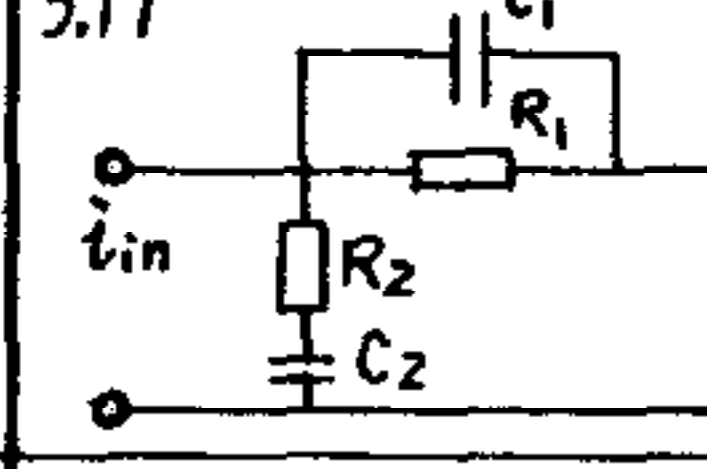
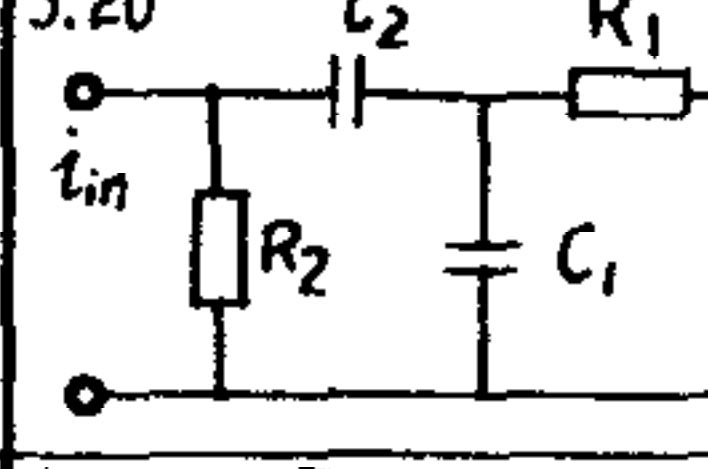
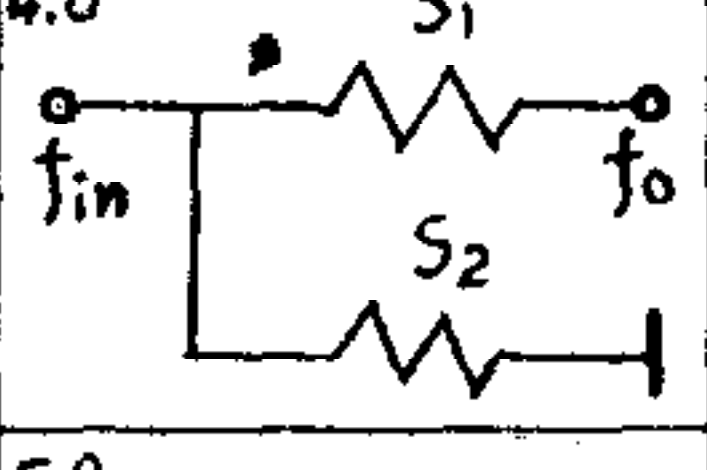
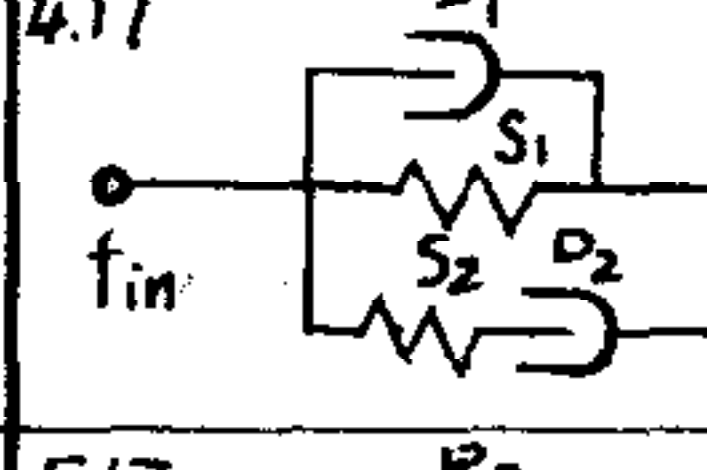
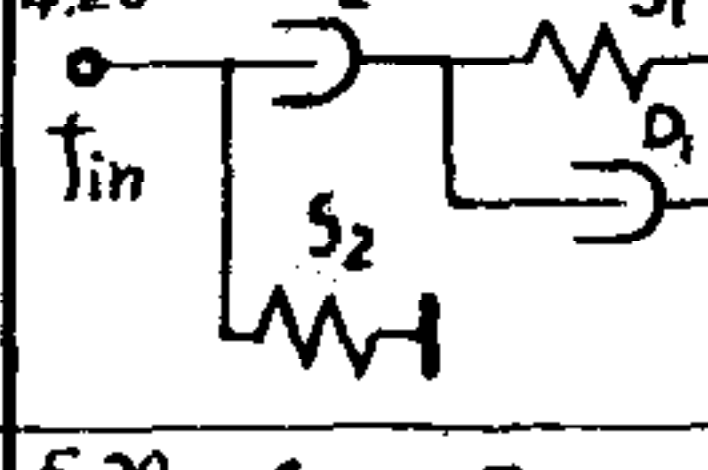
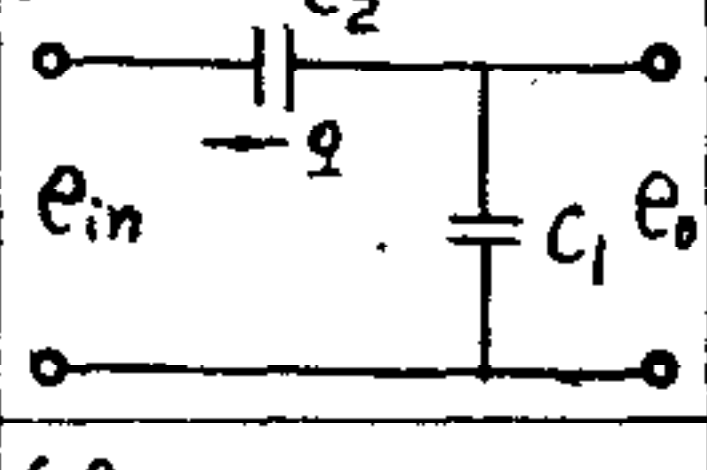
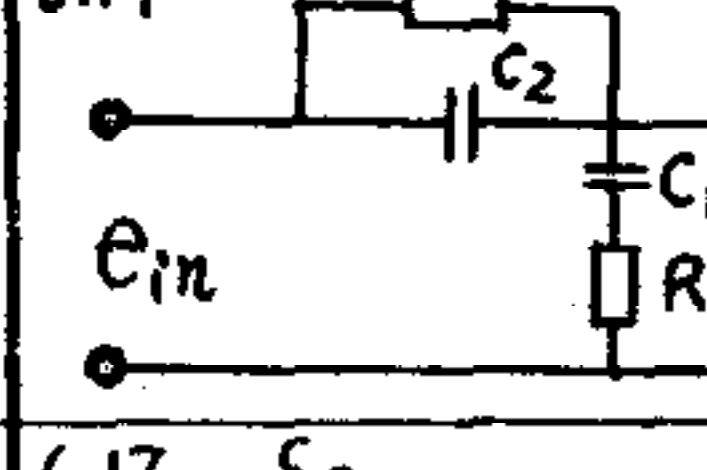
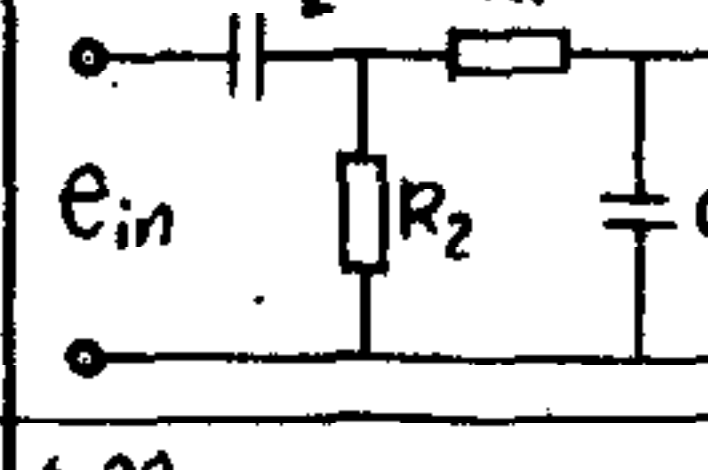
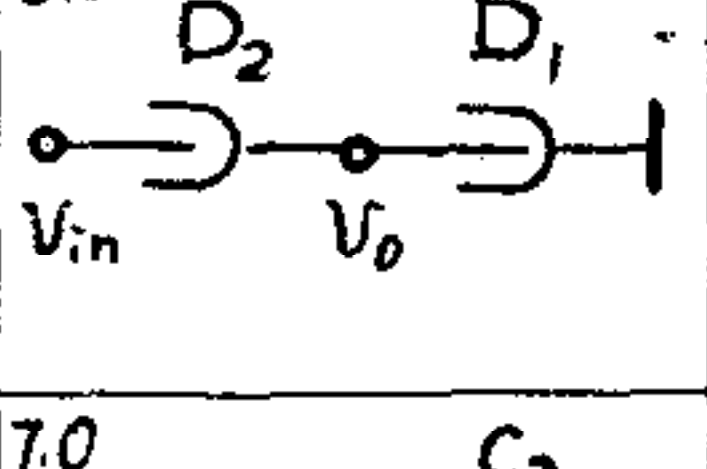
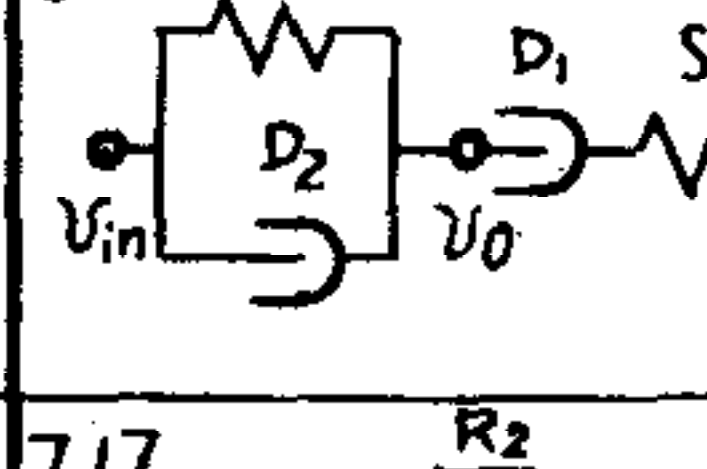
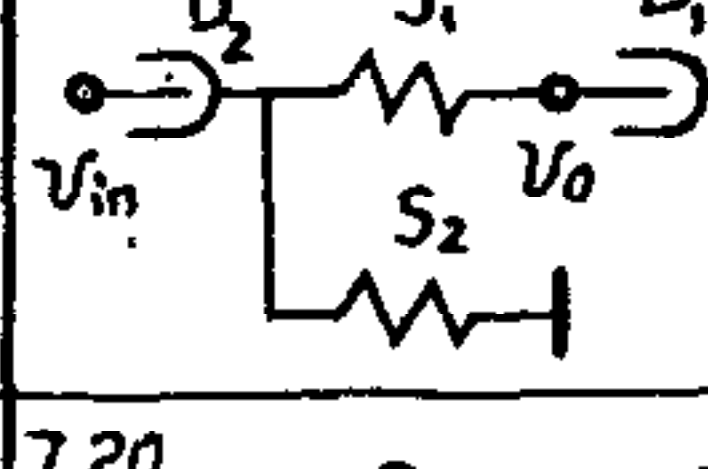
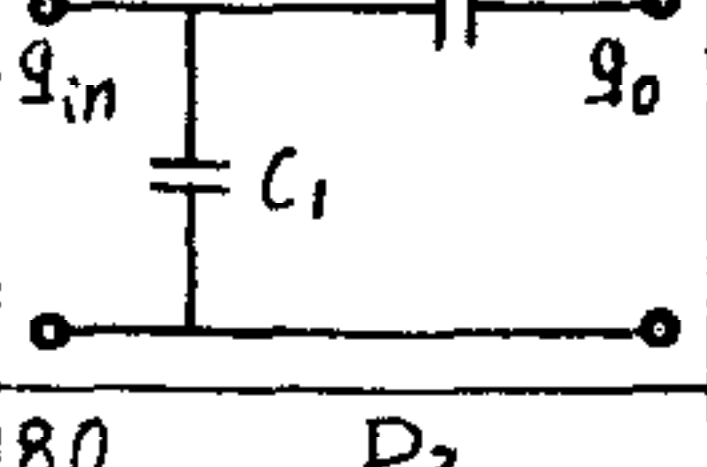
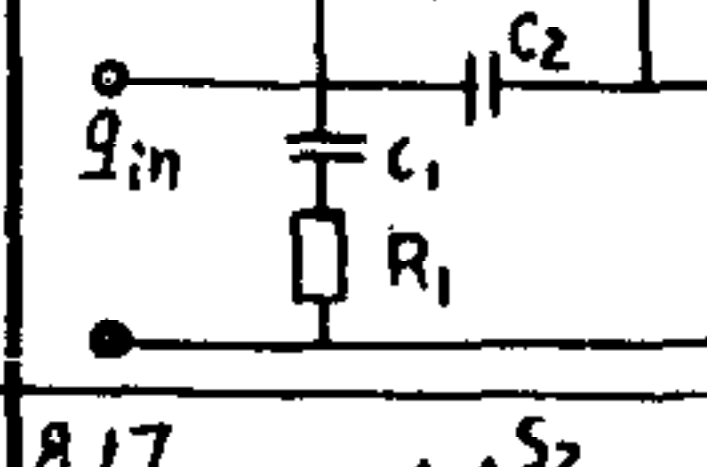
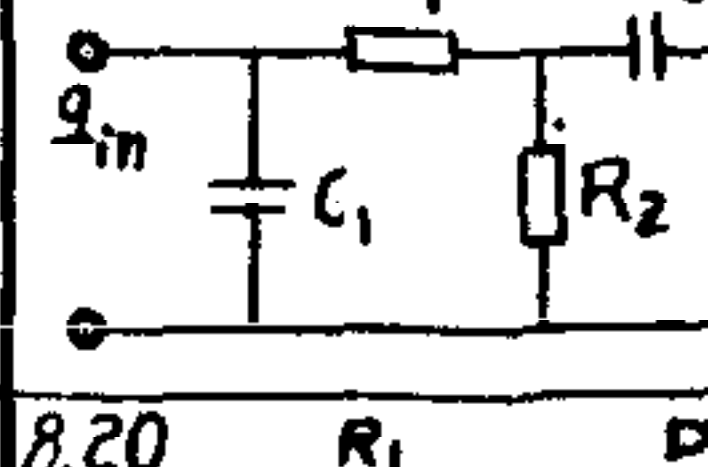
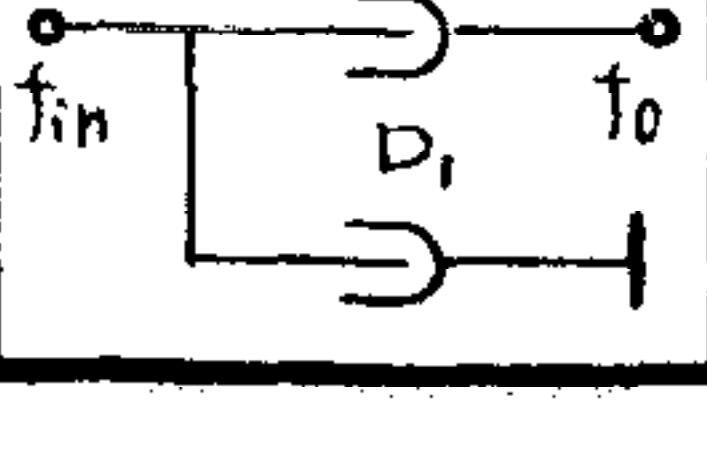
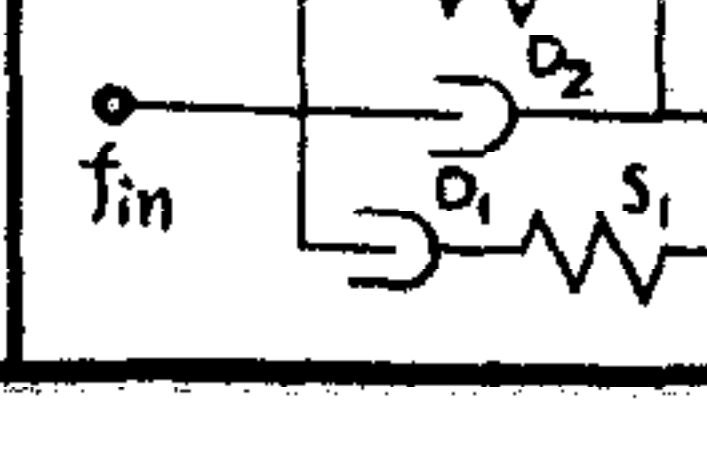
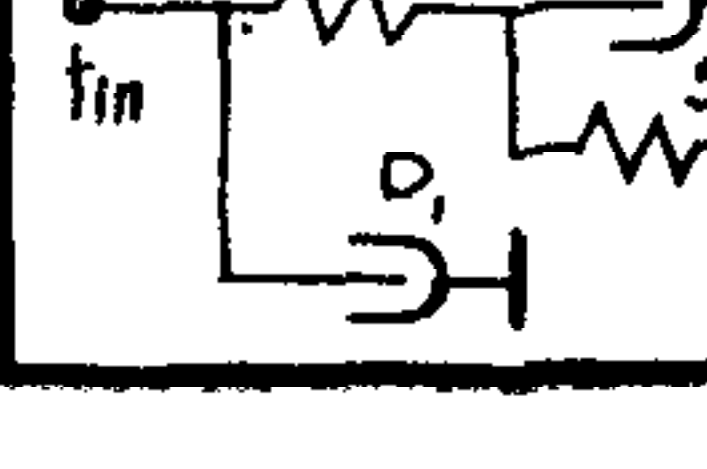


表5 电校正网络与机械补偿装置变换示例表

类型	变换法则	比例环节	滞后-引前网络	引前-滞后网络
电压校正 (I)	原型 $\frac{E_0}{E_{in}} = G(R_m, C_n)$	1.0  $\frac{E_0}{E_{in}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$	1.17  $\frac{E_0}{E_{in}} = \frac{R_1 R_2 C_1 C_2 p^2 + (R_1 C_1 + R_2 C_2) p + 1}{R_1 R_2 C_1 C_2 p^2 + (R_1 C_1 + R_1 C_2 + R_2 C_2) p + 1}$	1.20  $\frac{E_0}{E_{in}} = \frac{R_2 C_2 p}{R_1 R_2 C_1 C_2 p^2 + (R_1 C_1 + R_1 C_2 + R_2 C_2) p + 1}$
位移补偿	相似 $\frac{X_0}{X_{in}} = G(\frac{1}{k_m}, b_n)$	2.0  $\frac{X_0}{X_{in}} = \frac{k_1}{k_1 + k_2}$	2.17  $\frac{X_0}{X_{in}} = \frac{\frac{b_1 b_2}{k_1 k_2} p^2 + (\frac{b_1}{k_1} + \frac{b_2}{k_2}) p + 1}{\frac{b_1 b_2}{k_1 k_2} p^2 + (\frac{b_1}{k_1} + \frac{b_2}{k_1} + \frac{b_2}{k_2}) p + 1}$	2.20  $\frac{X_0}{X_{in}} = \frac{\frac{b_2}{k_2} p}{\frac{b_1 b_2}{k_1 k_2} p^2 + (\frac{b_1}{k_1} + \frac{b_2}{k_1} + \frac{b_2}{k_2}) p + 1}$
电流校正	翻转 $\frac{I_0}{I_{in}} = G(R_m, C_n)$	3.0  $\frac{I_0}{I_{in}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$	3.17  $\frac{I_0}{I_{in}} = \frac{R_1 R_2 C_1 C_2 p^2 + (R_1 C_1 + R_2 C_2) p + 1}{R_1 R_2 C_1 C_2 p^2 + (R_1 C_1 + R_1 C_2 + R_2 C_2) p + 1}$	3.20  $\frac{I_0}{I_{in}} = \frac{R_2 C_2 p}{R_1 R_2 C_1 C_2 p^2 + (R_1 C_1 + R_1 C_2 + R_2 C_2) p + 1}$
力补偿 (I)	翻转-相似 $\frac{F_0}{F_{in}} = G(\frac{1}{k_m}, b_n)$	4.0  $\frac{F_0}{F_{in}} = \frac{k_1}{k_1 + k_2}$	4.17  $\frac{F_0}{F_{in}} = \frac{\frac{b_1 b_2}{k_1 k_2} p^2 + (\frac{b_1}{k_1} + \frac{b_2}{k_2}) p + 1}{\frac{b_1 b_2}{k_1 k_2} p^2 + (\frac{b_1}{k_1} + \frac{b_2}{k_1} + \frac{b_2}{k_2}) p + 1}$	4.20  $\frac{F_0}{F_{in}} = \frac{\frac{b_2}{k_2} p}{\frac{b_1 b_2}{k_1 k_2} p^2 + (\frac{b_1}{k_1} + \frac{b_2}{k_1} + \frac{b_2}{k_2}) p + 1}$
电压校正 (II)	易位(变元素) $\frac{E_0}{E_{in}} = G(C_m, R_n)$	5.0  $\frac{E_0}{E_{in}} = \frac{C_2}{C_1 + C_2}$	5.17  $\frac{E_0}{E_{in}} = \frac{C_1 C_2 R_1 R_2 p^2 + (C_1 R_1 + C_2 R_2) p + 1}{C_1 C_2 R_1 R_2 p^2 + (C_1 R_1 + C_1 R_2 + C_2 R_2) p + 1}$	5.20  $\frac{E_0}{E_{in}} = \frac{C_2 R_2 p}{C_1 C_2 R_1 R_2 p^2 + (C_1 R_1 + C_1 R_2 + C_2 R_2) p + 1}$
速度补偿	易位-相似 $\frac{V_0}{V_{in}} = G(b_m, \frac{1}{k_n})$	6.0  $\frac{V_0}{V_{in}} = \frac{b_2}{b_1 + b_2}$	6.17  $\frac{V_0}{V_{in}} = \frac{\frac{b_1 b_2}{k_1 k_2} p^2 + (\frac{b_1}{k_1} + \frac{b_2}{k_2}) p + 1}{\frac{b_1 b_2}{k_1 k_2} p^2 + (\frac{b_1}{k_1} + \frac{b_1}{k_2} + \frac{b_2}{k_2}) p + 1}$	6.20  $\frac{V_0}{V_{in}} = \frac{\frac{b_2}{k_2} p}{\frac{b_1 b_2}{k_1 k_2} p^2 + (\frac{b_1}{k_1} + \frac{b_1}{k_2} + \frac{b_2}{k_2}) p + 1}$
电荷校正	易位-翻转 $\frac{Q_0}{Q_{in}} = G(C_m, R_n)$	7.0  $\frac{Q_0}{Q_{in}} = \frac{C_2}{C_1 + C_2}$	7.17  $\frac{Q_0}{Q_{in}} = \frac{C_1 C_2 R_1 R_2 p^2 + (C_1 R_1 + C_2 R_2) p + 1}{C_1 C_2 R_1 R_2 p^2 + (C_1 R_1 + C_1 R_2 + C_2 R_2) p + 1}$	7.20  $\frac{Q_0}{Q_{in}} = \frac{C_2 R_2 p}{C_1 C_2 R_1 R_2 p^2 + (C_1 R_1 + C_1 R_2 + C_2 R_2) p + 1}$
力补偿 (II)	易位-翻转-相似 $\frac{F_0}{F_{in}} = G(b_m, \frac{1}{k_n})$	8.0  $\frac{F_0}{F_{in}} = \frac{b_2}{b_1 + b_2}$	8.17  $\frac{F_0}{F_{in}} = \frac{\frac{b_1 b_2}{k_1 k_2} p^2 + (\frac{b_1}{k_1} + \frac{b_2}{k_2}) p + 1}{\frac{b_1 b_2}{k_1 k_2} p^2 + (\frac{b_1}{k_1} + \frac{b_1}{k_2} + \frac{b_2}{k_2}) p + 1}$	8.20  $\frac{F_0}{F_{in}} = \frac{\frac{b_2}{k_2} p}{\frac{b_1 b_2}{k_1 k_2} p^2 + (\frac{b_1}{k_1} + \frac{b_1}{k_2} + \frac{b_2}{k_2}) p + 1}$

位、翻转加相似变换,即转为 II 型力补偿装置,其传递函数 $G_2(p)$ 等于原传递函数中 R_m 、 C_n 的每一项分别被 b_m 和 $\frac{1}{k_n}$ 所取代,即

$$G_2(p) = G_1\left(b_m, \frac{1}{k_n}\right) \quad (17)$$

两种力补偿装置的选择要根据信号源及负载性质来确定。

八种电的与机械的补偿校正网络,以文中引出的三个基本变换(易位、翻转、相似)为纽带,组成一个完整的 RC-SD 网络体系,归总在表 4 中。八条变换法则的应用示例见表 5 (法则 1 见表 3)。

五、结 论

1. 所有对运动响应量(电流、电荷及位移、速度)进行补偿校正的网络都是由它们各自的导纳函数所引出;所有对激励量(电压、力)进行补偿校正的网络都是由激励量所导致的运动响应量的阻抗函数所引出。

同一响应量(电流、电荷、位移、速度)的阻抗与导纳函数所引出的一对(电压-电流;电压-电荷;力-位移;力-速度)补偿校正网络之间的转换都是翻转变换(见表 4)。网络的翻转变换只发生被校量的改变,而传递函数不变。

2. 从阻抗或导纳的分类(电流、电荷阻抗或导纳;位移、速度阻抗或导纳)所引出的对应网络(I-II 型电压校正网络;电流-电荷校正网络;I-II 型力补偿器;位移-速度补偿装置)之间都是变元素易位变换(见表 4)。变换前、后传递函数相似,且只发生 R 与 C ; b 与 $\frac{1}{k}$ 的参数对换。

由于 $Z_q = pZ_i$ 、 $Y_i = pY_q$ 、 $Z_x = pZ_v$ 、 $Y_v = pY_x$ (见表 1), 所以用阻抗法求上述对应网络的传递函数可以不计阻抗(或导纳)的分类来计算。例如,电荷阻抗引出的 II 型电压校正网络可以用电流阻抗法计算;速度导纳引出的速度补偿装置可以用位移导纳函数来求得,等等。

3. 网络的相似变换只适用于表 1 中 ①—②、③—④、⑤—⑥、⑦—⑧ 完全相似支路所构成的电-机网络之间的转换(见表 4)。变换前后网络传递函数完全相似,且都是 $R_m - \frac{1}{k_m}$ 、 $C_n - b_n$ 的置换关系。由法则 2 给出的 I 型电压与位移补偿校正网络之间的相似变换关系,立即可以发现文献 [2] 机械补偿器中 ± 40 db/dec. 引前和滞后网络的差错,并非常容易地填补文献 [5] 的空缺。

所有的机械补偿装置都可以通过相似变换转为电网络来分析;而所有的电流或电荷校正网络,都可采用翻转变换转为 I 或 II 型电压校正网络通过电流阻抗法来计算。翻转变换传递函数不变,相似变换只是 $R_m - \frac{1}{k_m}$ 、 $C_n - b_n$ 的代数置换。

4. I、II 型电校正网络之间的区别在于前者电压的建立依赖于电流,而后者电压的产生是依靠电荷。阶跃输入稳态时,前者电流的变化率为零(电流的稳态值可以是零,亦可

表 6 RC-SD 补偿校正网络变换关系对照表

分类	-20 db/dec. 滞后网络			-40 db/dec. 滞后网络			滞后-引前网络
特征曲线							
电压 (I)	1.1	1.3	1.5	1.9	1.11	1.13	1.18
电流	3.1	3.3	3.5	3.9	3.11	3.13	3.18
位移	2.1	2.3	2.5	2.9	2.11	2.13	2.18
力 (I)	4.1	4.3	4.5	4.9	4.11	4.13	4.18
电压 (II)	5.1	5.3	5.5	5.9	5.11	5.13	5.18
电荷	7.1	7.3	7.5	7.9	7.11	7.13	7.18
速度	6.1	6.3	6.5	6.9	6.11	6.13	6.18
力 (II)	8.1	8.3	8.5	8.9	8.11	8.13	8.18

表 6 RC-SD 补偿校正网络变换关系对照表(续)

分类	20 db/dec. 引前网络			40 db/dec. 滞后网络			引前-滞后网络
特征曲线							
电压 (I)	1.2	1.4	1.6	1.10	1.12	1.14	1.19
电流	3.2	3.4	3.6	3.10	3.12	3.14	3.19
位移	2.2	2.4	2.6	2.10	2.12	2.14	2.19
力 (I)	4.2	4.4	4.6	4.10	4.12	4.14	4.19
电压 (II)	5.2	5.4	5.6	5.10	5.12	5.14	5.19
电荷	7.2	7.4	7.6	7.10	7.12	7.14	7.19
速度	6.2	6.4	6.6	6.10	6.12	6.16	6.19
力 (II)	8.2	8.4	8.6	8.10	8.12	8.14	8.19

以是常值),而后者是电荷的变化率(电流)为零(电荷可以是零或常值)。

位移及速度补偿装置与此类似,前者力的传递及控制关系只依赖于位移,而后者离开速度就失去输出-输入之间的控制关系;此外,阶跃输入下输出量的稳态值可以不同,前者只能建立位移的稳态值,而后者允许有恒速输出;再者它们对信号源及负荷性质的要求也不相同,所以位移和速度补偿装置是不能混同的。

但是,由于速度补偿装置的输出速度对输入速度之比在初始条件为零时与输出位移对输入位移之比等同,速度补偿装置采用位移导纳或速度导纳函数法计算得到的传递函数完全一样,这就容易使人们将两者混同,例如文献[2]、[5]、[8]、[10]、[11]、[13]等都将速度补偿装置混为位移补偿装置。

5. 本文采用阻抗(导纳)函数的类比以及通过三种变换达到网络传递函数数学模型的统一是对模拟理论的丰富和发展;八条法则的提出及 RC-SD 网络体系的建立,对其它学术领域的网络分析计算也将有重要参考价值。

参 考 文 献

- [1] Harold Chestnut, Frequency Characteristics for Servomechanisms, *General Electric Review*, Dec. (1947), p. 38—44.
- [2] Grabbe, E. M., Simon Ramo, and Wooldridge, D. E., Handbook of Automation, Computation and Control, Vol. 1, John Wiley and Sons, Inc., (1958), p. 23-42—23-44.
- [3] Langill, A. W., Jr., Automatic Control Systems Engineering, Vol. 2, Prentice-Hall, Inc., (1965), p. 750—755.
- [4] Caldwell, W. I., 12 Ways of Generating Control Functions Pneumatically, *Control Engg.* 1 (Sept. 1954) p. 58—63.
- [5] Gibson, J. E., 14 Ways to Generate Control Functions Mechanically, *Control Engg.* 2 (May 1955) p. 65—69.
- [6] Blanton, J. W., and Gray, S. A., Mechanical Feedback Improves Hydraulic Servovalves, *Control Engg.* 6 (July 1959), p. 111—113.
- [7] Вершинин, Н. И., Верцайзер, А. Л., и Яховлев, В. М., Автоматическое Регулирование, Издательство «Энергия», (1965), стр. 50, 112.
- [8] Burrows, C. R., Fluid Power Servomechanisms, VNR Company, London, 1972, p. 112, Compensation-Hydraulic Servomechanisms.
- [9] Robert K. Heffley, Wayne F. Jewell, Aircraft Handling Qualities Data, F-4C Longitudinal Fell System, NASA-CR 2144 (1972), p. 65—67.
- [10] Winfried Oppelt, Kleines Handbuch Technischer Regelvorgänge, 3. Auflage, Verlag Chemie GmbH Weinheim/Bergstr. (1960), S. 74, 79, 119, 442.
- [11] Goldberg, J. H., Automatic Controls, Principles of Systems Dynamics, Boston, Allyn and Bacon, Inc., (1964), p. 300, 358.
- [12] Бесекерский, В. А., Динамический Синтез Систем Автоматического Регулирования, Издательство «Наука», Москва, (1970).
В. А. 别塞克尔斯著, 冯明义译, 自动调节系统的动态综合, 科学出版社, 1977, p. 85.
- [13] Katsuhiko Ogata, Modern Control Engineering, Prentice-Hall, (1970).
绪方胜彦著, 卢伯英译, 现代控制工程, 科学出版社, (1976), p. 58, 369, 378.
- [14] Brockhaus F. A., Brockhaus abe Automatisierung, Verlag Leipzig, 1975, S. 499.
- [15] Prokes, J., Hydraulic Mechanisms in Automation, New York, Elsevier, 1977, p. 277.
- [16] Dale Pennington, Charge Amplifier Application, *Instruments and Control Systems*, 38, No. 1, (1965), p. 81.

RC CORRECTIVE NETWORK AND SD COMPENSATIVE UNIT

SHAO RONG-SHI

(The Design Department, the Shenyang Aircraft Corporation)

ABSTRACT

According to the classification of mechanical impedance and the requirements for the advance of electrical engineering, it is proposed that electrical impedances are classified into current impedance (admittance) and charge impedance (admittance). By studying the contradictions among eight functions which are the impedance and the admittance functions of current and charge in RC branches, and of displacement and velocity in SD (spring-dashpot) branches, and by using the signal flow graph topology, the author presented some network transformation methods of TRANSPOSITION, INVERSION, SIMILARITY and their combinations, and established EIGHT TRANSFORMATION RULES. The transformation relationships of configurations among voltage, current, charge, force, displacement and velocity corrective-compensative networks, as well as the algebraic substitution relationships of their transfer functions have been given by the EIGHT RULES proposed in this paper. Then a complete system of RC and SD networks is composed. Shortcomings involved in some references are also pointed out. The analogy of the impedance (admittance) functions and the proposition of the THREE TRANSFORMATIONS and the EIGHT RULES enriched the simulation theory, and are also valuable for the network analysis in other scientific and technical domains.