

# 复合桥路双参量自动择一变换电路原理

姜嘉可

(长沙冶金工业学校)

## 摘 要

本文提出由传感器和四臂桥式电路组成的复合桥路。讨论了双参量自动择一变换原理，并在附录中给出了推导过程。复合桥路采用双对角线复合输出，可以自动选择被测参量中较大和较小者。文中介绍了一个三相交流电动机过载-不平衡保护的热敏复合电桥的实例，已在工业中应用。

## 一、引 言

桥式电路广泛用于单参量的检测系统，但在工业控制和电器保护中常需要同时对两个或两个以上的参量进行检测，采用复合桥路具有明显的优点。该电路可同时监测参量的不平衡度，以满足有关控制要求或动作差动保护。

本电路的典型应用是在工业控制电路中自动检测三相中电流较大相。三相电流不平衡度检测可用于过流、过载和三相不平衡保护，还可用于功率控制。对于其它工业控制参量，只要有适当的传感元件将被测参量的变化转变为电阻值的变化，就可采用本电路。

## 二、电 路 组 成

复合桥路双参量自动择一变换电路采用电桥两对角线  $ab$  和  $cd$  中电流之和或差的复合输出法。图 1(a) 为和输出电路，图 1(b) 为差输出电路。

被测(控)变量通过传感元件反映为桥臂电阻  $R_1, R_2, R_3, R_4$  的变化。在电路中，桥臂电阻的变化作为输入量，相对桥臂  $(R_1, R_4)$  和  $(R_2, R_3)$  各作为一对参量桥臂，可以分别代表两个变量(这时  $R_1 = R_4, R_2 = R_3$ )，也可以用一对参量桥臂表示相关联的两个变量，以代表两变量的参量桥臂电阻的乘积作为输入量，如  $R_1R_4$  或  $R_2R_3$ ，参量的大小可以采用标么值比较。

图 1 中，含有电源  $E$  的对角线  $ab$  为主对角线，不含电源的对角线  $cd$  为校正对角线。输出电流  $I_{01}$  和  $I_{02}$  流经  $W_{01}$  和  $W_{02}$ ， $W_{01}$  和  $W_{02}$  为磁放大器或电磁继电器以及其它磁性元件的控制绕组或线圈，电流流入的方向决定了总控制磁势为  $I_{01}W_{01}$  与  $I_{02}W_{02}$  的和或差。图 1(a) 的输出电路磁势为  $I_{01}W_{01} + I_{02}W_{02}$ ，图 1(b) 输出电路的磁势为  $I_{01}W_{01} -$

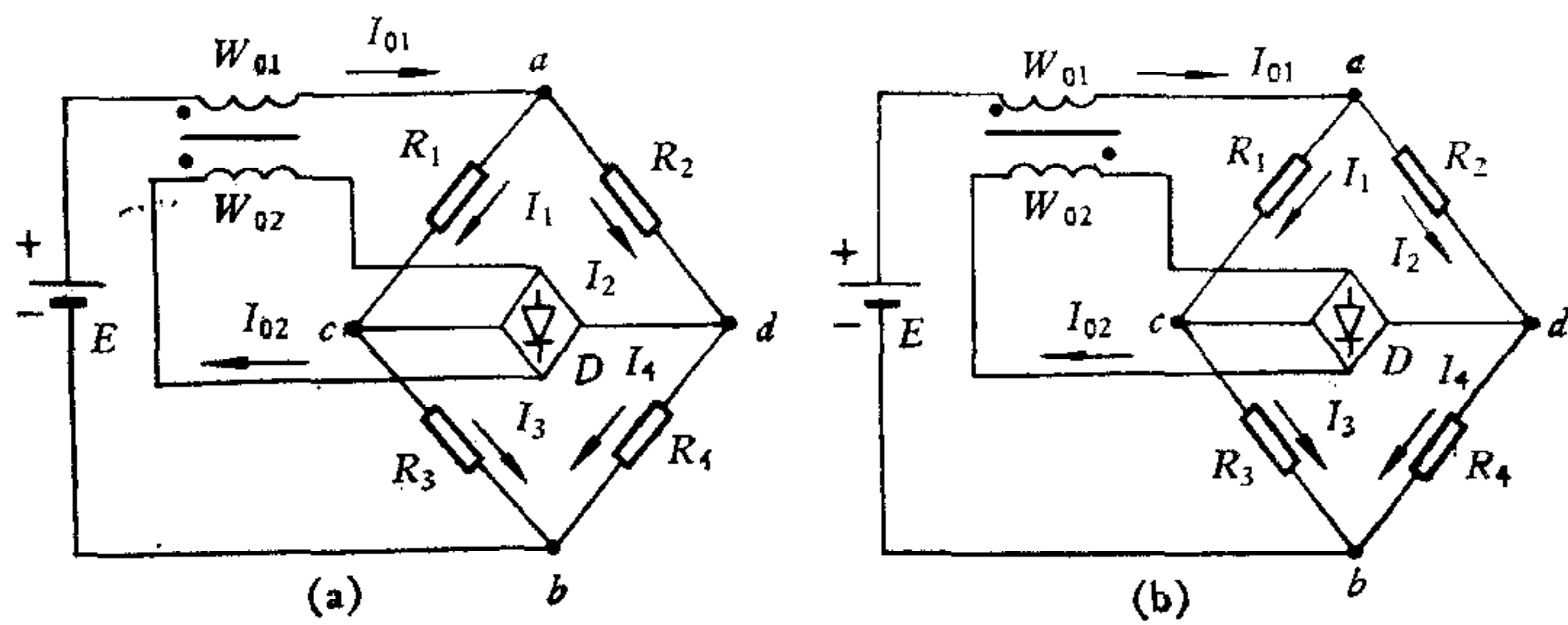


图1 复合桥参量变换电路

(a) 和输出电路, (b) 差输出电路

$I_{02}W_{02}$ . 电路中绕组匝数  $W_{01} = W_{02}$ , 绕组电阻  $R_{01} = R_{02}$ , 磁势与对角线电流的和或差成正比.

$cd$  对角线电流  $I_{02}$  的方向随  $R_1R_4$  与  $R_2R_3$  的相对大小而改变.  $I_{02}$  经过整流器后流入  $W_{02}$  的方向是不变的. 因此,  $W_{01}$  与  $W_{02}$  的接线确定以后, 电路输出恒保持对角线电流(绝对值)之和或差.

### 三、复合桥路参量变换特性与计算

#### 1. 参量变换特性

复合桥路具有双参量自动择一变换特性.

复合桥路参量变换定理: 复合桥一对角线接入直流电源  $E$ , 若两对参量桥臂 ( $R_1, R_4$ ) 和 ( $R_2, R_3$ ) 中,  $R_1 = R_4 = R'$ ,  $R_2 = R_3 = R''$ , 两对角线电阻  $R_{01} = R_{02} = R_0$ , 则对角线电流  $I_{01}$  与  $I_{02}$  (绝对值) 之和只与参量电阻  $R'$  和  $R''$  中之较小者有关,  $I_{01}$  与  $I_{02}$  之差只与参量电阻  $R'$  和  $R''$  中之较大者有关. 下式恒成立:

$$I_{01} + I_{02} = \frac{E}{R_0 + R_S}, \quad (1)$$

$$I_{01} - I_{02} = \frac{E}{R_0 + R_L}. \quad (2)$$

式中  $R_S$  和  $R_L$  分别为  $R'$  和  $R''$  中之较小和较大者. 因此, 复合桥的输出在接线确定后, 只与两对参量桥臂 ( $R_1 = R_4 = R'$ ) 和 ( $R_2 = R_3 = R''$ ) 中之一对有关, 而与另一对的具体数值无关, 其自动选择变换决定于  $R'$  和  $R''$  的相对大小. 在参量变化过程中保持这一规律(定理的证明见附录(1)).

复合桥路参量变换定理的推论(证明见附录(3)): 若复合桥中有一对参量桥臂的电阻不相等, 如  $R_1 \neq R_4$  (或  $R_2 \neq R_3$ ), 则下列情况成立:

当  $R_1R_4 > R''^2$  时,

$$I_{01} + I_{02} = \frac{E}{R_0 + R''}. \quad (\text{与 } R_1, R_4 \text{ 无关}) \quad (3)$$

当  $R_1R_4 < R''^2$  时,

$$I_{01} - I_{02} = \frac{E}{R_0 + R''}. \quad (\text{与 } R_1, R_4 \text{ 无关}) \quad (4)$$

当  $R_2 R_3 > R'^2$  时,

$$I_{01} + I_{02} = \frac{E}{R_0 + R'} \quad (\text{与 } R_2, R_3 \text{ 无关}) \quad (5)$$

当  $R_2 R_3 < R'^2$  时,

$$I_{01} - I_{02} = \frac{E}{R_0 + R'} \quad (\text{与 } R_2, R_3 \text{ 无关}) \quad (6)$$

## 2. 工作特性计算

### 1) 双参量自动择一变换特性计算

根据参量变换定理作出如图 2 的特性曲线。作曲线的条件为: 电源电压  $E = 24$

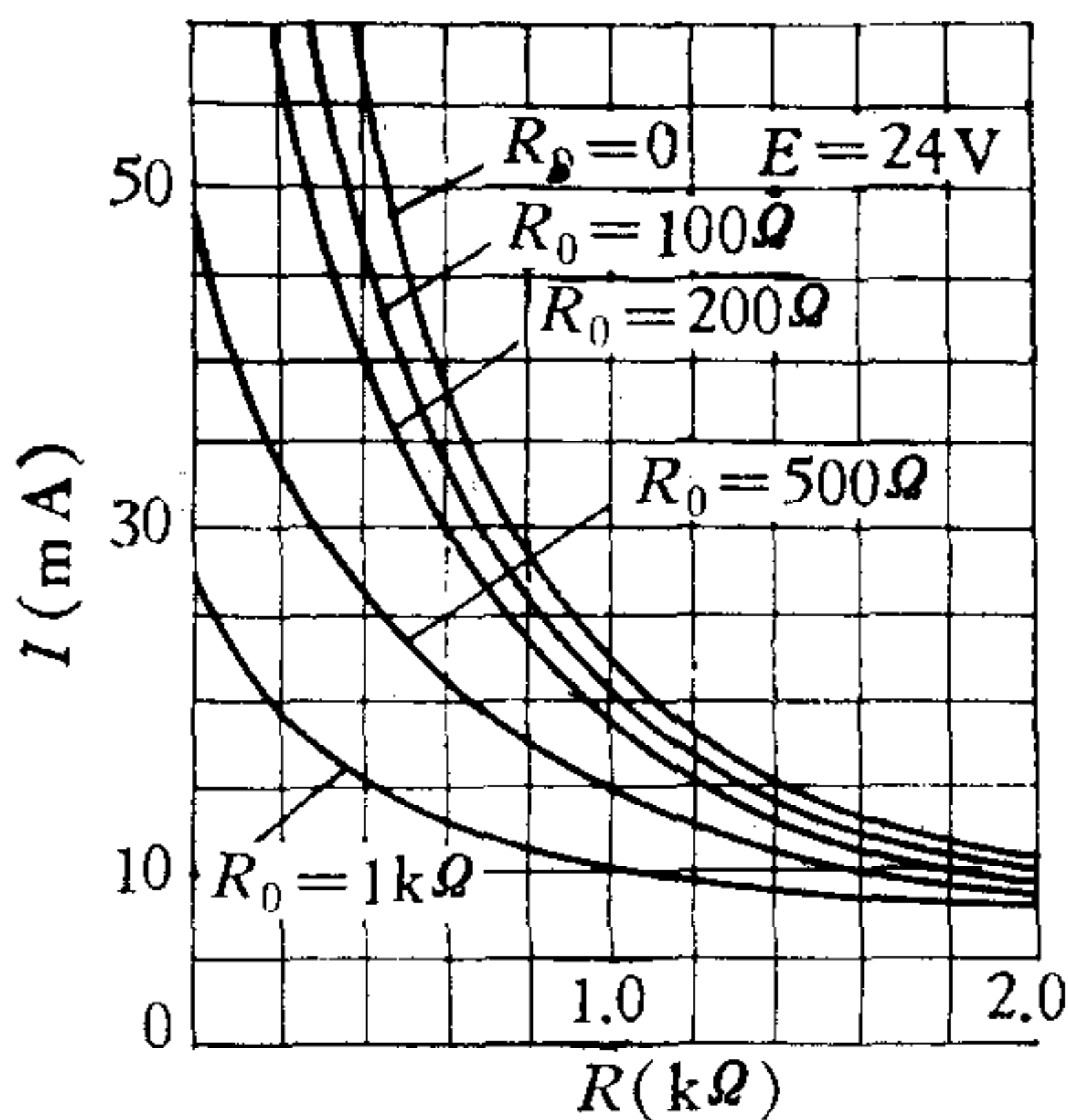


图 2 复合桥参量变换特性曲线

1. 纵坐标为和输出 ( $I_{01} + I_{02}$ ) 时, 横坐标表示任意时刻  $R'$  和  $R''$  中之较小者  $R_S$ ;
2. 纵坐标为差输出 ( $I_{01} - I_{02}$ ) 时, 横坐标表示任意时刻  $R'$  和  $R''$  中之较大者  $R_L$ .

伏, 对角线电阻  $R_0 = 0, 100, 200, 500, 1000$  欧。实验结果表明,  $cd$  对角线接入正向压降和正向电阻小的二极管 (2AP14, 2AP15) 时, 与计算结果非常相近。工作特性在参数选择时应根据传感器的特性综合考虑, 避开不灵敏区。

### 2) 参量变化自动截止特性计算

在图 1 所示的复合桥路中, 确定一对参量桥臂电阻作为给定临界值 (上限或下限), 该参量 (如电流、电压、温度等) 变化时, 参量桥臂传感器电阻随之改变, 这就相应调整了给定临界值的大小。另一对参量桥臂电阻反映被测(控)变量。

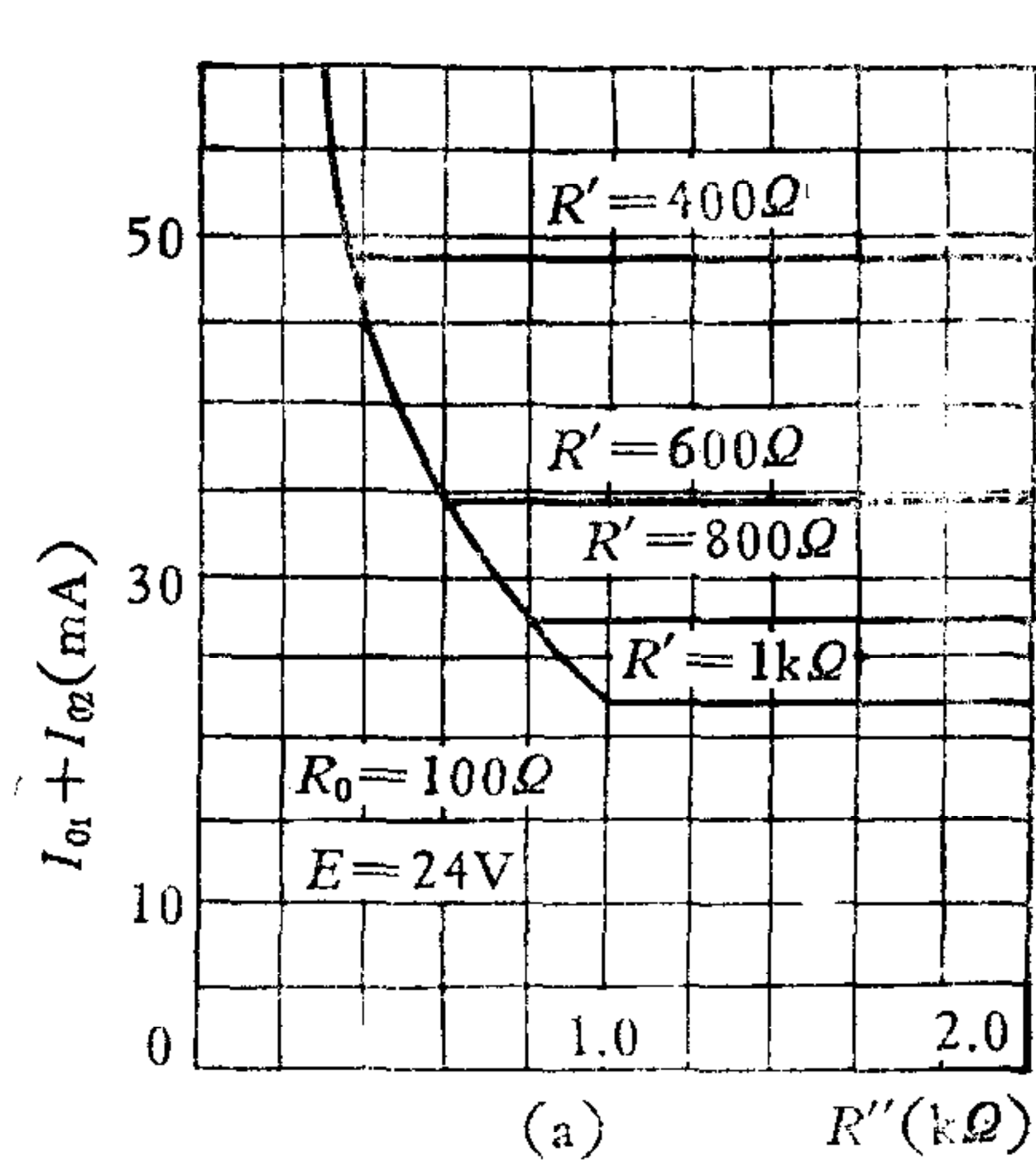
设给定临界值的参量桥臂为  $R_1 = R_4 = R'$ , 被测(控)参量桥臂为  $R_2$  和  $R_3$ , 在  $R_2, R_3$  反映同一个变量时, 采用图 1(a), (b) 的和输出电路及差输出电

路, 可以分别获得与图 3 和图 4 类似的特性曲线。特性曲线皆分为两段, 一段为变化段, 起控制作用, 另一段为水平段, 起截止作用。按式 (1), (2) 进行计算。获得的陡升和下降函数截止特性可用于控制中。

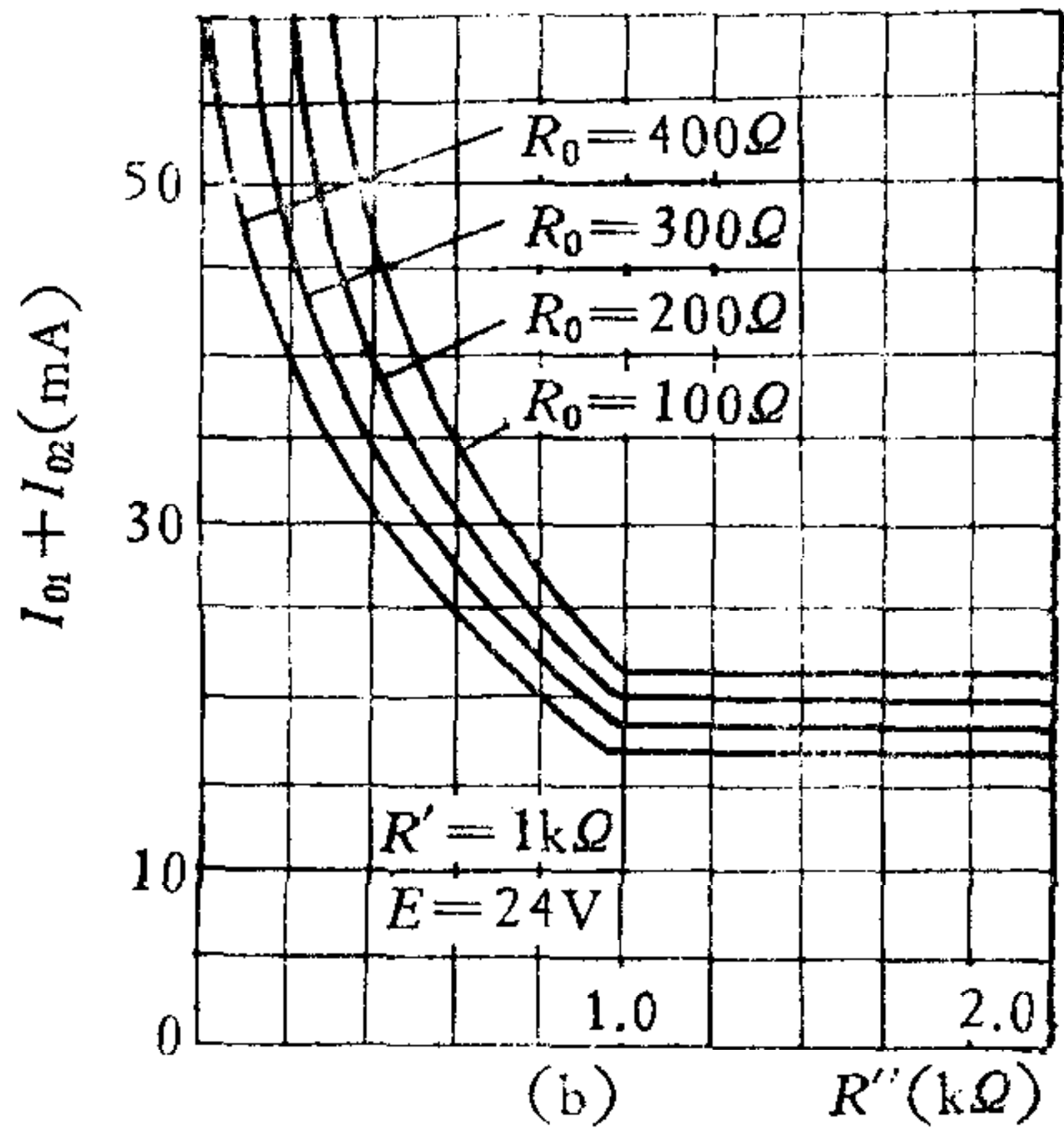
下面简要分析  $R_2$  和  $R_3$  分别反映两个相关联参量时的特性。根据推论, 反映两参量  $X_A$  和  $X_B$  (例如电压和电流) 变化的桥臂电阻  $R_2$  和  $R_3$  的乘积与给定临界值的桥臂电阻  $R_1 = R_4 = R'$  的平方符合推论中的条件时, 曲线水平段按推论中公式进行计算。特性曲线亦分为两段, 如图 5 (a), (b) 所示。

在以  $\sqrt{R_2 R_3}$  作横坐标变量时, 曲线段不再保持单值输出。当  $R_2$  与  $R_3$  为不同的组合 (在几何平均值  $\sqrt{R_2 R_3}$  相等时), 输出稍有不同。当  $m = R_3 / R_2 = 0.33 - 3$  时, 输出变化限于曲线的阴影部分。这在工程控制中常是允许的, 因此, 可以近似用  $\sqrt{R_2 R_3}$  作横坐标变量, 其计算见附录 (3)。  $R_2$  和  $R_3$  反映两个关联变量, 设计计算中应以标么值考虑参数的选择。

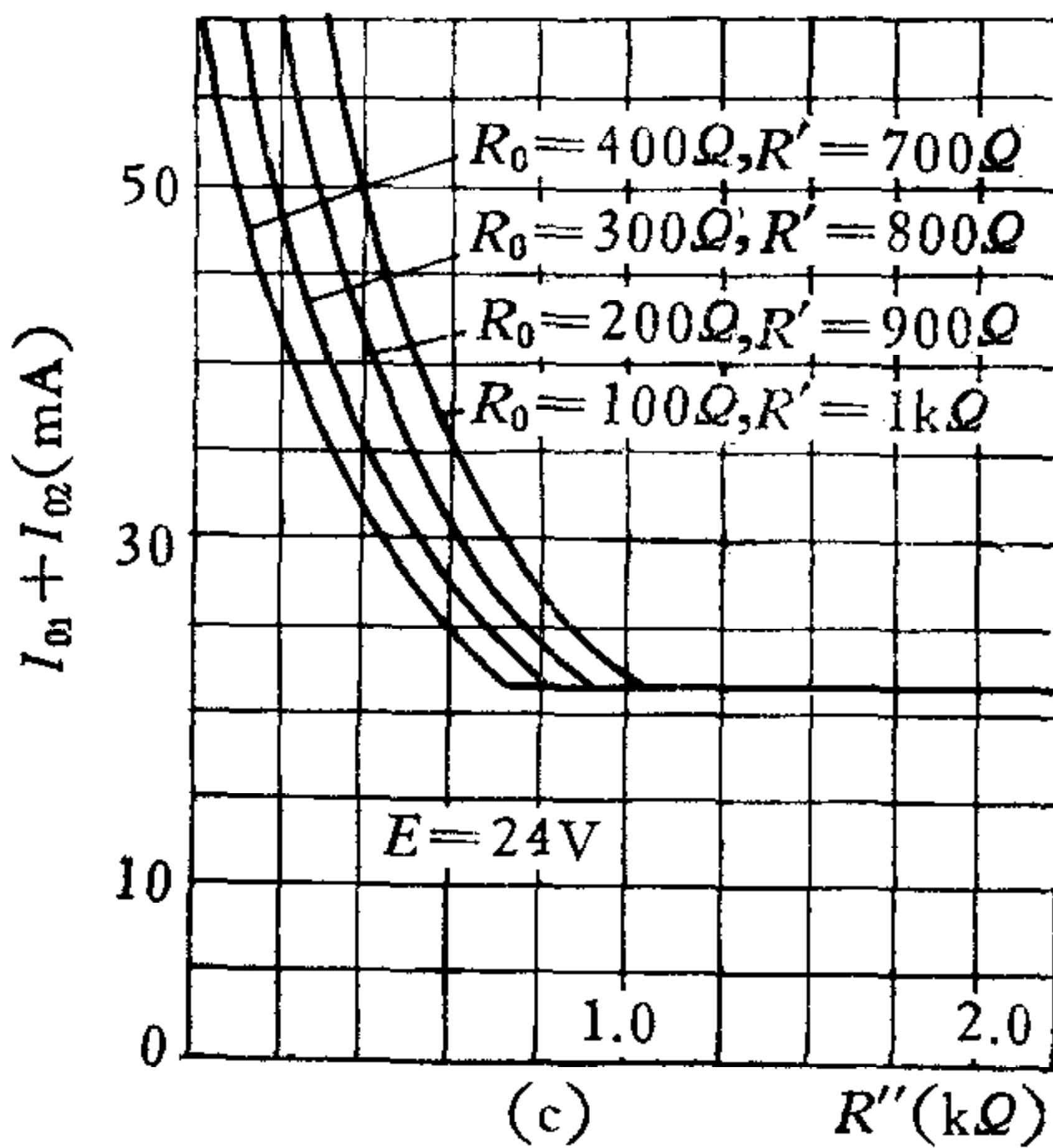
由于  $m = 0.33 - 3$  时以  $\sqrt{R_2 R_3}$  作为参量电阻导致的输出误差很小, 因此在  $R_2, R_3$  反映同一个变量, 且根据式 (1) 和 (2) 计算时, 当实际电路传感器电阻稍有误差, 不能严格保证相对参量桥臂电阻  $R_2$  和  $R_3$  相等, 这时采用  $R'' = \sqrt{R_2 R_3}$  (或  $R' = \sqrt{R_1 R_4}$ ) 为参量电阻, 理论计算和实测皆表明是可以的。



(a)  $R''$  (kΩ)

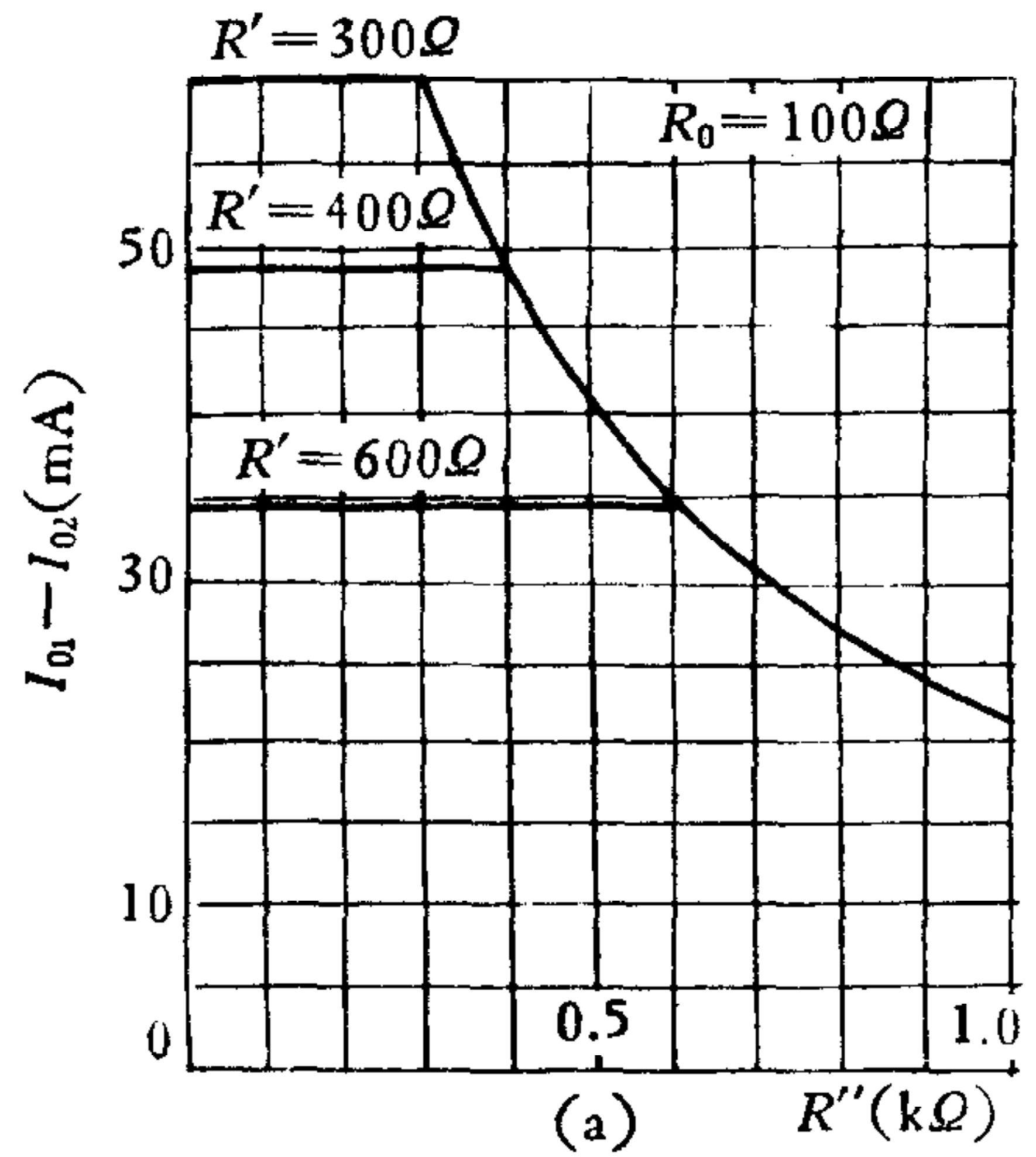


(b)  $R''$  (kΩ)

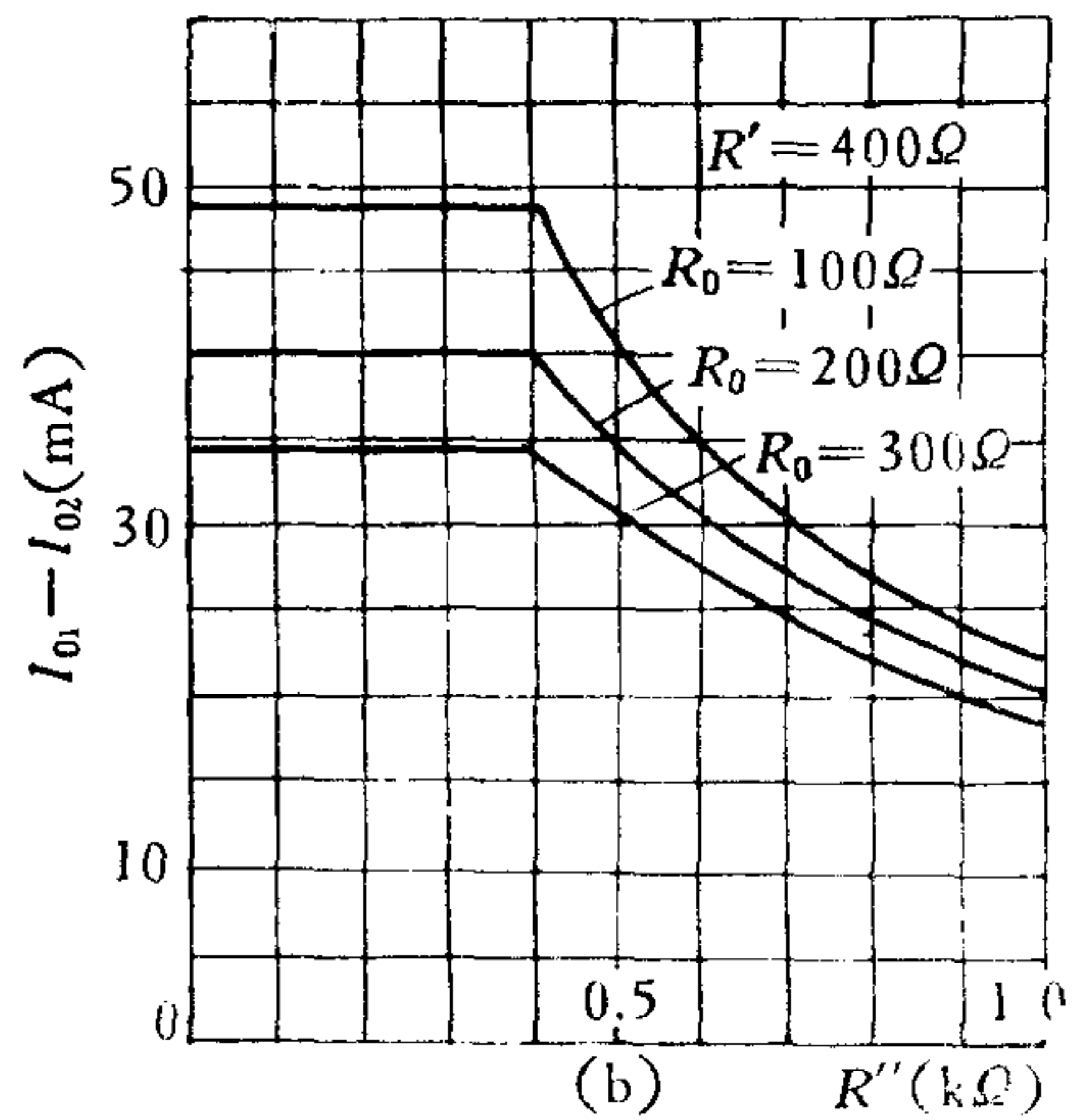


(c)  $R''$  (kΩ)

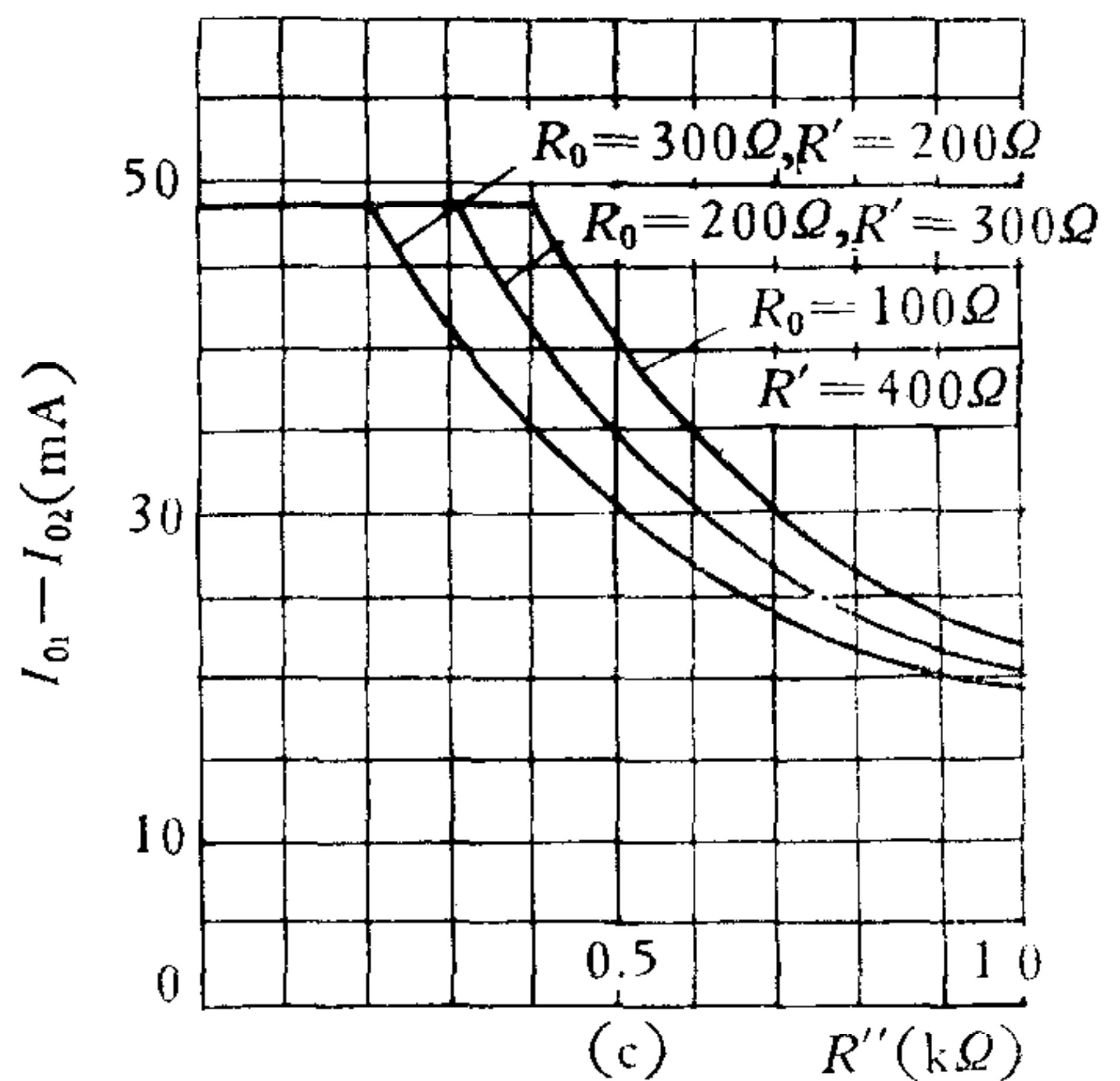
图3 和输出电路一对参量桥臂电阻给定时的特性曲线  
 (a)  $R_0 = 100\Omega$ ,  $R' = 400-1000\Omega$  时的特性曲线。  
 (b)  $R' = 1000\Omega$ ,  $R_0 = 100-400\Omega$  时的特性曲线。  
 (c)  $R_0 = 400-100\Omega$ ,  $R' = 700-1000\Omega$ , 且  $R_0 + R' = 1100\Omega$  时的特性曲线。



(a)  $R''$  (kΩ)

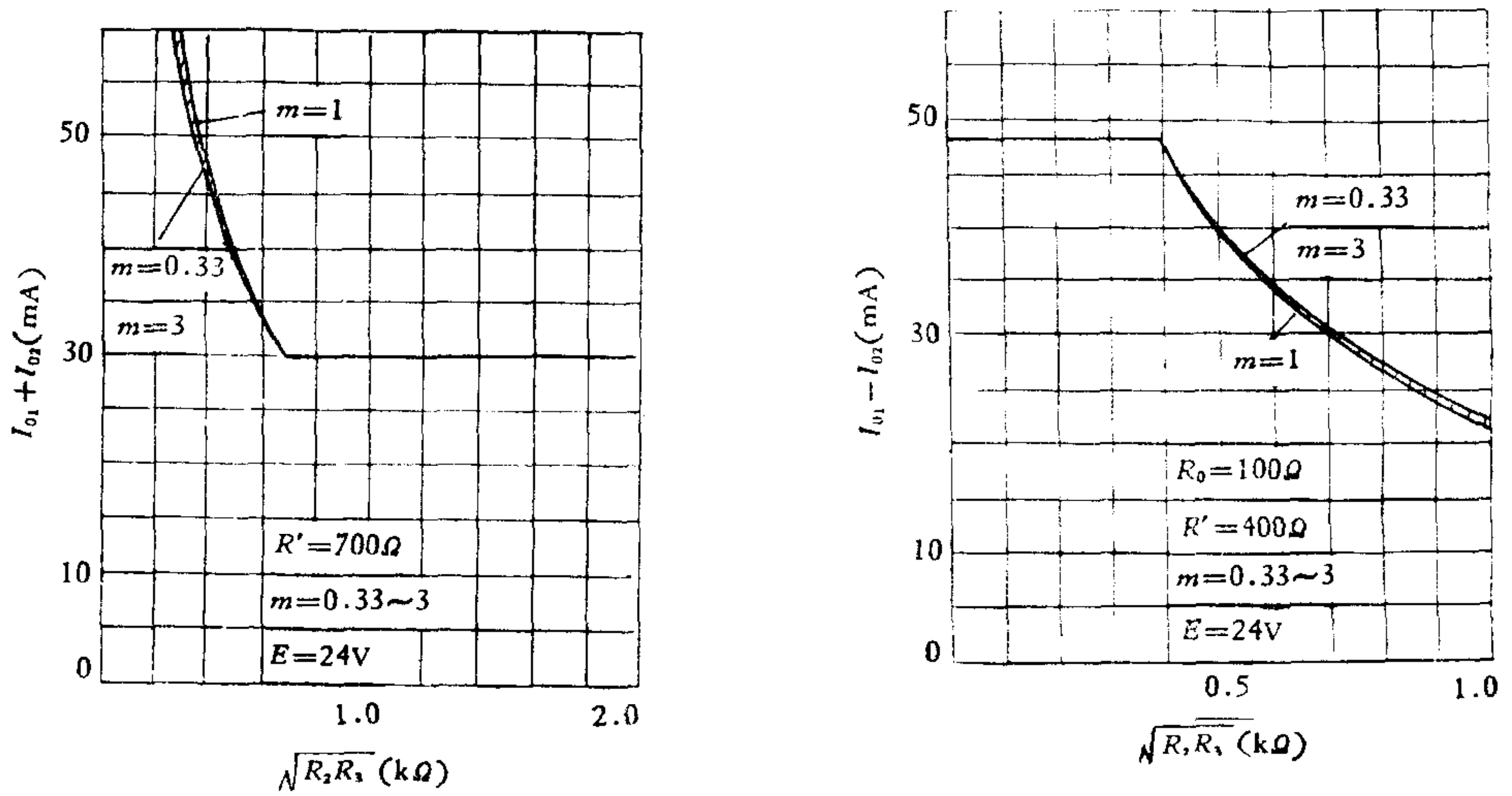


(b)  $R''$  (kΩ)



(c)  $R''$  (kΩ)

图4 差输出电路一对参量桥臂电阻给定时的特性曲线  
 (a)  $R_0 = 100\Omega$ ,  $R' = 300-600\Omega$  时的特性曲线。  
 (b)  $R' = 400\Omega$ ,  $R_0 = 100-300\Omega$  时的特性曲线。  
 (c)  $R_0 = 300-100\Omega$ ,  $R' = 200-400\Omega$ , 且  $R_0 + R' = 500\Omega$  时的特性曲线。



(a) 和输出电路

(b) 差输出电路

图 5

$m = R_3/R_2 = 0.33-3$  时, 以  $\sqrt{R_2R_3}$  作横坐标的特性。(阴影区为输出变动范围)

### 四、电路应用举例

图 6 为三相交流电动机控制中采用的复合桥过载-不平衡保护继电器, 已生产五十多

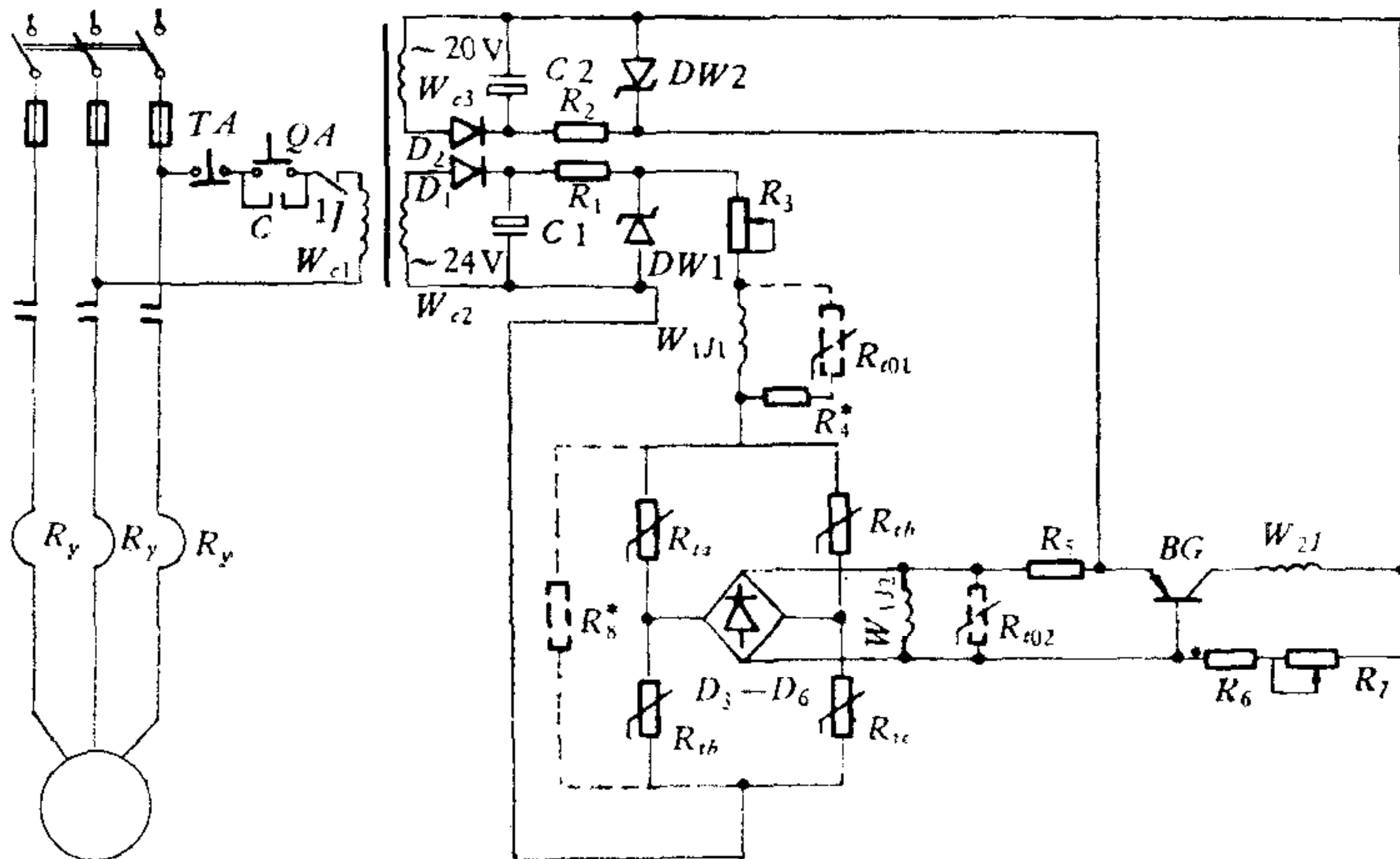


图 6 三相交流电动机热敏复合桥过载-不平衡(差动)保护电路

- $D_1, D_2$  为 2CP4;
- $D_3-D_6$  为 2AP14;
- $DW_1, DW_2$  为 2CW21;
- $C_1, C_2$  为  $50 \mu/50V$ ;
- $R_1, R_2$  为  $200-400 \Omega/1W$ ;
- $R_3$  为  $330 \Omega/1/2W$ ;
- $R_4$  为  $100-200 \Omega/1/2W$ ;
- $R_5$  为  $2.7 k\Omega/1/2W$ ;
- $R_6$  为  $75-390 k\Omega$ ;
- $R_7$  为  $470 k\Omega/1/2W$ ;
- $R_8^*$  为  $3 k\Omega-4.7 k\Omega$ ;
- BG 为 3 Ax31;
- $W_1J_1$  为  $6500 T, 550 \Omega$ ;
- $W_1J_2$  为  $6500 T, 600 \Omega$ ;
- $W_2J$  略。
- $R_y$  为热元件。
- $R_{ta}, R_{tb}, R_{tc}, R_{t01}, R_{t02}$  为热敏电阻。

台投入使用。

图中  $R_{1a}$ ,  $R_{1b}$ ,  $R_{1c}$  分别装于保护继电器三相热元件上, 热元件模拟三相绕组温升。 $W_{1J-1}$ ,  $W_{1J-2}$  为双线圈电磁过载继电器的两个线圈。根据复合桥路参量变换定理, 其合成磁势反映温度最高相的温度。在环境温度由 0—45°C 变化时,  $R_{101}$ ,  $R_{102}$  用作温度补偿,  $R_8$  为调节电阻, 适当选择参数, 可使合成磁势近似反映电机绕组温升的状况, 并能在环境温度高于 35°C 时限制电机的过载系数。 $W_{2J}$  为三相不平衡报警(或跳开)继电器线圈, 在三相电流不平衡(80% 负载)达到 30% 时继电器动作, 以保护三相电动机。本继电器对电动机三相均衡过载、断相运行过载起保护作用, 结构简单, 调整方便, 抗干扰性能与普通电磁继电器相近, 将扩大生产, 在三相交流电动机控制电路中推广使用。

综上所述, 复合桥路参量自动择一变换电路原理在工业控制中可以简单可靠地解决某些重要的控制和护保问题, 随着热敏、磁敏、应变片和其它一系列敏感电阻元件的发展, 应用范围将不断扩大。

## 附 录

### 1. 复合桥路参量变换定理公式推导

当  $R_1R_4 < R_2R_3$  时, 实际电流方向如图 7 所示。当  $R_1R_4 > R_2R_3$  时, 电流  $I_{02}$  改变方向, 其余支路电流方向不变。按实际电流方向列方程于下:

$$R_1I_1 \pm R_0I_{02} = R_2I_2 \quad (7)$$

$$R_3I_3 = \pm R_0I_{02} + R_4I_4 \quad (8)$$

$$E = R_0I_{01} + R_1I_1 + R_3I_3 \quad (9)$$

$$I_1 = I_3 \pm I_{02} \quad (10)$$

$$I_4 = I_2 \pm I_{02} \quad (11)$$

$$I_{01} = I_1 + I_2 \quad (12)$$

式中当  $R_1R_4 < R_2R_3$  时,  $I_{02}$  前取“+”号; 当  $R_1R_4 > R_2R_3$  时,  $I_{02}$  前取“-”号。

解: 将式(11)代入(8)得  $R_3I_3 = R_4I_2 \pm (R_0 + R_4)I_{02}$ , (13)

将式(10)代入(7)得  $R_1I_3 \pm (R_0 + R_1)I_{02} = R_2I_2$ , (14)

将式(10)代入(9)得  $E = (R_1 + R_3)I_3 + R_0I_{01} \pm R_1I_{02}$ , (15)

将式(10)代入(12)得  $I_3 = I_{01} - I_2 \mp I_{02}$ , (16)

将式(16)代入(13)得  $I_2(R_3 + R_4) = R_3I_{01} \mp (R_0 + R_3 + R_4)I_{02}$ , (17)

将式(16)代入(14)得  $I_2(R_1 + R_2) = R_1I_{01} \pm R_0I_{02}$ , (18)

将式(16)代入(15)得  $(R_0 + R_1 + R_3)I_{01} \mp R_3I_{02} - (R_1 + R_3)I_2 = E$ . (19)

由式(17), (18), (19)消去  $I_2$  得

$$\left[ \frac{R_3 + R_4}{R_1 + R_2} R_1 - R_3 \right] I_{01} \pm \left[ \frac{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}{R_1 + R_2} R_0 + R_3 + R_4 \right] I_{02} = 0, \quad (20)$$

$$\left[ \frac{R_2 - R_3}{R_1 + R_2} R_1 + R_0 + R_3 \right] I_{01} \mp \left[ \frac{R_1 + R_3}{R_1 + R_2} R_0 + R_3 \right] I_{02} = E. \quad (21)$$

由式(20)加式(21)得

$$\left[ \frac{R_2 + R_4}{R_1 + R_2} R_1 + R_0 \right] I_{01} \pm \left[ \frac{R_2 + R_4}{R_1 + R_2} R_0 + R_4 \right] I_{02} = E. \quad (22)$$

按定理条件  $R_1 = R_4 = R'$  和  $R_2 = R_3 = R''$  代入式(21), (22)得

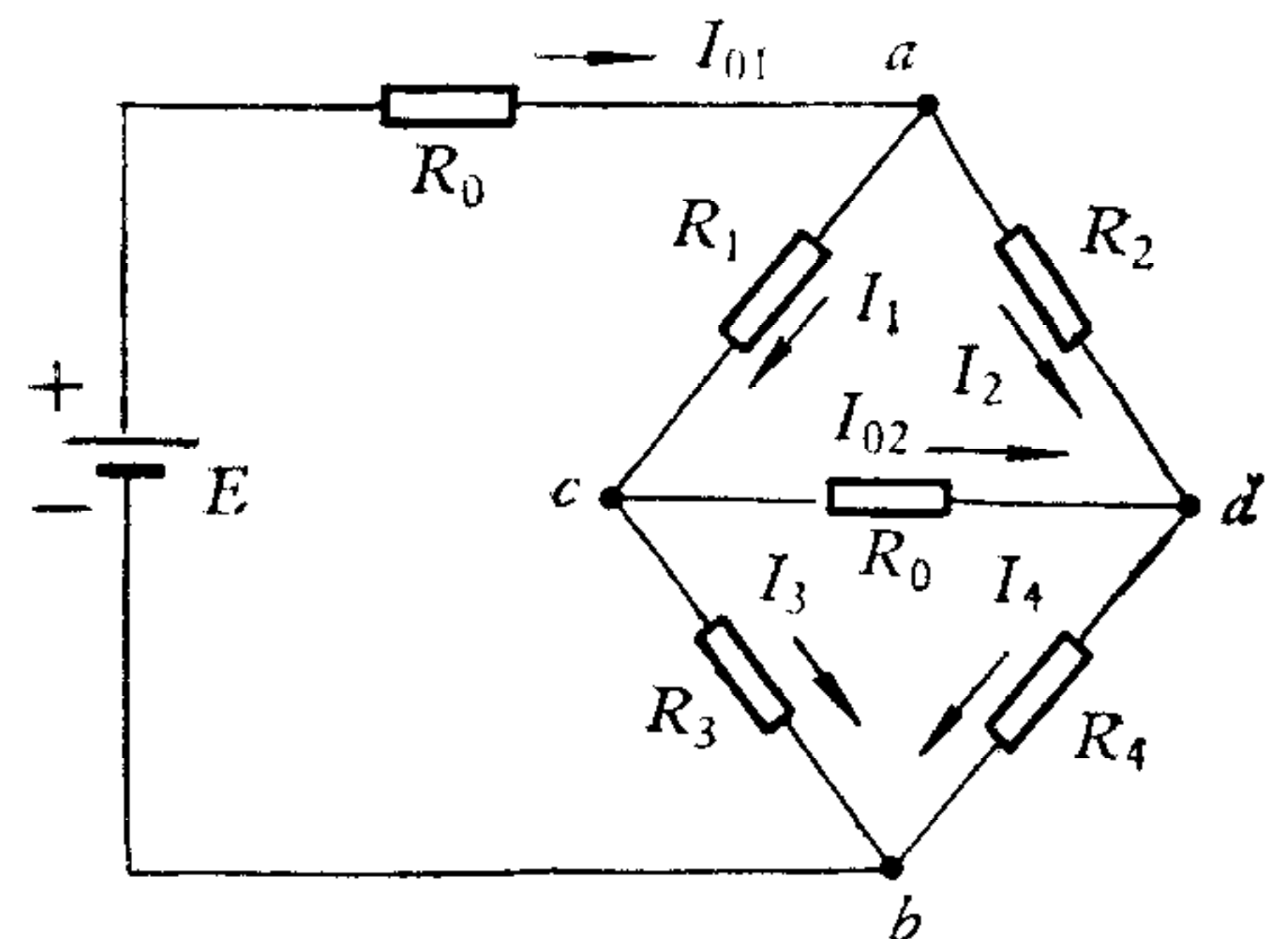


图 7  $R_1R_4 < R_2R_3$  时桥式电路中实际电流方向

$$(R_0 + R'')I_{01} \mp (R_0 + R'')I_{02} = E, \quad (23)$$

$$(R_0 + R')I_{01} \pm (R_0 + R')I_{02} = E. \quad (24)$$

当  $R' < R''$  时,取式(23),(24)中上面的符号得

$$\left. \begin{aligned} I_{01} + I_{02} &= E/(R_0 + R'), \quad (\text{与 } R' \text{ 无关}) \\ I_{01} - I_{02} &= E/(R_0 + R''). \quad (\text{与 } R' \text{ 无关}) \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

当  $R' > R''$  时,取式(23),(24)中下面的符号得

$$\left. \begin{aligned} I_{01} + I_{02} &= E/(R_0 + R''), \quad (\text{与 } R' \text{ 无关}) \\ I_{01} - I_{02} &= E/(R_0 + R'). \quad (\text{与 } R'' \text{ 无关}) \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

式(25),(26)改写为式(1),(2)的形式,即得定理的公式。

## 2. 推论公式的推导

$$\text{将条件 } R_2 = R_3 = R'' \text{ 代入式(21), } R_1 \text{ 与 } R_4 \text{ 不变,化简得 } I_{01} \mp I_{02} = E/(R_0 + R''). \quad (27)$$

式中  $R_1 R_4 > R''^2$  时,  $I_{02}$  前取“+”号;  $R_1 R_4 < R''^2$  时,  $I_{02}$  前取“-”号。

$$\text{将条件 } R_1 = R_4 = R' \text{ 代入式(22), } R_2 \text{ 与 } R_3 \text{ 不变,化简得 } I_{01} \pm I_{02} = E/(R_0 + R'). \quad (28)$$

式中  $R_2 R_3 > R'^2$  时,  $I_{02}$  前取“+”号;  $R_2 R_3 < R'^2$  时,  $I_{02}$  前取“-”号,式(27),(28)即式(3)—(6)。

## 3. 以 $\sqrt{R_2 R_3}$ 为横坐标时的特性曲线计算

1) 对和输出电路,在  $\sqrt{R_2 R_3} < R'$  时,根据式(28)得  $I_{01} - I_{02} = E/(R_0 + R')$ , 则和输出电路的

表 1 和输出电路的输出 ( $m = 0.33-3$ )

$\sqrt{R_2 R_3}$ ( $\Omega$ )	$I_{01} + I_{02} (mA)$									
	$R_0 = 100\Omega \quad R' = 700\Omega$					$R_0 = 300\Omega \quad R' = 700\Omega$				
	$m$					$m$				
	0.33	0.5	1.0	2.0	3.0	0.33	0.5	1.0	2.0	3.0
700	30	30	30	30	30	24	24	24	24	24
600	33.96	34.15	34.29	34.15	33.96	26.47	26.59	26.67	26.59	26.47
500	39.2	39.68	40	39.68	39.2	29.57	29.88	30	29.88	29.57
400	46.6	47.4	48	47.4	46.6	33.52	33.98	34.28	33.98	33.52
300	57.45	58.98	60	58.98	57.45	38.85	39.53	40	39.53	38.85

①  $R_1 = R_4 = R'$ ,  $E = 24$  伏; ②  $\sqrt{R_2 R_3} > R'$  时,输出恒等于  $E/(R_0 + R')$ 。

表 2 差输出电路的输出 ( $m = 0.33-3$ )

$\sqrt{R_2 R_3}$ ( $\Omega$ )	$I_{01} - I_{02} (mA)$									
	$R_0 = 100\Omega, R' = 400\Omega$					$R_0 = 300\Omega, R' = 400\Omega$				
	$m$					$m$				
	0.33	0.5	1	2	3	0.33	0.5	1	2	3
400	48	48	48	48	48	34.28	34.28	34.28	34.28	34.28
500	40.54	40.22	40	40.22	40.54	30.3	30.12	30	30.12	30.3
600	35.14	34.63	34.28	34.63	35.14	27.18	26.87	26.67	26.87	27.18
700	31.09	34.42	30	30.42	31.09	24.66	24.26	24	24.26	24.66
800	27.82	27.13	26.67	27.13	27.82	22.59	22.12	21.82	22.12	22.59
900	25.22	24.49	24	24.49	25.22	20.84	20.33	20	20.33	20.84
1000	23.08	22.32	21.82	22.32	23.08	19.35	18.81	18.46	18.81	19.35

①  $R_1 = R_4 = R'$ ,  $E = 24$  伏; ②  $\sqrt{R_2 R_3} < R'$  时,输出恒等于  $E/(R_0 + R')$ 。

$$\text{输出为} \quad I_{01} + I_{02} = 2I_{02} + E/(R_0 + R') \quad (29)$$

2) 对差输出电路, 在  $\sqrt{R_2 R_3} > R'$  时, 根据式(28)得  $I_{01} + I_{02} = E/(R_0 + R')$ , 则差输出电路的输出为

$$I_{01} - I_{02} = E/(R_0 + R') - 2I_{02} \quad (30)$$

由式(21)和(22)得

$$I_{02} = \frac{\pm \left[ R_3 - \frac{R_3 + R_4}{R_1 + R_2} R_1 \right] E}{\left[ \frac{R_1 + R_3}{R_1 + R_2} R_0 + R_3 \right] \left[ \frac{R_2 + R_4}{R_1 + R_2} R_1 + R_0 \right] + \left[ \frac{R_2 + R_4}{R_1 + R_2} R_0 + R_4 \right] \left[ \frac{R_2 - R_3}{R_1 + R_2} R_1 + R_0 + R_3 \right]} \quad (31)$$

将  $R_1 = R_4 = R'$  代入式(31), 化简得

$$I_{02} = \frac{\pm (R_2 R_3 - R'^2) E}{(R_0 + R') [2(R_0 R' + R_2 R_3) + (R_0 + R')(R_2 + R_3)]} \quad (32)$$

式中  $\sqrt{R_2 R_3} > R'$  时, 分子前符号取“+”号, 反之取“-”号, 使  $I_{02}$  的计算值恒为正。

由式(29), (30), (32)可求得  $R_2$  和  $R_3$  在不同的组合时的输出。当  $\sqrt{R_2 R_3}$  为定值时,  $I_{02}$  的最大值出现在  $R_2 = R_3$  时。当  $R_2, R_3$  相差的倍数增大时, 式(32)分母变大,  $I_{02}$  减小, 使曲线的上升段和下降段都变缓。

令  $m = R_3/R_2$ , 当  $m = 0.5-2$  时, 根据计算, 用  $\sqrt{R_2 R_3}$  代替式(25)和(26)中的  $R''$  所产生的误差不大。这在控制和保护装置中是允许的。这时式子改写为

$$I_{01} \pm I_{02} = E/(R_0 + \sqrt{R_2 R_3}) \quad (33)$$

式中当  $R_2 R_3 < R'^2$  时, 和输出电路取“+”号; 当  $R_2 R_3 > R'^2$  时, 差输出电路取“-”号。

在控制和保护装置中, 为了减小参量桥臂不平衡造成的误差, 在设计计算时, 应使  $m$  尽量在 0.5 到 2 的范围内。这在以两个被测(控)参量的乘积(如功率控制)为变量时, 要给以注意。

作为参考, 列出  $\sqrt{R_2 R_3}$  为定值,  $m = 0.33, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0$  时的输出计算值(见表 1, 2)

## THE PRINCIPLE OF ELECTRIC CIRCUIT FOR BIVARIABLE AUTOMATIC ALTERNATIVE TRANS- FORMATION OF COMPOUND BRIDGE

JIANG JIAKE

(Changsha Metallurgical Industrial School)

### ABSTRACT

In this paper, the compound bridge consisting of sensors and some electrical elements is proposed. The principle for bivvariable alternative transformation of the compound bridge is discussed and its deduction is given in the appendix. The diagonal current sum or difference of compound bridge has been regarded as output, its quantity can be selected as the larger or the smaller measured variable automatically.

An example of electrical circuit of the thermosensitive compound bridge relay for overload and non-balance protection of three-phase A.C. motor is introduced. It has been used in industry.