第2卷 第1期 自 动 化 学 报 Vol. 2, No. 1
1964 年 1 月 ACTA AUTOMATICA SINICA January, 1964

用繼电器組成可靠的繼电器电路[1)]

許 廷 鈺

摘 要

全文分三部分．在第一部分中，作者根据繼电器接点在动作时刻的实际要求，改进了 Moore E. F. 和 Shannon C. E. 提出的繼电器接点的状态模型[1]（图 1），提出了一种繼电器接点状态的新模型（图 2）．根据新模型及理論分析，証明了衡量繼电器电路是否可靠的新准則应該是下列两式

$$R(q^{(1)}, q^{(2)}) > 1 - \delta,$$
$$R(s^{(2)}, s^{(1)}) > 1 - \delta$$

同时被满足，从而改进了文献[1]中衡量繼电器电路是否可靠的准則．在本文的后两部分中，作者应用了文献[1]的若干結果，重新估計了可靠电路中繼电器接点的数目．最后与文献[1]的結果进行了比較，从理論分析及計算数据說明了本文的結果一般較佳．

一、新模型及新准則

在 Moore 和 Shannon 的論文“用不可靠的繼电器組成可靠的电路”[1] 中，对繼电器的接点状态提出了一个模型，在这个模型中，控制接点在繞組激发与不激发时具有接通或不接通两种可能状态（图 1）．但是在很多情况下，特别在多节拍的繼电器系統中[2,3]，不但要考虑控制接点在繼电器繞組激发（或不激发）时是否接通（或断开），而且还需要考虑（这更重要）接点是从什么时刻开始接通，什么时刻开始断开．而这在 Moore-Shannon 模型中并沒有得到反映．为此需要建立一个新模型来反映这类系統对繼电器的要求[2)]．图 2 給出了这个模型．

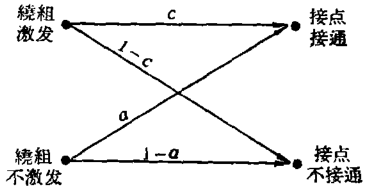

图 1. Moore-Shannon 模型

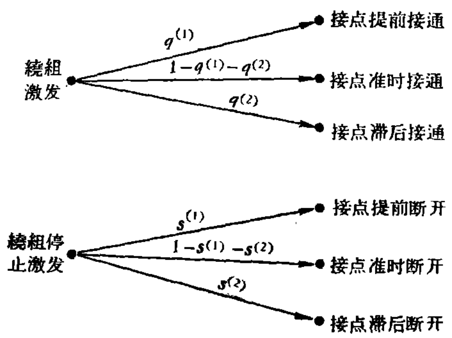

图 2. 新模型

接点在繞組激发时具有提前接通、准时接通和滞后接通三种互不相容的可能状态，而

1）本文曾在 1963 年 7 月中国自动化学会模拟技术和远动技术专业会議上宣讀．
2）文中所談的繼电器均为上述接点繼电器，以后不再作其它解释．

在繞組停止激发时则具有提前断开、准时断开和滞后断开三种互不相容的可能状态. 新模型可以認为是一个具有二元輸入和三元輸出的信道（图 3）. 图 3 中的参数意义如下：

$q^{(1)}$——繞組激发时接点发生提前接通的概率；

$q^{(2)}$——繞組激发时接点发生滞后接通的概率；

$1-q^{(1)}-q^{(2)}$——繞組激发时接点发生准时接通的概率；

$s^{(1)}$——繞組停止激发时接点提前断开的概率；

$s^{(2)}$——繞組停止激发时接点滞后断开的概率；

$1-s^{(1)}-s^{(2)}$——繞組停止激发时接点准时断开的概率.

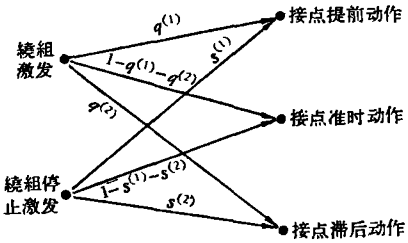

图 3、 新模型是一个具有二元輸入和三元輸出的信道

为使新模型中提出的参数有更确切的意义，现給出如下定义：

定义 1. 对継电器 $Л$ 确定两个时間区間 $[\alpha,\beta]$、$[\gamma,\sigma]$，設 t_A（或 τ_A）为 $Л$ 的繞組激发（或停止激发）时接点的接通（或断开）时刻. (1)若 $t_A<\alpha$，则称 $Л$ 发生提前接通，用 $(Л)_1$ 表示此事件；若 $t_A\geqslant\beta$，则称 $Л$ 发生滞后接通，用 $(Л)_{-1}$ 表示此事件；若 $\alpha\leqslant t_A<\beta$，则称 $Л$ 是准时接通的，用 $(Л)_0$ 表示此事件. (2)若 $\tau_A<\gamma$，则称 $Л$ 发生提前断开，用 $(Л)^1$ 表示此事件；若 $\tau_A\geqslant\sigma$，则称 $Л$ 发生滞后断开，用 $(Л)^{-1}$ 表示此事件；若 $\gamma\leqslant\tau_A<\sigma$，则称 $Л$ 是准时断开的，用 $(Л)^0$ 表示此事件. 因此

$$q^{(1)}=p[(Л)_1];\quad q^{(2)}=p[(Л)_{-1}];\quad 1-q^{(1)}-q^{(2)}=p[(Л)_0];$$
$$s^{(1)}=p[(Л)^1];\quad s^{(2)}=p[(Л)^{-1}];\quad 1-s^{(1)}-s^{(2)}=p[(Л)^0].$$

要求 $Л$ 的两个正常工作概率 $p[(Л)_0]$ 与 $p[(Л)^0]$ 和 1 非常接近，然而常常由于生产技术条件的限制不容易做到. 现仍采用文献 [1] 的方法，用若干个継电器 $Л$ 构成一个两端电路 $Ц$，使得 $Ц$ 的两种正常工作概率 $p[(Ц)_0]$ 和 $p[(Ц)^0]$ 与 1 的差距小于預先給定的正数 δ.

文献[1]已經指出，若 $Л$ 的接通概率为 p，那么由 m 个 $Л$ 所組成的两端电路 $Ц$ 的接通概率为

$$h(p)=\sum_{n=0}^{m}A_np^n(1-p)^{m-n},\tag{1}$$

式中 A_n 是在电路 $Ц$ 中选择这样 n 个接点的方法数，即当此 n 个接点接通而其余接点不接通时电路接通.

由下面定理可以計算电路 $Ц$ 的六个条件概率.

定理 1. 电路 $Ц$ 的 $h(p)$ 函数如(1)式所示，则有：

$$p[(Ц)_1]=h(q^{(1)}),\tag{2.1}$$
$$p[(Ц)_{-1}]=1-h(1-q^{(2)}),\tag{2.2}$$
$$p[(Ц)_0]=h(1-q^{(2)})-h(q^{(1)}),\tag{2.3}$$
$$p[(Ц)^1]=1-h(1-s^{(1)}),\tag{3.1}$$

$$p[(\mathcal{U})^{-1}] = h(s^{(2)}), \tag{3.2}$$
$$p[(\mathcal{U})^{0}] = h(1 - s^{(1)}) - h(s^{(2)}). \tag{3.3}$$

証明:

在同一个电路 $\mathcal{U}$ 中,下面(1),(2),(3)三个命题等价.

(1) $\mathcal{U}$ 在接点 $a_1, a_2, \cdots, a_n$ 均接通和其它接点均不接通时是接通的.

(2) $\mathcal{U}$ 在接点 $a_1, a_2, \cdots, a_n$ 均提前接通和其它接点均不提前接通时是提前接通的.

(3) $\mathcal{U}$ 在接点 $a_1, a_2, \cdots, a_n$ 均滞后断开和其它接点均不滞后断开时是滞后断开的.

因而使得电路 $\mathcal{U}$ 接通或是提前接通或是滞后断开的 n 个接点的选择方法是同样多的,即具有相同的 A_n. 由式(1)可知

$$p[(\mathcal{U})_1] = p[t_{\mathcal{U}} < \alpha] = \sum_{n=0}^{m} A_n q^{(1)n}(1 - q^{(1)})^{m-n} = h(q^{(1)}),$$

$$p[(\mathcal{U})^{-1}] = p[\tau_{\mathcal{U}} \geqslant \sigma] = \sum_{n=0}^{m} A_n s^{(2)n}(1 - s^{(2)})^{m-n} = h(s^{(2)}),$$

于是式(2.1)与(3.2)成立. 由以上的証明可知

$$p[(\mathcal{U})_{-1}] = 1 - p[(\mathcal{U})_1 U (\mathcal{U})_0] = 1 - p[t_{\mathcal{U}} < \beta] = 1 - h(1 - q^{(2)}),$$
$$p[(\mathcal{U})^{1}] = 1 - p[(\mathcal{U})^0 U (\mathcal{U})^{-1}] = 1 - p[\tau_{\mathcal{U}} \geqslant \gamma] = 1 - h(1 - s^{(1)}),$$

因而式(2.2)与(3.1)亦成立. 由式(2.1)和(2.2)、式(3.1)和(3.2)立刻可証得(2.3)和(3.3)(証毕).

令 $R(u, v)$ 函数为如下形式:

$$R(u, v) \equiv h(1 - v) - h(u).$$

于是由定理 1 可知

$$p[(\mathcal{U})_0] \equiv R(q^{(1)}, q^{(2)}), \quad p[(\mathcal{U})^0] \equiv R(s^{(2)}, s^{(1)}).$$

下面給出在新模型下衡量电路 $\mathcal{U}$ 是否可靠的新准則.

定义 2. 給定很小的正数 δ, 若电路 $\mathcal{U}$ 的 R 函数満足不等式:

$$R(q^{(1)}, q^{(2)}) > 1 - \delta, \tag{4.1}$$
$$R(s^{(2)}, s^{(1)}) > 1 - \delta, \tag{4.2}$$

則称电路 $\mathcal{U}$ 是可靠的,否則称 $\mathcal{U}$ 是不可靠的.

二、可靠电路中繼电器接点数的估計

在以下全部討論中都認为有

$$q^{(1)} + q^{(2)} < 1, \quad s^{(1)} + s^{(2)} < 1,$$

因而

$$q^{(1)} < 1 - q^{(2)}, \quad s^{(2)} < 1 - s^{(1)}. \tag{5}$$

下一个定理指出了不能組成可靠电路的繼电器.

定理 2. 設 $0 < \delta < \frac{1}{2}$, 若繼电器 $Л$ 的概率特性具有不等式

$$\max\{q^{(1)}, s^{(2)}\} \geqslant \min\{1 - q^{(2)}, 1 - s^{(1)}\}, \tag{6}$$

則不能用 $Л$ 組成可靠电路.

証明：

根据式(5)和(6)可知应有下面一个不等式成立

$$1-q^{(2)}\leqslant s^{(2)}\quad 或\quad 1-s^{(1)}\leqslant q^{(1)}. \tag{7}$$

假若存在着由 $\varPi$ 組成的可靠电路，則应有

$$R(q^{(1)},q^{(2)})\equiv h(1-q^{(2)})-h(q^{(1)})>1-\delta,$$
$$R(s^{(2)},s^{(1)})\equiv h(1-s^{(1)})-h(s^{(2)})>1-\delta.$$

考虑到 $0\leqslant h(p)\leqslant 1$ 和 $0<\delta<\frac{1}{2}$，則有

$$h(1-q^{(2)})>1-\delta>\delta>h(s^{(2)}),$$
$$h(1-s^{(1)})>1-\delta>\delta>h(q^{(1)}).$$

因为 $h(p)$ 是单調上升的，所以

$$1-q^{(2)}>s^{(2)}\ 和\ 1-s^{(1)}>q^{(1)}$$

均应成立．这与式(7)相矛盾，故此时可靠电路不存在(証毕)．

下面应用文献[1]的若干結果对具有某些性質的电路中接点的数目进行一些估計．

定理 3. 給定 $0<\delta<\frac{2}{e}$，$0<q^{(1)}<1-q^{(2)}<1$，$0<s^{(2)}<1-s^{(1)}<1$．令 $\theta=\min\{\ln q^{(1)}\cdot\ln q^{(2)},\ \ln s^{(1)}\cdot\ln s^{(2)}\}$，若存在可靠电路 $\mathcal{U}$，則 $\mathcal{U}$ 中的接点数 n 滿足不等式

$$n\geqslant\frac{\left(\ln\frac{\delta}{2}\right)^2}{\theta}. \tag{8}$$

証明：

因为电路 $\mathcal{U}$ 可靠，故式(4.1)成立，那么存在 ε 使得 $(0<\varepsilon<\delta)$

$$h(q^{(1)})<\varepsilon,\ h(1-q^{(2)})>1-(\delta-\varepsilon).$$

根据条件 $0<q^{(1)}<1-q^{(2)}<1$ 以及文献[1]的結果，可知

$$n\geqslant\frac{\ln\varepsilon}{\ln q^{(1)}}\cdot\frac{\ln(\delta-\varepsilon)}{\ln q^{(2)}}. \tag{A}$$

不难知道 $\varepsilon^*=\frac{\delta}{2}$ 是 $f(\varepsilon)=\ln\varepsilon\cdot\ln(\delta-\varepsilon)$ 在 $(0,\delta)$ 中的极小値点，于是由式(A)可得

$$n\geqslant\frac{\left(\ln\frac{\delta}{2}\right)^2}{\ln q^{(1)}\cdot\ln q^{(2)}}. \tag{B}$$

同理，由于 $\mathcal{U}$ 滿足式(4.2)，亦有

$$n\geqslant\frac{\ln\left(\frac{\delta}{2}\right)^2}{\ln s^{(1)}\cdot\ln s^{(2)}}. \tag{C}$$

由式(B)和式(C)立即可得式(8)(証毕)．

定理 4. 給定 $0<\delta<\frac{\sqrt{2}}{2}$，$0<q^{(1)}<1-q^{(2)}<1$，$d_1=\max\left\{\frac{1+(q^{(1)}-q^{(2)})}{2},\right.$

$\left.\frac{1+(q^{(2)}-q^{(1)})}{2}\right\}$, 则存在着接点数不多于

$$N_1 = 81\left[\frac{\log\frac{1-q^{(1)}-q^{(2)}}{4}}{\log d_1}\right]\left(\frac{1}{1-q^{(1)}-q^{(2)}}\right)^{\frac{\log 9}{\log 3/2}}(1+2\log_2\delta)^2 \tag{9}$$

的电路满足式(4.1).

証明:

設 ε 是满足不等式 $0<\varepsilon<\delta$ 的定数. 再令 $\varepsilon^* = \min\{\varepsilon, \delta-\varepsilon\}$. 文献[1]的結果指出,存在着接点数不多于

$$81\left[\frac{\log\frac{c-a}{4}}{\log d}\right]\left(\frac{1}{c-a}\right)^{\frac{\log 9}{\log 3/2}}\left(\frac{\log\sqrt{8}\,\delta}{\log\sqrt{2}}\right)^2$$

的电路使得不等式

$$h(a)<\delta \text{ 与 } h(c)>1-\delta$$

成立. 此处 $d=\max\left\{\frac{c+a}{2},\ 1-\frac{c+a}{2}\right\},\quad 0<a<c<1.$

若令 $c=1-q^{(2)}$, $a=q^{(1)}$, 再应用上述文献[1]的結果,便知存在着接点数不多于

$$N_\varepsilon = 81\left[\frac{\log\frac{1-q^{(1)}-q^{(2)}}{4}}{\log d_1}\right]\left(\frac{1}{1-q^{(1)}-q^{(2)}}\right)^{\frac{\log 9}{\log 3/2}}\left(\frac{\log\sqrt{8}\,\varepsilon^*}{\log\sqrt{2}}\right)^2 \tag{D}$$

的电路使得不等式

$$h(q^{(1)})<\varepsilon^*\leqslant\varepsilon \text{ 与 } h(1-q^{(2)})>1-\varepsilon^*\geqslant 1-(\delta-\varepsilon)$$

均成立. 又由 ε^* 的定义及对 δ 的限制,可知

$$0<\varepsilon^*\leqslant\frac{\delta}{2}<\frac{1}{\sqrt{8}}<1,$$

$$\therefore\quad (\log\sqrt{8}\,\varepsilon^*)^2\geqslant(\log\sqrt{2}\,\delta)^2. \tag{E}$$

从(D)、(E) 可知, 当 $\varepsilon=\frac{\delta}{2}\left(\text{此时 } \varepsilon^*=\frac{\delta}{2}\right)$ 时, N_ε 取得最小值, 即存在着接点数不多于

$$N_1 = 81\left[\frac{\log\frac{1-q^{(1)}-q^{(2)}}{4}}{\log d_1}\right]\left(\frac{1}{1-q^{(1)}-q^{(2)}}\right)^{\frac{\log 9}{\log 3/2}}\left(\frac{\log\sqrt{2}\,\delta}{\log\sqrt{2}}\right)^2 =$$

$$= 81\left[\frac{\log\frac{1-q^{(1)}-q^{(2)}}{4}}{\log d_1}\right]\left(\frac{1}{1-q^{(1)}-q^{(2)}}\right)^{\frac{\log 9}{\log 3/2}}(1+2\log_2\delta)^2$$

的电路满足

$$h(q^{(1)})<\frac{\delta}{2},\quad h(1-q^{(2)})>1-\frac{\delta}{2}. \tag{F}$$

由式 (F) 即知此电路亦使得式(4.1)成立(証毕).

类似地也可以証得下面的定理.

定理 4′. 給定 $0 < \delta < \frac{\sqrt{2}}{2}$, $0 < s^{(2)} < 1 - s^{(1)} < 1$, $d_2 = \max\left\{\frac{1 + (s^{(1)} - s^{(2)})}{2}, \frac{1 + (s^{(2)} - s^{(1)})}{2}\right\}$, 則存在着接点数不多于

$$N_2 = 81\left[\frac{\log\frac{1 - s^{(1)} - s^{(2)}}{4}}{\log d_2}\right]\left(\frac{1}{1 - s^{(1)} - s^{(2)}}\right)^{\frac{\log 9}{\log 3/2}}(1 + 2\log_2\delta)^2 \tag{10}$$

的电路满足式(4.2).

定理 5 給出了可靠电路中接点数的估計公式.

定理 5. 給定 $0 < \delta < \frac{\sqrt{2}}{2}$, 若 $q^{(1)}, q^{(2)}, s^{(1)}, s^{(2)}$ 满足 $0 < x = \max\{q^{(1)}, s^{(2)}\} < y = \min\{1 - q^{(2)}, 1 - s^{(1)}\} < 1$, 且 $d = \max\left\{\frac{x + y}{2}, 1 - \frac{x + y}{2}\right\}$, 則存在接点数不多于

$$N_* = 81\left[\frac{\log\frac{y - x}{4}}{\log d}\right]\left(\frac{1}{y - x}\right)^{\frac{\log 9}{\log 3/2}}(1 + 2\log_2\delta)^2 \tag{11}$$

的电路是可靠的.

証明:

根据文献[1]和定理 4 的証明,可知存在着接点数不多于 N_* 的电路满足

$$h(x) < \frac{\delta}{2}, \quad h(y) > 1 - \frac{\delta}{2}. \tag{G}$$

由本定理的条件可知

$$h(q^{(1)}) \leqslant h(x) < \frac{\delta}{2}, \quad h(s^{(2)}) \leqslant h(x) < \frac{\delta}{2},$$

$$h(1 - q^{(2)}) \geqslant h(y) > 1 - \frac{\delta}{2}, \; h(1 - s^{(1)}) \geqslant h(y) > 1 - \frac{\delta}{2},$$

于是此电路同时满足(4.1)与(4.2)两式,因而此电路是可靠的(証毕).

特别是当定理 5 中的参数 x 和 y 满足

$$0 < x < \frac{1}{4}, \; \frac{3}{4} < y < 1$$

时,亦可以得到与文献[1]相应的估計公式[1]),即此时存在着接点数不多于

$$N_{**} = 9\left(\frac{\log\sqrt{2}\,\delta}{\log\sqrt{8}\,g^*}\right)^2 \tag{12}$$

的电路是可靠的,其中

$$0 < \delta < \frac{\sqrt{2}}{2}, \quad g^* = \max\{x, 1 - y\}. \text{（証略）}$$

1) 实际上这里不需要再考慮組成可靠电路的前两个步驟,只需直接采用第三个步驟(見文献[1]).

三、与 Moore-Shannon 結果的比較

1. 前面已經指出文献 [1] 的模型及准則沒有考慮繼电器接点的动作时刻，这是与本文的基本区别. 但是本文的模型和准則仍然适用于文献[1]，因为在文献[1]中未将提前接通和提前断开看作是故障，卽有 $q^{(1)} = s^{(1)} = 0$，这样式(4.1)和(4.2)就变成为

$$h(1-q^{(2)}) > 1-\delta, \quad h(s^{(2)}) > 1-\delta,$$

这就是文献 [1] 的准則. 此处 $s^{(2)}$ 和 $1-q^{(2)}$ 相当于文献 [1] 中的 a 与 $1-c$. 以上說明本文仍然能解决文献 [1] 的模型和对象. 本文的模型和准則較之文献 [1] 的应用范围更广，更有实际意义.

2. 若对文献 [1] 中的参数 a 和 c 在本文的意义下与 $q^{(1)}, q^{(2)}, s^{(1)}, s^{(2)}$ 之間建立一定的关系，則可証明本文的公式(12)所表示的 N_{**} 較之文献[1]相应的公式

$$N^{**} = 9\left(\frac{\log\sqrt{8}\,\delta}{\log\sqrt{8}\,g}\right)^2, \quad g = \max\{a, 1-c\} \tag{12'}$$

所表示的 N^{**} 在 δ 充分小的情况下更佳. 为了証明这点，現用 $(Л)_*$ 表示事件"繼电器 $Л$ 的接点在不应接通时接通"，而用 $(Л)^*$ 表示事件 "繼电器 $Л$ 的接点在应該接通时不接通". 于是便有

$$\left.\begin{aligned}(Л)_* &= (Л)_1 U (Л)^{-1}, \\ (Л)^* &= (Л)_{-1} U (Л)^1.\end{aligned}\right\} \tag{13}$$

在文献[1]的模型(图 1)中，由 a, $1-c$ 的意义作下面的假設是合理的，卽設

$$a = p[(Л)_*], \quad 1-c = p[(Л)^*]. \tag{14}$$

由(13)和(14)可知

$$a > \max\{q^{(1)}, s^{(2)}\} = x, \quad c < \min\{1-q^{(2)}, 1-s^{(1)}\} = y, \tag{15}$$

因而

$$\begin{gathered} g = \max\{a, 1-c\} > \max\{x, 1-y\} = g^*, \\ \log\sqrt{8}\,g > \log\sqrt{8}\,g^*. \end{gathered} \tag{A}$$

由于 $\sqrt{8}\,g$ 和 $\sqrt{8}\,g^*$ 均小于 1，故 $\log\sqrt{8}\,g$ 和 $\log\sqrt{8}\,g^*$ 均小于零. 由式(A)得

$$\frac{\log\sqrt{8}\,g^*}{\log\sqrt{8}\,g} > 1. \tag{B}$$

此外，当 $\delta \to 0$ 时，有

$$\lim_{\delta\to 0}\frac{\log\sqrt{2}\,\delta}{\log\sqrt{8}\,\delta} = 1.$$

于是当 δ 充分小时，总有

$$\frac{\log\sqrt{8}\,g^*}{\log\sqrt{8}\,g} > \frac{\log\sqrt{2}\,\delta}{\log\sqrt{8}\,\delta},$$

因此

$$\frac{\log\sqrt{8}\,\delta}{\log\sqrt{8}\,g} > \frac{\log\sqrt{2}\,\delta}{\log\sqrt{8}\,g^*} > 0.$$

将上式两边平方后乘以 9，便可得到

$$N^{**} > N_{**}. \tag{16}$$

因此，当 δ 充分小时，N_{**} 較之 N^{**} 更佳.

在式(13)中若設 $(Л)_1$ 和 $(Л)^{-1}$ 独立，$(Л)_{-1}$ 和 $(Л)^1$ 独立，則有

$$a = q^{(1)} + s^{(2)} - q^{(1)}s^{(2)}, \quad 1 - c = q^{(2)} + s^{(1)} - q^{(2)}s^{(1)} \tag{17}$$

成立. 現根据式(17)举出下面的例子来驗証式(16).

例 1. 取 $q^{(1)} = q^{(2)} = s^{(1)} = s^{(2)} = 10^{-2}$

(1) 当 $\delta = 10^{-5}$ 时，可算得

$$N^{**} \doteq 119, \quad N_{**} \doteq 88, \quad N^{**} - N_{**} \doteq 31;$$

(2) 当 $\delta = 10^{-10}$ 时，可算得

$$N^{**} \doteq 549, \quad N_{**} \doteq 364, \quad N^{**} - N_{**} \doteq 185;$$

(3) 当 $\delta = 10^{-20}$ 时，可算得

$$N^{**} \doteq 2201, \quad N_{**} \doteq 1479, \quad N^{**} - N_{**} \doteq 722.$$

例 2. 取 $q^{(1)} = q^{(2)} = s^{(1)} = s^{(2)} = 10^{-1}$

(1) 当 $\delta = 10^{-5}$ 时，可算得

$$N^{**} \doteq 2558, \quad N_{**} \doteq 676, \quad N^{**} - N_{**} \doteq 1882;$$

(2) 当 $\delta = 10^{-10}$ 时，可算得

$$N^{**} \doteq 11561, \quad N_{**} \doteq 2916, \quad N^{**} - N_{**} \doteq 8645.$$

在本文写作中，會得到朱淇昌先生很多帮助，在此謹表謝意。

参　考　文　献

[1] Moore, E. F., Shannon, C. E., Reliable Circiuts Using Less Reliable Relays, *J. Franklin Inst.*, **262** (1956), No. 3, 191—208; No. 4, 281—297 (俄譯文見 «Кибернетический сборник», ил. 1960).

[2] Гаврилов, М. А., Теория релейно-контактных схем, Изд-во АН СССР, 1950.

[3] 陆鍂寿，繼电器接点电路邏輯基础，上海科学技术出版社，1958.

RELIABLE CIRCUITS USING LESS RELIABLE RELAYS

Sü Ting-yü

This article consists of three parts. In the first part, based upon the practical requirement for the operation time of relay contacts, the author improved the state model of Moore and Shannon and established a new model. Through theoretical analysis of the new model, it has been proved that the new criterion for measuring the reliability of relay circuit should be the simultaneous fulfilment of the following two inequalities:

$$R\ (q^{(1)}, q^{(2)}) > 1 - \delta,$$
$$R\ (s^{(2)}, s^{(1)}) > 1 - \delta.$$

In the second and third parts the author made use of some results in [1] to estimate again the number of relays' contact points in a reliable circuit. Finally, theoretical analysis and numerical computation show, that in general, the results obtained by the new method are better than that obtained by the method of Moore and Shannon.