

备用复式控制系统的可靠性预计及其应用*

疏 松 桂

(中国科学院自动化研究所)

摘 要 全面分析了备用复式系统的可靠性问题,推导出成套的预计公式并给出一个详细的计算实例.

首先,通过考虑监控器和转换开关的动态和静态故障,细致地剖析了自动控制器本身的故障.然后,按照公用与独立两种型式的转换器,划分这些故障为独立与相依两类,并且归结到独立转换器远比公用转换器为优.同时指出转换器本身的故障必须小于各个分系统的故障,否则就不可能提高总系统的可靠性.此外,对自动停车措施的得失及温冷混合贮备的优点,也都得到了明确的结论.

1 前 言

利用不太可靠的元器件构成高度可靠的控制系统,其有效办法是采用复式系统.比较简便的措施,是将若干个工作性能相同的元器件或分系统固定并联起来,使所有的并联分系统都处在加电工作状态,称为热复式系统^[1].这种系统对独立故障(如开路)而言,须待所有并联的分系统都失误时,总系统才失误,所以能够大大地提高系统可靠性.但对相依故障(如短路)而言,则相反,任何一个并联分系统失误,就影响其余并联回路的正常工作,甚至导致整个系统的失误,这样不但无益反而有害.因此,热复式系统只能用于各个并联分系统(或元器件)中的相依故障概率小于独立故障概率的情况.

另有一种并联复式系统叫做备用复式系统^[2-4].这种系统在所有可以并联的分系统中,只有一个分系统在工作,其余各个分系统都处在待命的状态.只有在前一个工作的分系统发生故障时,后一个备用的同样分系统才被接入工作,从而使总系统的工作不会间断,直至最后一个分系统失误时,总系统才失误.从此,可见备用复式系统的突出优点有二:(1)隔除了各个分系统之间相依故障的不良影响,从而提高了系统的可靠性.实际上,等于将各个并联分系统中的相依故障转换为独立故障,只有待到全部分系统都失误时,总系统才失去工作能力;(2)由于各个分系统都处于待命状态,所以不但能够节省电源的消耗,而且降低了设备的耗损,进一步提高了系统的可靠性.

2 自动转换器及其可靠性问题

* 《自动化学报》第5卷第2期,116—129页.

最古老的复式系统是由人工操作转换开关而运行的. 随着科学技术的发展, 要求在工作系统发生故障时迅速地转换到备用的分系统, 于是采用了自动转换器^[2-4].

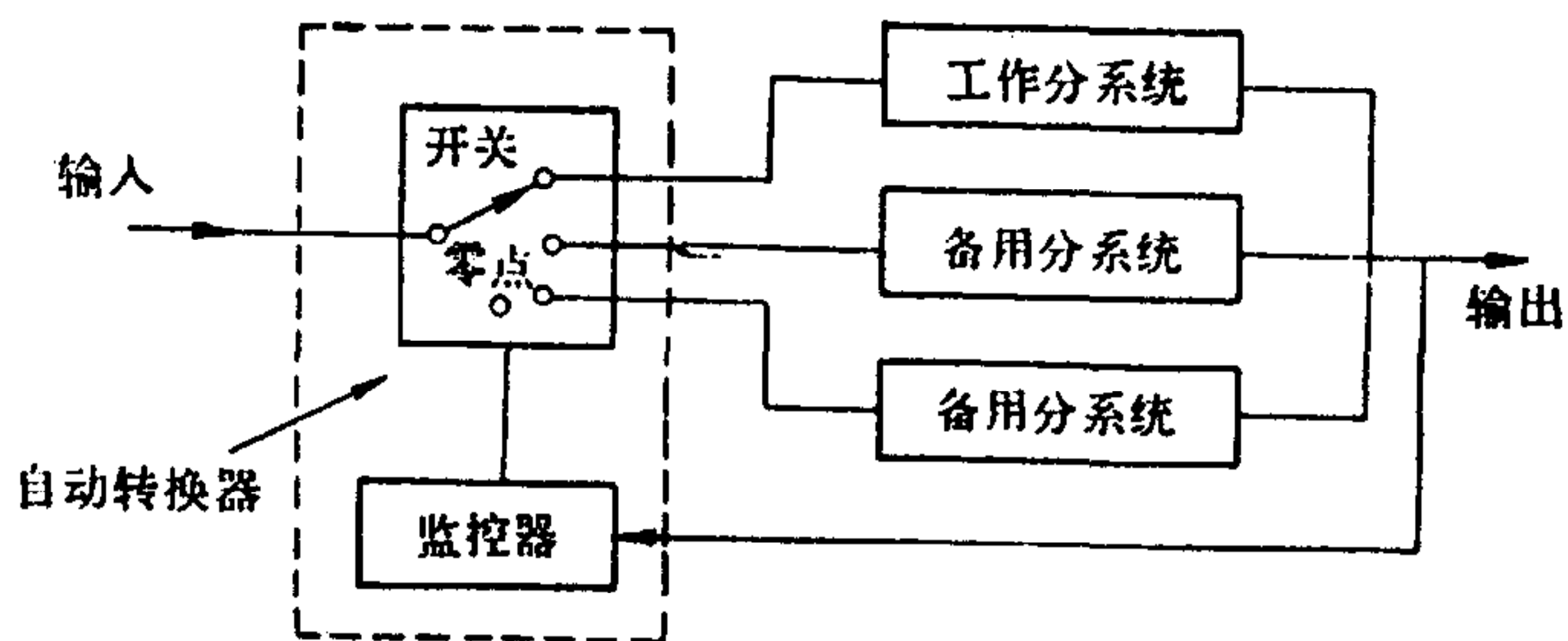


图 1 公用自动转换器的备用复式系统

通常自动转换器是由监控器和转换开关两部分元器件组成, 如图 1 所示. 这里公用一套转换器进行多档转换工作, 不难看出如果转换器本身在某一档中出现永久性故障, 则影响到以后各个分系统投入工作, 这样就失去其备用的作用. 所以公用转换器可以认为是相依故障转换器. 因此人们就对各个分系统配备它们自己专用的转换器件, 叫做独立转换器, 如图 2 所示. 但独立转换器不一定完全是独立故障转换器.

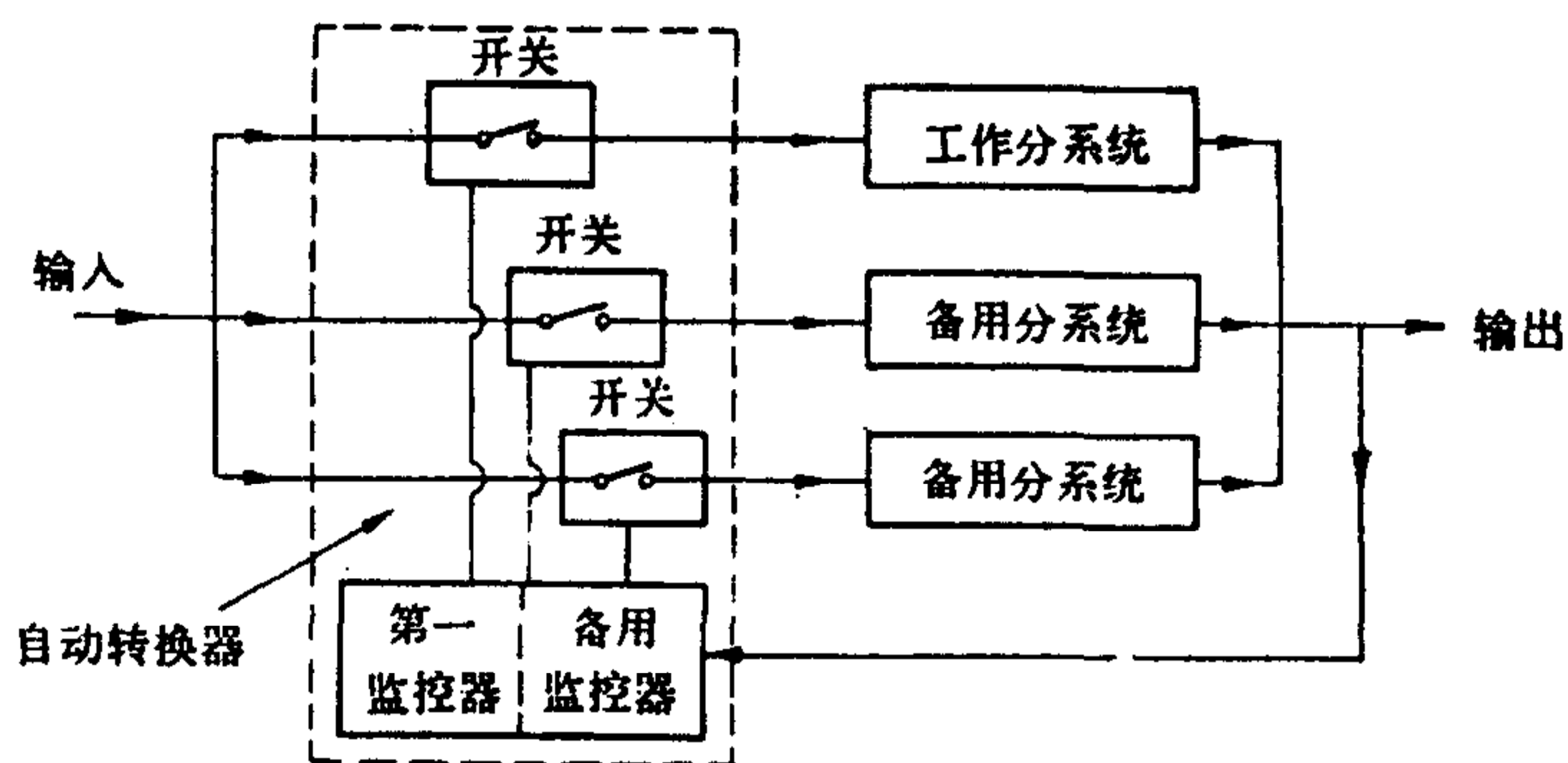


图 2 独立转换器的备用复式系统

因为自动转换器是控制系统中的组成部件, 所以转换器本身的故障概率对系统可靠性的影响是很大的. 各种元器件的故障又可以分为动态故障(应该动作而不动作)和静态故障(不应该动作而动作)两种. 普通备用元器件, 或分系统在使用中, 当无输入信号时很少误动, 所以静态故障较小, 可以忽略不计. 但对自动转换器而言, 则需考虑静态故障, 因为它的监控器都是加上电源处于待命状态, 有可能不触亦发, 有时某些元件的动态故障也能引起转换器产生静态故障.

现在用 R 表示可靠性, Q 表示失误概率(不可靠性). R' 表示动态可靠性, Q' 表示动态失误概率, R'' 表示静态可靠性, Q'' 表示静态失误概率. 符号的右下脚 m 和 s 分别表示监控器和开关. 当转换开关接到第一个分系统(可靠性为 R_1 , 失误概率为 Q_1)时, 其工作的成功与失误的概率组合列于表 1. 当然在各个分系统及其转换器相同的情况下, 这个概率组合表也都是适用的.

从表 1 可以得到转换器的动态可靠性(正确转换概率)及动态失误概率(应该转换而不转换的概率)为:

$$\left. \begin{aligned} R'_T &= R'_m R'_s + Q'_m Q'_s \cong R'_m R'_s (\text{正确转换}) \\ Q'_T &= R'_m Q'_s + Q'_m R'_s (\text{失误不转换}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\text{显然} \quad R'_T + Q'_T = 1 \quad (1a)$$

$$(\because R'_s + Q'_s = 1, R'_s + Q'_s = 1, R'_m + Q'_m = 1)$$

表 1 转换器可靠概率的组合

分系统	转 换 器			结 果	备 注
	监 控 器	开 关	转换器的概率		
R_1	R''_m	R'_s	$R''_m R'_s$	成功(不转换)	
		Q'_s	$R''_m Q'_s$	错误转换	静态故障
	Q''_m	R'_s	$Q''_m R'_s$	错误转换	静态故障
		Q'_s	$Q''_m Q'_s$ (二道失误)	成功(凑巧不转换)	可以不计
Q_1	R'_m	R'_s	$R'_m R'_s$	正确转换	
		Q'_s	$R'_m Q'_s$	失误(不转换)	动态故障
	Q'_m	R'_s	$Q'_m R'_s$	失误(不转换)	动态故障
		Q'_s	$Q'_m Q'_s$ (二道失误)	正确转换(凑巧)	可以不计

转换器的静态可靠性(不应该转换而不转换)及静态误动作概率(不应该转换而转换的概率)为:

$$\left. \begin{aligned} R''_T &= R''_m R''_s + Q''_m Q''_s \cong R''_m R''_s (\text{成功不转换}) \\ Q''_T &= R''_m Q''_s + Q''_m R''_s (\text{错误转换}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\text{显然} \quad R''_T + Q''_T = 1 \quad (2a)$$

从公式(1a)和(2a)得

$$\begin{aligned} \text{即} \quad (R'_T + Q'_T)(R''_T + Q''_T) &= 1 \\ R'_T R''_T + Q'_T(1 - Q''_T) + Q''_T &= 1 \end{aligned}$$

其中 $Q'_T Q''_T$ 是指转换器的动态故障与静态故障的乘积, 一般二道故障的乘积值甚小可以忽略不计, 于是得:

$$R'_T R''_T + (Q'_T + Q''_T) = 1 \quad (3)$$

$$R_T + Q_T = 1 \quad (3a)$$

所以转换器的可靠性和失误概率分别为:

$$\left. \begin{aligned} R_T &= R'_T R''_T = R'_m R''_m R'_s R''_s \\ Q_T &= Q'_T + Q''_T = R'_m Q'_s + Q'_m R''_s + R''_m Q''_s + Q''_m R'_s \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

上式表示自动转换器(包括独立转换器和公用转换器)在各档工作中的可靠性和失误概率, 得出故障转换器的可靠性之后, 就可以进行备用复式系统可靠性的分析与预计。

3 冷贮备复式系统可靠性的预计

如图 1 和图 2 所示, 只有工作的分系统接上输入, 其余备用的分系统都处在不加电待

命的状态,这叫做冷贮备复式系统,它适用于不需预热的线路.如果将图 1 和图 2 中的自动转换器移接于各个分系统的输出端,这样除一个分系统照旧工作外,其余备用的分系统都已处在加电待命的状态,这叫做温贮备^[4]复式系统.当然,就系统可靠性而言,冷贮备复式系统会优于温贮备系统,但为了满足使用条件的要求,有时还不得不采用温贮备.

现在让我们先来讨论冷贮备复式系统的可靠性问题.首先列出三项假定条件,作为推导这种系统的可靠性及其有关公式的依据:

1. 总系统执行的任务是给定的,也就是有一定的使命在一定的时间内执行.
2. 各个分系统的结构及性能是相同的,它们的可靠性参数也是一样的.即是

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= R_2 = \dots = R_n \\ Q_1 &= Q_2 = \dots = Q_n \\ R_i + Q_i &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, n$, 表示分系统的序号.

3. 各个分系统在开始接班工作时,都是完好的(这一点不适用于温贮备系统).

前面已经指出:自动转换器本身的故障,对整个系统可靠性的影响很大.不只是转换器的动态故障和静态故障均须考虑,而且要考虑故障性质(独立故障或相依故障)的影响.下面分两种情况来讨论:

1. 采用独立转换器时,预计冷贮备复式系统的可靠性.

如果各个分系统都配有自己的一套转换器如图 2 所示,则转换器的静态故障都彼此独立,不会导致相互影响,但动态故障还是相依的(见后).当前一个工作系统出现故障时,则自动转换到下一个分系统工作,余此类推.直到最后一个分系统出现故障时,则有两种情况:一个自动停车.这只需在第 n 个转换器中,仍保留断开第 n 个开关的动作即可;另一是没有自动停车措施.这就是在第 n 个转换器中,取消断开第 n 个开关的程序.前者的好处是能够保护设备的完全,后者的好处可以少量提高系统的可靠性.下面再分这二种情况,来研讨系统可靠性问题:

1) 自动转换器带有自动停车措施的情况

参看表 1 及公式(1)和(2),可见自动转换器在各档工作中转到下一档的概率为:

$$\delta = Q_1 R_T' + R_1 Q_T'' = Q_1 (1 - Q_T') + (1 - Q_1) Q_T'' = \delta' + \delta'' \quad (6)$$

其中前一项是正确转换的概率,后一项是错误转换的概率.

转换器从第一个分系统起一直转到自动停车的概率为:

$$P = \delta^n = [Q_1 (1 - Q_T') + (1 - Q_1) Q_T'']^n \quad (7)$$

其中正确停车概率(指没有错误转换,也就是没有静态故障)为:

$$P' = (\delta')^n = [Q_1 (1 - Q_T')]^n \quad (7a)$$

错误停车概率(任何一档或几档错误转换都会构成错误停车)为:

$$\begin{aligned} P'' &= P - P' = \delta^n - (\delta')^n \\ &= [Q_1 (1 - Q_T') + (1 - Q_1) Q_T'']^n - [Q_1 (1 - Q_T')]^n \end{aligned} \quad (7b)$$

很明显,当 $n \rightarrow \infty$ 时,

$$P = P' = P'' = 0 (\because \delta' < \delta < 1) \quad (7c)$$

根据表 1 及公式 (2), 可见当转换开关一旦转换到任何一个分系统时, 这个分系统包括转换器在内, 成功运转的概率均为 $R_1 R_T''$. 在备用复式系统中, 各个分系统是接力工作的, 所以整个系统的可靠性(成功的总概率)是各个分系统完成任务的概率之和, 即:

$$R = \sum_{i=1}^n \delta^{(i-1)} R_1 R_T'' = R_1 R_T'' \frac{1 - \delta^n}{1 - \delta} \quad (8)$$

整个系统的失误概率为:

$$Q = 1 - R = 1 - R_1 R_T'' \frac{1 - \delta^n}{1 - \delta} \quad (8a)$$

引用公式 (6) 得:

$$R_1 R_T'' = R_1 - R_1 Q_T'' = 1 - Q_1 - \delta + Q_1 (1 - Q_T') = 1 - \delta - Q_1 Q_T'$$

代入 (8a) 得:

$$Q = Q_1 Q_T' \frac{1 - \delta^n}{1 - \delta} + \delta^n \quad (8b)$$

其中右边第一项表示各个分系统失误概率之和, 第二项为自动停车概率.

当 $n \rightarrow \infty$, 则公式 (8) 和 (8b) 分别分为:

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{R_1 R_T''}{1 - \delta} \\ Q &= \frac{Q_1 Q_T'}{1 - \delta} \end{aligned} \right\} \quad (8c)$$

系统故障改善系数为:

$$F = \frac{Q_1}{Q} = \frac{Q_1 (1 - \delta)}{Q_1 Q_T' (1 - \delta^n) + \delta^n - \delta^{n+1}} \quad (9)$$

因为 $\delta < 1$, 当 n 很大时, $\delta^n \rightarrow 0$ 及 $\delta^{n+1} \rightarrow 0$,

$$\therefore F \cong \frac{1 - \delta}{Q_T'} \quad (n \rightarrow \infty) \quad (9a)$$

如果自动转换器无故障地工作, 则:

$$Q_T' = Q_T'' = 0, \quad R_T' = R_T'' = 1,$$

于是从公式 (6) 得 $\delta = Q_1$. 这样公式 (8) 和 (8b) 分别化为:

$$\left. \begin{aligned} R &= R_1 \frac{1 - Q_1^n}{1 - Q_1} = 1 - Q_1^n \\ Q &= Q_1^n \end{aligned} \right\} \quad (8d)$$

上式表明当转换器无故障工作时, 总系统的可靠性与独立故障固定并联的系统相同, 也可以说转换器起到了将各个分系统中相依故障完全转变为独立故障的作用.

2) 自动转换器没有自动停车措施的情况:

如果在第 n 个监控器中取消再转换的措施, 这样系统只能转接到第 n 个分系统为止, 纵然这最后一个分系统再发生故障, 也不复再转到自动停车(除非第 n 个分系统发生的故障是断路性的). 另一方面, 这样系统转接到第 n 个分系统之后, 再也不复有错误转换的可能, 所以系统可靠性有所提高. 但在前面各档工作的转换器之转换概率公式 (6) 还是适用

的。

借助公式(8), 只须在最后一项中, 令 R_T'' 等于 1, 此前各项不变, 则可得在没有自动停车措施时, 总系统的可靠性为:

$$R = \sum_{i=1}^{n-1} \delta^{(i-1)} R_1 R_T'' + R_1 \delta^{n-1} = R_1 R_T'' \frac{1 - \delta^{n-1}}{1 - \delta} + R_1 \delta^{n-1} \quad (10)$$

总系统的失误概率为:

$$\begin{aligned} Q &= 1 - R = 1 - (1 - \delta - Q_1 Q_T') \frac{1 - \delta^{n-1}}{1 - \delta} - (1 - Q_1) \delta^{n-1} \\ &= Q_1 Q_T' \frac{1 - \delta^{n-1}}{1 - \delta} + Q_1 \delta^{n-1} \end{aligned} \quad (10a)$$

故障改善系数为:

$$F = \frac{Q_1}{Q} = \frac{1 - \delta}{Q_T' (1 - \delta^{n-1}) + \delta^{n-1} - \delta^n} \quad (11)$$

当 n 很大时, 则上面 R 、 Q 和 F 三式化为 (8c) 和 (9a)。这就是说, 当备用分系统很多时, 自动停车措施就不复再影响总系统的可靠性。

2. 采用公用转换器时, 预计冷贮备复式系统的可靠性。

在使用公用转换器时, 如图 1 所示, 如果转换器在某一档中出现永久性的故障 (比如来自元器件的损坏), 则不能恢复正常工作, 此后各个备用的分系统就失去备用的作用了。所以公用转换器也叫相依故障转换器。

这种转换器在各档工作过程中, 发生故障的概率还是与前面独立故障一样, 分为静态与动态两种, 表 1 及其有关公式 (1) 到 (4) 仍适用。但在使用中转换器转换到各档的概率及自动停车概率则不相同。

现在仍按转换器分有、无自动停车措施二种情况来讨论系统可靠性问题。

1) 自动转换器带有自动停车措施的情况

转换器动态故障 Q_T' 的出现, 只会导致应该转换而不转换, 结果使总系统工作失误, 见表 1 及公式 (1), 此后尚未接班的备用分系统也就无用了。这不论是独立转换器还是公用转换器都会产生一样的结果。由于转换器在各档中的动态失误概率与正确转换概率是互相对立的事件, 所以这种转换器在各档中正确转换的概率也会是一样的。因此, 正确停车的概率也会相同, 所以公式 (7a) 对公用转换器还是适用的, 即:

$$P' = (\delta')^n = [Q_1 (1 - Q_T')]^n \quad (12)$$

另一方面, 转换器的静态故障 Q_T'' 导致错误转换。这里静态故障是相依的, 对错误转换及停车概率的影响与前面静态独立故障有所不同, 因为出现静态独立故障, 不会影响以后各档的转换概率, 但一旦出现静态相依故障, 则不能排除, 而要连续地错误地转下去, 一直到错误停车为止。这也就是说在任何一档中, 转换器出现静态相依故障都会导致错误停车。因此这里错误停车概率不能引用公式 (7b), 而是要将转换器在各档中可能出现的静态错误转换的概率都加起来就是总的错误停车概率。这里转换到第 i 档工作的概率为 $(\delta')^{i-1}$ (不是 δ^{i-1} , 因为在此之前还没有出现过静态故障的, 否则已经导致错误停车, 不复再能留在此档工作了), 在此档中可能出现错误转换的概率仍为 δ'' , 所以错误停车总概率为:

$$\begin{aligned}
 P'' &= \delta'' \sum_{i=1}^n (\delta')^{i-1} = \delta'' \left[\frac{1 - (\delta')^n}{1 - \delta'} \right] \\
 &= R_1 Q_T'' \left[\frac{1 - (Q_1 R_T')^n}{1 - Q_1 R_T'} \right] = (1 - Q_1) Q_T'' \frac{1 - [Q_1(1 - Q_T')]^n}{1 - Q_1(1 - Q_T')} \quad (13)
 \end{aligned}$$

自动停车总概率[不是公式(7)]应为:

$$\begin{aligned}
 P &= P' + P'' = (\delta')^n + \delta'' \frac{1 - (\delta')^n}{1 - \delta'} \\
 &= [Q_1(1 - Q_T')]^n + (1 - Q_1) Q_T'' \frac{1 - [Q_1(1 - Q_T')]^n}{1 - Q_1(1 - Q_T')} \quad (14)
 \end{aligned}$$

从上面二式,可见当 n 很大时,

$$P \cong \frac{\delta''}{1 - \delta'} = \frac{R_1 Q_T''}{1 - Q_1 R_T'} \quad (14a)$$

这个结果与使用独立转换器的情况不同[见前公式(7c)].

各个分系统本身成功运转的概率仍为 $R_1 R_T''$.任何一档发生错误转换都导致错误停车,只有正确转换到某一档时,这一档才有成功运转的可能.总系统成功运转的概率是各档成功概率之和,所以用 δ' 代替公式(8)中的 δ ,即得系统可靠性,

$$R = \sum_{i=1}^n \delta'^{(i-1)} R_1 R_T'' = R_1 R_T'' \frac{1 - (\delta')^n}{1 - \delta'} \quad (15)$$

因为 $\delta' < \delta$,将上式与公式(8)比较,可见系统可靠性降低了.

总系统的故障概率为:

$$\begin{aligned}
 Q &= 1 - R = 1 - R_1 R_T'' \frac{1 - (\delta')^n}{1 - \delta'} \\
 &= Q_1 Q_T' \frac{1 - (\delta')^n}{1 - \delta'} + (\delta')^n + \delta'' \frac{1 - (\delta')^n}{1 - \delta'} \quad (15a)
 \end{aligned}$$

上式左边第一项是动态失误总概率,第二项是正确停车概率,第三项是错误停车概率.故障改善系数为:

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{Q_1}{Q} = \frac{Q_1(1 - \delta')}{Q_1 Q_T' [1 - (\delta')^n] + (\delta')^n (1 - \delta') + \delta'' [1 - (\delta')^n]} \\
 &= \frac{Q_1(1 - \delta')}{(Q_1 Q_T' + \delta'') [1 - (\delta')^n] + (\delta')^n (1 - \delta')} \quad (16)
 \end{aligned}$$

因为 $\delta' < 1$,所以当 n 很大时,则 $(\delta')^n \rightarrow 0$,于是公式(15)、(15a)和(16)分别化为:

$$\left. \begin{aligned}
 R &\cong \frac{R_1 R_T''}{1 - \delta'} \\
 Q &\cong \frac{Q_1 Q_T'}{1 - \delta'} + \frac{\delta''}{1 - \delta'}
 \end{aligned} \right\} \quad (15b)$$

$$F \cong \frac{Q_1(1 - \delta')}{Q_1 Q_T' + \delta''} = \frac{1 - \delta}{Q_T' + Q_T'' / Q_1 - Q_T''} \quad (16a)$$

可见这时故障改善系数,与系统在第一档中的动态转换失误及静态错误转换之和成反比.

2) 自动转换器没有自动停车措施的情况

此处同前面独立转换器没有自动停车措施时一样,只须在最后一个分系统工作过程中加以修正,即可得:

$$\left. \begin{aligned} R &= R_1 R_T'' \frac{1 - (\delta')^{n-1}}{1 - \delta'} + R_1 (\delta')^{n-1} \\ Q &= (Q_1 Q_T' + \delta'') \frac{1 - (\delta')^{n-1}}{1 - \delta'} + Q_1 (\delta')^{n-1} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$$F = \frac{Q_1 (1 - \delta')}{(Q_1 Q_T' + \delta'') [1 - (\delta')^{n-1}] + Q_1 (1 - \delta') (\delta')^{n-1}} \quad (18)$$

上列二式表明:当 n 很大时, $(\delta')^{n-1} \rightarrow 0$, 则 R 、 Q 和 F 化为与带有停车措施时同样的结果,见公式(15b)及(16a).

4 温冷混合贮备复式系统可靠性的预计

前面已有说明,所谓温贮备复式系统是指各个分系统在参加工作之前,都处于加温待命状态,文献[4]已有分析.作者新提出的采用轮流加温的措施,只有一个完好的备用分系统加温待命,其余备用分系统仍处在冷贮备状态,这样比较经济适用.现在就来讨论这种温冷混合贮备的系统可靠性问题.

前面对冷贮备系统提出的前两条假定条件(即给定任务和各个分系统的结构及特性相同)在此还适用,这里再补充三点说明及假定条件.

1) 可以认为第一个服役的分系统同其他备用的分系统一样,在投入工作之前也有预热加温的过程.

2) 各个分系统的可靠性不因加温的早晚或参加工作的先后而改变,但随它们的状态而变化:如在冷贮备阶段其可靠性恒为 1,在温贮备结束时其可靠性为 R_w ,直接投入工作可靠性为 R_1 .这样,各个分系统实际工作的可靠性为 $R_1 R_w$.

3) 自动转换器的可靠性不因分系统的贮备状态而改变.

按照以上的假定及说明,可见这种轮流加温的温贮备分系统的工作可靠性均为 $R_1 R_w$.于是只须用 $R_1 R_w$ 代替前面各种公式及表格中的 R_1 ,则在冷贮备复式系统中所推导出的各种公式(包括独立转换器和公用转换器,及有、无自动停车措施),都适用于轮流加温的温贮备复式系统.这里就不需重新写出各个具体公式了.

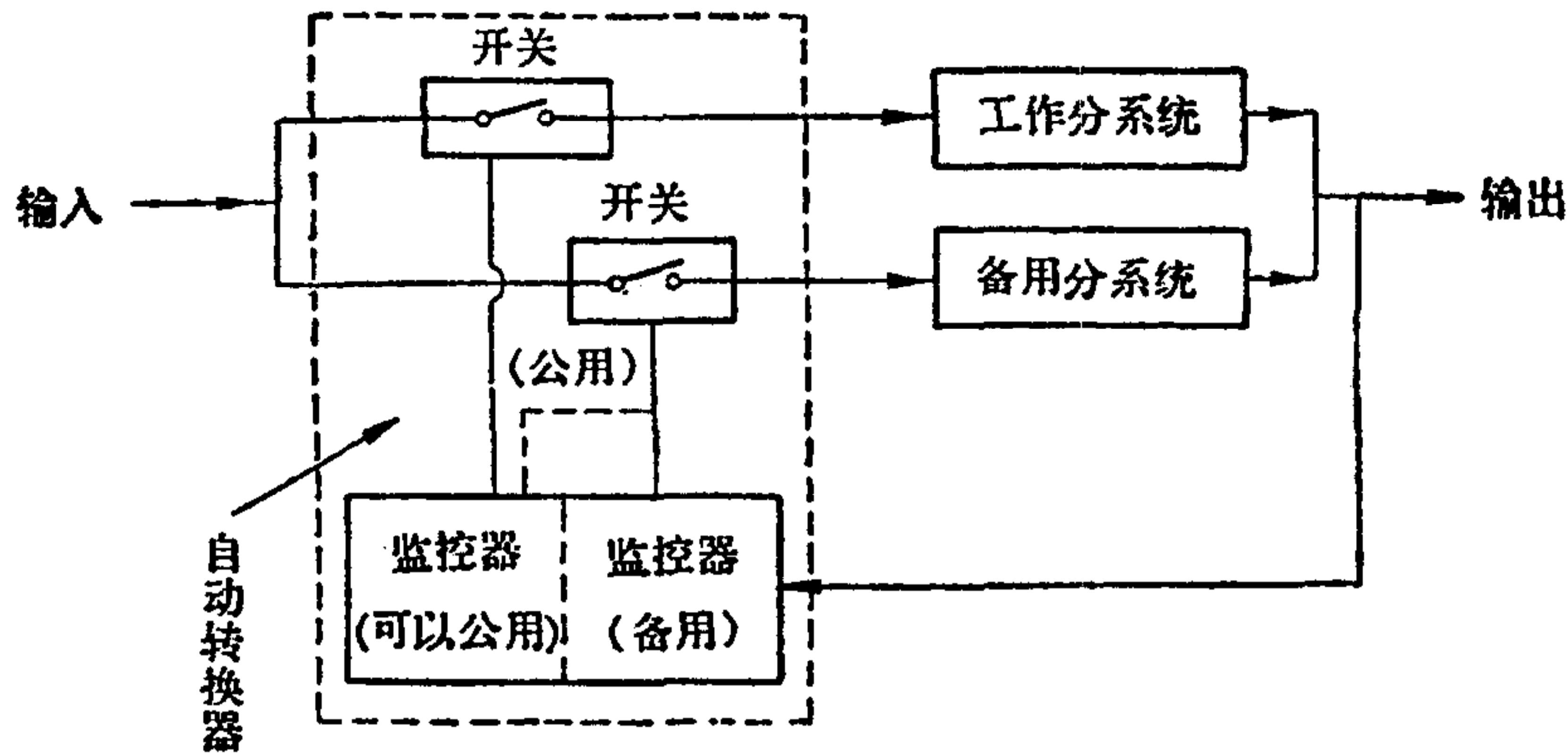
5 备用复式系统的应用及简例

一般军用自动控制系统可靠性要求很高,常常采用备用复式系统.随着工业自动化的发展,不少的自动生产线要求不间断地工作,不能停产修理,这样也只有走备用复式系统的途径,来解决实际问题.

现在举一个简单实例, 来研讨两种自动转换器的本身故障及自动停车措施对系统可靠性的影响.

设有一个备用复式系统由两个分系统(一个工作, 一个备用)组成. 配有自动转换器进行操作. 转换开关是按两个分系统分别配置的. 但监控器可以公用, 也可以分开使用, 其中自动停车措施可以使用, 也可以备而不用. 具体情况如图 3 所示. 可靠性数据如下:

分系统可靠性数据为



$$R_1 = 0.99 \quad Q_1 = 0.01$$

图 3 简单备用复式系统(双套)

自动转换器可靠性数据为

$$\begin{aligned} \text{动态:} \quad R'_T &= 0.998 & Q'_T &= 0.002 \\ \text{静态:} \quad R''_T &= 0.999 & Q''_T &= 0.001 \\ R_T &= 0.997 & Q_T &= 0.003 \end{aligned}$$

为了比较研讨转换方式及停车措施对系统可靠性的影响, 下面仍按前面的步骤分别计算出有关可靠性的数值.

1. 采用完全独立的转换器(图 3)

1) 使用自动停车措施

自动转换器转档的概率[引用公式(6)]为:

$$\begin{aligned} \delta &= \delta' + \delta'' = Q_1 R'_T + R_1 Q''_T = 0.01 \times 0.998 + 0.99 \times 0.001 \\ &= 0.00998 + 0.00099 = 0.01097. \text{ (对公用转换器也适用)} \end{aligned}$$

自动停车概率[公式(7)]为:

$$P = \delta^2 = (0.01097)^2 = 12.0341 \times 10^{-5}$$

正确停车概率[公式(7a)]为:

$$P' = (\delta')^2 = (0.00998)^2 = 9.96 \times 10^{-5}$$

错误停车概率[公式(7b)]为:

$$P'' = P - P' = (12.0341 - 9.96) \times 10^{-5} = 2.0741 \times 10^{-5}$$

总系统的可靠性[公式(8)]为:

$$R = R_1 R_T'' \frac{1 - \delta^2}{1 - \delta} = 0.99 \times 0.999(1 + 0.01097) = 0.99986$$

总系统的不可靠性为:

$$Q = 1 - R = 1 - 0.99986 = 0.00014$$

系统故障改善系数为:

$$F = \frac{Q_1}{Q} = \frac{0.01}{0.00014} = 71.43$$

2) 不用自动停车措施

系统的可靠性[公式(10)]为:

$$R = R_1 R_T'' \frac{1 - \delta^{2-1}}{1 - \delta} + R_1 \delta^{2-1} = 0.99 \times 0.999 + 0.99 \times 0.01097 = 0.99987$$

系统失误概率为

$$Q = 1 - R = 1 - 0.99987 = 0.00013$$

故障改善系数为

$$F = \frac{Q_1}{Q} = \frac{0.01}{0.00013} = 76.92$$

2. 采用公用监控器(转换开关分开)

1) 使用自动停车措施

正确停车概率[公式(12)]为:

$$P' = (\delta')^2 = (0.00998)^2 = 9.96 \times 10^{-5}$$

错误停车概率[公式(13)]为:

$$P'' = \delta'' \frac{1 - (\delta')^2}{1 - \delta'} = 0.00099(1 + 0.00998) = 99.988 \times 10^{-5}$$

自动停车总概率[公式(14)]为:

$$P = P' + P'' = 9.96 \times 10^{-5} + 99.988 \times 10^{-5} = 109.948 \times 10^{-5}$$

系统可靠性[公式(15)]为:

$$R = R_1 R_T'' \frac{1 - (\delta')^2}{1 - \delta'} = 0.99 \times 0.999(1 + 0.00998) = 0.99888$$

系统的故障概率为:

$$Q = 1 - R = 1 - 0.99888 = 0.00112$$

故障改善系数为:

$$F = \frac{Q_1}{Q} = \frac{0.01}{0.00112} = 8.93$$

2) 不用自动停车措施

系统可靠性[公式(17)]为:

$$R = R_1 R_T'' \frac{1 - (\delta')^{2-1}}{1 - \delta'} + R_1 (\delta')^{2-1} = 0.99 \times 0.999 + 0.99 \times 0.00998 = 0.99889$$

系统故障概率为:

$$Q = 1 - R = 1 - 0.99889 = 0.00111$$

表 2 备用复式系统

项目	独立转换器	
	有自动停车措施	没有自动停车措施
转换概率 $\delta = \delta' + \delta''$	$Q_1(1-Q_T') + (1-Q_1)Q_T''$	$Q_1(1-Q_T') + (1-Q_1)Q_T''$
自动停车 P	δ''	-
正确停车 P'	$(\delta')^n$	-
错误停车 P''	$\delta'' - (\delta')^n$	-
系统可靠性 R	$R_1 R_T'' \left(\frac{1-\delta''}{1-\delta} \right)$	$R_1 R_T'' \left(\frac{1-\delta''-1}{1-\delta} \right) + R_1 \delta''-1$
系统故障 Q	$Q_1 Q_T' \left(\frac{1-\delta''}{1-\delta} \right) + \delta''$	$Q_1 Q_T' \left(\frac{1-\delta''-1}{1-\delta} \right) + Q_1 \delta''-1$
故障改善系统 F	$\frac{Q_1(1-\delta)}{Q_1 Q_T' (1-\delta''-1) + \delta''-1}$	$\frac{1-\delta}{Q_T' (1-\delta''-1) + \delta''-1}$

附注: 1. 转换器的可靠性, $R_T = R_T' R_T''$; 转换器的故障概率, $Q_T = Q_T' + Q_T''$.

2. 表列公式是属于冷贮备复式系统.

3. 关于温贮备复式系统的计算公式, 只须用 $R_1 R_w$ 代替上列中的 R_1 及用 $(1-R_1 R_w)$ 代替 Q_1 即可.

故障改善系数为:

$$F = \frac{Q_1}{Q} = \frac{0.01}{0.00111} = 9.01$$

从以上计算的结果, 可以看出: (1) 独立转换器远比公用转换器为好, 可以有效地提高系统可靠性; (2) 不用自动停车措施对系统可靠性有利, 但差别不大.

6 备用复式系统可靠性小结

本文就自动转换器本身的故障对备用复式系统可靠性的影响作了比较详细的分析, 同时将转换器的故障划分为动态和静态两类, 其影响有相依与独立之分. 又就有、无自动停车措施作了分析比较, 另外还提出冷温混合贮备方式, 比较适用. 从这些分析及简例计算的结果, 可以归纳下面七条结论:

- 1) 备用复式系统可以隔除热贮备(固定并联)复式系统中相依故障的不良影响, 是提高带有相依故障复式系统可靠性的有效办法.
- 2) 自动转换器本身的故障对系统可靠性的影响很大, 它必须小于分系统的故障概率, 才能提高系统可靠性. 独立转换器的动态故障可能是独立性的(如开路故障), 也有可能是相依的(如短路故障). 但独立转换器的静态故障肯定是独立的. 公用转换器的动态故障和静态故障都是属于相依故障. 所以就提高系统可靠性讲, 独立转换器远比公用转换器为优.
- 3) 转换器附有自动停车措施时, 会降低系统可靠性[比较公式(8)及(10)]. 但在静态故障相当小时, 对系统可靠性影响不大, 同时能够保证安全停车, 有其积极的意义. 在备用

的计算公式

公用转换器		备 注
有自动停车措施	没有自动停车措施	n 表示分系统的数目
$Q_1(1-Q'_T) + (1-Q_1)Q_T^n$	$Q_1(1-Q'_T) + (1-Q_1)Q_T^n$	
$(\delta')^n + \delta^n \left[\frac{1-(\delta')^n}{1-\delta'} \right]$	-	
$(\delta')^n$	-	
$\delta^n \left[\frac{1-(\delta')^n}{1-\delta'} \right]$	-	
$R_1 R_T^n \left[\frac{1-(\delta')^n}{1-\delta'} \right]$	$R_1 R_T^n \left[\frac{1-(\delta')^{n-1}}{1-\delta'} \right] + R_1 (\delta')^{n-1}$	
$(Q_1 Q'_T + \delta^n) \frac{1-(\delta')^n}{1-\delta'} + (\delta')^n$	$(Q_1 Q'_T + \delta^n) \frac{1-(\delta')^{n-1}}{1-\delta'} + Q_1 (\delta')^{n-1}$	
$\frac{Q_1(1-\delta')}{(Q_1 Q'_T + \delta^n)[1-(\delta')^n] + (\delta')^n(1-\delta')}$	$\frac{Q_1(1-\delta')}{(Q_1 Q'_T + \delta^n)[1-(\delta')^{n-1}] + Q_1(1-\delta')(\delta')^{n-1}}$	

分系统较多时, 停车措施就没有什么意义了。

4) 当分系统很多时(即 $n \rightarrow \infty$), 使用独立转换器, 则故障改善系数 F 趋近于 $(1-\delta)/Q'_T$, F 与转换器的动态故障概率 Q'_T 成反比. 如果使用公用转换器, 则 F 趋近于 $Q_1(1-\delta')/(Q_1 Q'_T + \delta^n)$, F 与转换器在某一档中的动态故障概率及静态错误转换之和成反比, 可见 F 是降低了(当然, 在 n 不大时也是如此, 见简例的计算结果)。

5) 如果转换器十分可靠, 则备用复式系统提高系统可靠性的效果与将分系统中的相依故障换为同量的独立故障的热贮备系统相同。

6) 新提出的温冷混合贮备复式系统, 比较经济适用. 预计这种系统可靠性的方法与冷贮备系统相同, 只须用 $R_w R_1$ 代替 R_1 即可。

7) 推导出的通用计算公式汇列于表 2. 文中还给出了 $n \rightarrow \infty$ 时相应的简化公式. 实际上系统可靠性 R 和故障改善系数 F 随 n 的增加而加大是很敏感的, 通常取 n 为 2-3 就足以满足要求。

参 考 文 献

1. F. Moskowitz, "The Analysis of Redundancy Networks", AIEE Transactions, Vol.77, part I, 1958
2. B. I. Flehinger, "Reliability Improvement Through Redundancy at Vorious System Levels", IRE National Convention Record, part 6, March, 1958.
3. James H. S. Chin, "Circuit Redundancy", IRE National Convention Record, 1959.
4. Norman G. Dennis, "Insight into Standby Redundancy via Unreliability", IEEE Transactions on Reliability, Vol. R-23 No. 5, December 1974.

RELIABILITY PREDICTION FOR STANDBY REDUNDANCY CONTROL SYSTEMS AND ITS APPLICATION

SHU Song-gui

(Institute of Automation, Academia Sinica)

Abstract This paper provides a complete analysis for the reliability of standby redundancy systems. A set of formulas for predicting the reliability have been derived and a numerical example is given in detail.

First, the reliability of the automatic transfer device itself is carefully analyzed through the consideration of the dynamic and static failures of the monitors and transfer switches, then according to the two forms of the transfer devices these failures are classified into independent and dependent groups. Finally, we find out that the independent transfer device is much better than the dependent form in system reliability. At the same time the author points out that the unreliability of the transfer device must be smaller than that of the individual subsystems, otherwise you could not get any improvement in the whole system reliability. In addition, the obvious conclusions about the effects of the stop devices and the advantages of the warm and cold standby redundancy systems are obtained.

讨 论 意 见

钱钟韩

(南京工学院)

本文分析细致、理论严正、结论明确,在选择实用系统时可以起指导作用。

本文中某些提法,可以商榷。下列几点意见,未必有当,供参考:

1) 关于分系统的数目 n

表 2 中列举了 n 等于任何数目的通用公式,并在原文中许多地方写出了 $n \rightarrow \infty$ 时的简化公式。但 $n \rightarrow \infty$ 显然是不现实的。从实用观点来看,恰恰应该确定最小要用几个分系统就可以基本上满足工程要求。从公式来看,可能 $n=3$ 时,可靠性(或 F 值)已接近理论上限值。故 $n \geq 4$ 的得益不大。实用范围是 $n=2 \sim 3$ 。这一点值得强调指出,因为分系统的数目对复式备用系统的经济代价有重要关系。

2) 在复式备用系统中,最小的 $n=2$ 。这可能是实际上用得较多的一种情况。本文例题中所用的一系列公式就是适用于 $n=2$ 的情况,有一定实用价值。实际上这些公式都可以进一步简化,从而使主要矛盾更加突出,同时亦使计算工作量大大减轻。例如,如在 $R \doteq 1$, $Q \ll 1$, 和 $\delta \ll 1$ 的条件下:

独立转换器,带有自动停车措施,当 $n=2$ 时,则公式(8b)及(9)分别化为

$$Q \doteq Q_1 Q_1' + (Q_1 + Q_1')^2$$

$$F \doteq \frac{1}{Q_1 + Q'_T + 2Q''_T}$$

如不用自动停车, 当 $n=2$ 时, 则公式(10a)和(11)分别化为

$$Q = Q_1 Q'_T + Q(Q_1 + Q''_T)$$

$$F = \frac{1}{Q_1 + Q'_T + Q''_T}$$

比较上面两个 F 式可以看出, 采和自动停车措施对可靠性讲收效不大(因为二式分母只差一个 Q''_T , 且不是主要项目).

3) 在结论中应该明确指出: 不管 n 的大小, 使用公用转换器都可以使 F 大大降低. 从原文结论第四点提出 $n=2$ 时的二个公式, 可以看出这一点. 但从原文例题($n=2$)中, 亦可以得到类似的结论:

独立转换器(有自动停车措施):

$$F \doteq \frac{1}{Q_1 + Q'_T + 2Q''_T} \doteq 71.4$$

公用转换器(有自动停车措施):

$$F = \frac{1}{Q'_R + \frac{R_1}{Q_1} Q''_T + Q_1} \doteq 9$$

比较上二式, 可见

$$\frac{R_1}{Q_1} = \frac{0.99}{0.01} = 99772,$$

也就是使用公用转换器, 将使 F 值大大降低, 从而严重损害了复式备用系统的可靠性.