浅谈快速中间继电器的动作时间

许昌继电器研究所　张斌

继电器的动作时间分触动时间、运动时间和抖动时间三部分。下面分别叙述减少这三部分时间的措施。

一、触动时间

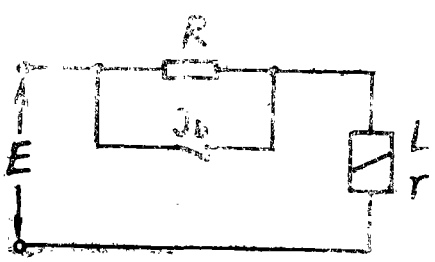
假定继电器的线圈等效于一个定值电感L和电阻r的串联，接通电源E之后的继电器线圈电流按指数增长：

$$I(t)=\frac{E}{r}\left(1-e^{-\frac{rt}{L}}\right) \quad ①$$

电流增长的速率为：

$$I'(t)=\frac{E}{Le^{\frac{rt}{L}}} \quad ②$$

由②式可知无论任何时刻电流增长的速率总是随电阻r的增加而减小。因此要减小触动时间，就得提高电流上升率，必须设法减小继电器线圈的电阻。然而在继电器激励量为电压的情况下，为了保证继电器的热稳定性，又不得不在线圈上串一高值电阻R。这无疑大大降低了电流增长的速率，延长了触动时间。为解决继电器的热稳定性与电流增长率的矛盾，可在电阻R两端并联一对继电器本身的常闭触点J_1（如图一所示）。



图一

在触动时间内，继电器尚未动作，常闭触点J_1处于闭合状态，电源通过常闭触点J_1给继电器供电，这时回路电阻仅仅是电源内阻与继电器线圈本身电阻r的串联，远小于R。由式②可知电流上升速率很高，电流能很快达到触动电流值，大大减小触动时间。而继电器动作之后即刻将常闭触点打开，电流只能通过附加电阻R给继电器供电，由于R的限流保证继电器的热稳定性。从而解决了电流增长速率与热稳定性的矛盾。以下是实测的对比数据：

以DZK—900为测试样机

动作时间mS ＼ 测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值
R上并联常闭触点	1.86	2.2	1.89	1.9	2.06	1.96	1.98	1.86	2	1.9	1.96
R上没并联常闭触点	3	3	3.12	2.98	3	3.2	3	3	3	3.1	3.04

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

以DZKK—200为测试样机

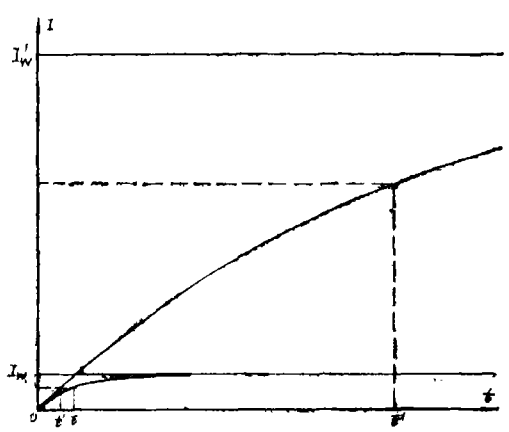
测量次数 / 动作时间mS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值
R上并联常闭触点	4.8	5.6	5.4	5.4	5.5	5.1	5.6	5.5	5.4	5.2	5.35
R上没有并联常闭触点	9.2	8.9	9.2	8.7	8.5	9	10	10	9.8	8.6	9.19

将继电器本身的常闭触点并联在电阻R上会不会降低动作值，能否保证在施加50%额定激励量时可靠拒动呢？这个问题取决于常闭触点的超行程。如果用于并联在电阻R上的常闭触点超程很大，当常开触点闭合之后尚未打开，这当然不能保证在施加50%额定激励量时拒动。如果该常闭触点的超程很小，在距常开触点闭合很远的位置就打开的话，那么只要该继电器本身能保证在50%激励量时可靠拒动，继电器的动板受到的电磁力就不能克服接触系统的反力继续运动。要么停止在某一平衡位置，要么返回到该常闭触点接通的位置。这时电流又开始增加，致使电磁力增加吸动动板。该常闭触点打开后动板又返回，反复动作，导致动板和接触系统在一个很小的范围内振动。试验也证实了这一点。

还要指出的是；将常闭触点并在电阻R上并不会增加接通瞬间的功耗。在接通电源瞬间电流从零开始按指数曲线很快上升，达到额定电流值的50%—70%时动板就要动作，马上打开常闭触点。由于电阻R的限流作用电流不会超过额定值。

从回路时间常数上来看将常闭触点并联在电阻R上，等于减小触动时间内的回路电阻，增加回路时间常数，为什么增加了回路时间常数反而会减小触动时间呢？我们知道回路时间常数仅仅是电流增长到稳态值的63.2%时所需要的时间，而触动时间是电流增长到触动电流值所需要的时间，这是两个不同的概念。将电阻R两端并联常闭触点后，对应此时的电流稳态值I_W'大大增加，电流增长到该值的63.2%所需要的时间确实增加不少，但从②式可知此时电流上升的速率却增加了不少。达到触动电流值的时间自然也就减少了许多。图二所示的是稳态电流值提高10倍时电流指数上升曲线的对比。

由电感电阻串联回路的微分方程



图二

$$\frac{di}{dt}=\frac{E-iR}{L} \quad ③$$

可知电感L越小时电流增长速率越大。在继电器线圈的电感中分主电感与漏电感两部分。主电感对应气隙主磁通，它产生电磁力。而漏电感对应的是漏磁通，不产生电磁力，徒然增加回路电感降低电流增长速率，并增加磁路磁通密度，降低磁路导磁率。因此就继电器本身来说希望尽量减小漏磁通。通常拍合式继电器的漏磁通相当大，几乎与主磁通相当。采用圆环形磁路，线圈均布是减小漏磁的理想

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

措施。但由于制造工艺上的原因这种方案不易实现。易实现的是矩形磁路，但漏磁通与线圈的安装位置很有关系。图三是线圈在不同位置时的线圈电感数值比。由图三可知将线圈套在动板上，线圈电感最小。这是由于将漏磁通减小到最低限度的缘故。作为快速中间继电器应该考虑采取这种结构。

若要把线圈套在动板上，势必要增加动板的长度，这对动作时间会有什么影响呢？设动板的长度为l，在作用力F的作用下，使动板转动的力矩$M=F\cdot l$。线密度为ρ的动板的转动惯量J

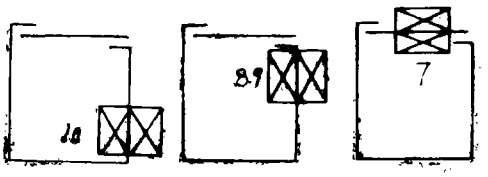


图 三

$$J=\int_0^l \rho l\,dl=\frac{1}{2}\rho l^2$$

动板转动的角加速度β

$$\beta=\frac{M}{J}=\frac{F\cdot l}{\frac{1}{2}\rho l^2}=\frac{2F}{\rho l}$$

当气隙δ大大小于动板长度时，转动角度θ可以表示为

$$\theta==\frac{\delta}{l}\text{弧度}$$

转动时间t为

$$t=\sqrt{\frac{2\theta}{\beta}}=\sqrt{\frac{2\delta/l}{2F/\rho l}}=\sqrt{\frac{\rho\delta}{F}} \qquad ④$$

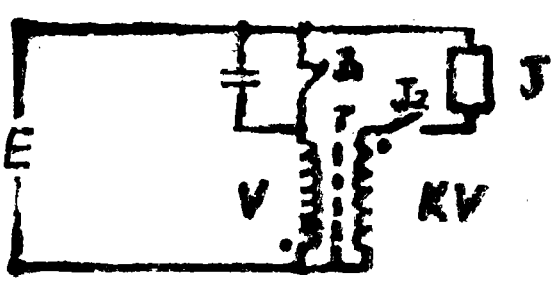
由④式可见在气隙和作用力一定的条件下，转动时间只与动板的线密度ρ有关，与动板长度无关。因此，把动板做得长一些，只要不增加线密度，不会增加转动时间。

由②式还可看出，电流上升速率与电源电压E成正比。我们可以采用变压器将直流阶跃电压提高的办法来提高加在继电器线圈两端的电压。电路图如图四所示。

J_1：继电器J本身的常闭触点；

J_2：继电器J本身的常开触点；

T：升压变压器。



图四

调整常开触点J_2的触点间隙使得在输入50%额定激励量时常开触点J_2的气隙不能被升高K倍的电压击穿。以保证可靠拒动。当激励量超过50%小于70%时被升高K倍的电压足以击穿常开触点J_2的气隙。将该电压直接加在继电器线圈两端，由于电压升高K倍，由②式可知电流上升的速率也提高K倍，使触动时间大大减小。采用这种方法能使动作时间减少到1.6毫秒。目前这种方法的动作值范围只能达到额定值的45%—85%，离50%—70%额定值的要求还有距离，并且还要求接通继电器的触点不能抖动。因此这种加速继电器动作

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

时间的方法只能作为辅助措施。

二、运动时间

由经典力学可知物体的加速度a与作用力F成正比与质量m成反比。作用在动板和接触系统并使之产生加速度的力F是电磁吸力F_x与接触系统反力F_f之差。即：

$$F = F_x - F_f$$

而F_x与F_f都是气隙δ的函数。从增加F的角度考虑，应尽量提高F_x和减小F_f，但快速中间继电器要求施加50%激励量时可靠拒动，即要求此时反力F_f大于电磁吸力F_x。为保证继电器的抗震性能又不能把反力F_f做得很小。因此只有在继电器动作之后的行程中使吸力F_x的增长大大超过反力F_f的增长。这就要求吸力特性尽量陡峭，反力特性尽量平坦。由电磁吸力能量公式看（此公式适用于气隙较大位置）

$$F(\delta) = \frac{1}{2}(IN)^2 \frac{dG_\delta}{d\delta} = \frac{1}{2}(IN)^2 \frac{\mu_0 S}{\delta^2} \quad ⑤$$

吸力特性的斜率为

$$F'(\delta) = -(IN)^2 \frac{\mu_0 S}{\delta^3} \quad ⑥$$

以上两式中

I：激磁电流；N：线圈匝数；μ_0：空气导磁率；S：气隙导磁截面积。

由⑥式可知减小气隙能有效提高吸力特性的陡峭程度。但要保证触点的断弧能力，触点间隙又不能太小。为解决这一矛盾，可适当加长铁心气隙与触点之间的距离，通过杠杆放大作用来保证较小的铁心气隙控制较大的触点间隙。从而保证触点断弧能力和吸力特性的斜率。由马克斯威尔公式（此公式适用于气隙较小位置）

$$F = \frac{1}{2}\frac{\phi^2}{\mu_0 S} \quad ⑦$$

由⑦式可知在气隙很小时，增大气隙截面积反而会使吸力下降。由④式可知在气隙较大时，吸力随气隙截面积增大而增大。由④式与⑦式综合来看，增大气隙截面积会使吸力特性平坦，这与实际测出的吸力特性曲线也是相符的。因此作为快速继电器的气隙截面积不宜过大，即应取小极靴或不要极靴。这与式⑥矛盾之处在于⑤式只适用于气隙较大的情况，没有考虑铁磁阻和漏磁通。

从触点系统加速度角度来看，应减小触点系统的转动惯量和动板的线密度。这与上述加长气隙与触点间距离的要求是相矛盾的。因此只有全面考虑才能选出最佳参数。

三、抖动时间

从减小运动时间角度考虑，无非要增加接触系统的加速度和速度。这无疑要增加触点接触瞬间的冲击能量，加剧抖动程度。瑞典ASEA公司生产的快速中间继电器的动触点片做成根部弹簧刚度小，触点到动板触压接触系统一段的弹簧刚度大的形式。静触点片的弹簧刚度很大，一旦触点接触，反力陡然上升，既有利于吸收动板的冲击能量又能有效克服触点反弹抖动。是减小触点抖动的很好的措施。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

日本系统保护装置技术开发现状和今后动向

福建电力试验研究所　蔡石山

（四）　提高保护继电器可靠性技术

为了提高保护继电器的可靠性，日本保护继电器除使用的元器件在制造厂进行充分的老化、筛选，降低额定值使用，而且一般不使用铝电解电容；用户方面除了迅速地把故障统计和不良对策向制造厂反馈以争取可靠性提高之外，他们采取的技术措施有：

（1）保护装置把串并联二重化结构作为标准，主干系统中主保护全部二重化，使对系统稳定影响很大的拒动几率极小。在主检出继电器之外还另外采用故障检出继电器，二者组成与条件构成跳闸回路，以改善误动作几率。

（2）为了使保护在待机状态下出现不良时能快速发现修复，一般静止型继电器都附加自动监视方式。自动监视采用二种方式，一种是根据装置正常状态的变化检出保护装置可能误动的不良情况，这称为常时监视；另一种是自动检查方式。用加入模拟量来确认保护是否正确动作，从而查出保护可能拒动的不良情况。表四列出了日本最近采用自动监视方式发现保护装置故障的实绩数据，如采同时采用常时监视和自动检查，可以发现90%的装置不良的情况。

（3）保护继电器都加装适当的浪涌吸收元件，加装屏蔽、在线滤波器，将强电和弱电线束分开以抑制影响保护可靠性的外来浪涌、噪声。他们认为外部浪涌、噪声是从PT、CT回路和电源线，通过控制电缆窜入继电器的，以及由于保护装置内部辅助继电器回路等通断引起的。近年来继电器装置进入电子化，所以他们认为要充分考虑以无线电收发报机为代表的辐射电磁场对静止型继电器的影响。国际上IEC等单位也正在继续对电波障碍的规格化进行研究。

表四　自动监视的故障发现率

		故障发现率(%)
只有常时监视		26
自动检查	动作不动作检查	63
	特性检查	92

（五）　继电器自动试验装置研制方面十分活跃

随着电力系统的扩大，保护继电器的数量与日俱增，对保护继电器可靠性要求也更为严格。日本从事保护维修工作的人员难以得到确实的保证。因此继电器自动试验装置的研制十分活跃。继电器自动试验装置分为便携式和1：N在线式两种。便携式继电器

综上所述，要减少快速继电器的动作时间，可采取以下措施：

1．将继电器本身的常闭触点并联在电阻R上。

2．采用变压器将电源电压阶跃提高，将继电器本身的常开触点串联在线圈回路，以保证突然施加50%额定电压时可靠拒动。

3．从结构上可采取将继电器线圈套在动板之处，取消或减小极靴，减小气隙等措施。触点片应做到根部弹簧刚度小，触点到动板触压接触系统一段弹簧刚度大的形式。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net