

# 电磁继电器对高频振荡器谐振回路频率的影响

四机部一四三一所 陈钟谋 程显海

## 引言

在通讯、自控等无线电设备中常常需要借助继电器对高频振荡电路进行转换,在某些应用场合对这些高频振荡器甚至还要求有很高的频率稳定度,如服务于空间技术对大气折射指数进行测量的轻型折射率仪,就需要依靠继电器对高频谐振回路实行交替转换,同时轻型折射率仪振荡器具有 $10^{-6}$ 量级的频率稳定度,这时对继电器本身带来的干扰模式进行研究在某一研制阶段就是一个关键问题,本文为此目的对继电器引入后,对高频谐振回路频率的影响问题进行探讨。这对于一部分实际应用线路和继电器的设计是有一定普遍意义的。

## 一、电磁现象与频率

对图 1 进行分析可得到下面方程

$$V_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$V_2 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt} \quad \dots\dots\dots (2)$$

忽略  $R_1$ 、 $R_2$ , 当  $V_1 = 0$  时图 1 简化成图 2 由此可以导出:

$$L'_{e1} = L_2 - \frac{M^2}{L_1} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$L_1$  为继电器线圈的自感,  $L_2$  为簧片的自感,  $M$  为继电器线圈与簧片之间的互感。

若在 A、B 间接进由  $L_0$ 、 $C_0$  组成的高频谐振回路, 由图 4 所示, 这就相当于通过继电器来接通高频谐振回路的情形, 要分析继电器对高频谐振回路频率的影响, 只须分析图 4。

由于  $L_2$  为继电器连通外电路的簧片的电感, 其作用可纳入等效的  $L_0$  中, 所以由

$$(3) \text{ 式可以得到 } (4) \text{ 式 } L'_{e1} = -\frac{M^2}{L_1} \quad \dots\dots\dots (4)$$

在方程 (4) 中, 如果将  $L_2$  近似的取为  $L_1$  的  $N^2$  之一 ( $N$  为继电器线圈的圈数), 在通常的情况下两个相同线圈之间的紧耦合系数  $K = 0.9$ , 又因为  $K = -\frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$ ,

所以当  $N = 3000$ 、 $L_1 = 1$  亨时的  $L'_{eff}$  有效电感近似为  $0.09$  微亨，这样小的电感量已足以影响到高频谐振回路的频率。举例来说  $15MHz$  的振荡器，若  $C_0$  为  $25pf$ ， $L_0$  也只有  $4$  微亨左右。虽然实际上簧片的电感形状系数很小，加之耦合很松，则感应到高频谐振回路的电感量只有千分之几微亨或更小，由此产生的高频谐振回路的频率变化约为几千赫或还要小些。

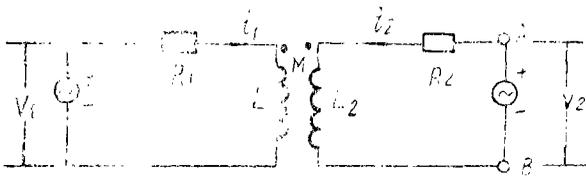


图 1

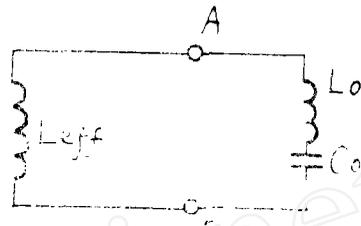


图 4

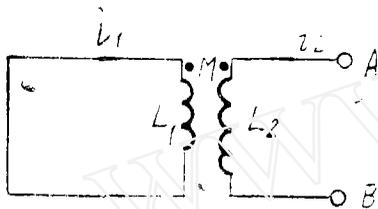


图 2

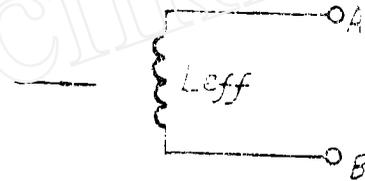


图 3

## 二、电感热漂移

影响线圈参量稳定性的因素主要是温度和湿度，但在我们的实验条件下湿度基本不变，忽略它的影响。而温度对线圈电感的影响由电感的温度系数来表示

$$\alpha_L = \frac{1}{L} \frac{dL}{dt} \quad (1/C^\circ)$$

$$\Delta L = L \cdot \alpha_L \cdot \Delta T_{max} \quad \dots \dots \dots (5)$$

$L$  - 线圈的固有电感量

$\Delta T_{max}$  - 线包绕组的温度变化

考虑到热效应不难分别从方程(1)和(2)导出

$$L_{eff} = L_2 - \frac{M^2}{L_1 (1 + \alpha_L \cdot \Delta T_{max})} \quad \dots \dots \dots (5a)$$

$$L_{IM} = \frac{M^2}{L_1} \cdot \alpha_L \cdot \Delta T_{max} \quad \dots \dots \dots (5b)$$

设  $L_1 = 1$  亨  $\Delta T_{max} = 50^\circ C$ ， $\alpha_L = 40 \times 10^{-6} (1/C^\circ)$ ，耦合到高频谐振回路中的  $L_{IM}$  约为  $0.00018$  微亨，这相当于对上述  $15MC$  的振荡器引起几百周到  $1KC$  左右的频率变化。

频率“热漂移”的规律由线包热膨胀的物理性能决定，它取决于继电器线包的材  
料、线圈的形状及其散热导致的热平衡过程。通常热平衡引起的尺寸变化具有指数递增  
形式，由急剧变化逐步缓慢地稳定到某一个常数值， $\frac{dL}{dt}$ 的变化完全类似。继电器从吸  
合到释放频率必从 $f_0$ 增至 $f_1$ ，相反吸合时从 $f_0$ 减至 $f_2$ ，这是因为

$$f \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_0 \pm L_{MT}) \cdot C}} \dots\dots\dots (6)$$

而且在释放时 $L_{MT}$ 为负，吸合时为正。因此电感的热漂移形式也就决定了高频谐振回路  
谐振频率的变化形式。

### 三、继电器簧片自然谐振频率对载频的调制

每次吸合过程簧片长度由 $l_0$ 逐步减小至 $l_1$ ，自然谐振频率由 $f_{SP0}$ 升高至 $f_{SP1}$ ，吸力  
由 $F_0$ 增至 $F_1$ ，磁路间隙由 $X_0$ 降到零，释放时则由 $l_1$ 恢复至 $l_0$ ，频率由 $f_{SP1}$ 降低  
到 $f_{SP0}$ ，斥力由 $F_2$ 降至 $F_3$ ，实际上存在着磁滞现象使吸力和斥力不恒等。继电器工作电  
压是选定了的，上面已经指出在每次吸合及释放过程中的吸力和斥力不等，就必然会有  
多余的储能存在。其能量除一部分转化为机械功外，另一部分转化为热能消散，其余成  
为干扰高频谐振回路的储能（包括电、磁两方面）。

$$d\epsilon = -\frac{1}{2}i^2 dL \dots\dots\dots (7)$$

又按能量守恒定律

$$d\epsilon = F dX \dots\dots\dots (8)$$

$$\text{则 } dL = -\frac{2F \cdot dX}{i^2} \dots\dots\dots (9)$$

形成干扰的电感量

$$dL_f = -\frac{2dF \cdot dX}{i^2} \dots\dots\dots (10)$$

为了简化起见，设 $\Delta F$ 在吸合及释放过程中按线性变化。 $\Delta L_{eff}$ 具有相反符号，即每次  
吸合过程中频率应向降低的方向漂移，反之释放时向频率增高的方向漂移，这就是由于  
振簧的自然谐振频率变化对主振频率调剂的结果。

本节的讨论参考图 5。

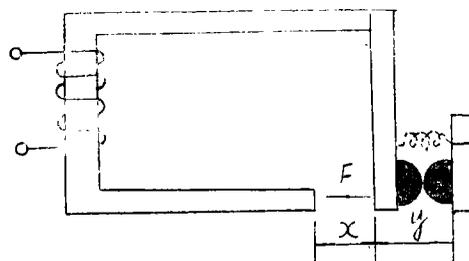


图 5

#### 四、继电器触点间的分布电容

在高频谐振回路中应用继电器作转换开关的等效电路形式之一由图 6 所示

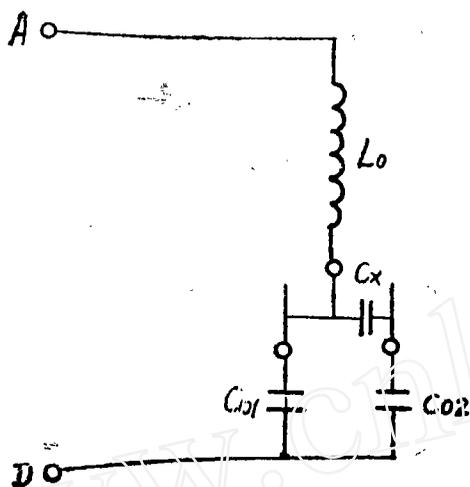


图 6

$C_x$ 为触点间的分布电容,静态时其值对于小型电磁继电器约为  $1 \sim 5 \text{ pf}$ 。引入  $C_x$  则振荡回路的等效电容分别为  $C_{01\text{eff}}$ 和  $C_{02\text{eff}}$ ,设  $C_{01} = C_{02} = C_0$  则  $C_{0\text{eff}} = \frac{C_0 C_x}{C_0 + C_x} + C_0$ ,

当  $C_x \ll C_0$  时, 则

$$C_{0\text{eff}} \approx C_0 + C_x \quad \dots\dots\dots (11)$$

继电器通电后动态电容  $C_x$  则是一个变量,

$$C_x = \frac{\alpha S}{y_0 + dy} = \frac{\alpha S}{dy} \quad \dots\dots\dots (12)$$

式中:  $S$  为簧片有效工作面积。

$y_0 + dy$  是簧片之间的间距, 对于图 5,  $y_0 = 0$

$\alpha$  是与继电器结构和簧片之间的绝缘介质性能有关的常数。

又由图 5 可以看出衔铁与铁芯间的吸力或斥力为  $F$ , 而  $dX = -dy$ , 则 (9) 式又可以写成:

$$F = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dy} \quad \dots\dots\dots (13)$$

将 (13) 式代入 (12) 式得到:

$$C_x = \frac{2 S \cdot F \cdot \alpha}{i^2 dL} \quad \dots\dots\dots (14)$$

从方程 (14) 不难看出, 当继电器吸合时  $F$  由小变大, 则  $C_x$  由小到大而造成工作频率逐渐降低。式中  $i$  的含意在下一节述及。

反之释放时, 虽然继电器线包的电流中断了而失去磁动势, 但或多或少地仍存在着

剩磁，它企图保持衔铁与铁芯吸合，同时铁芯中磁通的减少也受到反磁动势的阻碍造成了释放时延，其结果使簧片缓慢地恢复到初始状态，使  $C$  在释放过程中由大到小变化，而造成工作频率逐渐升高。

另外也要考虑到线包的热损耗，当工作电压一定时它导致电流的降低，使  $F$  变小，造成  $y$  的减小，触点分布电容的增加，其结果导致频率的下降，这就是触点分布电容的“热漂”，这是外力作用的结果，与维持电磁惯性的内力不能混淆，它们是作用方向相反的两个力，其作用结果类同也是不言而喻的。

还应当指出，当利用继电器实现谐振槽路的快速交替转换时，由于磁势交替地增减及簧片的机械惯性作用会引起簧片的低频阻尼振荡，其结果是簧片触点间距不断变化，造成触点间分布电容的不断变化，从而降低了振荡回路的频率稳定度。

### 五、继电器用作转换开关后高频回路的谐振频率

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{(L_0 + L_M + L_{M1} + L_1) \cdot (C_0 + \frac{C_0 C_x}{C_0 + C_x})}}$$

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{\left\{ L_0 \pm \left[ -\frac{M^2}{L_1} \left( 1 + \alpha_L \Delta T_{max} - \frac{2 dF \cdot dx}{i^2} \right) \right] \right\} (C_0 + C_x)}}$$

..... (15)

将各种影响纳入可得(15)式，由上式可见高频回路的谐振频率除了由集总元件  $L_0$ 、 $C_0$  决定外，继电器引入作回路转换开关后，如果不采取有效措施将对谐振频率产生严重干扰。它与高频谐振回路与继电器线圈的互感平方成比例；与线圈发热引起的电感改变量成比例；与簧片自然谐振频率在开关过程中的变化而导致的吸力或斥力的变化成比例；与磁路间隙的变化成比例；与由于吸力和线圈的热耗等变化导致的结点间分布电容  $C_x$  的变化量成比例。这里虽然也与电流平方成比例，但物理意义指的是  $dF$  与  $dx$  两个量的变化比例而言，因为在某一特定工作条件下， $i$  是常值。电感量仅与线圈的形状，直径、互感量等诸因素有关，而与电流大小是绝无关系的。

### 六、讨 论

综上所述，不予先采取有效措施将电磁继电器引入频率稳定度要求很高的高频谐振回路是不允许的，更不能将它用在有时间程序控制的高频系统。要减小继电器对高频谐振回路的影响，就必须减小高频谐振回路与继电器线圈间的耦合，如将继电器线圈作成双层绕组，并将外层非工作线圈进行短接对减小感应值是很有有效的。同时在继电器回路中开关两端并接电阻、电容串联回路或在线圈上并接半导体二极管对于减小感应量也是有效的。为了减少由于线圈发热对线圈电参量的影响，用于高频的继电器的线圈最好由热膨胀系数小的材料做成。对于舌簧继电器它类似于一个音叉式振荡器，所以不宜用作高频回路的转换开关，而应当选用在开关过程中本身自然谐振频率变动不大的元件作

为电磁驱动器。在没有其它合适元件而不得不用舌簧继电器来开关频率比较线路时，利用前面所叙及的继电器在开或关时高频谐振回路频率不同的极性变化规律，采用两个继电器同时分别在开或关状态下工作就可以减小由同一个继电器在开和关两个不同状态下工作而产生的频率跳动方面的干扰。不言而喻要保证高的频率稳定度应当选择触点间分布电容小的继电器来作为谐振回路转换开关。

## 七、双层绕组继电器对减小电磁干扰的分析

正如历届国际继电器会议大量文献所评，利用具有双层绕组线圈的继电器，较比采用电容电阻或半导体组件来衰减继电器的电磁干扰更有效和经济。

采用本文所做的分析方法双层绕组线圈的作用是一目了然的，由图7并利用前面的分析方法可以导出具有双层绕组继电器线圈的有效电感量  $L'_{eff} = L'_2 - \frac{M^2}{L_1}$ ，由此可将图7化成图8的形式，再进行类似的演变就可以得到具有双层绕组线圈的继电器对高频谐振回路的有效干扰电感量  $L_{bi,eff}$

$$L_{bi,eff} = L'_2 - \frac{M^2}{L'_2} = L'_2 \cdot (1 - K^2) \quad \dots\dots\dots (16)$$

前面已经指出具有单层线圈的继电器对高频谐振回路的有效干扰电感量  $L_{eff}$

$$L_{eff} = L_2 \left( 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2} \right) = L_2 (1 - K^2)$$

则可导出具有双层绕组线圈的继电器较比只有单层线圈的继电器的有效干扰电感量减小了几倍。

$$n = \frac{L_{eff}}{L_{bi,eff}} \quad \dots\dots\dots (17)$$

一般取继电器双层绕组线圈间的耦合系数为0.9则可以得到  $L'_{eff} \approx 0.2 L_1$ ，而  $L'_2$  又假定为  $L'_{eff}$  的  $N^2$  分之一倍，所以当双层绕组继电器和单层绕组继电器的圈数  $N$  相同时由(17)式可以得到

$$n = \frac{25 - K^2}{5(1 - K^2)} \quad \dots\dots\dots (18)$$

文献5中指出继电器开关过程中产生的最大瞬时干扰电压

$$V_{max} \approx I_0 \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \dots\dots\dots (19)$$

$I_0$ —继电器工作电流

$L$ —有效电感

$C$ —线圈导线间的分布电容

则单层和双层线圈继电器所产生的最大瞬时干扰电压之比为：

$$\frac{V_{max,单}}{V_{max,双}} = \sqrt{\frac{L_{eff} \cdot C_{双}}{L_{bi,eff} \cdot C_{单}}} = \sqrt{n} \cdot \sqrt{\frac{C_{双}}{C_{单}}} \quad \dots\dots\dots (20)$$

在通常的情况下  $\sqrt{\frac{C_{双}}{C_{单}}} = 1.08$ ，所以

$$\frac{V_{m,单}}{V_{m,双}} = 1.08 \times \sqrt{n} \dots\dots\dots (21)$$

从(20)式还可以看出若通过各种不同的连接方法来增大双层绕组线圈的有效电容量,对抑制瞬时干扰电压也有明显作用。如果将K取具体数值,可见到:得出的  $\frac{V_{m,单}}{V_{m,双}}$  值与文献5提供的实验数据是接近的。

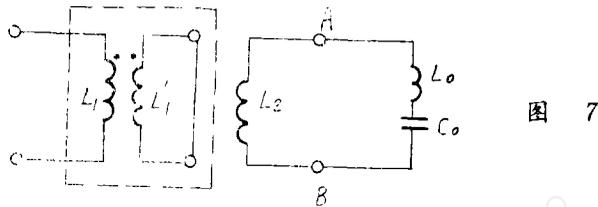


图 7

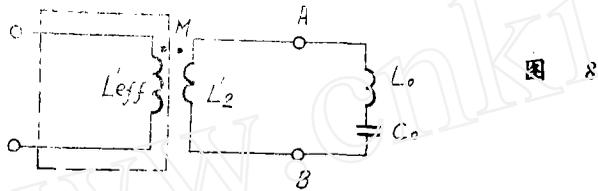


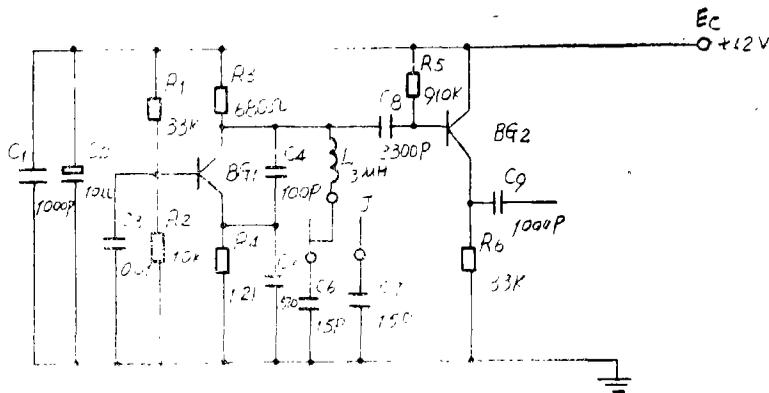
图 8

### 八、实验结果

实验电路由图9所示。

实验设备:

- S B—14, S B M—10示波器
- E<sub>312</sub>电子计数式频率计
- S Y—3 数字式打印机等



BG<sub>1</sub>、BG<sub>2</sub>: 3DG6C    J: JRC—6M

图 9

**实验结果:**

当串联谐振回路  $L-C_0$  不通过继电器直接连接时, 其电路的振荡频率为  $f_{0.1} = 22,029,450$  赫, 这时振荡频率在常温下的漂移由图10曲线 I 所示。

当  $L-C_0$  通过  $JRC-6M$  继电器常闭接点连接时, 由于继电器接点间分布电容和簧片自感的影响振荡频率降低为  $f_{0.2}$ ,  $f_{0.2} = 21327650$  赫, 该状态下电路的频率漂移由图10曲线 II 所示。

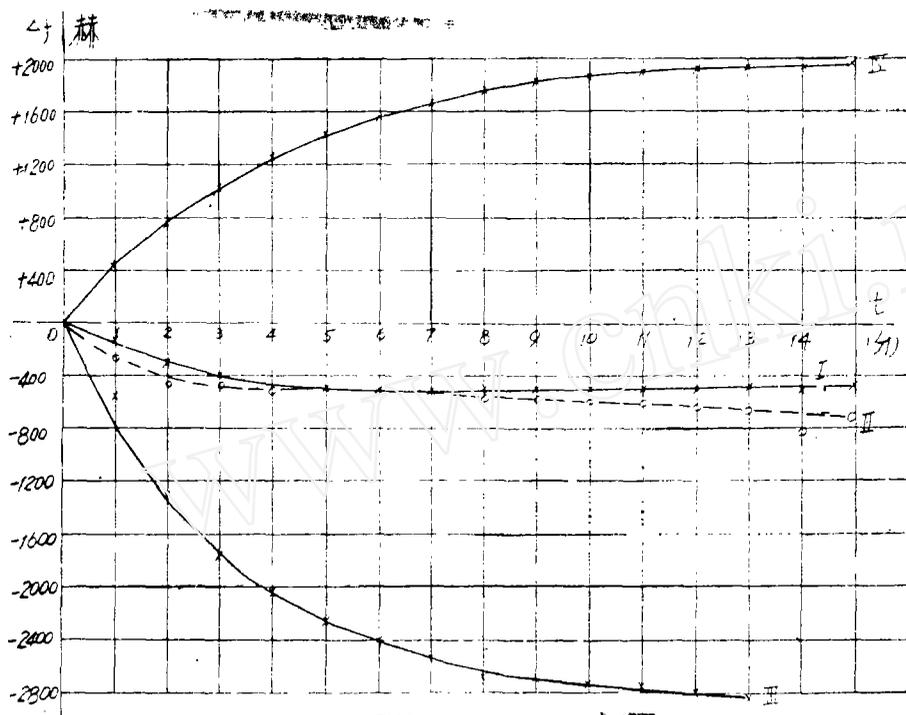


图 10

继电器转换过程中对高频振荡回路频率稳定度的影响, 当转换周期比较长时由图10曲线 III、IV 所示。其中曲线 III 为继电器吸合时利用常开接点接通  $L-C_0$  回路时振荡频率变化曲线, 曲线 IV 为继电器释放时利用常闭接点接通  $L-C_0$  回路时振荡频率的变化曲线。显然可见当继电器吸合时导致了振荡频率的降低, 而释放时导致了振荡频率的上升。在实验过程当中, 当我们利用两个参数完全相同的继电器交替吸合和释放来实现槽路电容  $C_0$  和  $C_1$  的转换 (原理图由图11所示) 时, 上述对频率的干扰现象得到明显的改善。

继电器在短周期内实现谐振槽路的转换对频率稳定度的影响分别由图12、13、14、15所示。从图12和图13可以看出, 在继电器开关中并联一适当的  $R-C$  回路, 转换过程

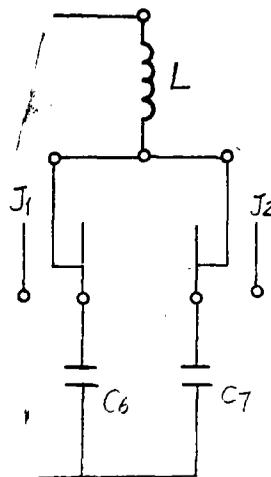


图 11

当中振荡频率的跳动有所减小。在图14和图15中不但在开关中并联一适当的R-C回路，而且对振荡回路的电感线圈L加上了一个屏蔽罩，则振荡频率的跳动又有所减小。所以在实际应用情况下如果能采取本文上述的各种措施，尤其是采用具有双层线圈绕组的继电器，对频率稳定度的影响还会大大减小。

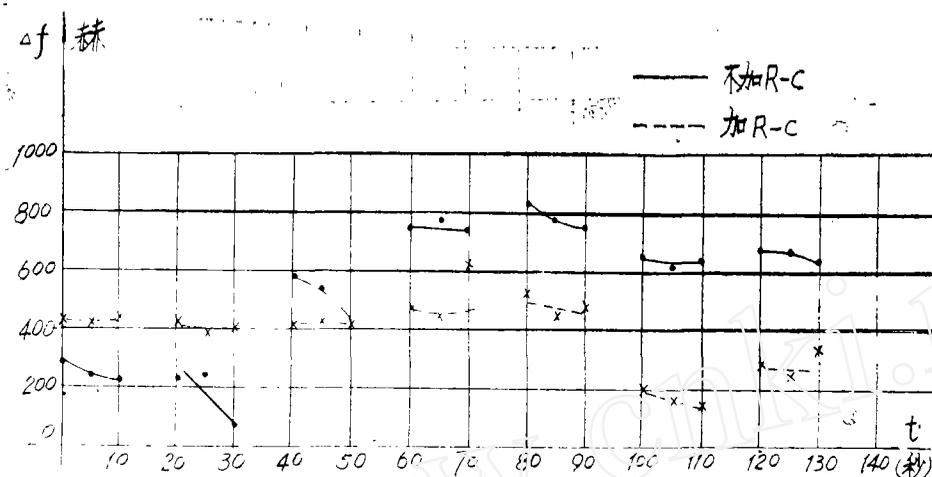


图12 继电器释放时利用常闭接点接通L-C<sub>7</sub>回路时频率变化曲线

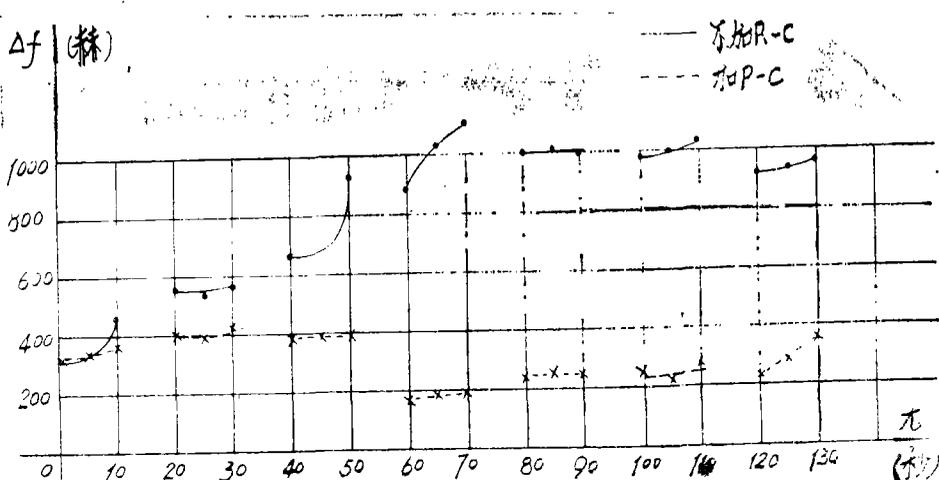


图13 继电器吸合时利用常开接点接通L-C<sub>7</sub>回路时频率变化曲线

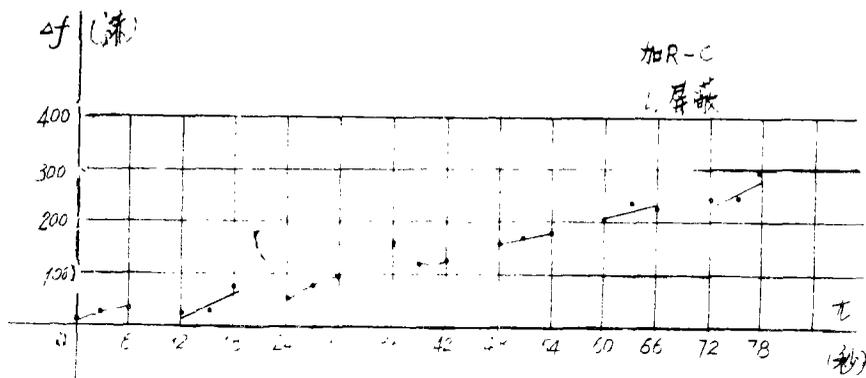


图14 继电器释放时利用常闭接点接通L-C回路时频率变化曲线

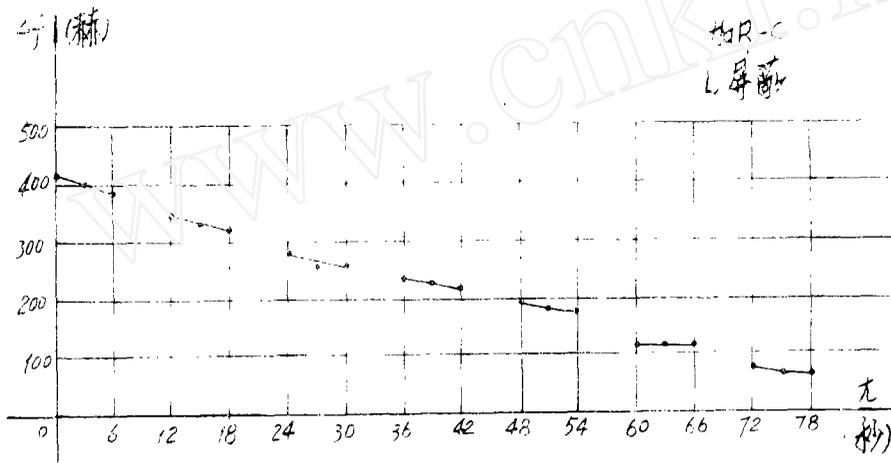


图15 继电器吸合时利用常开点接通L-C回路时频率变化曲线

## 九、结束语

本文研究过程中林遇春同志完成了不少实验工作，作者谨在此表示感谢。