

微小静電容量変化測定器 に於ける結合線路の取扱

安 田 力*

(信州大学 工学部通信工学科教室)

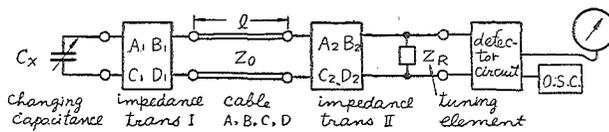
1. 緒 言

静電容量の微小変化を測定する方法のうち、被測定変化容量を含む回路にその共振周波数に近い一定周波数の高周波電源を結び、容量変化によつて回路中の電流又は電圧の振巾、位相が急変することを利用して、その容量変化の大きさを測定する型のものについて考えることにする。

この様な装置に於て、被測定変化容量は概ね特定個所に於ける圧力、変位、速度、誘電率変化等の微小量を適当な方法で静電容量変化に転換したものであるから、その近傍は機械的振動、衝撃、温度変化、湿気等の悪条件下にあることが多く、高感度の検出装置をそれらの障害から保護するために通常それを被測定部から隔離して据付け、その間を cable で連結して動作の安定化を図るとともに、測定部位に於ける装置の占有空間を極力小さくする様につくられている。

しかしながらこの cable には相等大きい分布容量があり、その先端の被測定容量の百分率変化はそのため甚だしく低下されることになる為高感度の検出装置を用いても微小な容量変化を検出することは困難となる。これを防止するには impedance 変成器^{1) 2) 3) 4)}を用いて等価容量を大とする事が考えられ、又広く実用されている。第1図は之等の測定系の標準配置を示す。

第 1 図



又一般に cable 内に生ずる損失は同調回路のQ、ひいてはこの種検出器の感度に直接の影響を及ぼし、更に使用する波長に比べて cable の長さが極めて小

であるとは云えないことが多いから、この様な測定装置の設計又は取扱に当つては cable を分布定数回路として考えねばならない。

筆者はさきにこの様な cable を使用した場合、その受端に被測定容量を取付けたその送端 impedance の変化率と容量変化率との関係を解析して若干の実験結果と⁵⁾もに発表したが、今回は与えられた被測定容量の変化を指定された距離を隔て、据えつけられた検出装置によつて感度よく測定する為に必要な回路条件を求めめるため、送端 impedance の諸元を cable 並びに各部の損失を考慮に入れて解析し、代表的な検出方式数種について回路条件と感度との関係を明らかにした。

* 信州大学助手

2. 結合回路の動作

変化容量と検出装置を結ぶ回路はいわゆる線型回路網であるから、通常の回路網理論で処理することができる。即ち Hô-Thévenin 定理によれば、回路中の一分枝 Z_x に電流 I_x が流れているとき、 Z_x が δZ_x だけ変化したとすれば回路各部の電流電圧の変化分は、この $Z_x + \delta Z_x$ に直列に $-I_x \delta Z_x$ の値の新たな電源を挿入し、他のすべての電源を零とおいたときの各部の電流、電圧の値に等しいから、一般には之によつて検出装置を含めた回路の動作を明らかにすることができる。

しかし装置の出力指示に直接関係の共振素子の特性としては、その reactance の値、その百分率変化、 Q 等であるから、結合回路の動作を示すものとして、その先端に Z_x を結んだときの他端からみたいわば送端 impedance とも云うべき Z_s に着目し、その値、長さ Q_s 、並びにその百分率変化と Z_x の変化率との関係を求めればよいことが判る。

結合回路の四端子定数を A, B, C, D とするとき、受端に Z_x を結んだ時の他端からみた impedance Z_s の値は、

$$Z_s = (AZ_x + B)(CZ_x + D)^{-1} \quad (1)$$

こゝで若しこの Z_x が δZ_x だけ増加したとき Z_s が $Z_s + \delta Z_s$ に変つたとすれば

$$Z_s + \delta Z_s = Z_s \left\{ 1 + \delta Z_x (AZ_x + B)^{-1} \right\} \left\{ 1 + \delta Z_x (CZ_x + D)^{-1} \right\}^{-1}$$

こゝで δZ_x が微小であるときにはその高次の項を Z_x に対して省略し、 $AD - BC = 1$ であることに注意すれば

$$\delta Z_s = Z_s (AZ_x + B)^{-1} (CZ_x + D)^{-1} \delta Z_x$$

故に Z_s の変化率と Z_x のそれとの比 k_z は

$$k_z = \frac{\delta Z_s / Z_s}{\delta Z_x / Z_x} = \frac{Z_x}{(AZ_x + B)(CZ_x + D)} \quad (1)$$

となる。一般に Z_x 並びに四端子定数は複素数であるからこの k_z も実数ではなく、とくに Z_s の振巾変化が問題になる様な場合 (§3 i) ii)) には k_z の代りに $|Z_s|, |Z_x|$ の変化率の比 $k|_z|$ を考えねばならない。簡単な考察によれば Z_x が Q のあまり低くない reactance であるときにはこの $k|_z|$ が

$$k|_z| = \frac{\partial |Z_s| / |Z_s|}{\partial |Z_x| / |Z_x|} = \frac{\Phi_r}{\Phi_r^2 + \Phi_i^2} \quad (2)$$

ここに Φ_r, Φ_i は夫々 $k_z^{-1} = (A + B/Z_x) \cdot (CZ_x + D)$

の実部と虚部である。そして更に Z_s も Q の甚だしく低くない様な reactance であるときには、 $\Phi_r \gg \Phi_i$ であるからその範囲では、

$$k|_z| \doteq 1 / \Phi_r \quad (3)$$

と考えられる。

又 Z_s の Q 即ち Q_s はその虚部 X_s と実部 R_s との比として示されること周知の通りであるが、之は Z_x の Q より必ずしも低くはならない。

3. 結合線路の動作

本節では結合回路のうち特に線路の動作を明らかにするため、その先端に被測定 impedance Z_x を取付けた特性 impedance Z_0 、減衰定数 β 、位相定数 $\alpha (\doteq 2\pi/\lambda)$ 長さ l の高周波 cable の他端からみた impedance Z_s について前節の結論を用いてみよう。

この様な cable の四端子定数は周知の通り

$$\left. \begin{aligned} A=D &= \cosh (\beta+j\alpha) l, \\ B &= Z_0 \cdot \sinh (\beta+j\alpha) l, \quad C = \{ \sinh (\beta+j\alpha) l \} / Z_0. \end{aligned} \right\} (4)$$

であり、 Z_x をその Q と impedance ratio で表わし、

$$Z_x = X_x (Q_x^{-1} + j), \quad x = \tan^{-1} \eta_x, \quad \eta_x = X_x / Z_0 \quad (4)$$

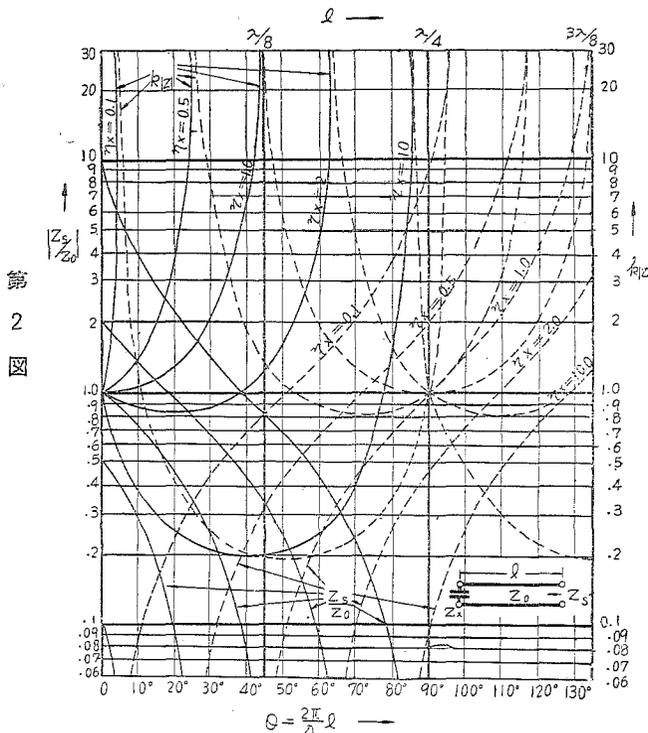
とすれば 前節の結果により Q_s が甚だしく低くない範囲で夫々次式が成立する。

$$X_s \doteq Z_0 \tan (\alpha l + x) \quad (5)$$

$$Q_s = \frac{2 \sin 2 (\alpha l + x)}{\sin 2x \{ 4 \beta l (\sin 2x)^{-1} + Q_x^{-1} \}} \quad (6)$$

$$k|_z| = \sin 2x / \{ \sin 2 (\alpha l + x) \} \quad (7)$$

第二図はこれら (5), (7) 両式で示される X_s , R_s の値の cable の長さ (それは使用電波の波長 λ を用いて位相定数の形で示してある) に対する変化を impedance 比 η_x を parameter にとつて表わしたものである。



第 2 図

同調回路をつくるため、この X_s に略々大きさの等しい反対符号の reactance X_R を組合せたときには、その Q を Q_R として合成の Q は次式で表わされる。⁽⁶⁾

$$Q = Q_R \cdot Q_s (Q_R + Q_s)^{-1} \tag{8}$$

この Q_s として(6)の値を用いれば

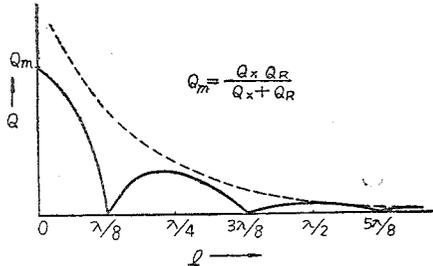
$$Q = \left\{ Q_R^{-1} + k|z| \left\{ Q_x^{-1} + 4\beta l (\sin 2x)^{-1} \right\}^{-1} \right\}^{-1} \tag{9}$$

となる。実際には式中 cable の損失を代表する $4\beta l$ の値は他 Q_R^{-1} 又は Q_x^{-1} と比べると相等に大きくなるのが普通で、(但し cable の長さ l が極めて小であるときを除く) その様なときには大体

$$Q \doteq \sin 2(al+x) / 4\beta l \tag{10}$$

とても良いと思われる。第三図は Q の値の l に対する変化を略示したものである。

第 3 図



4. 各種検出回路に於ける Cable の動作

一般に検出装置の出力指示は共振素子の微小変化量その他、検出の方式により、共振回路の Q や、並列共振 impedance $P (= X_s Q)$ 等も関係する。そしてこれらが感度にいかなる関係があるかは検出方式により一概に云えないが、次に代表的な数種の型についてそれらの関係を仮定し、それによつて線路の適当

な使用条件を求めることにする。

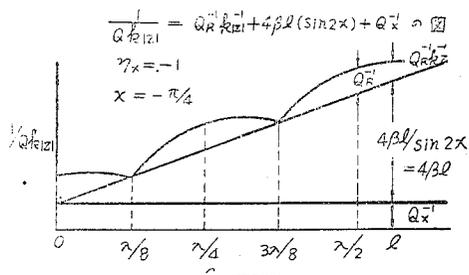
i) 振巾変化検出型(その一) 一定周波数の電源を同調回路に加えたとき、素子の変化により、回路の電圧(流)の振巾が変わるので、この振巾の変化率に比例した指示を得るものでは、回路を最適条件においたときには指示は素子の変化率と同調回路の Q とに比例するから、cable の動作を示すものとしては

$$Q \cdot k|z| = \left\{ Q_R^{-1} k|z|^{-1} + Q_x^{-1} + 4\beta l (\sin 2x)^{-1} \right\}^{-1} \tag{11}$$

が問題となり、この式の { } 内の値の l に対する変化を $\eta_x = -1$ の時について図示

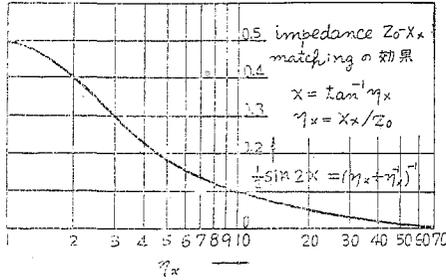
すると第4図の様になつて途中に周期的な極値がある。又その第3項は cable の長さとともに増大し、又之は前述の様に屢々大きい役割を示すから、 $Z_0 = |X_x|$ 即ち $x = \pi/4$ として成るべくその値を小とすること(損失の少ない impedance 変成器等を使用して行ふ)は感度をあげるに有効である。この結果は power の伝達のとき問題となる impedance

第 4 図



matching の条件と似ていて面白いことである。第5図に之を示す。

第 5 図

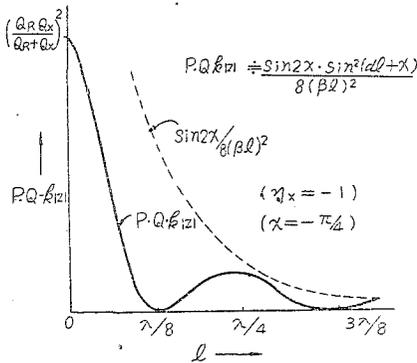


$$\sin(2x) \cdot \sin^2(al+x) / \delta(\beta l)^2 \quad (13)$$

(一例として $\eta_x = -1$ のときのその cable の長さとの関係を示せば第 7 図のようになる。)

iii) 位相変化検出型 同調回路の電圧又は電流の位相が共振点の近くで急変す

第 7 図



8) 路のある種の使用法によつては、格子電圧の振巾変化と位相変化を同時に利用しているのでそれらの合成特性を示すものとして、前二項に示した結果を適用してそれらの積をとれば、

$$P \cdot Q^2 \cdot k|z| = X_s \cdot Q^3 \cdot k|z| \quad (14)$$

となり、cable が余り短くないときには

$$\sin 2x \sin^2(al+x) \cos(al+x) / 32(\beta l)^3 \quad (15)$$

が感度比例量ということになる。即ち cable の長さとともに急速に感度が低下する。例として $\eta_x = -1$ のとき (15) の分子の値は第 8 図のようになる。

5. 結 言

被測定容量と検出装置との間を cable で連結して微小容量変化を遠隔測定する場合、その cable の特性が感度又は出力指示に及ぼす効果を明らかにし、結合回路を用いる

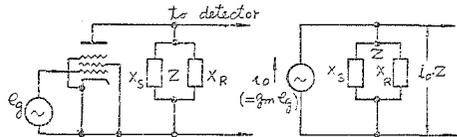
ii) 振巾変化検出型 (その二) 前項の電圧 (流) の振巾変化の大きさを直接取

出す様なものでは指示が P, Q, 素子変化率の積に比例するものが多い。(たとえば第 6 図の如く) この様なときには

$$P \cdot Q \cdot k|z| = X_s \cdot Q^3 \cdot k|z| \quad (12)$$

が問題となり、線路の損失が主として働く様なときに、この値は次の様に表わされる。

第 6 図



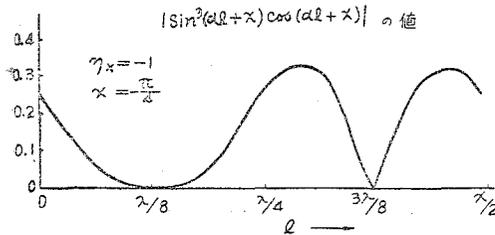
五極管を用いた定電流源電圧振巾出力型回路

(8) るのを直読型位相差計のような位相変化に比例した指示をもつもので検出するときには、最高感度の条件下では i) と同じく Q と $k|z|$ との積が感度を決定する要素となるからそこに述べられた事がその儘適合することになる。

iv) 位相-振巾変化型 井上回路の動作解析 (とくに最高感度の表示) が為されていない現在、前項迄の様な定量的な判断を下すことは甚だ危険であるが、この回路及び永井回

1) 2) 3) 4) 5) 10) 11)

第 8 図



このために生ずる検出能力の低下を防止するに有効な対策をたてるためにまず cable の送端 impedance の性質に着目し、それを解析した結果を代表的検出回路数例についてあてはめ、感度と cable の使用条件の関係を求めてその検出回路に適合する cable の使い方を示した。その結論を要約すれば、

ば、

- i) cable の減衰定数による感度低下は通常他の部分の損失によるものより大きく、その長さを短縮することは使用する cable を吟味すること、周波数を適当にする事等とともに大切である。
- ii) cable の特性 impedance の値と被測定 reactance の不変分とは成るべく一致させることが前項の損失を小さくする上に望ましい。
- iii) cable 以外の部分に於ける損失のための感度低下は、一般に cable の長さとともに周期的に変るから、その極小値を示す長さをとることはそれらの損失を小さくするに役立つ。
- iv) 検出回路によつては検出回路の側にも変成器を用いて impedance matching を行う方が有利になることもある。之等の変成器の動作は前述の如き方法によれば良いがこれについては他の機会に述べたい。

本文で取扱つた装置の性能を示すものとしては、単にその感度ばかりでなく、むしろ増巾装置の発達した現在では動作の安定度、雑音特性等が問題となることが多く、之等の特性を劣化させる様な Q の向上による装置の鋭敏化を行うよりも、第 2 図に示した様な impedance 変化率の上昇比 $k|z|$ を増大させる方が性能向上の有効な手段となるであろう。

終りに御指導を賜つた石田光夫教授、土屋英俊助教授並びに数々の御教示を賜つた通信工学科、電気工学科の教官各位に感謝の意を表します。

文 献

- (1) 井上他：電気三学会連合大会予稿 (1939)
- (2) 前田他：周波数変調 p 274 他 (1946)
- (3) 津田他：応用物理 Vol.18 No.10~12 (1949)
- (4) 筆者他：東京工業大学卒業論文 (1951)
- (5) 筆者：電気三学会東京支部連合大会要旨 (1952)
- (6) 川上：真空管を含む線型回路網の理論 p.16 (1949)
- (7) Bellanek：Acoustical Measurement (1951)
- (8) 永井他：第4回日本工学会電気部予稿 No.53 (1940)
- (9) 岡：電気三学会連合大会予稿 (1940)
- (10) 井上：第4回日本工学会電気部予稿 No.63 (1940)
- (11) 安井他：応用物理 Vol.17 No.10 (1946)

THE TREATMENT OF THE CONNECTING LINE FOR CAPACITANCE CHANGE METER

By

TSUTOMU YASUDA*

(Institute of Electrical Communication Engineering, Faculty of Engineering,)

In the capacitance change meter, which acts on the tuning response of high frequency circuit and includes the changing capacitance as principal resonant element, it frequently is necessary to set the detector circuit separately from the capacitance, and these are connected by a cable, because the position where the capacitance is settled is not suitable condition to set all parts of the system. In that system, sometimes, the sensitivity of the system is disturbed by unsuitable condition of the connecting circuits. In order to find the best condition of circuits, the author studied the sending end impedance characteristics of this cable, whose receiving end was coupled with the changing capacitance, and got the following conclusions. 1) It is desirable that the amplitude of the reactance which is joined the receiving end of the cable is equal to the characteristic impedance of the cable for decrease the effect of line losses, 2) The ratio of the capacitance change is not equal to that of the sending end impedance change, and sometimes the latter becomes larger than the former.

* Assistant of Shinshu University.