

# 電子装置を用いた流量測定

北辰電機製作所奈良工場\*

府 川 弘  
阪 田 力

## (1) 緒 言

戦前に於て一般に工業計器に電子装置を用いる事は殆ど見られなかつたが、戦後電子管を応用した計器、中でも電子管式自動平衡型計器が発達し実用に供せられた。

流量計に於ても旧来の機械式及び電気式計器から電子管式自動平衡型に移行しつつあるが、流量検出端は旧来と同じように主としてオリフイスを使用しておるので、精度の点では計器自体は向上しても此の点で制約される。

一方国内では未だ製品化されておらないが、流量測定の方法として文献に見られるものに電磁式流量計と超音波を使用する方法がある。

電子装置を用いる流量測定法として此の三方法の概説をする。

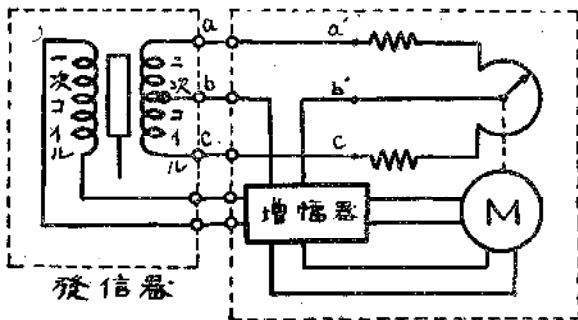
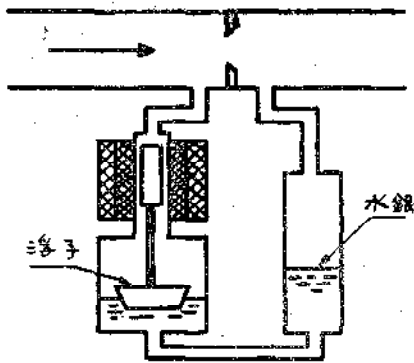
## (2) 電子管式自動平衡型流量計

之は旧来の流量計の改良と云えるものであるから簡単

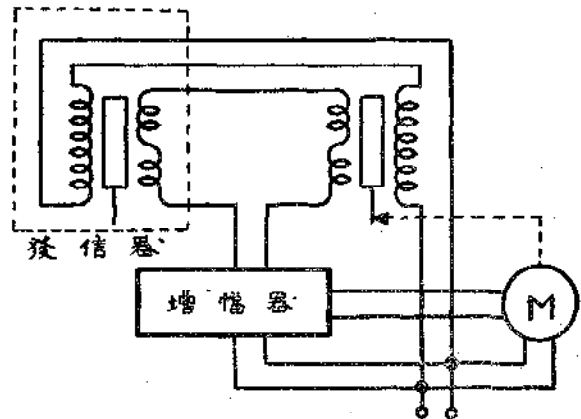
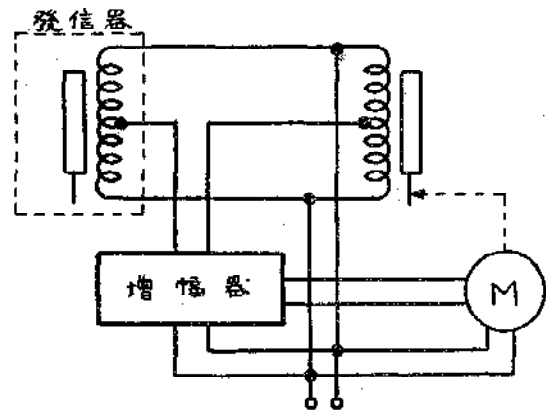
な説明に止める。

第1図はU字管浮子式で第2図はこの計器の原理図を示す。発信部は一次、二次コイルと可動鉄心より成り、一次側に  $50\omega$  又は  $60\omega$  の  $5\sim 20V$  程度を与える。鉄心がコイル中を上下することにより発生する二次コイルの電圧  $E_1, E_2$  の為には生ずる不平衡電圧  $eg$  を真空管増中器で増巾し、可動電動機を動かして、 $eg$  が0になる点迄摺動抵抗の接点を移動させて、ブリツヂを自動的に平衡させる。

此の回路の欠点は第2図の  $aa', cc'$  の導線抵抗の変化及び電源周波数の変化により目盛の両端で誤差を生ずる事である。此の原因は  $eg$  が0になり平衡しても二次コイル、 $aa'$ 、摺動抵抗、 $cc'$  の回路に電流が流れておる為である。電源電圧の変動による誤差は無視してよく



第 1、 2 図



第 3、 4 図

\* 奈良市南京終町201

且つ上記の誤差も筆者の試作品に於ては $10^{\infty}$ の変動に対して中央で0、両端で0.5%程度である。又aa'及びcc'即ち導線の抵抗の影響は片線2Ω変化させて0.2%程度で後述する第3図、第4図の結線よりも製作容易であり、且つ等分目盛をし易いので多くのメーカーは此の結線を取っている。

第3図の結線は余り用いられておらないが一つの方法である。

第4図は差動変圧器を用いる方法で、発信側の差動変圧器Aに発生する電圧と計器内の差動変圧器Bに発生する電圧とが等しくなるようにBの鉄心の位置を可逆電動機又はソレノイドを用いて自動的に平衡させる型である。此の回路を用いると導線抵抗及び周波数の影響を受けない。差動変圧器は本方式の生命で、特性としては残留出力が小さく、一次二次コイル間の静電結合を等しくし且つ安定にし、磁気結合の状態が一様なが望ましい。

国内某社の製品<sup>(1)</sup>に於ては差動変圧器の残留出力を20mV以下にし、可逆電動機の代りに差動電磁石を、制動には変圧器油を用いておる。性能はペン速度1秒、感度は0.1%以内、特殊製品では1ミクロンの鉄心の変位迄検出可能と云う。

第2図より第4図に示す方法は流量計のみならず圧力計、液面計等鉄心の変位に変換し得る場合はすべて可能である。

本式の流量計は旧来の流量計に比し精度も向上し、故障も少く進歩したと云えるが、オリフイスを使用するのが大部分なので流体の温度、圧力、脈動、或はオリフイスの工作上的精度等誤差の原因となるものが多い事に留意すべきである。

流体の温度、圧力の変化による誤差を除く意味でBailey Co.のオリフイス流量計の原理図を第5図に示す。

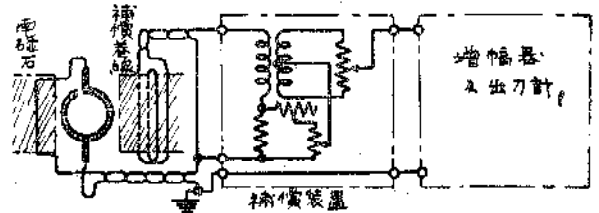
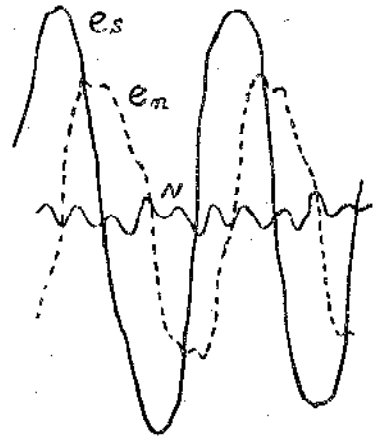
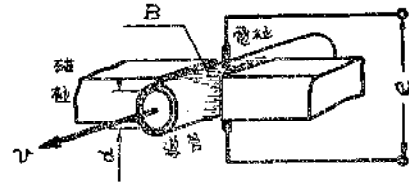
之は差圧計発信器の信号に圧力計及び抵抗温度計の発信器の信号を加算して遠隔伝達して指示するものである。

一般に電子管式自動平衡型流量計の増巾器は温度計の時の増巾器と大差がない。只増巾度は少くてもよく北辰電機に於ては一段減らして使用しておる。結線

は温度測定 of 電子管式の夫を参照されたい。

### (3) 電磁式流量計

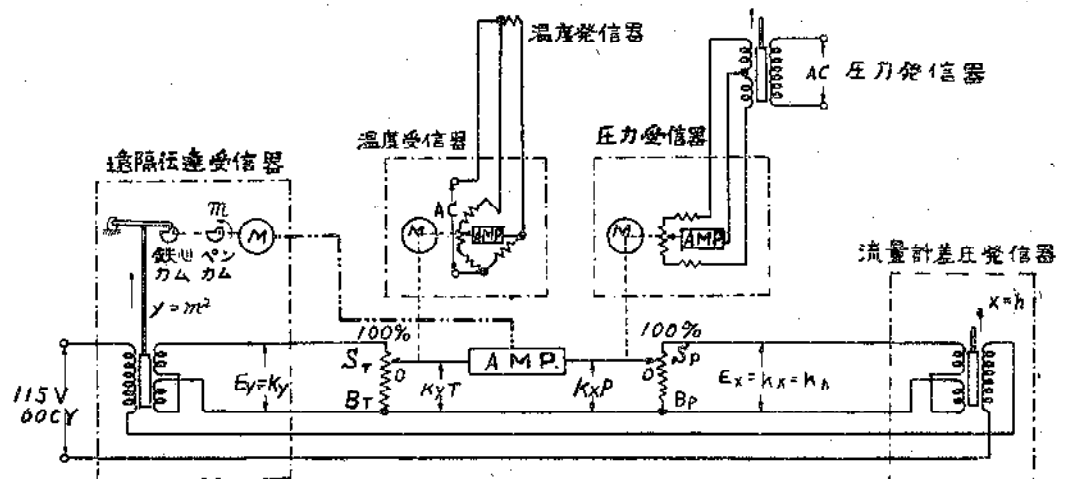
本流量計は純然たる電気式であり、電気式自体には僅かな利点しかないが後述する如き長所の為に注目されて来たものである。その原理は Faraday の電磁誘導作用



第 6 図

B : 磁束密度 (gauss)      e : 起電力 (volts)  
d : 電極間隔 (cm)          v : 流速 (cm/sec)

第 7 図、第 8 図



第 5 図

生産と技術

に外ならない。起電力は第6図に於て次式で示される。

$$e = B \cdot d \cdot U \times 10^{-8} \dots\dots\dots (3-1)$$

上式にて自明の如く起電力は流速に比例し、流量指示は直線的になる。又流体の諸性質（粘度・比重・温度・圧力・電気伝導度等）の関係する項は含まれていないから之等に無関係である。従つて微量流量の測定には最適で時間遅れが全くなく、又流れの状態にも無関係で電極間の平均速度を以て上式が成立する。(4)(4)

此の流量計は 1832年 Faraday がその法則を明かにした頃より考えていたと云われるが成功せず、1936年頃より Kolin を中心として血液の速度測定に研究が進められた。戦後他の方面にも応用を拡げられ、流れに対する各種の実験用計器として研究論文が発表されている。工業計器としてはシカゴの Mittelman Electronics Division より "Magna-Flow" の名称で出されているようであるが仕様は全く不明である。

(イ) 定常磁界方式

磁場としての定常磁界は此の研究が始められた当初専ら用いられたものであるが、成極作用を伴うことと直流増幅の困難とから仲々発展しなかつた様である。Kolin の Miller 回路を用いた増幅器に就いては、糸川英夫教授が詳しく解説されている(5)。一方 Grossmann, Charwat, Morris, Chadwick 等の人々は、研究の対象こそ異れ一連の系統の直結増幅器を用いて居り、入力インピーダンスは非常に高く 20MΩ 以上である。(6)(7)(8)

Grossmann等 は「流体の固有抵抗は出来る限り大きいことが望ましい。」「交番磁界より定常磁界の方が実験を簡単化出来る。」と述べているが、Kolin, Games等は之に反対意見の様であるし、筆者等も交番磁界で水道水以上の電気伝導度を持つ流体を対象としている。筆者等は工業計器としての立場から定常磁界としては振動容量型の直交変換を最良として検討したが、利得・駆動回路よりの誘導・駆動電圧変動による出力位相・入力電圧による出力波形等に関して良好な振動コンデンサーを得られなかつたので一応定常磁界方式を見送つた。

(ロ) 交番磁界方式

定常磁界に対して 1937年に Kolin が交番磁界の導入を発表してから此の方式のものが多くなつた。(3-1)式の磁束密度が正弦波で変化するとすれば、信号  $e_s$  は磁束の瞬時値に比例する。

$$e_s = B_m \cdot d \cdot v \cdot \sin\omega t \times 10^{-8} \dots\dots\dots (3-2)$$

此処に  $B_m$  は最大磁束密度 (Gauss)

一方交番磁界の為に、検出回路である電極を結ぶループは電磁石に対し変圧器の二次側正形成するので別の電圧  $e_n$  を発生する。

$$e_n = \frac{d\phi}{dt} \times 10^{-8} = K \frac{d}{dt} (B_m \cdot \sin\omega t) = K \cdot B_m \cdot \omega \cdot \cos\omega t \dots\dots\dots (3-3)$$

之は流速 0 の時にも存在し、流速に関係のない不要電圧で信号電圧  $e_s$  とは 90° の位相差がある。即ち交番磁界方式に於て発生する電圧  $e$  は

$$e = B_m \cdot d \cdot v \cdot \sin\omega t \times 10^{-8} - K \cdot B_m \cdot \omega \cdot \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \dots\dots\dots (3-4)$$

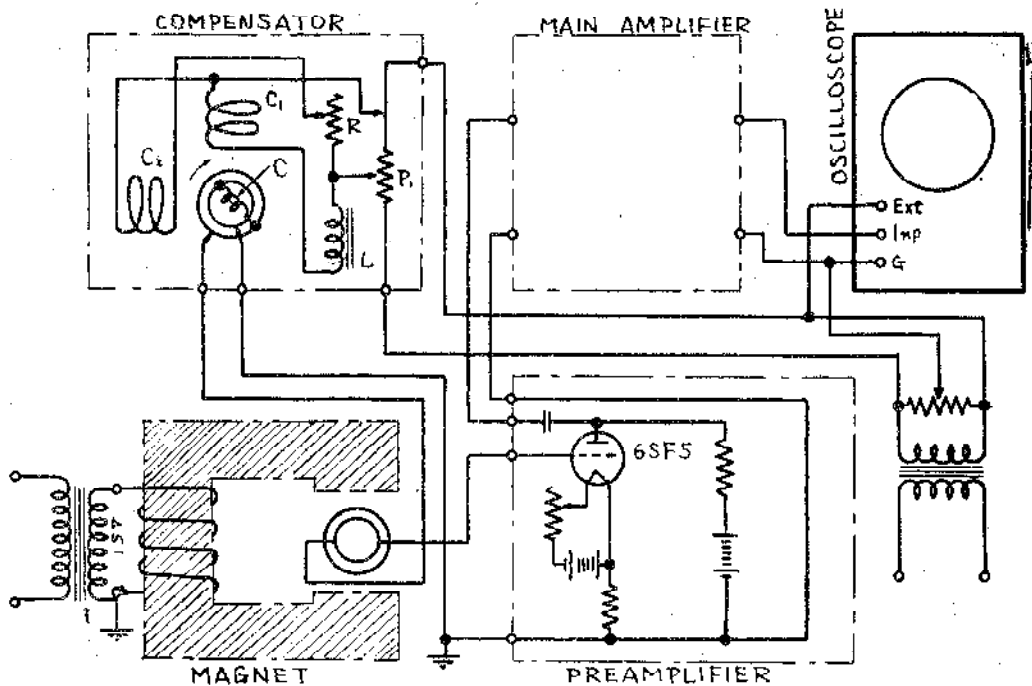
となり此の第2項に対する処置が問題となる。第7図に此の電圧を増幅器に入れた時の出力をオツシロで観察した波形を示す。N は  $e_s$  及び  $e_n$  を打消した時、microphonic noise 等に依り残る高調波である。

研野和人氏は 50∞ で之を 6AU6 の3段増幅をして U6 の cathode follower により 10V の電圧計で指示せしめる実験をされているが、雑音と若干の  $e_n$  の影響が現われて流速と指示との直線性が低流速に於て失われ、流速 0 で 0.7v の出力を残したと報告されている。(9) 同氏は  $e_n$  に対しては電極回路の導線を動かして K を小さくする方法をとられた。

齋藤良平氏は罐水の循環量の変化・脈動流現象等を研究し水管汽罐の性能を向上させる為に電磁式流量計を試作されたが(10)、 $e_n$  に対する補償の方法は第8図の如く電磁石にコイルを巻き、 $e_s$  と逆相のものを加えて消去するもので、之は Clark と Randall の発表(11)した系統のものである。齋藤氏の増幅器は 50∞ の5段増幅(初段管 6ZDH3)で指示計には 3V 配電盤用交流電圧計(内部抵抗 3KΩ)を使用されている。

第9図は Kolin の装置で(12)、 $e_n$  を補償する為に 90° 位相のずれた二つの互に直角な交番磁界を作るコイル  $C_1, C_2$  を用いている。即ちその合成回転磁界によつて交番起電力を C に発生せしめ、位相を C の位置により、大きさはポテンシヨメータ  $P_1$  によつて変え消去する。増幅器は Pre-amp・後5極管の3段増幅で 60∞ の Band pass filter を付けている。

James は装置に関して詳細な発表をしている(12)。周波数は 10∞ を採用し、流体を通じて外部より入る ground current による雑音電圧の障害を少なくする為に push-pull 入力の前置増幅器を用いて直接差効増幅器のグリッドに電極回路を結んである。主増幅器は普通の R-C 結合で充分であるが、雑音の影響を減ずる為に帯域通過特性を必要としている。其の一例として同期振動器を用いる方法を述べているが、之は位相選択性を有するもので  $e_n$  の対策となる。即ち第10図の如く vibrator により周期の前半を "onf"、後半を "off" にするが、正弦波入力に対し同相とすると負荷抵抗に流れる平均電流は  $A/\pi$



第 9 圖

で表わされ (A は最大電流)、位相がずれてくると平均出力電流は位相差の増加と共に減じ、 $90^\circ$  位相差で 0 となつて信号と誘導とを弁別することが出来る。帯域通過特性と云うのは此の同期振動器の人力周波数と振動周波数とが異ると出力の減衰を受け、減衰率は周波数の差に比例するからである。前記負荷抵抗にかかる電圧を増幅し 2 極管で整流して電子管式記録計に入れている。整流された出力迄の利得は約  $120\alpha b$  である。記録計の摺動線の電位は励磁コイルに直列に入れた抵抗にかかる交流電圧を整流したものから取つているので、電磁石の励磁電流の変化の影響は出ない。唯増幅器の雑音が残る記録計に零点調節が付けられている。James は尚周波数として成極作用、応答時間、増幅器及び励磁電源の設計、

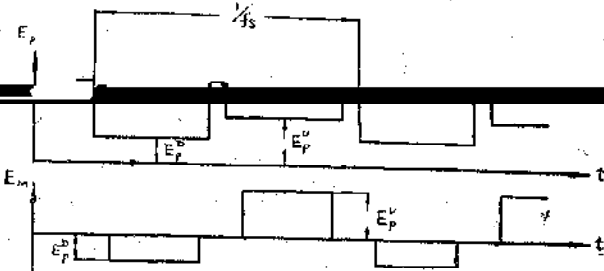
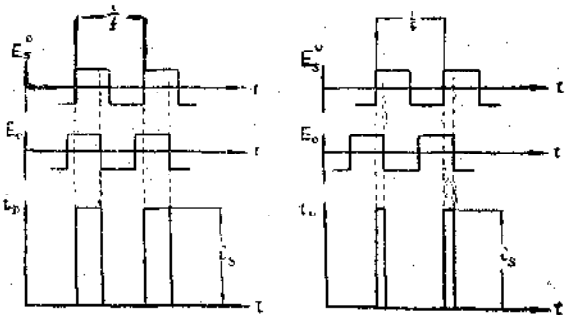
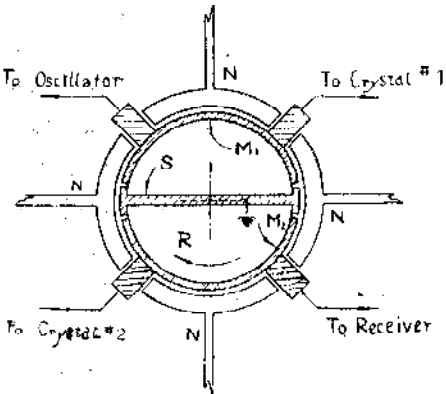
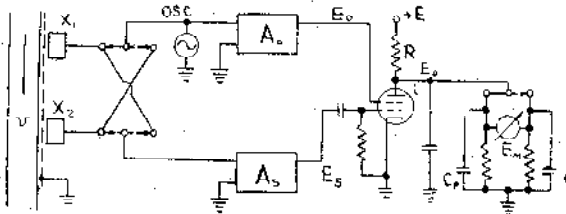
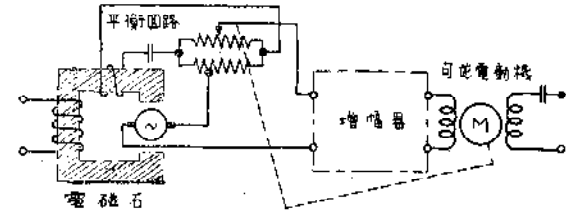
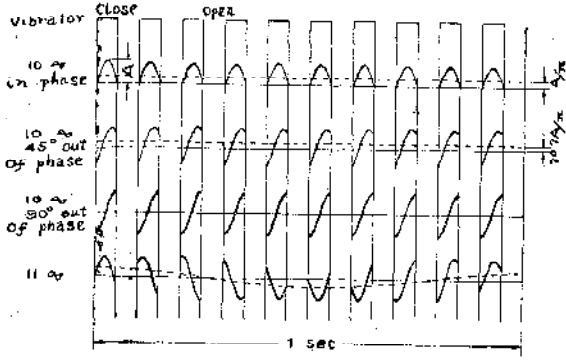
単による不要電圧の大きさ等の点から  $10 \sim 15\omega$  を適當としている。

以上述べたものは James のものを除いて実験器具としての電磁式流量計に過ぎず、測定の都度何らかの調整を要するものであるが、工業計器としては各種の条件変化に対して影響の少く連続使用の出来るものでなければならぬ。前述の方式は何れも信号を増幅して電圧を読む偏位方式であるので、James のものでも増幅器の利得変化を無視することは出来ない。又増幅器のグリッドにかかる電圧は流体の電気伝導度変化の影響を受け、信号電圧に対しては之を小さく出来るが、位相選択性のないものでは  $90^\circ$  異相の誘導電圧に対して甚しい影響を受ける。更に帯域通過特性を持たぬものでは高調波たる雑音も直接指示に現われて補正が必要になるが、厄介なこ

とには励磁が 0 の時に流速によつて生ずる雑音も動揺の激しい高調波である。

筆者等は商用周波数を使つて第 11 図の如く可逆電動機を用いる交流平衡の零位方式をとつた。即ち電動機の励磁電流と  $90^\circ$  位相差の出力電流のみが回転力となるから、信号電圧の増幅した位相を此の位相に調整しておけば位相選択性を持たせることが出来る。又之は帯域特性をも持つが、高調波雑音が大きくなるとジャッキング現象を起すので double-T 回路を増幅器に挿入した。平衡電圧は図の如く電磁石より取り出し信号と同調せしめれば、磁界の強さの受動による影響を無くすることが出来る。増幅器の利得は電圧増幅で  $120\text{db}$  程度を必要とするが、真空管の劣化等に備へ 6AU6、6SJ7、6SJ7、6SL7 の 5 段増幅とした。前 2 段は前置増幅器として分離し、その B 電源には定電圧放電管を入れヒーターは全波整流した。増幅器入力前のシールドは充分注意を払わねばならないが、電磁石の磁界以外の誘導は  $90^\circ$  異相の誘導と共に予め消去すると大した障害にはならない。此の為とは 2 段目グリッドに位相及大きさ可変の補償電圧を入れたが、流体の電気伝導度の変化の著しいものは  $90^\circ$  異相の誘導電圧が大きく変り、不感帯を生ぜしめるので此の誘導補償を二つに分け、 $90^\circ$  異相の分に対するものを増幅器入力前に入れて可逆電動機で自動的に抑圧することが必要になつてくる。

此の様な方式では電源電圧変動による影響は小さく、10% の変動に対して 0.2% 以下で、流量と指示との関係は全く直線性を得られ精度は  $\pm 0.2\%$  である。測定可能



第10図, 11図, 12図, 13図, 14図, 15図

の最小流量は (3.1) 式より明かな如く仕様に依つて異なるが、試作したものは内面断面積 0.9cm<sup>2</sup>、full scale 25 cc/sec (=90l/hr) である。

(4) 超音波を用いる流量測定

超音波を流体に加えてドップラー効果を利用し流速の測定をする方法は知られておるが、未だ実験の段階を脱しておらず、製品化されてはいないようである。然し将来其の可能性はあり得ると思うので H. P. Kalmus 氏の報告 (B) より其の原理と実験結果を簡単に紹介する。

之は流体中に何らの障害物を入れずに、100 K.C の超音波を上流、下流交互に送り、それらのパルスの位相差を検出して連続測定するものである。被測定液の導管の外壁に取り付けられたチタン酸バリウムの結晶の発振子と受信子との間に、電動機の Commutator によつて100の周期で 100 K.C の超音波を加える。2台の増幅器でそれらのパルスを受けて位相差検出用の真空管で位相差のずれを検出しパルボルで直読するもので、原理図を第12図に示す。

今上流より下流に超音波を発するとすると、発信子、受信子に於ける超音波は次式で示される。

$$E_1 = A \sin \omega t \dots\dots\dots (4.1)$$

$$E_2 = KA \sin \omega \left( t - \frac{D}{C+v} \right) \dots\dots (4.2)$$

Dは発振子、受信子の距離、Cは超音波の伝播速度、vは流速である、

(4.1)、(4.2) の位相差  $\Delta\phi$  は (4.3) 式で示される。

$$\Delta\phi = \omega \frac{D}{C+v} = \omega \left( \frac{D}{C} - \frac{vD}{C^2} \right) = \alpha - \beta \dots\dots\dots (4.3)$$

た同様に下流より上流に発信し時の位相差  $\Delta\phi_2$  は

$$\Delta\phi_2 = \omega \frac{D}{C-v} = \alpha + \beta \dots\dots\dots (4.4)$$

今 100 K.C の超音波を用い  $\Delta\phi_1$  を計算してみる。  
 $\omega = 2\pi \cdot 10^5$  rad/sec,  $D = 10$ cm,  $C = 1.5 \times 10^5$  c.m/sec.

$v = 10$ c.m. とすると  $\alpha = 2400^\circ$ 、 $\beta = 0.16^\circ$  となり  $\alpha$  の僅かな変化の為、流速に関する項である  $\beta$  を正確に測定出来ない。それで  $\Delta\phi_1$  と  $\Delta\phi_2$  の差、即ち(4.5)を求めようとおれば、 $\alpha$  の影響を避けられる。

$$\Delta\phi_1 - \Delta\phi_2 = 2\beta = 2\omega v D / C^2 \dots\dots (4.5)$$

測定液の導管はプラスチック製のパイプで、之に或る距離をおいて錫箔をつけ、其の上にチタン酸バリウムの結晶  $X_1$ 、 $X_2$  が押しつけられておる。 $X_1$ 、 $X_2$  は交互に発信子或は受信子として働くように、第13図に示す電動

(文 献)

機で駆動される commutator で  $10^{\infty}$  の周期で切り換えられておる。接触子は carbon brush である。発信子の信号は増巾器  $A_0$  へ、受信子の信号は増巾器  $A_s$  に入り、夫等の出力は位相検出用真空管の 6AS6 のグリッドに接続されている。 $A_0$  は リミッターを持ち 矩形波を出す。流速 0 の時  $\tau = D/C - K = f/4$  のほぼ奇数倍にする。と第14図に示すようなパルスが 6AS6 に流れ、其のパルスの巾は上流より下流に発信した時に  $f/2 - \tau_D$  となり、逆の時は  $f/2 - \tau_V$  となる。ここで  $\tau_D = D/C + v - K$ 、 $\tau_V = D/C - v - K$  である。此の差を取れば (4.5) に示す  $\Delta\phi_1 - \Delta\phi_2$  が求められる。

パルボルはやはり同期に  $10^{\infty}$  で切り換えられており、パルボルにかかる電圧  $E_M$  を第15図に示す。此の第15図の  $E^U_P$  と  $E^D_P$  の差をパルボルが指示しその値は

$$\Delta E = E^U_P - E^D_P = 2igf \cdot \frac{DU}{C^2} \cdot R \dots (4.6)$$

となる。 $\Delta E$  は  $U$  に比例する点があり有利である。今  $ig = 20m.Af = 100 K.C$ 、 $D = 10c.m.$ 、 $U = 10c.m./sec$ 、 $C = 1.5 \times 10^8 c.m./sec$ 、 $R = 20K.\Omega$  とすると、 $\Delta E = 0.356V$  で可成り大きいので普通のパルボルで測定出来る。実験結果によると  $1c.m./sec$  の流速を正確に測定出来て  $1c.m./sec$  より  $100c.m./sec$  迄非常によく理論に一致した実験結果が得られたと云う。此の方法の応答の時定数は  $10^{\infty}$  で切替えておる場合は  $0.5$  秒程度であるが、エレクトロニクススイッチを用い、 $100^{\infty}$  で行えば更に速められる。超音波の周波数は管径により適当に定める必要があり<sup>(14)</sup>、管径を細くすると周波数を高くする必要がある。

本方法は未だ特殊目的の実験用程度であるが興味のある方法であるので簡単に紹介した。

## (5) 結 言

電子装置を用いた流量計に関し其の概要に就て拙文を弄したが、少くとも我が国の工業計測に於て、流量測定は他の分野に比し最も遅れたものの一つである。流量測定に於ける電子管式自動平衡型にしても計測自体の進歩とは云い兼ねる。然も今日、流量の自動制御には圧力平衡式の新しく且つ有効な手段が取られつつあり、近代の寵児「電子装置」も流量測定に関する限り白面の未成年に過ぎない。

未だ我が国の工場で使用されていない前記新二方式の出現と共に、流量測定技術の進歩の爲には更に大巾な電子装置の導入を期待するものである。諸賢の御批判と御指導を賜ることを得れば幸い之に過ぎるものはない。

- ①西口 謙：計測 vol 3. No. 4 (1953)
- ②磯部 孝：計測 vol 2. No. 3 (1952)
- ③A. Kolin：R. S. I. vol 16, 109 (1945)
- ④J. S. Arnold：R. S. I vol 22, 43 (1951)
- ⑤糸川英夫：エレクトロニシヤン vol 1, 30 (1952)
- ⑥L. M. Gressmann and E. A. Shay：Mechanical Eng. vol 17, 744 (1949)
- ⑦A. J. Morris and J. H. Chadwick：Am. Inst. Elect. Eng. Trans. conferece Paper T-1-58 (1951)
- ⑧L. M. Grossmann and A. F. Chadyick：R. S. I. vol 23, 741 (1952)
- ⑨研野和人：計測 vol 3. 152 (1953)
- ⑩齋等良平：日立評論 vol 35, 913 (1953)
- ⑪J. W. Clark and J. E. Randoll：R. S. I. vol 20, 951 (1949)
- ⑫W. G. Games：R. S. I. vol 22, 989 (1951)
- ⑬H. P. Kalmus：R. S. I. vol 25, 201 (1954)
- ⑭R. E. Beatty：J. Accoust. Am. 22, 850 (1950)

(37頁より続く)

を  $1mm$  に細分すると概算しても  $1/50mm$  は区別出来ることになる。これを更に適当に直すと任意に精密さを表現出来る。これで電動機の回転量を比例的に自動制御すればよいと云うことになるのである。ここに通信理論と自動制御工学とを一体に応用して機械を運転すれば非常に精密な運動が出来ることになる理である。

テープ式が行われる前には計算器のように  $3 \sim 5$  桁の数字を置いてその回転でパルスを出し電動機で寸動して行く方法もあつた。

第13図は前年 Electronics (Vol. 26. P135(1953)) 紙上に発表された Punched-Tape Guide Milling Machine Cectters の系統図である。第14図の写真 5 枚はこの機械の構造を示すものである。(a) はフライス盤とその制御装置全体 (b) は制御装置の外観 (c) はテープ信号のリーダー (d) 試験製品 (e) は解説用サーボ系、及フライスの運動機構である。

## 8 むすび

電子装置を用いて機械工作を行う方法は次第に複雑になって来ている。更に電波技術の応用が考えられているようであるが、実用としては微削り装置は簡単なゼネレートまでであろう。しかし今後の発達により変化することは勿論である。特に微分解析機等を連結して曲面をゼネレートするためには設計計算するより早くてよいと思われる。