

車両制御器用精密位置検出器

High-accuracy Position Detector for Train Control

小 西 務*
Tsutomu Konishi

鈴木 敬 幸**
Takayuki Suzuki

要 旨

車両用制御器を無接点化する場合、特に制御円筒の回転角、調圧器の圧力などを、電源変動、温度変化など過酷な周囲条件に対し精度よく検出することが問題となる。

これに対し、われわれは差動変圧器と差動増幅器を組み合わせた精密位置検出器を考案、開発し、実用している。本文では、これらに関する動作原理、回路構成、特長、実験結果などについて取りまとめている。

1. 緒 言

従来、車両用制御器には電磁継電器など接点部分を有する制御素子を使用されている。これらの素子は火花、消耗、変形などのため電氣的寿命が短く、保守を必要とし、使用ひん度の高いところや多数個使用される場合には、接点に代わる制御素子が要求される。

このような必要性に対し、各種の無接点継電器が開発され、車両用制御素子として実用されている。ところが、さらにこれら無接点継電器と結合して使用する検出器の無接点化が要望される。

われわれは、主電動機速度制御用制御円筒の回転角位置の検出器、あるいはブレーキ用空気圧力の検出器など、二、三の精密な位置検出器を考案、開発した。

これらの検出器は小形の差動変圧器と差動増幅器を組み合わせ構成したもので、位置検出精度、回路構成の簡単さ、動作の安定性などを総合し、車両用位置検出器として十分な性能をもっている。

ここでは、精密位置検出器の構成、動作原理、特長などについて述べ、制御円筒および調圧器への応用についての検討結果を報告する。

2. 精密な位置の検出方法

2.1 位置の検出方法

一般に位置を検出する場合、電気、光、放射線、超音波などを用いる方法が考えられる。このうちでも、車両用として取り扱いやすさおよび保守の点から、特に電氣的方法が有望である。機械的変位を電氣量に変換する場合、電圧、電流、インピーダンス、周波数の変化が利用されるが、検出精度、回路の簡単さ、動作の確実性などの点で、車両用制御円筒、調圧器などの位置検出器としてはインピーダンスの変化がすぐれている。また、そのうちでも電磁誘導の変換が適している。

電磁誘導を用いた位置の検出方法には、自己インダクタンスあるいは相互インダクタンスの変化を利用するものがある。自己インダクタンス変化の利用にはたとえば発振の有無が、また相互インダクタンス変化の利用にはたとえばインピーダンス・ブリッジ、あるいは差動変圧器などがある。これらのうちでも、検出精度、測定範囲、線形性、小形などの点で差動変圧器を用いた方法がすぐれている。

以上のように、無接触、検出精度、線形性、小形、動作の安定性、信頼性などの点から、差動変圧器を用いた位置検出方法が、車両用制御素子として適当であることが明らかになった。

2.2 差動変圧器を用いた位置検出の問題点とその検討

差動変圧器を使用する場合、次に示すような種々の問題点があるので、これを十分解決しておく必要がある。問題点として、

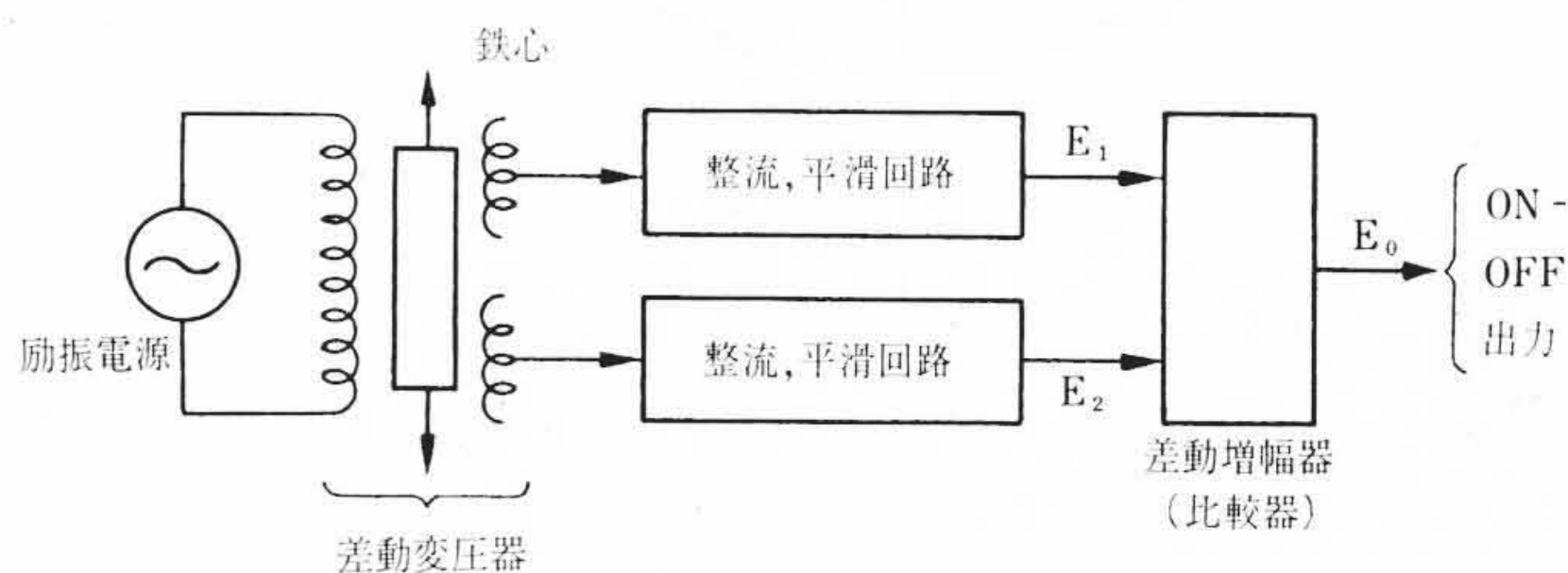


図1 精密位置検出器の構成

- (1) 零位置の残留電圧
- (2) 周波数誤差
- (3) 温度影響
- (4) 差動変圧器出力電圧の処理
- (5) 検出部のリード線長
- (6) 周囲磁界の影響
- (7) 理論的な設計基準の不明確性

以上のうち(1)において、残留電圧とは差動変圧器出力の差電圧の最小値が零にならずにある値を有することである。この電圧は差動変圧器の電磁的非対称性、浮遊容量による不平衡、周波数の過大、一次、二次間の位相差などが原因である。これは感度および位置の検出精度を低下させる。

(2)の意味は差動変圧器の励振電源の周波数が変化するとインピーダンスが変化し、二次電圧が変化する。そのため感度が変化する。

(3)の問題は温度変化のため巻線抵抗が変化し、上述の理由で感度が変化する。

(4)の内容は、差動変圧器の出力電圧を処理する場合、交流のままでは鉄心の中央よりの変位に対し区別した信号が得られない。また、同期整流して直流に変換する方法は中央位置からの変位に対し正負の信号が得られ、残留電圧の影響が少なくなるが、電源あるいは移相器が必要であり回路は複雑となる。

(5)～(7)の問題点については明らかであるので説明は省略する。以上の問題点を解決するため、次の方法を用いている。

(A) 差動変圧器とトランジスタ差動増幅器の組合せ

図1に示すように、差動変圧器出力をそれぞれ整流、平滑して直流電圧とし、差動増幅器を用いた比較回路で位置の判定をする。この方式の考案により、前述の問題点の(1)～(5)を解決している。

回路が差動的に動作するため、開回路であるにもかかわらず温度影響、電源影響を受けにくい。また、差動変圧器出力を直流的に処理しているので、残留電圧、一次、二次間の位相差などの問題はなくなり、リード線が長くできる。

(B) 差動変圧器に高い励振周波数の電源を使用

差動変圧器の温度影響の主因は巻線抵抗の温度変化にある。し

* 日立製作所日立研究所 工学博士

** 日立製作所日立研究所

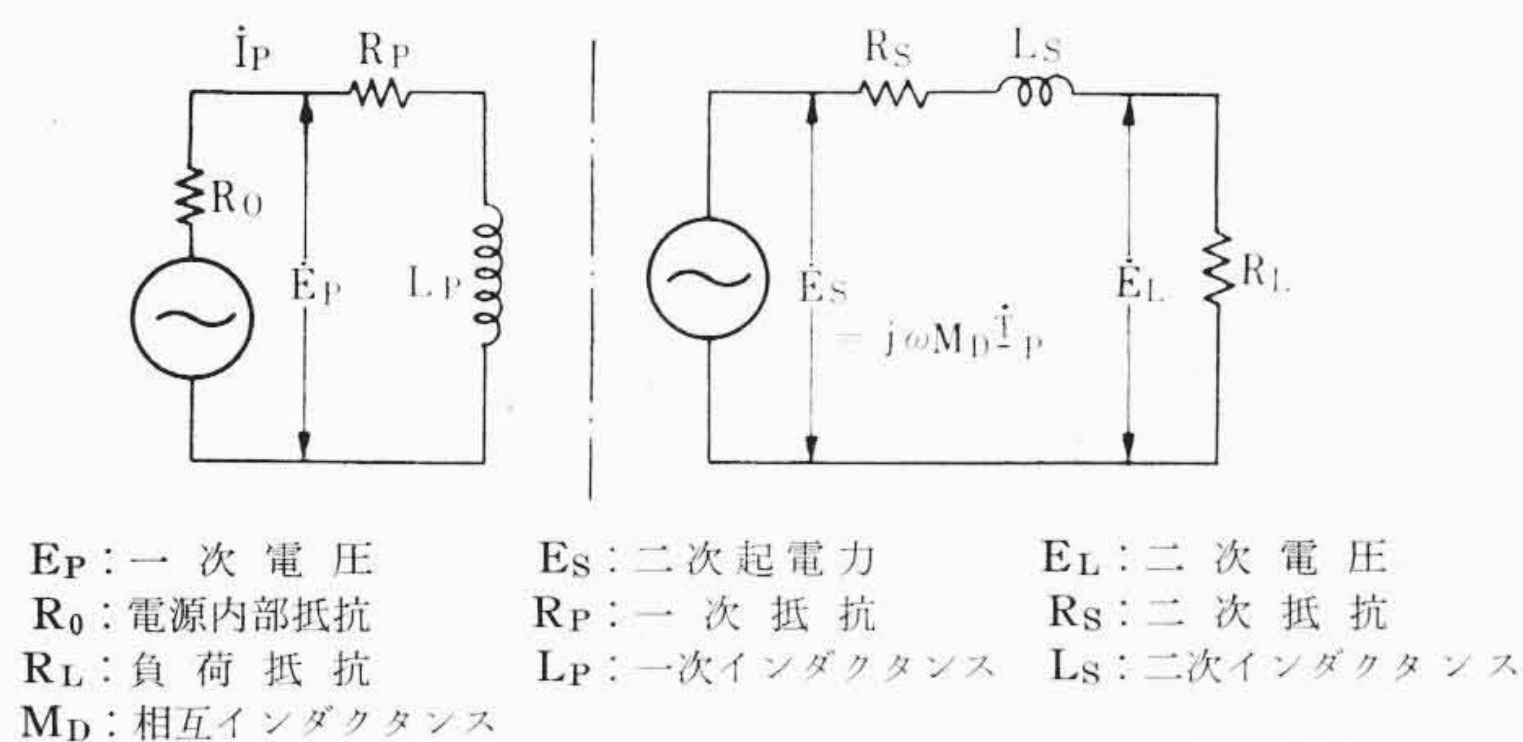


図2 差動変圧器の等価回路

たがって、周波数を高く選ぶことにより温度影響を小さくできる。しかしながら、周波数が高すぎると残り電圧が発生したり、感度が低下し、安定性が害されるので、適当な周波数を用いている。

(C) 磁気シールド・ケースの使用

外部磁界の影響をさけるため、磁気シールド・ケースを使用している。

(D) 設計手順の確立

差動変圧器の性能はほぼ大きさによって決定されるといっても過言でない。したがって、車両用のように、小形で検出構造が決まると、高性能を得るには差動変圧器の設計はきわめて重要になる。ここで特に高感度を得るための設計手順を明らかにしておく。

うず電流損、ヒステリシス損、結合容量を無視すると、普通差動変圧器の等価回路は図2のように書ける。したがって、出力電圧 V_L は次式のようになる。

$$V_L = \frac{R_L}{\sqrt{(R_L + R_S)^2 + (\omega L_S)^2}} \cdot \frac{\omega M_D}{\sqrt{(R_P + R_0)^2 + (\omega L_P)^2}} V_P \quad (1)$$

$$\text{ただし、} \sqrt{(R_L + R_S)^2 + \{\omega(L_S - M_D)\}^2} \gg \omega M_D \quad (2)$$

$$M_D = kD, \quad \left(\begin{array}{l} k = \text{構造によって決まる定数} \\ D = \text{平衡点よりのコア位置} \end{array} \right) \quad (3)$$

$$R_0 = \text{電源の出力抵抗}$$

$$\omega = 2\pi f, \quad (f = \text{電源の周波数}) \quad (4)$$

上式において、 R_P , L_P , R_S , L_S はコア位置 D が変われば実際には多少変化するが、使用範囲内ではほぼ一定とみなして問題はない。 M_D はコア位置の関数で(3)式により与えられるが、使用範囲内では L_P , L_S に比べきわめて小さい。

高感度にするには、すなわち同一コア位置において出力電圧 V_L を大にするには、次に述べる考慮が必要である。

(a) 負荷抵抗 R_L をなるべく大きくする。

(1)式の右辺第1項を大きくするには R_L を大きくする必要がある。この点、差動増幅器の入力抵抗は普通大きいので、きわめて有利である。

(b) 二次線輪の巻線回数を大きく選ぶ。

二次線輪の巻線回数を大きくすると二次インダクタンスが大となり、 M_D が大となって(1)式より V_L が大となる。このとき、 R_S が大となり第1項が小さくなる傾向になるが、 R_L が大きいのでそれほど問題とならない。巻線回数を極度に増加しようとする線径が小となり銅線の占積率が小さくなったり、断線の危険が増すので限界がある。

(c) 一次線輪のアンペア回数を大きく選ぶ。

電源電圧 V_P が一定の場合には、同一アンペア回数に対し一次線輪の巻線回数をできるだけ大きくするほうが消費電力が小さくてすむ。この消費電力は電源発振器から供給されるので、消費電力が小となると発振器が小形にできる。

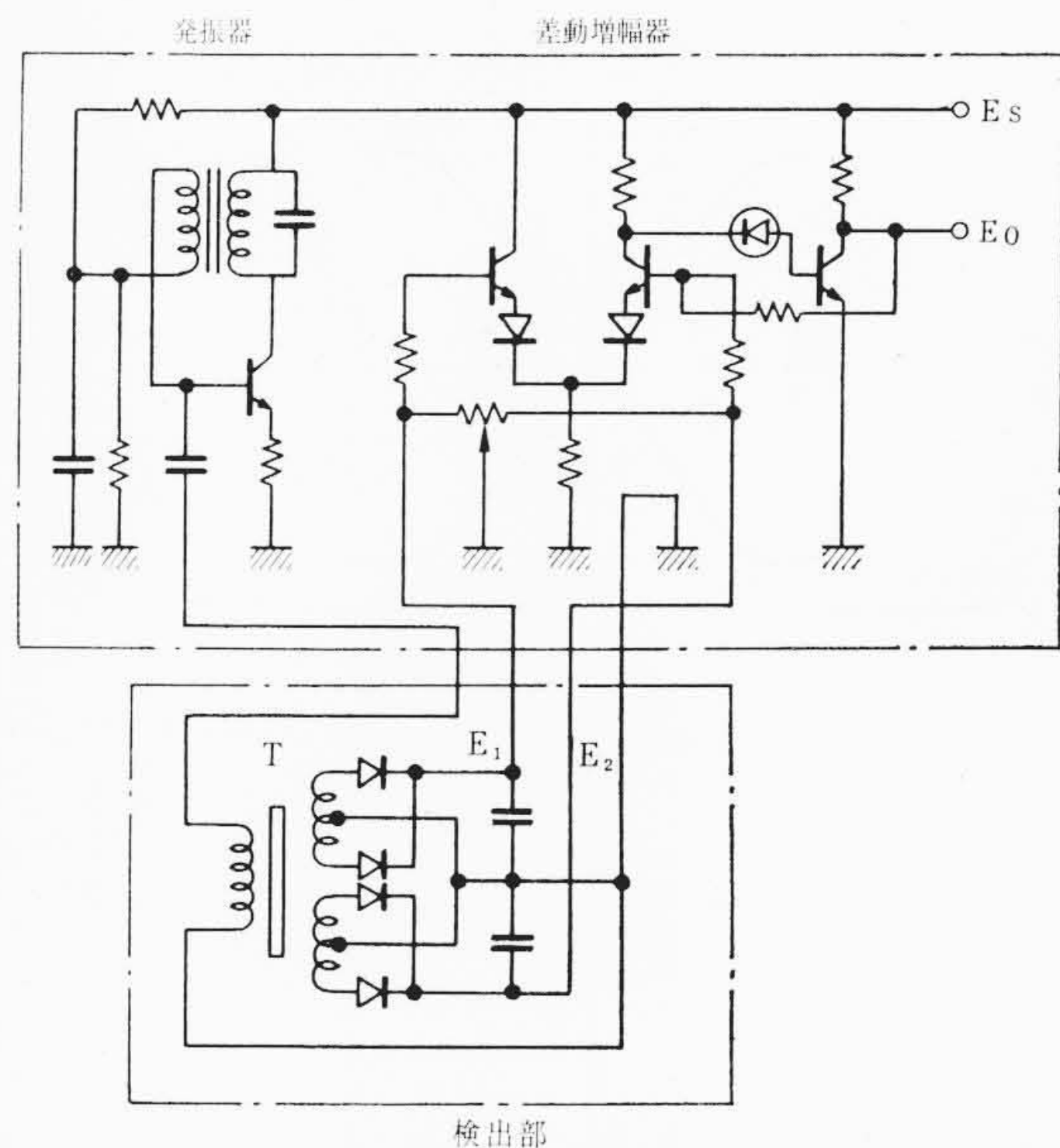


図3 精密位置検出器接続図

(d) 電源周波数をなるべく高く選ぶ。

(1)式から、電源周波数を高くしたほうが有利であることは明らかである。しかしながら、周波数があまり高くなりすぎると残留電圧が大となり、分布容量などにある不平衡が現われ、有効磁束が減少して、かえって感度の低下をきたす。したがって、周波数には上限がある。

以上、車両用の精密位置検出器としては差動変圧器と差動増幅器の組合せが適していることを述べ、差動変圧器のもつ問題点が一応解決され、使用できる見通しが明らかとなった。

3. 精密位置検出器の動作原理および特長

3.1 動作原理

代表的な精密位置検出器の接続図を図3に示す。検出部は差動変圧器 T の二次電圧を全波整流した後、平滑して直流に変換している。この検出部だけが必要な場所に設置される。差動変圧器一次の電源用発振器および二次直流電圧を処理する差動増幅器などは、検出部から数m離れた別の場所に置かれる。この間は適当な電線で接続される。この差動変圧器直流出力電圧 E_1 , E_2 の特性は図4(A)に示すようになる。

差動増幅器は入力電圧 E_1 , E_2 の差 ΔE に比例した電圧が出力に得られる。いまその差電圧がある正の値 ΔE_1 で差動増幅器がON出力信号を出し、負の値 $-\Delta E_2$ でOFF出力信号を出すとすると、コア位置 D に対する差動増幅器出力電圧 E_0 の特性は図4(B)のようになる。差動増幅器のON-OFF信号により位置を検出する場合、変位に対する出力電圧の比例変化範囲 ΔD は位置検出誤差となる。この誤差は、同図より推察できるように、差動変圧器出力特性の変化と、差動増幅器特性の変化に基づく。

次に、差動変圧器一次巻線の励振電源として、トランジスタ反結合発振器を使用している。トランジスタ発振器には、普通RC発振器、LC発振器などがある。この場合、LC発振器のほうが回路素子数が少なく、発振周波数が数100～数1,000 c/sには適しており、発振周波数が電源変動、温度変化に対し比較的安定である。LC発振器のうちでもハートレ形、コルピッツ形などに比し、図3のコレクタ同調形反結合発振器が簡単な回路である。

以上をまとめると、反結合発振器の出力で差動変圧器の一次巻線を励振する。被検出磁性体が差動変圧器鉄心の中央のいずれのほうにあるかを検出するため、二次巻線に誘起される電圧を整流、平滑

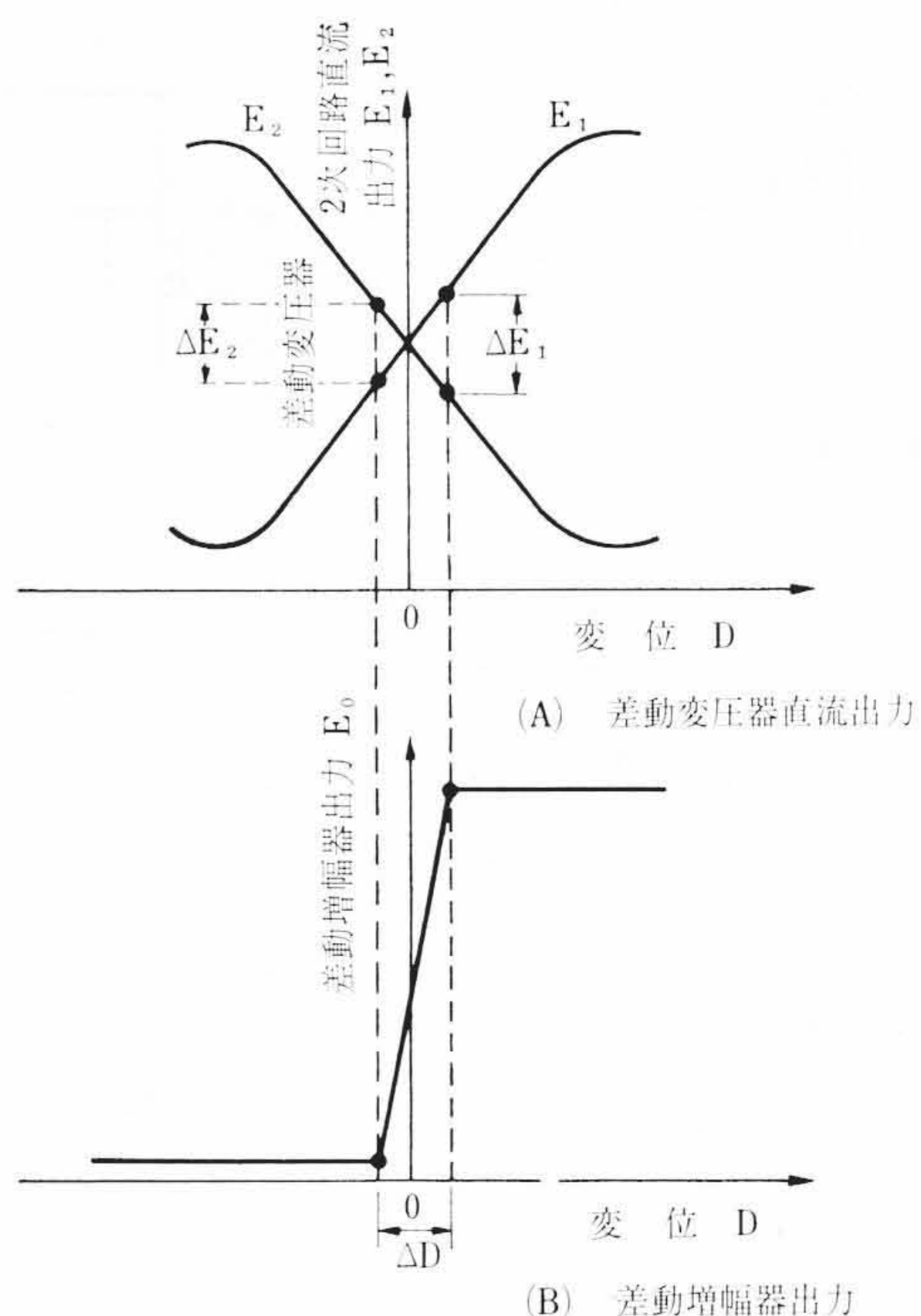


図4 差動変圧器および差動増幅器出力特性

して直流電圧に変換した後、差動増幅器により ON-OFF 信号に変え、位置を精密に検出している。

3.2 特 長

長 所

- (1) 検出誤差が小さい。
- (2) 差動変圧器および差動回路を用いているので検出誤差が小さく、電源変動、温度変化に対し回路が差動的に動作するのでそれらによる影響が小さい。
- (3) 検出部と被検出体間の間げき変化に対し、検出誤差の変化が小さい。
- (4) 鋼板一枚の厚さが検出できるので、被検出体を小さいピッチで検出できる。
- (5) 小形で、構造簡単である。
- (6) 検出部だけを5m以上離せる。
- (7) 応答が速い。

応答は主として差動変圧器の励振周波数および二次回路のろ波器の時定数によりほぼ決定される。励振周波数が高いので、比較的応答が速い。ろ波器の応答が問題になる場合にはRCろ波器の代わりに帯域遮断ろ波器たとえば並列T形ろ波器の使用が望ましい。

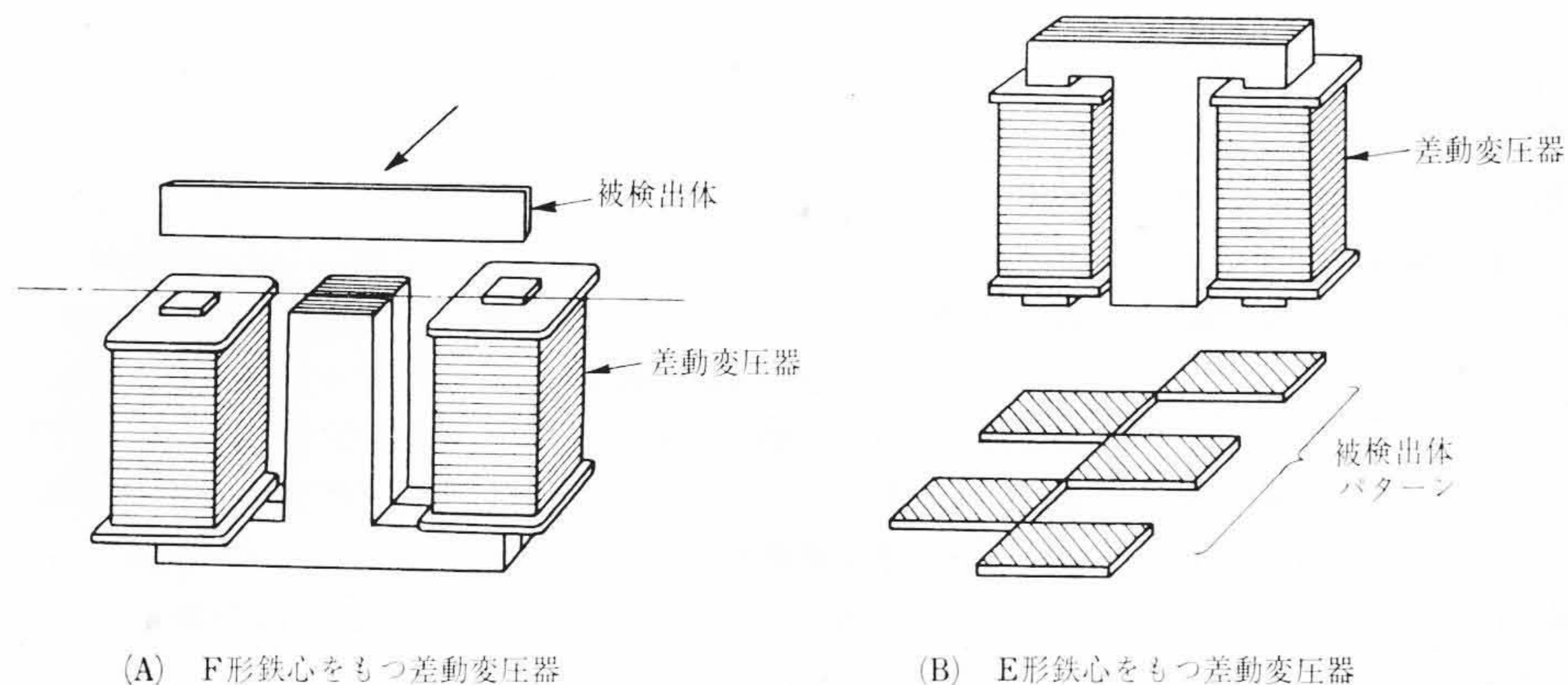


図6 制御円筒用差動変圧器と被検出体

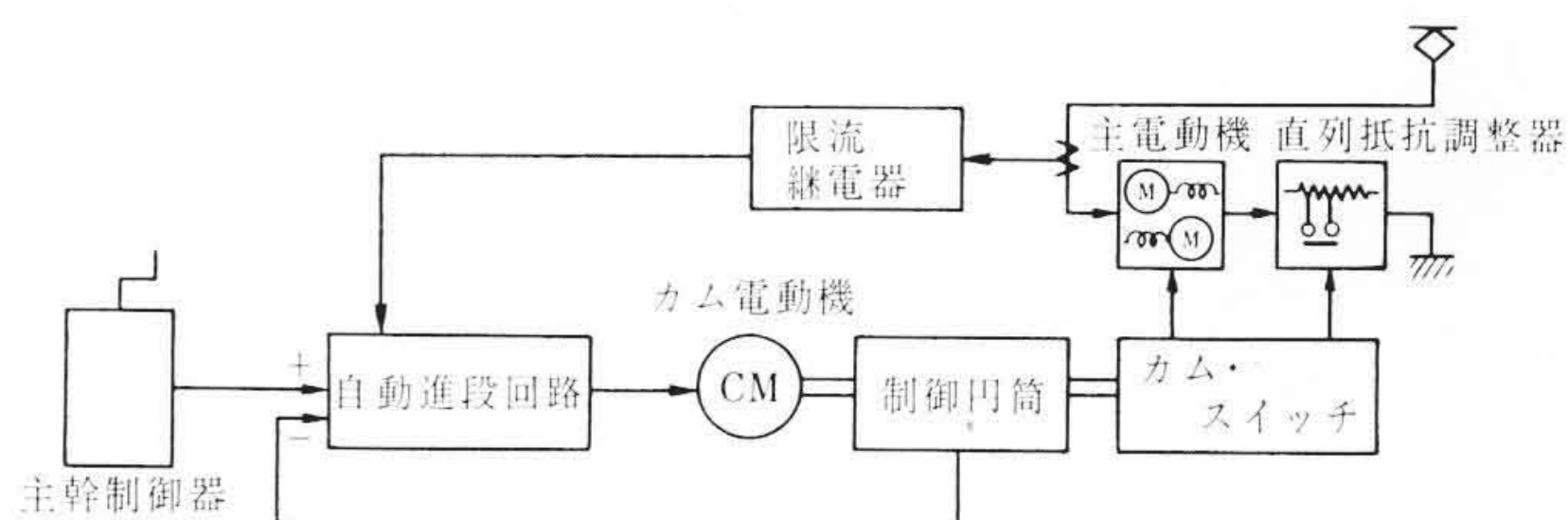


図5 カム軸制御器の構成図

欠 点

- (1) 鉄心を使用するためやや重い。
- (2) 複数個の検出点が一定間隔以上の場合には、被検出体のパターンを適当に作る必要がある。

4. 制御円筒への応用

前章までに述べた精密位置検出器を車両用に応用する場合、対象として考えられるものに制御円筒、調圧器、ユニット・スイッチ、あるいは逆転器の補助接点などに用いる検出器がある。本章では制御円筒への応用について述べる。

4.1 制御円筒の機能と従来の構造

電車を起動および加速する場合、主電動機の直並列接続、直列抵抗の短絡、界磁弱めなどを行なうため、図5に示すようなカム軸制御器が用いられる。自動進段回路は、主幹制御器の信号と制御円筒の回転角信号と限流継電器の積放信号を判断して、制御円筒およびカム・スイッチを直結したカム電動機CMに一定回転角信号をつぎつぎに送る。これにより、主回路電流はほぼ一定幅となり電動機を加速させる。制御円筒は絶縁円筒の表面に導電体が必要なパターン形状に埋込まれ、接点式のしゅう動子により信号を取り出すようになっている。このパターンの分割数は抵抗の短絡数、主電動機の直並列接続などにより決まる。したがって、円滑な加速運転、高速車両などではパターンの分割数が増加する。

4.2 制御円筒の無接点化

制御円筒を無接点化する場合、前章で述べた精密位置検出器が用いられるが、パターン分割数が増加すると小さいピッチで並ぶ被検出体を精度よく検出する必要があるため、特別の工夫を必要とする。これに対し、差動増幅器の鉄心構造を図6(A)のようにし、一枚の鉄片厚さを検出するようにしたり、鉄心を普通の構造にして制御円筒上のパターンを同図(B)のようにして使用される。

4.3 実 験 結 果

実験に用いた差動変圧器は図6(A)の構造のものである。実験は、図7に示すような差動増幅器と被検出体の相対位置について、間げきGの変化による検出誤差、被検出体の中心からのずれSの変化による検出誤差および検出誤差の温度影響、電源影響を測定した。

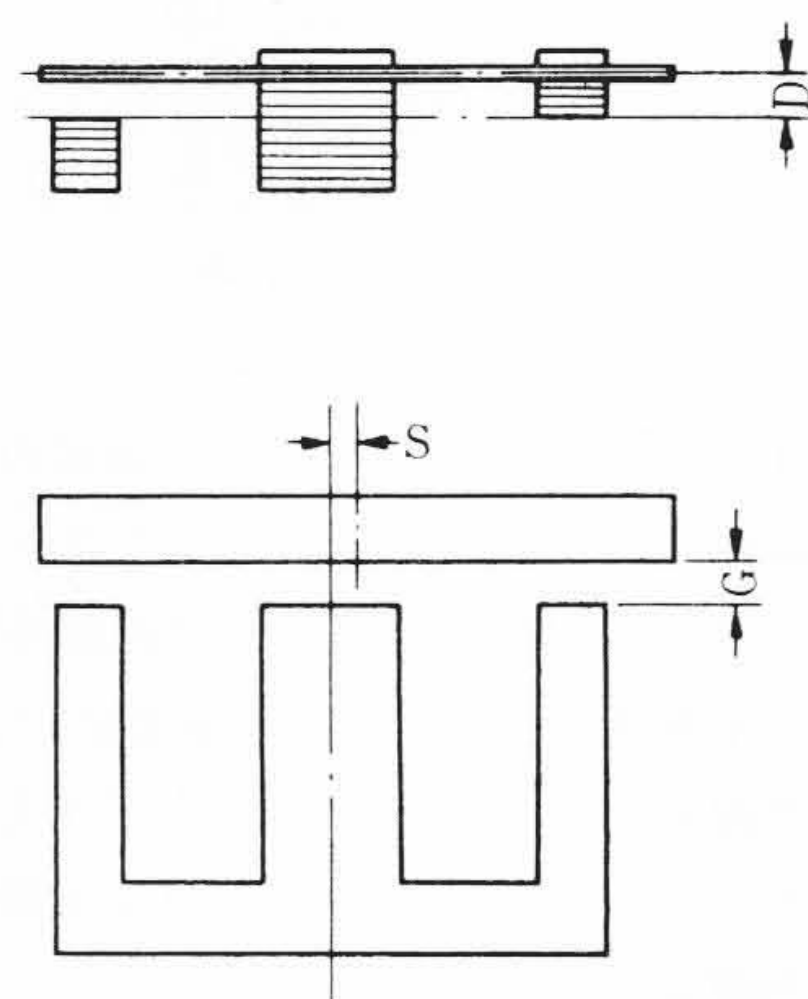


図7 差動変圧器に対する被検出体の位置

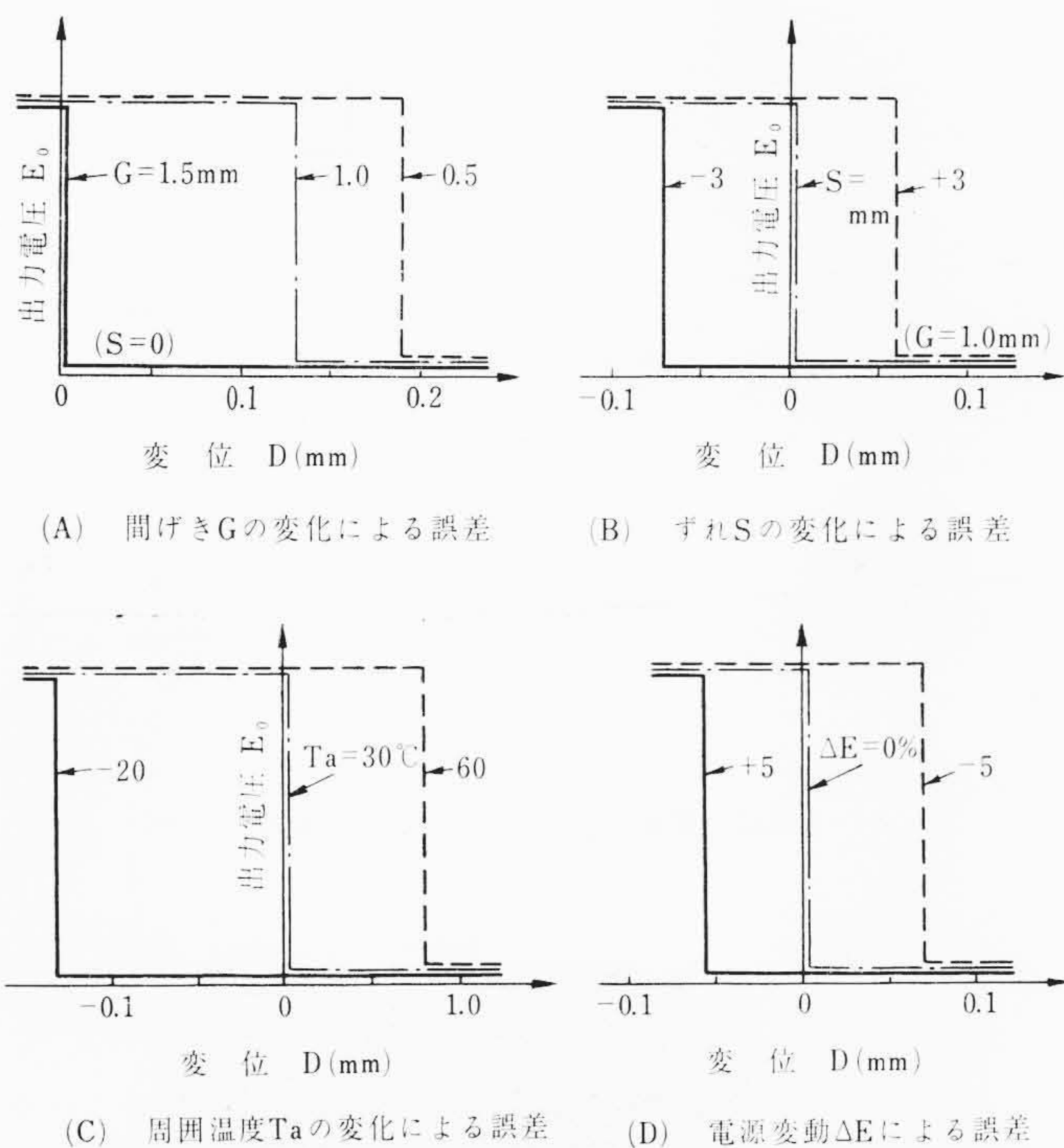
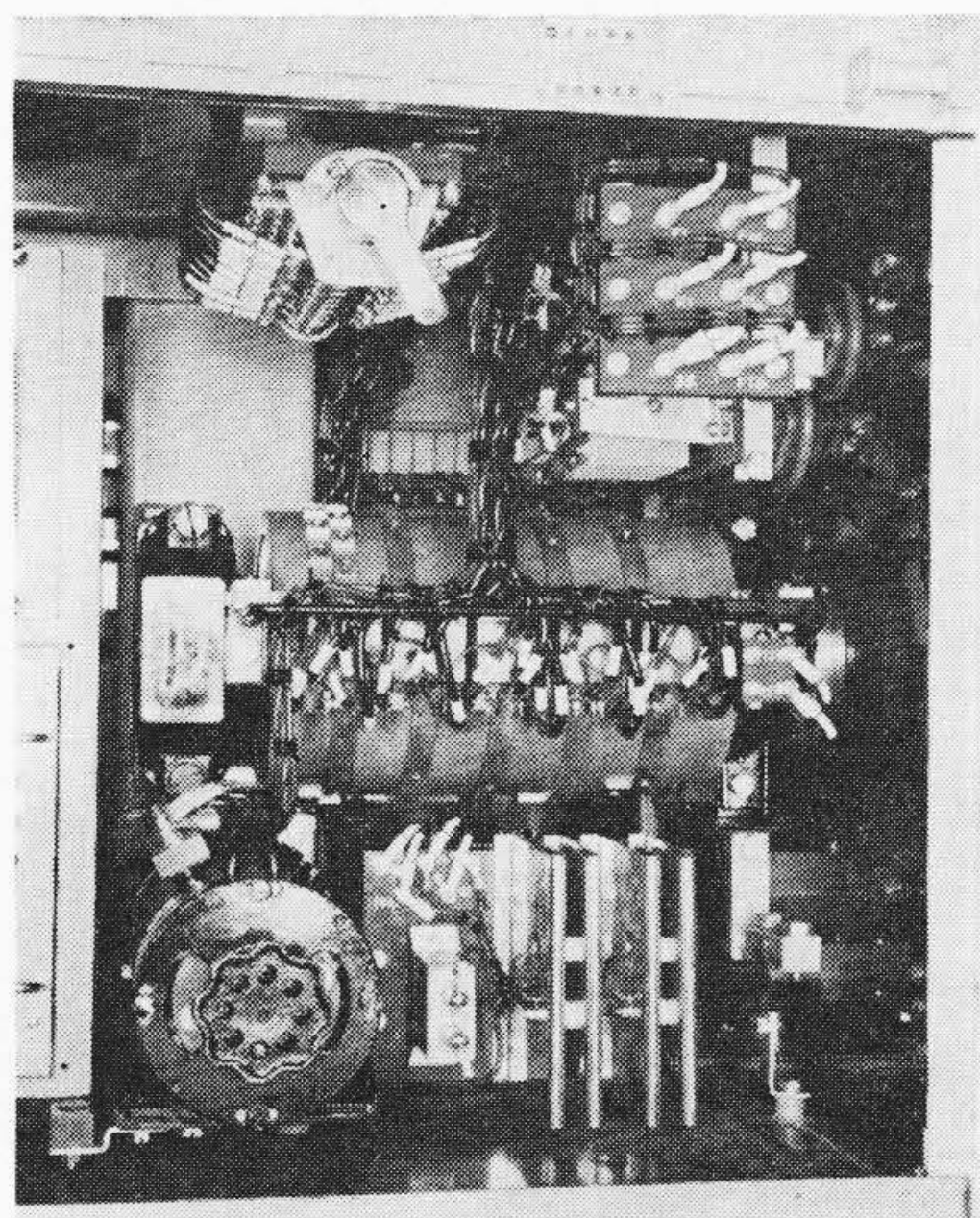


図8 種々の条件変化に対する位置検出誤差の実験結果



〔差動変圧器5個設置〕

図9 カム軸制御器(制御円筒)への応用

その結果をとりまとめて示したのが図8である。

また、被検出体は0.35mm厚さの珪素鋼板を10mm以内のピッチで検出でき、検出部と発振器、増幅器の間隔を10mにできる。

制御円筒の精密位置検出器に応用された一例を図9の写真に示す。これには検出部が5個使用されている。

5. 調圧器への応用

5.1 構造と動作原理

車両では空気ブレーキ、とびら開閉などに圧力空気を使用している。この圧力空気の圧力をほぼ一定に保持するために調圧器が用いられる。調圧器の構成の概要は図10に示すとおりで、空気タンクの圧力を一定に保つように動作する。

空気タンクの圧力は圧力検出部で検出される。圧力があらかじめ定められた一定値以下に低下すると駆動装置に信号が出て電動機が運転され、ポンプにより空気タンクの圧力が増加する。圧力が一定値になると圧力検出器の信号により電動機が停止する。以上のように

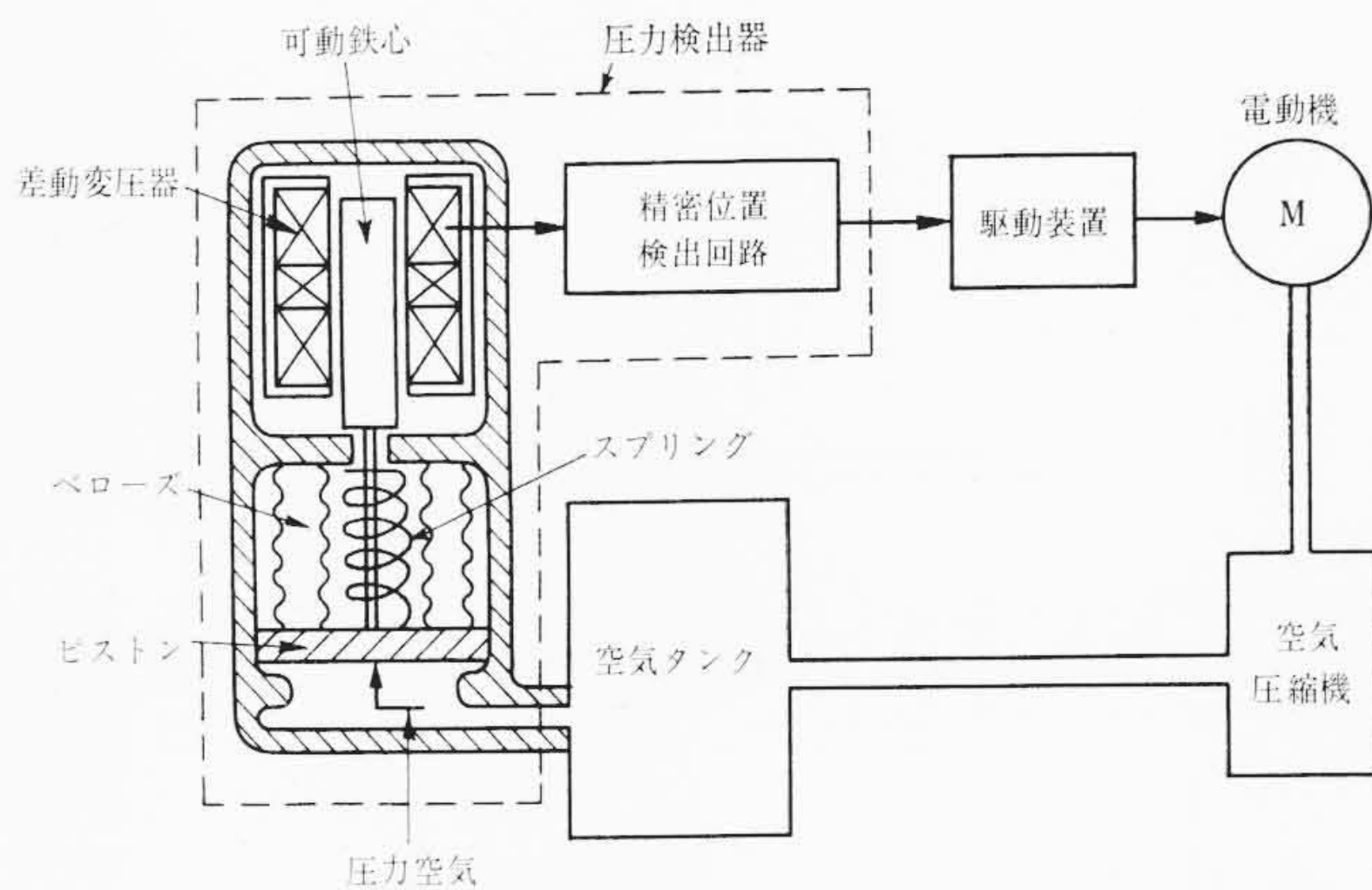


図10 調圧器の構成

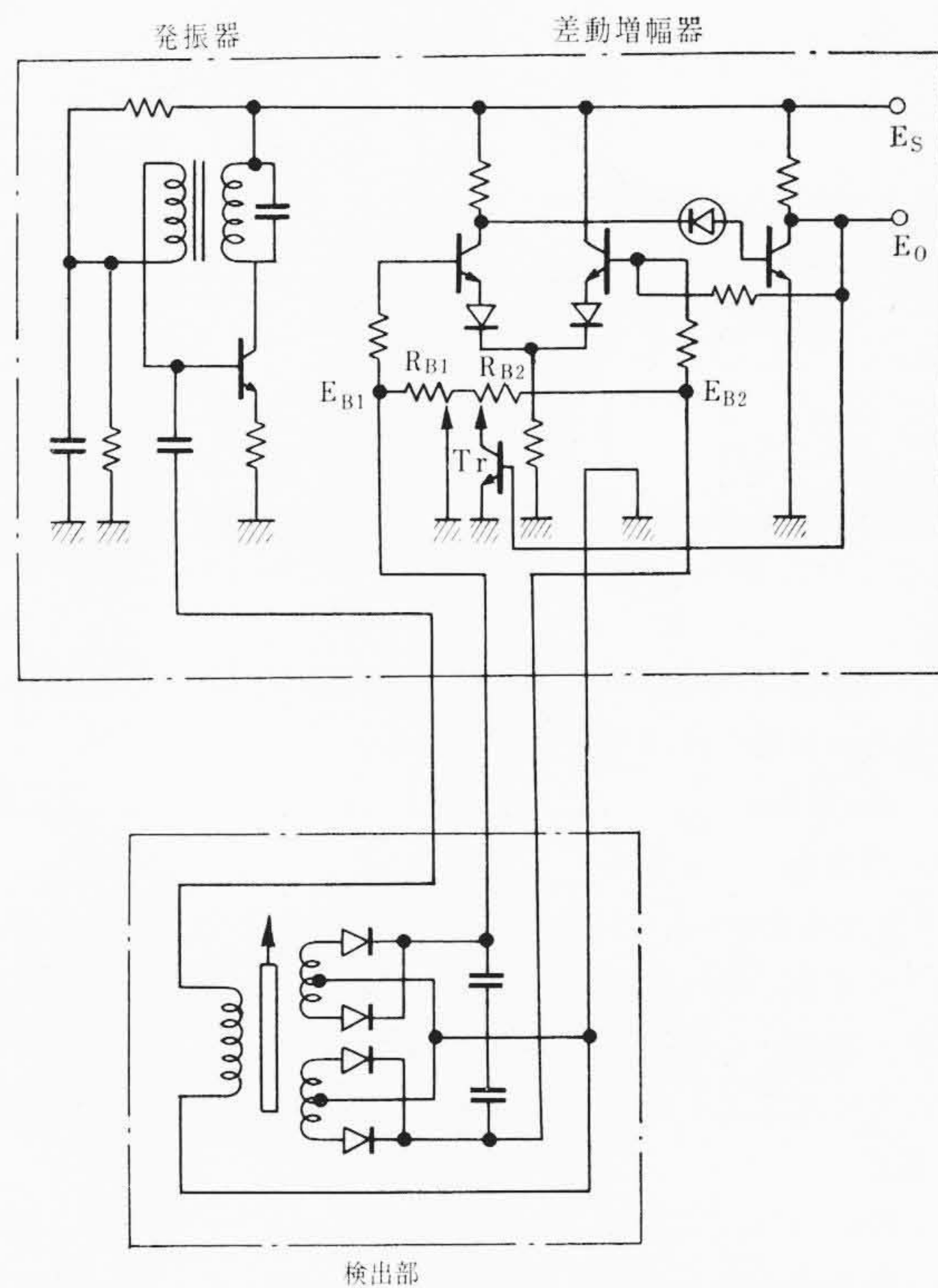


図11 調圧器用精密位置検出器接続図

にして、ある一定幅の圧力に空気タンクの空気圧が保持される。

次に、圧力検出器の構造を説明する。図10において、通常ピストンが圧力空気の圧力とスプリングおよびベローズの応力とにより平衡してある位置にある。いままし空気圧が変化するとその圧力と平衡するまでピストンが変位する。このピストンの変位は機械的に直結されている差動変圧器の鉄心を変位させ、この変位に応じた電圧が差動変圧器の二次巻線に得られる。この電圧の処理は、だいたい前章までに述べた精密位置検出器と原理的には同様である。ただし、調圧器の場合は圧力の上限と下限を検出するため、位置は2点において精密に検出する必要があるため、特別の考案がなされている。その内容については次節で述べる。

5.2 検出回路および動作

位置の検出回路を図11に示す。差動増幅器は図10に示すように絶縁円筒に一次および二次巻線が巻かれ、鉄心は円筒の中心を移動する構造になっている。図11において、いままし鉄心が平衡位置より下側にあれば、二次出力電圧は

$$E_{B1} < E_{B2} \dots\dots\dots (5)$$

となるので、出力電圧は $E_0=0$ となり、トランジスタTは遮断状態

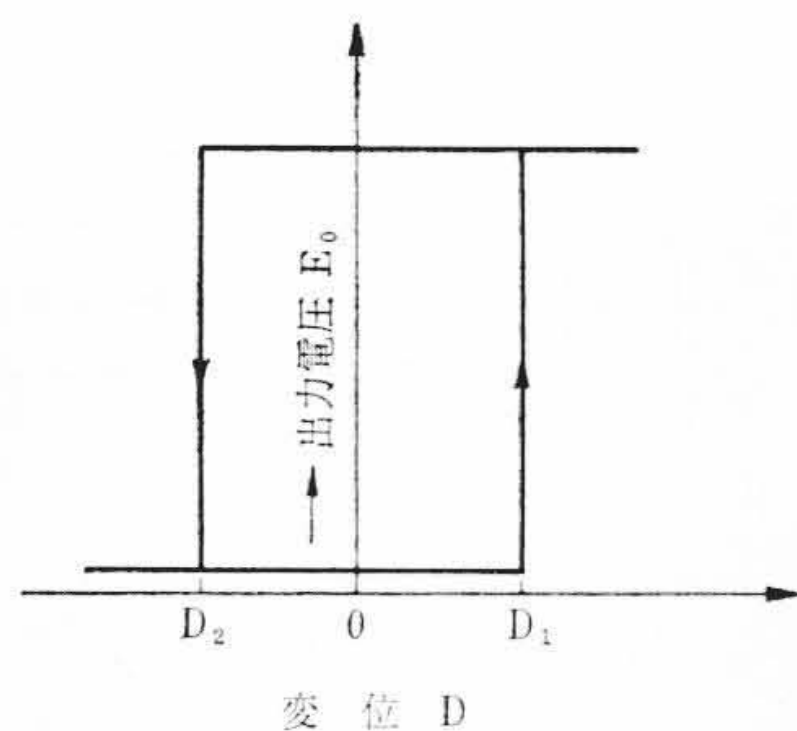
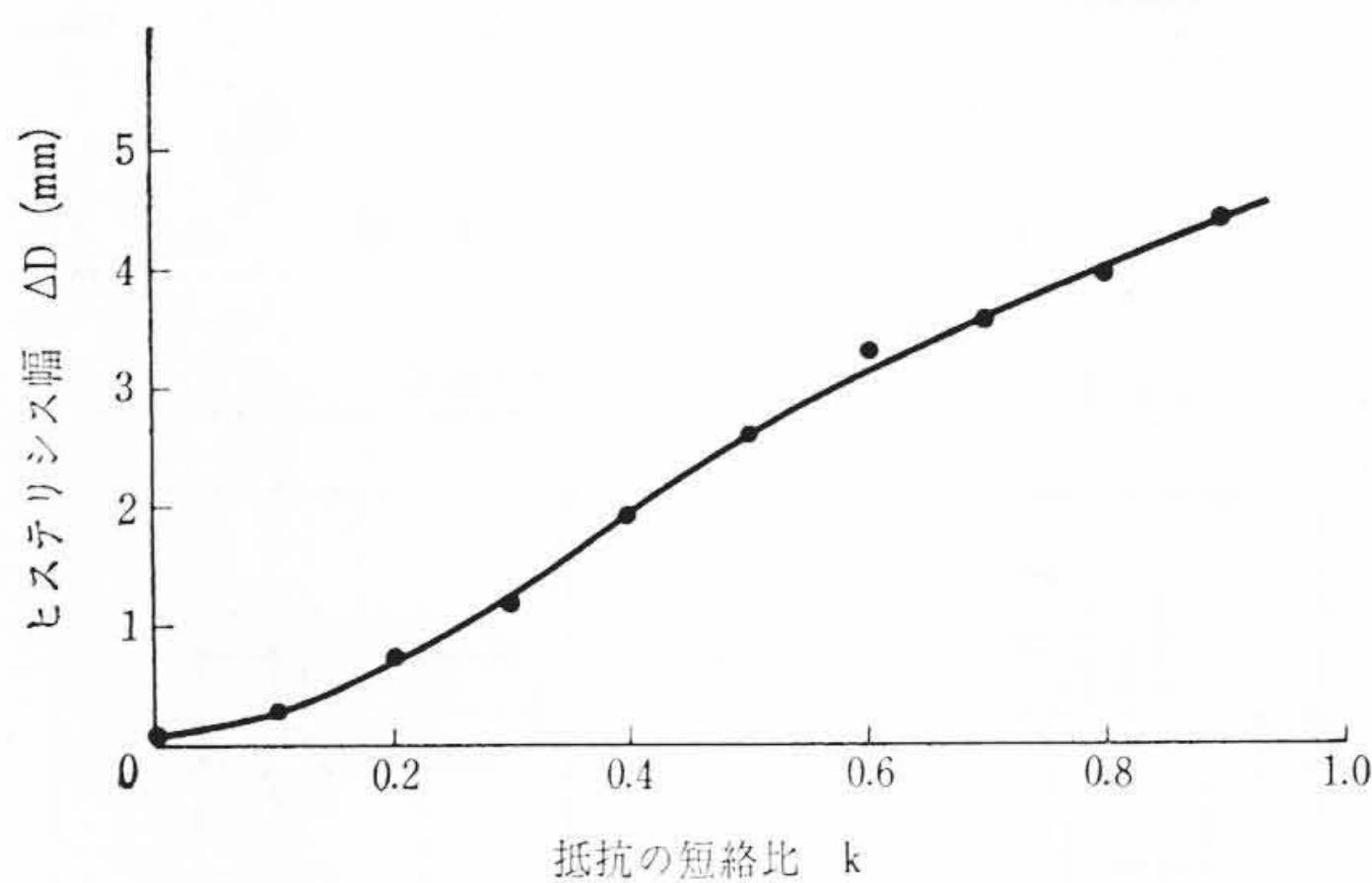


図12 調圧器用精密位置検出器の特性



$$\text{注: } k = \frac{\text{短絡抵抗}}{\text{全抵抗}} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$$

図13 抵抗の短絡比とヒステリシス幅の関係の実測値

となる。この場合の回路の動作は図3と同様である。したがって、鉄心が上方へ移動しほぼ平衡点を過ぎると

$$E_{B1} \geq E_{B2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

となり、出力 $E_0=1$ となる。

$E_0=1$ となると、トランジスタ T_r が飽和状態となり、抵抗 R_{B2} の値を小さくする。これにより差動変圧器二次の下側出力電圧の変動率が大きくなり、これにより平衡点が前述の位置より少し下方に移動したことになる。したがって、鉄心が下方に移動し、この平衡点を過ぎると

$$E_{B1} \leq E'_{B2} (< E_{B2}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

となり、出力 $E_0=0$ となる。

したがって、鉄心の変位 D (上方を正にとる) と出力 E_0 の関係は図12に示すようになる。このヒステリシス特性を与える変位 D_1 および D_2 は精密位置検出器の動作原理のうえから、電源変動、温度変化などの外的条件の変化に対し、非常に安定している。

5.3 実験結果

抵抗の短絡比とヒステリシスの幅の関係を図13に示す。この結果約0~4.5mmの間の任意のヒステリシス幅に調整できることがわかる。

次に、ヒステリシス幅を2mmに設定したとき、その立上り点および立下り点の電源影響を図14に示す。この結果、電源変動 $\pm 5\%$ に対し、誤差 $\pm 0.15\text{mm}$ 程度である。

調圧器に応用され、製品化された例を図15に示す。

6. 結 言

車両用制御器の無接点化の一環として差動変圧器と差動増幅器の組合せからなる精密位置検出器を考案、開発した。この応用として

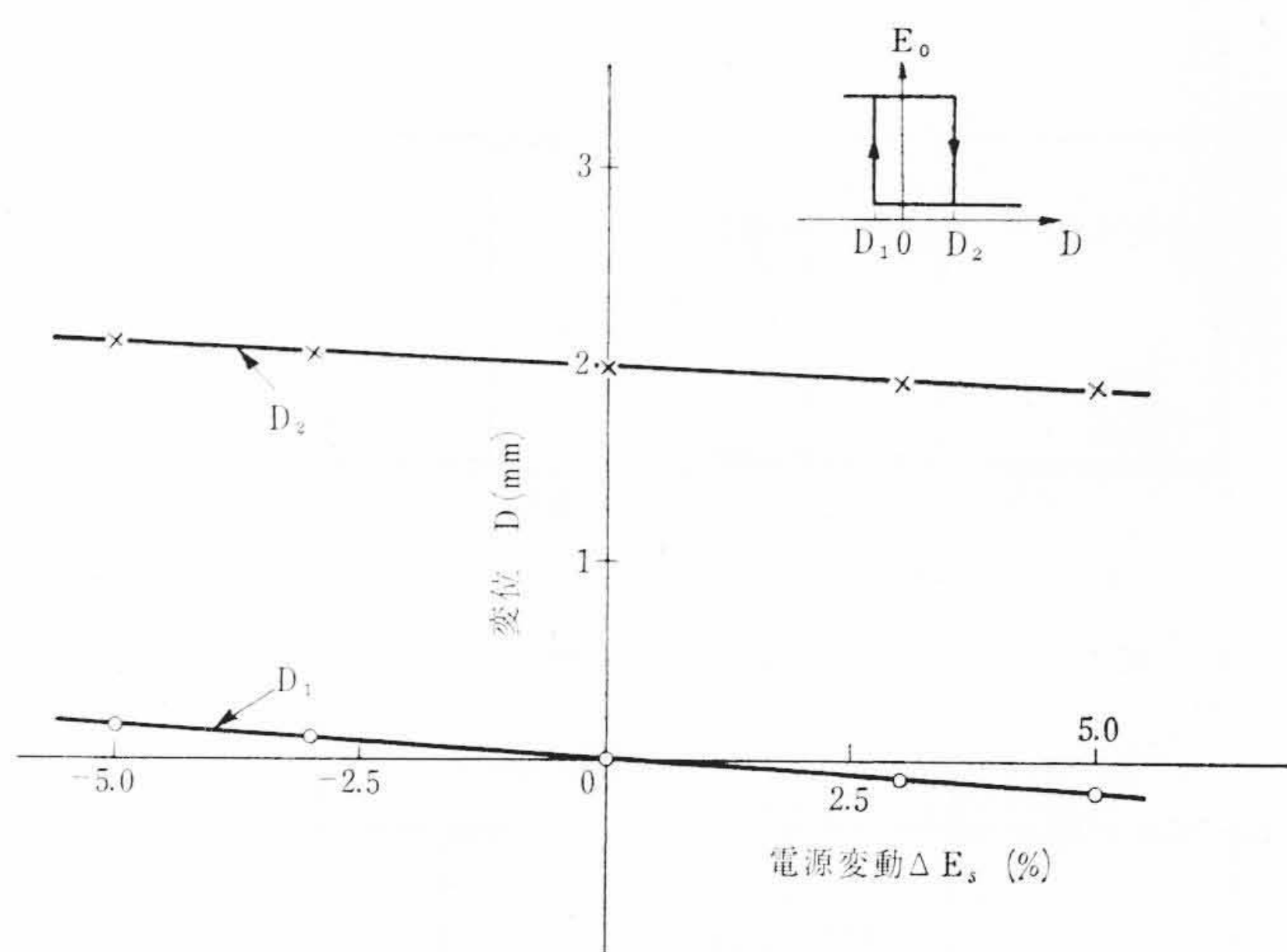
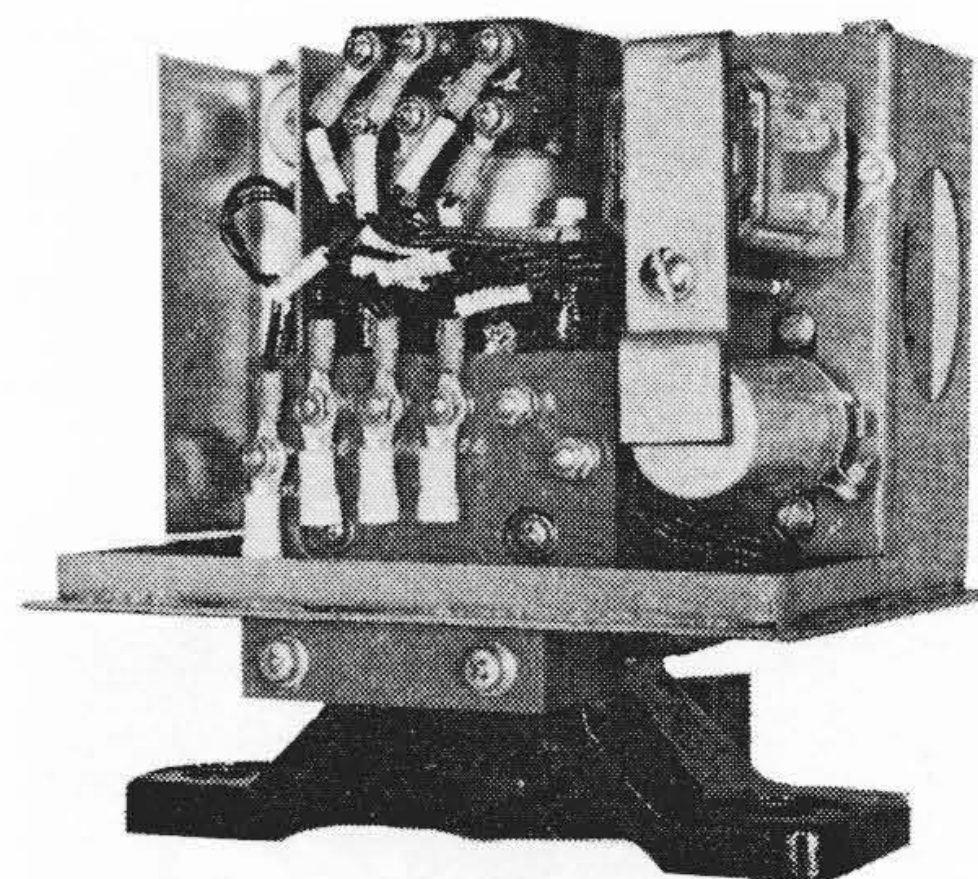
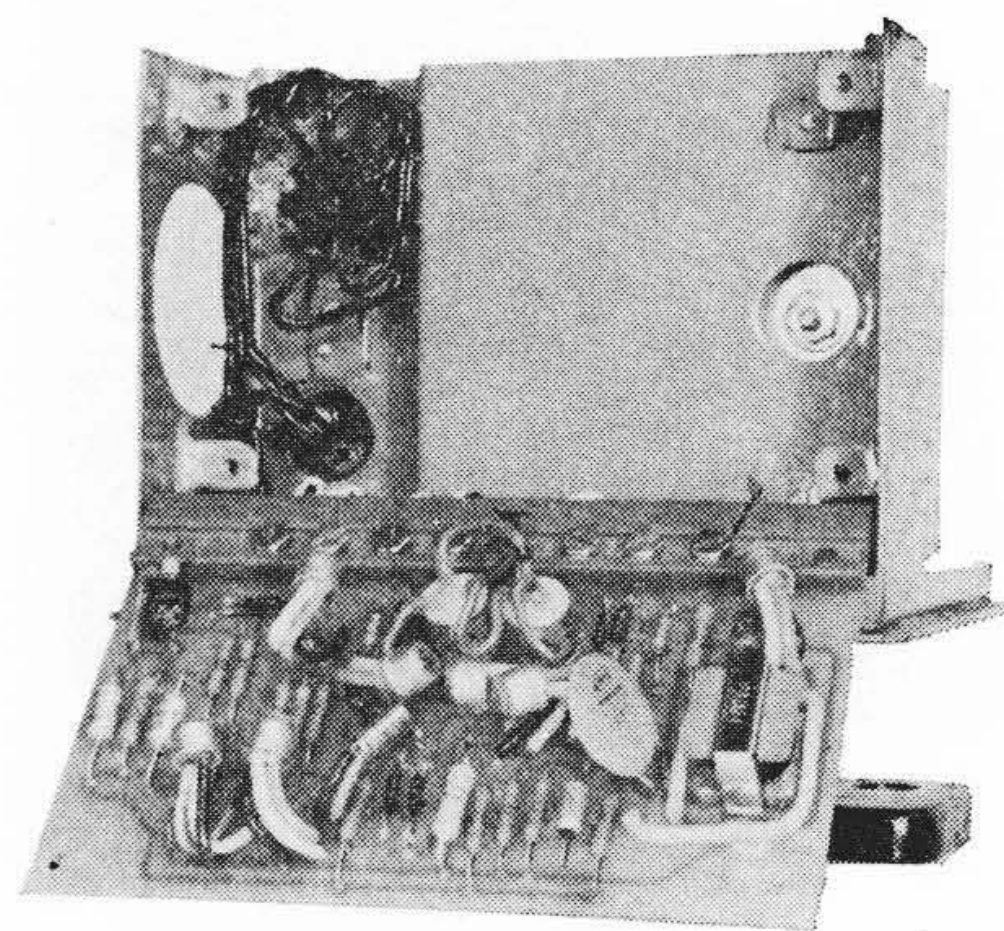


図14 電源変動とヒステリシス特性



(A) 差動変圧器取付部分



(B) 検出回路

図15 調圧器への応用

制御円筒、調圧器、ユニット・スイッチあるいは逆転器の補助接点などがあげられ、それぞれ実用化されているが、本報では制御円筒、調圧器への応用を紹介した。

試作装置の実験結果では、間げき変化 $1.0 \pm 0.5\text{mm}$ に対する検出誤差 $0 \sim 0.19\text{mm}$ 、被検出体のずれ $\pm 3\text{mm}$ に対し誤差 $-0.13 \sim 0.08\text{mm}$ 、周囲温度 $-20 \sim 60^\circ\text{C}$ に対し $-0.13 \sim 0.08\text{mm}$ 、電源変動 $\pm 5\%$ に対し $-0.55 \sim +0.70\text{mm}$ であった。また、調圧器への応用では電源変動 $\pm 5\%$ に対し誤差 $\pm 0.15\text{mm}$ であった。以上のように周囲温度変化、電源変動など周囲条件変化に対し、実用的に誤差がほとんど問題にならない精密な位置検出器を製品化できた。