薄膜パラメトロンを用いたフェイルセーフ素子†

伊 藤 登・池 野 和 夫・五 郎 川 達・高 田 勝

大井電気株式会社 横浜市港北区菊名町 884-1

(昭和 45 年 8 月 14 日 受付)

Fail Safe Element Using Thin Film Parametron

Noboru ITO, Kazuo IKENO, Tohru GOROKAWA and Masaru TAKADA

(Laboratory, Oi Electric Co. Ltd, Yokohama)

(Received August 14, 1970)

The high speed fail safe element is an urgent need of the day, especially in the field of traffic control such as that used on a railway or a highway. This is because the present magnetic relay control system widely used in the market may become unsatisfactory as the required control speed is drastically increasing. Few kinds of electronic fail safe elements have been reported, one is the fail safe threshold logical operational oscillator using resistors and semiconductors whose output voltages $+V$ and $-V$ ($|V| > \text{threshold voltage}$) correspond to the truth values 1 and 0 respectively, and the voltage less than the threshold voltage corresponds to the truth value 1/2. Another is the subharmonic oscillator called parametron whose 0 and π correspond to the truth values 0 and 1 respectively. The failure of an element and a circuit resulting in no voltage is covered by the following element whose constant signal is always monitored. The operational oscillator is excellent in the idea but the element is complicated and expensive, the subharmonic oscillator is simple but large in size and slow in speed because of the ferrite core.

Here aiming at accuracy, high speed, small size and low cost, we have developed a thin permalloy film parametron to replace the ferrite parametron. The permalloy film is deposited onto a piece of phosphorous bronze wire 0.47 mm in dia.. The film is $1\ \mu\text{m}$ thick and has a composition of 81 Ni-Fe with uniaxial anisotropy in circumference, and the anisotropy magnetic field is about 200 AT/m. To investigate the quality, we built a fail safe control equipment using 325 thin film parametron elements and 28 magnetic control relays. As a result of this study, we find the fail safe element using thin film parametron is very accurate under a clock frequency of 50 kHz and is cheap and small.

1. ま え が き

電車、エレベータなど交通機関のブレーキは、運転時、電力によって開き、電気を切ればスプリングの力などで自動的にブレーキが閉じるようになっている。これが逆に、電力でブレーキを閉じる構造であれば、停電によりブレーキは作動しなくなり、運転の自由を失って暴走する。これはフェイルセーフが実際に応用

されている一例で、これに類することはかなり古くから常識的に行なわれていた。また如上機器の制御には電磁継電器を使用するが、これも重力またはスプリングを利用して、停電または励磁巻線の断線にさいしては復帰する構造になっている。すなわち異常事態にさいしては、絶対に制御イオン側に素子が働いてはならないのである。

さて時代の進歩とともに、制御機能は複雑に、かつその速度は高速化してきた。かくして今までの制御素子の主役である電磁継電器では、この時代の要求に応

† 電子通信学会全国大会 (昭 44・10)、電気関係東北支部連合大会 (昭 44・10) で発表

することができず、これに代わる新しい素子が研究されるにいたった。代表的な例として、トランジスタを利用したもの¹⁾、フェライトパラメトロンを利用したもの^{2),3)}が報告されている。前者はトランジスタ発振器の出力を整流して得た電圧 (2 V) を直流電圧 (−V) に重畳、+V を真理値 1 に、また無入力時の電圧 (−V) を真理値 0 に対応させ、また構成部品の故障は発振停止 (−V) または電圧減 (閾値以下の電圧) となり、真理値は 0 またはたかだか 1/2 となる。

さらに双対の関係にある正副の二重系の各段出力を exclusive OR 回路でチェックし、故障点を表示している。後者はフェライトパラメトロンの発振位相 (0, π) および発振停止をそれぞれ真理値 0, 1 および 1/2 に対応させ、また論理回路は 0 系, 1 系 (異常のさいはそれぞれ 0 相, π 相に安定する系) の二重系を採用、素子の故障または布線断は、この双対二重系の不一致として検出している。いずれもフェイルセーフ素子としての機能は備えているが、前者は複雑高価であり、後者は廉価であるが論理速度が遅く (現在クロック周波数 5 kHz)、大形、かつプリント化に適さないなどの欠点があった。

われわれは上記フェライトパラメトロンの欠点を改良する意味で、焼青銅線の上にパーマロイを電着した、1 軸異方性を有する薄膜磁性線を用いてパラメトロンを製作、フェイルセーフ素子として使用した試作機によって検討した結果、クロック周波数 50 kHz で非常に安定に作動することを確認した。

2. 薄膜磁性線⁴⁾

分周波発振⁵⁾のリャクター材である磁性膜は 0.47 mm 径の焼青銅線の上に、Table 1 の条件で磁場中電着により製作される。この磁場は線に直接流される電流によって与えられ、したがって結晶異方性は円周方向に生ずる。組成は磁わい最小の点である 81 Ni-Fe に

Table 1 Composition and conditions of permalloy electrolyte

NiSO ₄ ·7 H ₂ O	230.0 g/l
FeSO ₄ ·7 H ₂ O	5.5 ㄱ
H ₃ BO ₃	30.0 ㄱ
Na ₂ P ₂ O ₂	0.2 ㄱ
NaC ₆ H ₄ CONHSO ₂	0.2 ㄱ
Cu SO ₄ ·5 H ₂ O	0.3 ㄱ
NiCl ₂ ·6H ₂ O	16.0 ㄱ
H ₂ SO ₄	0.3 cc/l
pH	2.1
bath temperature	47±1.0 °C
current density	50.0 mA/cm ²
magnetic field	1 600.0 AT/m

調整され、膜厚は 1 μ m である。また現在得られる電着膜の異方性磁界は 200 AT/m 程度である。

3. 素子の構造・特性

前記の磁性線の上に、発振巻線 (1)、定数巻線 (2)、情報巻線 (3)、(4) を施し、発振巻線に並列に同調容量 C を付加したものを 1 素子⁶⁾とする。Fig. 1 にこ

Fig. 1 Construction of a fail safe element using thin film parametron, when exciting frequency is 6 MHz

の状態を示す磁性線 2 本を平行に用いたのは外部騒乱の影響を除くためである。Fig. 2 は試作品の写真で、

Fig. 2 Photograph of three thin film fail safe elements on one substrate

3 素子が 1 基台に実装され、各巻線間にはスペーサで保たれており、また同調容量は裏面に配置されている。大きさは幅 10 mm、長さ 64 mm、厚み 15 mm で、結合抵抗はプリント板に実装される。

以下にまず素子単体としての電気的特性について述べよう。文献 5) にくわしく述べるように、分周波発振は同調点で最も発振しやすく、容量を変えて離調するに従い多くの励振電流 I_{2f} を必要とする。離調はまたバイアス電流 I_d を変化させても起こりうる。一般に I_d の上下限の広がりの大なるほど素子として安定であるので、この領域をマージン特性と称し性能比較に用いられる。また本文を通じ励振周波数 ($2f$) は 6 MHz に固定、クロック Duration は 1:1 なるよう調整した。また標準負荷抵抗 R_0 は 1 k Ω とした。ただし被測定素子への結合抵抗は $2R_0$ すなわち種情報半分を減じて行なった。

Fig. 3 は $I_d=0.1$ A に設定、容量 C の変化に対する最低励振電流 I_{2f} の値を実測したもので、パラメーターはクロック周波数である。図から $I_{2f}=0.18\sim 0.2$

Fig. 3 Detuning capacity C vs. exciting current I_{2f} characteristic curves of the thin film fail safe element for the parameter of clock frequency f_m , when bias direct current I_d is 0.1 A

Fig. 4 Normalized oscillatory voltage vs. bias direct current characteristic curves of the thin film (solid line) and ferrite (dashed line) fail safe element, when $f_m = 50$ kHz

A (rms) で使用すれば、単体としてはクロック周波数 100 kHz まで許容しうることがわかる。しかし他の条件をいれれば、安全性を考えて 50 kHz ぐらいが妥当な所であろう。Fig. 4 にクロック周波数 50 kHz (以下同一条件につき省く) の場合の、直流バイアス I_d に対する規準化発振電圧特性を示した。比較のためフェライトパラメトロン (PM-4) の特性をそう入したが、薄膜パラメトロンの方がはるかに定電圧性が良いことがわかる。これは多数決論理素子としては最良の特色であり、同時に定数監視を要するフェイルセーフ素子としてもたいへん都合なことである。

Fig. 5 は励振電流 I_{2f} 変化に対する規準化発振電圧特性で、この場合もフェライトパラメトロンより定電圧性が非常にすぐれている。Fig. 6 に温度に対する I_d マージン特性を示した。パーマロイの温度特性(+)をスチロールコンデンサのそれ(-)で補償しているので、同調点の I_d 方向の移動は見られない。この素子は温度に対して非常に安定であることが図から明ら

Fig. 5 Normalized oscillatory voltage vs. exciting current characteristic curves of the thin film (solid line) and ferrite (dashed line) fail safe element, when $f_m = 50$ kHz

Fig. 6 I_d vs. I_{2f} margin characteristic curves of the thin film fail safe element for the parameter of temperature, when $f_m = 50$ kHz

Fig. 7 I_d vs. I_{2f} margin characteristic curves of the thin film fail safe element for the number of sons, when $f_m = 50$ kHz

かである。Fig. 7 に標準状態における子供 (fan aut) の影響を示している。子供の数 20 個になると I_{2f} の大なるほう (図中斜線部分) で誤動作するので、その数は 15 ぐらいに押さえたほうがよい。ただしクロック周波数を 50 kHz より高くしたい場合は、子供の数を上述より減少させなければならない。これは Fig. 3 および Fig. 7 から明らかなように、クロック周波数あるいは子供の数の増大は、マージン特性の安定領域

を著しく狭めるからで、逆に子供の数が少ない場合は、クロック周波数を標準値より増加しうる。またその逆も成り立つ。

4. フェイルセーフ機能

フェイルセーフ性を保つため、上記素子は 2 値的な障害に対し、正常状態出力を発生するか、あるいは定められた論理値に誤らない、すなわち安全側の故障状態出力を発生するものでなければならない。

さて上記素子は発振電圧の位相——すなわち 0, π の 2 値——を情報源とするものであり、また Fig. 4, Fig. 5 に見るように外部要因に対し定電圧性が高いため、その故障は出力電圧ゼロで特長づけられ、中間値がない。すなわちこの素子は 0 相, π 相の有限電圧および故障（配線断を含む）に対応するゼロ電圧の 3 つの場合しか採り得ない典型的な 3 値形を有する。さらに、正常状態（高エネルギー）の 2 値は、故障状態（低エネルギー）に対し完全に対称位置にあり、0 相, π 相のいずれを論理的安定状態に対応させることも可能で、この点が他の現存素子（たとえば電磁継電器、トランジスタ）と異なり、双対の論理構成を容易にする理由である。このうち 0 相を論理安定状態とするものを 0 系, π 相に対するものを 1 系とし、異常のさいはそれぞれ 0 相, π 相に安定する 2 系の論理回路を作成、それら 2 系の AND をとって制御を行なわせ、異常状態は両系の不一致として検出する。Table 2 はこの素子を用

Table 2 Values and signs of constant of the thin film fail safe paramatron constructing twin system, where the right column is for general use

system logic	0	1	general
delay			
NOT			
AND			
OR			

いて、0 系, 1 系のフェイルセーフ機能を実現するための論理素子構成である。表中、円内の数字は、前段からの正規情報電流を 1 とした場合の定数電流の大きさと、その位相（0 相が“-”に、 π 相が“+”に対応）を示している。右端に一般論理素子として使用する場合の定数値を参考のため記載した。また Table 2 構成に対する多数決論理値を Table 3 (a), (b), (c) に掲げた。Table 3 (b) AND についてじゃっかん説明を加えれば、一般論理素子に対しては、Fig. 1

Table 3

(a) Majority table on normal and abnormal states of a input for the Delay logic in table 2

input \ sys.	0		1		general	
	nor.	one	nor.	one	nor.	one
-1	-3/2	-1/2	-1/2	1/2	-1	※ unde.
1	1/2	-1/2	3/2	1/2	1	unde.

(b) Majority table on normal and abnormal states of inputs for the AND logic in table 2

input \ sys.	0			1			general		
	nor.	one	both	nor.	one	both	nor.	one	both
-1	-7/2	-5/2	-1/2	-5/2	-3/2	1/2	-3	-2	-1
-1									
1	1/2	-1/2	-1/2	3/2	1/2	1/2	1	unde.	-1
1									
1	-3/2	-5/2	-1/2	-1/2	-3/2	1/2	-1	-2 unde.	-1
-1		-1/2			1/2			※	

(c) Majority table on normal and abnormal states of inputs for the OR logic in table 2

input \ sys.	0			1			general		
	nor.	one	both	nor.	one	both	nor.	one	both
-1	-3/2	-1/2	⊙ 1/2	-1/2	⊙ 1/2	⊙ 3/2	-1	※ unde.	※ 1
-1									
1	5/2	3/2	1/2	7/2	5/2	3/2	3	2	1
1									
1	1/2	-1/2	1/2	3/2	1/2	3/2	1	unde.	1
-1		3/2			5/2			2	

の巻線 (2) に定数 -1 が、また巻線 (3), (4) にともに信号 +1 が流れる場合を考えると、入力多数決は +1 となり、この素子は π 相発振を行ない、正解となる。次に巻線 (3) または (4) が断線すると、入力 +1, -1 の和でゼロとなり、発振位相は不定となる。しかし 0 相を非制御側と考える限り、この不定性は、正解 +1 に一致するか、または安定状態にあるかで、実害はない。しかし巻線 (3), (4) にそれぞれ +1, -1 が流れる場合に、巻線 (4) が断線すると、前同様発振は不定となり、わずかでも +1 信号が大であると π 相発振を起こし、制御は GO となる。この場合正解は -1, すなわち NOTGO であるから、この場合の不定さは危険である。よってこのような不定さには ※ 印を付す。以上のことから一般論理素子はフェイルセーフ性がないといえる。ここで表左側 0 系・

1系のANDを考えると、両巻線断に対してはすべて不一致、片巻線断または両者混合の場合には、不一致かあるいは非制御状態となり、完全にフェイルセーフ性を保障する。Table 3(a), (c)についても同じことがいえる (NOTはDelayを含む)。ただ問題になるのは、Table 3(c)に◎印を付した場合、すなわち入力-1, -1で、0系の両巻線断となり、同時に1系の片巻線または両巻線が断線した場合で、正解は0相発振であるにもかかわらず、この素子は π 相発振となり不都合である。よって論理設計ではこの点を検討し、かつ上記の同時障害が起こらないよう、実装面では、0系、1系は完全に分離、電源関係も別にする。さらにTable 2円内の定数はフェイルセーフの生命であるので、その変動はとくに監視され、異常のさいはアラームを出し制御は阻止される。これに関しては次章に述べる。

さて一例として、Fig. 8に2進2けたカウンタのフ

Fig. 8 Twin logic fail-safe construction of two digits binary counter using the thin film parametron

ェイルセーフ構成を示す。正常状態では、0系・1系のカウンタは一致し、パラメトロン9Aに出力があり、端子T₁から制御情報を送出する。もし0系の素子2Aの出力線が断線した場合、素子3Aは自身の定数-1/2により以後常に0発振を行ない、したがって素子1B以下はすべて0発振となる。このとき、1系側から出力1があれば、0系出力と一致せず、素子の9Aの出力は失われ、素子9Bに出力1が現われ、次段のフリップフロップを1にセットし、端子T₂からアラーム情報を送出する。さらに1系側の故障で、出力1が現われなければ、制御信号も出ないし、アラームも出ないが、ともかくフェイルセーフである。逆の場合も同様である。

ここで前述したTable 3(c)◎印の場合を検討してみよう。0系2Bの2入力断を考える。信号出力は

すべて直列であるから、この場合0系2Cの2入力も断となり、0系2Cは常に0相発振となる。よって1系の状態にかかわりなくT₁から制御信号が出ることはなく、この場合もフェイルセーフである。

5. 定数監視回路・出力制御回路

前章Table 2に示した定数は、定数パラメトロンの出力を増幅したのち、各素子に直列に供給されるのであるが、これはフェイルセーフ性を保障する重要な情報であるので、その量は常に一定範囲内にあるよう監視される。Fig. 9に差動増幅器を用いた監視回路の一例を示す。定数素子の出力は端子A₁, A₂を通じ、整流後トランジスタQ₁のベースに加えられる。Q₁, Q₂

Fig. 9 Monitor circuit for the constant current of above fail safe element, where Q₁ to Q₃ are 2SC267, Q₄ 2SB227, D₁ to D₄ 2×1N34A, and Z₁ and Z₂ are RD6A

は差動形になっており、入力が標準値の場合はV₁, V₂点は同電位(6V)に保たれる。またa₁, a₂点はツェナーダイオードZ₁, Z₂によって6Vに設定されているから、ダイオードD₁~D₄は断状態にある。このときQ₃, Q₄は通状態で、電磁継電器R₁, R₂は作動している。いま入力が標準値より下がった場合を考えると、V₁点の電位は上昇、V₂点の電位は下降する。このときD₁は逆方向で断、D₂は順方向で通となり、a₁点はV₂点の電位に追従する。またD₃通、D₄断であるからa₂点の電位はV₁点のそれに追従する。ここで入力が規定値より下がり、V₁点で8V以上、V₂点で4V以下になると、Z₁, Z₂は断状態となり、したがってQ₃, Q₄およびR₁, R₂は断となり、T₁の地気を去って制御を停止、T₂を地気して警報を送出する。ここでR₁, R₂はいずれか一方が断になれば必要十分であるが、安全のため二重構造とした。

次に入力が上昇、規定値を越えた場合もまったく同

Fig. 10 Deviation of V_1 and V_2 level of above differential amplifier for input level

様な過程を経て R_1 , R_2 は断となる。ただし V_1 , V_2 点の電位関係は逆転する。この差動増幅器の特性を Fig. 10 に示した。横軸の入力電圧が図の operational range 外に出ると異常状態となる。さて Fig. 9 の回路では 1 素子の故障は問題ない。たとえば $D_1 \sim D_4$ のいずれか 1 つが断線、または Z_1 , Z_2 の中の 1 つが短絡しても監視機能は保持される。また Z_1 , Z_2 , Q_3 , Q_4 の断はフェイルセーフとなる。ただ $D_1 \sim D_4$ の短絡事故は差動増幅器の機能を変じ好ましくないので、ダイオードを 2 個直列に用いた。しかし同時に 2 個の素子に障害が生じた場合、たとえば D_2 , D_3 あるいは D_1 , D_4 が同時断、または Z_1 , Z_2 同時短絡の場合は監視機能を失う。これを防ぐには、信頼度の高い素子を用いるのはもちろんであるが、異常値を周期的に入力に印加し監視回路の機能チェックをする必要がある。

次に出力制御であるが、パラメトロン出力は小さい (1.6 Vp-p) ので増幅する必要がある。これも Fig. 11 に示すように二重とし、Fig. 8 の出力端子 T_1 , T_2

Fig. 11 Output control circuit whose terminals T_1 , T_2 and T_4 are connected to T_1 and T_2 of Fig. 8 and T_1 of Fig. 9 respectively

をそれぞれ Fig. 11 の入力端子 T_1 , T_2 に接続する。正常時 T_2 入力に 0 相電圧であるから、定数 0 相電圧に加算され、amp. 2 および電磁継電器 R_2 は作動状態にある。このとき Fig. 8 の T_1 すなわち Fig. 11 の T_1 が 0 相電圧 (非制御) ならば、定数 π 相電圧と打消しあってなにとも起きないが、 T_1 が π 相電圧 (制御) となると入力電圧は倍加し、amp. 1 および電磁継電器 R_1 が作動し、端子 T_3 から被制御機器に地気を送出する。異常のさいは端子 T_1 に 0 相電圧、端子 T_2 に π 相電圧が現われ、定数とそれぞれ打消し、 R_1 は無作動、 R_2 は復帰し、端子 T_3 から地気を送出することはない。また amp. 1, 2 は正規の半分の入力 (入力巻線片側断を仮定) 電圧では作動しない。すなわち、出力制御もフェイルセーフ構造となっている。

6. 総合特性⁷⁾

本素子の機能をチェックする意味で、Fig. 12 のブ

Fig. 12 Block diagram of test equipment using thin film fail safe elements

ロックダイアグラムに示す装置を試作した。小駅用列車運行ダイヤ発生機能をも有し、一種の標準器として使用するもので、誤った情報を送出しないよう、また大形実用機への基礎データ集積の意味も含め、回路はフェイルセーフ構成とした。論理動作は 3. に述べた素子を用い、最終出力は電磁継電器接点とする。

Fig. 12 に対しじゃっかんの説明を加えるならば、0 系、1 系カウンタは本装置の基本クロックを生ずる部分であり、一致検出回路とともに Fig. 8 にそのひな型を示している。異常検出回路は Fig. 9 に示す定数監視装置で定数レベルを監視するとともに、定数断、論理不一致を検出、表示回路にその状況を示す。一致検出回路よりの出力は表示回路の正常ランプを点灯するとともに、タイミングカウンタおよびパターンカウンタで通降し、各出力から signal lever 制御パターンを送出、これにしたがい、track 情報を列車運行ダ

Fig. 13 Overall I_d margin characteristic curves of the equipment for commercial line level, when $I_{df}=0.2$ Arms and $f_m=50$ kHz

Fig. 14 Overall I_d margin characteristic curves of the equipment for clock frequency f_m , when $I_{df}=0.2$ Arms

イヤに合わせ送出する。使用素子 325 個、電磁継電器 28 個が主部品である。

さて装置総合特性は、商用電源、クロック周波数および周囲温度の変化に対し、装置が正常動作を失うまでの I_d マージンを測定した。Fig. 13 はクロック周波数 50 kHz、励振電流 0.2 Arms における、商用電源変動に対する I_d マージン特性で、規格 105 ± 15 V を十分満足している。Fig. 14 は励振電流 0.2 Arms を固定し、クロック周波数を変化した場合の I_d マージン特性で、条件さえ良ければ 80 kHz まで使用可能であることがわかる。Fig. 15 に励振電流 0.2 Arms、ク

Fig. 15 Overall I_d margin characteristic curves of the equipment for temperature, where $I_{df}=0.2$ Arms, and $f_m=50$ kHz

ロック周波数 50 kHz における、温度に対する I_d マージン変化を示している。規格 $20 \pm 30^\circ\text{C}$ は十分に満足している。

以上装置としての総合特性について述べたが、種々の周囲変化を考慮すれば、励振電流 0.2 Arms 前後、クロック周波数 50 kHz が安定した設定といえよう。

7. む す び

薄膜磁性線の応用として、小形、高速、安定、安価を目標とするフェイルセーフ素子を開発、これを用いて一連の機能を有する試作機を製作、各種試験を試みた結果、安定性は十分であり、小形、安価の点もほぼ満足しうることがわかった。ただ高速性はいまだ不十分で、今後の課題である。さらにもう 1 つの特長を付加するならば、フェイルセーフ素子としては、一種のパラメトロンを用意すれば良く、任意の論理回路はプリント配線で別に作製できることであろう。最後に大形実用機では、本文に現れた不都合な場合、たとえば 4. のフェイルセーフではあるが警報が出ない場合、または 5. の監視機能の停止などを検知するため、テストプログラムによる装置の定期的機能チェックを併用しなければならないが、本稿の範囲外であるので省いた。

本試作は鉄道技術研究所信号研究室の依頼により行なったもので、御指導いただいた奥村、渡辺両氏に深い感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 土屋：フェイルセーフ論理方式の研究，電気試験所研究報告第 695 号
- 2) 渡辺ほか：パラメトロンによる準フェイルセーフ理論系，信学会電計研資，p. 12/15 (1966)
- 3) 奥村ほか：パラメトロンを用いた鉄道信号用連動装置，信学会電計研資，EC 67-5
- 4) 伊藤ほか：薄膜磁性線の研究とその実用化報告，信学会電回材研資，CPM 69-35
- 5) 伊藤ほか：一軸異方性を有する磁性薄膜の非線形性に関する考察，信学会非線形研資，NLP 70-03
- 6) 伊藤ほか：薄膜パラメトロンを用いたフェイルセーフ素子，44 年秋信学会全国大会 253
- 7) 伊藤ほか：ワイヤパラメトロン・フェイルセーフ素子を用いた試作機について，44 年電気関係東北支連大 3C-8