

デジタル式自動列車制御装置 (ATC)

Automatic Train Control by Digital Device

小 西 務*
Tsutomu Konishi

要 旨

自動列車制御装置(ATC)は車速がその閉そく区間で定められた最大速度以上にある間ブレーキ信号を出す。高密度輸送の高速車両(250 km/h)になると特に速度検出精度の高いことが要求される。そのためデジタル方式が用いられるが、ここでは精度、安全性、構成の点ですぐれた2計数器式について、動作原理を明らかにし、速度検出精度、特性などの理論的検討を行なっている。制御装置を試作し、実験した結果、装置は所望の動作を示し、総合誤差は0.235%で許容値0.25%以内である。

1. 緒 言

最近、鉄道の輸送量が急激に増大しつつあるが、これに対処するため列車の高速化、列車間隔の短縮などにより輸送密度の増大が図られている⁽¹⁾。自動列車制御(以下ATCと略称する)は、車速がその閉そく区間で定められた最大速度以上にある間ブレーキ信号を出すもので、高速運転における一種の保安装置である。一般車両では簡単なアナログ式で十分であるが、速度が250 km/h程度の高速車両では安全性をそこなわずにできるだけ高速運転を可能にするため特に高い検出精度が要求される。

デジタル技術を用いて車速を検出する場合、いろいろの検出方法が考えられる^{(2)~(4)}。そのうち、検出精度、応答、安全性、装置の複雑さなどから検討し2個の計数器を用いる方法を採用している。ここに、この方法について構成、動作原理、速度検出精度および特性の理論的検討、試作制御装置の実験結果などについて取りまとめ報告する。

2. 速度検出方式

列車速度を検出する場合、実際には閉そく区間の許容最大速度、すなわち検出速度(これを以下照査速度という)が数種類程度あること、また摩耗による車輪径変化に対する補正などを考慮しなければならない。しかしながら、本章ではこれらを考慮せずに、単に一般的な立場から列車速度の検出方式について比較、検討する。

車速検出方式はアナログ式とデジタル式に大別できる。アナログ式は精度が±2~3%程度であるが、応答がよく、制御素子のフェール・セーフが容易で、装置の構成が簡単であるため一般車両に広く用いられる。デジタル式は特に高精度(±0.2~0.3%)が要求される場合に有利で、構成は複雑になるが高速車両に用いられる。

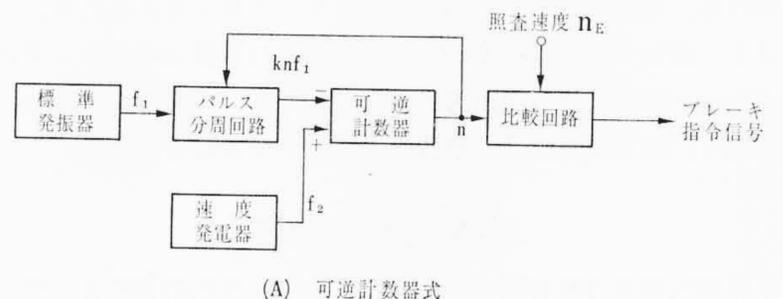
2.1 可逆計数器式と2計数器式の構成および動作原理

デジタル式速度検出方法にはいろいろあるが、ここでは可逆計数器式と2計数器式の代表例について比較、検討する。

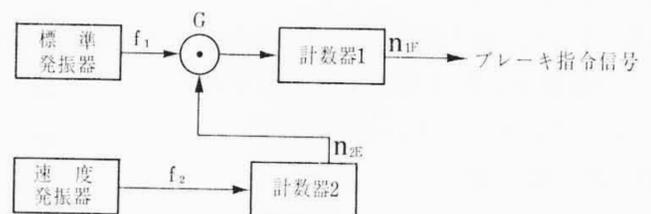
可逆計数器式および2計数器式の速度検出回路の構成例を図1(A)および(B)に示す。この例により、両者の動作原理を説明する。まず、可逆計数器式では標準発振器の周波数 f_1 をパルス分周回路により可逆計数器の単位時間当たりの計数量 n に比例した周波数 $k n f_1$ に分周し、可逆計数器の減数パルスとする。他方、速度発電機により発生する列車速度 V に比例したパルスを可逆計数器の加数パルスとする。可逆計数器はこれら二つの入力パルスの代数和を計数量(n)として出力に生ずる。したがって、 n は次式のように表わされる。

$$n = f_2 / (k f_1 + 1) \dots \dots \dots (1)$$

* 日立製作所日立研究所 工学博士



(A) 可逆計数器式



(B) 2計数器式

図1 計数器による速度検出方式

ここに、 $f_2 = k' V$

k, k' : 比例係数

上式からわかるように、可逆計数器の出力 n は列車速度 V に比例した量となっている。これを、照査速度に対応した量 n_E と比較回路で比較し、

$$n \geq n_E \dots \dots \dots (2)$$

のとき、ブレーキ指令を出す。

次に、2計数器式の動作原理について説明する。速度発電機のパルスを計数器2で計数し、その計数量が照査速度により決まるある値 n_{2E} になるまでゲートGを開く、この間、周波数 f_1 の標準発振器のパルスを計数器1で計数する。その計数量 n_1 は次式のようなになる。

$$n_1 = f_1 n_{2E} / f_2 \dots \dots \dots (3)$$

この場合、照査速度において計数器1の計数量が n_{1F} になるように n_{2E} が定められているので、計数器1の計数量 n_1 が

$$n_1 \leq n_{1F} \dots \dots \dots (4)$$

のとき、ブレーキ指令を出す。

2.2 性能の比較

前述の動作原理より明らかなように、可逆計数器式および2計数器式の性能を比較すると表1のようなになる。精度については前者が速度発電機のパルス数により限界ができるので器具的な問題を持ち、後者は加速度の大きさにより限界がある。しかしながら、1 km/h/s程度の加速度では後者がすぐれている。応答に関してはサンプリング方式の後者に対し、サンプリングしない前者が原理上すぐれている。

表1 可逆計数器式と2計数器式の比較

項目	可逆計数器式	2計数器式
精 度	速度発電機周波数で限界 約0.2%程度	サンプリング周期により限界 約0.1%程度
応 答	計数器の平衡時間により決まる 約0.4秒	ほぼサンプリング周期で決まる 約0.3秒
安 全 性	フェイル・セーフ困難	比較的フェイル・セーフがとれる
構 成	複 雑	比較的簡単

るが、実際には可逆計数器の平衡時間が比較的大きい。したがって、両者の応答速度はほぼ同程度である。安全性に関しては両者とも多重度をもたせる必要があるが、部分的にフェール・セーフがとれる後者が一段とすぐれている。なお、装置の複雑さからみればパルス分周回路、可逆計数器をもつ前者のほうが不利と考えられる。

以上、総合すると、精度、安全性、装置の複雑さの点から2計数器式のほうが列車速度検出方式としてすぐれていると思われる。したがって、次章からは2計数器方式について検討を進める。

3. 車 速 検 出 精 度

車速検出精度は最大照査速度に対する速度検出誤差により決定される。速度検出誤差は量子化に基づく静的誤差と、サンプリングによる加速時の検出遅れに基づく動的誤差とからなる。

3.1 静 的 誤 差

静的誤差 ΔV_s は、最大照査速度 V_E における量子化数、すなわち計数器1の計数量 n_{1F} により決まる。すなわち

$$\Delta V_s = V_E / n_{1F}, \quad (V_E = \text{照査速度}) \quad (5)$$

3.2 動 的 誤 差

動的誤差を算出するためのグラフを図2に示す。同図には静的誤差 ΔV_s と動的誤差 ΔV_d の関係を明示しているが、本節では動的誤差のみに着目して考察する。

いま、照査速度 V_E の近傍を一定加速度 α で列車が加速する場合について考える。ここで考えている時間は2サンプリング程度の短時間であるので、この加速度一定の仮定は相当の一般性をもつとみてさしつかえない。動的誤差 ΔV_d はこの加速度のため、サンプリングして速度を計測し終わった時点に生じている。サンプリング時間 T_s は次式のようになる。

$$T_s = T_p + P_c \quad (6)$$

$$= n_{1F} / f_1 \quad (7)$$

ここに、 T_p : 計数準備時間

T_c : 計数時間

このサンプリング時間 T_s は動作原理上明らかなように列車速度(サンプリング時間中の平均速度)の関数になっている。普通、一般的に考えると車速が照査速度に達して $T_s/2$ 後の速度誤差が動的誤差を与えるように思えるが、厳格に最悪状態を考えるとそのとおりではない。すなわち、照査速度 V_E に静的誤差 ΔV_s を加えた速度 V'_E は、

$$V'_E = V_E + \Delta V_s \quad (8)$$

において、計数時間 $T''_c/2$ 後に速度検出した場合、1量子化量(1カウント)不足のためもう1サンプル時間費やす必要が生ずるときが最悪状態となる。このとき、1サンプル時間としては速度 V'_E のサンプル時間 T'_s を費やす必要はなく、速度上昇のため図上に示すように T''_s でよい。 T''_s は図上で示す斜線部分の面積が等しくなるように定まるので、結局グラフを参照にして1量子化誤差の範囲で次式が成立する。

$$T'_s V'_E = (V'_E + \Delta V_1 + \Delta V_2 / 2) T''_s \quad (9)$$

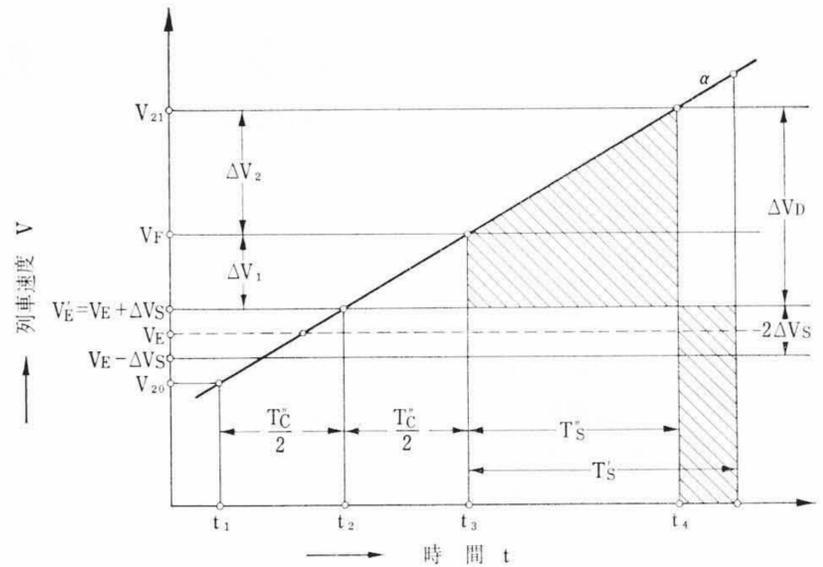


図2 誤差を検討するための速度特性

(9)式に

$$\Delta V_1 = \alpha T''_c / 2 \quad (10)$$

$$\Delta V_2 = \alpha T''_s \quad (11)$$

を代入し、 T''_s について解くと次式を得る。

$$T''_s = (\sqrt{1 + 2\alpha T'_s V'_E / V_F^2} - 1) V_F / \alpha \quad (12)$$

ここに、 $V_F = V'_E + \Delta V_1$

ゆえに、動的誤差 ΔV_d は次式のようになる。

$$\Delta V_d = \Delta V_1 + \Delta V_2 \quad (13)$$

$$= \alpha T''_c / 2 + (\sqrt{1 + 2\alpha T'_s V'_E / V_F^2} - 1) V_F \quad (14)$$

3.3 総 合 誤 差

総合誤差 ΔV は、静的誤差 ΔV_s と動的誤差 ΔV_d の和として与えられる。

$$\Delta V = \Delta V_s + \Delta V_d \quad (15)$$

$$= V_E / n_{1F} + \alpha T_s (T''_c / 2 T_s + T''_s / T_s) \quad (16)$$

ここに、 V_E : 照査速度

n_{1F} : V_E における計数器1の計数量

α : 加 速 度

T_s : V_E におけるサンプリング時間

T''_c : $V_E + \Delta V_s + \Delta V_1$ における計数時間 ($\leq T_s$)

T''_s : $V_E + \Delta V_s + \Delta V_1$ におけるサンプリング時間 ($\leq T_s$)

ΔV_s : 静 的 誤 差

ΔV_1 : $T''_c/2$ による動的誤差

上式からわかるように、車速検出精度は単に量子化数 n_{1F} だけによって定まるのではなく、加速度 α およびそれに基づくサンプリング遅れ T''_c, T''_s を考慮しなければならない。

4. 各計数器の特性

4.1 計数器1の特性

許容される速度検出誤差に対して、計数器1の計数量および標準発振器の発振周波数の間には適当な関係のあることは以下の解析により明らかとなる。

速度検出誤差 ΔV が次式のように表わされることは前章の結論である。

$$\Delta V = V_E / n_{1F} + \alpha T_s (T''_c / 2 T_s + T''_s / T_s) \quad (16)$$

上式に、

$$n_{1F} = f_1 n_{2E} / f_{2E} \quad (17)$$

$$T_s = n_{1F} / f_1 \quad (7)$$

を代入し、 f_1 について解くと次式を得る。

$$f_1 = \frac{(T''_c / 2 T_s + T''_s / T_s) \alpha n_{1F}^2 / V_E}{\Delta V n_{1F} / V_E - 1} \quad (18)$$

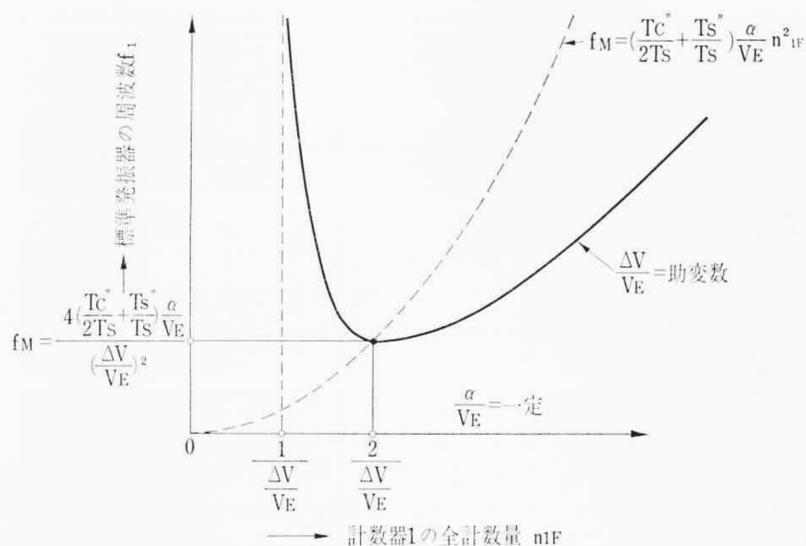
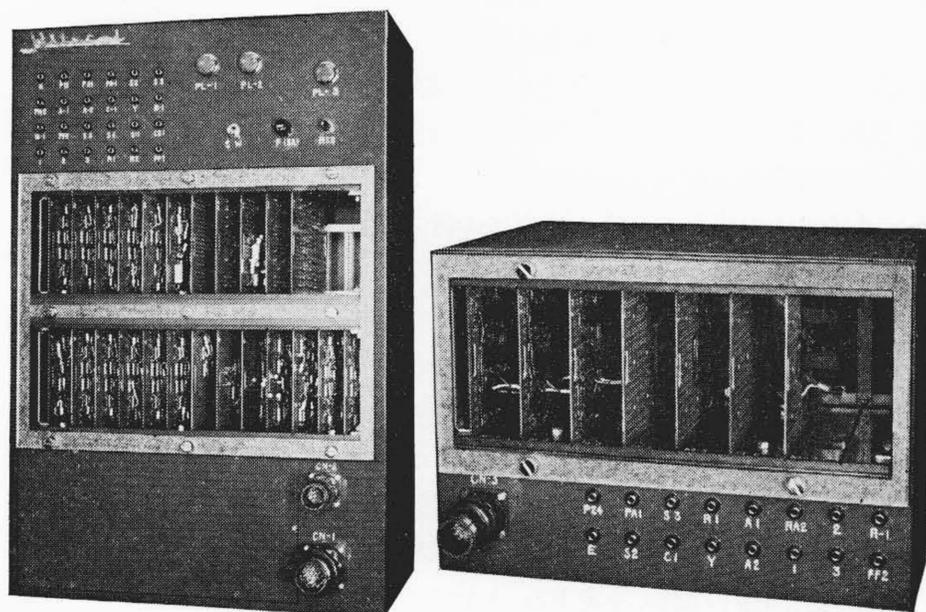


図3 計数量と周波数の関係



(A) デジタル式自動列車制御装置 (B) 薄膜回路部分

図5 試作制御装置

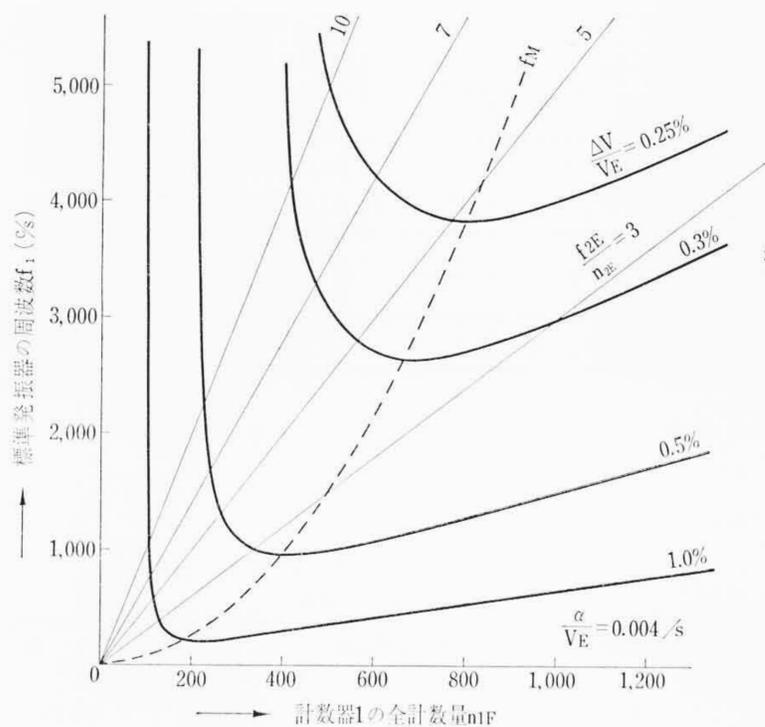


図4 $n_{1F}-f_1$ のグラフ

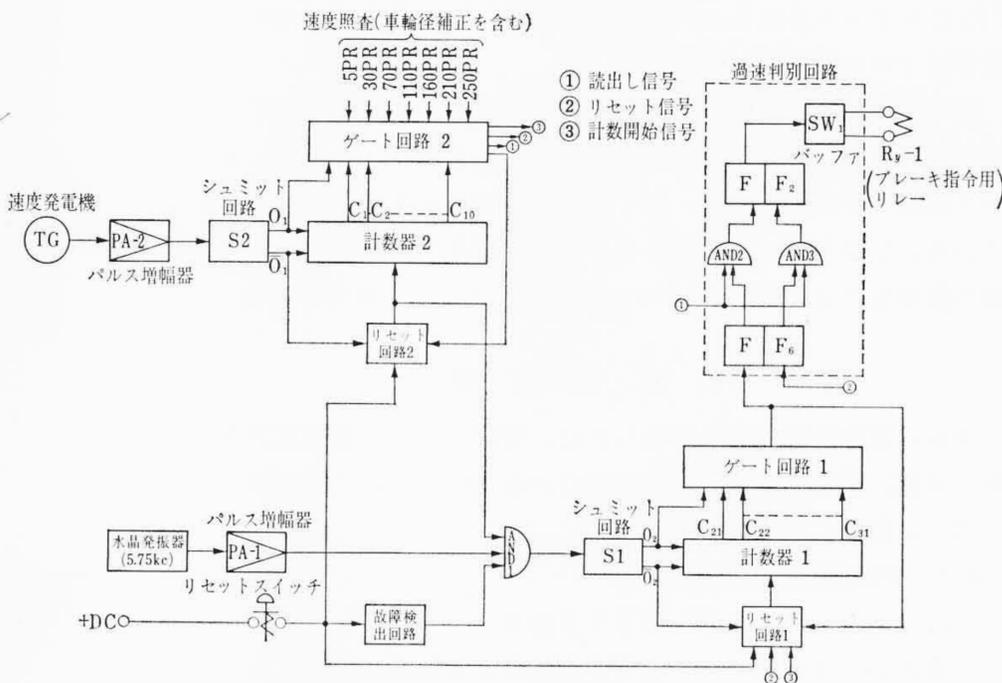


図6 試作制御装置の構成図

上式において、加速度 α が定まると、相対誤差 $\Delta V/V_E$ を助変数とし、周波数 f_1 は計数量 n_{1F} の関係となる。このような観点から、上式をグラフに表わすと図3のようになる。

同図に示してあるように、助変数 $\Delta V/V_E$ により定まる曲線は $n_{1F} = 2/(\Delta V/V_E)$ (19) において極小値 f_M をもつ。

$$f_M = \frac{4(T''_c/2T_s + T''_s/T_s) \alpha / V_E}{(\Delta V/V_E)^2} \dots\dots\dots (20)$$

なお、曲線のため分枝は漸近線

$$n_{1F} = 1/(\Delta V/V_E) \dots\dots\dots (21)$$

をもつ。

以上のような特性のほかに、計数器1は次のような特性をもつ。

(16)式からわかるように、総合誤差 ΔV は一般的には加速度 α に比例するが、もし前述の最適条件、すなわち、

$$f_M = (T''_c/2T_s + T''_s/T_s) \alpha n_{1F}^2 / V_E \dots\dots\dots (22)$$

が満足されていると、総合誤差 ΔV は次式のようになる。

$$\Delta V = 2V_E/n_{1F} \dots\dots\dots (23)$$

上式から明らかなように、(22)式が満足されていると総合誤差 ΔV は加速度 α に無関係になる。

4.2 計数器2の特性

経済性を主眼にして計数器1の計数容量 n_{1F} を小さくして同一の速度検出誤差 $\Delta V/V_E$ を得るには標準発振器の周波数 f_1 を大きく選

定すればよいことは前述の検討結果から明らかである。ただし、この場合、加速度 α が速度検出誤差 $\Delta V/V_E$ に影響する。このように、 $n_{1F} \rightarrow$ 小、 $f_1 \rightarrow$ 大とすると(7)式よりサンプリング時間 T_s が小となり、一定の照査速度における速度発電機の周波数 f_{2E} に対して計数器2の計数量 n_{2E} が大となる。この場合、照査速度に対する計数器2の設定精度 V_E/n_{2E} が与えられると、 n_{2E} に上限が存在する。

速度発電機から得られるパルスの周波数 f_{2E} は機械的構造より決まってしまうので、設定精度 V_E/n_{2E} から n_{2E} の上限が定まり、 f_{2E}/n_{2E} が定数として与えられる。したがって、このような観点から f_1 と n_{1F} との間には次式を満たす必要がある。

$$f_1 \leq f_{2E} n_{1F} / n_{2E} \dots\dots\dots (24)$$

上式を $n_{1F}-f_1$ 曲線上に描いておくと、計数器1の特性との関係が明らかとなり都合がよい。

4.3 特性例

例として、最大照査速度 $V_E = 250$ km/h、加速度 $\alpha = 1$ km/h/s とした場合、総合相対誤差 $\Delta V/V_E = 0.25, 0.3, 0.5, 1.0\%$ を助変数とし、計数器1の容量 n_{1F} と標準発振器の周波数 f_1 との関係の計算結果をグラフで表わすと図4のようになる。なお、同図上には $f_{2E}/n_{2E} = 3, 5, 7, 10$ のグラフも示してある。

5. 試作制御装置

制御装置の写真を図5に、またその構成の概要を図6に示す。図

6において、計数器1および計数器2は原理図〔図1(B)〕と対応している。ゲート回路2は照査速度に応じて計数器2の最大計数量を定めるために構成される。なお、計数器の計数開始後の出力を① 読出し信号、② リセット信号、③ 計数開始信号に使用している。この計数器とゲート回路により、サンプリング時間、計数時間が定まる。この場合、各照査速度におけるサンプリング時間が一定となるように回路が構成されている。

以上の回路により、照査速度に対してゲート時間が定まるので、水晶発振器から得られる標準周波数のパルス列をAND要素AND1を通して計数器1に計数する。照査速度における計数器1の計数量はゲート回路1により定まっている。したがって、列車速度が照査速度以下であれば、AND1は規定時間以上開いているので、計数器1の計数量は規定値に達し、ゲート回路1より出力を生ずる。

過速判別回路の記憶要素FF₆はすでに信号②によりリセットされているので、ゲート回路1の出力信号が生ずるとセットされる。それにより、AND3のゲートが開、AND2のゲートが閉となるので、次のサンプリング周期の最初に発生する信号①により記憶要素FF₂はリセットされる。FF₂の否定信号ONによりブレーキゆるめ信号がリレーR_{y-1}より出る。

列車速度が照査速度以上になるとサンプリング周期は規定時間以下になるので、計数器1は規定計数量に達しない。したがって、ゲート回路1の出力がなく、FF₆は信号②でセットされたままとなっている。したがって、AND2のゲートが開き、次のサンプリング周期の信号①によりFF₂がリセットされ、ブレーキ信号が出る。

6. 実験結果

実験は試作装置により行なわれた。実験の目的は制御装置各部の動作確認、薄膜回路部分の動作確認および性能、特に静的誤差、動的誤差の測定にある。

6.1 制御装置各部の動作

(1) 車速が照査速度を上下する場合

車速が照査速度に対し上下する場合を等価的に試験するため、速度発電機側の周波数を5c/s一定とし、標準発振器側の発振器周波数を120c/s→150c/s→120c/sに変化した場合の回路各部の信号およびブレーキ指令信号を測定した。ただし、照査速度信号は30PRを選んだ状態である。この結果を図7に示す。各信号は所望の動作をしていることがわかる。

次に、薄膜回路部分の動作試験を行なったが正常な動作を示した。

6.2 静的誤差

測定精度を上げるため、発振器周波数を8倍とし、その出力に3ビットの2進計数器を接続し、速度発電機信号として用い実験した。各照査速度について、ブレーキ信号が出る発振器の周波数をデジタル・カウンタで計数した。その周波数の1/8の値と理論値の比較を表2(A)に示す。この結果、誤差の最大値は0.15c/sで約0.009%に相当し、ほとんど問題とならない。

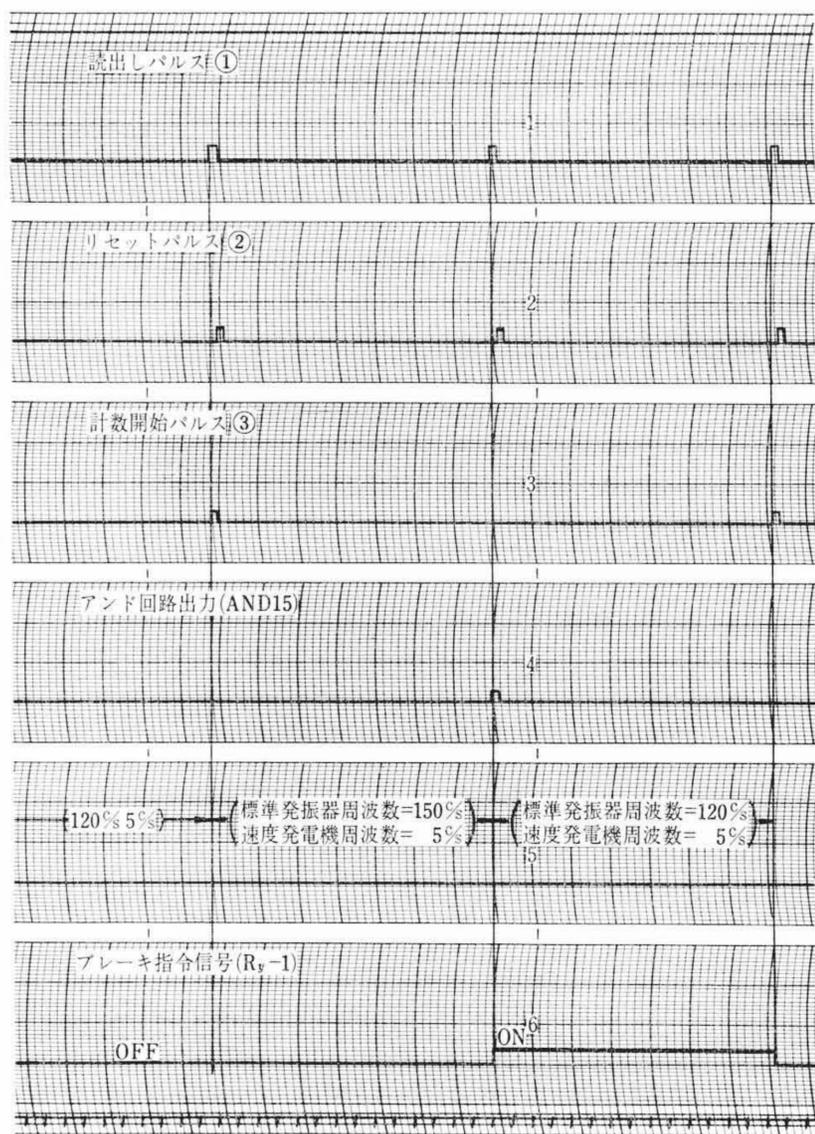


図7 照査速度近傍で車速が上下する場合

表2 誤差の測定結果表

(A) 静的誤差の測定結果

照査速度 (km/h)	発振器周波数 (c/s)	1/8×(発振器周波数) (c/s)	理論値 (c/s)	誤差 (c/s)
250	132,791	1,659.87	1,660.04	-0.15
210	112,262	1,403.28	1,403.42	-0.14
160	86,859	1,085.74	1,085.84	-0.10
110	61,200	765.00	765.06	-0.06
70	40,670	508.38	508.44	-0.06
30	20,143	251.79	251.81	-0.02
5	7,313	91.41	91.42	-0.01

(B) 動的誤差の測定結果

照査速度 (km/h)	測定時間 (t ₄ -t ₁) (s)	実測値 (ΔVD) (km/h)	動的誤差理論値 (km/h)
250	0.62610	0.47032	0.46975
210	0.62657	0.47079	0.47017
160	0.62752	0.47174	0.47102
110	0.62907	0.47329	0.47256
70	0.63191	0.47613	0.47521
30	0.64050	0.48472	0.48332
5	0.67000	0.56422	0.51109

(注) 加速度 α=1 km/h/s

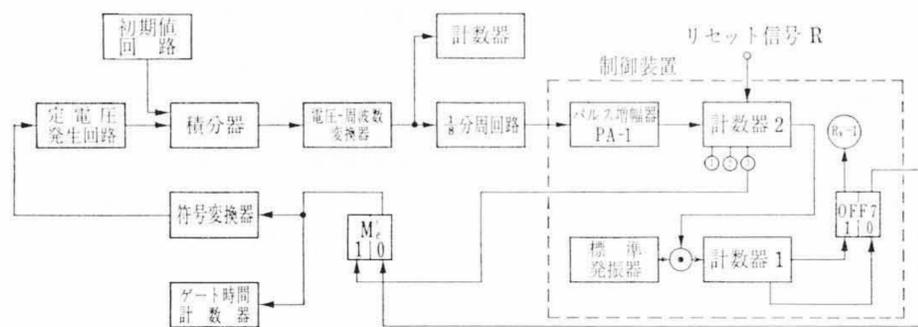


図8 動的誤差の測定回路

6.3 動的誤差

動的誤差の測定には特殊な回路を立案して用いたので、測定回路および測定結果について述べる。

6.3.1 測定原理

測定回路の構成を図8に示す。動的誤差を測定するには図2におけるΔV_Dあるいはt₄-t₂がわかればよい。しかしながら、実際には時刻t₂の状態から測定開始することは困難であるので、測定開始は時刻t₁より始める。ゆえに、ブレーキ信号が出る時刻t₄までの時間、あるいはその時刻の速度V₂₁を測定することにより、動的誤差ΔV_Dがわかる。すなわち、図2を参照して、

ΔV_D = V₂₁ - V₂₀ - ΔV₁ (25)

加速度は電圧-周波数変換器の入力を時間に対し変化することにより与えられる。この電圧は定電圧発生回路の一定電圧を入力にもつ高性能積分器で発生させる。

リセット信号Rを印加したのち、計数回路2より計数開始信号③が出ると記憶回路M_eがセットされる。ほぼ2サンプリング時間後、ブレーキ信号が記憶要素FF₇より出てM_eはリセットされる。このM_eのセット期間をゲート時間計数器で正確に測定する。これで、t₄-t₁が測定されたことになる。

6.3.2 実験結果

各照査速度における測定値(t₄-t₁)および動的誤差ΔV_Dを表2

(B)に示す。この結果、動的誤差の最大値は約0.564 km/h (0.226%)である。ゆえに、総合誤差は約0.235%となり、許容最大誤差0.25% (0.625 km/h) に対して小さい。

7. 結 言

精密な速度照査を行なうにはデジタル的に列車速度を検出する必要があるが、それには可逆計数器式よりも2計数器式のほうが精度、安定性、装置の複雑さの点で有利で、応答速度も実用上問題のないことが明らかになった。次に、2計数器式の車速検出精度および特性を理論的に明らかにした。最後に試作装置により実験し、制御装置全体の動作および薄膜回路部分の動作が正常であることを確認した。静的誤差を測定するとともに、特殊な測定回路を用いて動的誤差を測定した。その結果、車速250 km/hに対する総合誤差は0.235%で、許容最大誤差0.25%に対して余裕がある。また、サンプリング周期は0.312秒である。

以上の結果から、本制御装置は所望の性能を有することが明らかとなり、250 km/h程度的高速車両に使用できる見通しが得られた。

参 考 文 献

- (1) たとえば、刈谷ほか：日立評論 46, 875 (昭39-5)
(2) たとえば、小西：日立評論 45, 1869 (昭38-11)
(3) 小西：電学誌 84, 615 (昭39-4)
(4) 稲垣：エレクトロニクス 7, 744 (昭37-7)

Vol. 28

日立造船技報

No. 2

目 次

- 自由ピストン・ガスタービンの計画・設計法
液中過渡アーク放電による極性消耗とその応用
アルミニウム青銅鋳物の添加元素の耐摩耗性に及ぼす影響
Dewight Lloyd型焼結機における二層操業
流動乾燥装置の熱容量係数について
Ω形ベローズの強さ
船体縦揺れ軽減法
クリーガー形状ゲートの水圧分布

.....本誌に関する照会は下記に願います.....

日立造船株式会社技術研究所
大阪市此花区桜島北之町 60

第29巻

日 立

第10号

目 次

- 随筆 「虫どもとのつき合い」.....尾崎一雄
国づくりにむかって
原子力発電<第3回>「発電所と原子燃料」
“明日の教育”は始まっている「実用化へ進むティーチングマシン」
ファッションショーから電子顕微鏡まで「用途ひろげるITV」
琵琶湖の楽園
ねぶた祭
未知に挑む「原子炉の耐震設計」
カラスポット「小粒ながら」
ハイライト「超大形熱処理炉完成」
話のロビー「コンピュータの裏方さん」
HITACHI SCIENCE FICTION 一装置110番一
サンエンス・ジョッキー

発行所 日立評論社 東京都千代田区丸の内1丁目4番地
振替口座東京71824番
取次店 株式会社オーム社書店 東京都千代田区神田錦町3丁目1番地
振替口座東京20018番