

自動送錘式計量装置

The Weighing Mechanism with Automatic Slide Poise

瀬川 嘉一*

Kaichi Segawa

百瀬 惇*

Atsushi Momose

唐津 建春*

Takeharu Karatsu

Synopsis:

The report introduces the weighing mechanism with unique control system developed to gain high accuracy and rapid responsiveness of the scale.

The balance system is of automatic slide poise system, in which the poise is slid along the ball screw attached to balance lever with the control system. The control system is composed of differential transformer, current-frequency converter, pulse-motor, synchro-servo system, etc., and a load, on the lever is balanced with the weight attached to the balanced lever. Because of the electronic reversible counter used for detection of the value of a load, it is able to transmit digital signal of the value. The development of the mechanism has enabled us to produce accurate scale (accuracy: $1/3000 \sim 1/10000$).

1. 緒 言

各産業とも、生産規模が大きくなるにつれて、そこで用いられる工業用はかりも大型化されるばかりでなく、精度の向上、計量時間の短縮や省力化への要望が強くなってきた。

一般にはかりは、(1)被測定物を乗せる堅固な積載部、(2)荷重を集合し、縮分するレバー機構、(3)縮分された荷重と平衡し、その値を表示する計量装置の3部分より構成されるが、中でも計量装置は、最も精密さを要し、はかりの精度、計量時間など、はかりの性能を決定する重要な部分である。

現在、高精度の計量装置としては、桿(さお)

式と振子式とがあるが、前者は錘りの移動距離に応じて縮分荷重と平衡をとる方法で、古くから一般に使われているものである。後者は振子状になった錘りの回転角度により、縮分荷重との平衡をとる方法である。桿式は機構が簡単で製作も容易ではあるが、手動操作を必要とし、計量時間が長く、また目盛の読取りを自動化することが困難なので、最近では振子式のものが工業用自動はかりとして多く用いられている。しかし、振子式はその原理と構造上、期待できる精度が低く(1/3,000程度のもので、つくられている)、これでは前記の諸要望にこたえることが出来ない。そこで桿式の精度上の利点に注目し、これを自動化する努力を続けた結果、自動送錘式とよばれる計量装置を開発するにいたった。

* 計量器工場開発設計室掛長

当社、計量器工場では早くから、省力化と秤量作業の不正防止の立場から、この方式の研究を重ね、すでに所期の目的は達成したが、さらに高精度を期して、第1次目標として精度 $1/7,000$ 計量時間 15sec 以下、最終目標として精度 $1/10,000$ 計量時間 10 sec 以下として、AUE-540 型自動送銚式計量装置の開発を行ない、製品化することに成功した。

一般に精度と計量時間は相反関係にあり、この間の調和をいかにうまくとるかということに、成否がかかっているが、このために斬新な機構や、独自の制御方式を取入れたので、これらを中心にして、この計量装置を紹介する。

2. 装置の概要

装置は大別して、計量ボックス、操作盤、制御盤、付属装置で構成される。

計量ボックスには平衡レバー、差動トランス、シンクロサーボ系、パルスモータ、上位2桁発信装置、零調装置が収容されている。

操作盤には、計量操作、印字内容設定、零調操作部などの他に計量回数計、計量値表示管が組込まれている。

制御盤には整流器、V/I 変換器、I/F 変換器、高低速切替回路、下位2桁パルスカウンタなどの

プリント配線部、パルスモータ駆動回路、計量動作のシーケンス回路、計量値表示、印字用のリレー回路、装置の電源部などが取付けられている。図1に AUE-540 型計量装置ブロック図を示す。

以下に装置の主要仕様を記す。

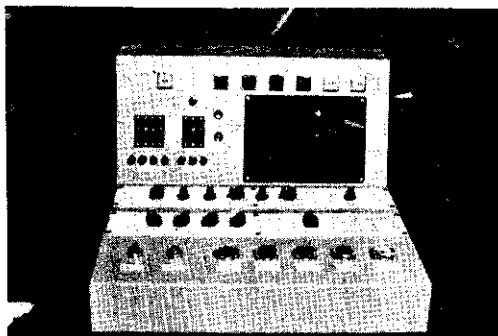


写真2 操作盤

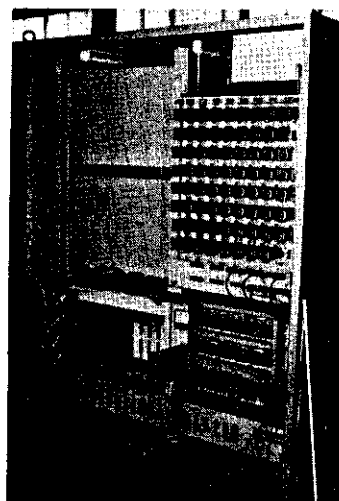


写真3 制御盤内部

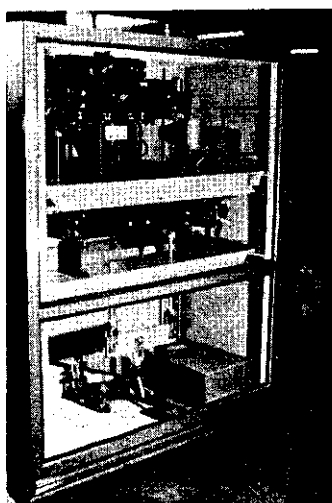


写真1 AUE-540 計量装置

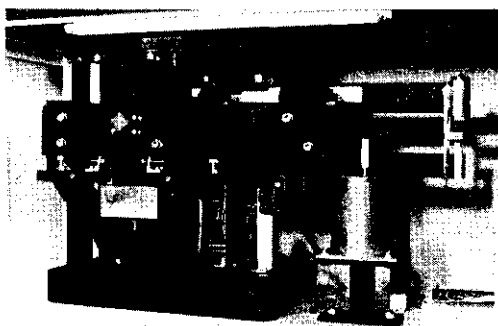


写真4 平衡レバー

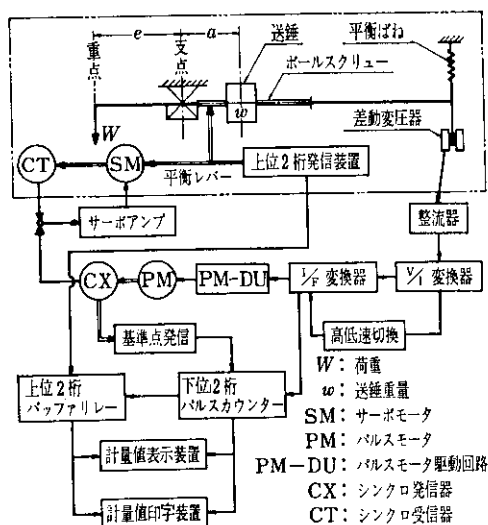


図 1 AUE-540 型計量装置ブロック図

装置の主要仕様

型 式 AUE-540 型

精 度 $1/5,000 \sim 1/10,000$

表示裝置 光電管表示器

付属装置 外部表示器

印字裝置

自動零調裝置

計量時間 精度 1/10,000 で max 15 sec

3. 動作の概要

はかりの積載部に被計量物を乗せると、その重量は縮分されて W となり、図 1 の上部にある平衡レバーの重点にかかり、交差板ばね支点までの距離を e とすると、 We なるモーメントを生ずる。

これに対し、送錘 w と支点までの距離 a により wa なるモーメントが逆方向に働き、 $We-wa$ なる偏差が生じ、平衡レバーはその差の方向に支点を中心に回転して傾く。この傾きが 0 のときは $We=wa$ であり e, w は一定であるから、 W は a で表わされる。

平衡レバーには、その先端に偏差を検出する差動変圧器(DT)の鉄心が取付けてあり、 $We \neq wa$ すなわち不平衡のときは、その量が極微であって

も、電圧が発生するので、この電圧が 0、すなわち $W_a = w_a$ となるように、送錘の移動を自動制御し、かつ a を自動的に読むようにすれば自動送錘式の計量装置となる。

DTの出力を、整流器(ADT)、V/I(電圧—電流)変換器、I/F(電流—周波数)変換器により、交流電圧→直流電圧→直流電流→周波数へと、その大きさを対応させながら信号変換を行ない、そしてパルスモータのドライブユニット(PM-DU)に入れると、パルスモータは偏差の方向に従って回転する。

平衡点付近では、DT 出力も小さく、したがってパルス数も少ないので、パルスモータは低速度で回転し、偏差が多いとパルスモータは高速回転をする。

パルスモータにはシンクロ発信器 (CX) が取付けてあり、送錘を移動させるために設けたボールスクリュウの一端に、歯車で取付けたシンクロ受信器 (CT) と対をなしている。CX-CT間に位相差を生ずるとサーボモータが働き、ボールスクリュウを回転して、それを補正するようにしてある。すなわちシンクロ追尾によるサーボ機構を形成している。したがって $We \neq wa$ で不平衡を生ずると、その量に応じた速度でパルスモータが回転し、シンクロサーボ機構によりボールスクリュウが回転し、送錘を $We = wa$ になる方向に移動させ、次第に偏差を減らしてパルスモータの回転をおとし、 $We = wa$ にいたり、パルスモータを停止するようになっている。平衡点に近づくまえに、パルスモータの速度をおとすのは、送錘の慣性による行き過ぎによって生ずるハンチング現象を防止するためであり、またこの機械系自体の慣性による行き過ぎを防ぐために平衡スプリング、オイルダンパなどの機構を備えてある。

平衡状態の判定は、I-F 変換器からの出力パルスのパルス間隔が、一定時間以上になることによって行なうが、こうすることにより不平衡部の検出感度を高めることができ、この時間は前もって系の応答時間を考慮して任意の時間に設定出来るので、精度と計量時間の調和がはかれる。

計量値の表示は、上記 a を精度良く読みとることであり、この装置では4桁で表示され、上位2

桁は送錘移動量と連動する発信器により、また下位2桁はパルスモータに入るパルスを逐次カウントする可逆カウンタにより、それぞれ検出する。これを数字表示管やタイプライタに接続することにより、計量値の表示や印字を行なう。

4. 平衡レバー

平衡レバーは計量装置のもっとも重要な機械要素で、枠、支点、重点、送錘、歯車、ボールスクリュウ、平衡ばね、オイルダンパがその主要部分を構成して、これに、差動変圧器、シンクロ受信器が取付けてあり、平衡レバーの良否によって装置の良否が決定される。

設計上特に考慮した点は、

- (a) 感度および支点の安定性
- (b) 精度の耐ドリフト性および計量時間
- (c) 送錘機構の直線性

などであり、以下これらに関する平衡レバーの主要構成機器について説明する。(図2参照)

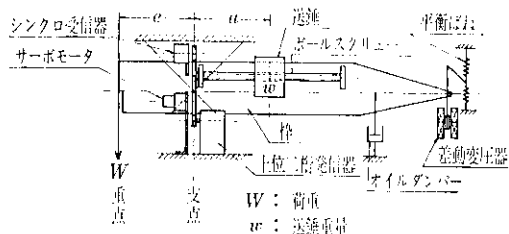


図2 平衡レバー

4.1 支点および重点

はかりのレバー系の支点や重点としては、一般に、刃、刃受機構で形成される。この機構は原理上、直線状の接触線をもっているとして考えられたものであるが、実際には工作上的の誤差、荷重などのために、極微ではあるがある丸味をもった帯で接触しており、またその接触帯も必ずしも真直であるとは限らない。したがって、このレバーが揺動する場合(不平行を検出する場合)、刃の間(レバー比)の変動や、摩擦などもあるので高精度のはかりを製作するのには、充分な感度とその

安定性をもっているとはいえない。したがって従来はこれを補うために、バランスのよくとれたレバーを製作し、計量に充分な時間をかけ、環境のよい場所で使用されてきたが、工業用として、まして自動送錘のように慣性力や、外部よりのトルクによる垂直以外の力が作用する場合には、感度とその安定性の充分さが望まれない。これに対して、交差板ばね構造による支点は、増尾、前田らの解明¹⁾のごとく、充分な感度と安定性を有し、高精度の自動送錘のような計量装置に適合すると思われるので、支点にはこれを用いた。また重点にはこの変形である単板ばねを用いた。これにより支点、重点による感度を十分に上げることが出来た。なお、交差板ばねの支点位置は、レバーの傾斜度に応じて移動するが、本機では零位法を採用しているので(平衡点として、レバーの水平位置をとっている)、問題とはならない。

4.2 平衡ばね、オイルダンパ

平衡レバー系は質量を持ち、その支点は摩擦が極端に少いので、送錘が平衡位置に近ずくと平衡レバーは平衡点(水平位置)の上下に振動する。

計量時間の短縮は、振動しながら平衡点に到着く時間を短かくすることであり、このために平衡ばねとオイルダンパを用いるが、これらは感度低下の要因となるので調和が必要である。

4.2.1 平衡レバーの減衰振動

平衡レバーの重点に、荷重 W がかかり送錘と平衡しているものとする、はかりの自由振動は平衡レバー単体の自由振動と大差がない、検討しやすいように平衡レバーをモデル化すると、図3のようになり、運動方程式は次のようになる。

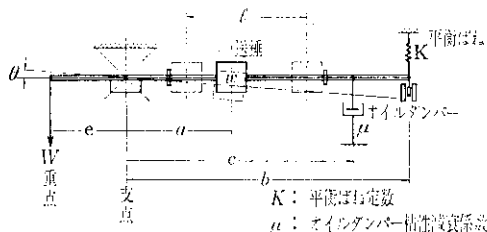


図3 平衡レバーのモデル

$$\left(I_0 + \frac{w}{g} a^2\right) \frac{d^2\theta}{dt^2} + \mu c^2 \frac{d\theta}{dt} + Kb^2\theta = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

I_0 : 平衡レバーの支点まわりの慣性モーメント
($\text{g} \cdot \text{cm}^2$)

w : 送錘重量 (kg)

g : 重力加速度 (980 cm/sec^2)

K : 平衡ばね定数 (kg/cm)

μ : ダンパの粘性減衰係数 ($\text{kg} \cdot \text{sec/cm}$)

θ : 平衡レバーの傾き角 ($^\circ$)

a : 支点, 送錘間の寸法 (cm)

b : 支点, 平衡ばね間の寸法 (cm)

c : 支点, オイルダンパ間の寸法 (cm)

(1)式で

$$\frac{\mu c^2}{I_0 + \frac{w}{g} a^2} = 2\varepsilon, \quad \frac{Kb^2}{I_0 + \frac{w}{g} a^2} = \omega_n^2 \quad \dots\dots\dots(2)$$

ω_n : 固有振動数

とおくと, (1)式は

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + 2\varepsilon \frac{d\theta}{dt} + \omega_n^2\theta = 0 \quad \dots\dots\dots(3)$$

となる。

減衰振動であるから

$$\varepsilon < \omega_n \quad \dots\dots\dots(4)$$

初期条件を

$$t=0 \text{ で } \theta=0, \quad \frac{d\theta}{dt} = u_0 \quad \dots\dots\dots(5)$$

とおくと, (4)式の解は

$$\theta = e^{-\varepsilon t} \frac{u_0}{\sqrt{\omega_n^2 - \varepsilon^2}} \sin \sqrt{\omega_n^2 - \varepsilon^2} t \quad \dots\dots\dots(6)$$

となる。

したがって, 平衡点に達する時間 (θ が微小範囲内に入るに要する時間) を短縮するには, ε , $\sqrt{\omega_n^2 - \varepsilon^2}$ を大きくすることが有効である。すなわち(2)式より I_0 , w/g , a は小さい方が, また b , c は大きい方がよい。しかし, これらはレバーの強度, 駆動のための所要トルクなどによる制限があるので, あまり大きく変えることはできない, したがって ε , $\sqrt{\omega_n^2 - \varepsilon^2}$ を大きくするためには, K , μ を大きくしなければならない。

4・2・2 平衡ばねのばね定数

計量時間を短くするためには, ばね定数 K を

大きくすればよいが, ばね定数を大きくすると, 単位荷重あたりのレバーの回転角が小さくなるので, 平衡レバーの感度が小さくなる。したがってこれを補うためには, レバー先端部の変位の検出装置や, 制御系の感度をよくする必要がある。

さらに検出装置の温度ドリフトや, レバーの変形, ばね定数の変化などが, 相対的に, 平衡点のドリフトとして大きく影響する。

この影響を, 20°C の温度変化に対し, 単位荷重の $1/2$ 以下に押えるには, 変位の検出装置としての DT, 整流器, レバー系などについて実験により検討した結果, 単位荷重あたり DT の位置で 15μ の変位をとる必要があることがわかった。

したがって, はかりの精度を $1/N$ とすると,

(図3参照)

$$wl/N = Kb \times 15 \times 10^{-4} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$K = \frac{wl}{bN \times 15 \times 10^{-4}} \quad \dots\dots\dots(8)$$

なお, (8)式を(2)式に代入すると

$$\omega_n^2 = \frac{1}{I_0 + \frac{w}{g} a^2} \times \frac{blw}{N \times 15 \times 10^{-4}} \quad \dots\dots\dots(9)$$

となり精度と計量時間の関係が表わされる。この式をもとに設計された, AUE-540 型自動送錘式計量装置の各部寸法は次のようになっている。

$l = 28 \text{ cm}$

$a = 10 \sim 38 \text{ cm}$ ($a = 30 \text{ cm}$ として計算する)

$b = 60 \text{ cm}$

$c = 48 \text{ cm}$

$w = 7.5 \text{ kg}$

$I_0 \approx 2 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^2$

$N = 7,000$

$K \approx 0.33 \text{ kg}$

$\omega_n \approx 11.53 \text{ rad/sec}$

したがって固有周期は, 0.54 sec となる。

その他, 設計上考慮した点は, 次のようなことである。

(a) 平衡ばねのヒステリシスを避けるため, レバー先端の変位を $\pm 1.5 \text{ mm}$ に規制するストッパーを設けた。

(b) 平衡ばねにはコイルバネを使用し, 温度補償のため, レバーの上下に対称に取付けた。

(c) オイルダンパーの粘性減衰係数は、制御系を組込んだ状態で最適にできるように、ピストンの穴を開閉することにより調整可能とした。

4.3 送錘機構

この計量装置の送錘機構に必要な条件は、

(a) 円滑な送錘を行なうこと

(b) 送錘量が精度よく読み取れること

であるが、この条件をみたすものとして比較的入手の容易なボールスクリューを採用した。

ボールスクリューはリード誤差が小さく、直線性が広いので、送錘量はボールスクリューの回転数として置き替えられ、手軽に精度よく読み取ることができる。また送錘のための所要トルクが小さいので駆動歯車の歯面摩擦も小さくてすみ、レバー感度を低下させることなく円滑な送錘が出来る。

使用したボールスクリューの仕様の一例を次に示す。

メーカー	NSK
規格	SPZ
単一リード誤差	$\pm 0.003 \text{ mm}$
累積リード誤差	$0.015 \text{ mm}/300 \text{ mm}$
軸方向透間	0
ねじ	14 mm
有効ねじ長さ	400 mm
リード	5 mm
単位荷重あたりの移動量	0.04 mm

5. 制御系

従来の自動送錘式計量装置の欠点の一つは、不平衡になってDTから出力が発生しても、その値が小さければ最小起動電圧以下となり、送錘を行わない範囲、すなわち制御系の不感帯が大きいことで、そのため高精度のはかりを製作することが出来なかった。

AUE-540型計量装置では、積分要素をもった高感度のIF変換器でパルスモータを駆動する方法を採用することによりこの欠点を補った。

制御系は、V-I変換器、I-F変換器、高低速切換回路、パルスモータ、シンクロサーボ系により

構成される。(図1参照)

5.1 I-F変換器、パルスモータ

装置の制御系の特徴は、I-F変換器、パルスモータを組込んだことにあるといえる。

DTにより検出された交流信号は整流器により同期整流され、直流に変換される。この信号は、V-I変換器(直流増幅器DA)を介してI-F変換器に与えられる。(図4、5参照)

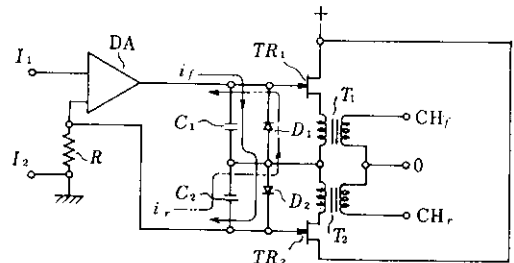


図4 V-I, I-F変換器回路

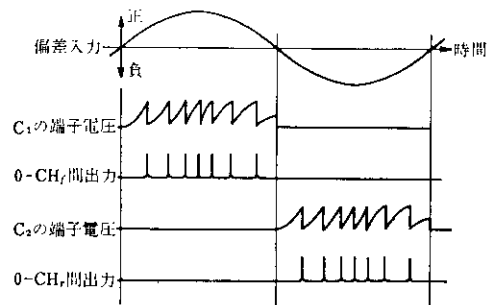


図5 I-F変換器動作説明

今、信号が入力端子 I_1 , I_2 間に正の電圧で与えられると、V-I変換器により電流 i_f は積分用コンデンサ C_1 、ダイオード D_2 の回路へと流れ、積分用コンデンサ C_1 を充電する。積分用コンデンサ C_1 の電位が上昇することによりユニジャンクショントランジスタ TR_1 が動作し、パルストランス T_1 を経て、パルスが1個発生し出力端子 O , CH_f 間から出力として出され、コンデンサ C_1 に充電されていた電荷は消滅する。また、V-I変換器の入力端子 I_1 , I_2 間に入力として負の電圧が加わった場合、電流は i_r 積分用コンデンサ C_2 、ダイオ

ード D_1 の回路へと流れ、積分用コンデンサ C_2 を充電する。

積分用コンデンサ C_2 の電位が上昇することにより、ユニジャンクショナルトランジスタ TR_2 が動作し、パルストランス T_2 を経てパルスが1個発生し出力端子 O , CH_r 間から出力として出され、コンデンサ C_2 に充電されていた電荷は消滅する。

積分用コンデンサ C_1 , C_2 の容量は一定であるから、入力電源が大きければ発生するパルスの時間間隔は短くなり、パルス周波数は増大する。

このような I-F 変換器とパルスモータを組合わせて制御系に用いることにより、次のような特長を有する。

(a) 入力端子 I_1 , I_2 間に加わる入力、いかに小さくともある有限の時間が過ぎると、積分用コンデンサ C_1 または C_2 を充電し、1 単位のパルスを発生できるため、不感帯を非常に小さくすることができる。

(b) 入力信号の正負により、パルスモータの正逆転用のパルスを別個のチャンネルから得られるので、パルスモータの駆動回路を簡単にすることが出来る。

(c) パルス周波数が零から最高まで自由に得られるから、DT の出力の大きいところではパルスモータが高速回転して応答を早くし、DT の出力信号が小さいとき、すなわち平衡点の近くでは極端に低速回転し、平衡レバーの安定を得ることが出来る。

(d) パルスモータの1パルスあたりの回転角が一定であるので、送鍾の移動量はパルスモータの回転角、すなわちパルスモータ駆動回路に加えられるパルス数に比例する。したがって I-F 変換器の出力パルスを正逆方向により加減算することにより、送鍾の移動量を数字化出来る。

次にパルスモータの仕様を記す。

メーカー	日本パルスモータ
型 式	PF 8-90
相 数	5
励磁方式	2-3 相
1 ステップ角度	2°
自起動周波数	2,000 pps

連続応答周波数	10,000 pps
最大静トルク	3.0 kg・cm
出力トルク	0.5 kg・cm/2,000 pps
駆動回路型式	PS-9F

5.2 シンクロサーボ

パルスモータは駆動力が小さいので制御要素としての役割にとどめ、送鍾のためには、シンクロサーボ系を使用した。次に仕様を記す。

(a) シンクロ発、受信器

メーカー	山洋電気
型 式	発信器 15CX-6 受信器 15CT-6

(b) サーボモータ

メーカー	日本サーボ
型 式	ESBT-25 型
最大出力	25W

(c) 増幅器

メーカー	川崎製鉄
型 式	KA-35

6. 計量値発信装置

計量値は10進4桁とし、上位2桁はサーボモータにより駆動される上位2桁発信装置により検出した。これは円筒状にリードスイッチを等間隔に配置し、その内側に永久磁石片を取付けたアームを回転させる機構で、永久磁石片が近接したときにリードスイッチが動作するようになっており、10:1の歯車列を介して、2組の円筒状のリードスイッチ群があり、0~99までの数字の判別を行なう。この装置はボールスクリューと連動しているので、判別される0~99の数字は、送鍾の位置に対応する。

一方、下位2桁は電子式の可逆カウンタを使用し、I-F変換器からパルスモータに送られる出力パルスを逐次カウントする。

シンクロ発信器1回転が200パルス(2パルスで計量単位荷重)になるようにし、シンクロ発信器1回転で上位桁のリードスイッチが1つ進むようにしてある。上位2桁のリードスイッチ群は、切換の境界でオーバーラップするようになってお

り、判別のあいまいさを防ぐため、下位2桁の可逆カウンタの内容により、どちらかを確実に選択するようにした。

可逆カウンタは、シンクロ発信器が1回転し、基準位置（表示は00）にきたときに、強制的にカウント内容をリセットする機能を備えており、ノイズ、電源の瞬断などによる計数値の乱れを補正するようにしてある。

7. 使用例

自動送錘式計量装置の使用例を表1に示す。

装置を、トラックスケールに採用することにより、計量操作が単純化され、経験を要する技術が不要となった。また、安定した高精度を保つことが出来るうに、計量値の表示、印字に人為的な要素が含まれないため、信頼性を高めている。

8. むすび

AUE-540 型計量装置は交差板ばね支点、適正なレバー要素、ボールスクリュー、積分型 I-F 変換器、パルスモータなどの開発、応用により、高精度 (1/3,000~1/10,000) で計量時間の短かい

検量票

年月日	4 5 0 5 0 7
番 号	
車 番	4 4 4 4 4 4
総重量	5 0 0 0 0 kg
空車重量	
差引重量	
最大重量	
正味重量	

納入者・消費者	
品 名	
発着場所	
積付 倉庫	
積付 場所	
積付 重量	
積付 備考	

川崎製鉄株式会社 知多工場倉庫課

図 6 印字カード例

表 1 使用例

	例 1	例 2	例 3
はかり名称	トレーラースケール	トラックスケール	トラックスケール
計重台寸法	16m×4m	10.5m×3m	8m×3m
計量装置型式	AUE-540	AUE-540	AUE-520
計量範囲	1,000~70,000kg	530~50,000kg	500~40,000kg
断続指示間隔	10kg	10kg	—
最小目盛	—	—	10kg
表示装置	光電管表示器	光電管表示器	本体ダイヤル表示器
印字装置	加算器	加算器	本体印字装置
零調装置	自動零調装置	自動零調装置	押釦零調装置
製作年月	1969年5月	1970年5月	1970年10月
計量時間	max 14 sec	max 13 sec	max 13 sec

備 考

- (a) 例3の計量装置にAUE-520型を採用しているが、AUE-520型は平衡レバーと制御系は原理的にAUE-540型と同じであるが、表示、印字装置に機械的な機構を使用したものである。
- (b) AUE-540型の印字装置に、加算器を使用しているので簡単な演算が可能である。
- (c) 図6は例2の場合の印字用紙を示す。

(15sec 以下) はかりの製作を可能とし, 所期の目的を達成した。

しかし, はかりの自動化が進み, 他のシステムとの関連性が強くなるにつれて, 計量時間をより短縮する必要に迫られている。そのためには次の

点を追究しなければならない。

(a) 平衡点付近までの送錘時間の短縮

(b) 平衡レバーの傾きの検出装置の感度と安定性の向上により, 平衡ばねのばね定数を大きくし, 平衡レバーの固有振動数を大きくする。

参 考 文 献

- 1) 増尾, 前田: 機械学会論文集, 28-195, (昭 37-10), 1225
- 2) 谷口: 振動工学, (昭 35), 32