

工業電子計測便覧

工業電子計測便覧

平井平八郎編

日刊工業新聞社

執筆者紹介

平井 平八郎

- 昭和 4 年 京都帝国大学工学部卒業後
大阪工業大学助手
同 14 年 大阪帝国大学助教授
同 18 年 京城高工教授
同 22 年 大阪市立都島工業専門学校教授
同 24 年 大阪市立大学工学部教授、現在
にいたる、工学博士

北 浜 安 夫

- 昭和 17 年 大阪大学工学部卒業
同 21 年 大阪市立都島工業専門学校
同 25 年 大阪市立大学講師
同 37 年 大阪市立大学工学部教授現
在にいたる、工学博士

安 藤 慶 一

- 昭和 24 年 京都大学工学部卒業後工業技術庁
大阪工業技術試験所に勤務
同 27 年 大阪市立大学工学部勤務
現 在 同大学工学部教授、工学博士

浅 居 喜 代 治

- 昭和 18 年 中島飛行機(株)技手
同 20 年 通信省技官
同 21 年 通信省通信教官
同 26 年 大阪大学工学部卒業後大阪
府立大学教員
同 44 年 大阪府立大学工学部教授
工学博士
-

はじめに

今日、電子応用計測の技術が、工業上きわめて重要な地位を占めていることは今さら強調するまでもないことであり、電気技術者のみならず、機械技術者、化学技術者その他広く一般の技術者がこの基礎技術を十分会得しておくことは必然的に要求されるところである。この意味において、このたび日刊工業新聞社が工業用電子応用計測便覧の出版を企画されたことは真に適切であり、時宜を得たものといえよう。著者は図らずもこれを編さんするよう依頼を受けたのであるが、その内容について協同執筆の方々と合議の結果、現用の電子応用計測器を個別に解説するよりも、読者自らそれらを理解し、また、新しい計測器を発案し得る能力を養うに役立つよう、測定対象である各種の工業量別にそれらの電気値変換、検出、測定の原理に重点をおいた内容とし、最後に資料としてそれぞれの代表的な製品の具体的な構成や活用法を示すようにすることとした。

以上の構想に基づき本書は次の順序に従って記述してある。

まず第1章においては電子応用計測の概念、特長、計測系の構成について述べ、第2章において電子応用計測の最も基礎となる、各種の被測定量（工業量）の電磁気量への変換、電磁氣的検出および測定の原理・方法を総括表示してその全貌を把握できるようにし、第3章においてそれに必要な変換要素、検出器のうち、重要な、また用途の広い共通的なものを選んで解説し、これによって変換、検出の技術を十分に理解し、かつ、その応用能力が養われるように意図している。つぎに第4章においては、次の段階として必要な、変換または検出された各種の電磁気量や付随的に必要のある電磁気量を測定するための電子的計測法を数値例をあげて説明し、第5章において、この電子回路を構成するに必要な各回路要素および付属装置について解説し、実例をも示して電子応用計測法の修得と実際の応用に便利のように配慮した。また第6章においては参考のため工業計測において用いられている各種の表示装置および記録装置について実例を付して説明し、最後に第7章において各種の製品例を示してあるが、以上によって工業用電子応用計測器の基本原則と全般の構成が十分理解できるものと考えている。なお第1章において述べているように、測定系としては一般には以上のほかにデータ処理装置と伝送回路も必要であるが、これらについては、本書が計測器自体を内容とする方針から、それぞれの専門書にゆずり割愛すること

にした。また本書の内容が広範，多岐にわたるので，紙数の関係上記述が簡潔にならざるを得なかったのであるが，参照にも便利なように，不備または難解と思われるところはもちろん，できるだけ多く原著，文献を記載するようにした。

電子応用計測は将来ますます発展する分野で，現在これに関連する諸技術は急速な進歩を示してはいるが，その基礎技術を十分理解し精通していれば，現時点での電子応用計測器を十分使いこなすことができるのみならず，自ら新しい計測技術を開発することはそれほどむずかしいことではないと考える。その意味において本書がいささかなりとも役立つならば望外の幸である。ただ，その内容が所期の目的に副うようなものになっていないことや，誤りも多々あるであろうことをおそれている。この点読者や識者の御叱正を得て今後より良いものにしたいと念願している。

終わりに本書作成にあたり参考あるいは資料にさせて頂いた内外の著書，論文の著者および有用な資料を御提供頂いた各計測器メーカーに対し深甚な謝意を表わす。また執筆の機会をお与え頂いた日刊工業新聞社，愛媛大学長熊谷三郎先生，執筆に御協力頂いた本学部北浜安夫教授，安藤慶一教授，大阪府立大学工学部浅居喜代治教授に厚くお礼申し上げる。

昭和 44 年 10 月　編　者

目 次

1. 一 般

1.1 電子応用計測の概念.....	1
1.2 電子応用計測の特長.....	1
1.3 電子応用計測系の構成.....	3

2. 測定量の変換・検出・測定の原理

2.1 まえがき	5
2.2 力学量	5
2.2.1 長さ・変位.....	5
2.2.2 厚 さ.....	13
2.2.3 レベル.....	17
2.2.4 力・圧力・重量.....	20
2.2.5 トルク.....	24
2.2.6 真空圧力.....	26
2.2.7 速 度.....	28
2.2.8 振 動.....	30
2.3 時 限	32
2.4 温 度	34
2.5 湿 度	36
2.6 流量・流速	39
2.7 成 分	45
2.7.1 ガス成分.....	46
2.7.2 液体成分.....	52
2.7.3 固体成分.....	59
2.7.4 水 分.....	61
2.7.5 粘 度.....	64
2.8 光.....	66
2.9 音.....	68
2.10 材質欠陥	69

3. 変換素子・変換要素・検出器

3.1 まえがき	73
3.2 コンデンサ形変換器	73
3.2.1 間隔変化形	74
3.2.2 面積変化形	75
3.3 インダクタンスコイル形変換器	78
3.3.1 自己インダクタンス形と相互インダクタンス形	78
3.3.2 単一出力形と差(比)出力形	78
3.3.3 空心形と鉄心形	80
3.4 ホール効果素子・磁気抵抗効果素子・マグネトダイオード素子	82
3.4.1 電流磁気効果	82
3.4.2 ホール発電器	86
3.4.3 磁気抵抗効果	88
3.4.4 磁気抵抗効果素子	90
3.4.5 マグネトダイオード素子	94
3.5 差動変圧器	95
3.6 機械変位変換電子管	97
3.7 ひずみ抵抗素子・圧抵抗素子	99
3.7.1 抵抗線ひずみ計	100
3.7.2 半導体感圧素子	101
3.8 磁気ひずみ素子	105
3.9 圧電素子	108
3.9.1 水 晶	112
3.9.2 ロッセル塩	112
3.9.3 チタン酸バリウム系磁器	113
3.9.4 ジルコン・チタン酸鉛磁器	113
3.9.5 PCM圧電磁器	113
3.10 感温抵抗体	115
3.10.1 金属線	115
3.10.2 半導体	117
3.10.3 硫化銀	119
3.11 ボロメータ	120
3.11.1 金属ボロメータ	121
3.11.2 誘電体ボロメータ	121

3.11.3 半導体ポロメータ	121
3.11.4 超伝導ポロメータ	123
3.11.5 酸化金属薄膜ポロメータ	124
3.12 サーマスタ	125
3.12.1 酸化物サーミスタ	125
3.12.2 ガラスサーミスタ	127
3.12.3 Si 多結晶サーミスタ	129
3.12.4 酸化すず-酸化チタンサーミスタ	130
3.12.5 その他	130
3.13 熱電対	131
3.13.1 熱電現象	131
3.13.2 熱電対の材料	132
3.13.3 熱電対の使用法	135
3.14 熱電対列	137
3.15 感湿素子	140
3.15.1 電解質形	140
3.15.2 真空蒸着膜形	142
3.15.3 塗布膜形	144
3.15.4 その他	145
3.16 光電管	147
3.16.1 真空光電管	149
3.16.2 ガス入り光電管	149
3.17 光電子増倍管	150
3.18 光起電力素子・ホトトランジスタ	155
3.18.1 光起電力効果	155
3.18.2 光電池	158
3.18.3 ホトダイオード・ホトトランジスタ	161
3.19 光導電素子	165
3.19.1 Cd 系光導電セル	167
3.19.2 Pb 系光導電セル	171

4. 電磁気量の電子的計測法と計測器

4.1 まえがき	175
4.2 電圧・電流	175
4.2.1 直 流	175

4.2.2 交流	198
4.2.3 パルス	207
4.3 電力	209
4.4 位相差	220
4.4.1 正弦波	221
4.4.2 ひずみ波	224
4.4.3 パルス	228
4.5 周波数	229
4.6 抵抗・静電容量・インダクタンス	236
4.6.1 抵抗	237
4.6.2 静電容量	245
4.6.3 インダクタンス	251
4.7 磁気量	253
4.7.1 磁界	253

5. 計測用基礎電子回路および装置

5.1 まえがき	261
5.2 交流増幅器	262
5.2.1 低周波増幅器	262
5.2.2 電力増幅器	276
5.2.3 広帯域増幅器	279
5.2.4 高周波増幅器	283
5.2.5 帰還増幅器	288
5.2.6 選択増幅器	298
5.3 直流増幅器	299
5.3.1 直結形増幅器	300
5.3.2 変調形直流増幅器	307
5.3.3 複合形直流増幅器	310
5.4 発振器	312
5.4.1 LC 発振器	314
5.4.2 水晶発振器	318
5.4.3 音叉発振器	322
5.4.4 CR 発振器	322
5.4.5 周波数てい倍器	326
5.5 パルス発生器およびパルス回路	327

5.5.1 波形変換回路	327
5.5.2 パルス発生回路	330
5.5.3 論理回路	334
5.5.4 計数器	338
5.6 A-D 変換器, D-A 変換器	342
5.6.1 A-D 変換器	344
5.6.2 D-A 変換器	347
5.7 その他	352
5.7.1 低域フィルタ・高域フィルタ・減衰器	352
5.7.2 遅延線路および遅延回路	354
5.7.3 移相器	356

6. 表示および記録装置

6.1 まえがき	359
6.2 表示装置	359
6.2.1 アナログ形表示装置	359
6.2.2 デジタル形表示装置	370
6.3 記録装置	388
6.3.1 アナログ形記録装置	388
6.3.2 デジタル形記録装置	407

7. 資 料

7.1 力学量関係測定器	411
7.2 時 限	418
7.3 温 度	418
7.4 湿 度	419
7.5 流量・流速	419
7.6 成 分	425
7.7 光	432
7.8 材料欠陥	433
7.9 磁気抵抗効果素子	434
7.10 ひずみ抵抗素子	434
7.11 圧電素子	435
7.12 熱電対	436

7.13 光 電 管437

7.14 光電子増倍管..... 437

7.15 電圧・電流.....437

7.16 電 力441

7.17 位 相 差442

索 引..... 卷末

1. 一 般

1.1 電子応用計測の概念

われわれが工業上いろいろな物象の状態を知り、かつそれを目的にかなうように処理するには、まず物象の諸量を正しく計測する必要がある。一般に電気計測技術は他の機械的、光学的計測技術に比べて感度が高く、精密測定が容易であり、操作も便利でこれに最も適した方法である。しかも最近電磁気量でない種々の物理量や化学量を電磁気量に変換する技術が発達してきたので、これらの分野を取り扱う電気応用計測は異常な発展を示して工業上重要な地位を占めるようになった。これには、また電子工学の技術の導入も大きい役割を果たしているのであるが、この場合を特に電子応用計測と呼んでいる。

電子応用計測においては、被測定量が電磁気量でないときは、まず適当な変換または検出方法によって電磁気量に変換または電磁気量として検出するのであるが、この場合の変換器または検出器として、電子的なものがかなり多く用いられるようになった。つぎに変換または検出された電磁気量に対し、種々の電子技術を応用して増幅・波形整形・演算などを行ない、さらに、その結果を直接、あるいは遠隔地に伝送して指示、記録させたり、制御用の情報として利用する。もちろん以上の計測過程において、全部が電子的に行なわれるものではなく、むしろ部分的に電子技術が適用される場合の方が多いが、これらをも含めて広く電子応用計測とみなしている。

1.2 電子応用計測の特長

電気応用計測において電子技術が用いられるようになったのは、次のような特長があり、しかも場合に応じてこれらの特長が組み合わされて、従来の方法とは比較にならないほど測定の精度や速度が向上され、また今まで不可能または困難であった計測も可能になり、また容易にもなりうるからである。

(1) 微小量の計測ができる。

電子技術により微小な電圧または電流を高利得でしかも安定に増幅できるので、被測定量を電圧または電流に変換できるときは、他の方法では測定し得ない微小量でもこれをきわめて感度高く測定することが可能となる。

(2) 被測定量に影響を与えることなく計測が行なえる。

高利得の増幅を行なう場合、それに必要なエネルギーは別に設けた補助電源から得て、測定対象からはほとんどエネルギーをとらないようにすることができる。したがって被測定量を乱さないで測定することができる。

(3) 計測が迅速に行なえる。

真空管・トランジスタその他一般の電子素子やブラウン管オシログラフ・ディジタルカウンタなどの応答速度はきわめて速い。したがって検出・変換・増幅・情報処理・表示・記録などの各部分より構成される測定系をこれらで電子化すれば、きわめて迅速な測定ができ、その時間的遅れは普通の工業量の変化に比べると無視できるほど小さいから、高速度で変化する量の測定に適している。

(4) 非破壊的に計測が行なえる。

放射線や超音波の透過性、電磁誘導や磁化のような電磁気現象などを利用すると、物体をこわさないでその寸法、表面や内部の欠陥の大きさ、材質などを計測することができるが、この場合電子技術は不可欠のものである。

(5) 情報処理が容易である。

被測定量を一度電気量に変換すると、その目的に応じて、種々の測定量に対し、アナログ電子回路を用いて加減乗除・自乗・微分・積分などの演算操作を容易に行なうことができる。また計測の精度を上げたり、表示や記録の便宜のため、さらには電子計算機を適用できるようにするために、被測定量をディジタル量に変換することが多いが、これも電子式のアナログーディジタル変換回路を用いて容易に行なうことができる。

(6) 表示・記録・記憶の方法が多様である。

従来は測定結果を指示電気計器またはダイヤルで読みとっていたが、電子技術によれば種々の方法を用いることができる。すなわちネオン管・同調指示管・ブラウン管・ペンレコーダなどが用いられるし、被測定量がディジタル量に変換された場合には、計数装置・計数放電管・E1Tなどが利用される。また測定量の長年月の記録や短時間の記憶に対しても電子式の各種の記録計器や記憶装置が開発されている。

(7) 遠隔計測が正確かつ容易にできる。

被測定量を離れた地点に伝送して表示、記録したり、またはそれを制御に利用したりする遠隔計測は、電子式が他のどの方式よりもすぐれている。特に遠距離の場合には、まず被測定量を電気量に変換し、この信号によって周波数の高い搬送波の振幅変調、周波数変調、位相変調などを行なって伝送する方法によって、伝送回路の状態、電源変動、ノイズその他の影響を受けないで正確に測定できる大きい利点がある。また、さらに周波数分割や時分割の多重化の技術を活用すると、伝送すべき測定量が多い場合にも伝送線路の容量の節約を図ることができ、このような系統においては、特に電子技術が大幅に取り入れられている。

1.3 電子応用計測系の構成

図 1.1 に電子応用計測系の構成を示す。計測の方法は大きく分けると、被測定量を電磁

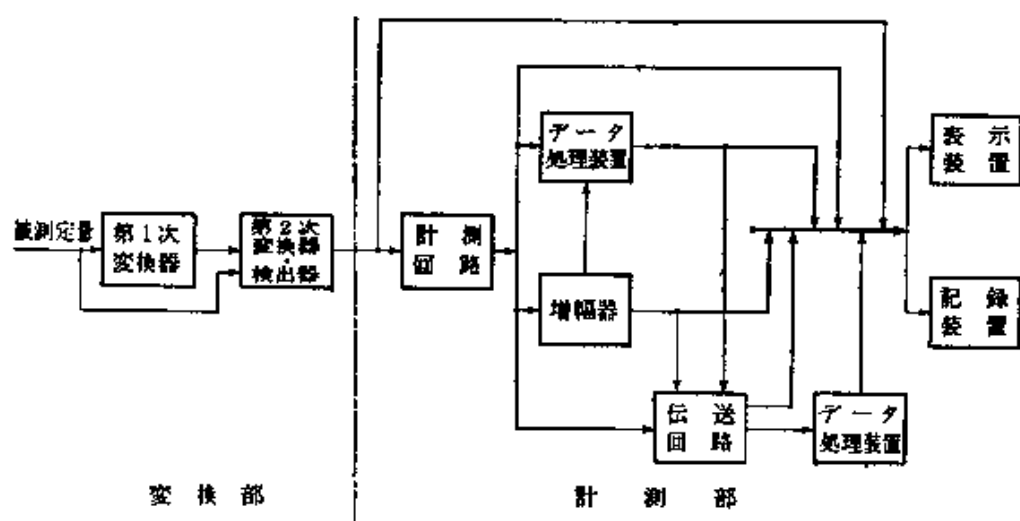


図 1.1 電子応用計測系の構成

気量に変換する過程とこの変換量を測定、処理、伝送および指示する過程の2つになる。

変換部は第1次変換器と第2次変換器とで構成される。第1次変換器は、被測定量を直接電磁気量に変換できないときに、これを一度電磁気量に変換しやすい他の物理量または化学量に変換するためのもので、機械的、光学的、または化学的な変換方法が用いられる。第2次変換器および検出器は直接被測定量を、または第1次変換器で変換された量を電磁気量に変換または電磁気量として検出するためのもので、電磁気現象、熱電現象、光電現象、電気化学現象などを利用する方法が用いられる。

計測部は計測回路・増幅器・データ処理装置・伝送回路・指示および記録装置などから構成せられ、これらを変換または検出された電磁気量の種類や大きさ、測定目的に応じて適当に組み合わせる。

計測回路は第2次変換器または検出器によって得られた電磁気量を、これ以後の操作に便利な他の電磁気量に変換するためのものである。計測回路の出力は、そのまま表示あるいは記録させることもあるが、普通は増幅回路で増幅したり、伝送回路によって遠方へ伝送したり、あるいはデータ処理装置でその量のみの自乗・微分・積分などの演算や、他の量と組み合わせての加減乗除の演算などを行なったりしたのち、表示装置や記録装置に送る。

表示および記録装置は、指示計器・積算計器・オシログラフ・計数器・記録計器などが普通であるが、場合によっては標示器・警報器のみのこともある。また情報信号の形式によってアナログ式のものやデジタル式のものがある。

2. 測定量の変換・検出・測定の原理

2.1 ま え が き

1章で述べたように、物理量や化学量の電子応用計測においては、これらの量をまず電磁気的方法やその他の物理的・化学的方法で変換または検出して電磁気量とし、これを電子計測技術を用いて測定して測定量を求めるという手段をとるので、まず測定量の電磁気量への変換の技法を理解することが必要である。

本章では代表的な測定量を種類別にして、それぞれに適する変換素子、変換器、検出器の基本原則と測定方法の原理を代表例を図示して説明しているが、容易に理解できるものは簡単な記述にとどめてある。

なお変換素子、変換要素、検出器のうち主要なものについては第3章で詳述する。

2.2 力 学 量

2.2.1 長さ・変位

長さの測定で電子応用計測の対象となるのは、主として微小変位である。角度は長さそのものではないが、角変位を考えると長さの測定と同様に取り扱うことができる。

変位を電磁気量に変換するには、変位に伴い静電容量、インダクタンス、抵抗、発生起電力の変化を生ずる変換素子あるいは変換要素を用いるのが簡単であり、普通よく用いられているが、特殊の用途、精度の向上などを目的として構成された装置も作られており、変位の種類、大きさ、要求される精度などによってこれらのうちの適当な方法が選択される(表2.1参照)。

変位の測定はまた種々の力学量の測定における基礎ともなるもので、力学量をいったん1次変換器によって変位に変換したのち、変位の測定から求める場合が多い。

表 2.1 長さ・変位の変換・検出・測定の原理

番号	変換・検出・測定の原理	参照図面	変換要素・検出器・計測装置	参照項目
1	空気コンデンサの一方の電極または電極間に挿入した誘電体を、変位に応じて動かすとその静電容量が変化する。	図 2.1	可変コンデンサ	3.2 4.6.2
2	図のような変成器ブリッジ（零点ドリフトをきわめて少なくするよう変成器の2次側はガードが付けてある）において、誘電物質よりなる可動片が中央の位置から変位すると、静電容量 C_1 , C_2 が差動的に変化し、ブリッジは不平衡となって、同期検出器に変位に対応した直流電圧を発生する [文献 C. A. Skalski : Capacitance Distance Transducer, Proc. IEEE, 56, 1 (1968), 111~112].	図 2.2	差動コンデンサ	3.2.1 (b)
3	磁気回路を形成する鉄片を変位に応じて動かすと磁気回路内の磁気抵抗が変化し、鉄心に巻いたコイルのインダクタンスが変化する。	図 2.3	空隙変化形インダクタンスコイル	3.3.3 4.6.3
4	ソレノイド内の鉄心を変位に応じて動かすと、そのインダクタンスが変化する。	図 2.4	可動鉄心形インダクタンスコイル	3.3.3 4.6.3
5	図のようにプローブの先端に細い線を巻いた小さいコイルを設け、これに高周波電流を流すと、これに相對した金属平板中にうず電流が誘導されるが、このうず電流は、プローブと変位する可動平板との距離（変位）に応じて、プローブ・コイルのインピーダンスを変化させる。可動平板が非磁性体であるか磁性体であるかによって、コイルのインピーダンスの変化は主として抵抗性であるか誘導性であるかになる [文献 H. T. Adkins : 5 ways to measure without touching (4. Inductive systems are cheaper), Control Engng, 15, 2 (1968), 90].	図 2.5		
6	すべり線抵抗のすり接触を直線変位または角変位に応じて動かすと、すり接触と端子間の抵抗が変化する。	図 2.6	すべり線抵抗器	4.6.1
7	環状のガラス管内に1本の白金-イリジウム抵抗線を張り、抵抗線の両端（AおよびE）と中央部分（R）とより端子を出し、管内の半分ほどに水銀を満たして抵抗線の一部を短絡するようにしたリングチューブを用い、これを角変位に応じて回転させると、抵抗線の短絡される部分が変わり、端子 ER および AR 間の抵抗が変化する。	図 2.7	リングチューブ	4.6.1
8	らせん形に巻いた白金線に一定電流を通じて加熱しておき、変位に応じてらせんを伸縮させると冷却率が変わり、白金線の温度にしたがってその抵抗が変化する（ブリッジにて検出）。	図 2.8	感温抵抗体	4.6.1