技術ハイライト

相 関 計 に つ い て

ソニー株式会社 児 玉 保*

§ ま え が き

最近、振動の波形解析が盛に行なわれるようになり、数理統計学的手法が一般化されるにつれて、学術的分野のみならず、工業計測の実際的な面で、大きな成果を上げつつある。ここに紹介する相関計は、波形解析を簡単に行なうアナログ式の自動計算機の一つで、ソニー株式会社によって始めて商品化されたものである。

§ 波形解析について

一般に振動波形は、単純な正弦波を合成したものであるという見地から、波形解析は、複雑な現象波形を基本正弦波に分解し、それぞれの基本正弦波の振幅、周波数、位相を知ることによってなされる。もちろん、周波数の代わりに角周波数、または周期で表現することは自由である。さらに、振幅、周波数、位相が時間的にどのように変化するかを知る必要が生ずることもある。この場合は、厳密な意味では、単純正弦波であるとはいえないが、ある特定の時間を区切って、その範囲内で正弦波であると考えて取扱うと簡便化できる。

このような基本単純正弦波に分解する考え方は、振動現象の工業的判断を行なう場合に有利であり、この解析結果から、機械装置の固有振動や不良個所の発見、素材の均一性等の検討をすることが可能となる。特に、観測された振動波形が、本質的に線スペクトルで表現されるべき性質を持っており、特定の周波数の正弦波の集合である場合は、工業的な実活動の上で極めて有効である。

§ 雑音について

しかしながら、一般に工業的に計測される波形は、必ずしも線スペクトルで表現され得ず、一般には、連続スペクトルの形を持っている。

連続スペクトルであるということは、光に例えれば、白色光で、特定の周波数がなく、連続的な総ての周波数成分を均等に含んでいることを意味している。この場合の波形は正弦波の集合というよりも、全くランダムな波形であり、これを雑音と称する。

統計学的には、“雑音”は、正確に定義づけられているが、ここでは、特定の周波数を持たない非周期性の振動を雑音と称することにする。

この雑音は、工業計測技術の上で忘るべからざる現象で、測定器自体から常に発生しているものであり、また、被測定事象そのものが雑音成分を多量に持っている場合が多い。この場合の波形解析は、まづ雑音に対する処理を行なって、雑音の量および性質を明らかにする必要がある。

一般には、工業的に観測される波形は、線スペクトルと連続スペクトルとの合成、すなわち、周期性成分と非周期性成分の合成されたものであるため、これらの認識の上に立って波形解析を行なう必要がある。

§ 電子回路による波形解析法

われわれが工業的に解析しようとする振動は、必ずしも電気振動であるとは限らず、機械的な振動の他、圧力、温度、寸度、pH値、溶液濃度等、総ての計量値の振動がある。これらの物理量や化学量をそのまま解析することは、極めて困難であるため、まづこれを電氣量に変換し、電気回路の特性を利用して解析を行なうのが普通である。

電気回路は、近時のエレクトロニクス技術の発展によって、各種の波形解析を行なうに必要な総ての演算が可能であり、特にシリコントランジスタの開発によって、小型軽量で、安定な動作をする装置が得られるようになった。

電子回路による波形解析は、大別して2種の方法がある。その一はアナログ方式で、トランスジューサーによって得られた電氣的振動波形をそのまま、アナログコンピュータで演算し、解を図表で表示するものであり、他方

* On the Correlator

TAMOTSU KODAMA, Sony Co. Ltd.,
Kitashinagawa, Shinagawa-ku, Tokyo, Japan.

は、アナログディジタルコンバータで、ディジタル信号に変化して、ディジタルコンピュータで演算し、解を数値で表示するものである。

この両方式を比較するに、操作の簡便性において、アナログ式が優れ、解の精度において、ディジタル式が優れているが、使用者の目的に応じて、適当に使い分ける必要がある。

本来、振動とは、時間軸に対するものであるが、実際的には、機械的位置や、被測物体の長さに対する振動も取扱う必要が生ずる。電子回路による演算は総て時間軸を変数として行なわれるので、このような場合は、被測物体を一定速度で移動せしめる等の方法で、変数を時間に対応せしめればよい。

§ フーリエ解析

被測波形の周波数分布を簡単に知るためには有効な手段である。特定の周波数のみを通過せしめるバンドパスフィルターを用意し、被測波形中に含まれる特定周波数成分のみを通過せしめてその振幅を測定する。

周波数分布を知るためには、通過周波数をわずかにシフトさせた多数個のバンドパスフィルターを使用し、それぞれの出力振幅を測定することによって、目的を達し得る。

この方式の解析装置は、市販されている種類も多く、各方面で実用化されているが、一般的にいって雑音を多量に含む被測波の解析には適当でない。すなわち、解析の目的とする特定周波数成分の信号が雑音の平均レベルより低い場合、この方式で得られる解は単に雑音の連続スペクトル分布を示すにすぎず、目的に応じた有効成分を抽出することが不可能である。

一般に、雑音と特定信号周波数が混在している場合に、両者の周波数帯域巾が同一ならば、普通のフィルターをもってしては、この両者を分離させることはできない。

§ 相関解析の特徴

一般の工業計測においては、雑音中にうずもれた特定周波数の信号を取出して、有効に利用したい場合が極めて多い。この際、相関計を用いた解析が極めて有利となる。

相関解析は、相関関数 (correlation function) を計算することによって、雑音と特定周波数の信号とを分離することが可能であり、また、被測波形の電力スペクトル密度を算出する基礎ともなる。

さらに、相互相関関数演算により、独立の複数の被測波相互間の周波数の同一性やその位相差を知ることが可

能である。

§ 相関解析の原理

相関解析のもっとも基本的な考え方は、被測波の周期性に着目して、雑音と信号とを分離することであるといえるであろう。

すなわち、雑音成分には、特定の周期がなくいかに時間が経過しても同一波形部分が再現することがないが、特定周波数成分は、その周期毎に同一波形が再現する性質を利用する。

そのため被測波形を何らかの形で、忠実に記録し、その記録した波形を人工的に時間軸上に平行移動して遅延せしめ、原波形と比較する。

遅延時間 τ が 0 の時は、移動波形は原波形と全く一致しており、遅延量が増加するにつれて両者の波形は、徐々に相異してくる。しかし、原波形が周期性のものであれば、遅延量 τ その周期 θ と一致した際に、両者の波形は再び同一となり、その後、 $\tau = n\theta$ で繰返し同一となる。一方原波形が雑音性であり、周期が認められない場合には、いかに遅延量を増大しても両波形が同一になることがない。

従って、比較する両波形の同一性を表わす概念を規定し、その量と遅延量 τ との関数を作ると、その関数は原波形が周期性の場合は、やはり周期性となり、原波形が非周期性の場合は、やはり非周期性となるのは明らかである。

この同一性を表わす概念を数学的に適当に定めることにより、周期性の有無の検出はもとより、電力スペクトル密度を算出する基礎とすることもできる。

この関数が相関関数であり、次式で表される。

$$\phi_1(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} g_1(t) \cdot g_1(t+\tau) dt \dots\dots\dots (1)$$

ここで $g_1(t)$ は、原波形を時間の関数として表わしたものであり、また $g_1(t+\tau)$ は、 $g_1(t)$ の τ だけ遅延せしめた関数で、 T は被測波形の時間的長さである。

(1) 式は、 $g_1(t)$ のみについてみたものであるため、自己相関関数と称し、また独立の二つの原波形の比較をするため次式の如き関数を作ることできる。

$$\phi_{12}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} g_1(t) \cdot g_2(t+\tau) dt \dots\dots\dots (2)$$

(2) 式を相互相関関数と称する。

この相関関数は、二つの関数の積であるため必ず $\phi(\tau) \geq 0$ であり、 $g_1(t) = g_1(t+\tau)$ すなわち $\tau=0$ の場合、または、 $g_1(t) = g_2(t+\tau)$ の場合に最大値をとる。

自己相関についてみれば、 $\tau=0$ の時 $g_1(t) = g_1(t+\tau)$

第1図 相 関 計 の 構 成

となり、 $g_1(t)$ にもし周期性があれば変数 τ が周期 θ の整数倍に等しくなった点で必ず、 $\phi(\tau)$ に極大値が生ずる。

一方、 $g_1(t)$ に周期性が全くなければ $\tau=0$ の点以外で極大値は生ずることなく、 τ が大きくなるにつれて $\phi(\tau)$ は、0 に収斂する。すなわち、非周期性の雑音は消去されてしまう。

従って、 $g_1(t)$ が周期性の信号と非周期性の雑音が合成されているものであった場合は、 $\phi_1(\tau)$ を計算してみると、 τ が充分大である範囲では、雑音成分が消去され周期性の信号成分のみがあらわれてくる。

また、相互相関についてみれば、 $g_1(t)$ と $g_2(t)$ が全く同一の波形であり、 $g_1(t)=g_2(t)$ ならば、前述の自己相関と同一になり、相互間に遅延 τ_1 があって、 $g_1(t)=g_2(t+\tau_1)$ ならば、 $\tau=\tau_1$ の点で極大値が生じる。また $g_1(t)$ に含まれる周期性信号分と、 $g_2(t)$ に含まれる周期性信号分との周期がもし同一の場合には、 $\phi_{12}(\tau)$ は、その周期ごとに極大値が生じ、 $g_1(t)$ と $g_2(t)$ が全く異質のものである場合には周期的な極大値は存在しなくなる。

以上の原理によって、測定波形 $g_1(t), g_2(t)$ を相関計にかけて相関関数を求めれば、前述の如き特徴を持った波形解析を行なうことができる。

§ 相関計の構成

相関計の原理的構成は、第1図の如くである。ここで注意を要することは、相関関数 $\phi(\tau)$ は、いうまでもなく τ の関数であるため、演算中に τ を変化せしめるのであるが、一方入力波形として取扱う $g_1(t)$ は時間の関数であるため、単に各演算素子を第1図の如く接続して、 τ を連続可変したのでは相関関数は求められない。

すなわち、まず、 $\tau=0$ に固定し、 $g_1(t)$ なる入力を入れて演算を行なって $\phi\tau=0$ を求め、次に τ をわずかならずせ、 τ_1 として固定し $g_1(t)$ を入れ $\phi\tau=1$ を求め、順次 $\phi\tau=2, \phi\tau=3, \dots, \phi\tau=n$ を求めて行く必要がある。

そのため、1 コの $\phi(\tau)$ を求めるためには極めて多数回、同一の $g_1(t)$ を演算回路に入れ、各回毎に、 τ を段階的に可変する。また、 $\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} dt$ という時間平均をとる場合、実際問題として、 T を無限大とすることは不可能であるので、誤差を大にしない範囲で有限時間の積分を行なわざるを得ない。

そこで $g_1(t)$ なる入力信号のうちから有限積分時間 $2T$ に相当する部分を切り取って波形記録装置に蓄積し、その再生を多数回繰返して行い、各回毎に遅延回路網を操作して、 τ をわずかなづつ、ずらせて行くのである。

§ 相関計の具体例

第2図の写真はソニー株式会社で商品化している、アナログ形磁気テープ方式の相関計 CCA-32 型である。この装置の規格性能は、第1表にまた、実際の演算実施例は第3図に示してある。

CCA-32 型は、磁気テープを利用して振動波形を忠実に記録再生し、かつ任意の遅延時間をとることを構造上の特徴としており、高性能のシリコントランジスタ式ア

第2図 相関計 CCA-32 型

第 1 表 CCA-32 の 規 格 性 能

規 格・性 能		型 式	
項 目		CCA-32	CCA-32W
チャネル数		2	2
記録方式		PWM	PWM
入力信号周波数		0~20c/s	0~100c/s
演算可能周波数		0.5~20c/s	2.5~100c/s
入力レベル		±1V peak	±1V peak
入力インピーダンス		5k Ω 以上 (不平衡)	5k Ω 以下 (平衡上)
テープ速度記録時		10cm/s	50cm/s
再生 (演算) 時		50cm/s	50cm/s
記録時間		約40秒	約 8 秒
使用テープ		12.5mm 巾, 計測用テープ	12.5mm 巾, 計測用テープ
遅延 (自動)		5m sec/回ステップで最大800回	1m sec/回ステップで最大800回
		10m sec/回ステップで最大400回	2m sec/回ステップで最大200回
		20m sec/回ステップで最大200回	4m sec/回ステップで最大200回
遅延 (手動)		最大 4sec の範囲で任意	最大 0.8sec の範囲で任意
電源電圧		AC 100V, 50 又は 60c/s	AC 100V, 50 又は 60c/s
消費電力		200VA 以下	200VA 以下
外形寸法		約幅580×奥行550×高さ1700mm	約幅580×奥行550×高さ1700mm
重量		約250kg	約250kg

計 算 例

A 信 号

B 信 号

A 自己相関

B・A 相互相関

B 自己相関

第 3 図 相 関 演 算 実 施 例

第4図 相関演算結果の代表例

ナログ演算回路の開発によって、第1図通りの構成を得ている。

解はペン書の記録計に表示される。

第4図は、本装置に表示された相関関数のパターンから原波形の性質を知るための手引きの一例である。

この種の相関計は、取扱い得る信号周波数範囲が、比較的狭く、かつ低い周波数の信号を扱うためには演算所要時間が長くなって実用度が低下する。これを防止す

るため、被測定波形の周波数変換を行なうと有利で、このためのデータレコーダを併用することが望ましい。

第5図は、周波数変換用データレコーダFMR-44型である。このデータレコーダは、直流から5kc/sまでの4チャンネルのアナログ信号を磁気テープに記録し、かつ2倍、5倍、10倍、1/2、1/5、1/10に周波数を変換することが可能であり、相関計の使用可能範囲が著しく拡大される。また、長時間にわたる現象をこのレコーダで記録しておき、その一部を抽出して順次に相関演算を行なうことができるので、現象の長時間にわたる変化を知ることが可能となる。第2表は FMR-44 型の規格性能である。

§ 相関計使用上の注意事項

相関演算は、(1)式(2)式で見られる如く、長時間にわたる定積分を必要とし、さらにそれを数百回も繰返えすため演算所要時間が相当に必要で、デジタルコンピュータで実施すると、段取り所要時間を含めると、数日から数十日間を要するといわれている。しかも演算が終了してからでないと、工業的な意味の有無が判明しない場合が多い。

従って解析したい原波形が多量にある場合には、高速度で、演算を行ない、相関の有無や、合目的性の有無を判断し、真に意味のある部分を抽出して、その部分のみに精密な再演算を実施すべきである。

CCA-32 型は、このように高速度で多量のデータを処理するための装置であり、一回の演算は、数十分から2時間程度で終了する。相関計の使用に当っては、このような高速な演算の必要性に充分の意を用いる必要がある。

§ 電力スペクトル密度の算出

波形解析の重要な一要素としてスペクトル分布を求める必要がある。フィルターを用いた、フーリエ解析法では、一般に周波数と振幅の関係を出すのであるが、相関関数を算出しておくとして次式によって電力のスペクトル分布を算出することが可能であり、これを電力スペクトル密度と称している。これは当然周波数の関数である。角周波を ω とすれば

$$\Phi(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(t) \cdot \cos \omega t dt \dots\dots\dots (3)$$

すなわち相関関数と $\cos \omega t$ との積の平均値をとったものであり、相関演算と類似の形をしているため、相関計と可変周波数の正弦波形発振装置とを利用して演算することが可能である。二つの装置は、商品化はされていないが CCA-32 型を利用して試作されている。

第5図 周波数変換用データレコーダ FMR-44

第 2 表 FMR-44 型 の 規 格 性 能

規 格 ・ 性 能

項 目	FMR-44	FMR-47	備 考
チャ ン ネ ル 数	4	7	
記 録 方 式	FM	左 同	
周 波 数 特 性	DC~5Kc/s±1dB	"	テ ー プ 速 度 76cm/s に て
	" 2.5Kc/s±1dB	"	" 38cm/s "
	" 1Kc/s±1dB	"	" 15.2cm/s "
	" 0.5Kc/s±1dB	"	" 7.6cm/s "
入 力 レ ベ ル	±1~10V Peak	"	連 続 可 変, 較 正 電 圧 内 蔵
入 力 イ ン ピ ー ダ ン ス	5KΩ (不 平 衡)	"	約 5 KΩ/V
出 力 レ ベ ル	±1V Peak	"	
負 荷 イ ン ピ ー ダ ン ス	600Ω (不 平 衡)	"	
信 号 対 雑 音 比	40dB 以 上	"	
歪 率	2 % 以 下	"	
零 点 漂 動	1 % 以 下	"	
テ ー プ 速 度	76, 38, 15.2, 7.6cm/s±0.3%	"	(30, 15, 6, 3in/s±0.3%)
ワ ウ ・ フ ラ ッ ク	0.15% 以 下 (RSM)	"	テ ー プ 速 度 76, 38, 15.2cm/s に て
	0.25% 以 下 (RMS)	"	" 7.6cm/s に て
使 用 テ ー プ	6.25mm (1/4in) 幅	12.5mm (1/2in) 幅	計 測 用 テ ー プ, 7 又 は 10 型 リ ー ル
連 続 記 録 時 間	15 分	左 同	テ ー プ 速 度 76cm/s 10 型 テ ー プ に て
	30 分	"	" 38cm/s "
	75 分	"	" 15.2cm/s "
	150 分	"	" 7.6cm/s "
電 源 電 圧	AC100V, 50 又 は 60c/s	"	
消 費 電 力	280VA 以 下	300VA 以 下	

§ 相 関 計 の 使 用 状 況

紡織工学に関しては(工業技術院)繊維工業試験所および各紡織会社において、糸の太さムラの研究に利用されているほか医学、電力工学、機械工学、車輛工学、航

空工学、造船工学、構築工学、土木工学、化学工学の各分野で広く使用されており、多数の研究発表がなされている。

(昭和40年4月7日受理)