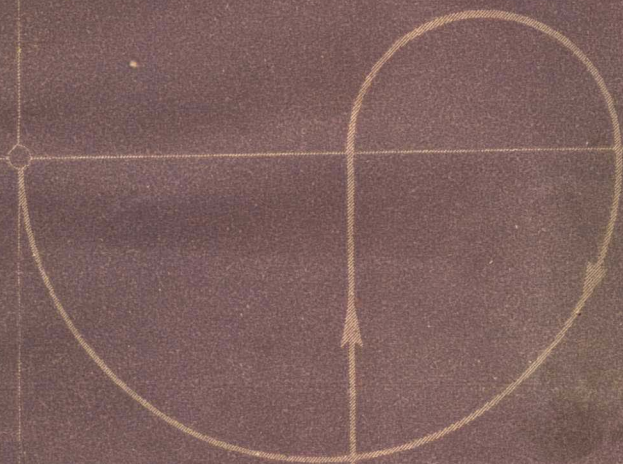


自动化丛书



工业电动调节器

——应用部分

[苏联] E. K. 克魯格 O. M. 米妮娜著 江建中译

上海科学技术出版社

工业电动调节器

——应用部分

〔苏联〕E. K. 克鲁格 O. M. 米妮娜 著

江建中 译

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书是“自动化丛书”之一。丛书内容包括自动学及远动学的理論,自动装置、元件和仪器的結構及应用等。丛书选题主要取自苏联及其他国家的有关資料,也包括国内編写的专题論著。本丛书由“自动化丛书編輯委员会”主編。

本书是本丛书 42 号的下册,內容从应用的角度来討論选择电动調节器时的工程計算方法,詳細地介紹調节对象的动态特性及参数的測定以及典型对象自动調节系統的动态性能、調节器类型及其整定参数的选择等。

可供从事自动化的工程技術人員及大专师生参考。

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИКИ

Е. К. Круг и О. М. Минина

Госэнергоиздат

自动化丛书(43)

工业电动調节器——应用部分

江 建 中 譯

自动化丛书編輯委员会主編

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路 450 号)

上海市书刊出版业营业許可証出 093 号

中华书局上海厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 787×1092 1/32 印張 4 10/32 排版字数 94,000

1965 年 5 月第 1 版 1965 年 5 月第 1 次印刷

印数 1—7,000

統一书号 15119·1812 定价(科六) 0.50 元

目 录

第1章 调节对象的动态特性及参数	1
1. 时间特性的测试	2
2. 频率特性的测试	7
3. 用统计法测试频率特性	13
4. 根据飞升曲线求微分方程的系数	18
5. 根据飞升曲线求对象典型特性的参数	34
6. 根据幅相特性求对象微分方程的系数	46
7. 根据幅相特性求对象典型特性的参数	52
8. 关于求调节对象动态特性及确定其参数的几点说明	59
第2章 典型对象自动调节系统的动态性能, 调节器类型及其整定参数的选择	61
9. 自动调节系统的最佳过渡过程	63
10. 过渡过程的品质指标	72
11. 一阶和二阶对象的自动调节系统品质指标及调节器参数整定	74
12. 滞后一阶对象的自动调节系统品质指标及调节器参数整定	88
13. 调节器类型的选择及其参数的整定方法	115
14. 考虑不同结构调节器的非线性特性时自动调节系统的过渡过程	123
参考文献	129

第 1 章

調節对象的动态特性及参数



選擇調節器的类型及整定其参数时，首先必須知道調節对象的动态特性。对于运行中的工业对象，用实验法测得的数据最为可靠。因为工业对象通常是用高阶非线性微分方程描述的复杂物理系统，因此，要根据这些对象的结构和物理参数，用分析法求它的动态特性并使特性线性化，是极其复杂的问题。所以，这种方法只能用来研究新建对象的动态特性。

調節对象动态特性的测试法适用于稳定的或“中性”的物理系统，可以由几个典型环节串联而成。包含振荡环节的工业对象实际上极为少见，因为在设计时，对象参数一般都选得使它具有好的阻尼性能。所以，工业对象可看成是由几个一阶环节（非周期环节和积分环节）和纯滞后环节串联组成。

目前已有好几种测试调节对象动态特性的方法：

1. 在系统上人为地加一个功率比干扰量大得多的非周期信号（一般都以调节作用的阶跃变化作为这种信号），来测定对象的时间特性；
2. 在系统上人为地加入不同频率而幅值比干扰量大得多的周期信号来测定对象的频率特性；

3. 在系統上人为地加入幅值与干扰量相当的正弦波訊号,亦能測定頻率特性;

4. 利用正常操作过程中的扰动,而不是加人为扰动的方法来求对象的动态特性。

本章将詳細介紹前三种方法。而以分析对象对操作过程中出現的外扰反应情况来确定对象动态特性的方法,到目前为止,只用于生产貴重产品及自衡性能較差的对象。要进行这种分析,暂时还是十分困难,因为它要求先掌握很多試驗数据,而这些数据的計算和处理,沒有专用的机器(相关器)是无法實現的。

用下述方法可求得对象的时间 and 頻率特性,并以几个典型环节串联的特性来逼近这些特性并确定其参数。

1. 时间特性的測試

在調节作用产生阶跃变化时,被調量与时间的关系,称为对象的时间特性,或叫飞升曲綫。

在實踐中,往往由于工艺上的限制(被調量的最大偏差值不許过大),不可能測繪出整条飞升曲綫。这时,只能进行所謂脉冲飞升曲綫的測試。这条曲綫是当調节作用变为脉冲訊号时所測出的被調量与时间的关系。

实际上,由于調节机构或其他装置慣性的影响和移动速度的限制,通常測得的是“畸变”飞升曲綫或“畸变”脉冲飞升曲綫^[25, 26]。

測試綫路 首先,确定复杂对象(工艺过程取决于各种不同的参数)的被調量和調节作用,然后,依次找出每一調节作用与各被調量的关系。这时,另一些調节作用和被調量,应尽可能用調节器或手控的方法保持恒定,以免影响測試結果。

測試時，對象的負載必須穩定。譬如，在圖 1 所示的系統中，被調量 φ_1 和 φ_4 用調節器 P_{et_1} 和 P_{et_4} 保持恒定。而調節作用 μ_3 (手控)，是當 μ_2 階躍作用的情況下，在測試被調量 φ_2 、 φ_3 的飛升曲線時，用來穩定工況之用^①。這一階段的工作應該同現場操作人員一起進行，同時也要吸取類似對象自動化的經驗。

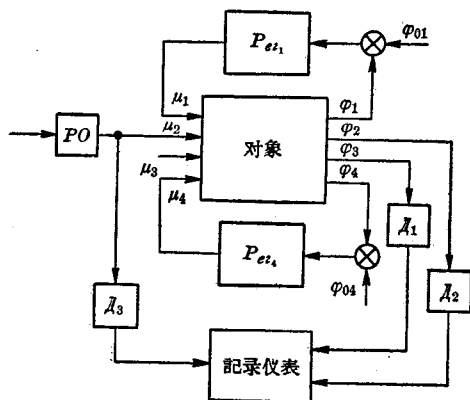


圖 1 對象飛升曲線的測試線路圖

P_{et_1} 、 P_{et_4} —調節器； A_1 、 A_2 、 A_3 —變送器； PO —調節機構

試驗時，正確選用被調量和調節作用的測量^② 儀表，是一個很重要的問題。上述各量的測量與記錄必須用高靈敏度和快速作用的儀表（儀表的時間常數應比對象的時間常數小得多）測量。關於這一點，可以根據儀表的數據，或者根據估計，或者根據試測的結果來加以判斷。

一般說來，變送器最好是採用慣性小的。如果這樣做有

① 測試飛升曲線時，相對於被調量 φ_2 和 φ_3 的對象處於開環狀態。——原注

② 原書為 *изменения*。

困难，則在測定特性時，必須採用組成自動調節系統時所用的變送器和記錄儀表。這時最好是測試對象、變送器和記錄儀表的總飛升曲綫。

對大多數工業對象的参数，建議採用 $\Theta\Pi\Pi-09$ 型多點自動記錄電子電位差計（滿刻度行程時間不超過 1 秒，記錄周期 0.75 秒，記錄紙速 24 毫米/分，測量範圍 1 毫伏）進行記錄，而快速工藝过程的参数需用振子示波器（記錄帶或紙速 5 毫米/秒或更大一些）來記錄。

調節作用的选择 根据不同的具体条件，可以直接用調節作用（加熱或冷却介质的流量、燃料和液体量等）、也可用調節机构的位置或輸入執行机构的訊号作为調節作用。后两种情况只有当調節机构或執行机构也用于这一對象的自動調節系統中才是合适。

如果已知對象調節作用的变化範圍很大，則必須在調節作用的不同初始值上進行特性的測試，因为这时的特性可能是非綫性的。通常，不可能在調節作用的整个变化範圍內使系統綫性化，因为当調節作用改变时，可能改变的不只是對象的参数，而且其結構特性也会变化。

上述現象可能产生在程序（被測量已經給定）和對象外扰作用变化範圍較大的自動調節系統中。

如果工藝上允許，儀器亦能滿足要求，則一般都是測取飛升曲綫，亦即採用階跃式調節作用（圖 2a）。若工藝上要求在對象測試过程中被測量只能在小範圍內变化，則只能測取脉冲飛升曲綫。這時，調節作用的波形如圖 2b 所示，其中 t_n 是作用的持續時間。当調節机构的位置不可能瞬時地改变时，則測到的為畸变飛升曲綫。這時，調節作用的波形如圖 2c（改变調節作用的裝置为一阶非周期环节）和圖 2d（調節作用

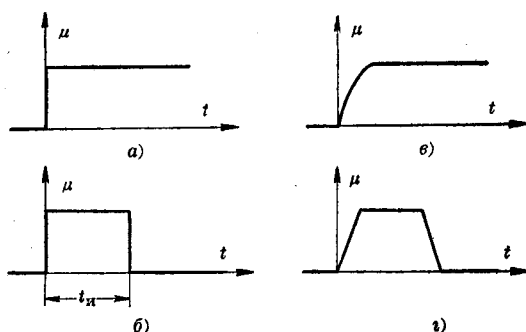


图 2 调节作用的波形

的变化速度有限)所示。

选调节作用幅值时，必须考虑到操作过程中最大可能的扰动量、特性的非线性度和干扰的大小等。扰动量一般可取为最大值的 5~20% (增大扰动时，可能因为特性的非线性而使测试结果不准确，而减小时，则在存在干扰时，难于处理结果)。

试验步骤 首先，需要根据欲测被调量，使对象状态稳定。当调节作用的初始值选定后，应保持对象的被调量数值恒定。一般可用稳定外扰及稳定对待测参数有影响的其他被调量和调节作用的方法，来稳定对象的状态。保持工况稳定的时间长短，取决于对象的动态特性。对象过渡过程时间愈长，这个时间亦应愈长。这个时间可从预试验中预先知道。

然后，需要检查新的稳定状态(即改变调节作用后的稳定状态)的稳定性。新的工况必须经过与上述类似的稳定过程。

对象工况稳定后，即可测试特性。先就调节作用某一初始值，按其已定的幅值进行二至三次测试，记下相应的被调量和调节作用值。然后，取调节作用的另一初始值，进行类似的

測試。

試驗結果的處理 加阶跃扰动时，試驗所得的被調量波形即为時間特性，或称飞升曲綫。图 3a 为自衡对象的飞升曲綫，而图 3б ① 为无自衡对象的飞升曲綫。

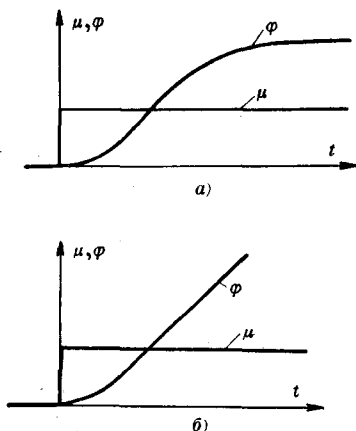


图 3 飞 升 曲 綫

当加脉冲扰动时，即得脉冲飞升曲綫(图 4，曲綫 φ^*)。

如果对象是綫性的，則飞升曲綫 $\varphi(t)$ 与脉冲飞升曲綫 $\varphi^*(t)$ 的关系可表为

$$\varphi(t) = \varphi^*(t) \quad \text{当 } 0 \leq t \leq t_n$$

$$\varphi(t) = \varphi^*(t) + \varphi(t - t_n) \quad \text{当 } t > t_n$$

式中， t_n 为測試 $\varphi^*(t)$ 时的脉冲扰动持續時間。

因此，可用下述方法，按試驗脉冲飞升曲綫求作飞升曲綫。一般說来，經過 t 時間后，脉冲飞升曲綫 $\varphi^*(t)$ 趋于某一恒定值(对自衡对象为零，而对无自衡对象不等于零)。这个

① 原书为图 3б。

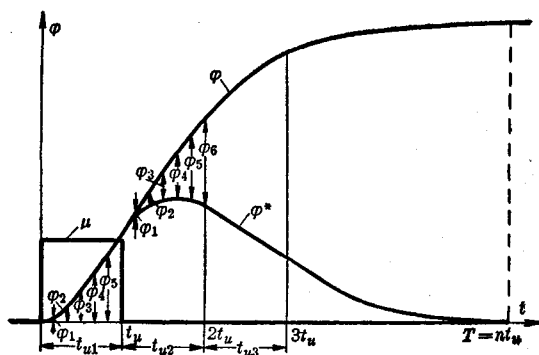


图 4 脉冲飞升曲线

值相应于脉冲扰动作用消失后的稳定工况。取足够大的自然数 n ，使脉冲飞升曲线在 $T = nt_u$ 时间内，实际上可达到其极限值。然后，将 0 到 T 这一段时间轴 t 作 n 等分，即 $t_{n1} = t_{n2} = t_{n3} = \dots = t_{nn} = t_u$ 。在 t_{n1} 这段时间内，飞升曲线 $\varphi(t)$ 与脉冲飞升曲线 $\varphi^*(t)$ 重合。若要作 t_{n2} 这一段时间里的曲线 $\varphi(t)$ ，只要把这一段中曲线 $\varphi^*(t)$ 的纵坐标加上相应于 t_{n1} 中（即超前 t_u 时间）已作出的曲线 $\varphi(t)$ 的纵坐标即可。这样，我们就可以在 t_{n2} 中曲线 $\varphi^*(t)$ 的纵坐标上加上 t_{n1} 中曲线 $\varphi(t)$ 相应的纵坐标之后，作出 t_{n2} 中的曲线 $\varphi(t)$ ，等等。依此类推，即可在 $0 \leq t \leq T = nt_u$ 这段时间内作出飞升曲线 $\varphi(t)$ 。当 t 值很大时， $\varphi(t)$ （图 4）趋于常数（对自衡对象）或趋于角系数为 1 的线函数（对无自衡对象）。

2. 频率特性的测试

测试频率特性的工作量比时间特性要大，所花的时间也更多。但是，频率特性能较准确地反映对象的动态性能^[26~29]。

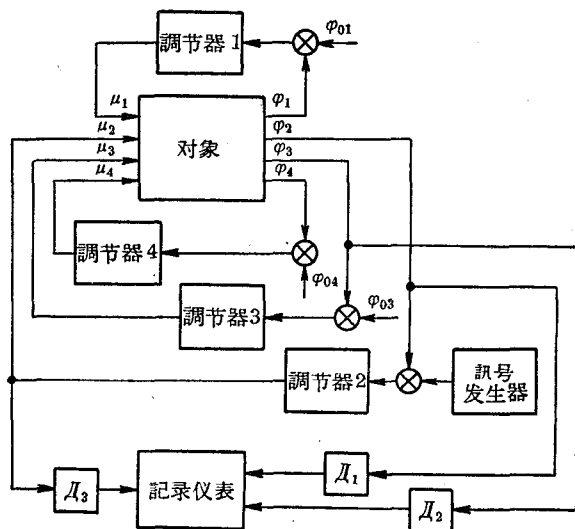
此外,用頻率法分析自動調節系統時,能更有效地利用頻率特性的圖表,即不必求算其分析式。這一點對於無法取得表示動態特性分析式的複雜對象更為重要。

在穩定的系統上加入周期振蕩後,記下對象輸入、輸出端的振蕩,就可作出對象頻率特性。實際上測試對象的飛升曲綫和頻率特性時,系統並未經過調節器形成閉路(系統開路),這樣經常遇到的困難是被調量的平均值不穩定。這個缺點在研究無自衡或自衡性能較差的對象時更為突出。被調量平均值的偏移,使試驗難於持續很久;很難選擇一個能使對象中的過程不致破壞的振蕩幅值。因此,在這種情況下,最好是作出閉環系統的頻率特性。

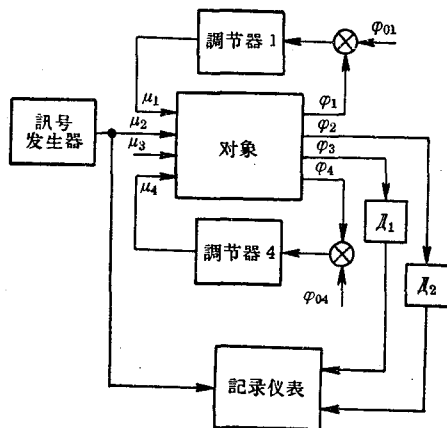
加給系統的周期振蕩,可以取正弦波或矩形波。

要取得諧波振蕩,雖然需要專門的低頻正弦波發生器,但試驗過程相當簡便。而矩形波振蕩(在文獻 [26, 29] 中稱為“矩形波”法)較易得到。其缺點不僅在於需要進行附加的計算,而且實驗數據的直觀性也差。在諧波作用下,穩定振蕩對諧波振蕩的偏差,不是說明了有外擾作用,就是說明了對象特性是非線性的。如果用“矩形波”法來測試特性,則系統中穩定振蕩的波形不僅與系統的動態特性、而且與所加非諧波振蕩的頻率有關。這時,要確定外擾作用和系統非線性的影響就比較困難。

測試綫路 測試頻率特性時,對象被調量和調節作用的測試步驟,以及穩定對象工況的過程與測試時間特性時相同(參閱第1節)。圖5的測試綫路與圖1唯一不同點,在於多了一個周期振蕩發生器。圖5a對於被調量 φ_2 、 φ_3 來說,是用調節器2、3組成的閉環系統,而圖5b是開環系統。在圖5a中,振蕩發生器接在調節器2的輸入端;但一般來說,發生器可根



a)



b)

图5 对象频率特性的测试线路图

据試驗需要接在被調量 φ_2 、 φ_3 回路中的任意点上。与 φ_2 、 φ_3 值, 及調节机构位置相应的訊号, 应接入記錄仪表。

如上所述, 对象頻率特性最好是在閉环系統中測取。如果被測系統的靜态誤差为零, 則被調量 φ_2 和 φ_3 (图 5a) 的振蕩波形平均值与沒有諧波振蕩时調节器 2 和 3 所应保持的一样。这样, 就容易使系統稳定。同时, 測試无自衡对象的頻率特性时, 也不会破坏工艺过程。

选择被調量和調节作用記錄仪表的方法与第 1 节类同。

調节作用的选择 一般采用的調节作用波形为正弦波 (图 6a) 或矩形波 (图 6б)。但是前面已經指出, 瞬时地或接近于瞬时地改变調节作用并不现实。所以, 在試驗时可能得到的不是矩形波, 而是梯形波 (图 6в)。然而, 試驗的实质并不因此而改变, 只是增加处理实验結果的工作量而已。这一点在后面的叙述中可以看出。

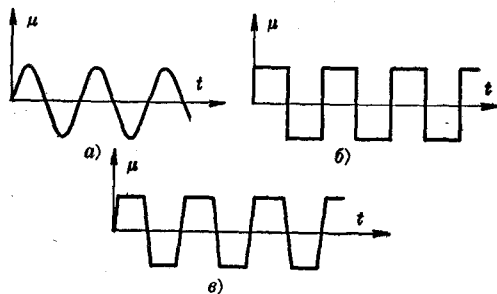


图 6 調节作用的波形

調节作用初始值及其幅值的选择, 可根据第 1 节介紹的原則进行。求作特性的頻带范围与对象的动态特性有关。为了确定这一頻带, 必須求出通过对象的振蕩頻率极限值, 即最大頻率值 (ω_{max})。当調节作用振蕩頻率等于 ω_{max} 时, 被調

量的振幅就趋近于零。从 0 到 ω_{max} 这一频带范围内的频率特性,已相当圆满地描述了对象的动态特性。

試驗步驟 首先,必須象測試時間特性一样(參閱第 1 节)使对象工况稳定。但在測試閉环系統的特性时,这一步工作将大为简化。

为了确定频带范围,需先求出最大频率。为此,在已定的系統初始状态下,逐渐增大調节作用的振蕩频率,直到被調量的幅值接近于零(比 $\omega=0$ 时的幅值小 20~100 倍)。然后把 0 到 ω_{max} 这一频带大体上分成 5、10 段,相邻各段的交接点相应为 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 、…。在已定的初始状态下,把选好的频率为 ω_1 的周期作用加給系統,并記下被調量和調节作用的稳定振蕩(不少于 2~3 个周期)。然后,改变作用频率,对 ω_2 、 ω_3 、 ω_4 、…重复上述試驗。

如果已知对象的动态特性与系統的初始状态有关,則必須在另外一些初始状态下重新确定最大频率,然后进行上述試驗。

試驗結果的处理 当加給系統的訊号为正弦波时,得到的結果是各种频率 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 、…、 ω_{max} 的被調量和調节作用的波形。对于稳定状态下的綫性系統, $\varphi = A \sin(\omega t + \psi)$, $\mu = B \sin \omega t$ 。这时,需确定幅值比 $r = \frac{A}{B}$ ^① 和相位移 ψ , 然后作幅相特性(參閱本丛书 42 号第 1 章)。

对于“矩形波”法,被調量和調节作用的波形为复杂的周期曲綫。这时,必須把这些曲綫用近似法分解为傅里叶級数加以处理。

① 原书为 $\frac{B}{A}$ 。

在稳定振荡条件下, 波形曲线可代以下列级数

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= A_0 + A_1 \sin(\omega t + \psi_1) + A_3 \sin(3\omega t + \psi_3) + \dots \\ \mu &= B_0 + B_1 \sin(\omega t + \psi'_1) + B_3 \sin(3\omega t + \psi'_3) + \dots \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

该级数仅包含频率 ω 的奇次谐波, 因为激励振荡为矩形波或梯形波。为了求该级数的系数, 从波形上截取一段曲线 (相应于 $\frac{2\pi}{\omega}$), 并把它十二等分, 求出各分点上的纵坐标: $y_0, y_1, y_2, \dots, y_{11}$ (图 7)。然后按表 1 的格式计算各纵坐标之和 (s_K, σ_K 和 β_K) 与差 (q_K 和 γ_K)。

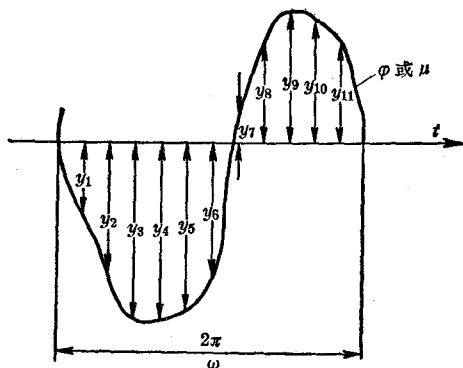


图 7 用分解为傅里叶级数的方法处理波形

表 1

士	y_0	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	s_0	s_1	s_2	s_3	q_1	q_2	q_3
	y_{11}	y_{10}	y_9	y_8	y_7			s_6	s_5	s_4		q_5	q_4	
和 差	s_0	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	σ_0	σ_1	σ_2	σ_3	β_1	β_2	β_3
	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5			γ_0	γ_1	γ_2				

因为在一般情况下,对象不让高频分量通过,因此,只要确定该级数的前三个系数(即取前三项)即已满足要求。这些系数用下列公式确定

$$\begin{aligned} A_0 \text{ (或 } B_0) &= 0.083(\sigma_0 + 2\sigma_3 + \sigma_1) \\ A_1 \text{ (或 } B_1) &= 0.408\sqrt{(\gamma_0 + 0.5\gamma_2 + 0.866\gamma_1)^2 + (\beta_3 + 0.5\beta_1 + 0.866\beta_2)^2} \\ A_3 \text{ (或 } B_3) &= 0.408\sqrt{(\gamma_0 - \gamma_2)^2 + (\beta_1 - \beta_3)^2} \\ \psi_1 \text{ (或 } \psi'_1) &= \arctg \frac{\gamma_0 + 0.5\gamma_2 + 0.866\gamma_1}{\beta_3 + 0.5\beta_1 + 0.866\beta_2} \\ \psi_3 \text{ (或 } \psi'_3) &= \arctg \frac{\gamma_0 - \gamma_2}{\beta_1 - \beta_3} \end{aligned} \quad (2)$$

就用这种方法来处理不同频率下得到的所有波形。取幅值之比 $r = \frac{A}{B}$ 和相位移 $\psi - \psi'$ 后,即可直接作出幅相特性。

必须指出,低频 ($\omega_1, \omega_2, \dots$) 下的试验结果,有时也可用来求取高频 ($3\omega_1, 3\omega_2, \dots, 5\omega_1, 5\omega_2, \dots$) 的数据。这些数据 ($A_3, B_3, \psi_3, \psi'_3$ 等) 就作为校准幅相特性用。

3. 用统计法测试频率特性

上一节介绍的频率特性测试法有一个突出的缺点,即:如果在试验时,对象受到干扰的作用,则对象输出端谐波振荡的记录或者根本不可能,或者只能记录低频部分。尤其在高频下,当输出振荡的幅值与干扰量相当时,测量精度就大大降低。而用统计法,即使在干扰量较大时也能求出虚频和实频特性^[30]。

如果调节作用为正弦波 $\mu \textcircled{1} = f_1(t) = B \sin \omega t$, 则被测量

① 设 μ 和 φ 的读数从稳定状态起算, —— 原注