プロセス制御最近の進歩

——昭和32年4月18日特別講演——

ユニバーサル・オイル・プロダクトCo. D. M. Boyd

高橋 安人 訳

要旨：—プロセス制御には制御の目的をはつきりつかんで設計をする必要がある。制御方式として空気信号の代りに電子信号を用いる方式が進歩した。両者の優劣を比較するのに周波数応答法によると、空気方式は長い伝送管を用いなければ電子方式に劣っていない。しかし実用に際して温度制御のようにおそい系では電子式が断然すぐれている。これは空気式のような機械的装置は不動帯（ヒステリシス）の幅が広く、これが特に微分動作に悪い影響を及ぼす。このことは全電子式と自動平衡電位差計式とを実験的に比較することにより確かめられ、この点については新型全電子式が最もすぐれている。

プロセス制御工業界には面白いことが少なくも一つある。それは明白な答が常に正解とは限らないということである。

たとえば、新しい技術者や工員へ教えるときに、液面調節が液面を調節するためではないということをはわからせるにはとても骨が折れる。この分野への新人はとかく液面調節器を液面をきつかり一定に保つように調整しがちであるが、そうすると出る流が非常にふらつくものになる。このふらつきは後続のプロセスをひどく乱すことになりがちである。こんな場合には流を一定にすることの方が貯槽の液面を一定にすることよりもずっと大切なものである。

近年になつてこの類のわけのわからぬことの例がまた一つ現われた。それは私共がロックアイランド製油会社にはじめて図示パネルをつくつた理由がパネルに絵を描くためだったと信ずる人が意外に多いということだ。このパネルを設計した主たる理由はつぎのものだった：

- (1) 全製油所のコントロールを一室に集中すること。
- (2) 制御する場所から遠くなるので制御装置はそれぞれの場所に散在させ検出値をパネルまで伝送する方式を考える必要がおこつたこと。
- (3) 既存の制御室が小さいので小型計装機器を必要としたこと。25の機器の占めた場所へ83台の機器をつけなければならなかつた。
- (4) 小型機器の使用によりスペースができたので

製油の諸単位の制御をフロー線図流に区分けできたこと——従来は温度、圧力、流量、液面などをずらりと列にならべていた。

これまでとは異なるとつと小型の機器を使つたので、一つの調節器から他の調節器への関係が一目でわかるような簡単なプロセス線図に沿つて機器を配列できることがわかつた。この機器は従来のものより融通性があつて速い制御系では動作を速くするために調節器を操作弁のところに置くことができた。

図示パネルの絵はしやれた香水びんのようなものだった。そのおかげで中味が売れた。しかし余りにも多くの人が絵にまどわされて、この方式のパネルの根拠とする二つの点をみたまないものをこしらえては図示パネルと称した。

調節器の悉くを非常に詳細なフローシートへならべたので簡単な骨組図の場合と違つて場所も余計に要るし作業員を助けるどころかかえつて混乱させる場合がよくおこつた。

さて現在考えられているのは空気信号の代りに電子信号を使う新型制御方式である。

電子工学とさくと多くの人は何となく惹付けられ、電子工学的には何でもかでも光の速さで達成されるという夢をもつ。しかし何事でもどんな方式がよいか決める前に比較を試みるのがかんじんだ。

近年における自動制御最大の業績はサーボ機構界の周波数応答法がプロセス制御工業へ応用されたことである。周波数応答法とステップ応答法の長短は何だかだと論議されようが、周波数応答法がプロセス工業へ

通信手段を与えたことは忘れてならない重要な事実である。そのおかげで今や一つの制御系と他とを定量的にはつきりくらべることができる。

電子式調節器と現在使われている空気式調節器の性能を比較するために、市販のもの各2につき周波数応答試験を行った。

この試験では空気圧正弦波を流量発信器に加え第1図に示すように10インチのダイヤフラム弁への調節器出力圧力を記録した。このようにして発信器から弁頂部圧力にいたる測定値により電子式と空気式の性能線図が得られた。

第2図が電子式2台と空気式2台の周波数応答の比較である。空気式については調節器と現場の間に相互に太き $\frac{1}{4}$ インチ、長さ100ftの伝送管系がある場合とない場合とをしらべた。図示の振幅比と位相

第1図 電子式と空気式調節器の試験装置配列

第2図 周波数応答曲線の比較

電子式調節器と弁頂および計器盤に取付けた空気式調節器

第3図 周波数応答曲線の比較

おくれをみると、電子式の性能は弁へ直結した空気式ほどよくはないが、100ft離れたところにある制御盤につけた空気式よりは優れていることがわかる。

電子式ときくと性能がすばらしく速いかの感じをもつが、それはこの結果により破られてしまう。伝送とか制御動作自体は瞬時的の速さでも、空気で動かす弁がついており、電子式調節器付属の空気パイロット装置は、特に空気式調節器が弁頂に直結された場合に匹敵する空気処理能力をもっておらなかつたのである。第3図に示すように、調節器と弁の間に僅か6ftの $\frac{1}{4}$ インチ銅管をいれただけで、空気式の性能は電子式と同程度まで下つてしまう。制御系の1構成要素がおそいと系全体がのろみになるのである。

ところで、周波数応答試験結果によると電子式による性能向上が予期されないのに、実際のプラントの制御成績は電子式の方が空気式よりはるかに優れてい

た。これはどういうわけだろうか？

制御記録を仔細に検討した結果によると、

第4図 分留塔配列

流量制御とか圧力制御のような速い系では電子式がこれに対応する空気式にくらべさして優れた結果にならないのに対し、温度制御のようにおそい系では断然優秀な結果を与えた。

そこで電子式制御系の性能をもつとよくしらべるために UOP プラットフォーム装置の前段分溜塔の

塔頂温度制御系をくわしく検討した(第4図)。これは電子式で完全に計装した装置であつた。

この系では温度調節器は分溜塔の上から出る蒸気管につけてあつた。この温度調節器は還流管につけた制御弁を操作して塔へもどる低温還流量を支配した。還流管には塔へもどる還流量を記録する流量計がつけて

第 5 図 分溜塔の周波数応答

第 6 図 塔 頂 温 度 と 還 流 量

第 7 図 塔 頂 温 度 と 還 流 量 の 詳 細

あつた。この制御問題の力学をもつとよくつかむために、この系の周波数応答試験を行つた。(第5図)。すなわち制御弁の開きを振揺して調節器出力を読んだ。調節器は積分、微分動作を切り比例帯を5%にしておいた。

こうしてこの系は三つの時定数とむだ時間よりなることが判明した。三つの時定数はそれぞれ0.55, 0.2, 0.26分でありむだ時間は0.025分だつた。

第6図が数時間にわたる調節器の温度記録である。これによると負荷が(還流の記録が示す通り)15~20%に亘る変化をしているにもかかわらず温度は一定に保持された。この温度調節器の機能をもつと詳しく評価するために、実験室用高速鋭敏記録計をつけてみた。(第

7図)。その記録は温度が 200°F のなかで $1/50^{\circ}\text{F}$ すなわち $1/1000$ まで本当にきつかり保たれていたことを示した！もつと驚嘆に値するのは還流量と温度記録との相関である。図示の曲線の点1では温度が一定、還流量も一定だった。ところが温度がある速さで上りはじめると（点2）。それが止む点3までは調節器の微分動作により還流量が上昇している。ここでまた温度が一定になると（点4）、微分動作が止んで還流量は下降した。そして点5に至り温度が下りはじめるとそれをくい止めようとして還流量はぐつと下つている。

すなわち温度を $1/50^{\circ}\text{F}$ の幅におさめるために調節器は数千分の一度の温度変化にまで応動している。この事実こそロックアイランドのプラットフォーム装置の電子式制御の優れた結果を最も雄弁に説明するものである。

自動調節器は希望値と実際値との偏差が検出されなければ訂正動作をおこなうことができないことは自明の理である。第8図によると調節器は、それがいかに速いものでも、図示の時間 T_1 すなわち温度偏差が不動帯の幅に達するまでは訂正動作を開始しない。もし不動帯をへらすと T_2 ですでに動作をはじめ訂正量がずつと少くなる。

温度調節器の不動帯（ヒステリシス）をしらべるために新型全電子式調節器と旧型の自動平衡電位差計式との感度試験を行つた。この試験には毎秒0.1サイクル

第8図 制御動作をおこなうまでの時間への不動帯の影響

第9図 感度試験装置

ルに調整した電子式正弦波発生器を用いた(第9図)。この発信器出力は温度調節器の熱電対接続端子へつなぐ前に百分の一に減衰し、発信器からの1ボルトの出力が熱電対端子へは百分の一ボルトとなつて加わるようにした。

第10図 感度試験結果

調節器は最高のゲインに調整し、その出力は増幅後2ペン記録計の一つのペンへ送つた。も一つのペンには比較のため発信器出力を描かせた。

第10図は全電子式温度調節器に対する試験結果である。これによると 8×10^{-6} ボルトの入力に対する出力は入力にきれいに再現している。入力を百万分の四、二、一と下げるにつれ予想通りノイズレベルが高くなつてくる。しかし最小の入力値に対してさえ出力は入力に応答している。

自動平衡電位差計式では第11図のようにかなり異つた結果が出た。この装置は 8×10^{-6} ボルトの入力にも追尾しておらない。図示の通り入力が最小値に

第11図 感度試験結果

第12図 アナログ試験結果

第13図 アナログ試験結果

なると出力も最小になるが、入力に向きをかえて $\frac{2}{3}$ だけでもどるまで出力は不変に保たれている。入力をもつと小さいと出力は入力に関係をもつというよりはむしろでたらめの値になつてしまう。

自動平衡式¹⁾にみられる不動帯のこのような作用は入力信号をく形波に変えてしまう。この種のく形波は微分動作へ非常に悪い影響を及ぼす。

ヒステリシスが微分動作へ及ぼす作用を検討し、また微分動作の理論的效果をみるためにアナログ計算機²⁾試験を行つた。この試験では四つの等しい時定数をもつプロセスに相似の4目盛の大きさの外乱を加えた。

第一のテストは比例制御だけの場合である。(第12図)。この結果によると比例帯の大きさは外乱の大きさの $\frac{1}{4}$ (4目盛の外乱に対し1目盛の大きさ)のオフセットを生ずるものがよい。このとき振動周期は $2\frac{1}{2}$ 目盛であつた。

第2のテストでは微分動作を導入した(第13図)。この場合はオフセットが外乱の10%になるまで比例帯をせばめることができ、振動周期も僅か1目盛になつた。換言すれば微分動作の導入により比例帯と振動周期が共に $\frac{1}{2.5}$ にへつた。これはたしかに全体の成績の大幅な改善である。

ところが。調節器内の微分機構の直前へ、つまり市販の機器で機械的動きを含むものでヒステリシスのおこると同じ場所へヒステリシス素子を入れると、第3のテスト(第14図)のようにその影響が現われる。このテストでは僅か1%の半分のヒステリシスを加えただけであるのに、比例帯を倍増してもなおかつ系は不安定となる。

微分動作の効果を発揮させるには一般に微分動作をプロセスの長い方の時定数に合せる。ところがヒステリシス過大の調節器では微分動作を長い時定数に合わせると実際のプロセス変動に際し飽和したり過調整しがちとなり、大抵は不安定になるので実際のプロセス時定数から必要とされる大きさよりも低い動作調整値におとさなければならなくなる。要するに微分動作による正味のゲインの利得と振動周期の短縮とはごく僅かなものになつてしまう。

希望温度からの偏差を検出するためにプロセス温度を伝送するさい機械的動きを使う調節器ではいつもプロセス温度の僅かな変化に対しては応答が比例しないために微分動作に関連する障害を伴う疑がある。

第14図 アナログ試験結果

比例+積分+微分

最近までは市販の温度調節器の大部分のものは微分のものには微分動作素子の直前にある種の機器的動き、またはリンクがあつたので、その結果として理論とおりの制御動作を発揮できなかつた。もちろん互に多少の優劣はあつたけれど、微分動作の前分動作の前方に機械的動きをもたない新型全電子式に大刀打ちできるものは一つもなかつた。上に第7図に示した結果こそこれを立証する事実である。

温度制御問題の大部分は温度測定に熱電対を使うものであるので、今やわれわれは機械的動きを含む設計の温度調節器はなるべく避ける次第である。その理由は前にも記したとおりつぎの諸点である。

1. 機械的動きを使うと動く部分のガタ、摩擦のために温度調節器の限界感度が下る。その結果として調節器が訂正動作を発動する前に変らなければならない温度幅が大きくなる。
2. 機器的動きを使うと微分動作素子へ送入されるプロセス温度変化速度が歪曲され微分動作の効果を減殺する。

1) 訳者注 原文では“サーボ平衡式”とよんでいる。

2) A. R. Aikman からの私信。

Recent Advance in Process Control

by D. M. Boyd.

(Universal Oil Products Co.,)

SYNOPSIS:—It is very important for designing process control system to comprehend the purpose of control. A new type of control system, which uses electronic instead pneumatic, is being developed. In the frequency response test, pneumatic controllers without long tubing are as good as electronic controllers. But the use of electronic controllers improves the performance of plant especially in slower system such as temperature control. This is due to the fact that the dead zone of the controllers using mechanical links has bad effect on the derivative unit, and that new all electronic controllers without dead zone have best performance in this respect. It is confirmed experimentally by using analog computer.

書 評

熱 管 理 技 術 講 義 (全改訂版)

中央熱管理協議会編 昭和32年6月1日発行

丸善株式会社発行 A5判 440頁 価680円

「熱管理技術講義」はすでに昭和28年に第1版が発行され、爾來版を重ねること第5版に達したが、最近の著しい技術の進歩発達に即応して今回、その内容に増補改訂を加え、全改訂版第1版として発行された。

すなわち近時目覚ましい進展をみてる熱設備、たとえば石炭ガス化工業における微粉炭ガス化炉、高压ガス化炉、さらに重油ガス化炉を新に加えたほか、蒸汽缶、乾燥装置などにも新規型式のものが追加記載されている。

またオートメーションの発達に対応して、計測関係において、自動制御の理論並びに各種制御装置を追加した。そのほか、蒸溜、蒸発、乾燥並びに乾溜装置の熱管理、熱精算方式については全面的に増補されているとともに、各項目について増補改訂を行なっている。

記載項目は従前と同様で、

I 熱管理概論, II 燃料概論, III 燃料試験方法, IV 熱および蒸汽, V 燃焼計算, 熱精算
VI 燃焼方法および燃焼装置, VII 計測方法および計測機器, VIII 窯炉, IX 炉材, X 蒸汽缶
XI 蒸発, 蒸溜, 乾燥, XII 乾溜, XIII ガス化, XIV 保温材
の14章に及んでいる。

昭和26年熱管理法が制定され、熱管理士の制度が確立されて以来、今日までに約5,500人が熱管理士の資格を持つにいたっており、わが国産業の発展に寄与しているところは大きいものである。

最近当局から発表されたわが国の長期エネルギー需給の見透しをみても解るとおり、今後のエネルギー需要の増大に対応して莫大なエネルギー源の輸入を必要とする事情にあり、エネルギーの消費効率の向上は産業人に課せられた重要な課題となっており、熱管理技術の重要性はますます大きくなってきた。

本書は熱管理に関する主要事項を網羅しており、すでに熱管理技術の研修に教材として用いられているが、加うるに熱管理士受験準備書としても最も適当しているもので、熱管理技術を修めんとする方を始めとして、熱管理に関係ある各種の業務に従事される方々の好伴侶であり、必読をおすすめするものである。

(燃料協会参与員 新村 唯治)