

品質工学を用いた増幅回路の安定化設計法

青木 博夫*

Robust Design of Transistor Amplifier Applying Taguchi Method

Hiroo AOKI

Today, development of electric apparatus using simulators is widely spread. However, it is doubtful whether high reliability design is carried out only by the simulation methods. Quality engineering is the knowledge/methodology known as Taguchi methods applied to various fields. So this paper describes that combination the simulation and the Taguchi methods is useful to robust design of electric circuit. From the result it was clarified that the factors of ratio of bias resistors is most affect SN ratio. In regard to the sensitivity, collector current and load resistance are significantly affect.

キーワード：増幅器，温度試験，パラメータ設計，割付表

1. まえがき

電子製品の開発に関しては現在、シミュレーションツールを活用しながら回路設計からさらに回路基板のパターン配線、および評価、改善までの一連の流れで行う方法が主流となっている。このようにシミュレーションツールを活用することで、実際にディスクリート部品で回路を組んで試作を行うより、はるかに開発時間の短縮となっている。

しかしこれらを用いても、経験的に行われている部分が多いため、真に信頼性の高い製品を開発しているかは疑問である。そこで本研究では、シミュレーション設計にさらに品質工学のパラメータ設計を組み合わせることで、安定な製品の設計が系統的に可能であることを、トランジスタ増幅回路の例¹⁾で示す。

2. パラメータ設計

製品の品質は、環境の変化、製品の劣化や製造条件の変化によって変動する。このような品質変動の原因を一括してノイズと呼び、ノイズに強いつまりロバストな設計をするのが品質工学＝タグチメソッドである。

その内パラメータ設計と許容差設計はタグチメソッ

ドの真髓であるが、パラメータ設計について説明する。たとえば電子回路でこれに用いる抵抗の値を決定する場合、1つの機能を満足させるのに、非常に多くの組み合わせが考えられる。このように設計する上で人為的に変え得るものをパラメータと呼ぶ。いくつかのパラメータが複雑な関係にあり、各パラメータがどんな値の組み合わせのときに全体の出力が最も安定しているかこれを見出すのがパラメータ設計である²⁾。

しかしここで最も安定した状態にも注目し、最も高い状態のみを考えているのではないことが重要である。言い換えれば、目的とする特性に対して、平均値を見るだけでなくばらつきと一体にして評価するということである。そのために

SN比＝目的とする信号／目的外の雑音
を考える。そしてSN比が一番大きくなるパラメータ因子の水準の組み合わせを最適とする。その後、SN比に影響を与えないで、感度に影響を与える因子を探し、それらを調整して目的の値に合わせる操作を行う。

3. 実験の設計

電子回路の設計とは回路方式の決定に引き続き、トランジスタ、IC等の能動素子の型名および抵抗、コンデンサ、コイル等の受動素子（以下RLC）の定数決定によって行われる。品質工学ではまず初めに基本機能を見出す必要があるわけであるが、この回路の場

* 電気工学科教授

原稿受付 2002年5月1日

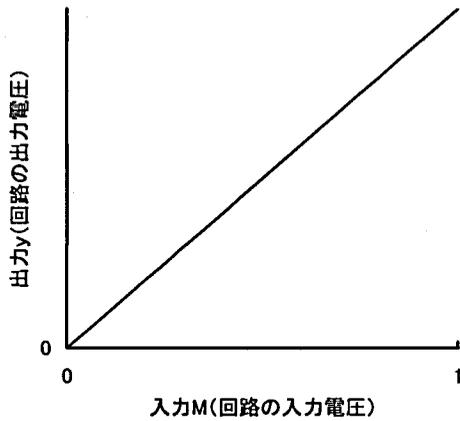


図1 基本機能(ゼロ点比例式)

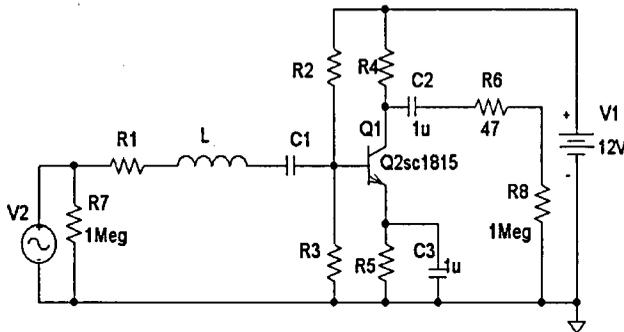


図2 トランジスタ増幅回路

合では図1のように考えることができる。今回検討した回路は、図2に示すように共通エミッタ増幅回路である。これらの受動素子の定数を制御因子とし、信号因子は、回路への入力電圧とした。誤差因子は電子回路で最も影響を与える周囲温度とした。また回路に与える発振器の周波数を標示因子とした。表1に制御因子とその水準を、表2に信号因子、標示因子および誤差因子とそれらの水準を示す。

回路シミュレータはPSpice Ver.8の評価版を使用した。評価版では、日本製のトランジスタがないため、今回使用したトランジスタ2SC1815のモデルライブラリーを作りそれを使用した。また温度係数は一般的な値を与え、抵抗とコイルで100ppm/°C、コンデンサで3000ppm/°Cとした。これらの値も上記モデルライブラリーに書き加え使用した。

表1 制御因子

| 因子 | | 水準 | | |
|----|---|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| A | 抵抗 R ₁ (Ω) | 0 | 6.8 | |
| B | 抵抗 R ₂ (kΩ) | 10 | 22 | 33 |
| C | 抵抗比 R ₃ / (R ₂ + R ₃) | 0.1 | 0.2 | 0.4 |
| D | 抵抗 R ₅ | I _c ≒ 1 (mA) | I _c ≒ 3 (mA) | I _c ≒ 5 (mA) |
| E | コイル L (μH) | 10 | 22 | 56 |
| F | コンデンサ (μF) | 12 | 10 | 8 |
| G | 抵抗 R ₄ (Ω) | 470 | 820 | 200 |
| H | 抵抗 R ₆ (Ω) | 0 | 22 | 47 |

表2 信号, 標示, 誤差因子

| 因子 | | 水準 | | | |
|------|---|-----------|-----|-----|-----|
| | | 1 | 2 | 3 | |
| 信号因子 | M | 入力電圧 (mV) | 5 | 10 | 20 |
| 標示因子 | F | 周波数 (kHz) | 125 | 250 | 500 |
| 誤差因子 | N | 温度 (°C) | 25 | 80 | |

4. 実験結果

実験は表3に示すL18直交表に割りつけた。すなわち18種類の回路で実験を行うわけであるが、実験1の結果のみを表4に示す。またそのデータを用いてSN比と感度を求める過程を以下に示す。

全2乗和

$$S_T = 156^2 + 156^2 + \dots + 637.6^2 = 3120998.36$$

有効除数

$$r = 5^2 + 10^2 + 20^2 = 525$$

線形式

$$L_{11} = 5 \times 156 + 10 \times 312 + 20 \times 620 = 16300$$

$$L_{21} = 5 \times 156 + 10 \times 314 + 20 \times 633 = 16580$$

$$L_{31} = 5 \times 155.7 + 10 \times 316 + 20 \times 641.6 = 16781$$

$$L_{12} = 5 \times 155 + 10 \times 311 + 20 \times 620 = 16285$$

$$L_{22} = 5 \times 155.6 + 10 \times 312.7 + 20 \times 631 = 16525$$

$$L_{32} = 5 \times 156.7 + 10 \times 313.9 + 20 \times 637.6 = 16675$$

比例項の変動

$$S_{\beta} = \frac{(L_{11} + L_{21} + L_{31} + L_{12} + L_{22} + L_{32})^2}{6r}$$

$$= 3120998.3 \quad (f=1)$$

標示因子の比例項の差の変動

$$S_{F,\beta} = \frac{(L_{11} + L_{12})^2 + (L_{21} + L_{22})^2 + (L_{31} + L_{32})^2}{2r} - S_{\beta}$$

$$= 365.0 \quad (f=2)$$

表3 L18直交表

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|
| NO. | A | B | C | D | E | F | G | H |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 4 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| 5 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 |
| 6 | 1 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 7 | 1 | 3 | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 | 3 |
| 8 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 |
| 9 | 1 | 3 | 3 | 1 | 3 | 2 | 1 | 2 |
| 10 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 |
| 11 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 | 2 |
| 12 | 2 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 |
| 13 | 2 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 |
| 14 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 3 |
| 15 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 2 | 1 |
| 16 | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| 17 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 18 | 2 | 3 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 |

表4 実験(1)の測定データ

| | | M1 | M2 | M3 | 線形式 |
|--------|------------|-------|-------|-------|-----------|
| | | 5mV | 10mV | 20mV | |
| N1(室温) | F1(125kHz) | 156.0 | 312.0 | 620.0 | L11 16300 |
| | F2(250kHz) | 156.0 | 314.0 | 633.0 | L21 16580 |
| | F3(500kHz) | 157.7 | 316.0 | 641.6 | L31 16781 |
| N2(高温) | F1(125kHz) | 155.0 | 311.0 | 620.0 | L12 16285 |
| | F2(250kHz) | 155.6 | 312.7 | 631.0 | L22 16525 |
| | F3(500kHz) | 156.7 | 313.9 | 637.6 | L32 16675 |

誤差因子の比例項の差の変動

$$S_{N(F)\times\beta} = \frac{L_{11}^2 + L_{21}^2 + L_{31}^2 + L_{12}^2 + L_{22}^2 + L_{32}^2}{r}$$

$$-S_{\beta} - S_{F\times\beta} = 13.8 \quad (f=3)$$

誤差変動

$$S_e = S_T - S_{\beta} - S_{F\times\beta} - S_{N(F)\times\beta} = 70 \quad (f=12)$$

誤差分散

$$V_e = \frac{S_e}{12} = 5.84$$

表5 SN比と感度

| 単位 (dB) | | | | | |
|---------|------|-------|------|-------|-------|
| NO. | SN比 | 感度 | NO. | SN比 | 感度 |
| 1 | 22.5 | 29.96 | 10 | 9.24 | 48.52 |
| 2 | 2.06 | 44.40 | 11 | 2.10 | 23.02 |
| 3 | 0.80 | 36.70 | 12 | 0.34 | 39.84 |
| 4 | 22.4 | 22.60 | 13 | 13.79 | 31.54 |
| 5 | 2.98 | 39.64 | 14 | 3.36 | 43.72 |
| 6 | 0.65 | 48.99 | 15 | 0.07 | 35.85 |
| 7 | 14.3 | 43.72 | 16 | 9.67 | 43.32 |
| 8 | 4.12 | 36.65 | 17 | 2.09 | 35.37 |
| 9 | 0.23 | 31.35 | 18 | 1.07 | 32.17 |
| 平均 | | | 7.78 | 37.11 | |

表6 利得の再現性

| 単位 (dB) | | | | |
|---------|----|-------|-------|-------|
| | | 最適 | 現行 | 利得 |
| SN比 | 推定 | 14.96 | -0.77 | 15.73 |
| | 確認 | 14.32 | 2.59 | 11.73 |
| 感度 | 推定 | 43.84 | 44.36 | -0.52 |
| | 確認 | 43.72 | 44.46 | -0.74 |

総合誤差

$$V_N = \frac{S_e + S_{N(F)\times\beta}}{15} = 5.59 \quad (f=15)$$

SN比

$$\eta = 10 \log \frac{\frac{1}{6r}(S_{\beta} - V_e)}{V_N} = 22.49 \quad (\text{dB})$$

感度

$$S = 10 \log \frac{1}{6r}(S_{\beta} - V_e) = 29.56 \quad (\text{dB})$$

以上の解析より得られた各実験回路のSN比, 感度を表5に示す. これを用いて各制御因子の水準毎の効果を計算し, 図にしたものが図3である. このような図を要因効果図という. SN比の要因効果図より水準間の差が大きいものを4つ選ぶと, 最適条件はA1C1D1G3となる. しかしD1G3を採用すると, 感度が落ちるためこれを考慮してA1C1D2G2とした.

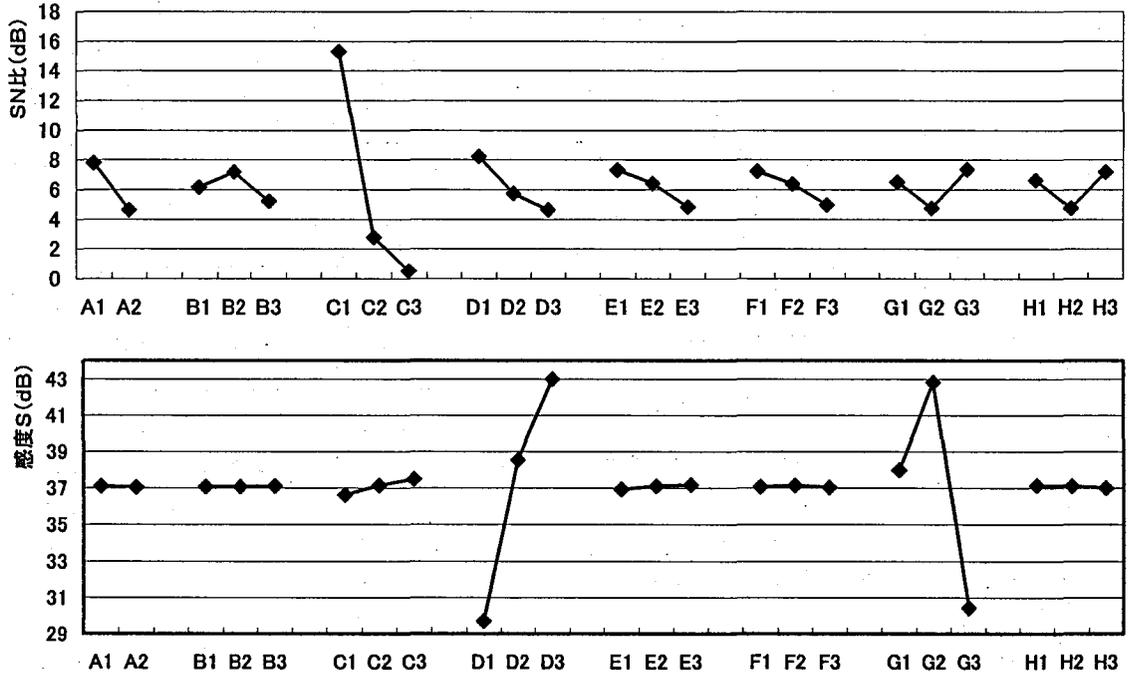


図3 要因効果図

この条件から SN 比と感度を推定する。

$$\text{SN 比} = 7.78 + 15.31 + 5.76 + 4.74 - 3 \times 6.21 = 14.96 \text{ (dB)}$$

$$\text{感度 } S = 37.11 + 36.61 + 38.55 + 42.81 - 3 \times 37.08 = 43.84 \text{ (dB)}$$

また現行の実験条件は全ての因子の水準を 2 であるから、この条件から SN 比と感度を推定する。

$$\text{SN 比} = 42.7 - 7 \times 6.21 = -0.77 \text{ (dB)}$$

$$\text{感度 } S = 303.92 - 7 \times 37.08 = 44.36 \text{ (dB)}$$

次に確認実験を行うわけであるが、最適条件実験はたまたま実験番号 7 にあるので確認実験を行う必要がなくこの結果を確認実験の値とした。現行の確認実験の結果は SN 比 = 2.59 (dB), 感度 S = 44.46 (dB) であった。

またこれらの数値を表 6 にまとめる。SN 比の再現性に若干の差があるが、推定と確認の差が推定の 30% 以内に入っていれば品質工学では、再現性があるとするのでこの実験は有効であると判断できる。SN が約 12 [dB] 向上しているが、これは現行に比べて 15 倍向上したことになる。

なお、RLC の受動素子の温度係数を 0 にして実験

番号 7 の回路で SN 比および感度を求めたが、温度係数を考慮した場合とほとんど差が無く、温度係数との交互作用で安定度が増したのではないことが分かった。

5. あとがき

トランジスタは温度に敏感であり、周囲温度の変化により増幅度等の特性が大幅に変化するが、バイアスを適切に選ぶことにより温度に鈍感すなわち安定度を高めることが分かった。その他の要因の影響は、バイアスを決定する抵抗比に比べたらかなり小さかった。また感度 (増幅度) に関しては当然予想されるように、負荷抵抗の値と負荷電流の影響が大きかった。

前述のバイアスと安定度の関係の物理的関係は明確ではないが、今後これを明らかにしていきたい。

参考文献

- 1) 原 和彦:「電気・電子の技術開発」, 日本規格協会, pp.220-241 (2000 年)
- 2) 大津 亘:「設計技術者のための品質管理」, 日科技連, p128 (1999 年)