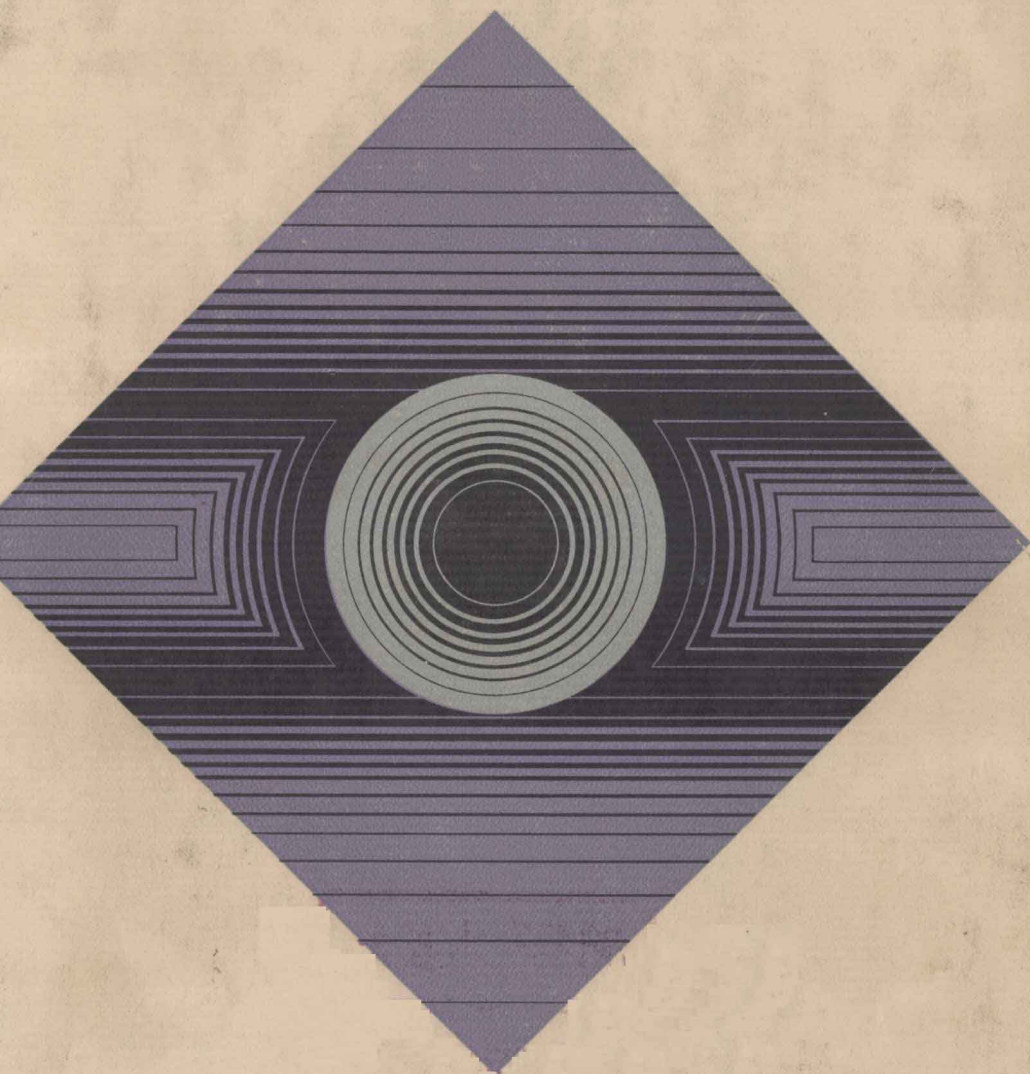


電気・電子工学基礎講座

パルスとデジタル回路

金沢大学教授 工学博士 山本外史 著



理工学社

電気・電子工学基礎講座

パルスとデジタル回路

金沢大学教授 工学博士 山本外史 著

編集

瀧 保夫

上田 實

櫻井良文

高木俊宜

理工学社

著者略歴

やまもと がい し
山本 外史

1924 年 愛知県に生まれる
1950 年 名古屋大学工学部電気工学科卒業
1957 年 金沢大学工学部講師
1960 年 金沢大学工学部助教授
現 在 金沢大学工学部教授，工学博士
専 攻 電子工学，電子回路
著 書 電子回路論Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ：広川書店（共著）
電子回路Ⅰ，Ⅱ：朝倉書店（共著）
ディジタル回路：広川書店
ディジタル技術：朝倉書店

電気・電子工学基礎講座 パルスとディジタル回路

1978. 7. 10. 第1版発行

著 者 山本外史

発行者 中川乃信

発行所 理工学社

東京都文京区本駒込5丁目9番10号
電話 東京(03) 828-5211 番 (代表)
振替口座 東京 1-34676 番 ㊦ 113

印 刷 中央印刷株式会社

製 本 松本製本所

電気・電子工学基礎講座
パルスとデジタル回路

本書の内容の一部あるいは全部を無断で複写複製（コピー）することは、法律で認められた場合を除き、著作者及び出版社の権利の侵害となりますので、その場合には予め小社あて許諾を求めて下さい。

は し が き

電子工学の発展はそれに利用される素子の開発とともに目覚ましいものがある。とくに電子回路は真空管回路が姿を消し、トランジスタ時代を迎え、さらに IC の時代となっている。

そのため、従来の線形回路を主体とした電子回路に対して、その一部と見られていたパルス回路が重要な位置を占め、短時間で処理される分野ではなくなってきている。このパルス回路は、さらにデジタル技術の一部として存在している現在である。このデジタル技術は電子計算機の発達と普及に負うところが大きく、デジタル制御の基本はパルス回路、論理回路、順序回路、演算回路の組み合わせよりなる。

本書は、電子回路より独立したパルス回路とデジタル回路を取り扱うことを目的としたものであり、従来のパルス回路の分野にデジタル回路を含めた構成となっている。デジタル制御に必要な基本的概念を理解し、取り扱われる数値概念をも植えつけることを目的とした入門書である。単に電気系の学生だけを対象としたものではなく、広く高専、工学部学生にも十分理解できるよう、できるだけ平易に書いたつもりである。また理解の助けとして例題、演習問題を各章に付した。説明は簡潔に努めたが、著者の力不足のため思わぬ説明不足、誤りをおかしている個所があるかもしれない。今後の読者の御叱正をまち、訂正してゆきたいと思っている。

最後に、本書の出版に当たり、種々御助言を戴いた名古屋大学上田實教授、本書を執筆する機会を与えて下さった理工学社の関口、吉住両氏、原稿の整理に御協力下さった当研究室の古川政弘君に衷心より謝意を表わします。

1978 年 6 月

著者しるす

目 次

第1章 RLC 回路の過渡応答

1.1 微分, 積分回路の応答	1
1.2 RLC 回路のステップ応答	3
1.3 分布定数回路のステップ応答	6
演習問題	8

第2章 トランジスタのスイッチング動作

2.1 トランジスタの大振幅動作	10
2.2 トランジスタの電荷制御モデル	14
2.3 電荷制御時定数の測定	19
演習問題	21

第3章 マルチバイブレータ

3.1 無安定マルチバイブレータ	22
3.2 単安定マルチバイブレータ	29
3.3 双安定マルチバイブレータ	30
3.4 シュミットトリガ回路	32
演習問題	36

第4章 ブロッキング発振回路

4.1 無安定ブロッキング	38
4.2 単安定ブロッキング	42
演習問題	43

第5章 時間軸発生回路

5.1 電圧時間軸発生回路	45
5.2 電流時間軸発生回路	49
演習問題	52

第6章 波形操作回路

6.1 振幅比較回路	54
6.2 クリップ回路	57
6.3 クランプ回路	58
演習問題	61

第7章 論理回路

7.1 ブール代数とカルノー図	63
7.2 AND 回路, OR 回路, NOT 回路	66
7.3 NAND 回路と NOR 回路	69
7.4 2進演算回路	71
7.5 フリップフロップの構成	78
演習問題	83

第8章 順序回路

8.1 順序回路の表現	85
8.2 状態数の縮小化	88
8.3 組み合わせ禁止のある場合の状態数の縮小化	93

演 習 問 題	97
---------------	----

第9章 負性抵抗スイッチング回路

9.1 代表的負性抵抗素子	98
9.2 電流制御形負性抵抗	100
9.3 電圧制御形負性抵抗	102
9.4 無安定動作	103
9.5 単安定動作	109
9.6 双安定動作	113
演 習 問 題	115

第10章 計 数 回 路

10.1 直列形計数回路	116
10.2 帰還形計数回路	117
10.3 並列形計数回路	121
10.4 直並列形計数回路	122
10.5 その他のカウンタ	125
10.6 分 周 回 路	125
演 習 問 題	128

第11章 A/D, D/A 変換

11.1 D/A 変 換	130
11.2 A/D 変 換	132
11.3 A/D, D/A 周辺回路	135
演 習 問 題	138

第12章 パルス変調

12.1 パルス変調の種類	139
12.2 アナログ形パルス変調	140

12.3	デジタル形パルス変調	144
12.4	時分割通信方式	146
	演 習 問 題	147

演習問題解答

付 録

参 考 文 献

索 引

第1章 RLC 回路の過渡応答

パルス回路では正弦波でない図 1.1 に示すようなパルス列, あるいは単一のパルス, ステップ波形を取り扱うため, ラプラス変換 (Laplace Transform) と呼ばれる数学的操作が用いられる. 本章ではその取り扱いについて示すものである. また変換表, 逆変換表が付録に示してある. 通常の回路におけるラプラス変換に充分と思われる程度のものを表に示してある. また分布定数回路によるステップ応答, パルス波形のための過渡応答についての基本的な概念を示すものである.

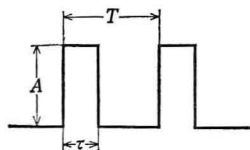


図 1.1 パルス波形

ここで今後用いるパルスの基本用語を示しておく. 図 1.1 において

$D = \frac{\tau}{T}$: 衝撃係数 (duty factor),

t_r : 立ち上がり時間 (rise time) 振幅が 90% に達するまでの時間,

t_f : 下降時間 (fall time) 振幅が下降してその 10% にまで低下するに要する時間,

t_d : 遅延時間 (delay time) 振幅が 50% にまで達する時間として用いる.

1.1 微分, 積分回路の応答

図 1.2 に示す回路の出力 v_o に対するラプラス変換 $v_o(s)$ は

$$v_o(s) = \frac{sv_i(s)}{1+sCR} RC \quad (1.1)$$

で与えられる. ここで s は複素周波数である. 上式において積 CR がきわめて小

さく

$$|sCR| \ll 1$$

であるとき

$$v_o(s) \doteq sv_i(s)RC \quad (1.2)$$

となり、上式を逆変換した $v_o(t)$ は $t=0$ における $v_i(t) = 0$ ならば

$$v_o(t) = RC \frac{dv_i(t)}{dt} \quad (1.3)$$

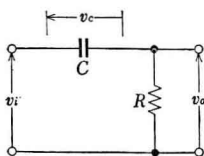


図 1.2 微分回路

と $v_i(t)$ の微分形が出力 $v_o(t)$ にえられる。

〔例〕 図 1.2 において入力 $v_i(t) = A \mathbf{1}(t)$ なるステップ電圧のときの出力 $v_o(t)$ を示す。まず入力 $v_i(t)$ のラプラス変換 $v_i(s)$ は

$$v_i(s) = \frac{A}{s}$$

与えられるから、式 (1.1) より

$$v_o(s) = \frac{ARC}{1+sCR}$$

となり、上式の逆変換 $v_o(t)$ は

$$v_o(t) = A e^{-\frac{t}{CR}}$$

与えられる。

ところで図 1.2 においてコンデンサ C の端子電圧 $v_c(s)$ は

$$v_c(s) = \frac{v_i(s)}{1+sCR} \quad (1.4)$$

である。上式において CR なる時定数 (time constant) がきわめて大きく

$$|sCR| \gg 1$$

ならば

$$v_c(s) \doteq \frac{1}{CR} \frac{v_i(s)}{s} \quad (1.5)$$

となり、上式を逆変換した $v_c(t)$ は積分の定理 (付録 C 参照) より

$$v_c(\tau) = \frac{1}{CR} \int_0^\tau v_i(t) dt \quad (1.6)$$

と $v_i(t)$ の積分形がえられる。したがって図 1.2 において C と R を入れ換えれば

積分回路となる。

〔例〕 入力 $v_i(t)$ が $A1(t)$ なるステップ関数のときのコンデンサ C の端子電圧 $v_c(t)$ を示す。

式 (1.4) より

$$v_c(s) = \frac{A}{(1+sCR)s}$$

となり，逆変換によって

$$v_c(t) = A(1 - e^{-\frac{t}{CR}})$$

となる。

1.2 RLC 回路のステップ応答

図 1.3 における回路の出力 v_o のラプラス変換表示は

$$v_o(s) = \frac{v_i(s)}{LC(s+\alpha)(s+\beta)} \quad (1.7)$$

となる。ここで

$$\alpha, \beta = \frac{\frac{r_L}{L} + \frac{1}{R_c C} \pm \sqrt{\left(\frac{r_L}{L} + \frac{1}{R_c C}\right)^2 - 4 \frac{1}{LC} \left(1 + \frac{r_L}{R_c}\right)}}{2} \quad (1.8)$$

である。いま

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \frac{1}{\sqrt{LC}} \left(1 + \frac{r_L}{R_c}\right)^{1/2} \\ k &= \frac{\frac{r_L}{L} + \frac{1}{R_c C}}{2\omega} \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

と置くと，式 (1.8) における α, β は

$$\alpha, \beta = \omega k \pm \omega \sqrt{k^2 - 1} \quad (1.10)$$

と書き改められる。

いま図 1.3 における入力 $v_i(s) = V_i/s$ なるステップ電圧を印加したときの出力応答は，

$k > 1$ の場合

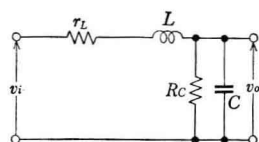


図 1.3 LC 直列回路

$$\frac{v_o(t)}{V_i} = \frac{R_c}{R_c + r_L} \left\{ 1 - \left(\frac{k}{\sqrt{k^2 - 1}} \sinh \omega \sqrt{k^2 - 1} t + \cosh \omega \sqrt{k^2 - 1} t \right) \varepsilon^{-\omega k t} \right\} \quad (1.11)$$

$k=1$ の場合

$$\frac{v_o(t)}{V_i} = \frac{R_c}{R_c + r_L} \{ 1 - (1 + \omega t) \varepsilon^{-\omega t} \} \quad (1.12)$$

$k < 1$ の場合

$$\frac{v_o(t)}{V_i} = \frac{R_c}{R_c + r_L} \left\{ 1 - \left(\frac{k}{\sqrt{1 - k^2}} \sin \omega \sqrt{1 - k^2} t + \cos \omega \sqrt{1 - k^2} t \right) \varepsilon^{-\omega k t} \right\} \quad (1.13)$$

とそれぞれ与えられ、図 1.4 に示すような応答波形がえられる。とくに式 (1.9) における k を制動係数 (damping constant) といい、 $k=1$ なる場合を臨界制動 (critical damping) という。 $k=1$ のとき波形が振動的でなく最も早く $v_o(t)$ が定常に達する。このための条件は

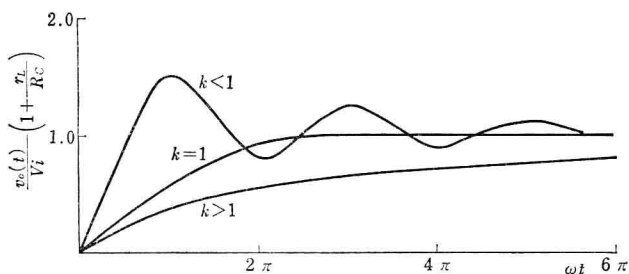


図 1.4 LC 直列回路のステップ応答

$$\frac{r_L}{L} + \frac{1}{R_c C} = \frac{2}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 + \frac{r_L}{R_c}} \quad \text{臨界制動条件} \quad (1.14)$$

で与えられる。さらに $r_L=0$ のときは

$$R_c = \frac{1}{2} \sqrt{L/C} \quad (1.15)$$

となり、一方 $R_c = \infty$ のときは

$$r_L = 2\sqrt{L/C} \quad (1.16)$$

が臨界制動条件となる。

次に図 1.5 に示すような LC 並列回路においては出力 $v_o(s)$ は

$$v_o(s) = \frac{sv_i(s)}{r_s C(s + \alpha)(s + \beta)} \quad (1.17)$$

で与えられ、上式における α, β は

$$\alpha, \beta = \frac{1}{C(R_P \parallel r_s)} \pm \sqrt{\left[\frac{1}{C(R_P \parallel r_s)} \right]^2 - \frac{4}{LC}} \quad (1.18)$$

である。上式において

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \frac{1}{\sqrt{LC}} \\ k &= \frac{1}{2\omega C(R_P \parallel r_s)} \end{aligned} \right\} \quad (1.19)$$

と置くと

$$\alpha, \beta = \omega k \pm \omega \sqrt{k^2 - 1} \quad (1.20)$$

となる。いま入力 $v_i(s) = V_i/s$ なるステップ電圧を図 1.5 の回路に印加したときの応答は

$k > 1$ の場合

$$\frac{v_o(t)}{V_i} = \frac{R_P}{r_s + R_P} \frac{2k}{\sqrt{k^2 - 1}} \varepsilon^{-\omega k t} \sinh \omega \sqrt{k^2 - 1} t \quad (1.21)$$

$k = 1$ の場合

$$\frac{v_o(t)}{V_i} = \frac{R_P}{r_s + R_P} 2\omega t \varepsilon^{-\omega t} \quad (1.22)$$

$k < 1$ の場合

$$\frac{v_o(t)}{V_i} = \frac{R_P}{r_s + R_P} \frac{2k}{\sqrt{1 - k^2}} \varepsilon^{-\omega k t} \sin \omega \sqrt{1 - k^2} t \quad (1.23)$$

とそれぞれ与えられる。 k の各値に対する応答波形が図 1.6 に示してある。同図において最も早く定常に達するのは $k = 1$ の場合で、これを臨界制動といい、その条件は

$$(R_P \parallel r_s) = \frac{1}{2} \sqrt{L/C} \quad \text{臨界制動条件} \quad (1.24)$$

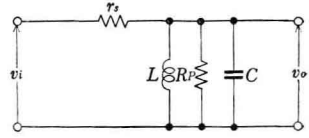


図 1.5 LC 並列回路

である。とくに図1.4, 図1.6において $k < 1$ のときにおけるように LC の共振による振動を生ずる回路をリングング (ringing) 回路という。

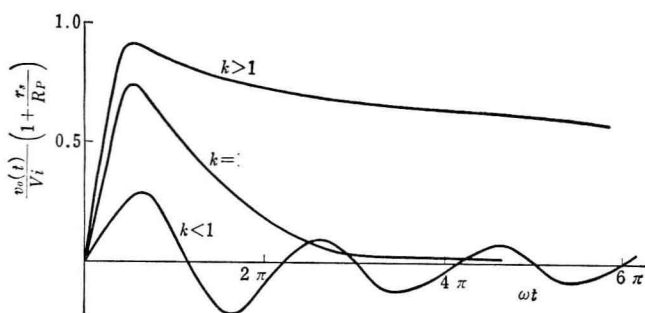


図 1.6 LC 並列回路のステップ応答

1.3 分布定数回路のステップ応答

図1.7(a)に示すように電源内部抵抗 R_s の電源よりスイッチ S を閉じることによってステップ電圧を印加すると、 $R_s = R_0$ の場合、まず最初の進行波 $V'_{AA'}$ が図1.7(b)に示すように振幅

$$V'_{AA'} = \frac{1}{2} V_i \quad (1.25)$$

で進行する。

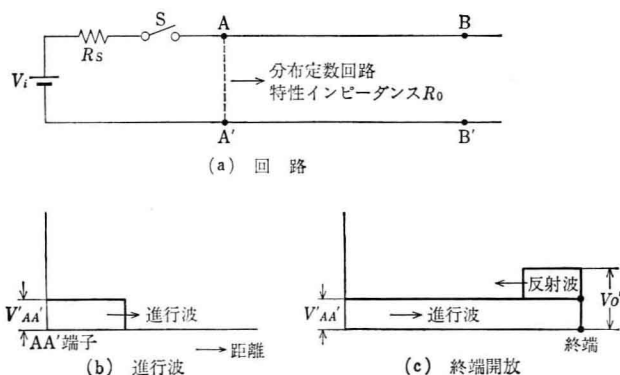


図 1.7 分布定数回路の終端開放波形

(a) 終端開放: このとき振幅 $V'_{AA'}$ で終端において反射することとなり, そのときの終端電圧 V_o' は

$$V_o' = 2V'_{AA'} = V_i \quad (1.26)$$

となる. この反射波が図 1.7 (c) に示すように反射して行くと AA' 端の電圧 $V_{AA'}$ は

$$V_{AA'} = 2V'_{AA'} = V_i \quad (1.27)$$

となり, 定常における終端電圧 V_o は

$$V_o = V_{AA'} = V_i \quad (1.28)$$

となる. ところで図 1.7 (a) に示す分布定数回路長を l , 伝播速度を v_e としたとき, スイッチ S を閉じてから $t = l/v_e$ 秒後に, 図 1.8 (a) に示すように出力開放端に V_i なる電圧を生ずる. また図 1.7 (a) の BB' 端子の電圧 $V_{BB'}$ は図 1.8 (b) に示すような階段波がえられる.

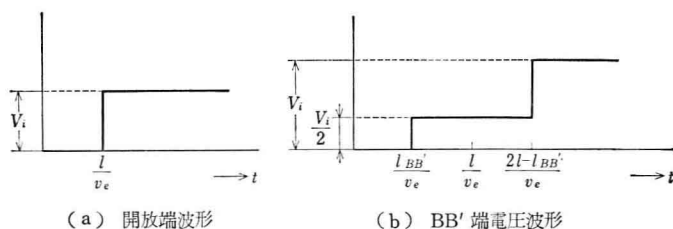


図 1.8 $R_s = R_0$ のときの図 1.7 の BB' 端子と開放端波形

(b) 終端短絡: 図 1.7 (a) の回路の終端が短絡され, $R_s = R_0$ なるときは図 1.9 (a) に示すように AA' 端子には時間幅 $2l/v_e$ なるパルスがえられ, BB' 端子では同図 (b) に示すように $2(l - l_{BB'})/v_e$ なる時間幅のパルスがえられることと

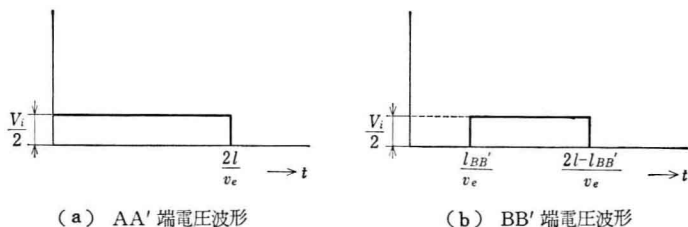


図 1.9 $R_s = R_0$ で終端短絡のときの波形