

電子管の理論と応用

HERBERT J. REICH, Ph. D.

Professor of Electrical Engineering, Yale University

目次

第 1 章	物理的な概念	1
1-1	励起, イオン化, 放射	1
1-2	電子ボルト	2
1-3	励起電位とイオン化電位	3
1-4	イオン化	3
1-5	運動する電子によるイオン化	4
1-6	正イオンによるイオン化	4
1-7	イオン化の量	4
1-8	光電離	5
1-9	宇宙線によるイオン化	5
1-10	空間電荷と空間電流	5
1-11	消イオン	6
1-12	金属中の自由電子, 電子親和力	7
1-13	接触電位差	8
1-14	金属からの電子やイオンの放出	8
1-15	電子力学	9
1-16	一様な電界における初速度が 0 の電子の動き	10
1-17	一様な電界における初速度が電界と平行な場合の電子の動き	11
1-18	一様でない電界中の電子の動き	12
1-19	通過時間の重要性	12
1-20	電界が初期移動方向と直交する場合	12
1-21	初期速度と直交する磁界中の電子の動き	13
1-22	交差した電界と磁界が作用する場合	15
第 2 章	熱電子放出; 高真空二極電子管	17
2-1	熱電子放出の理論	17
2-2	Richardson の式	18
2-3	純金属エミッタ	20
2-4	トリエーテッドタンゲステンエミッタ	20
2-5	酸化物被覆エミッタ	23
2-6	セシエーテッドタンゲステンエミッタ	24
2-7	カソードの機械的な構造	25
2-8	放出電流や空間電流に対する気体の影響	26

2-9	空間電荷によるアノード電流の制限	27
2-10	Child の法則	28
2-11	実際の二極管における Child の法則からのずれ	30
2-12	放出された電子の初速度の影響	30
2-13	Richardson の法則と Child の法則の関係	31
2-14	ショット効果	35
2-15	電子管の分類	35
2-16	電子管の構造	36
第 3 章	グリッド制御高真空管	39
3-1		39
3-2	三極管のグリッド作用の理論・プレートおよびグリッド電流の式	40
3-3	電子の通過時間	43
3-4	静特性と動特性	43
3-5	真空管の係数	45
3-6	真空管の係数と特性曲線の関係	48
3-7	シャープカットオフ・グリッド, リモートカットオフ・グリッド	49
3-8	複グリッド管	50
3-9	空間電荷四極管	52
3-10	五極管	53
3-11	ビーム五極管	56
3-12	複グリッド管のプレート電流の式	58
3-13	複合管と 4 個以上のグリッドを持つ真空管	59
3-14	グリッド回路およびプレート回路に印加された電圧	59
3-15	交流プレート電流の波形の形成	59
3-16	記号	61
3-17	グリッド回路およびプレート回路の電流と電圧の関係	63
3-18	静的動作点と動的動作点	64
3-19	高調波の生成	65
3-20	交流プレート電流の級数展開	66
3-21	級数展開 (抵抗負荷)	66
3-22	級数展開の導出	67
3-23	高調波の生成と混変調	69
3-24	級数展開 (インピーダンス負荷および可変増幅率)	70
3-25	級数の係数と動的特性曲線の関係	72
3-26	動的プレート抵抗	75
第 4 章	真空管と真空管回路の解析手法	77
4-1	等価プレート回路	77
4-2	等価プレート回路の作成	79

4-2A	プレート以外の電極の等価回路	81
4-3	真空管の静電容量とアドミタンス	82
4-4	図による手法	86
4-5	静的ロードライン	86
4-6	動作の動的軌跡—動的ロードライン	87
4-7	動的ロードラインの作成—プレート図表	89
4-8	交流および直流抵抗が等しい負荷のプレート図表	90
4-9	交流抵抗と直流抵抗が異なる場合の単純化したプレート図表	90
4-10	交流抵抗と直流抵抗が異なる場合の正確なプレート図表	91
4-11	プレート電流の図的解析	93
4-12	図的解析の式の導出	94
4-13	式の選択	100
4-14	高調波解析の式の適用分野	100
4-15	電流成分の数値の符号の意味	101
4-16	励振電圧が正弦波でないとき	101
4-17	高調波測定のための機械的な器具	101
4-18	高調波の百分率と歪率	101
4-19	ロードラインの位置を定め、高調波を求める実用的な手続き	102
4-20	直熱管の動作点	103
4-21	出力電力を図的に求める	104
4-22	動グリッド特性	104
4-23	開始および停止過渡現象	105
第 5 章	増幅器の定義，動作階級，回路	111
5-1	信号	111
5-2	増幅器	111
5-3	増幅器の歪み	111
5-4	増幅器の分類	113
5-5	増幅器の回路	114
5-6	直結増幅器	115
5-7	インピーダンス-容量結合	117
5-8	カソード抵抗を使ったバイアス	117
5-9	トランス結合	118
5-10	プッシュプル増幅器	119
5-11	位相反転器	121
5-12	出力回路	123
5-13	直熱管で中点タップ付きのフィラメントトランスを使う場合	123
5-14	周波数帯域	123
5-15	A 級，AB 級，B 級，C 級増幅器	124
5-16	デシベル	126

第6章	電圧増幅器および電流増幅器の解析と設計	129
6-1	インピーダンスを負荷とした真空管による電圧増幅	129
6-2	多段増幅器の電圧増幅度	131
6-3	直結増幅器の電圧増幅度	131
6-4	インピーダンス-容量結合電圧増幅器	132
6-5	抵抗-容量結合増幅器	133
6-6	抵抗-容量結合増幅器の応答に対する回路定数の影響	138
6-7	抵抗-容量結合低周波増幅器の設計において注意すべき点	139
6-8	抵抗-容量結合電圧増幅器の設計手順	141
6-9	プレート電源のフィルタおよび自己バイアスインピーダンスの影響	143
6-10	補償増幅器	145
6-11	カソードフォロワ増幅器	147
6-11A	カソードフォロワ増幅器の電圧増幅度	149
6-11B	カソードフォロワ増幅器の実効入力容量	150
6-11C	カソードフォロワ増幅器の出力端子の実効インピーダンス	151
6-11D	カソードフォロワ増幅器の回路と応用	152
6-11E	カソードフォロワ増幅器の設計	153
6-11F	フィルタ形式の広帯域増幅器	155
6-12	トランス結合低周波増幅器—予備的な解析	155
6-13	トランス結合低周波増幅器—厳密な解析	157
6-14	トランスの設計	162
6-15	抵抗結合とトランス結合低周波増幅器の比較	163
6-16	インダクタンス-容量結合	163
6-17	低周波電圧増幅器の真空管の選択	164
6-18	低周波増幅器の増幅度の調整	164
6-19	音量の圧縮と伸張	165
6-20	音質調整	166
6-21	抵抗結合高周波増幅器	166
6-22	複同調高周波増幅器	167
6-23	単同調増幅器	170
6-24	同調高周波増幅器用の真空管の選択	171
6-25	高周波増幅器の歪み	172
6-26	電流増幅	173
6-27	シールド	174
6-28	増幅度の限界	174
6-29	負帰還増幅器	175
6-30	負帰還による非直線歪みの減少	176
6-31	負帰還による周波数歪みの減少	177
6-32	負帰還による位相歪みの減少	178

6-33	帰還による雑音の減少	178
6-33A	許容入力電圧に対する負帰還の影響	179
6-34	極図表	179
6-35	発振	181
6-36	実用的な負帰還回路	181
6-37	負帰還により高い選択度を得る	184
6-38	バイパスコンデンサの使用	185
6-39	真空管を可変インピーダンス素子として使う	187
第 7 章	A 級および AB1 級電力増幅器	197
7-1	電力増幅器の解析法	197
7-2	プレート回路の電力の関係	197
7-3	プレート回路の効率	198
7-4	出力電力	199
7-5	最適出力電力	200
7-6	A 級電力増幅器	200
7-7	三極管 A1 級電力増幅器	201
7-8	三極管の最適負荷と出力の理論値	202
7-9	動作プレート電圧に対する最適出力電力	206
7-10	理論プレート回路効率	207
7-11	プレート損失による出力電力の制限	208
7-12	電力増幅三極管の動作条件の決定と性能	208
7-13	動作プレート電圧が指定されていない場合の最適動作条件の決定	210
7-14	電力増幅三極管の変換式	211
7-15	A 級四極管および五極管電力増幅器	211
7-16	五極管 A 級電力増幅器の出力電力, 歪み, 最適負荷	213
7-17	五極管電力増幅器の欠点と問題	213
7-18	五極管の出力電力に対する動作プレート電圧の影響	215
7-19	ビーム電力管による A1 級増幅器	215
7-20	四極管およびビーム五極管のスクリーン損失	216
7-21	出力トランスの巻数比	216
7-22	プッシュプル電力増幅器	218
7-23	合成特性	219
7-24	ロードライン	221
7-25	各真空管の動作の軌跡	222
7-26	高調波含有率と出力電力を図により求める	223
7-27	AB 級プッシュプル動作	223
7-28	A1 級および AB1 級プッシュプル三極管増幅器の最適動作	224
7-29	三極管の A1 級動作の限界	225
7-30	動作プレート電圧によるプッシュプル A1 級三極管の出力電力	227

7-31	サプレッサ五極管およびビーム電力五極管のプッシュプル動作	227
7-32	プッシュプル動作のまとめ	227
7-33	出力トランスの巻数比—プレート-プレート間の負荷	228
第 8 章	B 級および AB2 級電力増幅器	233
8-1	B 級低周波増幅器	233
8-2	B 級の特性	235
8-3	高調波含有率	235
8-4	出力電力	237
8-5	入力電力, プレート損失, プレート回路効率	239
8-6	双曲線を使って電力および効率を求める	239
8-7	最適負荷を求める	241
8-8	指定された動作条件のもとで概略最大出力を求める	244
8-9	B 級増幅の問題点	244
8-10	ドライバートランスの設計	249
8-11	AB2 級動作	249
8-12	負帰還 B 級および AB 級増幅器	250
8-13	C 級増幅	251
第 9 章	変調と検波	253
9-1	変調	253
9-2	振幅変調	254
9-3	振幅変調の側波	255
9-4	特性の曲がりによる振幅変調	256
9-5	平衡変調器	259
9-6	完全整流による振幅変調	261
9-7	直線プレート変調および直線グリッド変調	263
9-8	図による変調の解析	265
9-9	機密システム (盗聴防止)	266
9-10	AM 波の検波	267
9-11	電流-電圧特性の曲がりを利用した検波	268
9-12	2 乗検波の解析	268
9-12A	周波数変換器	271
9-13	2 乗則検波回路	272
9-14	完全整流による検波	272
9-15	理想直線二極管検波の解析	275
9-16	理想直線二極管検波器の検波効率および実効入力抵抗	277
9-17	一般的な波形の AM 波の理想直線二極管検波	279
9-18	異なる周波数の 2 つの電圧の理想直線二極管検波	279
9-19	二極管の特性の曲がりの影響	281

9-20	実用的な二極管検波器の設計	282
9-21	直線プレート検波 (直線伝達整流)	284
9-22	直線グリッド検波	285
9-23	図による検波の解析	286
9-24	検波器の級数展開と等価回路	287
9-25	振幅変調波による無線通信	289
9-26	自動利得 (音量) 調整 (A. V. C.)	289
9-27	周波数変調	291
9-28	位相変調	293
9-29	周波数変調の回路	294
9-30	周波数変調電圧の検波	296
9-31	妨害抑圧	299
9-32	振幅変調系の妨害対信号比	299
9-33	周波数変調系の妨害対信号比	300
9-34	プリエンファシスの使用	302
9-35	被変調搬送波の妨害	302
9-36	静的妨害	302
9-37	搬送波による (大振幅の静的) 妨害	304
9-38	無線通信における周波数変調の利点と欠点	304
第 10 章 トリガ回路, パルス発生器, 発振器		311
10-1	トリガ回路	311
10-2	四極管トリガ回路	312
10-3	五極管トリガ回路	312
10-4	Eccles-Jordan トリガ回路	314
10-5	Eccles-Jordan トリガ回路の設計	317
10-6	トリガ回路の応用	317
10-7	トリガパルスの生成回路	318
10-8	方形波および矩形パルス発生器	319
10-9	真空管発振器	321
10-10	弛張発振器	322
10-11	マルチバイブレータ	322
10-12	Van der Pol 弛張発振器	324
10-13	弛張鋸歯状波発振器	325
10-14	弛張発振器による周波数変換	329
10-15	マルチバイブレータの周波数制御の解析	330
10-16	正弦波発振器の解析	331
10-17	負性抵抗発振器	332
10-18	負性抵抗発振器の発振振幅	334
10-19	高調波含有率	335

10-20	発振周波数	336
10-21	直列発振回路	336
10-22	ダイナトロン発振器	337
10-23	負性伝達コンダクタンス発振器	338
10-24	プッシュプル負性抵抗発振器	340
10-25	負性グリッド抵抗発振器 (容量性の帰還を伴ったグリッド同調)	343
10-26	抵抗-容量同調負性抵抗発振器	343
10-27	負性抵抗発振器との結合方法	343
10-28	帰還発振器	343
10-29	プレート同調発振器	344
10-30	グリッド同調発振器	346
10-31	ハートレー発振器	347
10-32	コルピッツ発振器	347
10-33	2 つ以上の共振回路がある回路	348
10-34	一般化した帰還発振回路	348
10-35	プッシュプル発振器	348
10-36	発振管の良さの指標	349
10-37	直列給電と並列給電	349
10-38	自己バイアスによる発振振幅の制限	349
10-39	抵抗-容量同調発振器	352
10-40	発振器の設計における課題	356
10-41	帰還発振器の波形	357
10-42	周波数安定性	357
10-43	負荷が周波数に与える影響 . バッファ増幅器と電子結合の使用	358
10-44	周波数安定化の一般的な手法	360
10-45	抵抗による安定化	360
10-46	インピーダンスによる安定化	361
10-47	水晶発振器	363
10-48	磁歪発振器	365
10-49	同調フィルタ (多段帰還) 発振器	366
10-50	高調波除去による周波数安定化	367
10-51	発振器の出力電力	367
10-52	ビート周波数 (ヘテロダイン) 発振器	367
10-53	超高周波発振器	370
第 11 章 気体中の電気伝導		373
11-1	Current-voltage Characteristics of Glows.	373
11-2	Physical Aspects of Glow Discharge.	373
11-3	Potential Distribution in the Glow Discharge.	373
11-4	Normal and Abnormal Glow.	373

11-5	Theory of Ignition.	373
11-6	Theory of Ignition. Nonuniform Fields.	373
11-7	Time Required for Ignition.	373
11-8	Paschen's Law.	373
11-9	Breakdown.	373
11-10	Distinction between Ignition and Breakdown Voltage.	373
11-11	Application of the Current-voltage Diagram.	373
11-12	Dynamic Current-voltage Characteristics.	373
11-13	Grid Control of Glow Discharge.	373
11-14	Arc Discharges.	373
11-15	Arcs with Separately Heated Cathodes.	373
11-16	Grid Control of Arcs.	373
11-17	Completeness of Grid Control.	373
11-18	External Grid Control.	373
11-19	Control by Magnetic Field.	373
11-20	Igniter Control.	373
11-21	Arc Initiation by Auxiliary Glow.	373
11-22	Deionization.	373
11-23	Peak Forward Voltage and Peak Inverse Voltage.	373
第 12 章 グローおよびアーク放電管とその回路		375
12-1	Essential Facts Concerning Glow and Arc Discharge.	377
12-2	Applications of Glow Tubes.	377
12-3	Glow-discharge Tube as a Light Source.	377
12-4	The Glow-discharge Tube as a Voltage Stabilizer.	377
12-5	The Glow-discharge Tube as a Rectifier.	377
12-6	The Glow-tube Relaxation Oscillator.	377
12-7	Applications of the Glow-tube Oscillator.	377
12-8	Control of Power by Glow-discharge Tubes. Grid-glow Tube. . .	377
12-9	Grid-glow Tube Circuits.	377
12-10	Starter-anode Glow Tubes.	377
12-11	Glow-tube Protective Devices.	377
12-12	Glow-discharge Amplifier Tubes.	377
12-13	Arc-discharge Tubes.	377
12-14	Advantages of Arc-discharge Tubes.	377
12-15	Tungar Rectifier.	377
12-16	Cathode Structure of Low-pressure Hot-cathode Arc Tubes. . .	377
12-17	Choice of Gas or Vapor.	377
12-18	Tube Ratings.	377
12-19	Breakdown Time of Thyratrons.	377

12-20	Grid Current Previous to Firing.	377
12-21	Electrode Structure and Characteristics of Thyratrons.	377
12-22	Comparison of Thyratrons and High-vacuum Tubes.	377
12-23	Special Precautions in the Use of Arc Tubes.	377
12-24	Applications of Hot-cathode Arc-discharge Tubes.	377
12-25	Hot-cathode Arc Diode as a Rectifier.	377
12-26	Arc Tube as a Control Device. D-c Operation.	377
12-27	Parallel Control.	377
12-28	Series Control.	377
12-29	Relaxation Control.	377
12-30	Counter-e.m.f. Control.	377
12-31	Choice of Tubes for D-c Control Circuits.	377
12-32	Applications of Basic D-c Control Circuits.	377
12-33	The Thyatron as an Oscillator.	377
12-34	Thyatron Inverters.	377
12-35	The Parallel Inverter.	377
12-36	Series Inverter.	377
12-37	The Relaxation Inverter.	377
12-38	Counter-e.m.f. Inverter.	377
12-39	D-c Transformer.	377
12-40	Problems of Inverter Design.	377
12-41	Thyatron Motors.	377
12-42	The Use of Arc Tubes as Amplifiers.	377
12-43	A-c Operation of Thyratrons. Phase Control.	377
12-44	Phase-control Circuits.	377
12-45	Use of Saturable Reactor in Phase-control Circuits.	377
12-46	Voltage Impulses for Grid Control.	377
12-47	Tubes for Phase-control Circuits.	377
12-48	Illumination Control.	377
12-49	Alternating Load-voltage Control.	377
12-50	Voltage, Speed, and Frequency Regulators.	377
12-51	Temperature Control of Ovens.	377
12-52	Grid-controlled Rectifiers.	377
12-53	Welding Control.	377
12-54	Relay Control.	377
12-55	Mercury Pool Arc-discharge Tubes.	377
12-56	Comparison of Igniter and Grid Control.	377
12-57	Ignitron Structure.	377
12-58	Comparison of Thyatron and Ignitron.	377

12-59 Ignitron Control Circuits.	377
12-60 Externally Controlled Mercury Pool Arc Tube.	377
12-61 The Strobotron.	377
12-62 Stroboscopes.	377
第 13 章 光電管, 光電池	379
13-1 Types of Photoelectric Phenomena.	379
13-2 Historical Survey.	379
13-3 Laws of Photoelectric Emission.	379
13-4 Definitions.	379
13-5 Current-wave-length Characteristics.	379
13-6 Types of Phototubes.	379
13-7 Characteristics of Vacuum Phototubes.	379
13-7A Phototube Sensitivity.	379
13-8 The Gas Phototube.	379
13-9 Phototube Circuits.	379
13-10 Circuits for Measurement of Illumination.	379
13-11 Use of Phototubes in Phase-control and Trigger Circuits.	379
13-12 Limitations of Direct-coupled Circuits.	379
13-13 Circuits for Use with Modulated Light.	379
13-14 Sensitivity of Phototube and Amplifier.	379
13-15 The Anode Diagram.	379
13-16 Design of Phototube Circuits.	379
13-17 Secondary-emission Multipliers.	379
13-18 Special Photoemissive Tubes.	379
13-19 Photoconductive Cells.	379
13-20 Photovoltaic Cells (Barrier-layer Cells).	379
13-21 Comparison of Phototubes, Photoconductive Cells, and Photo- voltage Cells.	379
第 14 章 電源	381
14-1 定義	381
14-2 基本的な整流回路	382
14-3 整流管と整流回路の選択	384
14-4 整流回路の特性	385
14-5 電流の波形	386
14-6 平滑フィルタ	389
14-7 コンデンサフィルタの設計	390
14-8 例題	396
14-9 チョーク-コンデンサ (L-セクション) フィルタ	397

14-10	インダクタンスおよび静電容量の相対的な大きさ	399
14-11	例題	403
14-12	コンデンサ入力のチョーク-コンデンサフィルタ	404
14-13	定電圧電源	404
14-14	定電流電源	408
第 15 章	電子管を使った機器と測定	411
15-1	Vacuum-tube Voltmeters.	413
15-2	Use of Transfer Characteristics in Voltage Measurement.	413
15-3	Plate-detection (Transrectification) Voltmeters.	413
15-4	Balanced Plate Circuits.	413
15-5	Diode Voltmeters.	413
15-6	Grid-detection Voltmeter.	413
15-7	Logarithmic Voltmeter.	413
15-8	Voltmeters Based on Voltage or Current Amplifiers.	413
15-9	Slide-back Voltmeters.	413
15-10	Inverted Voltmeter.	413
15-11	Vacuum-tube Ammeters.	413
15-12	Vacuum-tube Wattmeter.	413
15-13	Vacuum-tube Ohmmeters.	413
15-14	Time and Speed Meters.	413
15-15	Counting Circuits.	413
15-16	Frequency Meters.	413
15-17	Cathode-ray Oscillographs (Oscilloscopes).	413
15-18	Deflection of Electron Beam.	413
15-19	Cathode-ray Tube Screens.	413
15-20	Oscilloscope Time Bases.	413
15-21	Oscilloscope Amplifiers.	413
15-22	Electronic Switches for the Observation of Two Waves.	413
15-23	Electronic Transient Visualizers.	413
15-24	Oscillographic Comparison of Frequencies.	413
15-25	Effect of Capacitance of Deflecting Plates.	413
15-26	Electron-ray Tube.	413
15-27	Determination of Static Tube Characteristics.	413
15-28	Oscillographic Determination of Tube Characteristics.	413
15-29	Dynamic Measurement of Tube Factors.	413
15-30	Amplification-factor Bridge.	413
15-31	Plate-resistance Bridges.	413
15-32	Transconductance Bridges.	413
15-33	Bridge for the Measurement of μ , r_p , and g_m	413

15-34	Negative-resistance Bridges.	413
15-35	Tuttle Tube-factor Bridge.	413
15-36	Harmonic Analyzers.	413
15-37	Analyzers Using Tuned Circuits.	413
15-38	Heterodyne Harmonic Analyzers.	413
15-39	Dynamometer-type Harmonic Analyzers.	413
15-40	Fundamental-suppression Harmonic Analyzers.	413
15-41	Measurement of Voltage Amplification.	413
15-42	The Use of Triangular and Rectangular Waves in Amplifier Analysis.	413
15-43	Measurement of Power Output.	413
15-44	Determination of Optimum Power Output and Optimum Load.	413
付録 A		415
A-1	並列等価回路	415
A-2	真空管のプレート回路の電力の関係	416
A-3	直線変調	417