

無線電波傳播及 天線饋電設備

下 冊

吳 鴻 鈞 編 著

中國人民解放軍軍事工程學院

北京 文華書局

知 191
PDG

下 冊 目 錄

第四篇 無線電波的輻射和接收及天線的基本理論

第十章 無線電波的輻射及發射天線基本理論的研究

第一節 天線輻射機能的基本認識，及各項決定因素的鑑別·····	1
第一款 電源頻率對天線輻射性能的決定作用，及天線輻射機能的基本認識·····	2
第二款 天線的幾何形狀對其輻射性能的決定作用，及天線輻射方向性的初步認識·····	4
第三款 天線上電流的分佈形態對其輻射性能的決定作用，及天線輻射阻抗的概念·····	6
第四款 各項決定因素的歸納，及本章研究範圍的確定·····	9
第二節 基本振子的輻射理論·····	9
第一款 基本振子的構造及其物理命名的涵意·····	10
第二款 基本振子的定量分析，及其輻射場的三種座標表示法·····	12
(A) 在直角座標系中，輻射場各分量的空時函數表達式的推導·····	13
(B) 在球面座標及柱面座標系中，輻射場各分量的空時函數表達式的推導·····	14
第三款 基本振子輻射場的二個區域，及輻射場的物理實質的說明·····	16
(A) 近區輻射場的簡化表達式，及輻射場的振動特性·····	17
(B) 遠區輻射場的簡化表達式，及其與各項決定因素間的定量關係·····	19
(C) 中間區內基本振子的輻射場，及決定因素 r 的函數曲線·····	21
(D) 再論基本振子的輻射機能，及其物理概念的商榷·····	22
第四款 基本振子的輻射功率和輻射電阻，及留金貝爾公式的推導·····	23
第三節 當電流的空間分佈為已知時，求出單根細長導線在遠區的輻射場·····	25
第一款 電流為純行波的情況·····	27
第二款 電流為純駐波的情況·····	30
第四節 對稱振子的輻射理論·····	33
第一款 對稱振子與長線的區別，及其幾何結構概念的商榷·····	33
(A) 阻抗觀點上的區別·····	34
(B) 電流觀點上的區別·····	35
(C) 電位觀點上的區別·····	36
(D) 結論和原則·····	36
第二款 利用對稱振子與平行線相互對照的原則，求出振子上電流和電荷的分佈·····	37
(A) 電流分佈的函數表達式的推導·····	37



(B) 電荷分佈的函數表達式的獲得	39
(C) 在導體表面上電場分佈的函數表達式的獲得	39
(D) 電位及阻抗分佈的函數表達式的獲得	40
(E) 用負載法調節振子上電流的分佈	42
第三款 根據已知的電流分佈, 求出對稱振子在遠區的輻射場	44
(A) 電流為正弦分佈的對稱振子	45
(B) 電流為非正弦分佈的對稱振子	48
(C) 對稱振子的等效高度	49
第四款 對稱振子的輻射功率和輻射電阻, 及其輸入阻抗的計算	52
(A) 終端負載的對稱振子的輻射電阻, 及莫、般、波爾公式的推導	52
(B) 非負載對稱振子的輻射電阻, 及巴爾金公式的推導	53
(C) 對稱振子的輸入阻抗的計算方法, 及其與 l/λ 的依從關係的獲得	54
第五款 對稱振子的嚴格理論	58
第五節 基本環型天線的輻射理論	62
第六節 發射天線的各项特性參數	66
第一款 發射天線輻射電阻的一般表達式	67
第二款 發射天線的效率	68
第三款 發射天線的方向性係數	70
第四款 發射天線的增益係數	74
第七節 天線的過壓現象	75
第一款 天線在低頻時的過壓現象	76
第二款 天線在高頻時的過壓現象	77
第十一章 發射天線陣的原理和設計	
第一節 天線陣輻射性能的決定因素及本章研究範圍的確定	79
第二節 二元天線陣方向性理論及方向乘積定理的推證	81
第一款 陣函數的推導及方向圖的描繪	81
第二款 方向性乘積定理的說明	87
第三節 直線型多元天線陣方向性的理論和設計	92
第一款 陣函數一般表達式的推導和簡化	92
(A) 第一類輔助函數的推導及圓圖的概念和應用	93
(B) 第二類輔助函數的推導, 及其與第一類輔助函數相對偶的推證	96
第二款 均勻天線陣方向性的基本理論	96
(A) 均勻邊射式天線陣的基本要求	108
(B) 均勻頂射式天線陣的基本要求	110
第三款 均勻邊射式天線陣最大方向性係數的探求, 及 d 對方向性的決定作用	112
(A) 定理一 對 $d=\lambda/2$ 的天線陣, 邊射式有最大的方向性係數	113
(B) 定理二 總長為 $\lambda/2$ 的邊射式天線陣, 則二元天線陣有最大的方向性係數	115
(C) 定理三 除 $d=\lambda/2$ 外, 邊射式天線陣將無最大的方向性係數	116

(D) 結論 均勻邊射式天線陣獲得最大方向性係數的條件	118
第四款 均勻頂射式天線陣最大方向性係數的探求, 及減少天線元個數的理論	118
(A) 因素 φ 對方向性的決定作用及頂射式天線陣最大方向性係數的研究	118
(B) 減少天線元個數的理論	120
第五款 不均勻天線陣方向性的研究及天線陣最佳方向性的獲得	123
(A) 邊射式天線陣方向性品質的商榷及最佳方向性的意義和實質	123
(B) 第必息夫函數式的基本認識及其各項特徵的說明	126
(C) 第必息夫函數式在天線陣理論上的應用及具有最佳方向性的天線陣的設計	128
(D) 當天線元的個數 n 很大時, 第必息夫式天線陣設計的實用方法	133
(E) 第必息夫分佈式理論的推演, 及超方向性係數天線陣的基本概念	136
第六款 陣函數的傅立葉級數表達式, 及根據方向圖以設計天線陣的電流分佈	141
第七款 由直線型天線陣導出面型及體型天線陣的方向特性	150
第五節 直線型天線陣的阻抗的研究	152
第一款 天線陣阻抗的決定因素及研究對象的確定	152
第二款 羅然斯基感應電動勢法的物理實質, 及輻射互阻抗一般公式的推導	155
第三款 兩平行對稱振子輻射互阻抗的計算及各項實用圖表的繪置	157
(A) $E_{z,2}$ 的函數表達式的推導	157
(B) 輻射互阻抗及輻射自阻抗的求得	159
(C) 計算 R_{12} 及 X_{12} 的實用圖表	173
第四款 天線元輻射總阻抗的求得, 及天線陣輻射總功率的推導	178
第五款 在天線陣中, 各天線元的輸入阻抗的計算	180
第六節 準圓環型天線陣方向性的研究	181
第一款 切向準圓環型天線陣的研究, 及圓環型天線的方向性的一般解答	182
(A) 當 n 無限增大時行波準圓環型天線陣方向性的分析, 及行波圓環型天線 方向性的一般解答	184
(B) 駐波圓環型天線方向性的一般解答	193
第二款 徑向準圓環型天線陣的研究, 及圓環面帶型天線的方向性的一般解答	195
第三款 軸向準圓環型天線陣的研究, 及圓柱環帶型天線的方向性的一般解答	199
第七節 準圓環型天線陣的輻射電阻及方向性係數的研究	203
第一款 $T.D.$ 天線的輻射電阻及其與 H 值的依從關係的商榷	203
第二款 $R.D.$ 天線的輻射電阻及其與 H 值的依從關係的商榷	207
第三款 $T.D.$ 與 $R.D.$ 天線的方向性係數的求解和分析	207
第八節 地面對天線輻射性能的影響	211
第一款 地面臨界作用的反射本質及鏡像概念的建立	212
第二款 地面對天線方向性的影響, 及地面陣函數的推導	214
第三款 地面對天線輻射阻抗的影響	231
第十二章 無線電波的接收及接收天線基本原理的研究	
第一節 天線接收機能的基本認識及各項決定因素的鑑別	233

第二節 互易定理，及接收天線各項特性參數的確定	234
第三節 接收天線的最佳輸出功率	237
第四節 接收對稱振子上電流的分佈	239
第五節 接收用基本環型天線的研究	243
第六節 在接收電場為橢圓極化波的場合下，平面矩形 環型天線接收電動勢的分析	248
第一款 天線對垂直分量 E_x 的接收作用，及接收電動勢分量 U_x 的求得	252
第二款 天線對水平分量 E_y 與 E_z 的接收作用，及電動勢 U_y 與 U_z 的求得	252
第三款 天線環路內總電勢的推求及物理性能的總結	256
第五篇 無線電長、中、短波天線及其饋電設備	
第十三章 無線電長、中、短波天線饋電設備概論	
第一節 研究天線饋電設備的實際意義及本章討論範圍的確定	261
第二節 發射天線應該考慮到的各項基本問題及發射天線 技術指標的初步鑑定	263
第三節 干擾電波對接收天線的決定作用及各項干擾來源的基本認識	267
第一款 天電干擾的方向特性和頻率特性	268
第二款 波長臨近電台的干擾及工業干擾的物理特性	270
第四節 接收天線應該考慮到的各項基本問題 及接收天線技術指標的初步鑑定	270
第十四章 無線電長波天線及其饋電設備	
第一節 長波發射天線類型的商榷及各天線部件的基本認識	275
第一款 頂電容規格的初步鑑定	278
第二款 地線規格的初步鑑定	279
第三款 傳輸線規格的初步鑑定	283
第二節 長波發射天線各基本參數的定量分析	284
第一款 頂線電容的計算	284
(A) 孤立細長導線的電容量的計算	285
(B) 兩平行導線系電容量的計算	288
(C) 面型多根平行導線電容量的計算	289
(D) 在地面上水平及垂直導線系電容量的計算	291
(E) 兩正交及斜交導線系電容量的計算	291
第二款 輸入電抗的計算	297
第三款 固有波長的計算	300
第四款 最高可用電位及最大功率定額的計算	305
第五款 等效高度及輻射電阻的計算	307
第六款 通頻帶寬度的計算	309
第三節 大功率長波發射天線的研究	313

第一款 兩基本振子輻射互阻抗的計算	314
第二款 長波天線陣饋電設備的商榷及亞歷山大天線的基本認識	320
第四節 導航專用的長波發射天線及阿篤克天線性能的研究	322
第一款 無線電導航的一般原理及對天線的基本要求	323
第二款 阿篤克天線的基本原理及航道的構成	325
第三款 阿篤克天線的饋電設備及航道方位的調節	328
第四款 阿篤克天線的使用和規格	332
第五節 長波接收天線	333
第一款 收訊用長波接收天線的研究	333
(A) 長波接收用的基本環型天線	333
(B) 別紋列茲天線及長波的定向接收	335
第二款 導航用長波接收天線的研究	340
第十五章 無線電中波天線及其饋電設備	
第一節 中波發射天線的一般要求及天線類型的商榷	355
第二節 線型中波發射天線的研究	356
第一款 輸入電抗的設計及調諧元件的設計	357
第二款 損耗電阻的計算及地網的設計	259
第三款 通頻帶的計算	361
第四款 最高可用功率的商榷	363
第五款 線型中波發射天線的技術評價	364
第三節 抗衰落中波廣播發射天線的研究	365
第一款 桅型及塔型抗衰落天線	366
(A) 桅型及塔型天線阻抗特性的分析	370
(B) 桅型及塔型天線電流分佈的分析及天線抗衰落品質的檢定	373
第二款 Г.3.艾捷貝爾格及馬利松抗衰落天線	374
第三款 Г.愛金堡頂端饋電式抗衰落天線	376
第四節 大功率中波發射天線的研究	377
第一款 直線型及圓柱型天線陣的商榷	378
第二款 在水平面內帶有方向性的廣播天線陣及調諧線路的設計	380
(A) 調諧線路的一般特性	380
(B) 調諧網絡的設計方法	382
第五節 中波接收天線	388
第十六章 無線電短波天線及其饋電設備	
第一節 短波天線的各項基本要求	389
第一款 短波通訊電道的設計及對天線輻射仰角的要求	389
第二款 短波天線方向性的基本要求及其工程技術指標的商榷	392
(A) 天線在垂直面內的方向特性的要求	392
(B) 天線在水平面內的方向特性的要求	395

第三款 天線輻射生能的頻率效應及對短波天線工作波帶的要求	396
第四款 短波發射天線的其他要求	397
第五款 短波接收天線應該考慮的各項基本問題及其基本要求的分析	398
第二節 短波天線的實用類型，及本章研究對象的確定	400
第三節 水平對稱振子（BΓ 天線）的研究	402
第一款 B Γ 天線方向特性的品質分析及天線懸掛高度的設計	403
(A) B Γ 天線在水平面內的方向性的品質分析	404
(B) B Γ 天線在垂直面內的方向性的品質分析	404
(C) B Γ 天線在立體空間內的方向性的品質分析及輻射功率分佈圖的概念	408
第二款 B Γ 天線的饋電，及饋線阻抗匹配的設計	413
(A) 行波變饋線分枝匹配式線路的設計	414
(B) 行波變饋線 ∇ 形匹配式線路的設計	421
(C) 行波單饋線匹配式線路的設計	424
(D) 駐波饋線式線路的原理和設計	428
第三款 B Γ 天線的功率定額及終端絕緣子耐壓強度的設計	429
第四款 B Γ 天線使用波帶的加寬及納金竿共振子的理論	432
第五款 B Γ 天線方向性的改進，及反射器饋電線路的設計	436
(A) 有源反射器饋電線路的分析和設計	438
(B) 無源反射器饋電線路的分析和設計	446
第六款 B Γ 天線的特殊類型及特種方向性的獲得	449
(A) 比斯多哥里斯角形天線方向性的分析和設計	449
(B) 洛塔林諾夫準圓環形天線方向性的理論和設計	452
第四節 同相水平振子（CΓ 天線）的研究	453
第一款 C Γ 天線方向性的分析和設計	457
(A) C Γ 天線方向性的基本分析及實用圖表的獲得	457
(B) 在各種特殊要求下，C Γ 天線方向性的分析和設計	470
第二款 C Γ 天線的阻抗特性和功率定額的分析，及配電線路的設計	485
(A) C Γ 天線的輻射電阻及其實用圖表的獲得	485
(B) C Γ 天線的過壓現象的分析和絕緣子耐壓強度的設計	492
(C) C Γ 天線的輸入阻抗、饋電線路和匹配網絡的設計	494
第三款 C Γ 天線的工程評價及具有特種型式的 C Γ 天線的簡略分析	499
(A) C Γ 天線工作波帶的加寬及倍波天線的理論	501
(B) C Γ 天線饋電線路的簡化，及富拉克林和西里克斯天線的理論	502
第五節 水平菱形天線（PΓ 天線）的研究	505
第一款 菱形天線的基本認識	508
第二款 P Γ 天線方向品質的分析	511
(A) P Γ 天線在水平面內方向特性的分析及因素 v_0 的定量作用的鑑別	512
(B) P Γ 天線在垂直面內方向特性的分析及天線尺寸的設計	515

(C) P Γ 天線實用規格的商榷及一些實用數據的介紹.....	522
第三款 再論P Γ 天線的方向特性及 P Γ 天線陣方向性品質的分析.....	524
(A) 在立體空間內P Γ 天線方向性品質的分析及其技術評價的商榷.....	524
(B) 利用天線陣原理以改進P Γ 天線的方向品質, 及數種基本配置的研討.....	529
(C) P Γ 天線陣的饋電設備及其實用規格的商榷.....	534
第四款 P Γ 天線的D, ϵ 及 η 的品質分析, 及各項實用圖表的介紹.....	536
第五款 P Γ 天線使用波帶寬度的鑑定.....	540
第六節 魚骨形(B形)天線的研究	541
第一款 B 形天線方向特性的品質分析.....	542
第二款 B 形天線方向性的波帶分析及耦合電容量 C_k 的設計.....	543

後 記

第 四 篇

無線電波的輻射與接收 及天線的基本理論

第 十 章

無線電波的輻射及發射天線 基本理論的研究

第一節 天線輻射機能的基本認識及各項決定因素的鑑別

在以上各章中，我們已詳細地研究了無線電波傳播過程的物理實質，並相應地導出了它們的定量的分析方法。應該指出，我們以往所作的一些研究，是在一個基本的假定前提下進行討論的，即：被傳播的無線電波，它的傳播方向和傳播功率的大小，以及電波的頻率或波長等基本參數，我們已默認它被發射天線預先地額定了。然則，輻射電波與發射天線之間究竟以怎麼樣的規律性聯系着？這一問題，在我們以上各章中並沒有加以交待，也正是我們本章討論目的之所在了。具體地講，我們本章的研究對象，就是要根據發射天線的已知條件，來求出電波的輻射方向和輻射功率的大小；或者，相反地，我們要根據輻射電波的性能的需要，來求出發射天線本身所必須具備的條件等等。總之，我們本章的研究任務，是以探求輻射電波與發射天線之間的依從關係的規律性為最終目的，我們並用『輻射』這一術語將它們概括起來。很自然的，在沒有進入輻射的規律性的各項定量分析之前，我們必須首先要認清參予這些規律性的究竟有那些決定因素，我們本節即以討論這一問題為對象。

應該着重指出，無線電波的輻射問題是極端複雜的，因為它必須牽涉到電波和天線的整個學習領域，因此，各項決定因素之間，就交織着極端複雜的聯系。現在，我們分下列各款來進行討論：

第一款 電源頻率對天線輻射性能的决定作用 及天線輻射機能的基本認識

現在，讓我們先來回答這樣一個有趣的問題，即天線為什麼會有電波的輻射機能？或者說，為什麼天線會有產生電波的本領，而這電波又能脫離天線而向空間輻射呢？從表面上看來，這一問題的本身似乎是很奇怪的，因為天線之所以能取得其物理命名，就是因為它具有能夠輻射電波這一基本屬性所致，要不，它就不成其為天線了。但這樣的解答絲毫也沒有說明事物的真相，因為，我們還要追問，天線又究竟是怎麼樣的一種東西，它為什麼會具有電波輻射的機能呢？

簡單地說來，天線可以視為是一個具有特種幾何形狀的交流電路，如在這一電路上饋以一高頻交流電流，那麼它就有同樣頻率的電波被輻射出來，因此，一般書上都把天線的輻射機能理解為一能量的轉換過程，亦即把發射天線理解為具有這樣的一種基本屬性的機械，它能把由發射機*送來的電流形態的電磁能量，轉化為電磁波形態的電磁能量向空間輻射，這樣，天線就被理解為一能量轉換器。能量轉換器這一命名的物理內容，在一些基本知識中是很容易獲得理解的，例如火車頭的發動機就是一種能量轉換器，它能使煤的化學能轉化為機械動能；又如發電機也是一種能量轉換器，它能使拖動電樞的機械動能轉化為電能。與這些對照起來，我們只要承認發射天線果真具有促使能量轉換的這一基本屬性的話，那麼發射天線之具有輻射機能這一事實，也就自然是意中之事了。

以上我們對天線輻射機能的解釋，雖然是一般工程上廣泛被採用的，但是它却常常不會使初學者感到滿意。因為，我們想：蒸汽發動機之所以會促使能量轉換，是由於它具有這樣的一種機構，即它能使煤的化學能轉化為蒸汽分子的動能，這種蒸汽分子的動能由於它的膨脹，就推動機械而成為機械動能，因此這種能量轉換器中的能量轉換過程，是非常形象而容易被理解的。但對發射天線這一能量轉換器來講，能量的轉換過程就不那麼形象了。我們已經知道，發射天線的機構祇不過是一種特殊的交流電路，它異於一般交流電路的，祇是它的頻率很高而已。那麼，我們就必須進一步追問，為什麼很高頻率的交流電路就能形成為一種能量轉換器，而為什麼低頻的交流電路就不能呢？或者說，為什麼提高電路中電流的頻率就能使電路獲得了輻射的機能而形成發射天線？電流頻率對天線輻射機能的決定作用，其物理本質又究竟體現在什麼地方呢？

以上所提出的問題，是一般同學們最感到困惑的地方，其實，這一物理概念的說明，却又是非常簡單的，我們所以要在這裏強調地指出，祇是企圖去引出同學們這些容易發生混淆的概念，得到及時的批判和澄清而已。讓我們首先肯定這樣一個

* 以後我們簡稱電源

事實，即交流電路之所以能成爲一能量轉換器，從本質上來講，並不決定於電流頻率的高低；或者說，天線輻射機能這一基本屬性，並不祇呈現於高頻，在低頻的條件下也是同樣具有的；輻射機能的存在與否，臨界頻率是並不存在的，祇不過是在高頻時它呈現得比較顯著，在低頻時不甚顯著或近似地可以忽略而已。在明確了這個基本事實後，我們就要進一步說明，爲什麼一交流電路在任何頻率時都會充當一能量轉換器這一問題了。早在本書上冊第一章之初，我們就已經批判了電路觀點的片面性的錯誤，我們已曾指出，電磁現象是具有相互聯系性的整體，它們之間的規律性是由馬克斯威爾聯立方程式給描繪出來的，而馬克斯威爾聯立方程式的實質之一，則是位移電流這一物理量的出現。這樣，我們在將一交流電動勢的電能饋送至一交流電路時，就會同時引起着三種主要的反映；其一是電路導線內出現導體性電流，其二是電路週圍出現磁場，其三則是在電路的週圍出現位移電流。位移電流在本質上是一個交變的電場，它與磁場同時存在於電路導線的外部空間，且按着馬克斯威爾聯立方程式所約制的規律性而形成了無線電波，更由於無線電波本身具有着輻射的或波動的運動本質，因此就完成了無線電波的輻射過程。這樣看來，我們可以說：交流電路之所以會具有輻射出電波的機能，是由於它具有着這樣的物理機構，即它能在它的外部空間產生一交變的電場和磁場所致。很顯然的，在電流爲時間的正弦函數的情況下，電流的頻率就等於交變的電場和磁場的頻率，也就是被輻射的電波的頻率；同時，也正是位移電流的頻率。由於位移電流並不單純地與電場的絕對值成正比，而且也與電流的頻率成正比，因此，對同一交流電路而言，若電流的頻率愈高，那麼位移電流就相應地愈大，當電流的頻率高到這樣的程度，以致電路週圍的位移電流較之於導線內的導體性電流佔到壓倒的優勢時，在這樣的情況下，由電源所供給的、消費在導線內部由於導體性電流所引起的歐姆損耗，將遠較轉化爲無線電波這一形態的能量爲小，處在這樣頻率下的電路，就可以近似地當作一單純的能量轉換器來看待，這就是工程上所稱爲的天線了。反之，假使電流的頻率低到這樣的程度，以致電路外部空間的位移電流比之於導線內的導體性電流可以完全略去不計時，在這樣的情況下電路中就可以近似地認爲沒有電波能量的轉換這一物理現象的出現，那麼這樣的電路就只能單純地視爲一交流電路，不能再視爲一天線了。

通過以上的分析，從原則上來講，天線與交流電路之間似乎是無法嚴格區別的，事實上也確乎是如此，但是，在工程上却並不過份強調這一原則，而是將天線和交流電路視爲是兩種完全不同的東西的，這又是什麼緣故呢？這是因爲，從工程的眼光看來，並不是所有具有輻射機能的交流電路就授以天線這一命名，我們的要求還要高得多。什麼要求呢？因爲，在任何交流電路中，導線內部的導體性電流和導線外部的位移電流是既然同時存在的，這就說明天線在能量轉換的同時，就必然有一部份能量損耗在天線本身的導線之中，亦即是說，任何天線的能量轉換過

程，都將是不完全的；這種能量轉換的不完全性，我們用天線的效率這一物理概念概括出來。在工程上，我們對天線的效率的要求是有一定的分寸的，假使天線的效率低到這樣的程度以致它完全失去它的實用價值時，它就失去了天線這一工程命名的意義了。很顯然的，天線的效率將隨電源頻率的增高而增加，爲了照顧這一工程要求，一般天線所用的頻率遂具有這樣的『量級』，它將數千乃至數百萬倍於一般交流電路的頻率；更通過以後的定量分析我們將可知道，天線輻射機能的強度一般都與頻率的平方成比例的！由於這種程度上的懸殊性，就構成了天線和一般交流電路之間、雖然它們在電波的輻射的機能上沒有原則性的區別，但在實用上却有鮮明的界限的理由！

通過以上的分析，我們已可完全確信，電源的頻率是決定天線輻射性能的一個定量因素；並且我們初步地鑑定，對同一個天線而言，若電源的頻率愈高，那麼它的輻射機能也就愈強，而且它的效率也會相應地增大。當然，這一結論祇是單純從電源頻率這一決定因素而片面地得出的，在考慮到其他的決定因素後，自然就還會使我們的問題趨於複雜化。

第二款 天線的幾何形狀對其輻射性能的决定作用 及天線輻射方向性的初步認識

除電源的頻率外，天線輻射性能的第二個決定因素是天線的幾何形狀。除超短波天線外，一般天線都是用光滑的銅線或其他非導磁性的金屬線製成。雖然，在長波天線中我們有時也加入一些電容器或自感圈等集總性的電路參數；但在更一般的情況下，一根光滑銅線的本身就可以作爲一根天線了。所謂天線的幾何形狀，就是指這根光滑的銅線的幾何形狀而言，例如我們可以把它拉成一條直線，稱爲直線式天線，它的典型實例是對稱振子，如圖 10.19 所示；我們也可以把它曲成一圓環，稱爲環形天線，它的典型實例是圓環形天線，如圖 18.19 所示；此外，我們還可以將它折成一菱形或繞成一螺旋形，分別稱爲菱形天線及螺旋形天線等等，天線的幾何形狀是多種多樣的。在工程上，各不同幾何形狀的天線都有它對應的工程命名，以標誌它們各具有不同的輻射性能。各不同天線的輻射性能的具體研究是我們今後天線饋電設備的主要的學習任務，至於目前，我們祇要從總的原則上來認清爲什麼不同幾何形狀的天線會呈現不同的輻射性能這一問題就夠了。然則，天線的幾何形狀爲什麼會對它的輻射性能參予着決定性的作用？它的物理機能究竟體現在什麼地方呢？

簡單地說來，天線的幾何形狀這一因素對輻射性能所起的決定作用，可以認爲是由下列兩個方面體現出來：

第一：在上款中我們就曾指出，爲了要加強天線的輻射機能，就應該加強電路外部空間的位移電流的比重。而這一位移電流的大小，除正比於電源的頻率外，還

正比整個電路雜散電容的總值。顯然可知，這一雜散電容的數值，是與天線的幾何形狀密切地聯系着的。由此可知，不同幾何形狀的天線，由於它雜散電容的不同，因此在同一電源頻率下它的位移電流的比重也就不同，由此則天線的輻射性能自然也就不同了。這似乎是很有趣的：在低頻的交流電路中，爲了要避免輻射損耗，因此電路的幾何形狀就以避免電路中雜散電容的形成爲目的；天線的要求則恰與它互相反背，爲了要加強它的輻射機能，因此則天線的幾何形狀就以強調它的雜散電容爲目的。由於這種正相反背的要求，就使得一般天線外表的幾何形狀與熟悉的電路構造大不相同，也正因爲如此，一些同學們就常常不相信天線與低頻交流電路之間還有着血脈的聯系的這一事實了。當然，從電路觀點過渡到天線觀點時，這種錯覺的存在是很自然的，但從物理概念上來講，這樣的錯覺是必須清除的。

第二：在上款中我們也曾指出，在天線這一高频電路中，電路四週空間的位移電流既然佔到壓倒的優勢，那麼於其說天線是一種路的問題，就不如說它是一種場的問題。從這一觀點看來，構成天線的導線就對電波中的電場和磁場起着臨界條件的作用，它將主宰着電磁場的空間分佈的型式，這就說明，天線的幾何形狀，將對輻射電波的方向性起着決定性的影響。所謂天線的方向性，是與沒有方向性相對地面言的。例如，假設我們的天線是一個幾何點或一個具有均勻的圓球的話，那麼由於天線本身的空間對稱性，它輻射的電波也將是具有空間對稱性的，在這樣的假定情況下天線輻射的電波就將是一沒有方向性的均勻球面波；但事實上天線決不可能是一個幾何點或一個圓球，因爲在這種情況下天線在原則上也就不成其爲交流電路了。很顯然的，天線的幾何形狀既有異於一個點或圓球，那麼它輻射的電波自然就有異於對稱性的均勻球面波，它在某些方向上輻射得多些，而在另一些方向上就輻射得少些，輻射場的方向性就開始呈現出來了。我們說，實際的天線它的幾何形狀既然必須有異於點或圓球，那麼任何天線就不會沒有方向性。當然，各天線方向性的具體性格將隨其具體的幾何形狀而不同，這也正是我們今後必須詳細深究的地方，但目前我們祇少可以肯定地說，天線的幾何形狀是決定方向性的一個定量因素。

應該着重指出，天線的方向性的探求，是研究天線輻射問題的首要主題。這一問題的重要性，可以由它的實用意義上理解出來。讓我們首先明確：均勻球面波是工程上所不必要的，因爲它表誌着天線的輻射功率向四面八方毫無重點地擴散，由於功率將輻射到不需要輻射的地方，結果就引起了能量的浪費；在這個實用意義上，天線的方向性就創造了很高的實用價值。因爲天線的方向性正意味着輻射功率不是在空間的各個方向上均勻地分配，而是在某些方向上獲得了功率的集中，假使我們設法使這些方向指向接收地點，那麼在接收地點所感受到的天線的輻射功率，在功率的集中性前後就可相應地提高一個倍數 D ，這就是我們在電波傳播中所一再引用過的被稱爲天線的方向性係數這一命名的物理內容所在了，關於它的嚴格定義，我們以後還會談到，我們這裏祇是指出，一個妥經設計的天線，它的 D 值可以

達到數十乃至數百，在個別的情況下可以達到數千，在理論上，甚至有達到無限大的可能；這相當於說在利用天線的方向性後，天線輻射功率的使用率就可相應地提高數十乃至數千倍；如果用熟悉的百分比概念標誌出來，那麼它就相當於數千乃至數十萬之多！這一驚人的數字就更給予了天線方向性以更高的評價，天線的方向性的探求也就成為研究天線的核心問題了。

在研究天線的幾何形狀對方向性的決定作用時，我們還可指出下述的一個有趣的事實。一般說來，天線的幾何形狀愈簡單（例如直線或圓環等），那麼它的方向性的幾何結構也就愈簡單，這是它的優點，因為它為輻射功率在單一方向集中這一實際要求創造了基本條件，但伴着這個優點的同時也就存在着一個缺點，即它的方向集中性不強，方向性係數不大；反之，天線的幾何形狀愈複雜，那麼它的方向性的幾何圖案也就愈複雜，它表現在某些方向上功率獲得了高度的集中，但却又不是集中在一個單一的方向，而是在很多個甚至是不必要集中的方向上也集中起來了。這樣，我們就得到一個重要的啓示，即假如我們只從單根天線的幾何形狀上來打算，那麼我們所獲得的方向性就不能解決兩個實際要求之間的矛盾：用複雜天線雖可照顧了方向集中性的程度，但却失去了方向集中的單一性；用簡單天線雖可照顧了方向集中的單一性，但它的方向集中性的程度又太小。那麼在這兩者之間，我們究應強調那一方面而犧牲那一方面呢，我們說，兩者都應強調，兩者都不能犧牲。然則，我們又怎樣去解決這兩者之間的矛盾呢？其實，這是很簡單的，例如我們採用簡單幾何形狀的天線，但不是用一根，而是用很多根同樣的天線按照適當的方法組合起來，那麼在各個天線的個別和相互作用下，我們就獲得一種可能性，即各個簡單天線的方向集中性的單一性可以保留下來，兩整個系統的方向性的集中程度又可因相互之間的助長而達到需求的水平，這樣，我們就可達到預期的要求了。

由很多個相同幾何形狀的天線組合而成的天線系統稱為天線陣，各個個別天線則稱為天線元。天線陣的幾何形狀視各天線元之間的相互位置而定，它可以作為一直線式排列，稱為直線型天線陣；也可以是圓環形排列，稱之為準圓環形天線陣等等。它們的性能的具體研究，我們將在以後陸續引進！

第三款 天線上電流的分佈形態對輻射性能的 決定作用，及天線輻射阻抗的概念

所謂天線上電流的分佈形態，是指構成天線的導線上的導體性電流的空間分佈而言。同學們也許會懷疑，天線上的導體性電流不是處處一樣嗎？那麼所謂電流的空間分佈將何所指呢？其實，這樣的疑問已犯了純電路觀點的片面性的錯誤了，因為從馬克斯威爾聯立方程式所包涵的內容看來，天線上的導體性電流雖然從表面上看來似乎很符合電路觀點，但實質上它却具有波動的本質，因此有一些書上把天線比作一波導，而將天線上的導體性電流比作一波導壁上的電流，這種論點，從物理

意義上來講是完全正確的，這裏我們當然不想去牽涉很多複雜的概念，但祇少我們應該指出，天線上的導體性電流並不是處處相同，而是按照着一定的規律性分佈着的。具體地來講，實用天線電流的分佈可以分爲行波及駐波兩種，前者稱爲行波天線，後者則稱爲駐波天線。對行波天線來講，天線上各點電流的振幅雖處處一樣，但各點電流的時間相並不相同；對駐波天線來講，天線各點上電流的時間相雖處處一樣，但各點電流的振幅則又並不相同。由此可知，不論天線之爲行波或駐波，它們具有着一個共同的特點，即：對同一時刻而言，天線上各點所呈現的電流值並不相同！由於以下即將述的理由，同學們可以知道，在研究電流的空間分佈與天線輻射性能的依從關係時，我們所指的電流分佈是指在同一時刻的分佈。因此我們又可以說，不論是行波天線或駐波天線，它們都有着空間不均勻性的電流分佈。

天線上的導體性電流的空間分佈形態是決定天線方向性的第二個決定因素。這一觀念，很多同學是不很容易建立的，其原因，不外是存在着這樣一個模糊的概念，即：所謂天線的方向性，其本質無非是輻射場在空間分佈的幾何結構，那麼它被決定於天線的幾何形狀這一事實，就似乎是很直觀的，至於它也被決定於天線電流的分佈這一事實，那就很難理解了。其實，這一觀念的說明却也是非常簡單的。因為我們可以這樣地來理解：引用微積分這一數學觀點，就容許我們將空間任一點的輻射場被理解爲無限個長度爲 dl 的小天線的輻射場的總和，這一總和是由線積分的形式表示出來的，在這裏，電流的空間分佈就充當了被積分的函數，這就說明，空間任意一點的輻射場必然與電流的分佈形態密切地聯系着，也就等於說，後者是決定天線方向性的一個決定因素。

根據以後的分所，我們可以知道：在一般情況下，不論天線爲行波或駐波，在同一時刻，天線上電流的分佈形態都可以近似地視爲一空間的正弦函數，它的波長恰等於電源的波長。在這個決定電流分佈的數學函數確定後，很顯然地，對某一個已知其幾何形狀的天線來講，電流空間分佈的總的形態，就將被決定於它的電的尺寸了。必須指出，這一結論是非常重要的而且是很有趣的，因為，它相當於說，當天線已經定型亦即其幾何形狀及幾何尺寸肯定後，天線的方向性將更被決定於電源的頻率或波長！就這樣，我們又找到決定天線方向性的第三個決定因素了。

關於天線方向性的決定因素的鑑別，我們不準備再討論下去了，同學們在通過今後的學習，自然會得到更爲形象的理解。但應該指出，我們以上所作的一些分析，還祇是對單根天線而言的；對於天線陣來講，它的方向性的決定因素還多得很呢，也正因爲它的決定因素多，所以就容許我們在更寬的尺度內進行選擇和設計，因此它能獲得比單根天線遠爲理想的方向性，也正是這個道理。

在說明電流的分佈形態時，我們還應該指出，在以上的討論中，我們只涉及了電流的分佈的型式，至於電流的大小對於天線輻射性能所起的作用則還沒有談到。在電流的分佈爲一正弦函數這一假定條件下，則所謂電流的大小就完全可以由其振

幅的大小標誌出來。我們現在就要追問一下，電流振幅的大小在天線輻射性能中所起的作用，究竟體現在什麼地方呢？它的具體作用，是在乎影響天線輻射功率的大小。這一結論又是使一般同學們感到困惑的地方，因為，他們要問，決定天線輻射功率的大小的不是位移電流嗎？為什麼却是天線表面上的導體性電流呢？關於這一概念，我們可以這樣來解釋，即：在天線的幾何形狀及電源頻率決定後，天線上的導體性電流及其四週空間的位移電流之間，其相互比率也就肯定了，因此導體性電流的大小，就直接標誌着位移電流的大小，因此，也就標誌着輻射功率或輻射電場的大小。或者，我們也可以這樣地來理解，即：天線的輻射功率的能源，是由電源所供給的電流形態的能量轉化而來的，很顯然的，電源所供給的電流形態的能量愈多，那麼由天線輻射出的能量也就愈多，但因電源供給的能量的多少可以由天線上電流的大小直接標誌出來，這樣，天線所輻射的能量或功率的數值，也就自然被決定於天線電流的大小了。

假使我們把天線的輻射功率與天線上導體性電流的數值結合起來，我們就可以獲得描繪天線輻射性能的一個定量參數，那就是俗稱的天線的輻射電阻，它的具體數值，是輻射功率除以電流的平方。很顯然的，輻射電阻將與輻射功率成直接的比例，因此它就可用以直接描繪天線輻射功率的大小；在另一方面，由於輻射電阻這一概念中已撇開了決定天線輻射性能的電的因素，而各項幾何因素則又得到了全面的概括，因此在工程上廣泛被採用。但應指出，輻射電阻雖以『電阻』命名，但它却與一般所熟知的電阻概念迥不相同，其主要區別，在於兩個方面：第一，電阻標誌着電能的損耗，它由電能轉化為熱能；輻射電阻則並不標誌電能的損耗，它僅用以描繪由電流形態的能量轉化為電波形態的能量的程度。第二，電阻是呈現在一個有形的導線的內部，而輻射電阻則呈現在天線四週的整個空間的介質之內，它是無形的，它的數值也不可用任何儀器直接測定出來。總之，輻射電阻祇是一個人為的定義，不可因它外表的命名而混淆了它的物理實質。此外，我們還可指出，輻射電阻本身並沒有肯定的數值，因為，按照它的定義來看，輻射功率雖然是一個定數，但天線上的電流却並不是一個常數而是一個空間函數，因此，祇有在作為參據的電流指定後，輻射電阻的數值遂能肯定。習慣上，我們作為參據點的電流有兩個，其一是駐波電流的波腹，其二是天線饋電端電流的數值。

與輻射電阻相應地，我們還有所謂輻射電抗，兩者的複數和，則稱為天線的輻射阻抗。輻射電抗可以是電容性的，也可以是自感性的，它的數值也有為零或為無限大的可能，在這一情況下，我們就稱天線進入共振狀態。關於輻射電抗的形成的物理原因，我們這裏不準備詳細分析，祇是指出，它是由於輻射功率不為一純實數而為一複數所致。同學們在通過今後的學習後，就可以很容易得到理解了。

在談到天線的阻抗問題時，我們特別要提到的，是天線的輸入阻抗的概念，它的定義是天線的輸入端的電壓與輸入端電流的比率。利用輸入阻抗這一概念後，我

們就可把天線當作一等效電路來看待，這樣，在研究天線的饋電設備這一問題時，就得到極大的便利。天線饋電設備是研究天線實際操作的一個重要主題，它是我們以後各章學習的重點，至於現在，我們祇須搞清輸入阻抗這一概念就夠了。

第四款 各項決定因素的歸納及本章研究範圍的確定

通過以上各款的分析，我們已初步描繪了天線輻射問題的簡單輪廓，我們知道，天線的輻射性能，是與天線的幾何形狀、電源的頻率、以及天線上導體性電流的空間分佈形式等決定因素密切地聯系着的；而且，事實上，它還應與天線四週空間的介質的特性，及地面的幾何形狀和其等效電參數等均有着密切的依從關係。更在由很多個天線組合而成的天線陣中，我們還將遇到更多的決定因素。由於決定天線輻射性能的因素如是之多，而各決定因素之間又相互交織地關連着，這就使得天線的輻射問題變得極度複雜；再則，天線既然是一個能量轉換器，因此它不獨概括着電路的理論，而且也概括着電波的理論，這就要求我們不獨要具有很好的有關電路和電波的準備知識，同時也要求我們必須具備很好的數學基礎才行。天線的輻射理論是本課程中一個比較精深的問題，這是我們應該估計得到的。

天線輻射問題的研究，我們可以歸納為下列四個問題的鑽研：

- (1) 電波輻射的方向性，它包括方向性圖，方向性係數及增益係數；
- (2) 天線的輻射阻抗，它包括着天線的輻射電阻，輻射電抗，以及天線陣中的自阻抗和互阻抗；
- (3) 天線的輸入阻抗，它包括着天線的輸入電阻及輸入電抗；
- (4) 天線的效率

等等。我們本章的學習任務，就是要就以上所指出的學習對象，去求出它們各各與各項決定因素之間的依從關係為目的。我們不獨要求出各對象與各因素之間的相互關係的函數表達式，並且要儘可能地找出各決定因素所起的獨立作用，這樣，才可能容許我們從更高的原則上來看透事物的本質，以便找到我們對各項決定因素的定量選擇和設計的依據。我們的學習系統將以天線的幾何形狀為主題，並由單根天線的研究過渡到天線陣的研究。我們本章的要求以認清天線輻射性能的基本實質為準則，至於各種天線的工程要求及其實際的饋電和操作方法，則留在以後各章中繼續引進。

第二節 基本振子的輻射理論

在上節中，我們已完全肯定了天線具有輻射機能的可能性，並在原則上指出了各項決定因素所起的決定作用及其物理意義，但這些決定因素的定量作用究竟通過怎樣的函數關係呈現出來這一事實，正有待於我們進行研究；在另一方面，對同一天線而言，我們所要研究的天線的輻射性能，其討論內容又是多方面的。為了使同