

超 高 頻 電 子 管

陸 鍾 祚 編 著

人 民 郵 電 出 版 社

內 容 提 要

本書共分六章，由靜電控制的超高频电子管講起，依次講速調管、磁控管、行波管及气体放电开关管。材料很丰富，物理概念也很清楚。附圖有 309 个，有关参考资料也不少，既适合大学無綫电系师生参考，也可供学习超高频無綫电的工程技术人員参考。

17-72/27
05

超 高 頻 电 子 管

編著者： 陆 鍾 祚

出版者： 人 民 邮 电 出 版 社

北京东四 6 条 13 号

(北京市書刊出版業營業許可證出字第 048 号)

印刷者： 北 京 市 印 刷 一 厂

發行者： 新 华 書 店

开本 850×1168 1/32 1958 年 9 月北京第一次

印張 13 册 頁數 221 1958 年 9 月北京第一次印刷

印刷字數 370,000 字 統一書号：15045·总 782—無 201

印数 1—2,650 册 定 价：(10) 2.05 元

序 言

超高频管是近代电子管中最新和工作频率最高的一支，它也是目前世界各国电子管制造事业和研究事业中集中很大的力量从事研制的一支，而在高等学校中亦均已开设有超高频技术和超高频管以及超高频工程或雷达等等有关的科目，该方面的事业与教育均已为各方所注意。

超高频管这门科目在南京工学院无线电系电子器件专业已开设好几年，为电子器件专业必修课程。它的预习科目是超高频技术，它的教学目的是给学生在超高频管的各种类型上建立一稳固的理论基础、掌握一定的计算和初步设计的能力、懂得该方面的应用要求、以及树立一定的测试能力，使学生离开学校后在工作岗位上从事该方面工作时，能够继续自学和不断发展。本书是著者在南京工学院数年来的讲稿经过补订而编印，主要包括下列各章，(1)静电控制工作超高频管、(2)速调管、(3)多腔磁控管、(4)行波管、(5)超高频气体放电开关、绪论，共六章。这些内容都是为打好一定的理论基础和解决实际技术问题所必需的，也是正确应用这些超高频管以便获得效果良好的设备所须参考的。

本书内容在讲授上足供 100 学时之需，第六章原为实验课的内容不一定在课堂上详细讲。每章之末均附一定的练习题供练习之用。本书除作为电子器件专业超高频管教学之用外，也可供其他方面参考之用。

书中采用有理化的实用单位 (RMKS) 制，这是国际协议单位之一，苏联科学院度量单位委员会也采用这单位制。

由于超高频管是新兴的一门学科，而它的类型又非常广泛，涉及理论颇多深奥，文献资料众多而教学用书极少，在这样一个情况下编写超高频管用书是缺乏经历可资遵从的，本书原为著者讲课手稿，虽经补充增订，其中不当之处尚希海内学者指正。

隋鍾祚

南京工学院，1958。

目 录

序 言

第一章 緒論	1
1.1 总述	1
1.2 超高频电子学及其领域中的物理特性	1
1.3 超高频电子管的发展过程	2
1.4 超高频工程在各方面的应用范围及频率分段	4
1.5 超高频管的现有种类	5
第二章 静电控制超高频电子管	7
2.1 总述	7
2.2 普通电子管在高频下的性质	8
2.3 小讯号二极管中的电子运动	17
2.4 大讯号二极管中的电子运动	29
2.5 小讯号二极管在高频率下的等值电路	34
2.6 三极管中电子飞越时间的影响和三极管理论计算	46
2.7 静电控制超高频电子管的现有类型与结构	64
2.8 静电控制超高频电子管设计计算的尺度比例法	74
2.9 超高频振荡器原理	79
2.10 超高频振荡器	85
第三章 速调管	103
3.1 总述	103
3.2 电子的速度调制和速调管的基本结构	104
3.3 双腔速调管的速度调制	107
3.4 双腔速调管工作原理的分析	108
3.5 双腔速调管输出的功率及效率	121
3.6 双腔速调管放大器	126
3.7 反射速调管	133
3.8 反射速调管振荡器	140
3.9 双腔速调管振荡器	15
3.10 直射式多腔速调管	163

3.11 速調管的結構及数据	172
3.12 速調管的測試	189
第四章 多腔磁控管	193
4.1 总述	193
4.2 电子在电磁場中的运动	195
4.3 磁控管振盪器	207
4.4 行波多腔磁控管振盪器	212
4.5 行波多腔磁控管 π 模式振盪	218
4.6 多腔磁控管的其他振盪模式	221
4.7 多腔磁控管中旋轉电子的相位聚焦	224
4.8 多腔磁控管 π 模式的工作情况分析	226
4.9 多腔磁控管工作中电子运动摆綫特性的影响	236
4.10 多腔磁控管的效率	244
4.11 多腔磁控管的电流与电压的关系式	251
4.12 多腔磁控管陰陽二極的最佳半徑比	257
4.13 多腔磁控管諧振腔系統的諧振頻率	259
4.14 多腔磁控管振盪模式的分隔	261
4.15 多腔磁控管振盪器的等值电路	267
4.16 多腔磁控管的頻率挽入, 頻率推出和長綫效应	273
4.17 多腔磁控管的調諧	277
4.18 多腔磁控管的測試	279
4.19 多腔磁控管的結構	284
4.20 多腔磁控管的尺度比例法	296
第五章 行波管	301
5.1 总述	301
5.2 綫卷式慢波結構行波管	302
5.3 綫卷式行波管行波的增益	306
5.4 綫卷式慢波結構行波管的行波傳輸系数	313
5.5 綫卷式行波管的增益	327
5.6 防止振盪的集中衰减	330
5.7 电子注傳輸至綫卷行波的功率	333

5.8 綫卷行波管的最大功率	338
5.9 無慢波电路結構的行波管	345
5.10 返波管	370
5.11 磁控行波管或磁控放大管	376
5.12 行波管的噪声	384
5.13 現有行波管的一般种类和数据	393
第六章 超高频气体放电开关管	402
6.1 总述	402
6.2 气体放电开关的应用和裝置	403
6.3 超高频气体放电的性質	407
6.4 高频率下气体放电的电导	408
6.5 高频气体放电天綫开关管	411
6.6 高 Q 高频放电开关的类型	412
6.7 胞式 TR 管的諧振腔及其調諧	414
6.8 胞式 TR 管的溫度补偿	415
6.9 胞式 TR 管的諧振腔耦合方法	416
6.10 連腔式 TR 管的結構及其調諧	418
6.11 低 Q 高频放电开关的类型	419
6.12 現代气体放电开关基本計算途徑及实验的研究	422
6.13 气体放电天綫开关的性質及充气的性質	423
6.14 波尖能量	425
6.15 放电漏过功率	426
6.16 还原時間	428
6.17 保活电极	429
6.18 TR 管的寿命及含气的被清除	431
6.19 气体放电天綫开关的現有种类的参量	432

第一章 緒 論

1.1 总述

超高频和微波电子管的蓬勃发展以及它的广泛应用是由于近代科学的成就与无线电技术的需要所促成的。无线电技术在继续不断开拓的区域就是超高频和微波的区域。超高频电子管和微波电子管的制造与研究就是为了在这个方面不断的作出新贡献。

超高频和微波电子管在国防上有特殊价值，在科学研究与工程技术上又有密切的关系。因此它与国防事业及国民经济均休戚相关。

我们学习超高频和微波电子管这一课的目的，是学习这个领域中的原理与结构、学习它的量测技术和应用、以及掌握从事超高频电子管制造所必需的基础和从事研究工作所必需的理解能力。在学习超高频电子管时，除有关它本身的工作原理外，还应当注意这个领域中的特殊物理性质、特殊元件、以及与电子管不能分割的电路。谈超高频管，既需谈电子管中的电子运动又需谈与电子管结合在一起的电路。这样，在从事超高频管研究和制造的人就需要更广泛的无线电技术和超高频技术基础，也比普通电子管与无线电技术有着更密切的关系。因此在学超高频管的时候，应先学自无线电基础上发展起来的超高频和微波技术。

目前超高频和微波已向毫米波段进军，在实验室中已取得许多相应的发展，不久的将来更将扩大超高频和微波领域而为人服务。为更短波领域中的工作打下基础也是我们学习这门课的目标之一。我们将分别的但是扼要的谈一谈目下这个领域中的情形。

1.2 超高频电子学及其领域中的物理特性

超高频管系由普通低频率应用的静电控制的电子管发展起来的，而且超高频电子管中仍旧有一类利用静电控制原理。电子由阴

極發射，然後在各電極之間受電場作用的力而運動，最後飛上陽陰或其他電極。由於電子具有慣性，雖然它異常微小以致在管中的運動非常迅速，例如在普通收訊放大管中由陰極飛到陽極的時間僅約 10^{-9} 秒，可是當工作頻率提高到數千兆赫時這時間就可以與交變電壓的週期相比甚或超出之，因而電子慣性作用就不能忽略。這是特殊物理性質之一。其次即使工作頻率尚不太高，電子慣性作用並不嚴重，但是普通電子管的各極引綫電感和極間電容的阻碍作用已十分顯著。這樣，超高频管本身的物理特性就比低頻率電子管來得複雜了。最後，由於頻率的提高，管子中的電流不僅有電子傳導所形成的分量而且位移電流的分量不能忽略甚至是主要的分量，因此必須引用麥克士偉的全電流概念。

除掉管中電子的運動關係外，我們還要注意與管子結合在一起的不可分割的電路，它也有特殊的物理特性。集中參數元件已不能應用，而隨頻率的提高分佈參數的元件逐漸獨佔了應用上的地位。這樣，集中參數電路理論已不適用於超高频和微波原理的分析，而分佈參數元件的理論和麥克士偉的電磁波理論成為分析的基礎。

分佈參數元件，首先是由諧振綫的特殊性質所組成的。當頻率更高時，就使用了波導管和諧振腔來代替集中參數元件的LRC的電路。因此在超高频工程中，元件的外表顯然具有更多的機械性質、更多的機械生產上的技術問題和更高度的機械上的精密要求。隨着電的性質和機械性質的提高，毫無問題在其他方面，例如絕緣材料、化學材料、真空封閉、陰極發射等等均需同樣提高。這樣超高频及微波就形成了一個新的重要的領域。

1.3 超高频電子管的發展過程

超高频電子管和無綫電工程發展之間的聯繫表現得非常清楚。無綫電工程自長波通訊起經歷中波一步一步地走入短波，人們對於無綫電波的性質逐漸掌握了，於是短波的研究乃獲得長足的進步並推向超高频領域。無綫電工程之所以有如此的輝煌成績，是不能脫

离电子管的，因此現在無綫电电子学这名称，也可以称为电真空器件的無綫电工程，而概括一切的总名称应是电子学。总之电子管的發展不能脱离無綫电工程而無綫电工程沒有电子管就不能达到今日的状况。

1887年赫芝証实麦克士偉电磁波理論时所使用的頻率实系超短波。他用火花式發射机产生微弱的超高频并在實驗室中証明了电磁波的反射繞射等性質。但是在赫芝之后，实用無綫电通訊却先走上了長波的途徑，然后再發展到广播段及短波段，并逐漸向超高频發展。其所以如此，完全是由于工業能力的緣故。該时电机工業已能造出几十千赫以上的高频發电机，因此才首先步上了長波通訊的应用。1908年三極电子管發明之后，方始促使無綫电通訊轉入新的一頁，而电子工程亦由此正式萌芽。

电子管發明后，無綫电通訊得到了迅速的發展。应用的頻率逐漸提高，电子管額定功率也愈做愈大。并發現了天空的电离層証明短波無綫电非常适合于远距离通訊工作。自此通訊工作深入短波范围，电子管的工作也非常滿意。可是当使用的頻率超出短波范围之后，电子管便逐漸显出缺点，它的定額功率低落、工作不稳定、电路效率低、零件品質因数不足、絕緣材料不合等等，阻碍了普通电子管在超高频工程上的应用。

超高频管首先仅在靜电控制的普通电子管的基础上加以改进。在这方面先后經小型管、橡实管、門鈕式管、而做到灯塔管、元盤管、及諧振腔管，而工作頻率也發展到10,000兆赫。同时，在其他方面的理論研究下，又制出了調速管、多腔磁控管、行波管、电子注波管等的超高频管以及为满足雷达应用的脉冲电子管、气体天綫开关管、及强电流气体放电脉冲管等，使得微波工程得以迅速的發展起来。

这許多超高频电子管的構造与应用技术均和波导管及諧振腔有密切的关系。电子管与电路合成一个整体，所謂超高频管就往往是一个振盪器或是放大器。頻率愈高管子和电路的結合愈感需要。

由科學研究的發展史來看，理論與實驗是互相推進的。常常因為實踐上遇到困難，便進入理論研究，理論上得出結論，又指導實踐。各種類型超高频管的發展幾乎都如此。

目前微波電子管繼續朝着縮短波長和增大功率這兩個主要方面發展。在縮短波長上，各國均集中力量于毫米波與超毫米波的產生。這方面尚有許多工作沒有完成。照現在各個方面進行的方法和途徑看來，將會產生許多新的方法而不是微波電子管的改進。例如高能電子束通過波導管和高速粒子在介質中的運動以及鉄銻氧磁物的應用等等均有成功的希望。我們所以要進行毫米波和超毫米波的產生，主要是雷達的分辨能力可以提高到電視的效果，其次是科學研究上已產生了新的微波頻譜學，它對物質的研究提供了新的有效的方法。至於在功率方面增加的要求也是迫切的，因為提高功率是增加微波技術能力的基本辦法之一。

1.4 超高频工程在各方面的应用範圍及頻率分段

超高频及微波技術在下述各方面已有重要應用。

(甲) 軍事方面：

雷達、導航、導彈、軍用電視、接力通訊等均為微波技術所獨佔。我們可以說，沒有微波就沒有上述各項，而對於軍事的價值是不言而喻的。

(乙) 科學研究方面：

微波對科學研究也有巨大貢獻。在原子能研究上脫離不了微波技術的幫助，而粒子的綫性加速器更是微波技術的直接產物。今日微波技術已在科學研究上形成一門獨立的研究項目，即微波頻譜學已與紅內綫紫外光及可見光光譜學並列互為相輔而行的學科，且微波頻譜學在量測的準確度上勝過其他光譜學的方法。

其次，微波技術已應用到宇宙星際的觀察，形成射電天文學，大大擴大人們觀察天體的窗孔，發現了許多新的星球和宇宙星際的射頻輻射。人對太陽的研究也取得了新的成功，量得了太陽的射頻

輻射在几厘米到十几米。

又如將微波技术应用到气象部門，則形成了微波气象学，增进了气象的預測工作。这些都是有着特殊成效的方面，其他方面的应用是举不胜举而且是在不断开拓中的。

目前超高頻率的範圍及頻率分段約有如下情况，

頻 率 (兆 赫)	波 長 (米)
30—300	10—1.0
300—3,000	1.0—0.1
3,000—30,000	0.1—0.01
30,000—	0.01—

根据雷达上的应用，上述頻率範圍有如下的波段划分。

波 段 符 号	中 心 波 長 (厘 米)	波 段 范 圍	波 段 寬 (百 分 数)
K	1.25		11
π_S	3.23	3.13—3.33	12
π_L	3.43	3.33—3.53	
S_{w1}	8.285	3550—3700 兆赫	8.45
S_{w2}	8.640	3400—3500 "	
S_{A1}	9.020	3250—3400 "	9.23
S_{A2}	9.455	3100—3250 "	
S_{S1}	9.840	3000—3100 "	6.67
S_{S2}	10.170	2900—3000 "	
S_{G1}	10.515	2800—2900 "	7.14
S_{G2}	10.900	2700—2800 "	
C		3500—6500 "	

1.5 超高頻管的現有种类

(甲) 靜电控制超高頻管:

(1) 小型管

- (2) 橡实管
- (3) 門扭式管
- (4) 灯塔管及元盤管
- (5) 諧振腔
- (乙) 速調管:
 - (1) 反射速調管
 - (2) 直射式速調管
- (丙) 多腔磁控管:
 - (1) 固定頻率式
 - (2) 調諧式
 - (3) 調制頻率及調制幅度式
- (丁) 行波管:
 - (1) 电压放大行波管

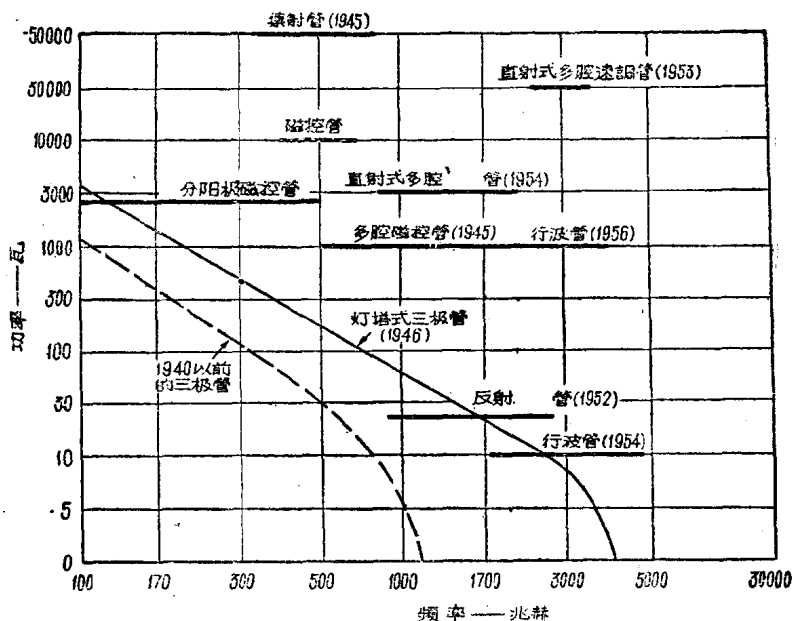


圖 1.1 超高频管的等幅波振盪的輸出功率

- (2) 功率放大行波管
- (3) 返波管
- (4) 电荷波管 (电子注波管)
- (5) 磁控行波管
- (戊) 集射管:
- (己) 气体天綫开关:
- (1) 高Q式
- (2) 低Q式

上述各种超高频管中某几种管的功率及频率范围以及进展情况如图 1.1 所示。圖 1.1 是在等幅波的工作情况下所有的, 如在脉冲应用下, 則輸出功率尚可增大千百倍。

集射管輸出功率很大, 它是二次世界大战中反雷达用的超高频管, 但是它的工作频率仅可达到一千兆赫以下, 目前反雷达中的效果已小而在功率上言又有其他种类的超高频管逐渐追上, 因此在本書中將集射管略去未談。

第二章 靜电控制超高频电子管

2.1 总述

靜电控制超高频电子管的工作原理与普通电子管的原理相同, 它亦系由管子中电場的作用使电子自陰極飞向陽極并且通过电子完成交直流电場之間的能量交换。但是由于工作频率提高, 普通电子管將产生許多困难而难于应用。在克服普通电子管在高频率下的困难的途徑上, 逐漸發展了一系列靜电控制的超高频管。普通电子管的性質可以由一組靜态特性曲綫表达出来, 由它还可以决定管子在学习上应选择的工作区域。当工作频率提高之后, 除掉將出現許多困难因素之外, 也使管子的参量成为复数, 因而靜态特性曲綫不再能应用。我們必須研究管子中的电子运动, 始可明了超高频电子管

中的工作情况和得到理論的分析。在着手分析靜电控制超高频电子管的理論和有关的問題之前，我們应首先对普通电子管在提高工作頻率后的性質和情况有所了解，以便知道它的發展途徑以及最后的限制究竟是什么因素，这样有助于理論的解决。

靜电控制超高频电子管的种类現有：小型电子管(花生式管)、橡实电子管、門鈕式电子管、元盤电子管(包括灯塔式、鉛笔式、陀螺式等)、以及諧振腔式电子管。其中以元盤式电子管为最后的型式，它的工作頻率最高，目下已提高到10,000兆赫。这許多种类的外觀結構虽然不同，但是它們的工作原理一样，並沒有脫离旧有的理論基础，因此併为一章。

本章中將談到电子管在提高頻率后的性質、电子管在小訊号下的工作状态、大訊号下的理論問題、管子的尺寸和結構和超高频电子管的振盪应用等。使讀者有一全貌的認識，从而使管子的設計制造更合乎实际要求。

2.2 普通电子管在高频下的性質

普通电子管在低頻率下工作的时候，在理論分析上常用等值的陽極电路，在应用上常用特性曲綫作圖解法解決問題。工作頻率提高之后，等值的陽極电路不再合宜因为它忽略了極間电容和引綫电感，而圖解法亦不能表示复数参量的关系亦告無用。

普通电子管在提高工作頻率时，受到三个主要困难，一是極間电容、二是引綫电感、三是电子的飞越時間。極間电容的存在可以使电子管的輸入电路和輸出电路受到影响，陰極引綫电感將产生一輸入导納降低了激励的訊号并且亦增大了輸出阻抗因而減少了輸出，飞越時間亦將产生一輸入导納并且使管子的参量成为复数終將減少了輸出。这三个因素在管子發展的过程上，前二个因素的困难在改变了电子管的結構和改进了应用的技术之后均被克服或不再成为困难。而第三个因素則阻碍了靜电超高频管工作頻率的無限制提高。

我們將对这三个因素作分析，以便明了它們所产生的困难，由此亦可得出改进的途徑；对第三个因素將作更詳細的分析，以求得出一定的理論結果和求出决定管子尺寸的关系式，作为設計和制造的指南。

(甲) 电子管極間电容的作用：

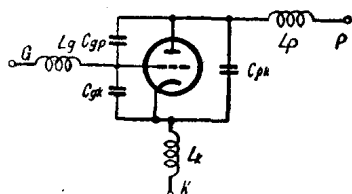


圖 2.1 三極管的电路表示

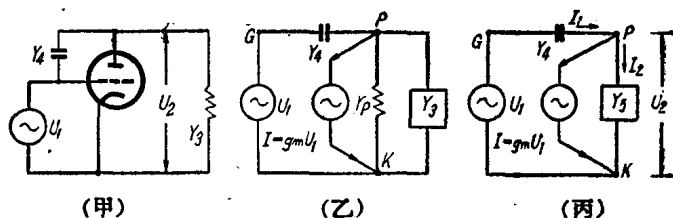


圖 2.2 三極管在低頻率时的近似等值电路

(1) 栅陽極間电容对輸入导納的影响：

电子管如由等值电路来表示，自其結構言，可以表示如圖 2.1；管子的極間电容及引綫电感分別以集中元件来表示。在此情形下，电子管如用陽極等值电路进行分析，則將非常麻煩而且亦將分不出主次的因素关系。但是这許多参数在不同的工作頻率下有不同輕重的作用；因此在实际的分析上常可以省略某一部分的存在从而將計算簡化，同时主要的因素关系却能清楚的觀察出来。例如在頻率低的时候，仅栅陽極間电容有主要的关系，而可以將其他略去。这样，陽極等值电路在30兆赫以上可以由圖 2.2 甲表示。

由于栅陽極間电容的存在，电子管的輸入导納將随陽極負荷阻抗的性質而有很大的变动。輸入导納的电导部份可以有正值亦可有負值，随負荷阻抗而定。如果电子管輸入电导是負值，常可引起振盪因而破坏放大作用。这种負輸入电导亦常被利用来構成振盪器。

自圖 2.2 的等值电路，有

$$Y_4 = j\omega C_{gp} \quad (2.1)$$

$$Y_5 = Y_3 + \frac{1}{r_p} \quad (2.2)$$

$$I_1 = (U_1 - U_2)Y_4 \quad (2.3)$$

$$I_1 = U_2 Y_5 + U_1 g_m = \left(U_1 - \frac{I_1}{Y_4} \right) Y_5 + U_1 g_m \quad (2.4)$$

或

$$I_1 = U_1 Y_4 \left(\frac{Y_5 + g_m}{Y_5 + Y_4} \right) \quad (2.5)$$

所以电子管輸入导納是

$$\begin{aligned} Y_{in} &= \frac{I_1}{U_1} = Y_4 \left(\frac{Y_5 + g_m}{Y_5 + Y_4} \right) \\ &= j\omega C_{gp} \left(\frac{Y_5 + g_m}{Y_5 + j\omega C_{gp}} \right) \end{aligned} \quad (2.6)$$

由式(2.6)，如果負荷阻抗的性質及大小有

$$Y_5 = -Y_4, \text{ 則 } Y_{in} = \infty$$

$$Y_5 = \infty, \text{ 則 } Y_{in} = Y_4 = j\omega C_{gp}$$

$$Y_5 < -Y_4, \text{ 則 } Y_{in} = G - jB$$

$$Y_5 > -Y_4, \text{ 則 } Y_{in} = -G + jB$$

由此可知，当陽極負荷阻抗是感抗，并且其值等于栅陽極間电容电抗，則电子管的輸入二端等于捷路，亦就是說輸入导納为無穷大。如果陽極負荷是电感电抗，并且其值大于栅陽电容抗，則电子管的輸入导納有負电导，在某些情况下可以引起振盪。

由式(2.6)可知，輸入导納与頻率成比例，頻率高輸入导納亦高，最后終可使訊号源負荷过重而不能应用。

(2) 陽陰極間

电容对輸出阻抗的影响：

电子管陽陰極間电容在高频时对陽極負荷电阻的大

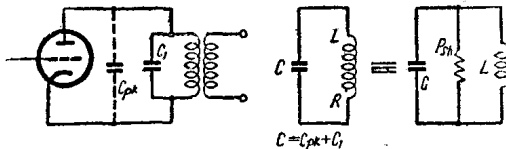


圖 2.3 陽陰極間电容对輸出电路的影响

小亦有严重的影响,即使在音频频率范围中也不能忽略它的作用。在射频应用上陽極負荷常由諧振电路構成,如圖 2.3。在并聯諧振电路中如 R 很小,有下述关系式

$$R_{sh} = Q\omega_0 L = \frac{1}{R\omega_0^2 C^2} = \frac{Q}{\omega_0 C} \quad (2.7)$$

式中, $Q = \frac{\omega_0 L}{R} = R_{sh} \omega_0 C = \frac{R_{sh}}{\omega_0 L}$

$$\omega_0 = 1 / \sqrt{LC}$$

$$C = C_{pK} + C_1$$

$$R_{sh} = \text{并聯电阻} = Q^2 R$$

$$R = \text{串聯电阻}$$

由式(2.7), 电子管陽極負荷电阻 R_{sh} 与电容和频率的乘积成反比。陽極負荷电阻如过小, 电子管輸出亦將降低。諧振槽路的电容如果愈降愈小, 亦即是频率愈提愈高, 最后所剩的电容將仅剩陽陰極間电容与次一級电子管的輸入电容。因此当频率提高而不使輸出降低, 則最后必需減小極間电容。

在放大器的应用上, 电子管的跨导以大为佳, 而上面說明極間电容要小, 因此我們可以用这两个参量的比值来比較电子管的优劣。于是得出三極管的品質因数为

$$G = \frac{g_m}{C}$$

式中, C 为电子管的輸出电容与輸入电容之和。

g_m 为电子管的跨导。

五極管放大器的放大倍数为

$$\begin{aligned} A &= \frac{\mu R_{sh}}{R_i + R_{sh}} = \frac{\mu R_{sh}}{R_i} = g_m R_{sh} = g_m \frac{Q}{\omega_0 C} \\ &= \frac{g_m}{2\pi f_0 C} \frac{f_0}{\Delta f} \end{aligned}$$

故