

电磁谐振腔中波的 相互作用现象

В. В. 史捷因史列格著



国防工业出版社

52

4

电磁谐振腔中波的相互作用现象

B. Б. 史捷因 史列格 著

王志群 译

黄武汉 校



国防工业出版社

В. Б. Штейншлейгер
ЯВЛЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЛН
В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ РЕЗОНАТОРАХ

Государственное издательство
оборонной промышленности

Москва—1955

本書系根据苏联
一九五五年俄文版譯出

电磁谐振腔中波的相互作用现象

[苏]史捷因史列格著

王 志 群 譯

董 武 汉 校

国防工业出版社 出版

北京市書刊出版业營業許可証出字第 074 号
北京机械工业出版社印刷 新华書店發行

*

787×1092 耗 $1\frac{1}{32} \cdot 4\frac{1}{16}$ 印張·85,000 字

一九五八年11月第一版

一九五八年11月北京第一次印刷

印数: 1—2,000 册 定价: (10)0.65 元

NO. 2020

作者写給中譯本的序言

作者希望本書通过中文翻譯給予从事微波工作的中国无綫电工程师和无綫电物理学工作者带来好处。

中国科学院电子学研究所黃武汉同志和王志群同志承担了本書的翻譯工作，并使作者有可能对附录二作了某些訂正，作者謹向他們致謝。

作者

1957年12月，莫斯科

目 录

作者写给中译本的序言	3
前言	5
緒論	7
第一章 理想諧振腔与实用諧振腔中的場	15
§ 1 諧振腔中場的方程式	15
§ 2 外壳的变形与波型間的耦合	27
§ 3 与外部电路耦合的元件及波型耦合	36
第二章 諧振腔中的不均匀性与重合現象	43
§ 4 重合点附近的諧振現象	43
§ 5 諧振腔重合点附近的固有函数	57
§ 6 圆柱形諧振腔中的重合現象	68
§ 7 减弱不均匀性寄生效应的方法	84
第三章 諧振腔中微小的不均匀性效应的观察	95
§ 8 观察諧振特性的方法	95
§ 9 不均匀性与重合現象	100
§ 10 重合点上寄生效应的减弱	108
結語	113
附录	115
1 圆柱形諧振腔的固有向量函数	115
2 互阻抗积分	120
3 积分 $\int_{S_0} [\vec{n} \vec{E}] \vec{H}_m dS$ 的研究	123
4 实验时所观察到的諧振腔的各量以及参数之間的关系	125

前 言

利用 H_{01} 型波的圓柱形电磁諧振腔，在超高频無線电測量技术中得到了广泛的应用。这是由于 H_{01} 型波較之其它波型有一系列的重要优点。

但是在实际应用 H_{01} 型波的諧振腔时，会遇到也能在这諧振腔中諧振的其它波型的干扰。

当 H_{01} 型波的自然頻率与干扰波型的自然頻率互相靠近时，便会出现一些極端不能令人愉快的現象，即諧振腔的諧振特性严重惡化(品質因数降低、振蕩强度下降等等)。因此，在相应的測量設備的諧振腔調諧範圍之內，就要出現許多不能工作的間隔，这就在頗大程度上减少了設備的作用，且使它們难于使用。产生这些在实际上非常有害的現象的原因和克服它們的方法，以前并不是清楚的。而說明这个問題就是本書的任务。

本書研究了諧振腔在如下的調諧範圍內产生的一些現象，即在这範圍內，有用的 H_{01} 型波和不需要的波型，其自然頻率互相邻近；本書也提供了关于所觀察到的寄生現象的近似理論，研究了克服它們的方法，并引証了一些实验，借以說明已被發展了的理論。

作者于 1948~1949 年已得到了大致像本書所描述的 基本結果；本書的扼要摘录發表在 1949 年初。

苏联科学院通訊院士 A. A. 皮斯托尔可斯討論了本書的个别章节，作者特致謝意。作者还要感謝物理数学博士 M. Л.

列文、評閱者 M. C. 聶依曼教授以及技術科學副博士 Б. 3. 卡切涅林包烏姆對本書所提的意見。

作者

緒 論

电磁諧振腔是超高频振荡系統的基本形式。在超高频无线电測量技术中，常用它們来測量物質的电磁常数、波長以及用在所謂回波箱中等等[●]。

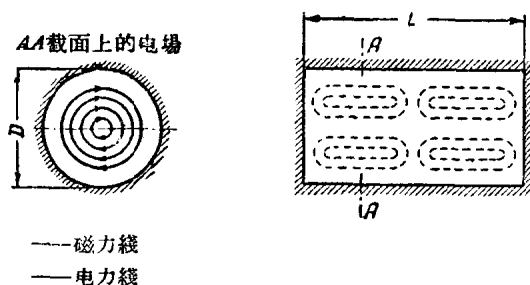


圖 1 a H_{01} 型波磁力綫及电力綫的形状

这类設備是多种多样的，其中最常用的是工作在所謂 H_{01} 波型上的圓柱形諧振腔。 H_{01} 型波应用極广，是因为这种波具有一些特殊的性質。

H_{01} 波型的一个最重要的特点，是当諧振腔的容积給定时，利用这种波型比之利用其它波型，具有更高的品質因数。

H_{01} 波型的極其重要的特性是，諧振腔的側壁上沒有电流的軸向分量，底座上沒有电流的徑向分量（見圖 1 a 和 1 b）。因此，諧振腔表面所开的縫口（因为測量用的諧振器在大多

● 苏联科学家和工程师在这方面做了許多工作。最初开始做电磁諧振腔工作的有 M. C. 聶依曼，B. H. 布尼莫維奇，E. M. 斯部金可夫等。Г. B. 基松科的著作是对諧振腔理論的一个重大貢獻。

数情况下都是开口的) 不致降低品质因数, 因为可以很容易地作到使这些缝口并不截断电流线。例如, 调谐活塞和侧壁之间的接触, 在利用其它波型时是十分必需的, 而在利用 H_{01} 型波时则无关重要。

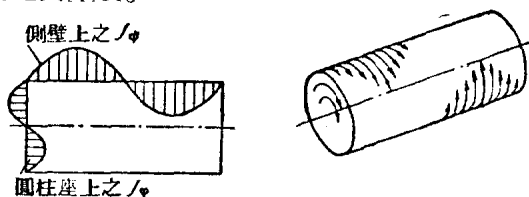


圖 1.6 H_{01} 型波在諧振腔表面上之電流分布

上面指出的这种波型的两个基本特点, 使得这种波对其它波型来说占有特殊的地位。在需要很高的品质因数的情况下, 差不多总是应用 H_{01} 型波。

但是在利用这种波型时, 諧振腔中也常常出现其它波型。可能有其它諧振波型这一点, 使得用这种波型的可調諧振腔在工作时, 会遇到严重的困难。

利用所謂諧振腔的調諧曲綫, 就比較容易理解这一点了。

对于圓柱形諧振腔, 可以将它在各种波型时的諧振頻率同諧振腔的尺寸連系在一起繪成圖形。这种圖形, 可称为調諧曲綫圖如圖 2 所示。

如果沿縱座标軸置以与 $(fD)^2$ 成正比的量, 而沿橫座标軸置以与 $(\frac{D}{L})^2$ 成正比的量, 这里 f 是諧振頻率值, D 是直径, L 是諧振腔的長度, 那么每一种波型都将相当于自縱座标軸某点开始的直綫束。每一条直綫都对应着一个一定的 n 值, n 表示分布在諧振腔長度 L 上的該型振蕩的半波数目[●]。

● 繪制諧振曲綫的公式見附录一。

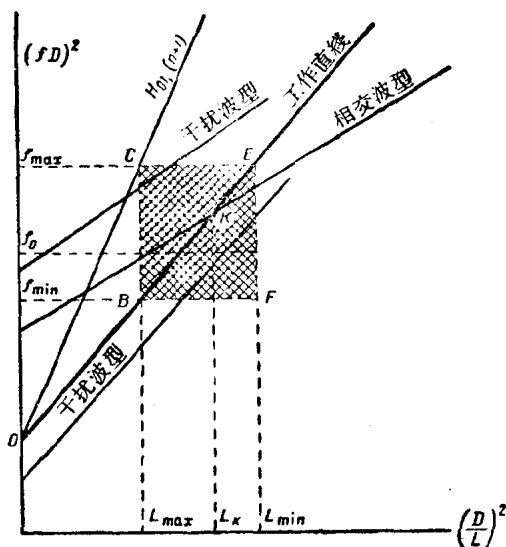


圖 2 圓柱形諧振腔之調諧曲綫圖

相应于运用波型（这里指 H_{01} 型）的直綫我們称之为調諧工作直綫。在圖 2 中即直綫 OE ，用它代表 H_{01} 型波。如果 $f_{\max}$ 和 $f_{\min}$ 是工作頻段的最高和最低頻率，而 $L_{\max}$ 和 $L_{\min}$ 是調諧工作直綫上与这些頻率相应的諧振腔的長度，那么这些量的总合就决定一个工作矩形（圖 2 的 $BCEF$ ）。

从圖上可以看出，当諧振腔的長度 L 在工作矩形的範圍內改变时，除了运用的 H_{01} 型諧振外（其頻率由直綫 OE 决定），諧振腔也可以諧振于別种波型上。在这种情况下，諧振腔活塞的位置与諧振頻率之間相互的單值关系被破坏了：从圖 2 看出，对于某个任意的激励頻率 f_0 諧振腔長度 L 可能有几个不同的值，也就是說活塞可能有几个位置，在这些位置上，諧振腔都将对此頻率諧振。活塞的每一个諧振位置都将对应着一个不同的空間場型（波型）分布，它們用 $H_{l,m,n}$ 来

表示或者用 $E_{l, m, n}$ 来表示, 視乎这种相应的振蕩波是磁型还是电型而定。給定的 L 值也与此完全一样, 它将对对应着数个激励頻率, 在这些頻率上, 諧振腔仍将以各种不同的空間分布場諧振, 即在不同的波型上諧振。

从圖 2 看到的这些寄生諧振可能有三种形式。第一, 是別种波型的諧振, 其頻率处于一条直綫上, 而这直綫在工作矩形範圍內不与調諧工作綫相交; 第二, 是另一种波型振蕩的諧振, 这些振蕩的頻率处于其調諧直綫和选用波型的工作直綫的交点上。我們將把这些点叫做重合点; 第三, 諧振的波型与选用的波型相同, 但分布在長度 L 上的半波数目 n 值不同(同一类型的諧振)。

設計諧振腔时, 其尺寸的选择, 是要使得它在工作矩形範圍之內沒有同类型波的諧振。因此通常就只需要处理前面两种諧振。

在用有可調諧振腔的測量設備时, 减弱干扰波型的影响如果不是主要問題, 也是基本問題之一。只有这个問題解决了, 这种設備才能完成自己的职能。

在运用 H_{01} 型波工作的可調諧振腔中, 减弱其中干扰波型的諧振, 最流行的是采用所謂吸收器的方法。按照此法, 应在諧振腔中放入吸收器, 使不希望有的波型的能量耗散在它上面。結果, 被抑制的波型就变得很弱, 因而也就不影响仪器的工作。加入吸收器时, 要使得在它上面并不耗散所有波型的諧振波的能量。

吸收器对于寄生波和有用的 H_{01} 型波作用上的差別, 可用 H_{01} 型波的特性来解釋, 即它在諧振腔表面上沒有軸向和徑向的电流分量(見圖 1)。

在某些諧振腔的結構中[●]，吸收器(有損耗的电介質)裝在活塞外部的空間，这个空間通过活塞与圓柱侧面間的狹窄环形隙縫与諧振腔相联系(圖3)。当寄生型波諧振时，电流通过环形隙縫流入活塞外部空間，在那里，电波的能量被吸收器强烈地吸收。对于 H_{01} 型波來說，由于沒有穿过隙縫的电流，所以，隙縫实际上对于这种波的諧振沒有任何影响。

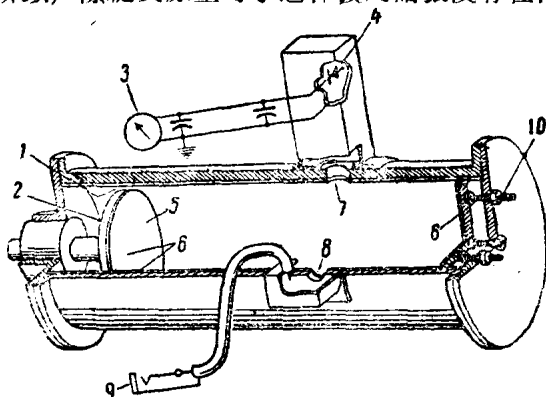


圖3 在活塞外部空間裝有吸收器的諧振腔

1—环形隙縫；2—具有損耗的电介質；3—微安計；4—晶体檢波器；5—調諧活塞；6—銀；7—輸出；8—輸入；9—輸入插孔；10—調整螺絲。

另外一種結構如圖4。圓柱是由用兩塊墊板沿着其圓周表面隔开的單獨部分組成，墊板則是用能够吸收电磁能量的物質制成的。因此，所有有軸向电流分量的波型，其能量在墊板上被吸

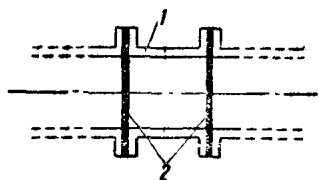


圖4 寄生波的抑制
1—圓柱部分；2—墊板。

● Wilson, Shramm, Kinzer, High Q resonant cavities, BSTJ, 1946, №3.

收，而沒有軸向電流的 H_{01} 波型（和 H_{0m} 波型），則不被吸收。

利用吸收器的方法，一般都能將干擾波型的諧振減弱到差不多不被發現的程度。

但是，在重合點附近，干擾波仍然會出現，並且非常強烈。在這附近可看到諧振腔的品質因數和振蕩強度大大降低。在這些點上，利用諧振腔來確定電介質的損耗或為了其它類似的目的時，測量將發生錯誤。這使重合點附近的調諧區在實際上變成不能工作的。

如果在調諧圖上的工作矩形範圍之內，調諧工作直線与其它波型的調諧直線相交的數目（也就是重合點的數目）很多，那麼，諧振腔的利用就非常困難。

圖5表示沿調諧圖上 H_{01} 型波的工作綫“移動”頻率時，諧振腔品質因數變化的一般性質。從圖上看出，很多間段（死區）內的品質因數降到不能允許的小數值●。這些不能工作

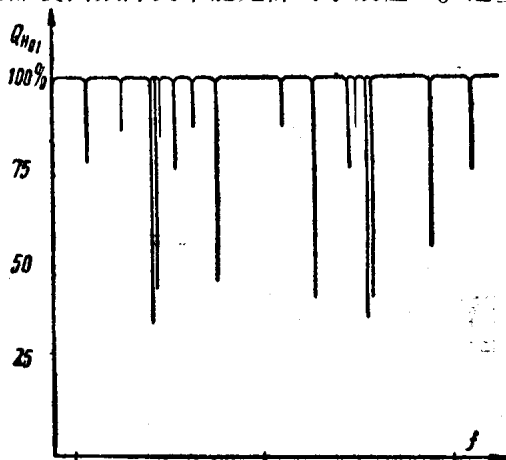


圖5 工作在 H_{01} 型波上的諧振腔當重調時其品質因數之變化

● 圖5死區外部的品質因數取作100%。

的范围，在調諧圖表上，正好相当于 H_{01} 型波的調諧工作直綫与寄生波型調諧直綫的交点（重合点）附近的区域。

尽管由于吸收器的关系，使不希望有的波型在距重合点較远的地方显得很弱，并且看来一般是不應該有什么作用了，但在重合点附近，品質因数降低的現象，仍然可以观察到，这点是很重要的。由此可見，寄生波型的吸收器在重合点附近則变得不大有效。

上述寄生效应的存在，是一个严重的缺点，它使那些采用了可調諧振腔的測量設備大大地变坏。可惜的是，以前对这些有害現象的原因不了解，因而，克服它們的方法也就不清楚。

由于对那些發生在諧振腔不工作範圍內的現象的分析，作者在1948年曾得出結論，認為观察到的寄生現象的原因，是一些在其它情況下完全无关重要的諧振腔的微小不均匀性，也就是說，是相对于理想情況下的那些微小变形（这里指对于直圓柱形的变形）。对于这种理想形狀的諧振腔，它們的参数已計算出来，这些参数是相应測量的基础。

这种不均匀性是永远不能避免的。这可能是圓柱底座有几乎不被觉察的歪斜（其軸不垂直）、截面成橢圓形以及有其它形式的变形。此外，与外部电路相連的諧振腔的耦合元件本身也引起不均匀性。

本書将研究諧振腔中在重合点上产生的現象，詳細地探討不均匀性对諧振腔性能的寄生影响，并指出减弱所观察到的寄生效应的方法。

本書共有三章。

第一章里引入了在諧振腔中当微小的不均匀性（腔体的

微小变形以及与外部电路相連的耦合元件) 存在时 場的 方程式。

第二章分析了重合点附近的現象，并在研究的基础上提出了减弱不均匀性的寄生效应的方法。

第三章是实验，用以說明第二章里所講的内容。参考資料放在附录里。

第一章 理想諧振腔与实用

諧振腔中的場

§1 諧振腔中場的方程式

一个理想的諧振腔是指这样一个空間，它里面充滿的是无耗損的介質，并且被外壁完全封閉，这个外壁具有一定的形状，并且具有无穷大的导电率。

实用諧振腔与理想諧振腔的差別是：第一，实用諧振腔外壁的导电率是有限的；第二，它的外壁是不完全封閉的，因为上面有孔，經過这些孔諧振腔与外电路交連（如与振荡器、負載等等）；第三，由于一些微小的且往往是很难估計的变形，实用諧振腔外壁的形状，可能在某种程度上与我們認為它所具有的形状（一般是一些端正的几何形状）是不同的。

我們先不考虑第三个因素。外壳的变形問題将在§2节里研究。

設 S_0 为与外部設備耦合的小孔所占有的諧振腔表面部分，而 S_p 为諧振腔的其余部分。我們認為，封閉表面 $S_0 + S_p$ 組成相应的理想諧振腔的表面 S 。我們并且假定，諧振腔是由外部穿过 S_0 表面（或其一部分）的角頻率為 $\omega = 2\pi f$ 的簡諧振荡激励的。

根据电磁場方程式解的唯一性原理，表面 S 内部的場，單值地决定于整个表面 S 上电場向量的切綫分量。S. H. 費尔德

(Фельд) ● 得出了一個關係式，它在一般形式上聯繫着某個體積內的場與給定在 S 表面的電場向量切綫分量 $\vec{E}_T$ 之間的關係，這裡 S 是限定這一体積的表面。根據這個關係式， S 所限定的體積內任何一點的電磁場，應該作為下述電磁場的重疊結果，這種電磁場是由沿表面分布的磁綫密度為 $\vec{K} = [\vec{n} \vec{E}] = [\vec{n} \vec{E}_T]$ ($\vec{n}$ ——外法綫， $\vec{E}$ —— S 上電場的真正值) 的磁通形成的；在這種情況下，如果認為已知表面具有無限大的導電率，那麼就可以計算磁通形成的場。

由此可見，如果認為 S 面上電場向量的切綫分量已經清楚，那麼尋求實用諧振腔內部場的問題，即可歸結為相應的被磁通激勵的理想諧振腔的問題。

為了解決這個問題，人們採用所謂諧振腔的固有向量函數 ● 方法來分析其場量。按照這個方法，引入兩個向量函數系統 $\vec{E}_m$ 、 $\vec{H}_m$ ，它們由下列關係聯繫着：

$$k_m \vec{E}_m = \text{rot } \vec{H}_m, \quad (1.1)$$

$$k_m \vec{H}_m = \text{rot } \vec{E}_m, \quad (1.2)$$

為滿足 S 表面上的邊界條件 ●

$$[\vec{n} \vec{E}_m] = 0. \quad (1.3, a)$$

k_m ——暫時是未定因子。

● Я. Н. Фельд, Основы теории щелевых антенн, изд. «Советское Радио», 1948.

● Д. Слэтер, Электроника сверхвысоких частот, изд. «Советское Радио», 1948.

Г. В. Кисунько, Электродинамика полых систем, изд. ВКАС им. С. М. Буденного, 1949.

● 從式 (1.3, a) 和式 (1.2) 得出， S 上也可以滿足條件

$$\vec{n} \vec{H}_m = 0. \quad (1.3, b)$$