

非 綫 繞 电 阻

苏联 Б. С. 加里別林著
西南無綫电器材厂翻譯組譯

人民電訊出版社

Б. С. ГАЛЫПЕРИН
НЕПРОВОЛОЧНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ 1958

内 容 提 要

本書敘述了各种类型的非綫繞电阻的結構、性能和工艺特点；对非綫繞电阻的結構、生产工艺和特殊的試驗方法作了說明。

此外，从技术和使用上論述了目前苏联和外国生产的用得最多的非綫繞电阻的特性。

本書供从事生产、設計和研究非綫繞电阻的工厂和实验室的工程技术人员使用，也可供設計包含电阻的机器的設計人員用。

書中的个别章节还可供中等技术学校和高等院校电工專業的高年級学生作参考用。

参加本書翻譯的有蔡流海、金瑞鑑、馬允中、汪鳳秀、宁志学、靳玉瑞、白溫庆等同志。

非 綫 繞 电 阻

著 者：苏联 Б. С. 加 里 別 林

譯 者：西南無綫电器材厂翻譯組

出版者：人 民 邮 电 出 版 社

北京东四六条13号

(北京市書刊出版登記證出字第〇四八号)

印刷者：北 京 市 印 刷 一 厂

發行者：新 华 书 店

开本 850×1168 1/32

印张7 頁112

印册字数187,000字

1960年1月北京第一版

1960年1月北京第一次印刷

印数1—4,500册

統一書号：15045•总1126-無302

定价：(10) 1.20 元

目 录

原序

緒論

§ 1. 術語和符号	3
§ 2. 發展簡史	5
§ 3. 按結構特征分類	7
§ 4. 按用途分類	9

I 非綫繞电阻的一般性能

第一章 非綫繞电阻的电气性能	1
§ 5. 电阻值与結構的关系	1
§ 6. 非綫繞电阻的等效电路	7
§ 7. 电阻与頻率的关系	12
§ 8. 阻值与溫度的关系	16
§ 9. 阻值与电压的关系	19
§ 10. 非綫繞电阻內的固有噪声	22
§ 11. 电阻器的电击穿	28
§ 12. 阻值与湿度的关系	31
第二章 电阻的發热过程	33
§ 13. 热平衡及建立状态	33
§ 14. 連續負荷下的稳定状态	36
§ 15. 脉冲負荷下的稳定状态	42
§ 16. 局部热过程	48
第三章 非綫繞电阻的老化	52
§ 17. 电阻老化的因素	52
§ 18. 电阻存放时的老化	56

§ 19. 电负荷下的老化	57
§ 20. 在潮湿介质中负荷时的老化	59
§ 21. 电阻的可靠性和寿命	61

II 非线绕薄膜电阻

第四章 碳膜电阻	64
§ 22. 碳膜电阻的特性	64
§ 23. 高温分解碳膜的结构及性能	64
§ 24. 碳膜电阻的绝缘基体	72
§ 25. 工业积碳法	75
§ 26. 一般用途的碳膜电阻	82
§ 27. 高稳定性的碳膜电阻	94
§ 28. 高频碳膜电阻	102
第五章 金属膜电阻	109
§ 29. 金属膜电阻的特性	109
§ 30. 金属薄膜的制造方法	110
§ 31. 金属薄膜的结构及特性	116
§ 32. 金属膜电阻的工业生产种类	124
§ 33. 金属氧化物膜电阻	134
§ 34. 金属膜可变电阻	137

III 非线绕合成电阻

第六章 合成电阻的特性, 结构和性能	139
§ 35. 非线绕合成电阻的特性	139
§ 36. 导电合成物的结构和等效电路	140
§ 37. 决定合成物电导率的因素	148
§ 38. 导电合成物的电气性能	147
第七章 导电合成物中使用的材料	151
§ 39. 导电物质	151
§ 40. 不导电物质	159
第八章 制取导电合成物的方法	162
§ 41. 制取漆膜合成物	162

§ 42. 导电漆膜的涂复法	165
§ 43. 漆膜合成物的热处理	171
§ 44. 用有机粘合剂实心电阻用的合成物	174
§ 45. 无机粘合剂的合成物	179
第九章 非繞繞合成电阻的工業类型	181
§ 46. 一般用途的漆膜固定电阻	181
§ 47. 一般用途的实心固定电阻	186
§ 48. 大功率合成电阻	189
§ 49. 高阻值电阻	192
§ 50. 小型电阻	196
§ 51. 印刷电路用的电阻	197
§ 52. 合成可变电阻	198
参考文献	205

I、非綫繞电阻的一般性能

第一章 非綫繞电阻的电气性能

§ 5. 电阻值与結構的关系

电阻值 R 的定义是：加在电阻上的电压 U 与通过电阻的电流 I 的比值：

$$R = \frac{U}{I} \quad (1)$$

如果电流用安和电压用伏表示，那么方程式(1)内的电阻值 R 就用欧表示。

如果 U 和 I 用绝对单位制表示，那么

$$R = 9 \times 10^{11} \frac{U}{I} [\text{欧}] \quad (2)$$

1908年在倫敦举行的国际电学会议上确定：高 106.3 厘米，截面一致，重为 14.4521 克的水銀柱在 0°C 时的电阻为电阻值的标准单位，其数值等于 1 国际欧姆。在工程中一般使用数值为由 0.1 到 100,000 欧的金属絲作为标准电阻。

在非綫繞电阻的应用中很少应用小于 1 欧的数值，而最常应用的是成千，成百万欧以及数值更大的电阻。因此往往使用由欧导出的电阻单位：

千 欧 = 10^3 欧；

兆 欧 = 10^6 欧；

千兆欧 = 10^9 欧；

兆兆欧 = 10^{12} 欧。

导体的电阻值决定于导体的几何尺寸和做成导体的材料。在一般的情况下电阻值按下式計算，

$$R = \rho \frac{l}{q} \quad (3)$$

式中：\$l\$——導體的長度；

\$q\$——橫斷面的面積；

\$\rho\$——材料特性常數，通常稱為體積電阻率。我們知道，體積電阻率的值是：

$$\rho = R \frac{q}{l} \text{ (歐-厘米)} \quad (4)$$

等於該材料單位的電阻，其單位長度為厘米，橫截面的面積為平方厘米。電阻率的倒數叫做電導率：

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{l}{Rq} \quad (5)$$

在工程計算中往往採用長度為 1 米，截面為 1 平方毫米導體電阻的電阻率 \$\rho'\$。這個單位為物理中以歐-厘米表示的單位 \$\rho\$ 值的 \$10^4\$ 倍：

$$\rho' = 10^4 \rho \quad (6)$$

某些材料的 \$\rho\$ 值列在表 2 內。

常用導電材料的體積電阻率

表 2

材料名稱	\$\rho\$ 歐-厘米	材料名稱	\$\rho\$ 歐-厘米
銅	\$1.7 \times 10^{-6}\$	康銅	\$5 \times 10^{-5}\$
鋁	\$3 \times 10^{-6}\$	鎳鉻合金	\$1 \times 10^{-4}\$
鎳	\$8 \times 10^{-6}\$	鈹	\$1.2 \times 10^{-4}\$
鐵	\$1.1 \times 10^{-5}\$	高溫分解碳	\$1.5 \times 10^{-3}\$
鉑	\$1.3 \times 10^{-5}\$	MJT 型電阻的合金	\$(1-3) \times 10^{-2}\$
鎢	\$4 \times 10^{-5}\$		

非綫繞電阻阻值即決定於導體的形狀、導體的長度和橫截面積。圖 3 和 5 所示為電阻最典型的形狀和結構。

對於實心結構的圓柱體電阻 (圖 3 a)

$$R = \rho \frac{4l}{\pi D^2} \quad (7)$$

式中： D ——电阻基体的直徑。

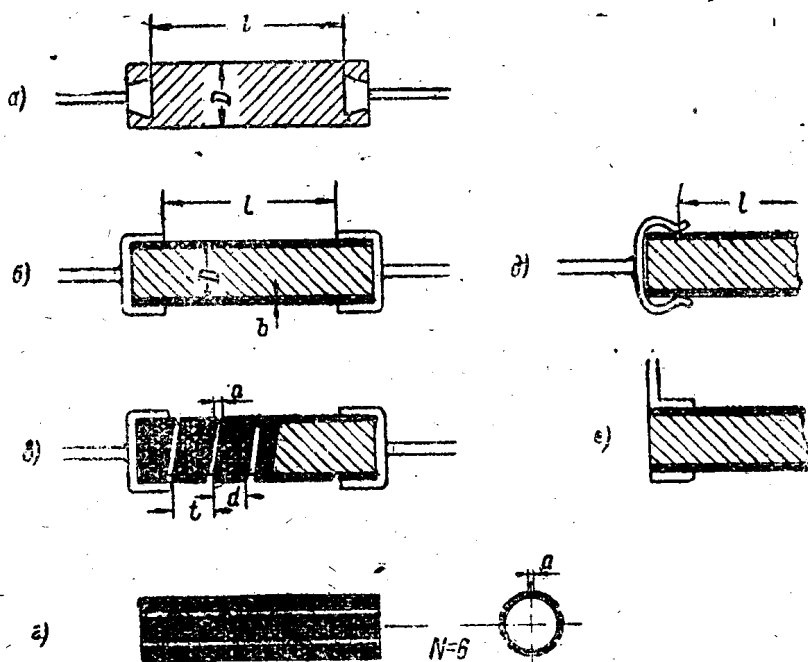


圖 3 圆柱体电阻的典型形状和結構：

a —实心的（体积的）； b —薄膜的； c —螺旋式的；
 d —薄膜上有縱槽的； e, f —有彈性引線的。

非線繞电阻結構特性可用 $\frac{l}{\pi D} = K$ 表示， K 称为形狀系数。在一般的結構內，数值 K 接近于 1（由 0.7 到 1.5）。过長和过細的电阻对于安裝是不方便的，而且机械强度也往往不大。而長度小的电阻則不能有效地利用其总的体积，因为接触附件所佔的長度已和导电部分的工作長度相等。此外，电阻的頻率特性同样也取决于形狀系数 K ，这将在下面談到。

將数值 K 代入方程式 (7) 內，便得到实心結構的电阻值为：

$$R = 4K \frac{\rho}{D} \quad (7a)$$

圆柱形薄膜电阻和合成膜电阻导电層的厚度 b 与基体直徑 D 比

較起來通常極小，因而對這兩種電阻來說（圖3, 6）：

$$R = \rho \frac{l}{\pi D b} = K \frac{\rho}{b} \quad (8)$$

方程式(8)只有當導體薄膜的厚度大大超過組成薄膜質點的尺寸並且薄膜在基體表面蓋的密實的情況下才可用來進行計算。無論是由于製造方法引起的薄膜的粒狀結構，或是因為基體存在有某些凸起，當厚度小於規定的值時，便不能把薄膜式電阻的膜看作是密實的。

薄膜的體積電阻率並不是一個常數而決定於膜的厚度。

因此，具有實際意義的只有比值 $\frac{\rho}{b}$ ，該比值是長度和寬度相等的薄膜的電阻，也可以叫做“平方電阻” R_s 。

這樣，從方程式(8)得到：

$$R = K R_s \quad (8a)$$

在導電層上可以沿圓柱體切一些縱槽，其電阻值可以根據槽的寬度 a 和槽的數量 N 來改變。在這種情況下（圖3, 7）：

$$R = \frac{K R_s}{1 - \frac{N a}{\pi D}} \quad (8b)$$

導電層用的最廣泛的形狀是螺旋形（圖3, 8）。螺旋電阻等於：

$$R_c = R_s \frac{l_c}{d_c} \quad (9)$$

式中： l_c ——螺旋長度；

d_c ——螺旋寬度。

若螺旋槽的傾斜角小，而螺旋間距 t 與基體直徑相比很小時，螺旋的長度可用下列近似值表示：

$$l_c = \pi D n = \frac{\pi D l}{d_c + a} = \frac{S}{t} \quad (10)$$

式中： a ——相隣圈之間的距離；

n ——基體工作長度上的圈數；

S ——电阻工作表面。

从(9)和(10)中得到:

$$R_c = R_s \frac{S}{t(t-a)} \quad (11)$$

或者, 如果 $a \ll t$, 則

$$R_c = R_s \frac{S}{t^2} \quad (11a)$$

比較方程式(7a)和(8)可以看出, 当 K 和 ρ 不变时实心电阻阻值随电阻几何尺寸的减小而增加, 而对于無螺旋槽的薄膜式和合成膜电阻則与尺寸無關。从方程式(11)可見, 螺旋式导电部分的电阻值, 与电阻的工作表面成比例而与形状系数無關。

从方程式(8a)和(11)中, 我們發現具有等值的 R_s , 且尺寸相同的圆柱形薄膜式电阻与切割螺旋后阻值的重要关系以 R_c (即所謂“切螺旋綫系数”或“切槽系数”) 表示:

$$k_n = \frac{S}{Kt(t-a)} = \frac{(\pi D)^2}{t(t-a)} \quad (12)$$

为了便于測定不同尺寸电阻的 k_n 值, 可以把形状系数 $K=1$ 时單位面积所“采用”的螺旋槽系数理解为:

$$k'_n = \frac{1}{t(t-a)} \quad (13)$$

不同数值的 t 和 a 計算出的 k'_n 值如圖 4 所示。

从方程式(11)可以得出結論: 切槽系数值乘平方电阻和总的面积可以得到切槽后的电阻值:

$$R_c = k'_n R_s S \quad (14)$$

或者用电阻 R_0 (圆柱体导电層切槽前的电阻) 乘切槽系数 k_n 也可以得到切槽后的电阻值:

$$R_c = k_n R_0 = k'_n R_0 \pi^2 D^2 \quad (14a)$$

导电層在半徑为 r_1 和 r_2 的接触环 (圖 5, a) 之間的垫圈結構的电阻,

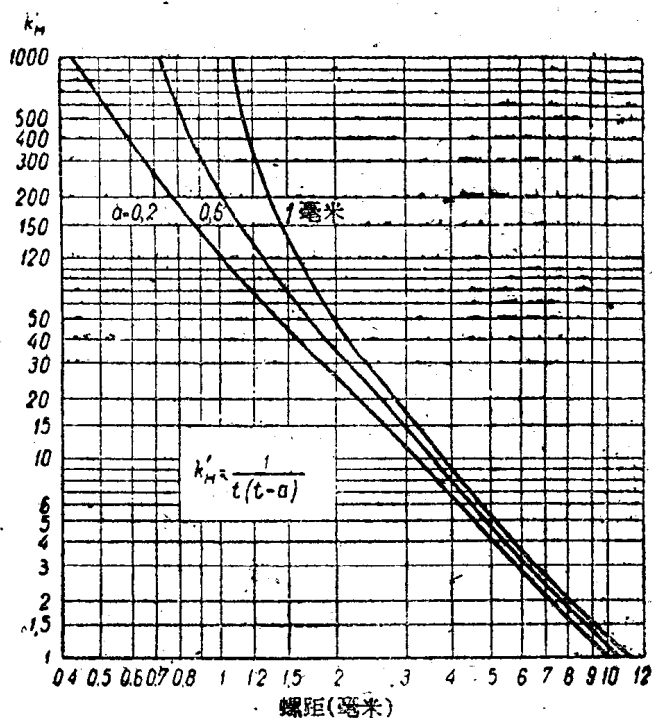


圖 4 采用螺旋槽的切槽系数

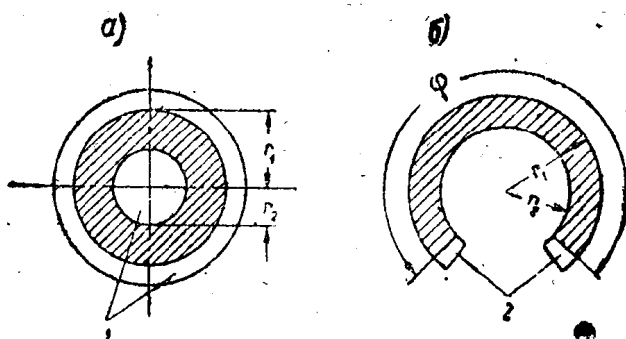


圖 5 平导电元件

a—圓盤式的, b—扇形形的, 1 和 2—接点

$$R = R_s \frac{\ln \frac{r_1}{r_2}}{2\pi} \quad (15)$$

而馬蹄形导电元件（一般用于可变电阻内）的电阻为：

$$R = R_s \frac{r_1 + r_2}{r_1 - r_2} \frac{\pi \varphi}{360} \quad (16)$$

式中： r_1 和 r_2 ——导电元件的外半径和内半径（圖 5, б）；

φ ——导电元件有效部分轉角（度）。

§ 6. 非綫繞电阻的等效电路

虽然非綫繞电阻的結構比較簡單，但是在一般的情况下，应当把电阻看作是一个电阻系統，其中导电元件本身的有效电阻作为系統中的主要部分。

直流电路内的电阻：在直流电路内（或者在低頻下），在稳定状态下，当可以不計算無功成分时，在一般情况下必須計算下列电阻的有效成分：

- 1) 电阻导电層和金属附件之間的接触电阻 R_k ；
- 2) 絕緣基体的分路电阻 R'_u （在实心結構内沒有）和保护塗層的分路电阻 R''_u 。为了簡化起見，可用一个电阻 R_u 来代替这两个电阻。

符合这种情况的电阻等效电路如圖 6 所示。

圖 6, б 的电路其总的电阻值为：

$$R_{\Sigma} = 2R_k + \frac{R_n}{1 + \frac{R_n}{R_u}} \quad (17)$$

当用螺紋的导电層时，由于导电在这种情况下都集中在各螺紋綫之間的短短的部分上，絕緣基体和保护層电导的分路影响增大。

因此，

$$R_{\Sigma} = 2R_K + \frac{R_n}{1 + \frac{R_n}{R_U} \frac{t}{a}} \quad (17a)$$

实际上, 如果电阻值不超过 $10^3 - 10^{10}$ 欧, 在正常的温度下, 絕緣基体的电导可以忽略不計。在較高的温度下和当基体电阻值小时, 基体的导电可能增大。而对一般用途的电阻在大多数的情况下都可以忽略其电导。

接触电阻值 R_K 在其他相同的条件下, 取决于接触点的結構, 因为結構还决定着电阻导电元件和金属引出綫之間真正的接触面。

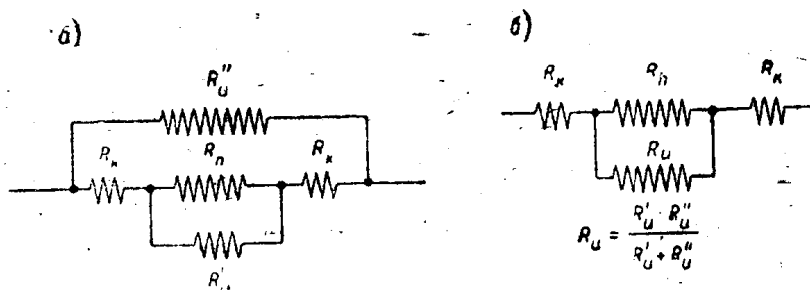


圖 6 低频作用下非綫繞电阻的等效电路

a —全圖; b —簡圖 ($R_K \ll R'_U$); R_K —接触电阻; R'_U —基体电阻; R''_U —保護層电阻; R_n —导电元件电阻。

在金属引出綫直接压入导电元件物体內的实心电阻中, 导电元件內引出綫的整个表面实际上就是接触面, 因而只要引出綫头有足够的尺寸并防止受腐蝕, 那么接触电阻是極小的。

薄膜式电阻其金属附件通常是套到导电層上 (見圖 3, b 和 3, c), 并挤紧使和基体牢固, 这时由于接触表面不可避免的不均匀性, 真正的接触面比几何面总要小得多, 这就不得不使接触电阻有較大的数值。

接触电阻在其他同样的条件下与导电元件的电阻率成正比。这样, 当 ρ 值改变时, 比值 $\frac{R_K}{R}$ 仍然不变。 R_K 值随导电層厚度的减

小而增大,但是比 R 增加得小,这就是說比值 $\frac{R_k}{R}$ 减小。

要使 $\frac{R_k}{R}$ 有大的减小可以延長元件(例如:切螺紋槽),因为 R_k 这时仍然不变,而 $\frac{R_k}{R}$ 則与 R 的值成反比。这样接触电阻在沒有螺紋槽的短厚層电阻內就具有重要的意义。

为了降低接触电阻,在專用型号的薄膜电阻內使用磨光基体和較大的經精确調整的附件。但是,根据節約的观点,这种方法在生产广泛用途的电阻中是不够适当的。因而大部分采用的是彈性附件,这就沒有必要制造直徑有精确尺寸的基体,彈性接触附件的典型結構表示于圖3,δ(所謂“彈性帽式”引綫)和圖3,ε(“領帶”式引綫)。

在所有的情况下,在导电元件端头(附件下面)塗上电阻率小的中間接触層可以使接触电阻减小。而最根本的和十分容易做到的方法是端头金屬化,这可以用燒結金屬的方法(大部分是燒結氧化物中还原的銀),噴鍍法即噴塗易熔金屬(大部分是鋅合金)或电镀的方法进行。

当导电元件不允許高溫或酸的作用时,采用分散度大的石墨或有大量粘合树脂的分子銀所構成的接触層,这种接触層只需稍微加热就容易使悬浮液狀塗上并干燥的。这一种方法所得到的結果比金屬化要差,因为由于接触層的粒狀結構其电阻較金屬的大。这就显著降低其要求效果,而有时則使由于真正接触面的增大而达到的效果完全化为烏有。

交流电路內的电阻:按照一般人的見解,非綫繞电阻与綫繞电阻的区别在于非綫繞电阻是一种純有效电阻,这种电阻只有在电阻值和电阻結構所确定的頻率值以下时才是可靠的。

圖6所示的一般用途电阻(10兆欧以下)的等效电路,在大多数情况下是用在声頻和不高的超声頻範圍內。在一般的情况下必須考虑到,非綫繞电阻和所有的导体一样,具有分佈無功参数——自

感 L' 电容量 C' 。除此之外，在所有的条件下都有电阻端头引线的集中电容 C_0 和电阻对地和接地物体（底板、变压器、密封电阻的保护金属外壳等）的电容。

其长度小于波长的非綫繞电阻的简化等效电路，如果电阻的任一端都没有接地，可以画成等于电阻工作长度二分之一的长度的長綫端头是闭合的，而如果电阻有一端接地（参考文献 4）就可以画成与等于电阻全长的长度是闭合的。

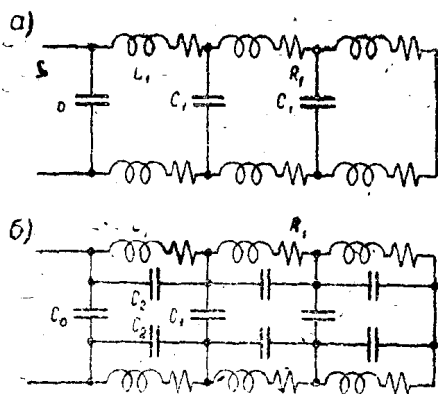


圖 7 高频用非綫繞电阻的等效电路：

a—未切螺旋槽；b—已切螺旋槽

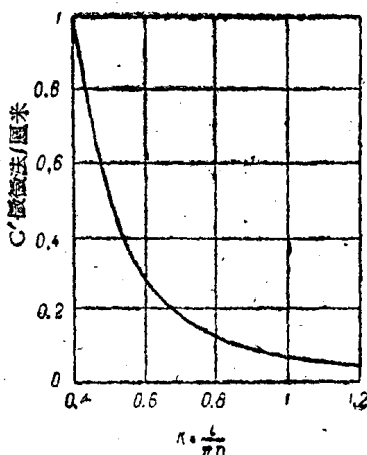


圖 8 电阻分佈容量与形状系数 K 的关系（根据波捷科娃的数据）

圖 7 所示的电路沒有計算对地的电容量，如果电阻离开接地的物体（其相隔的距离不小于电阻的长度），这样是允許的。零件分路电阻 R_n 也沒有表示出来，这是因为在高频电路中不采用阻值超过 $10^6—10^7$ 的电阻。

同时絕緣材料內的損耗也沒有計算。引线之間的电容 C_0 一般不超过十分之几微微法，并且即使与佈綫电容的总和实际上也不影响电阻的有效成分。而有重要意义的則是分佈电容 C' ，因为电阻的有效成分值是取决于分佈电容的。分佈电容的值决定于形状系数 $K = \frac{l}{\pi D}$ 并且也在不大的程度上决定于比值 $\frac{a}{l}$ （对切螺旋槽的电

阻而言)。

电阻的形狀和接触附件的位置以及基体(薄膜式电阻)和保护層的介电常数有重要的意义。

精确地計算指出的各种因素是很困难的, 所以每一具体結構的分佈电容值也只有用試驗的方法确定。

圖 8 所示是一批不同尺寸的薄膜式切螺紋槽电阻分佈电容值的測量結果(参考文献 5, 6 和 7)。其 C' 的值为十分之几微微法而且只有当 K 小于 1 时才剧烈增大。因此, 在这种关系下延長电阻的結構是比較适当的。

C' 与 K 的关系如从圖 8 看到的那样, 在試驗範圍內可以用函数表示出来:

$$C' = 0.01 \times 10^{\frac{0.8}{K}} \text{ [微微法/厘米]} \quad (18)$$

圓柱形电阻的分佈电感系数可以用下式精确地計算出来:

$$L' = 2(\ln 4\pi K - 1) \text{ [毫微亨/厘米]} \quad (19)$$

L' 值随着 K 的增大有不大的增加, 在一般的結構內($K=0.7-1.5$) 大約等于 3×10^{-9} 亨/厘米。

对于螺旋形的导电元件, 改变有名的長岡 (Hagaoka) 公式(参考文献 8), 可以得到:

$$L' = \frac{n^2}{K^2 \left(1 + \frac{0.14}{K}\right)} \text{ [毫微亨/厘米]} \quad (19a)$$

当 K 接近 1 时可以运用公式:

$$L' = 0.9 \frac{n^2}{K^2} \text{ [毫微亨/厘米]} \quad (20)$$

由于圈数 n 一般达 10 和 10 以上(大的电阻), 故螺旋形电阻的分佈自感值可以是十分之几微亨/厘米。

为了降低感应, 可以采用專門切螺紋槽的設備, 其螺紋槽的切割是使在同一段电阻上經過的电流方向相反, 得到电感小的电阻。

切割方法如圖 9 所示。实际上方向的改变是奇数圈中間是断开的，但要貫穿偶数圈，在断开的奇数圈部位切一条横槽。

§ 7. 电阻与频率的关系

分佈無功参数的存在决定着非綫繞电阻在高频时电导的复数特

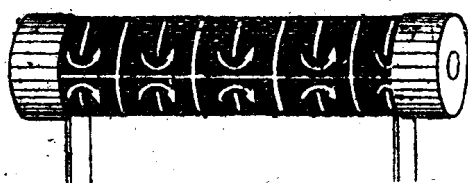


圖 9 电感量小的螺旋槽电阻
箭头表示电流的方向

性。上节圖 7 的等效电路可以表示复数电导的特性。使用長綫电路的理論对分析是不够方便的。因为分佈电容和电感的相对值取决于电阻值，所以研

究时有时可以忽略無功成分之一。同时确定电阻的極限阻值并認為这个阻值完全是有效的，这一点实际上也很重要。

高阻值电阻 当

$$R > \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (21)$$

时，电阻应当列入高阻电阻。在上述 L' 和 C' 值的情况下，圆柱体电阻的 R 值約为 300 欧，螺旋形电阻的 R 值約为 3000 欧。而当 R 值大时，电感的影响可以忽略，而电容性电納則具有主要的意义。

胡威（参考文献 4）指出，在这种情况下等效电路可簡化表示如圖 10，其中 C_f 代表随频率变化的电阻的分路电容，簡化等效电

路适用低于 $\frac{1}{2\pi\sqrt{L'C'}}$ 的频率，这相当于几百兆赫的频率。

分析表明，如果 $fCR_0 \leq 0.1$ ，則圖 10 电路內等效电容值与频率無关而等于电阻总电容 $C = C'$ 的 $1/6$ 。同时有效电阻 同样与频率無关，而等于直流时的电阻值 R_0 。

当频率超过 $\frac{0.1}{CR_0}$ 时， R 和 C_f 的值随频率的增高而降低，而