

高频率热处理工艺与设备

第一机械部

目 錄

1. 高頻加熱物理基礎	1-1-1-18
2. 感應加熱的基本現象和定律	2-1-2-12
3. 淬火感應圈	3-1-3-46
4. 高頻淬火	4-1-4-27
5. 鍛件高頻電流加熱	5-1-5-13
6. 機械式發電機	6-1-6-31
7. 真空管式發電機	7-1-7-18
8. 用ПЗ—30和ПЗ—60型 高頻率裝置	8-1-8-14
9. 應力及強度	9-1-9-3
10. 高頻電流淬火硬化層深度和 硬度的檢定方法	10-1-10-4

目 錄

緒論:

I. 圓柱形工件外表面加熱用的感應器.....	3-2
1. 概論.....	3-2
2. 聲頻率淬火用的感應器.....	3-7
3. 無線電頻率淬火用的感應器.....	3-16
4. 圓柱形感應器的近似計算.....	3-17
II. 圓柱形工件內表面和平形工件表面淬火用的感應器.....	3-26
5. 內表面淬火用的感應器.....	3-26
6. 平形工件表面淬火用的感應器.....	3-32
III. 複雜形狀工件表面淬火用感應器的基本類型.....	3-41
7. 旋轉體工件淬火用的感應器.....	3-41
8. 端面淬火用的感應器.....	3-43
9. 大模數齒輪淬火用的感應器.....	3-44
10. 電磁屏蔽法.....	3-45

1. 导体感应加热的物理基础

1. 电磁现象的基本概念

由任何电源（例如发电机）的电荷传给导体，在导体的周围就造成了电场。当某种带电物体（例如由轻质材料作的小球）被吸到带电导体上时，我们就发现有电场，我们肯定有机械力作用到带电小球上。该机械力迫使带电的物体运动机械力是电场的一种现象。

电场用电场强度来说明，通常用符号 E 来表示，电场强度等于作用到试验正电荷的机械力并且机械力与电荷数有关，电场强度有大小有方向。

藉电场强度的概念，我们将能描述空间任意一点的电场。

电场用线来表示，线的密度表明电场的强度。

把不带电的导体放在电场中我们肯定机械力将作用到物体内部的自由电子上，正如机械力作用到试验电荷上一样，在这些力的作用下，电子就运动起来，也就是在导线内发生了电流。

电子移到物体界面时，这同电流就很快停止，与电子运动方向相反的物体界面，形成正电荷。

缺少电子的导体另一部分是负有正电荷，在物体相对端头上的电荷集中在物体内部造成了电场，电场的方向与引起电荷移动的电场相反。由此在导体内部将没有电场存在，但是假如将导体与电源联结成封闭的电路，那末在导体的内部电场将不断的存在着，而电流在任何长的时间都将通过。

当电流通过时，利用磁针我们就能发现沿着导体的周围存在着磁场（图2），同时在导体的内部同样也存在着磁场。

根据电流的大小和方向，磁场有不变的和交变的，当为交流电时，能够利用测量仪器来发现磁场，该仪器与放在通电导线附近的线圈联结成一个回路。保持测量线圈与导线一定的距离，同

改变线匝对导线轴的位置，我们能使仪表指针得到最大的偏转，相当在线匝内通过最大的电流。

假想在磁场内划分出某一面时，就能研究通过这面的磁场部分被划分出的磁场部份称为磁流。

磁流密度称为磁感应，感应决定着在空间一定地方的磁场强度和磁场方向。

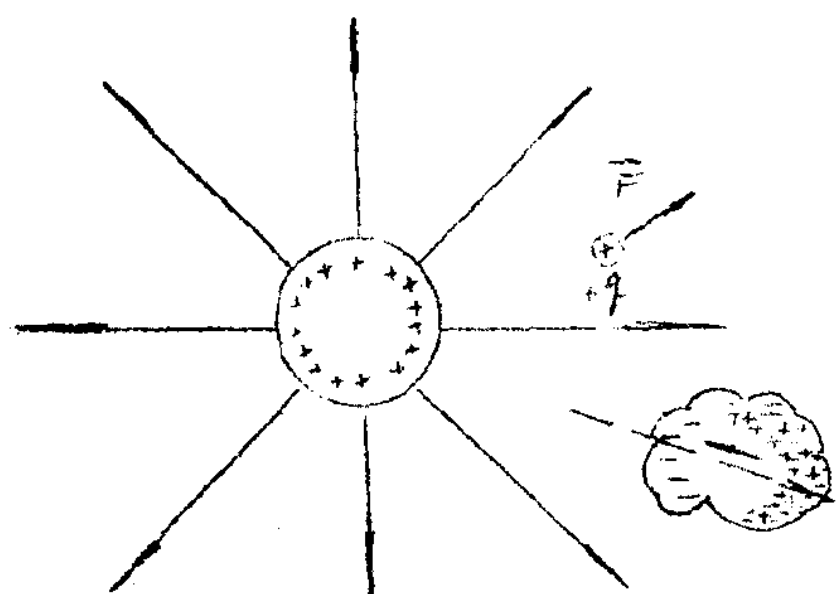


图 1. 电场强度 E 等於作用到试验正电荷 $+q$ 上的机械力 F 。该机械力与电荷数有关。

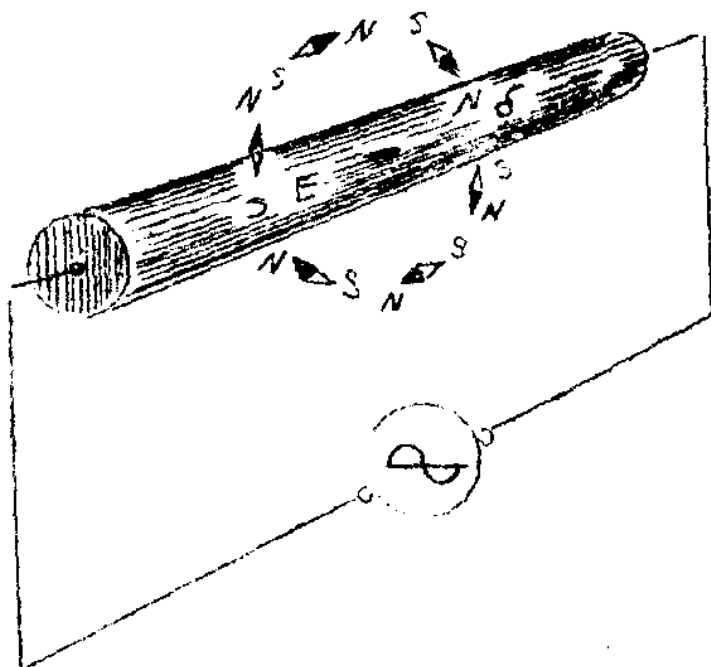


图 2. 用磁针来探测围绕在导线周围的磁场
 E — 电场强度 j — 电流密度。

磁场用线来表示，磁场密度用磁感来说明。

假想磁场在空间围绕着导线，因此改变线匝的位置，我们就改变着贯穿线匝的磁力线（图 3）

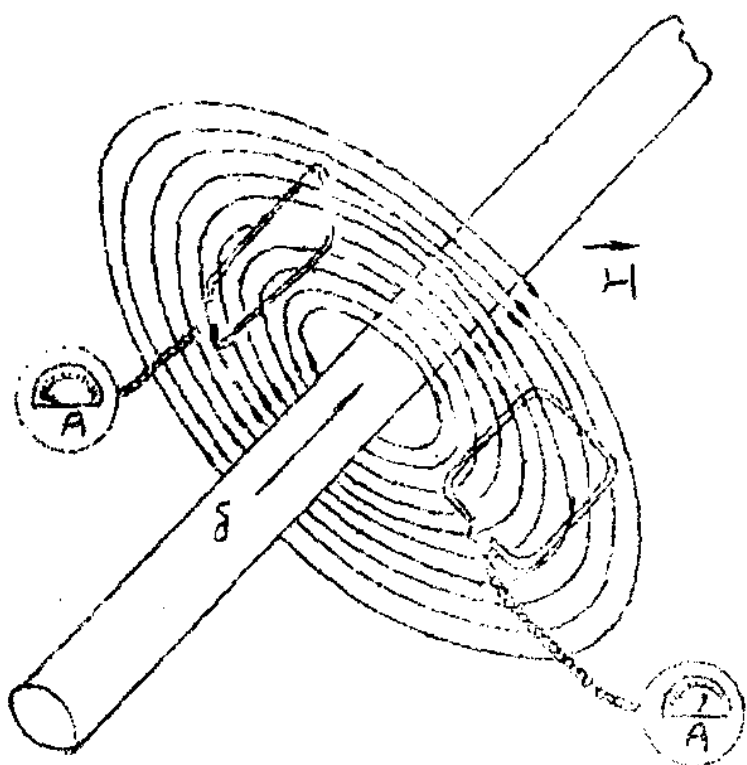


图 3. 改变线匝的位置时，贯穿在线匝所分割表面上的磁通量就改变。

当线匝的平面垂直放置在感应的方向，在线匝内产生了最大的电流，此时线匝将联系

最大的磁流。

当随时间而改变磁坊时，出现在线匝内的电坊是在线匝内产生电流的原因。

因此，我们知道，当随时间而改变贯穿线匝的磁流时，在线匝内就产生引起电流的电坊。

将具有电流的导体从自由空间中转移到某种物质内，我们能看见，在相同的电流下，磁坊会改变。

在物质内的感应与自由空间的感应之比，称为相对导磁系数，用符号 μ_{TH} 表示。

磁坊同样能用磁坊强度 $\vec{H}$ 来表明。磁坊强度与感应成比例并且在自由空间内的磁坊强度由关系式 $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$ 来决定 μ_0 —— 自由空间的透磁率，等于 $4\pi \times 10^{-9}$ 亨利米，在任何介质内磁坊强度由关系式 $\vec{B} = \mu \vec{H}$ 来决定， $\mu = \mu_{TH} \cdot \mu_0$ —— 介质透磁率。

当改变磁坊时，在线匝内诱生电流的现象称为电磁感应。

引起磁坊改变的电坊不仅在测量线匝内产生，同时，在设有导线的其他地方亦会产生。

我们进一步取二块平行的金属板，其中放置某种电介质这种装置称为电容器。

假如将电容器联结在交流线路内，那末在金属板之间，将有随时间而变的交变磁坊存在。

当磁针接近电容器时，就能发现造成随时间而变的电容器电坊的磁坊。

因此，当电坊随时间而改变时，就产生磁坊，电坊与磁坊是相互联系着的，是电磁坊的两个组成部分，在某一情况下我们与电磁坊发生关系。但是当研究某种现象时，我们常常考虑电磁坊的一个组成部分，而另一个必然存在的组成部分也要考虑到。

在某些条件下，例如在无线电台的放射天线内，电磁坊可能与自己的来源有关而传播出去，并且将能独立存在。成为在无线

电收音机上所呈现的电磁波形式传播在自由的空间中。

当说明应用在高頻加热中的物理现象时，我們常碰見关于电磁场的概念。

当交流电沿某个电路通过时，由电流形成的交变磁场就在导体内感应出电场，该电场与电源电流所造成的电场方向相反，换句话说，在电路内造成与电源电动势方向相反的自感应反电动势，由此在电路内的电流将小于没有自感应电动势时的电流。

产生在回路内的自感应电动势大小是决定于与回路交联的磁通变化速度。也就是自感应电动势的大小是与产生磁场的交流电频率成比例，同时也与磁通的最大数值成比例，此外自感应电动势还关系到磁通随时间而改变的曲线。

电流产生变化的完全循环时间称为週期，一秒内的週期数称为交流电的频率。

因此，自感应电动势的存在就相当在导体内出现了某些附加电阻，该电阻称为电路的感抗。

产生电磁场所消耗的能量就儲藏在电场和磁场内，即电场和磁场是儲蓄一定能量的負荷者，当这些电场和磁场消滅时，所儲蓄的能量或者復轉为能源，或者轉变为另一种形式的能量。

2. 帶有交流電導體的相互感應

前面我們研究了帶有交流電的單獨導體的情狀，也就是在導體附近沒有任何的其他導體，其中包括其他的帶電導體。

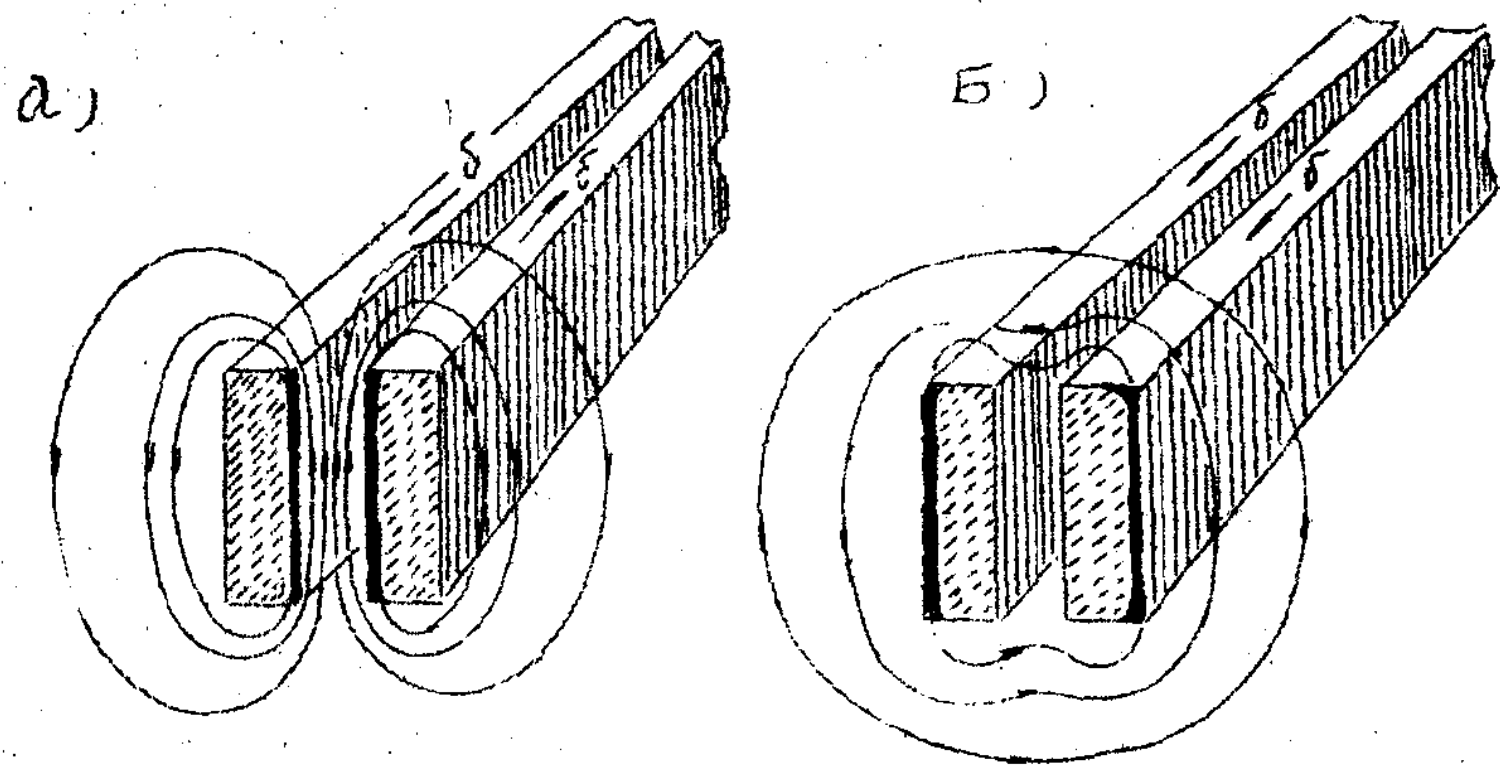


圖 7 並列兩線中交流電的分佈

a—兩線中的電流方向相反； b—兩線中的電流方向相同。

現在我們來闡明，當帶有交流電的導體是處在其他導體的磁場中時所產生的現象。

如有兩條平行線，其高度較厚度大得多，並列而放，則將顯示如下的集膚作用。

假如，在任何時間內兩線中電流的方向都是相反的，而數量大小相等（圖 7. a）。此時，各電流在兩線間所產生的磁場有相同的方向，總磁場將增加，而在兩線外側的磁場將減弱，因為磁場的方相是相反的。

因為總磁通不僅通過空氣，也通過兩線本身，所以各單獨的電流線聯有不同量的磁通，在兩線外側的電力線聯有較多的磁通，因而，沿此電流線，所產生的感應電場亦強於沿兩線內側電流線所產生的電場。

外側電力線的合成電場，即電源所產生的電場與感應所產生之電場的總和，弱於內側，因而，外側電流線的電流密度將弱於內側。

在集膚作用表現得很明顯時，電流將沿母線的内側流動。

如沿一條母線流過由外部電源來的電流，而沿另外一條母線流過誘生電流時，則在母線中電流分佈的情況與上述現象類似。

如有兩條帶電的平母線，在任何時間內電流的方向和大小都相等時，將呈現出另外的一種集膚作用現象。

此時，磁場將在母線右側和左側的空間內重合，在母線之間由各母線中電流所產生的磁場將消滅（圖7E），由此磁力線將纏繞兩條母線，有一部分還通過母線的截面。

在母線相對兩側的電流線將聯有大量的磁通，因而，在母線内側的電流密度將弱於外側的。

此時，如集膚作用表現得很顯著時，實際上電流將沿每條母線外側的薄層流過。

在將帶有電流的導體或能產生誘生電流的普通導體移近一帶電導體時，所產生的交流電重新分佈的現象叫做鄰近作用。

在上述情況下，母線的有效電阻可按單母線用的公式（5）和圖5計標，但這裡應計標母線的全部厚度，而不應只計標一半。

在母線的厚度與電流滲透深度之比等於1.57時，母線的電阻最小，對於單平母線亦是如此。

鄰近作用決定了同心電纜電流分佈的特性。

拿一條由圓柱和圓管所組成的電纜，該圓柱全部放在與共同圓心的圓管內，當圓管中和內導體中的電流方向相反時，在兩導體之間的空間中和導體本身中將產生磁場，在表面作用很顯著時，亦即在電流的週波很高時或在電纜的尺寸很大時，電流將在內導體的和包圍它的圓管外側的表面薄層流過。

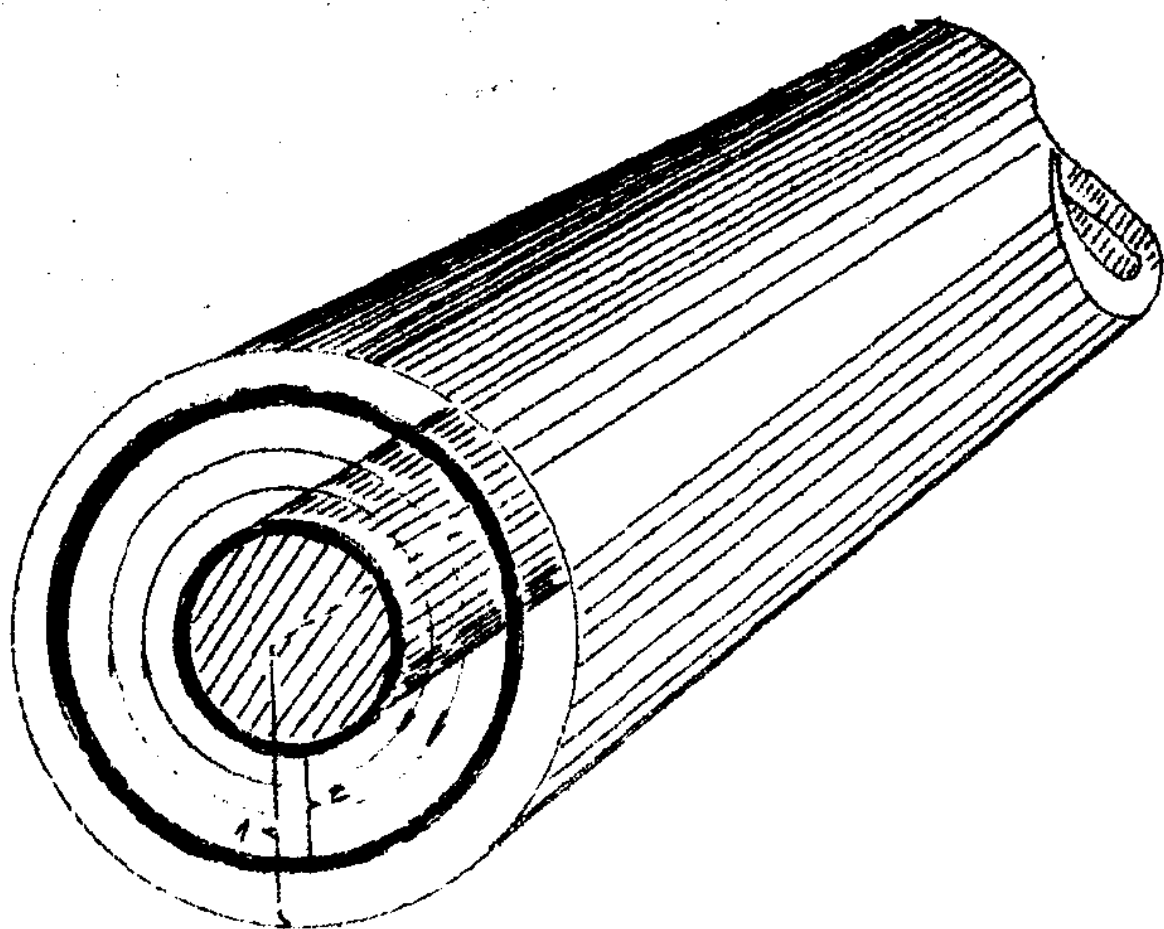


图8 在同心电流中流过交流电

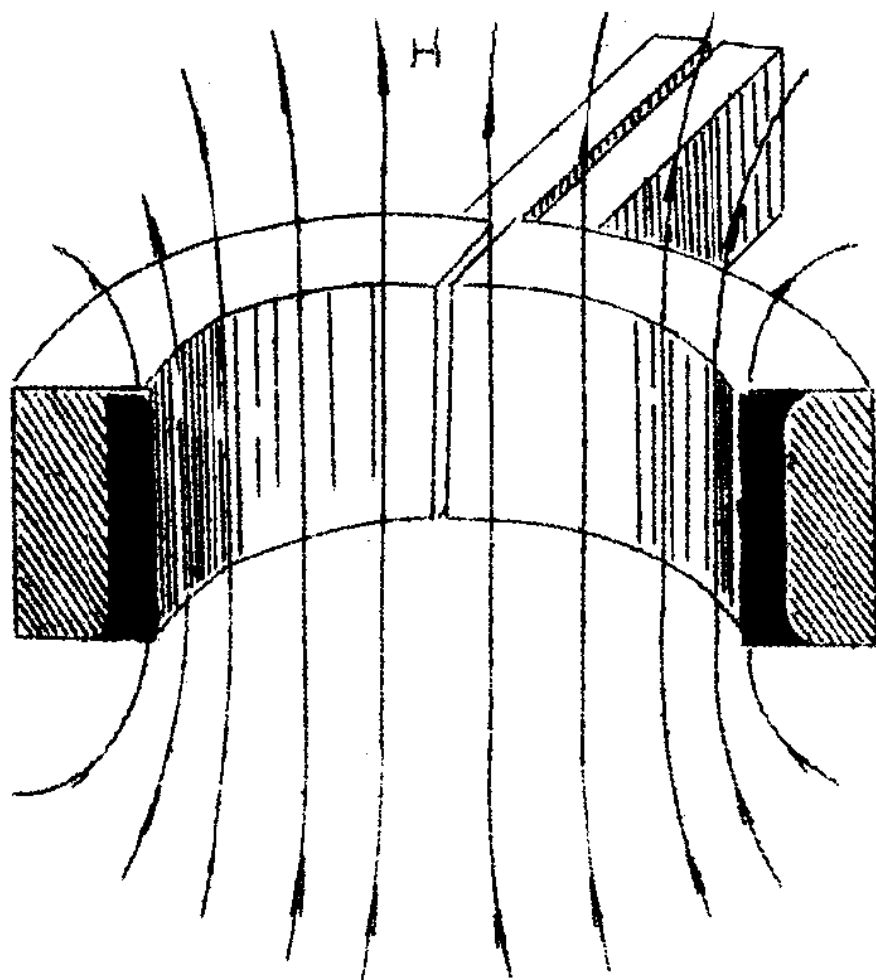


图9 在导体弯成环形时的集肤作用（因环或线塔作用）。

在这种同心电缆中我们考虑有两个回路（图8）

回路1是由与内导体同心的电流线和圆管外表面的电流线而形成，回路本身闭合，电流线的终端亦如此在无限远处联接。

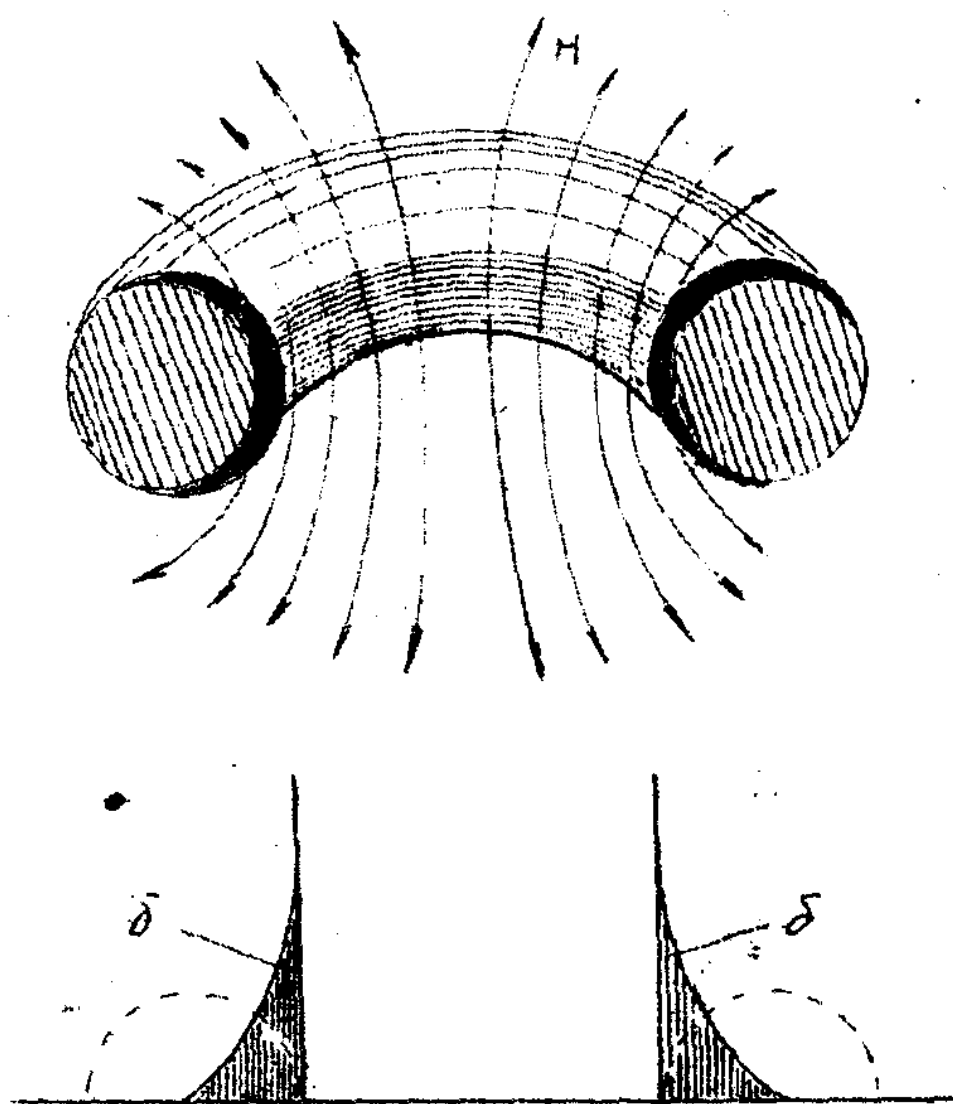
回路2是由通过导体表面的电流线和通过圆管内表面的电流线而形成，电流线的终端亦闭合。

此時，第一個回路所聯的磁通比第二個回路所聯的多，因而第一個回路的感應電阻（電抗）比第二個回路的大，電流是沿着電阻最小的途徑流過，所以電流沿內導体的表面和外導体的內表面所形成的回路流過。

最後，如拿一彎成環狀的平面線（圖9），則此時亦可發現集膚作用—變形的隣近作用。

在環內磁場將集中，而在環外將分散。

如將沿导体外側通過的電流線看做環狀的，則貫穿它的磁通多於貫穿导体內表面電流線的磁通。此現象可以解釋成是由於自感反電動勢的產生，但必須指出，環內側的總電場以及電流密度較大，而外側較小。



在環形导体的截面為其他形狀時，亦將發生完全相同的現象，例如，在截面為圓形時（圖10）。在导体彎成環形時所產生的集膚作用，通常叫做圓環或線捲作用。

圖10 圓形截面環导体的線捲作用。（曲線指出電流沿環半徑的分佈情況）

《線捲的》名稱解釋如下：在由數匝組成的線捲中和螺線圈中電流的分佈情況類似，亦即在線捲導線內側的電流密度大於外側的。

實際上在任何情況的感應加熱中都可發現線捲作用：電流僅沿線捲和環內側的薄層流過。

在电流移向外层时，电流密度按上面所述的规律下降，在矩形截面环的厚度与电流渗透深度之比为 1.57 时，环的有效电阻为最小。

在线圈是由圆铜管做成时，铜管厚度必须保证上述条件，铜管的厚必须约等于 $\frac{100}{\sqrt{f}}$ 公厘。

3. 在有磁路时导体中的集肤作用

我们来研究在导体附近有铁磁路时导体中所发生的集肤作用。

将带有交流电的矩形截面铜导线放在一面敞开的由铁片层集起来的槽内（图 11）。铁的透磁率与铜的透磁率相比是无限大的，电流是由电阻最小的途径流过，亦即沿接近铁槽敞开端的导体部份流过。

在槽底以下全部的磁通都将在铁中通过，在槽底以上磁力线将通过导体而闭合，而最后，有部分磁力线继续导体的全部截面，并在导体上部的空气中闭合。

在磁通这样分佈时，很显然，放在铁槽底上导体部分的电力线将联有大量的磁通，而在铁槽敞开端，导体上部分的电流线仅被在空气中闭合的磁通部分所环绕，此时，槽底导体部份电流线所引起的自感反电动势将大于导体上部电流线所引起的自感反电动势。

因为电流是由不同方向电场的电场总和（电源所产生的电场和电场变化所引起的电场）所引起的，所以铁槽底部导体由电流线的电流密度较小，而铁槽敞开端电流线的电流密度较大，因而，由导体的上部到槽的底部电流密度逐渐减少（见图 11）。铁槽愈深，由导线流过的电流週波愈高，这种不平均现象就愈显著。

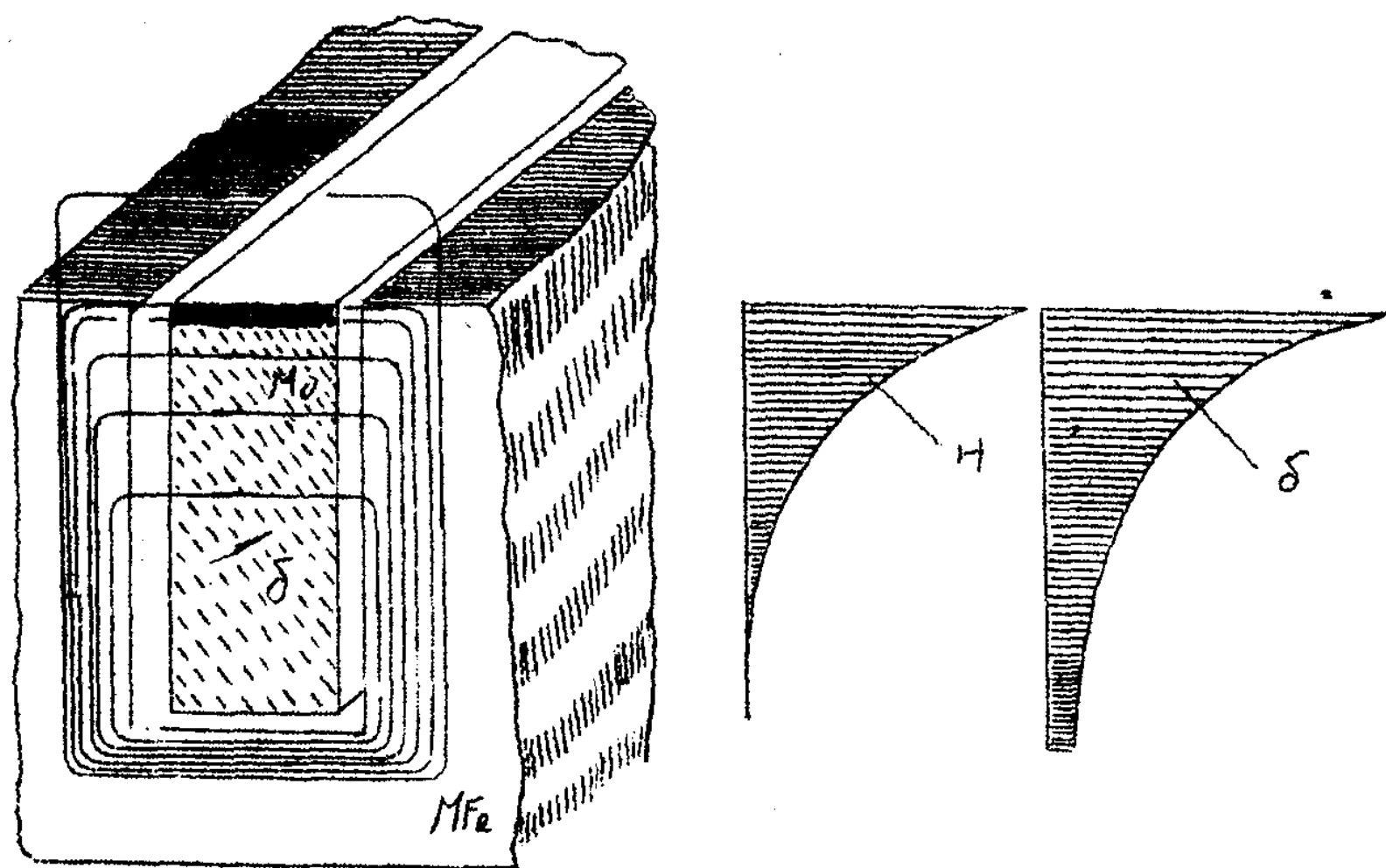


图11 在导体周围包以由铁片层集的鉄槽
並有散開磁場时，电流在导体截面
中的分佈。

H —磁場強度； J —电流密度

在集膚現象很顯著时，全部电流将由鉄槽敞开端导体的薄层
流过，电流在导线中的分佈可按公式(2)確定。

利用鉄片疊成的槽，
使导体周圍產生散開的磁
路，將使电流在导体截面
中重新分佈。在导体弯成
环形时，藉助磁路能迫使
电流不沿导体的内侧流过，
而沿导体的外侧流过。

为达到此目的，需要在导
体周圍加上能產生磁路的
疊片鉄槽，鉄槽的敞開端
在环的外侧(图12)。

在設計感加热設備的

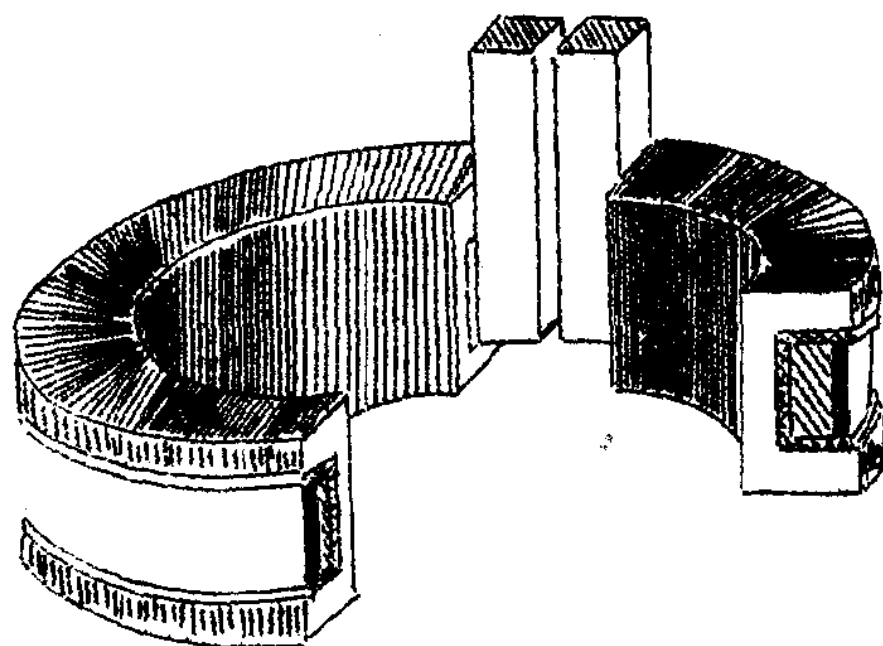


图12 为了使电流沿导体的
外侧流过，而边弯成
环状导体上所加的磁
路。

附件时，可利用铁磁路，以便使电流能在导体中重新分佈。

电流在导体截面中分佈不均匀的现象将使导线中的电能损耗增加，这一点在设计电机和电气器具时有很主要的意义，尤其是在通流很高时。

对于处在同一介质中，用某种方法弯曲的导线，磁场在凹下地方的空气中最集，而在凸出的地方散开（图13），导体凹下表面中的电流密度将很大，而凸出表面中的密度很小。

上面我们已经分析了在敞开导体中和放在带电导体中的现象。

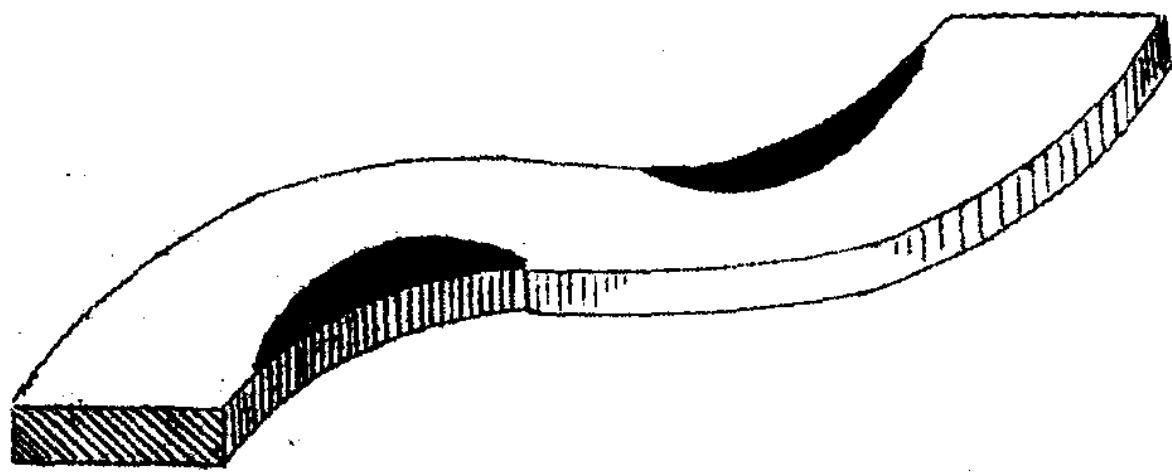


图13. 由於沿导体流过的电流分佈不平的，而引起加热最强的地方（垂黑的地方）。

前面所谈的都是关于电路中的导体部份，而电路是直接由电源供电，现在我们来研究不是有电源电路的导体部份，其中所发生的现象，而导体是放在其他导体中电流所引起的外电磁场中，彼一导体与被观察的导体在电气上不联结。

4. 交流磁场中的导体

将一闭合的导线圈放在流过某电路中电流所引起的交流磁场中，我们观察到其中有电流通过，此电流是由于与导体线圈相联的磁通变化而产生的。如果用大的导体来代替导线圈，亦将产生此种现象，如用圆钢柱和圆钢球。由於电磁感应现象，在这些物

体中也能产生交流电，此种电流叫做感应或感应电流。

感应电流能引起物体发热，用感应电流加热导体的方法叫做感应加热。

我们来研究通过圆柱导体的电磁过程，此圆柱是放在外磁场中(图14)。

假设圆柱中任何一点的单位导电率和导磁率都相等。

将圆柱放在交流电流通过长线卷的各匝中所引起的磁场中。磁场的磁力线平行于线卷的中心线，因而，亦平行于圆柱的中心线。当磁场在圆柱中变化时，将产生感应电流。

我们来研究圆柱放在交流磁场中时，在圆柱中产生感应电流过程，具有某一恒定速度的磁场贯穿在圆柱体中在第一个瞬间磁场将充入全圆柱体的外面不太厚的一圈，在这一圈中的感应电动势的影响下，在圆柱中将产生感应电流，此电流的方向与通过线卷各匝的电流方向相反，此电流形成的磁场与线卷的磁场相重叠，并使它减弱。

在继续的瞬间减弱了的磁场将继续深入，并充入圆柱中第一层下面的第二层。如

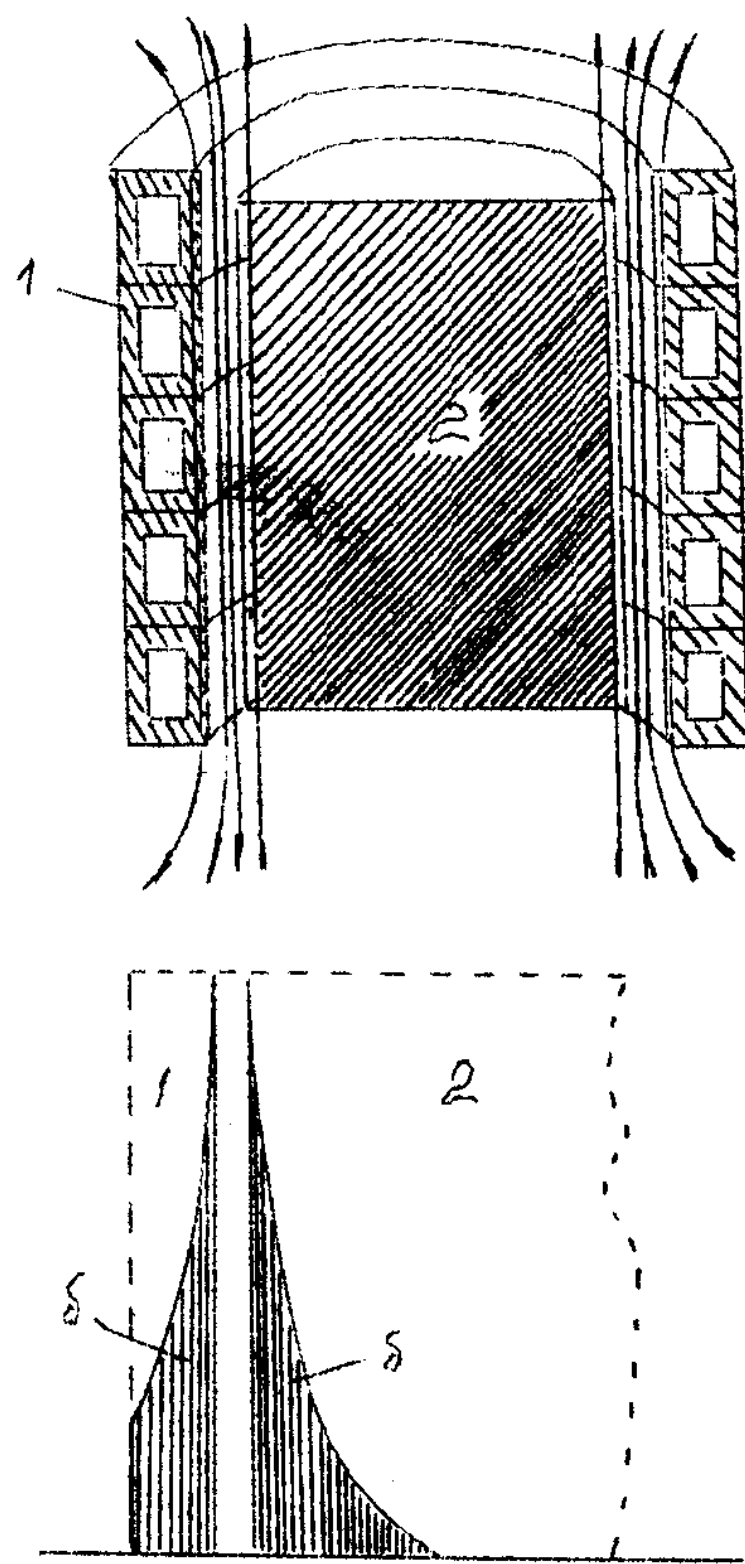


图14 将圆柱放在线卷的磁场中时，电流和电磁场在圆柱截面中分布不均匀的情况，(曲线指出电流在线卷中的分布情况1和在被加热圆柱中的情况2)

此，线捲的磁場逐漸減弱，並深入圓柱，在圓柱中引起電流，其密度由圓柱的外表面向它的中心按照我們已經曉得的規律逐漸降低。

因而，在圓柱放在线圈的磁場中時，我們又碰到了電流和電磁場在它的截面中分佈不均勻的現象。

磁場變化的週波愈高，亦即流過线捲電流的週波愈高，電流密度沿圓柱半徑減小的現象亦愈顯著。

磁場變化的週波愈高，在圓柱內引起的電場亦愈強，圓柱中的感應電流亦愈大。

這些電流的減磁作用將使磁場強度很快下降，電流密度亦隨之移向圓柱中心（見圖14）。

在電流的週波固定時，圓柱材料的單位導電率愈高，電流密度下降得亦愈快。其原因為：在圓柱中的感應電場強度相同時，在單位導電率較大的物體中，感應電流的值亦較大。圓柱中感應電場的強度是決定於電流的週波和线捲中的磁通值。

当线捲中電流的強度和週波相同時，圓柱材料的導磁率愈大，圓柱中的磁通亦愈大；磁場愈強，誘生的電流也就愈大。

在圓柱中產生的電流將使它發熱（圖15）。在電流流過的地方耗散熱量。消耗於加熱圓柱的能量由電源通過线捲所引起的電磁場而輸來。

当圓柱的尺寸不變，材料的單位導電率和導磁率固定，线捲中的電流強度固定時，輸到圓柱的能量決定於電流的週波。

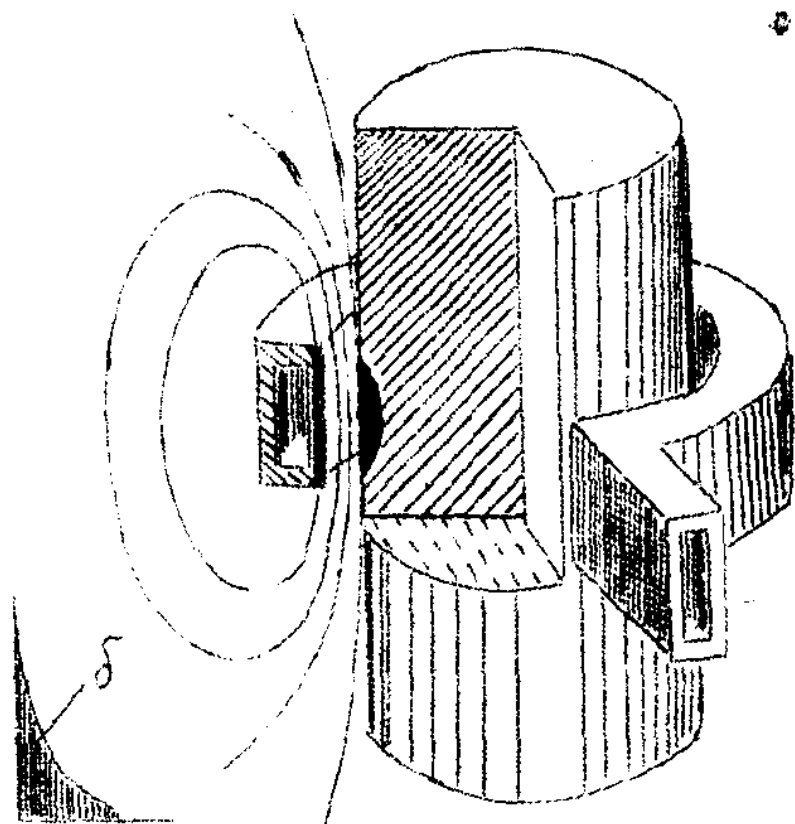


圖15 在電流流過的地方圓柱發熱，電流沿圓柱半徑的分佈圖

我们来研究在电流的週波等於零时的情况，亦即磁通不变；
 磁場是由流过綫捲的直流电而引起的。此时，由於磁通不变，在
 圆柱内亦不会产生任何电场（图16），亦不会产生电流，輸到圆
 柱的电流将等於零。

以後逐漸開始增加电流的週波。此时，在圆柱中将產生感应
 电流，在圆柱中所產生的电场强度与磁通的变化速度成正比，亦
 即与流过綫捲的电流週波成正比。除此而外，电场的强度与联接环
 电流綫的磁通成正比。根据

此环电流綫我們未確定电场的
 强度。当週波接近於零时
 ，磁通在圆柱截面中的分佈
 几乎是平均的，磁通的数值
 大，因为产生电流的感应作
 用弱。

此时，誘生电流的密度
 将与週波成正比，因而，輸
 到圆柱的能量将与週波的平
 方成正比。当电流的週波增
 加时，誘生电场的强度亦将
 增加，但这个增加将比較慢
 的，因为貫穿圆柱的磁場被
 产生电流的減磁作用所減弱

在週波继续增加时，这
 种现象将使輸到圆柱的能量
 不与週波的平方成正比而增
 長，而約与週波的平方根成

正比。如綫捲的电流週波固定时，而圆柱的直径增加，也是

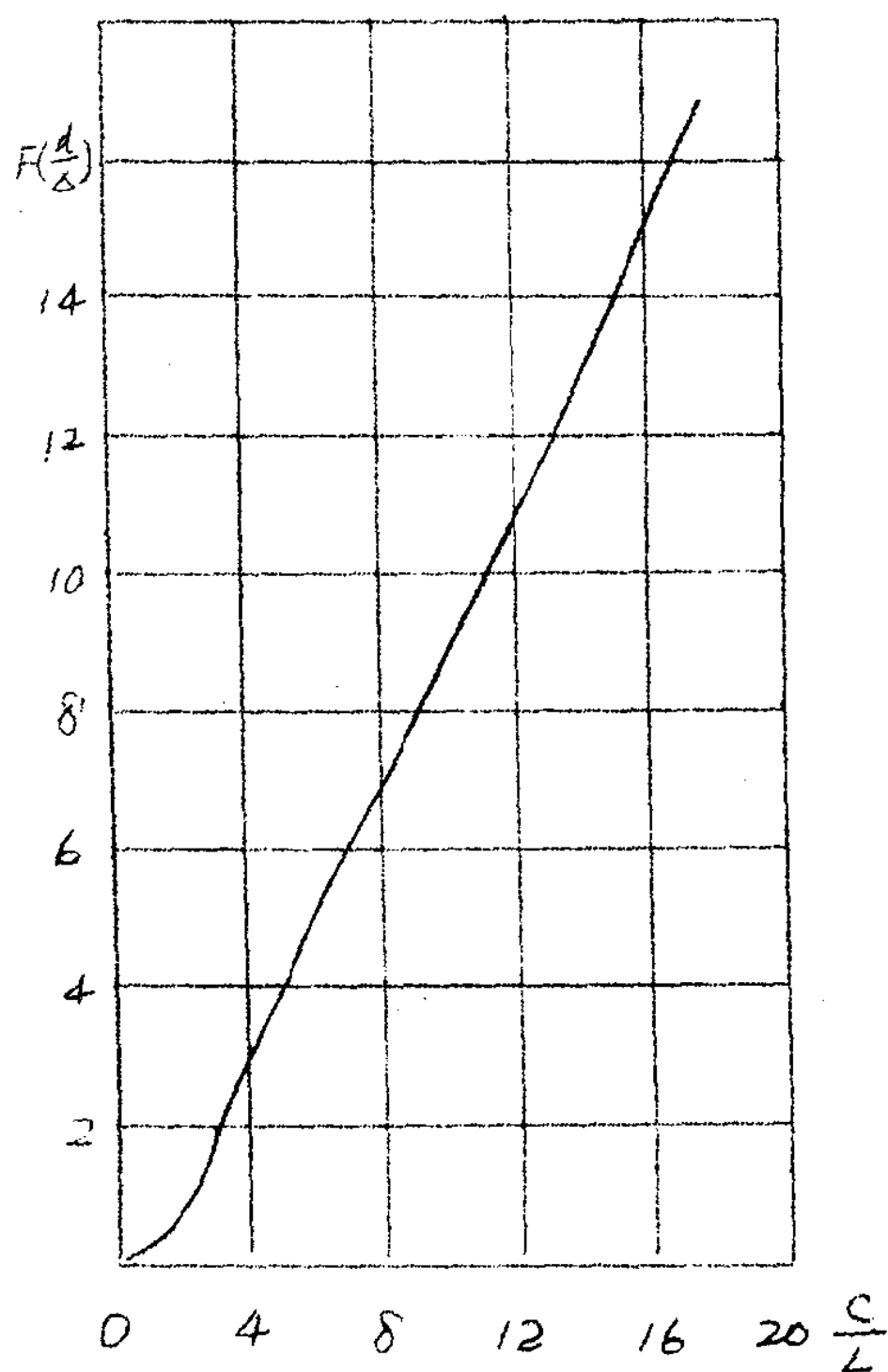


图16 確定容量用的函数

$F(d/\Delta)$ 图表：

$\frac{d}{\Delta}$ — 圆柱直径与电流
 渗透深度之比