

机器零件 感应加热用的 感应器

斯路霍茨基、雷斯金著



机械工业出版社

机器零件感应加热用的感应器

(設計与制造)

斯路霍茨基、雷斯金著

熊大達譯



机械工业出版社

1957

出版者的話

本書敘述感應加热的物理基础以及机器零件淬火和鍛造車間里毛坯加热用各式感应器的計算理論。書中用一些具体的例子闡明了感应器的計算方法，对各种不同用途的感应器及其制造工艺也都給予了詳細的介紹。

本書可供机械制造工厂、冶金工厂、科学研究机关的工作人员以及高等学校的学生参考。

苏联 А. Е. Слухоцкий, С. Е. Рыскин 著 'Индукторы для индукционного нагрева машиностроительных деталей'
(Машгиз 1954 年第一版)

* * *

NO. 1534

1957 年 10 月第一版 1957 年 10 月第一版第一次印刷
850 × 1168 ¹/₃₂ 字数 280 千字 印張 11 ³/₁₆ 0,001—1,900 册
机械工業出版社(北京东交民巷 27 号)出版
机械工業出版社印刷厂印刷 新华書店發行

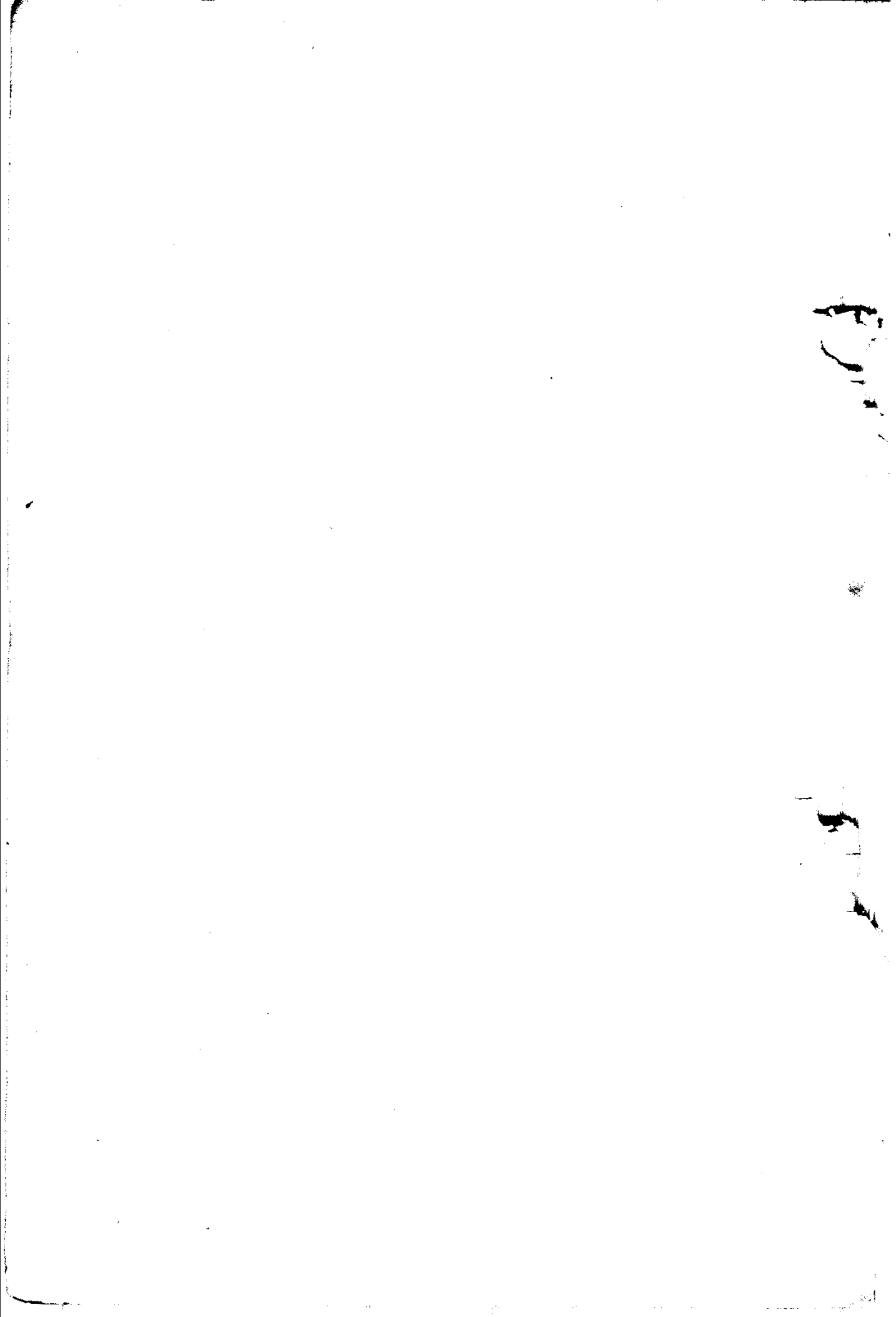
北京市書刊出版業營業許可証出字第 008 号 定价(10) 2.10 元

目 次

| | |
|----------------------------|-----|
| 緒言 | 7 |
| 第一章 感应加热法的物理基础 | 9 |
| 1 感应加热用裝置的組成部分和加热方法 | 9 |
| 2 感应加热法所利用的基本現象和定律 | 10 |
| 3 电磁感应現象 | 11 |
| 4 表面效应(集膚效应) | 12 |
| 5 鄰近效应 | 17 |
| 6 在加热过程中鋼的性質变化 | 18 |
| 7 圓环效应 | 20 |
| 8 施感导体与被加热零件中电流密度的分布 | 21 |
| 9 电磁場基本方程式的概念 | 22 |
| 第二章 加热规范的热計算 | 27 |
| 10 表面温度恒定及單位功率恒定时的加热规范 | 27 |
| 11 單位功率恒定时平表面的無限厚物体的加热 | 34 |
| 12 單位功率恒定时平表面的有限厚物体的加热 | 42 |
| 13 單位功率恒定时圓柱形物体的加热 | 50 |
| 14 热計算的例子 | 55 |
| 15 鍛件毛坯透热时的加热時間及單位功率的近似确定法 | 59 |
| 第三章 感应器計算的一般基础 | 64 |
| 16 引言 | 64 |
| 17 电流密度沿被加热物体截面的分布情况 | 67 |
| 18 被加热金屬的阻抗及磁阻 | 74 |
| 19 按已知加热规范确定导磁率 | 86 |
| 20 兩層的介質的有效电流透入深度 | 96 |
| 第四章 圓柱形零件表面加热用感应器的計算 | 99 |
| 21 加热帶寬度的确定 | 99 |
| 22 感应器上的电压 | 101 |
| 23 感应器的計算参数 | 106 |

| | |
|---|-----|
| 24 感应器計算的極限情况 | 113 |
| 25 汇流条的計算 | 115 |
| 26 感应器的計算 | 118 |
| 第五章 圓柱形外表面加热用感应器的典型構造 | 120 |
| 27 感应器設計的一般見解 | 129 |
| 28 不可分开式感应器 | 134 |
| 29 可分开式感应器 | 147 |
| 30 在声頻淬火时采用导磁体使加热均匀 | 158 |
| 第六章 平表面及內表面淬火用感应器的計算 | 162 |
| 31 平表面及內表面淬火的特点 | 162 |
| 32 变压器鋼片制导磁体的应用 | 165 |
| 33 被加热帶的計算寬度 | 166 |
| 34 感应器自身电阻及自身电抗的計算 | 171 |
| 35 感应器的計算参数 | 175 |
| 36 汇流条的計算 | 181 |
| 37 平感应器的計算 | 183 |
| 38 內表面淬火用感应器的形式 | 192 |
| 第七章 平表面及內表面加热用的典型感应器 | 194 |
| 39 平表面加热用的感应器 | 194 |
| 40 圓筒形內表面声頻加热用的感应器 | 201 |
| 41 圓筒形內表面射頻淬火用的感应器 | 219 |
| 第八章 表面淬火頻率的選擇及形狀复杂零件 淬火用感应器的近似計算 | 223 |
| 42 圓柱形物体及平物体淬火頻率的選擇 | 223 |
| 43 形狀复杂物体的淬火 | 229 |
| 44 形狀复杂的零件淬火用感应器的近似計算 | 236 |
| 第九章 特种感应器的構造 | 239 |
| 45 軸肩端面淬火用的感应器 | 239 |
| 46 电磁屏蔽及防止加热 | 244 |
| 47 凸輪軸淬火用的感应器 | 246 |
| 48 帶有安裝零件用的夹具的感应器 | 250 |
| 49 薄壁工件声頻加热用的感应器 | 253 |

| | |
|----------------------------------|------------|
| 50 鑄焊及焊接加热用的感应器 | 260 |
| 51 大模数的齿輪及鏈輪淬火用的感应器 | 265 |
| 52 形状复杂的物体声頻加热用的感应器 | 274 |
| 第十章 鍛件毛坯加热用感应器的計算 | 277 |
| 53 頻率的选择 | 277 |
| 54 基本关系 | 279 |
| 55 感应器上的电压 | 282 |
| 56 感应器的电效率 | 286 |
| 57 毛坯中的功率 | 288 |
| 58 感应器長度及匝数的选择 | 289 |
| 59 感应器內徑的确定、感应器的总效率 | 291 |
| 60 感应器冷却的計算 | 294 |
| 61 感应器的計算 | 296 |
| 第十一章 鍛件毛坯加热用感应器的典型構造 | 306 |
| 62 匀整毛坯加热用的感应器 | 306 |
| 63 長毛坯及毛坯端部加热用的感应器 | 320 |
| 第十二章 压縮变形、鑄焊及焊接加热时頻率的选择 | 327 |
| 64 压縮变形及强化 | 327 |
| 65 鑄焊 | 329 |
| 66 焊接 | 330 |
| 第十三章 感应器制造工艺的特点 | 332 |
| 67 制造感应器用的主要材料 | 332 |
| 68 感应器制造工艺 | 335 |
| 附录 I 在加热的第一阶段(冷规范)中感应器的計算 | 342 |
| II 感应器上电压恒定时加热规范的計算 | 348 |
| III 輔助函数 $F(z)$ 及 $F_1(z)$ 的数值表 | 352 |
| 参考文献 | 354 |
| 中俄名詞对照表 | 356 |



緒 言

有根据認為苏联是首先將高頻电流应用到工業上去的国家。

利用高頻电流来加热鋼件，以求使鋼件穿透淬火(淬透)的最初实验，是由苏联科学院通訊院士沃洛格琴教授(В. П. Вологдин)和基洛夫工厂的工程师别辽也夫(Беляев)在1926年所进行的。

1935年，沃洛格琴教授和罗曼諾夫(Б. Н. Романов)工程师提議利用感应加热来进行鋼軌的表面淬火。

不久，表面感应淬火法便成为普遍承認的一种先进方法。这种方法能保証获得高的生产率、經濟性、工作过程的自动化以及劳动衛生条件的改善。

在战前的几个五年計劃的年代里，苏联工業的蓬勃發展，給推广应用这种由苏联学者和工程师所研究成功的新加热方法創造了前提。

因为这个緣故，与理論基础的探討有关的一些問題便具有了特別迫切的意义。

在这里首先应当指出下列問題：頻率的选择；感应加热时的热过程；感应器和变压器的設計原理；感应器的計算；金屬学的問題，以及与热处理后零件的强度有关的一些問題。

不解决这些問題，就不可能正确地設計各种裝置和拟定工艺过程。

早在偉大的衛國战争以前，前三个問題基本上已經由苏联科学院通訊院士沃洛格琴教授和他在列宁格勒列宁电工研究所實驗室中的同事們解决了。

关于用感应加热法經表面淬火后的零件的强度方面的研究以及金屬学方面的問題，苏联科学院謝联先院士(С. В. Серенсен)、基勤(И. Н. Кидин)等人發表过一些著作。

对于应用高頻和超高頻加热的各种不同情况下所用的感应器和机床的設計問題，从1936年起就由沃洛格琴院士所領導的實驗

室的一些同事們开始进行工作，这个實驗室后来改为高频电流研究所了。

莫斯科斯大林汽車厂和烏拉尔斯大林汽車厂研究出了一系列的汽車零件加热用感应器的構造。

高尔基城的莫洛托夫汽車厂、齐略宾斯克拖拉机厂以及其他的企業也完成了許多工作。

但是，迄今在文献中还是沒有关于感应器計算和構造方面的有系統的資料。

本書是作者們在沃洛格琴高频电流研究所及工厂中多年工作所积累下来的經驗的总结。

書中引入的理論基础都是用来确立計算公式的，而所有的計算都用了实际的例子来加以說明。

有关表面加热用感应器的电計算的資料乃是本書首先發表的，而从已有文献中編选来的資料都經過了很大的修訂和补充，在許多情况下增补了一些特殊的計算輔助表。

本書前三章叙述感应器設計的一般理論基础；随后討論各种型式的感应器的計算和構造問題。

包括計算理論資料的各章和叙述感应器構造的各章是互相銜接的。作者認為，这样来安排本書的內容，可以使讀者在解决各个实际問題时利用本書更为便利。

在叙述电磁場方程式时，采用了合理化的度量單位，而長度的基本單位則采用了公分。

于是，真空的导磁率为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-9}$ (亨利/公分)，而几个基本量的度量單位遂为：磁場强度(安培/公分)；电場强度(伏特/公分)；磁感应强度(伏特·秒/公分²)。

第一至四、六、八、十、十二章及附录，叙述感应器的理論和計算問題，是由技术科学副博士斯路霍茨基編写的。第五、七、九、十一、十三章，叙述感应器的構造及其制造工艺，是由工程师磊斯金編写的。

第一章 感应加热法的物理基础

1 感应加热用装置的组成部分和加热方法

金属感应加热用装置通常由下列基本元件组成：

- 1) 高频发电机(真空管式或机械式)；
- 2) 感应器，是一螺旋形线圈或任何形状的导体，依被加热零件的类型而定；
- 3) 电容器，用来补偿感应器的低功率因数。

一般感应加热用装置的感应器常常是通过降压变压器而与发电机相联的，但表面淬火用装置的感应器则几乎永远是通过降压变压器而与发电机相联(图1)。具有多匝感应器的加热器通常不用变压器而与发电机直接接通(图2)。

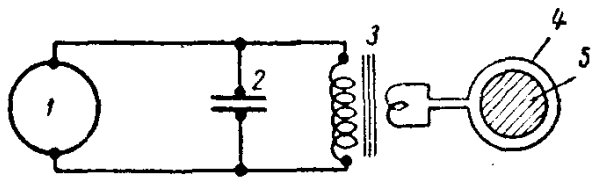


图1 具有降压变压器的感应加热用装置的简图：

1—发电机；2—电容器；3—降压变压器；4—感应器；5—被加热零件。

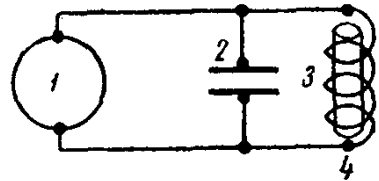


图2 没有降压变压器的感应加热用装置的简图：

1—发电机；2—电容器；3—感应器；4—被加热零件。

被加热零件放置在感应器里面或附近。感应器的交变磁场使零件中出现感应电流，结果便使零件加热。

现在有两种基本的加热方法。

同时加热法 感应器围绕着重作热处理的零件表面的所有部分，而且零件的加热在所有的点上同时进行。加热的温度及温度沿深度的分布状况依加热时间 t_R 以及在这时间内输送给零件的能量(输送给零件的功率)而定。

連續依次加熱法 將狹窄的感應器沿被加熱零件移動。此法特別經常應用於表面淬火。使冷水從感應器中或安置在感應器附近的特殊設備中噴淋到零件表面而進行淬火。在這種情況下，淬火深度及表面溫度依感應器的移動速度、感應器的寬度以及輸送給被加熱零件的功率而定。

在這裏的熱計算中，也可以利用加熱時間的概念，因為任何單元表面處在感應器內都有一定的時間：

$$t'_k = \frac{a}{v}, \quad (1)$$

式中 t'_k ——單元表面的加熱時間；
 a ——施感導體沿軸向的寬度；
 v ——感應器或零件的移動速度。

2 感應加熱法所利用的基本現象和定律

本章中所敘述的資料在文獻[3、4]中已經闡明過了。但是，我們認為簡要地說明一下感應加熱時所利用的一些基本現象，還是必要的。

感應加熱法是以利用下列現象和定律為基礎的：

- 1) 電磁感應定律；
- 2) 表面效應(集膚效應)；
- 3) 鄰近效應；
- 4) 在加熱過程中鋼的性質變化。

在表面熱處理時，鋼在加熱過程中的性質變化具有特別重大的意義。首先對此予以注意的人是蘇聯科學院通訊院士沃洛格琴，他是表面感應淬火法的創始人[3、4]。

在應用感應加熱法時，也必須注意到在感應器和被加熱零件中引起特殊的電流分布情況的其他現象的存在。在各種不同的情況下，這些現象可能是有利的或者是有害的。

所有這些現象很早就已經了解了。但是，幾乎在所有的技術

領域中，除了电磁感应現象之外，其余的現象都被認為是有害的或者在實質上是沒有意义的，而其所根据的原因正好是在感应加热情况下使这些現象成为有利的因素。

3 电磁感应現象

近代电工学是以电磁感应定律为基础的。上述的其余現象都是它的后果。

对于感应加热法來說，电磁感应的意义首先在于可以不采用接触子而能將电能輸送給被加热的物体。应用接触子会使工作过程大为复杂，并且在許多情况下是不可能实现的（例如，曲軸軸頸的表面淬火、形状复杂零件的表面淬火等）。

电磁感应現象的本質是：变化着的交变磁場会引起交变电場的出現，反之亦然。这两种場永远是同时存在的。

多半是根据放置在交变电磁場內的閉合导体中电流的出現而發現电磁感应的存在。

这时，在导体中發生交变电場，而引起电流的出現。

一般可以認為：在导体中感应出电动势(э. д. с.); 如果导体是閉合的，这电动势便引起电流的出現。

在回路中感应出的电动势的大小可以根据电磁感应定律来决定：

$$e = - \frac{d\psi}{dt} \text{ 伏特,} \quad (2)$$

式中 e ——电动势的瞬时值(伏特);

$\psi = w\Phi$ ——匝数为 w 及磁通为 Φ 的回路的磁鏈(磁通匝)总数(伏特·秒)。

如果所有各匝的磁通是同样的(这在我們感兴趣的情况下是以很高的精确度遵守着的)，則上列磁鏈数 ψ 的式子是正确的。

如果磁通 Φ 与時間 t 的关系接近于正弦关系，电动势的有效值就可以写成：

$$E = 4.44 f w \Phi \text{ 伏特。} \quad (3)$$

这时，导体中的功率則可由下式决定：

$$P = EI \cos \varphi = 4.44 f w l \Phi \cos \varphi \text{ 瓦特。} \quad (4)$$

安培·匝数 wl 决定任何电磁设备的载流部分(铜)的体积和重量，而磁通 Φ 則决定磁路的截面和重量。

由方程式(4)可知，当其余条件相等时，功率 P 与频率 f 成正比。

因此，当频率提高时，在相同体积中放出的能量也增大，亦即能量的浓度增大。这也正好说明了高频变压器的尺寸和重量为什么小以及在细小零件加热时为什么采用较高频率的理由。

4 表面效应(集肤效应)

表面效应乃是感应加热法、特别是表面淬火的基础。表面效应表现为电流密度沿导体截面分布得不均匀，最大电流密度出现于导体的某一表面。通常，表面效应这个术语所指的是电流挤聚于导体表面的现象，这现象是在该电流的磁场的影响下发生的。

这现象的物理本质可以阐述如下。假设某圆柱形导体受施加于其两端的电压 U 影响而有电流沿其中通过。

若将这导体分割成许多具有相等截面的同心薄层(图3)，则各层的电阻也是同样的。但是，各层的电抗 ωL_k 则将从表面向内心而增大，这里 L_k 是第 k 层的自感系数。

大家知道，某导体的自感系数由包围它的磁通 Φ 决定(在一般情况下由磁链数决定)，即：

$$L = \frac{\Phi}{I} \text{ 亨利；} \quad (5)$$

式中 I ——电流(安培)。

由图3a可知，内部的圆柱形假想线被导体内、外所有的磁通包围着。

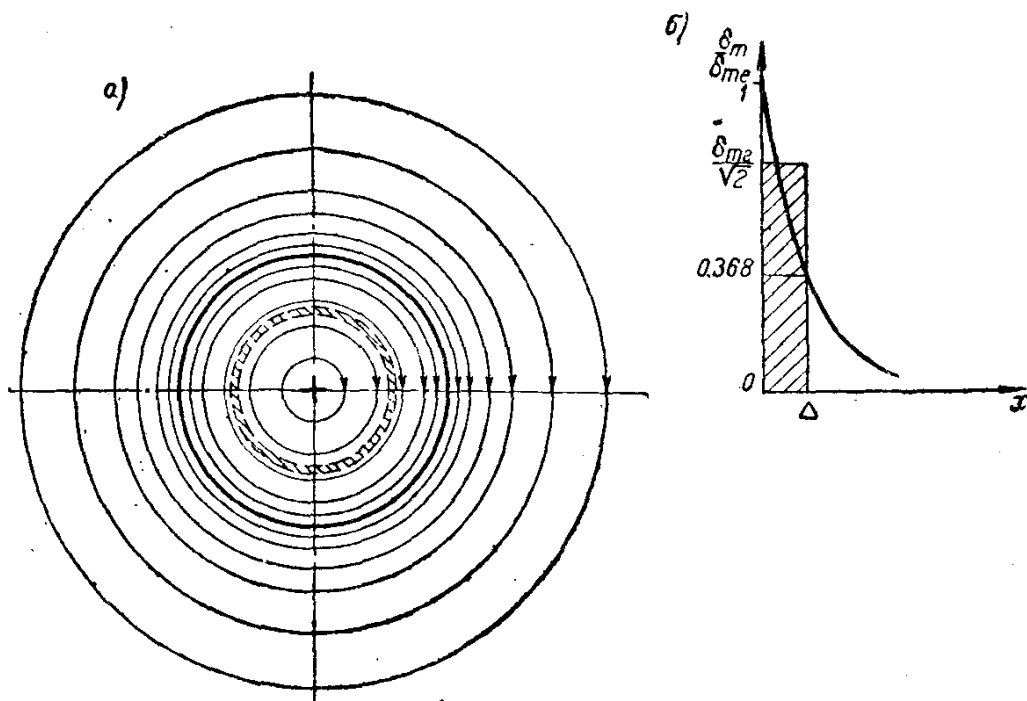


圖3 导体中的表面效应:

a—示意图;

——場綫; -----割出層的界綫;

b—电流密度沿很厚的平导体截面的分布情形; Δ —电流透入深度。

反之 处在外面的环状薄層(第 n 層)則只被外方的磁通包圍着。因此,

$$L_1 > L_n,$$

以及

$$z_1 > z_n,$$

因为

$$z = \sqrt{r^2 + x^2},$$

式中 z ——导体对交变电流的阻抗, 由电阻 r 与电抗 x 合成。

因为施加于导体所有單元的电压相同, 等于 U , 而薄層中的电流等于:

$$I_K = \frac{U}{z_K},$$

所以

$$I_n > I_1,$$

这就是說, 薄層中的电流强度随着向表面接近而逐渐增大。于是, 导体表面附近的电流密度比在某一深度上的要大些。

也可以直接利用电磁感应定律，即公式(2)，来解释这个现象。因为处在内部的假想线是与最大的磁通链结，所以在这假想线中将感应出与外施电压方向相反的最大的电动势。感应出的反电动势随着向表面接近而逐渐减小。薄层中的电流由外施电压与感应电动势的差来决定：

$$i = \frac{u - e}{r},$$

式中 u 及 e ——相应各量的瞬时值。

由此可知，电流密度是从导体表面向其内心而逐渐减小。当提高频率时，反电动势增大，电流向表面的挤聚也加剧。根据电磁感应定律，反电动势应当随频率增高而增大。

我们只粗略而定性地讨论了一下所有的现象。然而在许多情况下，沿导体截面的电流密度的分布可以由电磁场基本方程式的解答结果计算出来。例如，若我们有一无限厚的平导体，且其截面所有各点的电阻系数和导磁率恒定，则电流密度与截面深度(座标 x) 的关系服从下列指数定律：

$$\delta_m = \delta_{me} e^{-\frac{x}{\Delta}}; \quad (6)$$

式中 δ_{me} ——表面上电流密度的最大值(安培/公分²)；

δ_m ——深度 x 处的电流密度的最大值(安培/公分²)；

e ——自然对数的底；

Δ ——[电流透入深度](公分)：

$$\Delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0\mu}}, \quad (7)$$

式中 $\omega = 2\pi f$ ——角频率；

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-9}$ (亨利/公分)——真空的导磁率；

μ ——相对导磁率；

ρ ——电阻系数(欧姆·公分)。

当 $x = \Delta$ ，则

$$\delta_m = \frac{\delta_{me}}{\epsilon} = 0.368 \delta_{me}.$$

公式(6)和(7)的詳細推导見后面第17节。圖36表示相应于公式(6)的电流密度的分布情况。

[电流透入深度]这一概念可以同样簡便地替代由方程式(6)表示的电流密度的指数分布。这时可以認為，电流只在深度为 Δ 的薄層中以均匀的密度(等于 $\frac{\delta_{me}}{\sqrt{2}}$)流过，而在这薄層的界限以外便沒有电流了(圖36)。

这时，导体中通过的全电流等于有效值：

$$I_m = a \frac{\delta_{me}}{\sqrt{2}} \Delta \text{ 安培,} \quad (8)$$

式中 a ——薄層沿垂直于电流方向的寬度；

I_m ——电流的振幅值。

根据这些概念，可以写出薄層的电阻的式子：

$$r = \rho \frac{l}{a \Delta} \text{ 欧姆,} \quad (9)$$

式中 l ——薄層的長度(公分)。

这时，在寬度为 a 及長度为 l 的小帶中的功率等于

$$P = \frac{1}{2} I_m^2 r \text{ 瓦特}$$

或

$$P = a l \frac{\delta_{me}^2 \Delta \rho}{4} \text{ 瓦特。} \quad (10)$$

直接利用公式(6)，很容易核对这式子的正确性。

深度 x 处厚度为 dx 的單元薄層中的功率等于：

$$dP = \frac{1}{2} (a \delta_m dx)^2 \rho \frac{l}{a dx} = \frac{1}{2} a l \rho \delta_{me}^2 \epsilon^{-\frac{2x}{\Delta}} dx;$$

$$P = \frac{1}{2} a l \rho \delta_{me}^2 \int_0^{\infty} \epsilon^{-\frac{2x}{\Delta}} dx = a l \frac{\delta_{me}^2 \Delta \rho}{4}.$$

極為重要的是：在电流透入深度的界限之內放出能量的主要部分

$$P_{\Delta} = \frac{1}{2} a l \rho \delta_{me}^2 \int_0^{\Delta} \varepsilon^{-\frac{2x}{\Delta}} dx = a l \frac{\delta_{me}^2 \Delta \rho}{4} (1 - \varepsilon^{-2})$$

或 $P_{\Delta} = 0.865P,$ (11)

式中 P_{Δ} ——厚度为 Δ 的薄層中的功率。

于是在进行近似的热計算时，就可以假定是在这里放出所有的热能。

正如公式(7)所表示出的那样，电流透入深度与材料的物理性質及頻率有关。当頻率改变时，电流透入深度便改变，因而在其中产生热量的薄層的深度也改变。这对于感应加热技术具有特別重大的意义。

表1中列举在不同頻率时对于冷鋼、加热到超过磁性轉变点的鋼、以及銅的电流透入深度。

表1 鋼和銅中的电流透入深度(公分)

| 頻 率 (赫芝) | 銅 温度15°C $\rho = 1.8 \times 10^{-6}$ (欧姆·公分) $\mu = 1$ | 45 号 鋼 | |
|----------|---|--|---|
| | | 温 度 15°C $\rho = 2 \times 10^{-5}$ (欧姆·公分) $\mu = 40$ | 温 度 800°C $\rho = 10^{-4}$ (欧姆·公分) $\mu = 1$ |
| 50 | 1.0 | 0.5 | 7.0 |
| 500 | 0.3 | 0.15 | 2.2 |
| 2500 | 0.13 | 0.067 | 1.0 |
| 10000 | 0.07 | 0.034 | 0.5 |
| 10^5 | 0.022 | 0.011 | 0.16 |
| 10^6 | 0.007 | 0.0034 | 0.05 |

在实际情况下，导体总是有一定尺寸的，而且决非总是平的。然而即使是在这样的情况下，电流透入深度这一概念仍不失却其意义。因为电流密度早在离表面的距离等于(2.5~3) Δ 的地方就已实际上降到了零值，而功率則更早——在距离約为 2Δ 的地