

高频加热在工业中的应用

(苏联) M. Г. 洛津斯基著



科学普及出版社

高频加热在工业中的应用

M.Г.洛津斯基著

薄 国 华 译

本書提要

高频加热是电子学方面的一个新成就，~~是近年来~~，它在国民经济各个部門中获得了广泛的应用。

这本小册子所講的是高频加热在工业方面的应用：高频加热的原理，用高频加热將鋼制零件作表面淬火的方法，表面淬火时的注意事項，用高频电流加热金屬作焊接、模压、鍛造以及快速热处理等。

書中还引用一些簡單的計算公式和实际的例子，它將帮助讀者
在閱讀时能更深刻地理解內容。

总号：499

高频加热在工业中的应用

ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ
НАГРЕВА ТОКАМИ ВЫСОКОЙ
ЧАСТОТЫ

原著者：М. Г. ЛОЗИНСКИЙ

原編者：ВСЕСОЮЗНОЕ ОБЩЕСТВО ПО
РАСПРОСТРАНЕНИЮ ПОЛИТИ-
ЧЕСКИХ И НАУЧНЫХ ЗНАНИЙ

原出版者：ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»

1956

譯者：薄 國 華

出版者：科 学 普 及 出 版 社

(北京市西直門外郵政樓)

北京市書刊出版登記證出字第091号

發行者：新 華 書 店

印刷者：北 京 市 印 刷 一

(北京市西直門南大街乙1号)

开本：787 × 1092 1/16

印張：1 1/4

1957年7月第1版

字数：25,000

1957年12月第1次印刷

印数：2,050

統一書号：15051·16

定 价：(9)1角7分

目 次

緒 言	1
高頻电流感应加热的基本規律	2
用高頻电流感应加热將鋼作表面淬火	9
概 說	9
利用高頻电流加热的鋼表面淬火方法	12
内部应力对表面淬火制品使用性能的影响	15
表面淬火制品的回火和自动回火	20
鋼制品感应加热制度	22
表面淬火时制品的变形	24
用高頻电流加热把鋼作表面淬火的方法在工業中的应用	26
用高頻电流加热作快速焊接	31
把半成品穿透感应加热作冲压和鍛造	33
用感应加热將鋼作快速化学热处理	35
書中常用的外文字母及符号的意义	39
参考文献	40

緒 言

在各个工業部門的不同生产阶段中，往往必須將原料、半成品或制品作热力处理，这种处理通常叫做热处理。

把材料加热到規定温度，保持一定時間（時間从几秒鐘到許多小时，这要看处理的对象而确定），然后进行冷却——这几个过程組成整个热处理循环。根据加热材料的性能和工艺要求，升高温度的速度从每分鐘攝氏几度（°C）到每分鐘攝氏几千度。加热时所需温度的数值范围，同样也是很大的。

冷却速度是由技术要求来决定的。在某些情况下，必須緩慢地降低温度，不能快于每小时几度；在另外一些情况下，为了得到高質量的制品，須要迅速地冷却，它的速度达到每秒鐘几十度甚至几千度。

在各种加热方法（在煤气爐、石油爐和其他的爐子中加热，以及用蒸汽加热等等）中，利用电流的热效应来提高各种材料的温度，是最重要和应用得最广泛的一种方法。大家都知道，在時間 t 秒內， I 安培的电流通过电阻 R 欧姆的材料所产生的热量 Q （卡），由楞次-焦耳定律

$$Q = 0.24 I^2 R t \text{ 卡}$$

来确定。

可用各种方法进行电气加热。例如，大家都知道电阻爐，它有由耐热合金和其他材料制成的加热器。在这种电爐中，是利用輻射以及所謂空气对流現象，即热空气不断离开加热器，新鮮冷空气不断代替热空气，来把炙热的加热器的热量傳給制品而进行加热。

但是电爐中只有三分之一左右的热量傳到被加热材料上，所

有其余的热量都消耗在爐襯的加熱上而形成損失。

如果把電流直接通過作熱處理的材料進行電氣加熱，就要經濟得多。這時，因為熱量主要集中在制品的加熱部分，所以輻射所造成的損失減少了，電能消耗量也減少了。但是用這種方法加熱時，在加熱物件和供電網路的聯接處，必須要有可靠的電氣接觸[9 和 18]①。

近 20 年來，廣泛採用了以高頻電流無接觸的加熱各種材料的方法。這方法是以所有材料都能導電作為根據。只有無空氣的空間（排氣到十萬萬分之幾氣壓的高度真空）才不導電。應當指出，不同的材料具有不同的導電性能，而導電性能是由加熱或冷卻時發生變化的電阻的大小來決定的。

根據材料的電阻數值，可以用高頻電流感應加熱法或電容（電介質）加熱法進行加熱。如果要把易導電的材料作熱處理，使用高頻電流感應加熱法最為合適。金屬、合金和用粉末冶煉方法獲得的材料，首先應該認為是易導電的材料。如果要把不易導電的材料（半導體和電介質）加熱，就可以用電容法。屬於不易導電的材料有：塑料、橡膠、食品、纖維材料和絕緣材料等。

高頻電流加熱法的特點，是加工的制品和高頻電流的電源不必直接接觸（因為高頻振蕩能量在幾毫米的距離中的傳播不必利用導線，損失很小）；其次是它能夠以很大的速度進行加熱。

在機器製造業和金屬加工業中，感應加熱法應用得特別廣泛。這本小冊子要講的就是最有趣的幾種感應加熱方法。

高頻電流感應加熱的基本規律

當電流通過導體時，在導體周圍空間便產生看不見的磁力綫，這種磁力綫就組成電磁場。當強度隨時間而變化的變電

① 方括號中的數字表示附錄參考文獻的番号。

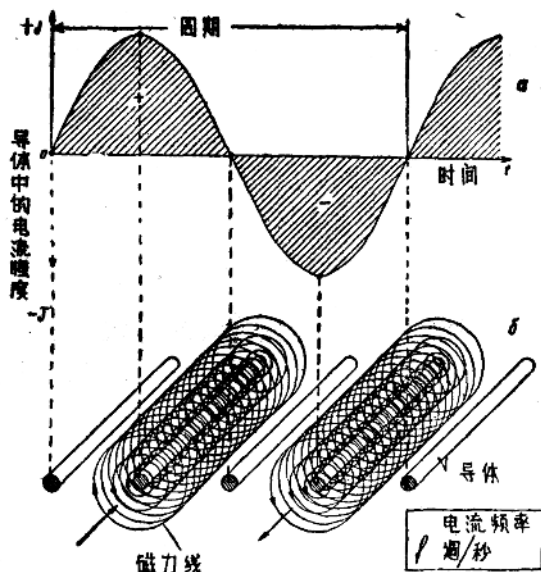


圖 1 交变电流强度和电磁场随时间而变化的示意图：

a —交变电流强度 I 随时间 t 的变化； b —在不同瞬間磁力綫在导体周围的分布圖。

流①通过导体时（圖 1），在导体周围随着电流强度的变化就出現一个由磁力綫組成的特殊壳層。离导体表面愈远，磁力綫就愈少。导体中电流强度降低时，这磁力綫就逐渐减少；电流强度降低到零以后，磁力綫就完全消失。到下一循环中电流强度增高时，导体周围就又重新出現磁力綫。

假如在通有交变电流的导体附近放一件鋼制零件，那么在鋼

① 我們要提示一下，电流强度从零变化到最大值，又重新恢复到零的整个循环，叫做“半周”。而电流经过上述兩次变化（一次是“正”半周，另一次是“負”半周，它們間的差別只是电流通过的方向不同）的时间，叫做“周期”。在这本小册子里，我們將經常遇到“电流频率”这个术语，它是表示每秒钟的周数，在技术書籍中，它常用拉丁字母 f 来代表。在苏联的电力和照明網路中，通常使用频率为每秒钟 50 周的交变电流。

制零件上和导体相距几毫米的部分就开始發热。这种發热現象是由什么东西引起的呢？为了回答这个問題，我們要來談談电工学的发展史。

約在 130 年以前，法国科学家法郎士·阿拉貢观察罗盤指針的摆动，研究了地球的磁性。他發現，假如在罗盤指針附近放一塊金屬，罗盤指針的摆动就迅速停止。阿拉貢也确定了，旋轉的圓銅板会帶动磁針（磁針和圓銅板并不接触，同时它和圓銅板的軸間保持着一定的距离）旋轉。上述現象和在金屬中激發（感应）的渦流是有联系的。阿拉貢的学生和繼承者列昂·佛科研究了电流感应的規律。从那时起，金屬中的感应电流就被叫做渦流或佛科电流。

德国科学家亨利·赫芝对渦流进行了数学的計算，并發表在他 1895 年出版的著作中。

有很長一段时期，感应渦流被認為是电机工作时只能引起損失的有害的电流，所以科学家和工程師們都竭力来防止它的产生。

經過了不少的年月，渦流才应用到技术中。首先渦流用来制动測量仪表的各种活动部件。制造帶有“阻尼器”的电气測量仪表已經有五十多年了。阻尼器的工作原理，是利用永久磁鉄磁場和在仪表活动部件中感应产生的渦流的互相作用而制动活动部件。

20 世紀初，科学家和發明家們开始研究利用渦流热效应的問題。在 1902—1904 年，制出了第一批熔化金屬的感应爐，并投入了生产。

A. C. 波波夫的發明，大大地促进了高頻电流在工業中的应用，他利用無导綫傳送电磁波的方法，首先把高頻电流用于無綫电通信的目的。

这位偉大的科学家的發現，奠定了电工技术蓬勃发展的基础。結果在較短的时期內，就制成了各种容量的高頻电流發电机

(旋轉式)、真空管式振蕩器和火花式振蕩器，并为新技术部門——高频电热的發展准备了物質和技术条件。

在苏联，应用高频电流把金屬感应加热来作热处理的方法的奠基人，是苏联科学院通訊院士 B. П. 沃洛格廷。他从 1935 年就开始研究在工業中利用高频电流热效应的問題。在过去的 20 年中，B. П. 沃洛格廷的許多学生和繼承者、科学家和生产革新者們进一步改进了金屬（首先是鋼）的感应加热法，并在机器制造工業各部門中采用了这种方法。現在几乎在苏联所有的金屬加工工厂中，都或多或少地应用着高频电流感应加热法。

諾尔特魯波最早研究了利用高频电流感应加热法对金屬加热作热处理的問題，并在美国發表了他的研究結果。后来美国“陶克”工厂开始制造对汽車發动机曲軸頸进行表面淬火的設備。以后这个加固方法曾在美国广泛应用。

为了明了这个过程进行情况，現在我們来研究一下对鋼进行感应加热的簡單示意圖。圖 2 中画着鋼制圓柱体 1，在圓柱体

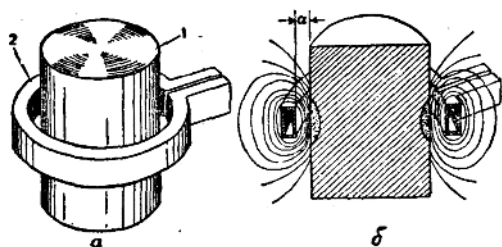


圖 2 鋼制圓柱体表面四周的感应加热：

a—鋼制圓柱体和感应器的相互排列位置圖；б—圓柱体和感应器的橫断面圖，加热部分的形状和感应加热瞬間的磁力綫的分布。

近旁距离 a 处有一載流体——感应器 2。在进行感应加热时，空气間隙 a 一般为几毫米。每当电流方向改变时，感应器周圍所产生的磁力綫就切割圓柱体的表面，并在其中激起渦流。由于渦流

的热效应，圆柱体靠近感应器的部分的温度就逐渐地升高。随着温度的逐渐升高，圆柱体靠近感应器的部分的颜色就逐渐改变：起初是深红色，后来是橙黄色。温度达到摄氏 1,200 度左右时，钢就开始发出相当明亮的亮光。

乍看起来，感应加热过程似乎是很简单的；而实际上，它却和许多复杂而难以研究的现象有着联系。

现在来研究一下高频电流感应加热过程的几个特点。

上面已经说过，感应加热时，制品表面上的电流强度最大。随着涡流进入钢的内部，电流强度就降低。图 3 表示涡流沿钢板截面分布的性质。

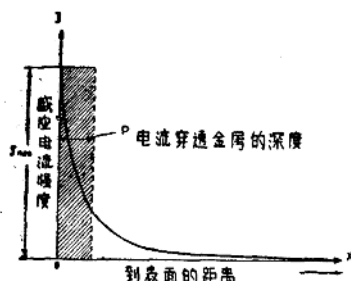


图 3 感应产生的涡流 J 的分布规律性。

感应电流强度变化的规律性，要用复杂的数学关系式来表示。在现代技术中，关于涡流在金属中分布的性质，一般地都采用比较简单的理解方法，来进行感应加热的近似的计算。根据德国数学家 K. 斯坦因梅茨的数据，约有 90% 涡流集中在金属的表面层，它的

厚度是由电流频率 f 和被加热材料主要物理性能——电阻系数 ρ （是表示材料导电能力的比例系数）和导磁率 μ 来决定。

金属中感应产生的大部分涡流所集中的表面层的厚度（也常叫做电流在金属中的“渗透深度”），一般可以按下列公式来确定：

$$P = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \text{ 厘米}$$

式中 P ——电流的渗透深度（厘米）；

ρ ——电阻系数（欧姆·厘米）；

μ ——导磁率（高斯/奥斯特）；

f ——电流频率（周/秒）。①

当把結構鋼从室温加热到攝氏 1,000 度的温度（許多牌号的鋼都是在这个温度下进行热处理的）时，电阻系数值約增加 11—13 倍。加热时，鋼的导磁率有很大的变化。在一定的加热温度、就是所謂“失去磁性的温度”下，导磁率急剧地降低到 $\mu=1$ ，而再繼續加热时，它几乎就保持不变了。例如，純鉄加热到攝氏 768 度时，它就失去磁性，而不同牌号的結構鋼却在攝氏 720 度到 770 度之間失去磁性。

圖 4 是表示鋼加热时电阻系数和导磁系数变化特性的圖表。温度升高时，鋼的性質变化使电流渗透深度增加，使集中了渦流所产生的大部分热量的表面層的厚度增加。

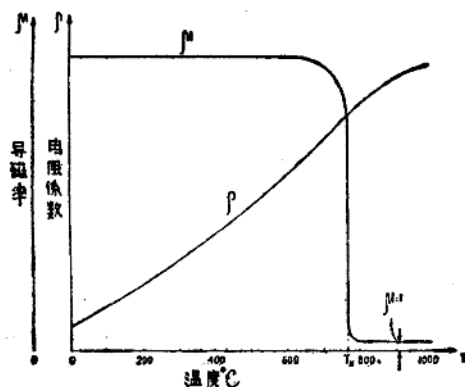


圖 4 結構鋼的电阻系数 ρ 、导磁率 μ 随加热温度 T 而变化的关系曲线。

假如把攝氏 20 度和 1,000 度的温度下結構鋼的 ρ 和 μ 值代入上面所列的公式，然后进行計算，可得到簡化的公式。当电流频率已知时，根据这些公式可以确定电流渗透冷鋼和热鋼的深度：

① 这里的几个注解是譯本編者加的。

$$P_{100} \cong \frac{20}{\sqrt{f}} \text{毫米}; \quad P_{1000} \cong \frac{600}{\sqrt{f}} \text{毫米}$$

利用上列公式，可确定不同频率电流渗透冷钢和热钢的深度。

表 1 中列有三种不同频率的电流的渗透深度计算结果，这三种不同频率是：工业用频率 $f=50$ 周/秒，工业方面常用的旋转式发电机所发出的频率 $f=2,500$ 周/秒，及由真空管式高频振荡器所获得的频率 $f=250,000$ 周/秒。

表 1

电 流 频 率 (周/秒)	电流渗透15号钢的深度(毫米)	
	摄氏 20 度时	摄氏 1,000 度时
50	2.8	85
2,500	0.4	12
250,000	0.04	1.2

由表 1 可以看出，在高温下不同频率电流渗透钢的深度，可以从 1 毫米左右的极小数值变化到几十毫米。在只需要对零件的一部分或半成品的一定深度作高温加热的许多工艺过程中，以及把制品作穿透加热时可以顺利地应用电流分布的这个特点。

用高频涡流加热金属的方法的第二个重要特点，是加热过程极为迅速。如果条件选择得正确，一般在几秒钟，甚至十分之几秒钟内就可以把钢的表面层加热到摄氏 1,000 度左右的温度。如果在炉子中加热同样的制品来作热处理，所需要的时间就多得多了。

举几个例子来说明这点。例如，要在炉中把壁厚 3 毫米的钢制零件加热到摄氏 1,000 度，需要把它在炉子中放 10 分钟。如果把温度升高的速度 τ 理解为温度 T 对加热循环持续时间 t 的比的话，这时温度升高的速度将是：

$$\tau_1 = \frac{T}{t} = \frac{1000}{10} = 100 \text{度/分钟}$$

現在我們來看另外一個例子。例如，需要把尺寸為 300×300 毫米、厚為100毫米的大件制品——沖壓機下模在爐中加熱。加熱這樣的下模所需的時間約為100分鐘。在這種情況下溫度升高的速度將等於：

$$\tau_2 = \frac{1000}{100} = 10 \text{ 度/分鐘}$$

上面所算出的溫度升高的速度為每分鐘10度和100度，這對於在爐中加熱的技術來說是有代表性的。現在我們來看用高頻電流加熱制品時溫度升高的速度。假設把鋼制圓柱體的表面層按2毫米的深度加熱到攝氏1,000度需要2秒鐘，於是溫度升高的速度將為：

$$\tau_3 = \frac{1000}{2} = 500 \text{ 度/秒或 } 30,000 \text{ 度/分鐘}$$

上面所說高頻加熱的特點（熱量可以沿制品截面不均勻地發散和加熱過程極為迅速），在規劃不同的熱處理工藝過程時已經得到利用，並且可以順利地解決把簡單和複雜形狀的半成品和制品作表面加熱和穿透加熱的許多技術問題。

用高頻電流感應加熱將鋼作表面淬火

概 說

鋼是現代機器製造業中的主要結構材料。強度大、價值比較低、加工容易、能夠用來製造外形極複雜的制品——這還遠不能完全說明各種牌號鋼的可貴的性質。很多種所謂“淬火”鋼的特別重要的性質，是它們能夠經受淬火。淬火鋼就是在冶煉生產過程中充分加入（通常也叫做“滲入”）碳和其他元素的鋼。

為實現淬火，必需把整個鋼制品或所要處理的個別部分加熱到為每種鋼所規定的溫度，也就是所謂奧氏體化溫度。然後在這溫度下保持一段時間，再使加熱部分迅速冷卻。冷卻過程（也就

是“淬火”)的速度,应当不小于为该牌号的鋼所规定的数值。最常用的冷却介质是水、各种乳状剂和油。

通常在爐中加热后可作淬火的各種牌號結構鋼,都可以作高頻表面淬火。在很多情況下,還能順利地將生鐵零件(如各種車床的導向機座)作淬火。

在把鋼作淬火時,鋼就發生奧氏體變為新的組織狀態(也就是所謂馬登體)的複雜過程。馬登體的特點是它有很高的硬度。但是馬登體有一個重大的缺點:它很脆,在撞擊荷重作用下容易破碎。

應當指出,表面淬火時產生的馬登體,通常是細小的晶體,在顯微鏡下觀察,它們具有特殊的“針”狀。小針狀的或者有時候叫做“密晶體”的馬登體,有着良好的使用性能,馬登體是由于感應加熱過程進行迅速,奧氏體的顆粒細小而產生的[8]。

人們學會製造鋼鐵,已經有幾千年了。中國人和印度人早就知道了應用鋼鐵。在印度古廟的牆壁上,還遺留着熔鋼坩堝的圖形。

從古代到今天,把鋼作淬火的技術經過了許多階段。約在1,700年以前,大馬士革城就以擁有大批煉鋼技師而聞名,他們掌握着一種特殊鋼——大馬士革鋼的生產技藝。在19世紀以前,這種鋼按其質量來說始終是無出其右的。

後來,約在1,000年以前,西班牙的托勒多城所製造的鋼開始和大馬士革鋼競爭。然而托勒多的技師還是不能達到他們的老前輩——大馬士革技師的完美的程度。約在一百多年以前,大馬士革鋼的秘密才被俄國采礦工程師 П. П. 阿諾索夫所揭破。他開天辟地地用顯微鏡來研究鋼的組織,因而解決了冶煉工作人員所遇到的許多問題。

杰出的俄國科學家 Д. К. 喬爾諾夫可以稱為“金屬科學之父”,他對鋼的性質作了深刻的研究。由於他的研究,人們才了解了鋼

在加熱時（特別是淬火時）所發生的過程。他說明了使鋼具有極高硬度的原因和條件。

為什麼要使鋼有這樣高的硬度呢？

大家知道，各種機器和機械的大部分鋼制零件磨損的主要原因就是摩擦。即使曲軸的軸頸或齒輪的牙齒在工作時只磨損十分之幾毫米（也就是說，有時候它的形狀的改變是極微小的），這肉眼所不易發現的改變也會成為整個複雜機組損壞的原因。

為了製造機器、車床和電動機容易磨損零件的更換用的備品，每年要消耗幾十萬噸鋼鐵。因此可以理解到，科學家和工程師們為什麼要想找出延長使用期限、延長鋼製品“生命”的方法。在許多情況下，增加鋼的硬度、改進淬火的質量和採用新的熱處理方法，是可以增強鋼製品的抗磨力的。

鋼制零件一般用比較柔軟而有韌性的所謂“生”鋼製成。但是經過淬火以後，鋼製品在具有硬度的同時又具有一個新的性質——它們變成脆性的了。完全淬火過的錘子打擊第一下就會碎成散塊，淬火過的鋼制沖壓機往往在工作中破裂而粉碎。為了防止這些現象，在淬火後時常採用把淬火過的零件回火的方法來人為地降低已有的高的硬度。回火，就是把製品再一次加熱，在一定溫度下保持一段時間，然後使它慢慢地冷卻。回火所需加熱的溫度由鋼的種類和所需降低的硬度來決定。這個溫度的範圍通常是攝氏 150—600 度。但是一經過回火，鋼製品在淬火時所得到的硬度就會大大地降低。

這樣，乍看起來，似乎問題無法解決，遇到了一個特殊的“迷津”。未經淬火的軟鋼所制的零件，使用不到幾小時甚至幾分鐘就會磨損；而穿透淬火過的零件又太脆，這將成為它們在工作中迅速損壞的原因。

解決這個問題的辦法，就是只把鋼製品在工作中受到摩擦的那些部分作表面淬火。如果把這種工作表面加熱到由 1—2 到 4—5

毫米^①的深度，然后进行淬火，那末制品中心將保持原来較低的硬度，它將成为緩和冲击荷重作用的特殊的“枕座”。

但这里又遇到了旧的加热技术所無法克服的困难：在普通加热爐中不能够只把制品的表面加热到需要的温度；制品將不可避免地整个受到加热。

为了对截面不均匀分布的表面进行加热，利用鋼中高频感应涡流的热效应是特別方便的。

把各种各样机器和工具零件的工作部分作高频表面局部淬火的方法，在机器制造业中已經普遍应用了。不論是尺寸为几米、重量为几吨的大零件，或尺寸为几毫米、重量为十分之几克的小零件，都能够用高频电流加热法进行淬火。

表面淬火能增加制品的强度，使制品的尺寸和重量减小。

利用高频电流加热的鋼表面淬火方法

在工業实践中广泛应用着两种表面淬火的方法：同时的和依次連續的。

第一种方法是把需要加固的整个表面同时加热，然后进行淬火。用这种方法可以保証高频裝置有高的生产率，但是供給高频电流的振荡器的容量，应当保証能把整个需要处理的部分加热。

用第二种方法时，使制品平稳地沿感应器移动（或使感应器沿制品移动），而表面層加热和加热过的部分送入冷却区域的淬火都是逐漸进行的。自然，这时淬火裝置的生产率会大大地降低，但是也相应地减少了供电振荡器的必需容量，减少了安裝淬火裝置所需的生产面积，降低了它的建筑費用。

淬火方法的选择，是由生产性質和所要加工的制品的形狀来决定。我們可以举几个例來說明这点。如果需要用同时加热法把

① 实践証明，这个淬火深度范围包括了现代机器制造业絕大部分的鋼制品。

直徑 $D=5$ 厘米、高度 $h=20$ 厘米的小軸側面作表面淬火，淬火深度 $\delta=2$ 毫米。根據我們的實驗可以指出，在使用頻率 $f \cong 200,000$ 周/秒的電流和供電振蕩器單位容量 $\Delta P \cong 1$ 瓩/平方厘米時，如果需要用同時加熱法將小軸作表面淬火，那麼上述深度的表面層加熱所需時間大約為 3 秒。

為了確定供電振蕩器的必需容量，首先必須按照下列公式算出小軸需要淬火的表面面積：

$$S = 3.14 \cdot D \cdot h = 3.14 \cdot 5 \cdot 20 = 314 \text{ 平方厘米}$$

在上述單位容量的數值 $\Delta P = 1$ 瓩/平方厘米時，用同時加熱法把整個小軸加熱所需的容量為：

$$P = \Delta P \cdot S = 1 \cdot 314 = 314 \text{ 瓩}$$

假如我們所舉的例中所討論的小軸是大量生產的零件，並且為了把它作表面淬火已製造了專門的機床，這種機床能保證自動地把小軸送入感應器去加熱，並把小軸送入冷卻介質中去淬火，那末消耗在這些操作上的時間應當加在加熱的持續時間內。處理每根小軸的每一循環的總持續時間，將是消耗在高頻加熱的時間（在我們的例中等於 3 秒）和機床時間（假定為 1 秒）的總和。處理每根小軸的整個循環的持續時間將為 4 秒。這時，高頻淬火裝置的生產率將為每分鐘 15 根小軸或每小時 900 根小軸。在每班中（在工作日為 8 小時的情況下）可保證把 7,200 根小軸作表面淬火。

只有進行大量生產的工廠才需要上述的生產率。並且當每天要把大批同樣類型的製品作表面淬火時，證明是完全合算的。但進行小批生產和單件生產的企業怎麼辦呢？在那裡把數量不多的零件作表面淬火是否合理呢？研究了第二個例以後就可以得到這些問題的解答。

假如在某個工廠需要把上述小軸作表面淬火，並且每班的產量不超過 15—20 根，那末如果使用上述的自動機床和容量約為 300 瓩的振蕩器，每班的任務只要 1—2 分鐘就可完成。當不採用