

开合式电磁探伤器

潘 希 駱德琳 合編

人 民 鐵 道 出 版 社

序 言

鐵道部在 1953 年底頒布的“機務段、車輛段及機車車輛修理工廠機車車輛重要配件電磁探傷細則”，其第一章“總則”的第一條就規定了：“為了防止機車及車輛在運行中，由於不良配件發生裂損，肇成事故，威脅行車安全及影響列車正常運行起見，機車車輛的重要配件，在廠段檢修過程中，均應施行電磁探傷”。但是施行電磁探傷的一種工具——開合式電磁探傷器，雖然在近年來已經成為鐵路檢修機車、車輛及其他機械的不可缺少的主要工具，卻還沒有一本有系統的書籍來介紹這個工具的構造、性能和使用方法。為了使一些實際工作人員，尤其是直接操作電磁探傷器的工人，有一個比較全面的了解起見，我們根據個人所搜集的一些資料，編成這本小冊子，供有關同志作為參考，但因作者學力有限，加以經驗不足，編寫不夠妥當的地方，尚希讀者惠予指正。

目

一、电磁探伤的基本原理	1
二、开合式电磁探伤器的构造	3
1. 开合式环型电磁探伤器	3
2. 开合式马蹄型电磁探伤器	8
三、开合式电磁探伤器的专用变压器	12
1. 铁心的截面积、平均长度、厚度和重量	13
2. 初级绕组及次级绕组的圈数、宽度、厚度、铜线长度和铜线重量	17
3. 变压器的损耗	21
4. 变压器的效率	23
四、电磁探伤器的附属用具和用品	27
1. 磁性铁粉	27
2. 磁性铁粉容器	28
3. 磁性铁粉回收盘	29
4. 分电盘	29
5. 照明装置	31
6. 探伤工作台架	32
7. 标准测定器	33
8. 零星用具	34
9. 零星用品	34
五、开合式电磁探伤器操作概述	35
六、电磁探伤工作的作业顺序及注意事项	39
附录一 轻型开合式马蹄型电磁探伤器	43
附录二 一种优良的磁性铁粉的制造方法	46
参考文献	49

一、电磁探伤的基本原理

电磁探伤法是無損檢查工作方法之一，系利用电磁的感应作用，檢查鋼鐵配件表面或接近表面部分有無裂損缺陷。这种工作方法的基本原理是用电磁探伤器对被檢查的配件进行电磁感应，使配件临时被磁化而於其内部产生磁力綫，配件上若無裂損缺陷，則該配件表面相当於普通电磁鉄的内部几乎没有磁力綫外洩，所以洒在配件表面上的磁性鉄粉不發生聚集現象；若在配件表面上有裂損的情况，並且裂損存在的方向与配件内部磁力綫的方向不平行，成为一定的交角时，則相当於把配件有裂紋的局部予以折断，也就是說像將普通的磁鉄从中折断一样，而形成一对新生的異性磁鉄，在这一对新生的異性磁極之間，有相当数量的磁力綫外洩，这时原已洒在表面上的磁性鉄粉就將被这一对磁極吸引而聚集成線紋形狀，如第一圖即表示因配件表面有裂損而形成一对異性磁極的情况，这样就达到了檢查的目的，使原来用肉眼不易察覺的裂損缺陷，因磁性鉄粉的聚集而被發現。

在对配件施行电磁探伤，因有缺陷而發生磁性鉄粉聚集的現象时，不論所聚集的鉄粉下面是什么缺陷，在电磁探伤的工作的術語上，对这种现象統称为「显示」。在电磁探伤工作中所發現的显示很不一致，其形狀及位置主要是由造成显示的缺陷形狀及所在位置决定的。「显示」在观察时清楚与否主要是由下列几个条件决定的：

1. 电磁探伤器的效能是否良好。若欲显示清楚，当然需要效能优良的探伤工具。

2. 被檢查的配件本身導磁系數的大小。假若其他條件不變，僅以導磁系數不同的兩配件上作同樣缺陷的顯示，必然是其中導磁系數較高的比另一個清楚得多。



磁力線流動方向 (a)



(6)

第1圖 (a) 因配件表面有裂紋，致使部分磁力綫外洩，同時裂紋兩側局部地方產生一對新生的異性磁極；

(6) 一根鋼軸上因有裂紋，在被電磁探傷時，裂紋表面上的磁性鐵粉聚集成線狀狀態

然是寬的較為清楚易見。

4. 缺陷方向和配件內部磁力綫交角的大小。交角越接近垂直，則顯示越清楚；越接近平行越不清楚。這主要原因是在一個單位面積上所穿過磁力綫的多少，和它所發生的磁場強度成正比，磁場愈強者吸引的鐵粉越多，顯示就越分明。

5. 配件本身不同形狀的位置上所產的缺陷，其顯示的清楚與否也不相同。譬如，同樣大小的缺陷，若產生在光平的表面上，必然比產生在凸角的尖部或凹角的根部能顯示清楚，這也是由於缺陷阻截配件內部磁力綫的多少而造成的。

6. 同樣大小的缺陷，其隱於配件表皮下面的距離，使

3. 缺陷的大小。所謂缺陷的大小，即是缺陷的深度和寬度。深度是指缺陷阻截配件中磁力綫的面積的大小，面積越大（即新生的磁極面積越大）者磁力越強，則被吸引而聚集的磁性鐵粉就越多。

此外是缺陷的寬度，例如兩個裂紋一個寬一個窄，當

它显示的清楚与否也不相同。越接近於表面的显示越清楚，越隱於表面深处的显示越不清楚。这是因为隱於配件表面的缺陷，其距离表面越远，就使配件内部磁力綫外洩的数量越少，所示鉄粉的吸引越少，显示也就越不清楚。

总而言之，电磁探伤的目的是希望在一定的范围内，将原来人眼看不見的缺陷，通过电磁探伤的方法，使它能够被检查者发现。同时，还希望原来不易发现的缺陷，通过电磁探伤，使它更为明显。因此，制造清楚易見的『显示』是对电磁探伤工作的先决要求；欲使显示清楚，首先是必須設置效能优良的电磁探伤器，下文即將我国鉄路部門使用最广泛的一种电磁探伤器——开合式电磁探伤器作一些介紹，以供讀者研究和参考。

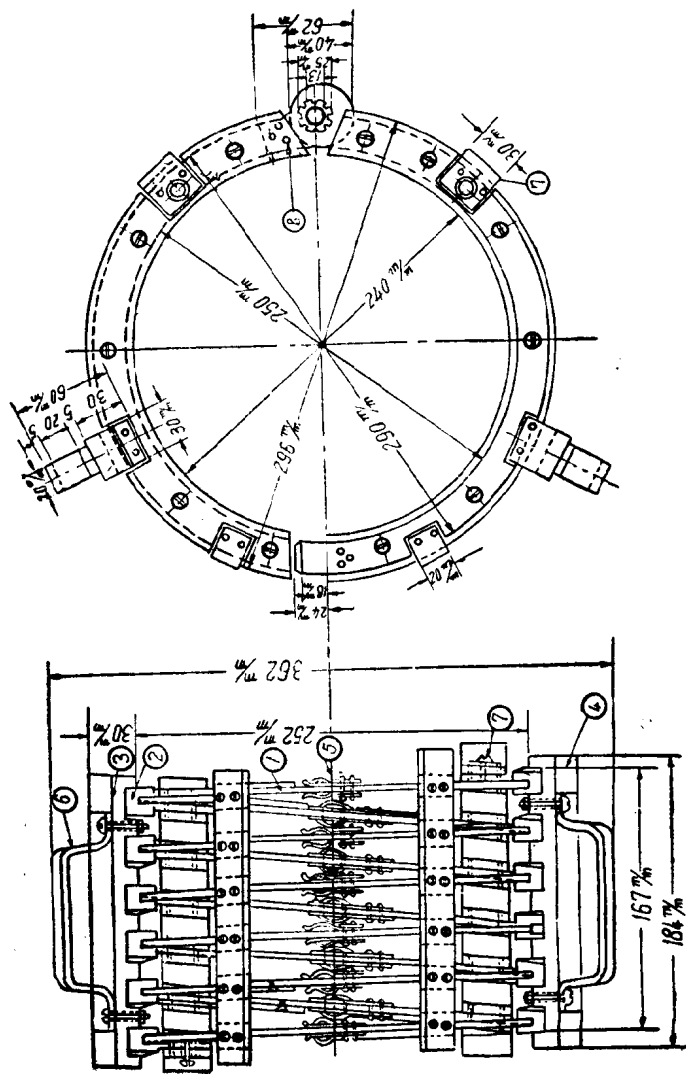
二、开合式电磁探伤器的構造

这里所介紹的开合式电磁探伤器，是我国鉄道部於一九五一年底参照苏联和我国的鉄路部門已使用的各型电磁探伤器，結合实际需要所改进設計的，到目前为止，开合式电磁探伤器仍被各使用單位認為是各型电磁探伤器中最好用的一种。

开合式电磁探伤器有二种类型，一种是开合式馬蹄型电磁探伤器，一种是开合式环型电磁探伤器。这里先对这二种类型的电磁探伤器的構造和作用加以介紹，至於它們的專用变压器將在下一章作專題叙述。

1. 开合式环型电磁探伤器

开合式环型电磁探伤器的口徑系依桿狀工作物直徑的大小而决定的。在鉄路机务部門所使用者採取 300 公厘的內



第2圖 開合式環型電磁探傷器構造圖

徑，以能檢查機車動輪的最大車軸為主。鐵路車輛部門所使用者採取240公厘的內徑，以能檢查客貨車的最大車軸為主。

開合式環型电磁探傷器的構造如第2圖所示，勵磁繞圈6匝系使用 $5 \times 20 = 100$ 平方公厘的扁銅繞成，在繞圈的兩外方，為防止探傷器勵磁繞圈相觸，用膠木板及油浸木板構成繞圈座及繞圈撐板予以隔離，並且為了防止銅線和外界的導體或被試驗物直接接觸，因此使絕緣板的內側較勵磁繞圈突出5公厘，而外側較勵磁繞圈突出3公厘。圖中①為 5×20 平方公厘的紫銅勵磁繞圈6匝；②為繞圈座；③和④為繞圈撐板；⑤為繞圈接口；⑥為手把；⑦為接線座；⑧為鉚釘。圖中的尺寸為鐵路車輛部門所採用者，其內徑為240公厘；如為鐵路機車部門所用者，內徑應為300公厘，而其他的尺寸均須比照內徑尺寸增加。此種型式的探傷器可以檢查鐵路機車車輛車軸的輪座、軸身、軸頸，曲拐軸、連桿以及其他桿件的橫裂紋，因為它在操作檢查時可以根據需要來開合，以便套住桿件，而且它的主要構造又是螺旋型的勵磁繞圈，因此定名為：「開合式環型电磁探傷器」。

關於其電氣方面的性能，概述如下：

當環型电磁探傷器閉合時即為一空心螺管，因此我們可根據勵磁繞圈的長度和半徑，圈數和環內所通過的電流，用下列公式求出勵磁繞圈軸心上中點及兩端所發生的磁化力：

在中點的

$$H_k = \frac{4\pi NI}{10\sqrt{4r^2 + l^2}}; \quad (1)$$

在兩端的

$$H = \frac{2\pi NI}{10\sqrt{r^2 + l^2}}。 \quad (2)$$

上列二公式中：

H_k ——励磁电环轴心上中点所發生的磁化力，單位为吉柏/公分；

H ——励磁电环轴心上兩端所發生的磁化力，單位为吉柏/公分；

π ——3.1416；

N ——励磁电环的圈数，已知为6匝；

I ——励磁电环內通过的电流，已知为269.5安（參看第三章开合式电磁探伤器的專用变压器中所計算的变压器次級电流）；

r ——励磁电环的半徑，已知机車用者为15公分；

l ——励磁电环的長度，經实测为15.8公分。

將有关值代入（1）及（2）式，則在中点的

$$\begin{aligned} H_k &= \frac{4 \times 3.1416 \times 6 \times 269.5}{10 \times \sqrt{4 \times (15)^2 + (15.8)^2}} = \\ &= \frac{20319.8688}{10 \times \sqrt{1149.64}} = \frac{20319.8688}{339} = \\ &= 59.94 \text{ 吉柏/公分；} \end{aligned}$$

在兩端者

$$\begin{aligned} H &= \frac{2 \times 3.1416 \times 6 \times 269.5}{10 \times \sqrt{(15)^2 + (15.8)^2}} = \\ &= \frac{10159.9344}{217.86} = 46.57 \text{ 吉柏/公分。} \end{aligned}$$

因为环型电磁探伤器是以空气为其磁路介質，根据上面所求得的励磁綫圈轴心上的中点及兩端所發生的磁化力可計算出其磁通密度。由於空气的磁导系数 $\mu = 1$ ，所以磁通密度为

$$B_n = \mu H_n = 59.94 \text{ 高斯/平方公分} = 59.94 \text{ 線/平方公分};$$

$$B = \mu H = 46.57 \text{ 高斯/平方公分} = 46.57 \text{ 線/平方公分}.$$

假設其截面上各處的磁通密度均相等，則勵磁繞圈中點及兩端整個截面內所通過的總磁力綫數為

在中點的

$$\Phi_n = B_n A; \quad (3)$$

在兩端的

$$\Phi = BA, \quad (4)$$

式(3)，(4)中

Φ_n ——勵磁繞圈中點截面內所通過的總磁力綫數，單位為線；

Φ ——勵磁繞圈兩端截面內所通過的總磁力綫數，單位為線；

B_n ——勵磁繞圈軸心上的中點所發生的磁通密度，已知為59.94線/平方公分；

B ——勵磁繞圈軸心上的兩端所發生的磁通密度，已知為46.57線/平方公分；

A ——勵磁繞圈內空氣磁路的截面積 $= \pi D^2 = 3.1416 \times (30)^2 = 2827.44 \text{ 公分}^2$ 。

將有關值代入式(3)，(4)，則在中點的

$$\Phi_n = 59.94 \times 2827.44 = 169,476 \text{ 線};$$

在兩端的

$$\Phi = 46.57 \times 2827.44 = 131,673 \text{ 線}.$$

上述計算表明：勵磁繞圈中點所發生的磁力綫，到兩端逐漸減少。我們知道，螺管外決不致於毫無一些磁阻存在，而且螺管內所發生的磁力綫亦決不能全部通過勵磁繞圈，而是有一部在其表面漏出，這兩種影響我們假設其互相抵消。

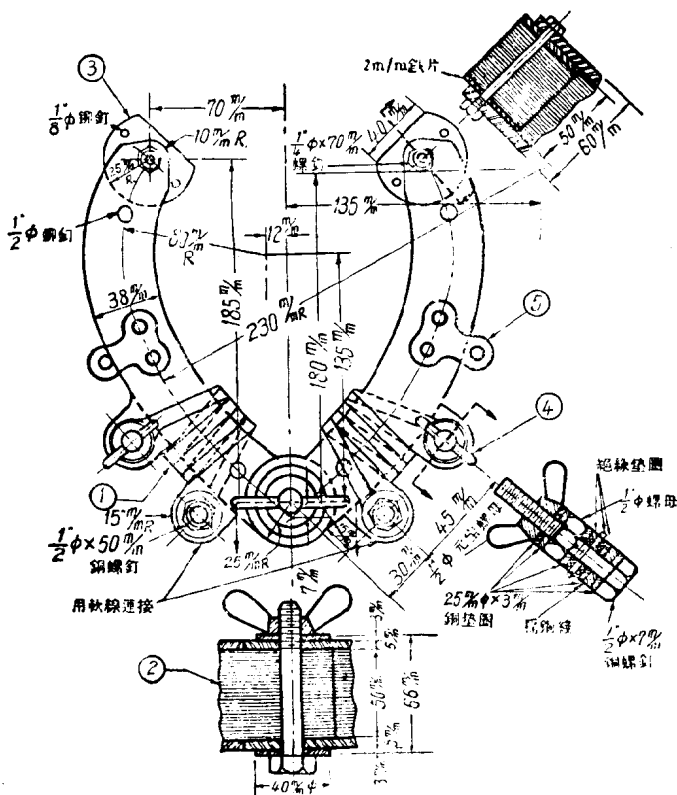
此外，綫圈每匝並非閉合圓周，而是螺線的一部分，其間隔亦有相當節距，所以電流有一部分與螺管平行，此點我們亦暫未顧及。類此情況原來均須將上述數值予以若干修正，但是在此處討論則未免過繁，所以均予以忽略不計而求出其近似結果如上。

此外，當探傷器中有配件被探傷時，其所構成的新磁路將使上述數值有所變動，但基本上已經能夠滿足探測配件表面有無裂紋的需要了。

2. 開合式馬蹄型電磁探傷器

其前身即馬鞍型電磁探傷器，因為馬鞍型電磁探傷器兩極間的距離是固定的，不能調整磁力，所以將其形狀改成外卡鉗形，使其兩臂能開合自如，兩臂的最大開口距離為360公厘，最小為35公厘，能檢查各種車軸和各種零件的表面。其兩尖端為了能與各種曲折面接觸起見，所以亦改為25公厘半徑可動的接觸球，球的一面削為平面，以求其能與配件平面完全接觸；並且為了能使它充分導磁起見，使它的截面積與變壓器鐵心的截面積近乎相等，即採用 $4 \times 5 = 20$ 平方公分的截面積。此種型式的探傷器可以檢查軸身和其他機件的縱橫裂紋，因其操作檢查時亦有開合作用，而其兩臂及觸頭的整個構造如馬蹄型，故定名為：「開合式馬蹄型電磁探傷器」。

開合式馬蹄型電磁探傷器的構造如第3圖所示。它的本體全部用0.35公厘的矽鋼片重疊而成，為求得本體能夠充分導磁起見，亦使它的截面積與變壓器的鐵心截面積接近一致，即設計為 $3.8 \text{ 公分} \times 5.0 = 19$ 平方公分的截面積；本體的外部附加5公厘的鐵板作為保護，並為使鐵板及矽鋼片能夠



第3圖 开合式馬蹄型电磁探伤器構造圖

無間隙地緊密結合，兩臂各用 6 公厘直徑的鉚釘鉚固；其兩臂共設四個端鈕，在各臂的兩個端鈕之間選用並纏以截面積為 60 平方公厘的絕緣扁銅綫 4 圈，而兩臂端鈕之間用和扁銅綫相等截面的軟銅綫連接，以尽量使探傷器在開合操作時不受妨礙。圖中 (1) 為 $6 \times 10 = 60$ 平方公厘的扁銅綫纏成的 8

匝的勵磁綫圈；（2）為探傷器本体，用0.35公厘的矽鋼片組成，最外二邊為5公厘厚的鉄板；（3）為探傷器触頭；（4）為端鈕接綫螺絲；（5）為把手；其他零件均已於圖上註明。

關於其电气方面的性能，簡述如下：

首先，我們根據馬蹄型电磁探傷器上的勵磁綫圈的匝數和勵磁綫圈內通過的电流，可求得其磁通勢。求磁通勢的公式如下：

$$F = \frac{4\pi NI}{10} = 0.4\pi NI,$$

式中， F ——磁通勢，單位為吉柏；

常數 0.4π —— $0.4 \times 3.1416 = 1.257$ ；

N ——勵磁綫圈的匝數，已知為8圈；

I ——勵磁綫圈內通過的电流，已知為269.5安（參看第三章開合式电磁探傷器的專用變壓器中所計算的變壓器次級电流）。

則：

$$F = 1.257 \times 8 \times 269.5 = 2710.09 \text{ 吉柏。}$$

其次，我們根據馬蹄型电磁探傷器兩触頭密切無縫地合攏時所量得的磁路平均長度，可求得其磁化力。探傷器本体部分的鉄心截面積為19平方公分，而其触頭部分的鉄心截面積雖然不一致，但與本体貼合後二邊多余的部分為數不大，為計算方便起見，可予以忽略不計，即將探傷器的鉄心作為均勻截面的貫通磁路看待，則求其磁化力的公式如下：

$$H = \frac{F}{l},$$

式中, H ——磁化力, 單位为吉柏/公分;

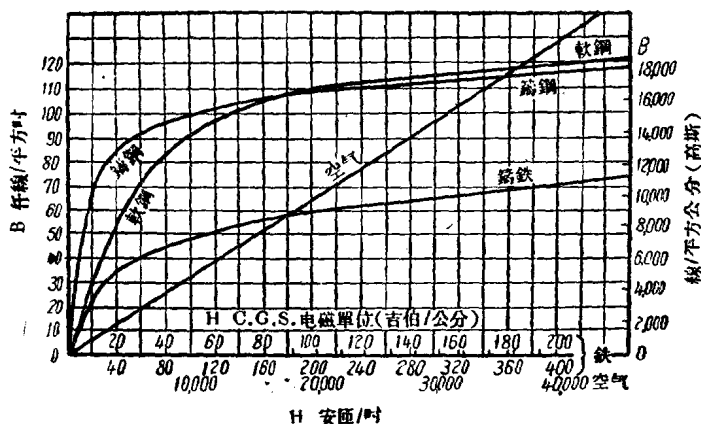
F ——磁通勢, 已知为2710吉柏;

l ——磁路平均長度, 經实测得49.5 公分。

則:

$$H = \frac{2710}{49.5} = 54.74 \text{ 吉柏/公分。}$$

於是, 我們可根據下列飽和曲綫圖 (或称 $B-H$ 曲綫圖) 內鑄鋼的曲綫上查得磁通密度 $B = 15300$ 高斯/平方公分 $= 15300$ 線/平方公分。



第4圖 飽和曲綫圖 ($B-H$ 曲綫圖)

我們已知鐵心的截面積 $= 19$ 平方公分, 所以, 馬蹄型電磁探傷器內所通過的總磁力綫數应为:

$$\Phi = BA = 15300 \times 19 = 290,700 \text{ 線。}$$

但在實際上, 因为探傷器上的磁化綫圈並非沿着磁路平

均分布的，而是根據構造上的方便，集中在兩臂的端鈕之間，因此磁通的個別磁束便可能在不希望有磁通存在的地方閉合起來，即形成所謂「漏磁通」，使上述數值有所減少（在一般電機中的漏磁通約佔最大磁通的10~20%）。還有，當探傷器與被試驗的配件接觸而構成新的較長的磁路時，也能使上述數值有所減少，但基本上也足夠探測配件表面有無裂紋的需要了。

三、開合式電磁探傷器的專用變壓器

開合式電磁探傷器的用電是由其專用的變壓器把普通電源調節成適合需要的大小後供給使用的。該專用變壓器為鐵心型式是自冷式降壓變壓器，在使用時可與開合式馬蹄型電磁探傷器配合使用，也可與開合式環型電磁探傷器配合使用。其規格為：

型式——鐵心型自冷式；

頻率——50赫；

相數——單相；

容量——1.2 仟伏安；

初級電壓——220伏或110伏；

次級電壓——4.5伏或32伏；

持續使用時間——不超過一小時。

該變壓器的外貌如第5圖所示。初級接線端子及次級接線端子分別露出於木箱外的兩側；次級接線端子共有兩對，上方一對為4.5伏，供給電磁探傷器使用，下方一對為32伏，供給照明燈使用；木箱上並裝有提携用的皮帶。箱內變壓器的構造如第6圖所示，主要部分為鐵心及繞組。第7圖

为鉄心及繞組的主要尺寸圖。

1. 鉄心の截面积、平均長度、厚度和重量

(1) 鉄心の截面积。鉄心是由0.35公厘厚的变压器用矽鋼片疊成方框形，其截面积系依下列公式計算求得：

$$Q = C \sqrt{\frac{P_n \times G \times 10^9}{f \times \Phi_m \times i}}$$

式中 Q —— 鉄心

截面积，
單位为平方公分；

C —— 輸出
系数；

P_n —— 变压器
的額定
容量，單
位为仟伏
安；

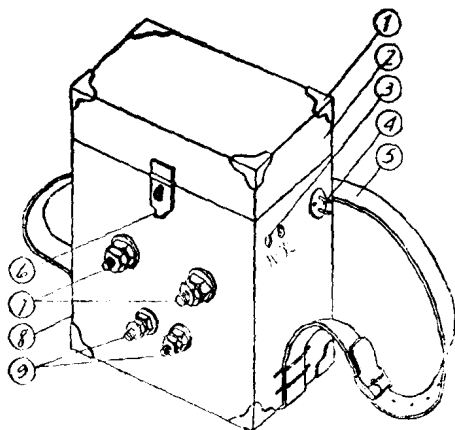
G —— 銅綫
与鉄心の
重量比率；
 f —— 頻率，
單位为赫；

Φ_m —— 磁通密度，單位为每平方公分面积上的磁力綫
数；

i —— 电流密度，單位为每平方公厘面积上的安培数。

已知 $P_n = 1.2$ 仟伏安； $f = 50$ 赫。

取：



第5圖 开合式电磁探测器专用变压器箱的外觀圖

- 1——鉄包角； 2——木盖； 3——开关；
4——插座； 5——提帶； 6——鎖扣环；
7——次級接綫端子（供探测器用）； 8——
木制箱； 9——次級接綫端子（供照明灯用）

$$C = 0.5; G = 1.5;$$

$$\Phi_m = 14000 \text{ 線/平方公分}; i = 2.0 \text{ 安/平方公厘}.$$

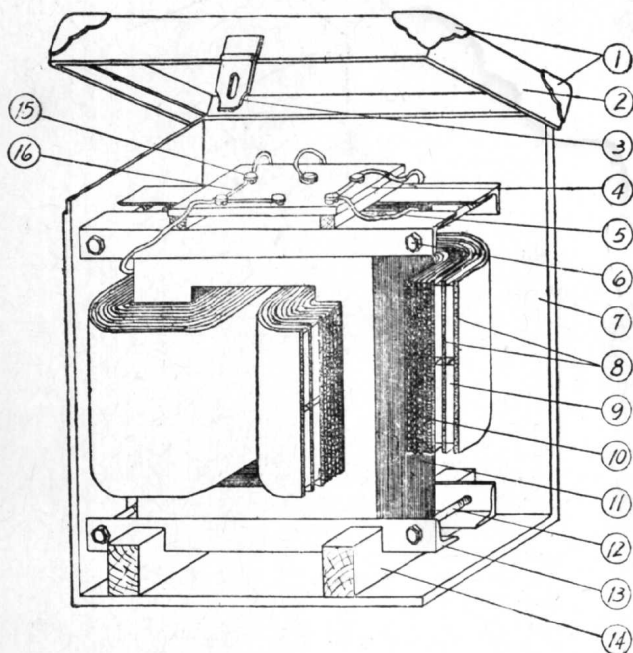
則

$$Q = 0.5 \sqrt{\frac{1.2 \times 1.5 \times 10^9}{50 \times 14000 \times 2}} =$$

$$= 0.5 \sqrt{\frac{18000}{14}} =$$

$$= 0.5 \times 35.85 =$$

$$= 17.93 \text{ 平方公分}.$$



第6圖 開合式電磁探傷器專用變壓器內部構造圖

- 1——鐵包角； 2——木蓋； 3——鎖扣環； 4——接線板； 5——
導線； 6——夾緊螺帽； 7——木箱壁； 8——繞組絕緣層； 9——
次級繞組； 10——初級繞組； 11——鐵心； 12——夾緊螺絲； 13——
夾緊角鐵； 14——木墊； 15——導線接头； 16——保險絲