

节约用铜丛书



铝线变压器

上海市旋转电机制造公司编

85

上海科学技术出版社

目 录

第一篇 SJL 型“鋁”变压器試制的初步总结	1
一、采用“鋁”变压器的意义及上海試制 SJL 型“鋁”变压器的 介紹	1
二、鋁与銅的基本性能	3
三、焊接及連接工艺	7
四、設計中的几个主要問題和参数	14
五、SJL 系列之机械应力及热限度計算	18
六、SJL 型“鋁”变压器系列設計單及鋁銅变压器系列主要材 料成本比較表	
第二篇 鋁綫变压器試制經驗	26
一、以鋁代銅的有利条件	26
二、以鋁代銅的电力变压器設計途徑	27
三、設計鋁綫变压器的几个經驗常数	30
四、鋁綫电力变压器的制造实例	31
五、鋁綫連接方法	32

第一篇 SJL 型“鋁”變壓器試制的初步總結

一、採用“鋁”變壓器的意義及上海試制

SJL 型“鋁”變壓器的介紹

在第二次世界大戰以前，蘇聯就開始研究過用鋁綫製造電力變壓器，德國早年也採用過。第二次世界大戰期間，很多資本主義國家如日本、美國和當時的德國都曾生產鋁綫變壓器，但戰後，“鋁”變壓器在這些國家中並沒有大量發展，美國基本上並未採用，英國雖然曾一度採用，在 1954 年還製造過一台 71,000 仟伏安的鋁變壓器，由於資本主義國家發展工業是為了牟利，因此用鋁代銅受到市場限制而未能發展；社會主義國家發展工業是為了人民的長遠利益，因為預見到，銅的蘊藏量和生產不能適應工業發展的需要，因此“節約用銅”“以鋁代銅”成為社會主義國家共同的技术政策和願望。近幾年來，在捷克、羅馬尼亞和民主德國，鋁變壓器發展得很快，民主德國已有 2% 的變壓器採用了鋁綫。

在我国的具體情況下，以鋁代銅更有其特殊重大的意義。在全國工農業大躍進的形勢下，變壓器產量增長的速度很快，今年上海旋轉電機製造公司的變壓器產量就比去年增加 4 倍左右，因此對生產變壓器的主要材料——銅綫及硅鋼片的需要量也要增加幾倍。在新的形勢下，我們遵照了黨中央提出的“節約用銅”的精神，認識到技術革新對發展生產的重要意義，在上海

市机电工业局指示下，公司领导的各变压器制造厂曾于“五一”国际劳动节前，设计并试制了第一批 SJL 型“铝”变压器系列，并决定从第三季度开始，560 仟伏安以下的系列产品完全采用。仅根据上海旋转电机制造公司的今年产量统计，如全部代用就可节省铜 360 吨以上，此外，SJL 型系列还比 SJ 型“铜”变压器系列节省矽钢片约 12%。为了贯彻总路线，我们认为有必要把试制“铝”变压器初步获得的经验向全国介绍。

过去我们思想上一直受到“焊接技术有问题”这个思想的障碍，这一次我们冲破“迷信思想”，相信工人的智慧与经验，试制铝变压器终于获得初步的收效；我们认为不应该把技术问题的所谓“圆满”解决作为推广新技术的先决条件，而应该在有一定的基础上即行推广。在推广的过程中，依靠工人创造的經驗加以总结，不断改进，再总结，反复的深入下去。

SJL 型变压器系列暂到 560 仟伏安为止，从电气性能上看，它是符合 SJ 型所依据的苏联国家标准 ГОСТ-401-41。从其机械性能上看，目前的设计能满足短路状态下的要求，详细的计算和数据，分别列于本报告第五、第七两节中。至于 560 仟伏安以上的也在考虑采用铝线或铝合金线，以增加其机械强度。

SJL 型铝线绝缘仍采用纸包，其他结构原则仍与 SJ 型相同。铝绕组的热容量（瓦/平方公分）比同功率的铜绕组变压器小，但温升试验结果尚未有正确地反应出这一特点，可能是因为对测量线圈温升所采用的延时校正常数不准确所致（这次仍采用苏联国家标准 ГОСТ 401-41 所列的常数）。关于这个常数我们正在研究中，因为它与线圈温升的准确度有关。

SJL 型铝线电力变压器是在最近试制完成的，因此我们所累积的经验也是初步的。本报告中除了介绍一些铝、铜基本性

能及提出設計中的主要問題和参数外，还对采用鋁變壓器的主要技術問題——焊接、連接及機械应力、熱穩定性能——汇集一些資料和理論推断供大家參考，但由于時間匆促，一定有不少錯誤及缺點，希望有關方面提出指正。

二、鋁與銅的基本性能

1. 物理性能

導電材料中，除銅以外，以鋁為最優，由于鋁具有特殊的性能，在某些程度上還勝過銅，因而在電機制造上，提供了以鋁代銅的優越條件，目前工業上生產的電氣工業用的鋁綫，純度約為99.5%，其主要物理性能如表1-1所示。

表 1-1 鋁綫與銅綫的物理性能比較表

性 能	單 位	鋁	銅
比重 (20°C)		2.703	8.89
線膨脹系數 (20°C)	1/°C	23×10^{-6}	16.42×10^{-6}
導熱率	卡/公分·秒, °C	0.503	0.923
熱容量(比熱)	卡/瓦, °C	0.2259	0.092
熔點	°C	657	1083
導電率	%		
退火的	%	62~63	100
硬拉的	%	61	96.2
電阻溫度系數常數		245	235
比電阻		0.0290	0.0175

* ГОСТ 183-55

由表1-1可見鋁的熱容量的數值很高，雖然鋁的熔化溫度

比銅低，將鋁加熱至熔化溫度而變為溶化狀態，却比熔化同樣數量的銅，需要化費更多的數量。鋁的導熱率，象它的導電率一樣，是比銅少 59%，但在設計變壓器時，這不是一個主要因素，因為導線中熱降與繞組溫升的關係較少。一樣大的截面積和同樣長度的鋁線比銅線的電阻高 1.65 倍，如要維持同樣的電阻，則鋁線直徑比銅線大 1.285 倍，如果我們限于地位，就難以用鋁來作為銅的代用品，而必須改變設計。

2. 機械性能

在變壓器中除了要考慮線圈的電磁性能及熱性能外，還要考慮機械性能。線圈在短路時的瞬時過熱，將立即降低導線的機械強度。表 1-2 及表 1-3 列出機械性能與溫度之關係，至于線圈短路應力及熱穩定的計算，將在第七節詳述。

由表 1-2 及表 1-3 我們很明顯地能看到鋁的機械性能比銅差，在變壓器短路時，鋁的抗拉強度還不及銅的三分之一，這點是我們設計變壓器時所必須注意的一個問題。

3. 電化序(以氫為準)

(標準的與在 3% NaCl 溶液中)

電勢(伏) Au—Pt—Ag—Cu—H—Pb—Sn—Ni

標準的 +1.5+0.85+0.8+0.34±0-0.12-0.1-0.22

在 3% NaCl 溶液中

開始時 — +0.24+0.02±0-0.39-0.25-0.13

結束時 — +0.20+0.05±0-0.26-0.25-0.02

—Co—Cd—Fe—Cr—Zn—Mn—Al—Mg

—0.29-0.4-0.43-0.56-0.76-1.04-1.34-1.55

—0.17-0.58-0.84-0.02-0.83-1.05-0.63-1.45

—0.45-0.52-0.50+0.23-0.83-0.95-0.63 —

表 1-2 鋁的機械性能與溫度的關係

機 械 性 能	溫 度 °C									
	20	50	100	150	200	250	300	350	400	450
公 斤/平 方 公 厘	硬 拉 的 退 火 的 (300°C, 2 小 時) 在 油 中									
抗拉強度	14.7	14.0	13.2	10.7	8.3	6.0	2.87	9.0	7.78	6.71
瞬時強度	39	44.4	30.9	15.4	15.8	14.8	—	33.7	27.4	31.1
伸 延 率 %	14	11.5	9.5	10.7	12.2	14.3	45	33.1	32.8	34.7
收縮率(縱面)%	77.5	79.1	74.3	76.1	81.7	83.4	95.7	84.4	78.2	83.0
彈性系數(靜)	7200	6550	6495	5475	5500	4780	4770	6300	6580	5640
彈性系數(動)	6590	6000	6290	6100	5170	3919	—	5370	4140	—
振動疲勞強度	7.6	6.7	6.7	4.1	2.9	1.65	—	2.7	2.5	—

表 1-3 銅的机械性能与温度的关系

机 械 性 能 公斤/平方公厘	温 度 °C							
	20	100	200	250	300	350	400	450
	硬 拉 的							
	退火的 (650°C, 1/2 小时)							
抗拉强度	40.9	37.2	31.8	20.7	14.6	23.9	20.8	17.5
瞬时强度	68	61	55	45.6	30	69.6	53.3	35.6
伸长率 %	5.4	5.5	6.6	27.3	54.2	47.2	40.4	38.6
收缩率(截面)%	56.1	58.8	59.3	73	61.3	71.4	72.1	60.6
弹性系数(静)	12150	10860	10375	9020	9300	11700	11780	11080
弹性系数(动)	11200	9100	8900	—	7600	7350	6900	6400
振动疲劳强度	9.5	7.6	5.9	—	3.5	7.4	6.6	5.2

鋁与銅的电化序相差是 1.68 伏，在电气設備中，鋁与銅的連接是不能避免的，因而接触处就会产生电化腐蝕。如接触处受到潮湿的作用，那末該处就会产生相当高的电动势的局部电化堆，使在接触处的外表上有电流，从鋁流向銅，因而鋁导体便可能因腐蝕而被严重地损坏，所以銅导体和鋁导体的結合处，必須小心地加以被复。

4. 鋁銅腐蝕性

如鋁导体在特种气体或氯化鈉溶液中，則腐蝕性更大，因而重量电阻及抗拉强度均有显著变化（見表 1-4）。

5. 对变压器油的影响

鋁在变压器油中，对油所起的老化触媒作用較銅为輕，因而油的老化程度及酸价的增長也較銅变压器小，实验証明，鋁在变压器油中，经历長时期后，所生之油泥較銅所生的大为减少。所以采用鋁变压器还相应提高油的寿命。

三、焊接及連接工艺

鋁焊接技术，苏联和捷、德等兄弟国家都已創造了很多可貴經驗，最近国内各刊物也多有介紹，这里根据上海旋轉电机公司各变压器厂工人同志們在学习先进的实践中所初步累积的經驗和所得到的进一步发展，加以書上的一些資料汇集成初步的意見，供各方面參考。

1. 油浸鋁綫电力变压器中所要解决的焊接及連接問題

油浸电力变压器的特点就是大部分导电体是浸在变压器油中，但也必須有一小部分——即出綫导杆要露在空气中。露在空气中的导杆要在不同的环境下——冷、热、雨、雪、风砂、潮湿及各种腐蝕气体下——与母綫連接。由于氧化鋁薄膜的电阻很

表 1-4 鋁綫与銅綫在含有混合气体的空气中
及 3% 氯化鈉溶液中腐蝕后的性能
(連續試驗 1 个月)

	鋁		銅	
重量	試驗时	100%	試驗时	100%
	Cl (1 毫克/公升)	96.83%	Cl (1 毫克/公升)	89.7 %
	Cl (15 毫克/公升)	97.12%	Cl (5 毫克/公升)	63 %
	Cl (150 毫克/公升)	90.3 %		
	SO ₂	100 %	SO ₂	99.94%
	NH ₃	100.93%	NH ₃	85 %
	NaCl	95.35%	NaCl	98.64%
	鋁		銅	
电阻	試驗时	100%	試驗时	100%
	Cl (1 毫克/公升)	112 %	Cl (1 毫克/公升)	123.5 %
	Cl (5 毫克/公升)	128 %	Cl (5 毫克/公升)	155 %
	Cl (50 毫克/公升)	154.8 %		
	SO ₂	100 %	SO ₂	130.45%
	NH ₃	101.34%	NH ₃	123.3 %
	NaCl	112 %	NaCl	103.6 %
	鋁		銅	
抗拉 强度	試驗时	100%	試驗时	100%
	Cl (1 毫克/公升)	62.6 %	Cl (1 毫克/公升)	70 %
	Cl (5 毫克/公升)	55.8 %	Cl (5 毫克/公升)	63.2 %
	Cl (50 毫克/公升)	22.7 %		
	SO ₂	82.2 %	SO ₂	98.5 %
	NH ₃	82.2 %	NH ₃	97 %
	NaCl	59.5 %	NaCl	97 %

高，且鋁导体在空气中易受腐蝕，目前我們所採用的暫時還是銅導杆。

除此之外，浸在油里的部分除了鋁繞組外，從繞組引到導杆的一段（即引出綫）可以全部採用鋁导体，也可在其中加入一段銅导体，具體可分為以下幾種情況：

（1）高壓引出綫用鋁导体（一般是圓綫），高壓導杆和分接開關用銅导体，要解決二個問題：一個是引出綫與綫圈的焊接，即鋁-鋁焊接；一個是引出綫與銅導杆之間的機械連接。

（2）低壓引出綫電流在 120 安培（即 100 杆伏安以上）的，在連接到引出綫導杆上時必須要經過一段薄銅皮或薄鋁皮以防因熱膨脹及振動而影響到低壓套管鬆動。在薄皮與綫圈之間還要焊接一段鋁排。這種情況下如採用薄鋁皮，則要解決多根鋁綫（低壓綫圈多為二根以上導綫組成）與鋁排的焊接，鋁排與薄鋁皮的焊接以及薄鋁皮與銅導杆之間的機械連接。如採用薄銅皮的，則除了解決多根鋁綫與鋁排焊接外，還要解決鋁排與銅片之間的焊接。

（3）高壓引出綫用銅圓綫，則只要解決一個問題，即銅綫與綫圈鋁綫的焊接。

（4）低壓引出綫電流在 120 安以下的，不採用薄鋁片或薄銅片而代之以鋁接頭或銅接頭。原則上，引出綫採用鋁綫者（此電流範圍內多採用圓綫）用鋁接頭，引出綫用銅綫者則用銅接頭。這種情況下的焊接、連接問題與高壓綫相同。

歸納以上分析的四種情況看來，在油浸鋁綫電力變壓器中，除了要解決各式各樣鋁-鋁焊接方法外，還要解決鋁-銅機械連接與鋁-銅焊接技術。以下分別就已採用的幾種方法加以敘述。

2. 鋁-鋁熔焊工藝過程

鋁-鋁焊接一般可採用三種不同原理的焊法，即熔焊、蜡焊及冷焊。蜡焊的機械強度不如熔焊，且因焊劑不易清除，抗腐蝕性也較差。冷焊所需的沖擊壓力甚大，變壓器上的鋁引綫焊接必須在裝配過程中進行，且冷焊不便于操作，故我們採用的暫時還是鋁-鋁熔焊。在繞組接頭時採用的熔焊方法是接觸碰焊，在引綫中採用的是乙炔氣焊。

由於鋁-鋁熔焊有很多不同於黑色金屬熔焊的特點，如：

(1) 氧化鋁熔點比鋁高三倍，焊接所需的热量大，成可塑性狀態的時間短暫，致使焊件容易變形；

(2) 氧化鋁沉於溶池下部較難清除；

(3) 流動性小，收縮性大；

(4) 熔化時色澤不變，難於掌握……等。

故焊件所要求的技术高，既要掌握他的特性，又要操作熟練，尤其在使用接觸碰焊机時，更需要熟練地掌握時間及電流。但應指出，鋁-鋁熔焊仍然是很可靠的辦法，這些要求是可以經過努力而辦到的。現分別將乙炔氣焊及接觸碰焊的工藝過程敘述如下：

(一) 鋁-鋁乙炔氣焊

適用範圍——變壓器引綫焊接，包括鋁排與鋁排、鋁綫與鋁排。

加熱工具——乙炔氣焊槍。

焊 劑——上海大南電焊材料廠出品“鋁焊劑”。

焊 條——鋁綫。

工藝過程：

(1) 鋁排焊接表面砂光，用夾具把焊件夾住，包以浸濕的石棉。

(2) 熔剂調水盛于杯中，焊接表面涂少許焊剂。

(3) 火焰先对着焊件加热，然后集中火焰于焊縫处熔化焊条(焊条上也沾有焊剂)。

(4) 凡焊条熔下成球狀的就不能焊牢，把它除去，并需再沾焊剂。

(5) 以采用对接焊为原则，搭焊时焊剂易停留在搭焊縫間不易清除。对接焊时接縫留 2 公厘左右。

(6) 先焊牢一面，再焊背面。

(7) 焊接完成后，火焰不应立即移开；应使焊縫慢慢冷却，否則机械强度較差。

(8) 焊接完毕后用酸触法清洁。清洁液可用以下二种配方：

(甲) 5% 硝酸及 10% 硫酸溶液，酸触时间 1 分鐘

(乙) 2% 稀鉻酸溶液，65~80°C 温度，浸入 3~5 分鐘。

(二) 鋁-鋁接触碰焊

适用范围——变压器繞組接头，包括扁綫及圓綫。

加热工具——接触碰焊机。

焊 剂——不需要，只須在焊接处涂以松香水。

工艺过程：

(1) 鋁綫断面成  形。

(2) 焊接处涂松香水。

(3) 掌握电流通过时间，至鋁綫发暗紅色即可施加压力，要不使碰焊处，爆出火花才焊得牢。

(4) 在空气中自然冷却后鉻光。

3. 銅-鋁堆焊工艺过程：

由于鋁銅的合金組成只有当含銅 8~12% 或含鋁 <11% 时才能得到可用的机械强度。在鋁銅熔焊时得不到理想的合金

配合，故一般焊接之后經不起弯折試驗。除了采用机械連接之外，只得采用蜡焊。蜡焊的主要缺点是焊剂不易完全起化学反应，而遺留下的焊剂易固，“潮解”作用使鉛綫腐蝕并降低焊接强度，故除了清洗之外，还应加以包扎。焊料的熔点如过低則不适于电力变压器中，否則当短路瞬时过热时将使焊接处融化。工人同志在實踐中仍采用錫焊条并能在鉛排上(或鉛綫上)搪上較厚一层錫，經試驗証明錫焊比特殊的鋅、錫、銅合金焊条的强度高，且熔点也較高。

适用范围——銅圓綫与鉛圓綫，鉛排与銅皮。

加热工具——火油噴灯。

焊 剂——上海大南电焊材料厂出品“鉛電綫蜡焊熔剂”。

焊 条——錫焊条。

工艺过程：

(1) 銅皮砂光搪焊錫。

(2) 先將銅皮与銅皮間用錫焊焊牢，表面焊錫揩清，只留較薄一层錫在表面上。

(3) 鉛排焊接处涂蜡焊熔剂。

(4) 用噴灯加热，先是焊剂沸騰，然后成灰色膜，繼續加热使膜变成白色顆粒，然后錫焊条可以熔化而搪在鉛排以上了。

(5) 錫焊条熔化以后，熔池中的渣只能輕輕挑出，而不可象在銅排上搪錫一样用布揩清，只要輕輕挑出溶渣，就可繼續在鉛排上搪上較厚的一层錫。

(6) 銅皮、鉛排分別搪上錫层后，各自加热，繼續加些焊剂(不宜太多)及焊錫。

(7) 銅皮重疊在鉛排上，繼續加热，待錫溶化后稍加压力，

并繼續在叠合处，加少許焊剂及焊錫。

(8) 再加压力使多余的錫流出，稍等片刻用水冷却。

(9) 用酸蝕法清洗，清洗液的配方与鋁-鋁熔焊相同，因为两种焊剂的成分基本相同。

(10) 用鋁鉚釘把已焊好的鋁排及銅皮再加鉚牢，可增加其机械强度。

如为鋁圓綫与銅圓綫熔焊，过程与以上相同，但需以細銅綫包扎两根圓綫。

4. 鋁-銅机械连接及鋁-鋁机械连接

(一) 鋁-銅机械连接

在本报告第二节中已列出的电化序，指出鋁銅的电位差甚大，因此在连接时，应在鋁-銅之間加以中間电位的金屬使鋁銅隔离。查电化序可知中間电位是(鋁)-鋅-鉄-錫-(銅)，故可采用鍍鋅的鉄垫圈及鍍錫的銅垫圈作为隔离金屬层。这样的连接无疑地将会增加接触电阻，这是一个缺点，同时电流在200安以上时，鍍鋅鉄垫圈，还应開一道槽以免渦流生热。

(二) 鋁-鋁机械连接

曾用在鋁圓綫的连接，乃是用一个鋁套筒，两端各套入欲連接的两根綫，套筒的内徑不应比綫徑过大，套好后用特制的头鉗將套筒夾扁。

5. 几种焊接的試驗結果

以上所介紹的几种焊接方法，皆送試样多件請上海机电工业試驗所試驗抗拉强度，結果分別如下：

(一) 鋁導綫——7.44 公斤/平方公厘。

(二) 鋁-鋁乙炔熔焊——多种試样的平均值为6.66公斤/平方公厘，断裂处在焊縫以上約10公厘，試样未經过工艺过程中

第7項过程,故强度較差。但弯折角仍达 180° 。

(三)鋁-鋁接触碰焊——7.33 公斤/平方公厘。拉断处亦非焊缝,其抗拉强度几近于未焊的鋁綫。同样截面的銅綫碰焊,断裂在焊缝处,且抗拉强度比未焊的銅綫降低 20%。鋁綫碰焊后弯折 180° 五次始断。

(四)鋁-銅圓綫蜡焊——6.41 公斤/平方公厘,断处在焊接处以上約 10 公厘。

(五)鋁排銅皮蜡焊——在不用铆釘时,用錫焊条作焊料,比用合金特制焊条作焊料要提高机械强度 4 倍。

6. 結語

油浸电力变压器中,焊接的弱点仍在鋁排与銅皮的蜡焊。我們的初步意見仍采用鋁-銅机械連接,至于是否要經過中間金屬隔离尚可研究,因为在变压器中与空气及水分接触的机会少,油呈碱性的情况較少,故不必有过分的顧慮。这样,对連接的机械强度則有足够的保証。此外在大量制造中,乙炔气焊的生产率較低,必需在工艺装备上想办法,同时还应考虑用石墨电极夾子来代替乙炔气焊枪。

四、設計中的几个主要問題和参数

1. 設計途徑

設計鋁綫变压器之前必須先对鋁銅繞組的两种变压器在相同的要求及条件下(損耗、效率及阻抗等),找出一定的关系,然后独立的应用某些参数作为設計的依据。在鋁銅变压器的关系上,我們从 R. M. 施尼采尔发表的“鋁繞組电力变压器”(苏联 BЭИ 杂志, 1957, 4)一文中得到了启发。

由于鋁的比电阻大,因而繞組导体的截面及鉄窗的尺度均

相应的增大,但为了不增加鉄心重量(鉄心直徑 d , 同时对已定磁通密度來說,

$$\frac{w_{\text{鋁}}}{w_{\text{銅}}} = \frac{d_{\text{鋁}}^2}{d_{\text{銅}}^2},$$

$$\frac{d_{\text{鋁}}}{d_{\text{銅}}} = \sqrt{\frac{w_{\text{鋁}}}{w_{\text{銅}}}}. \quad (1)$$

同时短路損耗也应相同,当 75°C 时

$$13.1 G_{\text{鋁}} \delta_{\text{鋁}}^2 = 2.4 G_{\text{銅}} \delta_{\text{銅}}^2, \quad (2)$$

式中 G 及 δ —分别为繞組的重量及繞組中电流密度。根据預先选定的鋁銅重量比 k , 可以得出各种方案, 以 l 、 D 、 h 分別代表低压及高压繞組的展开長度、平均直徑及平均高度, 由 (2) 式可得

$$\begin{aligned} \frac{l_{\text{鋁}}}{l_{\text{銅}}} &= \frac{w_{\text{鋁}} D_{\text{鋁}}}{w_{\text{銅}} D_{\text{銅}}} = \frac{(8.9)}{(2.7)} \frac{G_{\text{鋁}}}{G_{\text{銅}}} \cdot \frac{\delta_{\text{鋁}}}{\delta_{\text{銅}}} \\ &= \frac{8.9}{2.7} \sqrt{\frac{2.4}{13.1}} \frac{G_{\text{鋁}}}{G_{\text{銅}}} \cdot \sqrt{\frac{G_{\text{銅}}}{G_{\text{鋁}}}} \\ &= \sqrt{2} \frac{G_{\text{鋁}}}{G_{\text{銅}}} = \sqrt{2k} \end{aligned} \quad (3)$$

当短路損耗相同, 則短路电压中的无功分量 U_r 亦將相等。

$$U_r \propto \frac{w^2 D}{h},$$

故

$$\frac{w_{\text{鋁}}^2 D_{\text{鋁}}}{h_{\text{鋁}}} = \frac{w_{\text{銅}}^2 D_{\text{銅}}}{h_{\text{銅}}}. \quad (4)$$

將 (4) 式代入 (3) 式, 得

$$\frac{w_{\text{銅}}}{w_{\text{鋁}}} \cdot \frac{h_{\text{鋁}}}{h_{\text{銅}}} = \sqrt{2k}. \quad (5)$$

先选择适当的 $\frac{h_{\text{鋁}}}{h_{\text{銅}}}$ 值, 就可以确定鋁及銅变压器主要尺寸之間