

浸漬紙絕緣電纜的試驗

蘇聯 邦別 岡基著

邱 麟 譯

燃 料 工 業 出 版 社

目 錄

序言	4
緒論	5
第一章 電纜的尺寸和機械性質的決定	7
1. 概論	7
2. 幾何尺寸的決定	8
3. 彎曲試驗	13
4. 在決定機械性質時發現的缺點	14
第二章 載流線芯的直流電阻的決定	15
5. 線芯直流電阻的計算	15
6. 用電橋測量電阻	18
7. 用雙臂電橋測量電阻	20
8. 在檢查載流線芯的直流電阻時發現的缺點	24
第三章 電容及絕緣電阻的測量	25
9. 電纜接至直流電壓時絕緣中的電流	25
10. 根據絕緣電阻及吸收電流來評定絕緣	27
11. 用比較法測量絕緣電阻	29
12. 用比較法測量電容	32
13. 用比較法測量絕緣電阻的誤差	33
14. 在測量絕緣電阻及電容時發現的缺點	36
第四章 介質損耗的測量	36
15. 絕緣中損耗的分類	38
16. 關於介質損耗的標準要求	38
17. 交流電橋	40
18. 高壓標準電容器	45
19. 測量介質損耗時的屏蔽	60

20. 應用交流電橋的特殊場合	53
21. 介質損耗測量結果的校正	58
22. 在測量介質損耗時發現的缺點	60
第五章 交流電壓試驗	61
23. 關於黏性浸漬電纜絕緣的電強度的一般認識	61
24. 對電纜的電強度的標準要求	68
25. 根據等值電壓及電壓作用的等值時間來評定電強度	68
26. 作電壓試驗時電纜端部的製備	71
27. 對電纜作電壓試驗時電容電流的抵償	73
28. 用交流電壓試驗電纜時發現的缺點	75
第六章 直流電壓試驗	76
29. 泛論浸漬紙絕緣在直流電壓時的電強度	76
30. 標準要求, 試驗規則	78
31. 直流高壓試驗的特點	79
32. 以直流高壓試驗電纜時發現的缺點	81
第七章 衝擊電壓試驗	81
33. 關於衝擊強度的一般認識	81
34. 決定衝擊強度的方法	82
第八章 在加熱電流與電壓同時作用時 絕緣的加速老化和穩定性試驗	85
35. 概論	85
36. 試驗的熱條件的選擇	89
37. 試驗的電條件的選擇	92
38. 試驗中對電纜的測量	93
39. 電纜品質的評定	95
40. 在加熱電流與電壓同時作用時試驗中發現的缺點	96
第九章 絕緣中游離的研究	97
41. 根據介質損耗測量結果分析出游離損耗	97

42. 直接測量游離.....	98
43. 找尋發展擊穿的地方.....	103
44. 絕緣中電流的有功分量和高次諧波的分離與示波.....	105
第十章 絕緣內部不均勻性的研究	111
45. 檢查絕緣紙條的相互排列.....	111
46. 決定絕緣的密度.....	115
47. 決定絕緣中臘的形成.....	118
48. 紙條的電和機械性質的測量.....	119
49. 在研究內部不均勻性時所發現的缺點.....	121

序 言

本書敘述了試驗浸漬紙絕緣電力電纜的方法與技術。

在這極有限的篇幅中，作者盡可能地、完全地介紹現代電力電纜，特別是最通行的浸黏性油電纜的試驗技術。

對於決定絕緣品質與可靠性的問題及關於現行的電纜試驗規範的討論，都給予特別的注意。

書中並未討論充油和充氣電纜的試驗以及鉛皮試驗等特殊問題。這些問題，照作者看來，應當有適當的專題來討論。

這裏，對確定損壞地點的方法也不作討論，因為在阿·依·魯里葉(А. И. Лурье)所著的[電力線路中的電氣測量]一書中都已討論過了。

本書可供試驗站、工廠電纜試驗室及電力系統的工作人員之用。照作者看來，此書對高等動力學校的學生也是有幫助的。

最後，作者應對技術科學學士姆·葛·蓋爾贊什傑恩(М. Г. Герценштейн)及工程師耳·普·斯米爾諾夫(Л. П. Смирнов)表示謝意。因為他們審閱了原稿並提了很多寶貴的意見。

斯·斯·高洛傑滋基

緒 論

電力電纜的功用是在電壓作用下，沿着金屬導流線芯傳輸電能。導流線芯是相互地，並與包在它們外面的接地包皮絕緣。電力電纜可以敷設在地下，在水中或在空氣中。電纜是根據電流的種類和大小，頻率及電壓來選擇的。用電纜傳輸能量時，電壓可自 24 至 220 000 伏，而被傳送的電流可以自數安培至數千安培。

當電流沿線芯流動時，由於線芯的有效電阻，發生了能量的損耗。一部分傳輸的電能在載流線芯中轉變為熱，使電纜發熱。在傳輸交流電流的電纜中，由於電磁感應，在電纜的金屬包皮和鎧裝中有感應電壓和電流的產生。它們產生額外的能量損耗，並使電纜發熱。

為有利於電能的傳輸，損耗不應超過某一嚴格的限度，此限度決定於電纜運用的小時數。電纜在正常的工作條件下以及在過負載及短路時都不應過熱，以使其絕緣即使在長時期運用以後仍不損壞。絕緣應能承受工作電壓及在運行時發生的過電壓而不被擊穿。

因為由浸漬紙組成的電力電纜絕緣是不「理想」的，所以在加電壓於電纜時，有電流穿過絕緣，因而在高壓電纜中導致顯著的能量損耗及絕緣的發熱。在各種工作電壓下，此電流的性質和大小是絕緣品質的特徵。

電纜四周的環境對於電纜的運用，特別對它的發熱，有很大的影響。

為了在新型電纜或用新的材料做成的電纜出品以前，能有把握地判斷電纜的可靠性，可以在實驗室中，考慮到在最艱難的運行的條件下，對試驗樣品作嚴格的試驗。實驗室試驗的數據，以及運行試驗的數據，都被反映在標準和技術條件中，這些標準和技術條件對於額定電壓自 1000 至 35 000 伏的，用黏性油浸漬的紙絕緣電纜，規定了主要的結構數據和最大容許負載。這些標準是工廠的主要「結構標準」，並決定各零件的結構。

爲了檢查品質，工廠中所有的電纜都是在試驗站的控制之下。試驗的目的是決定電纜在材料及結構方面是否符合於標準，並找出製造中的缺點。在敷設以前，電纜在電力系統的實驗室中經過檢查和試驗。

除此以外，在新敷設的線路接到電源以前，對敷設的電纜應進行試驗；在運行期中，也要定期試驗。

電纜試驗是工作中極重要的一部分。試驗電纜的工程師對工廠製造者和電力消費者都負有極大的責任。由於廠方的過失，電纜損壞所造成的每一樁事故，均是工廠製造家的過失。

在敷設好的電纜中消滅缺點所用的費用，要比在工廠中或在敷設以前經試驗發現並消滅這些缺點所用的費用大得多。

由於絕緣中過程的複雜性，在電纜的全長上不可能觀察鉛皮下絕緣的情況。在高壓下進行試驗的必要性，以及試驗的巨大費用，都要求我們詳盡地了解個別試驗的意義及進行試驗的技術。

第一章 電纜的尺寸和機械性質的決定

1. 概 論

在試驗電纜時，工作的第一步是將樣品拆開；此時檢查結構的尺寸，仔細觀察，測量並衡量每一結構元件。

許多與規定的製造方法不符之處，及由於製造過程執行不良所致的缺點，能最簡單地用拆開樣品的方法發現（實際尺寸與設計不符，線芯表面粗糙，絕緣紙條重合，絕緣中的纖維與摺痕等等）。

在電纜的生產過程中，在工廠中作交貨試驗時，以及在電力系統的實驗室中檢查電纜時，拆開具有一定幾何尺寸的樣品是最重要的檢查方法之一；它能防止生產次貨，及敷設有缺點的電纜。

當觀察線芯時必須檢查線芯的截面，扭絞節距，扭絞成線芯的導線數目及其直徑，銲接或銲接的可靠性，沒有倒刺、擦傷，扇形線芯沒有尖的邊緣，以及其他的缺點。

在拆去絕緣時必須檢查絕緣的總厚度，紙條的數目，厚度和寬度，及它們的相互排列，即紙條圈間間隙，和這些間隙與已繞上的相鄰紙條的疊蓋，具有機械損傷的紙條數量，以及在絕緣中沒有纖維與摺痕（見 §45）。

此外，在拆開絕緣時亦須檢查絕緣紙條的浸漬品質及韌性。脆性大（能對摺的次數少），就表示紙的品質不佳，或在製造中（乾燥浸漬過程）或運行中絕緣曾受到過熱。

在檢查鉛皮時，除了檢查其幾何尺寸以外，並檢查在鉛皮中沒有混雜的粒子、氧化物、氣孔，接合處的缺點及其他的缺點。

在檢視外護層時，除了其與設計的結構符合以外，並檢視鋁裝層是否包得正確，及護層中黃麻和紙的浸漬品質。

2. 幾何尺寸的決定

a) 導線扭絞節距的測量

測量扭絞節距的方法有二種。

第一種方法常被稱為「鋪紙法」，在線芯的製造過程中，用來測量機器上的扭絞節距，但也用來測量電纜樣品。

第二種方法要移去最外層導線的一根導線，所以只適用於樣品。用鋪紙法測量扭絞節距時，在線芯上鋪一紙條，並用鉛筆摩擦。因此，在紙面上得到一系列的平行線條。此後取下紙條，並自任何一條條起(除了它本身以外)數出等於在該層中導線數目的線條數。此時，在平行於線芯軸的方向，在二端線條間所量得的距離，即扭絞節距之

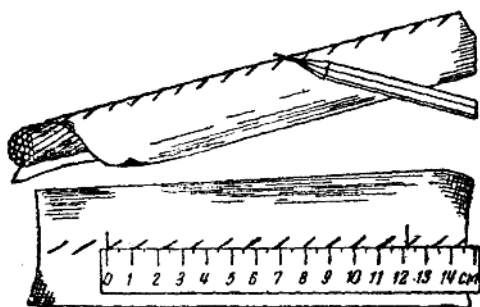


圖1a 用鋪紙法決定扭絞節距



圖1b 用自一層中移去一導線的方法決定節距

長度(圖 1a)。用第二種方法在裁下的線芯樣品上測量扭絞節距時是這樣進行的：在每一層導線中移去一根導線，並沿扭絞線芯的軸測量在被移去的導線一整轉時，其遺跡間的距離(圖 1b)。在測量之前，樣品的二端用細線紮緊。

6) 線芯截面的決定

決定截面的方法與線芯的形狀及其製造方法有關。由圓形導線扭絞而成的、不擠壓的線芯，其截面可由測量每一導線的幾何尺寸，或由衡量重量來決定。由不規則形狀的導線組成的、外形複雜的線芯及擠壓過的線芯，其截面由衡量重量來決定。

對於由有規則形狀的圓形導線扭絞成的線芯，在決定截面時，將線芯退扭成單獨的導線，並仔細地將導線弄直以後，用具有平面夾頭的螺旋測微器，在二個互相垂直的方向測量其直徑。線芯的截面是根據各導線截面之和算出；而各導線的截面則自平均半徑算出。當導線由不規則形狀的導線組成時(擠壓過的導線即有此情況)，線芯截面用下列的一種方法衡量而定。

第一法 在與線芯軸垂直的方向，切下一定長度的(例如 10 厘米)絕緣線芯樣品。除去絕緣，並將扭絞的線芯按層退扭成導線。此後將導線仔細地揩擦，並將導線在汽油或其他溶劑中洗去浸漬物及銅屑。

在仔細地清潔以後，將每一組單獨地衡量。為考慮到切割扭絞線芯的角度可能發生偏差，在拉直導線以後，決定其平均長度。

取銅在 20°C 時的比重為 8.89 克/厘米³，線芯每一層的截面可由下式決定：

$$S_n = \frac{10^3 G}{8.89 L}, \quad (2-1)$$

其中 S_n ——一層的截面積，用毫米²表示；

L ——該層導線的平均實際長度，用毫米表示；

G ——一層中所有導線的重量，用克表示。

線芯的截面由各層截面之和求得。

上述決定線芯截面的方法係假設在各單獨導線間沒有接觸，即電流沿每一導線流動而不進入鄰近的。

由表面被氧化的鋁線組成的、不擠壓的多導線線芯是這種線芯的最相近的例子。實際上，在線芯中各單獨導線間有接觸，電流不僅沿各導線流動，亦自導線與導線間流動，因此減低了線芯的電阻。

第二法 用第二種方法決定截面時，假設線芯的各導線間有完全的接觸，而電流與線芯軸平行流動。

在此情況下，線芯的截面可以按下式決定：

$$S = \frac{10^3 G}{8.89 L}, \quad (2-2)$$

其中 S —— 線芯的截面，用毫米²表示；

G —— 一段線芯的重量，用克表示；

L —— 一段線芯的長度，用毫米表示。

在決定重量時，預先仔細地測量一段線芯的長度，此後將線芯退扭成導線；在衡量以前，還須仔細地洗去這些導線上的浸漬物及粒屑。

當導線間沒有浸漬物存在的情況下，這第二種決定截面的方法不僅得出稍大一些的截面值；而且大大地接近了小心擠壓過的，由軟銅線做成的多導線線芯。

假設導線間有或沒有接觸時，求出截面的差別值約為0.5—1.5%，以扭絞節距，導線材料及擠壓程度而定。

多導線線芯的工作截面是在上述二個方法所求出的截面值之間。

爲了得到可以比較的結果，在測量截面時應該說明所用的方法。

Б) 線芯幾何尺寸的決定

圓形扭絞線芯的直徑可用螺旋測微器或測徑器來測量；或者由電纜的周界算出。

圖2示用測量紙條測量直徑的方法。左圖表示用紙條不重疊地繞

上電纜樣品。



圖 2 用測量紙條決定電纜直徑

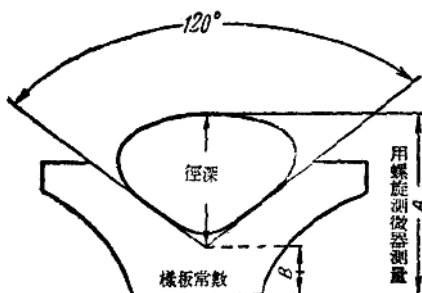


圖 3 決定扇形線芯的徑深

在紙條二邊緣的任何接觸處，用很尖的鉛筆劃一線條，然後將紙條伸直，並在線條與紙條邊緣的二交點間劃一直線（圖 2 右邊）。距離 ab 即為所求的圓周長。

在非圓形線芯，特別是扇形線芯時，也用測量紙條來決定等值直徑。扇形的高度用螺旋測微器測量。對扇形線芯，為了判斷扇形外形的經濟性，有時測定所謂「徑深」（圖 3）。徑深是扇形線芯的外圓弧頂點及其二側邊切線的交點間的距離。為了測定扇形線芯的徑深，可利用與三芯電纜成 120° 張角的樣板。

在測量時，線芯放在樣板中，並用螺旋測微器測量距離 A 。自測微器測得的數量 A 減去樣板常數 B ，即得徑深。

г) 絕緣與護層厚度的測量

絕緣的平均厚度是用測量紙條來決定的。為此，要沿着絕緣與線

芯來測量直徑(或在非圓形時, 測量絕緣的及未絕緣的線芯的等值直徑)。直徑或等值直徑之差的一半, 即為絕緣的平均厚度。護層平均厚度的測量, 是用測量紙條來量電纜的外徑和在護層下的直徑。

π) 多芯扇形電纜中對稱性的測量

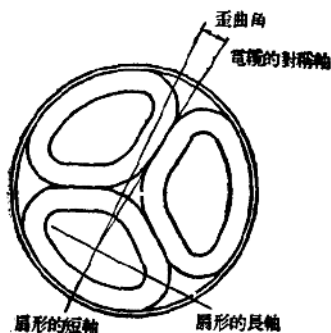


圖 4 多芯扇形電纜對稱性的測量

在三芯電纜的製造中, 應注意到扇形線芯相互排列的正確性。在扇形線芯電纜中, 當排列正確時, 扇形的對稱短軸(在扇形高的方向)必須通過電纜的幾何中心。通過二線芯絕緣的接觸點的電纜對稱軸之一, 與扇形的對稱短軸所形成的角, 決定了至曲角(圖 4)。至曲角用量角規測量。

最好, 至曲角對於三芯電纜不超過 15° 及 10° 。當至曲角很大時, 電場的形狀變壞了, 並且增加了絕緣中的梯度。

○) 鉛皮厚度的測量

鉛皮的厚度是從電纜包皮切下的一段管子上進行測量。在測量時, 儘可能不使從鉛皮切下的管子變形, 以使其厚度可能與電纜包皮厚度相當。按照蘇聯國家標準 340-41, 電纜包皮的厚度是用每分格代表 0.01 毫米的螺旋測微器來測量; 此測微器的夾頭之一是平面的, 另一是半球形的。

依照目前通行的, 對蘇聯國家標準 340-41 的補充說明中, 要求測量鉛皮的最小、額定及最大厚度。最小是爲了檢查包皮的可靠性, 額定是(平均的)用於計算鉛的重量, 而最大是爲了避免在生產中用鉛過多。

按照蘇聯國家標準 340-41，鉛皮的最小厚度是用以下方法決定的：在端截面處大約決定最薄的部分；在包括此部分的四分之一圓周內，由三次測量來決定最薄的地方。用此法求得的最薄處厚度應不小於蘇聯國家標準 340-41 的規定。

在決定鉛皮的平均厚度時，應在圓周上均勻分佈的五點或十點（視電纜直徑而定）處進行測量。當檢查在線盤上電纜的鉛皮厚度時，應從電纜的二端都割下鉛管進行測量。由二端的測量結果求得平均厚度。在實驗室工作中，鉛皮不均匀程度的百分數由下式決定：

$$C = \frac{\delta_{\text{最大}} - \delta_{\text{最小}}}{\delta_{\text{平均}}} 100. \quad (2-3)$$

3. 彎曲試驗

在製造及敷設電纜時，電纜受到多次的彎曲，這樣可能在絕緣中引起紙條撕裂或斷裂等損壞，及在鉛皮中有裂縫出現。

絕緣及鉛皮在彎曲時的堅固性是電纜質量最重要的指標。

絕緣的堅固性決定於紙的機械性質，他的捲繞密度，乾燥程度，浸漬物的黏度（因此也與電纜的溫度有關），以及線芯及包皮的幾何形狀。

鉛皮的堅固性決定於鉛的機械性質（鉛的牌號），壓鉛的方法與過程，以及鉛皮的厚度。

根據蘇聯國家標準 340-41，彎曲試驗按照以下方法進行。

取一截長度不短於 5 米的電纜，將其全部護層除去（除了鉛皮以外）。將已準備好的樣品繞在線盤或圓柱上，其直徑等於多芯電纜鉛皮外徑的 15 倍，或單芯電纜鉛皮外徑的 25 倍。

此後，將電纜退下並矯直；然後重新向相反的方向繞在圓柱上；然後再退下電纜並矯直。

這一過程重複三次，此後電纜樣品經過檢視，並作電壓試驗。

線芯分別鉛包的電纜彎曲試驗以相同的方法進行；但在除去所有的保護層並將線芯退扭以後，每一鉛包線芯須個別地試驗。

在此情形下，線盤或圓柱的直徑應等於鉛皮外徑的 25 倍。

在一截電纜進行了彎曲試驗以後，蘇聯國家標準 340-41 對電壓試驗的要求列於表 1 中。

表 1

電纜的標稱電壓，仟伏	試驗電壓，仟伏		試驗持續時間，分鐘
	用於中點接地的電力網絡中的電纜	用於中點不接地的電力網絡中的電纜	
10仟伏及以下	標稱電壓的五倍		15
20	60	75	120
35	100	115	120

蘇聯國家標準 340-41 未曾列出在電纜彎曲以後，對紙絕緣狀態（由拆開並檢視個別紙條的方法決定）的要求；因為它認為絕緣的狀態已用電壓試驗來檢查。但是，蘇聯的電纜工廠常在電壓試驗以後拆開絕緣樣品，來決定彎曲試驗後絕緣及鉛皮的狀態。

在實驗室中，短的樣品的彎曲試驗能很方便地在特製枱子上進行。枱子上插了許多棒，實際上，電纜能按任何半徑彎曲。

在電纜工廠的試驗站中，彎曲一截 5 至 10 米的電纜時，通常是圍繞在所謂「錐體」上。錐體是由許多直徑漸減的圓柱互相堆疊而成。

4. 在決定機械性質時發現的缺點

從電纜幾何尺寸的檢查，樣品的拆開及彎曲試驗中可以發現一連串個別的缺點。這些缺點降低了電纜在運用中的可靠性，並且是在線盤的全長內作電氣的檢查試驗時所不能發現的。在這些缺點中，首先是：

1. 個別結構元件的幾何尺寸與額定值不符（絕緣厚度，線芯截面，鉛皮厚度等等）；
2. 個別製造上的缺點（例如，在載流線芯的導線上有倒刺，絕緣中有大的綫紋與摺痕，紙條多次重合，浸漬不充分，絕緣因乾燥過

度而變脆，外護層未浸漬等等)；

3. 對彎曲的堅固性不夠。

第二章 載流線芯的直流電阻的決定

5. 線芯直流電阻的計算

對於使用者而言，線芯的電阻不超過一個與電纜的標稱橫斷面相當的數值，是十分重要的。在電能的傳輸中，由於線芯電阻而致的損耗是負載的電纜中總損耗的主要部分。電纜線芯的電阻通常用直流電流來測量，因為這是最簡單便利的測量方法。在交流時，線芯的電阻要比在直流時稍大一些。由於電磁感應，交流電流在線芯截面上的分佈是不均勻的；線芯外層中的電流密度要比內層的大些(表面效應)。在 50 週交流電流時的有效電阻與在直流時的差別甚小，可以忽略不計。

依照下式，可由線芯的幾何尺寸，電阻係數及溫度算出電阻：

$$R_t = \frac{[\rho_{20} + \Delta\rho(t - 20)]l}{q}, \quad (5-1)$$

其中 R_t ——在 $t^\circ\text{C}$ 時線芯的電阻，單位歐；

ρ_{20} ——線芯金屬的電阻係數，即長度 1 米、截面 1 毫米² 的導線在 20°C 時的電阻，單位 $\frac{\text{歐} \cdot \text{毫米}^2}{\text{米}}$ ；

$\Delta\rho$ ——當溫度增加 1°C 時，線芯金屬的電阻係數的增加；

t ——線芯的溫度，單位 $^\circ\text{C}$ ；

l ——線芯長度，單位米；

q ——線芯的截面，單位毫米²。

在 20°C 時，線芯的電阻等於：

$$R_{20} = \frac{\rho_{20} \cdot l}{q}. \quad (5-2)$$

在溫度 t 時測得的線芯電阻 (R_t) 可以換算為在 20°C 時的電阻

(R_{10})，以與額定電阻比較，

$$R_t = \frac{\rho_{20} l}{q} \left[1 + \frac{\Delta \rho}{\rho_{20}} (t - 20) \right] = R_{10} [1 + \alpha_{20} (t - 20)], \quad (5-3)$$

由此得

$$R_{10} = \frac{R_t}{1 + \alpha_{20} (t - 20)}.$$

$\alpha_{20} = \frac{\Delta \rho}{\rho_{20}}$ 是線芯金屬每 1°C 的電阻溫度係數，它在 0°C — 100°C 的範圍內可以當作恒定值。

在線芯中，電流實際上只沿個別導線流動，因為由於比較高的接觸電阻，由導線流至導線的電流並不顯著。在小截面的單芯電纜中，線芯僅由一根導線組成，導線的長度就等於電纜的長；在所有其他的情形下，由於在線芯中導線是扭絞的，而多芯電纜的線芯又是相互扭絞的，所以導線要比電纜長些。此長度的增加約為 1.5%。

用以製造電纜線芯及導線的金屬，對其標準電阻係數的要求列於表 2 中。在列出的電阻係數中，已考慮到由於線芯中的扭絞及冷作而致的電阻增加，所以它們比在一般手冊上所給的值要稍大些。

如果電纜線芯在 20°C 時的電阻等於或小於對該標稱橫斷面的電纜線芯所規定的電阻，則它符合標準。

表 2

金 屬	在 20°C 時的電阻係數 (歐·毫米 ² /米) (包括因 導線扭絞及冷作而致的 增加百分數)	當溫升 1°C 時電阻係數 的增加 $\Delta \rho$ (歐·毫米 ² /米· $^\circ\text{C}$)	溫度係數 $\frac{\Delta \rho}{\rho_{20}} = \alpha_{20}$
軟 銅	0.0184	0.000063	0.00392
鋁	0.03125	0.00011	約 0.004

用下列方法來進行比較：

將在溫度 $t^\circ\text{C}$ 時測得的線芯電阻 R_t ，換算為在溫度 20°C 及 1 公里電纜長度的電阻，得 $R_{10}/\text{公里}$