

电信电缆的平衡

B.H.庫列朔夫
苏联B.3.馬雷舍夫著
B.O.施瓦茨曼

人民邮电出版社

电信电缆的平衡

【苏维埃】 叶利谢也夫 著
周德成、王克勤、李中、叶中译
人民邮电出版社

.....

電 信 電 纜 的 平 衡

蘇聯 B. H. 庫列朔夫 B. 3. 馬雷舍夫

B. O. 施瓦爾茨曼 著

呂惠民 沈塘銘 白其章 金鍾驥 李既平 譯

人 民 郵 電 出 版 社

В. Н. КУЛЕШОВ В. З. МАЛЫШЕВ
В. О. ШВАРЦМАН

СИММЕТРИРОВАНИЕ КАБЕЛЕЙ СВЯЗИ

СВЯЗЫЗДАТ
МОСКВА 1952

內 容 提 要

在本書的頭幾章內，研討了引起干擾的原因，根據或然率理論，確定長途通信電纜干擾的通性，並在第三章內簡要地介紹了必需的或然率理論。其次幾章內，研討了間接干擾，並論證了不同程式回路間干擾參數的允許值。

本書的重點在於研討消除電纜回路間的干擾方法，詳細研究各個方法的效果及其應用領域。最後還談到平衡工作的順序及其基本原理，平衡時的測試等。

本書的特點，是根據實際經驗結合數學推論來較全面地研究電纜有關的理論問題。

電 信 電 纜 的 平 衡

著 者：蘇聯 В. Н. 庫列朔夫
В. З. 馬雷舍夫
В. О. 施瓦爾茨曼

譯 者：呂惠民 沈蟾銘 白其章 金鍾驥
李既平

出版者：人 民 郵 電 出 版 社
北京東四區六條胡同13號

印刷者：人 民 郵 電 出 版 社 南 京 印 刷 廠
南京太平路戶部街15號

發行者：新 華 書 店

書號：有73 1956年9月南京第一版第一次印刷1—3,300冊
787×1092 1/27 121頁 印張8 $\frac{26}{27}$ 字數172,000字 定價(10)1.30元

★北京市書刊出版業營業許可證出字第〇四八號★

序 言

蘇聯人民創造性的事業，需要有組織良好的長途報話通信。隨着國民經濟的發展和人民文化生活水平的提高，必須在最新技術成就的基礎上更進一步地發展我國的通信工具。

戰後斯大林五年計劃中關於發展通信工具方面最主要的任務之一，就是幹綫綫路進一步的電纜化。在建築這種綫路時，最主要的問題就是回路的平衡。

本書供從事通信電纜設備的設計、施工和維護工程技術人員之用，書中論述的是對稱的通信電纜回路間相互干擾的問題以及在敷設電纜過程中減少這種干擾的方法。

本書的頭幾章研究引起回路間干擾的原因和確定遠距離通信綫路間的干擾所固有的規律性。後一問題是用機遇向量或然率的理論來求得解決的。由於在相互干擾的理論中經常遇到機遇向量或然率的理論問題，所以在第三章內簡單的敘述了關於機遇向量方面必需具備的知識。

大家知道，除了電纜的直接干擾外，還會發生間接干擾；後面各章即研究這種干擾的原因和相應的數量上的規律。同時，在這幾章內還論證了各種型式回路間干擾參數容許值的規定根據。

本書特別着重研究減少回路間干擾所採用的方法。關於回路平衡的各種方法的採用範圍和效果，也作了規定。

其次係研究各種型式電纜平衡方法的必需順序和敘述長途與郊區通信電纜平衡方法的原理。後面幾章還敘述了在接續好的各段電

纜上回路的集中平衡和在平衡過程中所進行的電氣測試。

在研究相互干擾和平衡技術時，作者根據已敷設的電纜的實際平衡經驗，力求可能地結合必要的數學結論來全面敘述理論問題。

本書的第3、4、6、7、8、9（9章1節A除外）、10（10章7節除外）各章和第11章3節及序言是B·O·施瓦爾茨曼寫的。

第1、2、5各章和9章1節A與10章7節是B·H·庫列朔夫寫的。

第11章（11章3節除外）是B·З·馬雷舍夫寫的。

引 言

在我們祖國廣闊的土地上，用新型的通信電纜來使全國電纜化，是實現可靠的和高質量的通信的主要方法。

這一任務的順利解決，是與那些在一般通信綫路，特別是在電纜技術的改進和發展上有着巨大貢獻的俄國和蘇聯科學家的名字分不開的。在通信工具發展初期，俄羅斯科學院通訊院士 П. П. 許林格發明了電纜（1812 年）和架空明綫（1836 年）的通信綫路，在 1842—1843 年 Б. С. 雅科比院士創建了彼得堡與沙皇村之間的長途電纜通信綫路。但是當時的技術水平還不可能得到使通信十分穩定的電纜結構。因此，架空明綫在長途通信方面，一直佔着主要的地位。

直到二十世紀的初期，電纜的構造在技術上才有了改進。經過這些改進後，在接入加感綫圈的回路情況下，能保證幾百公里距離的穩定的通信。在 1912 年，П. Д. 沃依那羅夫斯基又奠定了同軸電纜的理論。由於有了真空管放大器，才有可能使得電纜通信綫路更進一步的發展。從 1915 年起 В. И. 科瓦林可夫在俄國進行了真空管放大器的研究，並在 1922 年完成了蘇聯第一部真空管放大器的裝置。

А. С. 波波夫在 1895 年對無線電的發明，乃是高頻通信廣泛發展的基礎。遠比國外早四年，在 1906 年俄國就已在有綫高頻通信方面得到了第一個專利權，但長途電話通信在我國得到廣泛的發展，是在偉大的十月社會主義革命以後才開始的。

在二十年代初，蘇聯科學家 М. В. 舒列金、П. В. 施馬科夫、П. А. 阿茲布金等等研究了利用通信綫路通長途電話的理論問題，並

指出了實際實現這種通信的可能性。大約與此同時，“賽維”電纜製造廠就開始了長途通信電纜的製造工作。

在頭幾個斯大林五年計劃的年代中，我們工業部門即已掌握了通信架空明綫多路載波設備的生產。同時，也掌握了通信電纜綫路多路通話設備的生產。中央電信科學研究所全體人員和一些工業部門的工作人員在H·H·阿金菲耶夫、B·H·阿馬拉托夫、H·A·巴也夫、H·B·巴西克、A·C·布洛金、Г·Г·鮑羅德麥克、B·H·李夫托夫、Г·B·多勃羅沃爾斯基、Я·И·維里庚、M·У·波里亞克、B·B·哈列佐夫等的積極參加下，研究出了多路通信制。

H·A·克謝也夫教授在1938年原則地提出了減少電纜回路衰耗的新方法。這種方法的效果遠遠地超過原先採用的方法。

在衛國戰爭前就已開始運用聚苯乙烯塑料絕緣的高頻電纜，現在正在大量生產中。製造方法的不斷改善和新式構造的研究，使我們能夠生產通載波達到110千赫的繩捻絕緣電纜和有同軸回路的複合式電纜。

目前在蘇聯科學家與工程技術人員的密切配合下，正在研究新式的、更臻完善的電纜結構，高頻絕緣物，以及更加耐久和經濟的電纜保護外壳。

多路載波通話設備的高頻電纜的採用，可保證長途報話通信適應我國不斷增長的國民經濟對長途報話通信的需要。

遠距離電纜綫路的高頻電話通信，只有在對回路進行多路利用的情況下才為經濟。因此，長途通信時採用12路或24路載波設備的不加感星型電纜。用12路載波設備時，其增音段距離為40—45公里；用24路載波設備時，增音段為30—35公里。

但是，不加感回路載波制的發展，並不等於就不需要低頻加感

回路了。後者能廣泛地應用在郊區通信、幹綫電纜各站間通信以及業務聯系上。同時，低頻回路在多路制發生障礙時，還可作為後備之用。因此，通常的幹路電纜，除了高頻回路外，還有一部分低頻回路。

在用1.2公厘直徑銅心綫扭成星形的，具有26.5微法/公里電容量的低頻星型電纜上，接入加感綫圈的電感量為100毫亨（實回路）和70毫亨（幻象回路），其加感節距為1.7公里。這種加感的方法，能保證300至3300赫（實回路）和300至2700赫（幻象回路）的頻帶的有效傳輸。低頻加感回路增音段長度等於三個不加感高頻回路增音段長度，其距離約為120公里。

除了不加感電纜以外，還採用頻率範圍達到60千赫的載波高頻加感電纜。一般採用1.2公厘直徑銅心綫的聚苯乙烯塑料絕緣電纜作高頻加感，接入的加感綫圈的電感量為1.75毫亨，加感節距為285公尺。這種電纜的增音段距離可達到120公里，這一點對於在那些設置和維護增音站有困難的地方敷設電纜來說，特別重要。

用長途電纜來傳輸廣播時，在長途電纜中使用屏蔽綫對。屏蔽綫對是1.4公厘直徑的銅心綫，接入加感綫圈的電感量為12毫亨，加感節距為1.7公里。廣播回路增音段的長度約120公里。

除了已講過的那些對地是對稱的回路的電纜外，還採用同軸結構的不是對稱的回路。現在最普遍的電纜構造，有下列幾種：

- 1) 複合電纜包括若干同軸綫對，若干加感與不加感星組及屏蔽綫對；
- 2) 對稱電纜包括若干加感與不加感的星組及屏蔽綫對；
- 3) 對稱電纜僅包括加感的星組和屏蔽綫對；
- 4) 聚苯乙烯塑料絕緣對稱電纜包括若干高頻加感星組。

低頻回路的通信，用二綫制和四綫制都可以。從二綫制的穩定性來說，通信距離應不大於 5—6 個增音段。在四綫制的情況下，低頻加感回路的通信距離限制在 10—15 個增音段左右；在個別情況下，可達 20 個增音段。

高頻回路通信，通常是沿實際上（物理上）的四綫回路進行的。只有在一些個別情況下，高頻加感回路的通信才依照在電氣方面是四綫制而在物理方面是二綫制的制度來實現。

我們在回路間極嚴格地限制相互干擾，是使電纜綫路在長距離上得到優良通信的重要條件之一。因此，除了適當地改變通信綫路上那些決定傳輸質量的特性（如衰耗、傳播速度、失真程度）以外，在電纜技術發展的最初期，對電纜技術就提出了減少回路間干擾的任務。這一任務對高頻電流的載波電纜綫路具有首要的意義。

由於回路間具有相互干擾，所以有必要對減少干擾採用特殊的方法。這些方法是在廠方電纜的製造過程中和在敷設時接續電纜的時候採用的。接續電纜過程中所進行的關於減少對稱電纜回路間相互干擾的措施，稱為“平衡”。對於出廠電纜的電氣特性提出的要求愈高，就愈為電纜平衡創造條件；另一方面，平衡愈有效果，則對出廠電纜提出的嚴格要求就愈少，因而，也就減少了電纜製造的費用。

關於減少回路間相互干擾辦法的選擇，基本上是根據經濟觀點來決定的。但是，也應考慮到技術上的可能性。

在通信架空明綫和電纜綫路上，減少相互干擾的應用最廣的方法是施行交叉。

無論在一切其他技術方面或者在電話回路間減少相互干擾方面，蘇聯科學家和工程師都是革新者。

關於通信綫路間相互干擾（主要是架空明綫）以及減少這種干擾的問題，在蘇聯科學家： $\Pi \cdot A$ ·阿茲布庚、 $\Pi \cdot K$ ·阿庫里申、 $H \cdot A$ ·巴也夫、 $E \cdot B$ ·基塔也夫、 $B \cdot H$ ·科瓦林科夫、 $H \cdot B$ ·科潑切夫、 $E \cdot H$ ·庫利沙夫、 $M \cdot H$ ·米哈依洛夫、 $B \cdot A$ ·諾維科夫和其他科學家的一些著作中，已有極充分的說明。

並且必須指出： $A \cdot A$ ·格列夫在1914年所發表的著作，在當時已遠遠勝過外國科學家的同一類的著作，還有 $\Phi \cdot X$ ·希列霍夫爲了實現當時世界上最長的鋼綫綫路起見，在1916年就已經研究和採用了電話回路施行交叉的方法。

1928年在 $H \cdot E$ ·普列什柯夫的領導下，敷設了一條最早的長途電纜，並且做了平衡。1929年在他的著作中又研究了各種平衡方法。這些方法後來在 $A \cdot A$ ·施納爾斯基（1934年）的著作中又得到了進一步的發展。

在三十年代內， $K \cdot H$ ·新費洛首次建議用接入變壓器的方法來減少回路間的相互干擾。 $S \cdot A$ ·沙依柯維茨根據這一建議研究出對通信電纜高頻回路平衡的新穎裝置。

本書係研討作者曾參加擬定的通信電纜的現代平衡方法。

目 錄

序 言

引 言

第 一 章 相互干擾的原理 (1)

1.1 相互干擾現象的物理實質 (1)

1.2 回路間干擾的方程式 (3)

1.3 串音衰耗 (8)

1.4 傳輸電平及防衛度 (11)

1.5 防衛度和串音衰耗的標準 (15)

第 二 章 電磁耦合 (19)

2.1 電容耦合 (19)

2.2 電容耦合 K_1 的分佈律 (25)

2.3 電感耦合 (27)

2.4 電耦合和磁耦合的實效分量 (31)

2.5 短段電纜中實綫回路間的電磁耦合 (33)

2.6 實綫和幻綫回路間的電磁耦合 (38)

第 三 章 在長距離綫路上的干擾 (41)

3.1 正態隨機複數 (41)

3.2 正態複數的模數的分佈律 (45)

3.3 模數的累積分佈律 (46)

3.4 兩個自變的正態隨機複數乘積的模數的累積分佈律 (48)

3.5 隨機自變複數之和的模數的累積分佈律 (49)

3.6 近端干擾 (53)

3.7 遠端干擾.....	(58)
第 四 章 回路間的間接干擾	(60)
4.1 由於機械和纜路不配合而產生的干擾.....	(60)
4.2 由於回路不均勻而產生的干擾.....	(64)
4.3 經過第三回路的相互干擾.....	(77)
第 五 章 耦合和不平衡的容許值	(84)
5.1 低頻加感回路的容許耦合.....	(84)
5.2 傳輸廣播的屏蔽纜對間以及這些纜對和低頻加感回路間 的容許耦合.....	(93)
5.3 高頻不加感回路間的容許耦合.....	(96)
5.4 高頻加感回路間的容許耦合.....	(99)
第 六 章 平衡節距的確定	(105)
6.1 不加感電纜平衡節距的長度.....	(105)
6.2 加感電纜平衡節距的長度.....	(109)
第 七 章 用交叉法減少回路間的耦合	(116)
7.1 四纜組內回路的平衡.....	(116)
7.2 兩兩交叉法.....	(119)
7.3 按照耦合值選擇四纜組的兩兩交叉法.....	(123)
7.4 在若干點上同時交叉.....	(125)
7.5 依次聯接各段時的交叉方法.....	(129)
第 八 章 利用電容器減少回路間的耦合	(132)
8.1 四纜組內回路的平衡.....	(132)
8.2 不同四纜組回路的平衡.....	(136)
8.3 低頻電纜中近端干擾的減小.....	(143)
8.4 高頻電纜中近端干擾的減小.....	(147)

第 九 章 通訊電纜平衡的步驟和制度	(151)
9.1 節距內的平衡	(151)
9.2 節距彼此接續時的平衡	(161)
9.3 通信電纜的平衡制度	(165)
第 十 章 集總平衡	(169)
10.1 增音段中的電磁耦合	(169)
10.2 遠端干擾時的集總平衡	(169)
10.3 在一點的平衡	(172)
10.4 在兩點的平衡	(175)
10.5 在預給的頻率範圍內的平衡	(176)
10.6 補償網絡 (反耦合元件)	(182)
10.7 補償耦合的圖解計算法	(188)
10.8 補償網絡的裝置和調整	(195)
10.9 集總平衡的舉例	(199)
10.10 近端干擾時的集總平衡	(204)
第十一章 平衡過程中的測量	(207)
11.1 串音衰耗的測試	(207)
11.2 電容耦合和電容不平衡的測量	(214)
11.3 在運用中的低頻加感電纜的電容耦合測試	(219)
11.4 電磁耦合的測量	(222)
11.5 回路工作電容的測量	(227)
11.6 回路直流不平衡的測試	(228)
11.7 回路交流不平衡的測試	(229)

第一章

相互干擾的原理

1.1 相互干擾現象的物理實質

通訊電纜中各電氣回路間發生干擾的原因有下列數種：

1. 當在任何一個回路上，比如說在 $a-b$ 回路上有電流通時，則在這個回路的兩導線周圍形成磁場，該磁場的一部分磁力綫

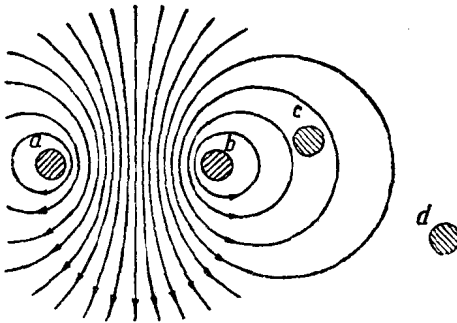


圖 1.1 磁干擾圖

穿過相鄰回路 $c-d$ 兩導線間的空間（圖1.1）。通過 c 和 d 導線間的磁力綫束在這些導線中感應起電動勢。感應起的電動勢在回路 $c-d$ 中產生電流，這個電流沿着綫路傳輸到綫路終端的接收機中去。

接收機中就受到干擾。因為這種干擾是由磁場作用而發生，所以稱它為磁干擾。

2. 當導線 a 和 b 上有電流通時，在這些導線上形成電荷 $+Q$ 和 $-Q$ 。這些電荷產生電場，該電場的一部分電力綫和相鄰回路 $c-d$ 的兩導線相接觸（圖1.2）。於是導線 c 和 d 間發生電位差，這電位差在導線 c 和 d 中產生電流，並使電流沿着綫路傳輸。感應電流到達綫路終端的接收機，並在其中產生干擾作用。這種干擾是

由電場作用而發生的，
所以稱它為電干擾。

磁干擾和電干擾的
共同作用稱為電磁干擾。

如果兩回路互相改
換地位，即把回路 $c-d$

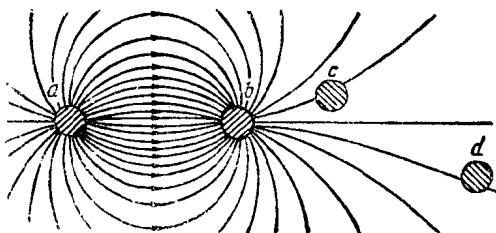


圖 1.2 電干擾圖

做為干擾回路，而回路 $a-b$ 作為被擾回路，那末情形是完全相類似的：即干擾回路 $c-d$ 在回路 $a-b$ 中引起的電磁干擾和回路 $a-b$ 作為干擾回路時在回路 $c-d$ 中所引起的電磁干擾完全相同。

研究這個相互電磁干擾時可以肯定地這樣說：回路 $a-b$ 在回路 $c-d$ 中引起電磁感應，而回路 $c-d$ 中被感應起的電流反過來又在回路 $a-b$ 中引起感應，這就是說，回路 $a-b$ 正好像是經過回路 $c-d$ 而自己對自己引起感應一樣。但是在現行規定的回路不平衡條件下，這種干擾是非常小的，可以不予考慮。

表徵磁干擾的數量叫做磁耦合，其值由被擾回路中的感應電動勢 E_2 對於干擾回路中的電流 I_1 之比來決定，並取其負值：

$$M_{12} = r_{12} + i\omega m_{12} = -\frac{E_2}{I_1}, \quad (1.1)$$

式中 r_{12} ——磁耦合的實效分量，或簡稱實效耦合，

m_{12} ——互感量或電感耦合。

表徵電干擾的數量叫做電耦合，其值由被擾回路中的感應電流 I_2 對於干擾回路中的電位差 U_1 之比來決定：

$$K_{12} = g_{12} + i\omega k_{12} = \frac{I_2}{U_1} \quad (1.2)$$

式中 g_{12} ——電耦合的實效分量，

k_{12} ——電容耦合。

1.2 回路間干擾的方程式

併行回路間的電磁干擾方程式，由下述方法導引而得。

設第一回路(圖1.3a)始端的電壓為 U_1 ，這時 x 點的電壓將為
 $U_{1x} = U_1 e^{-\gamma_1 x}$ ，而電流將為 $I_{1x} = \frac{U_1}{z_1} e^{-\gamma_1 x}$ ，式中 γ ——傳播常數，
 z ——特性阻抗。

第二回路中的單元電動勢等於

$$dE_{2x} = -I_{1x} M_{12} dx = -\frac{U_1}{z_1} e^{-\gamma_1 x} M_{12} dx。$$

磁干擾在第二回路中引起的單元電流(圖1.3b)由下式決定：

$$dI'_{2x} = \frac{dE_{2x}}{2z_2} = -\frac{U_1}{2z_1 z_2} e^{-\gamma_1 x} M_{12} dx。$$

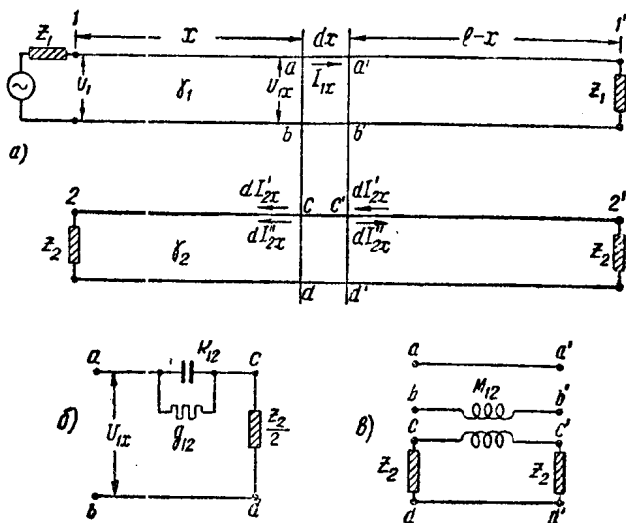


圖 1.3 近端干擾圖