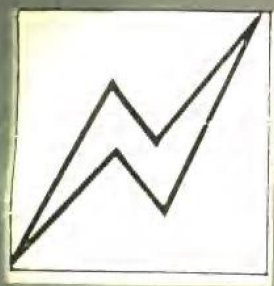
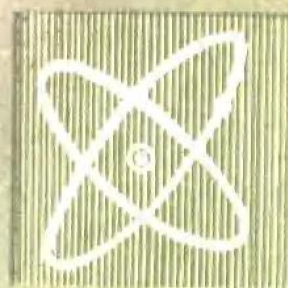
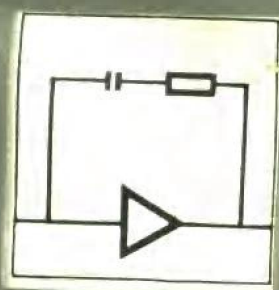
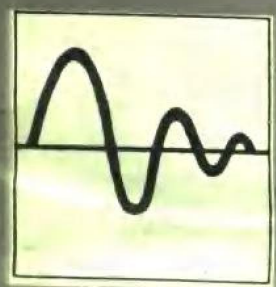
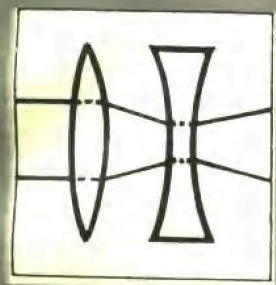


高等学校试用教材



通信电缆

哈尔滨电工学院郑玉东 主编



机械工业出版社

通 信 电 缆

哈尔滨电工学院 郑玉东 主编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $20 \frac{1}{2}$ · 字数496千字

1982年12月北京第一版·1982年12月北京第一次印刷

印数 0,001—5,500 · 定价2.10元

*

统一书号: 15033·5146

前 言

本书是根据第一机械工业部一九七八年四月在天津召开的高等学校一机部对口专业座谈会确定的计划以及一九八〇年八月在哈尔滨召开的《通信电缆》教材会上确定的教材编写大纲编写的。

本书重点介绍了通信电缆的结构及其设计原理，书中对通信电缆的基本原理和物理概念进行了较详细的阐述，同时对当前国内外新型通信电缆也进行了必要的介绍。

本书共分十二章，主要介绍了通信电缆的传输原理，对称及同轴通信电缆的结构、及其设计计算，对称及同轴通信电缆回路间串音产生的原因、规律及消除串音的办法，海底通信电缆的结构特点，通信电缆电性能的测试，射频电缆的结构及设计计算，并对通信电缆生产中特殊的工艺原理也作了扼要的介绍。光纤通信是近年来发展的一门新技术，本书专设一章扼要介绍了光纤通信的原理、光缆的结构及其制造。

本书可作为电缆技术与电工材料专业的试用教材，也可作为职工大学和有关专业的教学参考书，并可供有关工程技术人员参考。

本书由哈尔滨电工学院郑玉东同志主编，书中除第十二章由上海电缆研究所范载云同志编写外，其余均为郑玉东同志编写。全书由上海电缆研究所刘谦同志，西安交通大学葛景滂同志，四机部 8390 厂朱家壁同志主审。

在编写过程中，上海电缆研究所刘谦同志、郑戢同志、陆奇松同志、丁纬民同志、须学范同志和王春江同志，四机部 1423 所郑大钊同志，上海电缆厂徐守申同志，秦维亮同志，郑州电缆厂赵禹洪同志，哈尔滨电工学院汪景璞同志、黄振杨同志给予了热情的支持，并提出了许多宝贵意见，编者在此表示衷心感谢。

由于编者水平所限，加上时间仓促，无论从体系、内容和编写方法上一定存在着许多缺点和错误，希望读者批评指正。

常用符号表

A_0 ——近端串音衰减	H ——磁场强度; 层绞节距
A_l ——远端串音衰减	H_z ——纵向磁场强度
A_{12} ——远端串音防卫度	h ——节距
A_s ——屏蔽衰减	I ——电流
A_f ——反射屏蔽衰减	I_0, I_l ——线路始端及线路终端的电流
A_n ——吸收屏蔽衰减	I_{10}, I_{1l} ——主串回路发送端及接收端的电流
A_c ——耦合损耗	I_{20}, I_{2l} ——被串回路近端及远端串音电流
a ——导线间距离	$I_\lambda, I_{\bar{\lambda}}$ ——入射波电流及反射波电流
B ——宽度(纸带、塑料带、铜带、钢带)	I_a, I_b ——内导体及外导体中的电流
b ——衰减; 垫片厚度	I_B ——涡流
b_H ——反射衰减	I_p ——护套中的感应电流
b_p ——工作衰减	K ——涡流系数; 绝缘绕包系数
b_s ——结构反射衰减	K_a, K_b ——内、外导体的涡流系数
C ——工作电容	K_0, K_l ——近端及远端电磁耦合系数
C_{12} ——电耦合	K_{13} ——衰减温度系数
c ——光速; 电容耦合	K_R, K_L, K_C, K_G ——有效电阻、电感、电容、绝缘电导温度系数
D ——外导体内径; 电缆芯外径	K_h ——电缆表面散热系数
D_s ——屏蔽内直径	K_1 ——内导体有效直径系数
D_m ——平均直径	K_2 ——衰减的绞线系数
D_1, D_2 ——护套直径	K_b ——编织效应系数
D_e ——外导体等效直径	K_3 ——电压梯度系数
d ——导电线芯直径, 内导体直径	$k_1 \sim 3, k_4 \sim 12$ ——电容耦合
d_1 ——绝缘线芯直径	L ——电感; 线路长度
d_2, d_4 ——对绞组及星绞组直径	$L_{\text{内}}, L_{\text{外}}$ ——对称电缆内、外电感
d_e ——内导体等效直径	L_a, L_b, L_i ——同轴对内导体、外导电感及外电感
d_w ——编织导线直径	L_N, L_w, L_p ——金属护套内、外及总电感
E ——电势; 电场强度	L_z ——纵向电感
E_r ——径向电场强度	L_N ——钢带内电感
E_φ ——切向电场强度	l ——线路长度
E_z ——纵向电场强度	M_{12} ——磁耦合
e ——偏心度	m ——电感耦合
$\epsilon_{1 \sim 3}$ ——电容不平衡	N ——编织覆盖率
f ——频率	n ——钢带层数; 导线根数; 线路段数
G ——绝缘电导	P ——功率; 反射系数; 发泡度
G_0 ——直流绝缘电导	P_0, P_l ——回路发送端与接收端功率
$G_{\sim}$ ——交流绝缘电导	P_{10}, P_{1l} ——主串回路发送端与接收端功率
G_1, G_2 ——泡沫及实体聚乙烯密度	P_{20}, P_{2l} ——被串回路近端、远端的串音功率
g ——介质耦合	

- $P_{\text{峰}}$ ——额定峰值功率
 $P_{\text{额}}$ ——额定平均功率
 p ——电平
 $p_{\text{信}}$ ——信号电平
 $p_{\text{串}}$ ——串音电平
 Q ——总伴流通量
 q ——增音段的伴流通量
 R ——有效电阻
 R_0 ——直流电阻
 $R_{\sim}$ ——交流附加电阻
 $R_{\text{集}}, R_{\text{邻}}, R_{\text{金}}$ ——对称回路集肤效应、邻近效应及金属损耗的附加电阻
 R_a, R_b ——同轴对内外导体的有效电阻
 R_{0a}, R_{0b}, R_m ——同轴对内、外导体及钢带的直流电阻
 R_{20}, R_t ——在 20°C 及 $t^\circ\text{C}$ 时的电阻
 R_i ——绝缘电阻
 R_z ——复杂结构外导体的附加电阻
 R_p ——护套电阻
 R_K ——钢带铠装电阻
 r ——导线半径; 导电耦合
 r_a, r_b, r_c ——内导体及外导体内、外半径
 S ——屏蔽系数、驻波系数
 S_p ——偏心系数
 S_K, S_G ——空气及介质截面积
 S_1, S_2, S_{12}, S_{21} ——同轴对外导体屏蔽系数
 S_n, S_f ——对称回路吸收及反射屏蔽系数
 S_0 ——金属套理想屏蔽系数 (防护作用系数)
 $S_{\text{绝}}, S_{\text{护}}$ ——电缆绝缘及护层的热阻
 s ——导线截面积
 t ——外导体厚度; 温度; 时间
 U ——电压
 U_0, U_l ——回路始端及终端电压
 U_{10}, U_{20} ——主串回路始端及终端电压
 U_{20}, U_{2l} ——被串回路近端及远端的串音电压
 $U_{\text{入}}, U_{\text{反}}$ ——入射流电压及反射波电压
 V ——体积
 v ——传播速度
 W ——热流、重量
 W_a, W_b, W_G ——内导体、外导体及绝缘的热流
 Y ——耦合导纳
 Z_0 ——波阻抗
 Z_H ——负载阻抗
 Z_r ——电源内阻抗
 Z_G ——空气波阻抗
 Z_M ——金属波阻抗
 Z_p ——金属护套阻抗
 Z_{12}, Z_{21} ——同轴回路耦合阻抗
 Z_{11}, Z_{22} ——同轴对外导体内阻抗及外阻抗
 Z_{λ} ——输入阻抗
 Z_0 ——短路输入阻抗
 Z_{∞} ——开路输入阻抗
 α ——衰减常数、螺旋绕包角
 α_R ——表征金属损耗的衰减常数
 α_G ——表征介质损耗的衰减常数
 α_a ——表征内导体金属损耗的衰减常数
 α_b ——表征外导体金属损耗的衰减常数
 α_{13} —— $t^\circ\text{C}$ 及 13°C 时的衰减常数
 α_{20} —— 20°C 时的电阻温度系数
 β ——相移常数
 γ ——传播常数
 Δ ——绕包钢带间隙
 δ ——钢带厚度; 塑料 (纸) 绳直径; 波纹深度
 ϵ ——介电常数
 ϵ_0 ——真空介电常数
 ϵ_r ——相对介电常数
 ϵ_D ——等效相对介电常数
 ϵ_d ——等效绝对介电常数
 ϵ_K ——空气相对介电常数
 ϵ_G ——介质相对介电常数
 θ ——透入深度
 λ ——绞合系数; 电磁波波长
 μ ——磁导率
 μ_0 ——真空磁导率
 μ_r ——相对磁导率
 μ_a, μ_b ——内、外导体磁导率
 μ_{ar}, μ_{br} ——内、外导体相对磁导率
 μ_i, μ_{ir} ——介质磁导率及介质相对磁导率
 μ_1, μ_2 ——内、外层屏蔽的磁导率
 ρ ——电阻率
 ρ_a, ρ_b ——内、外导体的电阻率
 ρ_V ——体积电阻系数

X

$\rho_{\text{绝}}, \rho_{\text{护}}, \rho_{\pm}$ ——绝缘、护层及土壤热阻系数

ρ_1, ρ_2 ——内、外层屏蔽的电阻率

σ ——电导率

σ_a, σ_b ——内、外导体电导率

σ_d ——大地电导率

τ ——脉冲宽度

ϕ ——磁通

φ ——阻抗角、导纳角

ψ ——对称电缆工作电容的接地修正系数

ω ——角频率

$\text{tg} \delta$ ——介质损耗角正切值

$\text{tg} \delta_D$ ——等效介质损耗角正切值

$\text{tg} \delta_K$ ——空气损耗角正切值

$\text{tg} \delta_o$ ——介质损耗角正切值

ΔZ_c ——波阻抗偏差

Δd ——内导体直径偏差

ΔD ——外导体内径偏差

Δt ——铜带厚度偏差

$\Delta \varepsilon_D$ ——等效介电常数偏差

目 录

常用符号表

第一章 绪论 1

§ 1-1 现代电气通信及其对通信电缆的要求 1

§ 1-2 通信电缆的发展过程 2

§ 1-3 音频通信与载波通信 4

一、音频通信的基本原理 4

二、载波通信——频分制通信 4

§ 1-4 脉码调制通信概述 5

§ 1-5 电缆线路通信的传输制式 7

一、二线制和四线制 8

二、单电缆制与双电缆制 9

§ 1-6 通信电缆的用途和分类 10

第二章 通信电缆的传输理论 11

§ 2-1 电磁波沿均匀电缆线路的传输 11

一、均匀电缆的等效回路 11

二、均匀电缆传输的基本方程 11

三、终端负载阻抗匹配的均匀线路 13

§ 2-2 电缆线路的二次传输参数 14

一、波阻抗及传播常数的物理意义 14

二、波阻抗的计算公式 15

三、传播常数的计算公式 17

四、电磁波沿电缆线路的传播速度 19

§ 2-3 信号在线路上的失真 20

一、振幅失真 20

二、相位失真 21

三、由于波阻抗 Z_0 随频率变化而引起的失真 21

四、非线性失真 22

§ 2-4 传输电平和通信距离 22

一、传输电平 22

二、通信距离 25

§ 2-5 非均匀电缆线路的性质 26

一、非均匀电缆线路 26

二、反射系数 26

三、线路终端接以不同负载时的反射

系数 27

§ 2-6 均匀电缆线路的输入阻抗 27

一、输入阻抗及其表示式 27

二、不同负载情况下的输入阻抗值 28

三、长线路的输入阻抗 29

四、输入阻抗的波动 29

§ 2-7 均匀电缆线路的工作衰减 31

第三章 对称通信电缆 32

§ 3-1 对称通信电缆的结构元件 32

一、对称电缆的导电线芯 32

二、对称电缆导电线芯的绝缘 32

三、对称电缆的线组 35

四、对称电缆的电缆芯 37

五、通信电缆的护层 37

§ 3-2 对称通信电缆的类型 39

一、市内通信电缆 39

二、长途对称通信电缆 41

三、宽频带对称电缆 44

四、电话设备用通信电缆 45

五、农用塑料通信电缆 46

§ 3-3 对称通信电缆传输参数的计算 47

一、对称电缆的有效电阻 47

二、对称电缆的电感 53

三、对称电缆的电容 55

四、对称电缆的绝缘电导 58

五、对称电缆等效介电常数和等效介质损耗角正切值的计算 59

六、对称电缆二次传输参数的计算 61

第四章 同轴通信电缆 62

§ 4-1 概述 62

§ 4-2 同轴通信电缆的结构元件 63

一、同轴对的内导体 63

二、同轴对的绝缘型式 64

三、同轴对的外导体 66

四、同轴对的屏蔽及外绝缘 67

§ 4-3 同轴通信电缆的结构类型 68

一、综合中同轴通信电缆	68	三、不均匀性对传输质量的影响	108
二、综合小同轴通信电缆	70	四、波阻抗不均匀性的表示方法	109
三、微型同轴电缆	71	五、反射波对输入阻抗的影响	110
四、防雷长途通信电缆	72	六、伴流量	112
§ 4-4 同轴电缆的特点及电气过程	73	七、减小不均匀性的措施	113
一、理想同轴电缆的电磁场	73	第五章 海底通信电缆	119
二、内外导体中的电流分布	74	§ 5-1 海底通信电缆的应用及其特点	119
§ 4-5 同轴通信电缆的一次参数	75	一、海底电缆通信的重要性	119
一、内外导体的直流电阻	75	二、海底通信电缆的优点	119
二、内导体的有效电阻和内电感	76	三、海底通信电缆的使用特点	119
三、透入深度	76	四、海底通信电缆的分类	120
四、外导体的有效电阻和内电感	76	五、海底通信电缆的发展沿革	120
五、同轴回路的外电感	77	§ 5-2 海底对称通信电缆	121
六、同轴回路的有效电阻及电感	77	一、海底对称电缆的结构	121
七、同轴回路的电容	79	二、海底对称电缆的平衡	123
八、同轴回路的绝缘电导	79	§ 5-3 海底同轴电缆	124
九、一次参数与频率及结构尺寸的关系	79	一、海底同轴电缆结构设计特点	124
§ 4-6 同轴通信电缆的二次传输参数	80	二、海底同轴电缆的结构	125
一、波阻抗	81	§ 5-4 海底通信电缆的电性能	127
二、衰减常数	81	一、海底同轴电缆的传输参数	127
三、相移常数和传播速度	83	二、敷设效应与老化效应	128
§ 4-7 复杂结构外导体的有效电阻	84	第六章 通信电缆回路间的串音	130
§ 4-8 同轴对内外导体直径的最佳比值	86	§ 6-1 对称电缆回路间的串音机理和干扰参数	130
§ 4-9 同轴回路等效 ϵ_D 和 $\text{tg}\delta_D$ 的确定	89	一、串音的机理	130
一、求取等效 ϵ_D 和 $\text{tg}\delta_D$ 的基本原理	89	二、一次干扰参数——电磁耦合	131
二、各种组合绝缘结构等效 ϵ_D 和 $\text{tg}\delta_D$ 的计算	90	三、二次干扰参数	132
三、用实验求取 ϵ_D 和 $\text{tg}\delta_D$ 的方法	96	§ 6-2 对称短电缆回路间的串音及低频电缆串音	134
§ 4-10 导体及电介质对同轴电缆传输特性的影响	98	一、短电缆回路间的串音	134
一、外导体厚度与同轴对衰减的关系	98	二、低频电缆回路间的串音	136
二、同轴对的衰减与导体材料的关系	100	§ 6-3 对称电缆电磁耦合的分析和公式	137
三、同轴电缆中金属衰减 α_r 与介质衰减 α_c 之比	101	一、四线组内的一次干扰参数	137
四、不同电介质对电缆直径的影响	102	二、电容耦合及电感耦合与回路结构的关系	139
五、不同绝缘结构的比较	103	三、任意回路间电容耦合的概念和公式	140
六、垫片绝缘结构的设计	103	§ 6-4 长对称电缆线路中的串音衰减	142
§ 4-11 传输参数与温度的关系	105	一、近端串音衰减	143
§ 4-12 同轴电缆的波阻抗不均匀性	107	二、远端串音衰减	144
一、波阻抗不均匀性的概念	107	三、远端串音防卫度	145
二、波阻抗不均匀性的种类和原因	108	§ 6-5 对称电缆回路间的间接串音	145
		一、经由第三回路的间接串音	145

二、由于反射而引起的间接串音	146	§ 7-5 电缆金属套的屏蔽作用	191
§ 6-6 高频对称电缆回路间的串音	147	一、低频时电缆金属套的屏蔽作用	191
一、高频串音的特点	147	二、电缆金属套的屏蔽系数	192
二、高频串音耦合矢量的概念	147	三、理想屏蔽系数的计算	193
三、高频组内串音	148	第八章 通信电缆的设计	196
四、高频组间串音	148	§ 8-1 通信电缆的设计内容与程序	196
§ 6-7 对称通信电缆线组绞合节距的 确定	149	§ 8-2 对称通信电缆的设计	196
一、绞合节距配合的物理概念	149	一、对称电缆结构的选择	196
二、线组绞合节距的确定	151	二、对称电缆参数计算与最佳结构	199
三、低频及高频对称电缆线组绞合 节距的选择	153	§ 8-3 同轴通信电缆的设计	200
§ 6-8 对称通信电缆的平衡	154	一、同轴电缆结构的选择	200
一、对称电缆平衡的必要性	154	二、同轴电缆的计算	201
二、对称电缆平衡的基本方法	154	第九章 通信电缆电性能的测试	202
三、对称电缆的平衡过程	161	§ 9-1 概述	202
§ 6-9 同轴电缆回路间串音的概念	163	§ 9-2 工作电容测试	202
§ 6-10 同轴电缆的一次干扰参数	165	一、测试仪器及原理	203
一、一次干扰参数的概念	165	二、接线方式的影响及合理的接线方式	203
二、一次干扰参数的计算公式	166	三、注意事项	204
三、复合结构外导体的耦合阻抗	168	四、换算公式	204
§ 6-11 同轴对间的串音衰减	171	§ 9-3 电容耦合和电容不平衡测试	205
一、两个孤立同轴对间的串音衰减	171	一、测试仪器及原理	205
二、具有公共护套的多同轴对间的 串音衰减	174	二、不同连接方式对测试结果的影响	206
三、串音衰减与频率的关系	174	三、利用串音衰减测试器测试电容耦合	206
四、串音衰减与线路长度的关系	175	§ 9-4 通信电缆一次和二次传输参数 的测试	207
第七章 通信电缆的屏蔽	177	一、电桥法测试电缆的输入阻抗	207
§ 7-1 概述	177	二、电缆终端开路、短路时输入阻抗 的特点	208
§ 7-2 屏蔽的基本原理	179	三、开短路测试结果及电缆传输参数 的计算	209
一、三种屏蔽形式的作用原理	179	四、有关开短路测试法准确性的几点 说明	211
二、屏蔽系数和屏蔽衰减	180	五、短段电缆一次传输参数的测量	212
三、屏蔽过程与传输过程的异同	180	§ 9-5 同轴电缆衰减的测试	212
§ 7-3 同轴电缆的屏蔽	180	一、电桥谐振法	213
一、单层外导体的屏蔽效果	180	二、串联比较法	214
二、多层屏蔽的效果	182	三、衰减温度系数的测试	214
三、双金属外导体的最佳厚度比	183	§ 9-6 串音测试	216
§ 7-4 对称电缆的屏蔽	185	一、对称电缆的串音测试	216
一、主串回路在中心的单层屏蔽的 屏蔽效果	185	二、同轴电缆的串音测试	217
二、主串回路偏心时对屏蔽效果的影响	189	三、影响串音测试的仪器上的因素	219
三、多层屏蔽的屏蔽效果	189	§ 9-7 同轴电缆的脉冲测试	220

一、脉冲回波测试法的基本原理	221	三、绝缘结构对最高使用频率的限制	257
二、M 693 型电缆脉冲测试仪简介	223	§ 10-8 同轴射频电缆的最佳结构	257
三、脉冲测试中的几点说明	224	一、衰减最小时的最佳直径比	257
四、 $P-1$ 校正曲线的绘制	225	二、额定电压最大时的最佳直径比	257
§ 9-8 屏蔽系数的测试	226	三、额定峰值功率最大时的最佳直径比	258
一、屏蔽系数的测试原理	226	四、额定平均功率最大时的最佳直径比	258
二、测试设备及接线	227	五、同轴射频电缆波阻抗的取值	259
第十章 射频电缆	228	§ 10-9 对称射频电缆	259
§ 10-1 概述	228	一、对称射频电缆的结构	259
一、射频电缆的使用条件及特点	228	二、对称无屏蔽电缆的电性计算	260
二、射频电缆的分类	229	三、对称屏蔽电缆的电性计算	262
§ 10-2 同轴射频电缆的结构元件	229	§ 10-10 螺旋射频电缆	266
一、内导体	229	一、螺旋射频电缆的特点及用途	266
二、绝缘	231	二、延迟和匹配电缆的电性计算	268
三、外导体	232	三、变阻电缆	269
四、护套	233	第十一章 通信电缆制造工艺	271
五、铠装	234	§ 11-1 线芯绝缘制造工艺	271
§ 10-3 同轴射频电缆的结构与类型	234	一、纸绝缘工艺	271
一、一般用途的射频电缆	234	二、泡沫塑料绝缘工艺	272
二、大功率射频电缆	234	三、泡沫塑料绝缘的新工艺	276
三、低衰减射频电缆	235	§ 11-2 线组绞合工艺	277
四、微小型射频电缆	236	一、对绞	277
五、稳相射频电缆	236	二、星绞	277
六、高压脉冲电缆	236	三、左右绞	278
七、低噪音电缆	237	§ 11-3 同轴对的制造	280
八、漏泄同轴电缆	237	一、中同轴对的制造	280
九、电视电缆	238	二、小同轴对的制造	282
十、特殊环境用射频电缆	240	§ 11-4 成缆工艺	283
§ 10-4 同轴射频电缆的参数计算	240	一、市内通信电缆的成缆	283
一、波阻抗	240	二、长途对称通信电缆的成缆	285
二、衰减	243	三、综合同轴电缆的成缆	286
三、电容	246	§ 11-5 电缆芯的干燥工艺	286
四、相移	246	§ 11-6 通信电缆护层的制造	288
五、工作电压	248	一、金属护套	288
§ 10-5 波阻抗不均匀性及驻波	249	二、外护层	290
一、射频下波阻抗不均匀性的特点	249	第十二章 光缆	291
二、阻抗偏差、驻波系数和反射衰减	250	§ 12-1 概述	291
三、阻抗偏差与电缆结构的关系	250	§ 12-2 光的折射、反射与全反射	294
四、周期性及随机分布的阻抗不均匀性	250	§ 12-3 光纤的数值孔径	296
§ 10-6 同轴射频电缆的传输功率	251	§ 12-4 圆柱阶跃光纤中光的传播模式	297
一、额定峰值功率	251	§ 12-5 光纤的传输衰减	304
二、额定平均功率	251	§ 12-6 渐变型光纤、光纤的传输带宽	306
§ 10-7 同轴射频电缆的最高使用频率	256	§ 12-7 实用光纤制造工艺对比及举例	311
一、衰减指标对最高使用频率的限制	256	§ 12-8 光缆设计的基本原理	313
二、同轴射频电缆的截止频率	256	§ 12-9 光缆结构分类及实例	316

5. 电缆有护套可防止外界因素对电缆的损坏, 工作寿命较长。

虽然通信电缆的衰减较大, 但由于电子技术的发展, 增音机质量的改进, 这个缺点已不再是发展通信电缆的障碍。缺点是通信电缆的一次投资较大。

在电气通信中, 对通信质量的要求是: 衰减小、失真小及串杂音小。因此为使通信系统具有高传输质量, 不仅要有良好的通信设备, 还要有高质量的通信电缆线路。因此通信电缆的设计制造应满足以下几点要求:

1. 能满足实际需要的通信距离进行通信, 就是说在宽频带内电缆的衰减应该尽可能小;
2. 由线路产生的失真要小;
3. 电缆回路对相互干扰及外界干扰的防卫度高;
4. 电气参数稳定;
5. 整个通信体制要经济。

§ 1-2 通信电缆的发展过程

在十九世纪末制成的第一批通信电缆是空气纸绝缘对绞市内电话电缆, 其结构是在导电线芯上绕包一层空心纸管, 然后通过一个模子进行压缩而制成。这种电缆由于在绝缘中含有一些空气, 而使介电常数下降, 电容也随之而降低, 从而使衰减有所减小。这种电缆传输的距离只为 6 公里。为了满足更长距离的通信, 在二十世纪初开始设计并制造了长途通信电缆。这种电缆的结构是将纸绳以一定节距绕扎在导电线芯上, 然后再绕包一、二层纸带而构成, 当时采用的导电线芯较粗为 2~3 毫米。这种结构的特点是有效电阻较小(导线直径大), 结构稳定, 绝缘中含有更多的空气(因而介电常数小, 电容小), 并且沿电缆全长各截面上所含空气量近于相等, 因而结构均匀。线组是采用星绞或复对绞结构。这种电缆的通信距离可达 30 余公里。除此之外, 这种电缆由于线组的结构可为复对绞, 在一个复对绞组中除了进行两个实回路通信外, 还可采用幻路进行通信。幻路是这样构成的, 一个实路的两根导线作为幻路的去线, 另一实路的两根导线作为幻路的回线, 图 1-1 即为幻路通信示意图。

显然这种能进行 30 公里通信的通信电缆但仍不能满足生产发展的需要。在此以后通信电缆的发展是采用人工加感, 用增加电感的方法来减小衰减。人工加感的方式有两种, 即均匀加感和集中加感。均匀加感是在电缆导电线芯上包上一层磁性材料, 使回路的电感增大。这种加感电缆生产工艺复杂, 应用范围受到限制, 故至今未被广泛应用。集中加感是在线路上相隔一定距离接入一个电感线圈来达到加感的目的。这样可使通信距离达到 140 公里。

人工加感线路也带来一些缺点, 主要是由于电感线圈的接入, 相当于一只低通滤波器或因线圈附加损耗的增加, 使传输频率受到限制。

更长的通信距离是在增音机发明的基础上实现的。增音机实质上就是一个放大器, 把已经衰减到很微弱的信号进行放大。

采用增音机后, 一方面能满足实际所需要的通信距离 L , 只要沿线路设立适当数量的增音机就可以满足要求, 如图 1-2 所示。另一方面降低了线路的费用。采用增音机后线路的费

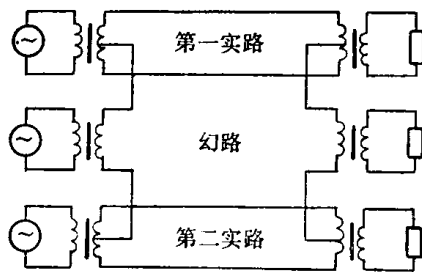


图1-1 幻路的构成

用将包括两部分，电缆的费用和增音机的费用。对一定长度的线路来说，电缆的费用随增音站间距离的增加而增加，增音机的费用是随增音站间距离增加而减少。从理论和实践上证明，采用增音机后，当电缆导电线芯的直径从 2~3 毫米降低到 0.9~1.4 毫米时，整个线路的费用将为最低。

载波通信(复用)的发明，促进了通信电缆的进一步发展。所谓载波通信是在一对导线上利用频率分割同时进行很多对用户的通话，而相互没有干扰。这既增加了通话路数，也降低了每个话路的成本。为适应生产的发展而需增加通信路数，这必然要加多载波通信路数，随之要求电缆能传输较宽的频带，这是通信电缆的发展方向。

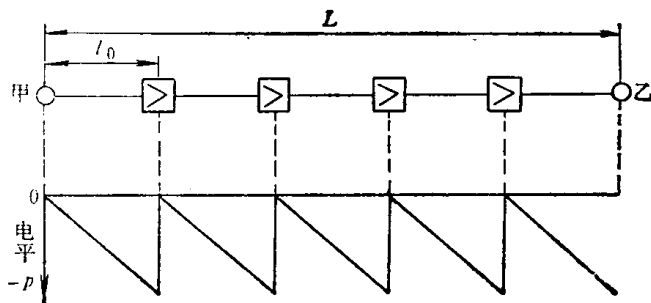


图1-2 线路增音示意图

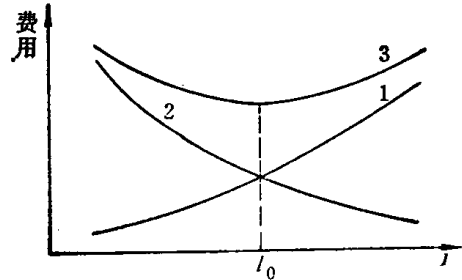


图1-3 线路费用与增音站之间距离的关系

1—电缆的费用 2—增音机费用
3—线路的费用

在电气通信中要求加宽频带的另一个原因是电视和雷达等宽频带新技术的迅速发展。为了数目更多的载波话路和传输其它宽频带的通信项目，在本世纪三十年代发展了新型结构的不对称式的电缆——同轴电缆。同轴电缆的主要优点是：能传输很宽的频谱；在高频时对回路间相互干扰和外来干扰具有较高的防卫度；在大通路时，传输系统就整体来说比较经济。

架空明线、对称电缆和同轴电缆均属于传输电磁波的双线传输线。这些传输线在一定频率范围内的通信中已得到了广泛的应用，但是当需要传输更高频率电磁波的情况下（千兆赫以上），上述传输线已不能适应，而出现了另一种新的传输线——波导。波导除用于无线电系统以外，也可用于长途通信。例如在圆形波导管中传输 H_{01} 型波时，其衰减频率特性极佳，即随频率升高，衰减反而下降。显然，若用它来作为长途通信的传输线是极为有利的。近年来一些国家已开通了数条实验线路，其中最多可开通 460000 路。波导的缺点是要求精密度高的加工技术。

由于超导现象的发现及深冷技术的发展，超导同轴通信电缆在一些国家也进行研究和实验。超导通信电缆的优良特性是低衰减、高屏蔽性及大功率等。尽管超导通信电缆的性能十分理想，但目前由于致冷技术与设备的限制，建设长距离的超导通信电缆线路仍不经济。低温同轴电缆是国外作为一种比较容易实现的较长距离低衰减宽带通信的补充手段。它的工作温度一般在液氢（20°K）温度下工作，这样对致冷的要求可低一些，线路成本也有所降低。

六十年代由于激光的产生和发展，因此国外对光通信进行了研究。光导纤维通信是一种利用光波进行通信的新方法。它是把激光器发出的调制的激光送入一种象头发那样细的透明玻璃丝中，并传到对方的接收机来实现通信的。光导纤维通信的最大优点是传输容量相当大。实质上光也是一种电磁波，不过它的波长极短，频率极高。如红光波长约 10^{-3} 毫米，其频率为 3×10^{14} 赫，若用它的 1/10 作为传输信号用，则有 3×10^{18} 赫。理论上可以传输 10^6 路高

质量电视或 10^{10} 路电话。即使降低 10^4 倍, 带宽还有 3 千兆赫, 也是 10800 路中同轴系统的 50 倍。如果由多根光导纤维组成光缆, 那么它的通信容量还可大大增加。光导纤维通信的另一个重要优点是使用光导纤维作为传输线, 可节省大量有色金属。光导纤维通信还有一些其它优点, 例如截面积小、重量轻、不受外界电磁场的干扰、衰减小及保密性好等, 因此光导纤维通信是一种极有前途的导向传输线。

我国通信电缆的生产在解放前非常薄弱。解放以后, 通信电缆的生产得到了迅速的发展。现在生产的品种有: 市内通信电缆, 高频长途对称通信电缆, 小同轴综合通信电缆, 中同轴综合通信电缆, 电气化铁道通信电缆, 以及局用及配线电缆, 此外还生产各种军用通信电缆及射频电缆等。但是从日益增长的社会主义的国民经济、国防等需要, 以及为实现四个现代化需要来看, 还远不能满足发展的需要。在产品品种、材料、工艺和生产设备上与国外先进国家比还有很大差距。因此我们必须在改进电缆结构、改进工艺、提高电缆性能, 延长电缆使用寿命等方面做大量的工作, 以尽早赶上和超过世界水平。

通信电缆的技术发展方向是: 增加新品种; 现有产品开通更宽的频带; 采用新材料、新结构、新工艺, 对产品和生产技术进行革新, 以提高质量和降低成本。

§ 1-3 音频通信与载波通信

一、音频通信的基本原理

音频通信主要是电话通信。音频电话通信就是利用音频电流的传输, 使人们能互通语言的通信方式。

当发话人在送话器前讲话时, 声波作用于送话器上, 在送话器直流电路内产生了相应地音频电流变动, 此电流沿线路传送到远地的受话器。受话器接收到这一音频电流后, 又使它产生声波, 传播于空气中, 于是听到了原来的话音信号。这就是音频电话传输的基本原理。

人在讲话时, 所发出的声音是一个复杂的振动频谱, 它可以分解为一系列正弦波。研究指出, 人的声音频带在 $10 \sim 16000$ 赫范围内, 对这么宽的频带要求不失真的进行传输, 当然可以提高通话质量, 但相应地对电话设备的质量要求也大为提高, 因而很不经济。声波频谱中, 高频部分对清晰度影响较大, 而低频部分则含有较大的能量。因此, 对于一般的电话通信, 除了要有一定的强度(声响)或振幅外, 还希望有一定的清晰度, 以及能根据噪声的音色辨别说话者的分辨度。一般在 $300 \sim 3400$ 赫的频带内, 就可得到满意的效果。对于传输文艺节目的广播中, 为使声音更加逼真, 就需要利用 $10 \sim 10000$ 赫的频带。

在电话电路计算中, 对通话频带中包含的不同频带一一计算是不方便的, 因此人们把 800 赫或 1000 赫用作代表性的中间计算频率。对于这两个频率, 人的听觉有最高的灵敏度, 所以这两个频率在电话电路计算中具有代表性, 而用 800 赫计算时, 角频率 $\omega = 2\pi f = 2 \times 3.1416 \times 800 \approx 5000$, 计算时尤为方便。

二、载波通信——频分制通信

普通的音频电话, 其通话方式是在一个通信回路上, 在同一时间只能允许一对用户通话, 因此电话线路的利用率不高, 特别是对长途通信来说很不经济。为了提高线路利用率, 研究出一种载波通信方式——频分多路复用。

运用载波通信, 可以在一个通信回路上实现多路通信而互不干扰。

实现载波通信的方法是将各用户发出的音频信号波载在不同频率的载波上,同时送入一个通信回路中去,传输到对方后,利用滤波器再将它们各自分离来实现的。其原理与无线电广播的原理相似。

载波通信的基本原理可由图 1-4 来说明。如果我们在一个通信回路上希望传输三路电话信号,由于从话筒送出的都是音频信号,所以如果第一路电话频率为 f_0 的音频信号直接经由滤波器 ϕ_0 通过传输线路送至接收端的话,第二路电话、第三路电话为了不使信号相互混淆,就必须将其原来的话音频率信号借助于调制器 Π_1 、 Π_2 载在频率为 f_1 和 f_2 的载波上,然后经相应的滤波器 ϕ_1 、 ϕ_2 送入传输线路。在接收端,频率为 f_0 、 f_1 、 f_2 这些信号将各自通过滤波器 ϕ'_0 、 ϕ'_1 、 ϕ'_2 , 经 ϕ'_0 的话音频率信号直接被送入接收器,而经过 ϕ'_1 、 ϕ'_2 的载波信号将经解调器 Π'_1 、 Π'_2 产生原来的话音频率信号后才送入各自的接收器中。

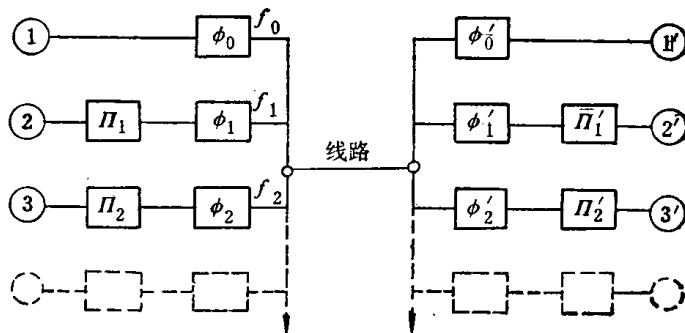


图1-4 载波电话通信方框图

载波就是把音频信号通过调制进行频谱迁移,把各路电话频谱互不重叠地排列在指定的载波频段,因音频电话频谱限制在 0.3~3.4 千赫范围中,一般的载波制式又是单边带制,所以调制时各路所调制的载频互相隔开 4 千赫,就可实现各话路频谱互不重叠。

现代所采用的长途通信电缆及架空明线线路复用的频带列在表 1-1 中。

应该指出运用载波不仅可以进行载波电话通信,而且也可以进行其它项目的载波通信(电报、广播等)。采用二次复用设备可以沿任何一个频宽为 4 千赫的高频话路传输 18~24 路一般电报,或传输一路传真电报,一个广播节目则需占用二个或三个电话通路的频谱。

表1-1 各种类型通信线路通路数、复用频带及增音段长度

线 路 类 型	通 路 数	频谱范围(千赫)	增音段长度(公里)
架空明线	1 + 3	0.3~27	300
架空明线	1 + 3 + 12	0.3~150	80~120
对称电缆	24	12~108	35
对称电缆	60	12~252	12~18
小同轴电缆	300	60~1300	8
小同轴电缆	960	60~4100	4
中同轴电缆	1800	300~9000	6
中同轴电缆	2700	300~12000	4.5
中同轴电缆	10800	3000~60000	1.5

§ 1-4 脉码调制通信概述

脉码调制通信与频分制的载波通信不同,是属于时分制多路通信的一种形式。

时分制多路通信原理如图 1-5 所示。在一对线路上,假设开通三个话路,图中 K 和 K' 为

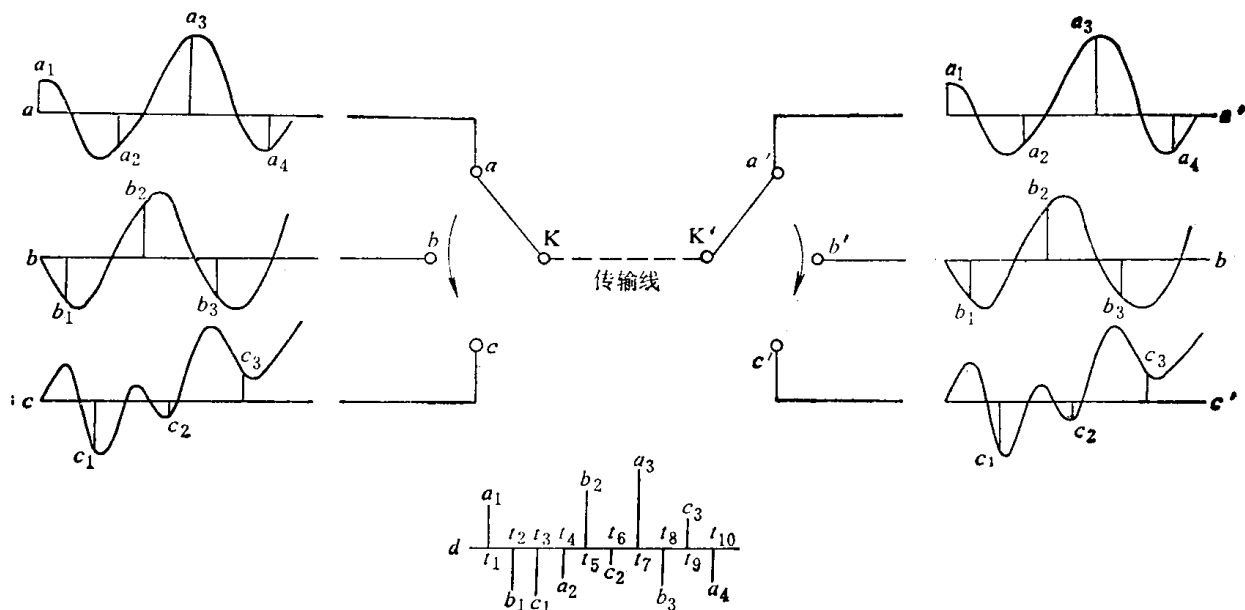


图1-5 时分制多路通信示意图

两个每秒旋转 8000 转的转换开关，它们不但转得快，而且双方旋转臂的位置总是严格同步的。当 K 接通 a 点时， K' 刚好接通点 a' ，当 K 接通 b 点时， K' 刚好接通点 b' ，……。在接点 a 、 b 、 c 上分别加上待传送的三路话音信号，其波形如图 1-5 中曲线 a 、 b 、 c 所示。

由图 1-5 可见，在时间 t_1 ， K 和接点 a 相接， K' 正好和 a' 相接。此时信号 a 的幅值即抽样值 a_1 就通过线路送出，被 a' 点所接收。在时间 t_2 ， K 和接点 b 相接， K' 正好和 b' 相接。此时，信号 b 的抽样值 b_1 就通过线路送出，被 b' 点所接收。在时间 t_3 ， K 和接点 c 相接，此时，信号 c 的抽样值 c_1 就通过线路送出，被 c' 点所接收。此后 K 和 K' 继续旋转，分别依次接通接点 a 、 b 、 c 和 a' 、 b' 、 c' ，一次又一次的重复上面的过程。

从图 1-5 的曲线可以清楚地看到，在线路中，是周而复始的依次传送各话路的样值，即 a_1 、 b_1 、 c_1 、 a_2 、 b_2 、 c_2 、 a_3 、 b_3 、 c_3 ……。而在接收端， a' 、 b' 、 c' 各接收点所得到的则分别是 a 路、 b 路、 c 路的信号样值。 a' 点收到样值 a_1 、 b_1 、 c_1 ……； b' 点收到样值 b_1 、 b_2 、 b_3 ……； c' 点收到样值 c_1 、 c_2 、 c_3 ……。由于 K 和 K' 是每秒转 8000 次，所以对各路而言都是每秒抽样 8000 次，即抽样频率是 8000 赫。它大于话音频率 3400 赫的两倍。根据抽样定理，如果在 a' 、 b' 、 c' 各点都接一个截止频率为 3400 赫的低通滤波器，就可以分别得出 a 、 b 、 c 的话音信号。 a 、 b 、 c 三路信号虽然都通过同一线路传送，但是由于它们抽样的时间不同，在公用线路中传输所占用的时间位置不同，所以在接收端仍能把它区分开来，不至互相混淆，从而实现了多路通信。正因为是利用传送时间的不同来区分各路信号的，所以把它叫做时分制多路通信。

从上面的例子可以看到，在线路中传送的是一串脉冲信号，脉冲的幅度是随信号的大小而变化的。这种时分制多路通信叫做脉幅调制方式，或叫做 PAM 方式。

脉幅调制信号的脉冲幅度是随原始话音信号的幅度变化而变化的。这些脉冲在线路中传送时，由于线路有衰减及干扰等，会造成脉冲的严重失真，这就不能保证通信质量，所以这种方法并没有实用。在改进脉幅调制的过程中，研究了采用脉冲编码的时分制多路通信，简称脉码调制通信 (PCM 通信)。

脉码调制通信 (PCM通信) 与 PAM 通信的区别在于对多个模拟信号抽样后, 还要进行量化和编码, 使之变成具有规定信息速率的离散的数字信号 (数字脉冲)。这一串数字信号 (脉冲) 由线路传至接收端, 经解码及分路后, 通过低通滤波器还原为原来的模拟信号。

脉码调制信号与目前常用的载波通信 (频分制) 比较, 具有如下优点:

1. 抗干扰性强, 对线路的串音性能要求较低;
2. 信号再生而不积累失真;
3. 适应性强, 除了电报、电话外, 还有数传、传真、可视电话、广播节目及彩色电视等信息都可以变换为数字信息时分复用综合传输;
4. 保密性强。

脉码调制通信也存在以下缺点:

1. 脉码调制通信所需要的频谱一般比载波通信要宽得多, 例如传输 24 路电话, 载波只需要 $4 \times 24 = 96$ 千赫的带宽, 而脉码调制通信则需 1.544 兆比特/秒, 其等效频率为 772 千赫, 因而相应的线路衰减要大, 中继 (增音) 段的距离就要缩短, 使线路成本提高。

2. 脉码调制要具备取样、量化、编码、同步等多种机能才能通话, 因此终端设备比较复杂。

脉码调制通信是用数字脉冲来传输信息的。单位时间内所传送的信息量称为信息速率, 单位为比特/秒。脉码调制通信中, 30/32 路的信息速率为 2.048 兆比特/秒, 24 路的信息速率为 1.544 兆比特/秒, 上二种制式一般称为一次群。以 30 路为基群的 120 路 (二次群) 的信息速率为 8.448 兆比特/秒, 以 24 路为基群的 96 路的信息速率为 6.312 兆比特/秒。一般广播信号的信息速率约为 300~400 千比特/秒, 一路数字可视电话信号的信息速率约为 10 兆比特/秒, 数字电视信号的信息速率约为 100 兆比特/秒。

脉码调制通信在线路上传输的是具有一定信息速率的数字信号, 为对传输线路及中继器进行设计, 要求其等效传输频率 f_e 。

从理论分析上来求等效传输频率 f_e , 要根据综合转移函数来处理, 用发送脉冲振幅和接收均衡波峰值之比来换算取定, 这个数值应与综合转移函数的损耗所换算的值相等。但实际上只取随机脉冲串列的功率频谱的最大值 f_0 的一半, 即 $f_e = f_0/2$ 就可以了, 而 f_0 可以用最高脉冲传输速率的倒数很方便地算出来。如信息速率为 1544 千比特/秒的脉码调制信号的等效传输频率为 772 千赫。线路实验结果证明, 用等效传输频率来计算中继段长度或确定前置放大器增益是可行的。

测试脉码调制通信回路间的串音衰减时, 也要求出串音等效频率。按照理论计算结果, 对于近端串音

$$f_{e0} = 0.42f_0 \text{ (对 24 路 PCM 通信 } f_{e0} = 640 \text{ 千赫)}$$

对于远端串音

$$f_{ei} = 0.31f_0 \text{ (对 24 路 PCM 通信 } f_{ei} = 480 \text{ 千赫)}$$

但实际上, 在有单元对称屏蔽电缆的设计计算中, 为了计算与测试方便起见, 往往用等效传输频率 f_e 来代替 f_{e0} 与 f_{ei} , 而只是把相应的标准适当降低些。

§ 1-5 电缆线路通信的传输制式

对于双线回路——对称通信电缆和同轴通信电缆的通信制式, 有二线制和四线制之分,

对于四线制传输又有单电缆制和双电缆制之分。

一、二线制和四线制

采用二线制时，来去两个方向的信号是沿同一线对传输的。采用四线制时，去的方向用一个线对传输，来的方向则沿另一个线对传输。

图 1-6 a) 所示为音频 300~3400 赫的二线制通信，b) 为音频四线制通信。

图 1-7 a) 所示为高频二线制传输方式，由图可见来去的电信号都在一对线上进行传输，例如 A 端向 B 端发送 6 路(设为去话)电话信号，则 A 端到 B 端的传输频带为 12~36 (12+4×6=36) 千赫，而从 B 端向 A 端发送 6 路(设为来话)电话信号，则 B 端到 A 端的传输频带为 36~60 (36+4×6=60) 千赫。原则是当一对线上要传输两个方向的频带时，为了避免来话和去话相互影响，来去话路必须采用两个不同的频带。所以高频下二线制传输方式也称为双频带二线制传输方式。

图 1-7 b) 所示为高频四线制传输方式。由图可见来去各 12 路的电信号是分开在两对线上进行传输的。例如回路 I 用于从 A 端到 B 端 12 路电话信号的传输，回路 II 则用于从 B 端到 A 端 12 路电话信号的传输。来去电话信号的通信频带相同，都是 12~60 (12+4×12=60) 千赫，可见一对线上只传输一个方向的频带，所以高频下四线制传输方式也称为单频带四线制传输方式。

在同一电缆内的二线制与四线制则各有特点：

1. 两种传输方式的线路利用率相同，从图 1-7 可见，用两个回路组成的来去话路数不论是二线制还是四线制都是 12 个双向通路。

2. 两种传输方式的串音干扰不同。从防止回路间相互干扰的角度来看，在同一电缆中二线制比四线制优越。

图 1-8 示出二线制与四线制回路间相互干扰的情况。对于二线制通信时，在每一回路上，从 A 端到 B 端用同一频带（例如 12~60 千赫）传送，而在相反方向则用另一频带（例如 36~60 千赫）传送。因为在电缆内的所有回路上，均以固定方向传送同样的频带，所以最危险的是在远端的干扰，因为分隔滤波器不

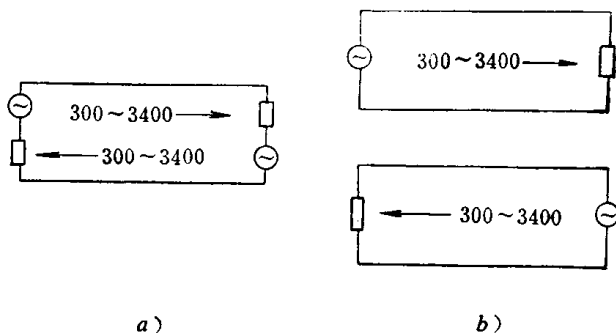


图 1-6 音频二线制与四线制通信

a) 二线制 b) 四线制

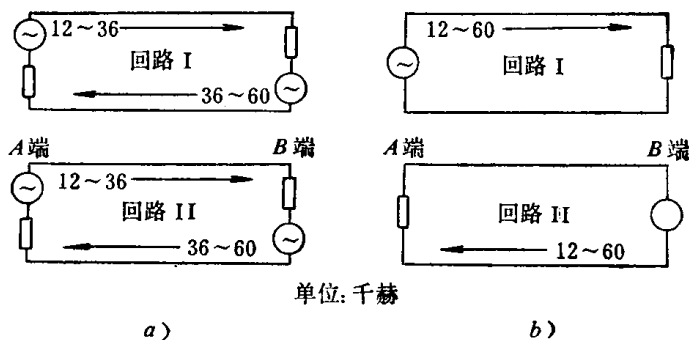


图 1-7 二线制及四线制的高频通信

a) 双频带二线制 b) 单频带四线制

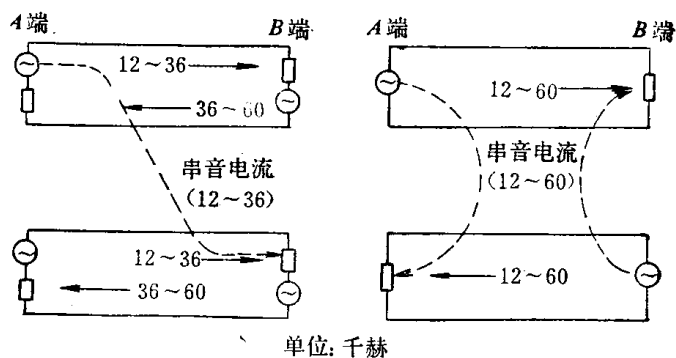


图 1-8 二线制与四线制时的干扰

a) 双频带二线制 b) 单频带四线制