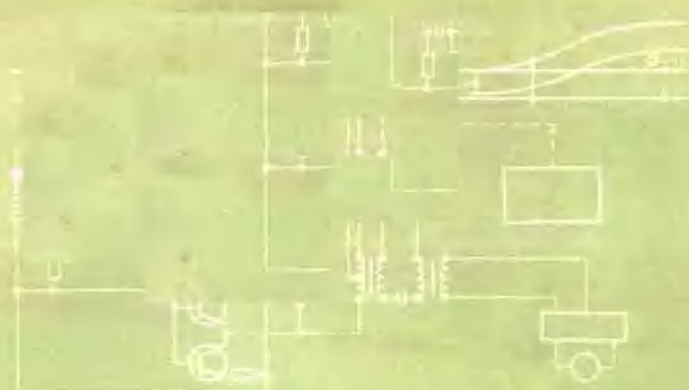




信号轨道电路

(下)



人民交通出版社

信号轨道电路

(下)

(日) 铁道技术研究所板仓荣治著
交通部电务工程总队信号编译组译

人 民 交 通 出 版 社

1975年·北京

信号轨道电路

(下)

(日)铁道技术研究所松本荣祐著
交通部电务工程总队信号编译组译

人民交通出版社出版

(北京市安定门外和平里)

北京市书刊出版业营业许可证出字第 006 号

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民交通出版社印刷一厂印

开本: 850×1168 $\frac{1}{32}$ 印张: 6.375 字数: 158 千

1975年1月 第1版

1975年1月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—5,500 册 定价(科三): 0.62 元

目 录

8. 轨道电路参数

8.1 什么是轨道电路参数	1
8.2 钢轨的直流电阻	8
8.3 钢轨阻抗	9
8.4 漏泄电导	16
8.4.1 漏泄电导的形成	16
8.4.2 支配漏泄电导的因素	19
8.4.3 混凝土道床的漏泄电导	22
8.5 分布电容	23
8.6 轨道电路参数的实测资料	23
8.7 轨道电路参数的测试和计算方法	27
8.7.1 衰耗小的轨道电路参数的计算例	27
8.7.2 衰耗大的轨道电路参数的计算例	40

9. 轨道电路计算方法

9.1 工频交流轨道电路的计算方法	43
9.1.1 向量图的画法	43
9.1.2 电压电流的计算方法	46
9.1.3 分路灵敏度的计算方法	54
9.2 音频轨道电路的计算方法	59
9.2.1 电压电流的计算方法	59
9.2.2 分路灵敏度的计算方法	66
9.3 直流轨道电路的计算方法	67
9.4 使用模拟轨道电路的计算方法	68

10. 列车分路电阻和分路灵敏度

10.1 列车分路电阻和分路灵敏度的关系	70
----------------------	----

10·2	一个车轴的分路电阻	71
10·3	多数车轴的分路电阻	73
10·4	列车分路电阻的实际情况	74
10·5	列车分路电阻的测试方法	78
10·6	轨道电路的分路灵敏度	80
10·6·1	分路灵敏度的测试方法	80
10·6·2	分路灵敏度的一般特性	82
11	轨道电路的不平衡和干扰	
11·1	轨道电路干扰的种类	84
11·2	轨道电路的不平衡	84
11·2·1	产生不平衡的原因	85
11·2·2	轨道电路不平衡率的定义和测试方法	87
11·2·3	极端不平衡	90
11·3	交流牵引电流的干扰	94
11·3·1	双轨条轨道电路时	94
11·3·2	单轨条轨道电路时	95
11·3·3	牵引电流的频率成分	98
11·3·4	交流轨道继电器的抗干扰特性	99
11·4	直流牵引电流的干扰	104
11·4·1	扼流变压器的磁饱和	104
11·4·2	变电所的波动	104
11·4·3	可控硅控制式电力机车的干扰	105
11·4·4	迷流	106
11·5	电磁干扰	111
11·5·1	来自BT供电方式交流电气化铁路的电磁干扰	111
11·5·2	来自AT供电方式交流电气化铁路的电磁干扰	115
11·5·3	来自超高压输电线的电磁干扰	117
11·5·4	电磁干扰的判断及防护措施	119
11·6	浪涌电压及浪涌电流	122
11·6·1	由馈电线路故障产生的反常电压	122
11·6·2	由雷击产生的反常电压	127

11·6·3	考虑防止反常电压的方法	129
11·6·4	轨道电路保安器	131
12· 轨道电路的可靠性和维修管理		
12·1	轨道电路的可靠性	134
12·1·1	故障—安全和可靠性	134
12·1·2	可靠性的尺度	134
12·1·3	提高可靠性的措施	138
12·1·4	实际数据	141
12·2	维修调整程序图的使用方法	144
12·3	轨道电路的测试仪器	146
12·3·1	音频轨道电路电压表	146
12·3·2	音频钢轨电压电流表	148
12·3·3	信号电压表、信号电流表	149
12·3·4	频率测试器	149
12·3·5	信号精密相差表 (R式)	150
12·3·6	精密万用相位表	151
12·3·7	轨道电路参数简易测试器	152
12·3·8	轨道电路绝缘试验器	153
12·3·9	ATC移动测试架	154
12·3·10	电气试验车	154
[附录 1]	信号工程规范 (摘要)	155
[附录 2]	信号设计施工标准 (摘要)	158
[附录 3]	铁路信号的图例及符号	182
[附录 4]	电化铁路术语集	184
[附录 5]	相对分贝图表	188
[附录 6]	绝对分贝图表	188
[附录 7]	计算程序	189
[附录 8]	各种轨道电路干扰电流的允许范围	196

8. 轨道电路参数

8.1 什么是轨道电路参数

闭路式轨道电路，是有线传输的一种形式。钢轨相当于通信电缆的芯线，枕木及道碴相当于乙烯基或聚乙烯等的绝缘层。在电路理论上，与图 8.1 所示分布参数的四端网络是等效的。图中的 1—1' 是输入端子（送电端），2—2' 是输出端子（受电端）。本章出现的基本公式，在第 9 章的轨道电路计算中还将引用。

（1）一次参数的概念

为能理解轨道电路的一次参数，先从轨道的构造来考虑。假定枕木及道床的电阻为无限大，将轨间的静电电容予以忽视，剩下的电路参数则是轨道的钢轨电阻及钢轨电感两种，包括引接线等的电阻。在一个轨道电路的钢轨接通角频率为 ω 的交流电流时，钢轨电阻 R 及钢轨电抗 ωL 的向量和则为钢轨阻抗 $\dot{Z}$ 。 L 为钢轨电感。假定钢轨阻抗等于 0，仅考虑枕木及道床以及其他钢轨间存在的电路参数，则为漏泄导纳 $\dot{Y}$ 。 $\dot{Y}$ 的实数部分为漏泄电导 G ，将虚数部分除以 ω ，则为分布电容 C 。轨道电路的一次参数是 R 、 L 、 G 、 C 的总称，因而 $\dot{Z}$ 、 $\dot{Y}$ 也是一次参数。

一般，单位长度 (1km) 的 R 、 L 、 G 、 C 及 $\dot{Z}$ 、 $\dot{Y}$ ，分别为 r 、 l 、 g 、 c 、及 $\dot{z}$ 、 $\dot{y}$ ，仍是一次参数。亦即，单位长度的参数乃为基本参数（参看表 8.1 的上半部分）。

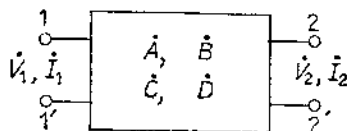


图 8.1 传输四端网络的 4 个系数

（2）从电路理论说明一次参数

将图8·1的受电端2—2'接以负载，送电端1—1'给以电压 $\dot{V}_1$ ，时，假定1—1'流入的电流是 $\dot{I}_1$ ，2—2'的电压是 $\dot{V}_2$ ，流经负载的电流为 $\dot{I}_2$ ，在 $\dot{V}_1$ 、 $\dot{V}_2$ 、 $\dot{I}_1$ 、 $\dot{I}_2$ 间，采用四端网络的系数 A 、 B 、 C 、 D 时，可构成如下的基本方程式：

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (8.1) \quad \textcircled{1}$$

因轨道电路为可逆电路，有如下关系：

$$\dot{A} \dot{D} - \dot{B} \dot{C} = 1 \dots\dots\dots (8.2)$$

如使参数平均分布时：

$$\dot{A} = \dot{D} \dots\dots\dots (8.3)$$

则为对称电路网。

如为对称电路网，在将受电端短路时，由于 $\dot{V}_2 = 0$ ，(8·1)式则为：

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (8.4)$$

以 $\dot{V}_1 = \dot{B} \dot{I}_2$ 及 $\dot{I}_1 = \dot{D} \dot{I}_2$ 两式分别除以各边，使 $\dot{V}_1 / \dot{I}_1 = \dot{Z}_s$ 时：

$$\dot{Z}_s = \frac{\dot{B}}{\dot{D}} = \frac{\dot{B}}{\dot{A}} \dots\dots\dots (8.5)$$

$\dot{Z}_s$ ，为受电端短路时，从送电端的视入短路阻抗。

将受电端开路时 $\dot{I}_2 = 0$ 。同样，再使 $\dot{V}_1 / \dot{I}_1 = \dot{Z}_0$ 时：

$$\dot{Z}_0 = \frac{\dot{D}}{\dot{C}} = \frac{\dot{A}}{\dot{C}} \dots\dots\dots (8.6)$$

$\dot{Z}_0$ ，为受电端开路时，从送电端的视入开路阻抗。

① 表示 $\dot{V}_1 = \dot{A} \dot{V}_2 + \dot{B} \dot{I}_2$ 及 $\dot{I}_1 = \dot{C} \dot{V}_2 + \dot{D} \dot{I}_2$ 两式

其次, 如图 8·2 所示分布参数的四端网络, 上图表示从送电端相隔 x 距离及 $x + \Delta x$ 距离而划分的, 非常短的 Δx 区段的四端网络。下左图表示 Δx 区段的钢轨阻抗, 下右图表示 Δx 区段的漏泄导纳。

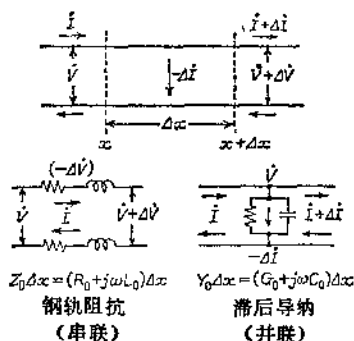


图 8·2 分布参数电路 Δx 区段的等效电路

Δx 区段的电压衰减为 $-\Delta V$ 。如为集中参数电路时, $\Delta V = (\Delta R + j\omega L)\dot{I}$, 但由于电压电流为距离 x 及时间 t 的函数, 如分别以瞬时值 Δv 及瞬时值 i 表示时, 可成立如下的微分方程式:

$$\Delta v = -\Delta R \cdot i - \Delta L \frac{\partial i}{\partial t} \dots\dots\dots (8 \cdot 7)$$

同样, 如轨间的积蓄电荷以 ∂q 表示时, 漏泄导纳的电流变化量:

$$\Delta i = -\Delta G \cdot v - \frac{\partial}{\partial t} (\Delta q) \dots\dots\dots (8 \cdot 8)$$

式中: $\Delta q = v \Delta C$

如将 Δx 区段的 ΔR 、 ΔL 、 ΔG 、 ΔC 各参数, 用一次参数的概念所述的按单位长度的参数 r 、 l_r 、 g 、 c 表示时:

$$\left. \begin{aligned} \Delta R &= r \Delta x, \quad \Delta L = l_r \Delta x \\ \Delta G &= g \Delta x, \quad \Delta C = c \Delta x \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8 \cdot 9)$$

R 、 L 、 G 、 C 的单位, 分别为 Ω 、 H 、 S 、 F 时, r 、 l_r 、 g 、 c 的单位, 应为 Ω/km , H/km , S/km , F/km 。

同样, 电压的衰减比例为 $-\frac{\partial v}{\partial x}$, 电流的衰减比例为 $-\frac{\partial i}{\partial x}$ 时, 可用下式表示。

$$\left. \begin{aligned} -\Delta v &= -\frac{\partial v}{\partial x} \Delta x \\ -\Delta i &= -\frac{\partial i}{\partial x} \Delta x \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8.10)$$

将 (8.9) 式与 (8.10) 式代入 (8.7) 式及 (8.8) 式时,

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial v}{\partial x} &= r i + l_r \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= g v + c \frac{\partial v}{\partial t} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8.11)$$

即为传输的基本方程式。

假定电压 v 及电流 i 为正弦波, 将

$$v = V e^{j\omega t}, \quad i = I e^{j\omega t} \dots\dots\dots (8.12)$$

代入 (8.11) 式。以向量表示时, 则为:

$$-\frac{d\dot{V}}{dx} = (r + j\omega l_r) \dot{I} \dots\dots\dots (8.13a)$$

$$-\frac{d\dot{I}}{dx} = (g + j\omega c) \dot{V} \dots\dots\dots (8.13b)$$

右边括号内, 分别为单位长度的钢轨阻抗及漏泄导纳, 以 $\dot{z}$ 、 $\dot{y}$ 表示时, (8.13a、b) 式则为:

$$-\frac{d\dot{V}}{dx} = \dot{z} \dot{I} \dots\dots\dots (8.14a)$$

$$-\frac{d\dot{I}}{dx} = \dot{y} \dot{V} \dots\dots\dots (8.14b)$$

以上各方程式出现的轨道电路的一次参数如表 8.1 上半部所示, 一次参数与轨道电路长度 (控制区段长度) l 的关系, 如下式所示。

$$\left. \begin{aligned} R &= r l, \quad L = l_r l, \quad G = g l, \quad C = c l \\ \dot{Z} &= \dot{z} l, \quad \dot{Y} = \dot{y} l \end{aligned} \right\} \dots\dots (8.15)$$

与轨道电路关系密切的漏泄电阻 R_b ，为单位长度漏泄电导 g 的倒数，即，

$$R_b = \frac{1}{g} \dots\dots\dots (8.16)$$

最近，在轨道电路的传输电路中，多采用较漏泄电阻更为方便的漏泄电导。

(3) 二次参数和传输方程式的一般解法

为明确传输的性质，解 (8.14式)。将 (8.14a) 式以 x 微分代入 (8.14b) 式。然后，相反的再微分 (8.14b) 式代入 (8.14a)

表8.1 轨道电路参数的符号和单位

	符 号	单 位	名 称
一 次 参 数	R	Ω	钢轨电阻 {直流时，直流电阻} {交流时，有效电阻}
	r	Ω/km	单位长度的钢轨电阻 {同上}
	L	mH	钢轨电感 ($L_i + L_e$)
	l_r	mH/km	单位长度的钢轨电感
	G	σ	漏泄电导
	g	σ/km	单位长度的漏泄电导
	R_b	$\Omega \cdot \text{km}$	单位长度的漏泄电阻 ($1/g$)
	C	μF	静电电容
	c	$\mu\text{F}/\text{km}$	单位长度的静电电容
	$Z \angle \phi_z$	$\Omega \angle \text{deg}$	钢轨阻抗 ($R + j\omega L$)
	$z \angle \phi_z$	$\Omega/\text{km} \angle \text{deg}$	单位长度的钢轨阻抗
	$Y \angle \phi_y$	$\sigma \angle \text{deg}$	漏泄导纳 ($G + j\omega C$)
	$y \angle \phi_y$	$\sigma/\text{km} \angle \text{deg}$	单位长度的漏泄导纳
二 次 参 数	$Z_K \angle \phi_k$	$\Omega \angle \text{deg}$	特性阻抗
	$\theta \angle \phi_\theta$	$\angle \text{deg}$	传播常数
	$\gamma \angle \phi_\gamma$	$\text{km}^{-1} \angle \text{deg}$	分布参数电路的传播常数 ($\alpha + j\beta$)
	α	dB/km	衰耗常数
	β	deg/km	相位常数
	$Z_S \angle \phi_S$	$\Omega \angle \text{deg}$	短路阻抗 (按方向分别为 $\dot{Z}_{S1}$ 、 $\dot{Z}_{S2}$)
	$Z_O \angle \phi_O$	$\Omega \angle \text{deg}$	开路阻抗 (按方向分别为 Z_{O1} 、 Z_{O2})

式时，可得出如下的传输方程式：

$$\frac{d^2 \dot{V}}{dx^2} = \dot{z} \dot{y} \dot{V} \dots\dots\dots (8 \cdot 17a)$$

$$\frac{d^2 \dot{I}}{dx^2} = \dot{z} \dot{y} \dot{I} \dots\dots\dots (8 \cdot 17b)$$

解 (8·17a) 式，假定按位置 x 变化的电压，

$$\dot{V} = \dot{A}_0 \varepsilon^{rx} \dots\dots\dots (8 \cdot 18)$$

由于 $\frac{d^2 \dot{V}}{dx^2} = \dot{\gamma}^2 \dot{A}_0 \varepsilon^{rx} = \dot{\gamma}^2 \dot{V}$ ，如 $\dot{\gamma} = \pm \sqrt{\dot{z} \dot{y}}$ 时，解 (8·17a) 式即为 (8·18) 式。因而 (8·17a) 式的一般解法，则为：

$$\dot{V} = \dot{A}_0 \varepsilon^{-rx} + \dot{B}_0 \varepsilon^{rx} \dots\dots\dots (8 \cdot 19)$$

$\dot{A}_0$ 及 $\dot{B}_0$ 为由边界条件确定的积分常数。

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\dot{z} \dot{y}} \dots\dots\dots (8 \cdot 20)$$

如此确定的 $\dot{\gamma}$ ，称为传播常数。 $\dot{\gamma}$ 与区段长 l 之积也称传播常数，以 θ 表示。将 $\dot{\gamma}$ 划分为实数部分及虚数部分时：

$$\dot{\gamma} = \alpha + j\beta \dots\dots\dots (8 \cdot 21)$$

α 为衰耗常数，在表示单位长度的电压、电流，以及功率衰耗时使用。 $\dot{z}$ 及 $\dot{y}$ 的单位分别为 $\Omega/\text{km} \angle \text{deg}$ ， $\text{S}/\text{km} \angle \text{deg}$ ， α 的单位为 Np/km ①，如乘以 8.686 时，可用 dB/km 表示。

β 为相位常数，在表示轨道电路单位长度的电压以及电流的相位偏移时使用。单位为 deg/km 。

将 (8·19) 式用双曲线函数方程式② 表示时：

$$\dot{V} = (\dot{A}_0 + \dot{B}_0) \cosh \dot{\gamma} x + (\dot{B}_0 - \dot{A}_0) \sinh \dot{\gamma} x$$

作如下变换 $\dot{A}_0 + \dot{B}_0 = \dot{A}$ ， $\dot{B}_0 - \dot{A}_0 = \dot{B}$ 时，则：

① Np (奈培) 也可写为 nep ， θ 的单位为 Np 或为 dB

② $e^{\alpha x} = \cosh \alpha x + \sinh \alpha x$ ， $e^{-\alpha x} = \cosh \alpha x - \sinh \alpha x$

$$\dot{V} = \dot{A} \cosh \dot{\gamma} x + \dot{B} \sinh \dot{\gamma} x \dots\dots\dots (8.22)$$

此即 (8.17a) 式的一般解法。

由于与电流有关的 (8.17b) 式与 (8.17a) 式同形, 可用同样的方法作为一般解法, 但从 (8.14a) 式来看, 将 $\dot{V}$ 以 x 微分时亦可求得。所以如将 (8.22) 式微分时^①,

$$\frac{d\dot{V}}{dx} = \dot{\gamma} (\dot{A} \sinh \dot{\gamma} x + \dot{B} \cosh \dot{\gamma} x)$$

从上式及 (8.14a) 式可得出,

$$\begin{aligned} \dot{I} &= -\frac{\dot{\gamma}}{z} (\dot{A} \sinh \dot{\gamma} x + \dot{B} \cosh \dot{\gamma} x) \\ &= -\sqrt{\frac{\dot{y}}{z}} (\dot{A} \sinh \dot{\gamma} x + \dot{B} \cosh \dot{\gamma} x) \\ &\dots\dots\dots (8.23) \end{aligned}$$

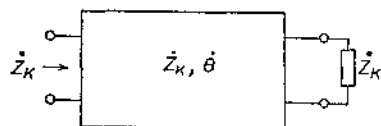
如将特性阻抗定为,

$$\dot{Z}_K = \sqrt{\frac{z}{y}} \dots\dots\dots (8.24)$$

(8.23) 式则为:

$$\dot{I} = -\frac{1}{\dot{Z}_K} (\dot{B} \cosh \dot{\gamma} x + \dot{A} \sinh \dot{\gamma} x) \dots\dots\dots (8.25)$$

如图 8.3 所示, 将受电端以特性阻抗为终端时, 从送电端的视入阻抗则与特性阻抗相等。亦即受电端阻抗是在匹配的状态。



(4) 电压分布和电流分布 图8.3 以特性阻抗为终端的四端网络

其次加以某一边界条件确定积分参数 $\dot{A}$ 及 $\dot{B}$ 。假定受电端电

① $\frac{d}{dx} \cosh ax = a \sinh ax, \quad \frac{d}{dx} \sinh ax = a \cosh ax$

压为 $\dot{V}_2$, 受电端电流为 $\dot{I}_2$ 。由于受电端 $x=l$, (8.22) 式则为:

$$\dot{V}_2 = \dot{A} \cosh \dot{\gamma} l + \dot{B} \sinh \dot{\gamma} l$$

同样, (8.25) 式则为:

$$\dot{I}_2 = -\frac{1}{\dot{Z}_K} (\dot{B} \cosh \dot{\gamma} l + \dot{A} \sinh \dot{\gamma} l)$$

从以上二式:

$$\dot{A} = \dot{V}_2 \cosh \dot{\gamma} l + \dot{Z}_K \dot{I}_2 \sinh \dot{\gamma} l$$

$$\dot{B} = -\dot{Z}_K \dot{I}_2 \cosh \dot{\gamma} l - \dot{V}_2 \sinh \dot{\gamma} l$$

将 $\dot{A}$ 及 $\dot{B}$ 代入 (8.22) 式及 (8.25) 式, 则:

$$\dot{V} = \dot{V}_2 \cosh \dot{\gamma} (l-x) + \dot{Z}_K \dot{I}_2 \sinh \dot{\gamma} (l-x) \dots\dots (8.26a)$$

$$\begin{aligned} \dot{I} &= \dot{I}_2 \cosh \dot{\gamma} (l-x) \\ &+ \frac{\dot{I}}{\dot{Z}_K} \dot{V}_2 \sinh \dot{\gamma} (l-x) \dots\dots\dots (8.26b) \end{aligned}$$

即为在距送电端为 x 距离处的轨间电压及钢轨电流的方程式。

送电端电压 $\dot{V}_1$ 及送电端电流 $\dot{I}_1$, 在 (8.26a、b) 式中, 可使 $x=0$, 即:

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_2 \cosh \dot{\gamma} l + \dot{Z}_K \dot{I}_2 \sinh \dot{\gamma} l \dots\dots\dots (8.27a)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 \cosh \dot{\gamma} l + \frac{1}{\dot{Z}_K} \dot{V}_2 \sinh \dot{\gamma} l \dots\dots\dots (8.27b)$$

这一方程式, 为计算轨道电路参数不可缺少的重要方程式。

8.2 钢轨的直流电阻

钢轨的直流电阻很低。表 8.2 仅是钢轨的电阻值, 在不是长钢轨时, 还必须加以接续线的电阻。钢轨接头部分的等效电路, 如图 8.4 所示。接续线本身的电阻 R_B (表 1.6) 加上接触电阻

$2R_s$ ，用实测值平均时，焊接式接续线为 $30\sim 60\mu\Omega$ ，塞钉式接续线约为 $150\mu\Omega$ 。

表8-2 钢轨的直流电阻

类	型	每米 ($\mu\Omega$)	轨道电路参数 ($m\Omega/km$) $\ominus$
30	kg PS	49.9	99.8
37	kg PS	41.1	82.2
45	kg 高T	33.0	66.0
50	kg PS	31.6	63.2
61	kg 沟形	25.0	50.0
69	kg 沟形	22.0	44.0

$\ominus$ 不包括接续线等

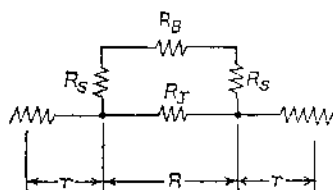


图8-4 钢轨接头部分的等效电路

R ：总电阻

R_B ：接续线本身的电阻

R_S ：接续线及钢轨的接触电阻

R_J ：钢轨接头的接触电阻

r ：1米钢轨的电阻

$$R = \frac{R_t(R_B + 2R_S)}{R_B + 2R_S + R_J}$$

8.3 钢轨阻抗

(1) 钢轨阻抗的形成和定义

将钢轨阻抗作为电路参数分类时，如下式所示：

式中： ω 为交流的角频率，()内表示单位长度的参数。

$$\text{钢轨阻抗：}\bar{Z} = R + j\omega L \quad (z = r + j\omega l_r) \quad \dots\dots (8.28)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{钢轨有效电阻：} R(r) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{钢轨电抗：}\omega L = \omega L_i + \omega L_e \quad (\omega l_r = \omega l_i + \omega l_e) \quad \dots\dots (8.29) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{内部电抗：}\omega L_i \quad (\omega l_i) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{外部电抗：}\omega L_e \quad (\omega l_e) \end{array} \right.$$

$$\text{钢轨电感: } L = L_i + L_e (l_r = l_i + l_e) \dots\dots\dots (8 \cdot 30)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{内部电感: } L_i(l_i) \\ \text{外部电感: } L_e(l_e) \end{array} \right.$$

$$\text{钢轨阻抗: } \dot{Z} = \dot{Z}_i + \dot{Z}_e (\dot{z} = \dot{z}_i + \dot{z}_e) \dots\dots\dots (8 \cdot 31)$$

$$\text{内部阻抗: } \dot{Z}_i = R + j\omega L_i (\dot{z}_i = r + j\omega l_i) \dots\dots\dots (8 \cdot 32)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{钢轨有效电阻: } R(r) \\ \text{内部电抗: } \omega L_i(\omega l_i) \end{array} \right.$$

$$\text{外部阻抗: } \dot{Z}_e = j\omega L_e (\dot{z}_e = j\omega l_e) \dots\dots\dots (8 \cdot 33)$$

钢轨阻抗的形成以向量表示时如图 8·5 所示, 随着频率增加, 三角形也变大。

钢轨的有效电阻, 是当交流电流接通钢轨时, 将钢轨内产生的焦耳热的一个周期的平均值除以电流的一个周期的自乘平均值。

钢轨的内部电感, 是接通电流后将钢轨内部积蓄的磁能的一个周期的平均值除以电流的自乘平均值; 内部电抗, 是再乘以电流的角频率 ω 。

钢轨的外部电感, 与钢轨外部积蓄的磁能有关, 与上述定义相同。

(2) 钢轨阻抗的计算方程式和特点

由于钢轨形成复杂的断面, 接通电流时的磁通分布难以用计算求得。但是, 实测的磁通分布如图 8·6 所示, 在稍离钢轨时即形成同心圆的状态。这与圆周同钢轨断面的边长相等的圆形断面导体接通电流时产生的磁通分布极为相似, 为等效圆柱导体。等效圆柱导体阻抗的理论方程式, 可作为钢轨阻抗的近似方程式使用。

等效圆柱导体的半径以 α [m], 钢轨材质的相对导磁系数以 μ_r

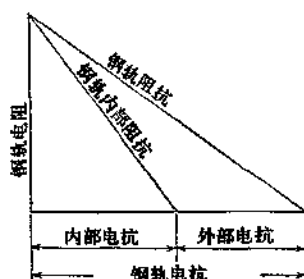


图8·5 钢轨阻抗的形成

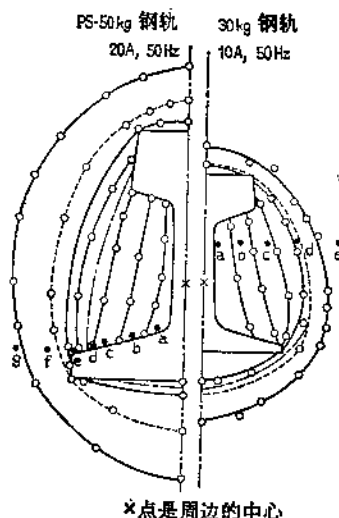


图8-6 钢轨周边的磁通分布

钢轨电阻系数以 $\rho [\Omega \cdot \text{m}]$ ，空间的导磁系数以 μ_0 ($= 4\pi \times 10^{-7}$) $[\text{H/m}]$ ，频率以 $f [\text{Hz}]$ 表示时，单位长度轨道电路的钢轨有效电阻 r 及钢轨内部电抗 ωl_i ，可用下式计算。 l_i 为钢轨内部电感。

$$r = 2\sqrt{\frac{\mu_0}{4\pi}} \cdot \sqrt{\frac{\mu_r f \rho}{a}} \dots \dots \dots (8.34)$$

$$\omega l_i = 2\pi f l_i = 2\sqrt{\frac{\mu_0}{4\pi}} \cdot \sqrt{\frac{\mu_r f \rho}{a}} \dots \dots \dots (8.35)$$

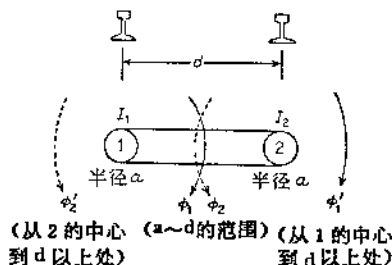


图8-7 钢轨外部的磁通