

交流电气化铁道

吸流变压器和回流线装置

人民铁道出版社

电气化铁道 吸流变压器和回流线装置

缪耀珊 编

人 民 铁 道 出 版 社

1979年·北京

内 容 提 要

书中主要介绍吸流变压器的防干扰原理及进一步提高装置的防护效果的方法,分析了装置对牵引供电系统的影响,并叙述了该装置的试验结果和设计、计算方法。

读者对象:从事铁道电气化供电、通信线防护的设计、运营人员学习用。

交流电气化铁道 吸流变压器和回流线装置

缪耀珊 编

人民铁道出版社出版

责任编辑:周秋枫 封面设计:赵敬宇

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民铁道出版社印刷厂印

开本: 787×1092 1/32 印张: 3.25 字数: 68 千

1979年5月第1版 1979年5月第1次印刷

印数: 0001—6,000 册

统一书号: 15043·5125 定价: 0.36 元

前 言

多年的实践表明，交流电气化铁道对邻近通信线路的干扰影响及其防护，已成为铁道电气化高速发展的严重障碍。这一问题已经引起我国有关领导部门的高度重视。从1964年起就组织了有关科研、设计部门的力量对防干扰的问题进行了许多试验研究工作。在交流电气化铁道牵引供电系统中采取措施以防止对通信线的干扰影响方面，大致有三种方法：采用吸流变压器——回流线装置；采用自耦变压器方式及采用同轴电力电缆供电方式。

1974年初，我国第一次在干线铁道电气化区段中试验安装了吸流变压器——回流线装置，其后，又陆续在其它干线铁道电气化工程中正式采用了上述装置，并进行了多次大规模的试验，取得了较好的防护效果。现在，吸流变压器——回流线装置已成为交流电气化铁道防止对通信线干扰影响的一种有效手段，获得了普遍的应用。

本书是几年来在吸流变压器——回流线装置的设计、运营和试验经验的基础上编写而成的。书中主要介绍了吸流变压器的防干扰原理和进一步提高装置防护效果的方法，分析了装置对牵引供电系统的影响，并介绍了装置的试验结果和设计计算方法。

本书可供从事铁道电气化供电和通信线防护的设计和运营人员参考。由于编者水平有限，错误和不妥之处在所难免，欢迎读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 交流电气化铁道对邻近通信线路的影响·····	1
第一节 电气化铁道钢轨回路内的电流和电压·····	1
第二节 危险电压影响·····	4
第三节 杂音干扰影响·····	9
第四节 电气化铁道对通信线影响的允许标准·····	11
第二章 吸流变压器的防干扰原理·····	14
第一节 吸流变压器的工作原理·····	14
第二节 影响吸——回装置防护效果的主要 因素·····	16
第三节 接触网短路条件下吸——回装置的 防护效果·····	23
第三章 进一步提高吸——回装置防护效果的 方法·····	25
第一节 合理选择回流线在接触网支柱上的位置·····	25
第二节 合理确定吸上线的位置·····	25
第三节 合理确定吸流变压器间的距离·····	27
第四节 合理选择吸流变压器的变比·····	27
第四章 吸——回装置对牵引供电系统的影 响·····	32
第一节 对牵引网单位阻抗的影响·····	32
第二节 钢轨对地电位的影响·····	40
第三节 对牵引网电压损失和电能损失的影响·····	43
第四节 对牵引变电所接地网回流分布的影响·····	47
第五节 对接触网运行条件的影响·····	49

第五章 吸——回装置的设计与运行	51
第一节 吸流变压器的负载阻抗	51
第二节 吸流变压器容量选择	53
第三节 吸流变压器的分布方案和主结线	54
第四节 吸——回装置防护效果的实用计算方法	56
第五节 吸——回装置的运行与维护	64
第六章 吸——回装置的试验	67
第一节 第一次试验结果	67
第二节 第二次工程试验	78
第三节 进一步提高吸——回装置防护效果 的试验	84

第一章 交流电气化 铁道对邻近通信线路的影响

交流电气化铁道的牵引网是一种不对称供电回路。作为送电导线的接触网是由承力索和钢铝电车线并联组成，担任回流导线的则是钢轨和大地。这种不对称供电回路在其周围空间产生的电场和磁场，对邻近的通信线路将引起危险感应电压和杂音干扰电压。

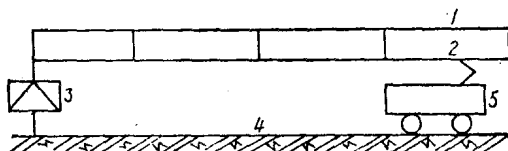


图 1—1 交流电气化铁道牵引网的构成

1 —— 承力索； 2 —— 接触导线； 3 —— 牵引变电所； 4 —— 钢轨，
5 —— 电力机车。

危险感应电压可能造成对通信设备和使用通信设备的工作人员人身安全的威胁。杂音干扰电压则使通信线的通话质量降低。因此，有必要采取措施，使电气化铁道对通信线的影响不超过规定标准。

高压线对通信回路的影响，还与通信线的类型有关。通信线回路的对称程度越高，受邻近高压导线影响的敏感程度就越小。

第一节 电气化铁道 钢轨回路内的电流和电压

为了计算和分析电气化铁道对通信线的感应影响，需要弄清楚牵引电流在钢轨内的分布状况。图 1—2 表示接触网

内有一个机车负荷的简单情况。假定负载（机车）离电源点较远，以在回流点附近的地中电流已不影响负载点的电流分布。由于钢轨和大地间存在着过渡电阻，钢轨内的电流分布呈U型曲线变化。在距离负载点 b 为 x 公里处的钢轨电流为：

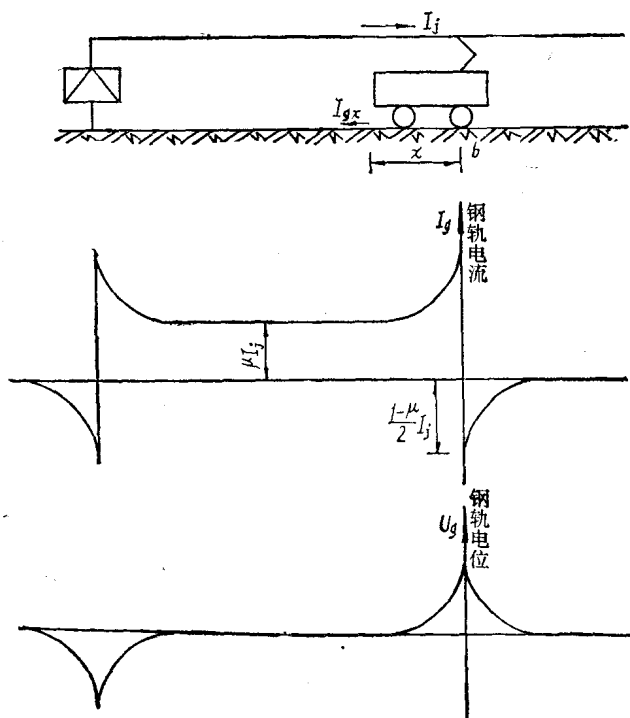


图 1—2 电气化铁道钢轨回路内的电流和电压

$$\dot{I}_{gx} = -\dot{I}_j \left[\mu + \frac{1-\mu}{2} e^{-\gamma x} \right] \quad (1-1)$$

式中 μ ——钢轨感应电流系数，

$$\mu = \frac{Z_{j0}}{Z_g}$$

其中 Z_{ij} ——接触网与钢轨间的单位互阻抗，欧/公里，

Z_g ——当量钢轨的单位自阻抗，欧/公里；

I_j ——接触网电流，安；

γ ——钢轨回路的传播常数，公里⁻¹，

$$\gamma = \sqrt{\frac{Z_g}{r_s}}$$

其中 r_s ——钢轨和大地间的过渡电阻。

从 (1-1) 式可见，任意点钢轨内的电流是由两个分量组成的。其一为感应分量，即由接触网电流通过互感耦合在钢轨内产生的感应电流 μI_j 。除了感应电流之外，另一部分称作传导电流分量。它沿负载两侧的钢轨逐渐泄入大地。这部分电流在通过钢轨与大地间的横向过渡电阻泄入大地时，将造成钢轨对地电位的升高。钢轨的对地电位，以机车负载处为最高。随着与负载点距离的改变，钢轨对地电位呈指数衰减曲线下降。在通常情况下，距负载为 3~5 公里，以远时，钢轨中将只剩下感应电流分量，其钢轨电位已基本上等于大地的零电位。自负载点 b 向远离电源方向以及自电源点向远离负载点方向的钢轨内，也有传导电流流过。可以认为，负载点两侧钢轨内的传导电流分量是对称的。因此，当通信线沿整个供电臂向两侧延伸若干距离条件下，在负载至回流点范围之外钢轨中的电流，起着削弱钢轨屏蔽效应的作用。实际上当负载点距离回流点较远时，在负载点和回流点两侧钢轨中的传导电流分量对通信线的感应影响正好是互相抵消的。此时的钢轨屏蔽系数可按 (1-2) 式计算。

$$\lambda_g = 1 - \mu \quad (1-2)$$

式中 λ_g ——钢轨的屏蔽系数。

当通信线在供电臂范围内不向两侧延伸时，在供电臂外

两侧钢轨内的电流对通信线不产生感应影响，从而加强了钢轨的屏蔽作用。这种情况称作“终端效应”。此时钢轨的平均屏蔽系数可按（1—3）式计算。

$$\lambda_g = (1 - \mu) \left[1 - \frac{1}{\gamma l} (1 - e^{-\gamma l}) \right] \quad (1-3)$$

式中 l —— 负载至回流点的距离，公里。

当通信线距电气化铁道较近时，钢轨的屏蔽系数还应考虑接触网和钢轨由于位置不同造成对通信线互感差异的影响。这时的钢轨屏蔽系数可按（1—4）式计算。

$$\lambda_g = 1 - \frac{Z_{gT}}{Z_{iT}} \cdot \mu \quad (1-4)$$

式中 Z_{gT} —— 钢轨与通信线间的单位互阻抗；

Z_{iT} —— 接触网与通信线间的单位互阻抗，欧/公里。

对于通信线距电气化铁道较近，并在供电臂范围内不向两侧延伸的情况下，其钢轨屏蔽系数应按（1—5）式计算。

$$\lambda_g = \left(1 - \frac{Z_{gT}}{Z_{iT}} \mu \right) \left[1 - \frac{1}{\gamma l} (1 - e^{-\gamma l}) \right] \quad (1-5)$$

钢轨的对地电位可由（1—6）式计算。

$$V_{gx} = \frac{(1 - \mu) I_l \cdot \rho}{2} e^{-\gamma x} \quad (1-6)$$

式中 ρ —— 钢轨回路的波阻抗，欧。

$$\rho = \sqrt{Z_g \cdot r_s}$$

钢轨对地电位的最大值发生在负载点或回流点的钢轨处。其值为：

$$V_{g \cdot \max} = \frac{(1 - \mu) I_l \cdot \rho}{2} \quad (1-7)$$

第二节 危险电压影响

交流电气化铁道对通信线的危险电压影响可分为静电感

应影响和电磁感应影响。

接触网的27.5千伏工频电压在其周围空间产生电场，通过电容耦合，可在位于电场影响范围内的架空通信线上产生静电感应电压。其值可由（1—8）式计算。

$$V_s = KV_i \frac{b \cdot c}{a^2 + b^2 + c^2} \text{ 伏} \quad (1-8)$$

式中 V_s ——架空通信线上的静电感应电压；

K ——系数，对单线电气化铁道可取 $K=0.4$ ，对复线电气化铁道可取 $K=0.6$ ；

V_i ——接触网电压，伏；

a ——通信线对接触网的接近距离，米；

b ——接触悬挂平均高度，取 $b=6$ 米；

c ——通信线平均架设高度，取 $c=5$ 米。

由（1—8）式可见，电气化铁道对架空通信线的静电感应电压是和其接近距离的平方成反比例的。当接近距离增大时，静电感应电压迅速衰减。通常，当接近距离大于90~100米时，对通信线的静电感应电压的影响已可忽略不计。

对于有接地金属外皮的电缆线路，由于外皮的静电屏蔽作用，其芯线将不受接触网静电感应电压的影响。

当接触网内接入电力机车负载时，接触导线和钢轨内的电流虽然在相位上相差接近180°，但它们的幅值往往并不相等。交变电流在其周围空间产生的交变磁场在通信线内将产生电磁感应电压。

对于架空通信明线或长度小于40公里的电缆通信线路，电磁感应电压可按（1—9）式计算。

$$E = I_i \omega M \cdot \lambda_0 \lambda_0 \cdot l \text{ 伏} \quad (1-9)$$

式中 E ——对通信线的电磁感应电压，伏；

λ_0 ——其它与电气化铁道平行的接地金属导体（金属

管道、电缆外皮)的综合屏蔽系数;

ω ——电流的角频率;

$$\omega = 2\pi f = 314$$

M ——接触网和通信线间的单位互感。

对于长度超过40公里的电缆线路,其电磁感应电压可由下式计算。

$$E = I_j \omega M \cdot \lambda_g \cdot \lambda_0 \cdot l \frac{\operatorname{ch} \gamma_A \cdot \frac{l}{2}}{\operatorname{ch} \gamma_A \cdot l} \text{ 伏} \quad (1-10)$$

式中 γ_A ——通信线回路的传播常数。

任意两平行导线间的单位互感可由下式确定:

$$M = \left(1 + 2 \ln \frac{2}{1.78 a \sqrt{4\pi\sigma\omega}} - j \frac{\pi}{2} \right) \cdot 10^{-4} \text{ 亨/公里} \quad (1-11)$$

式中 a ——两导线间的平行接近距离,厘米;

σ ——大地导电率(cgsm单位)。

当电流频率为50赫兹时两导线间的互阻抗等于:

$$Z_M = j\omega M = 0.05 - j0.144(1.53 + \lg a \sqrt{\sigma}) \text{ 欧/公里} \quad (1-12)$$

为了计算方便,通常都将互感系数公式作成诺模图的形式。通过查表可直接得出在不同大地导电率及通信线平行接近距离条件下的互感系数值。图1—3和图1—4是常用的50和800赫电流频率时互感系数计算诺模图。图中 a_1 和 a_2 分别为与电气化铁道斜接近段的起、始端接近距离。 a_3 为当量的计算平行接近距离。在已知 a_1 、 a_2 及大地导电率 σ 的条件下,即可由诺模图直接查出互感系数 M 值。

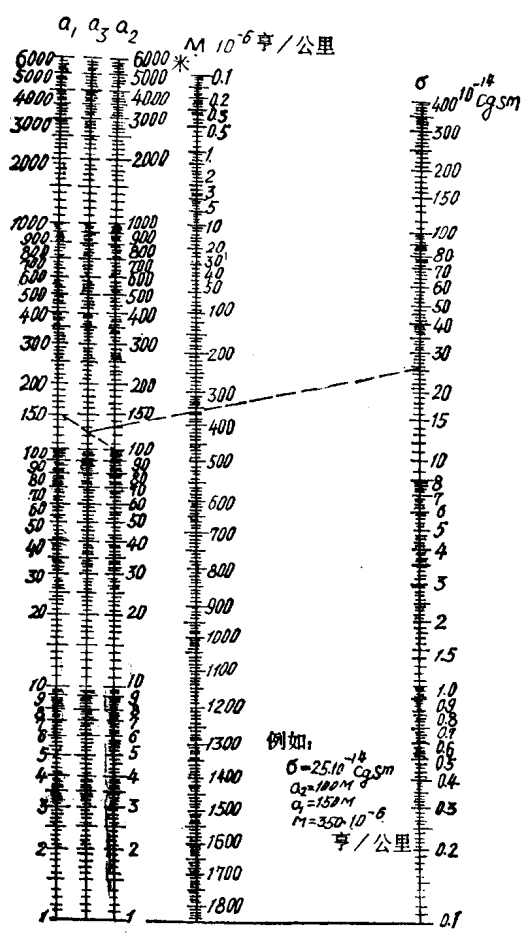


图 1—3 频率为50赫时互感系数诺模图

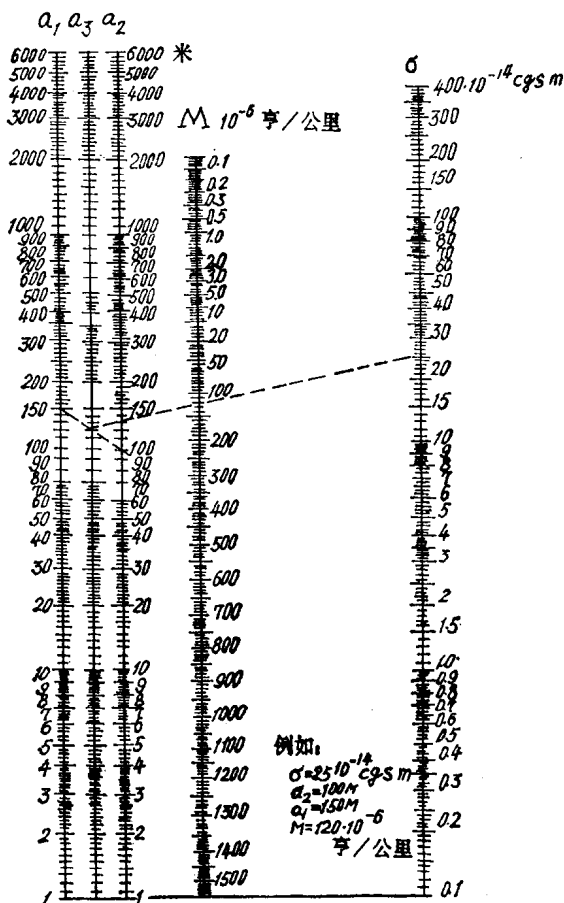


图 1—4 频率为800赫时互感系数诺模图

第三节 杂音干扰影响

我国的交流电力机车现采用硅二极管整流的直流牵引电动机传动方式。近年来，随着大功率可控硅技术的发展，某些国家已积极采用以可控硅取代复杂的调压开关实现无级调压的电力机车。我国试制的大功率韶山 2 型电力机车，也采用了可控硅调压的先进技术。所有这些，使接触网电流中含有大量高次谐波分量，形成对通信线音频话路的严重杂音干扰。

人耳对于不同频率但幅值相同的谐波电流具有不同的灵敏度。用实验的方法可以求出不同频率的谐波电流与 800 赫同一电流的音响作用系数 p 值如表 1—1。根据机车电流谐波含量的试验资料，可将机车电流换算成只含 800 赫单一频率的等效干扰电流。

$$I_e = I_0 \sqrt{\sum (i_K p_K)^2} \quad (1-13)$$

式中 I_e ——800 赫等效干扰电流，安；

I_0 ——机车全电流；

i_K —— K 次谐波含量的百分比；

p_K —— K 次谐波的音响作用系数。

我国韶山 1 型电力机车各次谐波电流含量百分比实测值如表 1—2。

根据表 1—1 和表 1—2 的数据，可求出韶山 1 型电力机车每 100 安培电流的 800 赫等效干扰电流约为 5 安培。

电气化铁道对通信线的杂音干扰电压 U_m 可按下式计算。

当通信线回路长度小于一个单向供电臂时杂音电压的计算公式为：

$$U_m = 10^7 \times M_e \cdot I_e \cdot \lambda_e \cdot \gamma_e \cdot \eta_e \cdot \frac{I_p}{2} \text{ 毫伏} \quad (1-14)$$

人耳对不同频率的音响作用系数 表 1—1

频 率 (赫)	音响系数 $p \cdot 10^{-3}$	频 率 (赫)	音响系数 $p \cdot 10^{-3}$	频 率 (赫)	音响系数 $p \cdot 10^{-3}$
16- $\frac{2}{3}$	0.056	1000	1122	2350	643
50	0.71	1050	1109	2450	625
100	8.91	1100	1072	2550	607
150	35.5	1150	1035	2650	590
200	89.1	1200	1000	2750	571
250	178	1250	977	2850	553
300	295	1300	955	2950	534
350	376	1350	928	3000	525
400	484	1400	905	3200	473
450	582	1450	881	3400	412
500	661	1500	861	3600	335
550	733	1550	842	3800	251
600	794	1600	824	4000	178
650	851	1650	807	4200	116
700	902	1750	775	4400	72.4
750	955	1850	745	4600	43.7
800	1000	1950	720	4800	26.3
850	1035	2050	698	5000	15.9
900	1072	2150	679		
950	1109	2250	661		

韶山 1 型机车电流谐波含量 表 1—2

谐 波 次 数	含 量 百 分 比 %	谐 波 次 数	含 量 百 分 比 %
3	21	17	0.95
5	10	19	0.85
7	6.3	21	0.86
9	4	23	1.08
11	2.5	25	1.68
13	1.6	27	0.61
15	1.1	29	0.55

式中 M_e ——通信线和接触导线间对应于 800 赫频率的互感系数；

λ_e ——对应于 800 赫频率的钢轨屏蔽系数；

γ_e ——电缆外皮和芯线的屏蔽系数；

η_e ——通信线路的杂音敏感系数，对于不同类型的通信线其敏感系数如表 1—3。

通信线回路的敏感系数

表 1—3

通 信 线 类 型		敏 感 系 数 η_e
架 空 明 线	横 担	0.005
	弯 钩	0.01
	单 线	1
电 缆 线 路		0.001

当通信线长度超过一个供电臂长度时，杂音电压的计算公式为：

$$U_m = 2 \times 10^7 M_e I_e \lambda_e \gamma_e \eta_e \frac{\text{sh} \gamma_e l_e \text{sh} \gamma_e \frac{l_p}{2}}{\gamma_e \text{sh} \gamma_e l_a} \quad (1-15)$$

式中 l_p ——供电臂长度，公里；

l_e ——计算点对端至接近段中点的距离，公里；

l_a ——通信线回路长度，公里。

第四节 电气化铁道对通信线影响的允许标准

交流电气化铁道在邻近通信线内产生的危险电压可能对维护人员和通信设备的安全运行造成威胁，而诱生的杂音电压将造成通信质量降低。为了保证通信线路安全和质量良好地运行，应规定通信线受影响的允许标准。