

87.1083
RMT
7

1963年铁路科学技术论文报告会文集

第 7 辑

通 信



1963年铁路科学技术论文报告会文集

第 7 輯

通 信

通信信号专业会議学术委員会选編

人 民 鉄 道 出 版 社

1 9 6 4 年 • 北 京

1963年铁路科学技术论文报告会文集第7辑

通 信

通信信号专业会议学术委员会选编

人民铁道出版社出版、发行

(北京市霞公府甲24号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第010号

人民铁道出版社印刷厂印

书号 1966 开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ 印张 $7 \frac{1}{8}$ 字数 170 千

1964年11月第1版

1964年11月第1版第1次印刷

印数 0001—920 册 定价(科六) 0.95 元

目 录

交流电气化铁道区段架空通信明线的利用.....	1
关于通信导线群几个干扰理论问题的研究.....	9
确定架空通信线路两杆路间允许距离的理论分析和计算方法.....	31
微波接力通信反射鏡式无源中继站的应用.....	48
共线式音频自动电话的基本参数分析.....	64
移频制载波调度遙控设备的研究.....	77

交流电气化铁道区段架空 通信明线的利用

铁道科学研究院 刘见龙

内 容 提 要

本文首先说明了在工频单相交流电气化铁道区段上利用架空通信明线的意义,叙述了危险影响、杂音影响的计算方法和结果,以及影响原因的分析。然后介绍利用架空通信明线需要采取的各项措施,在宝凤段架空通信明线上安装分隔变压器后的测试结果。得出初步结论,认为电气化铁道区段的架空通信明线上采取防护措施,可以大大降低感应电压,在上面开通12路载波电话是可行的,如果缩短中继距离,或加装压缩器、扩展器以提高信号杂音比,开通3路载波电话也是可行的。

一、问题的提出

目前世界各国已公认工频单相交流电气牵引比其他制式的电气牵引具有很多优点,并为很多国家采用。我国铁道电气化也采用工频单相交流的制式,而且已建成宝鸡至凤州的电化区段。由于工频单相交流电化铁道的接触网是不对称的供电系统,它对铁道两旁的通信线路产生严重影响。因此在电化区段不得不埋设高屏蔽通信电缆来代替原来的架空通信明线,以降低通信线路上感应的危险电压和杂音电压。用通信电缆来代替架空明线,还能改善通信质量,提高通信的可靠性和稳定性。到目前为止世界各国均用高屏蔽电缆来解决交流电化铁路区段的通信问题,我国宝一风段也是埋设了特制的电缆。

但是目前生产的高屏蔽通信电缆价格较高,宝凤段的经验表明,通信改建工程的投资约占电化总投资(不计算机车)的30%,通信电缆线路的投资占总投资的20%以上。估计在若干通信线路繁多的铁路区段,此种投资所占比重还要增加。因此如何降低通信改建投资是目前我国铁路电气化所遇到的主要问题之一。解决这个问题的方法大致有下列几方面:

(1)降低高屏蔽通信电缆的造价,电缆制造部门应改进制造工艺,合理核定成本。同时在保证电缆护层具有好的屏蔽性能下研究改变护层结构,以达到降低成本和减少原材料消耗。例如用铝护套来代替铅护套。(2)研制适合铁路专用通信的微波接力和无线通信设备,以代替或部分代替通信和远程控制自动控制所需的有线通道。(3)在接触网上采取若干措施减少影响来源,以降低通信设备改建的数量和要求。(4)设法利用原有架空通信明线。

交流电化铁路区段利用架空通信明线的事例,国外刊物上很少报导。在接触网上装有吸流变压器以减少影响源的情况下,瑞典在 $16\frac{2}{3}$ 赫的交流电化区段继续利用了架空通信明线(距铁路约300米),日本在60赫的交流电化试验区段上作过利用架空通信明线的试验。接触网不加任何措施的情况下,1958年苏联中央邮电科学研究院曾在奥热列里耶—巴维列茨交流电化试验区段进行过利用架空通信明线开通3路载波电话的试验^[1]。1961年苏联在克

拉斯诺雅尔斯克铁路的交流电化区段上利用架空明线作为电缆高频心线的备用线对〔2〕。为了在交流电化区段（接触网不加任何措施的情况下）探索利用架空通信明线的可能性，以及为了积累经验和发现问题起见，曾在宝凤段作过一些试验。本文对交流电化区段架空通信明线能否利用和如何利用等问题进行分析，并得出初步的结论。

二、交流电化铁道接触网对架空通信明线的影响

从利用架空通信明线的角度来看，可将影响的性质分成三个方面，即危险影响，音频范围内杂音影响和载波频带范围内杂音影响，以便分别采取措施。

（1）危险影响：接触网上的电压和电流能在架空通信线上感应较高的对地电位，危及人身和机器的安全。由接触网上电压所产生的影响称为电影响，这时架空通信线上感应的电压 U_e 和电流 I_e 如下式所示：〔3〕

$$\left. \begin{aligned} U_e &= 0.24 U_o \frac{bc}{a^2 + b^2 + c^2} \cdot \frac{l_o}{l} \text{ 伏} \\ I_e &= 1.36 U_o \frac{bc}{a^2 + b^2 + c^2} \cdot \frac{l_o}{n + 2} \times 10^{-3} \text{ 毫安} \end{aligned} \right\} \dots\dots (1)$$

式中 U_o ——接触网上电压（伏），最高为27500伏；

l_o ——接触网和通信线平行长度（公里）；

l ——通信线长度（公里）；

n ——通信线中接地导线数目；

b ——接触网悬挂高度（米）；

c ——通信线悬挂高度（米）；

a ——通信线与接触网间距离（米）。

若令 $l_o = l$ ， $b = 6$ ， $c = 5$ ， U_e 与 a 的关系如图1中实线所示。如果 $l_o = 10$ 公里时，架空线上感应电流 I_e 与 a 的关系如图1中虚线所示（设 $n = 0$ ）。从图上看当 a 较小时，感应电压 U_e 很大，但感应电流 I_e 仅数毫安至数十毫安。如果将架空线经一阻抗接地，可使仅为数毫安的感应电流 I_e 排入地中，而且使感应的对地电位 U_e 也降低到很小（它等于入地电流乘以接地阻抗）。

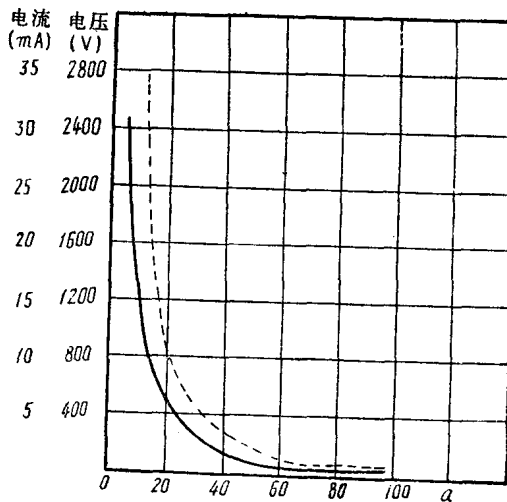


图 1

由接触网中牵引电流在架空通信线上产生的影响称为磁影响。这种影响的计算方法在铁道科学研究院1960年所编写的“交流工频单相交流电气铁道对有线通信设备影响暂定防护规程”中有详细的规定。磁影响在架空通信线上感应的电压 U_m 与牵引电流 I_o 及平行长度 l_o 成正比，与两线间距离 a 及大地导电率 σ 有较复杂的关系。设在单位牵引电流（ $I_o = 1$ 安）和单位平行长度（ $l_o = 1$ 公里）下所感应的电压为 e_m ，它与距离 a 之间的关系如图2所示。如果 I_o 为400安， l_o 为30公里，以图2中 e_m 的数值乘上 $I_o l_o$ 则得到 U_m 将在500~800伏之间（ a 在100米以内，以及各种不同的大地导电率之下）。由于磁影响，在通信线上产生了感应电压，若将被感应的架空通信线两端接地，线中将流过数安至数十安的电流（如果令两端接地电阻

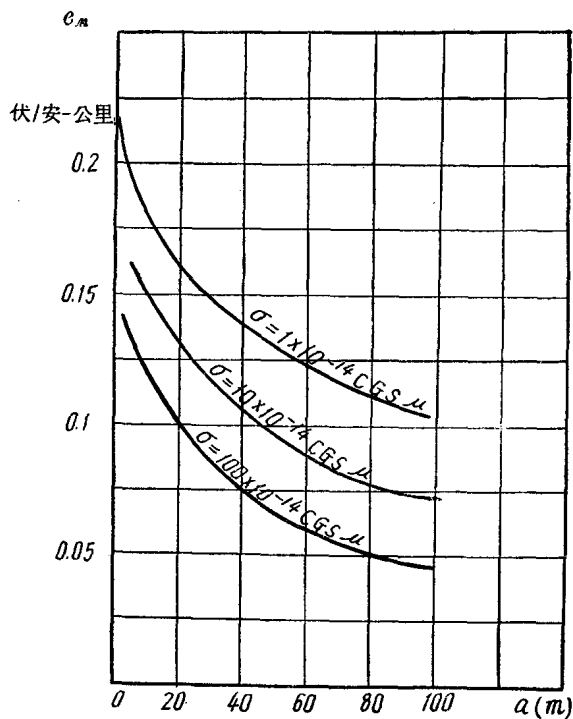


图 2

电容和电感。它对于某一频率的电流产生谐振，因此在谐振频率附近的若干次谐波电流分量显著增大，造成严重的杂音干扰。接触网的谐振频率主要随着接触网长度而变，宝凤段的供电臂长20余公里，谐振频率在1200~1300赫之间。用示波器观察的牵引电流，架空线单线对

为零，则电流等于通信线的单线阻抗除以感应电压 U_m 。

(2) 音频范围的杂音影响，当架空通信线距离接触网大于30米时，由电影响产生的杂音分量较磁影响所产生的杂音分量小很多，完全可以忽略。磁影响所产生的杂音是由于牵引电流中高次谐波所引起的。根据各次谐波计算杂音的方法以及由测试所确定的牵引电流中各次谐波的分量，均在防护规程中作了详细介绍。设牵引电流为300安，平行长度为20公里，通过计算可得出不同大地导电率下杂音电压与两线间距离的关系曲线绘在图3上。

从图3看出，两者间距离虽在200米以上，杂音电压仍达数十毫伏。

架空通信线上音频杂音的一个主要来源是接触网谐振频率电流的影响。牵引电流中各次谐波电流分量原应随着谐波次数的增高而减小，但接触网本身具有分布的

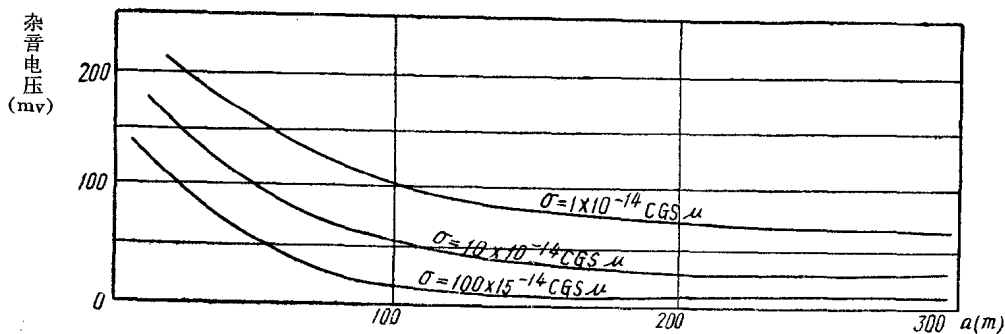


图 3

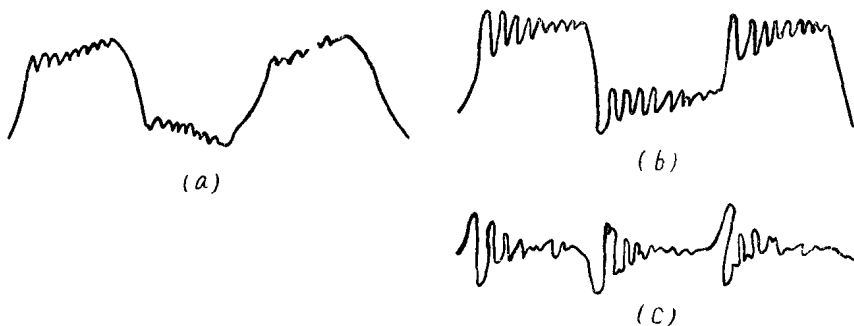


图 4

地电压和双线间杂音电压的波形表示在图4中的a, b和c。牵引电流的波形与正弦波相差很大,且其上具有一个振幅较小频率较高的振荡波,是由于接触网谐振所产生的。在架空线单线对地电压的波形中,这个振荡波更为显著,是因为接触网和架空通信线之间的互感阻抗随着频率成正比增加,频率愈高感应电压愈大。杂音电压的波形中则主要是谐振频率的成分,因架空线线对的敏感系数在1000余赫时比在50赫时大数倍所致。

(3) 载频范围内的杂音影响,牵引电流中包含高频(音频范围以上)成分的情况是非常复杂。国内外的试验表明,还无法找出载频范围内的干扰影响与电机车运行情况之间的关系。苏联曾在交流和直流接触网上进行过载波频带内干扰电平测量,其结果如图5所表示〔3〕〔4〕。我们由于设备条件所限制,未能作此种测试。应该指出,接触网中载频范围内的干扰电平是不恒定的,随着供电系统(接触网和变电所)电力机车种类以及列车运行情况而变。经较长时期在架空通信线上观察载频范围内杂音的结果,可以看出载频频带内产生干扰的原因大致有:(1)虽然牵引电流基波(50赫)的谐波是音频范围内杂音干扰的原因,但在载频频带内,这种谐波分量是很微小的。不过接触网谐振频率电流的多次谐波却是6~10千赫范围内杂音的主要来源。测试表明这一频段中的杂音与音频频段(300~3000)内的杂音成正比地增减。(2)在接触网和机车等设备中产生若干种局部振荡,振荡频率大约在10~30千赫之间,因此在这一频带内某一频率附近产生较强的干扰。(3)机车运行时,集电弓与接触网之间有时发生火花放电,这种放电作用形成一个频带很宽的干扰来源,全部载波频带均受影响。

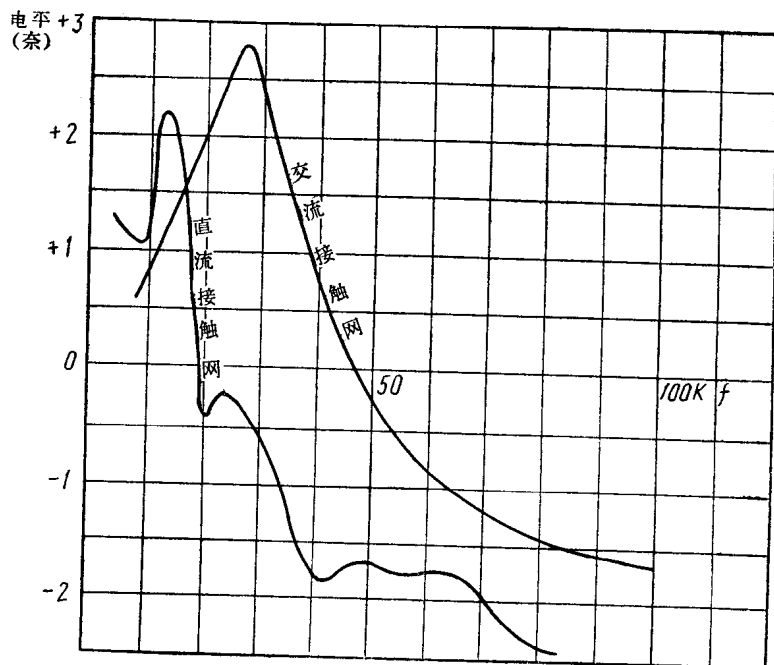


图 5

载频范围内杂音的计算很难得到精确的结果,近似地可以根据图5中曲线上所表示的某一频率的干扰电平,减去接触网与双铜话线间的串音衰耗值而得出杂音电平。在磁感应影响下,接触网与双铜话线间的串音衰耗值B,近似地可由下式求出〔3〕:

$$B = B_1 + B_2 + \ln \sqrt{\frac{Z_{cm}}{Z_{c1}}} \quad (2)$$

$$B_1 = \ln \left| \frac{\gamma_1^2 - \gamma_A^2 \sqrt{Z_{c1} Z_{cm}}}{\omega M_{1A}} \cdot \frac{1}{\gamma_1 + \gamma_A \frac{e^{-\gamma_1 l} - \operatorname{ch} \gamma_A l}{\operatorname{sh} \gamma_A l}} \right| \quad (3)$$

式中

γ_1 ——接触网的传输常数；

γ_A ——单铜话线的传输常数；

l —— $\frac{1}{4}$ 波长 (km)；

Z_{c1} ——接触网的波阻抗；

Z_{cm} ——双铜话线的波阻抗；

ωM_{1A} ——接触网与单铜导线间的互感阻抗；

B_n ——双铜话线的不平衡衰耗。根据通信线的技术条件在150千赫范围内,应大于5奈批；

$$\ln \sqrt{\frac{Z_{cm}}{Z_{c1}}} \approx \ln \sqrt{2} = 0.35。$$

计算表明,在不同大地导电率、不同频率以及变化接触网与通信线间距离的各种情况下, B_1 的值大约在1~5奈间变化。

三、利用架空通信明线需要采取的措施

为了减少架空通信明线上所受到的各种影响,可以采取下述措施。至于在接触上加设备以降低影响来源,本文内不予讨论。

(1) 利用分隔变压器或排流线圈以降低危险影响,上面已提到,磁感应影响与平行长度 l_0 成正比,另一方面如果将线对经一阻抗接地,可使电感应影响降低到很小。因此利用分隔变压器如图6(a)所示的装设方法,可达到此目的。分隔变压器将架空线分成几个较短段落,大大减少了 l_0 ,其中性点经过电容或电阻接地,消除了电感应影响。由于分隔变压器不能承受较大的电流,因此不可直接接地。利用排流线圈的方法如图6(b)所示。其中性点直接接地,因此在每一个接地点,架空线的电位接近零电位。在两排流线圈中间处所虽仍有对地电位存在,但比未装设此种设备以前,要低很多。由于排流线圈中性点直接接地,在磁影响下,架空线和排流线圈中,经常有数安培(最大可达20安)的电流流过。这两种设备也可混合使用。线路上加装了这些设备后,对通信传输上是不利的,因此对这些设备本身的特性(传输衰耗、非线性失真、平衡度以及绝缘和耐压强度等)应有严格的要求。

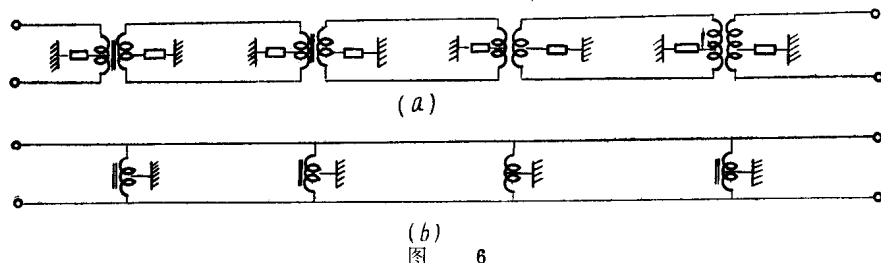


图 6

(2) 降低音频杂音的方法。除了提高通信线对的对地平衡度(也就是减小敏感系数)外,尚无有效降低杂音的方法。因此只有提高送话电平和降低接收灵敏度的方法以增加接收端的信号杂音比。在电话机上加装一半导体放大器大约可提高送话电平1~1.5奈,即信号杂

音比提高 2~4 倍, 也可以说杂音电压相对地减小了 2~4 倍。从图 4 的曲线可看出, 即使采取了这种措施, 当 α 小于 200 米时, 架空线上音频杂音电压还是超过标准很多, 因此难于开通正式使用。但作为维修工作中公务联络之用是完全可以的。

(3) 降低载频范围内杂音影响的方法。在载波机上加装扩展器和压缩器能降低杂音电平 1.5~2.3 奈。另外还可用缩短中继区间长度, 减少线路上的传输衰耗来提高信号杂音比的方法, 以相对地降低杂音电压。实验表明, 电化铁路对载频范围内的杂音影响, 还不是很严重的。

四、测试结果

在宝凤电化区段内, 利用邮电部原有的架空通信线作过测试。架空线与铁路平行, 两者相距最近点少于 10 米, 最远点为 500 米, 估计平均距离在 150~200 米之间。线路全长约 80 公里, 有八处安装了分隔变压器如图 7 所示。这条线路一年多没有使用和维修, 质量很差。

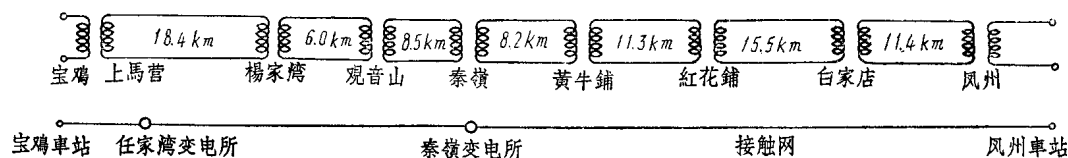


图 7

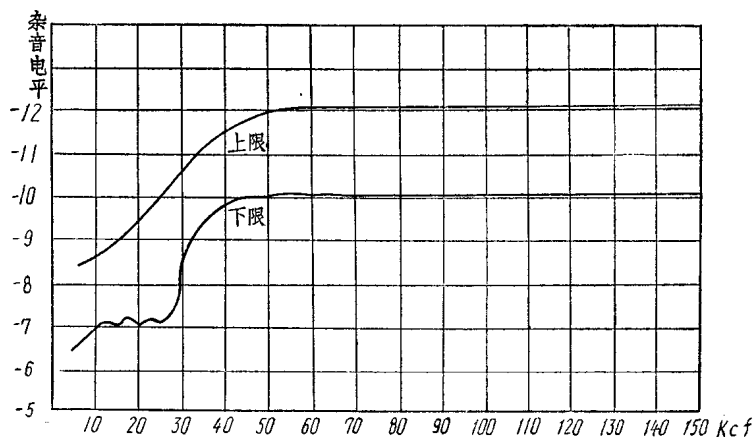


图 8

计算表明线路内诱起的电压应超过 600 伏, 由于装设了分隔变压器, 实测线路上各点的对地电压一般均少于 100 伏。仅仅在宝鸡—杨家湾区段内, 当牵引电流最大时 (400 安) 的一瞬间达到 200 伏。架空线上音频的杂音变化很大, 最高到 30 毫伏 (在宝鸡和凤州两地测量)。载频内的杂音电平如图 8 所示。在 3 路载波频带内约为 -7 奈。在 12 路载波频带内约为 -10 奈。6~9 千赫间杂音较大, 且与音频的杂音变化相一致。在 20 千赫附近, 另有一杂音较大的频段。用 B-3 载波终端机安装在宝鸡凤州两地, 作了较长时间的观测。当接收信号相对电平为 -0.8 奈时, 测得各话路内杂音电压数值如下表所列。

接收电路编号	载波机端别	电路频带 (千赫)	测试地点	最低杂音电压 (无电機車运行, 毫伏)	機車运行时, 大部分时间内的杂音电压 (毫伏)	最大杂音电压 (毫伏)
1	B	6.3—8.7	凤州	< 0.1	0.5—1.0	2.5 (偶然出现, 連續 5 分钟)
2	B	9.3—11.7	凤州	< 0.1	0.4—0.7	2.0 (偶然出现, 連續 5 分钟)
3	B	12.3—15.7	凤州	< 0.1	0.4—0.9	2.4 (偶然出现, 連續 5 分钟)
3	A	18.3—20.7	宝鸡	< 0.1	0.3—0.5	1.2 (偶然出现, 連續 3 分钟)
2	A	21.3—23.7	宝鸡	< 0.1	0.3—0.6	1.3 (偶然出现, 連續 3 分钟)
1	A	24.3—28.7	宝鸡	< 0.1	0.4—1.5	2.0 (偶然出现, 連續 3 分钟)

利用 312—A 型 12 路载波终端作了 4 小时的测试 (因此机正在使用, 临时停用进行测试), 在此时间内宝凤全段有五列由电机车牵引的列车在运行, 测试结果表明大部份时间内各个话路内杂音电压均小于 0.1 毫伏, 在若干个短时间内增至 0.2 毫伏左右, 个别话路有时到 0.4~0.5 毫伏。

这种装有分隔变压器或排流线圈的线路是无法进行通常的直流测试。因此在线路发生故障时 (断线混线等), 必须用脉冲测试器来判断故障地点, 在测试过程中曾发生多次故障, 均用此法很快和很准确地找出故障点。因为此种线路上经常存在着对地电压, 在上杆维修线路时, 需采取特殊的保安措施。

五、結 語

从上面的分析和测试结果, 可以得出几个初步的结论。

(1) 交流电化铁路区段附近的架空通信明线上加装若干防护措施, 可使感应电压降低到 200 伏以下。

(2) 这种架空通信线上音频范围内的杂音很大, 如果不在接触网上另行设法抑制干扰电流, 则难于开通音频话路使用, 但用来作为公务和联络电话 (不要求质量很好) 是可以的。

(3) 12 路载波频带内的杂音干扰并不很大, 在这种线路上开通 12 路载波电话是可行的。线路上加装分隔变压器后对于杂音方面也无显著影响。〔5〕

(4) 3 路载波频带内的杂音干扰电平超过了允许标准, 在这种线路上开通 3 路载波电话时应加装扩展器和压缩器。或者缩短中继区间的长度。

交流电化铁路区段利用架空通信明线是可能的, 在我国目前条件下也是需要的。除了上述电缆造价较贵外, 对于没有电缆用载波机而必须以架空明线用载波机在电缆上使用时, 更是需要。由于电缆心线衰耗较大, 12 路载波的中继区间长度仅 22 公里, 因此中继站的数目比用架空线时增多 6 倍, 而且用明线载波机时, 中继站就无法采用无人管理和远程供电的方式, 于是中继站的建设和维护费用就大大增多了。由于中继站的增多, 而又是用架空明线上用的载波中继器, 通信质量也将受到影响。

交流电化区段利用架空明线虽然是完全可行的, 但必须在现有的基础上进一步进行测试和试用, 以便取得更多的经验和资料, 为推广这种方法作好准备。

参 考 文 献

- [1] 苏联中央邮电科学研究院:《关于在交流电气铁道沿线的通信架空明线上组织高频通信可能性问题的研究报告》。中华人民共和国邮电部建设科学研究所中译本资料。
- [2] А.Б.Фельдман:《Резервирование уложенных цепей магистрального кабеля цепями воздушных линий связи на электрических железных дорогах переменного тока》。《Автоматика, телемеханика и связь на железных дорогах с электрического переменного тока》, 1961。
- [3] М.П.Михайлов:《Влияние внешних электромагнитных полей на цепи проводной связи изащитные мероприятия》。
- [4] А.Б.Фельдман:《Защита каналов высокой частоты от мешающего влияния электрические железных дорог постоянного тока》, 1958。
- [5] 乔占琳:《分隔变压器对通信线路交叉效果的影响》。《铁道科学技术》, 1962年第9期。

关于通信导线群几个干扰理论问题的研究

北京铁道学院 简水生

内 容 提 要

本文是将通信导线群当成一个整体来讨论干扰问题的。

对于强电干扰，则它是具有分布电压源和电流源的 $2(n+1)$ 端有源网络。从这个概念出发，本文第一部分推导了有关的一些普遍计算公式，第二部分中，提出了泄流支路的改进方案，并运用上述理论进行了分析，还初步做了些实验，结果证明泄流支路不但能有效地防止危险影响，而且还能防止静电杂音干扰。

对于相互串音干扰，则它是 $2(n+1)$ 端无源网络，本文第三部分还提出了无耦合（微耦合）矩阵的概念，证明了这种矩阵的几个基本性质，并且探讨了无耦合（微耦合）递输通信系统实现的可能性。为提高架空明线使用频率，提供了另一可能实现的途径。

引 言

目前我国的架空通信线路已经遍布全国各地，它是组成全国通信网最为主要的部分，而且在今后相当长的时期内，它仍将是相当主要的通信设备。因此，如何保证它的正常工作和提高其使用效率，便是一项重要的研究课题。

众所周知，对通信线路正常工作最大威胁之一，便是来自各式各样的强电线路。其中包括：线电压日益增高的三相输电线，工频单相交流电气化铁道，“两线——大地”农村输电线等。随着农业技术改革的发展农村输电线很可能遍布全国各地，尤其后两者都是不对称输电系统，它们对通信线的影响更为严重。因此，就迫切需要寻求一种简单经济的防护方法。目前全国在架空通信线上采用的防护措施，一般有：放电器，分隔变压器，排流线圈等，这些措施都是属于用许多网络介入在通信导线群以便收到防护效果的类型。应该说可以推导出一些较普通的公式，以便能计算它们的防护系数，和它们对通信质量的影响，因此，本文第一部分大体上就是适应于这个目的的。关于强电线路对通信线干扰的理论计算据已发表的文献〔1〕〔2〕〔3〕〔4〕看来，并未考虑到导线群相互之间的影响，尤其是在通信电缆中，这种影响更是不容忽视的，因此，有必要将所有通信线当成一个整体来考虑。鉴于通信线对强电线的反效应完全可以忽略不计。故本文引用下述概念： n 根被干扰的通信线是具有分布参数的 $2(n+1)$ 端有源网络。这个概念，最初为В.И.Кваленков在四端网的理论中所提出〔5〕，并为Э.В.Зелях〔6〕所发展，但还没有应用到强电干扰的领域中来，而且也没有推导出这种具有分布参数 $2(n+1)$ 端有源网络的递输函数。本文具体推导出了这一递输矩阵公式和上述计算有关的一些普遍公式。

为了探求一种简单经济的防护方法，本文在第二部分运用了上述的理论对泄流支路进行了理论分析和计算，并提出了改进方案。从理论计算和初步实验的结果证明，它能有效地防止危险影响和静电的杂音干扰。

为了提高通信线路的使用效率,就必需提高每一回线所能通过的频率。根据苏联邮电部研究院测试和计算的结果〔7〕:架空明线传输10兆赫时,只有0.2奈批/公里左右的衰耗。这就是说如果仅仅从衰耗方面来考虑,那么架空明线还大有潜力可挖,它的通过频率可以提高数十倍。如果仅仅是将通过频率提高到550千赫左右(因为在560千赫以下,无线干扰源较少)则每一回线的话路可增加4倍多,那么对我国社会主义建设事业就有着巨大的经济意义。但问题首先是如何来克服导线群相互之间的串音干扰,如果仅仅是依靠经典的干扰理论而设计的交叉程式,那是难以满足这种要求的。这种干扰理论从本世纪二十年代初就已开始建立。此后,许多科学工作者在这方面作出了卓越的贡献〔8〕,〔9〕,〔10〕,〔11〕,〔12〕,〔13〕,〔14〕,其中К. А. Акульшин的工作较为我们所熟悉。他在1937年提出的交叉程式一直应用到现在。这种干扰理论的计算公式是在忽略了导线相互之间的影响的前题下推导出来的,但是在考虑经第三回线的远端串音时却又用这些公式来计算导线群的相互影响。这是自相矛盾,频率愈高,这种矛盾就愈突出。在实际情况中作了某些交叉之后,串音衰耗可能出现负值(吸收现象)即被干扰回路的电流反而要比干扰回路大〔11〕,这也是自相矛盾的。因此,我们可以说在这种古典的假设前题下,某些情况的计算结果将不会与实际情况完全相符。苏联1959年的交叉规则〔22〕就是因为高频时实际测量出来的串音数值要比按上述理论计算的大,从而对原先的理论进行了大量的修改。但是它还没有超出上述古典假设的前题,故不能完全解决现有问题,更不能用来设计出一种新的防护措施,以使架空明线的使用效率能提高数倍。显然,为了解决更高频率的干扰问题,整个理论的假设前题是必需考虑到所有回线的相互影响。这就是说必须将通信导线群当作一个整体,即当成一个具有分布性参数的 $2(n+1)$ 端无源网络来考虑。只有这样才有可能综合设计出一种较理想的防护方案,以使架空明线上提高使用频率成为现实。当然,这样做在计算上是非常复杂的,但在电子计算技术如此发达的今天,解决这样的课题是不成问题的,实际上某些国家为了设计交叉方案,已有采用电子计算机来解决这种问题。非常明显,如果我们能很好的利用这六十年代里在网络综合和电子计算技术方面的成就,架空明线提高使用频率的课题,肯定是会得到解决的。为此,本文第三部分是在第一部分工作的基础上进行了下列的工作:提出了无耦合(微耦合)递输矩阵的概念,证明了这种矩阵两个重要性质,并讨论了无耦合(微耦合)递输通信系统合成的可能性。

一、通信导线群遭受强电干扰的理论研究

§1.1 均匀分布参数 $2(n+1)$ 端有源网的递输特性矩阵

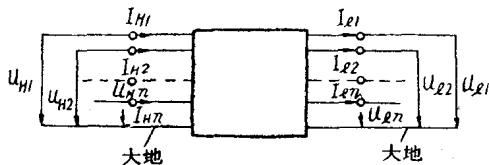


图 1

在这里我们将 n 根被干扰的通信线看成是一具有分布电压和分布电流源的 $2(n+1)$ 端网络。为了求得这种网络的递输特性矩阵,就必须从普遍的电报方程出发:

$$\left. \begin{aligned}
-\frac{\partial u_1(x, p)}{\partial x} &= z_{11}(p) i_1(x, p) + z_{12}(p) i_2(x, p) + \dots \\
&+ z_{1n}(p) i_n(x, p) - z_{01}(p) i_0(x, p) \\
-\frac{\partial u_2(x, p)}{\partial x} &= z_{21}(p) i_1(x, p) + z_{22}(p) i_2(x, p) + \dots \\
&+ z_{2n}(p) i_n(x, p) - z_{02}(p) i_0(x, p) \\
&\dots \\
-\frac{\partial u_n(x, p)}{\partial x} &= z_{n1}(p) i_1(x, p) + z_{n2}(p) i_2(x, p) + \dots \\
&+ z_{nn}(p) i_n(x, p) - z_{0n}(p) i_0(x, p) \\
-\frac{\partial I_1(x, p)}{\partial x} &= y_{11}(p) u_1(x, p) - y_{12}(p) u_2(x, p) \dots \\
&- y_{1n}(p) u_n(x, p) - y_{01}(p) u_0(x, p) \\
-\frac{\partial I_2(x, p)}{\partial x} &= -y_{21}(p) u_1(x, p) + y_{22}(p) u_2(x, p) \dots \\
&- y_{2n}(p) u_n(x, p) - y_{02}(p) u_0(x, p) \\
&\dots \\
-\frac{\partial I_n(x, p)}{\partial x} &= -y_{n1}(p) u_1(x, p) - y_{n2}(p) u_2(x, p) - \dots \\
&- y_{nn}(p) u_n(x, p) - y_{0n}(p) u_0(x, p)
\end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 $i_0(x, p) u_0(x, p)$ —— 干扰线上等效干扰电流电压象函数。

$$y'_{ii} = \sum_{j=1}^n y_{ij}$$

上式是 $2n$ 个线性非齐次微分方程组，一般的解法是消除电流或电压，可以得到用矩阵表示的二次微分方程式；但这样将要遇到矩阵开方的问题。因此我们采用下列的方法求得：

先将公式 (1) 写成行矩阵的形式

$$-\frac{\partial}{\partial x} X = X \begin{bmatrix} OY \\ ZO \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{0M}^t I_0, Y_{0M}^t u_0 \end{bmatrix} = XH - \begin{bmatrix} Z_{0M}^t I_0, Y_{0M}^t u_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 $X = [u_1(x, p), u_2(x, p) \dots u_n(x, p), I_1(x, p), I_2(x, p) \dots I_n(x, p)] = [u^t, I^t]$

$$H = \begin{bmatrix} OY \\ ZO \end{bmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & y'_{11}(p) & -y_{21}(p) & \dots & -y_{n1}(p) \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -y_{12}(p) & y'_{22}(p) & \dots & -y_{n2}(p) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -y_{1n}(p) & -y_{2n}(p) & \dots & y'_{nn}(p) \\ Z_{11}(p) & Z_{21}(p) & \dots & Z_{n1}(p) & 0 & 0 & \dots & 0 \\ Z_{12}(p) & Z_{22}(p) & \dots & Z_{n2}(p) & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{1n}(p) & Z_{2n}(p) & \dots & Z_{nn}(p) & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} Z_{OM}^t &= [Z_{01}(p), Z_{02}(p) \cdots \cdots Z_{0n}(p)] \\ Y_{OM}^t &= [y_{01}(p), y_{02}(p) \cdots \cdots Z_{OM}(p)] \end{aligned}$$

众所周知, 公式 (2) 之解为两部分, 其解一为:

$$-\frac{\partial}{\partial x} X_1 = X_1 H \quad (3)$$

另一为特定解:

$$-\frac{\partial}{\partial x} X_2 = X_2 H - [Z_{OM}^t i_o(x, p), Y_{OM}^t u_o(x, p)] \quad (4)$$

由公式 (3) 我们可得:

$$X_1 = C_0^{-Hx} \quad (5)$$

如果 H 的特征值为 $2n$ 个单根, 则 H 可化为对角阵

$$H = S [\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_{2n}] S^{-1} \quad (6)$$

那么

$$X_1 = C S e^{-(\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_{2n})x} S^{-1} \quad (7)$$

如果

$$u_o = u_{oH} e^{-\Gamma_o x}; \quad i_o = i_{oH} e^{-\Gamma_o x}$$

则

$$\begin{aligned} X_2 &= [(Y_{OM}^t Z u_{oH} e^{-\Gamma_o x} + Z_{OM}^t i_{oH} e^{-\Gamma_o x}) [\Gamma_o I - ZY]^{-1} [Z_M^t Y i_{oH} e^{-\Gamma_o x} + Y_{M_0}^t u_{oH} e^{-\Gamma_o x} \\ &\quad [\Gamma_o I - YZ]^{-1}] \quad \text{注: } 1 \text{ 为单位矩阵} \end{aligned} \quad (8)$$

在实际情况中 $\Gamma_o \approx 0$, 故

$$X_2 = [Y_{OM}^t Y^{-1} u_{oH}, Z_{OM}^t Z^{-1} i_{oH}] \quad (8')$$

当 $x = 0$

$$X = [u_{H1}, u_{H2}, \cdots, u_{Hn}, i_{H1}, i_{H2}, \cdots, i_{Hn}] = [u_{OM}^t, i_{OM}^t] \quad (9)$$

解 (7) (8) (9) 式可得

$$\begin{aligned} [u^t, I^t] &= [u_H^t, I_H^t] S e^{-(\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_{2n})x} S^{-1} \\ &\quad - [Y_{OM}^t Y^{-1} u_{oH}, Z_{OM}^t Z^{-1} i_{oH}] [S e^{-(\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_{2n})x} S^{-1} - 1] \end{aligned} \quad (10)$$

我们将公式 (10) 进行转置, 则可得

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u \\ I \end{bmatrix} &= S^{-1t} e^{-(\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_{2n})x} S^t \begin{bmatrix} u_K \\ u_H \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} S^{-1t} e^{(\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_{2n})x} S^{t-1} \end{bmatrix} \times \\ &\quad \times \begin{bmatrix} Y^{-1} Y_{OM} u_{oH} \\ Z^{-1} Z_{OM} i_{oH} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

再设

$$a = \begin{bmatrix} a_{11} & -a_{12} \\ -a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = S e^{-1} e^{-(\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_{2n})x} S^t \quad (12)$$

这里 $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$ 都是 n 阶的子块方阵

从公式 (11) 和 (12) 我们就可得出递输特性矩阵如下:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & -a_{12} \\ -a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_H \\ I_H \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_a \\ J_a \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中

$$\begin{bmatrix} e_a \\ J_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (a_{11} - 1) Y^{-1} Y_{OM} u_{oH} - a_{12} Z^{-1} Z_{OM} i_{oH} \\ -a_{21} Y^{-1} Y_{OM} u_{oH} + (a_{22} - 1) Z^{-1} Z_{OM} i_{oH} \end{bmatrix} \quad \text{——为 } 2(n+1) \text{ 端网的有源参数}$$

如果 H 的特征值有多重根, 普遍的情况有下列许多初等因子

$$(\lambda - \lambda_1)^{e_1}, (\lambda - \lambda_2)^{e_2}, \cdots, (\lambda - \lambda_s)^{e_s}$$

这里 $\rho_i (i=1, 2, \dots, s)$ 为大于等于1的整数, 且 $\rho_1 + \rho_2 + \dots + \rho_s = 2n$ 而 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_s$, 可以相等也可以不相等。

则 H 就不能如公式(6)所示。而是需要用约当块来表示。

$$\text{即} \quad H = S[I_{\rho_1}(\lambda_1), I_{\rho_2}(\lambda_2), \dots, I_{\rho_s}(\lambda_s)]S^{-1}$$

$$\text{则} \quad a = S^{-1} e^{-[I_{\rho_1}(\lambda_1), I_{\rho_2}(\lambda_2), \dots, I_{\rho_s}(\lambda_s)]} S^{-1} \quad (14)$$

式中

$$e^{I_{\rho_i}(\lambda_i)x} = e^{\lambda_i x} e^{I_{\rho_i}(0)x}$$

$$e^{I_{\rho_i}(0)x} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ x & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2!}x^2 & x & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{x^{\rho_i-1}}{(\rho_i-1)!} & \frac{x^{\rho_i-2}}{(\rho_i-2)!} & \frac{x^{\rho_i-3}}{(\rho_i-3)!} & \dots & \frac{x^2}{2!}x & 1 \end{pmatrix}$$

从公式(12), (13), (14)可以得出结论: 求得 $2(n+1)$ 端网络的递输特性矩阵就归结为求矩阵 H 的特征值和对角化矩阵的问题。

如果导线群两端各接以矩阵为 Y_I 和 Y_{II} 的 $(n+1)$ 端网如那么可得:

$$u_H = \Omega[Y_{II}e_a - J_a] \quad (15a)$$

$$u_I = [a_{11} + a_{12}Y_I]\Omega[Y_{II}e_a - J_a] - e_a \quad (15b)$$

很容易就可求出导线群任一点的电压和电流为:

$$\begin{bmatrix} u_x \\ I_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11x} - a_{12x} \\ -a_{21x} & a_{22x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega[Y_{II}e_a - J_a] \\ -Y_I\Omega[Y_{II}e_a - J_a] \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_{ax} \\ J_{ax} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\text{式中} \quad \Omega = [Y_{II}a_{11} + Y_{II}a_{12}Y_I + a_{21} + a_{22}Y_I]^{-1}$$

§1.2 不均匀参数 $2(n+1)$ 端有源网络的递输特性矩阵

为了降低通信线上被感应的电压, 我们可以介入某种防护网络如分隔变压器, 泄流支路, 放电器, 中和变压器等。我们设下列矩阵为它们的递输矩阵。

$$b = \begin{bmatrix} b_{11} - b_{12} \\ -b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中: b_{11}, b_{12}, b_{21} 和 b_{22} 都是 n 阶子块方阵, 它是所介入网络的结构所决定的。如果每隔不同长度介入不同结构的网络, 如图(2)所示。

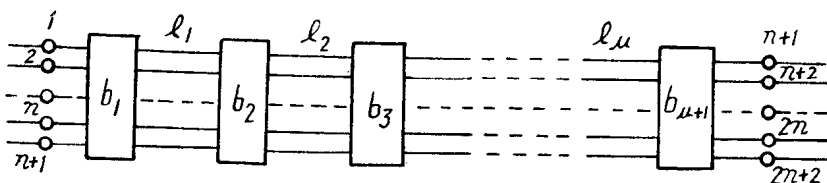


图2 通信导线群为防护网络分成个区段

在这种情况下, 通信导线的递输矩阵为:

$$\begin{bmatrix} u'_i \\ I'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} - A_{12} \\ -A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_H' \\ I_H' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_A \\ J_A \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中

$$\begin{bmatrix} A_{11} - A_{12} \\ -A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} = b_{M+1} a_M b_M \dots a_1 b_1 \quad (19a)$$