

无绝缘轨道电路原理及分析

费锡康 编著

中国铁道出版社
1993年·北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

无绝缘轨道电路是高速铁路信号设备的一项必备基础设备。对无绝缘轨道电路的分析是该书的独特之处。该书介绍了设计无绝缘轨道电路必须掌握的计算方法、信号分析方法以及移频、移相信号的产生、解调方法,并介绍了移频无绝缘轨道电路发送、接收设备的原理和为抗干扰而需进行的频率参数选择。

该书可供从事轨道电路研究、设计等工作的工程技术人员及大专院校师生阅读、参考。

无绝缘轨道电路原理及分析

费锡康 编著

*

中国铁道出版社出版、发行

(北京市东单三条 14 号)

责任编辑 魏京燕 封面设计 陈东山

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本:787×1092 毫米 1/32 印张:7.5 字数:173 千

1993 年 8 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:1—2000 册

ISBN7-113-01458-5/TP·142 定价:7.25 元

前 言

轨道电路自 19 世纪 70 年代发明以来,至今约有一个半世纪了。在这一较长的历史过程中,轨道电路随着铁路运输事业的发展和科学技术的进步,无论在理论上还是在实际设备方面都有了很大的进步。特别是最近 20 年来,轨道电路从有绝缘向无绝缘多信息方向发展;元器件从分离元件向中、大规模集成器件和单片微型计算机方向发展。这标志着轨道电路的发展进入了一个崭新的阶段。

无绝缘轨道电路和有绝缘轨道电路相比较,具有较明显的特点和优点。由于去掉了有绝缘轨道电路中故障率高的轨端机械绝缘接头,因而大大地提高了轨道电路的可靠性,在长轨区段安装不用锯轨,在电化区段降低了轨道电路的不平衡系数,改善了钢轨线路的运营质量等等。因此,世界各先进工业国家均相继研制了无绝缘轨道电路。目前国外已有多种制式投入运营,其效果比有绝缘轨道电路有很大改善。在我国目前一方面引进国外先进技术,消化吸收,逐步国产化;另一方面自己加速研制无绝缘轨道电路。故在今后一段时间内,无绝缘轨道电路在我国铁路上将有一个较大的发展。为了与这种情况相适应,设计出我国自己的高水平的无绝缘轨道电路,需要从理论上掌握分析计算方法,因此特编著《无绝缘轨道电路原理及分析》一书。

本书对无绝缘轨道电路的原理和分析方法作了全面介绍。本书共有七章,分为五个单元。第一单元介绍构成原理、

目 录

第一章 无绝缘轨道电路概述	1
第一节 无绝缘轨道电路的产生	1
第二节 无绝缘轨道电路原理及类型	2
第二章 电气隔离式无绝缘轨道电路分析	17
第一节 电气分隔接头参数	17
第二节 轨道电路信号传输分析	29
第三节 轨道电路分路灵敏度	42
第三章 自然衰耗中央供电式	
无绝缘轨道电路分析	61
第一节 调整状态分析	61
第二节 分路状态分析	75
第三节 机车信号状态分析	91
第四章 键控角度调制信号分析	96
第一节 相位连续的移频信号	96
第二节 相位离散的移频信号	109
第三节 键控绝对移相信号	115
第四节 键控相对移相信号	120
第五章 移频无绝缘轨道电路	128
第一节 键控移频信号 FSK 的产生方法	128
第二节 键控移频信号的解调	131
第三节 移频无绝缘轨道电路发送设备原理	156
第四节 移频无绝缘轨道电路接收设备原理	181

第六章 移相无绝缘轨道电路.....	199
第一节 绝对移相信号 PSK 的产生与解调	199
第二节 相对移相信号 DPSK 的产生与解调	213
第七章 无绝缘轨道电路的频率参数选择.....	221
第一节 频率参数的选择受分隔接头隔离方式和 轨道电路长度的限制.....	221
第二节 电化谐波干扰影响载频及频偏选择.....	222
第三节 系统本身要考虑相互之间的干扰.....	224
附 录 双曲函数算法.....	228

第一章 无绝缘轨道电路概述

第一节 无绝缘轨道电路的产生

随着铁路运量的增加,列车重量、行车速度和行车密度也将不断提高。特别在与公路和航空运输激烈竞争的条件下,出现了高速列车。高速列车要求提高线路的质量,使旅客乘车旅行舒适。因此,出现了长钢轨线路。在这种情况下,有绝缘轨道电路已不能适应铁路运输发展的需要,于是,产生了无绝缘轨道电路。具体来说无绝缘轨道电路是从下列两方面的需求提出来的。

第一方面,有绝缘轨道电路在运营中其轨端绝缘节是最薄弱的环节,故障率比较高。根据原苏联的统计,轨道电路在运营中,由于绝缘节破损发生的故障数目,在区间内约占故障总数的 25%,在车站内约占故障总数的 40%到 50%。根据我国的经验,一般一对绝缘节在干线区段,应用期约为三个月。这不仅加大轨道电路的维修费用,也是造成列车晚点,打乱运输计划,影响运输任务完成的主要原因。

第二方面,由于长钢轨线路具有以下优点:(1)减少列车运行阻力;(2)减少车列振动和噪声,使旅客坐车旅行舒适;(3)减少钢轨线路和机车车辆轮缘的磨损。因此长钢轨线路在世界各国得到了广泛采用。我国的主要干线也已有相当部分采用了长钢轨。在长轨区段装设轨端绝缘有一定困难,它必须切割钢轨,一对轨端绝缘需要三处切割钢轨。这使结构复杂,费用高,线路质量也相应下降。现在美国有一种采用粘接绝缘,它是将一块绝缘材料和两段钢轨压铸成一体,在需要装设

绝缘节的地方再与长轨焊接起来。据说这种绝缘材料在强度、光滑度和寿命方面和钢轨不相上下。这种方法虽好,但造价比较昂贵。

因此在长轨区段装设无绝缘轨道电路是有一定意义的。它既不存在轨端绝缘节的故障,又可切割长钢轨。在电化区段还可不采用扼流变压器,降低电化区段轨道电路的不平衡系数。故世界各先进工业国家均相继研究和发展无绝缘轨道电路。

第二节 无绝缘轨道电路原理及类型

无绝缘轨道电路按原理可分为两大类。

第一类是电气隔离式,又称谐振式。它是在轨道电路的分界处,采用电容和一部分钢轨的电感构成谐振回路。另外相邻轨道电路采用不同频率的信号电流,使轨道电路电气隔离。

第二类是自然衰耗式,又称叠加式。它是利用轨道电路的自然衰耗,相邻轨道电路采用不同频率的信号电流,利用在轨面外进行滤波的原理使相邻轨道电路的工作互不影响。

下面分别介绍这两类无绝缘轨道电路。

一、电气隔离式无绝缘轨道电路

(一)电气分隔接头的构成原理

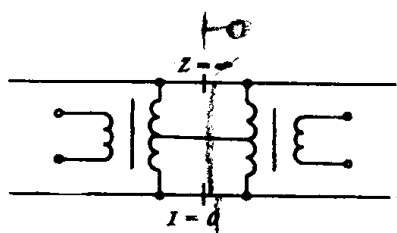


图 1—1 轨端机械绝缘

无绝缘轨道电路的电气分隔接头,对相邻两轨道电路的隔离原理是根据对偶原理类似于有绝缘轨道电路的轨端绝缘而构成的。图 1—1 是有绝缘轨道

电路的轨端机械绝缘,在相邻轨道电路交界处的电气参数为:阻抗 $Z=\infty$,电流 $I=0$ 。它的对偶电路是导纳 Y 对应阻抗 Z ,电压 V 对应电流 I ,这两者

互相转换所建立的关系是完全相同的。对比图 1—1 机械绝缘接头的轨道电路,其对偶电路如图 1—2 所示。它就是电气隔离式无绝缘轨道电

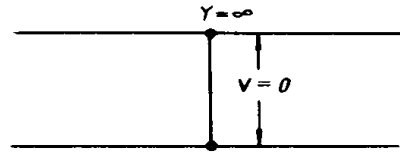


图 1—2 轨端机械绝缘的对偶电路

路的构成原理。在图 1—2 中,用短路线代替机械绝缘接头,因而两相邻轨道电路交界处的电气参数是:用 $Y=\infty$ 来代替 $Z=\infty$,用 $V=0$ 来代替 $I=0$ 。

仅用一根短路线来代替机械绝缘接头,这种无绝缘轨道电路是无法应用的。因为它虽然满足相邻两轨道电路的隔离,可是 $V=0$,不能传输能量,不满足能量传输的要求。究竟可用的电气分隔接头应具备那些条件呢?

(1) 电气分隔接头的隔离性要好,界限必须分明,隔离区段的长度应尽量短。

(2) 电气分隔接头(隔离区段)内不满足分路灵敏度要求的死区段应尽量短,至少要小于最短车辆两对轮轴之间的距离。

(3) 两相邻轨道电路间应无信号干扰,或虽存在干扰信号,但不影响本轨道电路正常工作。

(4) 轨道电路的独立性要强,相邻轨道电路分路,不能影响本区段正常工作。

(5) 分路灵敏度要高。

(6) 信号传输效率要高,应具有足够的传输长度。

(7) 设备简单可靠。

(二)电气隔离式的类型

最简单的电气隔离式无绝缘轨道电路的原理电路如图

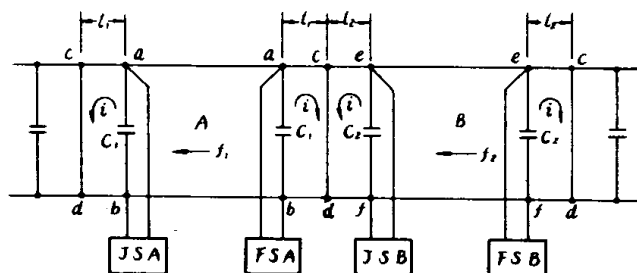


图 1—3 简单的电气分隔接头

1—3 所示。图中 A、B 轨道电路的分界处是电气分隔接头。在 cd 处装设截面为 75mm^2 的电缆短路线，在两侧 ab 和 ef 处各装设一个电容 C_1 和 C_2 。A 和 B 轨道电路利用 ed 处两钢轨间的短路线进行隔离。A 和 B 轨道电路分别发送频率为 f_1 和 f_2 信号电流。电容 C_1 接 A 轨道电路的发送器，电容 C_2 接 B 轨道电路的接收器。电容 C_1 和 $acdb$ 回路中的钢轨电感 L_{ac} 和 L_{db} 及短路线的电感 L_{cd} 构成并联谐振电路，它的并联阻抗的频率特性如图 1—4 中曲线①所示。由曲线①可知：在信号的频率为 f_1 时，电容两端的阻抗 Z_{ab} 呈现高

阻抗。因此 A 轨道电路发送器 FSA 发送的频率为 f_1 的信号，在 ab 两点间得到高的电压。该信号电流沿着 A 轨道电路向接收端传输。电容 C_2 和 $ecdf$ 回路中的钢轨电感 L_{ec} 和 L_{df} 及短路线的电感 L_{cd} 构成并联谐振电路，它的并联阻抗的频率特

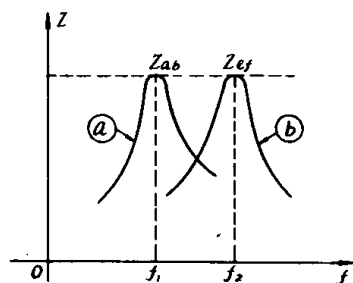


图 1—4 简单电气分隔的并联阻抗的频率特性

性如图 1—4 中的曲线⑥所示。由曲线⑥可知：在信号的频率为 f_2 时，电容 C_2 两端的阻抗 Z_{ef} 呈现高阻抗。因此沿着 B 轨道电路，从发送端传输来的频率为 f_2 的信号电流，在电容 C_2 两端 ef 形成高的电压，被接收器 JSB 接收，动作轨道继电器。关于 A 轨道电路接收端与接收器 JSA 相连和 B 轨道电路相同； B 轨道电路发送端与发送器 FSB 相连和 A 轨道电路相同，其工作原理同上述电气分隔接头。一般说来隔离区段 l_1 和 l_2 的长度随信号频率 f_1 和 f_2 的提高而缩短。

对于象图 1—3 这种简单的无绝缘轨道电路，在区间内实际不能采用，因为车辆在 cd 短路线附近不能得到可靠分路。但在小站的到发线上，可采用这种无绝缘轨道电路，如图 1—5 所示。图中两根钢轨之间的短路线实际上是由道岔心所代替。

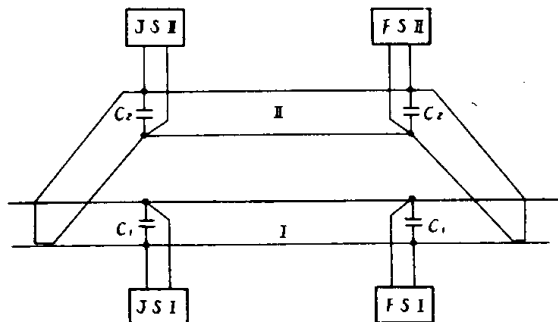


图 1—5 简单的无绝缘轨道电路用于站内到发线

为了对图 1—3 的无绝缘轨道电路进行改进，将两根钢轨间的短路线的两端延长，彼此相隔一定距离成为如图 1—6 所示的带有 S 形轨道跳线的谐振隔离式无绝缘轨道电路。考虑到 S 形跳线应不影响机械化养路作业，因此， S 形跳线采用下列走线方式：从第 I 钢轨的焊接点 a 开始，沿着轨枕到第 II 钢轨的腰部 a' 点，拐弯沿着钢轨 II 的腰部到 c 点，又拐弯沿着轨

枕到钢轨 I 的腰部 b 点,再拐弯沿着钢轨的腰部到 d' 点,再拐弯沿着轨枕到钢轨 II 的焊接点 d 。

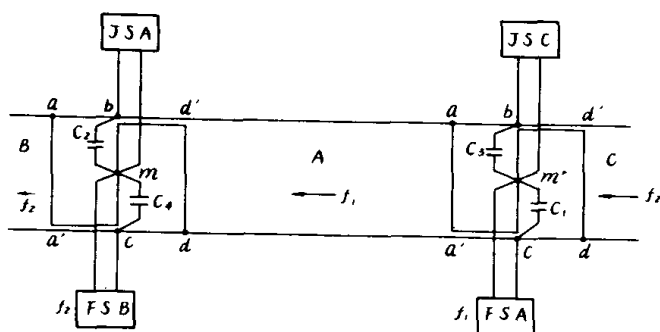


图 1—6 具有 S 形线的电气分隔接头

A 轨道电路的发送器 FSA 和接收器 JSA 采用如下斜对角的连接方式:发送器 FSA 相连的谐振槽路在 A 轨道电路的右下角,由电容 C_1 、钢轨 II 的一段 cd 和一段连接线 dm' 等部件组成;它由电容 C_1 、 cd 段钢轨 II 的电感 L_{cd} 、 dm' 段连接线电感 $L_{dm'}$ 及它们之间的互感 $M_{cm'}$ 构成谐振频率为 f_1 的并联谐振槽路。因此发送电容 C_1 两端呈现高阻抗;A 轨道电路发送器 FSA 产生频率为 f_1 的信号,在电容 C_1 两端相连的两点 $m'c$,也即在发送端轨面 ac 两点形成较高电压;此 f_1 信号沿着 A 轨道电路向接收端传输。接收器相连的谐振槽路在 A 轨道电路的左上角。由电容 C_2 、钢轨 I 的 ba 和一段连接线 am 等部件组成;电容 C_2 、 ba 段钢轨电感 L_{ba} 、 am 段连接线电感 L_{am} 及它们二者之间互感 M_{am} 构成谐振频率为 f_1 的并联谐振槽路。因此接收电容 C_2 两端呈现高阻抗,沿着 A 轨道电路传输来的 f_1 信号,在电容 C_2 两端相连的 bm 两点,也即接收端轨面 bd 两点,有较高电压,从而被接收器 JSA 接收,动作轨道继电器。

B、C 轨道电路的发送器 FSB、FSC 和接收器 JSB、JSC 的

连接方式与 A 轨道电路相同。不同的是, B 、 C 轨道电路发送和接收的是频率为 f_2 的信号。 A 和 B 、 C 轨道电路除了利用不同频率的信号互相隔离外, 还采用 S 形短路跳线, 使它们彼此隔离。

S 形轨道跳线的长度等于 ab 加 bd , 它随着信号频率的增高而减小。在电气隔离区段内无死区段, 但有分路重迭区段。分路重迭区段的最大长度为 ad' 和 $a'd$ 。在分路重迭区内机车信号将收到两种载频信号。由于 S 形轨道跳线把两根钢轨短路起来, 使轨道电路不平衡系数大大减少, 减少了电化干扰。

对图 1—3 的无绝缘轨道电路的另一种改进方法是用空心线圈代替两根钢轨间的短路线, 在空心线圈的两侧各装设一个谐振单元。其原理电路如图 1—7 所示。在电气分隔接头

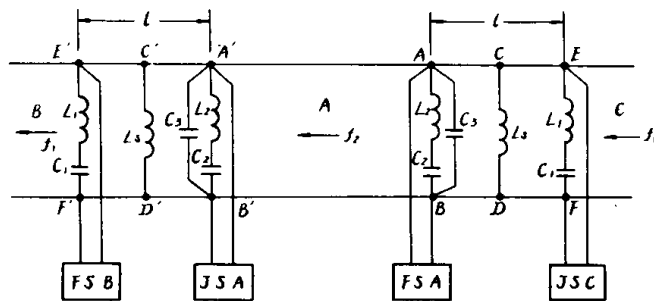


图 1—7 两边有谐振单元中央设空芯线圈的电气分隔接头

中间装设空心线圈 L_s , 主要起平衡牵引电流的作用, 因为它对 50Hz 牵引电流的阻抗很小, 相当于短路, 而对音频信号的阻抗较大。 A 轨道电路的发送器 FSA 发送频率为 f_2 的信号。 B 、 C 轨道电路发送器 FSB 、 FSC 发送频率为 f_1 的信号, 且 $f_1 < f_2$ 。谐振电路 L_1 、 C_1 构成串联谐振, 谐振频率为 f_2 , 串联谐振阻抗很小, 只有千分之几欧姆。因此频率为 f_2 的信号在 EF 和 $E'F'$ 处相当于短路, 使在 A 轨道电路中的 f_2 信号电流不会混

入 B 、 C 轨道电路,起 A 轨道电路与 B 、 C 轨道电路相隔离的作用。

与 A 轨道电路发送器 FSA 相连的谐振电路 L_2 、 C_2 、 C_3 对频率为 f_2 的信号呈现容性,相当于一个电容 C 。该电容 C 和其右侧四小段钢轨 AC 、 CE 、 FD 和 DB 的电感 $L_g/2$ 及一个空心线圈的电感 L_s 混连而成的等效电感 L_{f2} 构成并联谐振槽路,如图 1—8 所示,其谐振频率为 f_2 , AB 两点间呈现高阻抗。因此发送器 FSA 发送的 f_2 信号,在 AB 两点形成高电压,沿着 A 轨道电路,向左侧

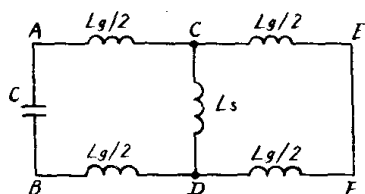


图 1—8 发送端分隔接头对 f_2 的等效电路

传输到接收端。当然也向右侧传输,但到 EF 被短路,不能混入 C 轨道电路。和 A 轨道电路接收器 JSA 相连的谐振电路 L_2 、 C_2 、 C_3 对 f_2 信号呈现容性,相当于一个电容 C 。该电容 C 和左侧四小段钢轨 $A'C'$ 、 $C'E'$ 、 $F'D'$ 和 $D'B'$ 的电感 $L_g/2$ 及一个空心线圈的电感 L_s 混连而成的等效电感 L_{f2} 构成并联谐振槽路,其谐振频率为 f_2 , $A'B'$ 两点间呈现高阻抗。因此对从发送端传输来的 f_2 信号产生较高电压,被接收器 JSA 接收,动作轨道继电器。当然 f_2 信号还继续向左侧传输,但到 $E'F'$ 处被短路,不能混入 B 轨道电路。

同理对于 B 轨道电路,由于发送的是频率为 f_1 的信号,其发送端和接收端的谐振电路 L_2 和 C_2 ,对 f_1 信号产生串联谐

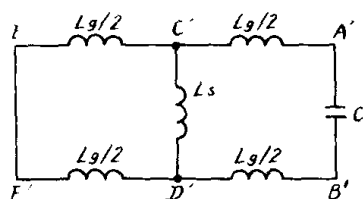


图 1—9 接收端分隔接头对 f_2 的等效电路

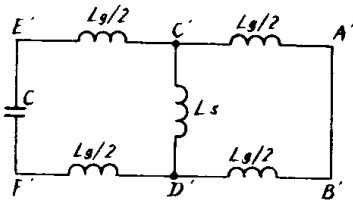


图1—10 发送端电气分隔接头
对 f_1 等效电路

振，串联谐振阻抗仅为千分之几欧，相当于短路。因此 f_1 信号不能混入 A 轨道电路，接收端也不能混入相邻轨道电路。和发送端 FSB 相连的 L_1 、 C_1 电路对 f_1 信号呈现容性 C 。该电容 C 与右侧的四小段钢轨电感 $L_g/2$ 和一个空心线圈电感 L_s 组成混连电路的等效电感 L_{f1} ，形成对 f_1 信号的并联谐振槽路，如图 1—10 所示。因此 $E'F'$ 两点间形成高阻抗。对 f_1 信号产生较高的电压，沿着 B 轨道电路传输到接收端。和接收端 JSB 相连的 L_1 、 C_1 电路对 f_1 信号也呈现容性 C ，该电容 C 与左侧的四小段钢轨电感 $L_g/2$ 和一个空心线圈 L_s 组成混连电路，电路的等效电感 L_{f1} ，形成对 f_1 信号的并联谐振槽路，如图 1—11 所示。因此在 EF 两点间形成高阻抗，对从发送端传输来的 f_1 信号产生较高电压，被接收器 JSB 接收，动作轨道继电器。

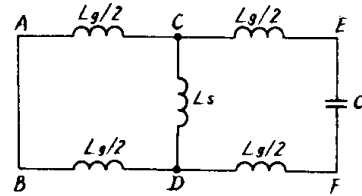


图1—11 接收端电气分隔接头
对 f_1 等效电路

二、自然损耗式无绝缘轨道电路

无绝缘轨道电路除了采用谐振隔离式外，还有采用自然损耗、频率区分、中央供电、两端接收方式的无绝缘轨道电路。这种方式的轨道电路，在钢轨之间无需装设与小段钢轨电感产生谐振的电容器。按它的接收方式，可分为电压接收式和电流接收式两种。

(一)电压接收式

电压接收式无绝缘轨道电路原理图如图 1—12 所示。图中:发送器 FS_1 通过变压器向两轨间发送频率为 f_1 (或 f_2) 的信号,接收器 JS_{11} 经过变压器连接在钢轨上,接收连接点两轨间的电压。

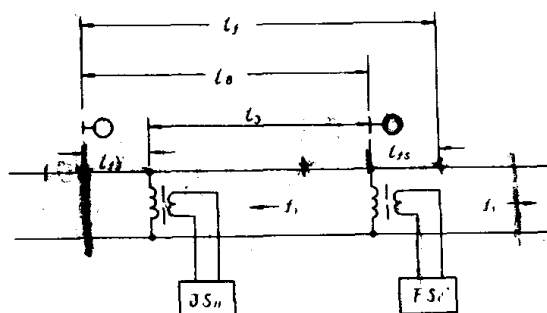


图 1—12 电压接收式原理图

这种无绝缘轨道电路,在列车分路方面具有下列特点。当列车接近轨道电路的接收端,离开接收端一定距离时,轨道接收器就被分路,分路的阻抗由钢轨阻抗和列车分路电阻组成,即

$$Z_f = R_f + z l_{fJ}$$

这个距离 l_{fJ} 称为接收端分路附加距离。这时接收器 JS_{11} 停止工作。

当列车一出清无绝缘轨道电路的发送端,接收器 JS_{11} 并不是立即励磁,因为这时发送器 FS_1 还被分路,在列车离开发送端一个相当距离之后,接收器才励磁工作。这时的分路阻抗由钢轨阻抗和列车分路电阻组成

$$Z_f = R_f + z l_{fS}$$

这个距离 l_{fS} 称为发送端分路附加距离。

上述两种分路附加距离是随着道碴电阻的变化而变化。

当道碴电阻 $R_d = R_{d\min}$ 最小时,接收端轨面电压为最低,即便分路电阻较大,也能满足分路要求,因而接收端分路附加距离最长,即 $l_{fJ} = l_{fJ\max}$ 。当道碴电阻 $R_d = R_{d\max}$ 最大时,接收端轨面电压为最高,因此必须用较小的分路电阻分路,才能使接收器停止工作,因而其分路附加距离也就愈短,即 $l_{fJ} = l_{fJ\min}$,甚至必须使 $l_{fJ\min} = 0$,才能保证列车分路。同样的理由,发送端的分路附加距离 l_{fS} 也有从 $l_{fS\max}$ 到 $l_{fS\min}$ 的变化范围。当 $R_d = R_{d\min}$ 时, $l_{fS} = l_{fS\max}$; 当 $R_d = R_{d\max}$ 时, $l_{fS} = l_{fS\min}$, 极限情况, $l_{fS\min} = 0$, 就能使接收器立即恢复工作状态。

基于上述特点,电压接收式无绝缘轨道电路就具有两种不同的长度:轨道电路结构长度 l_L 和列车分路长度 l_f ,如图 1—12 所示。结构长度 l_L 是轨道电路发送器和接收器安装地点之间的长度;列车分路长度 l_f 是使轨道接收器不工作(失磁)和使轨道接收器重新工作,这两个列车分路点之间的长度。这两个长度的关系为:

$$l_f = l_J + l_{fJ\max} + l_{fS\max}$$

闭塞分区长度是两个相邻闭塞信号机安装地点之间的长度。由于列车分路长度随着道碴电阻的变化而变化,因此设置地面信号机时,为了避免列车在接近信号机前改变信号显示,即避免由允许显示转为红灯显示,地面信号机设置地点距接收器设置地点之间的距离应不小于 $l_{fJ\max}$ 。在无绝缘轨道电路的发送端,列车分路附加距离 l_{fS} 的变化,不会影响第一列列车的运行,但能推迟后一列列车得到前一列车已出清闭塞分区的信息。因此,自动闭塞地面信号机的安装地点,可以与无绝缘轨道电路的发送端安装在同一地点。于是闭塞分区长度为

$$l_B = l_J + l_{fJ\max}$$

这样对电压接收式无绝缘轨道电路来说,闭塞分区长度、

轨道电路结构长度和列车分路长度三者是不一致的,对机械绝缘式轨道电路而言,上述三个长度是一致的。

在电压接收式无绝缘轨道电路中,轨道电路结构长度和闭塞分区长度是不变的,而列车分路长度是可变化的。在设置闭塞信号机时,又根据 $l_{fJ\max}$ 来确定地点。这样轨道电路就出现了无分路灵敏度的死区段,其长度为

$$\Delta l_{fJ} = l_{fJ\max} - l_{fJ\min}$$

如果再考虑极限情况, $l_{fJ\min} = 0$, 则 $\Delta l_{fJ} = l_{fJ\max}$ 。若 $l_{fJ\max}$ 大于一个机车长度,就存在不安全问题。这种情况应采取特殊措施予以解决。

以上是在一个列车的影响下,无绝缘轨道电路的分路长度随道碴电阻变化而变化的情况。若在道碴电阻没有变化,有两列列车运行情况下,轨道电路的分路长度也会有同样的变化。当第一列列车驶过轨道电路发送器一定距离,此时该轨道接收器刚工作,处在最小工作电压状态。这时第二列列车接近该接收器,在分路阻抗最大 $Z_f = R_f + z l_{fJ\max}$ 情况下,即能使轨道接收器被分路。为了避免第二列车接近信号机前改变信号显示,即使允许显示转为红灯显示,地面信号机应安装在距离轨道接收器安装地点 $l_{fJ\max}$ 的地方。

在最不利条件下,即道碴电阻最大 ($R_d = R_{d\max} = \infty$),第一列列车已经离开该轨道电路的发送端很长距离,对该轨道电路已无影响。这时该轨道接收器上的工作电压为最大。因此它的分路附加距离为最小, $l_{fJ\min}$ 接近于零。可见,两列列车在最不利的运行情况下,会使电压接收式无绝缘轨道电路的列车分路长度发生同样变化,而且它的变化最大。

如果地面不设信号机,列车依靠机车信号运行,如图 1—13 所示。列车在 C 点分路,轨道接收器 J_{31} 处于不工作状态,机车信号地面发送器通过 J_{31} 的落下接点自动接到 d 点,迎着