

轨道电路

Н. П. 科特拉列克 著
武正貴 楊易旻 羅海濤 譯

人民铁道出版社

作 者 序

在铁路运输行车调整的自动控制及远程控制系统中，轨道电路起着非常重要的作用。轨道电路能够检查线路上是否有机车车辆及钢轨是否完整，它们是铁路自动化系统中必要元件，并且也起着远程控制通信道的作用。从技术方面来说，轨道电路总是在不断发展和改进；在轨道电路中，采用电子管、离子管、半导体、磁放大器及其他等现代技术设备。在电码轨道电路中，利用各种各样的选择形式及不同性质的电流。

利用铁路线路上部建筑——钢轨作为电气线路是有着较大的损失，它们有可变的绝缘，并且是在其他电气回路遇不见的独特状态下工作。因此，研究及设计轨道电路，不能完全采用有线通信或传输线现有理论及方法。

本书系统地叙述了轨道电路的理论基础和分析、计算方法；本书反映了当前轨道电路这一学术研究的技术理论水平。书中大部分资料是作者的科研和教学工作的成果。其中有些成果是第一次发表。

为了便于研究起见，本书共分成三篇

一、轨道电路的设备和电气参数。

二、轨道电路的理论基础。

三、各种轨道电路的分析和计算。

在第一篇里面，描述一般特性，并且研究轨道电路的特征。

第二篇叙述交、直流轨道电路各种工作状态的分析和计算方法，特别注意到沿钢轨线路电能传输的研究及确定轨道电路达到最大效率的条件。传输交流电能及复数波阻抗线路具有非匹配复数负载的轨道电路最有代表性的情况，研究得最详细。

在第三篇中，有目前苏联铁路作为定型的轨道电路及其采用范围；对采用最广泛的各种轨道电路的性质和特征研究得比较详

细，而且根据此项研究提出有关维护方面的技术建议，还有工程计算范例。此外，在第三篇中研究直流牵引电流谐波对轨道电路影响的防护方法及交流电力牵引区段轨道电路的特征。还有外国轨道电路技术发展的概述。

本书的材料，特别是第三篇可供有关轨道电路设计和施工的工程技术人员之用。

目 录

第一篇 轨道电路的设备和电气参数

第一章 轨道电路的基本特征	1
§ 1. 绪论.....	1
§ 2. 对轨道电路的要求.....	4
§ 3. 轨道电路的种类.....	8
第二章 钢轨线路的电气性能	12
§ 1. 一次参数.....	12
§ 2. 钢轨线路中电波的传播.....	23
§ 3. 二次参数.....	28
§ 4. 基本方程式.....	32
§ 5. 如同四端网络的钢轨线路.....	36

第二篇 轨道电路的理论基础

第三章 沿钢轨线路电能传输条件的分析方法	40
§ 1. 直流时电能的传输.....	40
§ 2. 交流时电能的传输.....	48
§ 3. 交流时反射系数对电能传输条件的影响.....	53
第四章 轨道电路的等效电路	66
§ 1. 等效概括电路和基本方程式.....	66
§ 2. 一些四端网络的等效参数.....	75
§ 3. 单轨条轨道电路轨道四端网络的等效电路.....	75
第五章 轨道电路分流灵敏度的分析和计算方法	83
§ 1. 一般情况.....	83
§ 2. 电流介入变化法.....	84
§ 3. 转移阻抗比较法.....	90

§ 4. 电压比较法	93
第六章 断轨状态的分析和计算方法	94
§ 1. 概述	94
§ 2. 介入阻抗法	96
§ 3. 转移阻抗比较法	99
§ 4. 电压比较法	101
§ 5. 断轨时轨道四端网络系数的确定	101
§ 6. 临界道碴电阻的确定方法	115
第七章 短路状态的分析	124
§ 1. 没有阻抗联接器的轨道电路	124
§ 2. 带阻抗联接器或阻抗联接变压器的轨道电路	133
第八章 机车自动信号状态的分析和计算方法	137
§ 1. 机车自动信号状态的特征	137
§ 2. 基本方程式	138
§ 3. 机车自动信号电流与分流地点的关系	143

第三篇 各种轨道电路的分析和计算

第九章 轨道电路的种类、基本特性和应用范围	146
§ 1. 非电气化区段的轨道电路	146
§ 2. 直流电力牵引区段的轨道电路	154
§ 3. 交流电力牵引区段的轨道电路	163
第十章 直流轨道电路	166
§ 1. 调整状态	166
§ 2. 分流状态的分析和计算	182
§ 3. 断轨状态的分析和计算	188
§ 4. 脉冲轨道电路的工作特点和计算	192
§ 5. 脉冲轨道电路的计算范例	196
第十一章 交流电码轨道电路	199
§ 1. 调整状态和机车自动信号状态	199
§ 2. 断轨状态	210

§ 3.	分流状态	218
§ 4.	轨道电路终端阻抗的选择	228
§ 5.	关于钢轨线路的不平衡	229
§ 6.	电码轨道电路的计算范例	231
§ 7.	电码轨道电路的研究成果和维修方面的技术建议	238
第十二章	带二元轨道继电器的交流轨道电路	241
§ 1.	二元继电器的装置和动作特点	241
§ 2.	二元继电器相位关系的改善方法	246
§ 3.	带二元继电器的轨道电路的计算特点	250
§ 4.	带二元轨道继电器的轨道电路的计算范例	256
§ 5.	带ДСР-12型继电器的轨道电路的研究成果和维护方面技术建议	264
第十三章	直流牵引电流谐波对轨道电路影响的防护方法	276
§ 1.	谐波对轨道电路作用的性质	276
§ 2.	谐波分量频谱	277
§ 3.	电码轨道电路的防护	280
§ 4.	带检波继电器的单轨条轨道电路的工作特点	286
§ 5.	单轨条轨道电路的防护	293
§ 6.	带滤波器的单轨条轨道电路的研究成果和维护方面技术建议	297
第十四章	交流电力牵引区段的轨道电路	303
§ 1.	轨道电路的特点	303
§ 2.	基本防护原理	311
§ 3.	信号电流频率的选择	315
§ 4.	双轨条和单轨条轨道电路的特点	319
第十五章	国外所采用的轨道电路	326
§ 1.	亚音频及音频轨道电路	326
§ 2.	离子器件的电路	341

§ 3. 导电枕的轨道电路.....	342
§ 4. 轨道电路的改善途径.....	342
附 录.....	345
参考文献 (略)	

第一篇 軌道电路的設備和电气参数

第一章 軌道电路的基本特征

§ 1. 緒 論

调整行车过程的综合自动化，是现代铁路运输技术发展中的重要问题之一。由于貨物周转量规定的增长，要求提高列车重量，行车速度和行车密度。因此，广泛地采用最完善的自动控制和远程控制设备，以显著地提高铁路通过能力，保证行车安全及减轻铁路职工的体力劳动。

由于轨道电路的运用，铁路自动控制和远程控制的现代设备，如自动闭塞、带自动停车和速度监督的连续式机车自动信号、调度集中、进路式电气集中及列车运行的调度监督等设备，才可能有广泛地推广。

用铁路线路的钢轨作为导体的特种电路，叫做电气轨道电路，或简称轨道电路。在简单的轨道电路中（图 I—1），可以明显地看出下面主要组成部分：由钢轨和轨端导接线组成的钢轨

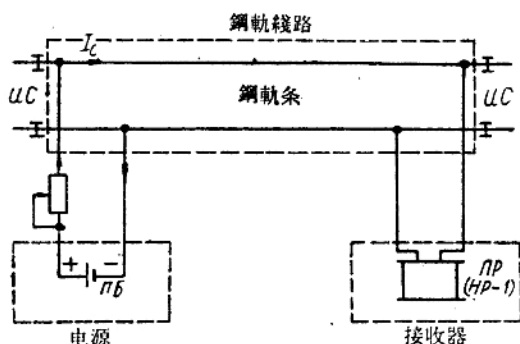


图 I—1

线路；电源，例如，轨道电池 $II B$ ；限流电阻；带接收器即轨道继电器 $II P$ 的接收设备。多半是采用电源和接收器分别放在钢轨线路两端的轨道电路；通常，轨道继电器在励磁状态，并且用流经的电流表示机车车辆未占用的空闲状态和轨道电路所有组成部分（其中也包括钢轨条）在完整状态。为表示钢轨线路状态而加在钢轨线路上的电流 I_c ，一般叫做信号电流。

为了将一个轨道电路与相邻轨道电路加以电气绝缘，在轨道电路两端的每一根轨条上均安装轨端绝缘 UC 。

利用最复杂电码轨道电路作为远程控制通信道的简图，如图 1—2 所示。这里，在钢轨线路的发送端，连接有振荡器和调制器或编码器；而在其接收端，连接有由防护器械、放大器、整流器及轨道继电器 $II P$ 所组成的轨道接收器。此外，当有连续式带自动停车的机车自动信号（АЛС）时，通过接收线圈 $II K$ 建立钢轨线路与机车接收器之间的电感耦合。这个接收器的组成元件与轨道接收器相同，但是结构样式有所不同。

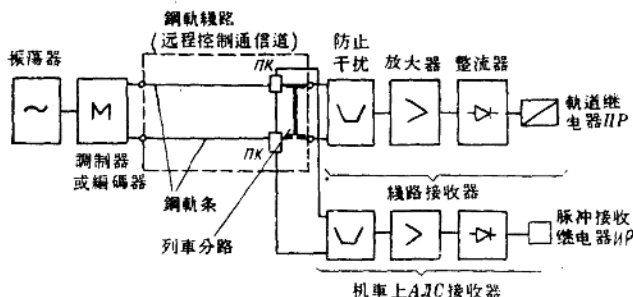


图 1—2

轨道电路的设备与电气参数与通信架空明线和输电线有显著的区别，架空明线的位置与地面距离较大，导线相互间及其与支承杆之间的电气绝缘程度均较好，导线接头处有可靠的连接。因此，通信架空明线及输电线的电气参数相当稳定，而且导线相互间的绝缘电阻及导线对地的绝缘电阻相当大。轨道电路同通信架

空明线和输电线比较，由于导体（钢轨）对地及其相互间电气绝缘较差，因而它们处在较困难的条件下；放在道床上的枕木是钢轨的绝缘体。

由于枕木和道碴的潮湿、周围温度变化及其他等因素的影响，它们本身的电导在颇大的程度上有所改变。因此，轨道电路的绝缘电阻或称为道碴电阻，是很低的，而且很不稳定（在0.25至100欧姆·公里范围内改变）。

钢轨的长度多半是较短（12.5及25米），而且它们相互间用电气接触不稳定的钢鱼尾板连接起来的。因而，虽然安装轨端导线，但是钢轨电阻（特别是在直流的情况下）的改变范围很大。

在电气化区段上，交流轨道电路的工作是特别困难的，这里，对轨道电路电气参数改变大小和性质有很大的影响，如沿钢轨流经电力牵引电流，相邻轨道电路之间有电导耦合及接触网金属支柱与钢轨相连接。这种情况，在分析和计算轨道电路时必须考虑。

轨道电路的主要特征是它们在几种状态下工作，在轨道电路元件电气参数各种数值的情况下，对每种工作状态均造成最困难的条件。

因此，必须选择仅对某一种工作状态最佳或接近最佳的轨道电路元件参数。电路元件参数选择以后，一般必须了解对其他工作状态影响程度如何。为此，对表征每种工作状态的方程式进行数学分析时，仅求得自变量的最佳数值是不够的，应研究表示这些方程式的函数图形。轨道电路的一般理论系建立在全面地研究和分析每种工作状态的基础上。当分析交流轨道电路时，必须把复数量的变化看成复变函数。

因此，在现代轨道电路中，应用各种技术设备——滤波器、半导体、饱和扼流圈、铁共振调整器、电子管和离子管等。由于有了非线性元件及非正弦电流和电压，对轨道电路的分析和研究，在较大的程度上是更复杂了。

近几年来，脉冲和电码轨道电路有了广泛地采用，在这些轨道电路中，瞬变过程起了重要的作用。大家知道，目前，仅对无损耗或损耗很小的线路，研究出瞬变过程的解析分析法，该线路系为匹配负载，并在其上沒有反射波。就轨道电路来说，其线路的损耗很大且工作在负数不匹配负载的情况下，这样一来，解析分析法很复杂。因此，为了研究稳定和建立过程及作出分析和计算的近似方法，必须作出许多轨道电路的试验工作，特别是对非线性元件。

在已出版的有关轨道电路理论的著作中，通常，公式和方程式仅供以计算的方法绘制大量个别情况的曲线族，不能表示轨道电路的一般性质，这对轨道电路的设计和元件最佳参数的选择是很复杂的。

在本书内，举例说明作者所研究的几种解析法及图解解析法的应用，由这些方法可用普通形式研究轨道电路的基本性质及选择轨道电路元件的最佳参数。这些方法系以数学、电工理论基础及电路理论等课程为基础，同时特别注意到数学结论和物理概念的结合。

§ 2. 对轨道电路的要求

对轨道电路提出下面的主要要求：当在轨道电路上沒有机车车辆时，应发出有关它空闲的信息；当在轨道电路上有一个机车车辆轮对存在及钢轨破损（钢轨条断电）或轨道电路任何元件发生故障时，应发出有关占用的信息。在轨道电路可能处在的最不利情况下，尽管是短时的，应滿足上述的要求。根据这些要求，当进行设计、计算及研究时，轨道电路分成三个基本工作状态：调整状态、分流状态及断轨状态。对每种工作状态轨道电路工作条件的影响有三个自变数：道碴电阻、钢轨电阻及电源电压。每一个自变数对上述工作状态的影响不同。对调整状态来说，使通过接收器电流最小的自变数数值为最不利的条件；钢轨阻抗最大、道碴电阻最小及电源电压最小。对分流状态来说，使通过接

收器电流最大的自变数值为最不利条件：钢轨阻抗最小、道碴电阻最大及电源电压最大，参见表 I—1。

表 I—1

轨道电路状态	单位钢轨阻抗	单位道碴电阻	电源电压
调整状态和AJJC状态	最大	最小	最小
分流状态	最小	最大	最大
断轨状态	最小	临界值 (由计算确定)	最大

电源电压最大和道碴电阻不是最大而是对每一个具体轨道电路有不同的所谓临界值的这种情况，是断轨状态的最不利条件。这是因为钢轨破损时轨道电路不完全断电，而有漏电流通过道碴绕过间断点；因此，道碴电阻是很复杂的影响断轨状态。在各种状态的情况下，上述自变数对轨道电路工作条件的影响性质与采用的电路、器械参数及轨道电路长度有关。

根据调整状态条件，希望所选择的轨道电路供电端和继电器端器械（其中包括轨道继电器）的参数，使电源至接收器电能传输所消耗的功率尽量地小一些。

根据分流状态，轨道电路全部元件参数应这样地选择，由于列车分流电阻在各种因素影响下，可能有显著地增加，因此分流灵敏度尽可能高一些。但是，当轨道电路的分流灵敏度过分高的时候，在道碴电阻较低的情况下，可能破坏它的工作，从而轨道电路断轨灵敏度通常被降低。轨道接收器内电流降至可以保证可靠地传输有关轨道电路被占用信息时加在钢轨线路上的分流电阻值，是轨道电路分流灵敏度的限度。

通常，轨道线路各点的分流灵敏度是不相同的。因此，极限分流灵敏度或分流灵敏度最小数值对每一个轨道电路来说均有一个规定的数值，该最小数值在分路效应最不利条件下由计算确定的。

为了检查分流灵敏度，引入列车分流标准电阻。在苏联列车分流标准电阻等于0.06欧姆。这就是说，在轨道电路上加电阻

0.06欧姆及比这个小一些的分路，每一个电路在任何情况下均应发出有关占用的信息。在许多国家，都采用这个标准分流的数值。分流的标准数值系按照测量资料确定的，它是列车分流的极大电阻。

列车分流电阻系由列车轮对本身的电阻 $R_{\kappa n}$ (图 I—3) 及轮箍与轨顶表面之间、A和B两点上的接触电阻 R_n 组成。由于轮箍与钢轨的接触表面很小，所以 $R_n \gg R_{\kappa n}$ 。虽然在交流的情况下，由于出现电感成份而轮对本身电阻有所增加，但是上述不等式仍然保持不变。这样一来，列车分流电阻主要取决于轮箍与钢轨之间的接触电阻；确定这个接触电阻是纯电阻。

列车分流电阻的变化范围很大——从千分之几至0.02~0.06欧姆，它与轨顶表面状态、轨道电路上的车轴数、车轴上压力大小、列车运行速度、轮箍装配质量和时间及其他等因素有关。位于轨道电路上的轮对愈

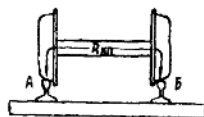


图 I—3

少，加在每一个车轴上的压力愈小，列车分流电阻愈高。特别在轨顶上生锈及冰冻的情况下，以及由砂土灰碴、油脂薄层、石油制品及其他等使轨顶污脏的情况下，这个电阻增加的更厉害（到5~10倍）。有些轮对的轮箍与轮缘之间有较高的接触电阻。

在外国铁路上，车轴压力较小的轻便内燃动车或重型轨道车经常运用在某些区段上。为此，分流标准电阻值便增至0.5~1.0欧姆，并采用轻车通过时提高分流灵敏度的特种方法。

根据断轨状态的条件，轨道电路组成元件的参数应这样选择，当钢轨破损时使继电器电流降至能保证可靠地发出占用信息。在干燥气候条件及行车密度较大的国家里（苏联、美国及其他），对轨道电路提出必须表示钢轨破损的要求。对电气化区段的几种交流轨道电路，还提出其他的要求。例如，双轨条轨道电路应保证机车自动信号设备可靠动作。这个要求，表示当列车进入继电器端时，机车接收线圈下面钢轨中的电流应不小于机车自

动信号机车设备稳定动作的数值。为了简化起见，我们以后把这个要求叫做机车自动信号状态。因此，调整状态和机车自动信号状态的临界条件是相同的（参照表 I—1）。对机车自动信号的这些要求，使轨道电路的设计过于复杂，并且在许多情况下，当选择轨道电路元件参数时，这些要求已经规定了。

轨道电路的工作还应在短路状态下进行检查，也就是说，当列车分路位于供电端时，这种检查对交流轨道电路特别重要，这是因为轨道变压器的电压和限流器的电阻在上述轨道电路中均可在很大的范围内变化，因此短路状态条件将有剧烈地改变。在许多情况下，短路状态的要求对选择供电端器械，特别是限流器参数，是一些规定的要求。

这样一来，设计最复杂类型的轨道电路，有五种工作状态——调整状态、分流状态、断轨状态、机车自动信号状态及短路状态。此外，轨道电路应防止各种干扰，该干扰可能引起绝缘区段空闲或占用的不正确表示。第一种干扰应该认为是特别危险的。通常，这些干扰产生在连续供电轨道电路中，在直流轨道电路中由直流迷流或列车照明线路漏电流（在旧的单线电路情况下）而产生的；在交流轨道电路中由牵引电流谐波成分或照明线路漏电流而产生的。在脉冲或几种电码供电的情况下，出现第二种干扰。轨道电路防止干扰的要求是相当重要的，在电气化区段，为满足这个要求以致使电路图复杂化，甚至改变成较高频率的信号电流，并且根本地改变了电路图。

此外，根据苏联现行技术条件，在轨道电路内还应检查轨端绝缘处出现短路的情况。许多外国没有提出这个要求。

当研究新型及改善现有轨道电路时，必须力求使每一个轨道电路不仅从技术上是最完善的，即保证行车安全条件的全部要求；而且在最大程度上也是经济的——有尽可能较大的长度，消耗少量电能，不需要消耗大量电缆和不需要采用贵重器械，在维修方面不需要消费大量资金和时间及其他等。

在轨道电路还担任完成远程控制通信道任务的情况下，其元

件参数的选择，应使传送信息的电气信号的失真不超出规定允许值。

§ 3. 轨道电路的种类

由于对轨道电路提出各种复杂要求，它们工作在各种情况下，以及对某些问题的各种解决方法有广阔的技术可能性，从而目前在各国实践中，采用大量的各种类型的轨道电路。因此，让我们根据主要特征研究一下一般轨道电路的种类。

根据轨道电路的动作原理，可分为开路式（图 I—4）和闭路式（图 I—1）轨道电路。在开路式轨道电路中，其元件的完整性不用电流来检查，这是因为轨道继电器正常不励磁；在机车车辆占用轨道电路的情况下，当钢轨条被列车轮对闭合时，轨道继电器励磁。一般，在这种电路中，电源 $ПБ$ 和接收器 $ПР$ 均接在一端。由于没有检查轨道电路元件的完整性，故可能发出有关股道空闲的不正确信息。因此，开路式轨道电路仅在机械化驼峰电气集中上采用，该电气集中轨道电路的长度较短、它处在不断地被监督下及保证继电器动作时间短；也利用这种轨道电路完成辅助作用。

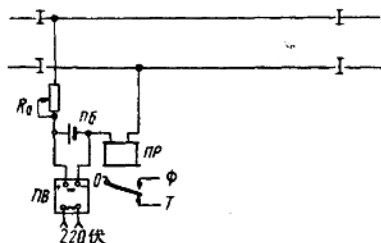


图 I—4

在闭路式轨道电路中，当其上没有列车时，用流通的电流来检查全部元件的完整性，其中也包括轨条。因此，在自动控制和远程控制的所有现代设备中，均广泛地采用这种轨道电路，后面仅研究闭路式轨道电路。

按照信号电流的种类，可分为直流轨道电路和交流轨道电路。直流轨道电路有最简单的电路和元件结构，并且由于它们采用蓄电池或一次电池，故有可靠的电源。它们可用连续及电码电流或脉冲电流供电。无极继电器及有极继电器或组合继电器（无极——有极）可以作为这些轨道电路的接收器。当脉冲或电码供电时采用脉冲有极继电器，当连续供电时，采用无极继电器。

由两个继电器组成的组合接收器具有较大的返还系数，它们在两种供电情况下均能采用。

在装设机车自动信号的情况下，连续供电或脉冲供电的直流轨道电路，应在列车进入其上后，由辅助电码交流供电。

交流轨道电路同直流轨道电路比较，具有较复杂的电路和元件结构；由于交流轨道电路工作在各种不同和比较复杂的情况下，因此它们比直流轨道电路有较多的类型。此外，在交流的情况下，由于应用电子学、无接点元件及其他等最新成就，使各种技术问题的解决有较多的可能性。

交流轨道电路可由工业频率交流及与工业频率不同的交流或简称非工业频率交流供电。

当工业频率交流时，采用电码或连续供电，但是，在装设机车自动信号的情况下，当列车进入连续供电轨道电路后，该轨道电路应另外由电码电流供电。利用下面器件作为工业频率电流供电轨道电路中的接收器：当电码供电时利用检波脉冲继电器，当连续供电时利用检波单元继电器、二元感应继电器（扇翼型或电动机型）、及电子继电器。非工业频率的信号电流可以是亚音频，例如，75赫（苏联），83.3赫（法国）及100赫（日本），或音频（由300至8700赫）。在苏联、法国、美国、日本、葡萄牙及其他国家，采用亚音频或音频电流。在苏联，当75赫时，仅采用轨道电路的脉冲或电码供电，而在法国，当83.3赫时，仅采用不连续供电；当音频时，采用两种供电——脉冲及连续供电。用下面器件作为非工业用电频率轨道电路中的接收器：当脉冲或电码供电时，若采用75赫，则用脉冲检波继电器；若采用其他亚

音频或音频时，则用电子设备。当连续供电时，在亚音频轨道电路中，若采用频率83.3赫时，则用二元感应扇翼型继电器作为接收器，若采用其他亚音频及音频时，则用电子设备作为接收器。

在直流电力牵引区段上，采用两种交流轨道电路：单轨条及双轨条轨道电路。

根据轨道电路利用钢轨条作为通过牵引返回电流的数量，来决定叫做单轨条或双轨条轨道电路。这两种电路的区别，主要在于元件的结构特征，该元件系保证牵引电流由一个轨道电路绕轨端绝缘通向另一个轨道电路：在单轨条轨道电路中(图 I—5, a)有牵引连接线 TC ，而在双轨条轨道电路中有轨道阻抗联接变压器 ΔT_n 及 ΔT_p (图 I—5, b)。

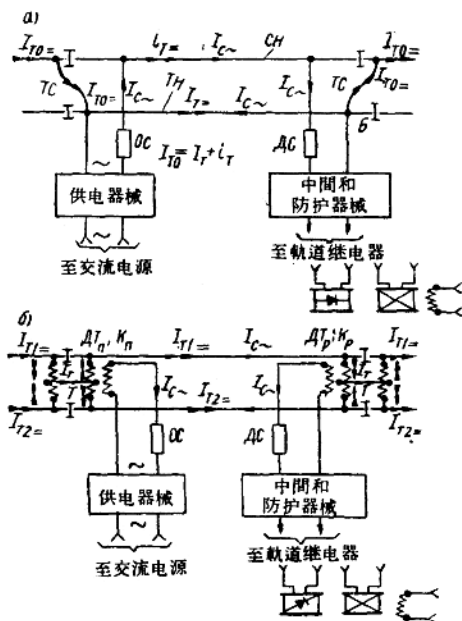


图 I—5