

西南交通大学出版社

铁路继续教育系列教材

电力牵引供电系统技术及装备

铁道部人事司 组织编写
铁道部人才交流培训中心



西南交通大学

铁路继续教育系列教材

电力牵引供电系统技术及装备

铁道部人事司 组织编写
铁道部人才交流培训中心

贺威俊 主编

丁圻谔 商福崑 主审

西南交通大学出版社

· 成都 ·

铁路继续教育系列教材
电力牵引供电系统技术及装备
铁道部人事司 组织编写
铁道部人才交流培训中心
贺威俊 主编
出版人：范子亮

*

西南交通大学出版社出版发行
(成都二环路北一段111号 邮政编码:610031)
郫县报华印装厂印刷

*

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:15.5
字数:365千字 印数:1~3000册
1998年10月第1版 1998年10月第1次印刷
ISBN 7-81057-229-6/T·300
定价:18.00元

铁路继续教育系列教材编委会 名 单

编委会主任：华茂昆
编委会副主任：费克勤 安立敏 温继武
编委会成员：杨友根 吴 风 丁圻谔
宋凤书 胡东源 卢祖文
曹 菁 柳呈祥 于 川
许守祐 章根明 柴浦安
顾 聪 蔡申夫 刘国祥
王申庆 何 璧 张玉秀
杨安立 吴信然 王 成
朱克勤 赵建国 张全寿
黄大光

序 言

《铁路继续教育系列教材》，是对铁路专业技术人员进行继续教育的基础读本。它的问世，对于抓好铁路继续教育，提高铁路专业技术队伍的素质是有益的。

铁路是我国交通运输的骨干。在加快改革开放和发展社会主义市场经济的新形势下，铁路面临着新的机遇和挑战。为把我国铁路现代化建设事业全面推向 21 世纪，我们必须以十五大精神为指导，加快铁路改革与发展，实施科教兴路战略，使铁路从传统产业逐步走向现代化。

实现铁路现代化，关键是科技，基础在教育。加快铁路科技进步，提高铁路专业技术队伍的素质，直接关系到铁路现代化的进程，现代科技发展日新月异，世界铁路在高速技术、重载技术、管理技术、安全技术和信息技术等方面取得了重大进展。为了适应新的形势，必须对全路专业技术人员广泛开展继续教育。

为了搞好铁路专业技术人员的继续教育，编写一套好的教材是非常重要的。《铁路继续教育系列教材》反映了现代科学技术发展的水平和铁路企业技术进步的特点，兼顾了教材理论体系的系统性和专业人员选修的适用性，对专业技术人员了解和把握本专业学科领域国内外科技发展动态，学习掌握先进的技术、理论和方法等会有帮助。希望全路各级组织、各级领导都来关心继续教育的工作。各单位要根据实际，以这套教材为基础读本，切实抓好继续教育的工作。全路广大专业技术人员要通过继续教育，不断更新知识内容，拓宽知识面，为我国铁路现代化建设事业作出新贡献。

这套教材由铁道部人事司、人才交流培训中心组织各方面的专家、教授和学者编写，部机关有关司局进行指导和审定，在此，我谨向为这套教材的编写、出版倾注了大量心血的所有工作人员表示衷心的感谢。

傅 志 寰

一九九七年十二月一日

前 言

我国铁路牵引动力改革的方针是大力发展电力牵引,合理发展内燃牵引。由于电力机车总功率大,起动和加速快,过载能力强,运输能力大,能满足现代铁路对快速、重载运输的需要,电力牵引对缓解我国铁路运输能力紧张状况有重大作用,并具有热效率高、运营费用低、无空气污染等多方面技术经济优势。因而,改革开放以来,我国铁路电气化得到迅速发展,截至1997年底,电气化铁路通车里程已达11 000 km,占铁路总通车里程的17%,承担铁路总运输工作量的比重接近30%。

随着繁忙干线高、快速与重载电气化铁路的陆续兴建和运营,对电力牵引供电系统安全性、经济性和电能质量提出了更高的要求。国内外实践证明,牵引供电系统的规划设计、技术装备、运行管理分析和控制检测手段的现代化是更好的满足上述要求的有效措施。近年来,以计算机技术、信息通信、电力电子技术为代表的大量现代科技成果和新设备、新材料在电气化铁路的推广和应用,使牵引供电系统技术装备的面貌发生了很大变化,并逐步向免维修化、自动化和信息化的方向发展。

在新形势下,为适应本专业学科领域科学技术的发展,提高铁路电气化运行管理技术人员的业务水平,按照铁道部领导和有关业务主管部门的要求,特编写本书作为继续教育的教材。它也可作为铁路电气化设计、施工等技术人员、本专业高校师生、研究生和电力工程技术人员的参考书。

本书共分为四章,以高、快速和重载电力牵引为重点,系统地介绍了电力牵引供电系统及其各组成部分的基本结构,主要技术装备和新技术原理及其具体应用。第一章,电力牵引供电系统基本分析,介绍了目前常用的供电方式,及其分析比较、主要电气量与参数计算方法和系统仿真;谐波、负序和无功形成的原理,分析计算与改善措施;供电系统绝缘配合与过电压保护方法。第二章,牵引变电所主设备和监控保护、检测新技术,介绍新型牵引变压器、并联综合补偿技术、自动调压、微机保护与变电所综合自动化以及高压设备与二次系统新型测试装置等的原理和应用。第三章,高快速接触网与受流技术,介绍弓网作用的动力分析、动态仿真、弓网参数对受流质量的影响,高快速接触网悬挂与支持结构、悬挂振动特性和接触网的动态、静态检测技术与检测车装置。第四章介绍牵引供电微机远动监控系统的构成原理、通信系统和设备状态监控技术与分析等。

全书内容以实用新技术、新装备和新材料的原理和应用为主线,对传统技术和原有装备、器件不再重复介绍。具有取材新颖、内容全面充实、重点突出、以及理论分析与实际应用并重等特点。

本书由西南交通大学和内江铁路机械学校有关教师共同编写,各章编写的分工为:第一章,程波(第1~10节),刘明光(第11节),第二章,贺威俊(1,5,6,8,11节),李群湛(第3节),高仕斌(第2,4,7节和6节中的智能重合闸部分),王富荣(第9节)、刘承志(第10节),第三章,李岚(第1,3,4节),陈唐龙(第2节)、吴积钦(第5节),董昭德(第9,10,11,12节),董昭德、吴积钦(第6,7,8节),第四章,王茜(全部1~7节)。

西南交通大学贺威俊教授为本书主编,并负责对全书进行统稿和审校,由部机务局丁圻涛

高级工程师和铁道科学研究院商福崑研究员担任主审。

西南交通大学于万聚教授对第三章作了重点审校,简克良教授、王富荣副教授对本书编写的组稿、联系做了不少工作,西南交大电气工程学院领导对本书编写给予了全力支持。本书在编写过程中得到铁道部机务局、铁道科学研究院机辆所和成都铁路局等单位的大力支持和帮助,特别是张珂高工、白山、殷琴芳、常敏森、叶柏洪研究员和文小鹰副研究员等有关专家,对书稿提出了多方面宝贵意见和建议,在此作者对上述单位和个人一并表示感谢。

在本书编写过程中,作者结合本人教学、科研和生产实践经验,对内容深度及其选择、各章节体系安排和文字叙述都尽了较大努力,但对现场的实际需要不一定能完全满足,诚恳地希望对本书提出批评和指正。

作者

1998年3月

目 录

第一章 电力牵引供电系统基本分析

1.1 概 述	1
1.2 带回流线的直接供电(DN)方式	1
1.3 自耦变压器(AT)供电方式	5
1.4 牵引网负荷电流和电压水平计算	16
1.5 电力牵引系统负序电流及其改善措施	21
1.6 牵引网谐波及其治理	25
1.7 牵引网功率因数及其改善措施	31
1.8 牵引网供电电压改善方法	36
1.9 牵引供电系统仿真及供电能力核查	40
1.10 高速铁路牵引供电系统构成及有关技术问题	44
1.11 牵引供电系统绝缘配合与过电压保护	48

第二章 牵引变电所主设备和监控保护、测试新技术

2.1 牵引变电所功能和主要运行技术指标	58
2.2 新型牵引变压器原理与特性	59
2.3 并联综合补偿技术	66
2.4 SF ₆ 全封闭组合电器及成套配电装置	76
2.5 牵引变电所自动调压	82
2.6 微机继电保护原理及其在供电系统中的应用	87
2.7 牵引网故障点测距与实时录波	107
2.8 牵引变电所综合自动化系统	115
2.9 高压电气设备试验新技术及其在线检测	120
2.10 牵引变电所二次设备测试系统	129
2.11 接地与接地装置系统	138

第三章 高、快速铁路接触网及受流技术

3.1 弓网相互作用动力分析	145
3.2 接触悬挂的振动特性及受流稳定性	154
3.3 弓网参数对受流质量的影响	157
3.4 弓网系统计算机动态仿真	161
3.5 高速接触网零件	165
3.6 接触网分段、分相装置	167

3.7	高速接触网的接触导线	171
3.8	高速接触网线岔	172
3.9	高速接触网悬挂方式和支持装置	178
3.10	接触网的静态检测	182
3.11	接触网动态检测	187
3.12	接触网检测车	195

第四章 牵引供电远动监控系统

4.1	牵引供电远动监控系统基本概念	200
4.2	远动监控调度端系统	205
4.3	远动监控执行端系统	209
4.4	远动通信系统	215
4.5	牵引供电远动监控系统的监控功能	222
4.6	远动监控系统的统计分析处理功能	226
4.7	远动监控系统的故障分析处理功能及系统维护	230

参考文献	235
------------	-----

第一章 电力牵引供电 系统基本分析

1.1 概 述

电气化铁道供电系统由牵引供电系统和一次供电系统组成,由国家电力系统统一供电。

牵引供电系统是一种复杂的单相网络系统,它在许多方面相对于电力系统有其特殊性。随着技术、经济和铁路运输的不断发展,我国电力牵引供电系统结构从单一的供电方式发展为多种供电方式,这给牵引供电系统的运营管理和技术上的提高带来了一定困难。

我国电力牵引供电系统的主要特点有以下几方面:

① 电力机车是单相移动性随机负荷,是一种负序源。

② 非线性整流器机车,成为一种谐波源,并从电力系统和牵引供电系统获取无功。

③ 供电方式及设备种类多样化,有直接供电方式、带回流线的直接供电方式、串联吸流变压器、BT 供电方式、自耦变压器 AT 供电方式,这些供电方式的技术和经济特性有较大的差异。对牵引变压器,有单相、YN,dll 接线、斯科特接线、伍德桥接线、阻抗匹配平衡型、三相不等容量型等形式,它们具有不同的结构和性能特点。由于供电方式不同,接触网结构类型也较多。

④ 牵引供电系统和电力机车在电气上是一个连续的整体,易于实现自动化和信息化管理。

牵引供电系统中存在的主要技术问题,包括牵引变压器供电能力的提高及增容、牵引网电压的调节、电力系统要求对谐波、负序、无功的治理等。为解决这些技术问题,在设计和运行中需要对牵引供电系统进行深入研究,例如:对各种供电方式的结构、参数、性能的分析计算和优化;对变压器过负荷能力及对负荷平衡能力的研究;利用计算机对谐波、负序、无功、电压损失、防干扰能力等进行系统地分析和综合治理研究;牵引供电系统的过电压保护和绝缘配合有效措施的研究等等。

我国电气化铁道已运营了几十年,在实践中积累了大量的经验,但与铁路电气化发达国家相比,在技术及装备上仍有较大的差距。特别是在面临高速、重载和扩能要求下,牵引供电系统中更有许多技术难题需要解决。

本章将对牵引供电系统中有关基本原理和系统电气计算的基本技术问题进行分析 and 讨论。

1.2 带回流线的直接供电(DN)方式

铁道电气化发展较早的国家,如日本最初采用由吸流变压器和负馈线(NF)构成的 BT

供电方式,60年代末期开始采用 AT 供电方式。这两种供电方式是为减轻对平行分布在电气化铁路沿线的通信线的干扰危害而采用的,其抗干扰效果十分显著。

但 BT、AT 供电方式也有妨碍其自身良好性能发挥的固有弱点。AT 方式设备复杂、一次投资高、运营费用大、维护困难,特别在多隧道区段应用更为困难。BT 方式由于其半段效应、接触网分段及牵引网阻抗大等弱点,对高速和重载行车的适应能力较差。

目前,除日本以外,世界上绝大多数国家的铁路(交流)电气化均采用了直接供电方式。直接供电方式与 BT、AT 供电方式相比,其馈电回路和设备简单、投资省、运营维护方便。采用直接供电方式,对简化系统设备、提高供电可靠性、增强技术指标及广泛的适应性等方面具有极大的现实意义。

为增强直接供电方式的防干扰性能,按防干扰原理,提出了用直接供电加回流线(负馈线)的供电方式,简称为 DN 供电方式。为能取得最好的防干扰效果,则需研究回流线的空间布置(与接触网的磁耦合关系)和设法降低回流线—地、钢轨—地回路的自阻抗以提高回流率。

1. DN 供电回路构成及特点

DN 供电回路的构成见图 1-1。

由图 1-1 可知, DN 供电方式是由接触网、钢轨、沿全线架设的负馈线 NF (每隔几公里用 P 金属线和钢轨相连接)组成。由于 NF 和钢轨并联连接,使得正常运行时钢轨中负荷电流的一部分分流到 NF 中去,因此,可以减少流入大地的电流,减轻对通讯的干扰危害,降低钢轨电位,减小馈电回路的阻抗。另外,当绝缘子闪络时, NF 线可起到回归短路电流的作用,即具有保护线(PW)的特性。

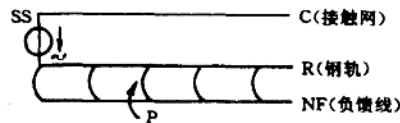


图 1-1 DN 供电方式的构成示意图

2. DN 供电方式特性分析

对 DN 供电方式的特性分析主要有两方面的内容。一是运用长回路和短回路的概念,分析回路阻抗、回流率、屏蔽系数和系统压损等技术特性;二是分析回流网的参数调整及空间布置对取得最大回流率的作用。分析表明,回流网的优化布置和选择是提高 DN 供电方式技术性能,并进而扩大其应用范围的有效方法。

(1) DN 方式的计算模型

对单线单边供电和复线单边供电,从回流角度看, DN 方式的线路计算模型均可等效成图 1-2 所示的单边单线形式。

图中, C、NF、T、G 分别表示接触网、负馈线、钢轨、地; Z_C 、 Z_N 、 Z_T 、分别为 C、NF、T 各导

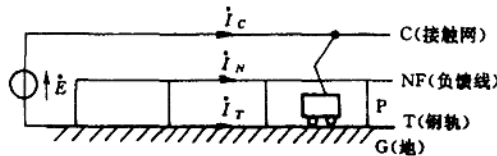


图 1-2 DN 方式线路计算模型

线一地回路单位自阻抗 (Ω/km) ; Z_{NC} 、 Z_{NT} 、 Z_{TC} 分别为 NF—C、NF—T、T—C 各导线一地回路间的单位长互阻抗 (Ω/km) ; E 为牵引变电所馈线基波电源电势 (kV) ; P 为 NF、T 之间的连接线。

(2) DN 方式的长、短回路分析方法

为分析方便可把线路分为长、短回路两部分。长回路是指变电所到机车近变电所侧第一根连接线之间的线路；短回路是指机车所在的两根连接线 P 之间的线路。

① 长回路分析

若 Z_c 为单线值, 则复线接触网一地回路单位自阻抗为

$$Z_{c(M)} = [Z_c(2L-x) + Z_m \cdot x] / 2L \quad (\Omega) \quad (1-1)$$

式中, L 为供电臂长度 (km) ; Z_m 为上、下行接触网之间的互阻抗 (Ω/km) ; x 为机车离变电所的距离 (km)。

单线牵引网单位长阻抗为

$$Z'_L = Z_c - \frac{Z_{NC}(Z_T Z_{NC} - Z_{NC} Z_{NT}) + Z_{TC}(Z_N Z_{TC} - Z_{NT} Z_{NC})}{Z_N Z_T - Z_{NT}^2} \quad (\Omega) \quad (1-2)$$

长回路 (长 l) 的总阻抗为

$$Z_L = Z'_L \cdot l \quad (1-3)$$

对复线情况, 式 (1-2) 中 Z_c 应以 $Z_{c(M)}$ 取代。

通过对长回路分析, 可导出回流网的回流系数 \dot{K}_B 。 \dot{K}_B 定义为

$$\dot{K}_B \triangleq -(\dot{I}_N + \dot{I}_T) / \dot{I}_C \quad (1-4)$$

式中, \dot{I}_N 、 \dot{I}_T 、 \dot{I}_C 分别为 NF、T、C 各导线一地回路中的电流 (A)。

\dot{K}_B 可用下式计算, 并分解为实、虚部, 简记为

$$\dot{K}_B = \frac{(Z_T - Z_{NC} - Z_{TC} Z_{NT}) + (-Z_{NT} Z_{NC} + Z_N Z_{TC})}{Z_N Z_T - Z_{NT}^2} = (A_1 + jA_2) / (B_1 + jB_2) \quad (1-5)$$

显然, 若能使 $\dot{K}_B = 1$, 则 I_C 完全由回流网吸上, 地中电流为零。由式 (1-5) 可知, 要得到理想的回流系数值, 需要调整 r_T 、 r_N (T、NF 线单位长电阻)、 X_T 、 X_N (T、NF 线单位长电抗) 和 X_{NC} 、 X_{NT} 、 X_{TC} (T、NF、C 三线之间互电抗) 参数。 X_{NC} 、 X_{NT} 、 X_{TC} 由空间布置情况决定, 当 T、NF、C 三线空间布置一定后, 可选 X_T 、 X_N 作为调整变量, 可以用在 T、NF 中串联电容 (SC) 的方法来调整 X_T 、 X_N 值。 NF、T 线中单位长线路上串联电容的容抗为

$$\left. \begin{aligned} X_{NSC} &= X_{NC} - X_N \\ X_{TSC} &= X_{TC} - X_T \end{aligned} \right\} \quad (\Omega) \quad (1-6)$$

式中, X_{NC} 、 X_{TC} 为无 SC 时 NF、T 导线一地回路的单位长自电抗。当 X_T 、 X_N 值确定后代回式 (1-5) 中, 可计算出实际回流率, 记为 \dot{F} 。

值得指出的是, 由于牵引负荷中含有谐波分量, 回流网对基波和各次谐波的回流作用是不同的。不过, 以基波下回流系数 K_B 最大来选择 X_T 、 X_N 也会有助于各次谐波回流率的提高。有

SC 时, NF、T 的 n 次谐波自电抗可按下式计算:

$$\left. \begin{aligned} X_N(n) &= X_{NO}(n) - X_{NSC}/n \\ X_T(n) &= X_{TO}(n) - X_{TSC}/n \end{aligned} \right\} \quad (\Omega) \quad (1-7)$$

式中, $X_{NO}(n)$ 、 $X_{TO}(n)$ 为无 SC 时, NF、T 线一地回路的 n 次谐波自电抗。

DN 方式长回路屏蔽系数 $\dot{\lambda}_L$ 可由回流率 \dot{F} 求得, 即

$$\dot{\lambda}_L = 1 - \dot{F} \quad (1-8)$$

② 短回路分析

单线、复线 DN 方式短回路的线路计算模型见图 1-3 所示。

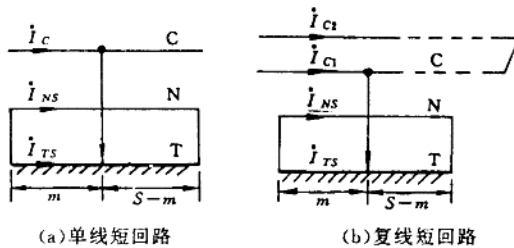


图 1-3 单、复线短回路计算模型

当把复线上、下行对 NF、T 线的影响综合考虑时, 则两种模型是等效的。设短回路长 S (km)。当机车在长 $l+m$ (km) 处取流时, 牵引网阻抗 Z_u 为:

$$Z_u = Z_C(l+m) - \Delta Z_L(l+m^2/S) \quad (\Omega) \quad (1-9)$$

式中, ΔZ_L 为

$$\Delta Z_L = \frac{Z_{NC}(Z_T Z_{NC} - Z_{TC} Z_{NT}) + Z_{TC}(Z_N Z_{TC} - Z_{NT} Z_{NC})}{Z_N Z_T - Z_{NT}^2} \quad (\Omega) \quad (1-10)$$

DN 方式回流网的回流率为

$$\dot{F}_{(s)} = \frac{m}{S} \dot{F} \quad (1-11)$$

上式说明, 随着机车进入和在短回路内移动, 短回路的回流率将线性增大, 直至长回路的回流率。

当通信线路覆盖整个短回路时, 短回路的屏蔽系数与长回路相同, 但当通信线的部分或全部被短回路覆盖时, 则有类似于 BT 方式的半段效应存在。若要求 DN 方式短回路屏蔽系数 λ_S 不大于 BT 方式半段内的屏蔽系数 λ_{BT} , 则可用下式计算 DN 方式的短回路长度:

$$S \leq \frac{S_{BT} - Y}{F \cos \theta_F - \sqrt{(F \cos \theta_F)^2 - 1 + \lambda_{BT}^2}} \quad (1-12)$$

式中, S_{BT} 为 BT 半段长度 (km), Y 为平行通信线末端到短回路远端的长度差 (km), θ_F 为回流率 \dot{F} 的相角。

3. 对 DN 供电方式分析的结论

对 DN 供电方式作全面分析后可得出如下结论。

(1) 复线回流网的屏蔽效果较单线好。

当复线 NF 根数与单线相同时,因复线钢轨一地回路裂相作用较大,自阻抗较小,故复线 DN 方式的长回路屏蔽效果较单线好些,但差异不大。若复线回流网中 NF 线根数按单线加倍时,复线 DN 方式的长回路屏蔽效果明显比单线好。

(2) DN 方式中 NF 线对屏蔽效果的提高是明显的,但也是有限制的。

在技术指标上,随着 NF 线根数增加,屏蔽效果呈饱和型较好;在经济指标上,通常 NF 线根数与其投资近似成正比,再考虑到支柱容量和安装问题,故单线区段以不多于 3 根 NF 线为宜。

NF 线与接触网的近距悬挂对提高屏蔽效果特别有效。但由于 NF 线与钢轨相连,故从绝缘设计上考虑,NF 线对接触网的接近程度是有限度的。

对 DN 方式的屏蔽效果,可从加入 SC 适当增加 NF 线根数,最大可能地实施 NF、T 近距悬挂等方面考虑,有可能使其与 BT 供电方式的屏蔽效果相仿。

(3) 为增强屏蔽效果,应考虑短回路长度 S 。

S 值的选择应考虑通信线与接触网的相对位置,还应考虑线路轨道电路的结构。 S 值一般可选为 1 km 左右。

(4) DN 方式能较大程度地改善供电动力指标。

DN 方式改善供电动力指标,一是使牵引网电阻下降而节能。但无串补 SC 优于有 SC,因接入 SC 后回流网中 NF、T 线的阻抗均衡度变劣所致,特别是在单根 NF 线时尤为显著。二是使牵引网压损降低而延长供电距离或使网压水平更趋稳定。有 SC 时可供距离总比无 SC 为长。若与 BT 供电方式相比, DN 方式可供距离约增长一倍。当 DN 方式的供电距离按 BT 方式的供电距离设计,则其网压水平高,能适于高速或重载牵引的需要。

总之, DN 供电方式具有供电方式简单、可靠的优点,通过优化其结构和参数能保证较好的屏蔽效果,在稳定网压、延长供电距离、节能方面也有较明显的优势,其成本与运营维修费用均比 AT、BT 方式低得多,它还克服了 AT、BT 方式的某些弱点(如 BT 方式的吸流间隙)。在高速或重载的研究中, DN 方式引起了国内外学者和工程技术人员的兴趣和关注。有关 DN 供电方式的分析研究可参阅文献[5]。

1.3 自耦变压器(AT)供电方式

自耦变压器(AT)供电方式已在我国的京秦、大秦、郑武等电气化区段运用。我国电气化科技人员在消化吸收国外研究成果的基础上,对有关 AT 网络的电气计算、防干扰性能计算、网络结构优化计算等方面作了深入的研究,提出了一整套先进的分析计算方法。在运营方面经过多年的实践,也积累了大量的经验,也还存在着一些问题急需解决。

1.3.1 AT 供电方式基本原理

AT 供电方式示意图 1-4。其牵引网结构较复杂,由接触悬挂 T、正馈线 F、保护线 PW

(包括 CPW 线)、轨道大地系统 R 以及每隔一定距离设置的自耦变压器 (AT) 构成。AT 并联于接触导线和正馈线之间, AT 中点和钢轨相连, 使大部分回流流经正馈线, 从而降低对邻近通信线的干扰。为尽量减小感应环的尺寸, 正馈线和接触导线架设在同一支柱上。一般情况下, 正馈线和接触导线对钢轨具有相同的电压。

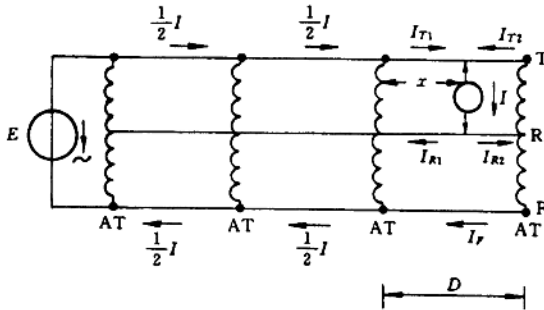


图 1-4 AT 供电方式示意图

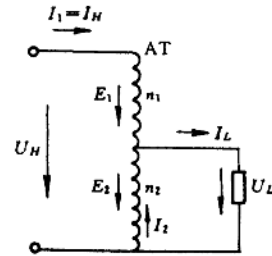


图 1-5 AT 工作原理

1. 自耦变压器工作原理

自耦变压器的工作原理如图 1-5 所示。它的一次和二次回路共用部分绕组 (图中的 n_2 部分), 而 n_1 只有一次电流通过。

设 U_H, U_L 分别为一次、二次回路电网电压, E_1, E_2 分别为 n_1 和 n_2 的感应电势, I_L 为二次负荷电流, I_1, I_2 为铁心不饱和且不计激磁电流时一、二次绕组电流。

n_1 线圈的容量等于:

$$E_1 I_1 = (U_H - E_2) I_H = (U_H - E_L) I_H = U_H I_H - E_L I_H \quad (1-13)$$

n_2 线圈的容量等于:

$$E_2 I_2 = U_L (I_L - I_1) = U_L I_L - U_L I_1 \quad (1-14)$$

变压器一、二次回路的功率应相等:

$$U_H I_H = U_L I_L \quad (1-15)$$

从而, $E_1 I_1 = E_2 I_2$, 称为 AT 的自身容量。而 $U_H I_H$ 称为 AT 的线路容量。

当 n_1 与 n_2 相等时, 有

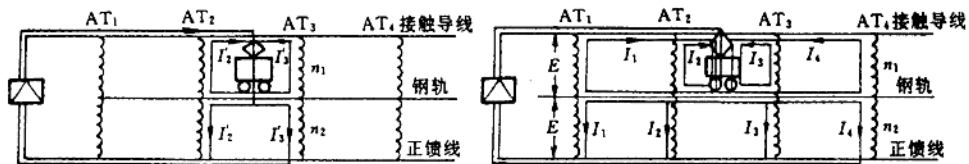
$$\frac{\text{自身容量}}{\text{线路容量}} = \frac{E_1 I_1}{E_H I_H} = \frac{E_1}{2 E_1} = \frac{1}{2} \quad (1-16)$$

式(1-16)说明输入电压为输出电压的 2 倍, 也就是说, 通过自耦变压器可以输入较高的电压而得到机车所需的低电压。电流则相反, 输入电流为输出电流的一半。利用 AT 这个特点, 可增大变电所间的距离和增大传输功率, 减少牵引网损耗。

2. AT 网络的电流分布

AT 在漏抗为零的理想条件下, AT 网络的电流分布如图 1-6(a) 所示。

由于自耦变压器绕组存在漏抗和自耦变压器的容量有限, 因而离机车远的 AT 也供出牵



(a) 忽略 AT 漏抗(理想)

(b) 考虑 AT 漏抗(实际)

图 1-6 AT 供电回路电流分布

引电流,所以在全部供电分段的轨道中都有电流,如图 1-6(b) 所示。这样,有一部分轨道电流流入大地,形成地中电流,引起对邻近通信线路的感应。随着机车位置的变化,感应电流的分布发生变化并呈复杂的走势,而且在整个供电臂中,无论机车在什么位置,都存在感应电流,使感应电势发生较复杂的变化。不过,由于 AT 的漏抗很小(短路电压多在 1% 以下),因而机车所在的 AT 区段以外的 AT 向机车供给的电流很小,在定性地描述 AT 供电方式对通信线感应影响的防护作用时,可按图 1-6(a) 的理想电流分布进行。

在复线区段,当上、下行接触网通过分区亭实现并联供电时,AT 网络中电流的分布如图 1-7 所示。

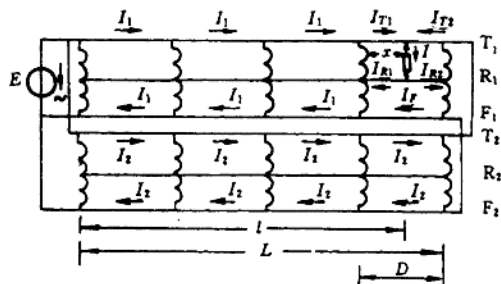


图 1-7 复线并联供电 AT 网络电流分布图

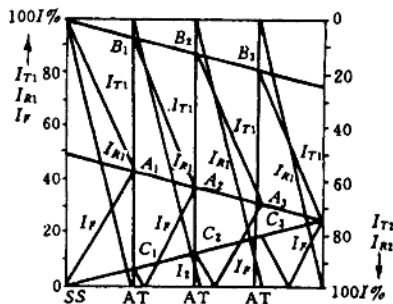


图 1-8 复线 AT 网络的电流分布曲线

设供电臂上 AT 段数为 n , 则网络内电流分布可由下式确定:

$$\left. \begin{aligned}
 I_{T1} &= \left[\left(1 - \frac{i-1}{4n} \right) - \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4n} \right) \frac{x}{D} \right] I \\
 I_{T2} &= \left[\frac{i-1}{4n} + \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4n} \right) \frac{x}{D} \right] I \\
 I_{R1} &= \left(1 - \frac{x}{D} \right) I \\
 I_{R2} &= \frac{x}{D} I \\
 I_F &= \left[\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{4n} \right) \frac{x}{D} - \frac{i-1}{4n} \right] I \\
 I_1 &= \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{4L} \right) I \\
 I_2 &= \frac{l}{4L} I
 \end{aligned} \right\} \quad (1-17)$$

式中, n 为供电臂内 AT 段数, L 为供电臂长度 (km); l 为列车至牵引变电所距离 (km); i 为列车所在 AT 段序号。

需要指出, 复线单边并联供电 AT 网络中设置保护线对网络内的电流分布没有影响。

复线 AT 网络的电流分布曲线如图 1-8 所示。

3. AT 网络的牵引网阻抗

AT 的漏抗 Z_x 一般都很小, 在同时忽略钢轨漏泄导纳和 AT 漏抗的条件下, 可得到 AT 馈电回路的简化等价电路, 如图 1-9 所示。

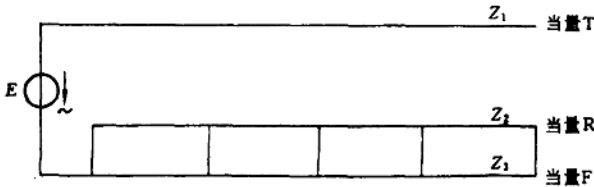


图 1-9 简化的 AT 等价(当量)电路

由等价回路, 从变电所至任意点 n (距变电所 l_n km) 处的 T-R 间牵引网总阻抗为

$$Z_n = Z_L l_n + Z'_L \left(1 - \frac{X_n}{D_n}\right) X_n \quad (1-18)$$

式中
$$Z_L = Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} \quad (1-19)$$

$$Z'_L = \frac{Z_2^2}{Z_2 + Z_3} \quad (1-20)$$

其中, Z_1 为消去互阻抗后的等价接触导线自阻抗, Z_2 为消去互阻抗后的等价钢轨自阻抗, Z_3 为消去互阻抗后的等价正馈线自阻抗。 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 的表达式为

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= \frac{1}{2} (Z_T + Z_{RF} - Z_{TR} - Z_{TF}) \\ Z_2 &= Z_R + \frac{1}{2} (Z_T - 3Z_{TR} - Z_{RF} + Z_{TF}) \\ Z_3 &= \frac{1}{4} (Z_F - Z_T) + \frac{1}{2} (Z_{TR} - Z_{RF}) \end{aligned} \right\} \quad (1-21)$$

式中, Z_T 、 Z_R 、 Z_F 及 Z_{TR} 、 Z_{RF} 、 Z_{TF} 分别为 T、R、F 的自阻抗及相互间的互阻抗。

根据式(1-18), 可绘出 AT 馈电回路阻抗与距离的关系曲线, 如图 1-10 所示。

图 1-10 中所示曲线为单线 AT 网络的阻抗、距离关系曲线。在图中, 直线 1 为 T-F 间的长回路阻抗, 其斜率即为长回路的单位阻抗。在每一个 AT 段中, 由于段中阻抗增量的影响, 形成一系列鞍形曲线。各 AT 段的鞍形曲线中都有一个极大值。当列车处于 AT 段中的极点位置时有最大的牵引网阻抗。对单线区段来说, 各 AT 段的极点位置是固定不变的, 它由下式计算:

$$X_{\max} = \frac{Z_L + Z'_L D}{2Z'_L} \quad (1-22)$$