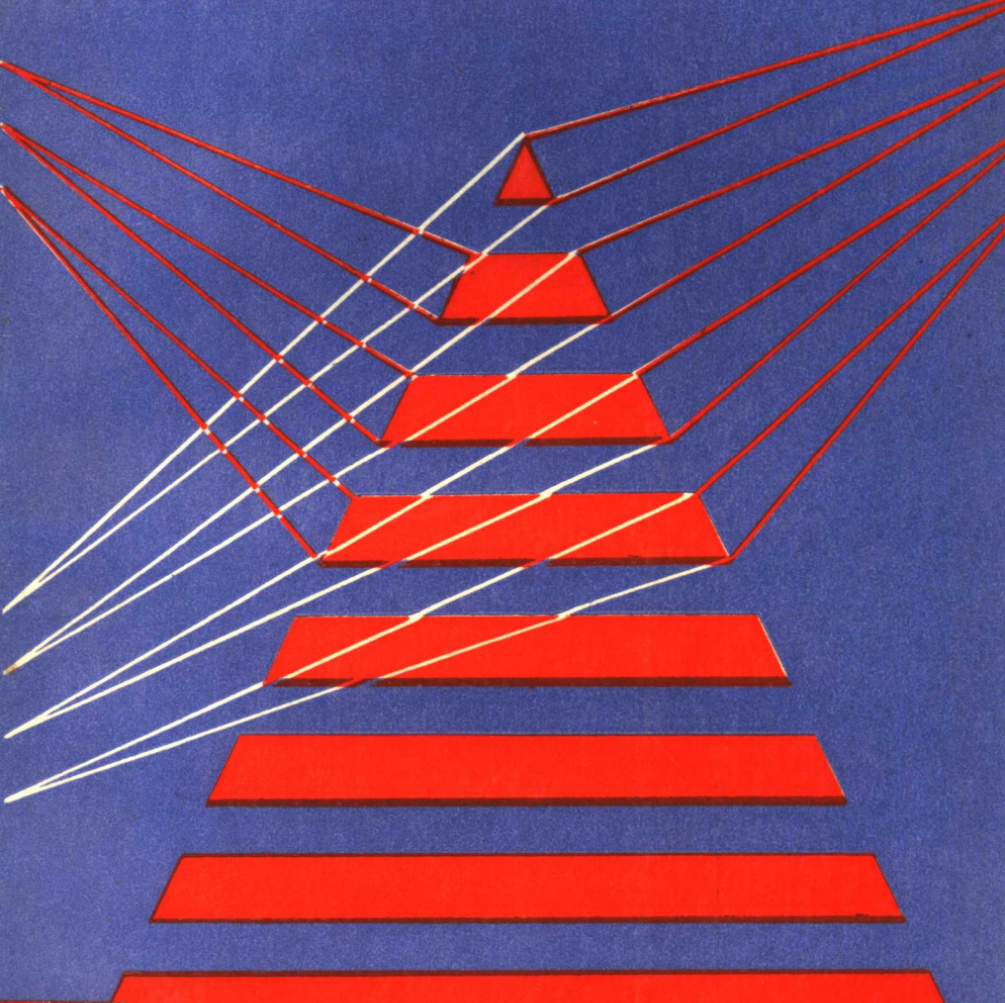


电气化铁道 并联综合补偿及其应用

高等学校试用教材



南交通大学 李群湛 著

U22
004
高等学校试用教材

电气化铁道
并联综合补偿及其应用

西南交通大学 李群湛 著

西南交通大学 张进思 审

中国铁道出版社

1993年·北京

(京) 新登字063号

内 容 简 介

本书较系统地讨论了牵引供电系统中并联补偿在无功、负序、谐波等方面的综合作用的理论和应用。着重论述了无功、负序综合补偿模型以及减少功率损失(节能)、释放牵引变压器容量(节容)、改善网压质量的途径和效果,还讨论了牵引变电所滤波装置的最优化设计及三相谐波建模方法,并研究了牵引负荷谐波水平的合理算法和谐波水平的分布算法。最后对同相供电系统作了理论分析。

本书为高等院校电力系统和铁道电气化专业的教材,也可供有关专业的研究生及研究、设计、运行方面的技术人员参考。

高等学校试用教材

电 气 化 铁 道 并联综合补偿及其应用

西南交通大学 李群湛 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 方 军 封面设计 王毓平

各地新华书店经售

北京市燕山联营印刷厂印

开本: 850×1168毫米1/32 印张: 8.25 字数: 215千

1993年8月 第1版 第1次印刷

印数: 1—1000册

ISBN 7-113-01352-X/U·418 定价: 2.60元

前 言

本书是根据铁道电气化、电力牵引与传动控制专业教学指导委员会教材编写计划撰写的，是根据多年的专业教学实践，结合我国电气化铁道运行的特点和运行的实际需要，在以前所用讲义基础上经扩充、改编而成的。书中汇集了作者近几年来在电气化铁道并联补偿及谐波和滤波方面的新探索。

全书分七章，主要讨论任意接线牵引变电所并联补偿的一般分析方法；从节能（节容）的角度讨论并联无功补偿（PRC）和并联电容补偿（PCC）的模型和算法，谐波的产生、影响、限制措施及应考虑的有关因素；牵引变电所的滤波问题；电力牵引特点，三相谐波模型和谐波分布算法；对称补偿和同相供电系统的一些理论问题。教学时数为48学时。

并联综合补偿是解决电气化铁道许多特殊技术问题（如无功、负序、谐波等）的有效途径，也是产生适于高速、重载电力牵引供电模式的支持基础。在电气化铁路大力发展的今天，研究和开发并联综合补偿技术不仅有重要的理论价值，也有重要的实用意义。

本书由西南交通大学李群湛撰写，张进思教授审阅了全书，连级三教授审阅了第四章，同时得到铁道部科技司、工程总公司、电气化工程局、第一、二、三、四勘测设计院、成都铁路局等单位 and 贺威俊、钱清泉教授以及刘惠德、贺建闽、潘学智、张雪、马林、黄彦全、汪永宁、李曙辉等同志的帮助，在此，深表谢意。

作者欢迎同仁争鸣，提出宝贵意见。

作 者

1991年6月于成都

目 录

第一章 概 述.....	1
第一节 牵引变电所与牵引供电系统.....	1
第二节 牵引负荷及其特性.....	6
第三节 并联补偿及其综合作用.....	13
第二章 并联补偿的一般分析方法.....	16
第一节 无功和负序的一般表达式.....	16
第二节 全正序相量图与全负序相量图.....	21
第三节 牵引变电所负序补偿特性解析.....	31
第四节 无功和负序综合补偿计算模型.....	38
小 结.....	53
第三章 并联补偿的综合技术指标与经济性能.....	58
第一节 综 述.....	58
第二节 并联补偿节能模型及其算法.....	59
第三节 牵引变压器容量释放.....	70
第四节 牵引变电所综合技术指标.....	76
第五节 并联补偿系统的经济性能分析.....	90
小 结.....	102
第四章 谐波及谐波阻抗特性.....	105
第一节 电力系统中的谐波.....	105
第二节 谐波的有害影响.....	111
第三节 电力系统谐波阻抗与特性.....	115
第四节 谐波抑制——滤波.....	126
小 结.....	133
第五章 综合优化补偿与滤波设计.....	136
第一节 单调谐支路通用模型与算法.....	136

目 录

第二节	牵引变电所综合补偿特性分析	148
第三节	多串多次单调谐波滤波装置设计举例	157
	小 结	165
第六章	谐波模型与谐波分布	168
第一节	牵引变电所三相谐波模型	168
第二节	电力系统三相模型与谐波分布	181
第三节	谐波影响与对策分析	186
第四节	谐波水平与算法	193
第五节	谐波合成算法与特性	201
第六节	谐波水平与滤波效果计算举例	203
	小 结	207
第七章	对称补偿与同相供电系统	210
第一节	同相供电系统的构造	210
第二节	对称补偿与实现模式	211
第三节	对称补偿系统的主要技术指标	219
第四节	同相供电系统主要性能分析	227
	小 结	235
附录	技术词汇汉英对照	237
参 考 文 献		254

第一章 概 述

第一节 牵引变电所与牵引供电系统

一、牵引变电所

为适合牵引供电系统高电压、大电流的用电要求，或者为减轻牵引供电系统对电力系统的不对称影响，牵引变电所中的牵引变压器可采用不同方式的接线。实用的牵引变压器接线方式主要有以下几种。

1. $Y/\Delta-11$ 接线，其接线原理如图 1—1 所示。

$Y/\Delta-11$ 接线是一种标准的三相双绕组联接，原边的中性点可以大电流接地，但是否接地由电力管理部门根据零序网的分布情况确定。这种接线可方便地供给牵引变电所的三相自用电。当两馈线负荷相同且无任何补偿装置时，这种接线牵引变压器的理论容量利用率（牵引负荷容量除以所占用的牵引变压器容量）为

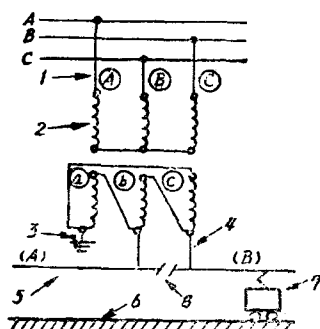


图 1—1 $Y/\Delta-11$ 接线原理

1——进线；2——绕组；3——接地线；4——馈线；5——接触网（供电臂）；6——钢轨（地）；7——电力机车；8——分相绝缘器。

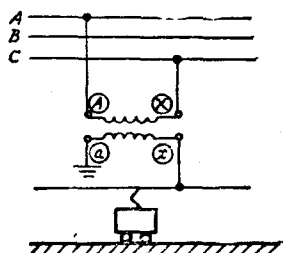


图 1—2 纯单相接线原理

75%左右,达到最大。

2. 纯单相接线,接线原理如图1—2所示。

纯单相接线使用单相双绕组变压器,是一种最简单的接线方式,其原边跨接于电力系统三相中的两相之间,即取用线电压,无法实施中性点接地,同时,在牵引侧无法直接供给牵引变电所的三相自用电,除非采取特殊措施。当无任何补偿装置时,这种接线的牵引变压器的理论容量利用率可达100%。

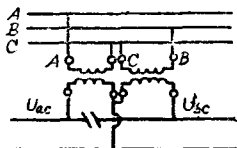


图1—3 V/V接线原理

3. V/V接线,其原理如图1—3所示。

V/V接线由两台单相变压器或三铁芯“V”接双绕组构成,在牵引侧可方便地提供三相自用电。这种接线的牵引变压器理论容量利用率亦达100%。

4. 三相——两相平衡接线,主要包括Scott接线、Le Blanc接线、Wood-bridge接线等,其接线原理将在第二章中介绍。

三相——两相平衡接线是一种特殊接线,它试图实现三相系统和两相系统间的对称变换,以期使单个牵引变电所的负序功率降至最低。这种接线牵引变压器的理论容量利用率一般介于Y/△—11接线和纯单相接线之间,因具体接线方式不同而异。在产生牵引变电所三相自用电方面,Wood-bridge接线最方便,Le Blanc和Scott接线可用其逆变换实现。Le Blanc接线和Wood-bridge接线像Y/△—11接线那样可方便地实现原边中性点大电流接地,Scott接线则不宜。但就接线结构而言,Scott接线是实现三相——两相平衡接线的最简单的方式。

Y/△—11接线、纯单相接线、V/V接线等通常通过相邻牵引变电所在原边的相位轮换(换相)来最大限度地减轻负序对电力系统的影响。Y/△—11接线和V/V接线牵引变电所在出口处进行

电分相，有时还在两相邻牵引变电所之间的分区亭处再设分相绝缘器。纯单相接线则在分区亭处进行电分相。为在紧急情况下（如某牵引变电所失电时）实施越区供电，分区亭内通常设置能分、合两侧供电臂的开关（断路器、隔离开关）设备。

二、牵引供电系统

牵引供电系统通过牵引变电所与电力系统相连接。

牵引供电系统由牵引变电所和牵引网组成，牵引网由接触网、钢轨（地）、接地线及有关设备组成。牵引供电系统正常运行情况下，分区亭开关设备闭合时，牵引变电所对机车的供电称为双边供电，否则为单边供电。我国现行的都是单边供电。

牵引供电系统为了自身技术指标或抑制通讯干扰的需要，产生了以下几种供电方式。

（1）直接供电方式 如图 1—4 所示，这种方式的牵引网仅由接触网和钢轨（地）及吸上线组成。这是最简单的供电方式，故亦称简单供电方式。

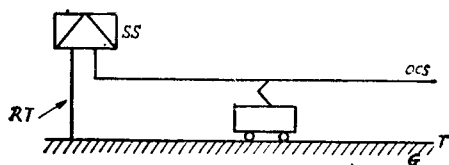


图 1—4 直接供电方式

SS——牵引变电所；ocs——接触网；RT——吸上线；T——轨；G——地。

直接供电方式的主要特点是：①牵引网回路的结构最简单，成本和维修量都少；②对通讯线路的干扰（影响）较严重；③钢轨电位通常较其他方式高。

（2）BT供电方式 即吸流变压器供电方式，如图 1—5 所示。其中图 1—5（a）为 BT/回流线方式，图 1—5（b）为 BT/钢轨方式。一般 BT 间隔为 1.5~4 km。

BT供电方式中, BT/回流线方式的主要特点是: ①能大大减轻对通讯线路的干扰; ②要设置火花间隙(是大电流运行的薄弱环节)。BT/钢轨方式抑制通讯干扰的能力不及BT/回流线方式, 同时要在串入BT的钢轨上设置绝缘间隙。

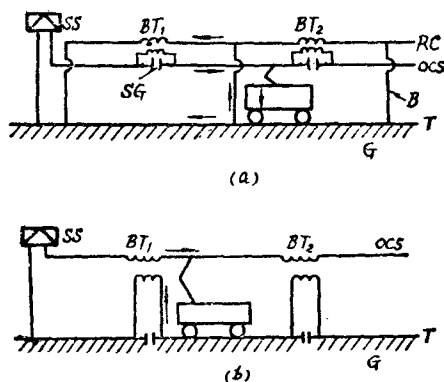


图 1—5 BT 供电方式

(a) BT/回流线方式; (b) BT/钢轨方式。

BT——吸流变压器; RC——回流线; B——横联线; SG——火花间隙。

(3) 设置回流线(也称负馈线)的直接供电方式 如图 I—6 所示, 这是 BT 供电方式中 BT/回流线方式的简化形式。与 BT/回流线方式一样, 回流线与接触网同杆, 并多在其上方或一侧偏上方架设效果较好^[38]。轨与回流线间的横联线的间隔一般应比 BT 间隔小些。

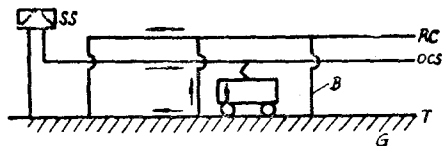


图 1—6 带回流线的直接供电方式

设置回流线的直接供电方式抑制通讯干扰的能力主要取决于回流线的布置方式、根数, 横联线的间隔及有无串联补偿^[38]等,

其效果一般不及BT/回流线方式好，但这种供电方式保持了直接供电方式结构简单的特点，还能较好地降低轨道电位，同时回流线故障（断线）不会影响正常供电，这与BT供电方式不同。

(4) AT供电方式 即自耦变压器供电方式，如图1—7所示。这种方式中一般设置绕组匝数 $n_1 = n_2$ 的自耦变压器，接触线与正馈线之间的电压为机车受电弓上电压的2倍，机车受电弓上电压与直接供电方式、BT供电方式相同。正馈线与接触网同杆架设。AT间隔一般为10km左右。

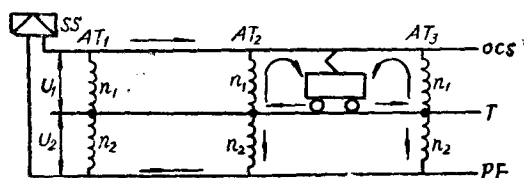


图1—7 AT供电方式
AT——自耦变压器；PF——正馈线。

AT供电方式的主要特点是：①牵引供电电压成倍提高，自耦变压器并联接入系统，避免了BT串入时的火花间隙对大功率牵引的影响；②牵引变电所间距较大，一般可达100km左右，能节约电力系统进线的投资；③牵引网结构较复杂，保护和维护的难度也相应提高。

(5) CC供电方式 即同轴电缆供电方式，如图1—8所示。它又分为接触网开口方式和不开口方式。

就牵引供电系统自身的电压损失（反映网压水平）、输送功率能力等性能看，AT供电方式和CC供电方式最好，设置回流线的直接供电方式和直接供电方式次之，BT供电方式再次。就牵引网及其设备的投资来看，直接供电方式和设置回流线的直接供电方式最少，BT供电方式较高，AT供电方式更高，CC供电方式最高（主要表现为同轴电缆），以致在目前尚无法在实际系统中

大量正式采用。

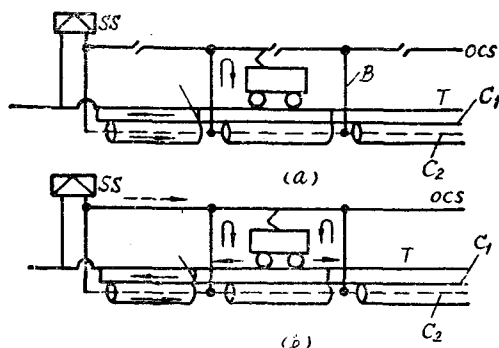


图 1—8 CC 供电方式

(a) 接触开口 CC 方式；(b) 接触网不开口 CC 方式。
 C_1 ——电缆外导体； C_2 ——电缆内导体； B ——横联线。

各种供电方式各有其技术和经济上的优劣，实际应用中是因地制宜的。

牵引变电所的接线方式与供电系统的供电方式是兼容、配合的，只有用于 AT 供电方式时，牵引变压器的接线（主要是次边绕组）要特殊考虑。但无论如何，牵引供电系统是单相（或两相独立的）含地系统，这是其区别于三相电力系统的主要结构特征——不对称，同时决定了牵引供电系统分析、研究方法的特殊性。

第二节 牵引负荷及其特性

一、随机波动性

由于列车在运行过程中的加速、恒速、惰行、制动等各种工况以及运行中坡道、弯道、站场、道岔、自然气候、司机操作过程等因素的影响，使牵引负荷随机波动。图 1—9 所示的是某干线紧密运行时从牵引变电所馈线上看到的 5 h 内的负荷过程（即

时电流——时间)的实测曲线[5]。

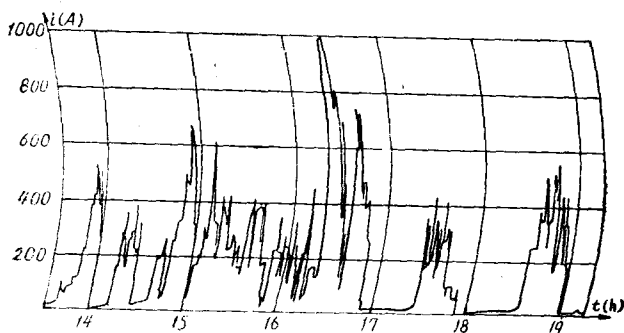


图 1—9 牵引负荷过程曲线

从图 1—9 可见, 牵引负荷过程的主要特点是其(基波)即时(有效)电流大幅度剧烈波动。一般电力机车的取流很难保持 30s 平稳不变, 有时还会在更短的时间内突然由 0 变到满负荷或者相反。这种波动及其发生时间都具有随机性。但通常说来, 山区电气化铁路的牵引负荷要比平原的波动剧烈, 单线比复线剧烈(前者主要由于山区线路的坡道、弯道较平原多, 后者是单线行车密度较复线低)。与之不同, 一般牵引负荷的功率因数变化很小, 可以认为是不随牵引过程变化的, 是常值^[1], 从牵引变电所看, 一般为 0.8~0.82(滞后)。

负荷通过系统必然造成电压损失, 影响受电点的电压水平。牵引负荷的波动性使牵引变电所及牵引网上的电压发生波动。电力系统其它负荷的变化对牵引变电所电压水平也有一定影响。

牵引负荷的剧烈波动性还使牵引供变电设备的容量利用率变低, 例如, 一般牵引变压器的容量利用率在 20% 左右, 明显低于电力系统变压器的利用率。

二、非线性

现行的电力机车多为交——直(AC/DC)整流型的, 即用

于牵引电机的直流电是经交流电全波整流得到的，这是一个非线性过程，故亦称牵引负荷为非线性负荷。正常运行时牵引电流的波形一般介于方波与三角波之间，图 1—10 是整流型机车典型的电流波形。易见它们含有明显的谐波成分。由于半波对称，其中只含有奇次谐波。牵引负荷的谐波具有幅值波动大、相位分布广泛的特点，明显区别于一般工业用的三相非线性负荷。

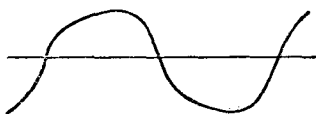


图 1—10 整流型机车 电流波型

当牵引负荷流经大地时，会在地面空间造成不平衡电磁场，在邻近电气化铁路的通讯线上感应干扰。由于牵引负荷电流的主要谐波都处于音频带上，所以通讯的杂音干扰就不容忽视。上一节说过，BT、AT 等供电方式能有效地吸回地中电流，从而能有效地抑制谐波造成的通讯干扰。

另外，牵引负荷中的谐波可直接通达牵引变电所进入电力系统。谐波在电力系统中的流通会造成许多不良影响。诸如，额外占有系统及其设备容量，引起附加发热，激发谐振，影响电容装置的正常运行，可能使继电保护发生误动；使发电机、电动机出力下降或引起机械振动；加速绝缘介质老化，降低寿命等。谐波的不良影响已引起国内外电力行业的广泛关注。

三、单相独立性和不对称性

现行牵引变电所除纯单相接线外，都是两相（异相）供电，一条馈线的负荷可能在另一条馈线上引起电压损失（如 Y/△—11 接线）而影响其电压水平，但在正常网压范围内，由于机车自身的调节功能，其取流受到另一馈线造成的电压损失的影响是甚微的，故可认为牵引变电所各供电臂的取流具有单相独立性，即牵引变电所两供电臂的牵引负荷是相互独立的、随机波动的。

相对三相系统而言，牵引负荷具有不对称性，主要是负序。

单相独立的牵引负荷也独立地在电力系统中造成负序，即使采用三相——两相平衡接线，由于两臂负荷的随机独立性，也仍有随机波动的未被平衡的剩余负序电流进入电力系统。负序电流在电力系统中会造成一些不良影响。例如，额外占有系统及其设备的容量，造成附加网损；引起电压不对称，降低发电机、电动机出力，严重时还会危及发电机和电网的安全运行等。虽然随着电力系统容量的不断增大，负序威胁发电机及电网安全运行的可能性越来越小，但在电力系统容量薄弱区段，或者按最小运行方式供电，或者在既有线路上开行重载列车时，负序问题仍应受到足够重视。另外，为使电力系统经济运行和提高电能质量，尽可能好地降低负序也是十分必要的。

四、数字特征与分布特性

牵引负荷的随机波动性使测量或抽取个别负荷值变得没有意义。有效的作法是将牵引负荷过程视为随机过程，研究其数字特征和分布特性。

从实用的角度看，随机过程的数字特征最典型的是均值、均方值（二阶原点矩）、方差（二阶中心矩）等，但最基本的是均值和自相关函数。虽然，仅研究均值和自相关函数尚不能完整地描述随机过程，但能表现随机过程在某些方面的重要特征和主要的统计特性，还便于运算和实际测量，因此应用颇广。

牵引供电中最常用的负荷过程数字特征是均值和均方根值（平均有效值）。由于按运行图运行的电气化铁道的负荷过程具有日周期性，故均值和平均有效值常常是针对典型日负荷过程的日平均值和日平均有效值。

记全日时分为 T （为1440min），馈线带电（有负荷）总时分为 T_g （min），空载总时分为 T_0 （min），如图1—9所示，则

$$T = T_g + T_0 \quad (1-1)$$

由此定义的日带电概率 P_g 和空载概率 P_0 分别为

$$P_g = \frac{T_g}{T} \quad P_0 = \frac{T_0}{T} \quad (1-2)$$

日平均电流 I 和带电平均电流 I_g 分别为

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T i dt \quad (1-3)$$

$$I_g = \frac{1}{T_g} \int_0^T i dt \quad (1-4)$$

显然, $IT = I_g T_g = \int_0^T i dt$

考虑式 (1-1)、(1-2) 便得日平均电流 I 和带电平均电流 I_g 的关系为

$$I = I_g (1 - P_0) \quad (1-5)$$

$$I_g = \frac{I}{1 - P_0} \quad (1-6)$$

再来定义平均有效值, 即均方根 (*rms*) 值。也分为日平均有效值 I_r 和带电平均有效值 $I_{r,g}$, 即

$$I_r = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (1-7)$$

$$I_{r,g} = \sqrt{\frac{1}{T_g} \int_0^T i^2 dt} \quad (1-8)$$

同样因

$$I_r^2 T = I_{r,g}^2 T_g = \int_0^T i^2 dt$$

并考虑式 (1-1)、(1-2) 能得日平均有效电流 I_r 和带电平均有效电流 $I_{r,g}$ 的关系

$$I_r = I_{r,g} \sqrt{1 - P_0} \quad (1-9)$$

若进一步引入日有效系数 K_r 和带电有效系数 $K_{r,g}$, 即

$$K_r = \frac{I_r}{I} \quad K_{r,g} = \frac{I_{r,g}}{I_g} \quad (1-10)$$

代入式 (1-9) 得两有效系数的关系

$$K_r = \frac{K_{r,g}}{\sqrt{1 - P_0}} \quad (1-11)$$

通常带电有效系数 $K_{\text{e}} = 1.04 \sim 1.08$ ，多数情况下可取 $K_{\text{e}} = 1.04$ 。

平均值反映负荷的平均水平，可用来估算平均牵引能耗，牵引变压器容量利用率，并联补偿下系统容量损失或功率损失的降低量（见第三章）等；平均有效值主要用于计算发热（如功率损失）和系统及设备的容量等。

由于牵引负荷波动甚剧，只用均值和均方根值有时显得不足，常需寻找一些特殊的数字特征。例如，（持续）10min最大负荷（平均值，下同），半小时最大负荷等。统计表明，一般10min最大负荷与日平均负荷之比在1.8~3.9之间^[4]，半小时最大负荷与日平均负荷之比在1.6~2.9之间，其中复线或平原偏小，单线或山区偏大。1min最大电流与半小时最大电流之比约为2^[5]。这些数字特征常用于系统及设备容量校验或选择，负序对系统的影响分析等。

理论上，反映随机过程分布特性的分布函数族能完善地刻画随机过程的统计规律。但实际应用中，要确定随机过程的分布函数族往往比较困难，甚至不可能。为简便、实用，研究其一维分布函数或一维密度函数显得十分突出和重要。

若把牵引负荷过程视为平稳随机过程，则（一维）密度函数（常称为概率密度）与时间无关，情况变得相对简单。

先看馈线电流 i 带电期间的概率密度 $p_g(i)$ 。 $p_g(i)$ 具有以下特点。

（1）非负性

$$p_g(i) = \begin{cases} p_g(i) & 0 < i \leq I_{\text{max}} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1-12)$$

式中， I_{max} 为最大馈线电流。这也说明，馈线电流 i 具有有界性，若仅研究无再生反馈牵引情形，则 $i \in [0, I_{\text{max}}]$ 。

（2）连续性

带电期间 i 连续变化，相应概率密度也是连续的，即