

高等学校试用教材

电传动机车控制

上海铁道学院
西南交通大学 合编
北方交通大学

中国铁道出版社

高等学校试用教材

电 传 动 机 车 控 制

上海铁道学院

西南交通大学 合编

北方交通大学

中 国 铁 道 出 版 社

1980年·北京

内 容 提 要

全书共三篇、十二章，除用少量篇幅扼要叙述电牵引基础知识外，着重结合大功率变流技术和自动控制原理阐述了电力机车、电传动内燃机车、电动车辆等的主电路和控制系统的原理、设计计算方法，并介绍了典型机车的电路和试验。

本书除供教学外，还可供有关专业的研究生、工程技术人员参考，对于从事其他大功率变流技术的科技人员也有参考价值。

高等学校试用教材

电传动机车控制

上海铁道学院、西南交通大学、北方交通大学 合编

中国铁道出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张：26.5 字数：654千

1980年11月 第1版 1980年11月 第1次印刷

印数：0001—3,500册 定价：2.70元

前 言

本书是阐述电牵引机车车辆（包括电力机车、电传动内燃机车、工矿电力机车、电动车辆等）电传动系统的理论和设计知识的专业教材；是为了适应近年来新成立的机车电传动专业和原有电力机车专业的需要，由上海铁道学院、西南交通大学、北方交通大学三校共同编写的。

为了大力加强课程的理论基础，并力求反映当代机车电传动方面的最新成就，本书根据两个专业的需要，在理论体系和内容方面，较之以往的教材和讲义，都作了颇大的改革和充实。

本书共分三篇，第一篇以较少的篇幅扼要地阐述了电牵引的基础知识；第二篇以大功率变流技术为核心，把整流、有源逆变、交直流斩波、无源逆变等技术与机车主电路的理论和设计有机地结合起来，作了比较系统和深入的论述，这是本书的重点；第三篇是机车控制系统，比较详细地阐述了机车恒功率励磁控制、机车自动控制、机车保护系统和故障检测等方面的知识，并以东风₄型内燃机车、韶山1型和新设计的韶山3型电力机车的控制电路（或电子电路）为例，作了相应的解析或说明。此外还介绍了电传动内燃机车和电力机车的出厂试验和型式试验。

本书编写的内容中，有一部分章节综合了较多的国内外文献资料，引进了有关科研学术论文的部分内容或结论。

各章撰写人如下：

第一章 朱世麟（北方交通大学）

第二章 卢肇铨（北方交通大学）

第三章 王锡义（西南交通大学）

第四章 连级三（西南交通大学）

第五章 王干一（西南交通大学）

第六章 易友祥（西南交通大学）

第七章、第九章、第十一章、第十二章 邵丙衡（上海铁道学院）

第八章 陈効国（上海铁道学院）

第十章 杜庆萱、黄昌继（西南交通大学）

本书由邵丙衡、连级三、卢肇铨主编，杜庆萱审校。

在本书的编写过程中得到铁道科学研究所机辆所、株洲电力机车研究所（厂）、大连热力机车研究所（厂）、长春客车厂等有关同志的热情协助，部分书稿并经他们校阅，特此致谢！

由于时间匆忙、更兼学术水平有限，书中难免存在不少缺点甚至错误，请读者批评、指正。

编 者

1979年10月

目 录

第一篇 电牵引基础

第一章 机车电牵引原理	1
第一节 列车运动方程式	1
第二节 牵引力和制动力	5
第三节 列车运动的阻力	10
第四节 电传动机车的牵引特性	16
第五节 牵引重量的计算	19
第六节 机车电传动装置的功用和分类	22
第七节 电传动机车电路概述	26
第二章 机车的牵引特性和调速	28
第一节 串励和并励直流牵引电动机牵引性能的比较	28
第二节 具有串励直流牵引电动机机车在恒电压下的牵引特性	31
第三节 具有串励直流牵引电动机机车在恒功率下的牵引特性	33
第四节 具有直流牵引电动机机车的调速方法和恒电压下的磁场削弱及其特性	34
第五节 具有直流牵引电动机的机车在恒功率下的磁场削弱及其特性	37
第六节 恒功率调速比的概念	40
第七节 具有直流串励牵引电动机机车的电阻制动和再生制动	43
第八节 异步牵引电动机的基本调速方法	47
第九节 异步牵引电动机在恒转矩和恒功率下变频调速的特性	50

第二篇 机车主电路及其参数计算

第三章 理想整流电路参数的计算	54
第一节 单相不可控整流电路及其参数计算	54
第二节 单相可控整流电路及其参数计算	60
第三节 三相不可控整流电路及其参数计算	69
第四节 三相可控整流电路及其参数计算	74
第四章 机车整流电路及其参数计算	79
第一节 机车主电路概述	79
第二节 $x_c \neq 0$ 、 $x_d = \infty$ 单相整流电路换相过程和重叠角的计算	82
第三节 $x_c \neq 0$ 、 $x_d = \infty$ 单相整流电路的参数计算	90
第四节 $x_c \neq 0$ 、 $x_d = \infty$ 三相整流电路的参数计算	96
第五节 $x_c \neq 0$ 、 $x_d \neq \infty$ 单相整流电路的参数计算	112

第六节	整流电路过渡过程的计算	118
第七节	整流电路短路故障电流的计算	124
第八节	整流电路电流脉动值及平波电抗器电感值的计算	131
第九节	内燃机车主电路原理	135
第十节	电力机车主电路调压原理	136
第五章	有源逆变电路和机车再生制动	145
第一节	单相有源逆变电路	145
第二节	三相有源逆变电路	149
第三节	电力机车的再生制动	152
第四节	再生制动的颠覆	158
第六章	交、直流斩波电路及其参数计算	161
第一节	直流斩波电路的基本原理和电路的分析	161
第二节	直流斩波电路的换流	166
第三节	直流斩波电路中换流和滤波元件的参数计算和选择	176
第四节	多相多重斩波电路——地铁动车的斩波电路原理	183
第五节	多象限联接与再生制动电路	189
第六节	逆导型可控硅元件在斩波电路中的应用	193
第七节	交流斩波电路原理	197
第八节	四象限变流器原理	202
第九节	斩波电路换流过程的分析	209
第七章	交流电传动和无源逆变电路	213
第一节	交流电传动的发展概况和基本型式	213
第二节	逆变电路的设计原则和基本类型	216
第三节	简单的串联逆变器和并联逆变器电路	220
第四节	串联电感式三相并联逆变电路 (McMurray-Bedford电路) 及其参数 计算	222
第五节	具有辅助可控硅和辅助电源的并联逆变电路	228
第六节	具有辅助可控硅单独关断的并联逆变电路 (McMurray逆变电路) 及 其参数计算	230
第七节	麦克墨莱 (McMurray) 逆变电路的主要性能及其改进	235
第八节	E120型机车逆变电路和宽脉冲换流 (链形换流) 逆变电路	239
第九节	逆变电路换流元件的参数计算	242
第十节	电流源逆变电路	245
第十一节	逆变器的电压调节	250
第十二节	逆变器的脉宽调制及谐波消除	252
第十三节	相控循环变频器供电的交-交流传动系统	259
第十四节	单相—三相变频器供电的交-交流传动系统	264
第十五节	DE2500型机车主电路原理	266

第三篇 机车控制系统

第八章 恒功率控制系统	268
第一节 概述	268
第二节 直流和交流牵引发电机恒功率工况下的理想外特性和调整特性	269
第三节 恒功率励磁调节系统的组成及方框图	272
第四节 横向裂极式励磁机功调系统原理	275
第五节 联合调节器的基本原理	279
第六节 带测速发电机的联合调节励磁电路原理	282
第七节 带磁放大器的联合调节励磁电路原理	287
第八节 电子恒功率励磁控制系统原理	295
第九章 机车的电气保护系统和故障的自动检测	302
第一节 概述	302
第二节 机车的过电流保护	304
第三节 过电压保护和零电压保护	310
第四节 轮对的空转保护和滑行保护	315
第五节 机车的接地保护	323
第六节 交流电力牵引的谐波干扰及其防护	326
第十章 电力机车自动控制	333
第一节 电力机车自动调节系统概述	333
第二节 电力机车恒流起动和恒速运行的自动控制系统	342
第三节 调节器的参数选择	343
第十一章 电传动机车的控制电路	349
第一节 机车控制电路的设计原则和电气联锁方法	349
第二节 东风 ₄ 型内燃机车控制电路的组成和控制电源	352
第三节 柴油机的起动电路	353
第四节 辅机的控制电路	356
第五节 机车起动和调速的控制电路	358
第六节 电阻制动的控制电路及机车保护和信号显示电路	362
第七节 韶山1型电力机车的控制电源及机车的起动和调速控制电路	374
第八节 韶山1型电力机车电阻制动的控制电路	377
第九节 受电弓、主断路器及辅助机组的控制电路	379
第十节 信号灯及自动制动信号的控制	381
第十一节 韶山3型电力机车电子控制系统的主要作用及其方框图	383
第十二节 恒流调节和电压限制电路	385
第十三节 移相和脉冲形成的电子电路	387
第十四节 脉冲功率放大和振荡电源电路	390
第十五节 自动升位和脉冲故障监视电路	392
第十六节 级位转换的逻辑环节	394

第十七节 韶山3型电力机车的电子保护电路	397
第十二章 电传动内燃机车及电力机车的试验	400
第一节 概述	400
第二节 电传动内燃机车的水阻试验和试运行	401
第三节 电力机车的出厂试验	407
第四节 电力机车的型式试验	411
附录 电力机车和内燃机车电路常用图形符号表	416

第一篇 电牵引基础

第一章 机车电牵引原理

第一节 列车运动方程式

一、列车运动方程式的导出

当机车牵引车辆列行驶时，在整个列车上作用着很多的力。这些力有些是不直接影响列车运动状态的，例如与路面垂直的力以及一些相互抵消的内力等。有些是直接影响列车运动状态的外力。这些直接影响列车运行状态的力有牵引力、阻力、制动力三种。

牵引力 F ——使列车产生前进运动的力，作用方向与列车运动方向相同。牵引力的大小可根据需要由司机控制；

阻力 W ——阻止列车运动的力，其作用方向与列车运动方向相反，是不能由司机控制的外力；

制动力 B ——也是阻止列车运动的力，作用方向也与列车运动方向相反，但它是能由司机控制的外力，用来使列车减速和停止。

这些力的单位一般为公斤，为了便于计算，通常采用列车重量（吨）的单位值来表示。如果 G 表示列车的重量（吨），则

$$\left. \begin{aligned} f &= \frac{F}{G} \text{——单位牵引力（公斤/吨）} \\ w &= \frac{W}{G} \text{——单位阻力（公斤/吨）} \\ b &= \frac{B}{G} \text{——单位制动力（公斤/吨）} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

作用在列车上的外力影响着列车的运动状态，也就是说要改变列车的速度。所谓列车运动方程式，就是表示作用在列车上的外力与列车速度变化关系的方程式。

当列车以加速度 $\frac{dV}{dt}$ 前进时，在列车上所受到的外力可作如下分析：

(一) F_p ——假设列车整体作为一个质点向前运动时的加速力，即

$$F_p = m \frac{dV}{dt} \quad (1-2)$$

式中 V ——列车速度（机车速度）；

m ——列车的实有质量。

(二) F_i ——在列车以 $\frac{dV}{dt}$ 加速度前进时，机车动轮及动轮轴上传动机角加速度所要求的力，即

$$F_i = \frac{\sum J_i \frac{d\omega_i}{dt}}{R_i} = \sum \frac{J_i}{R_i^2} \cdot \frac{dV}{dt} \quad (1-3)$$

式中 R_i ——机车动轮滚动圆半径，

J_1, ω_1 ——机车动轮及动轮轴上传动机构的转动惯量和角速度。

(三) F_i ——在列车以 $\frac{dV}{dt}$ 加速度前进时, 车辆轮对角加速度所要求的力, 即

$$F_i = \frac{\sum J_i \frac{d\omega_i}{dt}}{R_i} = \sum \frac{J_i}{R_i^2} \cdot \frac{dV}{dt} \quad (1-4)$$

式中 J_i, ω_i ——车辆轮对的转动惯量和角速度;

R_i ——车辆轮对滚动圆半径。

(四) F'_D ——在列车以 $\frac{dV}{dt}$ 加速度前进时, 牵引电动机转动部分及其轴上传动机构角加速度所要求的力, 即

$$F'_D = \frac{\sum J_D \frac{d\omega_D}{dt}}{R_D}$$

式中 J_D, ω_D ——电枢及电枢轴上传动机构的转动惯量及角速度;

R_D ——电动机电枢半径。

前面三个力都是作用于轮缘上的力; 而 F'_D 是作用在电枢圆周上的力。为了便于计算时总加, F'_D 也应该归算到轮缘上(图 1-1)。

F_D 是 F'_D 归算到动轮轮缘上的力, 即

$$F_D = \mu_c \left(\frac{R_D}{R_i} \right) F'_D = \sum \frac{\mu_c J_D}{R_i} \cdot \frac{d\omega_D}{dt}$$

此外

$$\omega_D = \mu_c \omega_i = \mu_c \frac{V}{R_i}$$

$$\frac{d\omega_D}{dt} = \frac{\mu_c}{R_i} \cdot \frac{dV}{dt}$$

式中 V ——机车速度;

μ_c ——机车齿轮传动比 $\frac{R_2}{R_1}$ 。

因此

$$F_D = \sum \frac{\mu_c^2 J_D}{R_i^2} \cdot \frac{dV}{dt} \quad (1-5)$$

将四个力总加起来, 得

$$\begin{aligned} F_s &= F_p + F_i + F_l + F_D \\ &= m \frac{dV}{dt} + \sum \frac{J_i}{R_i^2} \cdot \frac{dV}{dt} + \sum \frac{J_l}{R_l^2} \cdot \frac{dV}{dt} + \sum \frac{\mu_c^2 J_D}{R_i^2} \cdot \frac{dV}{dt} \\ &= m \left[1 + \sum \frac{J_i}{m R_i^2} + \sum \frac{J_l}{m R_l^2} + \sum \frac{\mu_c^2 J_D}{m R_i^2} \right] \cdot \frac{dV}{dt} \\ F_s &= m(1 + \gamma) \frac{dV}{dt} = m_g \frac{dV}{dt} \quad (1-6) \end{aligned}$$

式中 F_s ——所有作用于列车上产生加速度的外力之和;

γ ——回转质量系数, 即与回转部分相当的质量对列车全部质量 m 的比值;

m_g ——列车的归算质量。

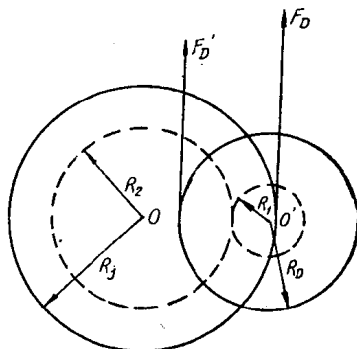


图 1-1 归算电动机电枢圆周作用力的示意图
 R_D ——电动机电枢半径; R_1 ——小齿轮半径;
 R_2 ——大齿轮半径; R_i ——动轮半径。

这就是列车运动方程式的第一种形式。

设 S 为列车运行距离。因为 $dt = \frac{dS}{V}$ ，所以可把运动方程式的第一种形式改写为

$$F_t = m(1 + \gamma)V \frac{dV}{dS} = m_0 V \frac{dV}{dS} \quad (1-7)$$

(1-7) 式称为列车运动方程式的第二种形式。

在列车运动方程式的两种形式中，都包含列车归算质量 m_0 。但实际上列车都用重量 G (吨) 来表示。为计算方便起见，可将 $m(1 + \gamma)$ 用 σG 表示，则 (1-6) 及 (1-7) 两式可分别改写成

$$F_t = \sigma G \frac{dV}{dt} \quad (1-8)$$

$$F_t = \sigma G V \frac{dV}{dS} \quad (1-9)$$

如果用单位值表示，则

$$f_t = \sigma \frac{dV}{dt} \quad (1-10)$$

$$f_t = \sigma V \frac{dV}{dS} \quad (1-11)$$

这是运动方程式的最简单形式，式中 σ 为一系数，其数值由 F_t 、 G 、 V 、 t 、 S 等所用的度量单位以及机车、车辆回转部分所占比例来决定。

有时，系数 σ 也用其倒数来表示，即

$$\frac{1}{\sigma} = \zeta$$

这时运动方程式变为

$$\zeta f_t = \frac{dV}{dt} \quad (1-12)$$

$$\zeta f_t = V \frac{dV}{dS} \quad (1-13)$$

从上式可见， ζ 的物理意义就是 1 公斤的力作用在 1 吨的列车重量上所引起 的 加 速 度 值。 ζ 的值愈大，单位作用力所引起的速度变化也愈大。 ζ 我们称为加速度系数。

现在我国车辆概算结果， ζ 值如下：

空货车： $\zeta = 106 \sim 110$

重货车： $\zeta = 120 \sim 122$

客 车： $\zeta = 119 \sim 120$

一般计算时，旅客列车及重货物列车平均取用 $\zeta = 120$ ，空货物列车可采用 $\zeta = 108$ 。故一般客货列车的列车运动方程式可写成

$$\frac{dV}{dt} = 120 f_t \quad (\text{公里/小时}^2) \quad (1-14)$$

二、列车运行状态

电传动机车牵引列车时，列车有三种运行状态：

(一) 牵引状态——牵引电动机通电转动，将电能变为机械能，驱动机车使列车前进的

运动:

(二) 惰行状态——牵引电动机不通电, 列车靠惯性前进的运动,

(三) 制动状态——在列车上加制动力, 使列车减速的运动。

这几种运行状态都可以用运动方程式来分析。即:

1. 在牵引状态下, 列车上作用的外力只有牵引力 F 与阻力 W , 因此, 运动方程式可写成

$$F - W = \sigma G \frac{dV}{dt} \quad (1-15)$$

如用单位值表示则可写成

$$f - w = \sigma \frac{dV}{dt} \quad (1-16)$$

如果 $F > W$, 则 $\frac{dV}{dt} > 0$, 说明列车在加速。如果 $F < W$, 则 $\frac{dV}{dt} < 0$, 说明列车在减速, 在列车上坡时是有可能发生这种运行情况的。

当 $F = W$, 则 $\frac{dV}{dt} = 0$, 说明列车在等速运行或是停止不动。

2. 在惰行状态下, 牵引电动机不通电, 列车上作用的外力只有阻力 W , 则

$$-W = \sigma G \frac{dV}{dt} \quad (1-17)$$

或

$$-w = \sigma \frac{dV}{dt} \quad (1-18)$$

在一般情况下, W 是正值, 也就是阻力 W 是阻止列车运动的。这时 $W > 0$, $\frac{dV}{dt} < 0$, 列车减速。

但当列车在一个较大的下坡道上向下惰行时, 也可能 $W < 0$, 这时 $\frac{dV}{dt} > 0$, 列车在加速。此外, 在下坡道上向下惰行时, 也会发生 $W = 0$ 的情况, 这时 $\frac{dV}{dt} = 0$, 列车等速惰行。

3. 在制动状态下, 除阻力 W 外, 还有制动力 B 作用在列车上, 即

$$-(W + B) = \sigma G \frac{dV}{dt} \quad (1-19)$$

或

$$-(w + b) = \sigma \frac{dV}{dt} \quad (1-20)$$

在一般情况下 $W + B > 0$, $\frac{dV}{dt} < 0$, 列车减速。

当列车在大的下坡道上向下行驶时, 可以设想也许会发生 $W + B < 0$ 的情况, 这时 $\frac{dV}{dt} > 0$, 列车仍在加速。当然这种情况事实上是不能容许的, 因为在加上制动力以后, 列车仍加速向下运行, 那就很可能造成危险事故。

如果 $W + B = 0$, 则 $\frac{dV}{dt} = 0$, 说明列车等速向下运行。

第二节 牵引力和制动力

一、牵引力和制动力的形成

(一) 牵引力的形成

牵引力是使列车产生前进运动，并可以由司机根据需要来控制的外力。

从力学的基本定律知道，任何物体如果不受到外力的作用，就永远不会改变自己的运动状态，对列车来说也是一样。

作用在列车上，使列车前进的外力通常可以有以下两种：

1. 重力；
2. 钢轨对机车动轮的作用力。

只有当列车下坡时，列车重力沿地面的分力才能使列车前进，但它不能根据司机需要来控制，所以不能满足人们的要求。

实际上，机车牵引力所利用的外力只有钢轨对机车动轮的作用力。

下面我们来分析电传动机车动轮轮缘上牵引力的形成过程。图 1—2 (a) 所示为机车的一个动轮。机车通过轮对以其整个重量（包括轮对自重）压在轨道上，每一动轮对对于轨道的正压力是 $2P_z$ 。由于这个正压力的关系，使动轮与轨道表面紧压在一起，形成了轮轨表面间的“粘着”。另一方面，牵引电动机电枢产生转矩，通过传动机构作用在动轮上；同时经过机车内力的传递，在车架上也受到大小相等方向相反的力矩。作用在动轮上的力矩 M ，可以用作用在 C 点与 O 点的力偶来代替，偶力的大小为 F_l 及 F'_l ($F_l = F'_l$)，其作用臂为动轮半径 R_l 。由于力 F_l 作用于轮、轨接触点 C 上，企图推钢轨，故钢轨产生一个与所作用力大小相等、方向相反的反作用力 F 作用于动轮轮缘。因此，任一瞬间，在 C 点上作用的力是平衡的。动轮上的 C 点对钢轨来说是相对静止的。所以， C 点（即粘着点）就是动轮沿钢轨滚动的瞬时中心——瞬时支点。由于 C 点力的平衡，才释放出了作用于动轮中心点 O 的力 F'_l 。这个力没有被平衡，它使动轮围绕瞬时滚动中心 C 点转动；同时它使动轮轴箱紧压于转向架的构架，使机车产生平移运动。显然，力 F 是作用于机车上可利用的唯一外力，正是由于它的存在，才释放出了力 F'_l ，使机车向前运动。因此，钢轨作用于动轮轮缘上的反作用力 F ，就是机车的轮周牵引力。

(二) 制动力的形成

同机车牵引力相似，列车制动力也是由于轮轨间的粘着关系而产生的外力。不过，机车牵引力仅产生在机车动轮与轨面之间；而列车制动力则产生在全列车具有制动装置的机车车辆轮轨之间。

产生列车制动力的方法很多。最普通的方法是通过制动装置推动闸瓦，使闸瓦抱紧车轮，与车轮摩擦，把列车的动能变为热能，而使列车减速或停止。电传动机车还普遍采用电气制动。

制动力的形成过程可以和牵引力的形成过程完全类似地来研究。如图 1—2 (b) 所

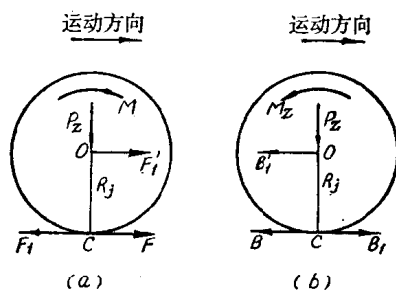


图 1—2 牵引力和制动力形成的示意图
(a) 牵引力； (b) 制动力。

示, 设机车以速度 V 惰行, 轮对正压力仍为 $2P_z$ 。通过某种制动方式, 我们对车轮施加一制动力矩 M_z 。制动力矩 M_z 可以用具有作用臂 R_1 的力偶 B_1 和 B_1' 来代替。力 B_1 企图向前推钢轨。这样, 在 C 点便引起了制动力 B ——阻止列车前进的钢轨反作用力。

二、粘着问题

产生牵引力的关键是动轮与钢轨间的粘着现象, 那么粘着现象到底是怎么产生的呢?

在一般物理学中我们研究的是静止与滑动, 静摩擦与滑动摩擦等现象。我们知道, 当一个静止的物体受到外力作用时, 随着外力的加大, 静摩擦力也加大, 直到外力超过静摩擦力的最大值时, 物体开始移动, 这时物体就处于滑动状态。

这个过程可以认为经过两个阶段, 即:

1. 滑动前的弹性位移阶段;
2. 滑动阶段。

可以设想, 物体的表面是有些高低不平的, 同时当两物体接触时, 由于距离很近, 彼此分子之间可能会产生相互作用力。所以当物体上加有外力时, 首先外力是被物体表面高低不平处的弹性变形力及分子间的相互作用力所平衡。因此, 在外力的作用下, 虽然从表面上看来物体是静止不动的, 但实际上却有着很小的位移。当外力除去后, 位移即消失而等于零。我们称这个位移为弹性位移, 把这一阶段称为滑动前的弹性位移阶段。在这一阶段中用来平衡外力的弹性变形力和分子作用力则称为“非全静摩擦力”。

随着外力的增加, 弹性位移与非全静摩擦力也加大。但弹性位移的增加有一极限值, 达到此极限值时, 物体所受的反作用力为最大。这一反作用力的极限值也就是两接触面间的最大静摩擦力, 即非全静摩擦力的最大值。故非全静摩擦力也是随着外力的大小而改变, 且有一最大数值。

当外力再加大, 弹性位移超过极限值时, 静摩擦被破坏而进入滑动阶段。这时, 物体产生硬性位移, 它所受的反作用力即为滑动摩擦力。

机车动轮与钢轨的情况基本上也可以分成弹性位移阶段与滑动阶段。当牵引电动机通电后, 动轮对钢轨有一作用力 F_1 (图 1—2 a)。力 F_1 的作用是要使动轮与钢轨产生相对滑动。和前面的分析一样, 在弹性位移阶段也将产生非全静摩擦力。由于非全静摩擦力的作用使动轮与钢轨不能产生滑动, 而只产生弹性位移。

这种阻止动轮与钢轨不能相对滑动 (只有弹性位移) 的非全静摩擦力, 称为粘着力。

当电动机的电流继续增大, 一定有这样一个瞬间, 力 F_1 能使动轮与钢轨间的弹性位移达到极限值, 也就是说动轮与钢轨间的非全静摩擦力达到极限值。如力 F_1 再加大, 动轮与钢轨间就要产生硬性位移而进入滑动阶段。这时轮轨的接触点 C 会相对滑动, 动轮在钢轨上不仅有滚动, 且带有滑动, 这种现象称为打滑。

弹性位移达到极限值时的非全静摩擦力称为极限粘着力或最大粘着力。

总的来说, 要使动轮滚动前进, 动轮与钢轨间所作用的水平方向的力, 一定要小于非全静摩擦力的极限值, 也就是一定要小于极限粘着力。换句话说, 动轮所能实现的牵引力不可能大于动轮与钢轨间的极限粘着力。

由于粘着力的大小与动轮对钢轨的正压力有关, 而且在弹性位移阶段可以认为是成正比的, 所以可以写出下式

$$F \leq \mu \cdot 2P_z$$

(1—21)

式中 F ——动轮对所能实现的牵引力；

$2P_z$ ——动轮对对钢轨的正压力（轴重）；

μ ——最大粘着力与轴重之间的比例常数，称为粘着系数。

因为在机车上，动轮对数不止一个，所以对整台机车来说

$$F_K \leq \mu P_K$$

(1—22)

式中 $F_K = \Sigma F$ ——机车所能实现的总牵引力；

$P_K = \Sigma 2P_z$ ——机车动轮轴重总和（即机车的粘着重量）。

(1—22) 式也可以用一句话来表达，即机车所能实现的牵引力，就数值上来说，不能大于机车粘着重量的某一分数（因为粘着系数 μ 永远小于 1）。

关于动轮与钢轨间产生粘着的物理解释，目前还存在不同看法，尚需进一步研究和探讨。这里仅就弹性变形理论这一观点简要介绍如下。

弹性变形理论认为，动轮对以 $2P_z$ 的正压力压在钢轨上，而产生弹性变形，因而形成椭圆形的接触面（图 1—3 中假定钢轨不变形）。动轮表面纤维在进入接触面以前，由于力矩的作用沿圆周受压缩。当它进入接触面后，仍旧维持压缩状态，接触面的这一部分称为滚动区域。在动轮接触面后面部分的纤维则有些拉伸，因而使这部分轮缘与钢轨之间有微量的滑动，这部分接触面称为滑动区域。尽管动轮在不断地滚动，接触面在不断地替换，这种现象的实质并不改变。实际上，动轮受力矩作用在钢轨上滚动时，钢轨的表面纤维也发生拉伸和压缩的弹性变形，只是钢轨的表面纤维在接触面的前面部分受拉伸，而在接触面的后面部分受压缩。因此，动轮上被压缩的表面纤维，在接触面的前部与钢轨的被拉伸的表面纤维相接触。随着动轮在钢轨上的滚动，动轮上这块被压缩的表面纤维陆续地放松并伸张开来，而钢轨上相应的被拉伸的表面纤维将被压缩而收缩。所以，动轮的圆周速度将比移动速度为高。这两种速度的差叫做“微滑动”。由此可以得出这样的认识：没有弹性变形就没有微滑动，也就不能传递牵引力。

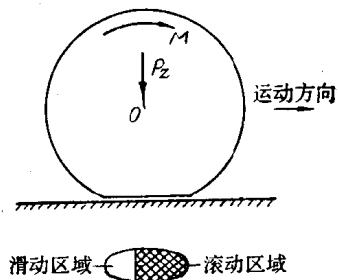


图 1—3 弹性变形理论对粘着解释的示意图

动轮上所受力矩较小时，作用在动轮上的切向力也较小，滑动区域占整个接触面的很小一部分，微滑动的量极小。随着切向力逐渐增加，滑动速度和滑动区域逐渐增加，滑动区域的摩擦系数及摩擦力逐渐减小；与此相反，滚动区域则逐渐减小，滚动区域的非全静摩擦系数及非全静摩擦力逐渐增大。在这个粘着情况的变化中，非全静摩擦力增加得多，摩擦力减小得少，总的粘着力还是增加的。当切向力增加到某一数值时，滑动区域将覆盖整个接触表面。若切向力超过这个数值，车轮与钢轨的整个接触面将相对滑动，这就是打滑的开始。打滑之后，轮轨全部接触面的摩擦系数均为滑动摩擦系数，其数值大为减小，这时粘着力也变为滑动摩擦力，其数值也大为降低。

弹性变形理论还认为从打滑开始，到动轮真正打滑，这中间会出现一个滑动、粘着、再滑动的断续滑动运动。这是因为施加在动轮上的切向力增加时，不仅导致车轮与钢轨间的微滑动，而且使得传动机构内弹性应力增大。打滑开始后，动轮就会加速，滑动摩擦力就会减小，传动机构内的弹性应力就会被部分地解除。由于传动机构的弹性和动轮的运动惯性，动

轮转速不会直线增加，而是波动式上升（即引起一个振动运动）。在这个振动运动的负周期中，粘着又可以重新恢复，然后再次打滑，于是重复同样的循环。弹性变形理论把这个断续的滑动运动称为“滑动—粘着”现象。

因此，弹性变形理论对施加于动轮上的切向力与滑动速度的变化关系有如下的看法：施加于动轮上一个逐渐增大的切向力，就会发生一个微滑动运动，它开始时慢慢地增大（即微滑动），直到切向力达到一定数值，它便开始更快地增大（即微滑动的量变大，称为所谓“大滑动”）。当切向力达到最大值的瞬间，“滑动—粘着”现象出现，此后滑动运动将继续增大，而可传递的切向力反而减小，即发展成真正的打滑（图 1—4）。

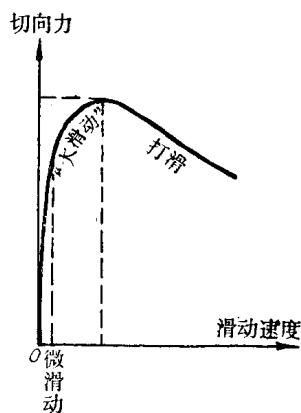


图 1—4 切向力与滑动速度的关系曲线

三、粘 着 系 数

在一定的机车粘着重量下，实际可能得到的最大牵引力决定于粘着系数 μ （也称为物理粘着系数）。由于影响 μ 的因素很多，在实际计算中，我们用的是所谓计算粘着系数 μ_j 。它是这样定义的：即在不空转的运行条件下，所能得到的最大牵引力 $F_{K_{max}}$ 与机车粘着重量 P_K 之比称为计算粘着系数 μ_j ，表示式为

$$\mu_j = \frac{F_{K_{max}}}{P_K} \quad (1-23)$$

计算粘着系数是用实验方法求出的。以后所谈到的粘着系数都是计算粘着系数。

（一）影响单独轮对粘着系数的因素

影响粘着系数的因素很多，情况比较复杂，下面仅就主要的几方面作简要讨论：

1. 材料：对于一般用来作轮箍的钢材，从近期的一些研究试验来看，可以认为它们对于粘着没有重大影响。

有试验表明，如果用 18/8 铬镍钢的钢轨和轮箍，粘着可以增大 0.05 左右。另外，当两种不同硬度的材料相接触时，在接触点处，硬度大的材料易将硬度小的材料的凸峰削去，因此降低了机械弹性变形力的数值，粘着系数也就减小了。

2. 接触面的状态：实际运行经验表明，天气对粘着系数有很大影响。潮湿有雾的天气或是微雨的时候，粘着系数降低；相反地，在下大雨钢轨被彻底清洗之后，粘着系数却加大。

钢轨上有薄锈时，或是轨面上撒砂后，粘着系数加大。

轨面有薄冰时，粘着系数减小。

3. 速度：速度越小，相对地说接触点接触的持续时间越长，因此粘着系数越大。

（二）影响电传动机车粘着系数的因素

机车在运行中，由于线路状态及运行条件的关系，整台机车的粘着系数与单独动轮对的粘着系数并不相同。机车的粘着系数受到更多因素的影响。

1. 机车运行速度对粘着系数的影响：运行速度对机车粘着系数的影响很大。除了在速度加大时，由于轮与轨接触的持续时间相对减小而使粘着系数减小外，机车单位时间通过钢

轨接缝的次数也加多,也就是说机车振动次数增加,当然也使粘着系数减小。

因此,电传动机车考虑到运行速度对粘着系数的影响,不同的车型分别采用不同的公式计算粘着系数。韶山1型电力机车的计算公式为

$$\mu_i = 0.24 + \frac{12}{100 + 8V} \quad (1-24)$$

东风₄型内燃机车的计算公式为

$$\mu_i = 0.25 + \frac{8}{100 + 20V} \quad (1-25)$$

式中 V —— 机车运行速度 (公里/小时)。

2. 各轮对牵引力及轴重分配不均对机车粘着系数的影响: 根据 (1-23) 式 $\mu_i = \frac{F_{K\max}}{P_K}$ 可知, 机车计算粘着系数决定于各个动轮对牵引力之和 ($F_K = \sum F$) 及轴重之和 ($P_K = \sum 2P_z$)。

首先从牵引力方面来看, 由于同一台机车中各电动机的特性和动轮直径不可能完全相同, 因此各动轮轮缘处的牵引力也不会一样。这时可能出现这样一种情况: 在其它动轮都没有达到极限粘着力时, 某一个动轮对却已达到极限粘着力。因此, 整台机车所能实现的最大牵引力将小于理想计算值 (即在各轮对的电动机特性和轮径都没有差异, 而同时达到极限粘着力) 的情况下计算出来的数值)。换句话说, 整台机车的粘着系数也将比理想计算值要小些。

其次, 机车在运行情况下, 各轮对轴重分配也不相等。

图 1-5 为二轴电力机车示意图。机车重量为 P , 传递牵引力的车钩距轨面的高度为 H , 车钩处的阻力为 W 。

当牵引电动机不通电而机车处于静止的情况下, 轴重 $P_1 = P_2 = \frac{P}{2}$ 。在机车通电运行时, 假设列车为等速运行并忽略机车阻力, 则机车牵引力 F 将等于阻力 W 。这时, 如果不考虑电动机特性及轮径的差异, 可以认为每个动轮都发出大小为 $F/2$ 的牵引力。

但由于车钩处列车阻力 W 的影响, 两轴的轴重不再相等, 即 $P_1 \neq P_2$ 。

这时对 B 点取转矩, 则

$$P_1 \cdot L + W \cdot H - P \cdot \frac{L}{2} = 0$$

$$P_1 = \frac{P}{2} - \frac{WH}{L}$$

对 A 点取转矩, 则

$$P_2 \cdot L - W \cdot H - P \cdot \frac{L}{2} = 0$$

$$P_2 = \frac{P}{2} + \frac{WH}{L}$$

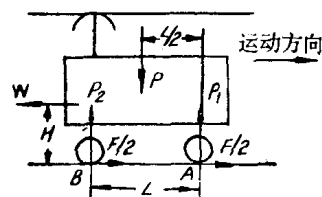


图 1-5 二轴电力机车轴重分配示意图

由上式可以看出, 在牵引状态下, 沿列车运行方向, 前轮对减载而后轮对加载。因为极限粘着力是与轴重成正比的, 因此在前轮对减载时, 极限粘着力或前轮对所能实现的最大牵引力也减小了。这样就使机车总和牵引力也减小了, 也就是说一个动轮对的减载就将限制其它轮对充分发挥牵引力。

在运行中, 机车动轮轴重减载的情况是一定会发生的。为了便于计算起见, 我们认为机车粘着重量不变, 只是在这种情况下, 机车粘着重量没有得到充分利用, 结果是机车的粘着系数又减小了些。即