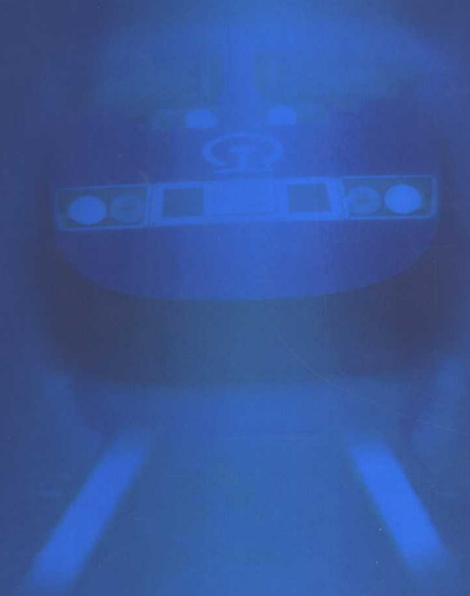


新技术·新方法·新科学知识论丛

电传动机车概论

连级三 主编



西南交通大学出版社

新技术·新方法·新科学知识论丛

电传动机车概论

连级三 主编

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

电传动机车概论 / 连级三主编. — 成都: 西南交通大学出版社, 2001.12

(新技术·新方法·新科学知识论丛)

ISBN 7-81057-550-3

I. 电... II. 连... III. 电传动内燃机车 - 概论
IV. U262.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 029471 号

电传动机车概论

连级三 主编

*

出版人 宋绍南

责任编辑 苏燕辰

封面设计 毕雪屏

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 发行科电话: 7600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

E-mail: cbs@center2.swjtu.edu.cn

四川森林印务有限责任公司印刷

*

开本: 787 mm × 1092 mm 1/16 印张: 14.25

字数: 351 千字 印数: 1—3000 册

2001 年 12 月第 1 版 2001 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 7-81057-550-3/U · 045

定价: 20.00 元

编 者 的 话

编者曾先后于 1983、1996 年主编过《电传动机车控制》和《电力牵引控制系统》两本教材，主要是介绍干线电力机车和电传动内燃机车的主、控、辅三大电路。而这本《电传动机车概论》可以说是一个补充，即填补前两本教材没有涉及的问题，如高速铁路与高速列车、城市轨道交通机车车辆和磁浮铁路等内容。它们对于从事有轨铁路交通机车车辆的工程技术人员来说都是十分需要的。因为这些内容比较新，在以往的教学都没有涉及，也没有相应的教材。编者认为，在目前的教学改革中加强基础课，强化外语和计算机技能，而淡化专业教学是完全正确的。但是，对于一个高素质的工程技术人员来说，具有合理的知识结构，有比较宽广的专业知识面也是十分重要的。只有具有扎实的基础和较强的外语与计算机技能，同时又有比较多的专业知识，才能较好地适应经济技术的发展，从容面对工程技术中所遇到的各类问题。本书正是适应当前教改方向，着眼轨道交通机车车辆发展多方面内容的综合性教材。

由于教材所涉及的专业多，非编者个人能力所及。为此，特邀请一些专家和教授共同完成。其中，第 1、2、3 章由赵叔东教授级高级工程师撰写；第 4 章由贺威俊教授、第 5 章钮小明教授和鲍维千教授、第 6 章由胡汉春教授、第 7 章连级三教授和林国斌副教授撰写。对他们的大力协作，编者深表谢意。同时，也对西南交通大学出版社编辑的辛勤工作表示感谢。

由于编者水平有限，内容有不妥之处，请读者施教。

连 级 三

2000 年 9 月于西南交通大学

目 录

1 列车牵引理论基础

1.1 轮轨相互作用原理	1
1.2 列车运行阻力	10
1.3 列车运行方程式	17

2 高速铁路与高速列车

2.1 高速铁路的发展	24
2.2 高速列车的现状	30
2.3 高速列车的阻力和功率	34
2.4 粘着系数、轴重	38
2.5 高速时的轮轨作用	41
2.6 高速列车的空气动力学问题	43
2.7 高速列车的制动	47
2.8 高速列车弓网关系	49
2.9 车辆的轻量化	52
2.10 车辆间的连接	54
2.11 高速列车的电传动系统	55
2.12 摆式列车	58

3 电力机车的机械部分及总体布置

3.1 转向架	60
3.2 车 体	81
3.3 总体布置	87

4 电气化铁道供电系统

4.1 电力系统与电能生产基本概念	98
-------------------------	----

4.2	牵引供电系统概论与供电方式	102
4.3	牵引变电所主设备与电气主接线	108
4.4	接触网与受流技术	119
5	城市轨道交通机车车辆	
5.1	直流牵引电机及其控制	127
5.2	交流牵引电机及其控制	138
5.3	磁阻电机及其控制	152
5.4	轻轨车辆机械部分	156
6	电传动内燃机车恒功率控制系统	
6.1	概 述	167
6.2	交流牵引发电机的理想外特性	172
6.3	牵引发电机恒功率励磁系统的基本工作原理	176
6.4	液力调节器(联合调节器)恒功率励磁系统	179
6.5	电子恒功率励磁系统	185
6.6	微机控制恒功率励磁系统	188
6.7	内燃机车交—直—交流传动恒功率调速系统	191
7	磁浮铁路	
7.1	概 述	199
7.2	日本超导磁浮铁路	204
7.3	德国常导磁浮铁路	208
7.4	城市常导磁浮铁路	217
	参考文献	222

列车牵引理论基础

1.1 轮轨相互作用原理

自世界上第一条铁路诞生以来,轨道运输技术不断发展,与之相适应的牵引动力更是多种多样,出现了蒸汽机车、内燃机车、电力机车、动车组以及城市轨道用车等等。它们广泛用于干线铁路运输、城市交通及工矿运输。

上述运输方式,都依赖于车轮与钢轨的相互作用,钢轨限制了机车车辆的运动范围,自由度小是其缺点,但与其他运输方式比较,轨道运输具有运量大、速度快、耗能省、运费低、占地少、污染小的特点,因而成为世界各国的主要运输手段。为此,我们必须研究轮轨相互作用的理论,它是轨道运输的基础。

1.1.1 动轮与钢轨间粘着的概念

采用电传动方式的机车车辆,由于能量的变换方式方便,又容易控制,因而得到广泛的应用。这种方式由牵引电动机通过传动机构,将电机的转矩传递给机车轮对。这些传递电机能量的机车轮对(车轮),称为动轮对(动轮)。

图 1.1 为机车以速度 v 在平直线路上运行时一个动轮对的受力情况(忽略内部各种摩擦阻力)。为了清楚起见,图中将动轮与钢轨分离。

G_i 为一个动轮对作用在钢轨上的正压力,又称为轮对的轴重。牵引电动机作用在动轮上的驱动转矩 M_i , 可以用一对力形成的力偶代替。力 F_i' 和 F_i 分别作用在轮轴中心的 O 点和轮轨接触处的 O' 点,其大小为 $F_i = F_i' = M_i / R_i$, R_i 为动轮半径。

在正压力 G_i 的作用下,车轮和钢轨的接触部分紧压在一起。切向力 F_i 使车轮上的 O' 点具有向左运动的趋势,由于作用力 G_i 及轮轨接触处摩擦的作用,车轮和钢轨间产生静摩擦力, f_i 为钢轨作用于车轮的力,其反作用力 f_i' 为车轮作用于钢轨的力,显然

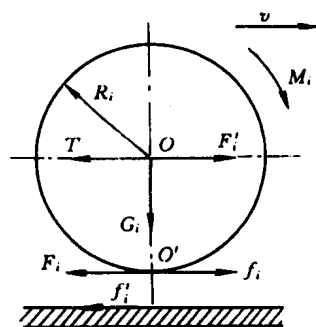


图 1.1 动轮对受力

$f'_i = f_i$ 。我们将 f_i 称为轮周牵引力。当车轮与钢轨间未产生滑动时, 车轮上 O' 点受到两个相反方向的力 F_i 和 f_i 的作用, 而且

$$f_i = F_i \quad (1.1)$$

这时, O' 点保持相对静止, 轮轨之间没有相对滑动, 在力 F'_i 的作用下, 动轮对绕 O' 点作纯滚动运动。

动轮与钢轨接触处, 由于正压力而出现的保持轮轨接触处相对静止、而不相对滑动的现象称为“粘着”。粘着状态下的静摩擦力 f_i 又称为粘着力。

试验研究表明, 轮轨间的粘着与静力学中的静摩擦具有十分相似的物理性质。驱动转矩 M_i 产生的切向力 F_i 增大时, 粘着力 f_i 随之增大, 并保持与 F_i 相等。当切向力 F_i 增大到某一数值时, 粘着力 f_i 达到最大值。若使切向力 F_i 再继续增大, f_i 反而迅速减小。试验证明, 粘着力 f_i 的最大值 $f_{i\max}$ 与动轮对的正压力 G_i 成正比, 即

$$f_{i\max} = \mu G_i \quad (1.2)$$

最大粘着力与轮对正压力的比例常数称为粘着系数, 用 μ 表示。上式表明, 在轴重一定的条件下, 轮轨间的最大粘着力由轮轨间粘着系数的大小决定。

当轮轨间出现最大粘着力后, 若继续加大驱动转矩, 切向力 F_i 将大于最大粘着力, 动轮上的 O' 点将向左移动, 轮轨间出现相对滑动, 粘着状态被破坏。动轮由纯滚动变为既有滚动, 也有滑动。此时对动轮的反作用力 f_i 由静摩擦力变为滑动摩擦力, 其值迅速减小; 与此同时, 动轮的转速上升。这种因驱动转矩过大, 轮轨间的粘着关系被破坏, 使轮轨间出现相对滑动的现象, 称为“空转”。动轮出现空转时, 轮轨将依靠滑动摩擦力传递切向力, 这就大大削弱了传递切向力的能力, 同时造成动轮踏面的擦伤。因此, 机车在牵引运行中, 应尽量防止出现动轮的空转。

粘着系数是由轮轨间的物理状态确定的, 因此要提高每轴牵引力, 只有加大轴重, 但轴重的增加, 又受轮轨间允许作用力的限制, 特别对高速列车更是如此。因此要增加一台机车的牵引力, 往往通过增加动轴数来达到。

上述只是对粘着最浅显的解释, 粘着的问题远远比上述情况要复杂得多。粘着的弹性变形理论, 有利于深化对粘着的认识。我们利用图 1.2 作简要说明。

在动轮正压力的作用下, 轮轨接触处产生弹性变形, 形成椭圆形的接触面。从微观上看, 两接触面是粗糙不平的。由于切向力 F_i 的作用, 动轮在钢轨上滚动时, 车轮和钢轨的粗糙接触面产生新弹性变形, 接触面间出现微量滑动, 即所谓“蠕滑”。蠕滑的产生是由于在车轮接触面的前部产生压缩, 后部产生拉伸; 而在钢轨接触面的前部产生拉伸, 后部产生压缩。车轮上被压缩的金属, 在接触表面的前部与钢轨被拉伸的金属相接触。随着动轮的滚动, 车轮上被压缩的金属陆续地被放松而伸长, 而钢轨则由拉伸变为压缩, 因而在接触面的后部出现滑动。

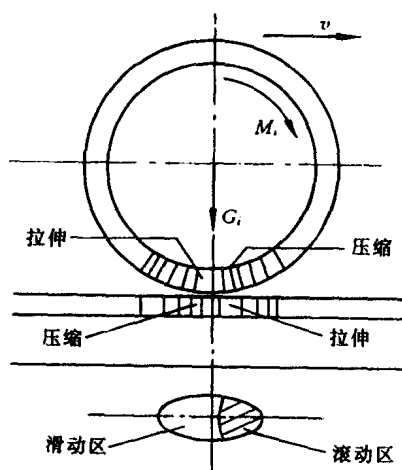


图 1.2 牵引工况轮轨接触处的弹性变形

轮轨接触面存在两种不同状态：接触面的前部，轮轨间没有相对滑动，称为滚动区，在图 1.2 中用阴影线表示；接触面的后部轮轨间有相对滑动，称为滑动区。这两个区域的大小将随切向力的变化而变化。当切向力增大时，滑动区面积不断增大，滚动区面积越来越小，直到为零。当滚动区面积为零时，整个接触面间出现相对滑动，轮轨间的粘着被破坏，即出现空转。

蠕滑是滚动体的正常滑动。动轮在滚动过程中必然会产生蠕滑现象。伴随着蠕滑产生静摩擦力，轮轨之间才能传递切向力。由于蠕滑的存在，动轮的滚动圆周速度将比其前进速度快，这两种速度的差称为蠕滑速度。用蠕滑率 σ 表示蠕滑的大小，则

$$\sigma = \frac{\omega R_l - v}{v} \times 100\% \quad (1.3)$$

式中， v 为动轮的前进速度； ω 为动轮转动的角速度。

轮轨间由于干摩擦产生的切向力（蠕滑力）反过来作用于驱动机构。随着切向力的增大，驱动机构内的弹性应力也增大。当切向力达到极限摩擦时，由于蠕滑的积累而累及整个接触面，使之发展成为真滑动，能量将被用来加速车轮本身，这时驱动机构内的弹性应力被解除。因为车轮的惯性和驱动机构的弹性，而在轮轨间建立起粘滑振动。这种振动导致“滑动—粘着—再滑动—再粘着”的反复振荡过程，一直持续到重新在驱动机构中建立起稳定的弹性应力为止。

1.1.2 机车牵引力及限制

1. 牵引力的形成

由图 1.1 可知，由于轮轨间存在粘着，静止的动轮受驱动转矩 M_i 的作用后，在动轮上的 O' 点受到大小相等、方向相反的切向力 F_i 和粘着力 f_i 的作用。 O' 点保持相对静止，成为动轮的瞬时转动中心。作用在轮轴中心 O 点的力 F_i' ，将使动轮绕 O' 点转动，引起轴承对轮轴的水平反作用力 T 。只要驱动转矩 M_i 足够大，动轮即绕瞬时转动中心转动，瞬时转动中心沿钢轨不断前移，机车产生平移运动。

从整个机车来看，驱动转矩归算到轮心的作用力 F_i' 和轴承对轮轴的反作用力 T 是一对内力，而钢轨对动轮的摩擦反作用力 f_i 是动轮受到的惟一水平外力。只有 f_i 的存在，机车才有可能产生平移运动，故这个外力称为动轮的轮周牵引力。

机车的轮周力 F 为机车各动轮的轮周牵引力之和，即

$$F = \sum f_i \quad (1.4)$$

机车的轮周牵引力部分克服机车内的各种阻力，其余通过转向架、车体传递到车钩，牵引列车前进。车钩上的那部分牵引力称为挽钩牵引力，以 F_w 表示，则

$$F_w = F - w' \quad (1.5)$$

式中， w' 为机车总阻力。

由上可知，机车牵引力是动轮受驱动转矩作用后形成的。因为驱动转矩是可以控制的，因而机车的牵引力可以受司机控制。

2. 粘着对牵引力的限制

如上所述, 调节牵引电动机转矩的大小, 可以改变切向力 F_t 的值, 只要粘着没有破坏, 就可以得到不同的轮周牵引力, 机车所能实现的最大牵引力受粘着条件的限制。由粘着条件决定的最大粘着力, 也就是动轮不空转所能实现的最大牵引力, 称为机车的最大粘着牵引力, 用 $F_{\max}$ 表示, 其值为

$$F_{\max} = \mu_{\max} G$$

式中, $\mu_{\max}$ 为机车的最大粘着系数; G 为机车的粘着重力。

机车粘着重力的常用单位为吨力 (9.8 kN), 简称为吨, 与机车粘着质量之间有关系式

$$G = P_{\mu} g$$

这时

$$F_{\max} = \mu_{\max} P_{\mu} g \quad (1.6)$$

式中, P_{μ} 为机车粘着质量, 吨 (t); g 为重力加速度, $g = 9.8 \text{ 米/秒}^2 \text{ (m/s}^2\text{)}$ 。

机车牵引力的单位为牛或者千牛, 式 (1.6) 中的牵引力为千牛 (kN)。

当机车各动轴中的驱动转矩归算到轮缘的作用力超过粘着牵引力时, 粘着条件相对最差的动轴首先产生空转, 机车的牵引力立即下降。

因为每轴的正压力, 亦称为轴重, 受到钢轨、路基、桥梁等限制, 所以欲增加机车的牵引力, 一般是增加机车的动轴数。

1.1.3 粘着系数与计算粘着系数

机车的粘着质量确定之后, 实际能够得到的最大牵引力, 决定于动轮钢轨间粘着系数 μ 。

机车在运行中, 动轮与钢轨间的粘着系数受很多因素影响。其中主要的有:

① 动轮踏面与钢轨表面的状态。动轮踏面与钢轨表面干燥或雨后附有薄锈, 粘着系数增大; 如有冰、霜、雨、雪、油垢或潮湿, 粘着系数减小。在钢轨上撒砂能较大地提高粘着系数。

图 1.3 表示干燥钢轨与潮湿钢轨的粘着系数变化情况, 显然粘着系数受轨面状态的影响很大。该图是法国国铁的试验结果。图中实线为计算平均值。

② 线路的质量。钢轨越软或道碴的下沉量越大, 粘着系数越小; 钢轨不平或直线地段两侧钢轨顶面不在同一水平, 动轮所处位置的轨面状态不同, 粘着系数减小。

③ 运行速度的高低。运行速度增高, 加剧了动轮对钢轨的纵向和横向滑动及机车振动, 粘着系数减小。

④ 机车有关部件的状态。

- 各动轴上牵引电动机的特性不完全相同, 在同一运行速度下发出的轴牵引力不同。牵引力大的轮对将首先发生空转。

- 每个动轮的直径不同。在相同驱动转矩时, 直径小的动轮发出的力大, 容易首先发生空转。

- 每个动轮的动负荷不同, 机车运行中因车钩的作用以及弹簧悬挂和线路状态的影响, 使得各动轮之间的负荷重新分配。动负荷轻的动轮将首先空转。

以上所述都导致整台机车的粘着系数减小。

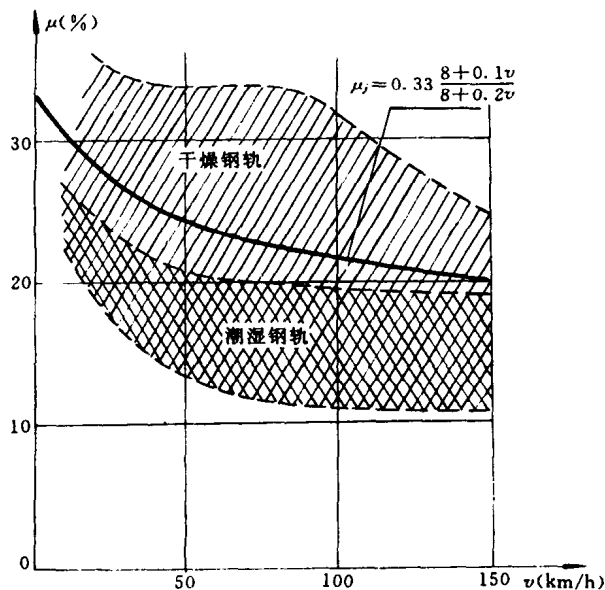


图 1.3 粘着系数与轨面状态的关系

粘着系数既然与很多因素有关，因而不可能制定一个包括各种因素的计算公式。牵引计算若按最大粘着系数来计算，则机车运行将处于空转的状态，这是不容许的。因而牵引计算中采用的粘着系数是经过专门试验制定的，称为计算粘着系数，用 μ_j 表示，它是机车在通常条件下能够实现的最大的粘着系数。在粘着条件不好时，还必须采用撒砂等改进粘着的措施。这时机车的计算粘着牵引力 F_j 用下式表示

$$F_j = \mu_j P_\mu g \quad (\text{kN}) \quad (1.7)$$

铁道部新编制的《列车牵引计算规程》中规定了各型电力机车和内燃机车计算粘着系数的计算公式，按 TB/T 1407-1998 规定：

- 国产各型电力机车的计算粘着系数 μ_j 按下式计算

$$\mu_j = 0.24 + \frac{12}{100 + 8v} \quad (1.8)$$

- 6K 型电力机车的计算粘着系数 μ_j 按下式计算

$$\mu_j = 0.189 + \frac{8.86}{44 + v} \quad (1.9)$$

- 8G 型电力机车的计算粘着系数 μ_j 按下式计算

$$\mu_j = 0.28 + \frac{4}{50 + 6v} - 0.0006v \quad (1.10)$$

- 电力机车（三轴转向架）在曲线半径小于 600 m 的线路运行时，曲线上的计算粘着系数 μ_r 按下式计算

$$\mu_r = \mu_j (0.67 + 0.00055R) \quad (1.11)$$

- ND₅ 型内燃机车的计算粘着系数 μ_j 按下式计算

$$\mu_j = 0.242 + \frac{72}{800 + 11v} \quad (1.12)$$

- 各型电力传动内燃机车的计算粘着系数 μ_j 按下式计算

$$\mu_j = 0.248 + \frac{5.9}{75 + 20v} \quad (1.13)$$

- 内燃机车在曲线半径小于 550 m 的线路上运行时, 曲线上的计算粘着系数 μ_r 按下式计算

$$\mu_r = \mu_j (0.805 + 0.000355R) \quad (1.14)$$

从上我们可以看到:

- ① 各种车型的计算粘着系数是不同的, 这是因为各种机车结构及性能不同所致。
- ② 计算粘着系数随速度增加而减小。
- ③ 内燃机车的计算粘着系数一般小于电力机车, 其原因之一是由于燃油的消耗, 使实际粘着质量减小之故。

1.1.4 轴重转移与轴重补偿

1. 轴重转移

机车的轴重是指机车在静止状态时, 每个轮对加于钢轨的正压力, 在机车出厂前应将机车各轴的轴重调整至尽可能相同。实际上, 在牵引运行时, 由于轮周牵引力与作用在车钩上的列车阻力不在同一水平线上, 使得各轮对的轴重发生变化, 有的增载, 有的减载。这种机车运行时的轴重重新分配称为牵引力作用下的轴重转移。当然, 机车总的粘着质量是不会改变的。

我们用图 1.4 及简单计算, 定性说明轴重转移性质的关系。实际的轴重转移计算要复杂得多。

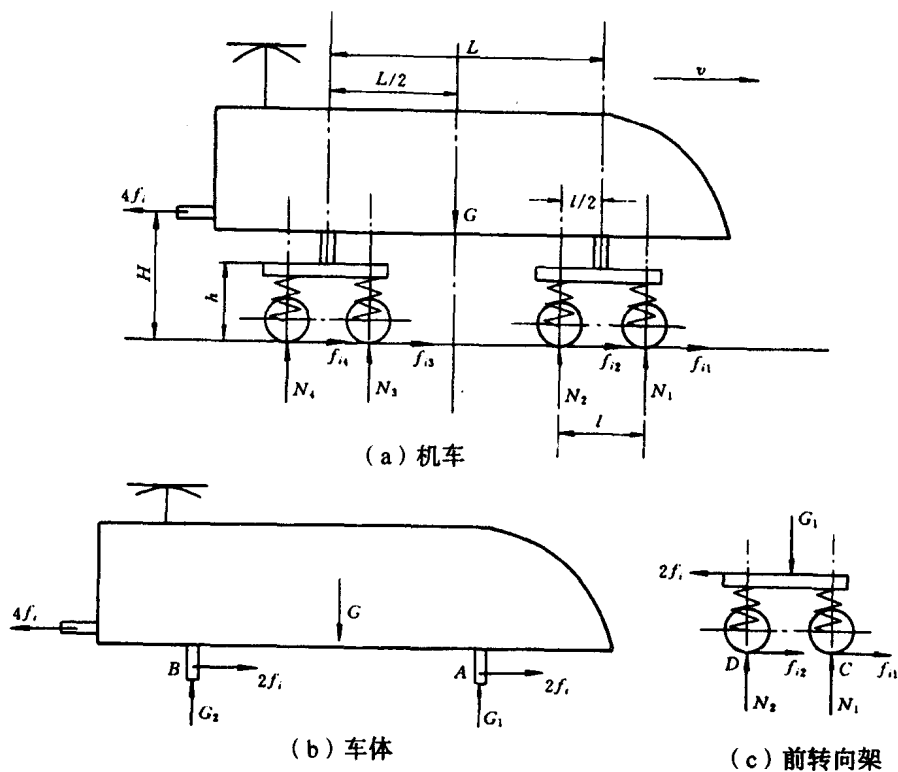


图 1.4 四轴电力机车受力分析

图 1.4 为四轴电力机车牵引运行时的受力情况（忽略机车阻力）。机车垂直力的传递是通过轮对与转向架之间的一系弹簧和转向架与车体之间的二系弹簧实现的；水平力则是通过动轮的轴箱以及中央支承传递。

设机车各动轮所发挥轮周牵引力相等。

机车处于静止状态时，力 f_i 均为零。由图 1.4 (a) 可得

$$N_1 = N_2 = N_3 = N_4 = \frac{G}{4} \quad (1.15)$$

各轮对轴重 P_i 均匀分配，等于钢轨的反作用力 N_i ，为机车重力 G 的 $1/4$ 。

牵引状态下，车体与转向架的受力情况如图 1.4 (b)、(c) 所示。

以车体为隔离体，B 点的力矩方程式为

$$4f_i(H-h) + G_1L - G\frac{L}{2} = 0 \quad (1.16)$$

得
$$G_1 = \frac{G}{2} - \frac{4f_i(H-h)}{L} \quad (1.17)$$

同理，由 A 点的力矩方程式可得

$$G_2 = \frac{G}{2} + \frac{4f_i(H-h)}{L} \quad (1.18)$$

由式 (1.17)、(1.18) 可知，在牵引力及车钩力的作用下，前转向架减载、后转向架加载。

以前转向架为隔离体，D 点的力矩方程式为

$$2f_i h - G_1 \frac{l}{2} + N_1 l = 0 \quad (1.19)$$

$$N_1 = \frac{G_1}{2} - \frac{2f_i h}{l} \quad (1.20)$$

同理，由 C 点的力矩方程式可得

$$N_2 = \frac{G_1}{2} + \frac{2f_i h}{l} \quad (1.21)$$

由式 (1.20)、(1.21) 可知，在同一转向架内，前轮对减载，后轮对加载。

将式 (1.17) 代入式 (1.20)、(1.21) 得

$$N_1 = \frac{G}{4} - 4f_i \left(\frac{H-h}{2L} + \frac{h}{2l} \right) \quad (1.22)$$

$$N_2 = \frac{G}{4} - 4f_i \left(\frac{H-h}{2L} - \frac{h}{2l} \right) \quad (1.23)$$

同理可得

$$N_3 = \frac{G}{4} + 4f_i \left(\frac{H-h}{2L} - \frac{h}{2l} \right) \quad (1.24)$$

$$N_4 = \frac{G}{4} + 4f_i \left(\frac{H-h}{2L} + \frac{h}{2l} \right) \quad (1.25)$$

式 (1.22) ~ (1.25) 说明, 在牵引工况下机车轴重进行了再分配, 沿列车运行方向, 前轮对减载后轮对加载。最大的轴重减载量发生在第一个轮对, 其最大减载量为

$$P_{i\max} = 4f_i \left(\frac{H-h}{2L} + \frac{h}{2l} \right) \quad (1.26)$$

轴重转移一般由两部分组成。一部分是因车钩牵引力和中央支承处的水平作用力不在同一水平线上而引起的转向架之间的轴重转移, 前转向架的轴重减载, 后转向架的轴重增载, 其转移量为式 (1.26) 的前一项; 另一部分是因轮周牵引力与中央支承处的水平作用力不在同一水平线上而引起的转向架内部的轴重转移。前轴轴重减载, 后轴轴重增载, 其转移量为式 (1.26) 的后一项。

上述计算中, 忽略了一系弹簧与二系弹簧对轴重转移的影响。实际上弹簧有很大影响, 而且轴重转移不仅受到机车的结构参数 (如 H 、 h 、 L 、 l 等) 的影响, 而且还与牵引电动机的布置方式和传动方式等许多因素有关。

2. 轴重转移对计算粘着系数的影响

轮对发挥的最大粘着力与轴重成正比。轴重越小, 轮对发挥的最大粘着力越小, 轮对也更容易产生空转。因此, 机车牵引运行时, 通常减载最大的轮对将首先产生空转, 使整台机车发挥的粘着牵引力减小, 机车的计算粘着系数将降低。

轴重转移导致机车粘着牵引力减小的原因是机车的粘着质量没有得到充分利用。我们用粘着质量利用系数 η 来反映粘着质量利用的程度。

$$\eta = \frac{G - \Delta G_{\max}}{G}$$

所以, 考虑到轴重转移, 机车的计算粘着系数可以用下式表示

$$\mu_i = \eta \mu$$

在牵引工况下, 轴重转移是必然会产生, 在某些情况下甚至可以达到轴重的 20% 或更高, 也就是粘着质量的 20% 或更多一些没有发挥作用。而且轴重转移最大时, 正是机车发挥最大牵引力的时候。例如当机车起动及爬坡时, 正需要发挥较大的牵引力, 而此时轴重转移恰恰也最大。因此, 努力减小轴重转移, 提高粘着质量利用系数, 对充分发挥机车的牵引力具有重要意义。为了减小轴重转移的影响, 可以采用低位牵引拉杆和电气补偿的方法, 提高粘着质量利用系数。

轴重转移的电气补偿是利用电气控制的办法, 使驱动轴重小的动轴的牵引电动机的输出转矩减小, 而驱动轴重大的动轴的牵引电动机的输出转矩加大, 以加大机车牵引力。

1.1.5 列车制动力的形成

列车运行中为了降低运行速度或使列车停车, 利用制动装置产生与列车运行方向相反的外力, 称为列车制动力。

产生列车制动力的方法很多, 除了广泛使用的闸瓦制动以外, 还有:

- ① 盘形制动;
- ② 电阻制动;

- ③ 再生制动;
- ④ 液力制动;
- ⑤ 磁轨制动;
- ⑥ 涡流制动。

磁轨制动是将电磁铁落在钢轨上, 并接通激磁电流将电磁铁吸附在钢轨上, 通过磨耗板与轨面摩擦产生制动力。其缺点是会使钢轨产生磨损。涡流制动则将电磁铁落至离轨面 7~10 mm 处, 由电磁铁与钢轨间的相对速度引起电涡流作用形成制动力。

除上述两种制动方式外, 其他几种同牵引一样是通过轮轨粘着产生的制动力, 称为粘着制动。上述两种则为非粘着制动。

图 1.5 是一个轮对利用闸瓦制动力的示意图。

设一个轮对上有两块闸瓦, 在忽略其他各种摩擦力的情况下, 轮对在平直道上运行。

若每块闸瓦以力 K 压向车轮踏面, 闸瓦与踏面间引起与车轮运动方向相反的滑动摩擦力 $2\mu_K K$ (μ_K 为轮、瓦间的滑动摩擦系数)。这种闸瓦制动不仅用于机车动轮对上, 也可以用于车辆的非动轮对上。对机车或车辆来说, 这一摩擦力是内力, 不能使列车减速。但作用于轮对上摩擦力形成的转矩与牵引电动机产生的转矩一样, 通过轮轨间的粘着, 引起与列车运动方向相反的外力, 实现列车减速。

摩擦力 $2\mu_K K$ 对车轮的作用相当于制动力矩 M_b 。 M_b 满足以下关系

$$M_b = 2\mu_K K R_i \quad (1.27)$$

用类似分析牵引力形成的方法, 转矩 M_b 可以用作用在轴心和轮轨接触的力偶 (B_i 、 B'_i) 代替。力偶的力臂为车轮半径 R_i , 作用力

$$B_i = B'_i = M_b / R_i = 2\mu_K K \quad (1.28)$$

轮轨接触处因轮对的正压力 G 而存在粘着, 切向力 B_i 将引起钢轨对车轮的静摩擦反作用力 b_i , 则 $b_i = B_i = 2\mu_K K$ 。 b_i 作用车轮踏面的 O' 点, 作用方向与列车运行方向相反, 是阻止列车运行的外力, 称为制动力。制动力 b_i 也是轮轨间的粘着力, 因而也受到粘着条件的限制, 即

$$b_i = \mu_b G_i g \quad (1.29)$$

式中, b_i 为轮对的制动力, 千牛 (kN); μ_b 为制动时的粘着系数; G 为粘着质量, 吨 (t)。

整个列车总的闸瓦制动力为机车、车辆所有轮对闸瓦制动力之和, 即

$$B = \sum b_i \quad (1.30)$$

制动力的大小可以采用加减闸瓦压力予以调节, 但不得大于粘着条件所允许的最大值。否则轮轨产生相对滑动, 车轮的制动力变为滑动摩擦力, 数值立即减小, 车轮被闸瓦“抱死”, 轮子在钢轨上继续滑行, 这种现象称为“滑行”。这时制动力大为降低, 车轮与钢轨的接触面会被擦伤, 因此, 应尽量避免。

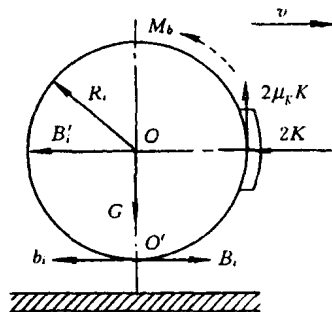


图 1.5 闸瓦制动力形成

1.2 列车运行阻力

列车运行时,除前面分析的制动力外,还会受到与列车运行方向相反,而且是司机不能控制的外力。这种阻止列车运行的外力,称为列车阻力,简称阻力,用 W 表示。由于列车由机车和车辆组成,因而运行阻力也分别由它们产生。

阻力分为基本阻力和附加阻力两大类。

基本阻力是机车和车辆在运行中任何情况下都存在的阻力,用 W_0 表示。附加阻力只发生在个别情况下。例如,在坡道上运行时的坡道附加阻力 W_i ,在曲线上运行时有曲线附加阻力 W_r ,在隧道内运行时有空气附加阻力 W_s 等。起动阻力是指机车和车辆由静态到动态的综合性阻力。

制动力的作用方向虽然也与机车、车辆的运行方向相反,但它是根据需要由司机有意施加的,因而不能列为附加阻力。

列车运行时,作用在列车上的阻力为基本阻力和附加阻力之和。如列车在坡道上运行时,作用在列车上的阻力为

$$W = W_0 + W_i \quad (1.31)$$

为了便于计算,将作用在列车上的阻力分为机车和车辆两部分,分别称为机车阻力 W' 和车辆阻力 W'' , 即

$$W = W' + W'' \quad (1.32)$$

试验表明,作用在机车车辆上的阻力,绝大部分都与其质量成正比。因此,牵引计算中常用单位质量的阻力,称为单位阻力(用 w 表示),来计算机车、车辆的阻力,单位为 N/kN 。

机车的单位阻力为

$$w' = \frac{W'}{m_1 g} \quad (\text{N/kN}) \quad (1.33)$$

车辆的单位阻力为

$$w'' = \frac{W''}{m_2 g} \quad (\text{N/kN}) \quad (1.34)$$

式中, m_1 为机车质量,吨(t); m_2 为车辆总质量,又称牵引质量,吨(t)。

列车的单位阻力为

$$w = \frac{W}{(m_1 + m_2)g} = \frac{W' + W''}{(m_1 + m_2)g} \quad (\text{N/kN}) \quad (1.35)$$

1.2.1 基本阻力

引起基本阻力的因素很多,其中最主要的因素是机车车辆部件和机车车辆表面与空气的摩擦以及车轮与钢轨间的相互摩擦和冲击。归纳起来可分为以下五类。

1. 轴颈与轴承之间的摩擦

列车运行时,机车车辆所有轮对的轴颈与轴承之间都将产生摩擦阻力,阻止轮对的转动。这部分阻力与轴荷重、摩擦系数和轮对尺寸有关。轴荷重随机车车辆的质量而定。其中货车的质量变化

大, 因其载重不同, 有空车、重车之分, 故对阻力有不同的影响。摩擦系数有较大的变化范围, 它的值受到轴承类型、运行速度、轴颈表面承受的单位压力和润滑油等的影响。

2. 车轮与轨面间的滚动摩擦

车轮压在轨面上, 轮轨形成椭圆形接触面。当车轮滚动时, 轨面因挤压而变形, 引起附加阻力, 即为滚动摩擦阻力。

滚动摩擦阻力受轴重、轮轨材料的硬度、线路质量、车轮半径、运行速度等的影响, 其值一般较小。

3. 车轮与钢轨间的滑动摩擦

车轮的圆锥形踏面、车轮直径的差异以及某些轮对组装不正确, 都将使得车轮在滚动的同时存在纵向和横向的滑动, 产生滑动摩擦阻力。

4. 冲击和振动

列车运行时, 由于钢轨接缝、轨道不平直以及轮轨擦伤等原因, 引起轮轨间的冲击和机车车辆振动的加剧。同时, 机车车辆间也存在着纵向和横向的冲击和振动。所有这些都将随运行速度增高而加大。

采用长钢轨, 保护车轮踏面及做好线路养护工作, 都是减少这部分阻力的有效措施。

5. 空气阻力

列车运行时, 由于与周围空气发生相对运动。列车前面的空气被压缩, 尾部的空气稀薄产生涡流, 形成前后两端的压力差, 这部分阻力称为压差阻力。同时, 列车整个外部表面与空气相摩擦, 产生摩擦阻力。此外因机车、车辆突出部分及转向架等在运行时, 扰动空气, 产生扰动阻力。这些阻碍列车运行的阻力, 称为空气阻力。列车的空气阻力与列车重量无关, 只决定于列车与空气的相对速度、列车外形的尺寸及外表的光滑程度。空气阻力与空气相对速度的平方成正比。因此高速列车的空气阻力成为基本阻力的主要部分。

上述引起列车基本阻力的五种因素, 随着列车速度的高低而有不同的影响。低速时, 轴颈与轴承间的摩擦起主要作用, 速度提高后, 轮轨间滑动摩擦、冲击和振动以及空气阻力的影响逐渐增大。高速时, 列车基本阻力则以空气阻力为主。

产生列车基本阻力的原因较多, 影响因素复杂。因此列车的基本阻力是根据多次试验所得资料, 经过分析研究后确定。在《列车牵引计算规程》中, 规定了各型机车车辆单位基本阻力的计算公式。

(1) 电力机车

① SS₁、SS₃及SS₄型

$$w'_0 = 2.25 + 0.0190v + 0.000320v^2 \quad (1.36)$$

② SS₇型

$$w'_0 = 1.40 + 0.0038v + 0.000348v^2 \quad (1.37)$$