

图 1.3 牵引力的产生过程

$O_1$ —电机与主动齿轮的轴心； $O_2$ —车轮与从动齿轮的轴心； $d_k$ —车轮滚动圆直径（mm）

### 三、牵引力的传递

轻轨列车纵向牵引力的传递路径是：车轮→车轴→轴承→轴箱→定位销、套→构架侧梁→牵引拉杆→摇枕→下心盘→上心盘→主车架→车体。

地铁列车纵向牵引力的传递路径是：牵引电机→联轴节→齿轮箱→轮对→轴箱→一系弹簧→构架→牵引拉杆→中心销座→中心销→车体。

## 第三节 黏着限制、动轮空转及改善方法

### 一、黏着对牵引力的限制

调节牵引电动机转矩，改变切向力  $F_k$  的值以得到不同的轮周牵引力的前提条件是不破坏黏着。也就是说，动车所能实现的最大牵引力受黏着的限制，即在任何时候、任何速度下，动车真正能够实现的牵引力不能超过轮轨间的黏着力。

由黏着条件决定的最大黏着力，也就是动轮不空转所能实现的最大牵引力，称为黏着牵引力，用  $F_\mu$  表示：

$$F_\mu \leq \mu(\sum m_m \cdot g) \quad (\text{kN})$$

式中  $\mu$  —— 黏着系数；

$\sum m_m$  —— 全部动轮的黏着质量 ( t )；

$g$  —— 重力加速度 ( 取  $9.81 \text{ m/s}^2$  , 下同 )。

如果各动轴驱动转矩归算到轮缘的作用力之和超出上式的限制时，黏着条件相对最差的动轮就会产生空转，动车的牵引力立即下降。

综上所述，动车牵引力最大值在任何时候都不得超过动轮与钢轨间黏着力最大值的总和，这一原理称为“黏着定律”。动车牵引力的最大值可用下式表示：

$$F_{\max} = \left( \sum m_m \cdot g \right) \cdot \mu_{\max} \quad (\text{kN}) \quad (1.5)$$

式中  $F_{\max}$  —— 动轮最大轮周牵引力 ( kN )；

$\mu_{\max}$  —— 最大物理黏着系数。

## 二、黏着系数

在第一节所谈的物理黏着系数是一个由多因素决定的变量，当动车黏着质量确定后，黏着系数的变化就是决定黏着牵引力大小的因素。

动车在运行中，由于以下因素影响使实际黏着能力小于理论值——最大静摩擦力。

### (一) 动轮踏面与钢轨表面状态

干燥清洁的动轮踏面与钢轨表面黏着系数高，冰、霜、雪等天气的冷凝作用或小雨使轨面轻微潮湿时轨面黏着系数低。大雨冲刷、雨后生成薄锈使黏着系数增大，油垢使黏着系数减小。

## (二) 线路质量

钢轨越软或道砟的下沉量越大，黏着系数越小。钢轨不平或直线地段两侧轨顶不在同一水平，动轮所处位置的轨面状态不同，都会使黏着系数减小。

## (三) 车辆运行速度和状态

车辆运行速度增高，加剧了动轮对钢轨的纵向和横向滑动及车辆振动，使黏着系数减小。特别是在轮轨表面被水污染的情况下，黏着系数随速度增加而急剧下降。

车辆运行中由各种因素导致轴重转移，也会影响黏着系数。如车辆过弯道时，会出现车辆车轮一侧增载，另一侧减载，造成黏着系数大幅降低；曲线半径越小，黏着系数降低越多。

## (四) 动车有关部件的状态

(1) 各动轴上牵引电动机的特性不完全相同，在同一运行速度下产生牵引力大的轮对将首先发生空转。

(2) 各个动轮的直径不同，直径小的动轮发出的牵引力大，容易首先发生空转。

(3) 各个动轮的动负荷不同，运行中动负荷轻的动轮将首先空转。

空转必然导致动车的黏着系数减小。由于以上原因，黏着系数具有随机性，变化范围大，影响因素多，所以很难准确计算。一般都是通过大量试验，将试验结果用统计方法整理成经验公式作为计算的依据。根据该经验公式得出的黏着系数就是计算黏着系数，用 $\mu_j$ 表示。计算黏着系数可概括为：动车在运用条件下，能不空转而得到的黏着牵引力与黏着质量之比。

目前，地铁列车轮轨间的计算黏着系数，参照国产电力机车计算黏着系数的经验公式。

当 $v=0\sim 50\text{ km/h}$ ，曲线半径 $R>600\text{ m}$ 时：

$$\mu_j = 0.24 + \frac{12}{100 + 8v} \quad (1.6)$$

当曲线半径 $R<600\text{ m}$ 时，计算黏着系数有所下降：

$$\mu_r = \mu_j(0.67 + 0.00055R) \quad (1.7)$$

式中  $\mu_r$ —— 曲线上的计算黏着系数；

$v$ —— 运行速度 ( km/h )。

按计算黏着系数  $\mu_j$  计算的黏着牵引力，称为动车计算黏着牵引力，即

$$F_{\mu} = \left( \sum m_m \cdot g \right) \cdot \mu_j \quad (\text{kN}) \quad (1.8)$$

【例 1.1】某地铁采用动力分散型电动车组，每列列车采用 6 节车辆编组，编组形式为 A-B-C-C-B-A，其中 B、C 为动车，平均车辆质量（载客后）为 60 t，试计算该列车速度为 40 km/h 时的黏着牵引力。

解：（1）计算  $\sum m_m$ ：

$$\sum m_m = 60 \times 4 = 240 \quad (\text{t})$$

（2）计算黏着系数  $\mu_j$ ：

$$\mu_j = 0.24 + \frac{12}{100 + 8 \times 40} = 0.269$$

（3）计算黏着牵引力：

$$F_{\mu} = \left( \sum m_m \cdot g \right) \cdot \mu_j = 240 \times 9.81 \times 0.269 = 633 \quad (\text{kN})$$

答：该列车速度为 40 km/h 时的黏着牵引力是 633 kN。

### 三、动轮空转与改善黏着的方法

#### （一）空转的产生和危害

若由于各种原因，使得轮轨间的黏着系数下降，黏着力减小，当动轮对的牵引力大于轮轨间的最大黏着力时，轮轨接触点的受力则不再平衡（参见图 1.1），车轮开始沿钢轨向后滑动，在强大力矩作用下，车轮飞快转动，而轮轨间的纵向水平作用力变成了滑动摩擦力，其值比最大静摩擦力小得多，因而车辆运行速度并不高，在铁路术语中，把这种状态称为“空转”。

空转的危害性很大。空转发生时，轮对转速迅速上升，如果任其发展，往往可能在数秒或略长时间内超出车辆构造速度，这样不仅使动车牵引力下降，而且还会使钢轨和车轮遭到剧烈磨损。如果列车在起动时发生空转，列车没有起动，而司机又没有及时采取措施减小驱动力矩，轻则不能充分发挥动车的牵引能力，造成列车晚点，重则可能造成钢轨和动轮严重磨损的事故，降低了列车的使用寿命，因此必须对空转加以保护。

## (二) 改善黏着的方法

轮轨之间的黏着力是轮轨相互作用并产生动车牵引力的根源。随着牵引力的发展、动车功率的加大、载客量的增加，轮轨间的极限黏着力已经限制了动车牵引力的进一步提高，因此，提高轮轨间的黏着力，防止动轮空转，就成为一个重要的课题。目前，改善黏着的方法主要有：

(1) 提高轮轨间的黏着系数，将动车的机械能更有效地转化为牵引力。例如，修正轮轨表面接触条件，改善轮轨表面清洁状态。

(2) 在设计列车时，应使其具有较高的黏着质量利用率，并改善轨道车辆的悬挂系统，以减轻因轮对减载带来的不利影响。例如：① 采用机械特性硬的牵引电动机。机械特性硬的牵引电动机，负载大幅度变化时转速变化很小，也就是说，如果电机转速略有上升，就会使转矩大幅度下降，因而具有良好的防空转性能。如采用鼠笼式交流牵引电动机的动车不会产生持续空转。② 机械走行部分采用低位牵引，以及采用合适的悬挂系统等。

(3) 司机要正确地操纵车辆，在手动驾驶时，应力求起动平稳，平滑调节牵引力；有空转预兆时，提前采取措施，适当减小牵引力，使轮轨间保持较高的黏着系数。

### (三) 黏着控制系统

现代列车上多装有防空转检测保护装置，使动车在空转刚刚发生时，就能检测出来，并能自动采取措施消除空转，以保证列车正常运行。

#### 1. 黏着控制的必要性

在设计轨道交通车辆时，充分考虑了轮轨之间黏着的利用，但是没有黏着控制系统的轨道车辆只能靠其自然特性运行，难以将黏着运用到极限，即使短时达到高的牵引力，也难以维持，因为轮对空转随时可能发生，因此只能远离黏着极限使用。同样，在车辆制动时，若无防滑行保护，一旦制动力大于轮轨黏着极限，就会出现滑行，将导致轮对擦伤、制动距离增加。

因此，在现代车辆的控制中，一般都设有黏着控制系统——防空转/滑行保护系统。

#### 2. 校正型黏着控制系统

目前，国内外常见的黏着控制系统主要有校正型和蠕滑率控制型两大类。城市轨道交通车辆要求动车具有良好的防空转和防滑行性能，因此大多采用校正型的控制系统。

当轨道交通车辆产生空转时，会有如下情况发生：①空转轮对转速不正常地大幅度上升（较大的  $dn/dt$ ）；②空转牵引电动机电流不正常地大幅度下降（较大的  $di/dt$ ）；③串联电路中一台电动机的端电压迅速上升，而另一台迅速下降（较大的  $du/dt$ ）；④轮对空转前有某种一定频率的扭振。

控制系统是通过检测装置测得上述空转信号的。当动车牵引力超过黏着值，空转或空转趋势达到一定程度时，控制系统快速并深度削减动轮驱动转矩，使空转得到强烈的抑制；进入再黏着恢复区后，又迅速恢复牵引力；当回升到空转前转矩的一定百分比时，再以缓慢速率增长，以便寻找一个黏着极限点。采用这种短时超越黏着的最大值，又不让空转发展的简

单办法，可使轮轨经常运用在高黏着区，而使每次校正削减造成的牵引力损失都减到最小。

## 第四节 牵引特性

### 一、牵引特性

当动车在一定的功率下运行时，随着运行速度的变化，其轮周牵引力也作相应的变化，即  $F = f(v)$ 。这种牵引力随速度变化而变化的规律，被称为动车的牵引特性。

### 二、牵引特性曲线

动车牵引力可以通过计算和实测得出，将动车轮周牵引力与速度的关系曲线绘在一张图上，即构成动车轮周牵引力曲线。牵引特性曲线不仅可以用来查取各速度的牵引力；还可以用来判定和比较不同类型动车的牵引性能。不同车辆生产厂家给出的动车的牵引特性曲线不同，有的以单电机特性曲线方式给出，有的以牵引单元的特性曲线方式给出。图 1.4 所示为广州地铁 5 号线使用的动车中单电机牵引特性曲线。

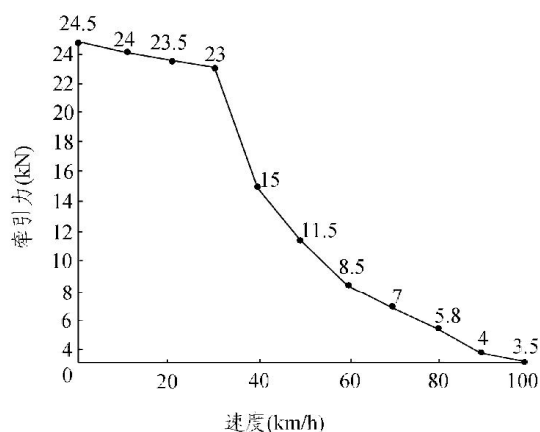


图 1.4 广州地铁 5 号线使用的动车单电机牵引特性曲线

从城市轨道交通运输的要求和特点来看，为了提高线路通过能力，列车应能在保证行车安全的前提下，以尽可能高的速度（不超过最大限制速度）运行；而在起动或低速时，又能很快加速。因此，动车在以其最低持续速度与最高速度之间的任何一种速度运行时，都要求它的功率是恒定不变或是接近恒定的，只有这样，才能充分地发挥动车牵引力。

### 复习思考题

1. 城市轨道交通车辆的运用特点有哪些？
2. 何谓黏着？何谓蠕滑？
3. 什么叫牵引力？如何分类？
4. 何谓轮周牵引力？何谓车钩牵引力？
5. 牵引力的产生需要具备哪两个条件？
6. 什么叫空转？有什么危害？
7. 改善轮轨间黏着条件的方法有哪些？
8. 何谓牵引特性？牵引特性曲线有何意义？