

第一章 牵引理论基础

第一节 粘着、牵引与制动

一、动轮与钢轨间的粘着

目前 绝大多数城市轨道交通车辆属于钢轮钢轨式 运行的任何一种工况，都依赖于车轮和钢轨的相互作用力。

在钢轮钢轨式城市轨道交通车辆中，牵引动力由牵引电动机通过传动机构 传递给动车的动力轮对(动轮)由车轮和钢轨的相互作用，产生使车辆运动的反作用力。根据物理学中关于摩擦的概念，轮轨之间的切向作用力就是静摩擦力。最大静摩擦力是钢轨对车轮的反作用力的法向分力与静摩擦系数的乘积。但实际上，动轮与钢轨间切向作用力的最大值比物理学上的最大静摩擦力要小一些，情况也更复杂一些。在分析轨道车辆的轮轨相互作用时 通常引入两个十分重要的概念：“粘着”和“蠕滑”。

(一) 粘着

图 1—1 为动车以速度 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)为了更清楚地表示，图中将接触的动轮与钢轨稍稍分开画出。

P_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

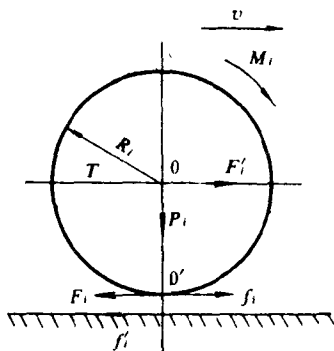


图 1—1 动轮对受力分析

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 P_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，并通过 O' 点作用在钢轨上。 f_i' 表示车轮作用在钢轨上的力，其值 $f_i' = F_i$ 。由于轮轨接触处存在着摩擦，车轮上 O' 点向左运动的趋势将引起向右的静摩擦力 f_i 即钢轨对车轮的反作用力 其值 $f_i = f_i'$ 。 f_i 称为轮周牵引力。因此 车轮上的 O' 点受到两个相反方向的力 F_i 和 f_i 的作用 而且

$$f_i = F_i \quad (1-1)$$

所以 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，动轮对作纯滚动运动。

由于正压力而保持动轮与钢轨接触处相对静止的现象称为“粘着”。粘着状态下的静摩擦力 f_i 又称为粘着力。

轮轨间的粘着与静力学中的静摩擦的物理性质十分相似。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。此后切向力 F_i 如再继续增大 f_i 反而迅速减小。试验证明，粘着力 f_i 最大值 $f_{i\max}$ 与动轮对的正压力 P_i 成正比 其比例常数称为粘着系数 用 μ 表示。即

$$f_{i\max} = \mu P_i \quad (1-2)$$

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时，若继续加大驱动转矩，一旦切向力 F_i 大于最大粘着力，动轮上的 O' 将向左移动，轮轨间出现相对滑动，粘着状态被破坏。动轮与钢轨的相对运动由纯滚动变为既有滚动，也有滑动。此时钢轨对动轮的反作用力 f_i 由静摩擦力变为滑动摩擦力，其值迅速减小；并使动轮的转速上升。这种因驱动转矩过大，破坏粘着关系，使轮轨间出现相对滑动的现象 称为“空转”。动轮出现空转时 轮轨间只能依靠滑

动摩擦力传递切向力 传递切向力的能力大大削弱 同时造成动轮踏面和轨面的擦伤。因此，牵引运行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。加大每轴的正压力 即轴重 可以提高每轴牵引力 但轴重受到钢轨、路基、桥梁等限制。动力分散型的城市轨道交通车辆 动轴数较多 很容易达到整列车所需的牵引力 因而轴重较小 这对保护轮轨的正常作用是有利的。

(二) 蠕滑

分析牵引工况轮轨接触处的弹性变形 (图 1—2) 可以进一步深化对粘着的认识。

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_t 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“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 车轮上原来被压缩的金属陆续放松 并被拉伸 而钢轨上原来被拉伸的金属陆续被压缩，因而在接触面的后部出现滑动。

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。这两个区域的大小随切向力的变化而变化。当切向力增大时，滑动区面积增大，滚动区面积减小。

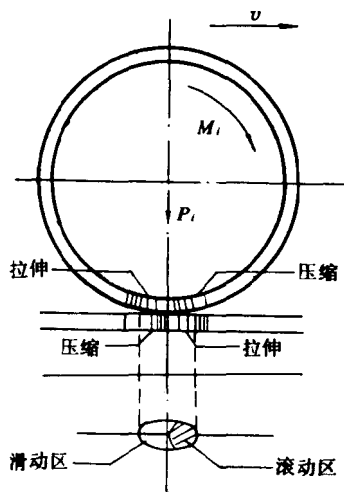


图 1—2 牵引工况轮轨接触处的弹性变形

当切向力增大超过一定程度时 滚动区面积为零 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，牵引时动轮的滚动圆周速度将比其前进速度高。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。

$$\sigma = \frac{\omega R_i - v}{v} \quad (1-3)$$

式中 v ——动轮的前进速度；

ω ——动轮转动的角速度。

轮轨间由于摩擦产生的切向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。当切向力达到极限时 由于蠕滑的积累波及整个接触面 发展为真滑动 积累的能量使车轮本身加速，这时驱动机构内的弹性应力被解除。由于车轮的惯性和驱动机构的弹性，在轮轨间出现滑动——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。

二、牵引力的形成及限制

（一）牵引力的形成

由图 1—1 可见 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 动轮上的 O' 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 车辆产生平移运动。

从车辆整体来看，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 是动轮受到的唯一水平外力。由于 f_i 的存在 车辆才有可能产

生平移运动。故这个外力称为动轮的轮周牵引力。

动车各动轮对的轮周牵引力，通过转向架、车体传递到车钩，牵引拖车，使列车前进。也就是说，调节驱动转矩可以控制列车的牵引工况。

（二 粘着对牵引力的限制

调节牵引电动机转矩，改变切向力 F_t 的值以得到不同的轮周牵引力的前提条件是不破坏粘着；也就是说，动车所能实现的最大牵引力受粘着的限制。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，称为粘着牵引力，用 F_μ 表示。

$$F_\mu = \mu_j P_\mu \quad (1-4)$$

式中 μ_j ——计算粘着系数；

P_μ ——各动轮正压力之和，也称为粘着重量。

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，粘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。

三、粘着系数与改善粘着的方法

（一 影响粘着系数的主要因素

1. 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粘着系数高 冰、霜、雪等天气的冷凝作用或小雨使轨面轻微潮湿时轨面粘着系数低。大雨冲刷、雨后生成薄锈使粘着系数增大 油垢使粘着系数减小。在钢轨上撒砂则能较大地提高粘着系数。

不同轨道的粘着系数不同 需要经多次实验后计算其平均值。图 1—3 是日本 JR、JNR、营团等城市轨道及日本新干线干燥与潮湿时的粘着特性。

2. 线路质量

钢轨愈软或道碴的下沉量愈大 粘着系数愈小 钢轨不平或直

线地段两侧钢轨顶不在同一水平 动轮所处位置的轨面状态不同，都会使粘着系数减小。

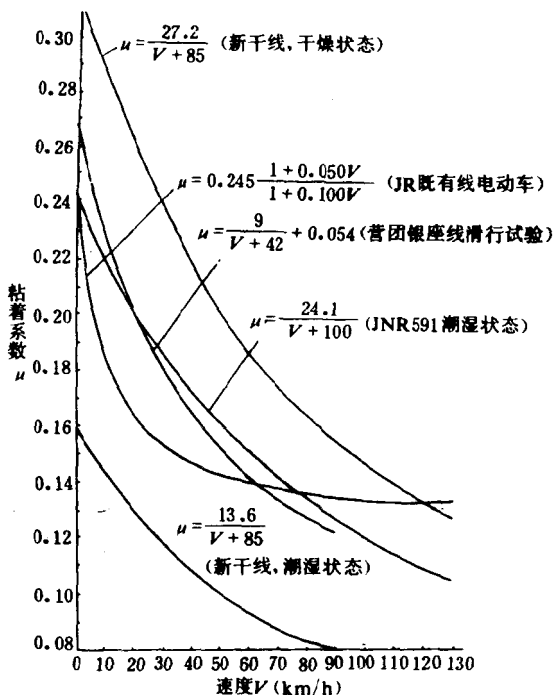


图 1—3 粘着特性曲线

3. 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 使粘着系数减小。特别是轮轨表面被水污染情况下 粘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，也影响着粘着系数。如车辆过弯道时 造成车辆车轮一侧增载 另一侧减载 造成粘着系数大幅降低 曲线半径愈小 粘着系数降低愈多。

牵引与制动工况对粘着系数也有影响，牵引时的粘着系数比制动时要大一些。

4. 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粘着系数减小。

(二 改善粘着的方法

改善粘着的方法有两大类：一是修正轮轨表面接触条件 改善轮轨表面不清洁状态；二是设法改善轨道车辆的悬挂系统，以减轻轮对减载带来的不利影响。通常采用如下改善粘着的措施：从车辆往钢轨上撒干砂，用机械或化学等方法清洗钢轨、打磨钢轨，改进闸瓦材料如用增粘闸瓦，改善车辆悬挂减小轴重转移。

四、制动力的形成

为了降低列车运行速度或停车，利用制动装置产生与列车运行方向相反的外力，称为制动力。

(一 制动方法

制动方法可分为三类：

1. 摩擦制动：包括闸瓦制动和盘式制动

闸瓦制动是将制动缸的力通过一套制动杠杆传动系统传给闸瓦，并通过闸瓦压在轮对的踏面上产生机械制动力。这种制动方式会引起轮对和闸瓦磨损，需要经常更换闸瓦。

盘式制动是由数字式电控制动系统或电子模拟式无级制动系统控制压缩空气，对盘式制动器实施制动或缓解。

2. 电气制动：包括电阻制动和再生制动

利用电机的可逆原理，可以在制动工况时把牵引电动机变为发电机，将列车的动能变为电能。这时，牵引电动机轴上的反向转矩，作用在动轮上形成电制动力，称为电气制动。采用这种制动可以提高列车运行速度，降低轨道车辆轮对及闸瓦的磨损。

如果利用电阻使电气制动时牵引电动机所产生的电能转化为热能散掉，称为电阻制动或能耗制动。如果将电能重新反馈回电网中去加以利用 就称为再生制动或反馈制动。

摩擦制动和电气制动产生的制动力 同牵引力一样 都是通过轮轨粘着产生的。

3. 电磁制动 包括磁轨制动和涡流制动

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，通过磨损板与轨面摩擦产生制动力。涡流制动则将电磁铁落至距轨面 7~10 mm处 电磁铁与钢轨间的相对运动引起电涡流作用形成制动力。电磁制动的最大优点是所产生的制动力不受轮轨间的粘着条件限制。

(二) 通过轮轨粘着产生制动力

摩擦制动和电气制动都是通过轮轨粘着产生制动力的。下面以闸瓦制动为例 说明通过轮轨粘着产生制动力的过程。

图 1—4 是一个轮对利用闸瓦制动产生制动力的示意图。

设一个轮对上有两块闸瓦，在忽略其他各种摩擦阻力的情况下 轮对 在平、直道上滚动前行。

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转动方向相反的滑动摩擦力 $2K\Psi_K$ ； Ψ_K 为动轮与闸瓦间的滑动摩擦系数。对于列车来说 此摩擦力是内力 不能使列车减速，可是它通过轮轨间的粘着，引起与列车运动方向相反的外力，实现列车的减速。

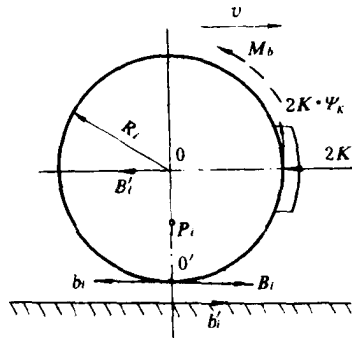


图 1—4 闸瓦制动力形成

摩擦力 $2K\Psi_K$ 对车轮的作用效果，相当于制动转矩 M_b 。

$$M_b = 2K\Psi_K R_i \quad (1-5)$$

应用类似牵引力形成的分析方法 转矩 M_b 可以用轴心和轮

轨接触处的力偶 (B_i, B_i') 代替。力偶的力臂为车轮 R_i 作用力 $B_i = B_i' = M_b / R_i = 2K\Psi_K$ 。轮轨接触处因轮对的正压力 P_i 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 $b_i, b_i = B_i = 2K\Psi_K$ 。 b_i 作用在车轮踏面的 O' , 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

$$b_i \leq P_i \mu_b \quad (1-6)$$

式中 P_i ——动车或拖车轮对的轴重;

μ_b ——制动时轮轨间的粘着系数。

整个列车总的闸瓦制动力为所有轮对闸瓦制动力之和, 即

$$B = \sum b_i \quad (1-7)$$

制动力的大小可以采用加减闸瓦压力来调节, 但不得大于粘着条件所允许的最大值。否则车轮被闸瓦“抱死”, 车轮与钢轨间产生相对滑动, 车轮的制动力变为滑动摩擦力, 数值立即减小, 这种现象称为“滑行”。滑行时制动力大为降低, 制动距离增加, 还会擦伤车轮与钢轨的接触面, 因此应尽量避免。

电气制动与摩擦制动的不同只是制动转矩由电机产生, 而制动力都是通过轮轨粘着产生的, 同样应避免滑行。

第二节 空转与滑行、粘着的控制

一、空转与滑行的产生与防止

(一) 空转与滑行的产生

当动轮对的牵引力大于最大粘着力时, 轮对就发生空转。空转时轮对的转速迅速上升, 如果任其扩展往往可能在数秒或略长的时间内超出构造速度。这样不仅使动车的牵引力下降, 而且由于高速空转使轮对的踏面严重擦伤, 若带有轮箍结构形式的轮对, 那么会导致轮箍因过热而松动脱落, 同时牵引电动机转子绕组也可能因离心力过大而飞散“扫膛”引起重大事故, 因此必须对空转

进行保护。

车辆在制动时 当制动力过大 以致于破坏了粘着 使轮对“抱死” 结果造成滑行 增加了制动距离 还会擦伤轮对的踏面和轨面，因此也必须采取措施对滑行加以保护。

(二) 防空转设计

1. 主电路防空转设计

(1) 牵引电动机全并联结构

两台串励牵引电动机串联连接时，在恒电压下如果一台电动机空转 由于串联电路中两台电机励磁电流相等 结果使空转电动机的端电压升高，空转的速度进一步加大。但在电动机并联连接的电路里就不会发生这种电压转移的现象，从而加强了防空转性能。

(2) 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。例如，鼠笼式牵引电动机的动车不会产生持续空转。

2. 传动系统防空转设计

(1) 采用单电机转向架传动系统。

(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措施。

二、粘着控制

(一) 粘着控制的必要性

轨道交通车辆在设计时 充分考虑了轮轨之间的粘着利用 但是没有粘着控制系统的轨道车辆动车只能靠其自然特性运行，难以运用到粘着极限 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 因此只能远离粘着极限使用。同样 在车辆制动时 若无防滑行保护，一旦制动力大于轮轨粘着极限 就会出现滑行 将导致轮对擦伤 制动距离增加。

直流传动系统大多采用串励直流牵引电动机，机械特性为很软的双曲线，当电机转速上升时，转矩变化不很大，所以不利于空转的自恢复，一旦空转发生，要依靠粘着控制系统造成短时的硬特性，适时恢复粘着，以提高动车的粘着利用。

从机械特性上讲，采用交流传动的轨道交通车辆并非自然具有高粘着性能。虽然频率给定的交流电机相当于电压给定的直流他励电动机一样，有硬的机械特性，一旦轮对空转就相当于空载，电机立即自动卸载，从而使轮对飞转不起来，但只靠这种自然硬特性并不能提高粘着性能。所有的交流动车都是依靠粘着控制系统来保证粘着特性的。

因此，在车辆的控制系统中一般都设置粘着控制系统——防空转与防滑行保护系统，使轮轨粘着运用到接近最大值而不超过，或稍有超过立即拉回来，从而使车辆的平均粘着利用率提高，也就是提高了平均牵引力。

（二）粘着控制分类

1. 按控制类型分类

目前，国内外常见的粘着控制系统主要是校正型和蠕滑率控制型两大类。

（1）校正型粘着控制系统

当轨道交通车辆产生空转时会产生如下信号：

空转轮对转速不正常地大幅度上升（较大的 dn/dt ）；

空转牵引电动机电流不正常地大幅度下降（较大的 di/dt ）；

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 ）；

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。当动轮牵引力一旦超过粘着值，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，进入再粘着恢复区后，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，以便寻找下一个粘着极限点。采用这种短时超越粘着最大值，又不让空转发展的简单办法，可使轮轨经常运用在高粘着区，而每次校正削减造成的牵引力损失都能减到最小。

(2) 蠕滑率控制型控制系统

利用安装在动车底部的分米波无线电雷达，经过一个较复杂的频谱分析的数据处理系统得到精度 1% 以内的动车平移速度；再将每个轮对的转速与之比较，得出蠕滑率值；并根据各电动机电流（相当于轮轨驱动力）测量出蠕滑特性梯度，判断是接近还是离开最大粘着值；通过快速但幅度较小的牵引力校正使轮对接近最大粘着值，又不超越到大空转的不稳定区，只有当轨面粘着突然大幅度降低时才深度减载一次。虽然系统较复杂，但平均粘着利用比校正型可提高 10%~20%。

城市轨道交通车辆主要要求动车具有良好的防空转和防滑行性能，大多采用校正型的控制系统（只要检测到空转（或滑行）及时减少牵引力或减少制动力）就可以满足。

2. 按被控制对象分类

按被控制对象分，粘着控制有集中控制和分散控制两大类。

(1) 集中控制：这种控制方式是一个粘着控制系统控制整辆动车。

(2) 分散控制：这种控制方式也叫单轴控制，即每一动轴单独控制。

当然也有一种介于集中控制与分散控制之间的控制方式，即每一个控制系统仅控制一台转向架上的几根轴。

从粘着控制角度看，牵引电机的分散控制比集中控制效果好得多。尤其是采用校正型系统时，因为需要不断自行寻找粘着最大值，当高粘着运用时必然要不断产生校正削减过程，造成牵引力波动。当某一轮对空转时，集中控制将引起全车牵引力波动，平均牵引力也不可能很高；对每一转向架单独控制，效果明显改善；单轴控制效果最好，牵引力波动小，平均粘着利用高，也不必从机械设计方面考虑轴重转移的影响；缺点是主控电路复杂，造价也随之

提高。

第三节 牵引参数的选择

一、城市轨道交通车辆的运行特点

与干线列车不同，城市轨道交通车辆的运行特点是站距短而旅行速度较高。

城市轨道交通线中，地铁和高架线路站距约为 0.8~1.8 km，市郊线路站距约为 1~3 km。由于站距短，需要频繁地启动和停靠，每站又需要 30 s 左右的停站时间，但其运行一般要求在最节约资源的条件下实现 35~40 km/h 的旅行速度，因而牵引参数的选择十分重要。

城市轨道交通车辆运行的速度-距离曲线如图 1-5 所示。图中 OC 牵引段中，若采用直流电动机牵引，OA、AB、BC 段分别对应于直流牵引电动机的调压控制、削弱磁场控制和自然特性控制方式；若采用交流异步电动机牵引，则 OA、AB、BC 段分别对应于交流异步牵引电动机的 v/f 恒定控制、恒功率控制和恒转差频率控制方式。图中 DE 制动段为恒减速运动，城市轨道交通车辆一般均采用再生制动与电阻制动相结合的电制动优先、空电联合制动方式，保证在制动系统允许的条件下得到尽可能大的制动减速度。

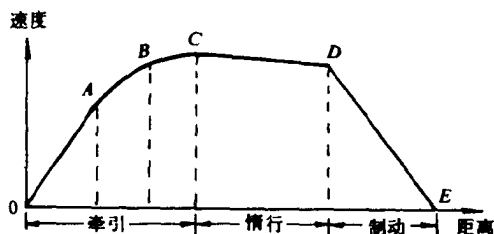


图 1-5 城市轨道交通车辆运行的速度-距离曲线

二、轴功率计算

城市轨道交通车辆的运行阻力包括基本阻力和附加阻力，其中，单位重量基本阻力主要由摩擦和冲击引起，一般与速度成二次曲线关系。沿用国外有关公式的速度-阻力系数曲线如图 1—6 所示，设计时应根据具体车型加以修正。图中，起动阻力是列车由静态到动态转变过程的阻力，与运行阻力规律完全不同。

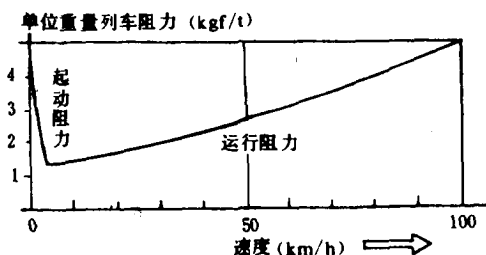


图 1—6 城市轨道交通车辆运行的速度-阻力系数曲线

城市轨道交通车辆运行的速度-阻力系数关系式如下：

$$r_R W = (1.65 + 0.0247V)m_M + (0.78 + 0.0028V)m_r + (0.028 + 0.0078(n-1))V^2 \quad (1-8)$$

式中 r_R ——阻力系数；
 W ——列车总重量；
 V ——列车速度；
 m_M ——编组中动车总重量；
 m_r ——编组中拖车总重量；
 n ——编组车辆总数。

城市轨道交通车辆的单位重量附加阻力主要取决于线路条件 例如坡道阻力、弯道阻力、隧道空气阻力等。

计算表明：城市轨道交通车辆的单位重量所需功率主要应满足图 1—5 中 A 点的要求。图 1—7 中比较了 6 种情况下单位重量所需功率。

坡道起动对起动加速度有直接影响 城市轨道交通线路的设

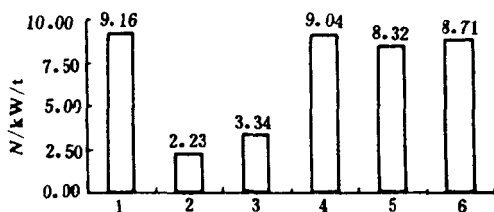


图 1—7 城市轨道交通车辆各种运行情况下单位重量所需功率比较

1—起动加速度为 0.9 m/s^2 、恒力矩—恒功转换点速度为 36 km/h 时的 A 点；

2—剩余加速度为 0.06 m/s^2 、最高运行速度为 90 km/h 惰行；

3—剩余加速度为 0.06 m/s^2 、最高运行速度为 120 km/h 惰行；

4—起动加速度为 0.3 m/s^2 、坡度为 60% 、运行速度为 36 km/h 作坡道运行；

5—坡度为 60% 、剩余加速度为 0.06 m/s^2 、保持运行速度为 45 km/h 作坡道运行；

6—坡度为 50% 、剩余加速度为 0.06 m/s^2 、保持运行速度为 55 km/h 作坡道运行。

计中 应尽量避免坡道起动 遵循车站较高、线路较低的原则 合理、充分地利用势能、动能的转换进行列车的起动和停止。

根据 A 点决定的单位重量所需功率 (N_A)、轨道交通车辆的车重 (M_z) 和动轴数 (D) 可以很容易得到轨道交通车辆的轴功率 (P_A):

$$P_A = N_A M_z / D \quad (1-9)$$

应当指出 这样得到的 P_A 对电动机来说是暂载功率, 除以过载系数 (K) 和传动效率 (η) 才是电动机的额定功率 (P_N)。即:

$$P_A = P_N K \eta \quad (1-10)$$

K 主要取决于电动机的允许温升, 一般为 $1.1 \sim 1.4$ 之间 牵

引负载小、启动过程短，则可取较大 K 值。例如，对于一小时暂载功率为 180 kW 、采用 H 级绝缘的交流变频牵引电动机，可取 $K = 1.2$ 。

城市轨道交通车辆一般均采用动力分散型动车组，通常条件下列车牵引对粘着的要求都可以满足；其动车与拖车的轴重略有不同，但最大不超过 16 t 。

三、启动加速度的选择

城市轨道交通车辆各项牵引参数中，启动加速度的选择至关重要，因为它对轴功率和旅行速度都有着直接的影响。为了保证所需要的旅行速度，城市轨道交通车辆的启动加速度比干线列车大得多，但取过大的启动加速度又会不必要地增大轴功率，引起一系列资源的浪费。目前世界各国的城市轨道交通车辆启动加速度为 $0.69 \sim 1.43\text{ m/s}^2$ 。适当地选择启动加速度，可以使城市轨道交通车辆以较小的轴功率得到符合需要的旅行速度。

(一) 启动加速度 a 与单位重量所需功率 N_A 的关系

图 1—8 给出了恒力矩-恒功转换点速度 V_1 分别为 30 km/h 、 36 km/h 、 40 km/h 时的 a 与 N_A 的关系。

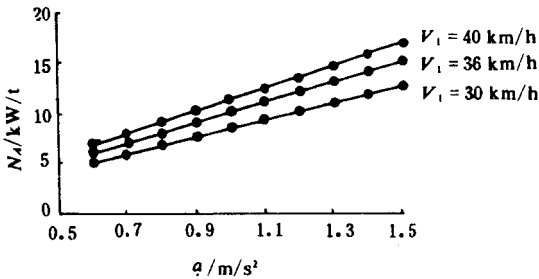


图 1—8 启动加速度 a 与单位重量所需功率 (N_A) 的关系

(二) 启动加速度 a 与开行时间 t_K 的关系

选择 a 和制动减速度 b 的实质，是为了充分利用轴功率控

制牵引段和惰行段的运行时间，从而在保证达到规定的旅行速度的同时 获得节能效果。

根据国内外的城市轨道交通车辆和高速列车的运行经验，只要防滑制动系统的性能足够高，只依靠粘着制动就可以实现 1.0 m/s^2 的常用制动减速度。

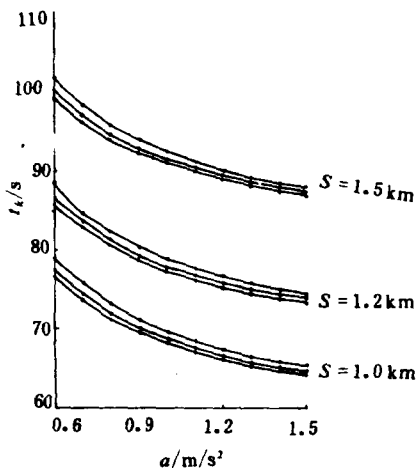


图 1—9 起动加速度(a)
与开行时间 t_k 的关系

图 1—9 给出了最高运行速度为 80 km/h 常用制动减速度为 1.0 m/s^2 ，恒力矩 恒功转换点 A 的速度分别为 30 km/h 、 36 km/h 、 40 km/h 站距 (S) 分别为 1.0 km 、 1.2 km 、 1.5 km 时的 a 与 t_k 的三组关系曲线。可以看出：对于各种不同的站距， $a > 0.9 \text{ m/s}^2$ 后 对缩短开行时间的作用都将越来越弱。取不同的最高运行速度进行计算，也可以看到 $a > 0.9 \text{ m/s}^2$ 后，对缩短开行时间的作用减弱这一现象。

(三 轴功率 (P_A) 与区间运行时间 (t) 的关系

t 是开行时间与停站时间之和。城市轨道交通一般车站的停站时间约为 30 s 图 1—10 给出了最高运行速度为 80 km/h 、站距为 1.2 km 恒力矩 - 恒功转换点速度为 36 km/h 时 轴重为 11 t 、动轴数为 50% 条件下的 P_A 与 t

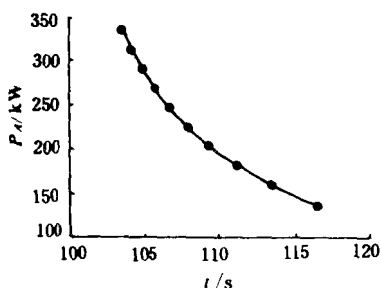


图 1—10 轴重为 11 t 、动轴数为 50% 时轴功率 (P_A)
与区间运行时间 (t) 的关系