

项目一 动车组制动系统的认识

【项目描述】

本项目是初学者对动车组制动系统的认识，实施地点安排在动车组列车虚拟仿真实训基地和动车组制动系统维护与检修实训基地。以动车组制动装置模型、实物和教学课件为学习载体，通过教学使学生初步了解车辆制动的一些基本概念，认识国产动车组的组成及各组成的作用。经过本项目学习后，学生应具备动车组制动的基本知识，为学生今后从事动车组运用、检修工作打下牢固基础。

【知识目标】

- (1) 掌握动车组制动系统的作用及分类；
- (2) 理解制动力的产生及影响因素；
- (3) 掌握动车组制动系统的组成及各组成部分的作用。

【能力目标】

- (1) 能够描述各型动车组制动系统的组成及其特点；
- (2) 能够正确填写动车组制动设备配置表。

任务一 认知车辆制动装置的功能、组成及分类

【任务描述】

在车辆制动演练场内，以主型客车、货车实物、动车组模型、多媒体教学课件为载体，认识车辆制动装置，分析制动的作用、轮轨关系以及制动力的形成，制作一个制动基本知识教学课件。

【背景知识】

一、制动基本概念及其在铁路运输中的意义

日常生活中，任何运输工具都离不开制动系统。小到自行车，大到火车，制动系统都起着保证运输安全的重要作用。对于铁路运输来说，列车的运行过程包括牵引、惰行和制动 3 种基本工况，而制动工况的顺利实施关键在于制动系统有效、可靠地工作。那么，什么是制

动系统？它包括哪些组成部分？制动力是如何形成的？制动对铁路运输有什么意义？

(一) 制动的基本概念

人为地使运动的物体减速（含防止其加速）、停车或使静止的物体保持不动，这种作用被称为制动作用。解除制动作用的过程称为缓解。

对于运动着的铁路列车，我们欲使其减速或停车，就要根据需要施加于列车一定大小的与运动方向相反的外力，以实现列车的减速或停车作用，即施行制动作用；列车在停车后起动，或列车运行途中实施制动后，加速前均要解除制动作用，即施行缓解作用。

制动系统是安装在列车上能产生制动和缓解作用的一套机械设备和控制系统的总称。

对既有的机车车辆来说，制动系统是通过司机操纵机车上的制动阀，使制动管内压缩空气以不同的速度增压、减压或保压，产生不同的作用。制动系统通常由空气制动机、基础制动装置、手制动机（动车组中称停放制动装置）三大部分组成。装于机车上能实现制动作用和缓解作用的装置称为机车制动装置，装于车辆上能实现制动作用和缓解作用的装置称为车辆制动装置。列车制动装置由机车制动装置与所牵引的所有的车辆制动装置组合而成。

空气制动机，即制动系统中以空气压力作为动力源产生制动原动力，用空气压力的变化速度进行操纵和控制的部分，通常包括从制动软管连接器至制动缸的一整套机构。

基础制动装置，即制动系统中用于传递、扩大制动原动力的一整套杆件连接装置，通常包括车体基础制动装置和转向架基础制动装置。

手制动机，即制动系统中以人力作为动力源产生制动原动力并由人力操纵和控制的部分。

空气制动机、基础制动装置、手制动机三者的关系如图 1-1-1 所示。

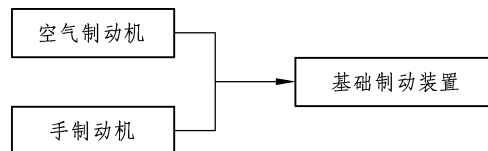


图 1-1-1 制动系统控制关系

对动车组来说，制动装置既有动车制动装置，又有拖车制动装置。制动系统由电制动系统和空气制动系统复合而成。空气制动系统包括供风系统、制动控制系统和基础制动装置三大部分。

制动距离，即制动时从司机操纵制动阀置于制动位起至列车停车时止，列车所走过的距离。制动距离越短，列车的安全系数就越大。我国《铁路技术管理规程》（简称《技规》）原来规定的列车紧急制动距离不超过 800 m，但随着列车速度的提高，制动距离的标准也相应延长。列车紧急制动距离按不同情况分别不超过：

- 旅客列车 120 km/h——800 m；
- 140 km/h——1 100 m；
- 160 km/h——1 400 m。
- 动车组 200 km/h——2 000 m；

300 km/h——3 800 m ;

350 km/h——6 500 m。

(二) 轮轨关系、制动力的形成及影响因素

由制动装置产生的与列车运行方向相反的外力称为制动力。它是人为产生的阻止列车运行的外力，比列车运行中所受到的风的阻力、曲线阻力、坡道阻力等各种自然阻力大得多，因此，在列车制动过程中，尽管运行阻力也起作用，但列车制动力起主要作用。在分析轨道车辆的轮轨关系时，通常必须引入两个十分重要的概念，即“黏着状态”和“蠕滑状态”。

以动车组上使用的盘形制动为例，分析制动力的形成及影响因素。

1. 黏 着

图 1-1-2 所示为某动车以一定的速度 v 在平直轨道上运行时，一个动车轮对的受力情况（我们暂且忽略它内部的各种摩擦阻力）。为了清楚地表示该图中的各种关系，我们把实际上互相接触的车轮与钢轨稍稍分开画出。

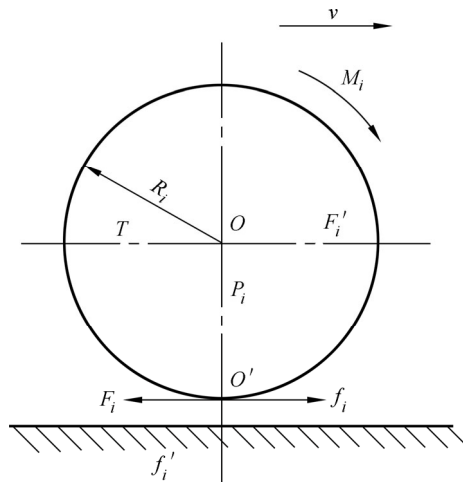


图 1-1-2 在直线上运行的轮对与钢轨之间的受力关系

在图 1-1-2 中， P_i 为某个动车轮对作用在钢轨上的正压力，又称为轮对的轴重。牵引电机作用在动轮对上的驱动旋转力矩 M_i 可以用一对力形成的力偶 F_i 和 F_i' 来代替，并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

$$F_i = F_i' = M_i / R_i$$

式中 R_i ——动车轮对半径。

在正压力 P_i 的作用下，车轮踏面与钢轨的接触部分紧紧压在一起。

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' 点向左运动的趋势时将引起向右的静摩擦力 f_i ，即钢轨对车轮的反作用力，且 $f_i = f_i'$ ，此力称为轮周牵引力。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 $F_i = f_i$ 。所以， O' 点保持相对静止，轮轨之间没有任何相对滑动，在力 F_i' 的作用下，车轮对做纯滚动运动。

我们把由于正压力的作用而保持的车轮与钢轨接触处相对静止的现象称为“黏着”。“黏着”状态下的静摩擦力称为“黏着力”。

轮轨间的“黏着”与物理学中静摩擦的物理性质十分相似。驱动旋转力矩 M_i 产生的切向力 F_i 增大时，黏着力 f_i 也随之增大，并且保持与 F_i 相等。但当切向力 F_i 增大到某个数值时，黏着力 f_i 也将达到最大值。此后如果切向力 F_i 再增大， f_i 反而会迅速减小。试验证明，黏着力 f_i 的最大值 f_{\max} 与动车轮对的正压力 P_i 成正比，其比例常数称为黏着系数，用 μ 表示，即

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

式 (1-1-1) 表明在轴重一定的条件下，轮轨间的最大黏着力由轮轨间黏着系数的大小决定，当轮轨间出现最大黏着力时，若继续加大驱动旋转力矩，一旦切向力大于最大黏着力，车轮上的 O' 点将向左移动，轮轨间将出现相对滑动，黏着状态就被破坏。这时，车轮与钢轨的相对运动就会由纯滚动变为滚中有滑的状态。此时，钢轨对车轮的反作用力 f_i 由静摩擦力变为滑动摩擦力，并且其值将会迅速减小，同时会使车轮的转速上升。这种由于驱动转矩过大而造成破坏轮轨黏着关系，使轮轨间出现相对滑动的现象我们称其为“空转”状态。当车轮出现空转时，轮轨间只能依靠滑动摩擦力传递切向力，因而传递切向力的能力将大大减小，并且会造成车轮踏面和钢轨轨面的磨损擦伤。因此，牵引运行过程中应尽量防止出现车轮的空转状态。黏着系数是由轮轨间的物理状态决定的。加大每个动车轮对作用在钢轨上的正压力，即增加轴重，也可以提高每个动车轮对的黏着力和牵引力。但是轴重也受到钢轨、路基和桥梁等各种条件的限制，不可能无限制地增加。动车组动轮对数量比一般铁路列车要多，驱动力和黏着力都较为分散，牵引力总量很容易达到，与铁路列车的动车轮对和牵引力都集中在机车头的情况相比，动车组利用黏着条件就相对好得多，因而对保护轮轨间的正常作用是很有利的。

2. 蠕 滑

传统理论认为：钢轮相对钢轨滚动时，接触面是一种干摩擦的黏着状态，除非制动力或牵引力大于黏着力时才会转入滑动摩擦状态。但是现代研究表明，由于车轮和钢轨都是弹性体，在车轮上正压力的作用下，滚动时轮轨接触处会不可避免地产生弹性变形，这种弹性变形使轮轨接触不是点或线的接触，而是形成椭圆形的面接触。车轮在钢轨上滚动时，接触面间会出现微量滑动，这种现象就称其为“蠕滑”状态。

“蠕滑”的产生是由于在车轮接触面前部产生压缩，后部产生拉伸，而在钢轨接触面前部产生拉伸，后部产生压缩。随着动车车轮的滚动，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。

如图 1-1-3 所示，切向力在接触面上形成两个性质不同的状态和区域：接触面的前部，轮轨间没有相对滑动，称为滚动区，图中是用阴影线表示的；接触面的后部，轮轨间有相对滑动，称为滑动区。这两个区域的大小是随切向力的变化而变化的。当切向力增大时，滑动区面积增大，滚动区面积将减小。当切向力超过某一极限值时，滚动区面积将变为零，只剩下滑动区，整个接触面间出现相对滑动，轮轨间的黏着被破坏，车轮在钢轨上开始明显打滑，即会出现车轮“空转”。

“蠕滑”是滚动体的正常滑动，车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，牵引时车轮的滚动圆周速度将比其轮心前进速度要大。这两种速度之间的差值称为“蠕滑速度”，并以一个无量纲比值——蠕滑率 σ 来表示蠕滑的大小，即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。当切向力达到一定的极限时，由于蠕滑的积累而波及整个接触面，轮轨状态也将由“蠕滑”发展成为真滑动，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—黏着—再滑动—再黏着的反复作用过程，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。

3. 制动力的形成

假设车轮与钢轨都是刚体，车轮在钢轨上做纯滚动。根据刚体平面运动学的分析，对于沿钢轨自由滚动的车轮，车轮和钢轨的接触点在它们接触的瞬间是没有相对运动的。如图 1-1-4 所示是一个车轮在钢轨表面的受力分析图， v 表示列车的前进方向和运行速度。制动时，闸片压紧制动盘，在制动盘上产生一个向下的摩擦力 $K \cdot \phi_k$ ，其中， K 是闸片作用在制动盘上的压力， ϕ_k 是闸片与制动盘之间的摩擦系数。对列车来说，此摩擦力是内力，它不能使列车运动状态发生变化，因此，它不是制动力，只是对车轮中心形成一个摩擦力矩。

由于轮轨接触面没有相对运动，在闸片摩擦力矩的作用下，轮轨接触点处产生一个车轮

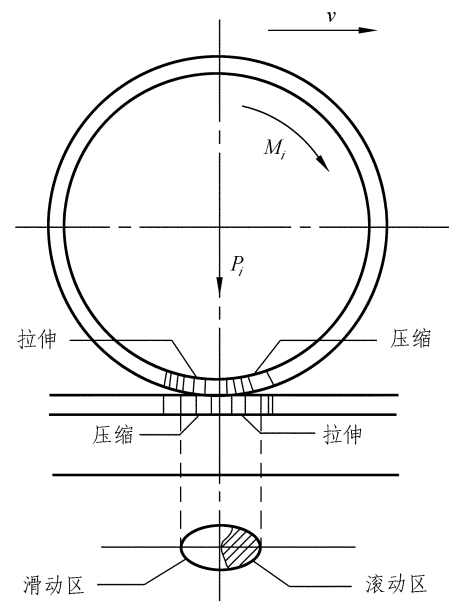


图 1-1-3 由切向力形成的滚动区和滑动区示意图

对钢轨的纵向水平作用力 B' ，方向向左，而钢轨则反作用于车轮一个大小相等、方向相反的作用力 B ，轮轨之间的纵向水平作用力 B 就是物理学上说的静摩擦力，其最大值——“最大静摩擦力”是一个与运动状态无关的常量，它等于钢轨对车轮的垂向支持力与静摩擦系数的乘积。对列车来说，钢轨对车轮的反作用力 B 才真正是制动装置引起的与列车运行方向相反的阻碍列车运行的外力，即制动力。

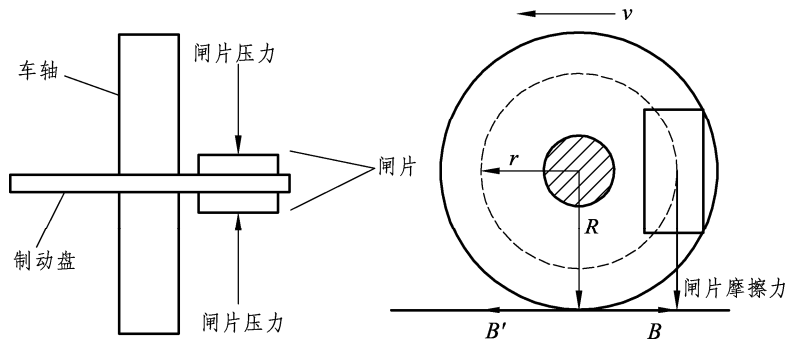


图 1-1-4 闸片制动力的形成示意图

以制动盘为研究对象，分析其受力情况，闸片摩擦力、制动力 B 与轮对角减速度 θ 的关系如下式：

$$\sum K \cdot \phi_k \cdot r - B \cdot R = I \cdot \theta \quad (1-1-2)$$

- 式中 K —— 每块闸片的压力，N；
 ϕ_k —— 闸片摩擦系数；
 B —— 由轨面反作用于车轮踏面的制动力，N；
 R —— 车轮滚动圆半径，m；
 r —— 每块闸片所处的制动盘平均摩擦半径，m；
 I —— 轮对的转动惯量， $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ；
 θ —— 轮对的角减速度， rad/s^2 。

式 (1-1-2) 中，轮对的转动惯量相比其他量要小得多，可忽略不计，则盘形制动的制动力可近似表示为

$$B \approx \sum K \cdot \phi_k \cdot \frac{r}{R} \quad (1-1-3)$$

从式 (1-1-3) 中可以看出，在车辆配置一定的情况下（即 r 、 R 一定），闸片和制动盘之间的摩擦系数 ϕ_k 直接影响着制动性能的好坏。影响摩擦系数的因素很多，制动盘和闸片材质对闸片摩擦系数的影响最为重要。除此之外，闸片摩擦系数还受压力、列车速度和制动初速度等因素的影响。试验研究结果表明：闸片压力越大，摩擦系数越小；列车速度或制动初速度越高，摩擦系数越小。另外，闸片摩擦系数还与制动盘摩擦面的洁净程度、闸片新旧等因素有关。目前，闸片摩擦系数的计算公式主要通过试验的方法获得。

4. 轮轨摩擦与黏着

车轮和钢轨在载荷作用下会有变形，轮轨间是椭圆面接触。如图 1-1-5 所示，由于闸片摩擦力矩的作用，轮周上位于轮轨接触部位左、右两侧的部分分别处于拉伸和压缩状态，而钢轨上位于轮轨接触部位左、右两侧的部分状态正好与车轮相反。随着车轮的滚动，轮轨接触部位的轮周会发生从拉伸到压缩的状态转变，而接触部位钢轨的状态转变情况则与之相反，因而轮轨之间必然存在相对滑动。其次，由于车轮踏面近似圆锥形，加之列车运行中不可避免地要发生冲击和各种振动，也会使得车轮在钢轨上滚动的同时必然伴随着微量的纵向和横向滑动。总之，车轮在钢轨上的运动不是纯粹的“静摩擦”状态，而是“静中有微动”或“滚中有滑”，轮轨间纵向水平作用力的最大值比物理上的“最大静摩擦力”要小得多。

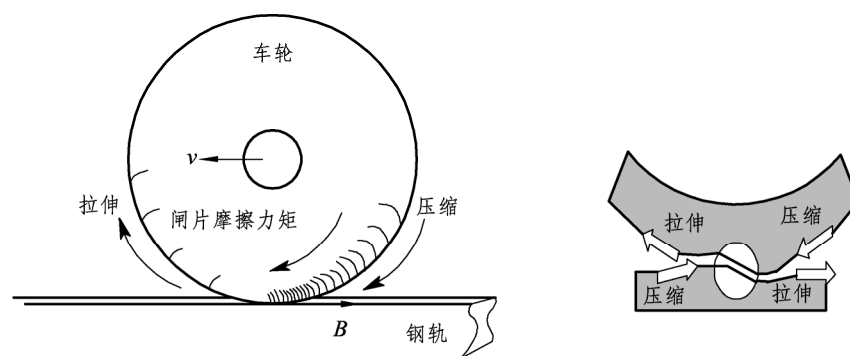


图 1-1-5 制动时轮轨表面的变形状态

因此，铁路牵引和制动理论在分析轮轨间的纵向力问题时，不用“静摩擦”这个名词，而用“黏着”来代替它。相应地，黏着状态下轮轨间纵向水平作用力的最大值就称为黏着力，而把黏着力与轮轨间垂向载荷的比值称为黏着系数。为便于应用，假定轮轨间的垂直载荷在运行中固定不变，即黏着力的变化完全是由于黏着系数的变化引起的。这样，黏着力与运动状态的关系被简化为黏着系数与运动状态的关系。

5. 黏着系数的影响因素

黏着系数的影响因素主要有两个：一个是轮轨接触面的表面状况，另一个是列车运行速度。

轮轨接触面的表面状况包括干湿情况、脏污程度以及是否有锈等。轮轨的湿度、脏污程度又与天气、环境污染状况和制动装置的形式（如有无踏面清扫装置）等因素有关。天气因素包括下雨与否、雨量大小和持续时间、有无霜雪等。轮轨干燥而清洁时黏着系数较大，轮轨潮湿，或有霜雪、油污时黏着系数明显减小。但如果连续大雨，钢轨被冲刷得很洁净，则钢轨虽然很湿，黏着系数也不会小。轨面生锈对黏着系数的影响是双方面的：薄薄的一层黄锈可使黏着系数增大，但锈层较厚，特别是有点湿润的棕色锈层，反而会使黏着系数明显减小。

列车运行速度对黏着系数的主要影响是，随着制动过程中列车速度的降低，冲击振动以及纵向和横向的少量滑移都逐渐减弱，因而黏着力和黏着系数也逐渐增大，其增大的程度与列车的动力性能、轨道的情况等有关。

另外，黏着系数还和轴重、轮径尺寸、轮对和钢轨材质等因素有关。由此可见，黏着系数的影响因素复杂多变，难以用理论方法确定。黏着系数的计算公式都是在大量试验的基础