

城市轨道交通系列丛书

城市轨道交通电力牵引

徐 安 主编

王日凡 主审



中国铁道出版社

《城市轨道交通系列丛书》

序

世界上轨道交通很早就作为公共交通在城市中出现。随着科学技术和城市化的发展,大运量的轨道交通在现代大城市中越来越起着重要的作用。经济发达国家城市的交通发展历史告诉我们,只有采用大客运量的地铁和轻轨交通系统,才是从根本上改善城市公共交通状况的有效途径。

我国发展大运量轨道交通的历史也并不短,40年前北京就开始了地铁建设。想建地铁的城市也不少,但一直因造价太贵而却步。至今一些百万人以上的大城市,仍然用传统的公共汽车和无轨电车来维持客运的做法,已越来越不能满足城市居民高频率出行的需要。因而目前很多大城市又在考虑和策划修建轨道交通项目。除北京外,上海和广州都已经在建造现代化的地铁系统。北京、上海、天津、广州四城市虽已有地铁线路在运营,但远远不能较为普遍地满足需要。由于我国城市轨道交通的应用技术和基础理论都还处于开拓阶段,项目实施的大多数情况是要引进技术和设备,国产化率低,成为工程造价昂贵的主要原因。因而提高我国城市轨道交通行业的技术力量,发挥自主建设能力,努力降低工程造价,已是健康发展大运量轨道交通的关键。

为此,我们组织了建设部和铁道部的有关专家,编写了这套《城市轨道交通系列丛书》,同时还与德国西门子股份公司交通技术集团进行合作,吸收了一些实用而先进的技术成果,分别按不同专业内容纳入这套丛书。

这套系列丛书以普及现代城市轨道交通基础理论、知识为目标,较为全面系统地阐述了城市轨道交通的发展历史和先进的技术成果,同时也论述了不同类型轨道交通的系统特征、通用技术的

适应范围、专业技术及其综合效应等。这套丛书可作为管理人员、专业技术人员和大专院校学生的基础理论知识读本,也可作为本行业专家学者在此基础上深化研究和促进技术发展的参考资料。

周千峰

1998 年

• 周千峰 中国科学院院士、工程院院士、建设部顾问、原建设部副部长

前 言

经历了马拉和蒸汽机车牵引年代之后,从1890年12月18日世界上第一条真正的电气化地下铁道线路诞生以来,城市轨道交通车辆几乎都已采用了电力牵引。

从牵引电气化、自动化角度看,虽然城市轨道交通车辆和干线铁道车辆都是由受流器接受来自接触网的电能,再在控制系统的指挥下,经主回路、牵引电机将电能转换为驱动列车所需机械能,并且在必要时使车辆实施制动;但为了满足城市公众对大容量快速交通的需求,主要在市内和市郊运行的城市轨道交通车辆,其运行条件和要求又与干线铁道有种种不同:一般都是动力分散型车组;为适应城市环境,需要在地下隧道、高架和地面轨道运行,站距短,线路曲线半径小,坡度大;客流量大而集中,乘客上下车频繁,高峰时可能严重超载;为了尽量缩短乘客的乘坐时间,要求有较高的运行速度,特别是较大的起动加速度和制动减速度;传动系统应效率高、能耗少,尽量减少发热,减轻自重;控制系统更可靠、精确,并有良好的适应能力;对乘坐舒适性和对城市环境无公害的要求也越来越高。这些特点都对城市轨道交通电力牵引系统提出了更高的标准。

城市轨道交通电力牵引系统荟萃了电力电子、计算机检测与控制、电机与电器制造等多学科的先进技术,正朝着智能化、模块化、轻量化、节能型、免维修方向发展。

本书从牵引理论基础、牵引电动机与运行、电力电子器件的原理与应用、斩波电路与逆变电路、控制与故障检测和车辆电气设备等诸方面论述了城市轨道交通电力牵引系统。虽然力求追踪飞速发展的城市轨道交通电力牵引技术,但错漏之处,希望得到国内外专家的热情指教。

多年来,王祖泽、连级三、邵丙衡、王曰凡、张鑫等等专家学者在铁道牵引电气化、自动化和城市轨道交通领域辛勤耕耘,本书多处引用了他们的研究成果,谨在此表示衷心的感谢。

本书得到了 SIEMENS、Adtranz、ALSTOM、三菱电机公司提供的资料,谨在此感谢他们的协助。

书中引用的公式、图表中个别计量单位沿用了原资料中的单位,谨请读者注意。

全书由徐安执笔主编,王曰凡主审。

编 者

1999 年 12 月

目 录

第一章 牵引理论基础.....	1
第一节 粘着、牵引与制动	1
第二节 空转与滑行、粘着的控制	9
第三节 牵引参数的选择	13
第二章 牵引电动机与运行	19
第一节 直流牵引电动机	19
第二节 交流牵引电动机	33
第三节 直线牵引电动机	45
第三章 电力电子器件的原理与应用	54
第一节 可关断晶闸管(GTO)	57
第二节 绝缘栅双极晶体管(IGBT)	71
第三节 智能功率模块(IPM)	81
第四节 电力电子器件的冷却	90
第四章 斩波电路与逆变电路.....	103
第一节 斩波电路的工作原理.....	103
第二节 直流斩波基本电路.....	109
第三节 逆变电路.....	120
第四节 IGBT 与 GTO 在逆变电路中的应用	145
第五节 缓冲电路.....	150
第五章 控制与故障检测.....	156
第一节 车辆直传动控制.....	156
第二节 车辆交流传动控制.....	171
第三节 制动控制与粘着控制.....	195
第四节 空电联合制动中空气制动的 指令传输与控制.....	203

第五节	故障诊断系统·····	212
第六节	控制系统的技术要求·····	226
第六章	车辆电气设备·····	232
第一节	受流器·····	232
第二节	辅助电源·····	241
第三节	空调通风装置·····	248
第四节	车辆电器·····	250

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 在平直轨道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

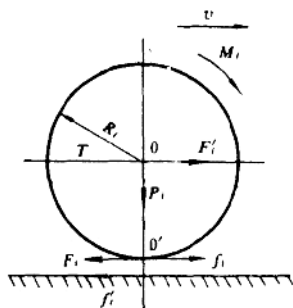


图 1—1 动轮对受力分析

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 $f_{\max}$ 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

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

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。

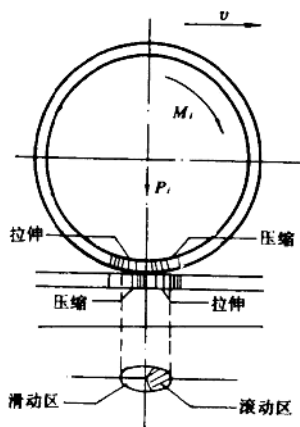


图 1—2 牵引工况轮轨
接触处的弹性变形

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。

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

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。

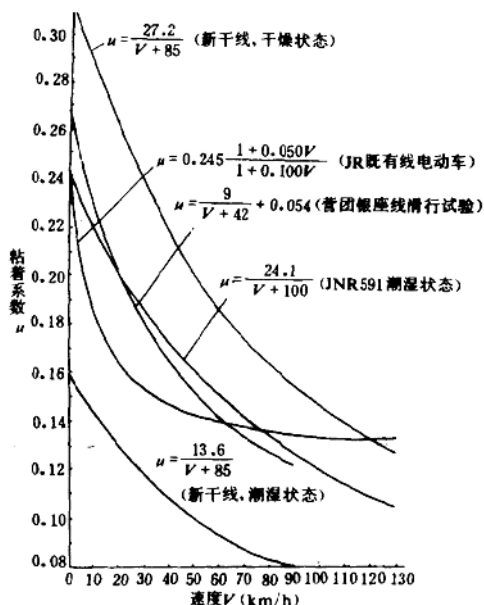


图 1—3 粘着特性曲线

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 $7\sim 10\text{ mm}$ 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, 轮对在同、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。

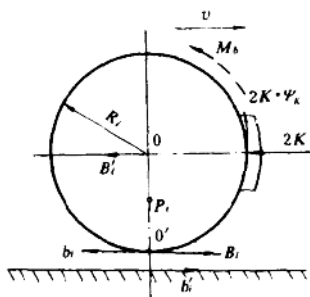


图 1-4 闸瓦制动力形成

摩擦力 $2K\Psi_k$ 对车轮的作用效果, 相当于制动转矩 M_k 。

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

应用类似牵引力形成的分析方法, 转矩 M_s 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。