

高速列车防滑控制策略研究

孙环阳, 罗飞平, 王 群, 杨 磊, 杨 硕

(南京中车浦镇海泰制动设备有限公司, 江苏 南京 211800)

摘 要: 防滑控制技术是高速列车制动系统的核心技术, 有效及可靠的防滑控制策略既可以避免轮对擦伤、保证车辆设备安全, 又可以充分利用轮轨粘着力并保证制动距离。从制动力与轮轨粘着力关系的角度, 介绍了高速列车滑行的产生机理, 结合 UIC 541-05 标准, 提出中国最新型高速动车组的滑行检测方法、防滑控制方法、安全导向控制、车轮不旋转冗余检测、增粘控制方法等控制策略, 并通过线路试验验证了防滑系统的有效性和可靠性。

关键词: 高速列车; 防滑控制; 增粘控制; UIC

中图分类号: U292.91⁺4; U260.11⁺5

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2017.05.102

Study of Wheel-slide-protection Strategy of High-speed EMUs

SUN Huanyang, LUO Feiping, WANG Qun, YANG Lei, YANG Shuo

(Nanjing CRRC Puzhen Haitai Brake Equipment Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 211800, China)

Abstract: Wheel-slide-protection control is one of the core technologies for the high-speed EMUs brake system. The effective and reliable wheel-slide-protection strategy can not only avoid the wheel tread flat, and protect the safety of the vehicle equipments, but also can take advantage of adhesion force between wheel and rail to guarantee braking distance. The basic mechanism of EMUs was introduced from the relationship between the brake force and adhesion force, and combining the standard of UIC 541-05, the wheel-slide-protection strategy of the latest EMUs in China was presented, including the wheel-slide detection method, anti-skid method, fault detection and safety-oriented, detection of non-rotating axles, and the method of adhesion increase. Finally, the validity and reliability of WSP brake control system was verified by means of the real tests.

Keywords: EMUs; WSP control; adhesion increase; UIC

0 引言

高速列车利用车轮与轨面之间的粘着力进行制动, 实际制动力的发挥取决于轮轨之间的粘着力大小。随着列车速度的提高, 轮轨间的粘着系数降低, 车轮滑行概率增加。车轮滑行将带来制动距离延长、轮对擦伤等问题, 严重情况下的擦轮事故和停车越界将影响车辆及旅客的安全, 均会对高速列车运营秩序带来不利影响。因此列车在运行过程中产生滑行时, 需采取具有较高有效性、安全性和可靠性的防滑控制策略, 达到粘着恢复、利用粘着、控制滑行的目的。

本文将介绍高速列车滑行的产生机理, 并且结合

UIC 541-05 标准, 提出中国铁路总公司组织设计的最新型动车组的滑行检测方法、防滑控制方法、安全导向控制、轴不旋转冗余检测、增粘控制方法等控制策略, 通过高速线路试验验证了高速列车防滑系统的有效性和可靠性。

1 滑行的产生机理

列车实际制动力的发挥取决于轮轨之间的粘着力大小。该粘着力受很多因素影响, 比如轨面存在油污、雨水、霜、露水、冰等, 都会引起低粘着现象的发生^[1]。

制动控制系统(BCU)根据制动力需求, 并输出制动缸压力, 使制动夹钳产生压紧力(P)作用在制动盘与闸片之间。

制动夹钳压紧力(P)、制动盘和闸片之间的摩擦

系数 (f) 以及制动盘比率 ($\Phi = \text{制动盘的有效直径} / \text{车轮直径}$) 三者的乘积, 即为使车轮停止转动的力, 也就是制动力 ($F_b = P \times f \times \Phi$)。这个力由车轮传递给钢轨, 从而使停止列车行驶的力即粘着力 (F_a) 起作用。

粘着系数 (μ) 是表征轮轨粘附程度的指标, 表示停止列车行驶的力 (F_a) 能够传递至钢轨的程度, 用粘着力 (F_a) 除以车重 (W) 而得到 ($\mu = F_a / W$)。

①在干燥轨面时, $F_a > F_b$, 不会产生滑行。

②在下雨天气粘着系数降低时, 会导致 $F_a < F_b$, 列车实际减速度将受到 2 个力中较小值的制约。因此粘着系数的降低会使制动力大于轮轨间能够承受的粘着力, 使车辆速度与车轮转动速度之差变大, 发生“滑行”; 如果滑行持续, 则车轮最终将停止转动, 呈现列车在车轮停止转动的情况下行驶的状态, 即车轮“抱死”状态。由于此时车轮只有一处与钢轨面接触, 从而使摩擦热增加, 导致车轮与钢轨接触部位熔化, 在踏面产生椭圆状的“擦伤”。由于列车的实际制动力会偏小, 导致制动距离延长, 如图 1 所示。

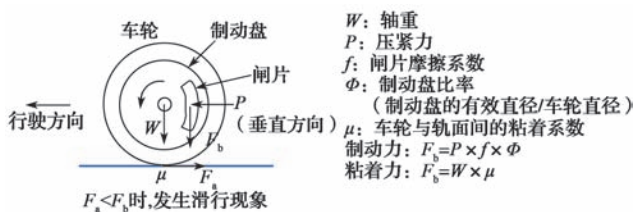


图 1 滑行产生机理

2 滑行检测方法

防滑控制系统由速度传感器、微机控制单元 (EBCU)、防滑阀、测速齿轮等组成, 其组成结构如图 2 所示。微机控制单元通过设在每根车轴轴端的速度传感器获得各轴的脉冲数, 结合测速齿轮齿数、车轮直径, 计算得出各轴轮对踏面的线速度, 并结合预设的模拟轴减速度计算出基准轴速度, 通过对各轴速度、减速度等进行比较, 判定轮对是否出现滑行。

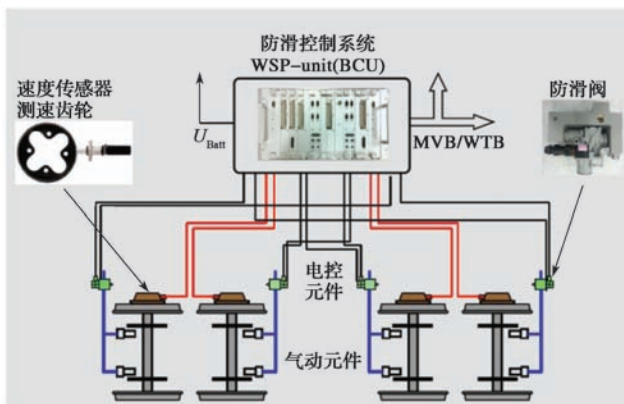


图 2 防滑控制系统组成

高速列车主要通过检测减速度、速度差、蠕滑率等方法来检测滑行。

2.1 减速度检测

减速度检测是根据本轴车轮的减速度变化是否超

过阈值来判断是否滑行。减速度检测是对单轴进行检测, 能及时检测滑行, 由于轮对与车辆的质量相差较大, 轮对速度变化相对也快一些, 所以优先使用减速度检测^[3]; 在制动控制系统计算列车速度存在偏差的情况下, 速度差检测无法起到准确监控滑行状态的功能, 此时减速度检测能够发挥更加重要的作用。

2.2 速度差检测

速度差检测是根据某轴速度与基准轴速度的偏差是否超过阈值来判断是否滑行。

在基准轴速度选取时, 在实测的第 1~第 4 轴速度和预设的模拟轴速度中, 选择其中的最高值。

设置模拟轴速度的目的是为了在全轴滑行时尽可能地获取相对准确的列车速度, 以便于粘着恢复。模拟轴速度为根据上个计算周期的基准轴速度通过预设的模拟轴减速度进行推算得出。在全轴滑行时, 如果预设的模拟轴减速度过高, 将无法检测到速度差滑行; 如果过低则会导致误识别为发生滑行, 影响制动力的施加。因此模拟轴减速度的选取需参考干轨条件下的实际减速度瞬时值, 并加以一定的裕量, 根据现车运用数据, 设置分别适用于常用 1-4N 制动、常用 5-7N 制动、紧急制动 EB/UB 的 3 条模拟轴减速度。

2.3 蠕滑率检测

轴速度的降低量与基准轴速度的比值称为蠕滑率, 通过计算蠕滑率是否超过阈值来判断是否滑行的方法称为蠕滑率检测。

根据国际铁路联盟 (UIC) 研究试验局 (ORE) 测得的轮轨间粘着 - 蠕滑率曲线关系 (如图 3 所示), 以及大量的试验数据得知, 轮对发生滑行时, 粘着力随着蠕滑率增大而增加^[2], 粘着力在这一点达到最大值时的蠕滑率约为 5%~20%, 当蠕滑率继续增大时粘着力下降。

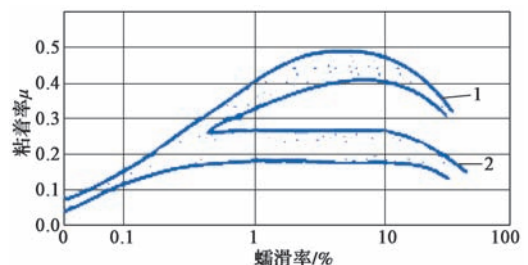


图 3 ORE 测得的粘着 - 蠕滑率曲线关系

通过将蠕滑率控制在合理区间, 既能充分利用粘着发挥列车制动力, 使轮轨粘着较差的情况下制动距离最短, 同时又能防止列车轮对严重擦伤及抱死带来的安全隐患。

如减速度和速度差滑行判据参数过于灵敏, 将导致频繁检测到滑行, 并可能导致制动距离延长较多, 因此在中国铁路总公司组织设计的最新型动车组中增加了蠕滑率检测的方法。为了选取合适的蠕滑率参数,

开展了大量的现车对比试验, 取得了良好的控制效果。

3 防滑控制方法

动车组出现滑行后, 需通过制动力控制达到粘着恢复、控制滑行的目的。

3.1 电制动防滑主体

动车组制动控制分为纯空气制动工况和空电复合制动工况。

- ①在纯空气制动工况下, 由BCU检测并控制防滑。
- ②在空电复合制动工况下, 拖车轴上没有电制动, 由BCU检测并控制防滑; 动车上一般有电制动和空气制动, 所以动车的防滑主要是电制动防滑和空气制动防滑。空气制动防滑由BCU实施。关于动车上的电制动防滑, 国内CRH1、CRH3、CRH5型动车组采用牵引系统(TCU)进行电制动防滑检测和控制, CRH2型动车组采用BCU进行电制动防滑控制。

由于动轴上既施加电制动又施加空气制动, 如果防滑分别由TCU和BCU负责, 则二者需进行相关协调管理, 控制逻辑复杂, 特别是在空电转换过程中, 极易出现互相影响而无法准确判断滑行的情况, 在轮轨间粘着极低的情况下, TCU并不能完全有效消除滑行, 最终将导致车轮擦伤的事故。

因此在中国铁路总公司组织设计的最新型动车组中, 采用了BCU统一进行电制动和空气制动防滑的控制策略。

3.2 防滑控制方法

动车电制动防滑采用车控的方式, 考虑到在电制动力施加的时刻, 动车单根轴发生滑行, 若BCU只降低电制动力, 而不补充空气制动力, 将造成该车4根轴的制动力损失。在极端情况下, 如小级别制动工况, 列车制动力完全由动车的电制动承担, 一旦发生滑行且长时间无法恢复, 将造成列车无制动力的严重后果, 因此在空电复合制动工况下, 采取单车空气制动闭环控制的策略, 控制方式如图4所示。

防滑检测和控制过程分为3个阶段实施:

- ①一旦检测出滑行状态(A点), 在电制动方面, BCU通过增大“发给TCU的电制动防滑减量”来降低本车电制动力; 在空气制动方面, BCU根据TCU发送的电制动力实际值, 在单车范围内采取闭环控制, 通过对中继阀的控制来补充空气制动, 但同时以轴为单位, 通过对防滑阀的阶段性的排气控制, 降低滑行轴的空气制动力, 以匹配轮轨粘着特性。
- ②当检测到滑行轴速度从滑行状态转换到速度恢复倾向时, BCU将该状态识别为B点, 通过对防滑阀的保持控制, 使制动缸的压力空气处于非充非排的状态, 以期使滑行轴速度恢复, 从而提高粘着利用率。
- ③当检测到滑行轴速度恢复至与基准轴速度较为接近的区域时, BCU将该状态识别为C点, 在电制动

方面, 通过减小“发给TCU的电制动防滑减量”来恢复电制动; 在空气制动方面, 根据TCU发送的电制动力实际值, 在单车范围内采取闭环控制, 对中继阀进行控制来降低空气制动, 避免制动力叠加或过大; 同时通过对防滑阀的控制, 解除制动缸的压力保持状态, 恢复为再供给。

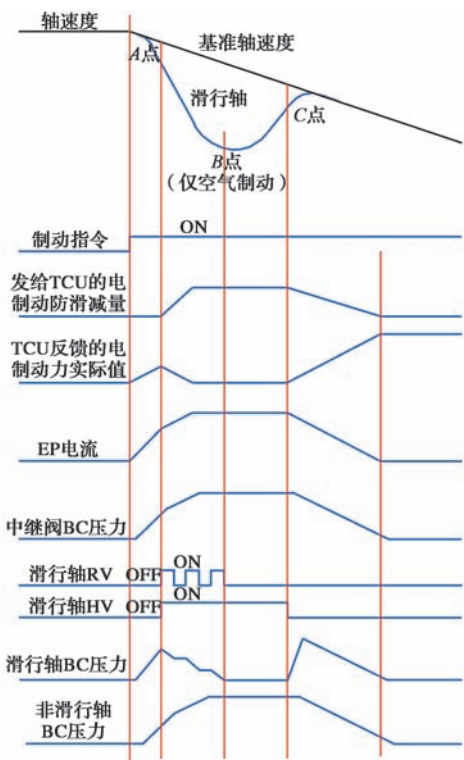


图4 空电复合制动工况防滑控制

4 安全导向控制

4.1 电制动切除控制

通过对既有动车组车轮抱死擦伤事故的数据调查发现, 存在动轴各轴持续同步滑行的现象, 使BCU计算得到的基准轴速度只能根据模拟轴减速度而变化。根据第2.2节, 模拟轴减速度是参考干轨条件下的实际减速度瞬时值, 并增大一定的裕量而选取, 如果1~4轴中任意一轴速度未能及时恢复, 基准轴速度将随模拟轴减速度而持续并快速降低, 且严重偏离列车实际速度, BCU以该基准轴速度为参考速度进行防滑控制, 在极端严重的情况下, 会提前识别为零速并停止防滑控制, 导致轮对擦伤。

通过研究发现, TCU根据BCU的电制动指令以及本身计算的参考速度, 进行转矩计算并施加电制动力, 并且其参考速度是通过自身采集的轴速度取平均得来。在滑行状态下, 由于滑行轴速度低于平均轴速度, 将产生正转差; 由于非滑行轴速度高于平均轴速度, 将产生负转差。由于电机存在励磁电流, 在正转差作用下将产生牵引力, 在负转差作用下将产生制动力。因此, TCU的参考速度计算方法将会对滑行轴产生牵引力, 改善滑行状态; 对非滑行轴产生较大制动力,

导致非滑行轴产生滑行，最终将形成 4 轴同步滑行的状态。

为解决该问题,需由 BCU 识别动轴各轴持续同步滑行的状态,并发送电制动切除信号,由 TCU 及时关断 IGBT 门极、取消电机励磁。

如频繁实施该控制,将影响牵引电机的使用寿命,造成电制动利用率下降、闸瓦磨耗加快的不利后果,因此BCU在检测到各轴同步滑行持续一定时间并且仍存在某轴滑行的现象时,才发出电制动切除信号;同时考虑到IGBT门极关断后,TCU需要时间才可以重启IGBT门极,因此BCU的电制动切除信号应维持一定时间。

4.2 参考轴防滑控制

动车组设置参考轴，用于列车网络系统（CCU）和列车自动保护系统（ATP）的列车速度计算，用于CCU 各种逻辑保护和 ATP 顶棚速度计算。该参考轴一般设置在头尾车的第 2、3 轴。

CCU 和 ATP 需要准确的列车速度，在车轮滑行及防滑控制过程中，如果对参考轴采取第 3.2 节的防滑控制方法（3 个阶段），在低粘着的情况下，轴速度极易产生波动，不利于 CCU 和 ATP 的列车速度计算，并导致相应的控制紊乱，因此需对参考轴采取特殊的防滑控制方式，如图 5 所示。

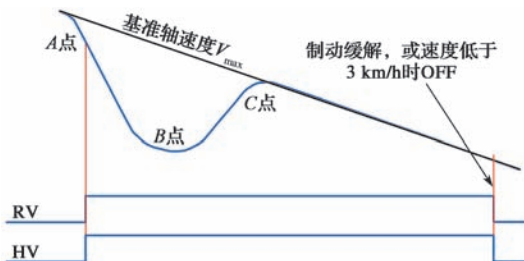


图5 参考轴防滑控制方式

BCU 检测到参考轴满足滑行 A 点条件后, 需一直维持该轴防滑阀中的排风阀 (RV) 和保压阀 (HV) 的得电状态, 以实现持续排气, 直到制动缓解或停车, 保证轴速度稳定。

由于 CCU 和 ATP 只参考占用端车的参考轴速度, 如果头车和尾车的第 2、3 轴在滑行状态下均采用持续排气控制, 则会引起制动力的较大损失, 因此该控制方式只适用于占用端车的第 2、3 轴; 同时为保证紧急制动工况下的制动距离, 在紧急制动 EB 和紧急制动 UB 时, 对头车和尾车的第 2、3 轴仍采取第 3.2 节的防滑控制方式, 以减少制动力的损失。

4.3 单轴防滑切除控制

2014 年底至 2015 年初,我国高铁线路上发生了几起动车组停车越界事故,严重影响了车辆安全、设备安全和旅客安全。动车组发生该类事故时的天气及轨面情况均比较恶劣,基本都发生在小雨、雪天且轨面出现不明物质的情况下。

通过对列车运行数据的分析发现,轮轨粘着系数约为 0.02~0.03 之间,属于极低粘着工况,各车各轴均出现了持续滑行、恢复并再滑行的现象,并相应采取了防滑保护措施,在该过程中制动力无法持续建立,最终导致制动距离延长,引发停车越界事故。

BCU 应识别持续滑行状态，一旦出现滑行轴持续排气时间超时或防滑阶段排气及保压时间超时，需及时将该轴防滑控制切除；在被切除防滑控制轴所在车辆的滑行状态解除后，需自动恢复切除轴的防滑控制功能。根据第 4.2 节，因参考轴采取特殊控制方式，参考轴防滑阀在持续排气时，不适用防滑切除功能。

防滑切除功能是为了在持续滑行状态下保证制动距离,是一种极端措施,但如果参数过于灵敏易导致车轮擦伤,是一对矛盾,需寻找两者之间的平衡:既需实现低粘着条件下的防滑保护正常,不触发防滑切除的极端措施,又需实现极恶劣粘着条件下的防滑切除功能正常动作,保证制动距离。通过大量的现车试验,在不同的轨面粘着条件下,对比各种防滑控制切除参数,取得了良好的效果。

4.4 看门狗监测及控制

根据 UIC 541-05 制动机 - 制动机部件制造规程 - 车轮防滑装置 (WSP) 标准的要求, 应设置一个独立的监控或“看门狗”装置来监测防滑控制系统的动作, 防止连续不间断排气时间超时, 以保证制动力^[4]。

第 4.3 节的单轴防滑切除功能是由防滑控制系统本身实现, 集成于防滑控制软件当中。为防止防滑控制软件失效或硬件电路故障而导致的意外持续排气, 并结合 UIC 541-05 标准的要求, 设置了一种防滑看门狗电路, 如图 6 所示。

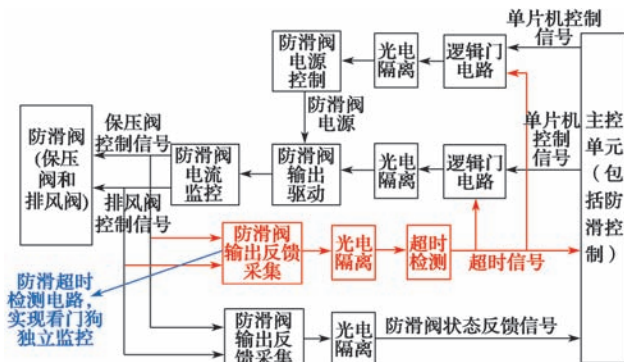


图 6 防滑看门狗保护电路框图

该电路为独立于防滑控制系统的微机单元,采用英飞凌公司 XC164 处理器,采集并监控防滑阀的驱动控制信号,当防滑阀连续得电时间超时(大于防滑控制系统用于单轴防滑切除功能的时间参数)后,将输出超时信号,由逻辑门电路切除该轴所在转向架的防滑阀电源,使防滑阀始终处于充气的状态,保证制动力施加。

根据第 4.2 节，因参考轴采取特殊控制方式，参考轴在持续排气时，看门狗电路应识别该状态，且不采

取时间计数及切除防滑阀电源等保护措施。

5 车轮不旋转冗余检测

按照 UIC 541-05 标准要求, 应在每辆车设置一个冗余的车轮不旋转检测装置, 来持续监控轮对的旋转情况, 如发生车轮抱死故障, 需及时在司机室进行故障显示^[4]。

根据该要求, 每辆车的制动控制装置内都设置 2 套 EBCU, 从车辆供电、列车网络接口等方面都相互独立。其中, EBCU_{x.1} 负责制动力控制、防滑保护控制, 且具备车轮抱死检测功能; EBCU_{x.2} 同样具备车轮抱死检测功能, 但不负责对防滑阀的控制。为满足独立性原则, 车辆每根轴都采用双通道速度传感器, 该传感器每个通道的电源由 2 套 EBCU 分别提供, 产生的脉冲频率信号也由 2 套 EBCU 分别采集, 如图 7 所示。

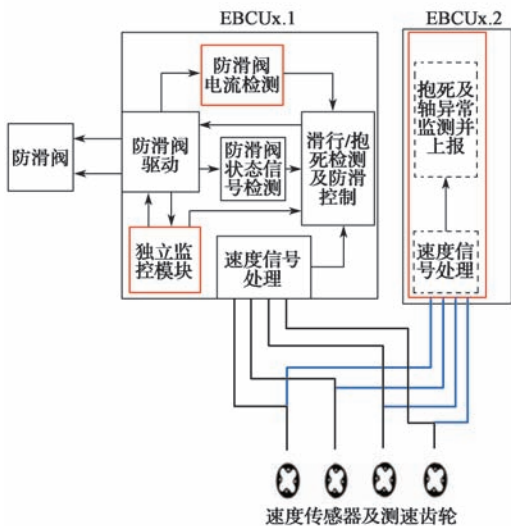


图7 车轮不旋转检测示意图

6 增粘控制方法

为保证在低粘着的情况下的制动距离, 动车组设置踏面清扫控制及撒砂控制等增粘功能。

踏面清扫控制是在列车产生滑行或空转时, 通过安装在每个车轮上的踏面清扫装置将研磨子压紧并研磨车轮踏面, 可去除存在于车轮踏面上的各种杂质、增加粗糙度, 并附着增粘成分。

撒砂控制是在列车产生滑行时, 将石英砂撒在轮轨之间, 在轮轨有油的低粘着工况下, 增粘效果显著。

动车组共设置 6 根撒砂轴, 可采取手动撒砂和自动撒砂的方式。以自动撒砂为例, 考虑砂箱容积条件, BCU 在严重滑行时, 向 CCU 发送自动撒砂请求信号, CCU 在收到任意一个车的自动撒砂请求时, 发布全列撒砂信号。BCU 根据前进方向的不同, 控制不同轴位进行撒砂动作: 在 1 车主控时, 由 1 车 3 轴、2 车 3 轴、7 车 2 轴撒砂; 在 8 车主控时, 由 8 车 3 轴、7 车 3 轴、2 车 2 轴撒砂, 如图 8 所示。

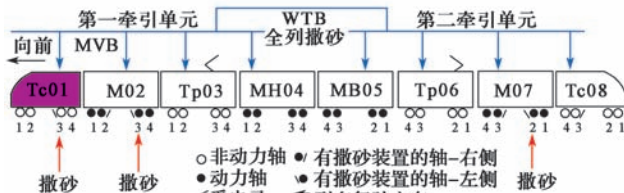


图8 撒砂增粘(1车主控)

7 试验结果及分析

按照上述防滑控制策略, 对该动车组进行了现车试验验证, 验证了控制策略的有效性和可靠性。

如图 9 所示, 在纯空气紧急制动 EB 工况下, 通过对防滑阀的控制, 滑行轴的速度得以迅速恢复, 防滑系统功能正常。

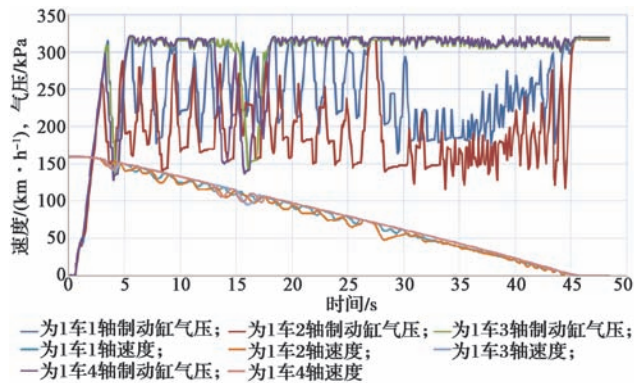


图9 160 km/h 紧急制动 EB 纯空气防滑试验

如图 10 所示, 在空电复合紧急制动 EB 工况下, 由于 4 根轴同步滑行, 发生了 2 次电制动切除现象, 电制动切除后, 各轴速度未再发生耦合, 同步滑行现象消除, 各轴速度恢复情况良好。

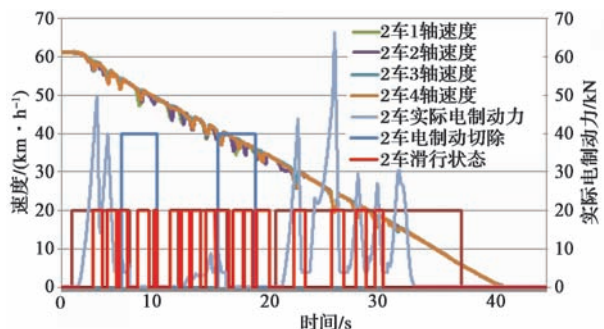


图10 60 km/h 紧急制动 EB 空电复合防滑试验

8 结语

防滑控制技术是高速列车制动系统的核心技术, 良好的防滑控制策略既能够避免高速车辆轮对擦伤, 又能充分利用轮轨之间的粘着, 保证列车制动距离尽量缩短。

本文介绍了高速列车滑行的产生机理, 结合 UIC541-05 标准, 提出了中国铁路总公司组织设计的最新型动车组的滑行检测方法、防滑控制方法、安全导向控制、车轮不旋转冗余检测、增粘控制方法等控制策略, 通过线路试验验证了 (下转第 43 页)