

地铁列车制动距离及制动减速度 相关问题研究

张兴宝

(西安市地下铁道有限责任公司 运营分公司, 陕西 西安 710016)

摘要: 为制定在特殊天气情况下(雾、雾霾)列车出库时的应急预案, 以及准确掌握列车在不同初速度下的紧急制动距离, 在试车线对西安地铁 1、2 号线车辆在不同初速度下的紧急制动距离进行测试。对测试结果进行理论分析与现场验证, 得出: 在制动系统相同的情况下, 制动初速度越大, 空走时间对制动减速度的影响就越小, 平均减速度越接近瞬时减速度, 在同等制动级位下, 纯空气制动和电控混合制动虽然均满足减速度要求, 但减速度值大小不尽相同; 在制动系统不同的情况下, 制动供货商设计和确定的系统减速度下限值、闸瓦材质、空走时间、所选的理论计算模型, 以及外界测试工况对制动减速度和制动距离均有影响。

关键词: 地铁列车; 空走时间; 初速度; 减速度; 制动距离

中图分类号: U231; U260.35 **文献标识码:** A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2016.05.107

Braking Distance and Deceleration Related Problems of Metro Trains

ZHANG Xingbao

(Operating Branch, Xi'an Metro Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710018, China)

Abstract: In order to develop the emergency plans of train leaving the storehouse in special weather conditions(fog, haze and so on), and accurately grasp the train emergency braking distance in different initial velocity, the test of Xi'an metro line 1 and 2 vehicles was put forward in the test line. With the theoretical analysis and field validation test results, it was concluded: with the same braking system, initial braking speed was larger, empty walk time influence on braking deceleration was smaller, and the average deceleration was approaching instantaneous deceleration; in the same braking grade, although pure air brake and mixed electric brake both met the reduction speed requirements, but the deceleration values were different; in the different braking system, the designed and determined deceleration limit value, the brake shoe material, empty walking time, the theoretical calculation model and the external test conditions would influence the braking deceleration and braking distance.

Keywords: metro train; empty walking time; initial velocity; deceleration; braking distance

0 引言

列车制动系统的作用是实现列车减速或在目标点准确停车。实现方式是司机根据列车初速度以及其他外界工况, 施加不同的制动级位(减速度)给制动系统,

然后制动系统根据司机发送的减速度指令和通过从空气弹簧采集的列车重量计算出列车所需要的制动力, 最后系统按照规定方式分配制动力至各个车辆。所以为确保列车能够在规定位置准确停车, 除了制动系统具备很高的可靠性和准确性外, 司机对列车制动距离/制动减速度的影响因素以及对驾驶的列车制动性能的掌握也是至关重要的。

1 现场试验项目及存在问题

2015 年 12 月 9 日，西安地铁公司组织相关人员在试车线对 1、2 号线车辆的制动距离进行测试，主要对列车在初速度为 25 km/h、20 km/h、15 km/h 以及 10 km/h 下施加 EB（紧急制动）制动，测试列车的制动距离。具体试验数据如表 1。

表 1 低速下制动距离的测量数据与理论计算数据

初速度 / (km·h ⁻¹)	现场测试制动距离 (EB) /m		理论计算距离 (未考虑空走时间) /m
	1 号线车辆	2 号线车辆	
25	18.00	22.00	20.09
20	12.00	15.00	12.86
15	8.50	12.00	7.23
10	3.80	5.50	3.21

同样的初速度，同样的制动级位（紧急制动），为何两条线路车辆制动距离相差很大，并且均和理论计算不一致，需要进行理论分析、现场试验，并依据相关文献^[1-13]对这 2 点进行深入研究。

2 现场问题的理论分析及推断

查阅车辆招投标及合同文件发现，没有对制动距离进行规定，但对紧急制动和最大常用制动的平均减速度值有规定，具体内容为：“在额定载员情况下，在平直的干燥轨面上，车轮为半磨耗状态，列车从最高运行速度 80 km/h 制动到停车，平均减速度为：紧急制动 ≥ 1.2 m/s²，最大常用制动 ≥ 1.0 m/s²”。

从上面关于制动平均减速度值的要求描述来看，合同中仅规定了紧急制动和最大常用制动平均减速度的下限值，并且此值是在特定的外界条件下取得的，例如平直干燥轨面、半磨耗轮对、从最高速度开始制动至停车等。这样，当在现场试验时外界条件不同，制动减速度 / 制动距离就不同。下面逐个分析各因素对列车制动减速度及制动距离的影响。

2.1 在制动系统相同的情况下的影响因素

2.1.1 制动初速度

如图 1 所示，列车在制动时，大致可分为 2 个时间阶段，即空走时间阶段和匀减速时间阶段。空走时间是由于制动指令的传输以及设备的反应时间产生的。

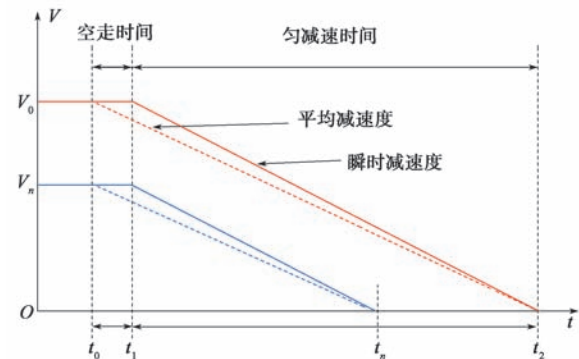


图 1 列车制动时的过程分析图

同时，系统确定后，此空走时间为确定值，它不随初速度大小的变化而变化。并且由于初速度不同，匀减速阶段所需的时间不同，空走时间占总制动所需时间的比重不同。这样，虽然制动级位相同，但制动初速度不同，则平均减速度不同，具体推导如下。

$$s_{\text{总}} = s_{\text{匀速}} + s_{\text{匀减速}} = v_0 \times (t_1 - t_0) + \frac{1}{2} \times v_0 \times (t_2 - t_1) \quad (1)$$

$$v_t^2 - v_0^2 = 2a_{\text{平均}}s \Rightarrow a_{\text{平均}} = \frac{v_t^2 - v_0^2}{2s} \Rightarrow a = -\frac{v_0^2}{2s_{\text{总}}} \quad (2)$$

将式（1）代入式（2）得

$$a_{\text{平均}} = -\frac{v_0^2}{2s_{\text{总}}} = -\frac{v_0}{2(t_1 - t_0) + (t_2 - t_1)} \quad (3)$$

令：t₁-t₀=c（常数），v_n=kv₀，t_n-t₁=k(t₂-t₁) 得：

$$a_{n(\text{平均})} = -\frac{v_n}{2(t_1 - t_0) + (t_n - t_1)} = -\frac{kv_0}{k(t_2 - t_1) + c} \quad (4)$$

$$\frac{v_0}{t_2 - t_1} = \frac{kv_0}{k(t_2 - t_1)} = \frac{v_n}{t_n - t_1} = \text{常数}$$

$$\text{所以 } a_{\text{瞬时}} = \frac{v}{t} = \frac{kv}{kt} \geq \frac{kv}{kt + c} = a_{\text{平均}} \text{ (c 为大于等于 0 的常数)}$$

当 k 越大，即制动初速度越大，空走时间对制动减速度的影响就越小，平均减速度就越大，且越接近瞬时减速度值。

2.1.2 制动模式

地铁车辆常用制动采用电控混合制动，并优先使用电制动，当电制动力不足时，由空气制动进行补充，最终满足制动需求。但电控混合制动时，电制动和空气制动之间的过渡需要时间并存在偏差，导致在同等制动级位下，纯空气制动和电控混合制动虽然制动减速度均满足减速度要求，但减速度值大小不尽相同。

2.1.3 制动初速度造成的闸瓦与踏面摩擦系数的变化

在很多文献中提及轮对踏面与制动闸瓦之间摩擦系数随着速度的提高而降低，即速度越高，闸瓦与轮对踏面之间的摩擦系数就越小，则制动减速度就越小。如图 2 所示为铸铁闸瓦摩擦系数与列车运行速度之间的关系图^[13]。

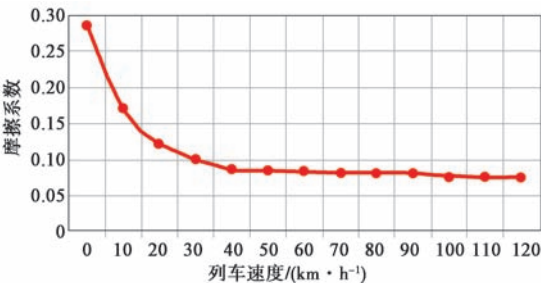


图 2 铸铁闸瓦摩擦系数与速度的关系

从图 2 可以直观看出，摩擦系数（闸瓦与轮对之间的摩擦系数）随着速度的提高而变小。这样，根据 F=μN（其中 μ 为闸瓦与轮对踏面之间的摩擦系数，N 为制动时闸瓦给轮对踏面的正压力），在同样的制动

级位下，制动初速度越大，摩擦系数越小，则制动力越小，制动减速度就越小。

2.2 在制动系统不同的情况下的影响因素

2.2.1 系统减速度下限值的设计

如上所述，车辆合同中仅对紧急制动和最大常用制动平均减速度下限值进行了规定，即不小于某一值。国内相关标准“地铁车辆通用技术条件（GB/T 7928—2003）”、“城市轨道交通装备技术规范 / 城市轨道交通车辆电制动系统通用技术规范（CZJS/T 0005—2015）”，以及国外相关标准“2003 Railway application-Braking-Mass transit brake systems Part 1（EN 13452-1）”，均对平均制动减速度没有其他特殊规定。所以，不同的供货商在设计时，根据合同均满足要求，但不同厂家最终确定的此值大小不一定相同。这样在装有不同制动系统的车辆在其他外界条件均一致的情况下，制动减速度可能不同，从而制动距离也就不同。

2.2.2 闸瓦材质

图3为不同材质闸瓦摩擦系数与速度变化的关系^[13]。从图3可以看出，不同材质的闸瓦，其摩擦系数和速度的变化不尽相同。

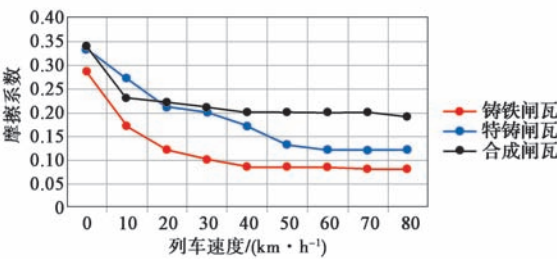


图3 不同材质闸瓦摩擦系数与速度的关系

根据图3推理，不同的制动系统供应商选用的制动闸瓦材质不同，导致闸瓦与轮对之间的摩擦系数不同。即摩擦系数越大，则制动减速度就越大，制动距离就越短。

2.2.3 空走时间

不同的制动系统空走时间不尽相同，这个也是不同系统制动减速度 / 制动距离不同的一个主要因素。

2.2.4 选用理论计算模型的不同

如表2所示，不同的制动供货商，在进行制动距离和平均减速度计算时，所建的模型不尽相同，算法不同，系统计算出的制动距离也有差别。制动距离的理论算法大致分为2种：

第1种：不考虑空走时间，即认为制动指令发出后列车速度立刻开始下降，全过程为匀减速运动。

第2种：考虑空走时间，即认为制动指令发出后到制动开始执行指令期间存在时间差，这期间列车为匀速运动，随后为匀减速运动。

2种建模计算的制动距离 / 制动减速度如表2所示。通过分析，考虑空走时间时的制动距离大于不考虑空

走时间的制动距离，减速度则与之相反。

表2 2种制动距离及制动减速度大小比较

参数	未考虑空走时间	考虑空走时间
制动时间 t	$t_2 - t_0$	$t_2 - t_0$
制动距离 s	$\frac{1}{2} \times v_0 \times (t_2 - t_0)$	$v_0 \times (t_1 - t_0) + \frac{1}{2} \times v_0 \times (t_2 - t_1)$
平均减速度 a	$\frac{v_0}{t_2 - t_0}$	$\frac{v_0^2}{2s}$

2.3 外界测试工况的影响因素

2.3.1 实际制动初速度和目标初速度之间的偏差

现场制动距离测试主要有2种方式；第1种是通过司机控制列车，待列车速度达到目标初速度时进行相应的制动，然后制动系统自动进行制动距离计算或根据示波图绘制的制动曲线人工进行制动距离计算；第2种是提前在地面上标记一个固定的开始制动点，司机控制列车速度让其运行至此规定点时列车的速度为目标速度，然后施加对应的制动，待列车停稳后，使用卷尺测量标记点至列车停车点之间的距离。

使用上面的任何一种方法进行制动距离测试，制动初速度均是由人进行控制，实际制动初速度和目标制动初速度均存在偏差。第1种方法制动初速度好控制，但制动距离是借助系统软件计算或通过示波图进行人工计算，在计算中存在误差。第2种方法制动距离为列车真实距离（实测距离），但由于要求司机控制列车在规定的位置达到规定的速度，不好实现。所以现场试验时一般实际的初速度和目标初速度都或多或少地存在偏差，并且偏差程度不确定。

2.3.2 试验线路的参数

由于试验线路的坡度大小、轮轨的粘着状态以及曲线半径大小等外界因素均影响制动减速度 / 制动距离的测试，有关计算公式如下。

坡道附加阻力公式为^[12]：

$\omega_r \approx 1000 \times \sin \theta = i$ （ θ 为坡度角度， i 为坡道千分数）

曲线附加阻力公式为^[12]： $\omega_r = \frac{A}{R}$ （其中A为曲线

半径，R为综合反映其他因素的常数）

所以对制动距离或减速度进行测试时，坡道大小不同、曲线半径不同，外界附加阻力就不同，从而导致总的制动力不同，制动减速度也就不同，制动距离相应地就不同。

3 现场问题部分原因推测再验证

以上从不同角度分析了影响列车制动减速度 / 制动距离的因素，部分影响因素比较明显，例如不同制动系统供货商不同，系统内部设计的参数不同等导致制动减速度和制动距离不同。但部分因素仅仅是理论推断，需要实际验证，例如制动初速度对制动减速度的影响等。下面就通过现场试验来验证制动初速度、制

动模式等因素对制动减速度及制动距离的影响。

3.1 试验方法及试验项目

在 2 号线车辆段试车线（平直的干燥轨面），利用 2 号线车辆进行试验。选取不同初速度（抽取了 10 km/h、15 km/h、20 km/h、25 km/h 和 60 km/h），然后分别施加紧急制动（EB）、纯空气制动（FB-A）和电控混合制动（FB-R），观察制动减速度的变化。试验目的：
①分别在 60 km/h、25 km/h、20 km/h、15 km/h、10 km/h 初速度下，施加 EB、FB-R、FB-A 制动，验证在制动级位相同的情况下，制动初速度与减速度的关系；
②分别进行 FB-R、FB-A 制动，验证纯空气制动和电空混合制动下减速度是否一致；
③在 60 km/h 的初速度下，分别施加 EB、FB-R、FB-A 制动，验证减速度是否满足合同要求。

3.2 试验数据整理

试验结果如表 3。根据表 3 绘制制动减速度及制动距离与制动初速度的关系曲线如图 4。

表 3 试验结果

初速度 / (km·h ⁻¹)	平均减速度 / (m·s ⁻²)			制动距离 /m		
	EB	FB-A	FB-R	EB	FB-A	FB-R
10	1.05	0.98	0.95	4.7	5.3	5.5
15	1.24	1.04	0.96	9.4	12.7	13.2
20	1.26	1.16	1.06	15.0	15.9	17.9
25	1.29	1.16	1.09	23.2	25.1	27.3
60	1.37	1.31	1.17	100.9	109.7	116.7

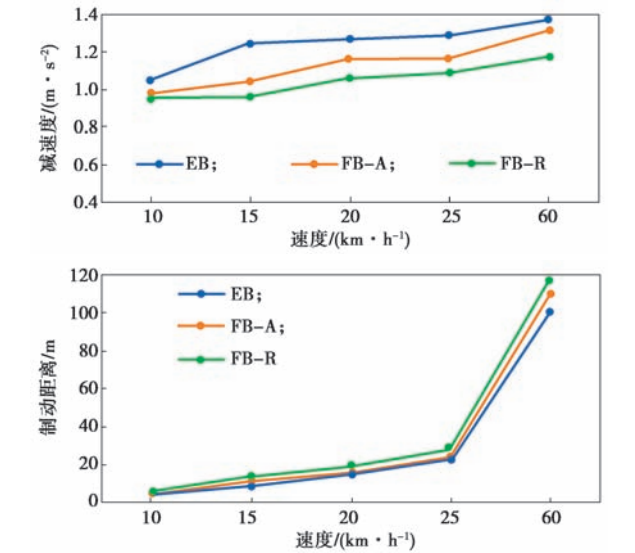


图 4 制动减速度及制动距离与制动初速度的关系

根据表 3、图 4 所示的试验结果，得到如下结论：
①在同样的制动级位下（EB、FB-A、FB-R），初速度不同，则制动减速度不同。并且此试验体现出随着制动初速度的增加，制动减速度在不断增加（摩擦系数大小也随速度变化而变化，但其影响较小，故此处不再考虑此因素）。
②制动模式不同，则制动减速度不同。并且此试验体现出纯空气制动（FB-A）时的制动减速度大于电控混合（FB-R）时的制动减速度（此结果受电控转换

设置的影响，不同的系统此结果可能不尽相同）。
③在初速度为 15 km/h 时，紧急制动的减速度大于 1.2 m/s²，最大常用制动减速度大于 1.0 m/s²，同时根据结论①推断，列车在 80 km/h 的初速度下施加紧急制动和最大常用制动，减速度满足合同要求。

4 现场试验出现问题的解释

通过上面的分析及结果再验证，可以根据这些结论解释文章开头提出的现场测试结果的 inconsistency 问题。虽然当天 2 条线路车辆制动距离的测试不在同一条轨道上进行，但均在两条线路车辆段的试车线上进行，2 条试车线均为平直的干燥轨面，结果不一致主要包括如下几个原因：
①由于测试的 2 条线路车辆的制动系统为不同的供货商提供（西安地铁 1 号线车辆制动系统为 KNORR 公司提供的 EP2002 系统，2 号线车辆制动系统为 NABTESCO 公司提供的 HRDA 系统），所以 2 个厂家设定的紧急制动下的减速度具体值不同、2 个系统空走时间不同、选用的闸瓦材质不同等，这样就出现了 2 条线路车辆在测试紧急制动距离时数值存在不一致性。
②由于当天测试的是列车低速下（30 km/h 以下）的紧急制动距离，而制动减速度随着初速度的减小而减小（影响因素的综合影响结果），但理论计算紧急制动距离时使用的减速度值是列车在高速下的紧急制动减速度值。这样，在低速下测试的实际紧急制动距离大于理论计算的紧急制动距离。
③司机对列车制动初速度的控制误差及误差大小不同、制动距离计算的差别等，也是导致此次试验结果不一致的因素。

5 环境对制动减速度及制动距离影响的修正

通过上面的分析，制动系统的供货商不同，其制动减速度和制动距离不尽相同，所以装有不同制动系统的车辆，对其制动减速度及制动距离进行相互比较是无意义的。即使制动系统相同，试验外界条件不同，试验结果也无法直接进行对比。对装备同一制动系统的列车制动距离及制动减速度进行测试，在外界条件相差在允许范围时，可用修正公式对其结果进行修正。
试验在平直干燥轨面上进行，试验区段长度不少于 1.0 km，实际制动初速度尽可能接近目标制动初速度等。如果试验条件不能满足要求，则所选区段坡道不应超过 ±4‰，试验时风速不宜大于 5 m/s，实际制动初速度与目标初速度之差不超过 ±3 km/h 等。在此情况下，可对制动距离按式（5）进行修正^[11]：

$$L_1 = L \times \frac{3.92 \times (1 + R_0) \times V_0^2}{[3.92 \times (1 + R_0) \times V^2] \pm i \times L} \tag{5}$$

（下转第 109 页）