



# 移动闭塞列车运行间隔控制研究

张友鹏, 孙永生, 赵斌

(兰州交通大学自动化与电气工程学院, 兰州 730070)

**摘要:** 研究移动闭塞列车运行间隔控制算法。运行间隔是影响列车运行安全的关键问题, 对列车的运行间隔进行有效控制, 能保证列车在移动闭塞条件下安全运行, 同时可以达到提高线路运力的目的。为此, 设计了移动闭塞条件下3种列车运行间隔模式的间隔控制算法, 实现列车在“撞硬墙”模式和“撞软墙”模式下的安全追踪运行, 保证列车运行安全。通过实例, 对“撞硬墙”模式和“撞软墙”模式下的算法进行仿真比较, 结果表明: 所设计的算法能够保证追踪列车在前行列车尾防护点外安全停车。同时, “撞软墙”模式下线路的运营效率更高。

**关键词:** 交通信息工程及控制; 运行间隔; 移动闭塞; 算法

**中图分类号:** TB24      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1674-2850(2013)12-1112-07

## Research on train interval control under moving block

ZHANG Youpeng, SUN Yongsheng, ZHAO Bin

(School of Automation & Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** The algorithm of train interval control under moving block was studied. Interval is the key issue to affect the safe operation of trains, and controlling the train interval effectively can ensure the safe operation of trains under moving block condition and achieve the goal of improving line capacity. Therefore, train interval control algorithm for three interval patterns under moving block were designed to achieve train security tracking operation in “hit a hard wall” and “hit a soft wall” modes and ensure train safety operation. By comparing the simulation of algorithm under “hit a hard wall” and “hit a soft wall” instance, it was found that this algorithm could ensure the tracking train to stop out of the forward train rear protection points safely. At the same time, “hit a soft wall” mode could improve line operations efficiently.

**Key words:** traffic information engineering and control; train interval; moving block; algorithm

## 0 引言

20世纪60年代, 我国铁道运输自动化专家汪希时教授提出铁路移动闭塞理论<sup>[1]</sup>; 20世纪90年代初, 北方交通大学(现北京交通大学)建立了铁路移动闭塞仿真实验室<sup>[1]</sup>, 对移动闭塞制式展开深入研究, 但未研制出完整的移动闭塞列车控制系统; 2004年, 我国第一条移动闭塞城市轨道交通线路——武汉轻轨1号线正式开通运营, 但该条线路所采用的列车控制系统是由阿尔卡特(现属泰雷兹)研发的。尽管我国不少单位在研究移动闭塞列车控制系统, 但仍不具备生产整套完全自主国产化移动闭塞列车控制系统的能力。

移动闭塞制式是铁路运输中最高级的闭塞方式, 它能够缩短列车行车间隔, 提高运输效率<sup>[2]</sup>。因此, 这里主要对移动闭塞列车的运行间隔控制算法进行研究。

**基金项目:** 高等学校博士学科点专项科研基金 (20116204110002)

**作者简介:** 张友鹏 (1965—), 男, 教授, 主要研究方向: 智能网络化电子引导系统、交通信息控制技术和电力系统计算机控制技术。  
E-mail: zhangyp@mail.ljztu.cn

## 1 移动闭塞

移动闭塞是相对于固定闭塞而言的，两者的区别在于：前者没有固定划分的闭塞分区，其闭塞分区随着列车的移动而不断移动，而后者采用轨道电路、计轴等方式将线路划分成固定的闭塞分区；前者的列车定位较精确，而后者以固定闭塞分区的占用定位列车；前者车-地传递信息量大，对可靠性的要求更高，而后者车-地传递信息量较小。

### 1.1 移动闭塞列车运行间隔

图 1 为移动闭塞制式下列车运行间隔示意图。

图 1 中， $S_{\text{车}}$  为列车长度； $S_{\text{常}}$  为列车当前速度下的常用制动距离； $\Delta S$  为列车 2 尾部防护点到列车 1 当前速度下常用制动停车点的距离； $S_{\text{防}}$  为列车 2 在列车 1 当前速度下的尾部安全防护距离。

图 1 中，假设列车 1 与列车 2 的长度相同。那么，可得列车运行间隔<sup>[3]</sup>为

$$L = S_{\text{车}} + S_{\text{常}} + \Delta S + S_{\text{防}}, \quad (1)$$

当  $\Delta S=0$  时，列车最小运行间隔为

$$L_{\min} = S_{\text{车}} + S_{\text{常}} + S_{\text{防}}. \quad (2)$$

也就是说，在移动闭塞情况下，当列车不超速时，前后两列车的最小运行间隔为  $L_{\min}$ 。即在移动闭塞情况下，当列车不超速，同时两站之间的距离大于列车最小运行间隔，两站之间就可以允许两列或两列以上的列车同时运行而不发生碰撞。

### 1.2 移动闭塞列车运行间隔模式

在移动闭塞情况下，列车的实际追踪运行存在 3 种模式。

1) “撞硬墙”模式：当两车之间运行间隔小于或等于最小运行间隔时，追踪列车认为前行列车处于停车状态，此时前行列车认为是“硬墙”，追踪列车不能冲撞它，故只能选择适当的减速度制动，直至停车。

2) “撞软墙”模式：当两车之间运行间隔小于或等于最小运行间隔时，追踪列车不认为前行列车处于停车状态，而是根据地面传来的前行列车的位置信息不断调整自身的运行状态，从而保证不冲撞前车，以达到安全行车的目的。

3) “无墙可撞”模式：前行列车的速度高于追踪列车的速度，当站间距离足够长的时候，追踪列车就“无墙可撞”，此时追踪列车在不超速的情况下，维持原速度或者加速运行，直至需要停车时再制动。

## 2 移动闭塞列车运行间隔控制算法

控制列车间的运行间隔，可有效保证列车运行安全，同时也能够起到提高线路运力的作用。而当列车制动时，控制运行间隔显得尤为重要。

作如下假设：列车当前速度为  $v_0$  (km/h)；线路限速为  $v_x$  (km/h)；列车当前速度的最大紧急制动距离为  $S_{\text{紧急}}$  (m)；列车当前速度的最大常用制动距离为  $S_{\text{最大常用}}$  (m)；移动授权极限能保证的列车制动距离为  $S_{\text{MA}}$  (m)；移动授权极限能保证的列车制动距离与列车当前速度的最大常用制动距离的差值为  $\Delta S_{\text{最大}}$  (m)；列车紧急制动减速度为  $a_{\text{紧急}}$  ( $\text{m/s}^2$ )；列车常用制动减速度为  $a_{\text{常用}}$  ( $\text{m/s}^2$ )；列车超

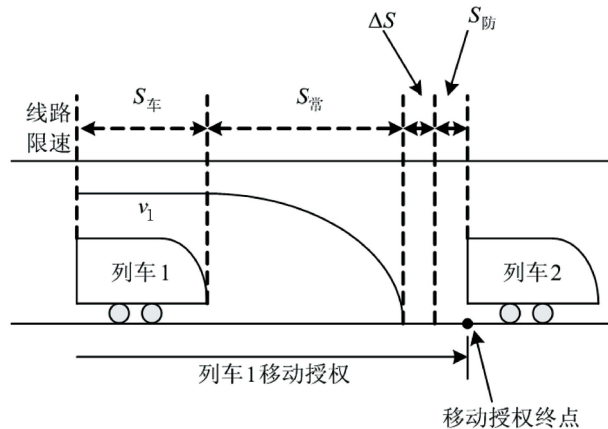


图 1 移动闭塞列车运行间隔示意图

Fig. 1 Schematic diagram of moving block train operation interval

速5 km/h 即触发紧急制动。

## 2.1 “撞硬墙”模式

“撞硬墙”模式下,当两车之间运行间隔小于或等于最小运行间隔时,追踪列车把前行列车当作固定障碍物看待,不再对其位置进行判断,而是采取相应的制动措施。该模式下的列车运行间隔控制算法如下:

- 1) 将  $v_0$  与  $v_x$  进行比较,若  $v_0 > v_x$ ,则执行步骤 2);若  $v_0 \leq v_x$ ,则转步骤 3)。
- 2) 若  $v_x \leq v_0 < v_x + 5$ ,则发出常用制动报警,并转步骤 8);若  $v_0 \geq v_x + 5$ ,则发出紧急制动报警,并转步骤 7)。
- 3) 将  $S_{\text{常用}}$  与  $S_{\text{MA}}$  进行比较,若  $S_{\text{常用}} \leq S_{\text{MA}}$ ,则转步骤 5);若  $S_{\text{常用}} > S_{\text{MA}}$ ,则转步骤 4)。
- 4) 将  $S_{\text{紧急}}$  与  $S_{\text{MA}}$  进行比较,若  $S_{\text{紧急}} < S_{\text{MA}}$ ,则转步骤 6);若  $S_{\text{紧急}} \geq S_{\text{MA}}$ ,则发出紧急制动报警,并转步骤 7)。
- 5) 车以速度  $v_0$  运行  $S_{\text{MA}} - S_{\text{常用}}$  距离后,进行常用制动,转步骤 11)。
- 6) 进行常用制动报警,并根据  $S_{\text{MA}}$  计算列车常用制动减速度,进行常用制动,转步骤 11)。
- 7) 根据  $S_{\text{MA}}$  计算列车紧急制动减速度,进行紧急制动,转步骤 11)。
- 8) 将  $S_{\text{常用}}$  与  $S_{\text{MA}}$  进行比较,若  $S_{\text{常用}} \leq S_{\text{MA}}$ ,则转步骤 9);若  $S_{\text{常用}} > S_{\text{MA}}$ ,则转步骤 4)。
- 9) 计算列车速度为线路限速时的  $S'_{\text{常用}}$ ,以及列车按最小常用制动减速度由  $v_0$  减速到线路限速  $v_x$  所走行的距离  $S'$ ,若  $S'_{\text{常用}} \leq S_{\text{MA}} - S'$ ,则转步骤 10);若  $S'_{\text{常用}} > S_{\text{MA}} - S'$ ,则转步骤 6)。
- 10) 列车进行常用制动,由  $v_0$  减速到线路限速  $v_x$ ,然后转步骤 3)。
- 11) 列车停车。

## 2.2 “撞软墙”模式

“撞软墙”模式下,追踪列车须根据地面传来的移动授权信息,与当前速度所对应的列车运行间隔进行比较,不断调整运行状态,保证运行安全。在移动闭塞制式城市轨道交通中,地面向车载设备提供的移动授权每 7 s 更新一次。因此,该模式下的列车运行间隔控制算法如下:

- 1)  $v_0$  与  $v_x$  进行比较,若  $v_0 \leq v_x$ ,则执行步骤 2);若  $v_0 > v_x$ ,则转步骤 3)。
- 2) 将  $S_{\text{常用}}$  与  $S_{\text{MA}}$  进行比较,若  $S_{\text{常用}} \leq S_{\text{MA}}$ ,则转步骤 4);若  $S_{\text{常用}} > S_{\text{MA}}$ ,则转步骤 5)。
- 3) 若  $v_x \leq v_0 < v_x + 5$ ,则发出常用制动报警,并转步骤 6);若  $v_0 \geq v_x + 5$ ,则发出紧急制动报警,并转步骤 7)。
- 4) 比较  $S_{\text{MA}} - S_{\text{常用}}$  和  $7 \times v_0 / 3.6$ ,若  $S_{\text{MA}} - S_{\text{常用}} \geq 7 \times v_0 / 3.6$ ,则执行步骤 8);若  $S_{\text{MA}} - S_{\text{常用}} < 7 \times v_0 / 3.6$ ,则转步骤 9)。
- 5) 将  $S_{\text{紧急}}$  与  $S_{\text{MA}}$  进行比较,若  $S_{\text{紧急}} < S_{\text{MA}}$ ,则转步骤 10);若  $S_{\text{紧急}} \geq S_{\text{MA}}$ ,则发出紧急制动报警,并转步骤 7)。
- 6) 将  $S_{\text{常用}}$  与  $S_{\text{MA}}$  进行比较,若  $S_{\text{常用}} \leq S_{\text{MA}}$ ,则转步骤 12);若  $S_{\text{常用}} > S_{\text{MA}}$ ,则转步骤 5)。
- 7) 根据  $S_{\text{MA}}$  计算列车紧急制动减速度,进行紧急制动,转步骤 14)。
- 8) 列车以速度  $v_0$  运行 7 s,获得新的移动授权距离,转步骤 2)。
- 9) 列车以速度  $v_0$  运行  $S_{\text{MA}} - S_{\text{常用}}$  距离后,以减速度  $a_{\text{常用}}$  匀减速运行  $[7 - (S_{\text{MA}} - S_{\text{常用}}) \times 3.6 / v_0]$  s,获得新的移动授权距离,转步骤 11)。
- 10) 发出常用制动报警,并根据  $S_{\text{MA}}$  计算列车所需的常用制动减速度,进行常用制动 7 s,获得新的移动授权距离,转步骤 11)。
- 11) 重新计算当前速度下的  $S_{\text{常用}}$  和  $S_{\text{紧急}}$ ,转步骤 2)。
- 12) 计算列车速度为线路限速时的  $S'_{\text{常用}}$ ,以及列车按最小常用制动减速度由  $v_0$  减速到  $v_x$  所走行的距离  $S'$ ,若  $S'_{\text{常用}} \leq S_{\text{MA}} - S'$ ,则转步骤 13);若  $S'_{\text{常用}} > S_{\text{MA}} - S'$ ,则转步骤 5)。
- 13) 列车减速至  $v_x$ ,并计算走行时间  $t$ ,若  $7n \leq t \leq 7(n+1)$  ( $n = 1, 2, \dots$ ),则保存第  $n$  个移动授

权距离（设开始计算时的移动授权为第 0 个），转步骤 11）；若  $t < 7$ ，则列车以速度  $v_x$  运行  $[7 - (v_0 - v_x)/a_{常用}]$  s，获得新的移动授权距离，转步骤 11）。

14) 列车停车。

### 2.3 “无墙可撞”模式

因为追踪列车的速度小于前行列车，所以当两列车之间的间隔足够大、且追踪列车不超速时，追踪列车应该适当加速（最高速度为限速值），为保证安全，同样需要不断地判断前行列车的位置信息。

该模式下的列车运行间隔控制算法如下：

1) 将  $v_0$  与  $v_x$  进行比较，若  $v_0 \leq v_x$ ，则执行步骤 2)；若  $v_0 > v_x$ ，则转步骤 3)。

2) 列车加速至  $v_x$ 。

3) 若  $v_x \leq v_0 < v_x + 5$ ，则发出常用制动报警，并转步骤 4)；若  $v_0 \geq v_x + 5$ ，则发出紧急制动报警，并转步骤 5)。

4) 列车减速至  $v_x$ ，继续行驶。

5) 列车紧急制动至停车。

从理论上讲，在该模式下，列车之间的运行间距永远是安全的，只有当追踪列车提速后，有可能追上前行列车，之后便进入“撞硬墙”或者“撞软墙”模式。但是，考虑到运营效率的要求，“无墙可撞”模式并不可取，因为列车间保持过大的间距会导致列车运行间隔增大，无法发挥移动闭塞的优势。

## 3 移动闭塞列车安全间距

移动闭塞制式下列车安全运行间隔由后续列车的制动性能和前后列车的安全间距决定。图 2 为移动闭塞前后两列车安全间距示意图。由图 2 可知：移动闭塞列车安全间距由列车安全制动距离和前行列车尾部防护距离组成，而列车的安全制动距离又包括有效制动距离以及司机和列车制动反应时间内列车行走的距离。

因此，移动闭塞列车安全间距<sup>[4]</sup>为

$$L = \frac{v^2}{3.6^2 \times 2a} + S_F + S_P, \quad (3)$$

其中， $L$  为列车安全追踪间距（m）； $v$  为列车运行速度（km/h）； $a$  为列车制动减速度（m/s<sup>2</sup>）； $S_F$  为在司机以及列车的反应时间内列车的走行距离（m）； $S_P$  为前行列车尾部防护距离（m）。

司机和列车制动反应时间内，列车速度保持不变，但没有制动力作用于列车，列车处于惰行状态，称为“空走时间”<sup>[5]</sup>。因此，列车在空走时间内的走行距离成为“空走距离”，即

$$S_F = v \times t_k / 3.6, \quad (4)$$

其中， $t_k$  为列车空走时间（s）； $S_F$ ， $v$  定义同式（3）。

列车空走时间  $t_k$  是与线路坡度相关的一次线性函数：

$$t_k = 3.5 - 0.08 \times i, \quad (5)$$

其中， $i$  为两列车所处线路的坡度（‰），上坡为负，下坡为正。

## 4 实例分析

假设列车在平直无岔线路上行驶，列车类型为地铁 A 型车（长 132 m），列车尾部防护距离为

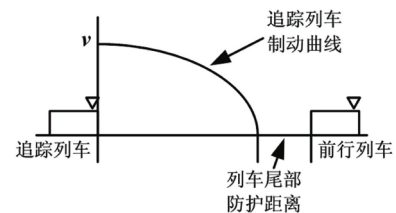


图 2 移动闭塞列车安全间距示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of moving block train operation safety distance

60 m, 列车能保证的常用制动减速度为  $0.9 \text{ m/s}^2$ , 紧急制动减速度为  $1.2 \text{ m/s}^2$ , 前行列车与追踪列车的速度均为  $80 \text{ km/h}$ , 线路限速为  $80 \text{ km/h}$ , 移动授权距离为  $532 \text{ m}$ , 以追踪列车尾部作为距离零点计算, 同时前行列车开始进行常用制动。

根据上述假设进行仿真, 得到列车速度与走行距离的变化关系, 结果如图 3 所示。

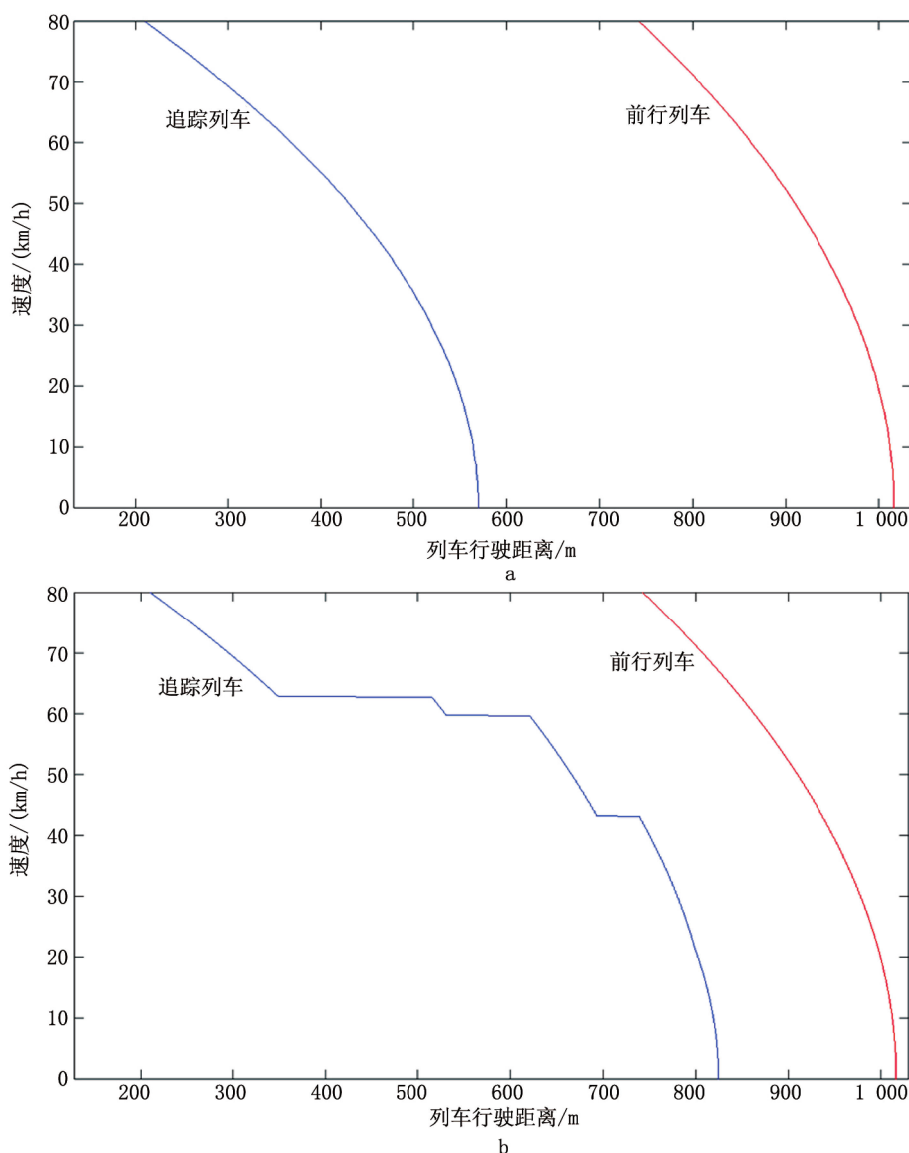


图 3 实例仿真结果

Fig. 3 Simulation of examples

a—“撞硬墙”模式; b—“撞软墙”模式  
a-Mode of “hit a hard wall”; b-Mode of “hit a soft wall”

由图 3 可以看出: 在前行列车进行常用制动停车的情况下, 2 种模式算法均能保证追踪列车安全停车, 从而保证列车运行安全。很明显, 图 3b “撞软墙”模式下追踪列车运行的距离大于图 3a “撞硬墙”模式。在“撞软墙”模式下, 由于追踪列车根据前行列车的运行情况不断调整自身的运行状态, 所以列车速度的变化不平稳。

图 3a 所示“撞硬墙”模式下, 列车的运行状态变化如表 1 所示。

表 1 “撞硬墙”模式下列车运行参数

Tab. 1 Train operation parameters under “hit a hard wall” mode			
列车	列车尾部初始位置/m	减速度/(m/s <sup>2</sup> )	走行距离/m
追踪列车	0	0.69	437.7
前行列车	532	0.90	352.0

由表 1 可以看出：当得知前行列车开始制动，且列车运行间隔小于最小安全追踪运行间隔时，追踪列车便根据移动授权情况，计算适当的减速度进行制动，在制动过程中不对前行列车的位置进行判断，因此，减速度不发生变化，列车运行过程比较平稳，直至列车安全停车。

图 3b 所示“撞软墙”模式下，列车的运行状态变化如表 2 所示。

表 2 “撞软墙”模式下列车运行参数

Tab. 2 Train operation parameters under “hit a soft wall” mode			
列车	列车尾部初始位置/m	减速度/(m/s <sup>2</sup> )	走行距离/m
追踪列车	0	不定	692
前行列车	532	0.91	352

由表 2 可以看出：在“撞软墙”模式下，追踪列车的走行距离远大于“撞硬墙”模式，但其列车减速度并不唯一。从追踪列车的走行距离来看，前后列车均停车后，“撞硬墙”模式下，追踪列车的头部与前车头部之间的距离远远大于列车的长度；而在“撞软墙”模式下，追踪列车的头部与前车头部之间的距离也比列车的长度要大。

图 3b 所示的“撞软墙”模式下追踪列车制动减速度变化如表 3 所示。

由表 3 可以看到：在“撞软墙”模式下，追踪列车的制动减速度随着运行距离的变化而不断变化，主要是由于前行列车的位置信息不断更新，从而使追踪列车获得的移动授权距离不断更新，追踪列车在将获得的移动授权距离进行判断后，调整自身的运行状态，保证列车运行安全。

在“撞软墙”模式下，保证列车安全停车的同时，由于制动过程中走行距离远大于“撞硬墙”模式，因此“撞软墙”模式下的列车运营效率更高。但是，由于在列车制动过程中要对移动授权信息进行判断，所以对列车位置的精确度有很高的要求，同时，对车-地信息传输通道的可靠性、安全性、实时性等也提出了更高的要求，从而对列控系统的要求更加苛刻。

另外，由于在“撞软墙”模式下追踪列车要根据移动授权不断调整自身的运行状态，因此，对列车制动系统、车体性能、线路条件等均有很高的要求，否则，列车的运行安全将会受到极大的影响。

## 5 结论

移动闭塞制式下，设计了 3 种模式下列车区间运行的运行间隔控制算法，并举例对“撞硬墙”模式和“撞软墙”模式下的算法进行了仿真验证。结果表明：“撞硬墙”模式和“撞软墙”模式算法能够保证追踪列车安全停车，从而保证列车的运行安全；同时，“撞硬墙”模式下列车制动走行距离小于“撞软墙”模式下的列车制动走行距离，因此，前者控车时的运营效率比后者控车的运营效率低，“撞软墙”模式在保证列车运行安全的同时也提高了运营效率。此外，“撞软墙”模式对列控系统的可靠性、安全性、列车性能、线路条件等要求更高，可能导致该模式下的列控系统比“撞硬墙”模式下的列控系统更加复杂，造价更高。

表 3 “撞软墙”模式下追踪列车减速度变化情况

Tab. 3 Deceleration changes of tracing train under “hit a soft wall” mode	
里程/m	减速度/(m/s <sup>2</sup> )
132.0~209.8	0
209.8~348.5	0.690
348.5~514.7	0
514.7~531.0	0.910
531.0~620.5	0
620.5~693.1	0.910
693.1~738.5	0
738.5~798.5	0.900
798.5~824.0	0.689



## [参考文献] (References)

- [1] 汪希时. 智能铁路运输系统 ITS-R[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.  
WANG X S. Intelligent transportation system-railway[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004. (in Chinese)
- [2] 路飞, 宋沐民, 田国会. 地铁列车的追踪间隔控制模型与仿真[J]. 信息与控制, 2006, 35 (5): 641-646, 650.  
LU F, SONG M M, TIAN G H. Model and simulation for tracking interval control of subway trains[J]. Information and Control, 2006, 35(5): 641-646, 650. (in Chinese)
- [3] 金娟. 基于移动闭塞原理的列车追踪运行仿真[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.  
JIN J. The tracing operation simulation of trains based on moving automatic block conditions[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [4] 荀径, 宁滨, 郜春海. 列车追踪运行仿真系统的研究与实现[J]. 北京交通大学学报, 2007, 31 (2): 34-37.  
XUN J, NING B, GAO C H. Study and realization of train tracking simulation system[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2007, 31(2): 34-37. (in Chinese)
- [5] 路飞, 宋沐民, 李晓磊. 基于移动闭塞原理的地铁列车追踪运行控制研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17 (8): 1944-1947, 1950.  
LU F, SONG M M, LI X L. Research on subway train following control system under moving block system[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(8): 1944-1947, 1950. (in Chinese)