

问
题
讨
论货物列车制车率的选取
与运行限速的探讨

曹兴贵

(南车戚墅堰机车有限公司, 江苏 常州 213011)



作者简介：曹兴贵（1956-），男，高级工程师（教授级），主要从事铁道内燃机车制动系统设计、制造和新技术研究。

摘 要：通过计算分析，阐述了车轮保持制动过程中不产生滑行的条件，货物列车制车率的选取以及列车最高运行速度、紧急制动距离限值、制动率和轴重间的关系。阐明了轴重提高到 25~30 t 后，制动距离限值不延长，必须降低列车最高运行速度；要保证货物列车最高运行速度，必须延长制动距离限值。

关键词：货物列车；制动；制车率；闸瓦；制动距离

中图分类号：U292.92；U260.35 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-128X(2011)06-0066-04

Brake Rating Selection and Running-speed Limit Investigation of Freight Train

CAO Xing-gui

(CSR Qishuyan Locomotive Co., Ltd., Changzhou, Jiangsu 213011, China)

Abstract: Based on calculation and analysis, the conditions of wheel keeping from sliding in brake, selection of freight train brake rating, and relations between train axle, the highest running speed, distance limit of emergency brake, and brake rating were expounded. It was pointed that the train highest running speed must be reduced when the axle load was increased to 25~30 t without extending brake distance limit, on the other hand, the train brake distance limit must be extending to keep the highest running speed.

Key words: freight train; brake; brake rating; brake-shoe; brake distance

列车制动力的大小直接影响列车制动时机车车辆轮轨间的接触状态和制动距离。列车制动力越大，制动距离越短，但是当制动力超过一定数值时，将引起车轮滑行，反而会使制动距离延长。本文主要探讨车轮保持制动过程中不产生滑行的条件，货物列车制车率的选取以及列车最高运行速度、紧急制动距离限值、制动率和轴重间的关系。

1 制动力与制车率

机车或车辆的总闸瓦压力乘以闸瓦的摩擦系数为机车或车辆的制动力，机车或车辆的总闸瓦压力除以机车或车辆的重量（自重加装载量）称为机车或车辆的制车率。机车车辆制动力总和除以机车车辆重量总和为列车单位重量制动力，机车车辆闸瓦压力总和除以机车车辆重量总和为列车制车率。在列车制车率不变的情况下，改变闸瓦的摩擦系数，列车单位重量制动力就会随之改变，列车制动距离也随之改变。因此

可用制车率来衡量列车的制动能力，也可用列车单位重量制动力来衡量列车的制动能力。

2 制动力与轮轨粘着力

列车只有受到与行驶方向相反的外力作用时才能把行驶速度降低直至停车。由于空气阻力和列车的滚动阻力很小，所以这个外力基本上由轮轨间粘着力提供。司机推制动阀手柄到制动区或紧急制动位产生轮瓦摩擦力矩时，轮轨制动力矩与轮瓦摩擦力矩的方向相反，在不计空气阻力、滚动阻力和车轮本身的惯性力时，轮轨制动力与轮瓦摩擦力的关系见图1。

3 车轮保持制动过程中不产生滑行的条件

列车在制动过程中，当车轮与闸瓦之间的摩擦力大于轮轨间的粘着力时，车轮就会被闸瓦抱死，车轮就要从滚动状态进入滑动状态，即产生滑行。

车轮产生滑行时，制动力不再是轮瓦间的摩擦力，而是轮轨间的滑动摩擦力，这就使制动力急剧下降，导致制动时间和制动距离相应延长，并产生车轮的擦

收稿日期：2011-05-31

伤。

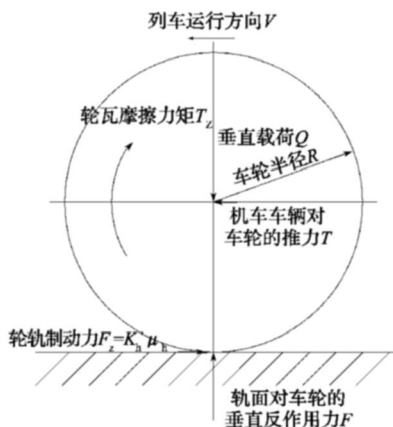


图1 制动时车轮的受力情况

由图1中力矩平衡可得单个轮对受力关系：

$$K_h \mu_h = \mu F = \mu Q$$

式中： K_h 为单个轮对换算闸瓦压力； μ_h 为列车换算闸瓦摩擦系数； μ 为轮轨制动粘着系数； F 为钢管对车轮的反作用力； Q 为轴重。

全列车为：

$$K_h \mu_h = \mu \Sigma F = \mu (P + G)$$

即 $\theta_h = \mu / \mu_h$

式中： K_h 为列车换算闸瓦压力； P 为机车重量； G 为牵引重量； θ_h 为列车换算制动率， $K_h / (P + G)$ 。

从上式关系可得，要保证制动时车轮不滑行，制动率最大不得超过轮轨制动粘着系数与列车换算闸瓦摩擦系数的比值。

如列车最高运行速度90 km/h，采用高磨合成闸瓦，换算闸瓦摩擦系数按下式计算：

$$\mu_h = 0.322(v + 150) / (2v + 150)$$

式中： v 为列车瞬时运行速度，km/h。

并按距离等效摩擦系数计算公式：

$$\mu_{hs} = (v_0^2 - v_z^2) / \Sigma [(v_1^2 - v_2^2) / \mu_h]$$

式中： v_0 为列车制动初速度，km/h； v_z 为列车制动后的末速度，km/h； v_1 、 v_2 分别为列车速度间隔的初速度和末速度，km/h。

计算得列车最高运行速度90 km/h，一次停车高磨合成闸瓦距离等效列车换算闸瓦摩擦系数 $\mu_{hs} = 0.25212$ 。

若采用高磷铸铁闸瓦，换算闸瓦摩擦系数按下式计算：

$$\mu_h = 0.372(17v + 100) / (60v + 100) + 0.0012(120 - v_0)$$

计算得列车最高运行速度90 km/h，一次停车高磷铸铁闸瓦距离等效列车换算闸瓦摩擦系数为0.18218。

若列车最高运行速度提高到120 km/h，一次停车距离等效列车换算闸瓦摩擦系数，高磨合成闸瓦为 $\mu_{hs} = 0.24094$ ，高磷铸铁闸瓦为 $\mu_{hs} = 0.15245$ 。

轮轨制动粘着系数按下式计算：

$$\text{干燥轨面} \mu = 0.0624 + 45.60 / (260 + v)$$

$$\text{潮湿轨面} \mu = 0.0405 + 13.55 / (120 + v)$$

并按距离等效制动粘着系数计算公式：

$$\mu_s = (v_0^2 - v_z^2) / \Sigma [(v_1^2 - v_2^2) / \mu]$$

计算得一次停车的距离等效轮轨制动粘着系数：列车最高运行速度90 km/h，干燥轨面为0.20517，潮湿轨面为0.11623；列车最高运行速度120 km/h，干燥轨面为0.19687，潮湿轨面为0.10882。

由 μ_s 和 μ_{hs} 得列车最高运行速度90 km/h和120 km/h，一次停车列车换算制动率见表1。

表1 一次停车列车换算制动率

列车最高运行速度 / km · h ⁻¹	闸瓦	轨面状态	列车换算制动率 / %
90	高磨合成	干燥	81.38
90	高磨合成	潮湿	46.10
90	高磷铸铁	干燥	112.62
90	高磷铸铁	潮湿	63.80
120	高磨合成	干燥	81.71
120	高磨合成	潮湿	45.16
120	高磷铸铁	干燥	129.13
120	高磷铸铁	潮湿	71.38

从表1中可看出，列车最高运行速度90 km/h，要保证制动时车轮不滑行，则：采用高磨合成闸瓦，在干燥轨面条件下，最大列车换算制动率不得超过81.38%，在潮湿的轨面条件下，最大列车换算制动率不得超过46.10%；采用高磷铸铁闸瓦，在干燥轨面条件下，最大列车换算制动率不得超过112.62%，在潮湿轨面条件下，最大列车换算制动率不得超过63.80%。

列车最高运行速度120 km/h，要保证制动时车轮不滑行，则：采用高磨合成闸瓦，在干燥轨面条件下，最大列车换算制动率不得超过81.71%，在潮湿轨面条件下，最大列车换算制动率不得超过45.16%；采用高磷铸铁闸瓦，在干燥轨面条件下，最大列车换算制动率不得超过129.13%，在潮湿轨面条件下，最大列车换算制动率不得超过71.38%。

由上可知，干燥轨面条件下的列车换算制动率接近潮湿轨面条件下的列车换算制动率的2倍。为了保证安全，不管是什么环境条件，都必须满足制动距离规定要求，因此建议采用湿轨粘着条件来确定列车换算制动率。

4 制动距离与制动率

行驶中的列车，从司机将制动阀手柄推到制动区或紧急制动位开始，到列车完全停住，列车所移动的距离，称为制动距离。用制动距离衡量列车的制动性能是最直观的，也是最容易被人们认识和接受的性能指标。

4.1 制动距离规定

货物列车紧急制动距离：

铁路主要技术政策规定运行速度90 km/h，小于等于800 m；运行速度120 km/h，小于等于1 100 m。25 t轴

重运行速度 120 km/h, 小于等于 1 400 m^[1];

铁路技术管理规程规定最高运行速度 90 km/h, 紧急制动距离限值 800 m; 最高运行速度 120 km/h, 紧急制动距离限值 1 400 m^[2]。

为了保证列车运行的安全, 防止行车事故的发生, 必须确保列车能在规定的制动距离内停车, 如果不能满足制动距离要求, 必须限速行驶。

4.2 制动距离计算方法

传统的列车制动距离计算方法是把制动距离 S_z 分为空走距离 S_k 和有效制动距离 S_e , 即:

$$S_z = S_k + S_e$$

空走距离 S_k 按空走时间内列车作等速运行计算, 并按下式计算:

$$S_k = v_0 t_k / 3.6$$

式中: v_0 为制动初速度, km/h; t_k 为空走时间, s。

有效制动距离按下式计算:

$$S_e = \sum 4.17 (v_1^2 - v_2^2) / (1000\theta_h \beta_c \mu_h + \omega_0 + i_j)$$

式中: β_c 为常用制动系数, 常用制动时根据列车管减压量按《列车牵引计算规程》表 4 查取, 紧急制动时取 $\beta_c = 1$; ω_0 为列车运行单位基本阻力, N/kN; i_j 为制动地段的加算坡度千分数。

4.3 由制动距离推算制动率

假定列车最高运行速度为 90 km/h, 并取紧急制动距离为 800 m。

根据滚动轴承货车运行单位基本阻力公式:

$$\omega_0 = 0.92 + 0.0048v + 0.000125v^2$$

和距离等效运行单位基本阻力公式:

$$\omega_{0s} = (v_0^2 - v_2^2) / \sum [(v_1^2 - v_2^2) / \omega_0]$$

计算得到货运列车距离等效运行单位基本阻力 ω_{0s} 为 1.613 2 N/kN (未计入机车)。

取 $i_j = 0$ 。

空走时间用公式计算:

$$t_k = (1.6 + 0.065n) (1 - 0.028i_j)$$

其中牵引车辆数取 $n = 85$, 计算得 $t_k = 7.1$ s。

将参数代入公式:

$$S_z = S_k + S_e$$

计算得采用高磨合成闸瓦得 $\theta_h = 20.88\%$, 采用高磷铸铁闸瓦得 $\theta_h = 28.90\%$ 。

若列车最高运行速度提高到 120 km/h, 紧急制动距离限值按 1 100 m, 采用高磨合成闸瓦得 $\theta_h = 28.05\%$, 采用高磷铸铁闸瓦得 $\theta_h = 44.32\%$; 紧急制动距离限值按 1 400 m, 采用高磨合成闸瓦得 $\theta_h = 20.60\%$, 采用高磷铸铁闸瓦得 $\theta_h = 27.25\%$ 。

由上可知: 列车最高运行速度 90 km/h, 在平道上, 为保证紧急制动距离不超过 800 m, 采用高磨合成闸瓦, 列车换算制动率不得小于 20.88%, 采用高磷铸铁闸瓦, 列车换算制动率不得小于 28.90%;

列车最高运行速度 120 km/h, 在平道上, 为保证紧

急制动距离不超过 1 100 m, 采用高磨合成闸瓦, 列车换算制动率不得小于 28.05%, 采用高磷铸铁闸瓦, 列车换算制动率不得小于 44.32%;

列车最高运行速度 120 km/h, 在平道上, 为保证紧急制动距离不超过 1 400 m, 采用高磨合成闸瓦, 列车换算制动率不得小于 20.60%, 采用高磷铸铁闸瓦, 列车换算制动率不得小于 27.25%。

5 平均制动减速度与制动率

对于货物列车, 容许的平均制动减速度取 $0.06g \sim 0.07g$ 较为适宜^[3]。

有效制动距离与平均制动减速度的关系:

$$S_e = v_{\max}^2 / (25.92 a_b)$$

式中: a_b 为货物列车平均减速度。

假如列车最高运行速度为 90 km/h, 取 a_b 为 $0.06g \sim 0.07g$, 计算得一次停车 S_e 为 455.5~531.5 m。

也取 $i_j = 0$, 牵引车辆数 $n = 85$, 计算得一次停车列车换算制动率:

采用高磨合成闸瓦 $\theta_h = 24.57\% \sim 28.77\%$

采用高磷铸铁闸瓦 $\theta_h = 34.00\% \sim 39.81\%$

若列车最高运行速度提高到 120 km/h, 也取 $a_b = 0.06g \sim 0.07g$, $i_j = 0$, 牵引车辆数 $n = 85$, 计算得一次停车列车换算制动率:

采用高磨合成闸瓦 $\theta_h = 25.55\% \sim 29.95\%$

采用高磷铸铁闸瓦 $\theta_h = 40.39\% \sim 47.34\%$

6 轴制动功率与制动率

要使高速运行的列车减速或停住, 就要对列车施加与行驶方向相反的制动力。施加制动力的过程就是把列车的动能通过轮瓦间的摩擦转化成热能消耗掉, 使列车减速或停下来。为了防止制动时轮瓦产生热裂, 并获得最佳的车轮和闸瓦的使用寿命, 须控制轴平均制动功率不得超过容许值。

轴平均制动功率、轴重、制动初速度和有效制动距离之间的关系如下式:

$$N = Q g v_0 (4.17 v_0^2 / S_e - \omega_0 - i_j) / 7200$$

式中: N 为轴平均制动功率, kW; Q 为轴重, t; g 为重力加速度, m/s²。

为简化计算, 舍去式中列车运行单位基本阻力 ω_0 和制动地段的加算坡度 i_j 后, 得

$$N = Q v_0^3 / (176 S_e)$$

在确定了适宜的轴平均制动功率后, 求出有效制动距离, 从而推算出容许的列车换算制动率。

7 列车最高运行速度、紧急制动距离限值、制动率和轴重间的关系

根据 4.3 条计算, 取每辆重车的换算闸瓦压力 $K_h = 250$ kN^[4], 并按四轴车计算得表 2。

表2 列车最高运行速度、紧急制动距离限值、制动率和轴重的关系

列车最高运行速度/ $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	闸瓦	紧急制动距离限值/m	列车换算制动率/%	轴重/t
90	高磨合成	800	≥ 20.88	≤ 30.54
90	高磷铸铁	800	≥ 28.90	≤ 22.07
120	高磨合成	1 100	≥ 28.05	≤ 22.74
120	高磷铸铁	1 100	≥ 44.32	≤ 14.39
120	高磨合成	1 400	≥ 20.60	≤ 30.95
120	高磷铸铁	1 400	≥ 27.25	≤ 23.40

从表2可看出：列车最高运行速度90 km/h，轴重大于25 t，采用高磷铸铁闸瓦，已不能满足紧急制动距离800 m限值要求，采用高磨合成闸瓦，制动安全距离余量很小。列车最高运行速度120 km/h，轴重大于23 t，2种闸瓦都不能满足紧急制动距离1 100 m限值要求。紧急制动距离延长至1 400 m，轴重大于25 t，采用高磷铸铁闸瓦，也不能满足紧急制动距离延长后的限值要求，采用高磨合成闸瓦，制动安全距离余量也很小。

表2中列车换算制动率比保持制动过程中车轮不产生滑行容许的制动率还小很多。

8 结语

通过以上计算分析可知：

采用高磷铸铁闸瓦，其制动率已不能满足制动距离限值要求，必须采用更高摩擦系数的闸瓦。

列车运行速度和轴重提高，在轮轨制动粘着限制容许范围内，应适当提高货物列车的制动率以缩短制动距离。

轴重提高到25~30 t后，如果制动距离限值不延长，必须降低列车最高运行速度，如果要保证货物列车的最高运行速度，必须延长制动距离限值。

参考文献：

- [1] 中华人民共和国铁道部. 铁路主要技术政策 [M]. 北京：中国铁道出版社，2004.
- [2] 中华人民共和国铁道部. 铁路技术管理规程 [M]. 北京：中国铁道出版社，2006.
- [3] 黄问盈，杨宁清，黄民. 我国铁道列车紧急制动距离限值标准的探讨 [J]. 中国铁道科学，2003，24(5).
- [4] 中华人民共和国铁道部. 列车牵引计算规程 [M]. 北京：铁道部标准计量研究所，1999.

(上接第65页)

家在城轨列车空调上也很少应用变频技术。

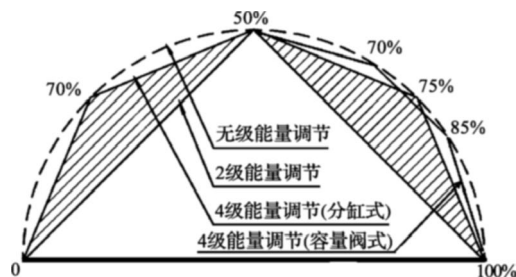


图5 能量调节的级数与节能潜力的关系示意图

注：把半圆面积表示无级能量调节（变频调节）节约能量的理论基数值，则容量阀式对应的多边形面积表示其理论节能值；分缸式多边形对应的面积表示其理论节能值；三角形表示二级调节可能达到的节能值；半圆周的直径表示能等级调节的节能值，此面积为零，即无节能作用。

5 结语

通过上述几类变级技术对比与分析，发现4、5号线之所以能灵活迅速地进行温度调节，适应乘客需求，

并且具有较好的节能效果，有如下2个主要原因：

① 地铁列车需要频繁开关车门，而广州地铁4、5号线的容量阀式4级能量调节由于最低级别为50%等级，因此无论当时空调处理何种工况下，均能够迅速地平衡调节客室温度，达到UIC553标准温度调节需求。

② 广州地铁4、5号线4级能量调节通过旁通阀进行卸载，较平滑地调节客室温度，降低了压缩机的负载，从而起到合理有效的节能效果。

综上所述，要解决当前城轨车辆空调温度调节的舒适性及节能问题，应该综合考虑到列车运行的环境情况、列车温度调节的响应速度，再对应选择合适的节能模式机型，才能取得良好的运行效果。

参考文献：

- [1] 南车四方机车车辆股份有限公司. 广州市轨道交通KGC35-1T2说明书 [M]. 青岛：南车四方机车车辆股份有限公司，2006.
- [2] 上海科泰运输制冷设备有限公司. 轨道交通列车节能型空调简介 [M]. 上海：上海科泰运输制冷设备有限公司，2011.