

文章编号: 1005—0523(2005)04—0034—05

列车制动荷载的离散分析及应用

陈丹华, 刘建村

(华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 列车制动过程中, 车轮荷载作为移动荷载作用于线路和桥梁结构. 若要深入研究移动车轮产生的制动力时程对线桥结构的影响, 必须将其离散到钢轨各节点处, 即将轮对的制动力时程转换为轨面节点的制动力时程. 文中阐述了列车制动力的这种离散分析方法, 以及它在制动力有效系数研究上的应用.

关键词: 铁路桥梁与线路; 制动力; 离散; 有效系数

中图分类号: U441.7

文献标识码: A

列车制动过程中, 车轮荷载作为移动荷载作用于线路和桥梁结构. 制动过程是一个非常复杂的动态过程, 移动轮对产生的制动力不仅与时间、位置有关, 还与车轮速度、加速度和列车编组等多个参数有关^[1-3]. 直接采用列车轮对制动力研究对于线桥结构各方面的影响, 将是十分困难的.

如果将列车轮对产生的制动力分散到轨面各点处, 也就是把列车轮对的制动力时程转换为钢轨轨面各点所受的制动力时程, 再研究轨面节点制动力对线桥结构的影响, 无疑简化了制动力荷载下的结构计算分析.

1 问题的定性分析

列车车体制动力是通过各个轮对与钢轨间相互作用产生的, 实际上列车制动力在轨面上的分布应是多点分布.

由前述, 列车移动车轮产生制动力的大小与其位置、速度等紧密相关. 在列车制动过程中, 各个车体的速度都不会完全相同, 而且列车车体是逐渐进入桥跨的, 各车轮与钢轨轨面间的相对位置不断变化, 这就使各车轮传给轨面制动力的大小有所不

同.

故列车制动力应是多点作用于轨面的不均匀荷载.

2 列车轮对制动力

文献[2] 设列车由 n 个车体组成, 以编组列车的每个车体单元为隔离体, 并以每个车体的纵向位移作为一个独立自由度, 得到由 n 个微分方程组成的运动方程组.

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = -N_1(q_1, \dot{q}_1) - W_1(x_1, \dot{x}_1) - B_1(\dot{x}_1, t) \\ m_2 \ddot{x}_2 = -N_1(q_1, \dot{q}_1) - N_2(q_2, \dot{q}_2) - W_2(x_2, \dot{x}_2) - B_2(\dot{x}_2, t) \\ \dots\dots\dots \\ m_i \ddot{x}_i = -N_{i-1}(q_{i-1}, \dot{q}_{i-1}) - N_i(q_i, \dot{q}_i) - W_i(x_i, \dot{x}_i) - B_i(\dot{x}_i, t) \\ \dots\dots\dots \\ m_n \ddot{x}_n = -N_{n-1}(q_{n-1}, \dot{q}_{n-1}) - W_n(x_n, \dot{x}_n) - B_n(\dot{x}_n, t) \end{cases} \quad (1)$$

式中, t 为制动中任一时刻; m_i 是序号为 i 的单元车体的质量; $\dot{x}_i$ 、 $\ddot{x}_i$ 、 $\dot{x}_i$ 分别是单元 i 的绝对位移、绝对速度和绝对加速度; N_i 为相邻车体之间的车钩力, 是两车体间相对位移 q_i 和相对速度 $\dot{q}_i$ 的函数;

收稿日期: 2004—11—11

作者简介: 陈丹华(1973—)女, 辽宁省丹东人, 讲师.

B_i 是 i 车体的单元制动力,是时间和速度的函数; W_i 是 i 车体的单元阻力,是速度和位移的函数.

用数值积分方法求解该运动方程组,可得到制动过程中任一时刻单元车体的制动力 $B_i(t)$ 和位移 $X_i(t)$,继而根据车体特定的制动系统,得到各轮对制动力时程 $b_{jl}(t)$ 和位移时程 $x_{jl}(t)$.

3 列车轮对制动力在轨面节点上的离散

3.1 离散方法

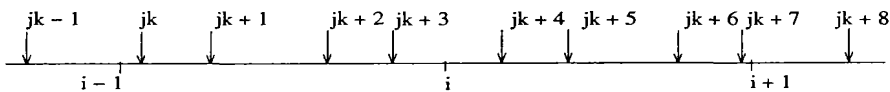


图 1 列车制动 t 时刻各轮对与轨面节点的相对位置示例

符号 i 表示轨面节点编号,对应的水平坐标为 x_i ;符号 $j_l(l=k-1, k+1, \dots, k+i)$ 代表车轮的轮对编号, t 时刻对应的水平坐标为 $x_{jl}(t)$. 轮对 j_l 产生的制动力荷载为 $b_{jl}(t)$. 利用线性插值原理,将某轮对制动力离散到所属区间段的左右节点上去(而忽略对其它区间段轨面节点的影响),再将各区间段分配至同一节点上的制动力值累加起来,就得到该节点制动力.以图 1 为例,假定当轮对 $j_k \sim j_{k+3}$ 出现在轨面区间 $[x_{i-1}, x_i]$ 内, $j_{k+4} \sim j_{k+7}$ 出现在轨面区间 $[x_i, x_{i+1}]$ 内时, i 节点将分配到节点制动力 $F_i(t)$:

$$F_i(t) = \sum_{l=k}^{k+3} b_{jl}(t) \frac{x_{jl}(t) - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} + \sum_{l=k+4}^{k+7} b_{jl}(t) \frac{x_{i+1} - x_{jl}(t)}{x_{i+1} - x_i} \tag{2}$$

上式需满足条件 $x_{j_{k-1}}(t) \leq x_{i-1} \leq x_{j_k}(t)$, $x_{j_{k+3}}(t) \leq x_i \leq x_{j_{k+4}}(t)$, $x_{j_{k+7}}(t) \leq x_{i+1} \leq x_{j_{k+8}}(t)$.

给定时间步长 ΔT ,在 $t + \Delta T$ 时刻, $[x_{i-1}, x_i]$, $[x_i, x_{i+1}]$ 区间内轮对的数量、位置以及每个轮对制动力 $b_{jl}(t)$ 的数值都发生了变化,计算程序将记录下这些变化.按相同方法可求出 i 节点在 $t + \Delta T$ 时刻所分配到的制动力.当一列车各个轮对依次驶过区间 $[i-1, i+1]$ 时(计算时间历程从列车制动开始到停车瞬间),按照(2)式同样方法可求得 i 节点

在线桥结构的钢轨单元上布置数个时程转换节点,设列车自左向右制动入桥,以左方桥台台尾为水平坐标原点.对于制动过程中的任一时刻 t ,计算出移动车轮在轨面的运行位置,分析比较各车轮与轨面各节点间的相互位置关系.

在所有时间步长内所受的制动力 $F_i(t)$,即得到节点 i 的制动力时程.

同理可得 $i-1$ 、 $i+1$ 等其它节点的制动力时程.

显然,钢轨节点划分得越密,越能真实地反映连续移动轮对的作用效果.本文计算中桥外路基和梁跨上方的轨面节点间距取 2 m.

3.2 轮对制动力向节点制动力转换程序框图

此程序是在求解列车运动微分方程组(1)的仿真程序基础上编制的,图 2 是程序的主框图.计算时首先试算出使列车第一轴轮位制动停止于右台台尾处所需的制动初始位移 x_0 ,继而运行此转换程序,得出节点制动力时程.程序计算以车体速度 $v \leq \epsilon$ 为判定条件,即当车体速度接近于零时,制动过程结束.

3.3 节点制动力时程曲线的分析

图 3 所示为 1 跨 16 m 梁的线桥结构整体承受列车制动力的计算模型.其中梁体单元的位置取实际梁体的中性轴;为了反映梁的弯曲效应,在中性轴以上梁高以及支座处中性轴以下梁体均设置了刚臂;钢轨与梁体间的道床传力作用采用离散设置的剪力杆模拟.图 3 中两侧桥头路基单元、梁体单元及其上的道床单元的节点编号未画出,仅示出左、右桥台台尾范围内的轨面节点编号.

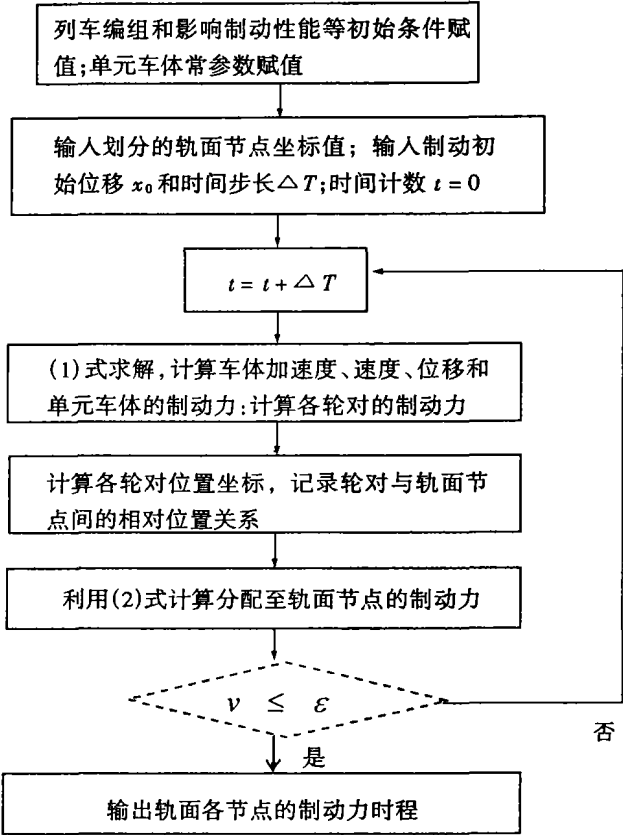


图 2 轮对制动力向节点制动力转换程序框图

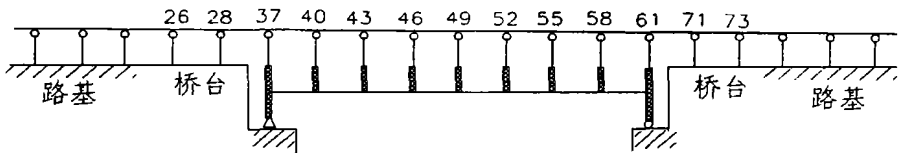


图 3 桥跨范围内的轨面节点编号(1跨 16m 梁)

列车编组为 1 台东风 4 型内燃机车牵引 1 辆 C62 型重车;列车自左方路基远处开始刹车,且机车第一轮对停于右方桥台台尾 73 节点处.

图 4 中给出了图 3 中 26、37、49、55、61 和 73 节点制动力时程曲线.

图中的尖角与轨面节点间距的取值、进入轨面单元内的车轮情况有关.如果节点间距取得小些,尖角就会消失.

在制动过程的每一时间步长内,将桥跨范围内轨面各个节点的制动力值累加起来,就得到各节点制动力之和时程曲线,即全桥制动力时程曲线,它对应于列车从制动开始到停车瞬间的时间历程.图 5 是桥跨范围内 26~73 轨面节点制动力之和时程曲线,该曲线呈阶梯状上升.这种形状反映了各轮对逐一进入桥跨范围的事实.1~2,3~4,5~6 台

阶分别反映了 DF-4 型机车前后转向架的各 3 个制动轮对和 1 节 C62 重车前转向架的 2 个轮对进入桥跨范围的情况.同时,它也间接验证了节点制动力时程计算的正确性.图中自制动开始到停车瞬间,每一个台阶曲线上升的陡度在逐渐变大,这与闸瓦摩擦系数随制动时间增长的规律相一致.

4 节点制动力时程的应用

本文着重讨论节点制动力时程在制动力有效系数静力求解上的应用.由桥梁墩台承受的制动力为有效制动力,有效制动力与列车轮对制动力的比值称为有效系数.

图 6 为制动力有效系数的静力计算模型.图中以 3 跨 16 m 梁为例,桥长 L 为 56 m,其中两侧桥台纵

向长度各取 4 m; 两旁路基延伸长度取 70 m; 轨面节点间距取 2 m; 桥跨范围的轨面节点个数为 29 个。

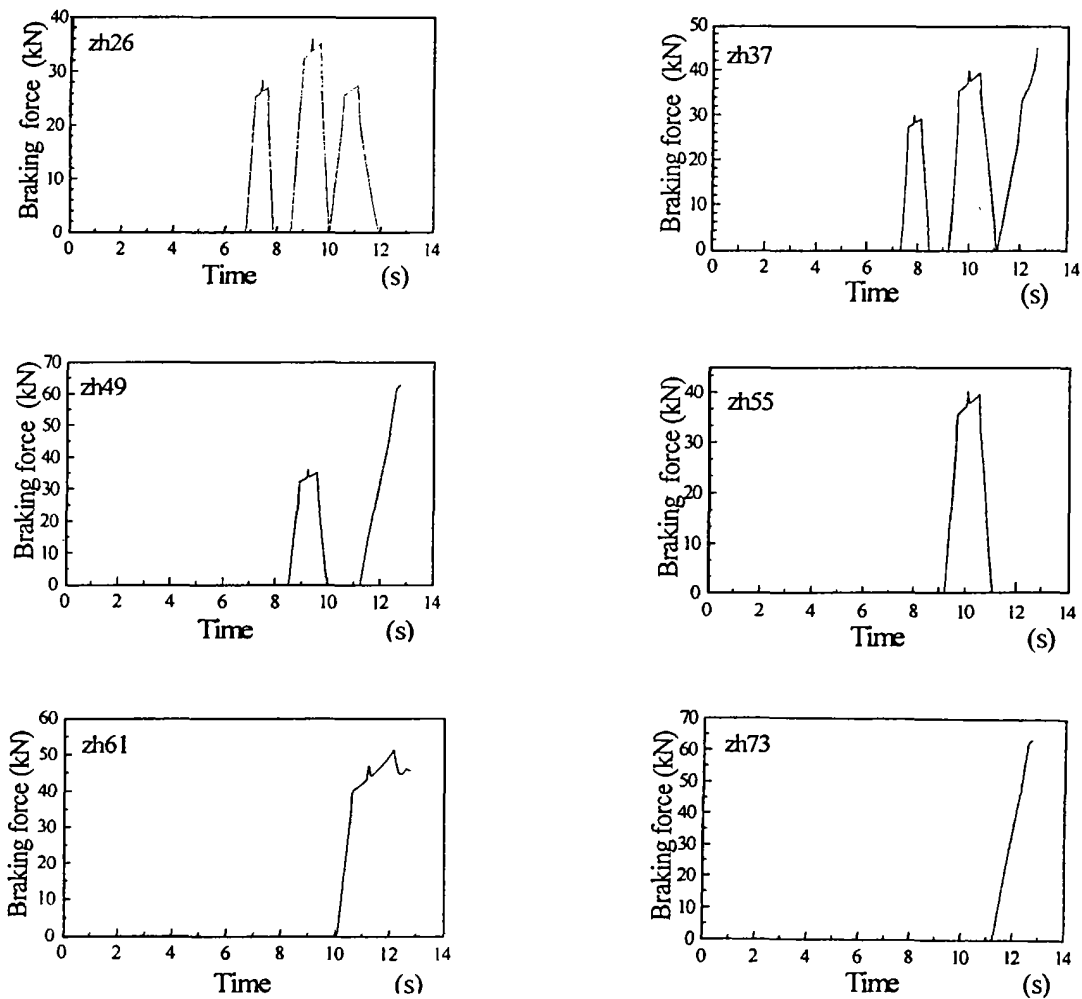


图 4 节点制动力时程曲线(26、37、49、55、61、73 节点)

利用上述离散方法, 将轮对制动力时程转换为轨面各节点的制动力时程, 在节点制动力时程曲线上取对应于列车制动停车瞬间时刻的制动力数值, 作为有效系数静力计算的外荷载。

列车编组为 1 台 DF-4 型内燃机车牵引 3 辆 C62 型重车, 经计算得出列车制动总时间为 13.66 秒; 桥跨范围内轨面各节点在停车瞬间时刻的制动力值, 列于表 1 中。

表 1 轨面各节点在停车瞬间的制动力数值

节点编号	制动力 /kN	节点编号	制动力 /kN	节点编号	制动力 /kN	节点编号	制动力 /kN	节点编号	制动力 /kN
1	44.10	7	25.05	13	17.02	19	43.79	25	0.00
2	18.22	8	43.98	14	38.83	20	6.28	26	0.00
3	0.00	9	7.46	15	37.31	21	46.00	27	46.00
4	4.79	10	0.00	16	0.00	22	63.25	28	63.25
5	44.10	11	15.49	17	0.00	23	63.25	29	63.25
6	27.80	12	43.98	18	26.08	24	0.00		

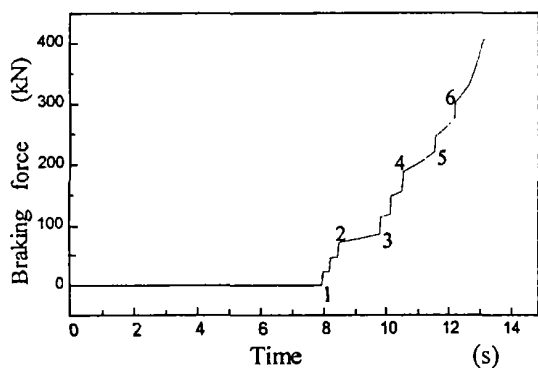


图5 全桥制动力时程曲线 (1跨 16m 梁)

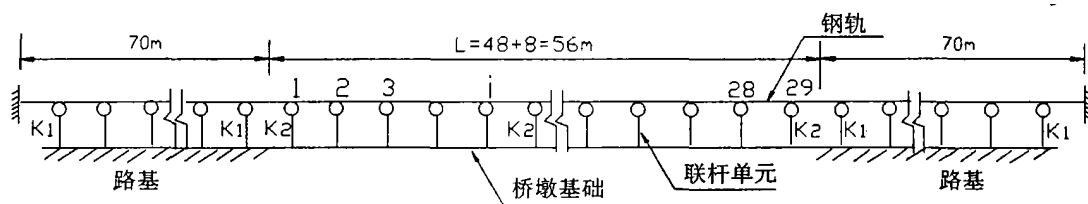
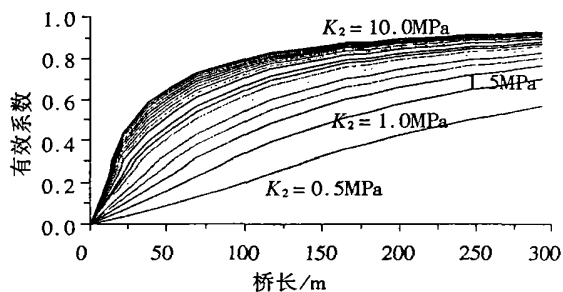


图6 桥跨范围内的轨面节点编号 (3孔 16m 梁)

图7 有效系数 ζ 随桥长 L 和综合刚度 K_2 变化曲线

研究的桥长范围为 40 ~ 296 m, 对应于 2 孔 16 m ~ 18 孔 16 m 简支梁桥; 综合刚度取值范围为 0.5 ~ 10.0 MPa, 对应于 20 种桥墩刚度. 对桥长和综合刚度的所有不同组合情况的有效系数进行了计算, 曲线显示的规律性较好, 计算结果的正确性可由文献[4]得到验证. 图7示出了 ζ 随桥长和综合刚度变化的曲线.

需要提及的是, 除上述应用, 节点制动力时程在线桥结构承受制动力的动力分析方面具有更重要的意义. 另外, 节点制动力时程与轮对竖向力时程相结合, 可用于线桥结构承受制挠力的动力响应分析, 它对桥上无缝线路的稳定性研究有重要的价值.

5 结束语

图6所示的联杆单元抗弯截面特性可通过纵向刚度值 K_1 、 K_2 换算求出. K_1 是路基范围内的道床结构纵向阻力系数, 由文献[4~6], 取为 15 MPa. K_2 是桥梁范围内道床结构与桥墩的综合刚度指标, 其物理意义也是纵向每延米刚度, 将道床与桥墩按串联结构计算, 得出 K_2 的变化范围是 0.5 ~ 10.0 MPa.

采用有限元分析软件, 求解各杆件单元的内力. 在求得传出桥跨范围的制动力值 (即由两侧路基承受的制动力) 后, 即可得到由桥梁墩台承受的有效制动力, 进而求出制动力有效系数 ζ .

以制动列车的动态仿真为基础, 编制了轮对制动力向轨面节点制动力的转换程序; 得出的全桥制动力时程曲线间接验证了节点制动力计算的正确性. 探讨了节点制动力在有效系数研究方面的应用, 通过计算, 得到了有效系数曲线. 列车制动力的离散是研究制动力对线桥结构行为影响的有效的分析方法, 轨面节点制动力时程将是线—桥结构动力响应分析的基础. 离散分析方法简化了连续移动荷载下的结构分析和计算, 对于一般工程结构而言, 该方法具有普遍的应用意义.

参考文献:

- [1] 李宏年, 陈丹华. PC 简支梁桥墩承受列车制动力的动力分析[J]. 工程力学增刊, 1999, (增): 707—711.
- [2] 李宏年, 冯 东. 铁路桥梁最大轨面制动力的动态研究[J]. 铁道学报, 1994, 16(2): 112—117.
- [3] 李宏年. 列车制动力荷载及对桥梁作用机理的研究[D]. 北京: 北方交通大学, 2001. 3.
- [4] 李宏年, 朱 晔, 于新杰. PC 简支梁铁路桥制动力有效系数的研究[J]. 土木工程学报, 2000, 33(3): 22—26.
- [5] 铁道部工务局. 铁路工务技术手册—轨道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1993.
- [6] 李宏年, 陈丹华. 弹条 I 型轨道扣件动力参数的试验研究[J]. 北方交通大学学报, 1999, 23(4): 87—90.

(下转第 48 页)

[3] 王秀花. 建筑材料[M]. 北京:机械工业出版社,2003.

[4] 纪建军,邓 涛. 池类结构防水混凝土施工的抗渗控制[J]. 低温建筑技术,2002(2),30~31.

[5] 刘 晔,顾玉新等. 地下防水混凝土结构渗漏的原因与治理方法[J]. 西部探矿工程,2002(6):141~142.

Analysis of Quality Defects and Improving Measures of Waterproof Concrete

DING Yong¹, JIN Jun-yan²

(1.Jiangxi Sanghai Investing and Developing Co., Ltd., nanchang, jiangxi, 330000;2.School of civil engineering and architecture, East China Jiaotong University, nanchang 330013, China)

Abstract: Facing to the quality defects of waterproof concrete, this paper puts forward some specific measures on designing ratio of concrete, setting construction joints, order of casting and concrete curing on the base of principle of waterproof concrete. It will be of great referent value to waterproof concrete construction.

Key Words: waterproof concrete, construction joint, casting, curing

(上接第 38 页)

Disperse Analysis Method and Application of Train Braking Load

CHEN Dan-hua, LIU Jian-cun

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In course of train 's braking, wheel load bring pressure to track and bridge structure qua locomotive load. If studying home braking time history 's influence on structure which is generated by locomotive wheel, we must disperse it on each node of rail surface, namely transforming wheel 's braking force time history into node braking force time history of rail surface. This paper expound this disperse analysis method of train braking force, along with its application to study of braking force effective coefficient.

Key words: braking force; disperse; track and bridge structure; effective coefficient