

文章编号: 1001-8360(2001)02-0081-05

准高速、高速铁路缓和曲线线型选择研究

王 小 文

(广州铁路(集团)公司科学技术研究所, 广东 广州 510600)

摘 要: 采用车辆动态曲线通过理论, 研究了车辆曲线通过安全和舒适度与缓和曲线线型之间的关系, 为准高速、高速铁路缓和曲线线型选择提供了理论依据。

关键词: 准高速铁路; 高速铁路; 车辆动态曲线通过; 安全和舒适; 缓和曲线

中图分类号: U 212 332 **文献标识码:** A

Study on choice of transition curve for quasi-high speed and high speed railway

WANG Xiao-wen

(Science and Technology Research Institute, Guangzhou Railway (Group) Corporation, Guangzhou 510600, China)

Abstract: Based on the theory of vehicle dynamic curving, this paper explores the relation between the shape of transition curve and the safety and comfort of vehicle curve negotiation, and provides theoretical evidence for choice of transition curve in quasi-high speed and high speed railways

Keywords: quasi-high speed railway; high speed railway; vehicle dynamic curving; safety and comfort; transition curve

100 多年来世界各国铁路工作者对缓和曲线的研究一直没有停止过, 提出了很多新型的线型, 还进行了曲线型缓和曲线的试铺工作。普遍接受的观点是普速铁路采用 3 次螺旋缓和曲线即可满足要求, 但是, 准高速铁路和高速铁路是否铺设高次缓和曲线在学术界和工程界存在着争论。

本文采用车辆动态曲线通过理论, 按现行线路设计标准给出两个完整曲线, 一个为准高速车通过 (160 km/h), 另一个为高速车通过 (250 km/h), 选择影响比较大的 6 种缓和曲线, 以 6 个安全和舒适度指标为评价依据, 通过计算机仿真, 研究车辆曲线通过安全和舒适与缓和曲线线型之间的关系, 为准高速、高速铁路缓和曲线线型选择作出评价。

1 车辆动态曲线通过

1.1 缓和曲线几何行为

平面上, 缓和曲线从 ZH 点到 HY 点纵距、偏角、

曲率均要连续变化, 三者中先确定一个, 其余两个随之确定。立面上, 从 ZH 点到 HY 点外轨超高及相应的超高角也要连续变化。为了使列车以均衡速度 V 通过整个缓和曲线范围内均能保持离心力和向心力相等, 要求缓和曲线的平面曲率 k 和立面的外轨超高 h 成比例, 即 $h = 11.8V^2k$, 它将立面超高 h 与平面曲率 k 联系起来。缓和曲线是一个空间连续变化的三维曲线, 列车通过时将产生横向和竖向空间耦合振动。

1.2 轮对运动描述

如图 1 所示, 建立 5 个坐标系描述轮对的运动。

定坐标系 $E_{i_E j_E k_E}$, 也即大地。

轨道水平面坐标系 $H_{i_H j_H k_H}$, i_H 、 j_H 均位于水平面内, i_H 沿轨道中心线在水平面上投影的切线方向, j_H 垂直于轨道中心线, k_H 按右手规则确定, 位于铅垂方向, 该坐标系以速度 V 沿轨道中心线移动, 相对于坐标系 $E_{i_E j_E k_E}$, 角速度 $E \omega_H = (-V/R)k_E$, R 为曲率半径。

轨道坐标系 $T_{i_T j_T k_T}$, 它由轨道水平面坐标系旋转得到, 先绕 i_H 轴转动 ϕ_e 角得到坐标系 $H_{i_{H_1} j_{H_1} k_{H_1}}$, ϕ_e 为外轨超高角, 再绕 j_{H_1} 轴转动 ϕ_k 得到 $T_{i_T j_T k_T}$, $\tan(\phi_k)$

收稿日期: 2000-01-11; 修回日期: 2000-07-27

基金项目: 广州铁路(集团)公司科技发展计划项目 ([1997]35 号 2.2)

作者简介: 王小文(1971—), 男, 陕西勉县人, 工程师, 硕士。

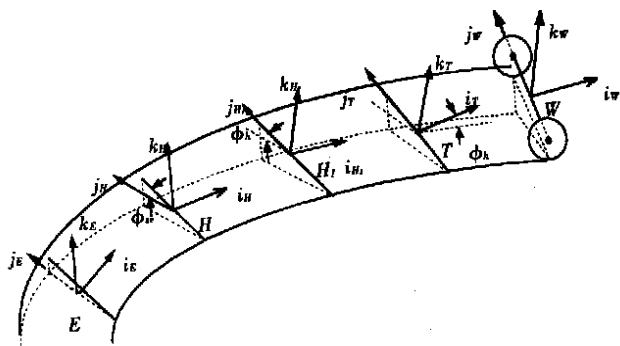


图 1 轮对运动描述坐标系

$= d(h/2)/dl$, i_T 沿轨道中心线的切线方向。 H 、 H_1 、 T 实际上是同一点, 位于轨道中心线上, 在图 1 中分开是为了表示方便。

轮对坐标系 $W i_W j_W k_W$, 其坐标原点位于轮对质心, j_W 沿轮轴方向固结于轮对上, i_W 、 k_W 轴不受车轮转动的影响。当轮对处于对位位置时, i_W 、 j_W 、 k_W 方向分别与 i_T 、 j_T 、 k_T 方向一致, 此时轮对坐标系原点相对于轨道坐标系的位置矢量为 $\vec{r}_W = r_0 k_T$, 其中 r_0 为车轮名义滚动半径; 当车轮离开对位位置时, $\vec{r}_W = x_W i_T + y_W j_T + (r_0 + z_W) k_T$, x_W 、 y_W 、 z_W 为轮对的平动分量, 其转动为先绕 k_T 轴转动 ψ , 再绕新坐标系的 i_T^* 轴转动 ϕ 。

轨道水平面坐标系 $H i_H j_H k_H$ 与轨道坐标系 $T i_T j_T k_T$ 之间的变换关系由式 (1) 给出 (需注意 ϕ 的转向, 式 (1) 中考虑了它的转向, 计算中取正值输入); 轨道坐标系 $T i_T j_T k_T$ 与轮对坐标系 $W i_W j_W k_W$ 之间的变换关系由式 (2) 给出。

$$\begin{Bmatrix} i_T \\ j_T \\ k_T \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \sin \phi_e & \sin \phi \cos \phi_e \\ 0 & \cos \phi_e & \sin \phi_e \\ -\sin \phi & -\cos \phi \sin \phi_e & \cos \phi \cos \phi_e \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i_H \\ j_H \\ k_H \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{Bmatrix} i_W \\ j_W \\ k_W \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\cos \phi \sin \psi & \cos \phi \cos \psi & \sin \phi \\ \sin \phi \sin \psi & -\sin \phi \cos \psi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i_T \\ j_T \\ k_T \end{Bmatrix} \quad (2)$$

根据上面所建立的坐标系及相互之间的转换关系, 由高等动力学中角速度加法公式及刚体上动点加速度的计算公式, 推导中略去一些高阶小量, 得轮对加速度和角速度

$$\begin{aligned} E_{aO_W} &= [x_W + 2 \frac{V}{R} y_W - r_0 (V \frac{d(1/R)}{dt} \phi_e + \\ & 2 \frac{V}{R} \dot{\phi}_e + \dot{\phi}_e) + V \frac{d(1/R)}{dt} y_W] i_T + [y_W - \frac{V^2}{R} - 2 \frac{V}{R} x_W - \\ & r_0 (\dot{\phi}_e - V \frac{d(1/R)}{dt} \phi_e - 2 \frac{V}{R} \dot{\phi}_e) - \end{aligned}$$

$$V \frac{d(1/R)}{dt} x_W] j_T + [z_W + a \dot{\phi}_e + \frac{V^2}{R} \phi_e] k_T \quad (3)$$

$$\begin{aligned} E_{\omega W} &= [\dot{\phi}_e - \frac{V}{R} \phi_e + \dot{\phi}_e] i_W + [- (\frac{V}{R} \phi_e + \dot{\phi}_e) - \\ & \frac{V}{R} \phi_e + \Omega + \dot{\beta}] j_W + [- \frac{V}{R} + \dot{\psi}] k_W \quad (4) \end{aligned}$$

式中, E_{aO_W} 表示轮对质心 O_W 对定坐标系 $E i_E j_E k_E$ 的加速度, 也即绝对加速度; $E_{\omega W}$ 表示轮对相对于定坐标系 $E i_E j_E k_E$ 的角速度。为建立轮对运动微分方程时方便, 在式 (3)、式 (4) 中所使用的坐标系各不相同。

Ω 为车轮名义滚动角速度, $\Omega = V/r_0$, β 为车轮滚动角速度扰动值。

车轮踏面为锥形, 车轮与钢轨始终保持接触, 轮对和转向架之间以及转向架和车体之间用线性弹簧和粘性阻尼元件连接, 对轮对、转向架、车体进行受力分析, 由牛顿第二定理和相对质心的动量矩定理得到各自的运动微分方程。以两轴客车为例, 整个车辆系统共考虑 27 个广义坐标。

1.3 数值计算方法

本文选择四阶龙格-库塔法, 这是因为龙格-库塔法不要求把微分方程整理成标准形式, 只要求把二阶微分方程转化为一阶, 其积分模式与本文使用的微分方程形式很适应。积分步长为 0.000 1 s。轮轨接触几何、接触椭圆、蠕滑系数、曲线轨道参数的计算编制成子程序, 供每一步积分调用。轮轨法向力迭代直至收敛为止。

2 车辆通过的曲线

按现行线路设计标准给出两个完整曲线, 由直线-缓和曲线-圆曲线-缓和曲线-直线构成。图 2(a) 为准高速车通过, 图中缓和曲线长度 120 m、圆曲线超高 105 mm, 是目前广深线最小半径曲线的实际设置参数; 图 2(b) 为高速车通过, 选择 6 种影响比较大的缓和曲线进行车辆通过动力学仿真比较, 它们是: 3 次螺旋曲线, “S”曲线 (4-4 曲线), 5 次曲线, 7 次曲线, 三角 I 形 (半波正弦), 三角 II 形 (全波正弦)。

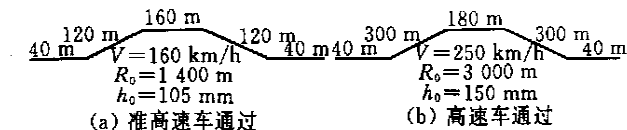


图 2 曲线参数

圆曲线半径和超高选定之后, 整个曲线的平面位置会因缓和曲线线型、缓和曲线长度、圆曲线内移量和最大超高顺坡率的不同而不同。如既有 3 次缓和曲线

改铺高次, 要求圆曲线位置不动, 则缓和曲线要向曲线内侧移动。圆曲线内移量相同或者最大超高顺坡率相同使高次缓和曲线要较 3 次螺旋缓和曲线更长, 缓和曲线变长使车体未被平衡离心加速度变化率降低, 旅客舒适度提高, 不用计算结论已知。所以, 比较的 6 种缓和曲线的相同条件定为长度相同。

3 动力学评价指标

选择 6 个指标, 即: 轮对横向位移 Y_w , 一旦轮对横向位移大于轮轨游间之半, 轮缘就与钢轨接触, 导致钢轨侧磨加剧、车辆运行阻力增加和换轨周期缩短, $Y_w \leq 8\text{ mm}$; 脱轨系数 α , 是轮轨间横向力 Q 和垂向力 P 之比, $\alpha = Q/P$, $\alpha \leq 0.8$; 轮重减载率 β , 偏载 ($\Delta P = P_0 - P$) 与静轮重 P_0 之比称为轮重减载率, $\beta = \Delta P/P_0$, $\beta \leq 0.6$; 轮对横向力 H_{\max} , 指的是轮对作用于两股钢轨横向力的合力, $H_{\max} \leq 0.85(10 + P/3)$, P 为轴重 (kN); 车体未被平衡离心加速度 Δa , $\Delta a \leq 0.72\text{ m/s}^2$; 未被平衡离心加速度变化率 J_0 , 一般取 $J_0 \leq 0.29\text{ m/s}^3$, 困难情况下取 $J_0 \leq 0.34\text{ m/s}^3$ 。

4 计算结果

4.1 准高速铁路

车辆通过的曲线为图 2(a), 以 6 种不同的缓和曲线分别计算 6 个评价指标, 结果如表 1 所示, 从表中可知, 轮对横向位移、脱轨系数、轮重减载率、轮对横向力 4 个安全指标都在容许限度之内, 而车体未被平衡离心加速度 (限值 0.72 m/s^2) 及其变化率 (限值

0.34 m/s^3) 两个舒适度指标超限。
图 3(a)~ 图 3(f) 给出了采用不同种类缓和曲线时 6 个评价指标的变化曲线, 从图中看出, 各曲线差异甚小。从图 3(e) 看出, 车体未被平衡离心加速度的变化规律是, 进入 ZH 点开始逐渐增大, 在 HY 点达到最大, 然后略有下降保持常值通过圆曲线, 进入 YH 点起又逐渐减小, 经过 HZ 点进入直线又趋于零值, 最大值出现在圆曲线。最大值在圆曲线说明该指标超限与缓和曲线没有关系, 是因为准高速车欠超高过大, 用足了困难条件下 110 mm 的允许值。
从图 3(f) 看出, 未被平衡离心加速度变化率在整个曲线上的变化规律不是十分平滑, 局部位置出现上下波动, 但规律性仍较强, 最大值出现在缓和曲线上, 圆曲线上为零, 进、出缓和曲线的情况正好相反。该指标超限的原因是缓和曲线长度不足, 文献[1]建议长度为 150 m。以 3 次螺旋曲线为例, 缓和曲线长改为 150 m 重新仿真计算得未被平衡离心加速度变化率降至 0.29 m/s^3 , 低于容许值。说明, 准高速铁路采用 3 次螺旋缓和曲线, 只要缓和曲线长度满足设计要求, 安全和舒适度均能满足。

本文仿真计算车辆的轴重为 110.64 kN, 与 1994 年广深线试验准高速车辆 (105~ 110 kN) 和 1998 年广深线试验 X 2000 车辆 (118.4 kN) 轴重相当, 表 1 中还给出了 1994 年广深线 1 400 m 曲线地面试验结果^[2] (缓和曲线为 3 次曲线), 除未被平衡离心加速度变化率试验值较计算值小外, 其余试验结果较计算结果偏大, 但相差不是很大, 基本吻合。

表 1 6 种缓和曲线对应的力学指标最大值 ($v = 160\text{ km/h}$)

	Y_w/mm	Q/P	$\Delta P/P_0$	H_{\max}/kN	$\Delta a/\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	$J_0/\text{m} \cdot \text{s}^{-3}$
3 次曲线	7.6	0.100	0.166	9.310	0.752	0.37
“4-4”曲线	7.1	0.096	0.166	8.945	0.749	0.40
5 次曲线	7.4	0.097	0.163	9.055	0.749	0.40
7 次曲线	7.2	0.096	0.169	8.980	0.759	0.37
半波余弦	7.2	0.095	0.162	8.838	0.742	0.30
全波正弦	7.3	0.097	0.172	9.046	0.766	0.40
1994 年准高速车试验	—	0.23	0.2~ 0.26	10~ 15	0.820	0.25

4.2 高速铁路

车辆以 250 km/h 速度通过图 2(b) 所示曲线, 以 6 种不同的缓和曲线分别计算 6 个评价指标, 结果如表 2 所示, 6 个指标都在容许限度之内。
图 4(a)~ 图 4(f) 给出了不同种类缓和曲线 6 个评价指标的变化曲线, 从图中看出, 各力学指标受缓和曲线线型影响很小。

纵观铁路缓和曲线的发展, 经历了一个由直线型超高顺坡向曲线型超高顺坡转化, 又由曲线型超高顺坡向两端改善的直线型超高顺坡发展的过程^[3]。本文仿真计算结果与这一趋势相吻合, 高次缓和曲线形式上很优越, 但实际效果很微弱。
英国高速铁路是在 3 次螺旋缓和曲线两端的立面上加一段 2 次方圆曲线圆顺段; 法国高速铁路是在 3

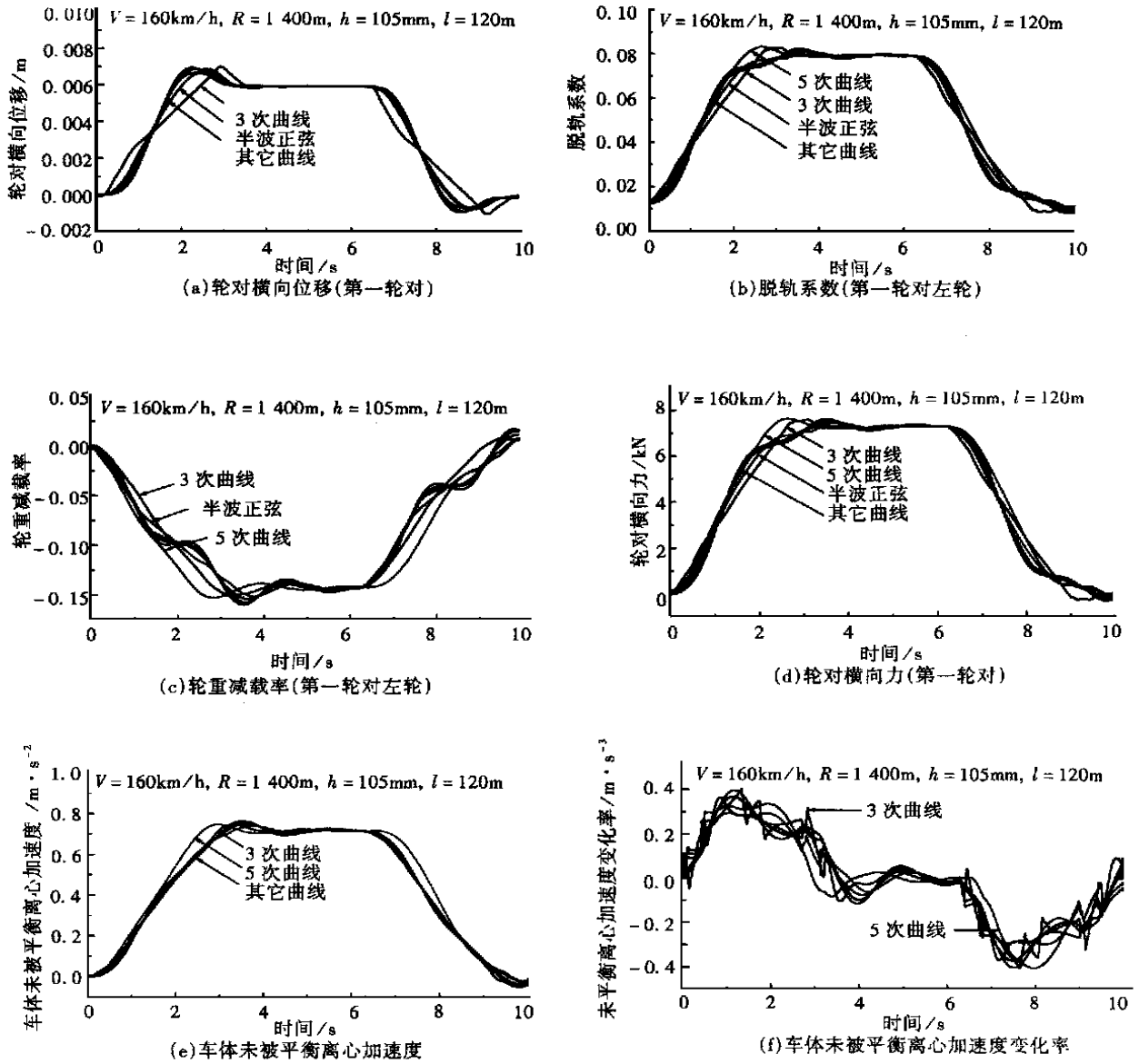


图 3 准高速铁路采用不同种类缓和曲线时, 6 个评价指标的变化曲线

$V = 160 \text{ km/h}, R = 1400 \text{ m}, h = 105 \text{ mm}, l = 120 \text{ m}$

表 2 6 种缓和曲线对应的力学指标最大值 ($v = 250 \text{ km/h}$)

	Y_w/mm	Q/P	$\Delta P/P_0$	H_{\max}/kN	$\Delta a/\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	$J_0/\text{m} \cdot \text{s}^{-3}$
3 次曲线	7.9	0.078	0.149	7.930	0.655	0.32
“4-4”曲线	7.2	0.073	0.142	7.360	0.629	0.28
5 次曲线	7.4	0.074	0.142	7.456	0.633	0.23
7 次曲线	7.2	0.073	0.145	7.408	0.636	0.20
半波余弦	7.2	0.073	0.145	7.726	0.638	0.19
全波正弦	7.2	0.073	0.144	7.701	0.635	0.21

次螺旋缓和曲线两端立面上加一段 40 m 长的余弦曲线圆顺段; 德国高速铁路缓和曲线仍采用 3 次螺旋曲线, 但对超高顺坡进行了限制, 250~ 300 km/h 的线

路, $i_{\max} = 1/10V_{\max}$, 大于 300 km/h 的线路, $i_{\max} = 1/12V_{\max}^{[4]}$ 。综合分析英、法、德三国高速铁路所采用的 3 次改善型缓和曲线的优缺点, 建议我国高速铁路

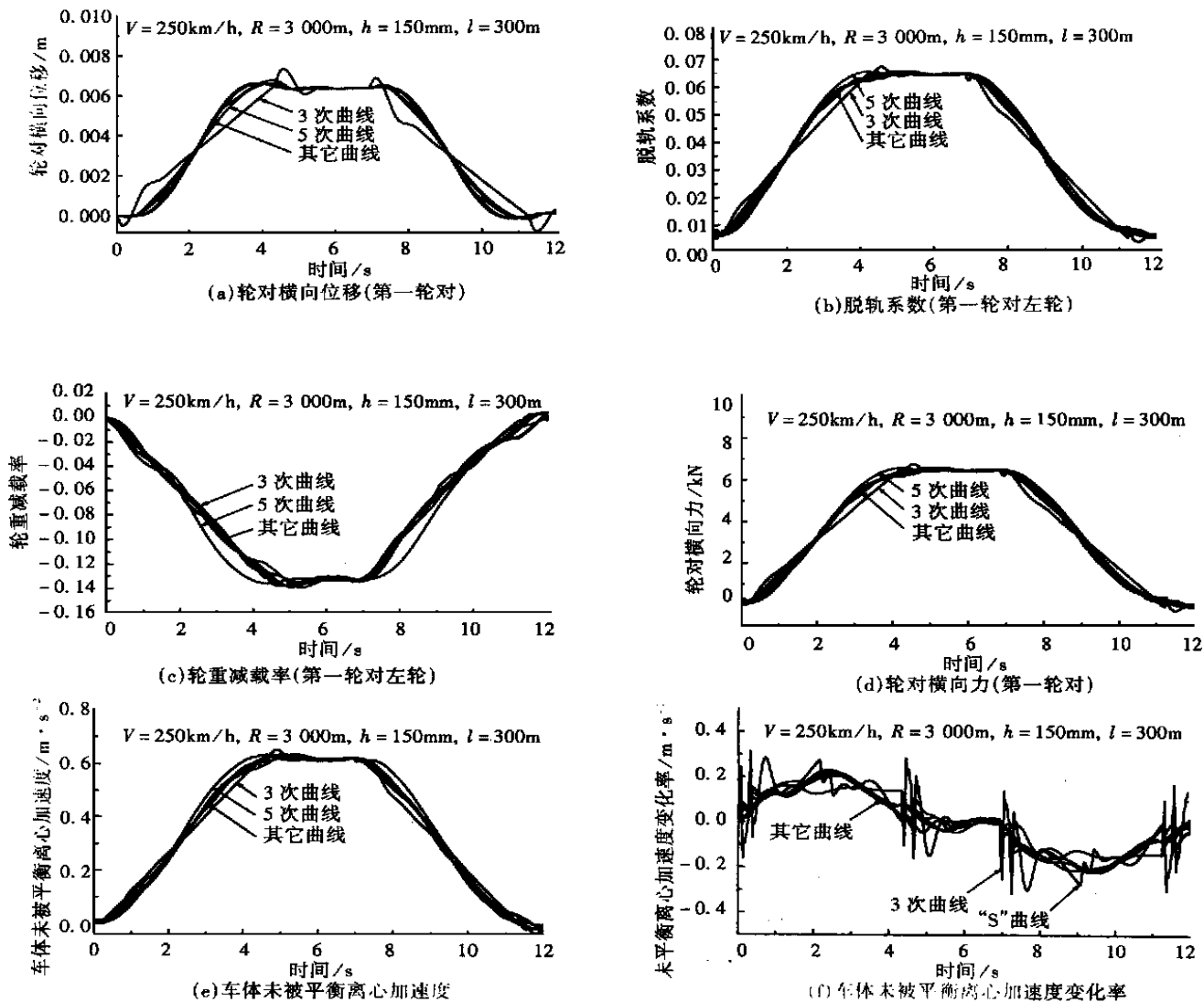


图4 高速铁路采用不同种类缓和曲线时,6个评价指标的变化曲线

 $V = 250 \text{ km/h}, R = 3000 \text{ m}, h = 150 \text{ mm}, l = 300 \text{ m}$

采用3次改善型缓和曲线,其办法与英国相同,在3次螺旋曲线起终点立面上加一个半径不小于竖曲线半径标准的圆型曲线圆顺段,平面上不动,仍为3次螺旋线。

5 结论

(1) 因铺设高次缓和曲线对提高旅客舒适度效果很微弱,广深准高速铁路采用3次螺旋缓和曲线是可行的,对旅客舒适度宜通过调整曲线超高和延长缓和曲线长度来改善。

(2) 高次缓和曲线形式上优越,但实际效果很微弱,对高速线路意义不大,宜采用3次改善型缓和曲线。即先按3次螺旋缓和曲线进行设计,其长度受舒适度控制,再在曲线起终点立面上加一段半径不小于竖

曲线半径标准的2次方圆曲线圆顺段,平面上不动,仍为3次螺旋线。

参考文献

- [1] 冯文相, 廖水生, 章欣, 等. 广深准高速铁路线路养护维修暂行规则[S]. 广州: 广州铁路(集团)公司科学研究所, 1995.
- [2] 铁道部科学研究院. 广深准高速铁路运营线试验报告之一——轨道状态及动力参数测试报告[R]. 北京: 铁道部科学研究院铁道建筑研究所, 1995.
- [3] 周宪忠. 关于我国高速铁路缓和曲线的探讨[J]. 西南交通大学学报, 1996, (1).
- [4] 朱文升. 4-3-4型与3次改善型缓和曲线理论上的主要特征及其差异[J]. 中国铁道科学, 1997, (2).

(责任编辑 张武美)