

DOI: 10.11779/CJGE201812014

地表移动荷载对既有地下隧道动力影响解析研究

曹志刚¹, 孙思¹, 袁宗浩^{*2}, 蔡袁强^{1, 2}

(1. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江工业大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310014)

摘要: 为获得地表移动荷载对地下隧道的动力影响, 首次给出了地表移动荷载作用下半空间隧道动力响应解析解。地表移动荷载采用移动简谐荷载模拟, 含隧道半空间地基通过各向同性弹性介质模拟。基于弹性地基控制方程在直角坐标系和柱坐标系下基本解及平面与柱面波函数波形转换, 结合地基表面和隧道柱面施加边界条件, 在频域中求得移动荷载下半空间弹性地基与隧道解析解答, 并结合快速 Fourier 逆变换求得隧道时域动力响应。利用本解析模型, 可计算获得地面移动荷载引起的地下隧道振动影响, 通过与已有研究对比, 对本模型正确性进行验证。计算分析了不同荷载移动速度与隧道埋深下, 隧道表面位移、加速度和地基中动应力响应。研究表明, 随着荷载移动速度增加, 隧道拱顶地基中动应力与振动加速度均显著增加。地基中动应力随隧道埋深增加迅速衰减, 隧道加速度随埋深衰减相对较慢, 但当隧道埋深超过某一临界深度时, 隧道振动可低于我国规范规定限值。在低速范围, 隧道临界深度随荷载速度线性增加, 但当荷载速度超过一定值, 隧道临界深度随着荷载速度呈指型增长。

关键词: 地表荷载; 地下隧道; 波形转换; 环境振动评估; 解析研究

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)12-2266-08

作者简介: 曹志刚(1983-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事土动力学方面的研究。E-mail: caozhigang2011@zju.edu.cn。

Analytical investigation of dynamic impact of moving surface loads on underground tunnel

CAO Zhi-gang¹, SUN Si¹, YUAN Zong-hao², CAI Yuan-qiang^{1, 2}

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: To investigate the influences of the moving surface loads on the underground tunnel, an analytical solution for calculating vibrations from a circular tunnel buried in a half-space due to moving surface loads is firstly given. The surface load is represented by a moving harmonic point load, and the half-space with a circular hole is visco-elastic. The analytical solution is obtained in the frequency domain based on the fundamental solutions of governing equation for elastic ground in Cartesian and cylindrical coordinate systems. Also, the transformations between the plane wave functions and the cylindrical wave functions and the surface boundary conditions should be used. Then the response in the time domain is obtained by the inverse Fourier transform. The influences of moving surface loads on the vibration of underground tunnel can be investigated by using the analytical model. The displacement and acceleration of the tunnel and the dynamic stress response in the ground under different load velocities and tunnel buried depth are analyzed. The results show that both the dynamic stress and the acceleration responses above the vault of the tunnel increase significantly as the moving speed of the load increases. The dynamic stresses decay rapidly as the buried depth of the tunnel increases, while the acceleration responses decay relatively slowly. When the buried depth of the tunnel increases to the critical depth, the vibration level of the tunnel can meet the requirements of Chinese specification. The critical tunnel buried depth increases linearly with the moving speed of loads at the low speed range, while when the speed exceeds 100 km/h, the critical tunnel buried depth increases exponentially with the increase of load speed.

Key words: surface loads; underground tunnel; environmental vibration assessment; analytical investigation

0 引言

针对地下交通荷载引起地面环境振动问题, 学者

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0800200); 国家自然科学基金项目(51578500, 51778571, 51708503); 中国博士后科学基金资助项目(2017M621967)

收稿日期: 2017-10-01

*通讯作者(E-mail: yuanzh@zju.edu.cn)

们展开了一系列研究。基于围道积分和 Laplace 变化, Liu 等^[1]基于 Biot 理论和壳体理论, 研究了隧道内表面作用轴对称荷载时的动力响应问题, 分析了水力边界条件的影响。Senjuntichai 等^[2]建立了全空间中圆柱孔洞内表面作用瞬态轴对称荷载模型, 并分析了土性参数、水利边界条件对位移、孔压响应的影响。Lu 等^[3]采用势函数分解法求解 Biot 方程, 研究了移动环形荷载作用下饱和土全空间中圆形隧道内表面引起的周围土体的位移、孔压和应力响应, 考虑了圆柱孔洞表面透水、不透水两种边界条件, 给出了位移、孔压和应力沿荷载移动方向的可见分布情况。在此基础上, Lu 等^[4]进一步研究了荷载移动速度的影响, 对比了低速和高速两种情况下体系的影响。刘干斌等^[5]研究了无限黏弹性饱和多孔介质中圆柱孔洞表面受轴对称简谐荷载和流体压力作用下的频域响应问题。通过引入势函数, 在频域中得到了应力、位移和超孔隙水压力响应解答。Metrikine 等^[6]建立了二维解析模型, 研究地下移动荷载作用下半空间圆形隧道的响应问题, 主要对比了移动常荷载、简谐荷载和随机荷载作用下的地表位移响应。Lu 等^[7]利用势函数分解法求解了移动轴对称荷载作用下饱和土中圆形隧道的动力响应, 讨论了荷载速度对地表动力响应的影响。Sheng 等^[8]提出了 2.5 维 FEM-BEM 髼合法来研究地下荷载作用下弹性半空间中圆形孔洞的动力响应问题。袁宗浩^[9]建立了三维弹性半空间中圆形隧道模型, 通过解析法研究了地下移动荷载作用下深埋或浅埋隧道引起的地基振动。

针对地面交通荷载作用下地基振动问题, 学者也已开展一系列研究^[10-12], 获得了地面移动荷载引起的地基振动传播与衰减规律。一些学者在交通荷载隔振减振方面也开展了卓有成效的研究^[13-15], 分析了波阻板、隔振沟等对交通荷载引起的地面振动的减振效果。然而随着地下空间开发日益加速, 地面环境与地下空间开发交互影响日益显著, 众多学者开始研究地表环境荷载对地下空间开发的影响。地面因素对地下隧道的影响主要有以下几个方面: 深基坑开挖对地下隧道的影响^[16-18]、地面堆载对地下隧道的影响^[19-22]、地面交通荷载对地下隧道的影响等。由于大量地铁、管涵等地下构筑物兴建, 为不影响交通干线的正常运行, 隧道施工过程中上部道车辆往往正常运行。地表高速交通荷载对下部隧道施工造成振动、动应力增加等负面效应, 甚至危害隧道施工安全。目前关于地面交通荷载对地下隧道振动影响方面的研究未有见到, 亟需开展地面交通荷载对既有地下隧道影响评估方面的研究。

为此, 本文建立了地表荷载作用下三维弹性半空间中的无限长圆柱孔洞模型并获得解析解, 获得了地表移动荷载引起的地下隧道振动响应。分析了地表荷

载移动速度、隧道埋深等对圆柱孔洞内表面的位移、加速度和地基动应力的影响规律, 并结合现有振动规范, 确定了地表移动荷载对地下隧道的影响大小与影响范围。

1 控制方程及求解

本文研究的三维弹性半空间模型如图 1 所示, 图中给出了直角坐标系和柱坐标系。半空间地基被模拟为各向同性的线弹性介质, 土体的密度为 ρ , Lamé 常数为 λ 和 μ , 圆柱孔洞半径为 a 。移动荷载 F 作用在地基表面对称中心 ($x = d$, $y = 0$) 且沿着 z 轴正方向移动, 地表移动荷载的速度为 c , 自振频率为 f_0 。

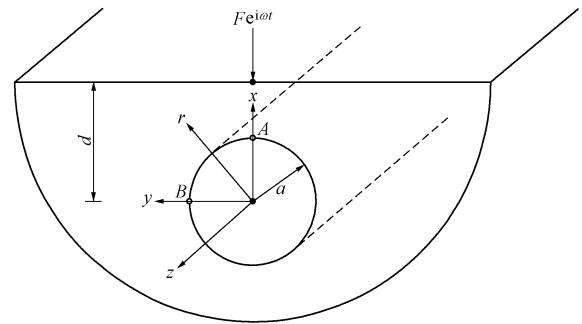


图 1 三维半空间地下隧道模型

Fig. 1 Model of an underground tunnel in half-space

对于半空间地基, 弹性动力学方程如下:

$$(\lambda + 2\mu)\nabla(\nabla \cdot u) - \mu\nabla \times (\nabla \times u) = -\rho\omega^2 u, \quad (1)$$

式中, u 为土体位移向量。

在法方向为 e_x 的平面上的应力表示为

$$t^{(e_x)}(u) = e_x \lambda \nabla \cdot u + \mu \partial_x u + \mu \nabla u_x. \quad (2)$$

对于直角坐标系: 单位向量为 e_x , e_y , e_z 。

在法方向为 e_r 的柱面上的应力表示为

$$t^{(e_r)}(u) = e_r \lambda \nabla \cdot u + 2\mu \partial_r u + \mu e_r \times (\nabla \times u). \quad (3)$$

对于柱坐标系: 单位向量 e_r , e_θ , e_z 。

由于本文只考虑了简谐荷载, 因此, 在下述求解过程中忽略了所有的 $\exp(i\omega t)$ 因子, $\omega = 2\pi f_0$ 是圆频率。基于弹性动力学方程, 下行波的表达式为^[9]

$$\phi_1^- = \nabla \times (e_z e^{i(qz - h_s x)} \sin py) = (p \cos py, i h_s \sin py, 0) e^{i(qz - h_s x)}, \quad (4)$$

$$\phi_2^- = \nabla \times \nabla \times (e_z e^{i(qz - h_s x)} \cos py) = (q h_s \cos py, -i q p \sin py, (k_s^2 - q^2) \cos py) e^{i(qz - h_s x)}, \quad (5)$$

$$\phi_3^- = \nabla (e_z e^{i(qz - h_p x)} \cos py) = (-i h_p \cos py, -p \sin py, i q \cos py) e^{i(qz - h_p x)}. \quad (6)$$

式中, ϕ_1^- 为剪切波(SH), ϕ_2^- 为剪切波(SV), ϕ_3^- 为压缩波(P); $k_{s,p} = \omega/c_{s,p}$ 是剪切波和压缩波波数, $c_s = \sqrt{\mu/\rho}$ 是剪切波波速, $c_p = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho}$ 是压缩波波速; $h_{s,p} = \sqrt{k_{s,p}^2 - q^2 - p^2}$ 是 x 方向的波数, p 是 y 方向的波数, q 是 z 方向的波数; 把式 (4) ~ (6) 中的 $-h_{s,p}$

替换为 $h_{s,p}$, 可得到上行波 ϕ_j^+ ($j=1, 2, 3$) 的表达式。

基于下行波的表达式, 在法方向为 e_x 的平面上的应力表示为

$$t^{(e_x)}(\phi_1^-) = \mu(-2iph_s \cos py, (h_s^2 - p^2) \sin py \cdot \\ iqp \cos py) e^{i(qz - h_s x)}, \quad (7)$$

$$t^{(e_x)}(\phi_2^-) = \mu(-2iqh_s^2 \cos py, -2qph_s \sin py - \\ ih_s(k_s^2 - 2q^2) \cos py) e^{i(qz - h_s x)}, \quad (8)$$

$$t^{(e_x)}(\phi_3^-) = \mu((2k_p^2 - k_s^2 - 2h_p^2) \cos py \cdot \\ 2iph_p \sin py, 2qh_p \cos py) e^{i(qz - h_p x)}. \quad (9)$$

把式 (7) ~ (9) 中的 $-h_{s,p}$ 替换为 $h_{s,p}$, 可得到上行波 $t^{(e_x)}(\phi_j^+)$ ($j=1, 2, 3$) 的表达式。

基于弹性动力学方程, 外行波的表达式为

$$\chi_{1m}^+ = \nabla \times [\mathbf{e}_z H_m^{(1)}(g_s r) \sin m\varphi e^{iqz}] = \left(\frac{m}{r} H_m^{(1)}(g_s r) \cdot \right. \\ \left. \cos m\varphi, -g_s H_m^{(1)'}(g_s r) \sin m\varphi, 0 \right) e^{iqz}, \quad (10)$$

$$\chi_{2m}^+ = \nabla \times \nabla \times (\mathbf{e}_z H_m^{(1)}(g_s r) \cos m\varphi e^{iqz}) = (iqg_s H_m^{(1)'}(g_s r) \cos m\varphi, \frac{-imq}{r} H_m^{(1)}(g_s r) \sin m\varphi, g_s^2 H_m^{(1)}(g_s r) \cdot \\ \cos m\varphi) e^{iqz}, \quad (11)$$

$$\chi_{3m}^+ = \nabla (H_m^{(1)}(g_p r) \cos m\varphi e^{iqz}) \\ = (g_p H_m^{(1)'}(g_p r) \cos m\varphi, -\frac{m}{r} H_m^{(1)}(g_p r) \cdot \\ \sin m\varphi, iqH_m^{(1)}(g_p r) \cos m\varphi) e^{iqz}. \quad (12)$$

式中 χ_{1m}^+ 为剪切波(SH), χ_{2m}^+ 为剪切波(SV), χ_{3m}^+ 为压缩波(P); $H_m^{(1)}$ 是第一类 Hankel 函数, $m=0, 1, 2, \dots$; $g_{s,p} = \sqrt{k_{s,p}^2 - q^2}$ 是 r 方向的波数; 把式 (10) ~ (12) 中的第一类 Hankel 函数替换为 Bessel 函数, 可得到非奇异波 χ_{jm}^0 ($j=1, 2, 3$) 的表达式。

基于外行波, 在法方向为 e_r 的柱面上的应力为

$$t^{(e_r)}(\chi_{1m}^+) = \mu \left[\left(\frac{2mg_s}{r} H_m^{(1)'}(g_s r) - \frac{2m}{r^2} H_m^{(1)}(g_s r) \cdot \right. \right. \\ \left. \left. \cos m\varphi, -g_s^2 (2H_m^{(1)''}(g_s r) + H_m^{(1)}(g_s r)) \sin m\varphi \cdot \right. \right. \\ \left. \left. \frac{imq}{r} H_m^{(1)}(g_s r) \cos m\varphi \right) e^{iqz} \right], \quad (13)$$

$$t^{(e_r)}(\chi_{2m}^+) = \mu(2iqg_s^2 H_m^{(1)''}(g_s r) \cos m\varphi \cdot \\ 2imq \left[\frac{1}{r^2} H_m^{(1)}(g_s r) - \frac{g_s}{r} H_m^{(1)'}(g_s r) \right] \sin m\varphi \cdot \\ g_s(k_s^2 - 2q^2) H_m^{(1)''}(g_s r) \cos m\varphi) e^{iqz}, \quad (14)$$

$$t^{(e_r)}(\chi_{3m}^+) = \mu((2k_p^2 - k_s^2) H_m^{(1)}(g_p r) + 2g_p^2 H_m^{(1)''}(g_p r) \cdot \\ \cos m\varphi, 2m \left(\frac{1}{r^2} H_m^{(1)}(g_p r) - \frac{g_p}{r} H_m^{(1)'}(g_p r) \right) \\ \sin m\varphi, 2iqg_p H_m^{(1)''}(g_p r) \cos m\varphi) e^{iqz}. \quad (15)$$

通过将式 (13) ~ (15) 中的 $H_m^{(1)}$ 替换为 J_m , 可

得到非奇异波表达的法向量为 e_r 柱面上的应力向量 $t^{(e_r)}(\chi_{jm}^0)$ 。

下行波引起的位移可表示为

$$u_1 = \int_{-\infty}^{\infty} dq \int_0^{\infty} dp \sum_{j=1}^3 A_j(q, p) \phi_j^-(q, p, x) . \quad (16)$$

外行波引起的位移可表示为

$$u_2 = \int_{-\infty}^{\infty} dq \sum_{j=1}^3 \sum_{m=0}^{\infty} B_{jm}(q) \chi_{jm}^+(q, r) . \quad (17)$$

弹性半空间圆形隧道的位移是下行波引起的位移和外行波引起的位移之和, 可表示为

$$u = u_1 + u_2 , \quad (18)$$

式中, A_j 和 B_{jm} 是未知常数, x 和 r 是观察点的位置向量。

第一类 Hankel 函数可表达为

$$H_m^{(1)}(g_s r) \sin m\varphi = \frac{2i^{-m}}{\pi} \int_0^{\infty} e^{i h_s x} \sin py \times \sin m\alpha_s \frac{1}{h_s} dp , \quad (19a)$$

$$H_m^{(1)}(g_{s,p} r) \cos m\varphi = \frac{2i^{-m}}{\pi} \int_0^{\infty} e^{i h_{s,p} x} \cos py \times \cos m\alpha_{s,p} \frac{1}{h_{s,p}} dp . \quad (19b)$$

将式 (19) 代入式 (10) ~ (12) 可得

$$\chi_{jm}^+(q, r) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \phi_j^+(q, p, x) M_{jm}(p) \frac{1}{h_j} dp , \quad (20)$$

式中

$$M_{jm}(p) = \begin{cases} i^{-m} \sin m\alpha_j & (j=1) \\ i^{-m} \cos m\alpha_j & (j=2,3) \end{cases} , \\ \begin{cases} h_j = h_s, \alpha_j = \alpha_s & (j=1,2) \\ h_j = h_p, \alpha_j = \alpha_p & (j=3) \end{cases} .$$

将式 (20) 代入式 (18) 可得

$$u(x) = \int_{-\infty}^{\infty} dq \int_0^{\infty} dp \sum_{j=1}^3 [A_j(q, p) \phi_j^-(q, p, x) + \\ \frac{2}{\pi} \phi_j^+(q, p, x) \sum_{m=0}^{\infty} B_{jm}(q) M_{jm}(p)] . \quad (21)$$

作用在地基表面对称中心处 ($x=d, y=0$) 的单位点荷载可表示为 $F = \delta(z-ct) \delta(y) e^{-i2\pi f_0 t} e_x$ 。

在频域中可展开为关于 q 的积分形式,

$$e_x \frac{1}{2\pi c} \int_{-\infty}^{\infty} dq e^{iqz} \delta \left(q - \frac{\omega - 2\pi f_0}{c} \right) \cdot \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \cos py dp . \quad (22)$$

基于式 (21)、(22), 地基表面地基表面对称中心处 ($x=d, y=0$) 应力分量的边界条件可写为

$$\sum_{j=1}^3 (A_j(q, p) t^{(e_x)}(\phi_j^-(q, p, x=d)) + \frac{2}{\pi} t^{(e_x)} \cdot \\ (\phi_j^+(q, p, x=d) \sum_{m=0}^{\infty} B_{jm}(q) M_{jm}(p))) \\ = -e_x \frac{1}{2\pi c} \delta \left(q - \frac{\omega - 2\pi f_0}{c} \right) . \quad (23)$$

对式 (23) 进行化简可得

$$A_j(q, p) = \frac{2}{\pi} \sum_{j'=1}^3 R_{jj'}(q, p) \sum_{m'=0}^{\infty} B_{jm'}(q) M_{jm'}(p) \frac{1}{h_{j'}} - \frac{\xi_j \cdot N}{\Delta_j}, \quad (24)$$

式中, $N = \frac{1}{2\pi c} \delta \left(q - \frac{\omega - 2\pi f_0}{c} \right)$; $R_{jj'} = -\frac{r_{jj'}}{\Delta_j}$, $m' = 0, 1, \dots, j'=1, 2, 3$, 具体表达式见附录。

$$\text{令 } \frac{2}{\pi} \sum_{j'=1}^3 R_{jj'}(q, p) \sum_{m'=0}^{\infty} B_{jm'}(q) M_{jm'}(p) \frac{1}{h_{j'}} = A_j^0(q, p).$$

则式 (23) 可简化为

$$A_j(q, p) = A_j^0(q, p) - \frac{\xi_j \cdot N}{\Delta_j \cdot \mu}. \quad (25)$$

关于 Bessel 函数, 有如下的关系式:

$$e^{-ih_s x} \sin py = \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m i^{-m} J_m(g_s r) \sin m\alpha_s \sin m\varphi, \quad (26a)$$

$$e^{-ih_s x} \cos py = \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m i^{-m} J_m(g_{s,p} r) \cos m\alpha_{s,p} \cos m\varphi. \quad (26b)$$

式中 当 $m=0$ 时, $\varepsilon_0 = 2$; 当 $m \geq 1$ 时, $\varepsilon_m = 1$ 。

将式 (25) 代入式 (4) ~ (6) 中得

$$\phi_j^-(q, p, x) = \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m \chi_{jm}^0(q, r) M_{jm}(p). \quad (27)$$

将式 (26) 代入式 (18) 可得

$$u(r) = \int_{-\infty}^{\infty} dq \int_0^{\infty} dp \sum_{j=1}^3 A_j(q, p) \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m \chi_{jm}^0(q, r) \cdot M_{jm}(p) + \int_{-\infty}^{\infty} dq \sum_{j=1}^3 \sum_{m=0}^{\infty} B_{jm}(q) \chi_{jm}^+(q, r). \quad (28)$$

由于未知数 A_j 已经由 B_{jm} 表示, 将式 (24) 代入式 (27) 得

$$u(r) = \int_{-\infty}^{\infty} dq \sum_{j=1}^3 \sum_{m=0}^{\infty} \left[\sum_{j'=1}^3 \sum_{m'=0}^{\infty} Q_{jm'j'm'}(q) B_{jm'}(q) \chi_{jm}^0(q, r) - T_{jm}(q) \chi_{jm}^0(q, r) + B_{jm}(q) \chi_{jm}^+(q, r) \right], \quad (29)$$

式中,

$$Q_{jm'j'm'}(q) = \varepsilon_m \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} R_{jj'}(q, p) M_{jm'}(p) \frac{1}{h_{j'}} M_{jm}(p) dp, \\ T_{jm}(q) = \varepsilon_m \int_0^{\infty} \frac{\xi_j \cdot N}{\Delta_j \cdot \mu} M_{jm}(p) dp.$$

在隧道内表面 ($r=a$) 的应力条件可以表示为

$$t(u(r=a)) = \int_{-\infty}^{\infty} dq \sum_{j=1}^3 \sum_{m=0}^{\infty} \left(\sum_{j'=1}^3 \sum_{m'=0}^{\infty} Q_{jm'j'm'}(q) B_{jm'}(q) \right. \\ \left. (q) t(\chi_{jm}^0(q, r=a)) - T_{jm}(q) t(\chi_{jm}^0(q, r=a)) + B_{jm}(q) t(\chi_{jm}^+(q, r=a)) \right) = 0. \quad (30)$$

可由式 (30) 解出未知数 B , 再代入式 (24) 可求得到未知数 A 。上述未知数全部求得后, 可由式(21)求得弹性半空间体系频域内解析解, 并通过 Fourier 逆变换求得半空间地基与隧道动力响应时域解。

2 数值结果

2.1 模型验证

目前未有地面移动荷载作用下地下隧道动力响应方面研究, 因此本文采用近似的方法与 Hung 等^[23]的结果进行对比, 以验证本模型正确性。Hung 等^[23]通过 2.5 维有限元-无限元结合的方法分析了地下移动点荷载引起弹性半空间地基表面振动响应, 地下荷载移动速度 $c=40$ m/s, 自振频率 $f_0=5$ Hz。本文依据互易定理, 即地表移动荷载在地基中引起的位移响应与地基中移动荷载引起的地表位移响应相等, 来验证本模型的正确性。选取相同的土体参数: 土体剪切模量 $G=1.154 \times 10^7$ (N·m⁻²), 土体泊松比 $\nu=0.3$, 土体密度 $\rho=1900$ (kg·m⁻³), 土体黏滞阻尼比 $\delta=0.02$ 。将圆柱孔洞半径缩小至 $a=0.1$ m 以模拟弹性半空间地基, 将本模型计算结果与 Hung^[23]结果对比, 位移响应如图 2 所示 ($u_x^* = (4\pi G/P)u_x$ 为归一化位移, P 为荷载幅值)。

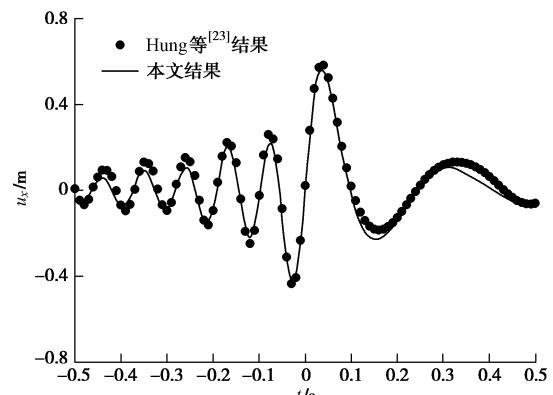
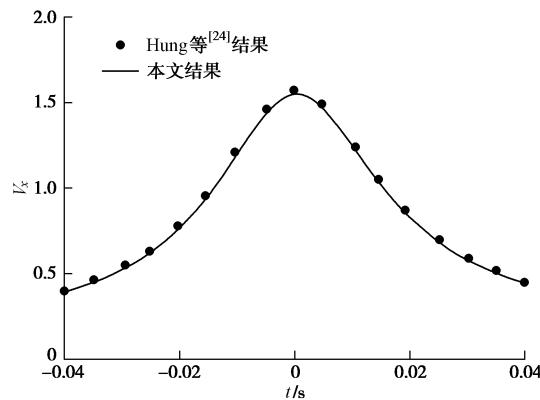


图 2 本文计算结果与 Hung 等^[23]计算结果对比

Fig. 2 Comparison between present work and Hung et al^[23]

另外, 本文采用同样的方法与 Hung 等^[24]的结果进行对比, Hung 等^[24]通过半解析法分析了地表移动点荷载引起弹性半空间地基内部振动响应, 地表荷载移动速度 $c=50$ m/s, 自振频率 $f_0=0$ Hz。选取相同的土体参数: 土体泊松比 $\nu=0.25$, 土体剪切波波速 $c_s=100$ m/s, 土体压缩波波速 $c_p=173.2$ m/s, 土体密度 $\rho=2000$ kg/m³, 土体黏滞阻尼 $\delta=0.02$ 。将本模型计算结果与 Hung 等^[24]结果对比, 位移响应如图 3 所示

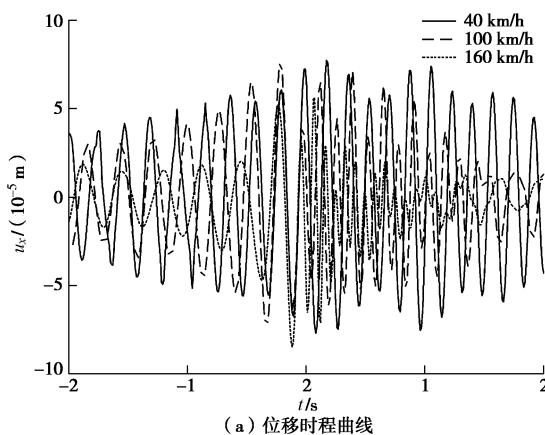
($V_x = 2\pi\mu u_x / P$ 为无量纲位移, P 为荷载幅值), 通过将本文模型圆柱孔洞半径缩小至 $a=0.1$ m 以模拟弹性半空间地基, 本文计算结果与 Hung 等^[24]结果吻合良好。上述两组对比证明本解法的正确性。

图 3 本文计算结果与 Hung 等^[24]计算结果对比Fig. 3 Comparison between present work and Hung et al^[24]

2.2 数值计算结果

本文弹性半空间土体参数参考文献[9]选取, Lamé 常数 $\mu = 1.2 \times 10^7 \text{ N/m}^2$, Lamé 常数 $\lambda = 3.7 \times 10^7 \text{ N/m}^2$, 土体密度 $\rho = 1900 \text{ kg/m}^3$, 黏滞阻尼比 $\delta = 0.05$ 。本文分别计算了圆柱孔洞埋深为 10, 15, 20 m 三种工况, 孔洞半径为 $a = 3 \text{ m}$ 。观察点取圆柱孔洞内表面的拱顶 A 点 ($x=3 \text{ m}$, $y=0 \text{ m}$, $z=0 \text{ m}$), 如图 1 所示。移动荷载的自振频率 $f_0 = 5 \text{ Hz}$, 荷载幅值 $F = 50 \text{ kN}$ 。

图 4 给出了圆柱孔洞埋深为 15 m 时, 移动简谐荷载作用下隧洞拱顶竖向位移时程曲线及相应的频谱曲线, 考虑了 3 种荷载移动速度 $c=40, 100 \text{ km/h}, 160 \text{ km/h}$ 的影响。从图 4 (a) 中可以看出, 竖向位移响应在 $t=0$ 时达到峰值(观察点 A 和荷载作用的位置重合)。荷载移动速度对拱顶竖向位移幅值的影响有限, 且随着荷载速度提高, 其引起的土体振动时间缩短。图 4 (b) 是竖向位移响应的频谱, 当荷载移动速度为 40 km/h 时, 竖向位移响应的频率成分主要分布在 4~6 Hz; 当荷载速度提高到 100, 160 km/h 时, 响应的频谱分别分布在 3~8 Hz 和 2~10 Hz 内。可见低速时, 竖向位移响应的频谱集中在荷载自振频率附近, 并且随着荷载移动速度的提升, 频谱分布在更宽的范围内。这种现象的产生是由于多普勒效应的存在, 移动简谐荷载频谱范围可通过公式 $f_{cr} = f_0 / (1 \pm c/c_R)$ 求得, f_{cr} 为频率分布边界, c_R 为 Rayleigh 波速。



(a) 位移时程曲线

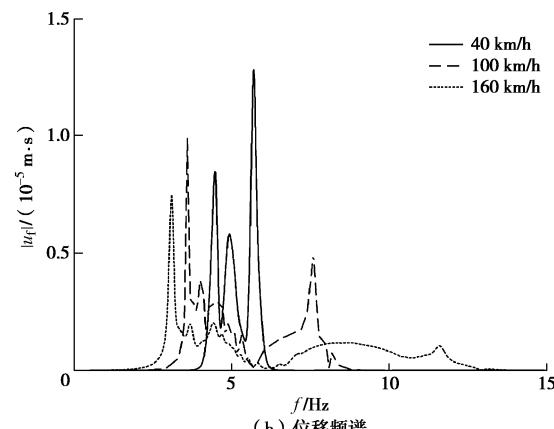
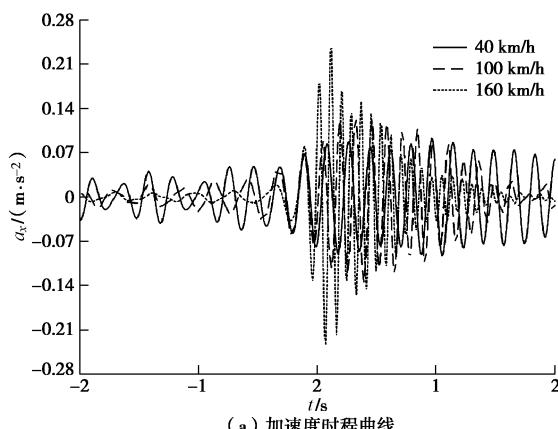


图 4 地表移动荷载下拱顶的竖向位移响应

Fig. 4 Response of vertical displacement of vault under moving surface loads

图 5 给出了不同荷载速度下隧洞拱顶的竖向加速度响应的时程曲线及相应的频谱曲线。如图 5 (a) 所示, 移动荷载速度为 40, 100, 160 km/h 时, 隧洞拱顶的最大加速度响应分别为 $0.10, 0.14, 0.21 \text{ m/s}^2$, 可见随着荷载移动速度的增加, 隧洞土体加速度响应显著增加, 且随着荷载移动速度增加, 加速度响应分布在更高的频率范围, 如图 5 (b) 所示。



(a) 加速度时程曲线

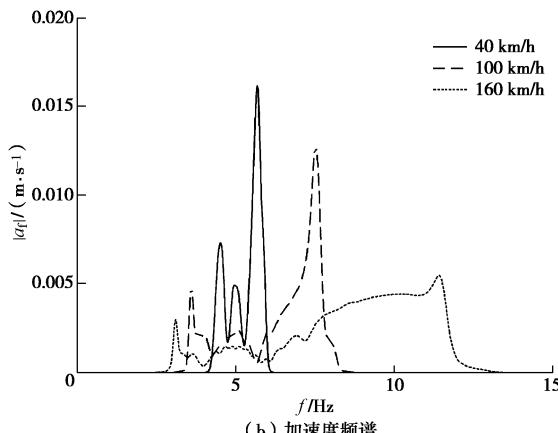


图 5 地表移动荷载下拱顶的竖向加速度响应

Fig. 5 Response of vertical acceleration of vault under moving surface loads

图 6 分别给出了不同荷载移动速度时极坐标和直

角坐标下平面内径向动应力响应(平面选取在 $t=0$ 时 $z=0$ m 平面内距圆柱孔洞中心轴线 $r=6$ m 的径向应力), 圆柱孔洞拱顶距地表 12 m。如图 6 (a) 所示, 地表移动荷载在隧道的顶部引起最大的径向应力, 荷载速度为 40, 100, 160 km/h 时, 拱顶径向应力分别为 600, 750, 1450 Pa。随着荷载速度的提升, 径向应力响应迅速增大。除了隧道顶部, 隧道底部也观察到了较大的径向应力响应。从图 6 (b) 中可以看出, 径向应力随着角度先急速减小, 再缓慢增大, 并在拱腰处达到最小值。

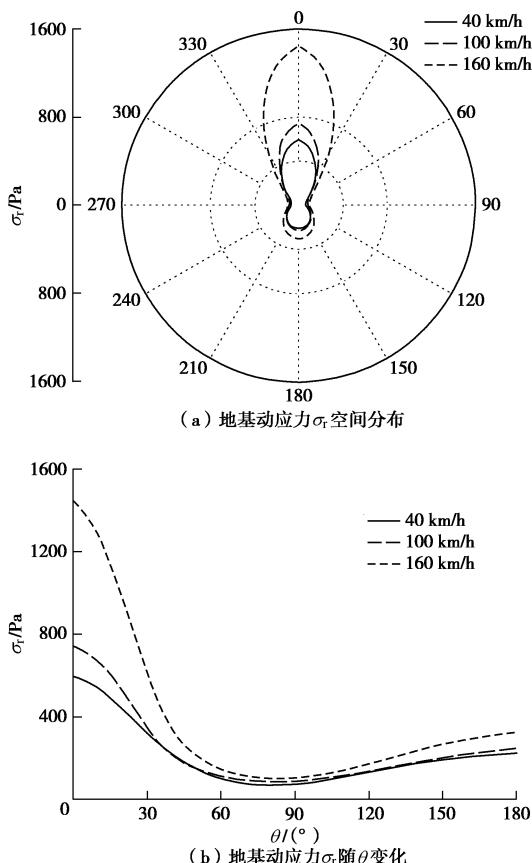


图 6 地表移动荷载下径向应力响应

Fig. 6 Response of radial stress under moving surface loads

图 7 给出了不同荷载速度下隧洞拱顶地基中($r=6$ m)竖向动应力响应随隧洞埋深 d 的变化情况。如图 7 所示, 在隧洞埋深 $d=10$ m 处, 荷载速度为 160 km/h 时隧洞拱顶动应力为 9 kPa, 是荷载速度为 40 km/h 时的 22 倍, 可见当隧道埋深较小时, 低速和高速情形下的土体动应力响应表现出显著差异。随着隧道埋深的增加, 隧洞拱顶地基中动应力响应显著降低, 同时荷载移动速度对动应力影响减弱。当隧洞埋深超过 15 m 时, 地下隧洞的应力响应趋于稳定, 小于 1 kPa, 且荷载速度对动应力响应基本无影响。

图 8 研究了不同荷载速度拱顶竖向加速度响应随隧洞埋深的变化情况。从图 8 可以看出, 当 $d=10$ m

时, 移动荷载在 40 km/h 时引起的隧洞拱顶竖向加速度约为 0.15 m/s^2 。且随着荷载移动速度增加拱顶加速度显著增加, 在荷载移动速度为 160 km/h 时, 拱顶加速度可达到 0.9 m/s^2 , 约为 $c=40 \text{ km/h}$ 时的 5 倍。土体加速度响应随着隧洞埋深的增大显著降低, 且同时荷载速度对隧洞振动响应的影响也进一步减弱。

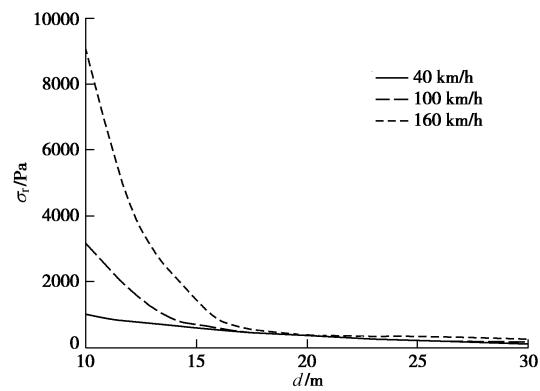


图 7 拱顶地基中应力随深度变化

Fig. 7 Variation of radial stress with depth

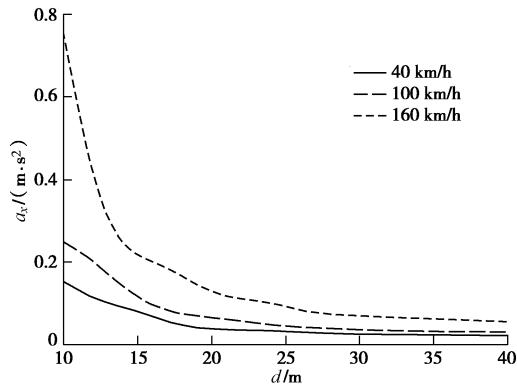


图 8 拱顶的加速度响应随深度变化

Fig. 8 Response of acceleration of vault to depth

中国还未有地表交通荷载引起地下建构筑物振动限制规范, 本文暂时采用中国城市区域环境振动标准 (GB 10070—88) [25], 据其规定, 交通干线引起的两侧建筑物振禁止超过 75 dB, 其铅垂向振级的定义: $VL_x(a_x) = 20 \lg a_x / a_0$, a_x 为加速度幅值, a_0 为基准加速度, 取值为 10^{-6} m/s^2 。图 9 给出了不同地表荷载速度和埋深下隧洞拱顶铅垂向振级大小。从图 9 可以看出, 当隧道埋深较浅时, 移动荷载引起的隧道振动将超过 75 dB 振动限值, 但当隧道路理深超过某一临界深度, 拱顶振动将衰减到规范振动限值以内。荷载移动速度为 40 km/h 时, 临界深度 d_a 约为 17 m; 100 km/h 时临界深度 d_b 约为 22 m; 160 km/h 时临界深度 d_c 约为 39 m。隧洞拱顶铅垂向振级随隧道埋深进一步增加而逐渐减小。

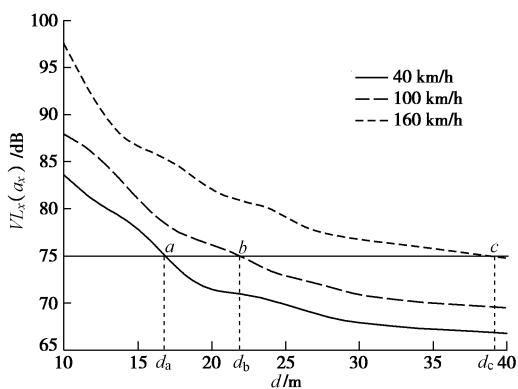


图 9 拱顶铅垂向振级随深度变化

Fig. 9 Variation of vertical vibration level of vault with depth

图 10 给出了隧洞临界深度随荷载移动速度的变化情况。从图 10 可以看出, 当荷载移动速度为 $c=10$ km/h 时, 隧洞的临界深度约为 15 m, 且随着荷载移动速度增加线性增加, 然而当荷载移动速度超过 100 km/h, 隧洞的临界深度加速增大, 在研究范围内与荷载移动速度呈指数型增长。这说明当荷载速度超过 100 km/h 后, 荷载速度增加引起的动力放大系数与影响深度都将显著增加。

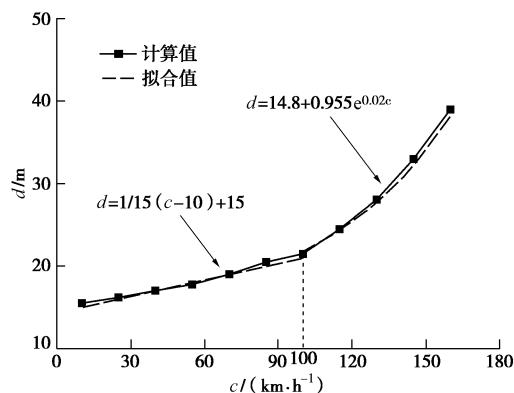


图 10 临界深度随荷载移动速度变化

Fig. 10 Variation of critical depth with load velocity

3 结 论

本文建立了三维弹性半空间模型, 基于弹性控制方程在直角坐标系和柱坐标系下的基本解, 再结合地基表面的应力条件, 首次给出了地表移动荷载作用下三维弹性半空间中无限长圆柱孔洞动力响应封闭解答。计算分析了地表移动荷载作用下隧洞位移、加速度和动应力响应, 并研究了荷载移动速度和隧洞埋深对隧洞动力响应的影响, 主要可得以下结论:

(1) 隧道埋深较浅时, 地表移动荷载速度增加可使拱顶地基中动应力显著增大; 拱顶地基中动应力随着隧道埋深的增加而迅速衰减, 荷载速度对地基动应力影响也相对减弱。

(2) 地表移动荷载引起的隧洞加速度随速度增加显著增大, 随隧洞埋深增加显著减小; 当隧洞埋深超过某临界深度时, 地表荷载引起的隧洞振动可低于规范规定限值。

(3) 在低速范围, 隧洞临界深度随荷载移动速度增加线性增加, 但当荷载速度超过 100 km/h, 隧洞临界深度随着荷载移动速度呈指数型增长。

(4) 本文提出了一种能准确预测地表移动荷载引起地下空间隧洞动力响应的解析解, 可作为地面交通荷载对地下隧洞动力影响评估的一项基本工具。

参 考 文 献:

- [1] LIU G B, XIE K H. Transient response of a spherical cavity with a partially sealed shell embedded in viscoelastic saturated soil[J]. Journal of Zhejiang University (Science A), 2005, **6**(3): 194 - 201.
- [2] SENJUNTICHAI T, RAJAPAKSE R. Transient response of a circular cavity in a poroelastic medium[J]. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, 1993, **17**(6): 357 - 383.
- [3] LU J F, JENG D S. Dynamic response of a circular tunnel embedded in a saturated poroelastic medium due to a moving load[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2006, **128**(6): 750 - 756.
- [4] LU J F, JENG D S. Dynamic analysis of an infinite cylindrical hole in a saturated poroelastic medium[J]. Archive of Applied Mechanics, 2006, **76**(5/6): 263 - 276.
- [5] 刘干斌, 谢康和, 施祖元. 黏弹性饱和多孔介质中圆柱孔洞的频域响应[J]. 力学学报, 2004, **36**(5): 557 - 563. (LIU Gan-bin, XIE Kang-he, SHI Zu-yuan. Frequency response of a cylindrical cavity in viscoelastic saturated porous media[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2004, **36**(5): 557 - 563. (in Chinese))
- [6] METRIKINE A V, VROUWENVELDER A. Surface ground vibration due to a moving train in a tunnel: two-dimensional model[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, **234**(1): 43 - 66.
- [7] LU J F, JENG D S, LEE T L. Dynamic response of a piecewise circular tunnel embedded in a poroelastic medium[J]. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 2007, **27**(9): 875 - 891.
- [8] SHENG X, JONES C J C, THOMPSON D J. Prediction of ground vibration from trains using the wavenumber finite and boundary element methods[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, **293**(3): 575 - 586.

- [9] 袁宗浩. 饱和土地区地铁列车运行引起的环境振动影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016. (YUAN Zong-hao. Environmental vibrations induced by underground railways in the saturated soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese))
- [10] SNEDDON I N. The stress produced by a pulse of pressure moving along the surface of a semi-infinite solid[J]. Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo, 1952, 2: 57 - 62.
- [11] BIERER T, BODE C. A semi-analytical model in time domain for moving loads[J]. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 2007, 27: 1073 - 1081.
- [12] XU B, LU J F, WANG J H. Dynamic response of a layered water-saturated half space to a moving load[J]. Computers and Geotechnics, 2008, 35: 1 - 10.
- [13] HUNG H H, YANG Y B, CHANG D W. Wave barriers for reduction of trains-induced vibrations in soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 130(12): 1283 - 1291.
- [14] TAKEMIYA H. Field vibration mitigation by honeycomb WIB for pile foundations of a high-speed train viaduct[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2004, 24: 69 - 87.
- [15] CAO Z G, CAI Y Q, BOSTRÖM A. Semi-analytical analysis of the isolation to moving-load induced ground vibrations by trenches on poroelastic half-space[J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331: 947 - 961.
- [16] HUANG X, SCHWEIGER H, HUANG H. Influence of deep excavations on nearby existing tunnels[J]. International Journal of Geomechanics, 2013, 13(2): 170 - 180.
- [17] ZHANG X M, OU X F, YANG J S, et al. Deformation response of an existing tunnel to upper excavation of foundation pit and associated dewatering[J]. International Journal of Geomechanics, 2017, 17(4): 04016112.
- [18] SHI C, CAO C, LEI M, et al. Effects of lateral unloading on the mechanical and deformation performance of shield tunnel segment joints[J]. Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2016, 51: 175 - 188.
- [19] POTTS D M, ATKINSON J H. Stability of a shallow circular tunnel in cohesionless soil[J]. Géotechnique, 1977, 27(2): 203 - 215.
- [20] KLAR A, VORSTER T E B, SOGA K, et al. Soil-pipe interaction due to tunneling: comparison between Winkler and elastic continuum solutions[J]. Géotechnique, 2005, 55(6): 461 - 466.
- [21] 戴宏伟, 陈仁朋, 陈云敏. 地面新施工荷载对临近地铁隧道纵向变形的影响分析研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 312 - 316. (DAI Hong-wei, CHEN Ren-peng, CHEN Yun-min. Study on effect of construction loads on longitudinal deformation of adjacent metro tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 312 - 316. (in Chinese))
- [22] 王正安, 肖洪天, 闫强刚. 地面列车动荷载对下穿隧道影响的动力学响应分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2016, 35(3): 67 - 72. (WANG Zheng-an, XIAO Hong-tian, YAN Qiang-gang. Analysis of dynamic response of undercrossing tunnels to vibration loads of ground trains[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2016, 35(3): 67 - 72. (in Chinese))
- [23] HUNG H H, YANG Y B. Analysis of ground vibrations due to underground trains by 2.5D finite/infinite element approach[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 9(3): 327 - 335.
- [24] HUNG H H, YANG Y B. Elastic waves in visco-elastic half-space generated by various vehicle loads[J]. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 2001, 21: 1 - 17.
- [25] GB 10070—88 城市区域环境振动标准[S]. 1988. (GB 10070—88 Standard of environmental vibration in urban area[S]. 1988. (in Chinese))

附录:

式(24)中参数 r_{jj} 和 Δ_j :

$$\begin{aligned}
 r_{11} &= e_s^2 [t_{11}(t_{23}t_{32} - t_{22}t_{33}) + t_{12}(t_{23}t_{31} - t_{21}t_{33}) + t_{13}(t_{21}t_{32} - t_{22}t_{31})], \\
 r_{12} &= 2e_s^2 t_{12}(t_{22}t_{33} - t_{23}t_{32}), \quad r_{13} = 2e_p e_s t_{13}(t_{22}t_{33} - t_{23}t_{32}), \\
 r_{21} &= 2e_s^2 t_{11}(t_{23}t_{31} - t_{21}t_{33}), \\
 r_{22} &= e_s^2 [t_{11}(t_{22}t_{33} - t_{23}t_{32}) + t_{12}(t_{21}t_{33} - t_{23}t_{31}) + t_{13}(t_{21}t_{32} - t_{22}t_{31})], \\
 r_{23} &= 2e_p e_s t_{13}(t_{21}t_{33} - t_{23}t_{31}), \\
 r_{31} &= 2e_p e_s t_{11}(t_{21}t_{32} - t_{22}t_{31}), \quad r_{32} = 2e_p e_s t_{12}(t_{22}t_{31} - t_{21}t_{32}), \\
 r_{33} &= e_p^2 [t_{11}(t_{22}t_{33} - t_{23}t_{32}) + t_{12}(t_{21}t_{31} - t_{21}t_{33}) + t_{13}(t_{22}t_{31} - t_{21}t_{32})], \\
 \Delta_1 &= t_{11}(t_{22}t_{33} - t_{23}t_{32}) + t_{12}(t_{23}t_{31} - t_{21}t_{33}) + t_{13}(t_{21}t_{32} - t_{22}t_{31}), \\
 \Delta_2 &= \Delta_3 = t_{11}(t_{23}t_{32} - t_{22}t_{33}) + t_{12}(t_{21}t_{33} - t_{23}t_{31}) + t_{13}(t_{22}t_{31} - t_{21}t_{32}), \\
 \xi_1 &= e_s(t_{22}t_{33} - t_{23}t_{32}), \\
 \xi_2 &= e_s(t_{21}t_{33} - t_{23}t_{31}), \\
 \xi_3 &= e_p(t_{31}t_{22} - t_{21}t_{32})。
 \end{aligned}$$