

## 粉质黏土地层盾构施工地表沉降关键参数分析与预测\*

杨 益<sup>1,2</sup> 李兴高<sup>1,2</sup> 蒋兴起<sup>3</sup> 金大龙<sup>1,2</sup>(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 100044, 北京; 2. 北京交通大学城市地下工程教育部重点实验室, 100044, 北京;  
3. 常州市轨道交通发展有限公司, 213022, 常州//第一作者, 博士研究生)

**摘 要** 基于常州地铁土压平衡盾构穿越典型粉质黏土地层 59 个地表沉降监测断面实测数据的统计结果, 分析了 Peck 公式用于预测常州地铁土压平衡盾构施工引起的地表横向沉降槽的适用性, 得出了预测常州地区典型地层中盾构施工引起的地表沉降基本参数的取值范围。即: 地层损失率取 0.10%~0.75%, 沉降槽宽度参数取 0.3~0.7。基于盾构机对土体作用的力学模型, 得到了盾构掘进时的地层位移场的解析解, 并与监测数据对比, 给出了相关参数的取值方法。应用给出的计算参数, 可以较好地预测常州地铁施工过程中及施工后引起的地表沉降。

**关键词** 地铁; 盾构; 地表沉降; 预测模型; 沉降槽

**中图分类号** P642.26; U215

**DOI:** 10.16037/j.1007-869x.2021.09.022

## Analysis and Prediction of Key Parameters of Ground Surface Settlements due to Shield Tunneling in Silty Clay Stratum

YANG Yi, LI Xinggao, JIANG Xingqi, JIN Dalong

**Abstract** Based on the measured data of 59 settlement monitoring sections during Changzhou Metro EPB shield tunneling through typical silty clay stratum, the applicability of Peck formula for predicting the ground lateral settlement trough caused by EPB shield tunneling in Changzhou Metro is analyzed. The range of basic parameters for predicting ground settlement in Changzhou area typical stratum is obtained, that is, 0.10%~0.75% for stratum loss rate, and 0.3~0.7 for settlement trough width. Based on the mechanics model of shield machine action on soil, the analytical solution of ground displacement field during shield tunneling is obtained. By comparing to the monitoring data, the method of selecting values for relevant parameters is given. By adopting the calculation parameters obtained from application, ground settlement caused by shield tunneling construction of Changzhou Metro can be well predicted.

**Key words** metro; shield tunnel; ground surface settlement;

prediction model; settlement trough

**First-author's address** School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, 100044, Beijing, China

盾构法施工由于其技术和经济的优越性, 且能够在不影响城市正常功能的情况下快速完成隧道建设, 已成为地铁区间隧道建设的主流施工方法。在建构筑物密集的城市区域, 盾构掘进时不可避免地会对土体产生扰动从而造成土体位移场发生变化, 位移过大则会对邻近建构筑物安全性造成威胁<sup>[1]</sup>。长久以来, 大量学者致力于隧道施工引起的地表沉降和变形预测研究。但对于一个特定地区来说, 由于地层环境及施工水平的差异, 隧道施工引起的地层沉降有其自身的特点, 准确预估地层沉降对指导施工有重要意义。

目前, 预测隧道引起地层变形的的主要方法有经验法、解析法、数值模拟法。早在 1969 年, Peck 建立了隧道开挖引起地表沉降的经验公式<sup>[2]</sup>, 是经验法的代表, 因其具有简单、适用等特点, 成为应用最广泛的分析方法。随着对盾构施工引起地层沉降的深入研究, 解析方法逐渐发展, 目前主要的解析方法包括应力函数法<sup>[3]</sup>、复变函数解<sup>[4]</sup>和虚像法<sup>[5]</sup>等, 可以求解不同边界条件下地层变形情况。此外, 随着计算机技术的发展, 数值模拟方法越来越多地应用于预测地层变形。有限元<sup>[6]</sup>、有限差分<sup>[7]</sup>等方法能考虑到复杂的施工工艺、地质条件等影响因素, 具有其独特的优势; 但这些方法的建模过程较复杂, 参数较多、较难确定。

本文基于常州地铁 1 号线、2 号线大量的地表沉降监测数据, 对 Peck 公式在常州地区的适应性进行了分析, 并给出了预测盾构开挖引起的横向地表沉降相关计算参数的取值范围。基于隧道结构-土

\* 国家自然科学基金面上项目(51978040); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2015CB057802)

体相互作用理论,并考虑地层损失和盾构施工荷载,建立了适用于常州地铁当前施工水平的预测盾构掘进时地表隆沉的计算方法,并与实测数据进行了对比。可为后续类似地层中地铁施工地表隆沉预测提供参考。

## 1 常州地铁工程概况

常州地铁1号线一期工程线路全长约34.076 km,其中,地下线长31.474 km,高架线长2.189 km,敞开段长0.413 km,目前已全线贯通并通车;2号线一期工程线路起于西部青枫公园站,终于东部颜家站,工程线路全长19.8 km,其中地下线长约18.23 km,目前仍在建设中。常州地铁工程主要采用土压平衡式盾构掘进,盾构机直径6.34 m,管片外径6.2 m。

常州市地处长江下游三角洲苏南平原,地形较为平坦,区域地质构造较稳定。地质勘察资料显示,地下区间盾构隧道主要穿越粉质黏土层,土体多呈软塑~流塑状,具有含水量较高、孔隙比大、强度低、压缩性较高等不良工程特性,同时还具有低渗透性、触变性和流变性等软土特点。

## 2 横向地表沉降分析

### 2.1 地表沉降预测的Peck方法

Peck提出了地层损失的概念,且假定实际土体损失体积等于沉降槽的体积。同时,基于对大量隧道开挖引发的地表沉降测试数据的分析结果,Peck提出了估算隧道开挖地表下沉的实用方法,即距隧道中线 $x$ 处的地表沉降值 $S(x)$ 可按式(1)计算<sup>[2]</sup>:

$$S(x) = S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

式中:

$S_{\max}$ ——地表最大沉降量,被认为位于隧洞轴线位置;

$x$ ——从隧道轴线到计算点的距离;

$i$ ——沉降槽宽度系数,代表从沉降曲线中心点到拐点的距离。

对于盾构施工的不排水条件,最大沉降值 $S_{\max}$ 可按式(2)计算<sup>[3]</sup>:

$$S_{\max} = 0.313V_L D^2/i \quad (2)$$

式中:

$V_L$ ——单位长度地表沉降槽的体积占隧道开

挖名义体积的百分比,称为地层损失率;

$D$ ——盾构开挖直径。

虽然Peck公式因其简便性、合理性被国内外广泛应用于预测盾构隧道开挖引起的地表沉降<sup>[8]</sup>,但对于具体工程而言,应用Peck公式对地表沉降进行估算需要确定两个参数:沉降槽宽度系数 $i$ 和地层损失率 $V_L$ 。其中, $V_L$ 与施工工艺、施工管理水平及土层性质等因素相关,一般可依据经验取值或预先在试验段确定。当 $V_L$ 一定的情况下, $i$ 值决定了地表沉降的影响范围。长期以来国内外对 $i$ 的取值问题,仍未形成统一的理论。 $i$ 的取值与土层的性质、隧道埋深和洞径等均有关系,目前的研究均认为 $i$ 值与隧道埋深 $Z$ 呈正相关规律。即在相同 $V_L$ 的条件下,隧道埋深越大,沉降槽越宽, $S_{\max}$ 越小,沉降曲线宽而浅。

### 2.2 常州地铁地表横向沉降的统计参数

对于一个确定的工程而言,盾构施工引起的地表位移取决于沉降槽宽度系数 $i$ 和地层损失率 $V_L$ 。 $V_L$ 决定了沉降的大小, $i$ 决定了沉降槽的形状。文献<sup>[9]</sup>根据在伦敦地区的经验,认为 $i$ 与隧道埋深 $Z$ 之间可以建立简单的线性关系:

$$i = KZ \quad (3)$$

式中:

$K$ ——沉降槽宽度参数。

当隧道的直径 $D$ 和埋深 $Z$ 已知时,准确估计 $V_L$ 与 $K$ 值成为预测地表横向沉降的关键。在一个地区特定的地质条件下, $V_L$ 与 $K$ 值具有一定的普遍规律。选取常州地铁1号线4个区间共59个横断面的监测数据进行分析,隧道埋深 $Z$ 在9.4~26.7 m之间,涵盖了目前常州市地铁穿越的各类典型粉质黏土地层。对选取的断面进行Peck曲线拟合而得到 $S_{\max}$ 和 $i$ ,通过换算得到 $V_L$ 以及 $K$ 值。

图1a)为 $V_L$ 与深跨比 $Z/D$ 的关系图。由图1a)可知,在当前施工水平条件下,常州地铁采用土压盾构施工的 $V_L$ 控制值在1.5%以下。当 $Z/D$ 小于3时, $V_L$ 值普遍为1%以下;当 $Z/D$ 大于3时,其中一些断面的 $V_L$ 值超过1%,以隧道上覆地层为粉砂层居多。

图1b)为地层损失率 $V_L$ 的分布范围统计结果。由图1b)可知,粉砂夹粉土层与粉砂夹粉质黏土层的分布相似, $V_L$ 值在0~0.25%范围内的占50%以上,控制地层损失的难度较小。上覆地层为粉砂层时, $V_L$ 值在0.25%~0.5%范围内得占70%左

右,控制地层损失的难度较前者更大。整体来看, $V_L$  值在 0.75% 以下的比例在 90% 以上,可在该范围内取值对地表沉降进行估计。

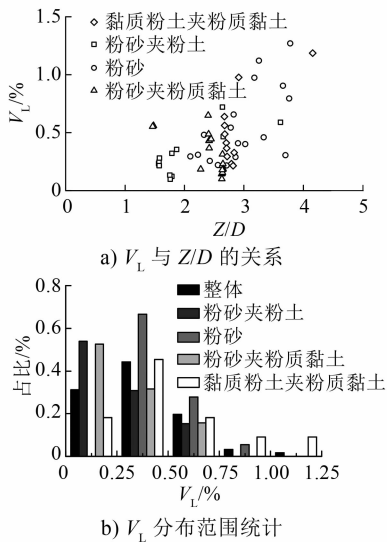


图1 地层损失率  $V_L$  统计分析结果

图2 a) 为  $i/D$  与  $Z/D$  的关系。尽管不同上覆地层的数据分布较离散,但整体而言,数据点符合公式(3)呈现的线性关系,且绝大部分断面的  $K$  值在 0.3~0.7 范围内。

图2 b) 为隧道在不同上覆地层中的  $K$  值分布统计结果。整体而言, $K$  值在 0.3~0.4 区间内的约占 20%,在 0.4~0.5 区间内的约占 50%,在 0.5~0.6 区间内的约占 30%。粉砂层及粉砂夹粉土层中  $K$  值分布在 0.4~0.6 范围内的断面占 80% 以上, $K$  值可按此范围进行估计。黏质粉土夹粉质黏土层中  $K$  值在 0.3~0.5 范围内的约占 90%,对该地层内的断

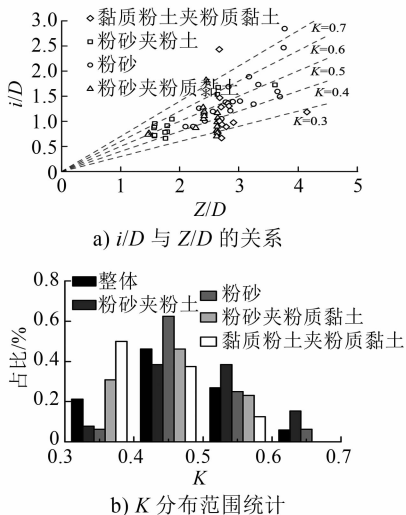


图2 沉降槽宽度参数  $K$  统计分析结果

面, $K$  值可按此范围进行估计。

### 3 施工过程中的地表位移分析

利用 Peck 公式并选用合理的预测参数  $i$  和  $V_L$  可以有效预测盾构施工后的横向地表沉降。但在盾构机掘进过程中,由于施工荷载引起的地层变形同样不容忽视。

#### 3.1 盾构机对土体的作用力学模型

文献[10]提出了综合考虑地层损失、盾壳摩擦、附加支护压力、刀盘扭转切削 4 个方面影响的盾构机对土体的作用力学模型,如图 3 所示。通过将 4 个方面各自引起的位移场叠加可以得到盾构掘进引起天然地层位移场。

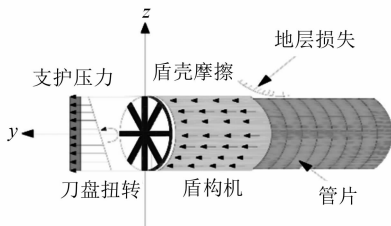


图3 盾构机对土体作用力学模型

#### 3.2 地层损失引起的地表位移

在文献[10]提出的模型中,因地层损失产生的任意一点的竖向位移  $u_{zV}$  为:

$$u_{zV} = \int_{-\infty}^{-s} V(x, z) f_z(x, y - \xi, z) d\xi \quad (4)$$

$$f_z = \frac{V_0}{4\pi} \left( \frac{z-h}{R_1^3} + \frac{2z}{R_2^3} - \frac{(3-4\nu)(z+h)}{R_2^3} - \frac{6z(z+h)^2}{R_2^5} \right) \quad (5)$$

$$V(x, z) = \frac{4gR + g^2}{4R^2} \exp \left( -\frac{1.38x^2}{(H+R)^2} - \frac{0.69z^2}{H^2} \right) \quad (6)$$

其中,  $R_1 = \sqrt{r^2 + (z-h)^2}$ ,  $R_2 = \sqrt{r^2 + (z+h)^2}$

式中:

$h$ ——球形空腔中心的覆土深度;

$V_0$ ——球形空腔引起的体积损失;

$H$ ——隧道中心轴线的埋深;

$R$ ——隧道断面的半径;

$V(x, z)$ ——隧道边界沿环向的收敛位移分布函数;

$x, y, z$ —— $x, y, z$  轴的位置坐标;

$\xi$ ——隧道开挖长度;

$g$ ——用于定义盾尾空隙大小的间隙参数。

根据文献[11]对  $g$  的定义,  $g$  可以表达为:

$$g = G_p + u_{3D} + \omega \quad (7)$$

式中:

$G_p$ ——盾构机外缘与衬砌外缘在几何上所形成的空隙;

$u_{3D}$ ——因土体挤入隧道工作面产生的三维弹塑性变形等效的径向位移量;

$\omega$ ——考虑施工精度产生的额外地层损失量。

随着土压盾构技术的发展,在土仓压力设定良好的条件下,开挖面前方土体可基本保持稳定,  $u_{3D}$  可以被忽略。同时,由于同步注浆技术的发展,  $G_p$  可通过壁后注浆被有效填充。文献[12]基于同步注浆浆体变形试验结果,考虑了壁后注浆体的体积收缩损失,将  $g$  修正为:

$$g = G'_p + \omega = G_p \varepsilon + \min(G'_p, u_i/3) \quad (8)$$

式中:

$\varepsilon$ ——壁后注浆体随时间的体积收缩率;

$G'_p$ ——壁后注浆收缩后的盾构机外缘与衬砌外缘剩余的空隙;

$u_i$ ——平面应变顶拱的弹塑性位移量。

根据文献[13]的研究成果,  $u_i$  可定义为:

$$u_i = R - R \left\{ 1 + \frac{2(1+\nu)c_u}{E_u} \left[ \exp^2 \left( \frac{\sigma_v - P_i}{2c_u} \right) \right] \right\}^{(-1/2)} \quad (9)$$

式中:

$E_u, \nu, c_u$ ——分别是土体不排水弹性模量、泊松比和抗剪强度;

$\sigma_v$ ——隧道拱顶的垂直土压力;

$P_i$ ——隧道掌子面支护压力。

根据式(8)和式(9)可计算得到当前施工水平及地质条件下的  $g$ 。

### 3.3 临时施工荷载引起的地表位移

文献[14]推导出水平和竖向点荷载作用于弹性半无限空间内部某位置时土体中任意一点的位移。对于盾构施工荷载(如盾壳摩擦力、附加支护力、刀盘扭转力)对地层影响的研究,采用 Mindlin 公式能够得到较为理想的结果<sup>[10]</sup>。

基于 Mindlin 公式,可得到附加支护力  $\Delta p$  引起的任一点的竖向位移  $u_{zp}$  为:

$$u_{zp} = \int_0^R \int_0^{2\pi} \Delta p \zeta(x - \rho \cos \theta, y, z - \rho \sin \theta) d\theta d\rho \quad (10)$$

式中:

$\zeta$ ——由 Mindlin 理论的水平力解确定的格林函数;

$\rho$ ——开挖面径向坐标;

$\theta$ ——开挖面角度坐标。

同理可得盾壳摩擦力  $f$ 、刀盘扭矩  $T$  引起的任一点的竖向位移  $u_{zf}, u_{zT}$ 。通过叠加上述各分量,可得到盾构隧道施工引起的空间变形  $u_z$  如下:

$$u_z = u_{zV} + u_{zp} + u_{zf} + u_{zT} \quad (11)$$

### 3.4 常州地区三维沉降预测实例分析

选取常州地铁2号线某位置处监测数据进行实例对比分析。首先估算地层损失引起的地表位移。盾构机参数如下:  $D=2R=6.34$  m; 管片外径 6.2 m; 盾构机长 8.68 m。土体泊松比  $\nu=0.28$ ,  $H=17$  m。为计算  $g$ , 根据地勘资料及掘进数据, 相关参数取值如下:  $E_u=11$  MPa,  $c_u=10$  kPa,  $\sigma_v=0.28$  MPa,  $P_i=0.21$  MPa。根据文献[12]中试验结果表明, 壁后注浆体在注浆压力 192.6 kPa 和 240.7 kPa 作用下的体积收缩率  $\varepsilon_c$  均为 9.8%, 利用式(8), 采用  $\varepsilon=\varepsilon_c=10\%$  可得:

$$G'_p = G_p \varepsilon = (6.34 \text{ m} - 6.2 \text{ m}) \times 0.1 = 0.014 \text{ m} \quad (12)$$

利用式(9)计算可得,  $\omega=0.014$  m, 则  $g$  取值为 0.028 m。则由地层损失引起的地表位移如图4所示。由图4可知, 地表位移关于隧道轴线呈对称分布, 在隧道横断面上呈现 Peck 曲线型分布。总体而言, 地层损失对地表位移的影响范围大致为隧道轴线两侧各 20 m 范围内。

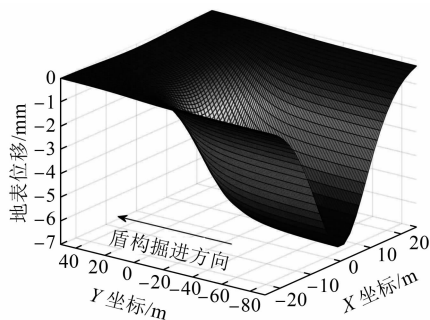


图4 地层损失引起地表竖向位移场

其次,对施工荷载引起的地表位移进行估算。根据盾构机行进参数确定施工荷载计算参数如下:  $f=40$  kPa,  $\Delta p=40$  kPa,  $T=2570$  kN·m。图5为各施工荷载引起的地表位移场分布。 $f$  和  $\Delta p$  引起的地表竖向位移呈现前隆后沉规律。 $f$  引起的地表最大隆起值 2.7 mm,  $\Delta p$  引起的地表最大隆起值仅为

0.06 mm,相较于 $f$ 而言, $\Delta p$ 对地表隆沉的影响较小。 $f$ 和 $\Delta p$ 对地表位移的影响范围约为刀盘位置前后各40 m、隧道轴线左右各25 m的范围。 $T$ 对地层位移场的贡献极小,最大位移量仅0.002 mm,完全可被忽略。

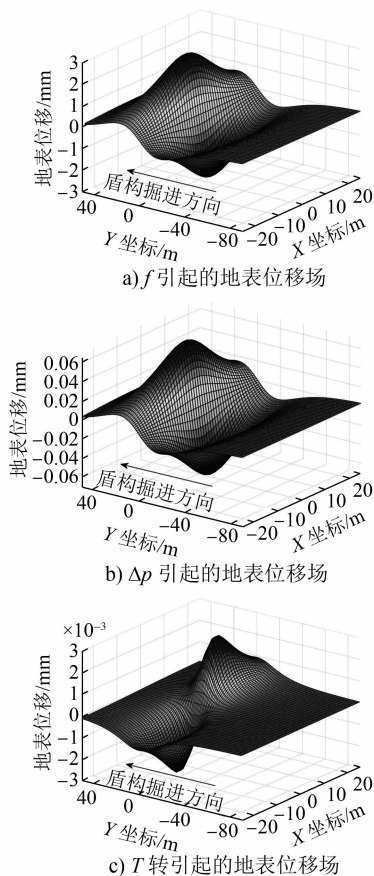


图5 施工荷载引起地表竖向位移场

将图4、图5的位移场叠加,得到图6 a)的预测地表位移场。图6 b)为实测地表位移场。二者对比可知,整体而言,预测值与实测值呈现的位移场规律基本吻合,以隧道轴线为中心线,宽度为50 m的区域内的地表位移场均受到盾构掘进的影响。以刀盘所在位置为分界线,刀盘前方地表产生隆起,刀盘后方地表呈现沉降。从盾构后方横向沉降来看,由于实测时在X方向测点布置存在限制,致使图6中预测位移场的沉降槽宽度较实测值稍宽。从纵向沉降来看,预测位移场中,最大沉降值产生于盾尾后方约5 m的隧道轴线处,最大隆起值产生于刀盘前方约10 m的隧道轴线处。

选取图6 b)中SD3、SD4、SD5等3列测点进行纵向沉降对比分析,结果如图7所示。刀盘位于Y

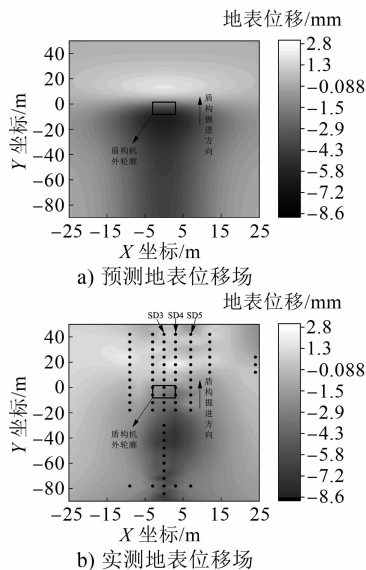


图6 预测与实测地表竖向位移场对比

坐标轴零点位置,SD3列测点位于隧道轴线正上方。由图7可知,在Y坐标轴-20~40 m的范围内,预测曲线能较好地反映地表位移的纵向演变规律。但在Y坐标轴-100~-20 m范围内,预测沉降值较实测值更小,原因有以下2个方面:

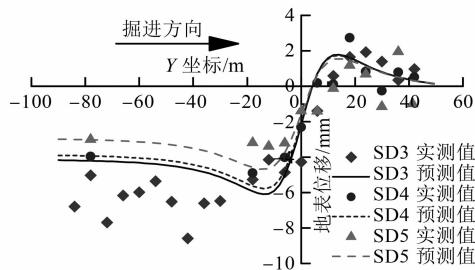


图7 盾构施工引起的预测与实测地表纵向位移对比

1) 预测值关于地层损失对沉降的贡献是基于同步注浆体的体积收缩进行估算的,对注浆体体积收缩的估算可能存在误差;

2) 由于常州地区属于深厚富含承压水地层,土层被盾构掘进扰动之后,超孔隙水压力逐渐消散引起地层产生长期固结沉降,该部分沉降不在预测模型考虑范围内。

## 4 结论

1) 从常州地区盾构施工的统计数据来看,地层损失率 $V_L$ 在0.1%~0.75%范围内,沉降槽宽度参数 $K$ 取值在0.3~0.7之间。

2) 考虑地层损失、盾壳摩擦力、附加支护力、刀盘扭转的盾构机对土体的作用力学模型,可以有效

预测盾构掘进时刀盘切口后方 20 m 至前方 40 m 的地表隆沉。

3) 基于 Mindlin 解求得的施工荷载对地表位移场的各种作用中,盾壳摩擦力  $f$  对地表位移起主要作用,附加支护力  $\Delta p$  的作用较小,刀盘扭矩  $T$  的作用可被忽略。

## 参考文献

- [1] DAMMYR, Øyvind. Pressurized TBM-shield tunneling under the subsidence sensitive grounds of Oslo: Possibilities and limitations [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 66: 47-55.
- [2] PECK R B. Deep excavations and tunnelling in soft ground [C] //State-of-the-Art Report. Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering State of the Art Report. Mexico: State-of-the-Art Report, 1969: 225-290.
- [3] 韩焯, 李宁, STANDING J R. Peck 公式在我国隧道施工地面变形预测中的适用性分析 [J]. 岩土力学, 2007(1): 23.
- [4] PARK K H. Elastic solution for tunneling-induced ground movements in clays [J]. International Journal of Geomechanics, 2004, 4(4): 310-318.
- [5] 王立忠, 吕学金. 复变函数分析盾构隧道施工引起的地基变形 [J]. 岩土工程学报, 2007(3): 319.
- [6] 姜忻良, 赵志民. 镜像法在隧道施工土体位移计算中的应用 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005(6): 801.
- [7] NG C, WW L, KIN M T, et al. Three-dimensional numerical investigations of new Austrian tunnelling method (NATM) twin tunnel interactions [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(3): 523-539.
- [8] ATTEWELL B, YEATES J, SELBY A R. Soil movements induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures [M]. Glasgow: Blackie, 1986. 10-50.
- [9] O'REILLY M P, NEW B M. Settlement above tunnels in the United Kingdom—their magnitude and prediction [C] //Institution of Mining & Metallurgy. Proceedings of the 3rd international symposium. Brighton. London: Institution of Mining & Metallurgy, 1982: 173-181.
- [10] 金大龙. 盾构隧道群下穿既有地铁运营隧道变形机理及控制研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [11] ROWE R K, LO K Y, KACK G J. A method of estimating surface settlement above tunnels constructed in soft ground [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1983, 20(1): 11-22.
- [12] 韩月旺, 梁精华, 袁小会. 盾构隧道壁后注浆体变形模型及土体位移分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007(增刊 2): 3646.
- [13] LO K Y, ROWE R K. Predicting settlement due to tunnelling in clay [C] //ASCE. Tunnelling in Soil and Rock. Atlanta: ASCE, 1984: 46-76.
- [14] MINDLIN R D. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid [J]. Journal of Applied Physics, 1936, 7(5): 195-202.

(收稿日期: 2019-11-22)

## (上接第 97 页)

模块的开关损耗、导通损耗、驱动损耗和体二极管导通损耗的计算方法,并对比分析了 MOSFET 模块开关损耗和导通损耗的计算值与仿真值,结果表明:碳化硅器件的开关损耗和导通损耗模型可为系统设计提供参考,其中导通损耗模型精确度高。对所研制的 SiC 充电机进行了功能验证,对比分析了该充电机功率损耗的试验值、仿真值、计算值,结果表明:通过计算模型能够预测充电机功耗,而且效果优于仿真模型的。

## 参考文献

- [1] 康成伟, 刘博, 张国芹, 等. SiC MOSFET 驱动参数的协同控制研究 [J]. 电力电子技术, 2020(10): 77.
- [2] 孙大南. 动车组与电力机车高频化辅助变流系统主电路研究 [J]. 电工电能新技术, 2019(3): 74.
- [3] 吴佐民. 城市轨道交通高频充电机研制 [D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [4] LIU B, LI W, MENG D, et al. Low Stray Inductance Optimized Design for Power Circuit of SiC-MOSFET Based Inverter [J]. IEEE Access, 2020, 99: 1.
- [5] LI W, MA Y, MEI W, et al. Evaluation of Full-SiC-Based Integrated Inverter Prototype [C] //IEEE. 2019 IEEE 2nd International Conference on Power and Energy Applications (ICPEA). Singapore: IEEE, 2019: 43-46.
- [6] 滕欣元, 郑建勇. 基于 PLECS 的 SiC 逆变器热设计研究 [J]. 电测与仪表, 2020(13): 17.
- [7] 刘博如. 基于 PLECS 的车载 SiC 单相逆变器损耗研究 [J]. 电力电子技术, 2019(8): 118.
- [8] YU L C, DUNNE G T, MATOCHA K S, et al. Reliability Issues of SiC MOSFETs: A Technology for High-Temperature Environments [J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2011, 10(4): 418-426.
- [9] 刘博, 刘伟志, 董侃, 等. 基于全碳化硅功率组件的变流器母排杂散电感解析计算方法 [J]. 电工技术学报, 2021(10): 2105.
- [10] DIAO L, DU H, SHU Z., et al. A Comparative Study Between AI-HM and SPD-HM for Railway Auxiliary Inverter With Pulsating DC Link [J]. IEEE Trans. Industrial Electronics, 2018, 65(7): 5816-5825.

(收稿日期: 2021-03-20)