

DOI: 10.3901/JME.2014.21.031

盾构装备掘进总推力的反演识别与力学建模^{*}

郑 峰^{1,2} 张 茜^{1,2} 亢一澜^{1,2}

(1. 天津大学机械工程学院 天津 300072;

2. 天津大学天津市现代工程力学重点实验室 天津 300072)

摘要: 盾构掘进载荷与装备地质适应性密切相关, 有效地控制掘进推力载荷是保证装备安全施工与提高掘进效率的关键环节。分析盾构掘进中总推力的特点, 以及掘进参数、地质参数与装备构型参数等对掘进总推力的影响, 利用力学分析与量纲分析的方法, 建立掘进总推力学模型。采用多元回归的方法, 处理工程实测数据, 对掘进总推力学模型中的系数进行反演识别。结合天津地铁九号线十一经路站至大直沽西路站施工段的工程实测数据, 采用统计学分析方法, 讨论掘进总推力学模型的计算残差。通过海量工程实测数据与力学模型预估结果比较, 讨论掘进总推力学模型的适用性。分析表明, 所建立的总推力学模型能够反映掘进总推力与掘进速度以及地质参数等主要影响因素间的相互影响规律, 可以为施工中总推力的合理选取与控制提供参考。

关键词: 海量工程数据; 盾构总推力; 力学建模; 量纲分析; 残差分析

中图分类号: TH11; U451

Inverse Identification and Mechanical Modeling of Total Thrust on Shield Tunneling Machine

ZHENG Zheng^{1,2} ZHANG Qian^{1,2} KANG Yilan^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072;

2. Tianjin Key Laboratory of Modern Engineering Mechanics, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract: Shield tunneling machine load is closely connected with the geological condition, Effective control on total thrust of shield tunneling machine is vital for the equipment operating security and efficiency. The characters of total thrust and influence of operating parameters, geological parameters and equipment configuration over total thrust are analyzed. Mechanical model of total thrust is established through the mechanical analysis and dimensional analysis. Inverse identification from on-site data is carried out for mechanical model coefficients via the multiple regression method. Based on the on-site data acquired from Rd. Shiyijing to Rd. Dazhiguxi of Tianjin No. 9 subway project, model residual is discussed using statistical analysis. By comparing the massive on-site data and mechanical model prediction results, model feasibility is discussed. Analysis indicates that established mechanical model is able to reflect the interactions among the total thrust, excavation speed and geological parameters. The model can serve as the reference for thrust selection and control in engineering.

Key words: massive on-site data; total thrust; mechanical model; dimensional analysis; residual analysis

0 前言

盾构装备具有结构复杂、载荷巨大等特点, 通过装备机载系统所记录的海量掘进数据, 分析施工

数据中的有效信息, 研究一些主要控制参量之间的相互关系, 识别盾构装备载荷的地质适应性规律, 对于装备设计与安全施工具有重要意义。

盾构总推力是掘进载荷中的重要组成部分, 也是反映装备地质适应性的核心参数, 推力值大小直接影响装备的掘进状态与掘进效率。盾构总推力的构成与装备尺寸和构型、地质力学参数、掘进控制参数等密切相关, 其影响因素十分复杂。围绕盾构

^{*} 国家自然科学基金(11127202, 11302146)、国家高技术研究发展计划(863计划, 2012AA041801)资助项目。20131109 收到初稿, 20140611 收到修改稿

掘进总推力的研究工作已经取得一定进展：早期的掘进总推力研究主要是经验数据的统计与分析。SZECHAY^[1]基于施工经验，给出了掘进界面上单位面积推力的建议值。KRAUSE 通过收集并分析多台日本和德国盾构施工数据，给出了盾构装备载荷设计的经验估计公式(推力 $F = \beta D^2$ ，扭矩 $T = \alpha D^3$ ， α 、 β 为经验系数， D 为直径)^[2]。GRAHAM^[3]提出了考虑单刀推力和岩石单轴抗拉强度为影响因素的掘进进尺经验预测模型。XIA 等^[4]提出了考虑刀具位相角、安装半径及刀间距等因素的单刀掘削载荷力学模型。张茜等^[5]提出了盾构掘进界面载荷的解耦分析方法，建立了综合反映地质条件、装备操作状态及结构特征等因素影响的装备载荷正向计算模型。在数值模拟方面，ZHANG 等^[6]利用数值分析模型对掘进扭矩与转速的关系进行了讨论。苏翠侠等^[7]利用有限元法研究了掘进过程中刀盘掘进界面的载荷与载荷分布。WEN 等^[8]利用数值模拟方法研究了复合地层下不同刀盘开口率对载荷的影响。WANG 等^[9]通过有限元法模拟了单刀掘削过程，讨论了切深对单刀掘削法向力的影响。郭伟等^[10]基于 CFD 理论讨论了相同开口率不同开口分布特征的刀盘前后渣土的压力分布规律。在试验研究方面，张厚美等^[11]基于盾构掘进参数的组合模拟试验，对装备在软土中掘进时的速度与扭矩进行了线性回归分析。SHI 等^[12]基于土压平衡盾构的掘进模拟试验，分析了刀盘开口率与土压力对扭矩的影响。何小新等^[13]对刀盘直径、功率、推力、力矩等参数间的线性相关关系进行了定量分析。宋克志等^[14]基于掘进模拟试验数据，结合回归方法得到了刀盘扭矩与切深之间的近似线性关系。ZHANG 等^[15]结合力学分析和回归方法，建立了掘进比能的识别模型。近些年来，智能识别方法被逐步引入到盾构装备研究中，相关的工作有：刘宣宇等^[16]总结了模糊理论、神经网络等智能方法在盾构装备自动控制的应用。SUN 等^[17]利用协同进化遗传算法对 TBM 掘进刀盘刀具布局进行了优化设计。MAHDEVARI 等^[18]使用不同种类神经网络对伊朗输水工程的隧道地层沉降进行了预测与对比。朱北斗等^[19]利用反馈神经网络技术，通过掘进推力、扭矩及掘进速度等参量，对试验土箱地层性质进行了识别。张干清等^[20]基于可靠灰色粒子群算法建立并求解了盾构机行星减速器轮系优化的数学模型。目前智能识别方法在应用研究中大多属于黑箱方法，基于训练样本建立数学模型，

一般难以给出明确的物理内涵。

盾构装备机载记录系统给出的工程数据信息数量巨大，种类繁多。从数据中识别盾构装备载荷地质适应性的内在规律，进行掘进总推力的力学建模是本文工作的主要目的。本文在分析工程实测数据的基础上进行盾构装备总推力的反演识别，利用力学分析与量纲分析的手段进行数据挖掘，分析盾构掘进过程中总推力的影响因素，建立掘进总推力的力学模型，并结合工程实测数据讨论该方法的有效性。

1 盾构掘进总推力的力学建模

基于盾构装备的海量实测数据的数据挖掘，对盾构掘进总推力进行力学建模的技术路线见图 1。

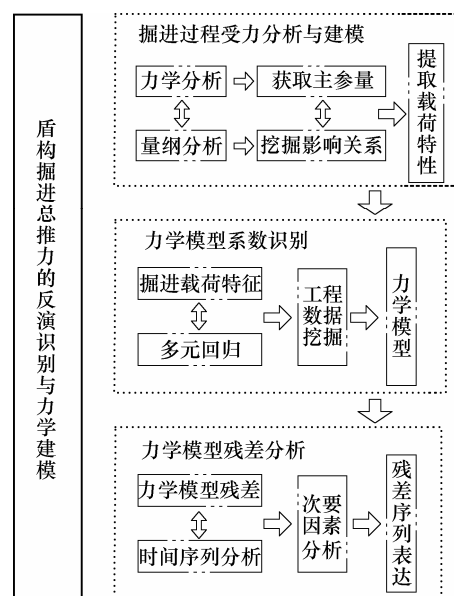


图 1 盾构掘进总推力的反演识别与力学建模技术路线

1.1 盾构掘进总推力的力学分析与建模

构成盾构装备掘进总推力的载荷分量多且复杂，影响盾构掘进总推力的主要因素大致可以归纳为三类参数，分别为掘进参数(如进尺 δ 、密封舱压力 P)、地质参数(如岩土承载力 W 、埋深 H 、地下水位 H')以及装备构型几何参数(如盾构直径 D)。在盾构掘进过程中，有些载荷分量相对稳定，不受掘进参数的影响，如掘进界面的静土压力与地下水压力、盾壳摩擦力与后续设备牵引力等。有些载荷分量与掘进参数直接相关，如刀盘系统的掘进力。因此，本文考虑总推力的属性与影响因素，将掘进总推力分为稳态载荷与动态载荷两大部分。其中稳态载荷与地质参数、装备尺寸因素有关，在掘进过程中基本不受掘进速度的影响。动态载荷与掘进速

度、地质参数密切相关,掘进速度快,所需要的载荷就大。基于上述分析,总载荷表示为

$$F = F_o + F_s \quad (1)$$

式中 F ——掘进总推力;

F_o ——动态载荷;

F_s ——稳态载荷。

动态载荷 F_o 主要是掘进载荷,与掘进进尺 δ 、地质参数 W 相关,且 $F_o \propto W\delta^a$, a 为待定的与掘进进尺相关的指数。稳态载荷 F_s 包括掘进界面的静土压力与地下水压、盾壳摩擦力与后续设备牵引力等, F_s 与盾构装备尺寸 D 、地质参数 W 、埋深 H 、地下水位 H' 相关。考虑到土压平衡盾构的密封舱压力与掘进界面的静土压力及地下水压相关,并且在掘进界面区域基本处于平衡状态,将稳态载荷表示为 $F_s \propto (p^b D^c + WD^c)$, 其中 b 与 c 分别为与掘进面水压力与静土压力、地质状况相关的待定指数。因此,给出如下掘进总推力力学模型

$$F = F_o + F_s = \beta_1 W \delta^a + (\beta_2 p^b + \beta_3 W) D^c \quad (2)$$

式中, β_1 、 β_2 、 β_3 为力学模型中不同的待定系数,其大小与具体工程、工况和盾构装备相关,可通过给定的工程测试数据进行识别确定。在式(2)中,稳态载荷取值相对稳定,动态载荷反映了总推力随掘进进尺 δ 与地质参数 W 的变化。

本文运用物理基本规律和量纲分析方法,研究总推力力学模型中的待定指数 a 、 b 、 c 。在式(2)给出的总推力力学模型中,总推力各个载荷分量应该满足量纲一致性原则。根据牛顿第二定律 $F = ma$ 可知,总推力的基本量纲表达式为 $[M][L][T]^{-2}$ 。将式(2)中的动态载荷 F_o 与稳态载荷 F_s 中的物理量都分别用长度 $[L]$ 、质量 $[M]$ 与时间 $[T]$ 三个基本量纲表示。其中,地质参数的量纲为 $[M][L]^{-1}[T]^{-2}$,进尺与盾构直径的量纲为 $[L]$ 。将上述物理量的量纲代入式(2)中的每一项,可得量纲表达式

$$[M][L][T]^{-2} = [M][L]^{-1}[T]^{-2}[L]^a \quad (3)$$

$$[M][L][T]^{-2} = [M]^b [L]^{-b} [T]^{-2b} [L]^c \quad (4)$$

$$[M][L][T]^{-2} = [M][L]^{-1}[T]^{-2}[L]^c \quad (5)$$

根据量纲一致性原则,式(3)~(5)两边量纲相等,求得待定指数为 $a=2$ 、 $b=1$ 、 $c=2$,代入式(2)得到掘进总推力表达式

$$F = \beta_1 W \delta^2 + (\beta_2 p + \beta_3 W) D^2 \quad (6)$$

式(6)给出了总推力的基本构架,以及掘进状态、地质条件、装备结构等主要因素与掘进总推力

的影响关系。若地质参数 W 较小,所需掘进总推力则较小。在地质条件不变时,若掘进速度增加,总推力的增量与进尺平方相关。装备在高地下埋深掘进时,也会使掘进总推力增大。式(6)中给出的总推力与装备直径间呈平方关系,符合力学的平衡关系,并与 KRAUSE 载荷经验公式中给出的推力与直径关系一致。

1.2 总推力力学模型的系数识别

基于具体工程的实测数据,采用多元回归方法,对式(6)力学模型中的待定系数进行反演识别。

本文采用的工程数据来自天津地铁九号线十一经路站至大直沽西路站施工段,盾构机为 6.34 m 直径土压平衡盾构,盾构机的数据采集系统可实时记录掘进过程中的载荷信息和掘进参数。图 2 给出掘进施工区段的基本信息,覆土深度在 10~20 m 范围,主要穿越地质层为地下粉质黏土层,淤泥质黏土层及粉土层等。

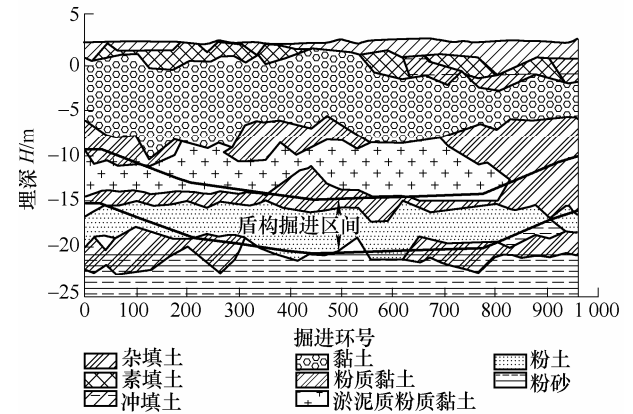


图 2 天津地铁九号线地质断面图

由于掘进施工的前 300 环为试掘进段,将该段数据剔除,选取 300~700 环数据作为训练样本。以实际工程的地质参数 W (kPa)、掘进进尺 δ (mm)、密封舱压力 p (kPa)、盾构直径 D (m) 为自变量,代入式(6)掘进总推力模型,对模型系数 β_1 、 β_2 、 β_3 进行识别。利用数据分析软件多元回归分析模块得到识别结果,给出本工程推力载荷的具体表达式为

$$F = 4\,430W\delta^2 + (1.267p + 0.229\,2W)D^2 \quad (7)$$

图 3 给出该工程 300~700 环间的盾构掘进总推力的机载系统工程实测值与由式(7)给出的总推力预测值随不同环数的变化曲线。力学模型给出的预测值与工程实测值在变化趋势上是一致的。图 3 表明,本文所建立的掘进总推力力学模型基本反映了主要影响因素的作用以及各参量间内在联系,能够大致给出总推力在掘进过程中随地质与掘进状态的变化趋势。

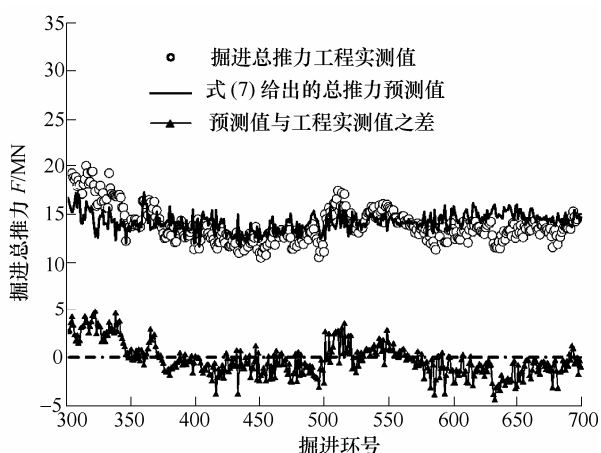


图 3 300~700 环总推力工程实测值、式(7)预测值与残差随不同掘进环数的变化曲线

2 总推力力学模型残差分析

将工程实测总推力值与模型计算总推力预测值比较, 两者之差定义为模型残差, 则有

$$e_n = F_R - F_C \quad (8)$$

式中 e_n ——模型残差项;

F_R ——工程实测总推力;

F_C ——模型计算总推力。

模型残差项与掘进环号相关。本章通过分析模型残差, 讨论盾构掘进总推力的力学模型的适用性。图 3 给出了模型残差随环号的变化曲线, 从图 3 可以看出, 残差曲线基本在 0 值附近波动, 表明力学模型式(7)已经包含了掘进推力载荷中的主体部分与主要影响因素。同时, 残差值与工程实测值随掘进环号变化的趋势部分相似, 表明影响推力载荷中的一些次要因素可能存在于模型残差中。

对残差数据进行统计学分析, 分别检验残差数据的平稳性与随机性, 讨论残差分布规律。对数据平稳性采用 Phillips-Perron 统计量^[21](简称 PP 统计量)进行检验, 假设残差数据为非平稳序列, 将残差数据导入统计学 EViews 分析软件, 可得表征残差平稳性的 PP 统计量为-14.27, 相伴概率为 0。PP 统计量描述了残差数据随环号的整体波动性, 其相伴概率为 0 表明了残差数据中含有非平稳信息的概率为 0, 即式(7)已经包含了掘进总推力的主要影响因素, 计算残差为平稳序列。

对残差数据的随机性采用 Q 统计量^[22]进行检验, 假设在残差数据中已经不含有影响掘进总推力的因素, 即残差数据为随机序列, 将残差数据导入统计学 EViews 分析软件中的随机性检验模块, 得到残差随机性检验结果见表 1。

表 1 残差数据的随机性检验

步数	Q 统计量	相伴概率	步数	Q 统计量	相伴概率
1	245.83	0	6	1 336.0	0
2	485.70	0	7	1 526.6	0
3	725.92	0	8	1 699.6	0
4	950.55	0	9	1 859.2	0
5	1 150.2	0	10	2 026.2	0

其中 Q 统计量描述了残差数据的关联性, 其取值较大, 表明残差数据存在规律, 其相伴概率表明, 残差数据中只含有随机信息的概率为 0。该统计学数据分析表明, 式(7)残差中仍具有部分影响掘进总推力的次要因素, 计算残差并不是随机分布, 可进一步分析残差模型形式。

利用 EViews 计算残差序列的自相关与偏相关系数, 见图 4。

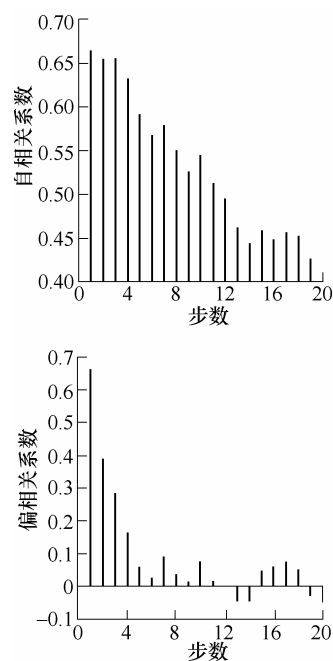


图 4 700~960 环残差数据的自相关与偏相关系数随计算步数的变化

如图 4 所示, 残差序列的自相关系数随计算步数的增加收敛较慢, 称为“拖尾”。偏相关系数收敛于第四计算步, 称为“四阶截尾”。根据时序分析基本方法, 判定残差随环号的变化规律符合自回归模型(Auto regression model, AR)形式, 且为四阶模型 AR(4), 其形式为

$$e_n = \gamma_1 e_{n-1} + \gamma_2 e_{n-2} + \gamma_3 e_{n-3} + \gamma_4 e_{n-4} + \alpha_n \quad (9)$$

式中, e_n 为第 n 环残差; $\gamma_1 \sim \gamma_4$ 为待估计系数; α_n 为第 n 环二次残差。将由式(7)得到的模型残差值代入式(9)模型, 并利用最小二乘法进行参数估计, 结果见表 2。

表 2 残差项模型各系数及显著性

变量	系数	标准差	t 统计量	相伴概率
AR(1)	0.232 7	0.044 3	5.256	0
AR(2)	0.217 0	0.044 2	4.912	0
AR(3)	0.238 8	0.044 2	5.396	0
AR(4)	0.181 2	0.044 2	4.095	0

由残差数据统计分析得到残差项的模型为

$$e_n = 0.232 7e_{n-1} + 0.217 0e_{n-2} + 0.238 8e_{n-3} + 0.181 2e_{n-4} + \alpha_n \quad (10)$$

式中 e_n ——第 n 环力学模型残差项;

α_n ——残差模型式(10)第 n 环的二次残差。

式(10)表明在盾构掘进过程中,掘进参数、地质参数变化对模型计算总推力预测值的影响具有一定滞后性,表现为即时刻掘进参数、地质状况的改变,会影响下一步掘进总推力的预估。为了验证二次残差 α_n 中是否仍含有有用信息,使用 Q 统计量对其进行随机性检验。将 α_n 导入 EVIEWS 随机性检验模块,得到检验结果见表 3。从 Q 统计量相伴概率可以看出, α_n 不含影响掘进总推力因素的概率随着计算步逐渐增大,且呈发散趋势,说明 α_n 已经为白噪声序列,式(10)已经提取了残差中的次要因素, α_n 应为工程检测中的噪声。

表 3 α_n 序列的随机性检验

步数	Q 统计量	相伴概率	步数	Q 统计量	相伴概率
1	0.102 3	—	7	4.810 2	0.186
2	0.419 1	—	8	4.819 3	0.306
3	1.424 7	—	9	5.070 6	0.407
4	3.683 5	—	10	7.591 6	0.270
5	3.689 0	0.055	11	7.722 2	0.358
6	4.314 8	0.116	12	7.773 9	0.456

模型残差分析表明,总推力力学模型式(7)给出了掘进总推力中的主体部分与主要参数对总推力的影响。仍有一些次要因素与误差存在于模型残差中,包括如下几个可能的因素:① 总推力模型计算预测值中采用的地质信息由地质探孔测量给出,有限数量的地质探孔数据不能准确反映全部掘进段的地质数据,代入式(7)引起预测值误差;② 总推力模型式(7)中考虑了关键地质参数的影响,但是考虑的参数有限,使预测值含有误差;③ 工程检测数据中存在部分噪声。

将式(10)代入式(8),给出考虑残差补偿的掘进总推力力学模型

$$\begin{cases} F = 443 0W\delta^2 + 1.267 pD^2 + \\ \quad 0.229 2WD^2 + e_n \\ e_n = 0.232 7e_{n-1} + 0.217 0e_{n-2} + \\ \quad 0.238 8e_{n-3} + 0.181 2e_{n-4} + \alpha_n \end{cases} \quad (11)$$

将该工程 300~700 环的地质参数与掘进参数等数据作为训练样本,代入考虑残差补偿的计算模型式(11),得到预测总推力随环数的变化曲线,及由计算模型式(11)给出的二次残差,如图 5 所示。图 5 表明,考虑残差补偿的计算模型式(11)可以进一步提高总推力预测精度,使二次残差趋于平缓。

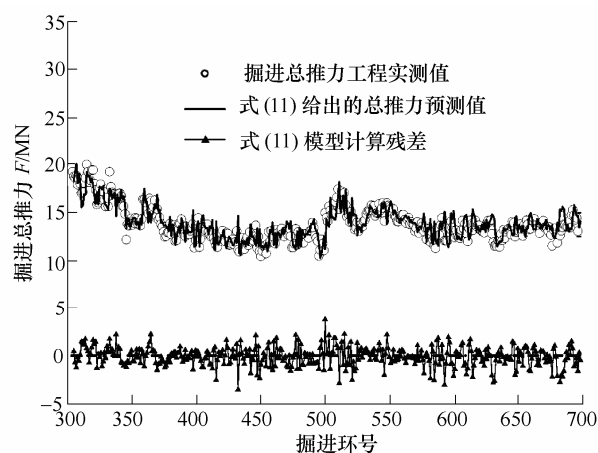


图 5 300~700 环总推力实测值、式(11)预测值及二次残差随环号的变化曲线

3 掘进总推力力学模型的讨论与验证

将天津地铁九号线十一经路站至大直沽西路站施工段 700~960 环工程实测数据作为检验样本,进一步讨论验证本文提出的掘进总推力的力学模型适用性以及识别系数的有效性。该工程 700~960 环数据未参与本文前面的数据识别过程,将该段地质参数与掘进参数等掘进数据代入式(7),计算总推力预测值。图 6 给出了式(7)计算掘进总推力与工程实测总推力随掘进环数的变化。

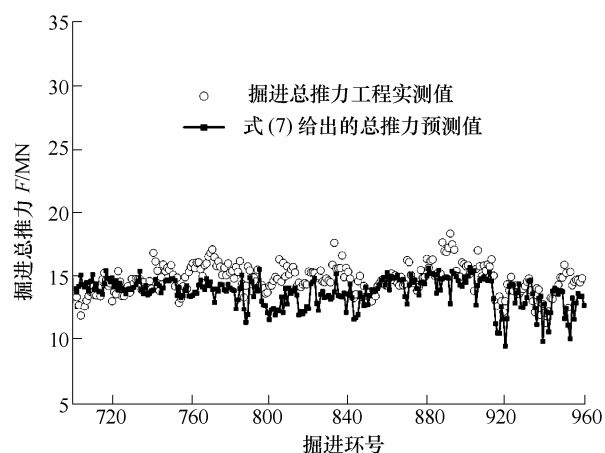


图 6 700~960 环总推力工程实测值与式(7)给出的总推力预测值对比图

由图 6 可见,对未参与建模过程的检验样本,

由该工程力学模型式(7)给出的预测值与工程实测值吻合较好,表明力学模型式(7)能够反映掘进总推力的变化趋势,提取了影响掘进总推力的主要因素。

为了验证式(7)模型掘进总推力的识别效果,以总推力工程实测值为 x 轴,式(7)给出的总推力预测值为 y 轴,做出总推力工程实测值与预测值的交叉相关图如图 7($R^2=0.986$)所示。

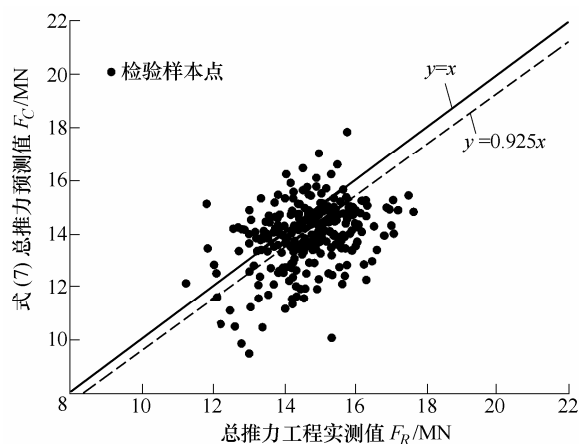


图 7 700~960 环总推力工程实测值与式(7)给出的总推力预测值交叉相关图

为定量描述掘进总推力预测值与工程实测总推力间的相关度,引入相关系数 R^2 。设检验样本点掘进段共 n 环,第 i 环总推力工程实测值为 x_i ,由式(7)得到第 i 环总推力预测值 y_i ,相关系数由式(12)计算

$$R^2 = \frac{(n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i))^2}{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]} \quad (12)$$

在式(12)中,如果相关系数趋于 1,表明两组数据完全相关,如果趋于 0,则表明两组数据完全不相关。利用式(7)计算的掘进总推力预测值与工程实测总推力间平方相关系数 $R^2=0.986$,显示相关度较高,表明力学模型预测值与工程实测数据非常接近,力学模型式(7)能较为准确地预估掘进载荷值,该模型体现了掘进总推力与装备掘进控制参数、地质的力学参数与装备构型参数间内在的影响规律。

4 结论

本文针对盾构装备掘进总推力力学建模展开研究,分析装备机载系统所记录的海量掘进数据中的有效信息,识别盾构装备的地质适应性内在规律,研究工作得到以下结论。

(1) 在基于海量实测工程数据的掘进载荷研究中,力学分析与量纲分析是一个有效的工具,能够探究复杂问题中的物理本质与内在机理。通过平衡分析,结合量纲分析建立了总推力力学模型,描述了总推力随地质参数、掘进参数以及装备构型参数等主要影响因素的变化规律。

(2) 结合天津地铁九号线工程实测数据,对掘进总推力力学模型中的系数进行识别,给出了该工程掘进总推力的计算式(7)。进一步分析力学模型的计算残差,对残差数据的统计学分析,讨论了次要因素对掘进总推力的影响。

(3) 通过工程实测数据与本文力学模型给出的掘进总推力预测值的分析比较,验证了该力学模型能有效预估总推力载荷值并反映其变化趋势。

(4) 基于盾构装备海量实测数据,选择更为合适的数据分析处理方法与力学量纲分析手段相结合,挖掘盾构装备地质适应性规律,是下一步工作值得研究的内容。

本文掘进总推力力学模型为盾构的地质适应性研究提供了一种分析工具,可以为施工过程中掘进总推力的控制提供借鉴。

参 考 文 献

- [1] SZECHY K. The art of tunneling[M]. Budapest: Akademiai Kiado, 1966.
- [2] MAIDL B, HERRENKNECHT M, ANHEUSER L. Mechanized shield tunneling [M]. Berlin: Ernst & Sohn, 1996.
- [3] GRAHAM P C. Rock exploration for machine manufacturers, in exploration for rock engineering[C]// Proceedings of the Symposium. Rotterdam: A. A. Balkema, 1976: 173-180.
- [4] XIA Yimin, OUYANG Tao, ZHANG Xinming, et al. Mechanical model of breaking rock and force characteristic of disc cutter[J]. Journal of Central South University of Technology, 2012, 19: 1846-1852.
- [5] 张茜, 蔡宗熙, 黄干云, 等. 盾构刀盘系统界面载荷力学表征与近似计算模型[J]. 力学学报, 2012, 44(5): 861-868.
ZHANG Qian, CAI Zongxi, HUANG Ganyun, et al. Mechanical characterization and predicting model for cutterhead interface load of shield machine[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2012, 44(5): 861-868.
- [6] ZHANG Kaizhi, YU Haidong, LIU Zhongpo, et al. Dynamic characteristic analysis of TBM tunneling in mixed-face conditions [J]. Simulation Modeling Practice and Theory, 2010, 18: 1019-1031.
- [7] 苏翠侠, 王燕群, 蔡宗熙. 盾构刀盘掘进载荷的数值模

- 拟[J]. 天津大学学报, 2011, 44(6): 522-528.
- SU Cuixia, WANG Yanqun, CAI Zongxi. Numerical simulation of excavation load on cutterhead in shield tunneling machine[J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(6): 522-528.
- [8] WEN Weili, FENG Pingfa, WU Zhijun, et al. Study on external load domain of shield machine cutterhead[J]. Intelligent Robotics and Applications, 2009, 5928: 1176-1182.
- [9] WANG Xiaoyu, CAI Zongxi, SU Pengcheng, et al. Numerical modeling of the effects of wears on cutting loads[J]. Advanced Materials Research, 2011, 16: 2340-2344.
- [10] 郭伟, 胡竟, 王磊, 等. 基于 CFD 的土压平衡盾构刀盘开口分布特征研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(17): 144-151.
- GUO Wei, HU Jing, WANG Lei, et al. Study on the opening distribution characteristics of earth pressure balance shield cutter head based on CFD[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(17): 144-151.
- [11] 张厚美, 吴秀国, 曾伟华. 土压平衡式盾构掘进试验及掘进数学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增 2): 5762-5766.
- ZHANG Houmei, WU Xiuguo, ZENG Weihua. Study on tunneling experiment and mathematical model of EPB shield[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Supp.2): 5762-5766.
- [12] SHI Hu, YANG Huayong, GONG Guofang, et al. Determination of the cutterhead torque for EPB shield tunneling machine[J]. Automation in Construction, 2011, 20: 1087-1095.
- [13] 何小新, 吴庆鸣. 全断面岩石掘进机主参数回归模型[J]. 武汉大学学报(工学版), 2007, 40(2): 99-109.
- HE Xiaoxin, WU Qingming. Research on regression model of full face rock tunnel boring machines[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2007, 40(2): 99-109.
- [14] 宋克志, 孙谋. 复杂岩石地层盾构掘进效能影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2092-2096.
- SONG Kezhi, SUN Mou. Analysis of influencing factors of shield tunneling performance in complex rock strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2092-2096.
- [15] ZHANG Qian, QU Chuanyong, KANG Yilan, et al. Identification and optimization of energy consumption by shield tunnel machines using a combined mechanical and regression analysis[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2012, 28: 350-354.
- [16] 刘宣宇, 邵诚. 盾构机自动控制技术现状与展望[J]. 机械工程学报, 2010, 46(20): 152-160.
- LIU Xuanyu, SHAO Cheng. Present status and prospect of shield machine automatic control technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(20): 152-160.
- [17] SUN Wei, HUO Junzhou, CHEN Jing, et al. Disc cutters' layout design of the full-face rock tunnel boring machine (TBM) using a cooperative coevolutionary algorithm[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2011, 25(2): 415-427.
- [18] MAHDEVARI S, TORABI S R. Prediction of tunnel convergence using artificial neural networks[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2012, 28: 218-228.
- [19] 朱北斗, 龚国芳, 周如林, 等. 基于盾构掘进参数的 BP 神经网络地层识别[J]. 浙江大学学报, 2011, 45(5): 851-857.
- ZHU Beidou, GONG Guofang, ZHOU Rulin, et al. Identification of strata with BP neural network based on parameters of shield driving[J]. Journal of Zhejiang University, 2011, 45(5): 851-857.
- [20] 张干清, 龚宪生, 王欢欢, 等. 可靠灰色粒子群算法的盾构机行星减速器轮系的多目标优化设计[J]. 机械工程学报, 2010, 46(23): 135-145.
- ZHANG Ganqing, GONG Xiansheng, WANG Huanhuan, et al. Multi-objective optimization design on gear train of planetary reducer in shield tunneling machine based on reliably grey particle swarm optimization[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(23): 135-145.
- [21] PHILIP R. Forecasting asymmetric unemployment rates[J]. The Review of Economics and Statistics, 1998, 80(1): 164-168.
- [22] BOX G E P, JENKINS G M, REINSEL G C. Time series analysis: Forecasting and control[M]. San Francisco: Holden-day, 1970.

作者简介: 郑峥, 男, 1989 年出生。主要研究方向为工程数据的力学分析与建模。

E-mail: pyzheng@tju.edu.cn

张茜(通信作者), 女, 1984 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为力学数据分析与反演识别。

E-mail: zhangqian@tju.edu.cn

亢一澜, 女, 1954 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师, 中国力学学会常务理事。主要研究方向为固体力学。

E-mail: tju_ylkang@tju.edu.cn