DOI: 10.3901/JME.2019.10.207

盾构推进载荷模拟的多维加载机制与试验研究*

李盈斌 郭为忠 郭文韬 梁庆华

(上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室 上海 200240)

摘要: 盾构机是一种用于地下隧道施工的大型设备,其装备复杂,经济价值很高。由于地下施工的环境恶劣,盾构掘进的现场研究工作较难开展,因此利用盾构推进模拟试验台在实验室条件下进行研究,是一种经济、安全的替代方法。盾构掘进过程中的受力十分复杂,为研究盾构掘进中的力学问题,对盾构模拟试验台提出了模拟掘进中的环境载荷的要求。针对盾构掘进中的环境载荷的特点,提出基于并联绳牵引的多维载荷加载机制;对模拟试验台的载荷模拟能力进行分析;设计模拟加载的试验方法,并进行盾构掘进载荷的模拟试验。理论分析和试验研究结果表明,该盾构载荷模拟装置能够通过调节作用在试验台盾构刀盘上的分布载荷的大小,形成等效的推力、俯仰矩、横摆矩和转矩,能够实现环境载荷的模拟。

关键词: 盾构;模拟试验台;多维加载;载荷模拟;加载空间

中图分类号: TH122

Multi-DOF Loading Principle to Simulate Thrust Loads for Shield Machines with Experimental Study

LI Yingbin GUO Weizhong GUO Wentao LIANG Qinghua

(State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: The shield machine is a kind of heavy equipment used in underground construction. It is very complicated and has high economic value. Because of the terrible construction environment, it is very difficult to do research of the shield machine excavation in the field. As to that, it is economical and secure to do these research under laboratory condition via a shield machine thrust simulator test rig. The shield machine suffers a complex load, that the simulator test rig is required to simulate the environment loads occurring in the excavating process, to study the mechanical problems. According to the characters of environment loads, we propose a multi-dimension loading mechanism based on the parallel cable-driven principle and do the analysis of the loading simulating ability as well as carry out the loading simulation experiments by utilizing the test rig. The theory and experiments researches discover that the loading simulator test rig can form equivalent thrust force, yawing torque, pitching torque and rolling torque by adjusting the distributing forces on the cutting head and it is feasible to simulate the environment loads.

Key words: shield machine; simulator test rig; multiple loading; loading simulation; loading space

0 前言

盾构机是集隧道挖掘、出土、管片铺设等多种隧道施工手段于一体的大型集成化设备,在现代隧道施工领域具有举足轻重的地位。为了研究提高盾构机的性能,国内外广泛建立用于试验研究的盾构试验样机。上海隧道工程等单位研制盾构掘进模拟的多功能试验台^[1],能模拟 1.8 m 直径的土压或者泥水平衡盾构在多种地层中的掘进过程;日本的

KASHIMA 等^[2]利用 DEPLX 盾构模拟试验台,进行检验盾构开挖性能和切剖面稳定性的模型试验。中铁隧道集团的洪开荣等^[1]开发盾构控制系统的试验测试平台,该平台是当时国际上同类型试验台中规模最大、功能最全的。

盾构模拟试验台的组成较为复杂,为了研究盾构掘进过程中的受力,需要利用载荷加载设备模拟土体对盾构的作用力。目前的盾构模拟试验台载荷加载方法主要有土箱法、离心机法和液压缸法等。上海理工大学土木工程系的徐前卫等^[3]利用直径为 400 mm 的盾构样机在土箱内进行了软土掘进试验,研究了盾构推进速度对土体压力的影响;SHINICHIRO 等^[4]采用一种微型盾构机进

* 国家自然科学基金资助项目(51275284)。20180603 收到初稿,20181210 收到修改稿

行隧道开挖和衬砌脱出盾尾过程的离心模拟试验。陈馈等^[5]介绍了中铁隧道集团的泥水盾构模拟试验台,该试验台利用六台油缸产生推进反力,通过调整各油缸的压力,可以模拟不同工况下的推力载荷。土箱法能有效模拟实际土壤的载荷,但加载设备庞大,载荷调节不灵活。液压缸法占用空间较小、使用较方便,然而设备的设计较为复杂,成本也比较高。上述几种盾构载荷模拟方法均存在一定的不足。

通过研究分析盾构掘进中的受力特点,参考现有试验台的设计思路与其不足,利用上海交通大学重大装备研究所的新型盾构推进作业模拟试验台,提出一种多自由度并联悬绳的多维载荷加载方法,该方法利用配重砝码组,模拟盾构掘进过程中盾构所受的刀盘切削与推进负载。对模拟试验台的加载能力进行分析,设计载荷模拟试验方法,对试验台进行载荷模拟的标定,并以深圳地铁二号线的部分施工数据进行载荷模拟试验。本文方法综合考虑试验设备的体积、成本、操作的便利性,能够实现一定的加载目标,具有一定的研究价值和意义。

1 盾构掘进载荷的多维加载机制

1.1 盾构掘进的载荷特点

盾构掘进时有三个方向的运动,即盾构轴线方向(沿 Z 轴)的推进,水平方向的横摆(绕 X 轴)和竖直方向的俯仰(绕 Y 轴)^[7](图 1)。根据刚体动力学,任意时刻的盾构姿态可以用 Fick 角^[8-9](ZYXRPY 角)表达,即先绕惯性坐标系的 Z 轴滚动(滚动角 $\alpha=0$),再绕惯性坐标系的 Y 轴俯仰(俯仰角 β),最后绕惯性坐标系的 X 轴横摆(偏航角 γ)。

图 1 盾构姿态的描述图

在掘进过程中,盾构会受到来自推进油缸、土体等的作用力,受力情况^[10]十分复杂。图 2 是 SUGIMOTO 等^[11]提出的反映盾构受力情况的五力模型,包括盾构自身的重力 f_1 、作用在刀盘上的掘进反力 f_4 、液压缸的对盾构的推进力 f_4 、土体对

盾构体的压力与摩擦力 f_5 和管片对液压缸的支撑力 f_2 。

图 2 盾构掘进受力模型

盾构在掘进过程中, f_1 是由盾构本身决定, f_3 由液压千斤顶控制, f_2 等于液压缸出力时的反力,而 f_4 、 f_5 是土体对盾构作用力。在地层环境中, f_4 、 f_5 变化十分复杂,既会在盾构刀盘上产生推力和弯矩载荷,也会因为刀盘切削时的切削反力,在刀盘上产生转矩载荷。盾构掘进时所受到的复杂环境载荷,是研究盾构推进系统不可缺少的重要条件,因此模拟试验台必须具备不同工况下的环境载荷的模拟能力。

1.2 基于并联悬绳的多维载荷加载原理

本文提出一种并联悬绳式的多维载荷加载原理(图 3)。该方法利用配重砝码产生拉力,经滑轮钢丝系统作用到盾构刀盘上,生成等效力和等效矩。由于钢丝绳只能作用单向的拉力,为模拟盾构掘进时受到的压缩载荷和刀盘的切削阻力,并联悬绳 G_1-G_n 的拉伸方向与盾构推进方向相反;扭转悬绳 G 的拉伸方向与刀盘的旋转方向相反。该方法能在盾构刀盘上产生四维的等效载荷,即沿轴线方向(Z 轴)的等效推力,绕水平方向(Y 轴)的等效俯仰矩,绕竖直方向(X 轴)的等效横摆矩,以及绕盾构轴线方向(Z 轴)的等效滚动矩。

图 3 并联悬绳吊挂的载荷模拟原理

1.3 载荷模拟装置的结构

并联悬绳载荷模拟装置包括盾构推进负载模拟器和刀盘切削负载模拟器。其中,推进阻力模拟器由刀盘、加载点(加载钢丝绳)、滑轮系统以及配重器构成,切削阻力模拟器由转矩传递器、转矩力臂、配重器组成(图 4)。

(a) 盾构推进模拟试验台总图

(b) 推进负载模拟器

(c) 切削负载模拟器

图 4 悬绳吊挂的载荷模拟装置

1. 机架 2. 刀盘 3. 推进缸 4. 土体约束模拟机构 5. 推力传感器
6. 阻力加载点 7. 导向滑轮组 8. 配重器 9. 配重器
10. 转矩力臂 11. 转矩传递器

推进负载模拟器可模拟盾构受到的掘进方向的推进阻力和土体作用在盾构体上的横摆矩和俯仰矩(图 4b)。其中的配重器用于加载配重砝码并产生作用力;滑轮系统用于引导钢丝绳的方向,使作用力按一定的角度作用到加载点上;加载点均匀分布在盾构刀盘上,用于限制钢丝绳上作用力的作用点的位置。通过改变配重器上的砝码质量,可以调节加载点上作用力的大小,在刀盘上产生不同的等效力与矩。

刀盘切削负载模拟器用于模拟盾构刀盘切削时受到的土体反作用力,即滚动矩(图 4c)。滚动矩的大小由转矩力臂的长度和配重器上的砝码重量决定。

2 多维加载的数学建模与能力分析

2.1 多维加载的数学建模

推进负载模拟器利用钢丝绳传递拉力,因此只

能在刀盘上产生单向作用力。根据等效集中力的原理^[12],在刀盘加载点上的作用力可等效为一个作用点在刀盘中心的三维矢量力和一个绕刚体质心的三维矩,如式(1)所示

$$\mathbf{F} = (F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z)^T \quad (1)$$

由于盾构掘进过程中的主要受 Z 方向的力和绕 X, Y, Z 方向的矩,因此实际只需要模拟 1 推、3 转的载荷,当钢丝绳垂直于刀盘面时,其等效载荷可简化为 (F_z, M_x, M_y, M_z) , 如式(2)~(4)所示

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^n \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -f_i \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^n \vec{r}_i \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ f_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ T \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^n \begin{pmatrix} -f_i \\ -f_i \cdot R \cdot \cos \theta_i \\ f_i \cdot R \cdot \sin \theta_i \\ -L \cdot G \end{pmatrix} = \mathbf{R}_A \cdot \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_n \\ G \end{pmatrix} \quad (4)$$

式(2)中的 n 为加载点的个数, f_i 为作用在加载点 i 上的配重力的大小;式(3)中的 R 为加载点的分布圆半径, θ_i 为加载点 i 的分布角, L 为转矩力臂的长度, G 为切削阻力模拟器的配重值;式(4)中的 $\mathbf{R}_A$ 为加载系统的特征矩阵,与盾构的加载点分布圆半径 R 、加载点的分布角 θ_i 和加载点的个数 n 有关,反映了从加载点的配重力到等效载荷的转换关系。

为了更加直观地反映加载装置的加载能力,使用了加载空间^[13]这一概念,即利用加载装置可以模拟的全部加载力和矩的组合的集合。加载空间越大,连续性越好,表明加载装置的加载能力和应用范围越广。

加载装置的工作过程见图 5,首先计算需要的等效载荷 F_z, M_x, M_y, M_z , 然后判断等效载荷是否位于加载空间内,如在加载空间内,则根据式(4)计算各加载点和转矩臂上的配重大小,并施加配重实现载荷的模拟;如不在加载空间内,则需要通过调整加载点的位置或数量,即改变 θ_i , 从而调整加载单元的特征矩阵 $\mathbf{R}_A$, 生成新的加载空间,再重新计算所需要的配重方案。

2.2 多维加载的能力分析

由式(4)可知,加载方程的解—配重方案 $(f_1, f_2, \dots, f_n, G)$ 由加载装置的特征矩阵 $\mathbf{R}_A$ 确定。由矩阵方程解^[14]的特点可知,如配重点的个数 $n+1$ 小于矩

图 5 加载装置的工作过程

阵 R_A 的秩 m , 则式(4)不封闭、无解, 不能实现加载的要求; 如 $n+1=m$, 则有唯一解, 能得到唯一的配重方案; 如 $n+1>m$, 则式(4)有多解, 配重方案不唯一, 需要选择最优的方案。因为盾构掘进时受到四个自由度的作用力, 因此加载装置至少需要 3 个加载点, 即 $n>3$ 。

在实际使用过程中, 考虑到牵引钢丝绳只能单向受力且配重砝码的质量是非连续的, 因此即使式(4)有解, 也不一定能够通过砝码配重实现全部的加载要求, 加载结果的误差是不可忽略的。

多维加载的性能可以用加载空间描述, 即 (F_z, M_x, M_y, M_z) 的取值空间, 显然加载空间越大, 则加载器的加载能力越强。根据集中力计算公式, 加载空间也能用集中力的大小及其作用点的位置表示, 即 $(F_z, y_c, x_c, M_z)^T$, 如式(5)所示。 y_c, x_c 是等效集中力的作用点在刀盘上的坐标, R_B 是两种载荷空间的转换矩阵。因为转矩加载器是独立的, 分别对具有 3 个加载点和 6 个加载点的推力加载器进行加载空间分析。

$$\begin{pmatrix} F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_z \\ y_c F_z \\ -x_c F_z \\ M_z \end{pmatrix} = R_B \cdot \begin{pmatrix} F_z \\ y_c \\ x_c \\ M_z \end{pmatrix} \quad (5)$$

图 6 是用 MATLAB 计算的 3 加载点下的加载装置的加载空间, 该加载空间给出了 3 加载点下可实现的全部等效载荷。由于配重的质量是非连续的, 为了便于求解, 加载密度不能太大, 本文设 3 个各加载点的加载砝码的最小重量为 1 kg, 配重加载的上限为 10 kg。

图 6b 为用等效载荷的集中力的大小和作用点坐标表示的三维加载空间, 其中 x, y 轴表示等效

集中力作用点的坐标, z 轴表示集中力的大小, 图中的圆上的三个点表示 3 个加载点在盾构刀盘上的分布。图 6a 为加载空间在 $X-Y$ 平面上的投影。图 6 反映了 3 加载点下能够实现的等效载荷的分布特点。

(a) 加载空间在 Z 方向上的投影

(b) 三维加载空间

图 6 三加载点下的推力加载空间

在3加载点下,加载空间呈三角对称分布,由于钢丝绳只能单向受力,故加载的合力是单向的。由式(5)可知,加载系统的等效矩,可以用合力与等效作用点的乘积得到。越靠近加载空间的中心,合力的取值范围越大,随着集中力的作用点远离中心,合力的取值范围明显减小。当只需要推力而不需要力矩时,可以选择加载空间的中心位置;当需要力矩时选择加载空间边缘的位置,此时能获得较大的矩,但是总推力的取值范围较小,产生力矩是以牺牲推力为代价的;由于只能加载单向力,不能获得独立的力偶^[12]。由于配重的不连续性,加载空间成离散状分布,加载装置只能实现图中加载点处的载荷配置。

同理,以2 kg的配重为最小间隔,10 kg为最大配重,进行6个加载点的加载空间计算,结果如图7所示。

(a) 加载空间在Z方向上的投影

(b) 三维加载空间

图7 6个加载点下的推力加载空间

从图7可以发现,6个加载点下,加载空间呈六角形对称分布,且加载空间中点的密度明显要高于3点加载时的情况。可以推断加载空间的形状与

加载点的个数和位置相关,且增加加载点的个数,能显著改善加载器的加载空间。分析其原因有:①增加了钢丝绳的数目,在钢丝绳强度不变的情况下,提高了加载器的最大加载能力;②增加了加载点的个数,使得加载结果的自由度增大,能实现更为复杂的加载。

虽然增加加载点的数量能改善加载空间,但也会使配重的调节变得更为复杂。实际使用时应根据需要,选择合理的加载点个数,在实现加载目的的前提下尽可能少使用加载点。

3 载荷模拟试验研究

3.1 试验台等效载荷测量方法

试验台的盾构进缸末端安装有单轴力传感器,被动支链的末端装有三轴力传感器,可以利用力传感器上的作用力计算作用在刀盘上的实际等效载荷,图8是测量等效载荷的静力学模型。

图8 加载系统试验标定的静力学模型

该模型建立在盾构的零位姿下,刀盘中心为坐标原点。图8中 $F_{a1} \sim F_{a6}$ 是推进缸上的作用力; $F_{n1} \sim F_{n3}$ 是被动支链上的力矢量; G_0 是等效重力; $M^G(0, M_y^G, M_z^G)$ 为等效重力矩; $f(0, 0, f)$ 是转矩加载器的阻力; $M^o(M_x^o, M_y^o, M_z^o)$ 是加载装置产生的等效弯矩; $F(0, 0, F_z^o)$ 是加载器的等效推力,其中 $F_{a1} \sim F_{a6}$, $F_{n1} \sim F_{n3}$ 可从力传感器直接测得。

由静力学模型,可以建立式(6)、(7)的加载方程,式中的 $r_{ni}(r_{nxi}, r_{nyi}, r_{nzi})$, $r_{ai}(r_{axi}, r_{ayi}, r_{azi})$ 是各矢量力作用点的位置矢量,由盾构样机的安装尺寸决定。进一步化简可以得到等效载荷的计算公式,如式(8)~(11)所示

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \sum_{i=1}^6 F_{ai} \end{pmatrix} + \sum_{i=1}^3 \begin{pmatrix} F_{nxi} \\ F_{nyi} \\ F_{nzi} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -G \\ 0 \\ f + F_z^o \end{pmatrix} = 0 \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^3 \begin{pmatrix} r_{nxi} \\ r_{nyi} \\ r_{nzi} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} F_{nxi} \\ F_{nyi} \\ F_{nzi} \end{pmatrix} + \sum_{i=1}^6 \begin{pmatrix} r_{axi} \\ r_{ayi} \\ r_{azi} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ F_{ai} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} M_x^0 \\ M_y^0 \\ M_z^0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ F_{yG} \\ F_{zG} \end{pmatrix} = 0 \quad (7)$$

$$F_x^r = -(F_{nx1} + F_{nx2} + F_{nx3}) = G_0 \quad (8)$$

$$F_y^r = -(F_{ny1} + F_{ny2} + F_{ny3}) = 0 \quad (9)$$

$$F_z^r = -\sum_{i=1}^3 F_{nzi} - \sum_{i=1}^3 F_{azi} = f + F_z^0 \quad (10)$$

$$\begin{pmatrix} M_x^r \\ M_y^r \\ M_z^r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_x^0 \\ M_y^0 + M_{Gy} \\ M_z^0 + M_{Gz} \end{pmatrix} = -\sum_{i=1}^6 \begin{pmatrix} F_{ai} r_{ayi} \\ -F_{ai} r_{axi} \\ 0 \end{pmatrix} - \sum_{i=1}^3 \begin{pmatrix} -F_{nyi} r_{nzi} + F_{nzi} r_{nyi} \\ -F_{nzi} r_{nxi} + F_{nxi} r_{nzi} \\ -F_{nxi} r_{nyi} + F_{nyi} r_{nxi} \end{pmatrix} \quad (11)$$

由式(8)~(11)可以发现, 加载理论值($F_x^0=0$, $F_y^0=0$, F_z^0 , M_x^0 , M_y^0 , M_z^0)与实际测得值(F_x^r , F_y^r , F_z^r , M_x^r , M_y^r , M_z^r)之间具有线性关系, 通过标定试验可以得到理论值与实际值之间的函数关系。

3.2 多维加载试验台的载荷标定

图9是载荷模拟的试验方法。考虑到重力、摩擦、制造及安装误差会导致试验值与理论值之间存在一定的系统误差, 利用统计学方法对加载试验装置进行标定, 来消除系统误差, 提高加载精度。由式(8)~(11)可得, 加载变量 F_z 、 M_x 、 M_y 、 M_z 的理论值与试验值之间应满足线性关系, 可采用线性回归的方法拟合, 试验与数据处理的过程见图10。

图9 载荷加载的试验方法

图10 载荷加载标定试验数据处理

将需要标定的参数分成三组分别进行试验, 包括推进阻力 F_z , 刀盘切削阻力 M_z 以及横摆、俯仰弯矩 M_x 、 M_y 。表1~3为三次试验的理论值与试验值之间的Pearson相关分析, 其中 r 为相关系数, sig 为显著性。本文将显著性水平设置为0.001, 当显著性 $\text{sig} < 0.001$ 时, 认为样本拒绝总体不相关的假设, 两变量之间有显著关系, 此时如果相关系数 $|r| > 0.7$, 就认为变量之间高度相关。

表1 加载 F_z 的试验的相关性分析

$r(\text{sig})$	F_z^0	F_x^r	F_y^r	F_z^r	M_x^r	M_y^r	M_z^r
F_z^0	1	0.998	-0.552	0.999	-0.903	-0.973	0.907
	(-)	(0.002)	(0.448)	(5.54×10^{-6})	(0.097)	(0.027)	(0.093)

表2 加载 M_z 的试验的相关性分析

$r(\text{sig})$	M_z^0	F_x^r	F_y^r	F_z^r	M_x^r	M_y^r	M_z^r
M_z^0	1	0.990	-0.909	0.465	-0.273	-0.986	0.992
	(-)	(0.001)	(0.032)	(0.430)	(0.656)	(0.002)	(8.84×10^{-4})

表3 加载 M_x 、 M_y 的试验的相关性分析

$r(\text{sig})$	F_z^0	M_x^0	M_y^0	F_x^r	F_y^r	F_z^r	M_x^r	M_y^r
F_z^0	1	-0.024	5.09×10^{-4}	-0.078	-0.399	0.879	-0.069	-0.018
	(-)	(0.931)	(0.998)	(0.782)	(0.140)	(1.59×10^{-5})	(0.806)	(0.949)
M_x^0		1	0.001	-0.381	-0.884	-0.441	0.974	0.0148
		(-)	(0.997)	(0.161)	(1.23×10^{-5})	(0.100)	(1.026×10^{-9})	(0.958)
M_y^0			1	0.864	0.079	0.025	1.28×10^{-5}	0.998
			(-)	(3.42×10^{-4})	(0.780)	(0.928)	(1.00)	(0)

从表1~3中可知高度相关的变量对有 (F_z^o, F_z^r) , (M_x^o, M_x^r) , (M_y^o, M_y^r) , (M_z^o, M_z^r) , (M_x^o, F_y^r) , (M_y^o, F_x^r)

对这些加载量进行回归分析能够得到回归曲线和残差图, 见图11。

(e) $M_x^o F_y^r$ 的回归曲线与残差分析 (f) $M_y^o F_x^r$ 的回归曲线与残差分析

图 11 加载结果的回归与残差分析

加载装置的标定结果总结见表 4。

表 4 加载装置的标定结果

目标值	实际值
$F_x^o \equiv G$	$F_x^r \equiv -19.12 + 8.37 \times 10^{-5} M_y^o (\text{kg})$
$F_y^o \equiv 0$	$F_y^r \equiv -2.31 - 2.914 \times 10^{-5} M_x^o (\text{kg})$
$F_z^o < 0$	$F_z^r \equiv -47.11 - 0.6619 F_z^o (\text{kg})$
M_x^o	$M_x^r \equiv 710 + 0.934 M_x^o (\text{kg} \cdot \text{mm})$
M_y^o	$M_y^r \equiv 5\,707 + 1.219 M_y^o (\text{kg} \cdot \text{mm})$
$M_z^o < 0$	$M_z^r \equiv -9\,317 + 0.1174 M_z^o (\text{kg} \cdot \text{mm})$

载荷 F_z^r 的回归函数有较大的截距，且斜率为 $0.662 < 1$ ，意味着该载荷的加载效率仅 66.2%。分析认为其截距主要因为配重器有一定的自重，而加载效率低主要是因为滑轮系统存在摩擦以及钢丝绳未完全垂直刀盘面。

载荷 M_z^r 的截距较大为 $-9\,317 \text{ kg} \cdot \text{mm}$ ，斜率只有 0.11，说明其初始转矩较大，且加载效率很低。加载装置的初始转矩是由于盾构的重心偏向 Y 轴的负方向所导致的，而加载效率小则反映了实际有效力臂小于理论值且存在较大的摩擦。

载荷 M_x^r 的初值较小，斜率接近 1，加载效果十分显著，说明横摆矩的加载性能较好。载荷 M_y^r 的初值较大，斜率反而大于 1，说明加载效率大于 1。俯仰矩的初值是由于盾构所存在的重力矩导致的，而加载效率被放大则是因为试验台盾构的转动中心位置低于理论值。

由式(8)、(9)可知，理论上 F_x^r 、 F_y^r 值应分别为定值 G_0 和 0，而试验却表明 F_x^r 与 M_y^r ， F_y^r 与 M_x^r 分别线性相关。分析后认为这是由于试验的钢丝绳未完全垂直刀盘面所导致的。但是考虑到回归系数很小，认为其对于加载结果的影响较小，可以忽略。

基于加载装置的标定结果可以，对载荷的模拟进行修正，从而提高模拟的精度。

3.3 盾构掘进过程的载荷模拟试验与分析

在盾构直线掘进的过程中，主要受到 z 轴方向的推力载荷 F_z ，刀盘切削时的扭转载荷 M_z ，还有因为上下土压差产生绕 y 轴的俯仰载荷 M_y 。根据深圳地铁二号线的部分施工数据，设计了盾构掘进过程中的载荷变化曲线，利用载荷加载装置模拟该载荷。

图 12~14 分别反映了推力，转矩，俯仰矩三个

载荷模拟的结果。考虑到试验台的加载能力, 模拟载荷相对真实情况进行了一定比例的缩小, 得到了加载的目标值如图中的 F_z-1 , M_y-1 , M_z-1 。考虑到试验台的加工误差、摩擦等因素对加载精度的影响, 根据标定结果对目标载荷进行了修正, 得到了用于

计算加载方案的理论加载曲线, 如 F_z-3 , M_y-3 , M_z-3 。试验测得的作用在试验台盾构上的实际加载曲线如 F_z-2 , M_y-2 , M_z-2 。

由此可知: ① 试验得到的实际加载曲线与理论曲线之间存在一定的偏移量, 却与目标加载曲线较为接近, 反映了加载前对目标载荷的修正是有效的; ② 推力载荷 F_z 和俯仰载荷 M_y 的试验模拟曲线和目标曲线比较吻合, 模拟效果比较好; ③ 切削载荷 M_z 的试验模拟曲线和目标曲线之间存在一定的偏离, 但是总体趋势基本一致, 说明该载荷的模拟精度较差, 但是仍能一定程度上满足试验要求。

4 结论

提出了一种基于并联绳牵引的多维载荷加载方法, 该方法能够模拟盾构掘进时的 3 矩 1 力等效载荷。对该方法进行了理论分析和试验研究, 其结论如下。

(1) 通过对加载空间进行分析, 得出了加载点数量和分布对加载能力具有显著影响的结论。

(2) 通过加载装置的试验标定, 分析了加载中的误差情况, 通过修正提高了模拟目标载荷的精度。

(3) 利用盾构掘进时的载荷参数, 进行了加载器的载荷模拟试验, 验证了该载荷模拟方法的可行性。

本文的研究工作验证了该多维载荷加载方法能够满足盾构掘进时的载荷模拟的需要, 简单有效, 具有较高的理论和实践价值。

参 考 文 献

- [1] 洪开荣, 陈馈, 冯欢欢. 中国盾构技术的创新与突破[J]. 隧道建设, 2013, 33(10): 801-808.
HONG Kairong, CHEN Kui, FENG Huanhuan. The Innovation and breakthrough of shield technology in China[J]. Tunnel Construction, 2013, 33(10): 801-808.
- [2] KASHIMA Y, KONDO N, INOUE M. Development and application of the DPLEX shield method: Results of experiments using shield and segment models and application of method in tunnel construction[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1996, 11(1): 45-50.
- [3] 徐前卫, 朱合华, 廖少明, 等. 软土地层土压平衡盾构法施工的模式试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(12): 1849-1857.
XU Qianwei, ZHU Hehua, LIAO Shaoming, et al. Experimental study on EPB shield tunnel construction in soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(12): 1849-1857.

图 12 推力载荷 F_z 的模拟试验

F_z-1 : 目标载荷; F_z-2 : 试验加载的实际载荷;
 F_z-3 : 修正后的理论载荷

图 13 俯仰载荷 M_y 的模拟试验

M_y-1 : 目标载荷; M_y-2 : 试验加载的实际载荷;
 M_y-3 : 修正后的理论载荷

图 14 切削载荷 M_z 的模拟试验

M_z-1 : 目标载荷; M_z-2 : 试验加载的实际载荷;
 M_z-3 : 修正后的理论载荷

- [4] SHINICHIRO I, TOSHIYUKI H, KENJI M, et al. Settlement trough above a model shield observed in a centrifuge[C]//Proceedings of the International Conference Centrifuge. Tokyo: 1998(9): 23-25.
- [5] 陈馈, 韩亚丽. 泥水盾构控制系统模拟试验台[J]. 建筑机械化, 2007, 28(4): 59-62.
CHEN Kui, HAN Yali. Simulation test-bed of slurry shield control system[J]. Construction Mechanization, 2007, 28(4): 59-62.
- [6] GUO Wentao, GUO Weizhong. A novel self-adaptive thrust system of shield machine under complex geological working condition[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2017(63): 133-143.
- [7] 张厚美, 古力. 盾构机姿态参数的测量及计算方法研究[J]. 现代隧道技术, 2004, 41(2): 14-20.
ZHANG Houmei, GU Li. On the measurement and the method of computation of the posture parameters of shields[J]. Modern Tunnelling Technology, 2004, 41(2): 14-20.
- [8] 周宗锡, 佟明安. 刚体姿态控制及其在机器人控制中的应用研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2002.
ZHOU Zongxi, TONG Mingan. Attitude control of a rigid body and its application to robot control[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2002.
- [9] 熊有伦. 机器人技术基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1996.
XIONG Youlun. Fundamentals of robot techniques[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1996.
- [10] MASHIMO H, ISHIMURA T. Evaluation of the load on shield tunnel lining in gravel[J]. Tunnelling and underground space technology, 2003, 18(2): 233-241.
- [11] SUGIMOTO M, SRAMOON A. Theoretical model of shield behavior during excavation I: Theory[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(2): 138-155.
- [12] 徐云岳, 何函. 基于 ANSYS 的塔式起重机塔身设计平台开发研制[J]. 机械, 2010, 37(7): 33-36.
XU Yunyue, HE Han. The development of design platform of the body of tower crane based on ANSYS[J]. Machinery, 2010, 37(7): 33-36.
- [13] 罗勇. 土工问题的颗粒流数值模拟及应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
LUO Yong. Numerical simulation and application research of particle flow in geotechnical problems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [14] 李样明. 一类矩阵方程解的讨论[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 1998(5): 17-22.
LI Yangming. The discssion of solution of a kind of matrix equation[J]. Natural Sciences Journal of Harbin Normal University, 1998(5): 17-22.
-
- 作者简介: 李盈斌, 男, 1991 年出生。主要研究方向为机械设计与控制。
E-mail: lybsjtu@163.com
郭为忠(通信作者), 男, 1970 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为现代机构学、并联机构、重大装备创新设计等。
E-mail: wzguo@sjtu.edu.cn