文章编号:1009-6582(2022)02-0038-07 DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2022.02.005

引文格式:王双敬,王玉杰,李 旭,等.TBM掘进数据标准化预处理方法研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(2): 38-44+52.
WANG Shuangjing, WANG Yujie, LI Xu, et al. Study of Standardized Pre-processing Method of TBM Tunnelling Data[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(2): 38-44+52.

TBM掘进数据标准化预处理方法研究

王双敬[1,2] 王玉杰[1] 李 旭[3] 刘立鹏[1] 尹 韬[1,2]

(1.中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100048;2.河海大学土木与交通学院,南京 210098;3.北京交通大学土木建筑工程学院,北京 100044)

摘 要:TBM信息化采集了海量数据,对TBM数据的标准化预处理是进行诸多研究的前提。基于此,提出了一种TBM掘进数据标准化处理方法,依托TBM现场施工掘进大数据,以破岩特征为依据选取基本掘进参数(刀盘转速、推进速度、刀盘推力及刀盘扭矩)分析掘进过程TBM数据特点,提出循环掘进过程空推段、上升段、稳定段及下降段起点的判别方法,对稳定段起点提出了标准差法判别方法、均值判别方法、直方图判别方法,满足实时和非实时的数据划分需求。最后对两个TBM工程的数据进行标准化预处理,实现施工大数据的标准化。结果表明,提出的标准化预处理方法可实现循环掘进过程数据的有效划分。研究成果可推广应用于众多TBM工程的数据标准化处理,有效实现机器学习数据库的建立。

关键词:TBM;标准化预处理;循环掘进阶段划分;TBM掘进数据分割(TDS)

中图分类号:U455.43 **文献标识码**:A

1 引 言

TBM(隧道掘进机)在隧道施工领域应用广泛,随着数据采集和传输技术的快速发展,TBM搭载多种类型的传感器,得到了丰富的掘进数据[1]。TBM施工信息云计算平台的搭建,解决了TBM施工过程信息采集、传输和存储问题,实现了TBM掘进过程的在线监控、数据共享等信息管理功能[2],使得基于TBM掘进参数的围岩特征识别[3]、掘进性能预测[4]、不良地质识别[5]、围岩分类[6]和掘进性能优化[7]具有数据依托。

得益于TBM施工数据云平台的研发,TBM装备企业已经在吉林引松工程[3]、兰州水源地工程、引绰济辽工程等工程中采集了海量TBM施工过程数据。但这些原始数据不可避免地存在着数据噪声大、无效数据多等诸多问题。为了提高数据使用效率,滤除无效掘进数据,减轻人工处理数据工作强度,开发一套TBM标准化数据预处理方法对于构建标准化数据库意义重大。由于TBM施工大数据应用具有重要意义,对于数据预处理的研究中,目前较多关注完整循环掘进过程的划分[8],而对完整循环掘进过程不同阶段(如上升段、稳定段等)缺乏系统性的划分方法[9,10],且上升段是诸多研究的基础[3,5,11],因而提出一种标准化的掘进数据预处理及循环段分割方法,对于现场应用及数据分析与数据挖掘具有重要意义。

本文基于TBM施工大数据,分析TBM循环掘进过程不同阶段的破岩特征及数据特点,在破岩特征的基础上建立了循环掘进不同阶段的划分方法,通过对不同阶段起点的识别进行循环掘进过程不同阶段的划分,实现TBM掘进数据标准化预处理和数据划分效果的可视化,最后通过两个TBM工程案例进行数据划分方法的应用。

2 TBM掘进过程一般特征

收稿日期:2021-06-29
修回日期:2021-07-19
基金项目:中国电力建设股份有限公司重点科技项目(DJ-ZDXM-2019-10);国家自然科学基金(52179121);陕西省自然科学基金(2019JLZ-13,2019JLP-23).
作者简介:王双敬(1992-),男,博士研究生,主要从事TBM大数据分析及数据挖掘工作,E-mail:shuangjingde@163.com.
通讯作者:王玉杰(1974-),男,博士,正高级工程师,主要从事TBM大数据分析及数据挖掘工作,E-mail:wangyj@iwhr.com.

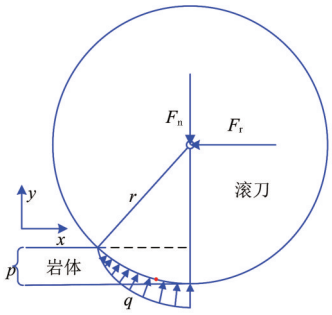
2.1 TBM破岩特征

TBM掘进过程是通过刀盘旋转带动分布于刀盘上的滚刀实现破岩，其中滚刀破岩过程由刀盘推力F和扭矩T提供滚刀贯入岩体深度p时所需法向破岩力F_n和滚动切削力F_r，如图1所示。当滚刀受力大于破岩阻力时将岩体破碎，在掌子面形成切槽产生渣块，随着刀盘旋转实现持续破岩[12]。滚刀所需法向破岩力F_n和滚动切削力F_r与刀盘推力F和扭矩T及滚刀安装数量N的关系如式(1)、式(2)所示[13]。

$$F_r = \left(T - T_f\right) \Big/ \sum_{i=1}^{N} R_i \tag{1}$$

$$F_n = \frac{F - F_f}{N} \tag{2}$$

式中：T_f为刀盘空转扭矩；F_f为刀盘推进过程的摩擦阻力[14]；N为TBM刀盘安装滚刀数量；R_i为滚刀安装半径。



注：r为滚刀半径；p为贯入度；q为岩体抗力分布形式.

图1 破岩过程滚刀受力特征[15]

Fig.1 Characteristics of force applied on disc cuter in the rock-breaking process[15]

考虑TBM滚刀及刀盘的受力特征和数据特征，与破岩相关的基本参数可分为两类：(1) 掘进控制参数，又称为主动参数，包括刀盘转速n及推进速度v，是TBM司机操作过程中可调整的参数，通过调整刀盘转速设定值n_set和推进速度设定值v_set，实现刀盘转速和推进速度的设定；(2) 设备性能参数，又称为被动参数，包括刀盘推力F和刀盘扭矩T，根据TBM破岩阻力自动调整。以上4个参数为TBM破岩的关键参数，后续数据处理均基于4个参数进行。

2.2 TBM掘进数据特征

TBM掘进过程连续记录掘进过程数据，包括刀盘推力、刀盘扭矩、刀盘转速、推进速度等参数，TBM掘进过程数据(刀盘扭矩)随时间的变化特征曲线如图2所示。数据标准化的前提是对停机过程及掘进过程进行分割，根据掘进过程是否进行可分为无效数据与循环掘进数据，其中无效数据是刀盘停止过程的停机阶段数据，此过程记录数据未有效破岩，各参数不发生变化；循环掘进数据是TBM掘进过程从刀盘启动掘进到刀盘停止掘进的数据，称为循环掘进过程，如图2所示。

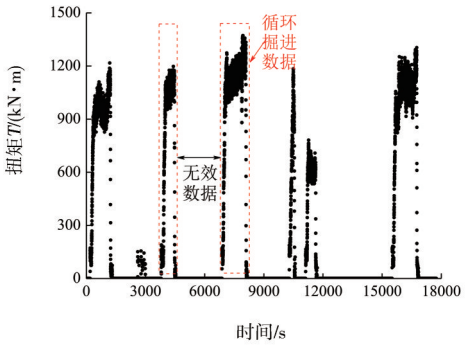


图2 TBM掘进过程数据(扭矩)特征[8]

Fig.2 Characteristics of torque data in the process of TBM tunnelling[8]

图3给出了一个典型循环掘进段的刀盘实际转速、设定转速、实际推进速度、设定推进速度、刀盘推力和刀盘扭矩的变化过程，在这一过程中，根据TBM掘进数据特征将完整循环掘进段划分为4个阶段[11,16]，即空推段、上升段、稳定段及下降段，主要数据特征如下：

(1) 空推段。刀盘从停机状态启动并逐步推进与岩体接触，由于尚未接触岩体，滚刀未受破岩阻力，扭矩为克服刀盘旋转过程的摩擦阻力而产生的扭矩，推力为推进过程克服TBM后配套系统及护盾的摩擦力[14]，两者维持恒定，此段数据为无效破岩

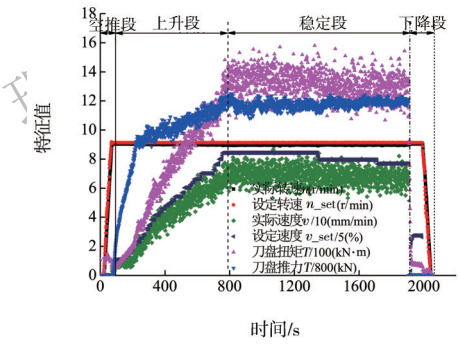


图3 TBM典型循环掘进过程参数变化特征

Fig.3 Characteristics of parameter changes in the process of typical TBM cyclic tunnelling

数据；

（2）上升段：刀盘转速基本恒定，TBM司机通过调整推进速度设定值，使推进速度及贯入度逐步增大实现破岩；贯入度增大导致刀盘破岩阻力增大，刀盘推力及刀盘扭矩增大，为有效破岩数据；此段数据所含信息量丰富[3, 5]，一般持续2~10 min，推进行程约10~50 cm，在该长度内围岩特征参数变化较小；

（3）稳定段：各掘进参数基本保持平稳，推进速度、刀盘推力、刀盘扭矩等数值趋于稳定，各参数存在一定程度的波动，如图3所示。稳定段一般持续掘进到最大油缸行程，此过程为主要破岩阶段；

（4）下降段：油缸行程达到最大值，循环结束，经过停机、换步操作后继续循环掘进，此过程未破岩，为无效破岩数据。

3 数据标准化预处理及实现流程

3.1 标准化预处理主要功能

如2.2节所述，TBM掘进过程的原始数据存在较多的无效数据，基于循环掘进各阶段特征，提取循环掘进过程不同阶段数据（图2），是本文标准化数据预处理所要实现的基本功能，其预处理主要包括：

（1）循环掘进过程数据筛选：在原始数据中筛除无效数据，如停机过程无效数据、刀盘检修过程无效数据等；

（2）循环掘进过程不同阶段划分：对（1）得到的循环掘进过程各阶段进行划分，确定空推段起点、上升段起点、稳定段起点、下降段起点，实现数据标准化存储及可视化汇编。

3.2 标准化预处理实现流程

数据标准化预处理实现过程主要步骤有：

（1）实时数据流信息获取；

（2）数据流特征判别，不满足判别条件的为无效数据，满足判别标准的为循环掘进数据，形成循环掘进数据数组；

（3）对步骤（2）形成的循环掘进数据数组，根据空推段及下降段起点判别标准、上升段起点判别标准、稳定段起点判别标准等步骤，实现循环掘进过程空推段、上升段、稳定段及下降段数据的划分；

（4）对上述循环掘进过程划分结果进行数据可视化和汇编；

（5）基于实时数据流进行新循环段的判别，并依照步骤（2）~（4）实现新循环掘进过程数据的标准化处理。

具体数据处理流程如图4所示。

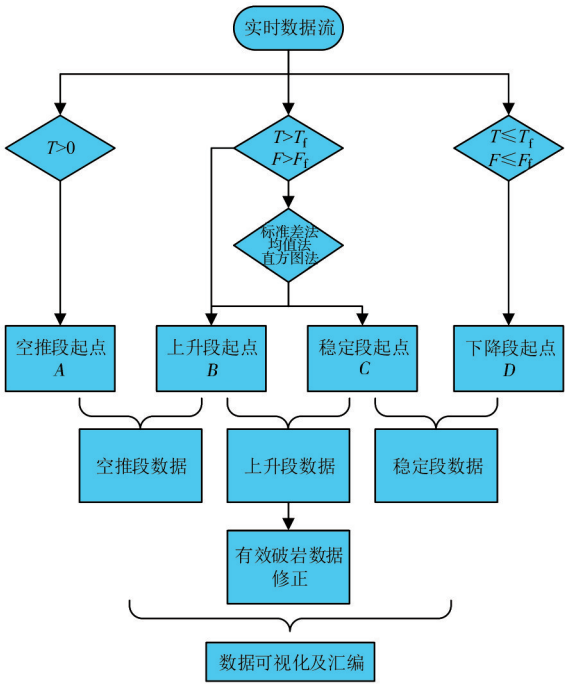


图4 数据标准化处理流程

Fig.4 Flow chart of standardized data processing

4 循环掘进不同阶段数据划分方法

完整循环过程应包括空推段、上升段、稳定段及下降段，通过判别，提供一种循环过程数据（图2）不同阶段起点的划分方法，通过不同阶段起点范围实现循环过程不同阶段数据的分割，主要为空推段起点判别、上升段起点判别、稳定段起点判别及下降段起点判别。

4.1 空推段起点判别

空推段起点的判别可实现原始数据中无效数据的筛除。在空推过程中，TBM司机根据地质情况结合施工状况决定是否开始启动刀盘掘进。因此，该阶段的开始认定以刀盘启动运行为基本判据，刀盘启动过程刀盘转速及刀盘扭矩从0逐渐增大，空推段起点的判别也即循环掘进过程起点的判别。空推段起点可采用扭矩启动阈值T进行判别，如式（3）所示：

$$T > 0 \tag{3}$$

4.2 空推段数据特征

在图3所示的完整循环过程中，刀盘启动后的空推过程中转速持续增大，扭矩为提供刀盘加速旋转的启动扭矩T_1及克服刀盘系统内阻和与周围岩体摩擦力所产生的空转扭矩T_f，推力主要克服摩擦作用力F_f，如克服洞壁与设备的摩擦力。刀盘启动扭矩T_1可表示为式（4）的形式：

$$T_1 = J\beta \tag{4}$$

其中，

$$\begin{cases} J = \dfrac{1}{2}mr^2 \\ \beta = \dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = \dfrac{\pi}{30}\dfrac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}t} \end{cases} \tag{5}$$

式中：T_1为刀盘启动扭矩；J为转动惯量；β为角加速度；m为刀盘质量；r为刀盘半径；ω为转动角速度，且$\omega=2\pi n/60$；n为刀盘转速。

刀盘转速增大到设定值后，将保持恒定转速运行，转速梯度$\mathrm{d}n/\mathrm{d}t$消失，此时T_1部分启动扭矩为0，呈正弦波动的空转扭矩T_f持续存在，此时扭矩较刀盘转速增大过程的扭矩有所降低，如图3所示。由于上一循环结束后刀盘及滚刀检修、保养等因素，刀盘后退一定距离，此过程刀盘由于未接触掌子面，刀盘所受阻力不发生变化，此时的刀盘扭矩及刀盘推力基本恒定[14]，为克服TBM系统摩擦阻力F_f及空转扭矩T_f。

根据上述分析，摩擦阻力F_f及空转扭矩T_f阈值的确定对于掘进过程极其重要，在循环掘进的任何时刻刀盘都存在上述阻力和扭矩，实际破岩推力F、扭矩T均应扣除相应阻力和扭矩的影响。确定摩擦阻力F_f及空转扭矩T_f阈值时，可依照以下标准进行[14]：

（1）转速基本恒定；

（2）上一循环结束刀盘后退，新的掘进空推过程中的推进速度存在数值且保持稳定；

（3）扭矩及推力保持基本稳定。

在完成了阻力阈值的判别后，基于空推段数据特征的识别，可实现空推段数据信息的提取。值得说明的是，在下降段过程，TBM循环过程结束，刀盘破岩停止，此时的数据特征可根据刀盘恒速空推的摩擦阻力F_f及空转扭矩T_f阈值进行判别，实现下降段起点的识别。

4.3 上升段起点判别

在滚刀接触掌子面及刀盘旋转过程中，TBM开始破岩，滚刀承受破岩阻力，刀盘扭矩、刀盘推力等各项参数开始增大，掘进过程进入上升段。因而可根据刀盘推力及刀盘扭矩迅速超过摩擦阻力F_f及空转扭矩T_f阈值作为上升段起点的初步判别标准，如式(6)所示：

$$\begin{cases} T > T_f \\ F > F_f \end{cases} \tag{6}$$

4.4 稳定段起点判别

本文提出3种稳定段起点划分判别方法，分别为标准差法划分方法、均值法判别方法和直方图法判别方法，实现不同需求的数据划分。

4.4.1 标准差法判别

在实时掘进数据处理过程中，当TBM掘进进入稳定段后，推进速度设定值v_set基本维持稳定，实际速度值v振荡稳定。稳定段推进速度设定值v_set波动性较低，标准差σ基本维持稳定，而在上升段过程，由于v_set的持续增大，其标准差σ较大，如图5所示。因而可根据稳定段推进速度设定值v_set的标准差作为判别依据，统计循环段v_set维持稳定过程的标准差范围，作为上升段进入稳定掘进过程的稳定段起点实时数据划分标准σ_s，如式(7)所示：

$$\sigma \leqslant \sigma_s \tag{7}$$

其中：

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(x_i - \bar{x}\right)^2}{N}} \tag{8}$$

式中：x为设定速度值v_set；$\bar{x}$表示均值；N为样本数量。

在图5中，标准差判别标准可能出现两种情况影响稳定段起点判别效果：一是循环起始阶段长时间不改变v_set，其标准差较低，定义为类型a；二是正常上升段v_set较长时间不改变，随后继续增加，定义为类型b。对上述可能影响稳定段起点判别效果的因素，应结合TBM操作特性进行规避：对于类型a，其v_set值一般在数值较小时，可通过设定起始v_set进行判别，如图5中设定v_set=10%可避免类型a的出现；对于类型b，可设定标准差σ_s持续时长，如图5中$\sigma\leqslant\sigma_s$持续时长小于60 s时进行稳定段更新，而若大于60 s时以原始判别的时刻作为稳定段起点，可避免稳定过程偶然因素调整v_set，通过该方法可实现数据划分质量的提高。

4.4.2 均值法判别

在循环掘进过程中，从上升段开始到循环结束

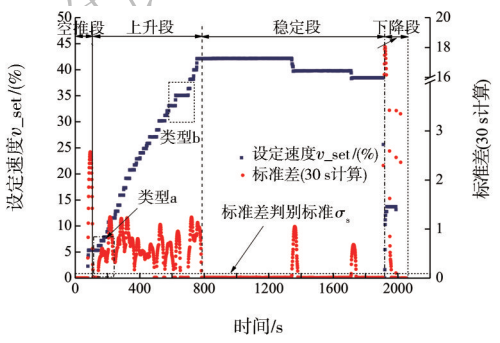


图5 实时数据划分法

Fig.5 Segmentation method of real-time TBM data

的数据量较大，通过特征值的均值化处理，对类似图3所示的循环段可实现上升段及稳定段的判别，本文选用扭矩均值T_m作为特征指标阈值：

$$T_m = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} T_i \tag{9}$$

式中：T_i为循环掘进过程各时间点的扭矩值；N为循环持续时间。

则小于该阈值条件的即认定为上升段，大于该阈值条件的认定为稳定段，实现均值法的稳定段起点的判别。

上升段：$T_i<T_m$

稳定段：$T_i\geqslant T_m$

4.4.3 直方图法判别

通常来讲，在循环进入稳定段后，数据特征普遍集中在一定的区域范围，图3所示的掘进段的扭矩直方图如图6所示，从图6中可知，扭矩数据分布范围在1 300~1 400 kN·m的较多，此区域为TBM稳定掘进过程的主要扭矩区间，而上升段数据数值与数量均较小。根据上述分析，选择频数最大值所对应的扭矩范围作为扭矩判别阈值T_h，图6中的扭矩判别阈值则为1 300 kN·m。值得注意的是，在利用直方图法判别时无需剔除空推段及下降段数据的影响，该部分数据对最终数据的判别结果基本无影响。

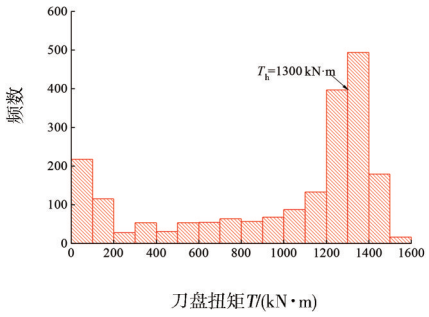


图6 图3所示循环段扭矩分布直方图

Fig.6 Histogram of torque distribution in the cyclic TBM tunnelling illustrated in Fig. 3

则小于该扭矩阈值T_h条件的即认定为上升段，大于该阈值条件的认定为稳定段，实现直方图法的稳定段起点的判别。

上升段：$T<T_h$

稳定段：$T\geqslant T_h$

4.4.4 稳定段起点划分效果

上述3种稳定段起点判别方法中，标准差法判别可应用于实时施工过程的数据划分，以设定速度标准差为判别依据；均值法适用于循环过程掘进参数无较大调整的判别；直方图法根据数据分布范围特征寻找频数最大值作为稳定段起点判别阈值。以刀盘扭矩表示的各方法的划分效果如图7所示，从图中可以看出，标准差法判别方法的上升段数据相对完整，是由于标准差法从操作特征进行数据的划分，而均值法受上升段数据在整循环占比的影响导致其均值计算结果偏低，直方图法受刀盘扭矩波动特征的影响，通过T_m、T_h阈值判断将导致数据过早被判断为稳定段。

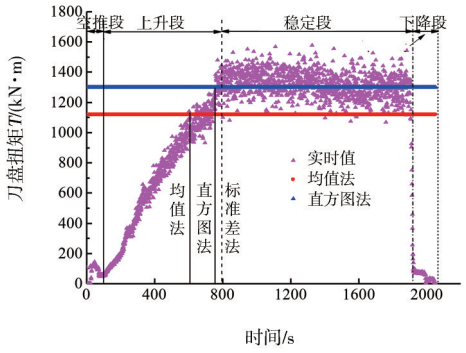


图7 不同方法的数据划分结果

Fig.7 Data segmentation results with different methods

4.5 下降段起点判别

根据TBM掘进过程特性，在停止掘进过程中推力及扭矩迅速降低，考虑刀盘依然存在一定时间的旋转进行清渣及减速，扭矩保持数值不会迅速降为0，此过程未破岩，扭矩主要是刀盘旋转过程的空转扭矩T_f，因而停机段的判别可依据式(6)的方法进行。

4.6 循环段数据划分效果

通过上述的判别标准即可实现循环掘进过程不同阶段的划分，基于Python编制相应的数据处理程序TDS(TBM Data Segmentation)实现上述功能。图8为程序实现的完整循环掘进过程各参数划分效果，不同阶段的数据特征以3条竖线表示，第1条竖线表示上升段起点，第2条竖线表示稳定段起点，第3条竖线表示下降段起点，可实现空推段、上升段、稳定段及下降段的划分，方便快捷的区分不同阶段的数据。通过制作pdf文件的方法对数据分割结果进行可视化汇编，表示循环段的数据特征及基本信息，主要包括循环编号、循环起/始桩号信息、掘进起/始时间、围岩分类及完整循环掘进参数过程线，对掘进参数进行可视化显示。上述可视化汇编结果对于数据异常诊断、循环掘进过程的特征辨别、文件归档等工作具有重要意义。

循环编号	00598	起始桩号	64 310.1 m	起始时间	2020-12-07 16:49
围岩分类	Ⅲ	结束桩号	64 308.5 m	结束时间	2020-12-07 17:24

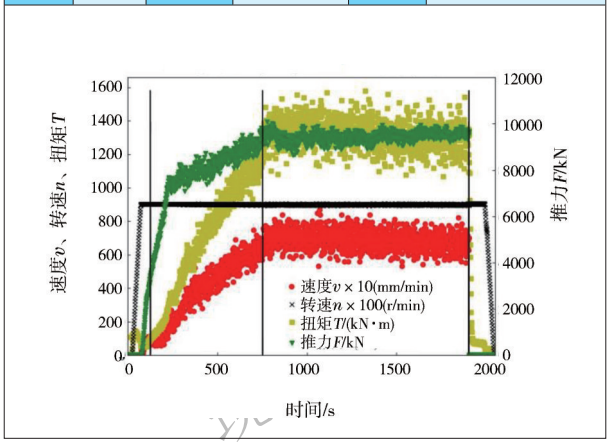


图 8 循环掘进过程数据划分效果

Fig.8 Effect of data segmentation in the process of cyclic tunnelling

5 工程应用

5.1 工程概况

针对上述数据分割方法及程序，基于已建引松供水工程[3]及在建引绰济辽工程TBM掘进数据进行数据标准化预处理方法的应用，各TBM主要设计参数如表1所示，值得注意的是，两TBM设备均为中铁工程装备集团有限公司制造，传感器的采集频率均为1 Hz，标准化的数据采集有利于数据处理模块的推广应用。其中引松供水工程包含802 d共19.5 km掘进距离的数据，引绰济辽工程TBM处于实时施工过程，数据量逐步更新。

表1 不同工程TBM主要参数

Table 1 Main TBM parameters in different tunnel projects

项目名称	引绰济辽	引松供水
刀盘直径ϕ/mm	5 200	7 930
额定刀盘推力F/kN	11 340	23 260
额定刀盘扭矩T/(kN·m)	3 340	8 410
最大刀盘转速n_{max}/(r/min)	11.45	7.6
滚刀数量N/把	34	56
施工天数/d	在建	802
掘进距离/km	2.5	19.5
TBM设备制造商	中铁工程装备集团有限公司	
数据采集频率/Hz	1	

5.2 引绰济辽TBM工程

图8为TDS程序实现的引绰济辽工程完整循环掘进过程划分效果。在空推段过程，刀盘转速逐渐增大，刀盘扭矩由于转动惯量的影响产生数值，刀盘推力及推进速度为0；进入上升段后，各参数逐渐增加，在220 s左右刀盘推力和刀盘扭矩波动性增加；在进入循环稳定段后，各掘进参数调整变化较小，维持基本稳定，直至循环结束；下降段过程刀盘维持了一定时间的空转，刀盘推力及推进速度为0。整个循环持续时间约为35 min。

5.3 引松供水TBM工程

图9为TDS程序实现的引松供水工程完整循环掘进过程划分效果。在空推段刀盘存在较长时间的空转，空转过程中刀盘转速及刀盘扭矩保持基本恒定，为空转扭矩T_f；随后刀盘接触掌子面进入循环掘进上升段，其推进速度在较短的时间内从0增大到稳定推进速度，刀盘推力及刀盘扭矩三者逐渐增大且开始产生波动性。在进入循环稳定段后，各掘进参数调整变化较小，维持基本稳定，直至循环结束；下降段过程刀盘维持了一定时间的空转，刀盘推力及推进速度为0。整个循环持续时间约为45 min。

循环编号	00947	起始桩号	69 882.4 m	起始时间	2015-08-31 21:04
围岩分类	Ⅳ	结束桩号	69 880.6 m	结束时间	2015-08-31 21:49

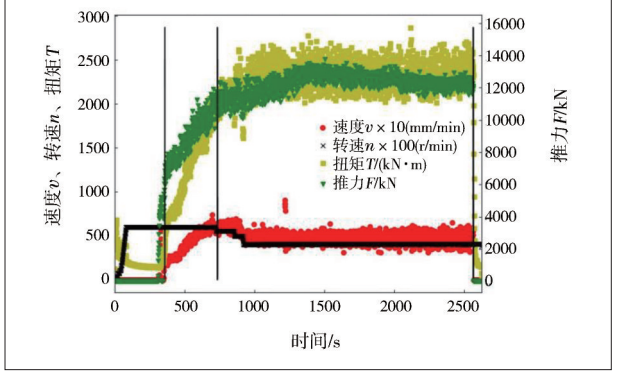


图 9 引松供水工程循环掘进过程数据划分效果

Fig.9 Effect of data segmentation in the process of cyclic TBM tunnelling of the Songhua River Water Conveyance Project

6 结 语

TBM施工中采集了海量数据，对循环掘进过程

不同阶段的数据划分是进行数据挖掘及智能化TBM掘进的前提。本文进行了TBM掘进数据标准化预处理方法的研究。结合滚刀破岩特性和TBM司机操作规律对TBM掘进数据特征进行研究，建立了循环掘进过程不同阶段数据划分的判别方法，实现了数据标准化处理，并在两个TBM工程中进行了数据标准化预处理的应用。结果表明本文所提出的数据标准化预处理方法可实现循环掘进不同阶段数据的有效划分。

通过本文的研究，所提出的循环数据不同划分方法建立的数据库可用于TBM-SMART机器学习模型的建立，循环数据的实时划分结果可用于现场施工过程机器学习模型的应用，辅助TBM智能化施工。

参考文献
References

[1] CHMELINA K, RABENSTEINER K, KRUSCHE G. A Tunnel Information System for the Management and Utilization of Geo-Engineering Data in Urban Tunnel Projects[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2013, 31(3): 845-859.

[2] LI Jianbin, JING Liujie, ZHENG Xiaofeng, et al. Application and Outlook of Information and Intelligence Technology for Safe and Efficient TBM Construction[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 93: 103097.

[3] JING Liujie, LI Jianbin, YANG Chen, et al. A Case Study of TBM Performance Prediction Using Field Tunnelling Tests in Limestone Strata[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 83: 364-372.

[4] LI Jinhui, LI Pengxi, GUO Dong, et al. Advanced Prediction of Tunnel Boring Machine Performance Based on Big Data[J]. Geoscience Frontiers, 2021, 12(1): 331-338.

[5] CHEN Zuyu, ZHANG Yunpei, LI Jianbin, et al. Diagnosing Tunnel Collapse Sections Based on TBM Tunneling Big Data and Deep Learning: A Case Study on the Yinsong Project, China[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 108: 103700.

[6] 薛亚东, 李 兴, 刁振兴, 等. 基于掘进性能的TBM施工围岩综合分级方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(增1): 3382-3391.
XUE Yadong, LI Xing, DIAO Zhenxing, et al. A Novel Classification Method of Rock Mass for TBM Tunnel Based on Penetration Performance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S1): 3382-3391.

[7] 钱七虎. 隧道工程建设地质预报及信息化技术的主要进展及发展方向[J]. 隧道建设, 2017, 37(3): 251-263.
QIAN Qihu. Main Developments and Directions of Geological Prediction and Informatized Technology of Tunnel Construction[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(3): 251-263.

[8] ZHANG Qianli, LIU Zhenyu, TAN Jianrong. Prediction of Geological Conditions for a Tunnel Boring Machine Using Big Operational Data[J]. Automation in Construction, 2019, 100: 73-83.

[9] 张 娜, 李建斌, 荆留杰, 等. 基于隧道掘进机掘进过程的岩体状态感知方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(10): 1977-1985.
ZHANG Na, LI Jianbin, JING Liujie, et al. Prediction Method of Rockmass Parameters Based on Tunnelling Process of Tunnel Boring Machine[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(10): 1977-1985.

[10] JING Liujie, LI Jianbin, ZHANG Na, et al. A TBM Advance Rate Prediction Method Considering the Effects of Operating Factors [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 107: 103620.

[11] WANG Shuangjing, WANG Yujie, LI Xu, et al. Big Data-Based Boring Indexes and Their Application during TBM Tunneling[J]. Advances in Civil Engineering, 2021: 2621931.

[12] 莫振泽, 李海波, 周青春, 等. 基于UDEC的隧道掘进机滚刀破岩数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1196-1202+1209.
MO Zhenze, LI Haibo, ZHOU Qingchun, et al. Research on Numerical Simulation of Rock Breaking Using TBM Disc Cutters Based on UDEC Method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 1196-1202+1209.

[13] GONZÁLEZ C, ARROYO M, GENS A. Thrust and Torque Components on Mixed-face EPB Drives[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 57: 47-54.

[14] GONG Q M, ZHAO J, JIANG Y S. In situ TBM Penetration Tests and Rock Mass Boreability Analysis in Hard Rock Tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, 22(3): 303-316.

[15] ROSTAMI J. Design Optimization, Performance Prediction and Economic Analysis of Tunnel Boring Machines for the Construction of Proposed Yucca Mountain Nuclear Waste Repository[D]. Golden: Colorado School of Mines, 1991.

[16] 张 娜, 李建斌, 荆留杰, 等. TBM掘进参数智能控制系统的研究与应用[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(10): 1734-1740.
ZHANG Na, LI Jianbin, JING Liujie, et al. Study and Application of Intelligent Control System of TBM Tunneling Parameters[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(10): 1734-1740.

（下转第52页）