

基于布尔代数的轨道交通车站计算机联锁 数据自动配置方案研究

谢 林¹ 朱迎春² 彭丽维¹

(1. 卡斯柯信号(成都)有限公司, 610083, 成都; 2. 卡斯柯信号有限公司, 200071, 上海//第一作者, 工程师)

摘 要 为提供一种基于布尔代数,根据联锁信息表和外部接口信息表及自定义的设备查询语法,自动生成轨道交通车站所有有效设备对应码位联锁数据的自动配置方法,从自动配置输入、通用语法搜索、布尔逻辑及通信码位生成等三方面展开研究。利用联锁工具将输入转换成固定格式的联锁逻辑信息,对通用搜索语法阶段的语法定义格式、搜索形式处理及搜索逻辑运算过程进行了具体分析,并对自定义的通用搜索语法进行解析;根据通用搜索语法提供的搜索形式,从固定格式的联锁逻辑信息中查询相关内容并进行逻辑运算,得到参数对应的有效设备信息为每个参数生成对应的码位,并为每个码位赋予运算表达式生成布尔逻辑;借用搜索语法阶段对应的搜索形式,指定通信参数的输入和输出标志及类型码,生成操作机与联锁机的通信码位;从数据配置格式和搜索形式上对该方案带来的变化进行可行性分析。基于布尔代数的轨道交通车站计算机联锁数据自动配置方案在技术上是可实施的。

关键词 轨道交通; 车站; 计算机联锁数据; 自动配置方案; 布尔代数

中图分类号 U384.36⁺2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.06.025

Automatic Configuration Scheme of Rail Transit Station Computer Interlocking Data Based on Boolean Algebra

XIE Lin, ZHU Yingchun, PENG Liwei

Abstract To provide an automatic configuration method for generating interlocking data corresponding to all valid equipment codes at rail transit stations based on Boolean algebra and according to interlocking information tables, external interface information tables and custom equipment query syntax, this process is studied from three aspects: automatic configuration input, universal syntax search and Boolean logic and communication code generation. The input is converted into fixed-format interlocking logic information using an interlocking tool. The syntax definition format, search form processing and logical operation process of the universal search syntax stage are

analyzed in-depth, and the custom universal search syntax is parsed. Based on the search form provided by universal search syntax, relevant content is queried and logical operation is performed on fixed-format interlocking logic information to obtain valid equipment information and code corresponding to each parameter and generate Boolean logic expressions for each code. The input and output flags and type codes of the communication parameters are specified using the corresponding search form in the syntax stage, and communication codes for operation machine and interlocking machine are generated. The feasibility of the changes brought by this scheme is analyzed from the perspective of data configuration format and search form. The automatic configuration scheme for rail transit station computer interlocking data based on Boolean algebra proves to be technically feasible.

Key words rail transit; station; computer interlocking data; automatic configuration scheme; Boolean algebra

First-author's address CASCO Signal (Chengdu) Ltd., 610083, Chengdu, China

1 计算机联锁数据的自动配置现状

目前,计算机联锁逻辑的实现方法主要有2种:一种是采用高级语言来实现,采用面向过程的编程思想,通过定义选路及动岔程序模块、进路建立程序模块、进路锁闭程序模块、信号开放程序模块及进路解锁程序模块等来实现联锁逻辑;另一种是采用开放式的布尔代数来实现,即借鉴继电联锁定型电路的思想和方法,将联锁逻辑转化成有运算关系的布尔表达式,并按照规定的顺序对所有的布尔表达式进行计算来实现联锁逻辑。轨道交通车站计算机连锁数据自动配置通常采用第二种方法。

布尔代数是一个用于集合运算和逻辑运算的公式,包含与运算、或运算和非运算。1个简单的布尔表达式形如 $A = B + C * .N.D$,表示变量A的

值的计算方式。其中： $+$ 表示或运算， $*$ 表示与运算， \neg 表示取反运算， B 、 C 、 D 均为变量。由若干个类似的表达式构成布尔逻辑。由布尔代数实现的联锁逻辑，其核心在于确定变量 A 定义的信号设备。将参数与信号设备组合生成码位，再计算码位的运算逻辑，即是本文研究的重点。

目前由布尔代数实现的联锁逻辑，其数据的自动配置方式采用配置脚本的形式，通过自定义的语法规则，由设计人员在该语法规则范围内依据配置指导书开发自动配置脚本，利用自动配置工具识别脚本的内容对数据配置栏进行自动配置。基于脚本的连锁数据自动配置框架如图 1 所示。该方案一定程度上能够解决计算机联锁数据的自动配置，但存在以下问题：

- 1) 测试脚本包含审核和测试流程，必须要一定的人力支撑。
- 2) 测试脚本的方式仍然是按照场景来配置的，在某个场景下需配置某一行的参数，是一种依赖于场景的自动配置方式。
- 3) 无法对无用的参数和布尔代数进行优化。
- 4) 针对复杂的场景，配置脚本中会使用大量的判断和循环语句，特别是循环语句中的覆盖赋值方式，因自定义的语法并无局部变量的概念，在循环外是否被错误地使用需要根据特定场景进行测试，

这是 1 个风险点。

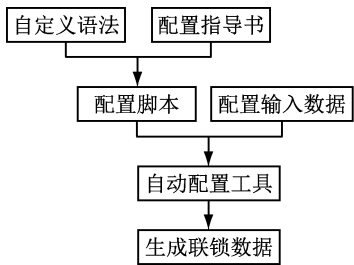


图 1 基于脚本的联锁数据自动配置框架
Fig. 1 Script-based interlocking data automatic configuration framework

2 计算机联锁数据自动配置方案

为了解决上述出现的问题，克服当前自动配置方式带来的缺陷，提出一种基于布尔代数的联锁数据自动配置方法。基于布尔代数的联锁数据自动配置方案的整体结构如图 2 所示。在输入信息制作阶段，生成用于自动配置所需的相关输入文件；通过通用搜索语法搜索阶段，分析自定义的查询语法，从输入文件中按照定义的搜索意图查询相关内容，并对查询到的内容进行逻辑运算，得到查询结果；根据通用语法搜索阶段查询到的设备，生成该站所需的所有码位及其对应的布尔表达式，以及该站操作机与联锁机通信所需的相关码。

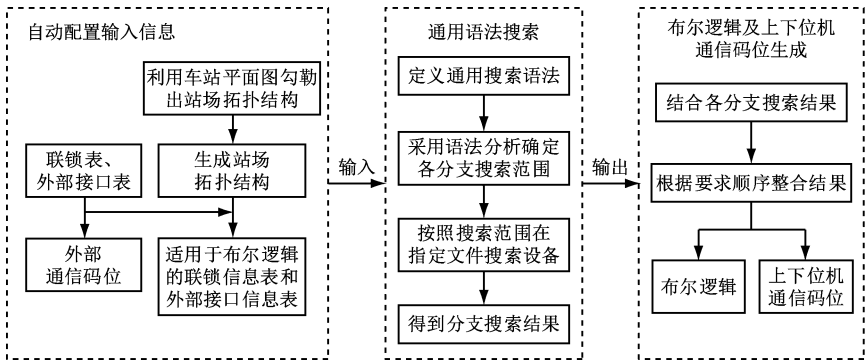


图 2 基于布尔代数的联锁数据自动配置方案整体结构

Fig. 2 Overall structure of interlocking data automatic configuration scheme based on Boolean algebra

3 计算机联锁数据自动配置处理逻辑

3.1 输入信息处理

输入信息处理阶段主要是利用联锁工具将审核通过的通用站场图编辑文件中描述的拓扑结构，以及该站相关的联锁逻辑信息按照一定格式自动转换成方便识别的联锁信息，输出到自定义联锁信

息表中。该信息表的内容包含信号机、道岔、区段、进路信息、进路属性，以及进路所在区段及侵限区段等信息。同时将信号厂商提供的 TCC(列车控制中心)和 RBC(无线闭塞中心)接口信息表转换成与布尔逻辑搜索相匹配的信息内容，输出自定义 TCC 和 RBC 接口信息表。该信息表的内容包含了该站所有与外部交互通信所需的相关信息及其辅助计

算信息,例如:与 TCC 接口的进路信息、禁止灯丝信息、调车危险信息、地震预警信息,以及与 RBC 接口使用的信号授权信息、子进路信息等。外部通信码位文件是与外部接口设备 TCC 和 RBC 通信所需的所有码位信息,包括输出码位和输入码位^[1-2]。

3.2 通用语法搜索处理

通用语法搜索阶段主要是解析自定义的通用搜索语法,根据通用搜索语法提供的搜索形式,从自动配置输入信息阶段得到的联锁信息表、外部信息表和通信文件中查询相关内容并进行逻辑运算,得到站场中所有有效设备和布尔参数。其中,自定义的通用搜索语法包含了若干搜索形式和若干布尔参数的 1 组字符串,通过识别该字符串中的搜索形式能限定搜索内容,1 个站场包含若干个自定义搜索语法,每个自定义搜索语法包含 1 个布尔参数和若干搜索形式,1 个搜索形式可包含若干搜索关键字。通用语法搜索的具体处理过程如下。

3.2.1 搜索语法定义

如图 3 所示,对布尔代数左边的参数定义若干形如 XXX[<YYY" con1:con2" >] +/-/* ZZZ [<WW > param] 的搜索语法,其中:XXX 和 ZZZ 表示不同的搜索形式;YYY 和 WWW 表示搜索关键字,即搜索形式下的搜索内容及范围限制;YYY" con1:con2" 表示搜索关键字扩展,用于条件搜索,即满足 YYY 的内容是 con1 或 con2 的条件下,再取内容;+ 表示并集运算,即将两种搜索结果取和去重;- 表示补集运算,即在第 1 种搜索形式的搜索结果中去掉所包含的第 2 种搜索形式的搜索结果;* 表示条件判断,即在第 1 种搜索形式有结果的前提下取第 2 种搜索形式的结果;param 表示布尔参数^[3]。

搜索形式	运算符	搜索形式	布尔参数	布尔表达式
XXX1[<YYY1>]	+/-/*	ZZZ1[<WWW1>]	param1	=(Bool Expresstion1)
XXX2[<YYY2>]	+/-/*	ZZZ2[<WWW2>]	param2	=(Bool Expresstion2)
XXXn[<YYYn>]	+/-/*	ZZZn[<WWWn>]	paramn	=(Bool Expresstionn)

图 3 基于布尔参数的设备搜索形式定义

Fig. 3 Equipment search form definition based on Boolean parameter

3.2.2 搜索形式处理过程

如图 4 所示,设备搜索时,首先,需要对搜索形式下定义的搜索关键字进行解析,获取搜索范围。

搜索关键字包含 2 方面的内容:一是定位该关键字搜索的表格内容,即从某个子表的某 1 列或者某几列选取内容;二是判断该关键字搜索是否是条件搜索,即该关键字所查找范围的内容满足条件的情况下再选取后面关键字的内容。其次,每次搜索都需要定义搜索基准,在搜索基准下记录搜索内容,此处的搜索基准是指以某个设备元素为准,往后进行搜索,如果是第 1 次搜索,则第 1 个关键字对应的范围就是搜索基准,后面每次的搜索都在前一次搜索结果的前提下进行,直到搜索结束。最后,该搜索形式下,每完成一次搜索,判断是否有结果,如果无结果下一次搜索便无搜索基准,直接结束,否则更新基准^[4]。

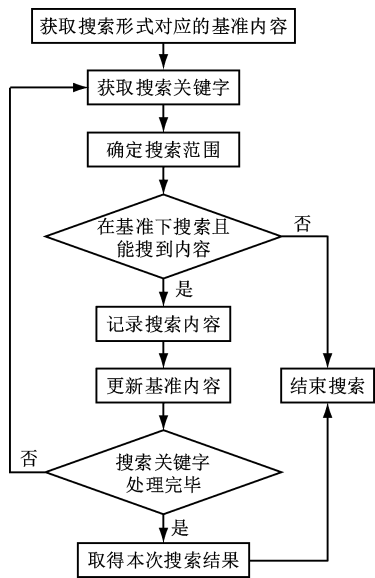


图 4 不同设备搜索形式的逻辑运算过程处理

Fig. 4 Logical calculation process handling of different equipment search forms

本次搜索的结果作为下一次搜索的依据,直到关键字处理完得到最后的结果,并将其作为该搜索形式下的搜索结果。具体步骤如下:

- 1) 设定每个搜索形式下第 1 个关键字所定位的设备是当前搜索的基准,从定位的设备开始,搜索文件中所有该设备对应的位置。
- 2) 取第 2 个关键字所定位的位置信息,与第 1 个设备对应的位置进行比较。如果两者有重叠部分,则重叠部分对应的设备即为第 2 个关键字所定位的设备,同时设定第 2 个关键字定位的设备是第 3 个关键字搜索的基准。
- 3) 设定 1 个搜索形式下有 N 个关键字,对第 N 个关键字搜索时,以第 $N - 1$ 个关键字定位的设备

为基准,判断第 N 个关键字和第 $N - 1$ 个关键字定位设备重叠的部分,则重叠部分对应的设备即为该搜索形式对应的结果。

3.2.3 设备搜索逻辑运算过程

定义每个搜索形式的结果为 1 个分支,1 个参数对应的设备会包含若干搜索分支的组合,最终取得组合的结果,即设备搜索的逻辑运算过程。不同设备搜索形式的逻辑运算流程如图 5 所示。对搜索形式两两组组合进行逻辑运算。逻辑运算过程包含 3 种运算:

- 1) 并集运算:将 2 个搜索形式的结果合并,去掉重复项。
- 2) 补集运算:将 2 种搜索形式的结果取补,在第 1 个搜索形式的结果中去掉第 2 个搜索形式的结果。
- 3) 条件判断:若定义的搜索关键字格式中不含参数定义且运算符是 *, 则认为是搜索形式下的条件判断,该搜索形式下有结果才取第 2 个搜索形式的结果,否则该分支就无结果。

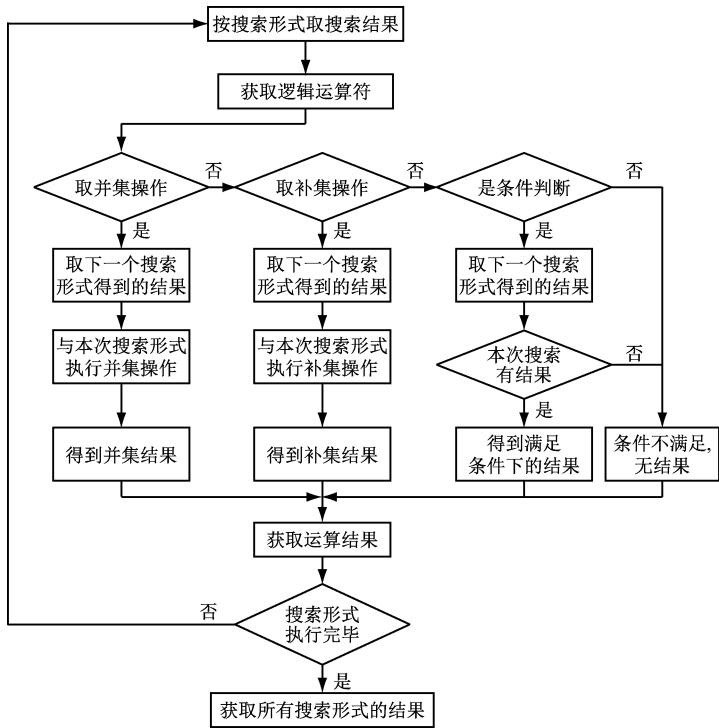


图 5 设备搜索逻辑运算流程

Fig. 5 Equipment search logical calculation process

3.3 布尔逻辑及通信码位生成

3.3.1 布尔逻辑生成

布尔逻辑是指一种为了实现某种目的(本文指联锁逻辑)而定义的包含若干码位和码位值运算的数学表达式,同时也是按照通用语法中布尔参数出现的顺序从上往下执行运算的一种数学计算方式。布尔逻辑的生成步骤如下:

步骤 1:在本文第 3.2 节的基础上,取通用搜索语法搜索阶段得到的所有有效设备及其布尔参数,并区分每个布尔参数在本站定义的所有设备。

步骤 2:将每个布尔参数与其对应的所有有效设备进行组合,生成该布尔参数对应的有效码位。假设布尔参数为 param,则该自定义搜索语法中若

干搜索形式逻辑运算的结果为: E_1, E_2, \dots, E_n 。将布尔参数和设备组合成有效码位: $E_{1-param}, E_{2-param}, \dots, E_{n-param}$ 。

步骤 3:按照布尔参数定义的顺序,结合参数对应的运算过程(见图 3 中的布尔表达式),按顺序生成码位的布尔表达式,将所有布尔表达式的顺序组合进行运算即为联锁数据的布尔逻辑。

3.3.2 操作机与联锁机通信码位生成

布尔逻辑的输入,一部分作为操作机的操作命令,因此数据的自动配置需包含操作机与联锁机通信码位。操作机与联锁机通信码位搜索形式定义如图 6 所述。操作机与联锁机通信码位的生成原理与布尔参数的设备搜索类似,只需额外地指定参数

的输入和输出标志及其对应的类型码,其中:输入、输出标志用于确定生成的码位相对于布尔逻辑是输入码位还是输出码位,类型码用于校验该参数是

否有对应的搜索逻辑。其余搜索形式及运算逻辑与参数的设备搜索一致。

输入输出标志		类型码	操作机与联锁机通信参数	搜索形式	运算符	搜索形式
输入码位标志		LX1	param 11,param 12,...,param 1 <i>n</i>	= XXX1[<YYY1>]	+/-/*	ZZZ1[<WWW1>]
		LX2	param 21,param 22,...,param 2 <i>n</i>	= XXX1[<YYY1>]	+/-/*	ZZZ1[<WWW1>]
输出码位标志		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
		LX <i>n</i>	param 1,param 2,...,param <i>nm</i>	= XXX1[<YYY1>]	+/-/*	ZZZ1[<WWW1>]

图 6 操作机与联锁机通信码位搜索形式定义

Fig. 6 Code search form definition for communication between operation machine and interlocking machine

4 联锁数据自动配置方案可行性分析

该方案是在目前采用的配置脚本形式的基础上进行改进的,主要会产生以下变化:

1) 数据配置表格格式。数据配置表格用于定义该站所有参数对应的设备,包含参数定义和通信码位定义。数据配置表中,参数配置保留,通信文件无需定义,同时需新增 1 个表格来辅助搜索上下位机通信设备,继而生成上下位机通信码位。

2) 搜索形式变更。需定义 1 个新的搜索形式对信息表和外部通信文件中定义的输入输出码位进行查询,且设备搜索结果需根据条件判断,对每个搜索形式的结果取并集与补集。

3) 可能带来的影响及解决措施。该方案加大了审核的难度,数据配置的工作量放到了审核当中,需要保证审核力度。同时,需兼顾数据一致性校核问题,即在搜索某一参数对应的设备时,可能有多途径可以获取,需要保证数据的一致性。因此,可由联锁工具提前进行一致性校核或在布尔表达式中增加判断语句进行校核判断。

4) 数据防护问题。在极端情况下,假如该搜索方式失效,搜索出错误的设备,比如某布尔参数对应的设备是信号机设备,但执行搜索时搜到了进路设备,可能会错误地生成该布尔参数对应的码位及其对应的表达式。目前提供 2 种方式进行防护:①布尔参数对应的设备根据实际站型来搜索,在布尔表达式中不给出布尔参数的默认值,这样避免出现多余配置的情况,在进行错误搜索时,该布尔参数

对应的码位不会生成任何逻辑运算,可以快速地定位到错误的位置;②定义人工配置优先的原则,该布尔参数如果在数据配置表中已经人工配置,则不再依赖于搜索逻辑进行搜索,直接采用人工定义的配置项^[5-6]。

经上述分析,在克服带来的审核难度的影响,以及极端情况下搜索失效的基础上,通过布尔代数实现联锁逻辑搜索在技术上是可实施的。

5 结语

基于布尔代数的计算机联锁数据自动配置方案,通过布尔代数直接描绘参数对应的设备变量,可以最大程度地减少数据配置的工作量,减少了额外的脚本自动配置环节,节约了配置脚本审核、测试环节带来的成本消耗,同时可以将大部分数据配置工作提前,在审核阶段提早发现问题,达到了配置与联锁逻辑剥离。此外,该方案并未增加额外的输入文件,所有的输入都是复用当前的信息表,不会增加设计工作量;另一方面解决了目前由于简化配置项引起的生成大量无用参数和布尔表达式的问题,能够优化布尔逻辑,根据需要选择性地生成有用的参数和布尔表达式,减少对联锁下位机系统容量的限制。

参考文献

[1] 国家铁路局. 铁路车站计算机联锁技术条件: TB/T 3027—2015[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.
National Railway Administration. Computer-based interlocking technical specifications: TB/T 3027—2015[S]. Beijing: China

- Railway Publishing House, 2016.
- [2] 杨扬. 车站信号控制系统[M]. 成都:西南交通大学出版社, 2012:10-30.
- YANG Yang. Station signal control system[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2012:10-30.
- [3] 胡晓辉, 韩佳芮. 车站联锁进路控制逻辑的形式化方法[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(17): 229.
- HU Xiaohui, HAN Jiarui. Route control station interlock logic of formal methods[J]. Computer Engineering and Applications, 2016, 52(17): 229.
- [4] 周果, 赵会兵. 城轨计算机联锁的数据安全性验证[J]. 铁道学报, 2016(8): 63.
- ZHOU Guo, ZHAO Huibing. Data security verification of urban rail computer interlocking[J]. Journal of the China Railway Society, 2016(8): 63.
- [5] 王文龙, 梁木海. 地铁联锁站数据监测系统的设计研究[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(12): 127.
- WANG Wenlong, LIANG Muhai. On the design of interlocking station data monitoring system[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(12): 127.
- [6] 付新华, 肖明清. 基于一种匹配函数的ATS资源自动配置方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(12): 1392.
- FU Xinhua, XIAO Mingqing. Automatic configuration approach for ATS test resource based on a kind of matching function[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(12): 1392.
- [7] HUANG L. The past, present and future of railway interlocking system[C]//IEEE. 2020 IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE). Beijing: IEEE, 2020: 170.
- [8] WANG H, XU T, YUAN T. Novel online safety observer for railway interlocking system[J]. Journal of Transportation Engineering, 2013, 139(7): 719.
- [9] ROANES-LOZANO E, ROANES-MARCÍAS E, LAITA L M. A computer algebra approach to the design of routes and the study of their compatibility in a railway interlocking[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2002, 58(3): 203.
- [10] 梁艺凡, 谭丽, 冯挺. A* 进路搜索算法的研究与实现[J]. 铁道标准设计, 2013, 57(2): 117.
- LIANG Yifan, TAN Li, FENG Ting. Research and implementation of A* algorithm on route search[J]. Railway Standard Design, 2013, 57(2): 117.

(收稿日期:2021-04-29)

(上接第141页)

参考文献

- [1] 邵华, 张子新. 盾构近距离穿越施工对已运营隧道的扰动影响分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊2): 545.
- SHAO Hua, ZHANG Zixin. Analysis of disturbing effect on running subway caused by adjacent shield-driven[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(S2): 545.
- [2] 朱蕾, 黄宏伟. 盾构近距离上穿运营隧道的实测数据分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(10): 1962.
- ZHU Lei, HUANG Hongwei. Monitoring data analysis of disturbing effect caused by shield-driven over operating tunnel[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(10): 1962.
- [3] 朱蕾, 赵敬妍. 盾构近距离下穿对上覆已建隧道影响的实测研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(3): 656.
- ZHU Lei, ZHAO Jingyan. Monitoring data analysis of shield-driven construction undercrossing the existing tunnel in a short distance[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(3): 656.
- [4] 方勇, 何川. 盾构法修建正交下穿地铁隧道对上覆隧道的影响分析[J]. 铁道学报, 2007, 29(2): 83.
- FANG Yong, HE Chuan. Analysis of influence of undercrossing subway shield tunneling construction on the overlying tunnel[J]. Journal of the China Railway Society, 2007, 29(2): 83.
- [5] 张晓清, 张孟喜, 李林, 等. 多线叠交盾构隧道近距离穿越施工扰动机制研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 1133.
- ZHANG Xiaoping, ZHANG Mengxi, LI Lin, et al. Mechanism of approaching construction disturbance caused by multi-line overlapped shield tunnelling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(4): 1133.
- [6] 丁智, 吴云双, 张霄, 等. 软土盾构隧道近距离穿越既有地铁影响数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(3): 663.
- DING Zhi, WU Yunshuang, ZHANG Xiao, et al. Numerical analysis of influence of shield tunnel in soft soil passing over existing nearby subway[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(3): 663.
- [7] 王宁. 既有隧道两侧新建近接隧道施工力学行为及影响分区研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- WANG Ning. Study on construction mechanical behavior and influence zoning of new adjacent tunnels on both sides of existing tunnels[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [8] 魏纲, 王霄, 张鑫海. 基于位移准则的盾构隧道施工影响分区方法研究[J]. 市政技术, 2017, 35(2): 71.
- WEI Gang, WANG Xiao, ZHANG Xinhai. Study on zoning method of shield tunnel construction influence based on displacement criterion[J]. Journal of Municipal Technology, 2017, 35(2): 71.
- [9] GONG Q M, NIE X F, TIAN Z Y. Study on safety state of shield tunnel under rotation and shear dislocation deformation mode[C]//Chang'an University. 21st COTA (Chinese Overseas Transportation Association) International Conference of Transportation Professionals. Xi'an: Chang'an University, 2021: 743-753.

(收稿日期:2021-01-15)