

山岭隧道钻爆法施工信息采集与机械化施工 配套软件开发及应用

王朋乐

(中国铁路设计集团有限公司, 天津 300308)

摘要:为甄别采用钻爆法施工的山岭隧道开挖循环作业时间影响因素,并合理预测施工工期,在现场调研的基础上,采用数理统计及理论分析方法,推导影响隧道工期的钻孔、装药爆破、出渣、立架和湿喷五道工序作业时间预估公式,并对机械化水平高的出渣和湿喷工序内机械合理配置数量进行研究。结果表明:隧道循环开挖进尺直接影响五道工序作业时间,钻孔和立架工序的循环作业时间还与围岩等级密切相关,出渣和湿喷工序循环作业时间与机械配置数量有关;出渣和湿喷工序内机械最优配置数量会随隧道累计开挖进尺增加而增加。为方便项目管理人员应用,基于 C# 语言开发了相关软件。该软件具备施工循环基本信息采集、机械配套数量计算和开挖作业时间预估三大功能,可实现管理人员远程监控施工进度并预见性地进行人员及机械安排的目标,有助于科学高效地进行隧道建设,提高施工效率,缩短施工工期。

关键词:山岭隧道;施工工期;钻爆法;统计分析;软件开发

中图分类号:U459.1;U455.41;U455.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2022)01-0241-08

近年来,随着国家铁路设施建设要求及隧道修建技术的不断提高,采用钻爆法施工的特长山岭隧道不断增多^[1],如石太高铁太行山隧道^[2]、兰新铁路乌鞘岭隧道^[3]、青藏铁路关角隧道^[4]及向莆铁路青云山隧道^[5]等,长度均超过 20 km。正在建设的川藏铁路中也有若干特长隧道,如易贡隧道(42 486 m)、色季拉山隧道(38 013.9 m)、果拉山隧道(34 200 m)、德达隧道(33 350 m)、拉月隧道(31 090 m)、芒康山隧道(30 675 m)、孜拉山隧道(30 000 m)等^[6-8]。在隧道长度不断增加的同时,机械设备的联合作业效率及施工工期控制愈加难以保证。因此,有必要对钻爆法机械化施工下的山岭隧道循环工序作业时间特征及机械效率等进行研究,有预见性地安排施工机械,优化施组方案。

目前针对山岭隧道钻爆法机械化施工的研究较多。王明年等^[9]依托郑万高铁湖北段大断面隧道洞群,对大型机械化大断面法施工下初期支护位移数据进行了统计和分析;林毅等^[10]以郑万高铁湖北段隧道工程实践为依托,从大断面快速修建技术理论研究、机械化配套设备、机械化配套条

件下施工技术和信息化系统应用等方面总结了郑万高铁湖北段隧道大断面修建关键技术,推动隧道的整体施工水平和综合管理能力提高。赵东波^[11]依托安琶铁路甘姆奇克隧道工程,对隧道开挖、装运和支护等不同工序进行机械化施工设备配置,并对比了不同机械配置的工效差异。邬彪红^[12]通过研究隧道施工中的机械化配套方案,缩减隧道施工工期,加快了隧道进度。刘禹阳等^[13-14]依托金家庄特长螺旋隧道工程,通过系统调研开挖与初期支护相关机械的现场作业时间,采用理论分析及数理统计方法,研究了装载机与湿喷机的停机等待时间特征,提出了隧道运输机械数量配置原则,并对施工机械的单机作业特性和衔接特性进行了分析。综上,目前关于钻爆法机械化施工的研究较多,对隧道施工前期施组准备具有参考意义,但在隧道施工现场随着隧道进尺的不断增加,各种影响机械施工效率及造成工序时间延长的问题不断发生。随着钻爆法山岭隧道由原来的粗放型施工向精细化施工转型,施组方案应根据实际状况及时优化。

收稿日期:2021-09-09

基金项目:中国铁路设计集团有限公司重大课题(2019YY120301)。

作者简介:王朋乐(1995—),男,河北衡水人,中国铁路设计集团有限公司,助理工程师,硕士,研究方向为山岭隧道机械化施工技术。

目前隧道施工现场的施工信息主要靠施工人员现场记录填写施工日志,然后递交给项目管理人员,由于信息的滞后性,项目管理人员不能及时判断施工中的延误原因,机械安排具有滞后性,延长了作业时间,且机械数量的不足会随着掘进里程的增加而逐渐显现,因此应有预见性地安排车辆进场^[13]。在施工工期预测方面,目前主要根据正常施工顺序、施工效率、作业面积等综合确定,缺乏有效的计算公式。本文在现场调研的基础上,通过理论分析及数理统计方法,创新性地推导了五部工序作业时间预估公式,同时得出了增加出渣工序及湿喷工序机械数量的计算方法。为方便现场人员应用,以 Visual Studio2012 为开发平台,采用 C# 语言,开发了山岭隧道钻爆法施工信息采集与机械化施工配套分析软件,实现管理人员远程监控施工进度并预见性地进行人员及机械安排的目标,有助于科学高效地进行隧道建设,提高施工效率,缩短施工工期。

1 施工循环信息采集系统

山岭隧道钻爆法施工信息采集与机械化施工

配套分析软件共分为 3 个模板,包括施工循环基本信息采集、机械配套数量计算和开挖作业时间预估,如图 1 所示。

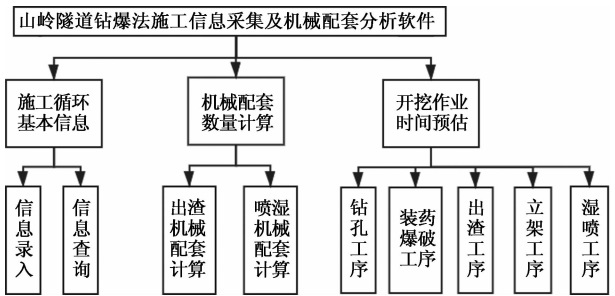


图 1 软件系统功能模块

施工循环基本信息录入界面如图 2 所示,包括基本信息、钻孔作业、爆破作业、出渣排危作业、封闭岩面(初喷)、立拱架、超前支护、挂钢筋网、喷混凝土(复喷)等 10 项基本录入信息,包含了隧道现场施工中的全部作业流程及相关参数。在输入完成后,系统将信息储存在轻量级的 SQLite 数据库中,可供项目管理人员远程查阅与分析。

周边眼	
设计数量(个)	14
实际数量(个)	46
设计半径(cm)	0.000
实际半径(cm)	2.000
设计孔深(m)	0.000
实际孔深(m)	4.000
设计间距(cm)	0.000
实际间距(cm)	37.000

辅助眼	
设计数量(个)	20
实际数量(个)	61
设计半径(cm)	0.000
实际半径(cm)	2.000
设计孔深(m)	0.000
实际孔深(m)	4.000
设计间距(cm)	0.000
实际间距(cm)	23.000

掏槽眼	
设计数量(个)	13
实际数量(个)	16
设计半径(cm)	0.000
实际半径(cm)	2.000
设计孔深(m)	0.000
实际孔深(m)	5.000
设计间距(cm)	0.000
实际间距(cm)	25.000

开始时间: 2020-05-09 18:30 结束时间: 2020-05-10 00:20

补充内容: 接风、水管18:30-21:30(三小时); 钻眼20:30-0:20.作业人员14人, 凿岩机13台

图 2 基本信息录入界面

2 隧道机械化施工工序作业时间分析系统

为甄别采用钻爆法施工的山岭隧道开挖循环作业时间影响因素,并合理预测施工工期,通过现场调研记录某 350 km/h 双线高速铁路隧道实际开挖参数及作业时间,对直接影响隧道开挖进度的掌子面钻孔、装药爆破、出渣、立架和湿喷五部工序的作业时间进行统计分析,确定这五部工序的作业时间影响因素并推导预估公式。

2.1 钻孔工序

本隧道钻孔工序采用人工手持风动凿岩机作业,现场统计的不同等级围岩下每延米钻孔时间如图 3 和表 1 所示。

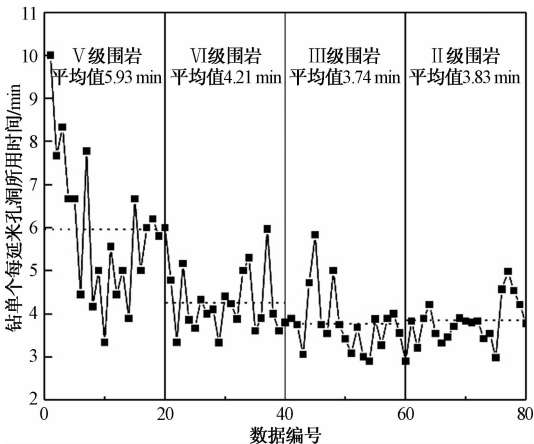


图 3 4 种等级围岩每延米钻孔耗时图

表 1 4 种等级围岩每延米钻孔耗时统计

围岩等级	V	IV	III	II
平均时间/min	5.93	4.21	3.74	3.83

每循环钻孔用时与每延米钻孔耗时、钻孔总数量、钻孔作业人数等有关,计算公式为

T_1 = \frac{\alpha_1 t_1 d N_{zk}}{n_{zk}} \tag{1}

式中: T_1 为每循环钻孔用时, min; \alpha_1 为钻孔工人的熟练程度; t_1 为每延米钻孔耗时, min; d 为每循环进尺, m; N_{zk} 为每循环钻孔数量; n_{zk} 为钻孔人数。

以钻孔作业时间计算公式(1)为基础编制工序作业时间分析系统中钻孔工序作业时间预估功能。软件界面如图 4 所示。

2.2 装药爆破工序

装药爆破工序中,装药人员在钻孔内进行装药,由于存在不同等级围岩的装药人员和钻孔数量不同的情况,因此将装药时间细化为每个装药人员不同进尺下的单孔装药时间,并求出平均时间,如图 5 及表 2 所示。

每循环装药爆破工序用时与单孔装药时间、隧道开挖进尺、钻孔数量、装药人数等有关。由图 5 可以看出,单孔装药时间与开挖进尺近似服从一次函数关系,进而推导每循环装药爆破工序用时预估公式为

T_2 = \frac{\alpha_2 N_{zk} \sum_{i=1}^n (0.76 d_i + 2.37)}{m_{zy}} \tag{2}

式中: T_2 为每循环装药爆破工序耗时, min; \alpha_2 为装药工人的熟练程度; d_i 为炮眼深度, m; n 为炮眼的种类; m_{zy} 为装药人数。

以式(2)为基础编制工序作业时间分析系统中装药爆破工序作业时间预估功能。软件界面如图 6 所示。

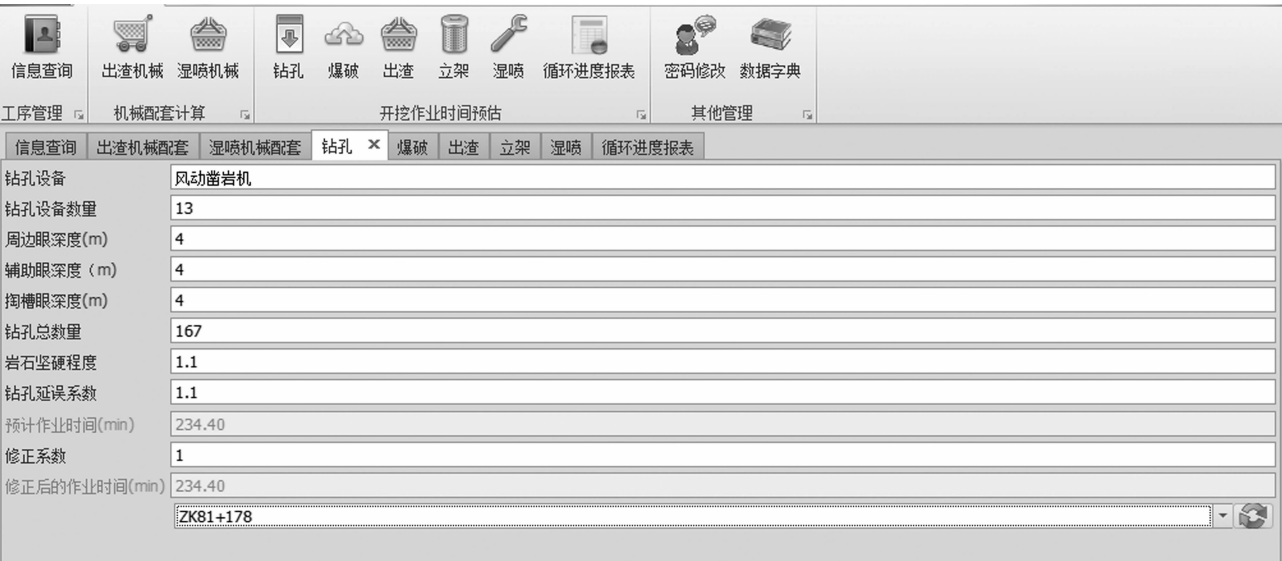


图 4 钻孔工序作业时间预估界面

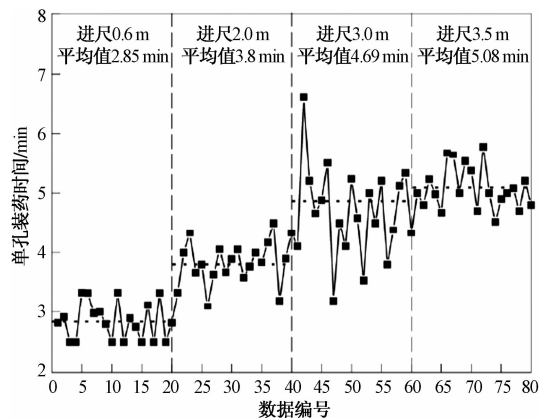


图 5 不同开挖进尺下单孔装药时间

表 2 不同开挖进尺下单孔装药时间统计

开挖进尺/m	0.6	2.0	3.0	3.5
平均时间/min	2.85	3.80	4.69	5.08



图 6 装药爆破工序作业时间预估界面

假设自卸汽车在掌子面和弃渣场之间的往返路程中等间距分布,则相邻两辆自卸汽车的间距 D_{cc} 为

$$D_{cc} = \frac{2(L_{jc} + L_{qz})}{n_{cs}} \tag{4}$$

式中: L_{jc} 为隧道累计开挖进尺,m; L_{qz} 为弃渣场距隧道洞口的距离,m; n_{cs} 为自卸汽车实际配置数量。

因此,装载机单次装渣平均延误时间 T_{yw} 为

$$T_{yw} = \frac{D_{cc} - D_c}{V_{zx}} \tag{5}$$

式中: D_c 为装载机装满一自卸汽车的时间另一辆自卸汽车可行驶的距离[根据式(6)确定],m; V_{zx} 为自卸汽车往返掌子面与弃渣场之间的平均行驶速度,m/min。

$$D_c = T_{zm} V_{zx} \tag{6}$$

式中, T_{zm} 为装载机装满一辆自卸汽车洞渣所用时间,min。

2.3 出渣工序

出渣工序作业时间与弃渣总量、机械配置数量、运输机械行驶距离、机械容量等有关,其中弃渣总量 W_{qz} 计算公式为

$$W_{qz} = S_{dm} d_{jc} R \Delta \tag{3}$$

式中: S_{dm} 为隧道开挖断面面积, m^2 ; d_{jc} 为隧道开挖进尺,m; R 为岩体松胀系数; Δ 为超挖系数,视爆破质量而定,一般取 1.15~1.25。

出渣工序作业时间与自卸汽车配置数量是否充足密切相关,当配置数量足够时,装载机装完一车弃渣后下一辆自卸汽车已到达掌子面处等待装渣,反之装载机停机等待自卸汽车的到来。

1)当实际配置的自卸汽车数量不足时,即装载机装满一自卸汽车后需停机等待下一辆自卸汽车到来,此时装载机停机等待时间可由下一辆自卸车距离掌子面的长度及其平均行驶速度确定。

由于自卸汽车到达掌子面后需要掉头进行装渣,因此设定掉头时间为 1 min,则每循环出渣工序总时间 T_3 预估公式为

$$T_3 = m(T_{zm} + T_{yw} + 1) \tag{7}$$

式中, m 为装渣总车数,根据弃渣总量和自卸汽车容量确定。

2)当现场实际配置的自卸汽车数量足够时,即装载机装满一自卸汽车后下一辆自卸汽车已到达等待装渣,自卸汽车不会产生延误,因此 $T_{yw} = 0$,此时出渣总时间 T_3 预估公式为

$$T_3 = m(T_{zm} + 1) \tag{8}$$

以式(8)为基础,编制工序作业时间分析系统中出渣工序作业时间预估功能。软件界面如图 7 所示。

2.4 立架工序

本隧道立架工序采用人工立架方式,Ⅳ级围岩段每循环开挖进尺 2 m,支立钢架 2 榀;Ⅴ级围岩段

每循环开挖进尺 0.6 m,支立钢架 1 榀。现场记录的每榀平均立架时间如图 8 和表 3 所示。



图 7 出渣工序作业时间预估界面

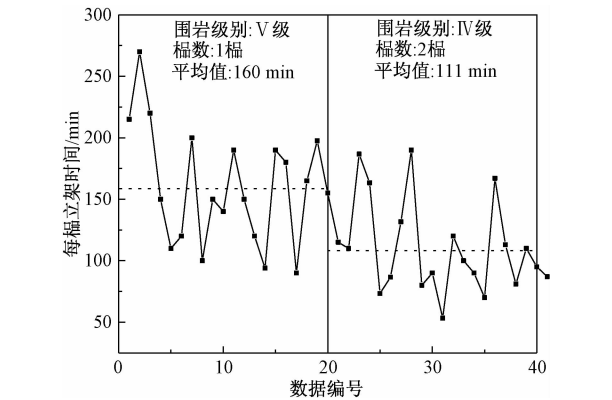


图 8 不同等级围岩每榀立架时间

表 3 不同等级围岩每榀立架时间统计

围岩级别	V	IV
平均时间/min	160	111

每循环立架工序用时与每榀平均立架时间、立架榀数有关,计算公式为

$$T_4 = \alpha_3 t_2 n_{ps} \tag{9}$$

式中: T_4 为立架工序作业总时间,min; α_3 为立架工人的熟练程度; t_2 为每榀平均立架时间,依据表 3 进行取值; n_{ps} 为立架榀数。

以式(9)为基础,编制工序作业时间分析系统中立架工序作业时间预估功能。软件界面如图 9 所示。

2.5 湿喷工序

每循环湿喷工序作业耗时与开挖进尺、每延米设计混凝土用量、湿喷混凝土回弹率和湿喷机实际喷射效率等有关,计算公式为

$$T_5 = \frac{\alpha_4 V_{hn} d_{jc}}{\alpha_{ht} v_s} \tag{10}$$

式中: T_5 为湿喷工序作业总时间,min; α_4 为湿喷机延误系数; V_{hn} 为设计每延米混凝土用量, m^3/m ; α_{ht} 为湿喷混凝土回弹率; v_s 为湿喷机实际喷射效率, m^3/min 。



图 9 立架工序作业时间预估界面

以式(10)为基础,编制工序作业时间分析系统中 湿喷工序作业时间预估功能。软件界面如图 10 所示。



图 10 湿喷工序作业时间预估界面

3 隧道施工机械化配套系统

隧道施工机械数量配置是否合理决定了机械群施工效率,直接影响了隧道施工进度。隧道施工工序内存在两种及以上机械设备配合使用时才会出现配套数量问题。在隧道出渣与湿喷工序内存在两种机械配套关系,即出渣工序内装载机与自卸汽车的配套关系,湿喷工序内湿喷机与混凝土罐车的配套关系。由于隧道断面的限制,用于出渣作业的装载机数量最多为 2 台,用于湿喷作业的湿喷机数量基本为 1 台,对于以上两工序的机械配套研究主要是对运输机械自卸汽车及混凝土罐车的配置数量进行研究。

3.1 出渣工序中自卸汽车配置数量计算

同出渣工序作业时间预估公式推导类似,最优的自卸汽车配置数量应使掌子面装渣用装载机不停机等待自卸汽车的到来,因此判断准则为装载机装满一自卸汽车洞渣后下一辆自卸汽车已经到达掌子面等待装渣,即

$$D_{cc} = D_c \tag{11}$$

因此,保证装载机不停机等待的自卸汽车配置数量 n_c 应满足

$$n_c \geq \frac{2(L_{qz} + L_{jc})}{D_c} \tag{12}$$

依据式(12),编制机械配套系统中出渣机械数量计算功能。软件界面如图 11 所示。

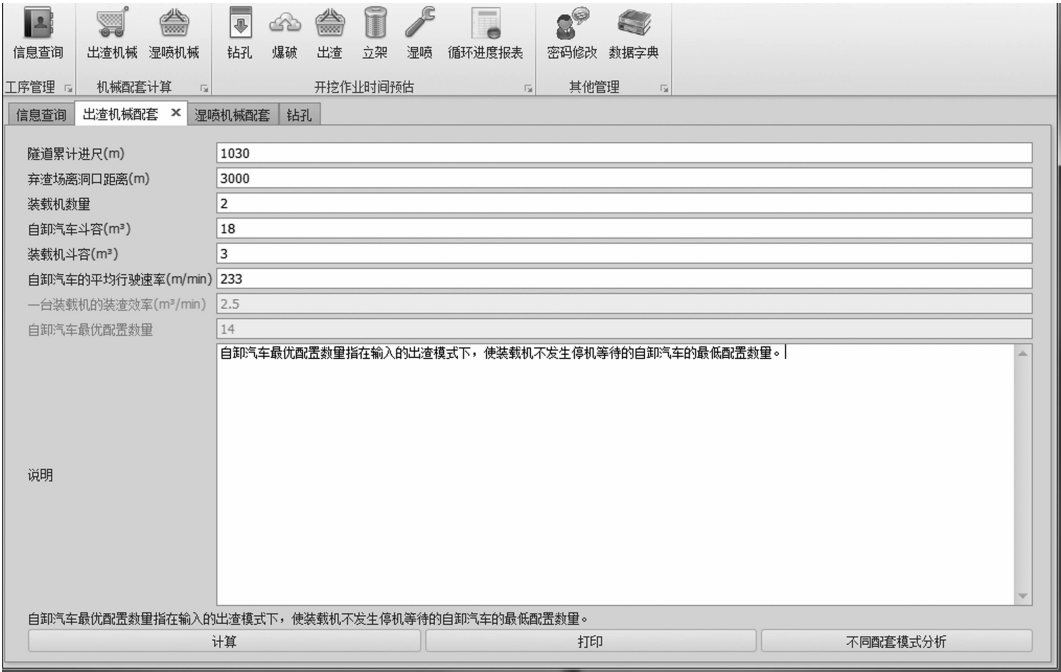


图 11 出渣机械配置数量计算功能界面

3.2 湿喷工序中混凝土罐车配置数量计算

同出渣机械配置数量计算类似,湿喷工序中混凝土罐车的配置数量应满足掌子面处始终有一辆混凝土罐车在给湿喷机卸料,一辆罐车卸完料时,另一辆混凝土罐车已装料完成后重新抵达掌子面。因此判断准则为湿喷机湿喷一罐车混凝土的时间、罐车往返掌子面和拌和站的行驶时间、罐车在拌和站装料时间三者之间的关系。

1)湿喷机湿喷一罐车时间与湿喷机湿喷效率、罐车容量有关,即湿喷机喷完一罐车混凝土料的时间为

$$T_{sp} = \alpha x \tag{13}$$

式中: T_{sp} 为湿喷机喷完一罐车混凝土料的时间,min; α 为湿喷机的湿喷效率,min/ m^3 ; x 为混凝土罐车容量, m^3 。

2)搅拌站装料时间与搅拌站的平均装料效率和罐车容量有关,即罐车在拌和站装满一车混凝土料的时间为

$$T_{zl} = \beta x \tag{14}$$

式中: T_{zl} 为罐车在拌和站装满一车料的时间,min; β 为拌和站的平均装料效率,min/ m^3 。

3)混凝土运输时间与掌子面与拌和站的距离和罐车的平均行驶速度有关,即罐车卸完料到装满料再次返回到湿喷机前的循环时间为

$$T_{gc} = T_{zl} + \frac{2(L_{jc} + L_{bh})}{V_{gc}} \tag{15}$$

式中: T_{gc} 为罐车循环运输时间,min; L_{bh} 为拌和站距隧道洞口的距离,m; V_{gc} 为混凝土罐车的平均行驶速度,m/min。

因此当 $T_{sp} = T_{gc}$ 时,混凝土罐车配置数量正好满足湿喷机不停机等待的标准,因此将混凝土罐车数量由 2 辆增加至 3 辆的隧道累计进尺应满足

$$L_{jc} \leq \frac{(T_{sp} - T_{zl})V_{gc}}{2} - L_{bh} \tag{16}$$

依据式(16),编制机械配套系统中湿喷机械数量计算功能。软件界面如图 12 所示。

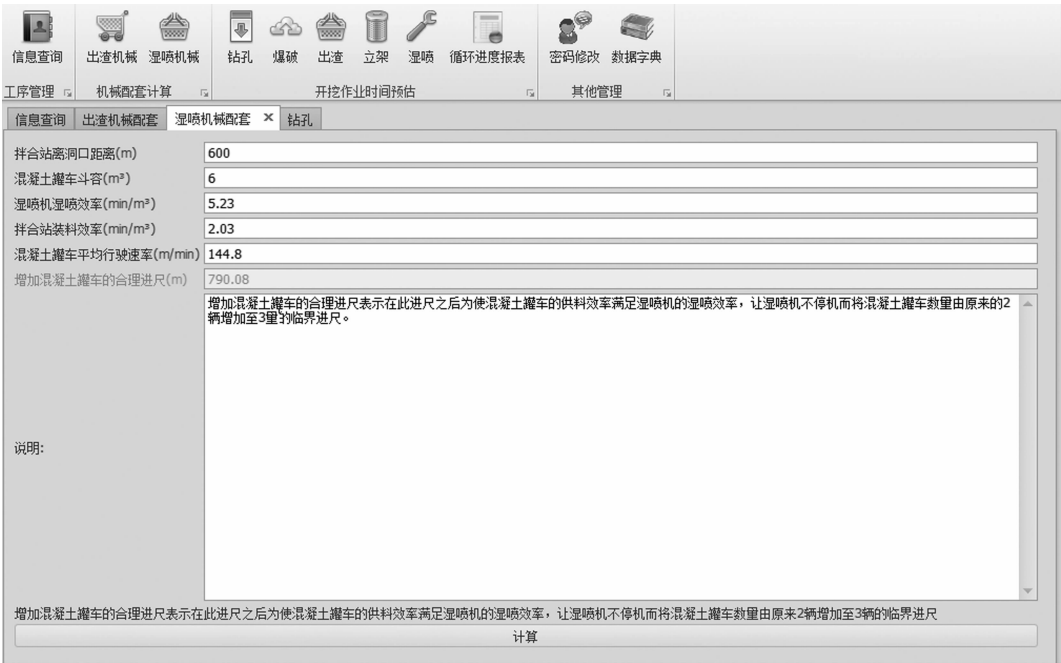


图 12 湿喷机械配置数量计算功能界面

4 结论

随着复杂环境地区交通设施的进一步完善,势必要建设更多的长大隧道,同时施工机械化水平也会进一步提高。本文通过收集隧道施工过程中的作业参数及作业时间,推导了工序时间预估公式和机械配置数量计算公式,得到以下结论:

1)针对 350 km/h 双线高速铁路隧道,不同围岩等级下的隧道施工难度不均,耗时也各有不同,

表现为隧道围岩越差,钻孔工序、立架工序作业时间越长;装药爆破工序主要跟隧道循环进尺有关;出渣工序和湿喷工序作业时间受隧道循环进尺和机械作业效率影响。

2)目前隧道修建过程中,出渣和湿喷工序内使用 2 种机械设备,随着隧道累计进尺的增加,将出现机械设备配置不足的问题。因此应根据隧道累计进尺、施工场地及机械实际施工效率等计算合理的

机械配置数量,并有预见性的安排机械进场。

3)为方便项目管理人员及时了解现场施工信息,开发了山岭隧道钻爆法施工信息采集与机械化施工配套分析软件,可实现管理人员远程监控施工进度并预见性的进行人员及机械安排的目标,有助于科学高效地进行隧道建设,提高施工效率,缩短施工工期。

参考文献

[1] 付惊群,薛学伟.国内著名长大隧道工程概览[J].建设机械技术与管理,2013,26(8):32-34.

[2] 牟忠霞,潘海泽,黄涛.石太客运专线特长隧道岩溶水对隧道影响研究[J].地下空间与工程学报,2009,5(3):568-572.

[3] 武学仕.高速铁路兰州至张掖三四线越岭隧道选线研究[J].铁道标准设计,2017,61(9):16-20.

[4] 高红杰.关角特长隧道施工地质问题及成因分析[J].铁道标准设计,2016,60(3):87-91.

[5] 龚彦峰.向莆铁路青山隧道紧急救援站设计研究[J].铁道工程学报,2014,31(2):83-87.

[6] 田四明,王伟,巩江峰.中国铁路隧道发展与展望(含截至

2020 年底中国铁路隧道统计数据)[J].隧道建设,2021,41(2):308.

[7] 周路军,蒋立,陈军,等.川藏铁路隧道 TBM 适应性及钻爆法机械化配套研究[J].现代隧道技术,2020,57(S1):52-56.

[8] 王栋,张广泽,李新坡,等.川藏铁路折多山隧道进口岩崩运动特征及防治措施[J].科学技术与工程,2017,17(34):118-123.

[9] 王明年,赵思光,张霄.郑万高铁大型机械化施工隧道位移控制基准研究[J].隧道建设,2018,38(8):1271-1278.

[10] 林毅,王立军,姜军.郑万高铁隧道施工大型机械化配套及信息化应用探索[J].隧道建设,2018,38(8):1361-1370.

[11] 赵东波.安琶铁路特长隧道机械化配套施工方案[J].中国铁路,2017(6):22-26.

[12] 邬彪红.大别山隧道工程建设工期控制关键技术研究[J].铁道标准设计,2010,54(5):91-94.

[13] 刘禹阳,王朋乐,汪碧云,等.基于停机等待时间特征的隧道运输机械数量配置[J].科学技术与工程,2020,20(10):4095-4100.

[14] 刘禹阳,王朋乐,汪碧云,等.隧道开挖与初支机械单机作业特性及作业衔接特性分析[J].科学技术与工程,2020,20(18):7451-7456.

Development and Application of Information Collection and Mechanized Construction Supporting Software for Mountain Tunnel Drilling and Blasting Method

WANG Pengle

(China Railway Design Corporation,Tianjin 300308,China)

Abstract: In order to identify the influencing factors of cyclic operation time of mountain tunnel excavation constructed by drilling and blasting method and reasonably predict the construction period, on the basis of field investigation, mathematical statistics and theoretical analysis methods are used to deduce the operation time estimation formulas of drilling, charging and blasting, slag discharge, erection and wet spraying, in addition, the rational allocation of machinery in slag discharge and wet spraying processes with high mechanization level is studied. Research results show that the cyclic excavation footage of tunnel directly affects the operation time of five processes, the cyclic operation time of drilling and erection process is also closely related to the grade of surrounding rock, and the cyclic operation time of slag discharge and wet spraying process is related to the number of machinery configuration;The optimal allocation of machinery in the slag discharge and wet spraying processes will increase with the increase of the cumulative excavation footage of the tunnel;In order to facilitate the application of project managers, relevant software is developed based on C# language. The software has three functions: collection of basic information of construction cycle, calculation of mechanical supporting quantity and estimation of excavation operation time. It can realize the goal of remote monitoring of construction progress and predictable arrangement of personnel and machinery by managers, and is conducive to scientific and efficient tunnel construction, improve construction efficiency and shorten construction period.

Keywords: mountain tunnel;construction period;drilling and blasting method;statistical analysis;software development