

金刚石钻进技术指标综合研究及其计算机控制

汤凤林^{1,2}, 赵荣欣¹, Нескоромных В.В.³, 李博¹, 周欣⁴, 段隆臣²

(1.上海市建筑科学研究院有限公司,上海 200032; 2.中国地质大学(武汉)工程学院,湖北 武汉 430074;
3.Сибирский федеративный университет, г.Красноярск 660095, Россия; 4.湖北省地震局,湖北 武汉 430064)

摘要:钻探工程施工目前通常是凭经验进行。应该改变这种情况,把凭经验施工转变到依靠科学施工上来。俄罗斯钻探专家提出把金刚石钻进中的机械钻速、钻头每转进尺和单位进尺能耗量3个参数综合起来研究,开发了控制钻进过程最优化的软件,经试用,取得了良好的效果,值得我们借鉴。

关键词:金刚石钻进;机械钻速;钻头每转进尺;单位进尺能耗量;最优化软件

中图分类号:P634.5;TE242 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)03-0001-07

Comprehensive research on technical indexes in diamond drilling and their computer control

TANG Fenglin^{1,2}, ZHAO Rongxin¹, NESKOROMNYH V.V.³, LI Bo¹, ZHOU Xin⁴, DUAN Longchen²

(1.Shanghai Institute of Building Sciences Limited Company, Shanghai 200032, China;

2.Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China;

3.Siberian Federal University, City Krasnoyarsk 660095, Russia;

4.Hubei Earthquake Agency, Wuhan Hubei 430064, China)

Abstract: Drilling engineering is a heavy physical work. At present majority does it basically by experience. That situation should be changed, the drilling by experience should be changed up to the science. Russian drilling specialists have proposed comprehensive research on the three indexes, i.e. rate of penetration, bit penetration rpm and energy consumption per meter in diamond drilling and developed a software controlling optimization of drilling process. Good results have been obtained by using the software and it is worth for us to learn from.

Key words: diamond drilling; rate of penetration; bit penetration rpm; energy consumption per meter; optimization software

1 概述

金刚石钻进是我国一种重要钻进方法,在地质勘探、石油天然气钻采等领域中得到了广泛应用,特别是在深部固体矿产坚硬岩石中钻进时更是一个优先选项^[1-7]。在金刚石钻进过程中,当钻头一岩石副相互作用时,在钻进规程参数(钻压 P 、钻头回转速度 n 、给定性能的冲洗液量 Q)的作用下,钻头上的金刚石破碎岩石,形成岩屑沉积在孔底,磨损

钻头胎体,露出金刚石,继续破碎岩石,钻进过程如此循环,钻孔如此加深。岩石磨损钻头,使钻头抛光、严重磨损,或保持正常钻进过程^[1]。

金刚石钻进时,钻头-岩石副相互作用与所钻岩石物理力学性质 f 、所用钻头类型 B 、钻进规程参数(P 、 n 、 Q)和正常钻进条件的关系,见图1。

由图1可见,如果钻进的地层已知,所用的钻头已经选定,拟用的冲洗液类型和性能已经确定,则

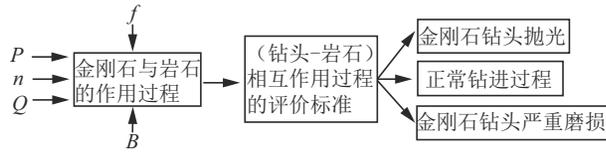
收稿日期:2022-10-10; 修回日期:2022-12-26 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.03.001

基金项目:国家自然科学基金面上项目“液压冲击回转作用下热压WC-Cu基孕镶金刚石钻头的磨损行为研究”(编号:41972327)

第一作者:汤凤林,男,汉族,1933年生,教授,博士生导师,俄罗斯工程院外籍院士,俄罗斯自然科学院外籍院士,国际矿产资源科学院院士,探矿工程专业,主要从事探矿工程方面的教学和科研工作,湖北省武汉市鲁磨路388号,fttang_wuhan@aliyun.com。

引用格式:汤凤林,赵荣欣,Нескоромных В.В.,等.金刚石钻进技术指标综合研究及其计算机控制[J].钻探工程,2023,50(3):1-7.

TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, NESKOROMNYH V.V., et al. Comprehensive research on technical indexes in diamond drilling and their computer control[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(3):1-7.



P —钻压; n —钻头转速; Q —冲洗液量; f —外界因素(岩石物理力学性质等); B —与钻进规程参数无关(如钻头类型等)的参数

图1 “金刚石钻头-岩石副”相互作用示意

Fig.1 Sketch of “diamond drill bit-rock couple” interaction

钻进过程的状态主要取决于钻进规程参数,即钻压、钻头转速和冲洗液量及其合理配合。但是,这3个规程参数如何配合才算合理,才能提高机械钻速和钻头进尺,保证得到高的技术经济指标和钻探安全生产,把我们施工的水平从经验施工提高到科学施工上来,是值得讨论的一个重要问题^[1-7]。

俄罗斯在金刚石钻进技术和工艺方面,在理论和实践方面,进行了很多研究,取得了很好的技术经济效益^[8-19],其中有些方面值得我们借鉴。

传统上,机械钻速、钻头进尺和每米钻探成本,是我们通常称之为钻探工程的主要技术经济指标。近年来,又提出了钻头每转进尺 h_0 和钻进单位进尺能耗量 ω 问题。

为此,俄罗斯钻探专家 Нескоромных В.В. 教授和吉林大学刘宝昌教授等提出要把这3个技术指标,即机械钻速 V_0 、钻头每转进尺 h_0 和钻进单位进尺能耗量 $\omega=N_0/V_0$ 作为一组整体指标,综合起来考虑,加以研究,并开发出了金刚石钻进过程计算机控制软件,以期进一步提高钻探工程的技术效果,提高钻探施工的科学水平^[8-11]。

2 钻进技术指标综合分析研究

为了对3个钻进技术指标进行综合研究,他们利用二水平、全因子试验设计方法。分别使用水和水+表面活性剂作为冲洗液,使用O1A3-59表镶金刚石钻头钻进辉长岩。试验结果见表1。

利用二水平、全因子试验设计,根据试验资料建立了3个技术指标与钻进规程参数(钻压 P_{oc} 、转速 n 和冲洗液量 Q)关系的数学模型^[8-9]:

以水作冲洗液的数学模型为:

$$V_0=4.78+2.63P_{oc}+0.675n+0.125P_{oc}n \quad (1)$$

$$h_0=0.085+0.049P_{oc}-0.024n-0.0185P_{oc}n \quad (2)$$

表1 钻进技术指标与钻进规程参数关系试验资料^[9]

Table 1 Experimental data about dependence of technical indexes from drilling parameters

转速 $n/(r \cdot \text{min}^{-1})$	轴 载 P_{oc}/kN	机械钻速 $V_0/(\text{m} \cdot \text{h}^{-1})$		功率消耗 N_0/kW		进尺能耗量 $(N_0/V_0 \rightarrow \text{min})/(\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-1})$	
		水+表 水	面活性 剂	水+表 水	面活性 剂	水	面活性 剂
625	3	1.6	2.5	1.4	1.6	0.88	0.64
	6	3.2	4.4	2.8	2.7	0.88	0.61
	9	5.1	5.4	3.8	3.9	0.75	0.72
	12	6.2	6.3	4.7	5.4	0.76	0.86
	15	6.6	7.5	6.8	6.6	1.03	0.88
1020	3	2.1	3.2	2.1	2.06	—	0.63
	6	4.5	6.1	3.7	4.09	0.82	0.67
	9	6.1	7.8	5.7	6.9	0.93	0.88
	12	6.8	8.7	9.5	8.7	1.4	1.06
	15	6.1	9.9	11.5	9.4	1.88	0.95
1480	3	2.7	4.2	2.6	2.9	0.96	0.69
	6	5.8	8.4	5.0	5.96	0.86	0.71
	9	6.9	9.8	8.0	8.7	1.16	0.89
	12	8.6	10.6	12.2	12.5	1.42	1.18
	15	8.2	9.8	16.1	16.46	1.96	1.68

$$N_0/V_0=1.21+0.29P_{oc}+0.25n+0.21P_{oc}n \quad (3)$$

以水+表面活性剂为冲洗液的数学模型为:

$$V_0=6.0+2.65P_{oc}+1n+0.15P_{oc}n \quad (4)$$

$$h_0=0.083+0.026P_{oc}-0.045n-0.19P_{oc}n \quad (5)$$

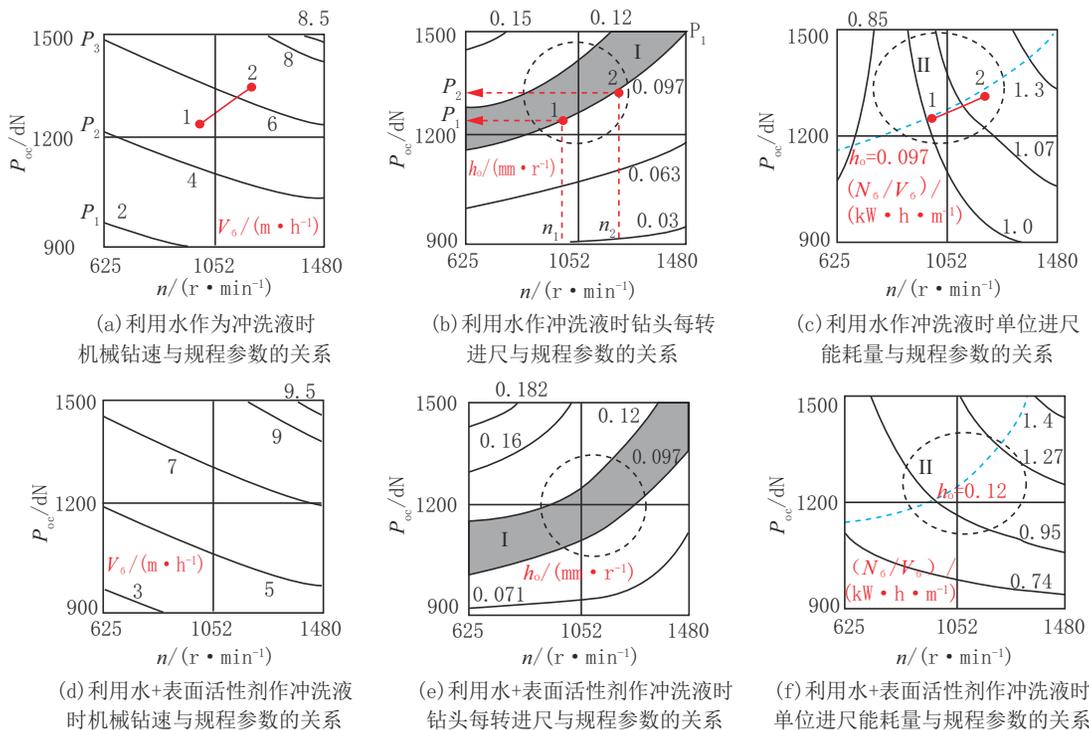
$$N_0/V_0=0.97+0.31P_{oc}+0.21n+0.0094P_{oc}n \quad (6)$$

从上述数学模型可见,使用水+表面活性剂比使用水作冲洗液的平均机械钻速提高了21%,单位进尺能耗量降低了20%,这可能与后者冲洗液的排屑、润滑和冷却性能更好有关。钻头每转进尺的数值没有增加,但是钻压和钻头转速的作用有明显改变:钻压的作用降低了近50%,钻头转速的作用增加了47%。

这3个技术参数与钻进规程关系试验研究数学模型的曲线图见图2。

我们可以从这些图中找出机械钻速高、钻进单位进尺能耗量低的钻头每转进尺的合理数值,例如图2(a)中的1和2点。

图2(b)是利用轴载和钻头转速关系的具体实



I 和 II 为轴载和钻头转速合理使用区; 图形中的圆为许用数值的最佳边界数值

图 2 使用 O1A3-59 金刚石钻头钻进辉长岩时机械钻速 V_0 、钻头每转进尺 h_0 和钻进单位进尺能耗量 N_0/V_0 与钻进规程参数关系试验曲线^[8]

Fig.2 Experimental curves about relations of penetration rate V_0 , bit penetration rpm h_0 and energy consumption per meter N_0/V_0 to drilling parameters while drilling gabbro by diamond bit O1A3-59

例。例如,如果把钻头每转进尺作为钻进过程主要控制参数(在本情况下设定为 0.097 mm/r,则在 n_1 时必须保持轴载为 P_1 ,为了提高机械钻速要把钻头转速提高到 n_2 时,应该把轴载提高到 P_2 。

图 2(c) 中的 1、2 点表示,如果决定钻头寿命的能耗量从 1.02 kW·h·m⁻¹ 增加到 1.1 kW·h·m⁻¹,则钻头寿命降低 7% 左右,机械钻速(图 2a)可能从 5 m/h 提高到 6.3 m/h,即提高 20%。可见,根据这 3 个技术指标,可以找到最有利的钻进规程参数。

图 2(c) 中,示出了按照钻头每转进尺数值确定的钻进规程参数的控制范围,图中中心部分的许用数值圆表示的是这个控制范围的最佳边界。

使用水+表面活性剂作为冲洗液钻进辉长岩时得到的机械钻速和每转进尺较高,钻进能耗量数值比较平稳(见图 2d、e、f)。对于这种钻进条件来说,如果要想钻头每转进尺保持先前的数值,则可使用另外的钻进规程参数数值(见图 2e)。

为了评价给定的钻头每转进尺条件下岩石破碎过程和查明与钻进规程参数的关系,需要利用得到

的数学模型和相应的曲线图(图 2a 和 2d)进行计算。为了计算不同钻压和钻头转速时的钻头每转进尺数值,可以利用机械钻速曲线和表示钻头转速数值的垂直线的交点进行计算。例如,钻头最低转速 625 r/min 时,与机械钻速曲线 2、4、6 m/h 有 3 个交点,可以得到与其相应的 3 个钻头每转进尺数值:

$$h_{01} = V_0/n = (2 \times 1000)/(625 \times 60) = 0.05 \text{ mm/r}$$

$$h_{02} = V_0/n = (4 \times 1000)/(625 \times 60) = 0.11 \text{ mm/r}$$

$$h_{03} = V_0/n = (6 \times 1000)/(625 \times 60) = 0.16 \text{ mm/r}$$

从图 2(a) 可见,与 h_{01} 、 h_{02} 、 h_{03} 相应的轴载分别是: $P_1=950 \text{ dN}$, $P_2=1210 \text{ dN}$, $P_3=1480 \text{ dN}$ 。

这样,我们就可以确定出,当钻头转速最小时,孔底钻头每转进尺与轴载的关系。为了计算钻头转速 1052 r/min 时的上述类似关系,可以利用图的垂直轴线与机械钻速 4 m/h 和 6 m/h 曲线的交点求得。计算钻头转速 1480 r/min 时,孔底钻头每转进尺与轴载的关系,可以利用图的垂直轴线与机械钻速 4、6、8 m/h 曲线的交点求得。

钻探施工人员在钻探施工中,可以根据钻进工

况是否正常、钻头磨损是否正常、钻探水泵是否正常、钻探设备(特别是动力机)是否有异音等做出判断,在现场按照图2的6个曲线图,利用计算机程序,实时控制钻进过程,及时调整钻进规程参数和操作技术,以取得好的钻进效果。

3 计算机程序控制金刚石钻进过程的主要思路

金刚石钻进控制系统主要是如下设计的^[8-10]:

(1)设计的基础是用二水平、全因子试验得出的机械钻速 V_0 、钻头每转进尺 h_0 、单位消耗量 W 与钻进规程参数 P 、 n 、 Q 关系的数学模型及其计算结果;

(2)设计中考虑了钻头磨损、回次进尺问题,用回次钻速 V_p 表示,将其定为设定范围,列入输入资料清单;

(3)机械钻速计算见式(7):

$$V_0 = h_0 n \quad (7)$$

故用钻头每转进尺 h_0 作为控制机械钻速和钻头寿命的调节参数,根据 h_0 的变化及其变化步长来调整规程参数;

(4)单位进尺磨损量 W 计算见式(8),功率 N_0 计算见式(9):

$$W = N_0 / V_0 \quad (8)$$

$$N_0 = P n R \mu / 97.5 \quad (9)$$

式中, R ——钻头唇部半径, μ ——钻头回转破碎岩石阻力系数。设定 W 值最小是金刚石钻进的最优化指标,用其调节 h_0 , 以及控制功率和机械钻速比值最小时的钻进规程参数。

表镶金刚石钻头钻进过程示意图,见图3^[8]。

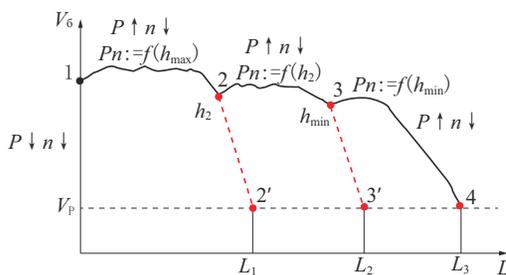


图3 表镶金刚石钻头钻进过程示意

Fig.3 Schematic diagram of drilling process finished by diamond bit

从图3可见,在钻头磨锐后,以小的轴载和钻头转速($P \downarrow n \downarrow$)可以得到高的机械钻速 V_0 , 见图3中的线段1—2。由于机械钻速是钻头每转进尺和钻头

转速的乘积 $V = h_0 n$, 而 h_0 在 $h_{\max} \sim h_{\min}$ 设计范围内, 故应根据 h_{\max} 来选择轴载和钻头转速(P 、 n)。

轴载应该足以使钻头切入岩石, 但是不能超过钻头的强度极限。如果轴载 P 不变, 钻头转速 n 增加过大, 则钻头切入岩石阻力开始增加, 切削具切入岩石深度变浅, 对钻头每转进尺和机械钻速产生负面影响。如果轴载增加, 钻头转速不变, 则破碎岩石功率增加($N \uparrow$), 而且, 机械钻速并不上升。功率受钻探设备的限制, 会影响钻探工程的成本, 还有施工安全问题, 因此要严格控制功率, 使单位进尺能耗量最小, 保证钻探施工安全, 在钻进过程中应始终如此。此时应该增加轴载 P , 降低钻头转速 n , 以保证功率增加不多、机械钻速高水平 ($V_0 \uparrow$), 即图3中的1—2 h_{\max} 线段。

上述情况是在钻头没有磨损的情况下发生的。如果钻头磨损, 则如此调整钻进规程参数, 不会得到预期效果, 机械钻速开始下降 ($V_0 \downarrow$) (图3中的2—2' 线段)。当机械钻速变得等于回次钻速 V_p 时, 应该卸下钻头, 换上新钻头, 此时钻头进尺为 L_1 。

这种情况可以改变, 如果把钻头每转进尺改为 h_2 , 且 h_2 在设计范围内, 即 $h_{\max} > h_2 > h_{\min}$ 即可。知道了钻头每转进尺为 h_2 (图3中的2点), 就可以根据 h_2 选择相关的钻进规程参数 P 和 n , 以防止机械钻速降低。然后, 按照线段2—3, 进行钻进过程, 直到钻头磨损, 钻进达不到钻头每转进尺 h_2 为止 (图3中的3点)。机械钻速又有降低的趋势 (图3中的3—3'), 机械钻速沿着3—3' 线降低, 此时钻头进尺为 L_2 。在此情况下, 为了防止机械钻速降低, 可以把 h_2 降低到 h_{\min} , 增加轴载, 降低钻头转速, 使钻头进尺增加到 L_3 。控制过程如此循环。

计算机程序控制钻进过程框图见图4^[8]。孔底传感器记录的钻进规程参数是输入参数。钻头转速 n 和轴载 P 以脉冲形式传到地表, 由地表计算机接收, 将其转变成相应的数值。为了描述钻头磨损的情况, 要输入钻头每转进尺 h_0 值变化范围和回次钻速 V_p 的数值。当程序连续得到有关孔底钻进规程参数性质的信息后, 对机械钻速 V_0 和破碎孔底岩石消耗的功率 N_0 可能变化的情况进行分析。得出钻头转速和轴载的具体数值后, 通过每个实时的数学计算, 得出机械钻速 (式7) 和功率的数值 (式9)。

把得出的结果与前一个类似计算得出的结果进

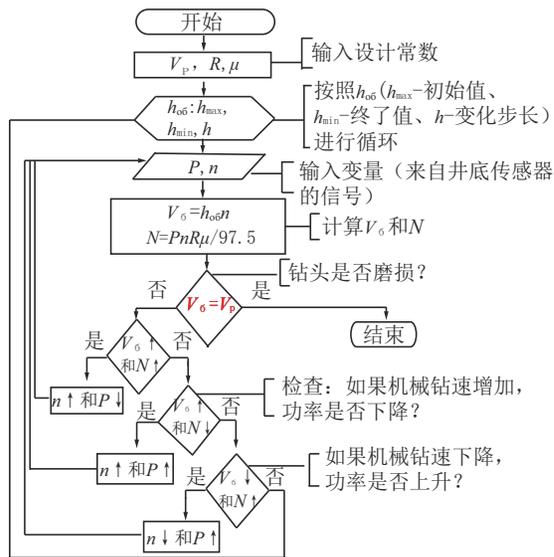


图 4 计算机程序控制金刚石钻进过程

Fig.4 Block diagram of controlling diamond drilling process by computer program

行对比。如果此时得到的结果 V_i 比前一个结果 V_{i-1} 大, 则 V_0 增加, 即 ($V_i > V_{i-1} \rightarrow V_0 \uparrow$)。如果此时得到的功率结果 N_i 比前一个结果 N_{i-1} 小, 则 N_0 降低, 即 ($N_i < N_{i-1} \rightarrow N_0 \downarrow$), 以此类推重复。

根据金刚石破碎岩石机理^[11], 如果机械钻速下降 ($V_0 \downarrow$), 功率上升 ($N \uparrow$), 则发出指令, 令钻头转速下降 ($n \downarrow$)、轴压上升 ($P \uparrow$)。在机械钻速上升 ($V_0 \uparrow$) 和功率也上升 ($N \uparrow$) 期间, 则发出指令, 令轴压降低 ($P \downarrow$)、钻头转速上升 ($n \uparrow$)。如果机械钻速上升 ($V_0 \uparrow$), 功率下降 ($N \downarrow$), 则发出指令, 降低轴压 ($P \downarrow$), 提高钻头转速 ($n \uparrow$)。如果大量计算和转换都不能得到应有的结果, 则程序会发出指令, 令钻头每转进尺下降 ($h_{06} \downarrow$), 循环如此继续, 直到单位进尺磨损量最低、钻进过程最优为止。

4 控制钻进过程计算机软件的实现

俄罗斯钻探专家使用的是 Derivative 公司的 Touch Designer 可视化软件。此软件的 Touch Designer 语言使用比较简单, 不要求有深厚的基础知识, 含有实时相互作用多媒体的内容, 支持各种设备, 可以和其它软件兼容, 特别是可以和各种可能类型传感器兼容, 这一点对于解决钻井空间问题是非常重要的。

Touch Designer 设计软件包括有下列模块: 生成对话框的 COMP 模块, 2D 多媒体 TOP 模块,

数学模型 CHOP 模块, 几何图形 SOP 模块, 素材 MAT 模块, 数据库和文本 DAT 模块。各个模块都有其各种可能并相互补充, 以实现设计要求。

为了用 Touch Designer 语言实现设计, 开发出了一个程序。利用这个程序可以把实时测得的钻进规程参数, 转换到用二水平、全因子试验设计方法得到的机械钻速、钻头每转进尺和单位进尺能耗量数学模型的曲线图中来。

用上述程序把实时规程中使用的钻进规程参数记入《输入数据》模块中, 见图 5(a)。因为 Touch Designer 语言可能对生成的情况进行模拟, 所以在科研第一阶段把程序和钻进实际合并起来是为时过早和不恰当的。规程参数在先前设定范围内变化, 可以通过程序界面相应窗口平稳调整规程参数来实现^[8-10]。

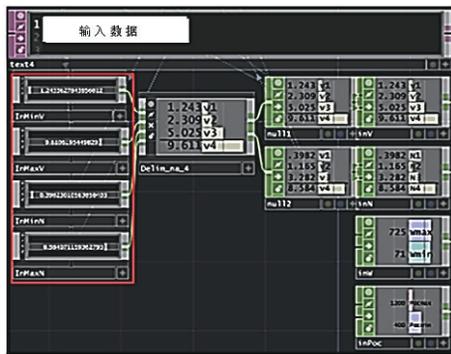
根据得到的信息, 在 coefficient segments 模块 (图 5b) 上进行全部必要计算, 计算结果在数学模型 CHOP (图 5c) 上输出。在此, 按照技术指标综合分析方法得出机械钻速、功率和单位能耗量与规程参数关系的模型^[9]。

为了方便和易于看清楚, 程序中设有 GRAPH 模块, 见图 6。按下 GRAPH 按钮时, 激活机械钻速数值变化情况 (图 6a)。为了检查程序和钻进过程模拟的相关性, 使用手动专门滑块来改变机械钻速的数值。机械钻速数值的减少或增加, 在屏幕上可以看到, 此时反映钻头每转进尺与规程参数 (P, n) 关系的曲线是如何变化的 (图 6a)。

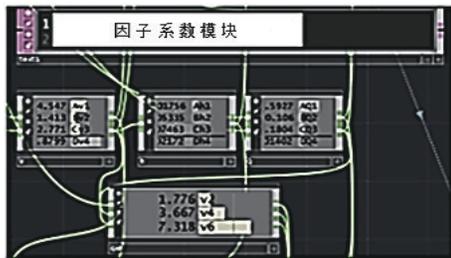
同样的, 可以利用 Touch Designer 语言软件, 通过手动专门滑块方式改变钻进规程参数, 实现对单位进尺能耗量指标的控制 (图 6b), 从而可以确定出, 在保证给定条件下, 与最优钻进过程单位进尺能耗量相应的最合理钻进规程参数来。

使用开发出来的试验程序表明, 利用 Touch Designer 语言编出的程序是可以实现钻进过程控制自动化的。就是说, 通过综合分析 3 个钻进技术指标来进行控制钻进过程是可能的, 也是有前景的。在评价工艺过程情况时, Touch Designer 语言有其灵活性, 可以实时收集和处理所得数据。可以接受来自不同传感器的信号, 是 Touch Designer 语言编出程序的突出特点。程序的后续自学能力, 可以线上处理钻进规程数据, 并给出正确的答案^[9-10]。

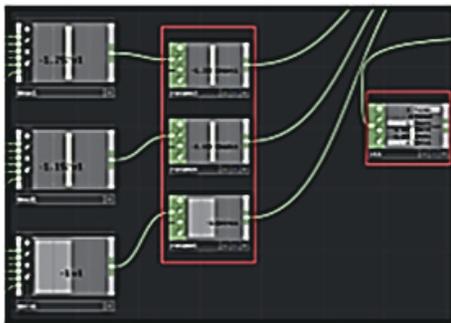
使用计算机软件控制金刚石钻进过程, 可在线



(a) 实时数据输入



(b) 计算参数关系模型的系数



(c) 计算钻进过程技术指标

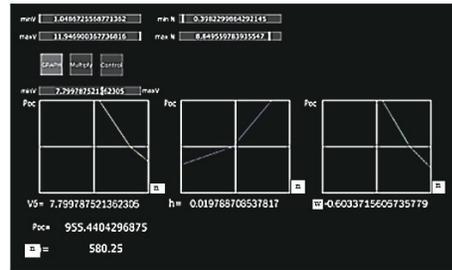
图5 Touch Designer 语言程序控制实时界面
Fig.5 Real time control interface of computer software Touch Designer

上进行,有利于其获得更好的技术经济效果、进一步提高我国钻探工程科学水平。

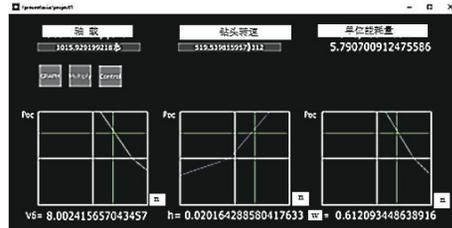
5 讨论和建议

根据上述分析,进行下述讨论及提出一些建议。

(1) 钻探工程施工是一项重体力劳动。目前,现场施工人员和指挥人员多半还是根据经验进行施工和指导施工。在科学技术迅速发展的今天和人民生活大为提高的现在,需要改变这种现状。如何把钻探工程施工从凭经验施工转移到科学施工上来,是一个非常现实和迫切的问题,应该引起我们的高度重视并加以妥善解决。建议有关专家开发出有关软件,加以推广。在我国计算机基本普及的今天,这件



(a) 机械钻速和钻头每转进尺试验模型曲线图



(b) 钻进过程单位进尺能耗量控制曲线图

图6 Touch Designer 程序实时控制界面
Fig.6 Real time control interface of computer software Touch Designer

事并不难,关键是要做起来,推广下去。

(2) 传统上,常说机械钻速、钻头寿命和每米钻探成本是钻探工程的主要技术经济指标。俄罗斯专家提出把机械钻速、钻头每转进尺和单位进尺能耗量这三个技术指标作为一组整体指标,综合起来考虑,以机械钻速为切入点,以钻头每转进尺为调节对象,以单位进尺能耗量为最优化目标进行研究。从科学技术角度考虑,把单位进尺能耗量作为评价标准可能更为客观和准确。每米钻探成本主要是经济指标,单位进尺能耗量主要是技术指标,因此后者提法显得更为科学、合理,且有利于保证钻探施工安全,减少事故发生。这种提法是个新提法,是一种新的观点,有一定的科学价值和实际意义。

(3) 俄罗斯在最优化试验设计中,多用二水平、全因子试验方法。利用这种试验设计方法得出的数学模型,不仅考虑了单个因子的单独作用,还考虑了它们的交互作用。对各因子影响和作用(含交互作用)进行考虑和分析,可能更加周到更加全面一些。建议和我们国内常用的线性回归方法进行对比分析研究,看看这种方法是否更好一些,更为合理宜用。

(4) 俄罗斯钻探工作者开发出来的 Touch Designer 软件,经过试运行,证明可以使用并取得一定效果。利用这个软件可以在线上了解、调节、控制钻进过程,选用最优钻进规程参数,以达到最好的技术经

济效果。这个成果值得借鉴。建议我国钻探工作者开发出更多的钻进优化或控制软件来,用于各种钻机机台和钻进条件,提高我国钻探施工的科学水平。

参考文献(References):

- [1] 汤凤林, Нескоромных В.В., 宁伏龙, 等. 金刚石钻进岩石破碎过程及其与规程参数关系的研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2021, 48(10):43-55.
TANG Fenglin, NESKOROMNYH V.V., NING Fulong, et al. Research on the rock fragmentation process and its relationship with drilling parameters in diamond drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2021, 48(10):43-55.
- [2] 汤凤林, 段隆臣, Чихоткин В.Ф., 等. 关于利用系统论方法设计金刚石钻头的分析研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(1):13-19.
TANG Fenglin, DUAN Longchen, CHIKHOTKIN V.F., et al. Analytical research on design of diamond drill bit with system theory approach[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(1):13-19.
- [3] 朱恒银, 王强, 杨展, 等. 深部地质钻探金刚石钻头研究与应用[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2014.
ZHU Hengyin, WANG Qiang, YANG Zhan, et al. Research and Application of Diamond Bit for Deep Geological Drilling [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2014.
- [4] 朱恒银, 王强, 杨凯华, 等. 深部岩心钻探技术与管理[M]. 北京: 地质出版社, 2014.
ZHU Hengyin, WANG Qiang, YANG Kaihua, et al. Deep Core Drilling Technology and Management [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- [5] 段隆臣, 潘秉锁, 方小红. 金刚石工具的设计与制造[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2012.
DUAN Longchen, PAN Bingsuo, FANG Xiaohong. Design and Manufacture of Diamond Tools [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2012.
- [6] 汤凤林, 沈中华, 段隆臣, 等. 深部各向异性硬岩钻进用新型金刚石钻头试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(4):74-79.
TANG Fenglin, SHEN Zhonghua, DUAN Longchen, et al. Experimental research on new type diamond bit for drilling in deep hard anisotropic rocks [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(4):74-79.
- [7] 汤凤林, 沈中华, 段隆臣, 等. 关于切削型多节式刮刀钻头的分析研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(6):88-92.
TANG Fenglin, SHEN Zhonghua, DUAN Longchen, et al. Analytical research on cutting type multitierwing bit [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(6):88-92.
- [8] Нескоромных В.В. и др. Алгоритм управления системой алмазного бурения [J]. Известия Томского политехнического университета, Инженеринг георесурсов. Россия, г.Красноярск, 2022(11):114-126.
- [9] Нескоромных В.В., Попова М.С. Разработка методики управления процессом бурения на основе комплексного анализа критериев [J]. Записки Горного Института. 2019(240):701-710.
- [10] Нескоромных В.В., Попова М.С., Баочанг Л. Влияние среды прибойной зоны скважины на эффективность разрушения горной породы резцом PDC [J]. Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. Россия, г. Красноярск, 2021(9):119-127.
- [11] Нескоромных В.В., Попова М.С., Баочанг Л. Резцы PDC с вогнутой поверхностью режущей грани [J]. Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. Россия, г.Красноярск, 2022(4):181-192.
- [12] Нескоромных В.В., Попова М.С., Чихоткин А.В. Методика проектирования долот с резцами PDC, учитывающая динамические процессы резания—скалывания горной породы и сопротивление среды [J]. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и море, 2020(4):14-17.
- [13] Нескоромных В.В., Попова М.С., Баочанг Л. Разрушение горных пород при бурении скважин алмазным буровым инструментом [M]. Красноярск: Россия, Сибирский федеральный университет, 2020.
- [14] А.А. Буканов, Л.К. Горшков, А.И. Осецкий. Принципы конструирования и эксплуатации алмазного породоразрушающего инструмента [J]. Разведка и охрана недр, 2013(7):44-49.
- [15] Коротков А.В. Современный взгляд на основные задачи оптимизации алмазного бурения [J]. Известия сибирского отделения РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений, 2011, 2(39):205-209.
- [16] Борисов К.И. Современные методы оценки сопротивления горных пород резанию—скалыванию при бурении долотами PDC [M]. Томск: ТПУ, 2013.
- [17] Нескоромных В.В. Оптимизация в геологоразведочном производстве [M]. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2013.
- [18] А.Я. Третьяк, В.В. Попов, А.Н. Гроссу, К.А. Борисов / Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента [J]. Горный информационно—аналитический бюллетень, 2017(8):225-230.
- [19] Нескоромных В.В., Попова М.С., Харитонов А.Ю. Влияние сил сопротивления на глубину резания - скалывания горной породы алмазным резцом [J]. Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов, 2020, 331(10):40-48.

(编辑 王文)