

文章编号: 1674—8247(2024)04—008—06

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2024. 04. 002

# 基于隧道三台阶铣挖定额施工组织模型的数据误差处理研究

李 准<sup>1</sup> 吴 炜<sup>2</sup> 马文景<sup>1</sup> 王正辉<sup>3</sup>

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 中国铁路经济规划研究院有限公司, 北京 100038;  
3. 中国铁路昆明局集团公司, 昆明 650032)

**摘 要:** 针对我国铁路建设过程中出现的复杂地质和特殊工况问题, 铁路建设者提出了各种新工艺新工法, 随之而来的挑战是测定新型工艺工法的补充定额, 以便完善铁路工程造价体系。如何提高定额数据的准确性和定额测定的稳健性是铁路造价人员需要解决的问题。本文运用误差理论和数理分析的方法, 通过建立系统误差、粗大误差和随机误差数据处理模型, 对现场测定数据进行计算分析和降噪处理, 准确剔除了异常值, 提高了定额测定工作的技术高度和深度。

**关键词:** 隧道工程; 三台阶铣挖法; 定额测定; 施工组织模型; 数据误差处理模型

中图分类号: F532; U445.4

文献标志码: A

## Study on Data Error Handling for Construction Organization Model Based on the Quota of Three-bench Cutting Excavation Method for Tunnels

LI Zhun<sup>1</sup> WU Wei<sup>2</sup> MA Wenjing<sup>1</sup> WANG Zhenghui<sup>3</sup>

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;  
2. China Railway Economic Planning & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100038, China;  
3. China Railway Kunming Bureau Group Co., Ltd., Kunming 650032, China)

**Abstract:** In response to the complex geological conditions and special working situations encountered in railway construction in China, constructors have introduced various innovative techniques and methods. A subsequent challenge lies in determining supplementary quotas for these novel processes to refine the cost estimation system for railway engineering. The issue at hand for railway cost estimators is enhancing the accuracy of quota data and the robustness of quota measurement. This paper employed error theory and mathematical analysis methodologies to establish models for handling systematic errors, gross errors, and random errors. By applying these models to compute, analyze, and denoise field measurement data, abnormal values were precisely identified and excluded, thereby elevating the technical rigor and depth of quota measurement.

**Key words:** tunneling; three-bench cutting excavation; quota measurement; construction organization model; data error handling model

收稿日期: 2023-10-18

作者简介: 李准(1982-), 男, 教授级高级工程师。

引文格式: 李准, 吴炜, 马文景, 等. 基于隧道三台阶铣挖定额施工组织模型的数据误差处理研究[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(4): 8-13.

LI Zhun, WU Wei, MA Wenjing, et al. Study on Data Error Handling for Construction Organization Model Based on the Quota of Three-bench Cutting Excavation Method for Tunnels[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(4): 8-13.

随着我国铁路建设重心向中西部转移,西南地区复杂地质对隧道施工工艺、工法的影响日益显著<sup>[1]</sup>。针对铁路隧道复杂的施工条件,设计、施工技术人员通过不断探索和实践,成功运用了诸多新型工艺工法,如铣挖法、三台阶预留核心土带仰拱一次开挖等隧道新型施工工法<sup>[2]</sup>。以上新型工法在人工、机械效率和材料消耗等方面与现行定额施工组织模型采用的工法存在较大差异。为完善铁路工程定额体系,研究人员对铁路隧道施工中的新型工艺工法开展测定,编制相应补充定额<sup>[3-5]</sup>。常规的定额测定方法是由测定人员主观判断删除如工作人员违纪、施工组织不当等人为因素造成的偏差极大的数据<sup>[6]</sup>,再在此基础上运用算术平均法进行人工、机械效率和材料消耗的计算。为了保证数据准确性,需要大量样本量,定额测定循环耗时长,数据测定难度较大<sup>[7]</sup>,而常规的定额测定方法无法解决这一问题。因此,本文针对系统误差、粗大误差和随机误差,对研究人员采集的基础数据进行处理,构建数据误差处理模型,以此增加测定数据的可靠性。

## 1 数据处理模型思路构建

研究人员在施工现场进行数据测定时,通常会受到各种因素的影响,如测定人员的专业技能水平、施工人员的熟练程度、施工环境变化等因素在不同程度上会对测定结果产生影响,造成原始数据存在偏差或异常<sup>[8]</sup>。因此,现场测得的原始数据不能直接作为定额编制所需的基础数据,需经过科学的数据分析、处理和优化。

根据影响因素的性质,一般可把其对测定数据产生的影响归纳为系统误差、粗大误差(以下简称“粗差”)和随机误差<sup>[9]</sup>:

(1)系统误差是测定对象受外界环境影响而产生的误差,且随着数据量的增加不会相互抵消。

(2)粗差是记录错误或测定时发生特殊情况使个别数据产生较大的偏离。

(3)随机误差是作业人员的熟练程度、施工机具的新旧程度不一等因素使其对同一测定对象进行多次测量时绝对值和符号以随机的方式发生的随机偏差。

为保证测定数据的有效性和科学性,需对原始数据进行清洗,采取适当的措施减小系统误差和随机误差带来的影响,并消除粗差导致的测定结果失真。

## 2 数据误差处理模型建立

### 2.1 系统误差判别

定额测定数据来源于同一项目,作业环境相对稳定,数据组中可能含有不变的系统误差,选用标准差比较法进行检验<sup>[10]</sup>。

将原始数据  $x_i$  按升序排列为顺序统计量,即  $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$ ,有:

$$u = \sigma_2 / \sigma_1 - 1 \quad (1)$$

式中:  $\sigma_1$ ——贝塞尔标准差,  $\sigma_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n V_i^2}{n-1}}$ ;

$$\sigma_2 \text{——别捷尔斯标准差, } \sigma_2 = 1.253 \frac{\sum_{i=1}^n |V_i|}{\sqrt{n(n-1)}};$$

$V_i$ ——残余误差,  $V_i = x_i - \bar{x}$ 。

若  $|u| \geq 2/\sqrt{n-1}$ ,则怀疑出现系统误差,需找出系统误差出现的原因,重新采集数据。

### 2.2 粗差数据剔除

剔除粗差的常用方法有误差极限调整法、莱以特(3 $\sigma$ )准则、格拉布斯准则、狄克逊准则、罗曼诺夫斯基( $t$ 检验)准则等。当原始数据较少时,可以应用 $t$ 检验准则;当原始数据个数为3~30个时,运用格拉布斯准则或狄克逊准则的效果更好;当原始数据个数为30~50个时,运用格拉布斯准则剔除异常值的效果更好;当原始数据个数大于50时,莱以特准则比较适用。

本次研究的三台阶铣挖工法定额测定样本有3个工区,每个工区采集10个循环数据,选择格拉布斯准则进行粗差判断。

将原始数据  $x_i$  按升序排列为顺序统计量,即  $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$ ,构造统计量:

$$g_{(i)} = \frac{|x_i - \bar{x}|}{\sigma} \quad (2)$$

式中:  $\bar{x}$ ——测定数列的算术平均值。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \text{ 为测定数列的标准差。}$$

格拉布斯判别式为:

$$|x_i - \bar{x}| > G(\alpha, n) \sigma \quad (3)$$

式中,临界值  $G(\alpha, n)$  是由测定次数  $n$  和显著性水平  $\alpha$  共同确定的常数,可查表确定,具体如表1所示。

若上式成立,则该测定值为异常值,需剔除;反之,该测定值不属于异常值,应保留。

### 2.3 卡尔曼滤波降噪处理

卡尔曼滤波在数学上是一种线性最小方差统计

表1  $G(\alpha, n)$ 取值表(部分)

$\alpha$	不同测定次数 $n$									
	3	4	5	7	10	15	20	35	40	50
0.050	1.145	1.46	1.67	1.94	2.18	2.41	2.56	2.82	2.87	2.96
0.025	1.150	1.48	1.71	2.02	2.29	2.55	2.71	2.98	3.04	3.13
0.010	1.150	1.49	1.75	2.10	2.41	2.71	2.88	3.18	3.24	3.34

估算方法,它是通过处理一系列带有误差的实际测量数据而得到物理参数的最佳估算<sup>[11]</sup>。其实质是要寻找在最小均方误差下  $x_k$  的估计值  $\hat{x}_k$ 。

卡尔曼滤波的基本思想是以最小均方误差为最佳估计准则,采用信号与噪声的状态空间模型利用前一时刻的估计值和当前时刻的观测值来更新对状态变量的估计,求出当前时刻的估计值。算法根据建立的系统方程和观测方程对需要处理的信号做出满足最小均方误差的估计。

在卡尔曼滤波的估计中,  $k$  时刻的状态值和观测值分别设为  $x_k$  和  $y_k$ ,通常建立状态空间模型为:

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + q_{k-1}$$

(4)

$$y_k = Hx_k + r_k$$

(5)

式中:  $x_k$ —— $k$  时刻的系统状态;

$u_k$ —— $k$  时刻的系统控制变量;

$A$ 、 $B$ ——系统参数;

$y_k$ —— $k$  时刻的测量值;

$H$ ——测量系统的参数。

$q_k$  和  $r_k$  是系统噪声和测量噪声,为相互独立且均值为 0 的高斯白噪声,假定系统噪声和测量噪声的协方差矩阵分别为  $Q$ 、 $R$ 。

卡尔曼滤波器采用一种循环反馈的滤波估计,建立求解方程:

(1) 状态预测方程:

$$\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1}^- + Bu_{k-1}$$

(6)

(2) 均方误差预测方程:

$$\hat{P}_k^- = AP_{k-1}A^T + Q$$

(7)

(3) 滤波增益方程:

$$K_k = \hat{P}_k^- H^T (H \hat{P}_k^- H^T + R)^{-1}$$

(8)

(4) 滤波估计方程:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (y_k - H \hat{x}_k^-)$$

(9)

(5) 滤波均方误差更新矩阵:

$$P_k = (I - K_k H) P_k^-$$

(10)

给定初值  $x_1$  和  $P_1$ ,根据  $k$  时刻的观测值  $y_k$ ,可以递推计算得到  $k$  时刻的状态估计值  $\hat{x}_k$ 。

3 成果运用

3.1 研究对象

以云南省玉磨铁路新平隧道 1 号斜井工区、3 号

横洞工区和出口工区作为测定工点。该工点穿越鲁奎山向斜地层为可溶岩,岩溶发育,且轴部地层岩体破碎严重,富含地下水,隧道施工过程中易发生坍塌和涌水突泥的危险<sup>[12]</sup>;新寨背斜发育于鲁奎山向斜翼部,受核部张力的影响,节理裂隙发育、岩体较破碎。隧道穿越 5 条断层破碎带,围岩极其破碎、稳定性差,且断层为地下水良好通道,施工过程中多次发生涌水突泥、坍塌、冒顶的危险。采用三台阶铣挖开挖工法,建立了 IV 级围岩三台阶铣挖工法、V 级围岩三台阶铣挖工法、三台阶铣挖出渣运输等施工组织模型。本文针对 V 级围岩三台阶铣挖工法模型记录搜集了 7 个主要施工过程、每个施工过程对应 30 个循环的基础数据,以此进行数据误差处理实例研究。

3.2 实例研究

(1) 系统误差判别

首先对原始数据进行系统误差判别,具体计算结果如表 2~表 4 所示。

表2 贝塞尔标准差计算结果表

贝塞尔标准差	新平1号斜井工区	新平3号横洞工区	新平出口工区
施工准备	2.05	2.05	1.56
上台阶铣挖	2.45	2.45	2.67
核心土修整	4.00	4.00	3.97
掌子面封闭	1.83	1.83	2.98
中台阶铣挖	5.29	5.29	4.69
下台阶铣挖	2.94	2.94	1.83
仰拱铣挖	4.97	4.97	5.79

表3 别捷尔斯标准差计算结果表

别捷尔斯标准差	新平1号斜井工区	新平3号横洞工区	新平出口工区
施工准备	2.38	2.38	1.58
上台阶铣挖	2.38	2.38	2.64
核心土修整	4.23	4.23	4.49
掌子面封闭	1.85	1.85	3.43
中台阶铣挖	6.08	6.08	3.70
下台阶铣挖	2.91	2.91	1.85
仰拱铣挖	5.28	5.28	5.28

表4  $u$  值计算结果表

$u$ 值	新平1号斜井工区	新平3号横洞工区	新平出口工区
施工准备	0.16	0.16	0.01
上台阶铣挖	-0.03	-0.03	-0.01
核心土修整	0.06	0.06	0.13
掌子面封闭	0.01	0.01	0.15
中台阶铣挖	0.15	0.15	-0.21
下台阶铣挖	-0.01	-0.01	0.01
仰拱铣挖	0.06	0.06	-0.09

根据判定条件,表 4 中的  $u$  值绝对值均小于  $2/\sqrt{n-1}$  (约 0.67),所以原始数据不存在系统误差。

(2) 粗差数据剔除

计算测定数据的算术平均值、残余误差和标准差,残余误差最大值所对应的原始数据含有粗差的可能性最大,将其看作可疑数据进行格拉布斯判别。为保留数据信息的完整性,取显著度  $\alpha = 0.05$ ,按工区计算  $n = 10$ ,则临界值查表为 2.18,计算结果如表 5~表 7 所示。

表 5 新平 1 号斜井工区测定数据格拉布斯判别计算结果表

新平 1 号斜井工区	残余误差最大值	标准差	判别界限	判定结果
施工准备	3.00	2.05	4.48	正常
上台阶铣挖	4.00	2.45	5.34	正常
核心土修整	6.00	4.00	8.72	正常
掌子面封闭	3.00	1.83	3.98	正常
中台阶铣挖	10.00	5.29	11.54	正常
下台阶铣挖	5.00	2.94	6.42	正常
仰拱铣挖	8.00	4.97	10.83	正常

由表 5 可知,新平 1 号斜井工区测定原始数据的残余误差最大值均小于判别界限,无异常值。

表 6 新平 3 号横洞工区测定数据格拉布斯判别计算结果表

新平 3 号横洞工区	残余误差最大值	标准差	判别界限	判定结果
施工准备	3.00	2.05	4.48	正常
上台阶铣挖	4.00	2.45	5.34	正常
核心土修整	6.00	4.00	8.72	正常
掌子面封闭	3.00	1.83	3.98	正常
中台阶铣挖	10.00	5.29	11.54	正常
下台阶铣挖	5.00	2.94	6.42	正常
仰拱铣挖	8.00	4.97	10.83	正常

由表 6 可知,新平 3 号横洞工区测定原始数据的残余误差最大值均小于判别界限,无异常值。

表 7 新平出口工区测定数据格拉布斯判别计算结果表

新平出口工区	残余误差最大值	标准差	判别界限	判定结果
施工准备	3.00	1.56	3.41	正常
上台阶铣挖	5.00	2.67	5.81	正常
核心土修整	5.00	3.97	8.66	正常
掌子面封闭	4.00	2.98	6.50	正常
中台阶铣挖	12.00	4.69	10.23	异常
下台阶铣挖	3.00	1.83	3.98	正常
仰拱铣挖	14.00	5.79	12.63	异常

由表 7 可知,新平出口工区测定原始数据中,中台阶铣挖残余误差最大值大于判别界限,其对应的循环 8 的数据 101 min 为异常值,需剔除,仰拱铣挖残余误差最大值大于判别界限,其对应的循环 7 的数据 95 min 为异常值,需剔除。

(3) 卡尔曼滤波算例

在运用卡尔曼滤波原理进行数据分析时,初始值

$x_1$  的设定对卡尔曼滤波估计的效果影响很小,初始协方差  $P_1$  越小,卡尔曼滤波估计的效果越好,但  $P_1$  不可以为 0,取 0.01;过程噪声协方差  $Q$  越小,卡尔曼滤波估计的效果越好,但  $Q$  不可以为 0,取 0.001;不考虑系统误差,参数  $B = 0$ ;假定本时刻的状态值等于上一时刻的最优估计值,参数  $A = 1$ ;考虑滤波估计均方差误差,  $R$  取 0.05。

上述数据经过系统误差判别和粗差数据剔除后,剩余数据运用 Matlab 软件构建卡尔曼滤波模型进行随机误差的降噪处理<sup>[13]</sup>,得到各施工过程的平均消耗量值,具体计算结果如下:

① 施工准备

剩余数据量 30 个,降噪处理后结果如表 8、图 1 所示。

表 8 施工准备估计值与测量值统计表

指标	最小值	最大值	平均值	中值	众数	标准差	极差
估计值	29	30.4	29.79	29.85	29	0.32	1.4
测量值	27	32.0	30.00	30.50	32	1.84	5.0

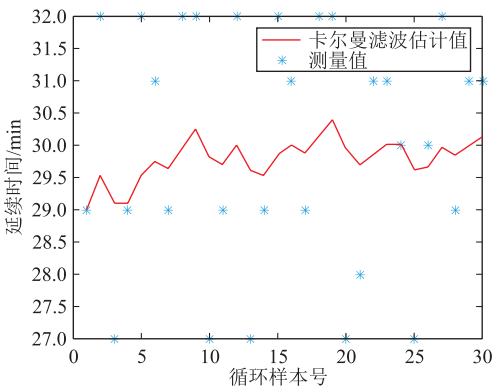


图 1 施工准备卡尔曼滤波估计信号与观测信号图

② 上台阶铣挖

剩余数据量 29 个,降噪处理后结果如表 9、图 2 所示。

表 9 上台阶铣挖估计值与测量值统计表

指标	最小值	最大值	平均值	中值	众数	标准差	极差
估计值	117.96	122	119.54	119.26	117.96	1.19	4.04
测量值	114.00	128	119.67	119.50	118.00	3.42	14.00

③ 核心土修整

剩余数据量 30 个,降噪处理后结果如表 10、图 3 所示。

④ 掌子面封闭

剩余数据量 30 个,降噪处理后结果如表 11、图 4 所示。



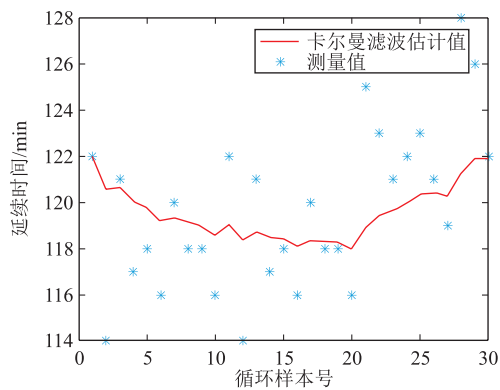


图 2 上台阶钎挖卡尔曼滤波估计信号与观测信号图

表 10 核心土修整估计值与测量值统计表

指标	最小值	最大值	平均值	中值	众数	标准差	极差
估计值	77.48	83	79.48	79.48	77.48	1.26	5.52
测量值	72.00	86	79.00	78.00	78.00	4.11	14.00

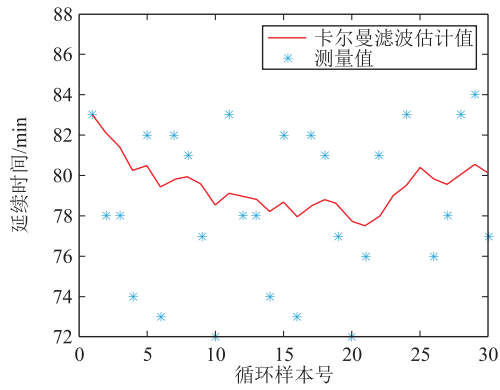


图 3 核心土修整卡尔曼滤波估计信号与观测信号图

表 11 掌子面封闭估计值与测量值统计表

指标	最小值	最大值	平均值	中值	众数	标准差	极差
估计值	57	62.61	58.92	57.96	57	1.91	5.61
测量值	55	68.00	60.00	59.00	60	3.62	13.00

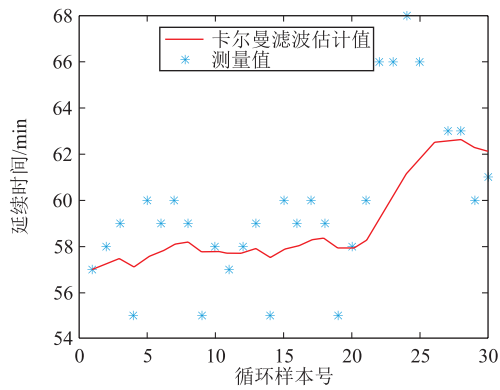


图 4 掌子面封闭卡尔曼滤波估计信号与观测信号图

⑤中台阶钎挖

剩余数据量 29 个,降噪处理后结果如表 12、图 5

所示。

表 12 中台阶钎挖估计值与测量值统计表

指标	最小值	最大值	平均值	中值	众数	标准差	极差
估计值	87	92.74	90.57	90.71	87	1.24	5.74
测量值	82	97.00	90.66	89.00	87	4.85	15.00

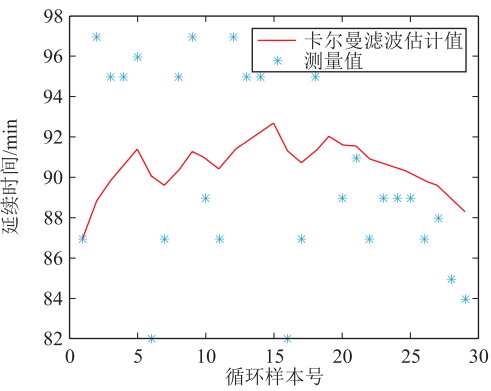


图 5 中台阶钎挖卡尔曼滤波估计信号与观测信号图

⑥下台阶钎挖

剩余数据量 30 个,降噪处理后结果如表 13、图 6 所示。

表 13 下台阶钎挖估计值与测量值统计表

指标	最小值	最大值	平均值	中值	众数	标准差	极差
估计值	65	71.6	68.34	67.8	65	1.85	6.6
测量值	64	76.0	69.67	69.0	65	3.49	12.0

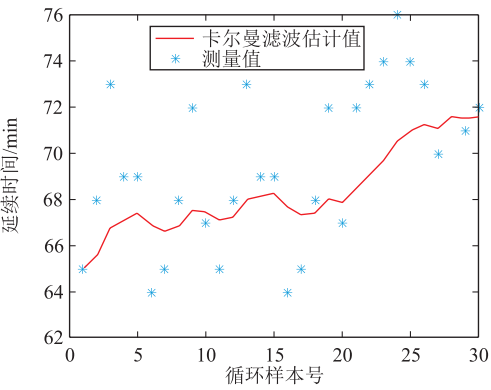


图 6 下台阶钎挖卡尔曼滤波估计信号与观测信号图

⑦仰拱钎挖

剩余数据量 29 个,降噪处理后结果如表 14、图 7 所示。

表 14 仰拱钎挖估计值与测量值统计表

指标	最小值	最大值	平均值	中值	众数	标准差	极差
估计值	77	80.47	79.43	79.47	77	0.74	3.47
测量值	74	88.00	79.83	79.00	83	4.35	14.00

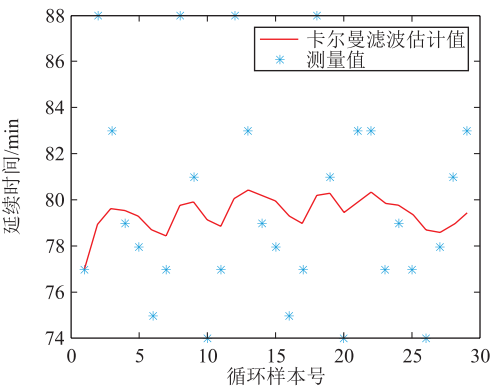


图7 仰拱铣挖卡尔曼滤波估计信号与观测信号图

3.3 校验结果

将采用上述数学模型计算的各施工过程消耗量与算术平均法计算的消耗量进行对比<sup>[14]</sup>,结果如表 15、表 16 所示。

表 15 V 级围岩三台阶铣挖开挖施工时间及人数对比表

序号	施工过程组成	数学模型计算		算术平均法	
		延续时间 /min	人数/人	延续时间 /min	人数/人
1	施工准备	29.79	20	30.00	20
2	上台阶铣挖	119.54	16	119.67	16
3	核心土修整	79.48	16	79.00	16
4	掌子面封闭	58.92	16	60.00	16
5	中台阶铣挖	90.57	16	90.66	16
6	下台阶铣挖	68.34	16	69.67	16
7	仰拱铣挖	79.43	16	69.67	16
8	领退炸药	20.00	1	20.00	1
9	铣挖机维护、检查	500.00	2	500.00	2
10	洞内降尘	60.00	14	60.00	14

表 16 V 级围岩三台阶铣挖开挖工日消耗定额对比表

序号	施工过程组成	数学模型计算		算术平均法	
		计算 参数	计算 结果	计算 参数	计算 结果
1	设计开挖断面/m <sup>3</sup>	122.76	—	122.76	—
2	本循环开挖进尺/m	0.60	—	0.60	—
3	循环内人工小计/工日	—	20.32	—	20.04
4	循环外人工小计/工日	—	4.43	—	4.43
5	人工工日汇总/工日	—	24.75	—	24.47
6	按定额单位计/(工日/10 m <sup>3</sup> )	—	3.36	—	3.32

由表 15、表 16 可知,原始数据通过数学模型处理,消除了粗差并减小了系统误差和随机误差对定额测定结果的影响,该数据结果更合理,准确性更高。采用数学模型消耗量计算结果纳入补充定额的编制。按同样的处理方法对机械效率和材料消耗进行了数据处理,此处不再累述。

4 结束语

随着我国铁路建设技术的不断精进,针对复杂工程难题的有效解决,铁路工程新工艺新工法等定额测定工作已日趋成熟,对现场测定数据真实性与准确性的要求也日趋提高。本文运用误差理论和数据分析的方法,消除了粗大误差,减少了系统误差和随机误差,保证了数据稳健度和可信度,提高了定额测定工作的技术高度和深度。在玉磨铁路新平隧道项目中,应用了数据误差处理模型对补充定额分析的关键样本数据进行精细处理,获取了施工组织模型的相关参数,为科学合理地确定补充定额提供了技术支撑,也为类似工程定额编制提供了借鉴及处理思路。

参考文献:

[1] 吴炜,唐小平,钟明琳,等. 铁路隧道 TBM 施工及超长工区施工等补充预算定额创新研究[J]. 铁路工程技术与经济,2021,36(2): 1-5.

WU Wei, TANG Xiaoping, ZHONG Minglin, et al. Research on Innovation of Supplementary Budget Norm and Standard for TBM or Super-long Structure Construction in Railway Tunnel [J]. Railway Engineering Technology and Economy, 2021, 36(2): 1-5.

[2] 孙鹏宇. 采用铣挖及配套技术开挖隧道方法探讨[J]. 铁路工程技术与经济, 2018, 33(1): 23-25.

SUN Pengyu. Approach to Tunnel Excavation by Milling Excavation and Matching Technology [J]. Railway Engineering Technology and Economy, 2018, 33(1): 23-25.

[3] 国铁科法〔2017〕30 号,铁路基本建设工程设计概(预)算编制办法[S].

Guo Tie Ke Fa〔2017〕No 30, Measures for the Preparation of Railway Capital Construction Project Design Estimates (Budgets) [S].

[4] 国铁科法〔2017〕31 号,铁路基本建设工程设计概(预)算费用定额[S].

Guo Tie Ke Fa〔2017〕No 31, Railway Capital Construction Project Design Estimate (Budget) Cost Quota [S].

[5] 国铁科法〔2017〕33 号,铁路工程预算定额[S].

Guo Tie Ke Fa〔2017〕No 33, Railway Project Budget Quota [S].

[6] 张远勤,赵万利. 工程预算定额测定方法研究[J]. 铁路工程技术与经济, 2021, 36(4): 67-71.

ZHANG Yuanqin, ZHAO Wanli. Research on Measurement Method of Engineering Budget Normand Standard [J]. Railway Engineering Technology and Economy, 2021, 36(4): 67-71.

[7] 宋美如. 高斯核自适应滤波算法误差理论分析与应用[D]. 镇江: 江苏大学, 2022.

SONG Meiru. Theoretical Error Analysis and Application of Gaussian Kerneladaptive Filtering Algorithm [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022.

ZHU Tingyu, WANG Huanlong. Countermeasures of Jammed TBM in Shattered Weathered Zone of Water-rich Structure [J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(4): 103 – 110.

[6] 任政勇,柳建新,岳国璇,等. 重力与磁法在有色金属矿产勘探中的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(1): 240 – 260.

REN Zhengyong, LIU Jianxin, YUE Guoxuan, et al. Research Progress of Gravity and Magnetic Method in Nonferrous Metal Minerals Exploration [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33(1): 240 – 260.

[7] 陈同俊,崔若飞,郎玉泉,等. 煤田采区三维地震精细构造解释方法[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(2): 573 – 578.

CHEN Tongjun, CUI Ruofei, LANG Yuquan, et al. Detail Structural Interpretation Methods of Coal 3D Seismic [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(2): 573 – 578.

[8] 丁志强,李飞,袁桂琴. 矿产普查中航空电磁异常的查证综合解

释[J]. 桂林理工大学学报, 2018, 38(4): 726 – 731.

DING Zhiqiang, LI Fei, YUAN Guiqin. Comprehensive Interpretation of Airborne Electromagnetic Anomaly Verification in Mineral Prospecting [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2018, 38(4): 726 – 731.

[9] 何继善. 大深度高精度广域电磁勘探理论与技术[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 1809 – 1816.

HE Jishan. Theory and Technology of Wide Field Electromagnetic Method [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 1809 – 1816.

[10] 张弛. 大地电磁数据质量评价与阻抗估计[D]. 长沙: 中南大学, 2013.

ZHANG Chi. Magnetotelluric Data Quality Assessment and Impedance Estimation [D]. Changsha: Central South University, 2013.

(上接第13页)

[8] 郭肖亭,王文廉,葛双超,等. 误差理论在科技论文数据处理与分析中的应用[J]. 电气电子教学学报, 2021, 43(3): 100 – 101, 112.

GUO Xiaoting, WANG Wenlian, GE Shuangchao, et al. Application of Error Theory in Data Processing and Analysis of Scientific Papers [J]. Journal of Electrical & Electronic Education, 2021, 43(3): 100 – 101, 112.

[9] 李准,张穷. 浮动平均值在大变形隧道定额测定与分析中的应用[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(1): 60 – 63.

LI Zhun, ZHANG Qiong. Application of Floating Average Value in Quota Determination and Analysis of Large Deformation Tunnel [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(1): 60 – 63.

[10] 王璐. 基于卡尔曼滤波的三维点云编码优化及后处理算法研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.

WANG Lu. Kalman Filter-based Coding Optimization and Post-processing for 3D Point Cloud [D]. Jinan: Shandong University, 2022.

[11] 吴炜. 铁路岩溶隧道旋挖钻孔单价分析研究[J]. 铁路工程技术与经济, 2022, 37(6): 8 – 13.

WU Wei. Analysis and Research on Unit Price of Rotary Drilling in Railway Karst Tunnel [J]. Railway Engineering Technology and Economy, 2022, 37(6): 8 – 13.

[12] 李芳,卢鑫垚,陈龙,等. 基于 Matlab 和 Excel 的误差理论教学软件设计[J]. 电脑知识与技术, 2021, 17(7): 66 – 67, 70.

LI Fang, LU Xinyao, CHEN Long, et al. Design of Error Theory Teaching Software Based on Matlab and Excel [J]. Computer Knowledge and Technology, 2021, 17(7): 66 – 67, 70.

[13] 颜欢,李准. 基于成渝客运专线新红岩隧道的数码电子雷管爆破定额测定与费用分析[J]. 铁路工程技术与经济, 2018, 33(4): 28 – 32.

YAN Huan, LI Zhun. Quota Determination and Cost Analysis of Digital Electronic Detonator Blasting of the New Hongyan Tunnel in Chengdu-Chongqing Passenger Dedicated Line [J]. Railway Engineering Technology and Economy, 2018, 33(4): 28 – 32.

[14] 汤杰,李准. 引孔型塑料排水板施工定额测定及单价分析[J]. 铁路工程技术与经济, 2019, 34(4): 28 – 32.

TANG Jie, LI Zhun. Construction Quota Determination and Unit Price Analysis of Orifice Plastic Drainage Plate [J]. Railway Engineering Technology and Economy, 2019, 34(4): 28 – 32.