

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221493

# 一种基于表面粗糙度分级抽样测量的隧洞糙率估算方法

李军强, 陈文学, 穆祥鹏, 张哲琦

(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 100038)

**摘要:**糙率是反映和影响工程输水能力的重要参数,可通过观测沿程水头损失的方法测算糙率值。但对于新建未通水工程,估算糙率值是一个难题。鉴于输水建筑物表面粗糙度是影响糙率值的最主要因素,提出一种基于分级抽样的表面粗糙度测量方法,并以某新建模筑钢筋混凝土衬砌隧洞为例,分析了该方法下表面粗糙度统计分布规律及使用该方法估算隧洞粗糙度的最小样本容量,在此基础上估算了某隧洞工程的糙率值范围,结果对预估新建工程的输水能力、检验衬砌施工质量具有一定的借鉴意义。

**关键词:** 输水建筑物;糙率;水流阻力;壁面绝对粗糙度;对数正态分布

中图分类号: TV135.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)04-0135-04

## 1 引言

对于长距离输水工程,糙率的大小直接影响着工程规模、建设成本及输水能力,糙率取值备受重视。如甘肃省引洮供水一期工程的隧洞设计糙率由 0.014 5 降至 0.013 5,即可节约投资 1 270 万元<sup>[1]</sup>。因此,对糙率影响因素展开了大量研究,如 ALLEN J J 等<sup>[2]</sup>发现有压管道的糙率系数和雷诺数、表面粗糙度与水力半径的比值等因素有关;何建京等<sup>[3,4]</sup>通过试验认为虽然水流弗劳德数、雷诺数、流量、水力半径等因素对糙率影响规律尚无统一论,但输水建筑物糙率值明显随衬砌表面粗糙度的增大而增大。目前公认输水建筑物糙率与水流流态、过流表面边界条件(衬砌材料及状况、施工工艺)等因素有关。工程上的水流通常处于阻力平方区,对于断面均一、无局部形状阻力的有压隧洞,过流表面的粗糙度是影响糙率的最主要因素。对于已建输水工程,通常采用沿程水头损失观测的水力学方法测算糙率值。但对于新建未通水的输水工程,估算其糙率值则尚无成熟的方法。如果能通过直接测量输水建筑物过流表面的绝对粗糙度而估算糙率,则对预估新建工程的输水能力、检验衬砌施工质量具有重要意义。建筑物过流表面局部的绝对粗糙度可通过仪器直

接测量,按测量仪器是否与建筑物表面接触分为接触式和非接触式测量两类,通过测量“点”或“线”的局部绝对粗糙度来反映输水工程过流表面的整体粗糙情况进而估算糙率,目前尚无相关报道。鉴于此,本文提出了一种基于多阶段抽样的表面粗糙度测量方法,以某新建模筑钢筋混凝土衬砌隧洞为例,分析了其表面粗糙度统计规律,并估算了其当量粗糙度及糙率,结果对于新建未通水输水工程的糙率估算、输水能力评估具有一定的参考价值。

## 2 测量方法

### 2.1 绝对粗糙度测量仪器

对于隧洞过流表面某点的绝对粗糙度,采用表面粗糙度测量仪进行测量。该仪器通过直接测量物体表面的起伏差  $\Delta$  来直接获取测量点的壁面绝对粗糙度,具有操作简单、测量精度高的优点。其技术参数见表 1。

表 1 表面粗糙度测量仪技术参数

Tab. 1 Technical parameters of surface roughness measuring instrument

型号	底部直径/mm	量程/ $\mu\text{m}$	分辨率/mm	允许误差/mm	测量力/N
HL223	26	0~6 300 可调量程	0.001	$\pm 0.003$	$\leq 1.5$

### 2.2 分级抽样方法

某圆形过水断面有压输水隧洞采用模筑钢筋

收稿日期: 2022-07-20, 修回日期: 2022-10-19

基金项目: 国家重点研发计划课题(2021YFC3200905);国家自然科学基金项目(U20A20316)

作者简介: 李军强(1996-),男,硕士研究生,研究方向为水力学及河流动力学,E-mail:ljqs1123@163.com

通讯作者: 穆祥鹏(1979-),男,博士、教授级高级工程师、博导,研究方向为水力学及河流动力学、冰水力学,E-mail:

混凝土内衬,直径 4.7 m,设计糙率  $n = 0.013$ ,设计流量  $28.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

表面粗糙度测量仪属于点式测量仪器,对于这种局部测量,理论上只有实现测量区域全覆盖才能真正反映输水建筑物的表面粗糙程度,这在测量工作量上是不现实的,因此借鉴质量抽样检查的思路,通过抽样测量方法估算表面粗糙度。为了避免测量人员在测量点位选择上受主观因素影响而有意选择表面光滑或粗糙的点位,测量点位的选择采用分级随机抽样的方法。所谓“分级”就是对于混凝土浇筑仓、浇筑仓内的测试带、测试带内的一级网格、一级网格内的二级网格(测量点)进行逐级随机抽样,具体方法为:①任意抽取一个混凝土衬砌浇筑仓,在仓内随机抽取一个顺水流方向 1 m 宽的测试带,再按  $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$  的大小将随机选出的测试带划分为 58 个一级网格;再按  $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  的大小对每个一级网格进行二次网格划分(图 1)。②采用不重复随机抽样的方法在 58 个一级网格中取若干一级网格,再在每个抽样中的一级网格中不重复随机抽取 10 个二级网格;再针对每个抽取的二级网格,进行 10 次随机粗糙度测量。

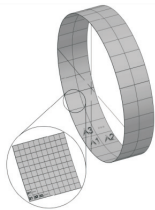


图 1 一、二级网格划分示意图

Fig. 1 Schematic diagram of first and second level grid division

为得到在该测量方法下隧洞表面粗糙度统计分布规律及最小样本量,抽取一级单元时按最大抽样密度 20% 进行抽样,即对于本工程而言抽取 12 个一级单元。

### 3 测量结果与分析

#### 3.1 测量样本统计

根据本文分级抽样方法对表面绝对粗糙度进行多级抽样测量,在顺水流方向 1 m 宽的环形测试带上共计获取了 1 200 个表面绝对粗糙度样本数据,将样本数据按组距为 0.02 mm 进行统计,其统计参数见表 2,分布情况见图 2。

表 2 样本统计参数

Tab. 2 Sample statistics parameters

统计量	均值	中值	方差	标准差	极小值	极大值	极差	偏度	峰度
统计值	0.153	0.097 5	0.033 1	0.181 9	0.005	1.976	1.971	3.931 9	23.415 2

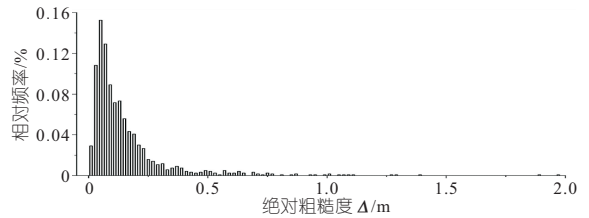


图 2 样本频率统计图

Fig. 2 Histogram of sample frequency statistics

由表 2、图 2 可知,该隧洞表面绝对粗糙度  $\Delta$  的均值和中值相差较大,频数分布具有明显的正偏特征,且主峰尤为陡峭。根据现场拍摄的隧洞混凝土表面(图 3)可知,该分布绝非偶然,由于模筑钢筋混凝土施工特点,其表面分布许多气孔,具有深坑较少、浅坑较多的离均特点,浅坑和深坑的相对深度最大可相差几十倍至近百倍。因此,主峰的正偏性反映的是绝对粗糙度的分布情况,换言之,表面凹坑深度的随机性和离均性质是造成绝对粗糙度频数分布具有正偏性的根本原因;同时,主峰峰度  $K_s$  远大于 3,呈高狭状,这说明隧洞表面凹坑深度大多集中在主峰附近,且凹坑深度范围较为集中。



图 3 隧洞混凝土表面实拍图

Fig. 3 Picture of concrete tunnel surface

#### 3.2 测量样本分析

##### 3.2.1 样本容量的影响

按一级网格抽取顺序,对不同样本容量的绝对粗糙度进行频率统计,设置组距为 0.02 mm,由于样本每次增加 100 个,共有 12 组不同样本容量数据,仅列出部分样本容量情况下样本的频率分布,见图 4。另外,按样本容量的不同,将样本统计参数值列于表 3。由图 4、表 3 可看出,随着样本量的增加,频率统计图中最大频率所在区间

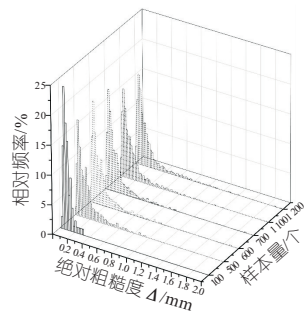


图 4 不同样本容量下绝对粗糙度  $\Delta$  统计频率图

Fig. 4 Histogram of absolute roughness frequency statistics under different sample sizes

表 3 不同样本容量下的统计参数

**Tab. 3 Statistical parameters under different sample sizes**

样本容量/个	最大频率/%	最大频率所在区间/0.01mm	均值/mm	标准差	偏度	峰度
100	24.00	(6, 8]	0.10	0.05	1.62	2.97
200	14.50	(6,8]	0.15	0.11	2.49	7.76
300	17.33	(4,6]	0.13	0.11	2.69	9.47
400	15.00	(4,6]	0.14	0.13	2.51	8.30
500	16.20	(4,6]	0.15	0.14	2.48	8.01
600	17.17	(4,6]	0.14	0.15	4.19	32.08
700	17.00	(4,6]	0.14	0.15	4.24	33.33
800	15.25	(4,6]	0.15	0.15	3.99	28.06
900	16.11	(4,6]	0.14	0.15	4.03	28.36
1 000	14.50	(4,6]	0.17	0.19	3.72	20.77
1 100	14.91	(4,6]	0.16	0.19	3.82	21.97
1 200	15.25	(4,6]	0.15	0.18	3.93	23.42

从(0.06,0.08]变为(0.04,0.06],且当样本容量大于 700 时,样本最大相对频率均稳定在 15%左右。

3.2.2 样本分布

由于绝对粗糙度测量数据具有明显的正偏性和高狭性,采用对数化的方式将样本数值进行变换,记为 lnΔ。将对数化的样本 lnΔ 进行正态性检验,取 P=0.05,用 lnΔ、σ' 分别表示对数化后的样本均值、标准差,假设检验结果见表 4。

表 4 lnΔ 单样本 Kolmogorov-Smirnov 检验

**Tab. 4 One sample Kolmogorov-Smirnov Test of lnΔ**

样本容量/个	正态参数		最极端差别绝对值	渐近显著性(双侧)	lnΔ 偏度	lnΔ 峰度
	lnΔ	σ'				
100	-2.37	0.46	0.075	0.63	0.365	-0.090
200	-2.13	0.66	0.047	0.78	0.037	0.564
300	-2.31	0.72	0.052	0.38	0.142	0.044
400	-2.27	0.80	0.039	0.59	-0.082	0.353
500	-2.23	0.83	0.050	0.17	-0.016	0.062
600	-2.33	0.87	0.043	0.21	0.030	0.079
700	-2.33	0.83	0.036	0.34	0.076	0.251
800	-2.26	0.83	0.026	0.63	0.018	0.292
900	-2.28	0.82	0.032	0.30	0.071	0.253
1 000	-2.18	0.87	0.030	0.34	0.160	0.217
1 100	-2.28	0.92	0.027	0.39	0.075	0.181
1 200	-2.30	0.90	0.029	0.25	0.128	0.276

由表 4 可知,不同样本容量下,双侧渐进显著性均大于 0.05,即在该测量试验中,不同样本容量下,对数化后的样本 lnΔ 分布均符合正态分布,表明该隧洞表面的绝对粗糙度分布符合对数正态分布,其表达式为:

$$f(\Delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma'\Delta} e^{-\frac{(\ln\Delta - \overline{\ln\Delta})^2}{2\sigma'^2}} \quad (1)$$

同时,对数化样本的均值 lnΔ 在各样本容量下并无显著差异,但标准差 σ' 在样本量小于 700 时,呈递增趋势,当样本量大于 700 时,标准差 σ' 趋于稳定,这说明当样本量大于 700 时样本容量已足够,样本能代表试验段总体情况。在样本量

小于 700 的情况下,lnΔ 偏度在 0 左右来回震荡,且随着样本量的增加,样本峰度变幅较大;当样本量超过 700 时,lnΔ 偏度逐渐稳定,始终正偏,且峰度值约在 0.24。

结合表 3、4 的结果,本试验在样本量为 1 000 时,样本最大频率从 16.11% 降至 14.50%,样本均值也随之增加,这主要是缘于该工程表面凹坑分布的随机性和测点抽取的随机性;但当样本量继续增加时,样本最大频率和对数化样本均值 lnΔ 恢复至正常水平,这表明该方法应用于输水建筑物过流表面的绝对粗糙度测量时,随着测量样本的增加,能纠正测量区域选择和施工质量不稳定对粗糙度抽样测量带来的影响。基于该特性,在使用这种方法进行表面粗糙度测量时,可通过观察样本均值变化情况判断测量结果的稳定性。

3.3 表面整体粗糙度分析

将对数化后的样本均值 lnΔ 进行指数化处理得 e<sup>lnΔ</sup>,该参数即为样本测量值的几何平均数,其具有长度量纲,即:

$$\overline{\Delta'} = e^{\overline{\ln\Delta}} = e^{\frac{1}{n}\sum \Delta_i} = \sqrt[n]{\Delta_n \Delta_{n-1} \cdots \Delta_1} \quad (2)$$

由于隧洞表面粗糙度符合对数正态分布,为了便于估计,采用对数化后的样本进行参数估计。表 5 为利用正态总体参数估计方法求出的 lnΔ 总体均值在 95% 置信区间下的估计区间。

表 5 粗糙度区间估计

**Tab. 5 Interval estimation of roughness**

样本量/个	lnΔ 置信区间(95%)	Δ' 置信区间(95%)
700	(-2.39, -2.27)	(0.092, 0.104)
800	(-2.31, -2.20)	(0.099, 0.111)
900	(-2.33, -2.23)	(0.097, 0.108)
1 000	(-2.23, -2.12)	(0.107, 0.120)
1 100	(-2.34, -2.23)	(0.096, 0.108)
1 200	(-2.35, -2.25)	(0.095, 0.105)

3.4 糙率估算

通常情况下,当水流处于紊流过渡区或阻力平方区时,当量粗糙度 k<sub>s</sub> 与沿程阻力系数 λ 的关系<sup>[5]</sup>为:

$$\lambda = 0.11(k_s/D + 68/Re)^{0.25} \quad (3)$$

式中,D 为管道直径。

当水流处于阻力平方区时,式(3)中含有 Re 项忽略。郑双凌等<sup>[6]</sup>针对 PCCP 管道,利用式(3)推求出表面绝对粗糙度与当量粗糙度之间的修正系数 B=3.56,表示为:

$$B = k_s/\Delta \quad (4)$$

郑双凌等<sup>[6]</sup>研究中 PCCP 管道管径 4 m,与本文隧洞管径 4.7 m 接近,借用式(4)中修正系

数结合本次测量获得的几何平均粗糙度 $\overline{\Delta'}$ 估计当量粗糙度,再根据当量粗糙度估计值求得曼宁糙率  $n$  值,结果见表 6。

表 6 曼宁糙率估计结果(置信区间 95%)

Tab. 6 Interval estimation of Manning's roughness coefficient (At 95% confidence interval)

样本量/个	$\overline{\Delta'}/\text{mm}$	$k_s/\text{mm}$	$n$
700	(0.092,0.104)	(0.327,0.370)	(0.011 8,0.012 0)
800	(0.099,0.111)	(0.352,0.395)	(0.011 9,0.012 1)
900	(0.097,0.108)	(0.345,0.384)	(0.011 9,0.012 0)
1 000	(0.107,0.120)	(0.382,0.426)	(0.012 0,0.012 2)
1 100	(0.096,0.108)	(0.343,0.383)	(0.011 9,0.012 0)
1 200	(0.095,0.105)	(0.338,0.374)	(0.011 8,0.012 0)

由表 6 可知,在样本量超过最小容许样本容量时(即不小于 700),当量粗糙度估计范围为 0.327~0.426 mm,所测隧洞的糙率范围约为 0.011 8~0.012 2。

《水力计算手册》<sup>[7]</sup>推荐钢模板衬砌施工质量良好,接缝平衡的钢筋混凝土管壁面当量粗糙度  $k_s$  范围为 0.3~0.9 mm,引滦入津<sup>[8]</sup>、引黄济青<sup>[9]</sup>测得当量粗糙度范围分别为 0.265~0.300、0.346~0.585 mm。由此可知,本文基于分级随机抽样得到的当量粗糙度范围相对合理,在一定程度上证明了该方法的有效性。

## 4 结论

a. 提出的基于表面粗糙度分级抽样测量的隧洞糙率估算方法能通过有限的粗糙度测量快速评估输水建筑物过流表面的整体粗糙度,从而对不能实施水力学观测的输水工程进行糙率估算,对于评价新建未通水输水工程的输水能力、施工质量、工程效益具有一定的参考价值。实例应用结果表明,所测量隧洞的过流表面绝对粗糙度分布具有正偏性和高狭性的特点,样本进行对数化处理后符合正态分布。

b. 采用本文分级随机抽样的绝对粗糙度测量

方法,当样本量不小于 700 时,样本最大相对频率稳定在 15%左右,在进行绝对粗糙度观测时,最小样本容量以不小于 700 为宜。若在样本量大于 700 的情况下,随着样本数量的增加而样本均值无明显变化,则可停止测量;反之,有必要进一步增加样本量,以消除随机测量及施工质量不稳定带来的不确定性影响。

c. 建议未来结合水力学观测,逐步建立起一套完整的材质或工艺—表面绝对粗糙度—当量粗糙度—水力条件—糙率定量关系,推动长距离输水工程水流阻力理论的进步。

## 参考文献:

- [1] 吕宏兴,路泽生,栾维功,等.引洮供水一期工程总干渠糙率原型观测(2)——糙率原型观测结果及经济效益[J].长江科学院院报,2010,27(2):37-41.
- [2] ALLEN J J, SHOCKLING M A, KUNKEL G J, et al. Turbulent flow in smooth and rough pipes [J]. Philosophical transactions of the royal society a-mathematical physical and engineering sciences, 2007,365(1852):699-714.
- [3] 何建京,王惠民.流动型态对曼宁糙率系数的影响研究 [J]. 水文, 2002,22(6):22-24,53.
- [4] 吴思.人工渠道糙率与明渠流态关系的试验研究 [D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2016.
- [5] IDELCHIK I E. Handbook of hydraulic resistance, 4<sup>th</sup> edition revised and augmented[M]. New York: Begell House Inc.,2008.
- [6] 郑双凌,马吉明,南春子,等.预应力钢筒混凝土管(PCCP)的阻力系数与粗糙度研究 [J]. 水力发电学报,2012,31(3):126-130.
- [7] 李炜.水力计算手册 [M].北京:中国水利水电出版社,2006.
- [8] 陈耀忠.引滦入津隧洞糙率两次原型观测成果综述 [J]. 水利水电科技进展, 2005,25(2): 58-61.
- [9] 水利部南水北调规划设计管理局,山东省胶东调水局.引黄济青及其对我国跨流域调水的启示 [M].北京:中国水利水电出版社,2009.

# A Method of Tunnel Roughness Estimation Based on Surface Roughness Hierarchical Sampling Measurement

LI Jun-qiang, CHEN Wen-xue, MU Xiang-peng, ZHANG Zhe-qi

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Roughness is an important parameter which reflects water transport capacity of water diversion project. The roughness value can be calculated by observing the frictional head loss. However, how to estimate the roughness is always a difficult problem in hydraulics for the new unworked water diversion project. The surface roughness of water conveyance buildings is a vital factor affecting the roughness value. So, this study proposed a surface roughness measurement method relies on hierarchical sampling. Taking a new in-situ reinforced concrete lining tunnel as an example, the statistical distribution of surface roughness and the minimum sample size of tunnel roughness estimation were analyzed. On this basis, the roughness value range of the tunnel project was estimated, which has a certain reference significance for predicting the water transport capacity of the new project and inspecting the construction quality of the lining.

**Key words:** water conveyance structure; Manning's coefficient; flow resistance; surface roughness; lognormal distribution