**铀矿石卡车计量站伽马能谱快速检测规范**

目 录

[前 言 2](#_Toc136234310)

[1 适用范围 2](#_Toc136234311)

[2 引用标准 2](#_Toc136234312)

[3 术语及定义 2](#_Toc136234313)

[3.1 死时间 3](#_Toc136234314)

[3.2 光电倍增管 3](#_Toc136234315)

[3.3 红外探测器 3](#_Toc136234316)

[3.4 换算系数 3](#_Toc136234317)

[3.5 铀镭平衡系数 3](#_Toc136234318)

[3.6 射气系数 4](#_Toc136234319)

[4 计量站场地及仪器要求 4](#_Toc136234320)

[4.1 场地环境要求 4](#_Toc136234321)

[4.2 框架要求 4](#_Toc136234322)

[4.3 探测器安装要求 5](#_Toc136234323)

[4.4 红外线安装要求 5](#_Toc136234324)

[5 仪器性能检查及校准 6](#_Toc136234325)

[5.1 仪器性能要求 6](#_Toc136234326)

[5.2 仪器性能检查 6](#_Toc136234327)

[6 测量方法 7](#_Toc136234328)

[6.1 动态测量 7](#_Toc136234329)

[6.2 本底测量 7](#_Toc136234330)

[6.3 计数率校正 8](#_Toc136234331)

[6.4 矿石称重 8](#_Toc136234332)

[7 换算系数确定 8](#_Toc136234333)

[7.1 谱段确定 8](#_Toc136234334)

[7.2 铀道净计数率确定 8](#_Toc136234335)

[7.3 换算系数确定方法 9](#_Toc136234336)

[8 矿石铀含量确定 10](#_Toc136234337)

[8.1 铀含量的计算 10](#_Toc136234338)

[8.2 铀含量的修正 12](#_Toc136234339)

[9 测量结果的对比验证 14](#_Toc136234340)

[9.1 矿石区块品位结果对比 14](#_Toc136234341)

[9.2 水冶厂反算供矿品位对比 14](#_Toc136234342)

[10 仪器维护与安全防护 14](#_Toc136234343)

[10.1 仪器维护 14](#_Toc136234344)

[10.2 安全防护 14](#_Toc136234345)

[附录A模型标准制作方法 16](#_Toc136234346)

[方案一：铀矿石模型标准 16](#_Toc136234347)

[方案二：吨装袋模型标准 16](#_Toc136234348)

前 言

随着我国铀矿开发由国内走向国外，因矿山类型、地质条件和开采规模等诸多因素的差异，特别是核仪器的快速发展以及实际应用需求，原有的铀矿采冶相关标准已无法满足需求，有必要重新制定和推广铀矿石卡车计量站规范，对促进我国铀资源领域技术发展具有现实作用。

本标准提出单位：中国广核集团有限公司

本标准归口单位：中国能源研究会核能专业委员会

本标准起草单位：中国广核集团铀矿采冶技术研发中心，东华理工大学、中广核贝谷科技有限公司，核工业航测遥感中心

本标准主要起草人：陈宁，王仁波，郝金龙，张雄杰，李福龙，张积运，邓洪泽

# 适用范围

本标准规定了能谱型铀矿石卡车计量站的仪器性能、校准方法、测量方法、数据处理、铀含量影响因素修正、质量控制、仪器维护和安全防护等基本要求。

本规范适用于常规方法开采的铀矿山、铀钍混合矿山采出矿石的铀品位快速测量。

# 引用标准

下列条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是标注日期的引用文件，其后所有的修订版均不适用于本标准。

EJ370 铀矿石计量站γ快速分析总则

EJ371 铀矿石矿车计量站γ快速分析

EJ372 铀矿石汽车计量站γ快速分析

EJ373 铀矿石火车计量站γ快速分析

EJ374 铀矿石皮带计量站γ快速分析

# 术语及定义

本标准采用下列术语和定义。

## 死时间

矿石中的天然放射性元素自发衰变产生的γ射线经过闪烁探测器转化为电脉冲信号，在脉冲幅度分析器中，每处理一个脉冲需要占用一定的时间，在这个时间范围内，电路不能再去处理其它的脉冲，这个时间就称为死时间。

## 光电倍增管

NaI闪烁探测器接收到γ射线后产生电子，使闪烁体分子电离激发，退激时产生大量的光子，光子经过反射后集中向光电倍增管方向投射，闪烁光子进入到光电倍增管后，由光电效应产生光电子，这些光电子经过光电倍增管各级倍增之后产生微弱的电信号输出到前置放大电路，经过前置放大后，输出到多道分析模块。

## 红外探测器

红外探测器用于触发通行状态和检测车速，该装置采用两对红外对射模块，安装于卡车计量站门架两侧的适当高度，当矿车车头驶入检测通道时，红外对射光线被阻挡，直至车尾驶出检测通道。在被阻挡时间内系统才启动对矿车的辐射检测程序，同时根据已知的矿车长度数据计算出矿车通行速度。

## 换算系数

换算系数表示单位含量的放射性核素（铀、钍、钾）的特征能量的γ射线在特定能量区间产生的计数率。表征测量得到的伽马计数率与测量目标体含量之间的换算关系。

## 铀镭平衡系数

矿石中铀镭含量的比值（Ra/U）与其达到放射性平衡时的比值之比。

（1）

—为铀镭平衡系数；

Ra—矿石镭含量，%；

U—矿石铀含量，%；

## 射气系数

射气系数（η）是由矿石逸散的放射性气体（222Rn）的量N1与在同一时间里矿石所产生的全部放射性气体（222Rn）量N2的比值。

（2）

# 计量站场地及仪器要求

## 场地环境要求

计量站应建立在通风、干燥、无强烈电磁和伽马辐射的场地，距干扰伽马辐射源（矿体、矿堆）应超过50m。

矿车驶入门架前的通道至少应有20m的平直路段。

矿车进入计量站门架前的通道两侧应设置卡车限路墩，以防卡车与门架碰撞。

保证路面与门架上部探测器的距离固定。

保障计量站系统供电持续稳定。

场地照明亮度应适宜，避免灯光直射被测量车辆。

## 框架要求

计量站框架尺寸需根据卡车尺寸确定：

框架内宽度应在保证卡车通过的情况下，两侧留出足够安全距离，宽度一般大于卡车车体宽度4m以上；

框架内高度应高于卡车最大装载高度0.5-1m；

框架应具有大风和轻微剐蹭情况下防倾倒设计；

框架整体应具有一定刚度要求，满足整体搬迁的需求。

## 探测器安装要求

计量站系统采用动态扫描检测方式，探测器带有铅屏准直功能的三组NaI晶体和光电倍增管构成（图1）。



**图1卡车计量站系统扫描面结构图**

1号探测器为主探测器，其经准直器屏蔽的探测角度为82°，覆盖矿车上矿石堆的整个横切面，且可降低地面背景辐射对测量结果的影响。

2号和3号探测器为辅探测器，分别位于矿车上部的对称的左右两边，探测角度为60°，分别接收矿石堆侧面伽马射线。如此排布方式可将卡车内矿石堆形的影响降到最低。

## 红外线安装要求

两对红外线分别安装固定在计量站框架两侧，负责发射和接收红外线。红外线探测器安装位置应依据卡车实际尺寸和结构确定：

卡车最前端抵达框架正下方时，红外线应能立即被卡车阻挡；

仅当卡车最后端离开框架正下方时，红外线接收端才能收到发射端的信号；

卡车车体驶过框架下方过程中，红外线必须被全程阻挡。

# 仪器性能检查及校准

## 仪器性能要求

NaI晶体尺寸：主探测器50×100×200mm（体积1L），辅探测器 Φ75×100mm。

探测γ射线的能量范围：60keV~3MeV。

数字脉冲幅度分析器道数：1024道。

NaI(TI)晶体探测器能量分辨率：≤8.0%（对137Cs源的662 keV全能峰）。

线性要求：仪器在铀含量0.5%以内非线性≤2%。

量程：计量站测量铀矿石品位范围覆盖0.005%-0.5%。

卡车速度：卡车在被测量时，速度在3~10kg/h范围内，且不同速度下重复测量结果误差应在±5%以内。

工作环境：温度：-10～＋55℃；湿度：20%～95%RH。

防护等级：IP55。

抗震能力：可抗非直接撞击和非直接跌落。

稳谱功能：具有自动稳谱功能。

校准时间：间隔不超过6个月。

## 仪器性能检查

### 准确性检查

满载已知品位标准矿石的卡车通过计量站，其测量结果与已知的标准矿石品位相对误差应在±5%以内。

### 重复性检查

使用同一辆卡车装载矿石，在同一计量站进行重复测量，用两次结果的相对误差衡量仪器重复性：

当矿石铀品位大于0.025%时，相对误差在±5%以内；

当矿石铀品位为0.015-0.025%时，相对误差在±7.5%以内。

### 线性检查

利用已知活度的四个放射源分别在三个探头固定位置上测量的计数率进行评价：

每个探头的四组活度值和对应计数率的相关系数应大于0.999；

各次线性检查的计数率也可用于仪器长期稳定性评价，即各次相应计数率的相对误差在±5%之内。

### 一致性检查

使用两台或两台以上计量站时，必须作一致性检查，检查应在相同测量条件下进行。用同一矿车矿石（品位在0.015%-0.5%）在不同计量站测量，任意两台计量站测量结果相对误差在±7.5%以内。

(3)

式中：

δ—相对误差；

Nj，Ni—任意两台仪器测量值，%；

N—多台仪器测量值的平均值，%。

# 测量方法

## 动态测量

卡车不停车通过计量站，以3~10km/h速度匀速通过。

具备现场车速检测、矿车信息识别、LED屏显、声光提示、故障自检、现场照明、数据传输等功能。

## 本底测量

矿石运输卡车满载不含放射性物质的沙石（零值模型）不停车通过计量站进行测量，以确定本底值。

## 计数率校正

矿车满载矿石通过门式计量站进行不停车测量，并对每个探测器的原始测量计数率进行死时间修正，死时间修正公式：

（4）

式中：

—探测器原始计数率，s-1；

—探测器修正后计数率，s-1；

—探测器死时间，μs。

## 矿石称重

矿车自身称重并显示重量，矿车应定期（建议每季度）在地磅上进行重量校正。矿石称重主要用于金属量计算以及根据卡车装载吨位修正铀品位。

# 换算系数确定

## 谱段确定

本规范推荐的特定能区（以下简称为谱段）必须包括钍、铀、钾元素的特征能量峰，其中受地层散射射线影响较大的低能区（≤0.4MeV）不列入用于定量解释的谱段，本规范推荐的谱段如下：

钍谱段的能量范围必须覆盖钍系2.62MeV的主特征峰：2.0MeV ~2.8MeV；

铀谱段的能量范围必须覆盖铀系1.76MeV的主特征峰：0.4MeV ~2.0MeV；

钾谱段的能量范围必须覆盖钾1.46MeV的主特征峰：1.3MeV ~1.6MeV。

## 铀道净计数率确定

伽马能谱测量，铀能区中包含了钍射线散射后的影响，一般钍在铀能区的影响与钍在钍能区的总计数率呈现一定的相关性，因此铀道净计数为：

（5）

式中：

U净计数—铀道净计数率，s-1；

U总计数—铀道总计数率，s-1；

Th总计数—钍道总计数率，s-1；

k—钍对铀道的影响因子。

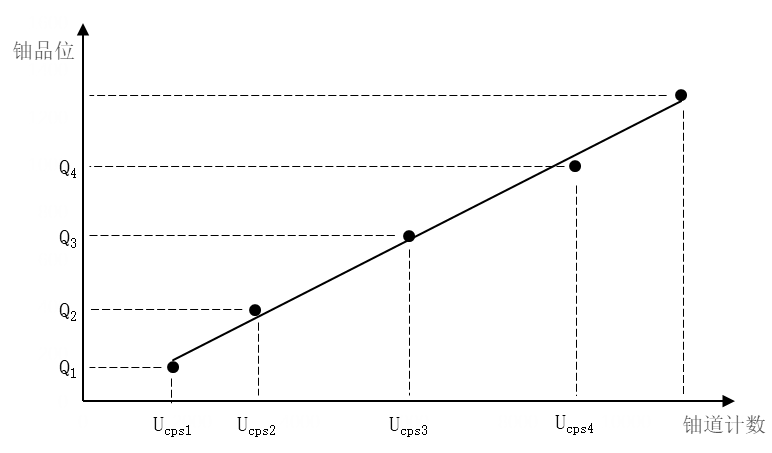
## 换算系数确定方法

利用已知品位的若干品级铀矿石（Q1、Q2、Q3┄），装满卡车后经过计量站测量得到相应的铀道净计数率（U净计数1、U净计数2、U净计数3┄），根据最小二乘法原理拟合求取换算系数K1和K2

其中：

（6）

（7）



**图2 最小二乘法求取换算系数示意图**

换算系数一般一年标定一次，新建计量站投产或应用新的矿车类型，需要重新标定计算换算系数。遇有下列情况之一应重新确定：

1. 探测器晶体或光电倍增管检修调试或更换后；
2. 多台计量站间的一致性超差后；
3. 计量站探头与地面间的距离发生明显改变后；
4. 矿车类型改变。

# 矿石铀含量确定

## 铀含量的计算

当矿车以一定速度（如5km/h）匀速驶过检测通道时，伽马探头从车头进入通道时刻开始，记录每测点的伽马能谱信息，动态扫描面示意图如图3所示。



**图3卡车计量站系统动态扫描面示意图**

将每条伽马能谱划分为三个能区，分别为低能区（0～400keV）、铀能区（400～2000keV）和钍能区（2000～2800keV），其中低能区会受到散射伽马射线影响，故将低能区舍去以提高计算的精度；铀能区计数率用于计算矿石铀品位；钍能区用于修正钍矿石对测量结果的影响（图3）。

**图3品位计算方法的能区划分图**

将矿车驶过检测通道的铀能区净计数记录，并绘制成扫描曲线，其模拟仿真结果如图4所示。

**图4模拟仿真的扫描曲线示意图**

其中红色区域为矿车车斗通过时产生的有效计数区域，该区域的平均计数率与矿车所载矿石的平均含量成正比，即通过计算检测系统每组探测器获得的有效区域的平均铀净计数率，以根据公式（8）求解出矿车所载矿石的平均含量。

‾Q=K1×Σ（U净计数-U本底）+K2 （8）

其中：

‾Q--矿车所载矿石的平均含量，%；

U净计数—铀道净计数，s-1；

U本底—本底测量中的铀道净计数，单位s-1；

K1—换算系数，见公式6；

K2—换算系数中的常量，见公式7，%。

## 铀含量的修正

### 矿石铀镭平衡系数修正

对铀镭平衡遭破坏的，计量站对矿石测量结果应进行铀镭平衡修正，方法为：

Q=Q’/Kp (9)

式中：

Q—修正后有铀含量，%；

Q’—修正前铀含量，%；

Kp—铀镭平衡系数。

### 矿石射气系数修正

对松散的、孔隙度较大的矿石，计量站对矿石测量结果应进行射气系数修正，方法为：

Q=Q’/（1-η） (10)

式中：

Q—修正后铀含量，%；

Q’—修正前铀含量，%；

η—矿石射气系数。

### 矿石湿度的确定

矿石湿度修正方法为：

Q=Q’/（1-W） (11)

式中：

Q—修正后铀含量，%；

Q’—修正前铀含量，%；

W—矿石湿度，%。。

### 矿石修正后的铀含量

对上述所计算的矿石铀含量分别进行矿石铀镭平衡系数、射气系数及湿度等影响因素的修正，计算公式如下：

（12）

式中：

Q—矿石修正后铀含量，%；

—矿石修正前铀含量，%；

Kp—矿石铀镭平衡系数；

η—矿石射气系数；

W—矿石湿度。

### 矿石装载重量要求和修正

铲车司机应进行岗前培训，对同一型号运输卡车要求每次装运量尽量保持为满载状态，对实际超载或者欠载的车辆测量结果，需根据装载重量要进行修正，将结果修正到仪器标定时装载重量对应的品位值。修正方法如下：

Qc= Qo\*(Ld\*A+B)/(Lp\*A+B) （13）

Qc—修正后铀含量，%；

Qo—修正前铀含量，%；

Ld—车型标定时矿车的实际载重量，t；

Lp—矿车通行时的实际载重量，t；

—重量线性校正参数斜率；

—重量线性校正参数截距；

# 测量结果的对比验证

## 矿石区块品位结果对比

在矿石区块的矿石吨数大于20000t时，并且扫描测量的吨数与矿石区块吨数误差小于5%时，扫描的平均铀品位与矿石区块地质模型平均品位误差在±10%以内。

## 水冶厂反算供矿品位对比

通常对比时间段为一年或半年，在相应期间内供给水冶厂矿石的平均扫描铀品位与同期水冶厂反算矿石铀品位进行对比，二者铀品位相对误差在±5%以内，铀金属量相对误差在±5%以内，否则应查明原因。

水冶厂反算供矿品位应充分考虑产品量、压槽量、浸出率、水冶回收率等因素。

# 仪器维护与安全防护

## 仪器维护

扫描设备必须按照说明书和相应规定进行维护。

红外探测器表面积灰引起失灵，应清理表面

计量站探头更换晶体或光电倍增管等重要元器件会引起仪器灵敏度变化，必须重新标定和检查。

## 安全防护

扫描现场应具备安全保障措施，否则不允许进行扫描工作。

从事矿车司机作业的人员应经过培训，并取得健康、安全和环保培训合格证书才允许正式上岗。

矿车在通过计量站门架时应正对门架中间并按规定速度匀速通过。

计量站周边应有夜间照明设施。

# 附录A模型标准制作方法

## 方案一：铀矿石模型标准

零值模型用不含放射性物质的沙石制作，以确定本底。

在线检测系统必须经过刻度才能准确测量车载矿石品位。本系统需采用矿车满载均匀标准矿石或刻度模型来对检测系统进行定期刻度检查。因此必须在采矿现场准备最多六种不同含量320t的矿石样品，其含量应包含：废石（0～100×10-6），次经济品位矿石（100～150×10-6），低含量矿石（150～400×10-6），中等含量矿石（400～700×10-6），高含量矿石（700～1000×10-6），特高含量矿石（＞1000×10-6）六个不同等级。

首先应将不同品级的标准矿石物料破碎到一定粒度，然后进行混合使其均匀，最后取样分析确定矿石含量。

使用现场的矿石样品作为刻度标准样，其制作成本较低，但这种刻度标样在重复使用后的一致性较差。此外，也可以将矿石样品制成标准模型块，每次刻度前将模块吊装到矿车上即可。



**图6标准物料堆**

## 方案二：吨装袋模型标准

由于海外露天铀矿采用的矿石运载卡车载重量达320t，要对门式矿车计量站进行准确的刻度校准就必须设计与卡车装载形态相近的标准刻度模型，并且该模型还必须满足测量参数稳定、适合不同类型车辆（湖山矿目前主要有90-320t共5种不同型号的车）、可重复使用、易于装卸等要求。

初步设计的刻度模型拟采用现场采集的不同品位的矿石制作标样，将制作好的标样装入吨装袋，每袋重量约为1~2t，成为可重复使用的标样袋。每种品位标样总重量不少于100t。使用时，在矿车车斗内先装入2/3的废石，之后用吊车将同一品位标样袋均匀码放在废石上部，要求覆盖全部车斗上部表面，覆盖厚度不小于1m，且外层堆形轮廓与实际矿车装载堆形一致，整体装载重量也与实际矿车重量一致。完成标样袋堆放后的矿车便成为一个扫描站刻度的标准模型，可对矿车计量站进行标定。拟制作的标样袋和矿车堆放形态见图7所示。

|  |  |
| --- | --- |
|  | **集装袋** |
| **图7 矿车标样堆放形态示意** | **图8 标样袋外观** |

矿石标样选择100×10-6、500×10-6和1000×10-6三个品位分别制作，每种不少于100t。标样矿石颗粒直径控制在2～5cm，同一品位标样矿石经粉碎、筛选后均匀混合。采用等间距网格取样的方式取样后，进行铀含量实验室分析，取所有分析样品的平均值作为该品位标样的标准