

# 变电站 X 射线检测的防护措施

郭涛涛<sup>1</sup>, 王达达<sup>1</sup>, 于 虹<sup>2</sup>, 吴章勤<sup>3</sup>, 郭铁桥<sup>4</sup>

(1. 呼和浩特供电局, 呼和浩特 010051;

2. 云南电力试验研究院(集团)有限公司 电力研究院金属研究所, 昆明 650217;

3. 云南电力试验研究院(集团)有限公司 电力研究院高压研究所, 昆明 650217;

4. 华北电力大学 机械工程系机电教研室, 保定 075001)

**摘要:**通过对射线强度衰减的计算,得出公众人员与现场操作人员的安全距离。然后设计出现场操作人员的铅屏蔽装置,使得操作人员在距离射线源 20 米处即可处于安全状态。最后通过昆明疾控中心的试验验证,得出了安全距离与防护设备的有效性。

**关键词:**X 射线; 缺陷尺寸; 计算方法

中图分类号: TPXXX; TG115. 28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2013)03-0-0

## Research on Protection Measures of Substation X Ray Detection

GUO Tao-Tao<sup>1</sup>, WANG Da-Da<sup>1</sup>, YU Hong<sup>2</sup>, WU Zhang-Qin<sup>3</sup>, GUO Tie-Qiao<sup>4</sup>

(1. Hohhot Pouer Supply Bureau, Hohhot 010051, China;

2. Yunnan electric power test & Research Institute(Group) High Voltage Research Institute of Electric Power Co Ltd, Kunming 650217, China; 3. Yunnan electric power test & Research Institute of Metal Research(Group)

Electric Power Research Institute Co Ltd, Kunming 650217, China; 4. Electromechanical Department of Mechanical Engineering Department of North China Electric Power University, Baoding 075001, China)

**Abstract:** Through the calculation of attenuation of X-ray intensity. And then design the site operators lead shielding devices, allows the operator can be in a safe state for 20 meters in distance with the ray source. Experimental verification of the Kunming CDC proved that the distance is safe and the protective equipment is effective.

**Keywords:** X-ray; defect size; calculation method

近年来,X 射线检测和成像技术在工业、医疗和化工等领域得到了广泛应用。然而,X 射线能量高,工作时会引起电离辐射。电离辐射对人体而言是有害的,接受过多的辐射会引起机体细胞功能下降,进而引发各种病症。

为了防止对健康危害的确定效应,尽可能减少随机效应的发生率,我国制定了一系列 X 射线防护方面的标准和规则,如《工业 X 射线探伤放射卫生

防护标准》,《500 kV 以下工业 X 射线探伤机防护规则》,《工业 X 射线探伤卫生防护监测规范》,《医用 X 射线诊断卫生防护监督规范》,《便携式 X 射线检查系统放射卫生防护标准》,《医用诊断 X 射线防护玻璃板标准》等。同时,国内外的研究者也投入大量精力研究开发新型 X 射线防护材料和防护用具,如防护眼镜,防护服,防护手套等。笔者通过试验研究与专业机构的验证得出了公众人员与专业操作人员的防护安全隔离,并设计了射线防护装置。

### 1 射线防护方法

云南电力研究院选用的 DR 系统为 GE 公司的 DXR250V 平板探测器和 ERESCO MF4 系列的便

收稿日期: 2012-04-23

基金项目: 云南电网公司重点资助项目《基于 X 射线的电力设备数字成像透视检测系统研发与应用》

作者简介: 郭涛涛(1986—), 男, 硕士, 研究生, 主要从事电力设备的 X 射线检测工作。

携式 X 射线机,见图 1。X 射线机最大管电压为 300 kV,最大功率为 900 W。



图 1 成像板与射线机

目前射线防护主要考虑 3 个因素:时间、距离和屏蔽层。在进行 X 射线试验时尽可能做到工作时间短,远离有效照射区域,屏蔽防护好。

(1) X 射线只在施加电压后的试验过程中产生,在试验完成后及时地关闭射线机就能立刻停止产生 X 射线。同时在检测时也尽量选择少的曝光时间。

GE 公司的 DXR250V 平板探测器,设定 2 s 的时间内采集 1 张图片,针对变电站设备一般比较大、比较厚重的特点,一般选择 8 s 的曝光时间,将采集到的 4 帧图像进行叠加效果会比较好。由于照射时间与所接受的剂量成正比关系,DR 系统相对于  $\gamma$  射线检测与 CR 检测技术已经大大缩短了曝光的时间,对操作人员与被检测设备都起到了一定的保护作用。

(2) 照射剂量与离射线源的距离平方成反比,增大与辐射源距离可以降低受照剂量,减少对人体伤害。

根据国家标准 GB 22448—2008《500 kV 以下工业 X 射线探伤机防护规则》,人员在 1 h 内吸收的剂量不能大于  $40 \mu\text{Sv}$ 。 $1 \text{ mGy/h} = 1 \text{ J/kg}$ , 则  $40 \mu\text{Sv/h} = 40 \times 10^{-6} \text{ J/kg}$ 。设 X 射线辐射强度为  $I$ ;受照面积为  $S$  的人在  $R_2$  处射线源张开的立体角为  $S/R_2^2$ ;质量为  $m$  的人在单位时间内接受的辐射剂量为  $I(S/(mR_2^2))$ , 则 1 h 内接受的计量为  $3600I(S/mR_2^2)$ 。取现场工作人员的身高与体重分别为 200 cm, 100 kg, 则操作人员的正面面积为  $S = 0.74 \times 2 = 1.48 \text{ m}^2$ ,  $(S/m) = 0.0148$ , X 射线机的辐射强度为:

$$I = c \frac{\mu i}{4\pi} \quad (1)$$

上式中  $c$  为一般工业 X 射线推荐选择系数值为 0.36,  $\mu$  为射线机最大电压 300 kV,  $i$  为电流 3 mA, 得到射线强度为  $I = 0.36 \{(300 \times 3)/4\pi\} = 0.026 \text{ J rad}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。根据公式:

$$3600I \frac{S}{mR_2^2} \leq 4 \times 10^{-5} \text{ J/kg} \quad (2)$$

式中: $m$  为人体的质量。

得出  $R_2 = 59 \text{ m}$ , 选取  $R_2 = 60 \text{ m}$ 。一般情况下选取  $R_2$  为一般公众人员的安全距离,并以其为直径为边长设置方形保护区。

由于控制电缆的长度与工况设置复杂等原因,一般选取工作人员的安全距离为  $R_1$  为  $20 \sim 50 \text{ m}$ , 所以对工作人员要进行必要的屏蔽防护措施。

(3) 在辐射源与操作人员之间添加吸收物质, 屏幕射线能量, 降低射线对人体的伤害。由于控制电缆长度在 30 m 左右, 所以操作人员进行试验时一般都在 30~50 m 处, 因此必须对操作人员进行一定的防护。由于铅具有耐腐蚀, 在射线照射下不易损坏和强衰减 X 射线的特性, 所以选择铅屏蔽装置作为现场操作人员的防护装置。

选择 30 m 作为操作人员的安全设定距离, 保证在距离最小的情况下操作人员也处在安全范围内。假设 X 射线机管电压为  $u$ , 管电流为  $i$ , 电能转化为辐射光子能量的比例系数为  $c$ , 不同的射线机  $c$  值也不相同。在此, 不考虑电能转化为热的部分, 即电能全部转化为辐射光子能量, 即  $c=1$ , 得到的光子辐射能大于实际值, 以此计算得到的屏蔽层厚度也大于实际值, 因此是绝对安全的。

X 射线机的辐射强度为:

$$I_0 = \frac{\mu i}{4\pi} \quad (3)$$

经过距离  $R_1$  后, 其强度减弱为:

$$I_i = \frac{I_0}{R_1^2} = \frac{\mu i}{4\pi R_1^2} \quad (4)$$

强度为  $I_i$  的射线, 经过厚度为  $d$  的屏蔽层后, 其强度衰减为  $I_i B e^{-\mu d}$  (其中  $B$  为积累因子,  $\mu$  为光子在物质中的线衰减系数,  $d$  为屏蔽层厚度,  $e$  为自然对数的底)。受照面积为  $S$ 、离射源距离  $R_1$  的射线操作人员单位时间内接受的剂量为:

$$\frac{I_i B e^{-\mu d}}{m} = \frac{\mu i S B e^{-\mu d}}{4\pi m R_1^2} \quad (5)$$

那么每小时的接受剂量为:  $3600 (\mu i S B e^{-\mu d}) / 4\pi m R_1^2$ 。根据国家标准《500 kV 以下工业 X 射线探伤机防护规则》, 操作人员在 1 h 内吸收的剂量不

能大于  $40 \mu\text{Sv}$ 。光子辐射能量为:

$$E = \frac{3ui}{4\pi n R_1^3} \quad (6)$$

表 1 为经过铅屏蔽后各向同性点源的剂量积累因子  $B$ 。表 2 是强衰减宽 X 射线束的近似半价层厚度  $T_{1/2}$ ;表 3 为在光子流密度,操作人员离射源的距离  $R_1$  为 20 m,管电流  $i=3 \text{ mA}$  的条件下不同电压等级时 20 m 处所需的铅屏蔽层厚度。

表 1 各向同性点源的剂量积累因子  $B$

辐射能量 /MeV	$\mu d$						
	1	2	3	7	10	15	20
0.250	1.08	1.14	1.21	1.30	1.37	1.45	1.57
0.500	1.22	1.38	1.61	1.83	2.09	2.36	2.68
0.662	1.29	1.50	1.84	2.25	2.60	3.06	3.57
1.000	1.37	1.67	2.19	2.89	3.51	4.43	5.36
1.250	1.39	1.74	2.36	3.25	4.10	5.47	6.88
1.500	1.40	1.77	2.41	3.43	4.38	5.90	7.44
4.000	1.27	1.57	2.27	3.15	4.99	9.54	15.20

表 2 强衰减、宽 X 射线束的近似半价层厚度  $T_{1/2}$

峰值电压 /kV	$T_{1/2}/\text{cm}$		峰值电压 /kV	$T_{1/2}/\text{cm}$	
	铅	混凝土		铅	混凝土
150	0.030	2.24	250	0.088	2.8
200	0.052	2.50	300	0.147	3.1

表 3 不同电压等级下 20 m 处铅屏蔽层最小厚度

X 射线管 电压/kV	屏蔽层厚 度/mm	X 射线管 电压/kV	屏蔽层厚 度/mm
150	$\geq 5.1$	250	$\geq 15.8$
200	$\geq 9.1$	300	$\geq 27.1$

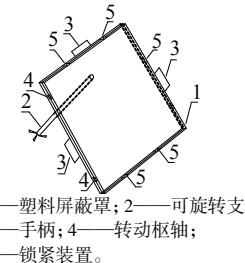
将  $B$  带入  $600[(\mu i S Be^{-\mu d} / 4\pi n R_1^2)] \leq 4 \times 10^{-5}$ , 经过依次计算,当计算值与表内  $\mu d$  值相等时就得到了需要的  $\mu d$  值。再根据公式  $\mu = 0.693/T_{1/2}$ , 得出  $\mu$  值。从而求得铅屏蔽层厚度  $d = \mu d / \mu$ 。表 3 给出了在 20 m 处铅屏蔽所需的小厚度值。

通过对铅屏蔽层厚度的计算,以及结合现场试验工况(一般电网设备比较厚重、体积较大,会用到高电压和大电流)。选择 28 mm 的铅板作为铅屏蔽装置。图 3 即是设计的屏蔽装置。

## 2 防护措施的验证

### 2.1 工作现场射线辐射量检测

根据标准 GBZ 117—2006 要求,在管电压低于



1—塑料屏蔽罩; 2—可旋转支架;  
3—手柄; 4—转动枢轴;  
5—锁紧装置。



图 2 射线屏蔽装置

200 kV 时,距其焦点 1 m 处的漏射线比释动能率应不大于 2.5 mGy/h,而在高于 200 kV 时应不大于 5 mGy/h。

选用为 B-0519 在线  $\text{x},\gamma$  射线巡检仪,检测条件为管电压 300 kV,管电流 3 mA,射线发射口用铅堵头堵住,对操作人员进行铅屏风防护,试验现场为变电站检测现场。检测位置按照《工业 X 射线探伤放射卫生防护标准》标准选取了不重复的 12 个点进行检测。

图 3 是检测位置布置情况,在 1,3,5,7,9~16 号 1 m 监测点处,分别测得空气比释动能率为 2 024,616,704,704,968,1 584,4 136,1 936,1 232,1 276,1 144,1 320  $\mu\text{Gy}/\text{h}$ ,其本底为 0.05~0.06  $\mu\text{Gy}/\text{h}$ 。

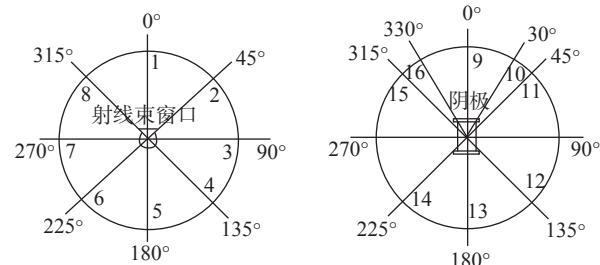


图 3 检测位置布置情况

从以上检测数据可见,只有在位置 11(射线发射口偏 45°)处的空气比释动能率最大且小于 5  $\text{mGy}/\text{h}$ ,其他位置的均远小于 5  $\text{mGy}/\text{h}$ ,且小于 200 kV 以下的 2.5  $\text{mGy}/\text{h}$  的标准,可见对于 200 kV 以下电压就没有检测的必要了。

去掉铅堵头,测点与 X 射线出口角度大约 180° 来模拟现场对设备进行透视检测的试验。利用巡检仪对 20,60 m 处进行检测。表 4 为试验的检测数据,其本底为 0.05~0.06  $\mu\text{Gy}/\text{h}$ 。

根据国家标准在空气比释动能率大于 4  $\mu\text{Gy}/\text{h}$  的范围设为控制区,可见在 60 m 处进行设置警戒线已足以达到安全的要求,并可证明推导出的计算公式基本准确。20 m 处最大电压下的空气比释动

**表4 20与60 m处不同电压等级下空气比释动能率**

离射线源距离	电压等级/kV					
	300	250	200	150	120	80
20 m	74.21	61.56	40.39	24.46	8.62	6.28
60 m	3.78	3.58	2.09	0.85	0.16	0.12

能率为  $74.21 \mu\text{Gy}/\text{h}$ , 远大于  $40 \mu\text{Gy}/\text{h}$ , 所以必须对操作人员采取一定的防护措施。

在 20 m 处加上 28 mm 厚的前屏蔽层, 未使用铅堵头, 测点与射线出口角度大约  $180^\circ$ , 再对该处的空气比释动能率进行测量。表 5 是此次的检测数据。

**表5 加屏蔽层前、后空气比释动能率**

X 射线管电压/kV			
300		200	
屏蔽前	屏蔽后	屏蔽前	屏蔽后
74.21	10	40.39	3.6

观察表内数据, 可见在最大电压下辐射量减少到  $10 \mu\text{Gy}/\text{h}$ 。可见铅屏蔽层大大削弱了射线的辐射量, 可以达到对操作人员的安全防护要求。

## 2.2 射线探伤机房辐射量检测

根据 GBZ 117—2006, 专用探伤室的设置应充分考虑周围的放射安全, 探测室必须与操作室分开。探测室门的防护性能应与同侧墙的防护性能相同, 并安装门-机联锁安全装置和照射信号指示器。要求探测室屏蔽墙外 30 cm 处空气比释动能率不大于  $2.5 \mu\text{Gy}/\text{h}$ 。

选用检测仪器为 B-0519 型  $\text{x}、\gamma$  射线巡检仪, 检测条件为管电压 300 kV, 管电流 3 mA, 本底为  $0.05 \sim 0.06 \mu\text{Gy}/\text{h}$ 。可测得温湿度试验室墙处空气比释动能率为  $0.12 \sim 0.14 \mu\text{Gy}/\text{h}$ , 暗室墙处  $0.13 \sim 0.16 \mu\text{Gy}/\text{h}$ , 机房墙处  $0.10 \sim 0.12 \mu\text{Gy}/\text{h}$ , 机房门左侧缝处  $0.16 \mu\text{Gy}/\text{h}$ , 机房门正中处  $0.10 \mu\text{Gy}/\text{h}$ , 机房门右侧缝处  $0.45 \mu\text{Gy}/\text{h}$ , 机房门

顶正中处  $0.10 \mu\text{Gy}/\text{h}$ , 机房门底正中处  $0.06 \mu\text{Gy}/\text{h}$ , 操作位处  $0.09 \sim 0.11 \mu\text{Gy}/\text{h}$ , 楼上处  $0.07 \sim 0.09 \mu\text{Gy}/\text{h}$ 。

观察上述数据可以得出, 检测所得空气比释动能率远远小于标准的规定, 说明该 X 射线机房在 X 射线机额定的工作条件下, 放射工作环境辐射水平符合规定的要求。

## 3 结论

通过专业机构在变电站现场对射线机 1 m 处漏射线空气比释动能率的检测以及在 20, 50 m 处辐射剂量的检测, 验证了 DR 系统在变电站设备检测的安全可行性。自主研发的铅屏蔽装置保证了现场操作人员射线检测时的安全防护工作。

结合相关国家标准与射线防护的知识、利用光学知识计算操作人员实际受照面积、能量守恒得出射线辐射能量变化等各方面知识推导出近似的辐射计算公式。该公式能较好地保证工作人员的安全距离, 在 20, 60 m 处的计算值均能符合标准规定值。

其他射线检测领域应将公式的计算值与测量值进行对照, 并以测量值为准来采取安全防护措施。

## 参考文献:

- [1] 李兆太.  $\gamma$  射线探伤安全防护计算 [J]. 无损探伤, 2004(2): 413—416.
- [2] 颜祥富, 魏伟胜.  $\gamma$  射线检测技术在分馏塔故障诊断中的应用 [J]. 无损检测, 2011, 33(5): 28—30.
- [3] 菅杰丽, 于志军. X 射线探伤机生产人员外照射剂量当量监测结果与分析 [J]. 无损探伤, 2004(2): 427—429.
- [4] By L G H. SARSFIELD, M. Sc. (Eng.), Member. Safety measures in X-ray work, including high-voltage flexible cables [J]. Electrical Engineers, 2010, 19(3): 253—270.
- [5] Taylor, Lauriston S. The economic features of X-ray protection [J]. Journal of Applied Physics, 2009, 32(1): 598—603.

## 摘要撰写

摘要是以提供文献内容梗概为目的, 不加评论和补充解释, 简明、确切地论述文献重要内容的短文, 因此, 必须符合拥有与论文同等的主要信息的原则。摘要可包括研究工作的主要对象和范围, 以及具有情报价值的其它重要信息, 内容不应

空洞、过简, 应具备四个要素, 即研究目的、方法、结果和结论, 其中, 后两个是最重要的。中文摘要一般为 200 字左右, 如需要可以略多; 英文摘要内容应与中文摘要一致。