

电子设备接地是对抗高空电磁脉冲的基本防护吗？

IS THE ELECTRIC EQUIPMENT GROUNDING THE BASIC PROTECTION MEANS AGAINST HEMP?

作者：Vladimir Gurevich博士 以色列电子公司

转载自《电磁干扰与兼容》

本文讨论了雷电电磁脉冲（LEMP）和高空核爆（NEMP或HEMP）的区别。文章还表明这些差别意味着不能将雷电电磁脉冲的经验应用到高空核爆中。作者质疑了将电子设备接地作为核电磁脉冲主要防护原理的有效性，即使在所有的管理文档和标准里都规定了这种防护方法。



当雷电（LEMP）击中接地设施（或者是一棵树、塔、建筑物或者避雷针）时，电磁脉冲（EMP）就发生了，这是一种自从人类存在就广为熟知的自然现象。在上个世纪，这个现象已被研究的很透彻，因此有些方法和技术已广泛应用于电磁脉冲防护。

对于高空核爆电磁脉冲（NEMP），当核武器在高空爆炸时（30-400公里），与发生在地面附近的情况有所不同。

美国于1962年进行了第一个核电磁脉冲试验。在这些试验中，对强电磁脉冲进行了记载，它们对电子设备、通信和电源线，射频和雷达站的影响巨大，甚至使夏威夷的街道照明系统失效，这离爆炸中心距离达1500公里。

在1962年秋天，前苏联也进行了三个高空核爆（每个容量为300千吨）以研究核电磁脉冲现象，其项目名称为“K项目”，在萨雷沙甘军事火力范围上空进行。

在这些试验中，记录的架空通信电缆中的脉冲电流高达3400A，导致出现幅度为28KV的脉冲电压；设备上安装的所有避雷器发生动作，保险丝爆裂，伴随着通信系统关闭；爆炸中心600公里以外的射频通信系统发生损坏；1000公里以外的射频定位系统发生中断；发电站的变压器和电源发生器发生损坏；架空传输线的绝缘体击穿。

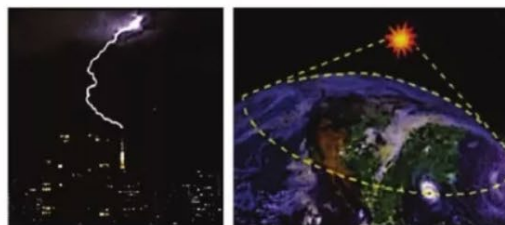


图1. 雷电和高空核爆的影响区域

还报道了拜科努尔航天发射基地的设备发生严重损坏。需要注意这指的是1960年生产的设备，即采用了机电单元和真空管的设备，它们比现代数字设备和基于微处理器的设备更能抵抗电磁脉冲。

两种类型的电磁脉冲对于目标产生的破坏性影响相似，并从两个方面进行了规定：应用于目标的非常高的电压脉冲幅度和流过这个目标非常高的脉冲电流，以及其他与这两个因素相关的间接电磁脉冲后果，这是非常危险的，它们会损坏电气设备。

破坏性影响的类似性导致将已得到很好研究和测试的雷电防护方法和技术，逐步应用于核电磁脉冲。一个例子是雷电防护的基础性原理：通过最小可能阻抗进行接地，采用气体放电管和滤波器将脉冲能量转移到地。

真的是这样吗？雷电电磁脉冲和核电磁脉冲的规定如此类似就可以采用相同的防护方法和技术？

雷电电磁脉冲和核电磁脉冲的主要差别

实际上，雷电电磁脉冲是存在高电位差的两个电极间空气间隙的局部电击穿；云层和地（或者位于地面上具有地电位的物体），如图1所示。

然而，核电磁脉冲是一种分布电场，它会覆盖大区域，并会由于带电粒子的空间移动而影响离爆炸中心成百上千公里外的物体，如由于复杂物理过程产生电子和离子，这伴随着大气中的核爆发生，如图1所示。

而且，这种场结构是不均匀的，可以有条件地分成3部分：E1，E2和E3。E1是很短的电场脉冲，在地面附近形成2/25ns，场梯度为50KV/米的电场。E2是弱电场脉冲，其持续时间从几ms到几十ms。E3是很长的低电压

电场脉冲，它在电离媒质里具有变化的过程。这能持续几分钟，并在很远的导电媒质中产生巨大的准直流电流，如钢轨、管道、电缆和线缆。E1是威力最大，破坏

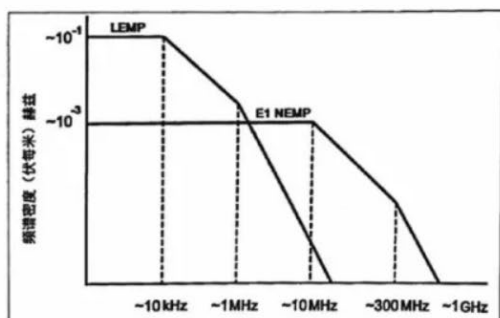


图2. 雷电电磁脉冲和核电电磁脉冲能量的频谱密度。

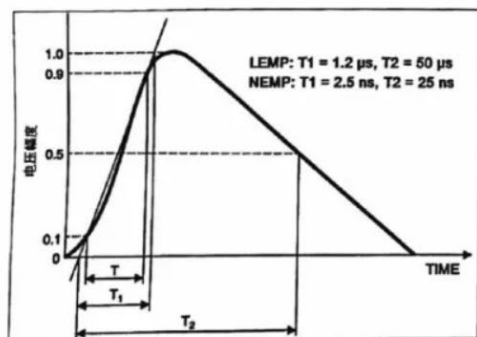


图3. 雷电电磁脉冲和核电电磁脉冲的时间参量差别。

性最强和最复杂的脉冲(从防护角度而言)。它具有垂直和水平极化部分。因此，当在本文中提到核电电磁脉冲时，意味着E1是主要分量。

与雷电电磁脉冲相比，核电电磁脉冲威力(图2)小些，时间短很多(图3)，但是它覆盖更大的区域，同时影响成千上万的设备；它比雷电电磁脉冲更危险。

如前所述，雷电电磁脉冲和核电电磁脉冲能在一定距离外重新定位。并以不同方式到达地面。雷电电磁脉冲通过电离通道重新定位。这些通道以单条或偶数条分支表示。情况差不多比较清楚。然而，对于核电电磁脉冲，情况要复杂得多。首先，核电电磁脉冲的电场接近地面，由地磁场产生，它相当不均匀。其次，电磁波以特定角度到达地面，因此，近地面的电场同时具有垂直和水平分量。第三，以一定角度到达地面的部分电磁能量，将发生反射，反射波与入射波发生叠加。

雷电电磁脉冲和核电电磁脉冲的差别，使我们认为它们对于地面上物体产生的效应不同。

实际上，如果我们采用10米金属杆，将它的终端插入土壤(垂直地)中，并把它接到一个电流传感器上，当雷电击中金属杆的开路端时，传感器将记录高幅度电流流过了金属杆，因为它的接地端具有零电位(有条件地)，虽然雷电导致它的上端具有高电位(相对于地)。

当我们将金属杆的底端与地表面进行很好的隔离，并将其垂直安装，那么在金属杆上将没有电流流过，即使我们假定雷电击中了它，这是因为在金属杆的两端不存在电位差(由于值很小，可以忽略金属杆终端对地的不同电容值)。

如果核电电磁脉冲影响相同的绝缘杆，那么它的两端将具有高电位差(理论上，几十Kv)，并且电流探头会记录下流经它的相对高的电流脉冲幅度。而且，金属杆两端会产生高电位差，即使它相对于地面是水平的。

如果我们将这个水平的金属杆一端接地，会发生什么?这个问题非常复杂，因为核电电磁脉冲穿透进土壤，并在土壤里直接产生梯度场。这种效应考虑了中性点接地的电力传输线模型以研究核电电磁脉冲效应。在这样的模型中，在线缆开路次端的对地电压取决于传输线的对地高度。线缆长度和土壤导电率^[1]。但是这个模型不是我们研究的绝缘终端金属杆情况，在我们研究的金属杆模型中，金属杆的一个接地端不会影响两端的电压梯度。

相同的效应会发生在安装于控制室机柜上的单个电子设备上，该控制室采用完全电气绝缘控制电缆(不考虑对地容量)连接它的输入。影响这些电缆的电场与地和它的电位无关。换言之，核电电磁脉冲在此类电缆两端产生电位差，即电磁脉冲源对于电子设备和地绝缘。它就像一个绝缘体内的充电蓄电池。

当蓄电池只有一个电极接地时，会发生什么呢?什么都不会发生!不仅对于蓄电池，而且对于从这个蓄电池接收功率的绝缘负载，什么都不会发生。

因此，如果我们将影响小的局部物体如内置电子设备的控制机柜的核电电磁脉冲接地，为什么会有事情发生呢?这个问题很重要并且高度相关。因为它直接影响了用于防护核电电磁脉冲的设备有效性。根据文献^[2]，“核电电磁脉冲波形的前期E1还会有效耦合到连接设备(电源线，信号线等)的短线上(1~10米)，并会感应传导到设备里面的大电压和大电流”。在该句中，与地无关。

不幸的是，很难在开阔测试场(OATS)模拟器中研究这个效应，该模拟器适用于同时测试之间具有电缆连

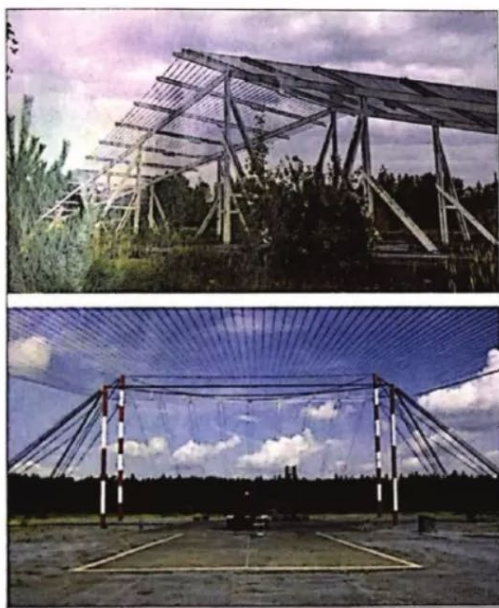


图4.单端口开阔场波导模拟器，产生垂直电场。

接的电气控制机柜组，因为大多数此类模拟器包括一个Marx发生器和两个电极：一个接地网格，另一个是置于接地网格上方5-20米的绝缘网格。如图4所示（称为单端口开路波导模拟器）。

将仿真的电脉冲场直接应用在这两个电极之间，以及上电极与地之间。在这个模拟器里，将被测设备（将屏蔽体和设备金属壳低阻抗连接到下电极）良好接地总能对于雷电测试有效防护起到一定作用。

下电极接地是由于需要模拟地反射对于测试区域内场影响的必要性。然而，相反地，根据IEC 61000-4-20^[7]。对于小的辐射测试设备，应将被测设备（EUT）置于测试区域地平面上的介质上。我们认为，为了研究 m 而提到的发生在大开阔场中的现象，在被测设备和下电极之间也可使用介质板，而不需要将被测设备接地。

将电子设备接地是防护核电磁场的主要防护方法

各种标准（包括民用和军用）以及不同的指南和建议，证明了将所有类型的电子和电气设备强制接地作为核电磁脉冲主要防护方法的必要性。但是为什么，如果对于核电磁脉冲（不像雷击），接地系统不是具有负电荷的另一个电极呢？

根据^[3]，“通常，接地的原因是变化的，如果不首先确定接地原因和接地系统应该实现的目标，就尝试规定接地程序是鲁莽的行为”。这些原因和目的通常基于系统功能，安全和射频干扰考虑，它们是接地系统设计的考虑方面，至少应添加的一个更多的目标（电磁脉冲加固），但是接地原因仍然不变。提供电子设备地的基本原因在于建立对于测试（或建立）信号和电源稳定的参考电位。

这些考虑是核电磁脉冲所有相关文档中标准接地方法推荐的一个原因，尽管对于核电磁脉冲接地不是一种清楚并已证明的防护方法。但是出于电子设备的功能性和安全考虑，以及参考电位的必要性是另一个直接接地解决方案因素^[4-6]。

同时，很明显，分支和空间分布式接地系统作为核电磁脉冲的一个巨型天线，从大区域里吸收能量，并通过接地回路将其直接传送到敏感电子设备上。当然，由于导电土壤作用，能量等级会部分降低。然而，那部分找到一定方式进入系统的能量足以导致高敏感性微处理器设备（如数字防护继电器-DPR）的电子电路上危险电位升高。

- “一个设备的许多元件以有效集电器的形式工作。它们提供了电磁脉冲能量的传播路径”。电磁脉冲能够耦合到如电源和电话线，天线塔，埋地管道和接地系统设施等结构上^[8]。

- “基于耦合计算，高达10KV的等级可能耦合到变电站的水平埋地电缆上（尽管某些场景下20KV也是可能的）”。

- “通常认为“接地”是回路的一部分，它是以相对低阻抗连接到局部地表面的那部分。然而，对于电磁脉冲防护，满足这个定义的特定接地设置可能不是最优的。甚至可能比不接地更糟”。

- “然而。对于核电磁脉冲防护，认为接地系统是瞬态进入系统的可能路径，也是瞬态分布于内部系统的一种方式^[10]。

关于接地，有两种对立观点出现在许多工程书籍和文献中，例如：

“因此。核电磁脉冲的主要效应是在火物体和导体如电源线。埋地电缆。天线，以及接地系统设施上产生大电压或大电流”（935页）…并且在同一页：“所有接地和搭接技术都是将核电磁脉冲感应电流导入地”^[11]。

“接地并不能直接提供对于电磁脉冲的防护（5-3页）…并且”“电磁脉冲防护需要接地…（5-5页）”^[8]。

这些观点可能产生怎样的结论呢？

实际上，这种设备的许多印刷电路板都具有它们自己的地，例如，称为零或参考电位的导体带状系统。设备运行所需要的所有其他电位都将相对于前者出现。作为一个规则，这种内部地会连接到金属体上，而金属体反过来连接到外部接地系统。接地系统的电位在通常雷击下会增加。同时，如果所有电子设备共享接地系统电位，如各种设备的零电位回路不具有电位差，这会增加公共电位及它与零的差别，这在所有设备内同时发生，不会引起这些设备的故障。

接地的整个理论都基于这个假设。即要求保持接地系统单元的最小阻抗，采用等位面等，换言之。这些方法致力于防止零电位回路之间的电位差，相互间距离，从而在不同点接地，但同时它们保持电气和信息连接。而且，在零电位回路上升时单个电子设备发生的问题未有所涉及。事实上，任何电子电路都包括许多非线性元件，它们具有电容和电感，并连接到零电位回路。因此，当电位上升时，回路不同点的电压和电流不会同时上升。

你可以想象它是一块支撑不同块重量的平板，这些块通过各种硬度的弹簧连接到这块平板上。如果我们逐渐将这块平板举起（即在逐渐增加电位能量过程中），静止在这块平板上的所有单元的电位能量将会同时增加。然而，如果我们突然举起这块平板，单元不会同时改变它们的位置和电位能量。而且，如果它们是机械组合，或许这甚至会导致这些连接的破裂。因此，等电位面的可用性和保持不同设备零电位回路的零差别不能保证高敏感电子设备不会产生故障。

实际中，当采用置于空间设施上的电子设备时，这非常困难，有时甚至不可能保持零电位回路的零电位差，特别是当接地系统像天线那样工作时，如图5所示。

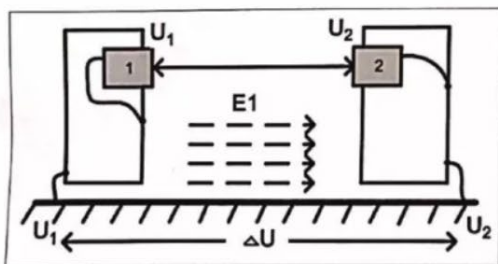


图5. 高电压对于电子设备输入端的影响。接地体里的输入端之间距离很远，进入系统的核电磁脉冲的E1分量会产生影响。

这种情况对于大能量产生设备和工业企业是真实存在的，如发电厂和变电站，炼油厂等。

对于电磁脉冲的防护设备

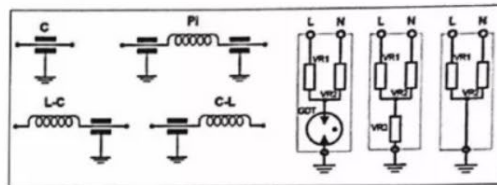


图6. 各种对于核电磁脉冲的LC滤波器的简化设计，以及采用并联单元将脉冲能量从输入转移到地的防护设备。VR—变阻器，GDT—气体放电管。

通常，设计用于防护核电磁脉冲过电压的设备会连接到需防护的回路和接地系统之间（共模防护），如图6所示。

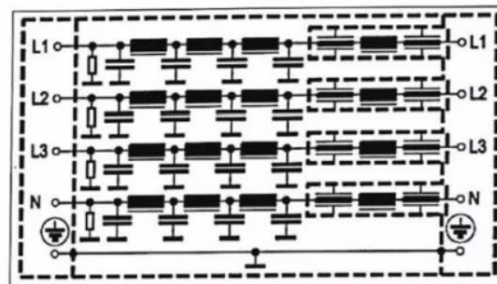


图7. 3相核电磁脉冲滤波器实际设计，该滤波器包括滤波器输入端和地间连接的非线性电阻（和电容器一起将能量转移到地）。

用于核电磁脉冲防护的特定滤波器包括将脉冲能量从滤波器输入转移到地的非线性单元，如图7所示。

另一个问题是应用在输入端和地之间，以及单个输入端之间的这些滤波器的参量差别，如图7所示。同时，在每个输入和地之间设计了主要防护。许多滤波器设计了只有一个输入端，一个输出端和接地体（图8）。因此，它们仅用于防护相对于地的高幅度脉冲的设备敏感输入，并将能量转移到地。

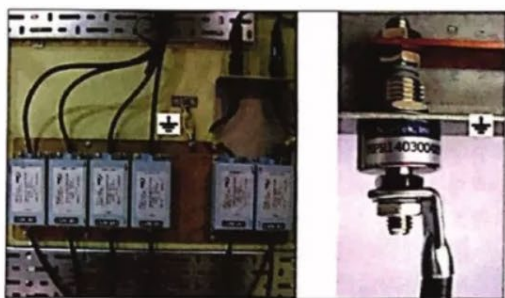


图8. 应用于设备输入端相对于地的核电磁脉冲防护滤波器。

然而，对于核电磁脉冲，当接地系统不代表反向电位或零电位区域，脉冲能量转移到何处呢？当类似的脉冲发生在接地电极，同时高电压脉冲发生在滤波器或过电压防护设备的输入端时，这种滤波器怎么减弱核电磁脉冲？

这些问题仍然亟待回答。因此，专家邀请关于这个问题展开活跃的讨论，因为接地可能不是解决方案，它更像是问题的一部分。

结论

采用电子和电气设备接地作为主要的核电磁脉冲防护，不仅有问题，还可能是危险的，它不会减弱核电磁脉冲，甚至增强了它对设备的破坏影响。然而，由于在所有管理文档里都规定了这种接地，这个问题需要进一步与相关专家进行讨论。（翻译：石丹）

参考文献

1. Scharfman W.E., Vance E.F. Electromagnetic Pulse Coupling and Propagation to Power Lines.' Theory and Experiments.-Final report AFWL-TR-73-287, Stanford Research Institute, 1974.
2. High-Impact, Low-Frequency Event Risk to the North American Bulk Power System. A Jointly-Commissioned Report of North American Electric Reliability Corp., and U.S. Department of Energy, November 2009 Workshop.-NERC, 2010.
3. Vance E. F. Electromagnetic-pulse Handbook for Electric Power Systems. - Report AD-A009 228, Stanford Research Institute, for Defense Nuclear Agency, 1975, 341 p.
4. Gurevich V. Functional Grounding of Digital Protective

Relays, -Transmission & Distribution, Australian Power Technologies, 2015, issue 6, PP.32-35.

5. Gurevich V. Accessible Methods Resilience of Power System Electronics to HEMP.-International Journal of Research Studies in Electrical and Electronics Engineering (IJRSEEE), 2016, vol. 2, issue 2, PP. 13-18.

6. Gurevich V. The Issues of Electronic Equipment Grounding at the Power Facilities.-International Journal of Research Studies in Electrical and Electronics Engineering (IJRSEEE), 2017, vol. 3, issue 1, pp. 11-19.

7. IEC 61000-4-20 Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 4-20: Testing and measurement techniques-Emission and immunity testing in transverse electromagnetic (TEM) waveguides.

8. TM 5-690 Grounding and Bounding in Command, Control, Communications, Computer, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance (C4ISR) Facilities. Headquarters Department of the Army, Washington, DC, 2002.

9. The Effects of Nuclear Weapons.-U. S. Department of Defense and Energy Research & Development Administration, 1977, 660 p.

10. Vance E. F. The Nuclear Electromagnetic Pulse.-Handbook of Electromagnetic Compatibility, Edited by Renaldo Perez, Academic Press, 2013.

11. Joffe E. B., Lock K. S. Grounds for Grounding; A Circui-to. System Handbook, Wiley, 2010.