征稿邮箱：bigbit@big-bit.com

基于高空电磁脉冲下通信设备保护的瞬态电压抑制器与滤波器选择技巧

Selection of transient voltage suppressor and filter based on high altitude electromagnetic pulse communication equipment protection

吴康

摘　要： 本文将从保护设备免受高空电磁脉冲产生的高频干扰与高压脉冲的影响二个方面分析着手，以通信设备为例对保护方案与瞬态电压抑制及滤波器应用选择为重点作分析说明。

关键词： 高空电磁脉冲，瞬态电压抑制，滤波器，高压脉冲干扰，通信与保护

Abstract: In this paper, the protection of equipment from high frequency interference and high voltage pulse caused by high altitude electromagnetic pulse is analyzed from two aspects.

Keywords: high altitude electromagnetic, pulse transient voltage suppression, filter, high voltage pulse interference, Communication and protection

前言

这些年，随着人工智能(AI)得益于大数据、云计算与互联网的发展，以至于在各领域如雨后春笋的开了花结了果。伴随而来的如何保护基础工程领域(如：电力、供水、通讯等)中电子设备免受各类电磁脉冲电有意破坏性电磁干扰，尤其是高空电磁脉冲(HEMP-Intentional Destructive Electromagnetic Interferences)带来的严重影响与损害，这将成为新的挑战。

当今作为电子设备高空电磁脉冲(能够在地面产生强度高达50kV/m的电场)的基本防护手段，它们在各个领域(包括军事系统)中的使用已经有很长一段时间了。这些手段包括滤波器、屏蔽电缆、金属屏蔽壳(法拉第笼)和脉冲电压限制器。同样的防护设备也在关键工业和电气电力与通信设备的保护装置中获得应用。这些都是让人工智能发展插上翅膀的有力举，是国家产业发展战略之需。

应该说，使用专门的LC滤波器来保护电气电子与通信设备免受高空电磁脉冲的破坏性影响被认为是一种常见的保护手段。然而在保护手段中如何应用性价比高(即简单、方便、效能与廉价)的电压抑制器代替昂贵的高空电磁脉冲滤波器却是不可回避免的问题，也就是说基于高空电磁脉冲产生的干扰下如何保护电气电子与通信设备对瞬态电压抑制与滤波器应用选择将成为重要话题。

据此本文将从保护设备免受高空电磁脉冲产生的高频干扰与高压脉冲的影响二个方面分析着手，以通信设备为例对保护方案特征应用及瞬态电压抑制和滤波器选择技巧为重点作分析说明。

从各自的物理特性考虑，其高电压脉冲和高频率干扰代表的两种截然不同类型的影响，所以对它们的防护能力的确认也应该通过两种截然不同的技术手段来进行。为此先从两个方面，即瞬态高压与高频的影响分别予以分析，然后对通信设备选用瞬态电压抑制器保护特征优势与LC滤波器选用的缺失作比较与研讨。

1　保护设备免受高空电磁脉冲产生高频干扰影响的高要求

对那些内部包含了集成电路的控制器和其他电子设备来说，必须要在高空电磁脉冲事件中对微控制器的损坏效应进行检查。由此应按照IEC 61000标准族的要求进行电磁兼容性(EMC)的测试。这是现代工业和电气电子设备都要遵守电磁兼容性标准的要求。为了设备的稳定性测试，这些标准会提供高频与高压干扰的要求，并将其施加到设备的输入端(即不同的输入端之间、集成输入端与本体之间)。例如，IEC 61000-4-12就规定通过对设备施加高频电压(频率为1MHz，幅度为2.5kV)来进行检查。IEC

61000-4-4 和 IEC61000-4-5 则规定以幅度高达 4kV 的短脉冲高频信号对设备的电路进行检查。IEC 61000-43 还规定在上至 2GHz 的频率范围内检查设备的抗高频干扰的能力。

换句话说，对于高频干扰，标准要求应该确保设备对包括高空电磁脉冲产生等干扰具有抵抗力。而事实上，高空电磁脉冲产生的干扰脉冲会比那些用于普通电磁兼容测试的标准脉冲要短得多。因此，不太可能仅通过满足电磁兼容的相关标准来确保设备具有抵抗高空电磁脉冲产生脉冲干扰的能力。

毕竟，对那些符合电磁兼容标准的、能够抗干扰的继电保护、控制和自动化设备而言，它们在高空电磁脉冲产生的很短的脉冲干扰作用下会失效。此外，用作快速瞬变 (EFT) 脉冲阻性测试的高空电磁脉冲影响的参数与普通电磁兼容测试中的电快速瞬变参数之间也只是在测试脉冲的幅度上有差别。

因此在保护设备免受高空电磁脉冲产生高频干扰影响的高要求下，使用专门的 LC 滤波器来保护设备免受高空电磁脉冲产生的高频干扰是有缺失之处，它是不能满足保护设备免受高空电磁脉冲产生高频干扰影响的高要求，这是不选择的原因之一吧。

2　压敏电阻和电压抑制器是保护设备免受高空电磁脉冲产生的高压脉冲干扰的理想选择

* 高空电磁脉冲产生的高幅度的电压脉冲被施加到设备电路的情况各不相同。而电磁兼容的相关要求、一致性测试检查的实施方法与实际高空电磁脉冲作用下影响到设备的过载水平相比都很不接近。尽管如此，还是会有一些众所周知的并被广泛使用的方法和技术手段，以保护设备免受高压脉冲的影响。例如，这些方法里就包括氧化锌压敏电阻器 (见下图 1 所示)。

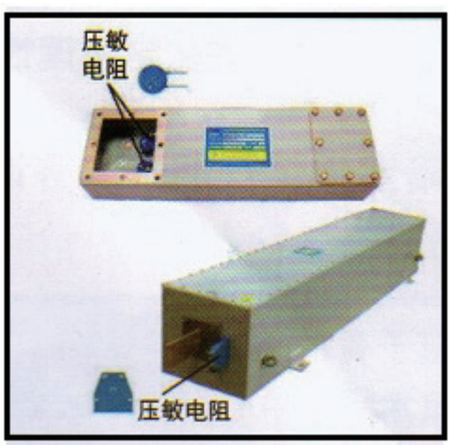

图 1　所示为氧化锌压敏电阻器

压敏电阻和电压抑制器都有一个所谓钳位电压的特征参数，即压敏电阻动作之后，压敏电阻和并联连接到压敏电阻的受保护设备上的剩余电压。作为电磁兼容标准的一般要求，需要对幅度为 2.5 ～ 4kV 的瞬态高压具备抵抗承受的能力，因此钳位电压为 500 ～ 600V 的大功率压敏电阻 (或者 TVS 二极管) 就能确保对设备形成可靠保护，使其免受高空电磁脉冲的影响。

从图 1 可知通过将压敏电阻器并联接到 (而不是接到电缆切口) 被保护设备上就可以保护控制和电源电路免受高空电磁脉冲的影响。压敏电阻器体积小巧、价格低廉，它的应用使得对设备的保护变得更加简单、便宜。有时，这种小的压敏电阻器的功耗不足以防止极高功率的高空电磁脉冲，因此许多电路必须通过附加大功率压敏电阻来进行防护，例如：交流和直流载流母线、公用电源等。有时，当使用到超灵敏设备的时候，可以使用模块化铁氧体环 (柱)，将其安装在保护电缆的外部，如图 2 所示为安装在电缆上的模块化铁氧体环，它们被用作超灵敏电子设备免受电磁干扰的额外保护。

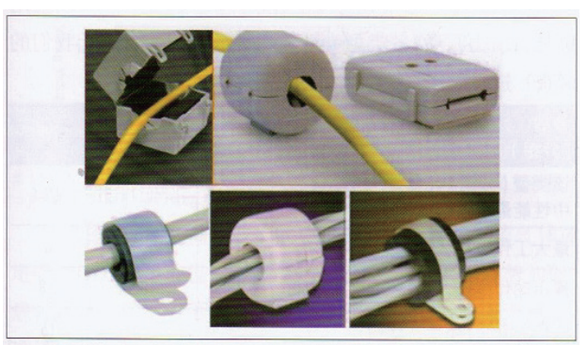

图 2　为安装在电缆上的模块化铁氧体环受电磁干扰的额外保护

此外，必须强调的是，大多数工业电子设备已经在它们的输入电路中配备了压敏电阻，例如：电源供电电路、继电保护电路的逻辑输入等。

但只有当迁到非常低内阻的保护设备时 (例如保护对象为蓄电池)，利用压敏电阻实现防护才会出现问题。这是

因为当高空电磁脉冲产生的电压脉冲被施加到该设备上的时候，由于低内阻，所以流过这种设备的电流可能足够大，再加上压敏电阻器动作下降电压不夠。在这种情况下会形成一个与被保护设备串联连接的感性扼流圈，其阻抗对于直流电流来说可以忽略不计，而对于短脉冲的高频信号而言是足够高，造成保护功能失效。

* 除此之外，对高空电磁脉冲短脉冲来说是非常重要的是应考虑设备保护的响应时间。为此，则选用暂态电压抑制器（TVS）如图 3 所示，它是一种基于雪崩二极管的所谓瞬态电压抑制器，比压敏电阻器更具优势。

图 3　基于雪崩二极管的所谓瞬态电压抑制器

* 在此需要指出的是为什么不需要任何高频高空电磁脉冲滤波器呐？因为：高空电磁脉冲滤波器非常昂贵，尤其是那些被设计用于大电流应用的大功率滤波器；在多个电路需要保护的情况下，标准方法将需要很多的高空电磁脉冲滤波器，而这会占用大量的空间，通常是不可行的；滤波器会被连接到控制和电力电缆的切口处，在有多个电路的情况下，这会妨碍滤波器的安装，从而使工作更加昂贵和更加困难。这是为什么不需要任何高频高空电磁脉冲滤波器原因之二吧。

3　现有电信设备保护的方案 -- 瞬态电压抑制器巧用

* 设计思想　应该使用简单，非常便宜，不可回收，但性能可以预测的保护装置。该装置基于一个特殊的瞬态电压抑制器，该器件所具备的参数能够满足并有效保护电信设备所必需的所有特性，例如：快速响应时间、低电容及低动作电压。在高空电磁脉冲影响的情况下，因为受到大电流脉冲通过带来的影响，瞬态电压抑制器（TVS 二极管）内部的 p-n 结会击穿，而它保护的电路将被旁路。

考虑到高空电磁脉冲事件并不经常发生，而且其脉冲也是单一的，非重复的，所以这种对设备实现保护的装置的工作方案也是可行的：即它一方面可以保护设备免受高空电磁脉冲的冲击，而另一方面在恢复过程中只需要断开被损坏的保护装置，就可以让它保护的设备恢复工作。

* 确保保护装置动作的选择性　瞬态电压抑制器应该只在高空电磁脉冲冲击出现的情况下击穿，而不应该在其他类型的、较弱的、重复出现的瞬变过电压影响出现的时候发生击穿。

这种选择性主要通过选择大功率的瞬态电压抑制器来实现，其次就是通过电阻来限制流过它的电流。对现有电信设备使用具有低动作电压与极低电容等一类瞬态电压抑制器来说，通过对参数分析与实践证明，例如应用新型的 S03—6 型瞬态电压抑制二极管（见图 4 所示）是效果最好的。

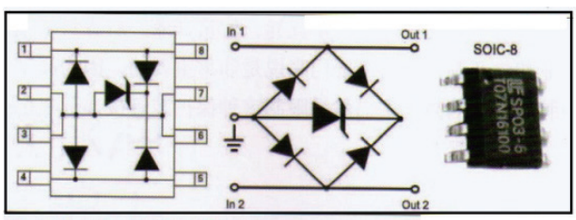

图 4　为 SP03—6 型瞬态电压抑制器二极管（TVS）

* 该瞬态电压抑制器特点与应用　是在具有相同的工作电压和电容值的前提下，它允许流过的脉冲电流最高可达 150A，效果更好。类似这样的一个小芯片可以保护单根双绞线线对免受共模（相对于参考电位而言的）和差模（导体之间的）的高空电磁脉冲的影响。而其批量购买价格不到 1 美元。

从图 4 电路图中可知，对串联接到抑制器每个输入端的电阻器而言，其阻值应该在 20 欧姆左右，以便限制流经抑制器的最大允许电流脉冲，防止幅度几千伏的脉冲瞬态干扰影响到保护装置的输入。用于限制电流的电阻器应该是无感的，而且应该适用多种类型的脉冲电流。

这种保护装置的设计方案使得它在工程化上非常简单（见图 5 所示），而且价格低廉。图 5 中为 6 对双绞线提供保护的装置的印刷电路板图，其中包括瞬态电压抑制器 S03—6 型和限流电阻器（R1-R12），而电路板应该涂刷高压漆。

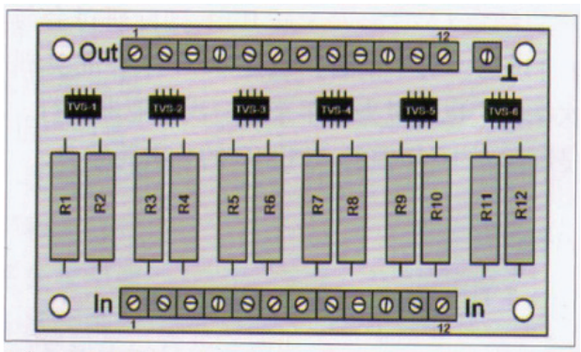

图 5 所示工程化非常简单见的为保护装置的设计

同样的原理也可以用来保护通过接插器件连接的敏感设备的输入（见图 6 所示），即是一种用于两对双绞线的简单保护装置应用的示例。

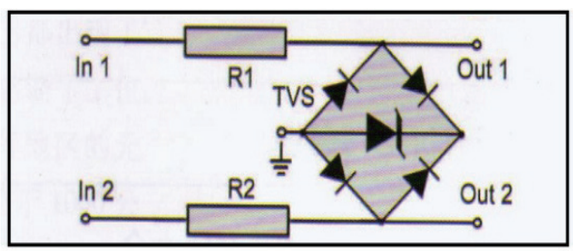

图 6 所示是一种用于两对双绞线的简单保护装置应用的示例

由于这些简单的设备的印刷电路板制造非常方便，因此可以很迅速的生产出所需数量的这种产品，而且质量优异、价格低廉。这对于电力工业和生产制造等民用部门来说是非常重要的，因为高空电磁脉冲保护的高成本仍然是限制这种保护装置被实际采用的一个主要因素。

由上高空电磁脉冲保护下通信设备选用瞬态电压抑制器保护特征优势的分析，可引导出以下为何不选用的 LC 滤波器的原因，从而瞬态电压抑制器与 LC 滤波器选择技巧也显而易见了。

4 作为高空电磁脉冲主要防护手段为何不选用的 LC 滤波器

4.1 先述 LC 滤波器是常规电磁环境下的保护理念

这防护手段中，LC 滤波器可以起到阻止高空电磁脉冲渗透进入一些关键的设备的作用。因为被认为是一种主要的防护手段，所以在国际电工技术委员会的标准中，它们会被专门说明。用专门的 LC 滤波器来保护电气和电子设备不受高空电磁脉冲和有意破坏性电磁干扰影响，如今现在被认为是具有常规合理性和强制性。为此目前，有数十家工业企业生产了数百种这类滤波器。此外，这些滤波器的使用范围并不仅限于电子、通信、管理和控制等设备，它们也可以被应用在一些大功率设备上，如具体用于额定电流 800A 和 1200A 级别的功率电路的高空电磁脉冲滤波器。目前的技术手段是将滤波器应用于各种类型的高空电磁脉冲防护设备中，而且市场上也能够提供不同类型的滤波器（包括那些被设计生产为穿墙套管形状的滤波器，以及被内置到多引脚连接器中的滤波器等等）。这些就使得那些被保护设备的开发人员逐渐认识到使用这些滤波器的必要性。例如，已有配备了大功率高空电磁脉冲滤波器的柴油发电机等设备。

但 LC 滤波器传统保护理念是有缺失的，要作为应用于电子与电气设备在大功率高空电磁脉冲保护装置有不尽人宜之处。

4.2 LC 滤波器缺失而不尽人宜之处

除了上述高空电磁脉冲产生的高频干扰下 LC 滤波器缺失而不宜适用的原因之一与之二外，还有以下原因之三与之四。

* 原因之三　在高空电磁脉冲是一种通过高电压、高频率对设备造成影响的复合干扰。因此，高空电磁脉冲滤波器既需要保护设备免受高电压脉冲的冲击，也需要保护设备免受高频率干扰的影响。然而，大多数高空电磁脉冲滤波器的工作电压是有限的，通常不超过几百伏特，而高空电磁脉冲的电压幅值可达 50kV。这意味着，如果将滤波器直接连接到受高空电磁脉冲影响的电路，那么这些滤波器将不可避免地被损坏。这就是为什么滤波器还应该配备额外的元件，以防止高幅度脉冲过载。按 MIL-STD-188-125 标准中就规定，须将这些保护元件与滤波器组合在一起，联合使用。此外，滤波器装备的这些保护元件，可以安装在箱内或箱外，由此造成了体积增大成本昂贵的不足之处。

* 原因之四　因滤波器通常的额定电压仅为数百伏特，但电磁脉冲感应信号可能会达到数千伏特；而如今的滤波

下转170页