

## 汽车音响直流电源滤波器的设计

作者：冯奇

德尔福中国技术研发中心

**摘要：** 本文通过介绍汽车直流电气系统的构成和直流滤波器的设计原则，针对汽车音响电源滤波器参数的确定进行介绍，尤其是对各种考虑因素（Over Voltage 和 ISO7637-2 中的各种脉冲模型）进行 Saber 和 MathCAD 仿真分析作为设计的参考。

**关键词：** 汽车音响、直流电源滤波器、瞬态传导干扰脉冲、阻抗失配、汽车电气系统、ISO7637、TVS

### 1. 汽车电气系统简述

近年来，随着汽车功能的不断增加和系统可靠性要求的不断提高，越来越多的电子控制单元（ECU）被引入到汽车设计中，汽车中的电气系统变得越来越复杂，已经成为汽车系统总成的核心。通常，汽车的电气系统分为供电系统和用电设备两部分。供电系统是指给用电设备产生、分配和传递电能装置的总称，它包括发电机、蓄电池、电线束、开关及继电器等，具有低压和直流的特点。汽车用电设备是指汽车电气系统中需要电源供给的设备，如：起动机、空调，音响，车灯，ABS 等等，其所需的电能由两个电源供给，即：发电机和蓄电池。其具有单线制供电特点，即：所有用电设备均并联。蓄电池和发电机的电源正极和各用电设备只用一根导线相连，而电源的负极搭接到汽车底盘上，俗称负极搭铁，利用发动机体、汽车车架和车身等金属机体作为一公共电流回路。下图为一汽车的电气系统概要框图（见图 1）。

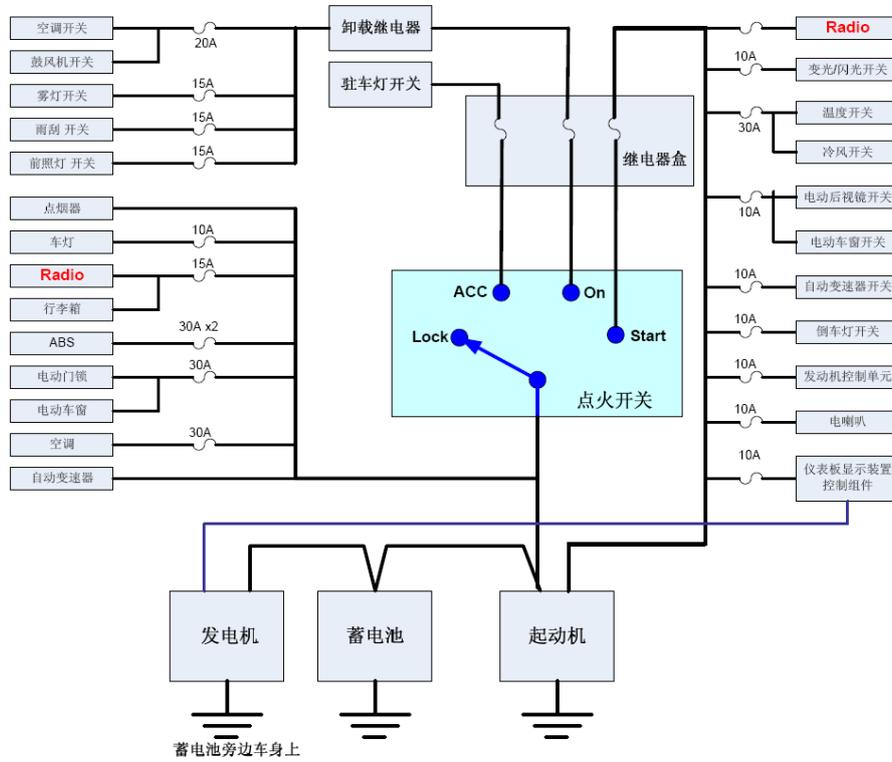


图 1

汽车内的供电是低压电路的供电，属于安全电压范围，其额定电压有 6V、12V、24V 三种。目前汽油车普遍采用 12V 电源，而柴油汽车则多采用 24V 电源。汽车发动机点火系和起动系统均由蓄电池供电，蓄电池为直流电源，因此，向蓄电池充电也必须采用直流电方式。汽车里通常采用的硅整流交流发电机其本质是一台三相同步交流发电机，通过硅二极管整流后提供直流充电电流。

发电机是由汽车发动机拖动而工作的，在汽车正常运行时，发电机在汽车上是主要的供电电源，供给全车除起动机外的一切电气设备的电能，并将多余的电能向蓄电池充电，使蓄电池始终处于完好的荷电状态。蓄电池是供电系统的辅助电源，当发动机处于起动或低速运转时，发电机不能发电或发出的电压很低，此时点火系及其它用电设备所需的电能则完全由蓄电池供给。同时，当用电设备所需的功率超过发电机所输出的功率时，蓄电池与发电机共同向用电设备供电。

在发电机供电的情况下，电源系统中有很高的脉冲电流，随着不同用电设备的启用或关闭，在各个负载中的脉冲电流也相应变化。因此，对供电系统的要求是：在车辆各种使用工况条件下，均能可靠地保证向用电设备供电；各零部件必须符合汽车电气设备基本技术条件及其专门技术条件的要求。

## 2. 直流电源滤波器的设计原则

越来越多的电子控制、通讯，导航，监控和显示等各种功能的电子化装置应用到汽车设计中。因此，必须考虑这些电子装置工作时所处的电气和电磁环境，它可能对周围的电子设备造成危害，同时也受到车载其他电气设备产生的电磁干扰，可能导致电子装置的功能降低、短暂故障甚至永久损坏。这些电磁干扰往往来自于点火系统、发电机及整流器系、电机以及执行器等供电系统，而且电磁干扰的频带很宽，且通过传导、耦合或辐射的方式，传播到车载电子部件或系统中，影响其正常运行。鉴于此，ISO 7637-2 中规定了沿电源线的电瞬态传导的干扰脉冲的抗扰性失效模式、严重程度和测量，适用于各种动力系统的道路车辆，例如：火花点火发动机、电动机、混合动力驱动系统等。为了确保用电设备正常工作，免受来自电源线上的电瞬态传导干扰脉冲，直流电源滤波器的设计成为汽车电子产品设计中的重点。

从广义范围上来看，电源滤波器所起的作用相当于是一个由电感、电容组成的无源低通滤波器，它能够将汽车供电系统中的瞬态干扰信号大幅度衰减或完全滤除，并能阻止汽车用电设备（如汽车音响等）内部电路设计中产生的干扰噪声通过电源线反串入汽车供电系统中，污染其他的用电设备的电源供电环境。

就直流电源滤波器的形式而言，其主要有四种网络结构，见下图 2。一般来说， $\pi$  形结构可以提供低的输入输出阻抗，适于所在电路源阻抗和负载阻抗高的场合；T 形结构可以提供高的输入输出阻抗，适用于电源源阻抗和负载阻抗低的场合；L 形结构可以提供高输入阻抗和低输出阻抗(或者相反)，适于所在电路低源阻抗和高负载阻抗(或者相反)场合。不管选用哪一种形式的滤波网络结构，都要注意以下设计原则：

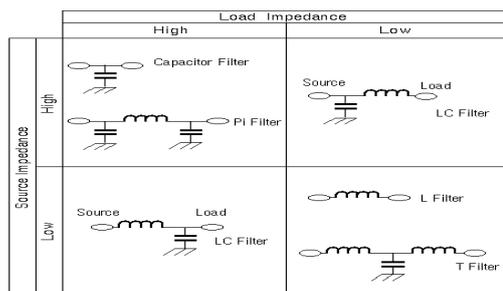


图 2

- 1) 双向滤波功能：供电系统对汽车音响提供电流、电源滤波器对来自供电系统的瞬态脉冲起到滤波作用，同时，汽车音响内部的各种高频脉冲信号或数字信号因为电源滤波器的存在，对汽车供电系统的传导发射干扰程度大大降低。
- 2) 能有效地抑制差模干扰和共模干扰：在汽车音响直流电源设计中要重点考虑差模干扰的抑制性能。

## 3) 最大程度地满足阻抗失配设计原则。

对于瞬态干扰信号，插入损耗要尽可能增大，即尽可能增大信号的反射。根据信号传输理论，当电源的输出阻抗  $Z_0 \neq$  滤波器的输入阻抗  $Z_I$  时，在电源滤波器的输入端口就会发生反射，反射系数  $p = (Z_0 - Z_I) / (Z_0 + Z_I)$ 。

显然， $Z_0$  与  $Z_I$  相差越大， $p$  便越大，端口产生的反射越大，瞬态干扰信号就越难通过。所以，直流电源滤波器输入端口应与汽车供电系统的输出端口处于失配状态，使瞬态干扰信号产生反射，有效抑制瞬态干扰信号进入汽车音响电路。同理，滤波器输出端口应与负载处于失配状态，使汽车音响内部产生的 CE 辐射信号产生反射，降低对外围用电设备的干扰。因此，电源滤波器的设计应遵循下列原则：

- a) 源内阻是高阻的，则滤波器输入阻抗就应该是低阻的，反之亦然。
- b) 负载是高阻的，则滤波器输出阻抗就应该是低阻的，反之亦然。

根据 ISO 16750-2 和 ISO 7637-2 中对连续电源的内阻  $R_i$  的要求（见表 1）：其应小于直流  $0.01 \Omega$ 。对于低于 400Hz 的频率而言，连续电源内部阻抗应为  $Z_i = R_i$ ，对于不同的瞬态脉冲， $R_i$  是不同的，参见下表中 12V 和 24V 供电系统的  $R_i$ 。输出电压在  $0 \Omega$  负载到最大负载（包括窜入电流）之间的变化不应超过 1V，它应在 100us 的时间内恢复其最大幅度的 63%。叠加脉动电压  $U_r$  的峰值间应不超过 0.2V，最低频率应为 400Hz。

瞬态脉冲	12V 供电系统 $R_i$	24V 供电系统 $R_i$
Pulse 1	10 $\Omega$	50 $\Omega$
Pulse 2a	2 $\Omega$	2 $\Omega$
Pulse 2b	0 to 0.05 $\Omega$	0 to 0.05 $\Omega$
Pulse 3a	50 $\Omega$	50 $\Omega$
Pulse 3b	50 $\Omega$	50 $\Omega$
Pulse 4	0 to 0.02 $\Omega$	0 to 0.02 $\Omega$
Pulse 5a	0.5 $\Omega$ to 4 $\Omega$	1 $\Omega$ to 8 $\Omega$
Pulse 5b	0.5 $\Omega$ to 4 $\Omega$	1 $\Omega$ to 8 $\Omega$

表 1

对于供电系统中的瞬态干扰信号，电感是高阻的，电容是低阻的，所以，电源滤波器与源或负载的端接应遵循下列原则：

- a) 如果电源内阻或负载是阻性或感性的，与之端接的滤波器接口就应该是容性的。
- b) 如果电源内阻或负载是容性的，与之端接的滤波器接口就应该是感性的。

### 3. 汽车音响直流电源滤波器的设计

通过采用阻抗失配原则选定了电源滤波器的结构，基本上已经决定了电源滤波器的效率。滤波网络两端的阻抗差异越大，滤波器的效率越高，滤波效果也就越好。此外，滤波器的插入损耗，即插入电源噪声滤波器后噪声干扰的衰减程度，这也是在实际设计和使用电源噪声滤波器中最需要考虑的因素之一。一般可以用电压幅值的比值来计算表示插入损耗，其值越大，表示滤波器抑制噪声干扰的能力越强。

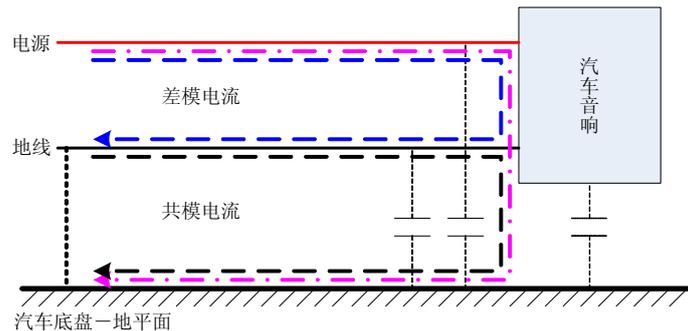


图 3

就汽车音响独立个体而言，汽车音响直流电源滤波器为差模噪声信号滤波器，采用滤波扼流圈和滤波电容组成的差模干扰滤除回路。由于差模电容的作用，差模干扰电流将通过电容流回电源线而不流入汽车音响中。但从系统而言，电源导线、汽车音响和地平面（汽车底盘）构成了共模噪声信号返回路径，如图 3 所示：为了降低系统的传导发射性能，要求汽车音响的外壳要有一个良好的接地位置，降低共模电流或消除共模电流的存在。在 CISPR25 的 6.1.2 中规定，如果 EUT 的电源返回路径超过 200mm，就将作为远端接地处理，如果 EUT 的电源返回路径小于等于 200mm，就作为近端接地，可以忽略共模电流的影响，降低共模电流引发的传导发射危害性，这就是为什么在汽车音响设计中尽可能的确保外壳与整车的底盘有良好的搭接。见下图 4 是汽车音响电路中常见的直流电源滤波器电路图。

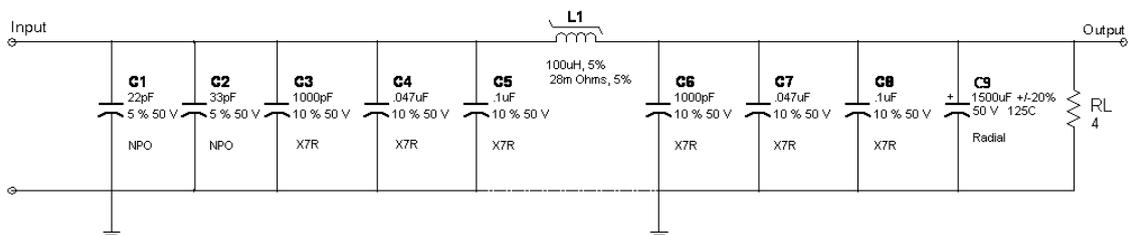


图 4

差模电容使用的类型是陶瓷电容，考虑到其实际电压值是额定交流电压和电磁干扰峰值电压的叠加值，因此要求差模电容要有足够高的耐压值，一般不低于 50VDC。电容容量值可按照所抑制的噪声电压频率下限值来确定，其值越大，滤波器的插入损耗也就越大。

差模扼流圈通常使用金属粉压磁芯（Iron Power Core），因为其初始磁导率受频率影响小，高频工作下损耗大，直流重叠特性好，大电流应用时电感量也不会大幅度下降，且适用频率范围较低。依流过电感的电流值不同，设计中的电感值可以取为几 mH~几十 uH。下图为三种不同的磁芯，其电感量随电流的变化的曲线。从图 5 中可以看出：在设计汽车音响直流电源滤波器时，要根据工作电流的范围来选择合适的扼流圈。当汽车音响的正常工作电流大于 3A 时，若选择图中 POT 磁芯的扼流圈，电感量急剧降低，根本起不到滤波器的效果。

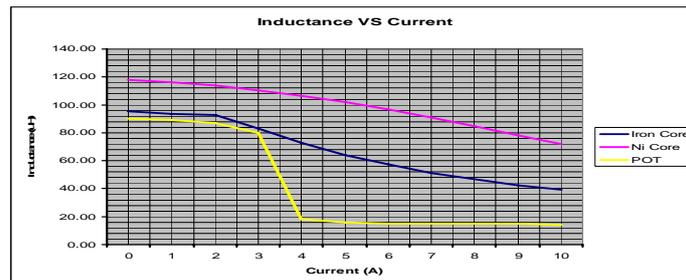


图 5

针对汽车供电系统中的瞬态脉冲噪声，一般集中在音频范围内（20Hz 至 20KHz），因此，在产品设计和 PCB Layout 中如何抑制音频噪声干扰（AFI = Audio Frequency Interference）成为汽车音响设计的一项重要性能评估指标。理论上，电源滤波器的电感和电容的参数选的越大，滤波效果越好。但在实际应用中，容量大的电容一般寄生电感也大，自谐振频率低，对高频噪声的去耦效果差，而电感值越大电感的体积也越大，所以在设计时应权衡各种因素的影响，确定合适的参数。在实际产品设计中，除了考虑来自汽车供电系统瞬态噪声的抑制，还要考虑高电压（Over Voltage）、大电流（Over Current）、反向电压（Reverse Voltage）等各种使用条件的分析和保护电路的设计。

#### 4. Over Voltage 和 Over Current 设计的考虑

在汽车音响电源滤波器设计时，不仅要考虑各种不同汽车电气系统瞬态噪声或脉冲的抑制作用，同时，还要加强 Over Voltage、Over Current 和 Reverse Voltage 等使用情况的发生。在 GMW3172 - Feb. 2007 : 5.2.4、VW 801 01-2005-06: 3.10 和 3.11、ISO 16750-2: 4.2 中规定了过压（Over Voltage）测试的内容，在 GMW3172 - Feb. 2007 : 5.2.7、VW 801 01-2005-06: 3.12 和 ISO 16750-2: 4.3 中规定了 Superimposed Alternating Voltage 的测试要求。由于普通电源噪声滤波器对浪涌电压的抑制能力较差，特别是当浪涌电压上升缓慢且宽度较大时，容易出现阻抗不匹配，使电感线圈达到磁饱和，所以在电源噪声滤波器输入端通常增加了一个压敏电阻或半导体浪涌电压抑制管抑制浪涌电压，保护汽车音响内部电路的正常运行。下面，针对 12V 汽车供电系统的电源滤波器电路进行参数确定，见图 6。

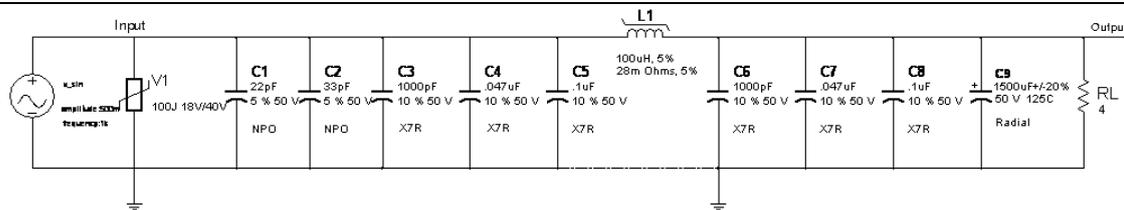


图 6

针对该电源滤波器，在 Saber 中进行滤波效果仿真，见下图 7：以此为依据，进行其他参数设计分析。

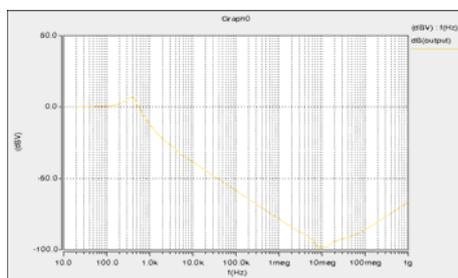


图 7

### a) C9 电容的取值

在允许的情况下，该电容的容量要求越大越好，其值很难确切地估算出来。一般情况下，要求取值在 1500—3300uf 之间。电容的耐压值必须经过雷击浪涌后取值，有残压，其瞬时值一般在 50V / s 时不损坏，按二级降额的原则选取，取值在 25 V，频率特性与电容的取值有关。电容容值越大，低频滤波特性越好；电解电容的 ESR 越小，低频阻抗越低。仿真结果见图 8a 和 8b。

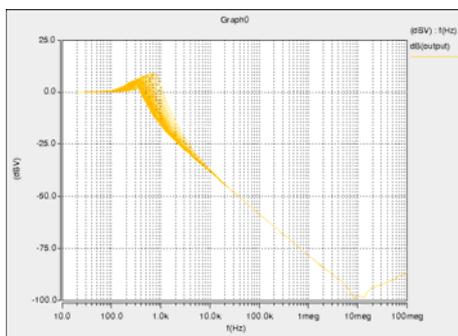


图 8a

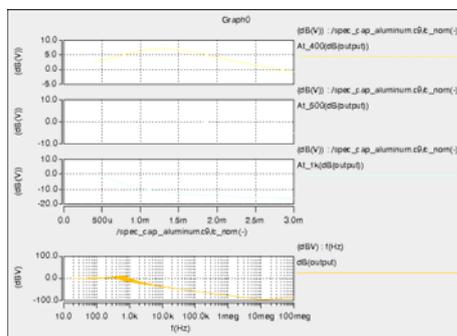


图 8b

## b) C1 - C8 电容的取值

在允许的情况下，电容容量的覆盖范围越广越好，这样，对于高频的瞬态干扰脉冲噪音就能够很好的抑制。一般情况下，要求取值在 20pf-0.1uf 范围。电容耐压值必须能够承受雷击浪涌后取值，有残压，其瞬时值一般在 100V / S 时不损坏，按二级降额的原则选取，取值 50 V，频率特性与电容的取值有关，电容值越小，高频特性越好。图 9 为 3 种电容实际阻抗随频率(100KHz 到 500MHz)变换的特征曲线。图 10 为电容理想模型阻抗随频率的关系曲线。因此，C1-C9 电容一般都是通过电容并联来满足瞬态干扰脉冲噪音全频范围内的抑制作用。仿真结果见图 11a 和 11b。

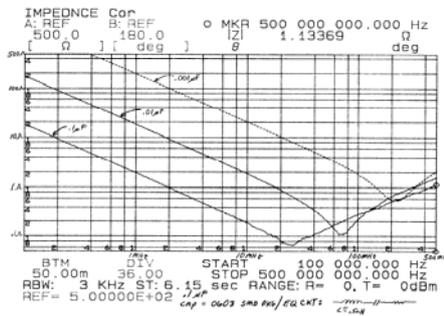


图 9

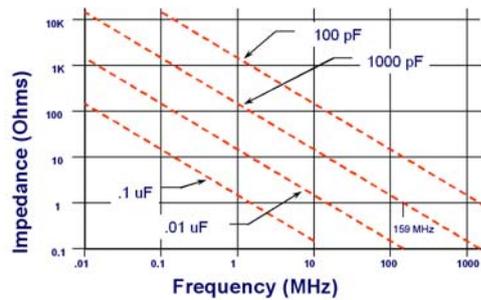


图 10

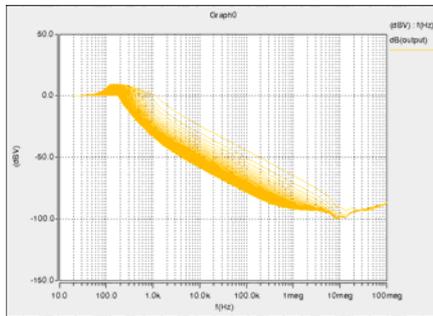


图 11a

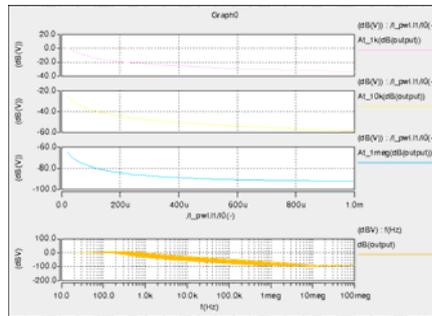


图 11b

## c) 电感的取值

电感性能的好坏取决于磁芯材料特性，应考虑以下几个方面：

- 第一，磁芯材料的频率范围要宽，要保证最高频率在 100MHz，即在很宽的频率范围内有比较稳定的磁导率。
- 第二，磁导率高，但是在实际中很难满足这一要求，所以，磁导率往往是分段考虑的。磁芯材料一般是铁氧体。

第三，电感量的估算——考虑阻抗随频率变换的特征曲线。共模扼流圈取值 1.5—5 mH，差模扼流圈取值为 40—100uH;图 12 为理想电感阻抗随频率变换的曲线。

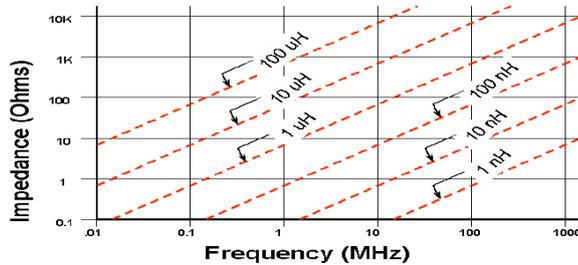


图 12

#### d) 压敏电阻的确定

压敏电阻是电压敏感器件，当加大压敏电阻两端的电压低于额定电压时，它的阻抗几乎是无穷大，而超过额定值后，电阻值急剧下降，反应时间为纳秒级。压敏电阻是根据工作电压来选择标称电压值，一般可按使用电压的 1.8 - 2.0 倍关系来确定标称电压。比如：汽车音响正常电源电压范围在 9V 至 16V，则压敏电阻的标称电压为  $2 \times 16V = 32V$ 。

e) TVS 参数的确定，在后面进行介绍。

### 5. 瞬态传导干扰的设计考虑

在ISO 7637-2:2004、GMW3100-08. 2001:3. 2. 1. 3等标准中规定了沿电源线的电瞬态传导的干扰脉冲的抗扰性失效模式、严重程度和测量，提供了5种典型脉冲波形，虽然没有涵盖所有可能出现在车辆上的各种瞬态脉冲，但适用于各种动力系统的道路车辆，例如：火花点火发动机、压燃式发动机、电动机、混合动力驱动系统。针对这5种典型的瞬态传导脉冲，在Saber仿真环境中进行该电源滤波器电路（图13）的仿真如下：

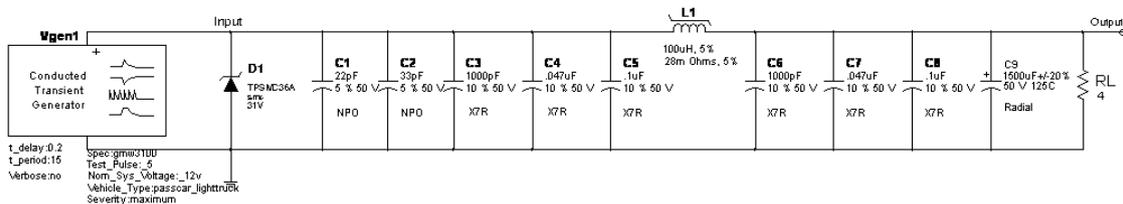


图 13

1) 脉冲1 是模拟电源与感性负载断开连接时所产生的瞬态现象。它影响与感性负载并联的用电装置，适用于各种DUT 与感性负载保持直接并联的情况。仿真结果见图14。

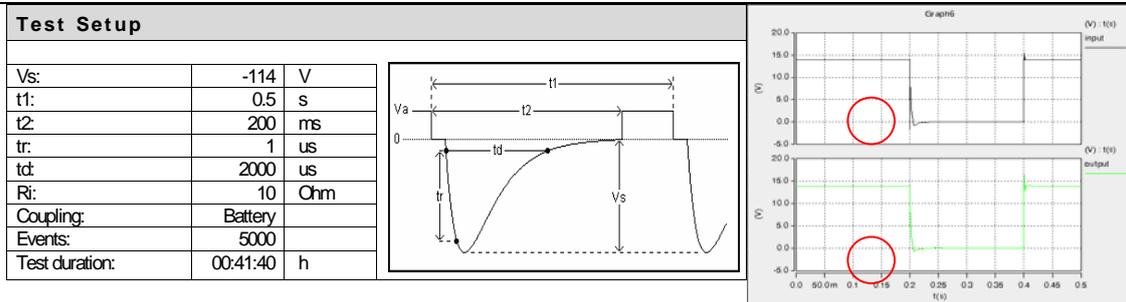


图 14

2) 脉冲2a 模拟由于线束电感的原因，使与DUT并联的装置内电流突然中断引起的瞬态现象；脉冲2b 模拟直流电机充当发电机，在点火开关断开时的瞬态现象。仿真结果见图15a和15b。

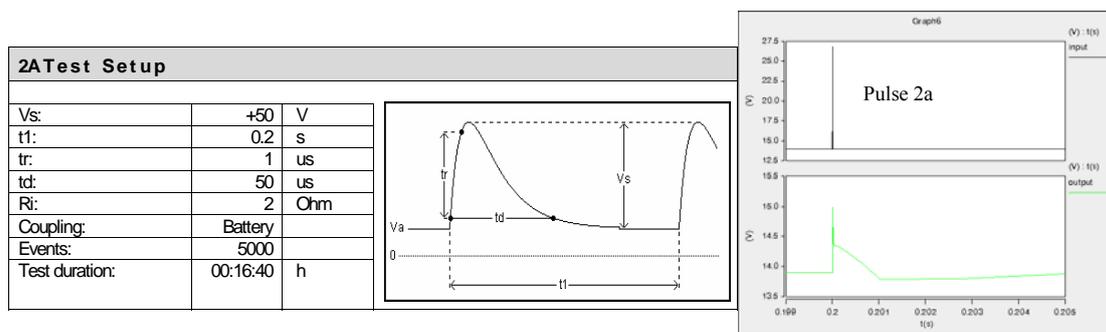


图15a

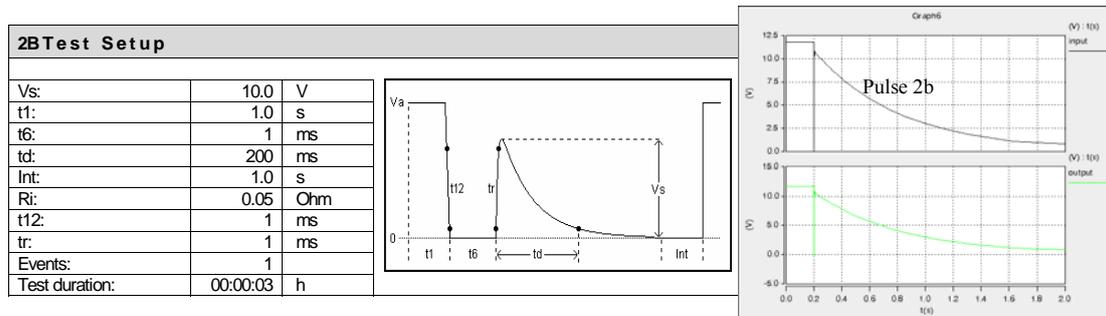


图15b

3) 试验脉冲3 模拟由开关过程引起的瞬态现象，这些脉冲的特性受线束的分布电容和分布电感的影响。仿真结果见图16a和16b。

### 3A Test Setup

Vs:	-150	V
f1:	10	kHz
t4:	10	ms
t5:	90	ms
tr:	5	ns
td:	100	ns
Ri:	50	Ohm
Coupling:	Battery	
Test duration:	1	h

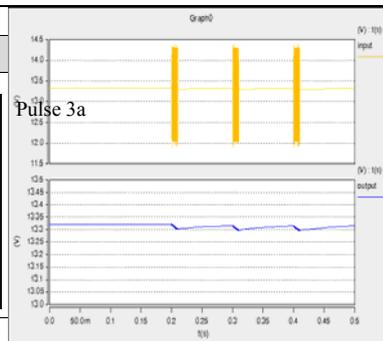
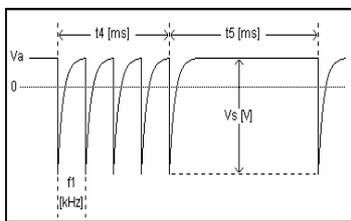


图16a

### 3B Test Setup

Vs:	+100	V
f1:	10	kHz
t4:	10	ms
t5:	90	ms
tr:	5	ns
td:	100	ns
Ri:	50	Ohm
Coupling:	Battery	
Test duration:	1	h

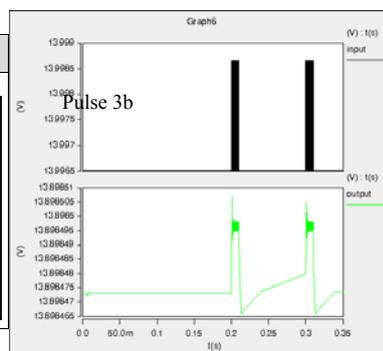
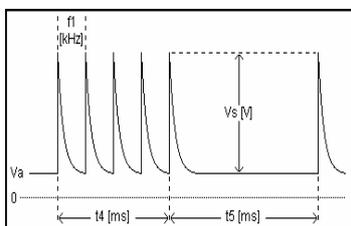


图16b

4) 试验脉冲4 模拟内燃机的起动电机电路通电时产生的供电系统电源电压的降低，不包括起动时的尖峰电压。仿真结果见图17。

### 4 Test Setup

Va1:	-7.0	V
Va2:	-2.5	V
t1:	1.0	s
t6:	5	ms
t7:	15	ms
t8:	50	ms
t9:	0.5	s
t11:	5	ms
Events:	1	
Test duration:	00:00:02	h

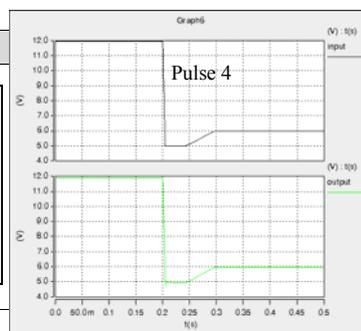
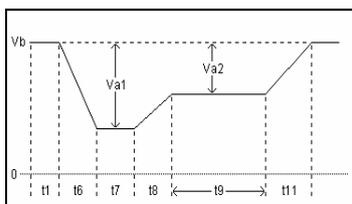


图 17

5) 试验脉冲5 是模拟抛负载瞬态现象，即模拟在断开电池（亏电状态）的同时，交流发电机正在产生充电电流，而发电机电路上仍有其它负载时产生的瞬态，抛负载的幅度取决于断开电池连接时，发电机的转速和发电机的励磁场强的大小，抛负载脉冲宽度主要取决于励磁电路的时间常数和脉冲幅度。产生抛负载的可能原因是电缆腐蚀、接触不良或发动机正在运转时，有意断开与电池的连接。大多数新型交流发电机内部，由于增加限幅二极管而抑制了抛负载幅度。具有非集中抛负载抑制的交流发电机的脉冲波形（脉冲5a）及仿真结果见图18a，具有集中抛负载抑制的交流发电机的脉冲波形（脉冲5b）及仿真结果见图18b。

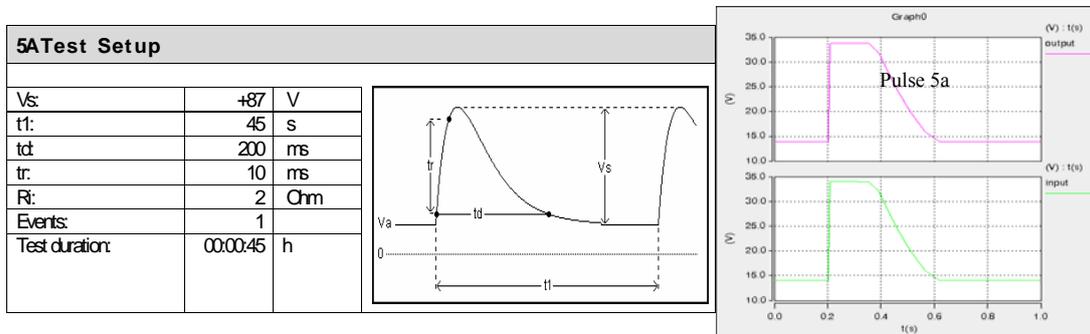


图 18a

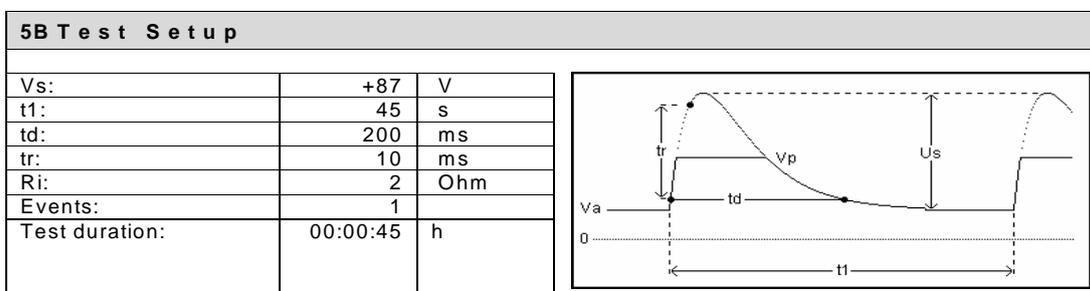


图 18b

在汽车音响产品设计满足 Over Voltage、反向电压测试和进行 Pulse 5 抛负载瞬态脉冲设计考虑中，TVS 二极管在整个电源滤波器中扮演着重要角色，如何选择适合的 TVS（硅瞬态电压吸收二极管 Silicon Transient Voltage Suppressor）是设计的关键。下面，针对 TVS 二极管进行简单介绍，建立 TVS 在 Pulse 5 双指数脉冲波形能量累积的 MathCAD 模型并进行仿真分析。

TVS 二极管是十分有效的瞬态干扰抑制器件，当其两极受到反向瞬态高能量冲击时，它能以 10 - 12 ns 量级的速度，将两极间的高阻抗变为低阻抗，吸收高达数千瓦的浪涌功率，使两极间的电压箝位于一个预定值（一般小于 2 倍额定工作电压），有效地保护电子电路中的精密元器件免受各种浪涌脉冲的破坏。

TVS 对浪涌功率和浪涌电流的吸收能力取决于 PN 结的面积，峰值脉冲功率（Pp）的吸收能力可以达到数千瓦。早期的器件用 10/1000us 波形来考核，现在通常采用 8/20us 的波形进行定义。TVS 的吸收峰值脉冲功率（Pp）是由 TVS 上的箝位电压和流过 TVS 的冲击电流的峰值乘积来确定的。要注意的是：TVS 的最大箝位电压与 TVS 的击穿电压（转折电压）不是一回事，最大箝位电压大约是击穿电压的 1.4 - 1.5 倍，这也表明 TVS 有一定的动态电阻。

实际的 TVS 瞬变干扰限定电压可以用下式表达：

$$U_o = (I_p / I_{pp}) (U_{cmax} - U_{BR}) + U_{BR}$$

式中：  
 $I_p$  是实际的脉冲电流值  
 $I_{pp}$  是额定的最大脉冲电流  
 $U_{cmax}$  是产品规定的最大箝位电压  
 $U_{BR}$  是击穿电压

图 19 至图 22 为 **TPSMC36A** TVS 的技术指标，了解每个波形的含义，有助于进行 TVS 的 MathCAD 模型仿真分析。

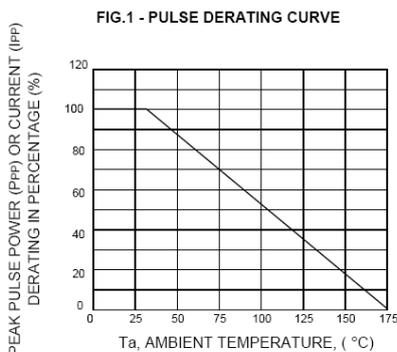


图 19

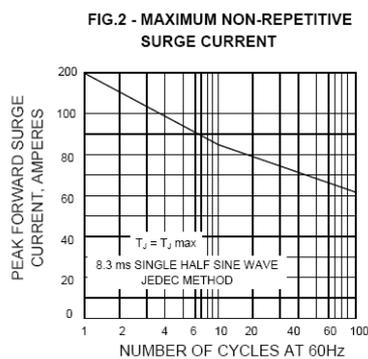


图 20

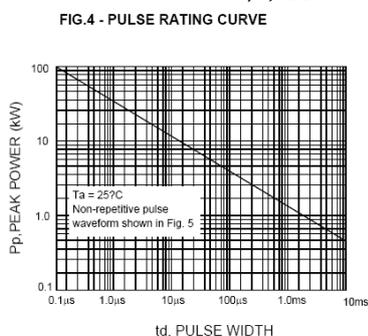


图 21

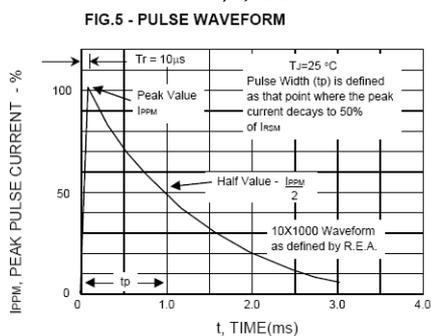


图 22

在 ISO7637-2: 2004 附录 E (脉冲发生器能量容量的确定) 中，介绍了计算由脉冲发生器传递到匹配电阻 (电阻性负载  $RL$ ) 上的脉冲能量的数学模型，如下图 23:

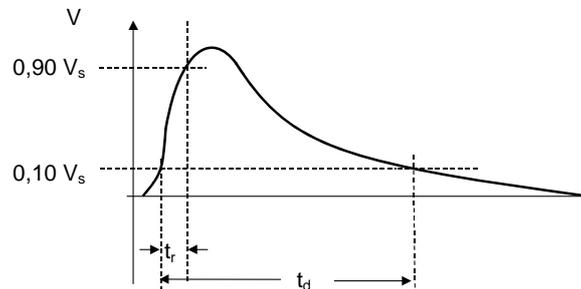


Fig. E.2 Double exponential pulse shape generated by a transient generator

图E.2——由瞬态发生器产生的双指数脉冲波形  
图 23

a) 电压波形函数,  $U(t)$ 按下式计算

$$V(t) = \frac{V_0 \times R_L}{R_i + R_L} \times e^{-\left(\frac{2.3 \times t}{T_d}\right)}$$

b) 电流波形函数,  $I(t)$ 按下式计算

$$I(t) = \frac{1}{R_L} \times \frac{V_0 \times R_L}{R_i + R_L} \times e^{-\left(\frac{2.3 \times t}{T_d}\right)} = \frac{V_0}{R_i + R_L} \times e^{-\left(\frac{2.3 \times t}{T_d}\right)}$$

c) 脉冲功率函数,  $P(t)$ 按下式计算

$$P(t) = V(t) \times I(t) = \frac{(V_0)^2 \times R_L}{(R_i + R_L)^2} \times \left( e^{-\left(\frac{2.3 \times t}{T_d}\right)} \right)^2 = \frac{(V_0)^2 \times R_L}{(R_i + R_L)^2} \times e^{-\left(\frac{4.6 \times t}{T_d}\right)}$$

d)  $P(t)$ 的积分表示具有负载 $RL$ 的单脉冲的能量容量

$$W_e = \int_0^{\infty} P(t) dt = \frac{(V_0)^2 \times R_L}{(R_i + R_L)^2} \times \int_0^{\infty} e^{-\left(\frac{4.6 \times t}{T_d}\right)} dt$$

上式中:

- U<sub>0</sub> —— 开路输出电压
- R<sub>i</sub> —— 脉冲发生器的电源内阻
- R<sub>L</sub> —— 脉冲发生器的负载电阻
- T<sub>d</sub> —— 0.1U<sub>s</sub> 至0.1U<sub>s</sub> 的脉冲宽度
- I(t) —— 电流波形函数
- U(t) —— 电压波形函数
- W<sub>e</sub> —— 单脉冲的能量容量

基于上述双指数脉冲波形能量计算数学模型, 在 MathCAD 中进行仿真, 可以得到 TVS TPSMC36A 抛负载测试 (Pulse 5) 的浪涌功率吸收的仿真结果, 见图 24。它能满足 GMW3100 中 Pulse 5B ( $V_s + V_r = 46V$ ) 的设计要求, 但达不到 ISO7637-2 中 Pulse 5A ( $V_s + V_r = 100V$ ) 的设计要求。

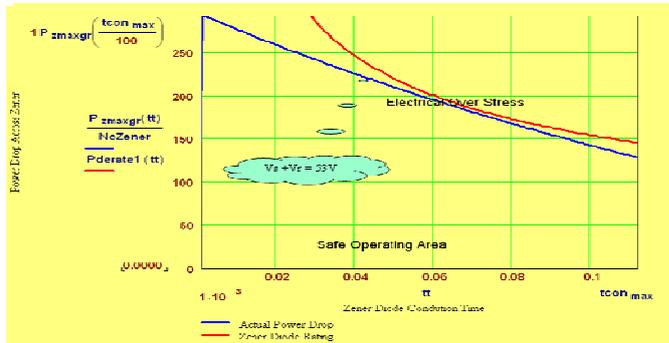


图 24

如果产品设计要求一定通过 Pulse5 脉冲，可以更换大功率的 TVS 二极管或者将两个或多个 TVS 串/并联起来解决高电压和大功率的要求。将 TVS 串联可以获得更高的限定电压值，只是等效 TVS 的最大吸收电流取决于串连 TVS 中  $I_p$  最低的一个值。将 TVS 并联可以获得更高的限定电流值，只是等效 TVS 的最大脉冲电压取决于并联 TVS 中  $V_{RSM}$  最低的一个值。将图 25 中的 D1 换成同系列的 TPSMC20A TVS 管，分别采用 4 个和 5 个并联使用，均能够满足 Pulse 5a 的要求，参见 Saber 和 MathCAD 的仿真结果，见图 26。从图 26 中可以发现：4 个 TVS 并联处于设计边缘，风险比较高，5 个并联则有设计风险低。采用 4 或 5 个 TVS 管，在 PCB Layout 中占有的空间比较大，若空间有限，可以选用单个 TVS 具有高功率的器件来满足设计要求。

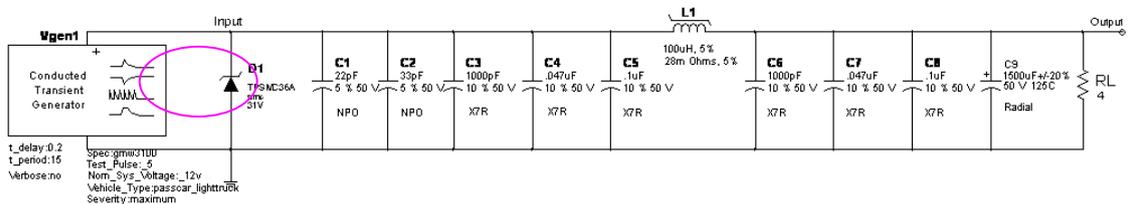


图 25

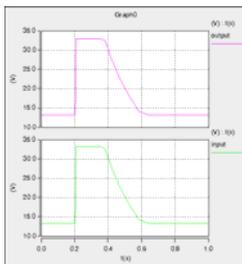


图 26a

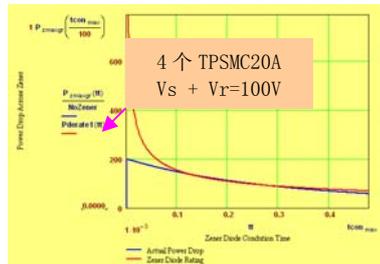


图 26b

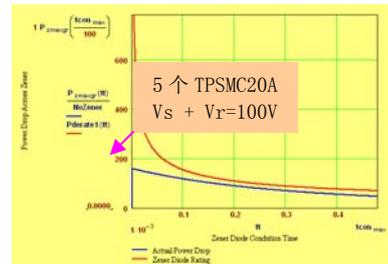


图 26c

## 6 总结

- 1) 汽车的电气系统分为供电系统和用电设备两部分，具有低压、直流和单线制供电特点；
- 2) 汽车电源系统中产生各种各样的瞬态脉冲电流，它是汽车用电设备的传导噪音源；

- 3) 直流电源滤波器主要有  $\pi$  形、T 形和 L 形等四种网络结构，不管采用哪一种网络形式，都要最大程度地满足阻抗失配设计原则；
- 4) 汽车供电系统中的瞬态脉冲噪音，一般集中在音频范围内（20Hz 至 20KHz），在汽车音响直流滤波器设计中要重点评估扼流圈和电容等器件的选择是否有效地抑制音频噪音干扰（AFI = Audio Frequency Interference）；
- 5) Over Voltage、Over Current、Reverse Voltage 和 ISO7637-2 中的各种瞬态脉冲等都是汽车音响直流滤波器设计过程中的重要考虑参数；
- 6) TVS 二极管在整个直流电源滤波器中扮演着重要角色，如何选择适合的 TVS 是解决汽车音响能否通过 Over Voltage、反向电压测试和 Pulse 5 抛负载瞬态脉冲测试的关键；
- 7) Saber 和 MathCAD 是进行电源滤波器设计电路仿真的有效快捷工具。

#### 参考文献:

- [1] 杨克俊 《电磁兼容原理与设计技术》人民邮电出版社
- [2] ISO 7637-2: 2004 Road Vehicles — Electrical Disturbances from Conduction and Coupling - Part 2: Electrical transient conduction along supply lines only (道路车辆—由传导和耦合引起的电骚扰第2 部分：沿电源线的电瞬态传导)
- [3] GMW3172—Feb.2007 General Specification for Electrical/Electronic Component Analytical/Development/Validation (A/D/V) Procedures for Conformance to Vehicle Environmental, Reliability, and Performance Requirements
- [4] VW 801 01-2005-06 Electrical and Electronic Assemblies in Motor Vehicles General Test Conditions
- [5] ISO 16750-2 Road Vehicles - Environmental conditions for electrical and electronic equipment — Part -2: Electrical loads
- [6] CISPR25 2002.08 V02 Radio disturbance characteristics for the protection of receivers used on board vehicles, boats, and on devices - Limits and methods of measurement
- [7] GMW3100-08.2001 General Specification for Electrical/Electronic Components and Subsystems; Electromagnetic Compatibility: Verification Part