

去耦电容在高速电路 EMC 设计中的研究与应用

龚 纯, 陈 伟, 黄秋元

(武汉理工大学 信息工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘 要: 在高速电路设计中应充分考虑电磁兼容方面的问题, 合理地使用去耦电容在电磁兼容防止电磁干扰中具有重要作用。对去耦电容的作用、容量、原理及其具体应用作了较为全面的分析; 讨论了增强去耦电容设计的一些实用方法。

关键词: 高速电路; EMC; 去耦电容

中图分类号: TN62

文献标识码: A

1 前 言

高速数字化的设计研究的是无源电路元件怎样影响信号的传播、发射和接收, 在信号间相互干扰 - 串扰, 以及电磁波在空间的相互作用 - 电磁干扰^[1-3]。而电磁干扰 (EMI)、电磁兼容 (EMC) 又是高速电路信号完整性理论中不可缺少的一部分, 对于它的研究一直以来都是很重要的。

EMC (Electromagnetic Compatibility) 是指电子设备在各种电磁环境中仍能够协调、有效地进行工作的能力。电磁兼容性设计的目的是使电子设备既能抑制各种外来的干扰, 使电子设备在特定的电磁环境中能够正常工作, 同时又能减少电子设备本身对其他电子设备的电磁干扰。在对 EMC 的设计中去耦电容是一个不可小觑的元件, 它的作用和配置将直接影响到高速电路 EMC 设计的实用性和有效性。

2 去耦电容

2.1 去耦电容的作用

在设计印制电路板时, 经常要在电路上加电容来满足数字电路工作时要求的电源平稳和洁净度, 这是 EMC 设计的重要内容。电子电容中的去耦电容通常有如下 2 个作用: 一方面是集成电路的蓄能电容, 提供和吸收该集成电路开门关门瞬间的充放电能; 另一方面旁路掉该器件的高频噪声。

具体来说如下: PCB 上供电线路的寄生阻抗有可能产生下述 3 种电磁干扰, 所以应采用去耦

电容 (如图 1) 来防止和减轻这些干扰的影响。

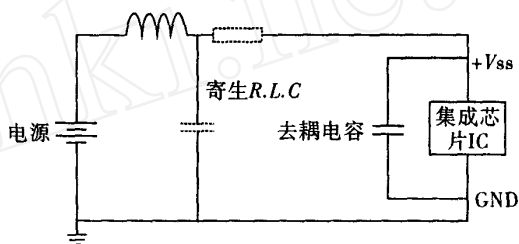


图 1 加在电源端和接地端之间的去耦电容

(1) 门电路开关瞬间电流是跳跃式变化的, 由于集成片通过电源线与电源相连接, 电源线的电感将会阻止电流的瞬态变化, 从而影响集成片的响应速度。

(2) 集成片的瞬态变化电流流过环路面积较大的电源线时, 将会产生较为强烈的对外辐射噪声。且由于各集成片很可能会流经相同的线路, 相互之间存在较大的公共阻抗, 从而产生了较严重的共阻抗耦合干扰。

(3) PCB 板的电源线存在寄生电阻、电容、电感, 线路电感的反电动势又使集成片得到的电源电压高于额定值。所以当集成片电源端子上电压振荡的幅值超过数字逻辑元件的噪声容限时就会产生干扰。

去耦电容的充放电作用使集成片得到的供电电压比较平稳, 减小了电压振荡现象; 集成片可以就近在各自的去耦电容上吸收或释放电流, 不必通过电源线从较远的电源中取得电流, 因此不会

收稿日期: 2005 - 05 - 15.

作者简介: 龚 纯 (1980 -), 女, 湖北武汉人, 武汉理工大学信息工程学院硕士研究生。

基金项目: 湖北省重大科技攻关资助项目 (2002AA101A04); 湖北省自然科学基金资助项目 (2004ABA045)。

影响集成片的速度;同时去耦电容为集成片的瞬态变化电流提供了各自就近的高强通道,从而大大减小了向外的辐射噪声,且相互之间没有公共阻抗,因此抑制了共阻抗耦合。

由于去耦电容在高频时的阻抗将会减小到其自谐振频率,因而可以有效地去除信号线中的高频噪声,同时相对低频来说对能量没有影响,所以可在每一个集成片的电源和地脚之间加一个大小合适的去耦电容。在选择去耦电容类型时,应考虑那些低电感的高频电容,例如高频性能较好的多层陶瓷电容或独石电容。

2.2 去耦电容的容量

在电源回路中加电容时,应该考虑电源和地平板的参数、电子回路的元器件情况、设备内部与电源连接的供电电路等因数。此外,选择电容时要根据经济技术最优指标决定电容的绝缘材料。去耦电容容量必须满足下列条件:

(1)从一般设计角度来看,即从去耦电容为集成片提供所需电流的角度考虑,去耦电容的容量可以按下式计算:

$$C = \frac{I}{V/t} \quad (1)$$

式中, I 为瞬态电流; V 为逻辑器件工作允许的电流值的变化; t 为开关时间。

设计时,先计算逻辑器件正常工作时允许的阻抗,即

$$Z_c = \frac{V}{I} \quad (2)$$

然后,由电源线条的电感求出对应的临界频率 f_m

$$f_c = \frac{Z_c}{2L_c} \quad (3)$$

当使用频率高于 f_c 时,由于电路中的电源引线比较长,瞬态电流会引起较大的压降,此时就要加平滑电容以便维持器件要求的电压值。也就是使用上拉电流主要流过平滑电容,产生较小的压降或波动。设所加平滑电容为 C_b ,平滑电容应该满足如下条件。

$$\text{当 } f > f_c \text{ 时, } \frac{1}{C_b} < Z_c \quad (4)$$

$$\text{当 } f > f_c \text{ 时, } Z_0 = \frac{1}{C_b} < 2f_c L_c \quad (5)$$

$$\text{令 } \frac{1}{C_b} = Z_c, \text{ 即 } C_b = \frac{1}{C_b Z_c} = \frac{1}{2f_c Z_c} \quad (6)$$

$$\text{即 } C_b = \frac{1}{2f_c Z_c} \quad (7)$$

通常 C_b 选取 10 - 100 μF 之间的数值。

理想的去耦电容应能提供逻辑设备所需的暂态电流。当集成片门电路由关闭状态翻转成为开启状态时,将在 t 内从去耦电容中吸收大量的暂态电流 I 。该电流不仅包括门电路开启所需的电流,还包括驱动下一级门电路负载的扇出电流。由于去耦电容在 t 内仅提供能量,还来不及从电源中获得补充能量,所以电容上的电压将下降 V ,该电压跌落应被控制在规定的范围内;由于电容器上的电压就是集成片上的电压,所以电压的跌落应该不引起集成片门电路的错误逻辑动作,一般取 V 为 20% V_M 。

(2)集成片与去耦电容两端电压差 V_0 必须小于噪声容限 V_{NI}

$$V_0 = \frac{L}{t} I < V_{NI} \quad (8)$$

式中, I 为门电路开启时所需暂态电流幅值; t 为门电路开启所需时间,一般为脉冲上升时间; L 为去耦电容的电感(包括引线电感以及去耦环路电感)。

(3)集成片开关电流的放电速度必须小于去耦电容电流的最大放电速度

$$\frac{dI_c}{dt} < \frac{V}{L} \quad (9)$$

去耦电容的自谐振频率 f_0 必须大于集成片的最大应考虑的谐振频率 f_{max}

$$f_0 > f_{max} \quad (10)$$

从直观上看似乎电容值越大,提供电流的能力越强,因此许多人喜欢使用容量大的去耦电容,实际上这是错误的。因为实际使用的电容器总存在一定的引线电感,这些电感与电容将产生串联谐振。在谐振频率点 f_0 处阻抗最小,其为高频电流所提供的通道阻抗最小,所以去耦效果最佳。所以谐振频率将是使用去耦电容时应首要考虑的问题。计算引线电感的公式为

$$L = \frac{\mu_0}{2} \left\{ \ln \left[\frac{l}{r} + \sqrt{\left(\frac{l}{r} \right)^2 + 1} \right] + \frac{l}{l} - \sqrt{\left(\frac{l}{l} \right)^2 + 1} \right\} \quad (11)$$

式中, l 为导线的长度; r 为导线的半径。

一般实际使用电容的引线电感 L 约为每英寸 15 nH,同时每个过孔约有 1 ~ 3 nH 的电感,由

$$f_0 = \frac{1}{2\sqrt{LC}} \quad (12)$$

即得理论上的谐振频率。具体使用的去耦电容的自谐振频率随封装形式以及引脚长度的不同而有所变化,应进行具体的测量。

2.3 去耦电容的滤波原理

当电路在很快的期间高低电平变换的时候,就会产生一系列的正弦谐波分量,这些正弦谐波分量就是EMI成分,这些高频谐波会通过和其他设备之间的耦合通道对其他设备造成电磁干扰。合理使用去耦电容就能很好地抑制电磁干扰的效果,实际的电容可以等效图2所示的模型。

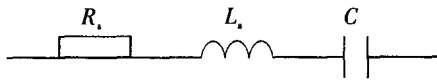


图2 电容等效模型

其中等效串联电阻称之为ESR,等效串联电感称之为ESL,可以计算出这个等效电容的谐振频率: $f_0 = 1/2\sqrt{LC}$

电容的滤波原理就是通过这个频率来确定^[4]。小于谐振频率时,电容体现为容性,而当频

率大于谐振频率时,电容就体现为感性。所以在滤波较为低频的噪声的时候,就应当选择电容值比较大的电容,想滤除频率较高的噪声,则应该选择数值比较小的电容,所以,在实际中,通常放置一个1 μf到10 μf左右去耦电容在每个电源输出管脚处,来抑制低频成分,而选取0.01 μf到0.1 μf左右去耦电容来滤除高频部分。为了获得最佳的EMI抑制效果,最好能在每组电源和地引脚都能安装一个电容,但是如果电源在流出引脚前在IC内部已经放置去耦电容,那么在引脚处就不必和每个地之间连接一个电容了,但是这样对IC芯片的成本相应提高。

图3是用Hyperlynx做的一个放置耦合电容和不放置耦合电容的EMI仿真比较。由图3可以看出,加了去耦电容的频谱中正弦谐波的分量明显减少,从而有效地降低了EMI成分。

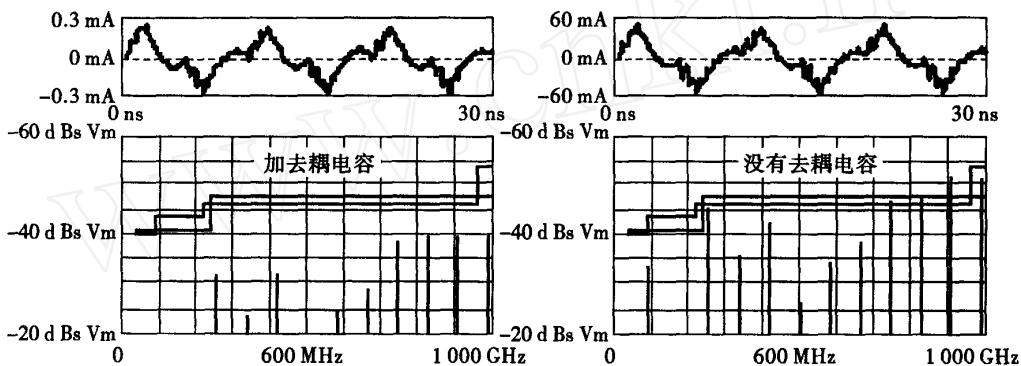


图3 去耦电容对抑制EMI的作用

3 去耦电容的设计

微控制器产品的EMC问题最普遍的原因之一就是电源不够好。电源线的正确和足够的去耦减少设备发出的噪音都是非常关键的^[5-6]。设备具有很宽的电压范围,并且只吸收几毫安电源电流。但是,就像所有的数字电路,电源电流是一个平均值。该电流在时钟边缘上以很短的峰值被控制,而且如果I/O线路转换,峰值甚至将会更高。如果一个I/O端口的所有8条I/O线路同时变化,电源线上的电流脉冲可能有几百mA。如果I/O线路没有加载,脉冲将只有几毫微秒,这种电流峰值不可能通过长的电源线产生的,主要的来源是去耦电容器。

图4显示了去耦不足的一个例子。电容器离微控制器太远,产生了很大的高电流环路。这里电源和接地平面是高电流环路的一部分,因此,噪

音更容易传递到板上其他设备上,并且板上的辐射散发甚至进一步增加,整个接地平面,而不仅仅是高电流环路,将充当噪音天线。如果电源和接地引脚直接连接到平面,而且去耦电容器同样连接,那么将会是这样。如果集成电路放在板的一边,电容器在一边,那么带有表面安装部件的板同样可以看到。

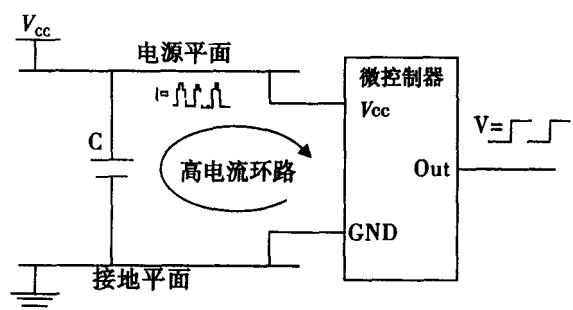


图4 去耦不足电路

图 5 显示了电容器的更好放置。作为高电流环路一部分的线路不是电源或接地平面的一部分。这非常重要,因为如果不是这样,电源和接地平面将会散发很多噪音。

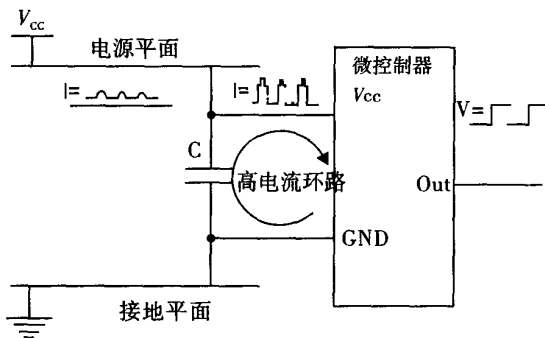


图 5 去耦电容器的设备

图 6 显示了去耦的另一种改进。它插入了一个串联电感器,来减少电源平面上的开关噪音。当然,电感器的串联电阻值必须足够低,以保证将没有显著 DC 电压下降。

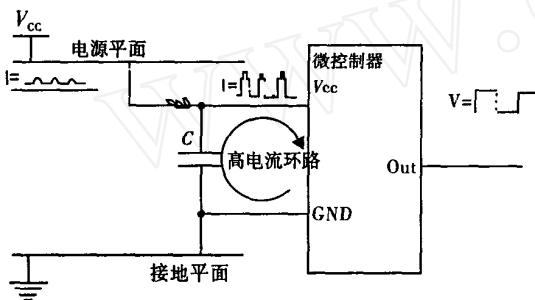


图 6 带串联电感的去耦电路

通常,电源和接地平面靠得很近的 AVR 设备将比带有工业标准引脚输出的设备具有更好的去耦能力,这些设备的电源和接地引脚位于 DIP 封

装的对角。这个缺点可以通过使用 TQFP 封装来克服,它允许把去耦电容器放置到离管芯很近的地方。对于具有多对电源和接地引脚的设备,有必要使每一对引脚都具有自己的去耦电容器。

4 结 论

随着数字电路不断高速发展,传统的电子设备受电磁干扰影响时,通常只是造成功能下降,而今天的电子设备遭受电磁干扰时可能会造成逻辑错误或信息丢失,尤其是在高速电路中保证电子设备电磁兼容性更是一项复杂的技术任务。这里所介绍的去耦电容的应用只是 EMC 设计研究中一个很小的部分,相信这一未知的高速极限也势必会给 EMC 的设计提出更多的挑战。

参考文献:

- [1] Johnson H W, Graham M. HIGH - SPEED DIGITAL DESIGN [M]. Indiana: Prentice Hall PRT, 2000.
- [2] Hall S H, Hall G W, M A. McCall High - Speed Digital System Design - A Handbook of Interconnect Theory and Design Practices [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2000.
- [3] Bogatin E Signal Integrity - Simplified [M]. Indiana: Prentice Hall PTR, 2003.
- [4] E. Bogatin A Closed form Analytical Model for the Electrical Properties of Microstrip Interconnects [J]. IEEE Trans Comp. Hybrids, Manufact Technol, 1990, 13 (2): 259.
- [5] Goetz M. Time and Frequency Domain Analysis of Integral Decoupling Capacitor [J]. IEEE Trans Comp. Hybrids, Manufact Technol, 1996, 19 (3): 518.
- [6] Paul C R. Effectiveness of Multiple Decoupling Capacitors [J]. IEEE Trans, 1992, 34 (5): 130 - 133.

Research and Application of Decoupling Capacitors in EMC Design of High - speed Circuits

Gong Chun, Chen Wei, Huang Qiuyuan

Abstract: EMC problems should be considered in the design of high - speed circuits and the reasonable application of decoupling capacitor plays a very important role in avoiding EMI. The effect, capacity, theory and some practical application of decoupling capacitors are analyzed. The design of enhancing decoupling capacitors is discussed.

Key words: high - speed circuit; EMI; EMC; decoupling capacitor

Gong Chun: Postgraduate; School of Information Engineering, WUT, Wuhan 430070, China

[编辑:刘美玲]

射频和天线设计培训课程推荐

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;我们于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训推荐课程列表: <http://www.edatop.com/peixun/tuijian/>



射频工程师养成培训课程套装

该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材;旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习,能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html>

手机天线设计培训视频课程

该套课程全面讲授了当前手机天线相关设计技术,内容涵盖了早期的外置螺旋手机天线设计,最常用的几种手机内置天线类型——如 monopole 天线、PIFA 天线、Loop 天线和 FICA 天线的设计,以及当前高端智能手机中较常用的金属边框和全金属外壳手机天线的设计;通过该套课程的学习,可以帮助您快速、全面、系统地学习、了解和掌握各种类型的手机天线设计,以及天线及其匹配电路的设计和调试...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/133.html>



WiFi 和蓝牙天线设计培训课程

该套课程是李明洋老师应邀给惠普 (HP)公司工程师讲授的 3 天员工内训课程录像,课程内容是李明洋老师十多年工作经验积累和总结,主要讲解了 WiFi 天线设计、HFSS 天线设计软件的使用,匹配电路设计调试、矢量网络分析仪的使用操作、WiFi 射频电路和 PCB Layout 知识,以及 EMC 问题的分析解决思路等内容。对于正在从事射频设计和天线设计领域工作的您,绝对值得拥有和学习! ...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/134.html>



CST 学习培训课程套装

该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出,是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装,所有课程都由经验丰富的专家授课,视频教学,可以帮助您从零开始,全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装,还可超值赠送 3 个月免费学习答疑...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html>



HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程,是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装,可以帮助您从零开始,全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装,更可超值赠送 3 个月免费学习答疑,随时解答您学习过程中遇到的棘手问题,让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

ADS 学习培训课程套装

该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程,共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解,并多结合设计实例,由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS,迅速提升个人技术能力,把 ADS 真正应用到实际研发工作中去,成为 ADS 设计专家...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html>



我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年,10 多年丰富的行业经验,
- ※ 一直致力并专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授,结合实际工程案例,直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>