

文章编号: 1001-4322(2001)05-0623-04

单片机系统在核电磁脉冲辐照下的效应研究*

侯民胜, 刘尚合, 王书平

(军械工程学院 静电与电磁防护研究所, 河北 石家庄 050003)

摘 要: 核电磁脉冲(NEMP)、雷电电磁脉冲(LEMP)和高功率微波(HPM)等强电磁脉冲对单片机系统具有很强的干扰和破坏作用。为研究它们对单片机系统的各种效应, 利用GTEM室产生的核电磁脉冲, 对单片机系统进行了辐照效应实验。实验表明, 单片机系统在强电磁脉冲作用下, 会出现“死机”、重启动、通讯出错等现象。基于实验, 讨论了单片机系统的各种效应产生的原因。

关键词: 核电磁脉冲; 单片机系统; 辐照效应

中图分类号: O441 **文献标识码:** A

随着微电子技术的高速发展, 特别是大规模集成电路和超大规模集成电路的广泛应用, 电子系统的敏感度越来越高。日趋恶劣的电磁环境, 使电子系统工作的可靠性和安全性受到了严重威胁。核电磁脉冲(NEMP)、雷电电磁脉冲(LEMP)和高功率微波(HPM)等强电磁脉冲具有功率高、频带宽、持续时间短等特点, 对电子系统具有很强的干扰和破坏作用。因此, 研究电子系统在强电磁脉冲辐照下的效应问题显得尤为重要。为此, 我们开展了强电磁脉冲对电子设备的效应和防护技术研究。单片机系统的效应实验是其重要组成部分。为有效地进行单片机系统的效应实验研究, 本人首次设计了专门用于电磁脉冲效应实验的具有故障自动检测及显示功能的单片机系统, 并将其运用于效应实验, 对单片机系统在核电磁环境下的效应问题进行了深入研究。

1 核电磁脉冲源和单片机系统

核电磁脉冲对单片机系统的辐照效应实验配置如图1所示。主要由吉赫横电磁波传输室(GTEM Cell)、Marx发生器, 控制台和被试单片机系统等组成。GTEM室采用崭新的结构设计, 具有GHz的极宽频带, 可模拟NEMP和LEMP辐射场。

控制台包括: 示波器, 型号为TDS680B, 采样速率为5Gs/s, 带宽为1GHz, 用于测量场信号和干扰信号波形; 模拟量光纤场测量系统, 型号为GC-202-1, 由光接收机和天线组成, 主要用于将脉冲电磁场转换成电压信号送示波器显示, 从而求出峰值场强; 控制面板还设有一些操作按钮, 主要用来进行Marx发生器的充放电操作和陡化间隙的调整。

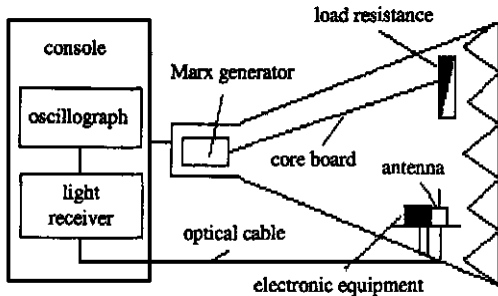


Fig 1 GTEM cell makeup sketch map
图1 GTEM室结构示意图

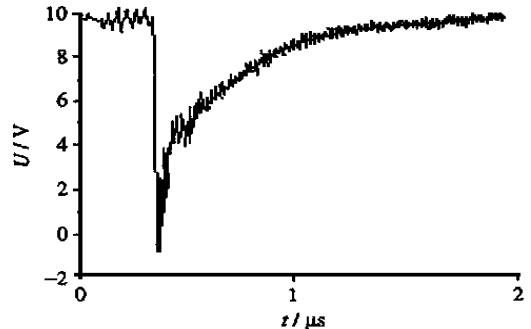


Fig 2 NEMP generated by GTEM cell
图2 GTEM室产生的NEMP

* 收稿日期: 2001-04-28; 修订日期: 2001-06-20
基金项目: 国家自然科学基金资助课题(50077024)
作者简介: 侯民胜(1964-), 男, 博士研究生。

Marx 发生器工作于单脉冲方式, 每次产生一个脉冲^[1]。图2是在 GTEM 室实际采集到的核电磁脉冲的时域波形。脉冲前沿较陡, 约10ns, 频谱能量主要分布于0~10MHz 频带范围内。

实验对象选用专门用于电磁脉冲效应实验的具有故障自动诊断功能的单片机系统。实验时, 将其置于测试转台上, 接受电磁脉冲辐照。本系统采用当前应用最广的51型单片机。为便于研究程序存储器的效应情况, 我们选用内部不含 EPROM 的8031作为中央处理器, 程序固化在外 EPROM (或 EEPROM) 中。由于8031内含 CTC 和 SD, 不再另设外 CTC 和 SD。模/数转换电路采用 A/D0809 芯片。数码管用于信息显示, 显示数据由四个锁存器 (74LS373) 保存。系统组成框图如图3所示。系统软件由八部分组成: 指示单片机重启动程序模块; 监测片内寄存器的程序模块; 外部中断检测程序模块; 检查定时器 CTC 运行情况程序模块; 串口通讯功能检查程序模块; A/D 转换电路检测程序模块; RAM 内容检测程序模块; EPROM 内容检测程序模块。

2 辐照效应实验

效应实验包括十部分: 重启动效应实验; “死机”效应实验; 控制状态改变效应实验; A/D 转换电路效应实验; 串口通讯电路效应实验; 读写存储器 RAM 效应实验; 定时器 CTC 电路效应实验; 外部中断效应实验; 内部寄存器效应实验; 程序存储器 EPROM 效应实验。实验步骤为: 先给控制台和单片机加电, 按动单片机“执

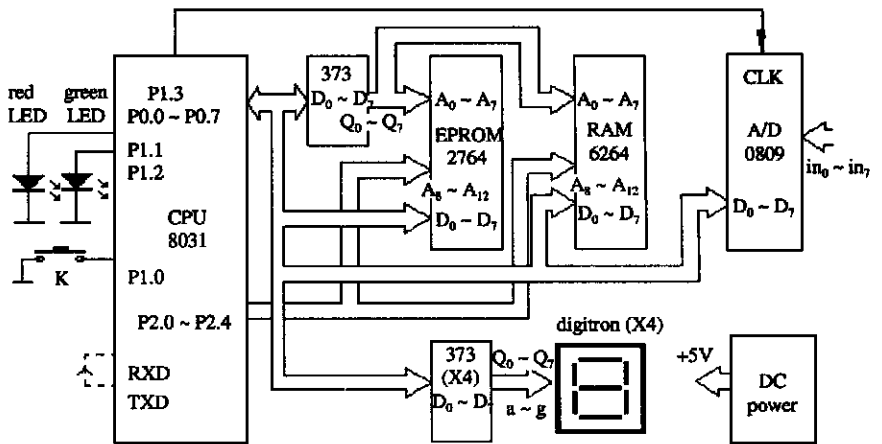


Fig 3 Block diagram of the single chip computer

图3 单片机系统组成方框图

行”开关 K, 使其工作于某一程序模块, 然后按下控制台上的“充电”开关, 充到一定数值后, 按下“停止”开关, 再按下“放电”开关, GTEM 室中便产生核电磁脉冲辐射场。这就完成了对单片机的一次辐照实验, 一般称为冲击实验。冲击后, 打开 GTEM 室, 检查单片机的工作情况。

实验环境为: 温度24.0, 湿度41.2%。

2.1 重启动效应实验及加固方法研究

2.1.1 实验结果及讨论

经多次冲击实验测得, 使单片机发生重启动现象的最低峰值场强为 $4.16 \times 10^4 \text{ V/m}$, 此时 NEMP 的上升沿为 11ns, 脉宽为 $1.2 \mu\text{s}$ 。在 $5 \times 10^5 \text{ V/m}$ 场强下进行 20 次冲击实验, 有 6 次发生重启动。使单片机重启动的原因之一是 RST 脚上的干扰信号被误认为是复位信号。图4是单片机重启动时在 RST 脚上采集到的干扰信号波形。要使单片机可靠复位, 需在 RST 脚出现不小于 2 个机器周期的高电平^[2]。当晶振频率 $f_c = 12 \text{ MHz}$ 时, 该高电平应最少保持 $2 \mu\text{s}$ 。图4中, 干扰信号的正负脉冲宽度都远小于 $2 \mu\text{s}$, 似乎不满足复位条件。但该条件是可靠复位的条件, CPU 内的复位电路在每个机器周期的 S5P2 采样一次 RST 的状态, 如果连续两次采集到的 RST 都处于高电平, 则 CPU 同样进入复位状态。由于 RST 脚上的干扰信号的持续时间接近 $2 \mu\text{s}$, 在 RST 脚上连续两次采集到高电平的可能性是存在的。另一个原因是

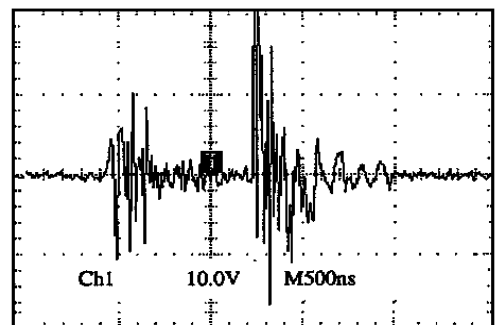


Fig 4 Interference waveform on the pin RST

图4 RST 脚上的干扰波形

CPU 内部的复位信号线(RST 不是直接复位信号)上有干扰信号, 直接使单片机复位。

2.1.2 加固方法研究

可采取屏蔽法和在敏感点与地之间并联浪涌吸收器元件法进行加固。本实验已对第二种方法进行了研究, 即在RST 脚和地之间并联瞬态抑制二极管TVS。TVS 响应快、瞬态功率大、漏电流小, 能以 10^{-12} s 量级的速度将两极的高阻抗变为低阻抗, 吸收数 kW 的浪涌功率, 使两极电压箝位于预定值^[3]。

在RST 和地之间并联一个型号为SA 5 0A (箝位电压为5V, 单向)的TVS 后,RST 脚上的干扰信号最大幅度降为10V 左右, 单片机发生重新启动现象的最低峰值场强升为 $5.12 \times 10^4 \text{V/m}$, 此时NEMP 的上升沿为9ns, 脉宽为 $1.2 \mu\text{s}$ 。当单片机工作频率为6MHz 时,RST 脚上需出现不小于 $4 \mu\text{s}$ 的高电平才能使单片机可靠复位, 因此,RST 上的干扰信号不足以使单片机复位。将12MHz 晶振换为6MHz 后, 实验测得单片机发生重新启动的最低峰值场强升为 $5.31 \times 10^4 \text{V/m}$ 。加装TVS 后, 干扰阈值基本不变。这也证明了上述分析的正确性。若想大幅度提高干扰阈值, 需采用屏蔽法, 衰减进入CPU 内部的干扰信号。

2.2 “死机”效应实验结果及讨论

实验测得, 使单片机“死机”的干扰阈值为 $3.29 \times 10^4 \text{V/m}$, 此时的NEMP 上升沿为12ns, 脉宽为 $1.2 \mu\text{s}$ 。在 $5 \times 10^5 \text{V/m}$ 场强下进行20次冲击实验, 发生5次“死机”和3次程序跳转。

“死机”是指干扰使程序计数器内容改变, 结果可能将一条指令的后半字节与下一条指令的前半字节当做一条指令来执行, 从而使程序进入一个意想不到的死循环^[4]。程序跳变不一定必然引起“死机”, 当程序跳转到某条指令首字节时, 一般不会引起“死机”; 如实验中出现的程序跳转现象。“死机”出现的概率与程序内容有关, 如长字节指令较多时容易引起“死机”。CPU 内部的程序指针计数器PC 的内容很容易被由数据总线导入的干扰所改写, 从而导致“死机”。由于PSEN 脚和数据线上有很强的干扰信号, 根据单片机的读指时序图可知, 还有一种可能造成“死机”: 干扰使CPU 读入了错误的跳转指令。

2.3 控制状态改变效应实验结果及讨论

单片机系统的控制信号一般由锁存器保存, 因此, 我们可通过研究锁存器输出数据的变化情况来研究控制状态的变化。实验表明, 使锁存器74LS373输出内容改变的最小场强只有 $1.91 \times 10^4 \text{V/m}$, 此时的NEMP 上升沿为12ns, 脉宽为 $1.2 \mu\text{s}$ 。在 $5 \times 10^5 \text{V/m}$ 场强下进行20次冲击实验, 锁存器的输出改变了16次! 由锁存器74LS373的时序图可知,ALE 脚上脉冲的上升沿可将数据输入端的信号存入锁存器。在每次冲击实验中,ALE 脚上有很强的干扰信号, 而每次数据输入端的干扰数据都不同, 因此锁存器输出的内容也都不同。

2.4 A/D 转换电路效应实验结果及讨论

A/D0809对0通道输入的直流电压进行转换, 程序可随时显示转换结果的最大、最小值。使A/D 转换结果改变的最小场强为 $3.17 \times 10^4 \text{V/m}$, 此时的NEMP 上升沿为11ns, 脉宽为 $1.2 \mu\text{s}$ 。在 $5 \times 10^5 \text{V/m}$ 场强下进行10次冲击实验, 实验结果如表1所示。使A/D 转换结果产生误差的原因有三: (1) 模拟输入端的输入信号上迭加有干扰信号(干扰脉冲峰值可达几十伏); (2) 读转换结果时, 数据线上的干扰信号使读入数据出错; (3) 强干扰使A/D0809的工作异常。实验表明, 数据采集误差增大主要由前两个因素引起。

表1 转换结果的最大最小值

Table 1 Maximum and minimum of the conversion result

serial number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
maximum	8A	8B	C8	FF	8A	8B	8A	8A	8B	A9
minimum	8A	8A	8B	8A	8A	8A	8A	0	8A	8A

2.5 串行通讯电路效应实验结果及讨论

将TXD 和RXD 短接, 使串口工作于自发自收状态, 将发送数据直接送入RXD 进行接收。当发现接收数据与发送数据不符时, 显示出错信息。实验测得, 使串行通讯出错的最小场强为 $2.18 \times 10^5 \text{V/m}$, 此时的NEMP 上升沿为11ns, 脉宽为 $1.2 \mu\text{s}$ 。在 $5 \times 10^5 \text{V/m}$ 场强下进行20次冲击实验, 有2次通讯出错。串口通讯出错的原因有两个: (1) 干扰使CPU 内的串口电路工作失误(如SBUF 内容改变), 从而使接收

与发送不符; (2) 将 RxD 线上的干扰信号当做数据接收。

2.6 其它效应实验结果

RAM 效应实验由三部分组成: (1) 先在 RAM 中写入数据, 然后进行冲击实验, 程序判断 RAM 内容是否改变; (2) 对一固定地址单元进行循环写, 在循环写期间进行冲击实验, 冲击完毕, 显示写入数据是否出错; (3) 先写入, 然后循环读一固定地址单元, 在循环读期间进行冲击实验, 并显示读数据是否出错。三部分实验中出错的最小场强分别为 $9.61 \times 10^4 \text{V/m}$, $3.15 \times 10^5 \text{V/m}$ 和 $3.84 \times 10^5 \text{V/m}$ 。在 $5 \times 10^5 \text{V/m}$ 场强下进行 20 次冲击实验, 出错次数分别为 6 次、1 次和 1 次。

使 CTC 停止计数的最小场强为 $3.83 \times 10^4 \text{V/m}$, 此时的 NEMP 上升沿为 11 ns, 脉宽为 $1.2 \mu\text{s}$ 。在 $5 \times 10^5 \text{V/m}$ 场强下进行 20 次冲击实验, 有 2 次 CTC 工作失误。

干扰可使 CPU 响应外中断 0 和 1, 响应的最小场强分别为 $2.74 \times 10^5 \text{V/m}$ 和 $3.51 \times 10^5 \text{V/m}$ 。在 $5 \times 10^5 \text{V/m}$ 场强下进行 20 次冲击实验, 外中断 0 响应了 3 次, 外中断 1 响应了 1 次。工作寄存器 $R_0 \sim R_7$ 和 SFR 出错的干扰阈值分别为 $2.17 \times 10^5 \text{V/m}$ 和 $2.83 \times 10^5 \text{V/m}$, 在 $5 \times 10^5 \text{V/m}$ 场强下进行 20 次冲击实验, 出错的次数分别为 3 次和 1 次。RAM 的 (20H~7FH) 单元没有出错现象发生。

实验中没有发现器件硬损伤及 EPROM 内容改变现象。

3 结 论

本文通过核电磁脉冲对单片机系统的辐照实验, 对单片机的重启动、死机、通讯出错等多种效应进行了研究, 测出了干扰阈值。由于实验的不彻底性, 对各种效应阈值的测量以及对上述现象的解释还不够准确, 有待于下一步进行深入的实验研究。

参考文献:

- [1] 王莹. 高功率脉冲电源[M]. 北京: 原子能出版社, 1991. 13—14 (Wang Y. High power pulse power supply. Beijing: Nuclear Energy Publishing Company, 1991. 13—14)
- [2] 丁志刚, 李刚民. 单片微型计算机原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 1990. 37—38 (Ding Z G, Li G M. The principle and applying of single chip microcomputer system. Beijing: Electronic Industry Publishing Company, 1990. 37—38)
- [3] 滕峰, 薛科子. 瞬态电压抑制器特性及应用[J]. 电子技术应用, 1996, 12: 25—30 (Teng F, Xue K Z. The characteristic and applying instantaneous voltage suppresser. *Applying of Electronic Technology*, 1996, 12: 25—30)
- [4] 孔蕙, 徐国华. 微机应用系统程序失控的若干防护措施[J]. 微型机与应用, 1996, (9): 31—33 (Kong H, Xu G H. Some defend-ed steps on the microcomputer system program out of control *Microcomputer and Applying*, 1996, (9): 31—33)

Study on irradiation effects of nucleus electromagnetic pulse on single chip computer system

HOU Min-sheng, LIU Shang-he, WANG Shu-ping

(Electrostatic and Electromagnetic Protection Institute, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract Intense electromagnetic pulse, namely nucleus electromagnetic pulse (NEMP), lightning electromagnetic pulse (LEMP) and high power microwave (HPM), can disturb and destroy the single chip computer system. To study this issue, we made irradiation experiments by NEMPs generated by gigahertz transversal electromagnetic (GTEM) Cell. The experiments show that shutdown, restarting, communication errors of the single chip microcomputer system would occur when it was irradiated by the NEMPs. Based on the experiments, the cause on the effects on the single chip microcomputer system is discussed.

Key words NEMP; single chip microcomputer system; irradiation effects