

基于统计分析的多协议单片机数据通信系统 EFT 抗扰度研究

钟志明¹, 谭坚文^{1,2}, 叶方伟¹, 刘 阳¹, 曾德平¹, 吴明达³

(1. 重庆医科大学生物医学工程学院, 省部共建国家重点实验室培育基地—重庆市超声医学工程重点实验室, 重庆市生物医学工程学重点实验室, 重庆市微创医学协同创新中心, 重庆 400016;

2. 重庆通信学院, 重庆 400035; 3. 重庆电力设计院, 重庆 401121)

摘 要: 电快速瞬变脉冲群(EFT)易通过电源线与通信线间的耦合干扰电子系统或设备正常运行,通信协议直接影响数据通信的 EFT 抗扰度. 本文设计了包含 I²C、USART、SPI 和 RS232 四种数据通信协议的单片机数据通信系统,采用线缆耦合方式对其进行 EFT 抗扰度试验,基于数理统计方法分析了不同通信协议下系统 EFT 抗扰度. 根据试验中获取的阈值电压数据,运用最大似然法估计假设模型参数,再通过卡方拟合优度检验以及汉南-奎因信息准则选取最优拟合分布模型 Gamma 模型,以研究不同通信协议下的 EFT 干扰阈值电压分布规律. 对单片机通信协议而言,在一定波特率下,EFT 抗扰度由低到高依次为 I²C、USART、SPI、RS232.

关键词: 单片机数据通信系统; 线缆耦合; EFT 抗扰度分析; 最大似然估计; 汉南-奎因信息准则; 数据通信协议比较

中图分类号: O441

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2018)02-0393-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.02.019

Research on EFT Immunity of MCU Data Communication System with Multi-protocol Based on Statistical Analysis

ZHONG Zhi-ming¹, TAN Jian-wen^{1,2}, YE Fang-wei¹, LIU Yang¹, ZENG De-ping¹, WU Ming-da³

(1. Key Laboratory of Ultrasound Engineering in Medicine Co-Founded by Chongqing and the Ministry of Science and Technology, College of Biomedical Engineering, Chongqing Key Laboratory of Biomedical Engineering, Chongqing Medical University, Chongqing Collaborative Innovation Center for Minimally-invasive and Noninvasive Medicine Chongqing, Chongqing 400016, China;

2. Chongqing Communication Institute, Chongqing 400035, China;

3. Chongqing Electric Power Design Institute, Chongqing 401121, China)

Abstract: The electronic system or equipment can be easily disturbed by Electrical Fast Transient(EFT) induced by coupling between power lines and communication lines. EFT immunity of data communication is directly influenced by communication protocol. Hence, a MCU data communication system which contains four kinds of data communication protocol including I²C, USART, SPI and RS232 was designed for EFT immunity test by means of cable coupling. The test data was analyzed by mathematical statistics method for obtaining the EFT immunity of MCU data communication system under different communication protocols. The optimal Gamma model is used for researching distribution law of EFT interference threshold voltage of MCU data communication system under different communication protocols, which was selected by chi-square goodness of fit test and Hannan Quinn information criterion through hypothetical models. The model parameters were estimated by maximum likelihood method based on test data. For MCU communication protocols, EFT immunity from low to high is in the order of I²C, USART, SPI, RS232 under the same baud rate.

Key words: MCU data communication system; cable coupling; EFT immunity analysis; maximum likelihood estimation; Hannan Quinn information criterion; comparison of data communication protocol

1 引言

电快速瞬变脉冲群(EFT)是用于模拟电网中瞬态过程(如电感性负载的切换、继电器触点弹跳等)的一种干扰,为电磁兼容(EMC)传导抗扰度测试中重要测试项目之一^[1].特别是随着高速、大规模集成电路和低电压芯片等敏感器件在复杂系统中的大量应用,EFT问题也随之加剧^[2,3].作为一项 EMC 传导测试项目,EFT 的传播、耦合及抑制方法研究常从传导的角度来开展.但在实际电子、电气系统中,由于系统设计与布线问题,EFT 通过线缆产生的辐射影响以及线缆间的互耦往往不可忽视,有时甚至比传导更为严重,且更难抑制.国内外学者已针对线缆间的 EFT 耦合及辐射问题开展了相关研究. Cerri^[4,5]较早指出 EFT 测试时将产生较强的电磁辐射.文献[6]根据 EFT 线缆耦合特性,建立了数值计算模型,分析了不同 EFT 干扰电压、线缆间距、线缆离地高度以及负载大小对耦合特性的影响.

在实际的电子系统或设备中,比较常见的 EFT 线缆耦合干扰现象为电源线与数据通信线间的互耦,导致数据通信发生紊乱.由于 EFT 波形的能谱主要集中在 100MHz 以下^[6],特别是当电子系统或设备中的数据通信线缆长度较长时,则电源线与数据通信线间的耦合问题更为明显.数据通信受 EFT 干扰的机理为通信线缆中的数字电平被耦合了错误的脉冲干扰,致使通信错误或与通信协议紊乱.不同的数据通信协议具有不同的电气特性以及不同的数据传输方式,其 EFT 抗扰度也有所区别.在系统设计时,合理地选择数据通信方式与通信协议对系统的整体抗扰特性至关重要.因此,对于不同通信协议下的数据通信,有必要以线缆间耦合的方式来开展 EFT 抗扰度研究.

在开展不同通信协议下数据通信的 EFT 抗扰度研究时,单次抗扰度测试结果存在随机性,故可采用统计方法分析其抗扰度.目前,运用数理统计方法分析 EFT 抗扰度的相关研究仍然较少.文献[7]求取了服从 Weibull 分布的 EMP 损伤函数,用于单片机传输系统 EMP 损伤效应研究.文献[8]运用贝叶斯数理统计方法获取损伤效应函数从而对器件级或系统级电磁脉冲效应进行评估.文献[9]提出了基于分层贝叶斯网络的电子系统电磁脉冲易损性评估模型建模方法.文献[10,11]建立了基于贝叶斯网络的电磁易损性分析方法论框架,并以由计算机和单片机等组成的智能控制系统为验证对象,分析其易损性.但在 EFT 抗扰度研究中,先验信息的匮乏及后验分布的复杂计算严重影响了贝叶斯统计方法的运用.

为分析不同通信协议下数据通信的 EFT 抗扰度,本文设计了一个多协议单片机数据通信系统,采用线

缆耦合方式对系统进行了 EFT 抗扰度试验,运用经典数理统计方法研究了系统 EFT 干扰阈值电压分布规律.首先,假设 Gamma、正态及 Weibull 分布为干扰阈值电压的拟合分布模型.再基于从试验中获取的干扰阈值电压数据,运用最大似然法估计假设模型参数,通过卡方拟合优度检验及汉南-奎因信息准则(HQC)选取最优拟合分布模型 Gamma 模型.最后,运用 Gamma 模型研究不同通信协议下数据通信系统 EFT 干扰阈值电压分布规律,进而分析并比较不同通信协议下的 EFT 抗扰度.经比较可得,同一波特率而不同通信协议下单片机数据通信系统的 EFT 抗扰度由低到高依次为 I²C、USART、SPI、RS232.

2 多协议单片机数据通信系统设计

为分析不同通信协议下数据通信的 EFT 抗扰度,设计了多协议单片机数据通信系统,其系统组成如图 1 所示.

由图 1 可知,设计的多协议单片机数据通信系统由主机和从机两块硬件结构上相同的 PCB 板以及连接两者的通信线缆组成.为增强系统的抗扰性,采用 3.3V 锂电池供电. PCB 板中采用的单片机为 Microchip 公司的 PIC18F44J50.主从机 PCB 板间通过 D 型 9 针数据接口连接器(DB9)连接通信线缆完成数据通信的硬件连接.为直观地观察主从机数据通信,PCB 板上设计了数码管.按键开关分为电源开关以及数码管开关,分别用于控制电源的关断和数码管显示.系统设有四种不同的通信串口,可分别用于实现 I²C、USART、SPI、RS232 四种不同通信协议的数据通信.通信程序设计思想为:四种数据通信的通信速率(波特率)均设置为 9600bps;当按下数码管开关时,从机数码管跟随着主机数码管开始从‘0’按 1s 时间间隔递增显示至‘99’.

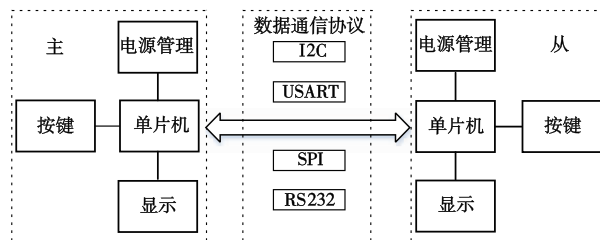


图1 多协议单片机数据通信系统设计框图

系统 PCB 板实物构成如图 2(a)所示.因本文重点研究的是数据通信线缆间的 EFT 耦合,不考虑 EFT 对数据通信系统 PCB 板的辐射效应,故将 PCB 板采用铝合金进行了屏蔽处理,屏蔽后的 PCB 板如图 2(b)所示.

3 EFT 抗扰度测试与实验

为模拟电源线与数据通信线缆间 EFT 耦合对系统

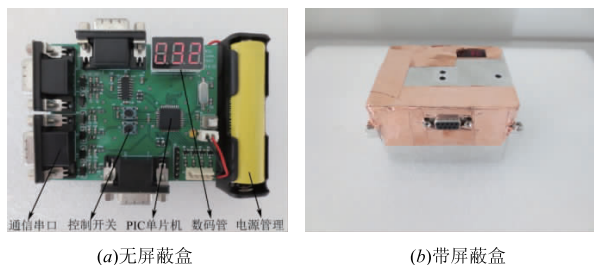


图2 多协议单片机数据通信系统PCB板实物图

或设备数据通信的影响,利用线缆间 EFT 耦合对单片机数据通信系统进行抗扰度试验,装置如图 3 所示.

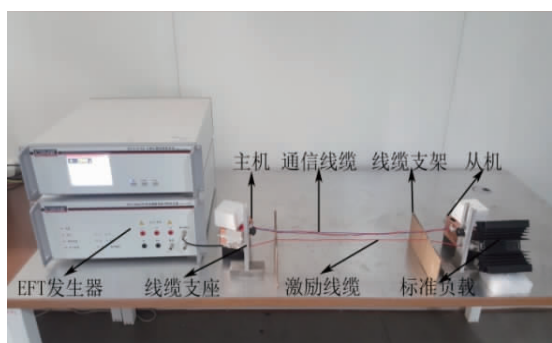


图3 多协议单片机数据通信系统EFT抗扰度试验装置

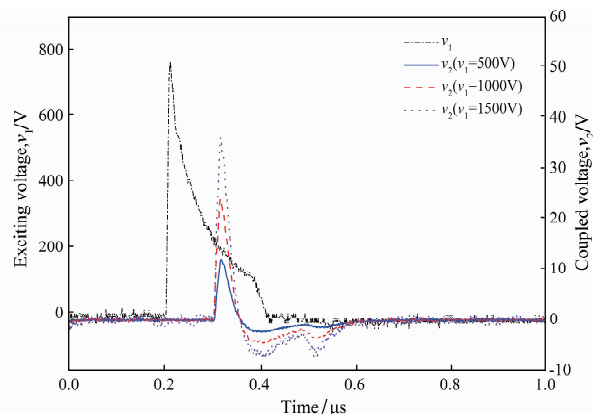
图 3 中, EFT 发生器为上海凌世电子有限公司的 EFT404CB, 因内阻为 50Ω , 故实际施加在激励线缆上的 EFT 电压为设置电压的 $1/2$, 后续文中采用的 EFT 电压值均为实际值, 将不再赘述. 长度为 l 的激励线缆通过线缆支座, 其中一端连接 EFT 发生器, 另一端连接 50Ω 标准负载, 线缆上被注入的 EFT 电压称为激励电压 v . 数据通信线缆平行于激励线缆, 离地高度为 h . 线缆支架上含有卡槽, 用于固定线缆以及调节激励线缆与数据通信线缆的间距 d . 在研究中, $d = 4\text{cm}$, $h = 8\text{cm}$, $l = 1\text{m}$. 文献[6]的 EFT 线缆耦合特性研究表明, 当 $v = 750\text{V}$, $d = 7\text{cm}$, $h = 8\text{cm}$ 时, 线缆上耦合电压峰值可高达 36.22V , 足以严重影响电子系统或设备的正常运行. EFT 激励电压与线缆耦合电压时域波形比较如图 4 所示.

在相同波特率下, 分别对不同数据通信方式下单片机数据通信系统进行 EFT 抗扰度试验. 以 SPI 通信协议为例, 试验采用步进法, 过程如下:

(1) 将系统通信协议调为 SPI, EFT 发生器参数设为: 脉冲频率 10k , 脉冲个数 30 , 电压为 200V .

(2) 系统开始数据通信后, 向激励线缆注入 EFT. 通过观察主从机数码管是否发生跳跃显示或者显示中止, 判断系统数据通信是否受扰.

(3) 主从机间传输 60 个数据量后, 系统数据通信仍未受扰则按 200V 步长提高 EFT 电压并间隔 30s 后重复步骤(2). 若受扰, 则该次试验结束, 记录此时 EFT 电

图4 EFT激励电压 (v_1) 与线缆间耦合电压 (v_2) 时域波形

压. 数据通信受扰时所对应 EFT 电压称为系统 EFT 干扰阈值电压.

4 统计模型与分析方法

EFT 抗扰度测试结果存在一定随机性, 为更合理评判系统抗扰度, 本文采用数理统计方法研究多协议数据通信系统 EFT 干扰阈值分布规律.

4.1 数据的获取

应用统计方法研究系统 EFT 干扰阈值分布规律, 先获取干扰阈值电压数据, 对其进行拟合分析. 为提高拟合准确度, 获取多个 EFT 干扰阈值电压. 以 SPI 通信协议为例, 对系统进行多次 EFT 抗扰度试验, 获取数据如图 5 所示.

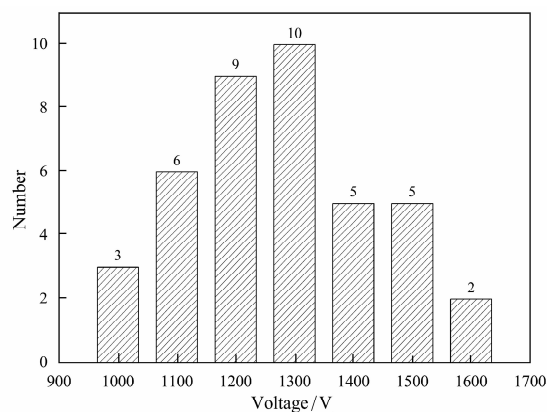


图5 SPI通信下系统的EFT干扰阈值电压数据

4.2 统计分布模型选取

对系统 EFT 干扰阈值电压进行拟合分析, 先假设拟合分布模型. 假设不同通信方式下的干扰阈值电压服从 Gamma、正态或 Weibull 分布.

Gamma 模型概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\beta x}, \quad x \geq 0 \quad (1)$$

正态模型概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(x-\mu)^2}, x \geq 0 \quad (2)$$

Weibull 模型概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{\eta}{\gamma} \left(\frac{x}{\gamma}\right)^{\eta-1} e^{-\left(\frac{x}{\gamma}\right)^\eta}, x \geq 0 \quad (3)$$

上列式子中, x 为阈值电压, α 和 β , μ 与 σ , γ 及 η 分别为 Gamma、正态、Weibull 模型的未知参数。

选取合适的拟合分布模型, 先确定假设模型未知参数。基于图 5 中 EFT 干扰阈值电压数据, 应用最大似然法^[12] 估计模型未知参数。其原理为: 对于给定的试验数据即 n 组样本观测值, 分布模型最合理的参数估计值应使模型抽取该 n 组样本观测值的概率最大。而抽取概率也称为分布模型的似然函数, 表明使似然函数取得最大值的参数值为分布模型未知参数的最大似然估计值。

$$L(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_r) = \prod_{i=1}^n f(x_i; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_r) \quad (4)$$

式中, $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_r$ 为分布模型未知参数, $L(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_r)$ 为分布模型的似然函数, $f(x_i; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_r)$ 则是其概率密度函数, x_i 是样本值, n 为样本数。求取似然函数 $L(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_r)$ 最大值点, 先求出其驻点。为减少计算量, 对式(4)两边作自然对数处理, 再分别求取各个未知参数偏导数并令其等于 0, 可得

$$\begin{cases} \frac{\partial \ln L(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_r)}{\partial \theta_1} = 0 \\ \frac{\partial \ln L(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_r)}{\partial \theta_2} = 0 \\ \vdots \\ \frac{\partial \ln L(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_r)}{\partial \theta_r} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)求出似然函数所有驻点, 比较驻点处似然函数值选取最大值点, 对应参数值为各参数 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_r$ 的最大似然估计。经估计, $\alpha = 64.7$, $\beta = 19.8$; $\mu = 1277.5$, $\sigma = 158.9$; $\gamma = 1349$, $\eta = 8.6$ 。

为检验假设模型是否适用于 EFT 干扰阈值电压的拟合分析, 采用卡方拟合优度检验^[13] 验证。检验在显著性水平为 α 的拒绝域为:

$$K = \sum_{i=1}^k \frac{(v_i - np_i)^2}{np_i} \geq \chi_{1-\alpha}^2(k-r-1) \quad (6)$$

式中, K 为假设模型的卡方拟合优度检验值, k 是试验数据即样本数据被划分的区间数, V_i 为落在相应数据区间的样本个数, P_i 是每个区间所对应的估计概率, n 为样本数量, r 是假设模型未知参数的个数。根据图 5 中 EFT 干扰阈值电压数据分布特性, 设区间数 $k = 5$; 由式(1)、(2)、(3)可知, r 均等于 2。取显著性水平 $\alpha = 0.05$, 则由式(6)可得, 卡方拟合优度检验拒绝域为 $K \geq 5.99$ 。而 Gamma、正态和 Weibull 模型的卡方拟合优

度检验值 K 分别为 4.79、5.16 和 5.87, 均不在式(6)所示的拒绝域范围中。故 Gamma、正态及 Weibull 模型均可用于系统 EFT 干扰阈值电压拟合分析。

为选出单片机数据通信系统 EFT 干扰阈值电压的最优拟合分布模型, 采用信息准则标准来衡量假设模型的拟合优良性。信息准则由模型拟合程度判断项和模型复杂度惩罚项组成, 判断项用于评判模型的拟合程度, 惩罚项则是用于防止过拟合问题^[14,15]。常见的信息准则包括赤池信息准则(AIC)、汉南-奎因信息准则(HQC)、贝叶斯信息准则(BIC)、一致性赤池信息准则(CAIC), 区别在于模型复杂度惩罚项的不同。模型复杂度的惩罚强度从弱到强为 AIC、HQC、BIC、CAIC, 惩罚强度越强, 选取的模型越精简但其拟合精度越低。为选取兼具良好的拟合精度和精简性的模型, 用 HQC 选取最优拟合分布模型。

$$HQC = -2 \ln[L(x)] + kin[\ln(n)] \quad (7)$$

式中, $-2 \ln[L(x)]$ 为模型拟合程度判断项, $kin[\ln(n)]$ 为模型复杂度惩罚项, $L(x)$ 是假设模型的最大似然函数, k 为假设模型未知参数, n 是样本数量。

经计算, 三种假设模型的 HQC 值如表 1 所示。一般地, 选取信息准则值最小的模型为最优模型^[16,17]。表 1 表明, Gamma 模型为不同协议下系统 EFT 干扰阈值电压的最优拟合分布模型。

表 1 不同假设模型的 HQC 比较

分布模型	Gamma	Normal	Weibull
HQC	521.2	521.6	524.5

4.3 EFT 干扰阈值电压分析

在脉冲干扰或损伤效应研究中^[7,18], 一般以 80% 的预估阈值电压为初始电压, 采用步进法逐步增加脉冲电压直至发生干扰或损伤效应, 并将对应的脉冲电压定义为阈值电压。从产生效应的概率上讲, 阈值电压明显大于前一个脉冲电压而又略小于后一个电压, 表明阈值电压处概率变化率最大。为简便分析, 以 SPI 数据通信为例, 通过 Gamma 分布 PDF 曲线和 CDF 曲线确定系统的 EFT 干扰阈值电压。

基于图 5 中 SPI 通信协议下的 EFT 干扰阈值电压数据, 运用最大似然法估计 Gamma 模型未知参数, 可得 EFT 干扰阈值电压拟合分布模型

$$f(x) = \frac{19.76^{64.66}}{\Gamma(64.66)} x^{63.66} e^{-19.76x}, x \geq 0 \quad (8)$$

其 PDF 曲线以及 CDF 曲线如图 6 所示。

CDF 曲线定义表明, 曲线斜率为系统产生干扰效应的概率变化率。定义变量 P_r 为曲线斜率

$$P_r = \frac{\int_0^x f(t) dt}{x}, x \geq 0 \quad (9)$$

其中, $f(t)$ 为模型概率密度函数, x 为 EFT 电压。由计算

可得, P_r 在 EFT 电压为 1259V 时取得最大值, 表明系统 EFT 干扰阈值电压为 1259V. 同时, 经计算发现 PDF 曲线也在电压等于 1259V 处取得最大值. 这是由 PDF 曲线本身定义所致. 图 6(a) 中, ΔS 表示系统产生干扰效应的概率增量, ΔV 为 EFT 电压增量. PDF 曲线定义表明, P_r 也等于 $\Delta S/\Delta V$. 而根据曲线特性可知, P_r 在曲线最大值处取得最大值, 说明 PDF 曲线最大值处所对应的电压为系统的 EFT 干扰阈值电压.

5 不同通信协议下单片机数据通信系统 EFT 抗扰度的对比分析

本文采用 Gamma 模型分别对 I²C、USART、SPI、RS232 四种不同通信方式下单片机数据通信系统的 EFT 干扰阈值电压进行拟合分析, 研究其分布规律, 并完成了不同通信方式下单片机数据通信系统 EFT 抗扰度的分析与对比.

5.1 基于 SPI 通信的单片机数据通信系统的 EFT 抗扰度分析

由图 6(a) 可知, SPI 通信协议下的 EFT 干扰阈值电压为 1259V. 图 6(b) 表明, 不同激励电压下 EFT 对 SPI 通信下系统具有不同的干扰概率. 如激励电压为 1000V 时, 系统受扰概率为 3.21%.

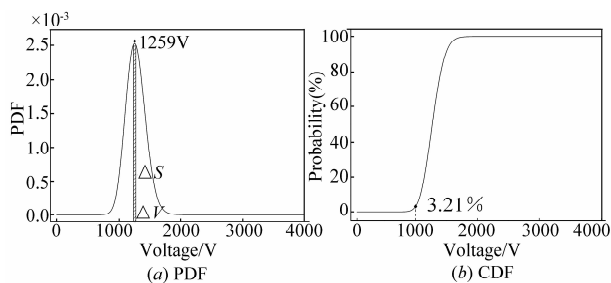


图6 SPI通信下系统干扰阈值电压的分布曲线

5.2 基于 I²C 通信的单片机数据通信系统的 EFT 抗扰度分析

将通信协议调为 I²C 通信, 获取 EFT 干扰阈值电压数据如图 7 所示. 基于数据, 运用最大似然法估计 Gamma 模型未知参数, 可得:

$$f(x) = \frac{33.34^{28.57}}{\Gamma(28.57)} x^{27.57} e^{-33.34x}, x \geq 0 \quad (10)$$

其 PDF 曲线以及 CDF 曲线如图 8 所示.

由图 8(a) 可知, I²C 通信协议下的 EFT 干扰阈值电压为 920V. 图 8(b) 表明, 不同激励电压下 EFT 对 I²C 通信下系统具有不同的干扰概率. 如激励电压为 1000V 时, 受扰概率为 62.7%.

5.3 基于 USART 通信的单片机数据通信系统 EFT 抗扰度分析

将通信协议设为 USART 通信, 获取 EFT 干扰阈值

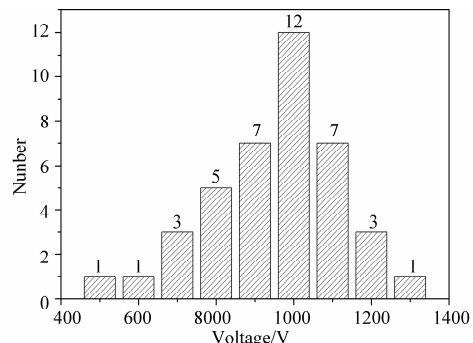


图7 I²C通信下系统的干扰阈值电压数据

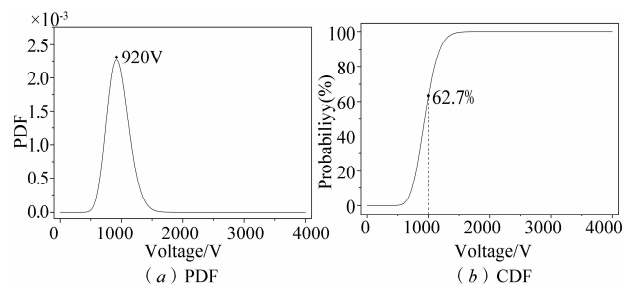


图8 I²C通信下系统干扰阈值电压的分布曲线

电压数据如图 9 所示. 基于数据, 运用最大似然法估计 Gamma 模型未知参数, 可得:

$$f(x) = \frac{35.94^{28.66}}{\Gamma(28.66)} x^{27.66} e^{-35.94x}, x \geq 0 \quad (11)$$

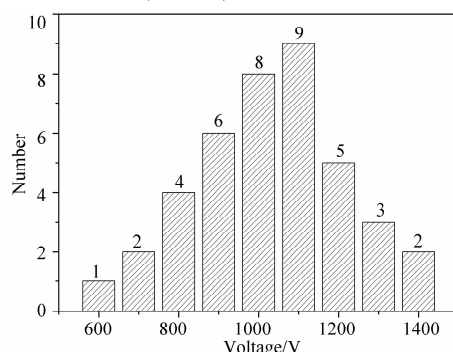


图9 USART通信下系统的干扰阈值电压数据

其 PDF 曲线以及 CDF 曲线如图 10 所示.

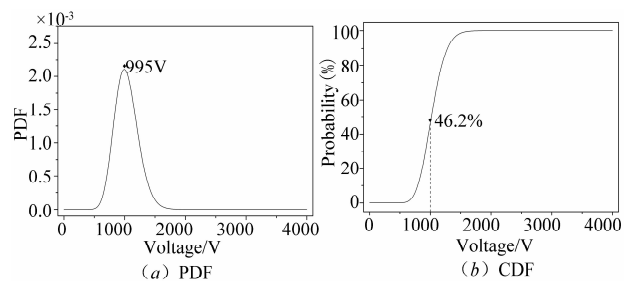


图10 USART通信下系统干扰阈值电压的分布曲线

由图 10(a) 可得, USART 通信协议下的 EFT 干扰阈值电压为 995V. 图 10(b) 表明, 不同的激励电压对

USART 通信下系统具有不同的干扰概率. 如激励电压为 1000V 时, 受扰概率为 46.2%.

5.4 基于 RS232 通信的单片机数据通信系统的 EFT 抗扰度分析

将通信协议调为 RS232 通信, 获取 EFT 干扰阈值电压数据如图 11 所示. 基于数据, 运用最大似然法估计 Gamma 模型未知参数, 可得:

$$f(x) = \frac{17.42^{97.75}}{\Gamma(97.75)} x^{96.75} e^{-17.42x}, x \geq 0 \quad (12)$$

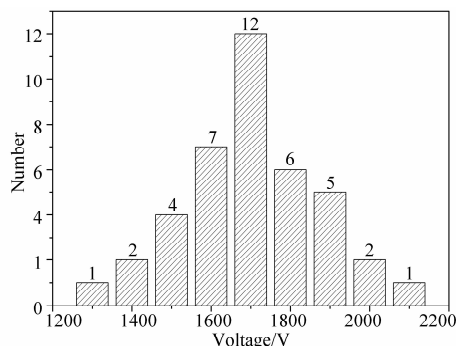


图11 RS232通信下系统的干扰阈值电压数据

其 PDF 以及 CDF 曲线如图 12 所示.

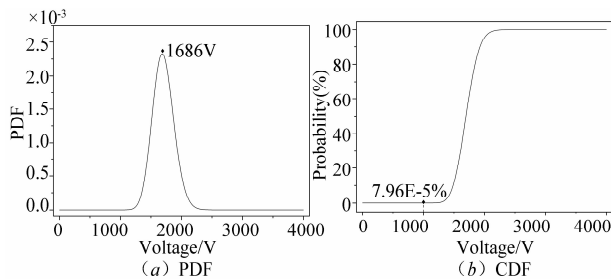


图12 RS232通信下系统干扰阈值电压的分布曲线

由图 12(a) 可知, RS232 通信协议下的 EFT 干扰阈值电压为 1686V. 图 12(b) 表明, 不同的激励电压对 RS232 通信下系统具有不同的干扰概率. 如激励电压为 1000V, 受扰概率为 0.0000796%.

5.5 不同通信协议下单片机数据通信系统的 EFT 抗扰度对比分析

3.2 表明, Gamma 模型为多协议单片机数据通信系统 EFT 干扰阈值电压的最优拟合分布模型. 运用 Gamma 模型对干扰阈值电压数据进行拟合分析, 研究干扰阈值电压分布规律, 比较不同通信方式下的 EFT 抗扰度, 如表 2 所示.

表 2 表明, 通信协议下单片机数据通信系统的 EFT 抗扰度由低到高依次为 I²C、USART、SPI、RS232. 由于 I²C、USART、SPI 数据通信均采用 TTL 电平, 而 RS232 数据通信采用高幅值电平 RS232, 故具有较好的抗扰性. SPI 只有在 SCK 时钟信号上升沿或下降沿才能进行

有效的数据通信, 相对而言, 通信更不易受 EFT 干扰. I²C 和 SPI 均依赖串行时钟, 但 I²C 是开漏 OpenDrain 类型的输入输出端口, 驱动依赖上拉电阻, 数据通信更易受到干扰. 而 I²C 数据通信需严格按照 SCL 信号时序进行, 在 EFT 干扰下 SCL 信号时序极易发生紊乱, 导致通信受影响.

表 2 不同通信协议下单片机数据通信系统 EFT 抗扰度比较

通信协议	I ² C	USART	SPI	RS232
阈值电压(V)	920	995	1259	1686
干扰概率(%)	62.7	46.2	3.21	7.96E-5
HQC	524.7	525.5	521.2	527.5

5.6 不同波特率对单片机数据通信系统数据通信 EFT 抗扰度的影响分析

波特率是数据通信时需设置的重要参数, 影响着通信速度, 为研究其与数据通信 EFT 抗扰度间关系, 开展不同波特率下单片机数据通信系统 EFT 抗扰度试验与分析. 与前述研究方法类似, 以 USART 数据通信协议为例, 求取不同波特率下的 EFT 干扰阈值电压, 如图 13 所示.

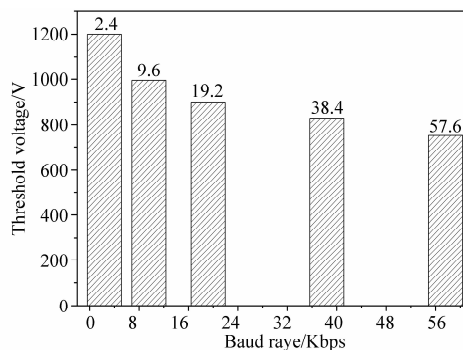


图13 波特率对系统EFT抗扰度的影响分析

图 13 表明, 随着波特率的增加, 单片机数据通信系统数据通信 EFT 抗扰度逐渐降低, 说明系统数据通信时设置合适的波特率是非常必要的.

6 结论

在电子系统或设备中, EFT 易通过电源线与通信线间的耦合干扰电子系统或设备的正常运行, 通信协议直接影响数据通信的 EFT 抗扰度. 因此, 本文设计了多协议单片机数据通信系统, 采用线缆耦合的方式对系统进行 EFT 抗扰度试验. 基于试验中获取的干扰阈值电压数据, 运用卡方拟合优度检验以及汉南-奎因信息准则对假设模型 Gamma、正态以及二参数 Weibull 分布进行验证与比较, 选取出了最优的 Gamma 分布模型, 用于试验数据的拟合分析, 研究了不同通信协议下单片机数据通信系统 EFT 干扰阈值电压的分布规律, 并比较了不同通信协议下单片机数据通信系统的 EFT 抗扰

度.通过模型验证可知,采用信息准则法有效提高了 EFT 抗扰度分析中经典统计理论的模型选择优良度.

通过比较不同通信协议下单片机数据通信系统的 EFT 抗扰度可得知,抗扰度由低到高依次为 I²C、US-ART、SPI、RS232.其中,RS232 由于具有较高的电平而具有更高的 EFT 抗扰性.同时,对 SPI 通信而言,EFT 只有在 SCL 时钟信号的上升沿或下降沿处才能干扰其通信,故其抗扰度相比于 I²C、USART 更高.I²C 是开漏 OpenDrain 类型的输入输出端口,驱动依赖上拉电阻,数据通信更易受到干扰且 I²C 数据通信需严格按照 SCK 信号时序进行,导致其 EFT 抗扰度最低.故系统内部或者线路板内的数据通信可优先选择 SPI 通信,而系统间或线路板间的数据通信可优先选择 RS232 的通信方式,从而改善数据通信的抗扰性,也提高了系统整体的 EFT 抗扰度.此外,线缆间的 EFT 耦合能量与线缆长度、线缆间距直接相关,因此,合理的系统布线设计对提高电子系统或设备的 EFT 抗扰度至关重要.

参考文献

- [1] BS EN 61000-4-4: 2012 Electromagnetic compatibility (EMC)-part4-4: Testing and measurement techniques-Electrical fast transient/burst immunity test[S].
- [2] Fontana M, Hubing T H. Characterization of CAN network susceptibility to EFT transient noise[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2015, 57(2): 188 - 194.
- [3] Zhang J, Koo J, Moseley R, Herrin S, Li X, Pommerenke D, Beetner D G. Modeling injection of electrical fast transients into power and IO pins of ICs[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2014, 56(6): 1576 - 1584.
- [4] Cori G, De Leo R, Primiani V M. Investigation of radiated susceptibility during EFT tests[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1997, 39(4): 298 - 303.
- [5] Cerri G, Leo R D, Primiani V M. Electrical fast-transient test: conducted and radiated disturbance determination by a complete source modeling[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2001, 43(1): 37 - 44.
- [6] Zhong Z, Tan J, Ye F, Zeng D. Numerical analysis of the electrical fast transient coupling between cables[A]. 7th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics [C]. Hangzhou, China, 2015. 69 - 72.
- [7] 翟爱斌, 陈向跃, 吴宏志, 孙蓓云, 聂鑫. 单片机传输系统 EMP 损伤函数研究[J]. 电波科学学报, 2011, 26(Z): 141 - 146.
Zhai Aibin, Chen Xiangyue, Wu Hongzhi, et al. Research on EMP-damage function of MCU transmission system[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2011, 26(Z): 141 - 146. (in Chinese)
- [8] 黄忠胜, 陈宇浩, 杨明, 李科杰, 祁国成, 吕峰, 谢萍, 刘青, 谢彦召. 基于贝叶斯方法的设备级电磁脉冲效应评估[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(12): 237 - 241.
Huang Zhongsheng, Chen Yuhao, Yang Ming, et al. Effect assessment of electromagnetic pulse at equipment level based on bayesian method[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(12): 237 - 241. (in Chinese)
- [9] 刘钰, 韩峰, 陆希成, 王建国. 电子系统电磁脉冲易损性评估的分层贝叶斯网络模型[J]. 电子学报, 2016, 44(11): 2695 - 2703.
Liu Yu, Han Feng, Lu Xicheng, Wang Jianguo. EMP susceptibility modeling and assessment of electronic system based on hierarchical bayesian networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(11): 2695 - 2703. (in Chinese)
- [10] Mao C, Canavero F. System-level vulnerability assessment for EME: from fault tree analysis to bayesian networks - Part I: methodology framework[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2016, 58(1): 180 - 187.
- [11] Mao C, Canavero F G, Cui Z, Sun D. System-level vulnerability assessment for EME: from fault tree analysis to bayesian networks - Part II: illustration to microcontroller system[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2015, 99(2): 1 - 9.
- [12] 杨谋存, 聂宏. 三参数 Weibull 分布参数的极大似然估计数值解法[J]. 南京航空航天大学学报, 2007, 39(1): 22 - 25.
Yang Moucun, Nie Hong. Advanced algorithm for maximum likelihood estimation of three parameter weibull distribution[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2007, 39(1): 22 - 25. (in Chinese)
- [13] 茆诗松, 吕晓玲. 数理统计学[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2011.
- [14] Tu S, Xu L. A theoretical investigation of several model selection criteria for dimensionality reduction[J]. Pattern Recognition Letters, 2012, 33(9): 1117 - 1126.
- [15] 戴前伟, 江沸波, 董莉. 基于汉南-奎因信息准则的电阻率层析成像径向神经网络反演[J]. 地球物理学报, 2014, 57(4): 1335 - 1344.
Dai Qianwei, Jiang Feibo, Dong Li. RBFNN inversion for electrical resistivity tomography based on Hannan-quinn criterion[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(4): 1335 - 1344. (in Chinese)
- [16] Chen P, Wu T J, Yang J. A comparative study of model selection criteria for the number of signals[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2008, 2(3): 180 - 188.
- [17] Mariani A, Giorgetti A, Chiani M. Model order selection based on information theoretic criteria: design of the penalty[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 63(11): 2779 - 2789.
- [18] 刘进, 陈永光, 谭志良, 陈京平. 集成电路不同脉冲注入

的损伤效应相关性[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1740 - 1745.

Liu Jin, Chen Yongguang, Tan Zhiliang, Chen Jingping.

Correlation of the damage effect of intergrated circuits injected by different impulses[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1740 - 1745. (in Chinese)

作者简介



钟志明 男, 1991 年生于江西赣州, 现为重庆医科大学生物医学工程学院硕士研究生, 主要研究方向为超声医疗技术、医用电气设备电磁兼容.

E-mail: zmzhongbs@126.com



谭坚文(通信作者) 男, 1980 年生于湖南长沙, 副教授, 主要研究方向为电力电子、电磁防护与电磁兼容和电工理论与新技术.

E-mail: artan@126.com