

低压电力线路载波通信特性的仿真研究

张金波^{1,2}, 孙海翠¹, 李威¹

(1. 河海大学计算机及信息工程学院, 江苏 常州 213022

2. 河海大学电气工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 低压电力线路作为信息传输的信道由于不需进行新的通信网络的投资与建设, 因而越来越多地受到人们的关注, 针对电力线路实际的电气参数, 根据电力线理论以及实际电力线路的具体特性, 建立了电力线理想等效电路和电力线载波通信的仿真电路模型, 根据仿真电路模型利用 PSpice 仿真软件对电力线路实际的电气参数进行了离线仿真研究, 通过仿真研究得出了电力线信道的各个电气参数是如何影响通信质量的, 为今后设计实际低压电力线载波通信系统电路及选择电路的有关参数时提供了理论依据。

关键词: 低压; 电力载波; 仿真; 模型

中图分类号: TM726.2 TN919.71 文献标识码: B

A Simulation Study of Characteristic of Power line Carrier Communication

ZHANG Jin-bo^{1,2}, SUN Hai-cui¹, LI Wei¹

(1. Computer & Information Engineering College Hohai Univ Changzhou Jiangsu 213022 China

2. College of Electrical Engineering, Hohai Univ Nanjing Jiangsu 210098 China)

ABSTRACT: As the transmission channel, low voltage power line has no need of new investment and construction of communications network, it has attracted the most attention. According to the actual electric parameter and theory of power line and its material characteristic, perfect equivalent circuit of power line and simulation model of its carrier telecommunication are built. Based on the model, off-line simulation is taken by using PSpice simulation software, how each electric parameter of power line channel can influence communication quality is reached. It provides the theory base for designing actual circuit of low voltage power line carrier communication system and choosing related parameters for the future.

KEYWORDS: Low voltage; Power line carrier; Simulation Model

1 引言

电力线载波技术出现于上世纪二十年代的初期, 应用电力线传输信号的实例最早是电力线电话。载波通信技术在 10KV 以上的高压电力线上的技术已经比较成熟, 但在低压电力线上的信息传输技术尚未成熟, 或者说还未达到完全实用阶段。低压电力线载波通信是指利用已有的低压配电网作为传输媒介实现数据传递和信息交换。

国外很早对电力线载波通信技术进行了研究, 多家公司推出了自己的电力线载波 Modem 芯片, 并制定了电力线载波通信适用范围的标准。目前有针对性北美洲地区电力网

(480V/277V, 208V/120V AC) 的标准频率范围 100KHz - 450KHz 和针对欧洲地区电力网 (400/230V AC) 的标准频率范围 9KHz - 150KHz。各家公司在标准频率范围内, 针对本地区电网特点, 采用各种特定专有技术, 设计出各自的电力线载波 Modem 芯片。由于国外电力线载波 Modem 芯片是针对本地区电网特性、电网结构, 且一般是针对家庭内部自动化而设计, 在国内使用都难尽如人意, 还未达到实用。

可以乐观地预见, 低压电力线载波通信技术必将成为未来几年内新的研究热点, 引起世界各国的广泛关注。其诱人之处在于它利用已有的低压配电网作为信息传输的信道, 而不必再进行新的通信网络的投资与建设。低压电力线载波通信的核心问题是载波信号的调制与解调, 也即电力载波调制与解调芯片。随着低压电力载波通信技术的发展, 电力载

收稿日期: 2005 - 08 - 08

波通信的速率、传送数据量、抗干扰能力都得到了很大的提高,为电力载波通信市场化奠定了物质基础。由于国内芯片制造业的现状,目前在国内应用的全是国外的 Modem 芯片。中国的电网特性、电网结构、居民住宅分布状况决定了电力线载波通信的应用领域等方面与国外有一些不同之处。因此,使电力线载波通信 Modem 芯片的瓶颈现象越来越突出,从而使国内电力载波通信市场难以迅速增长,应用中也延缓了用户对低压电力线载波通信技术的认同和接受。目前,已有相关公司正切入这一市场,积极与国外相关公司联系、合作,相信在未来的几年内,就能推出真正适应国内市场需求的电力线载波通信芯片,为载波通信打开一个光明的前景。

电力线是用来传输电能的,为非理想的随机参数通信信道。其不同于通用的通信电缆,有其本身的特性,影响通信质量的正是电力线信道的各个电气参数。电网的特性是动态的,因时而变、因地而变,即使是同一地区的电网在不同时刻的电气特性也不一样,因此有必要对电力线进行详细的分析。电力线信道是个复杂的数据传输信道,它的电气特性参数具有时变性与区域性,是动态的,建立一个完全精确的数学模型是不可能的。根据电力线理论以及实际电力线路的具体现状,本文利用 PSpice 仿真软件对实际电路的电气参数进行仿真,从而得到了影响载波通信的主要因素,为今后从事电力载波通信的研究奠定了理论基础^{[1][2]}。

2 电力线的理想等效电路

在交流电输电方式中一般民用的电力输送采用 50Hz 的单相 2 线制。电力线载波传输限于同一个变压器供电范围内,主从终端最好均接在同一相线上,这样传输衰减小、传输距离远、传输效果好。若传输线不同相,则应在不同相之间就近跨接 0.1μF 耐压 630V 以上的电容,实现交连传送,但传送效果较差。

严格地讲,电力线为非均匀随参传输信道,为研究方便,对电力线做理论抽象,将其均匀化。可以把一定长度的电力线看作由无数无限短长度的均匀线段组合而成。由电力线知识,在 30km 以下,可以不考虑线路的分布参数与集肤效应,将其看作为一个集中参数的电路。如图 1 所示为一电力线段的等效回路^{[3][4][5][6][7][8][9][10][11]}。

图 1 中为 R 单位长度电力线回路的有效电阻,单位为欧

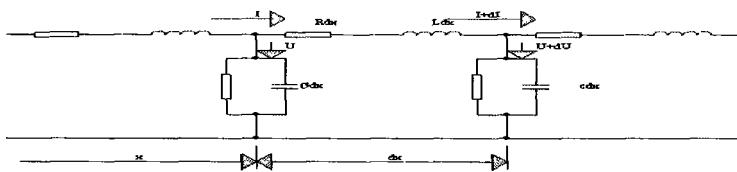


图 1 均匀电缆等效电路

姆 /公里; L 为单位长度电力线回路的电感,单位为亨 /公里; C 为单位长度电力线回路的电容,单位为法 /公里; G 为单位长度电力线回路的电导,单位为西 /公里; dx 为无限短电力线的长度。

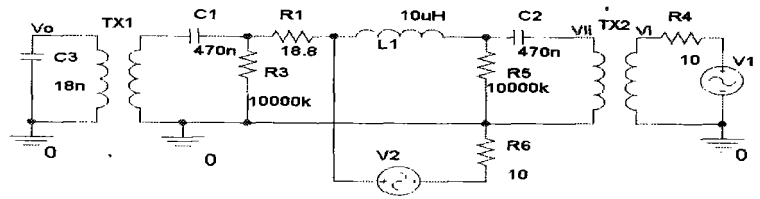


图 2 电力线传输电路仿真模型

3 电力线传输电路仿真模型

根据电力线理想等效电路建立了电力线传输电路仿真模型如图 2 所示。

在电力线传输电路仿真模型中,取铜导线长 1km,导线电阻 $R_1 = 18.8 \Omega$, R_1 为导线集中线路电阻。在电力载波传输中,导线本身的电感和电容对通信系统质量的影响不同,在图 2 中未给出线路的电容和电感。C1、C2 为高通滤波电容,其作用就是让载波频率信号通过,而阻止 50Hz 的电力电源进入耦合变压器,从而避免了危险,因为在实际载波通信中最低载波频率为 67kHz,故选取 $C_1 = C_2 = 470nF$ 。R3、R5 为 10兆欧的保护电阻跨接在电力线的两端,当与电力线断开时,充在电容上的电荷可通过 R3、R5 释放掉。V1 是模拟载波频率信号的信号发生正弦电源,其频率为 82kHz,幅值为 12V, R4 为信号源内阻。R4 的大小只影响 V1 的幅值大小,而对波形的形状无作用。V2 是 220V、50Hz 的交流电力电源信号, R6 电源内阻, R6 的大小对系统有一定的影响。T1、T2 为耦合变压器, T2 将载波频率信号耦合至电力线上,为保持发送信号一致,其原副边电感相等,取 $9.4\mu H$ 。

C3 为 LC 谐振电容,此电容值在实际电路中必须根据发送、接收耦合变压器的电感计算出。T1 将电力线上的载波信号滤除下来, T1 的原副边电感分别为原边 $9.4\mu H$, 副边为 $200\mu H$,为了在 82kHz 频率上达到谐振,则有:

$$C_3 = C_p = \frac{\left(\frac{1}{2\pi \cdot f_{res}}\right)^2}{L_{eq}} = \frac{\left(\frac{1}{2 \times 3.14 \times 82 \times 10^3}\right)^2}{200 \times 10^{-6}} = 18(nF)$$

C3 选 18nF 与 T1 的副边电感构成 LC 谐振电路。

4 电力线传输电路的仿真

通过调整仿真电路中导线的电气参数(导线电阻、电容、电感),电力电源负载性质以及选频电路频率等参数,来研究影响电力线载波通信主要因素。

4.1 改变导线电阻

图 3 为改变导线长度时接收信号 V_o 的仿真波形图 (a 为 $R_1 = 18.8$ 欧姆, 为 $R_1 = 37.6$ 欧姆), 比较图 3 中 a 和 可

知, 接收信号的频率完全相同, 幅值也没有明显的变化。所以, 从电路仿真中可以得出: 在电力载波通信中, 电力线的本身线阻对传输信号衰减不是主要因素。

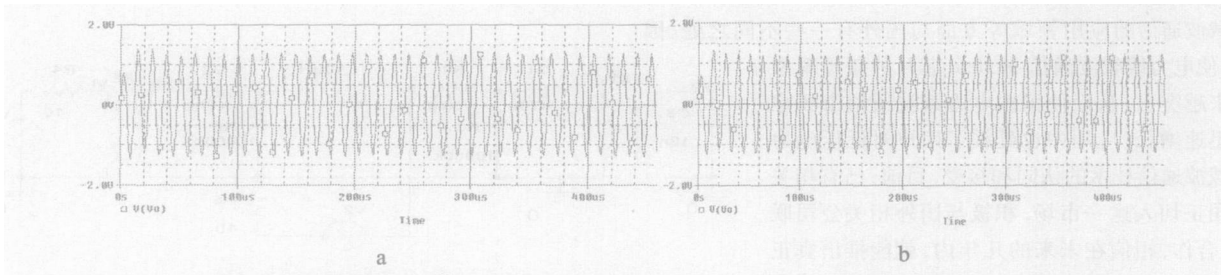


图 3 改变导线长度时接收信号 V_o 的仿真波形图 (a 为 $R_1 = 18.8$ 欧姆, b 为 $R_1 = 37.6$ 欧姆)

4.2 改变导线电感

图 4 为改变导线电感时接收信号 V_o 的仿真波形图 (a $L_1 = 30\mu\text{H}$, 为 $L_1 = 100\mu\text{H}$), 其中导线电阻不变取 $R_1 = 18.8$ 欧姆, 比较图 4 中 a 和 可知, 接收信号的频率完全相同, 幅

值也没有明显的变化。所以, 从电路仿真中可以得出: 随着导线电感的增加, 接收信号的波形幅值的衰减并不明显, 而信号的频率不变。

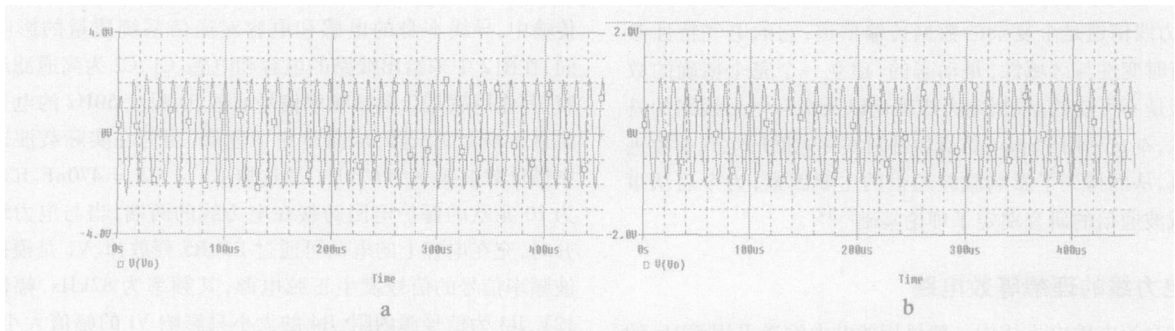


图 4 改变导线电感时接收信号 V_o 的仿真波形图 (a 为 $L_1 = 30\mu\text{H}$, b 为 $L_1 = 100\mu\text{H}$)

4.3 改变导线电容

在讨论导线电阻和电感对传输信号影响时, 未考虑两根导线之间的电容, 下面讨论两根导线之间的电容对传输信号的影响, 导线间接有电容 C_4 时电路仿真模型如图 5 所示, C_4 只是导线间电容效应在数学计算上的理论值。通常电力传输

导线为聚氯乙烯绝缘导线, 取其长度为 1km 时, 导线的介电常数 $\epsilon = 8.0$ 单芯导线的几何参数 G_e 取 0.5 , 则:

$$C = \frac{55.7\epsilon}{G_e} \times 10^{-12} \text{F/m} = \frac{55.7 \times 8.0}{0.5} \times 10^{-12} = 890 \text{pF/m}$$

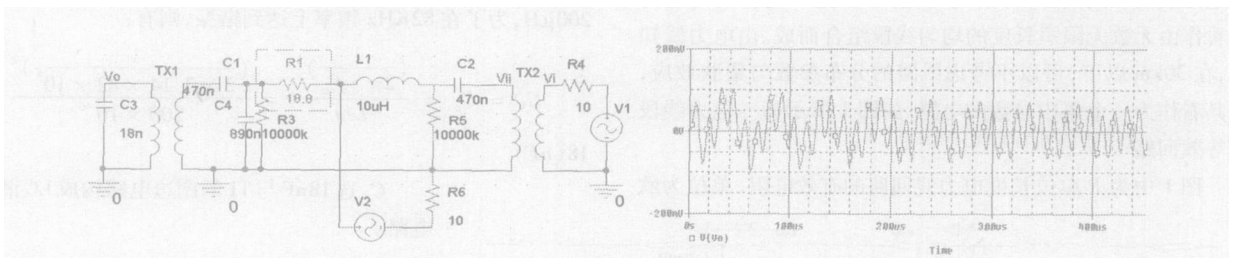


图 5 导线间接有电容 C_4 电路仿真模型和仿真结果图 ($C_4 = 890\text{nF}$)

因为载波信号的频率 (82kHz) 远大于电力电源的频率 (50Hz), 在考虑频率对电力线电气参数影响时, 仅计算载波信号的频率, 在载波信号频率一定的条件下, 导线间的电容

越大其容抗就越小。

由图 5 可以看出: 当信号传输中, 如果两根导线之间跨接有 890nF 的电容时, 接收信号 (V_o) 衰减很大 (毫伏级), 而

且信号产生了较为明显的畸变。在实际载波通信中,传输是不能达到1公里的。

改变导线间的电容值 C_4 ,接收端接收到的信号波形会随之变化。改变导线间的电容值时仿真波形图如图6所示。当

C_4 较大时,导线间的容抗就较小,高频信号就从 C_4 上通过,因此给数据的正确传输造成很大的影响,直至无法正确传输。对如图3图5和图6可以得出结论:在电力载波通信中,电力线间的电容效应对数据传输的质量有很大的影响。

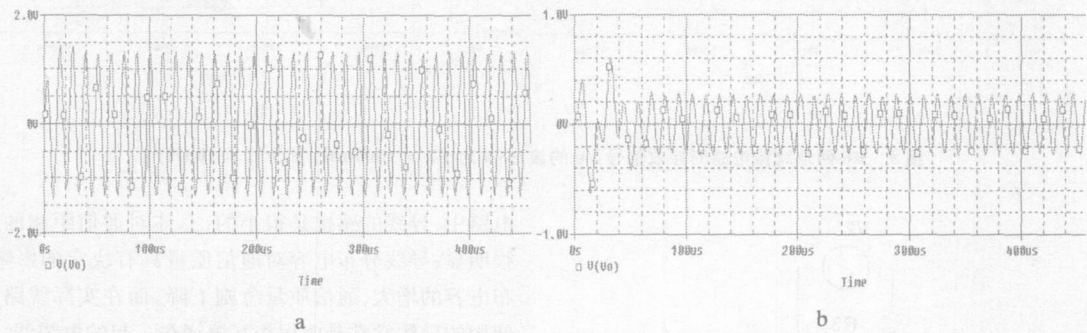


图6 改变导线间的电容值时接收信号波形(a为 $C_4 = 10\text{nF}$, b为 $C_4 = 700\text{nF}$)

当 C_4 很小时,接收端接收到波形的频率与发送端一致,在接收端灵敏度内可以正确地传输数据。随着 C_4 的增加衰减和畸变趋明显,当 $C_4 = 700\text{nF}$ 时,接收波形如图6中所示。

从图6中可看出在接收信号的起振阶段接收波形有几个脉冲的畸变,随着振荡的稳定,接收端接收到波形的频率与发送端发送的一致,在接收端灵敏度的范围内还可以进行正确的数据通信。此时的通信长度为: $700\text{nF}/890\text{nF} = 786(\text{m})$ 。

上面对电力线导线的电气参数特性对数据传输的影响仿真,通过对电力导线的性能参数(电阻 R 、电容 C 、电感 L)在载波信号传输中对载波接收信号波形影响的仿真,可以得到这样的结论:在不受外界干扰的条件下,两根电力导线之

间的电容效应对载波通信的影响最大。因此,在设计电路与实际应用中,首要考虑的就是如何减小导线间的分布电容问题,这个结论对今后面的实际电路设计时具有一定的指导意义。

4.4 改变电力电源负载性质

在载波传输电路仿真图1中,电力电源负载 R_6 对载波通信的质量有较大的影响。图1中,假设 R_6 为纯阻性的,在 R_6 的两端跨接一个电容 C_5 (即容性负载),接收信号波形 V_o 如图7所示。对如图7与图3接收信号波形幅值有些衰减,但频率未发生变化,在经过接收滤波放大电路后,仍可进行数据通信。当 $C_5 = 100\mu\text{F}$ 时,接收到的信号已经严重畸变如图7,其不能进行正确的数据通信,因此,电力电源的容性负载对载波通信的质量影响较大。

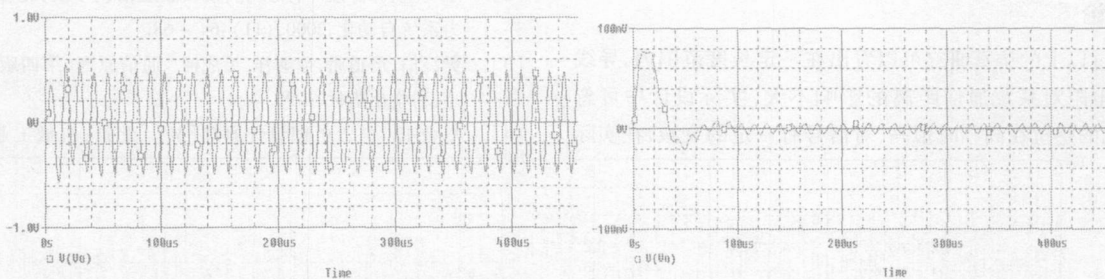


图7 R_6 两端跨接电容 C_5 时,接收信号波形图 V_o (a为 $C_5 = 100\mu\text{F}$, b为 $C_5 = 1\mu\text{F}$)

在 R_6 的两端跨接一个电感时(即感性负载),接收信号波形 V_o 如图8所示。对如图3和图8中a,可知,电力电源的感性负载对接收信号幅值有较大影响,而不使信号频率产生畸变。

4.4 改变选频电路的频率

电力线传送的数据信号经过载波 Modem 调制后为一频

率信号,此频率信号通过耦合变压器耦合至电力线上,而在接收端也是经过耦合变压器将载波频率信号滤除下来,选频电路起着至关重要的作用,有必要单独对此作一分析,选频仿真电路如图9所示。

V_1 为载波信号发生源, V_2 为干扰信号源。以 82KHz 为例,当 V_2 没有输出即没有干扰信号时,接收信号的波形与 V_1

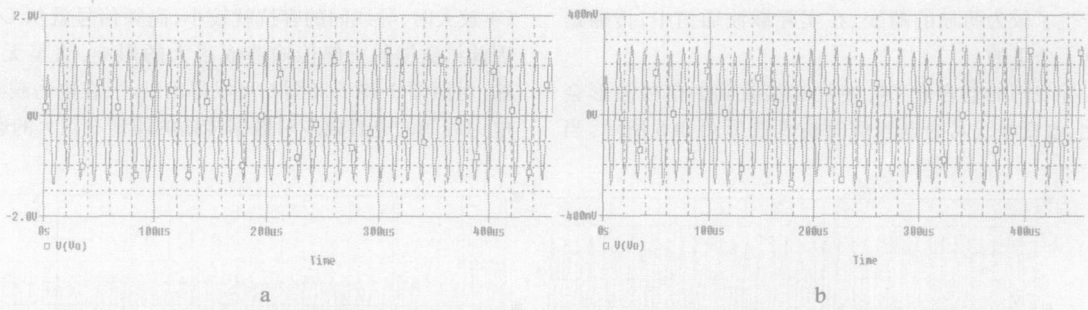


图 8 R6 两端跨接电感时接收信号 V_o 的波形 (a 为 $L_2 = 1000\text{mH}$, b 为 $L = 10\mu\text{H}$)

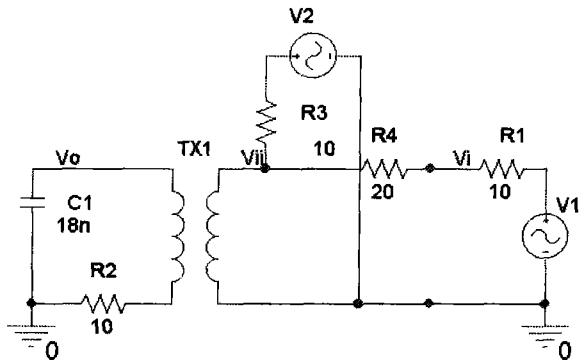


图 9 选频仿真电路

发出的信号基本一致,只是幅值的大小不同。当噪声源 V_2 有信号输出时,此时选频电路起作用,将数据频率信号通过 LC 谐振电路达到谐振而滤除掉噪声信号。由图 10 中 a 与 b 比较可以看出,当噪声信号频率越接近于载波信号频率,接收的波形受到影响越大。因此,在系统滤波中应尽量滤除掉信号二次谐波干扰。

5 结论

通过以上的仿真研究可以看出在一定长度范围内,导线本身的电阻对系统通信距离的影响不大,实际设计中可忽略;导线的感抗在高频时很高,对信号有一定的衰减,在实际

电路中,导线的感抗是很小的,总体对通信距离的影响也不很明显;导线分布电容对通信质量具有决定的影响,随着分布电容的增大,通信质量急剧下降。而在实际线路传输中所使用的导线常常是两根相互缠绕在一起的电缆线,较好地去除了两根并行导线之间的电容效应。因此在传输载波频率信号时,使用电缆线作为电力载波的传输媒介载波信号的衰减较小。

电力电源的负载性质对载波通信的质量也有不同程度的影响,其中容性负载对载波通信的质量影响较大,而阻性和感性负载没有明显影响。

由于电力线存在谐波干扰,为了避免谐波干扰在一定范围内,通过提高发射信号的频率可提高通信的质量与增长通信的距离。同时发射信号功率的增大也可增长通信距离,提高发射信号电压,在均匀传输线情况下可正比地增长通信距离,但过高的电压会对系统和电力线带来相应的负效应。

参考文献:

- [1] 张金波, 张学武. 限制低压电力载波通信的因素及解决方法 [J]. 电工技术杂志, 2004 (4): 15 - 17.
- [2] 王赞基, 郭静波. 电力线扩频载波通信技术及其应用 [J]. 电力系统自动化, 2000 (11): 64 - 68
- [3] 樊昌信, 詹道庸, 徐炳祥, 吴成柯. 通信原理 (第四版) [M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [4] 卓金玉. 电力电缆设计原理 [M]. 北京: 机械工业出版社,

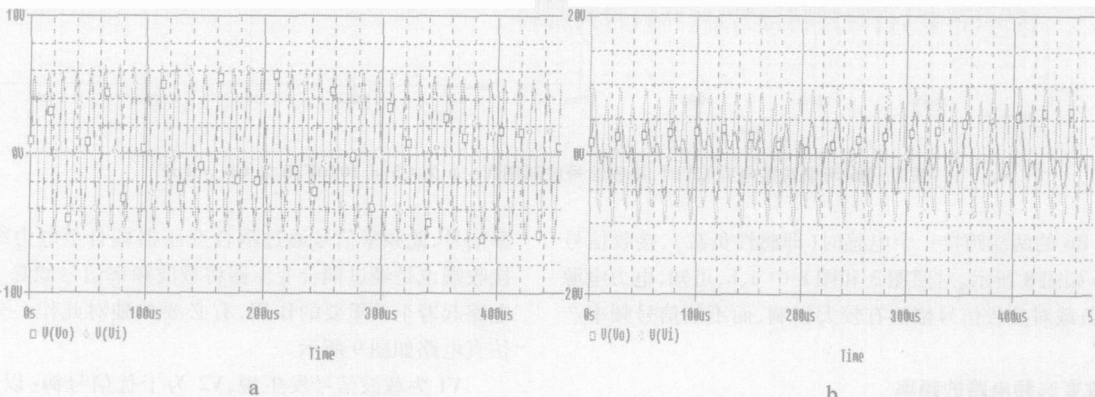


图 10 选频发送、接收波形 ($V_1 = 82\text{kHz}$, $V_2 = 1\text{kHz}$ ($V_1 = 82\text{kHz}$, $V_2 = 40\text{kHz}$))

- [5] 郑玉东. 通信电缆 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982
- [6] 张乘风, 等. 通信线路原理 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1992
- [7] 松浦虔士著, 曹广益译. 电力传输工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [8] 赖祖武. 电磁干扰与电磁兼容 [M]. 北京: 原子能出版社, 1993
- [9] 王明鉴, 施社评. 新编电信传输理论 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 1996
- [10] 贾玉明, 熊共怡. 有线电信传输理论 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1988.

- [11] 虞忠年, 陈星莺, 刘昊. 电力网电能损耗 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.

[作者简介]



张金波 (1967-), 男 (汉族), 黑龙江省双城市人, 博士研究生, 副教授, 研究方向: 电力系统及其自动化。

孙海翠 (1982-), 女 (汉族), 黑龙江省牡丹江市人, 硕士生, 研究方向: 通信与信息系统专业。

李威 (1980-), 男 (汉族), 河北省邯郸市人, 硕士研究生, 研究方向: 通信与信息系统。

(上接第 295 页)

基于以上控制方案得到的位置信号阶跃响应曲线。

图 4 和图 5 分别给出了模型质量突变时位置信号的仿真和试验响应情况:

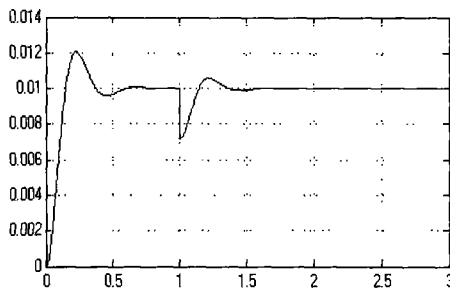


图 4 m 质量增加 700kg 时位置响应曲线

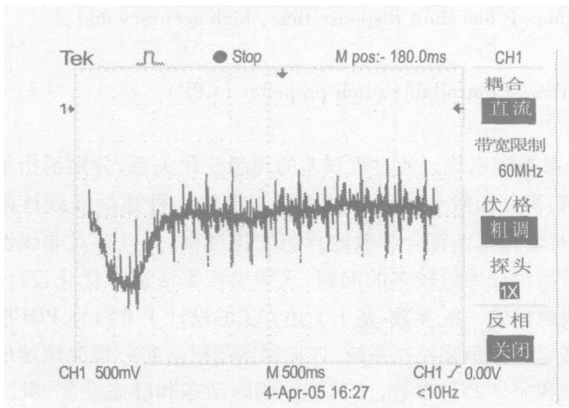


图 5 质量增加 500kg 时位置试验曲线

从仿真和试验曲线都可以看出: 控制系统可以承受较大的模型参数改变, 本文所提供的自适应控制方法适用于磁悬

浮系统。

6 结论

仿真与试验表明, 对于磁悬浮系统来说, 本文提出的双环自适应控制方法能够较好地适应系统参数的变化, 保证系统的实时动态特性。虽然算法比较复杂, 但是在试验中采用了两个 DSP 分别实现电流环和位置环的控制, 能够满足系统的实时性要求。

参考文献:

- [1] 刘恒坤. 非线性磁悬浮系统的稳定性分析 [J]. 兵工自动化, 2005-1.
- [2] 周东华. 非线性系统的自适应控制导论 [M]. 清华大学出版社, 2002
- [3] K J 奥斯特隆姆. 自适应控制 [M]. 科学出版社, 1992
- [4] 李清泉. 自适应控制系统理论, 设计与应用 [M]. 科学出版社, 1990
- [5] 刘兴堂. 应用自适应控制 [M]. 西北工业大学出版社, 2003

[作者简介]



刘恒坤 (1975-), 男 (汉族), 重庆人, 湖南长沙国防科技大学机电工程与自动化学院磁悬浮工程研究中心博士研究生, 主要从事磁悬浮控制方面的研究工作。

施晓红 (1976-), 女 (汉族), 甘肃兰州人, 湖南长沙国防科技大学机电工程与自动化学院磁悬浮工程研究中心博士研究生, 研究方向为磁悬浮列车动力学特性研究。

常文森 (1934-), 男 (汉族), 辽宁绥中人, 湖南长沙国防科技大学机电工程与自动化学院磁悬浮工程研究中心总师, 教授, 研究方向为磁悬浮技术和机器人技术。