

基于反馈放大器的微分积分电路设计研究仿真

陈安¹, 邢航²

(1. 广东工业大学实验教学部, 广东 广州 510006;

2. 华南农业大学工程学院, 广东 广州 510642)

摘要:利用放大器优化设计微分积分电路是为了将反馈信号放大,并提高稳定性。由于存在零漂和微分泄漏引起放大信号不稳定,误差大。所以提出了一种反馈放大器的微积分电路设计方法,利用电压反馈放大器(VFA)和电流反馈放大器(CFA),分别构建了积分电路和微分电路,并对电路进行分析,计算输入信号的理论频率范围。然后利用Multisim仿真工具搭建电路,在不同输入信号频率下进行实验。仿真结果表明,相比于传统的微积分电路,利用反馈放大器构建的微积分电路输入信号频率范围得到明显提高,仿真结果与理论计算结果相似,证明了仿真电路的正确性。

关键词:电压/电流反馈放大器;微分积分电路;最大输入频率

中图分类号:TP391 **文献标识码:**B

Research and Simulation of Circuit Design Based on Feedback Amplifier

CHEN An¹, XING Hang²

(1. Department of Experiment Teaching, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong 510006, China;

2. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou Guangdong 510642, China)

ABSTRACT: This research focuses on method for design of differential and integral circuit based on feedback amplifier. The research used voltage feedback amplifier (VFA) and current feedback amplifier (CFA) to build integral circuit and differential circuit respectively and analyzed the circuit, then calculated theoretic frequency range of input signal. The research used Multisim simulation tool to set up circuit and carried out experiment under different input signal frequency. Simulation results show that the differential and integral circuit built by feedback amplifier can improve frequency range of input signal apparently. The simulation results and theoretical calculation results are similar. It proves the validity of simulation circuit.

KEYWORDS: Voltage/current feedback amplifier; Differential and integral circuit; Maximum input frequency

1 引言

合理的微积分电路设计,可以被应用于工程实践中,并能取得很好的应用效果,随着计算机技术的快速发展,出现了一些高性能的电子电路仿真工具,例如 Multisim、Pspice、Proteus 等。其中 Multisim 是一种原理电路设计、功能测试的仿真软件^[1]。其集成了多种测试仪器,可将测试分析结果通

过图形直观显示,广泛应用于电路设计分析和实验教学中^[2]。

本文利用运算放大器设计了积分器和微分器电路。其中运算放大器分别采用了 741IC 型电压反馈放大器(Voltage Feed-back Amplifier, VFA)^[3]和 AD844 型电流反馈放大器(Current Feed-back Amplifier, CFA)^[4]。通过理论计算和仿真分析了积分器和微分器的最大输入信号频率,并进行比较。仿真结果显示,理论计算结果和仿真结果相似,证明了 AD844 型积分、微分器具有优良的性能,能够处理较宽频率范围的输入信号。

2 放大器电路设计基本原理

进行微积分电路设计时,需要分别设计微分电路和积分

基金项目:广东省教育教学成果奖(高等教育)培育项目;(JGXM007、JGXM029);广东省高等教育学会实验室管理专业委员会基金项目(GDJ2014008);广东工业大学本科实验教学研究项目(2015SY22);广东工业大学高等教育研究基金项目(2016GJ15)

收稿日期:2016-07-16 修回日期:2016-08-08

电路,微分电路和积分电路都是利用电容器的充放电来进行信号脉冲波形的变换,但它们的电路形式及运算条件不同,利用这两种电路的优点,将其整合完成微积分电路设计,可以很好的弥补两者的不足,达到良好的效果。进行微积分电路设计时,需要利用电压反馈放大器(VFA)路和电流反馈放大器(CFA),构建微分电路和积分电路,并利用运算放大器进行电路分析与整合,完成电路设计。

2.1 放大器

放大器是一种高增益直接耦合放大器,是最基本的一种模拟集成电路^[5]。其中,传输增益是考核放大器品质优劣的最为重要的一项依据,传输增益越小,放大器的频率响应曲线越平坦,失真越小,信号的还原度和再现能力越强^[6];频率响应是评价放大器好坏的另一个指标,频率特性是指放大器对不同频率电信号放大率的均匀度,频率响应越强,放大器设计的越合理;频带允许传送的信号的最高频率与允许传送的信号的最高频率这之间的频率范围,频带越大,说明放大器的运算范围越广。运算放大器按照反馈信号类型可以分为两大类:电压反馈放大器(VFA)和电流反馈放大器(CFA)。

2.2 电压反馈放大器(VFA)

VFA 是出现比较早的一种放大器。VFA 的同相与反相输入端的结构和输入阻抗都基本相同。在差模和共模形式下,输入阻抗一般都在 10Ω 以上^[7-8],VFA 的结构框图如图 1 所示。

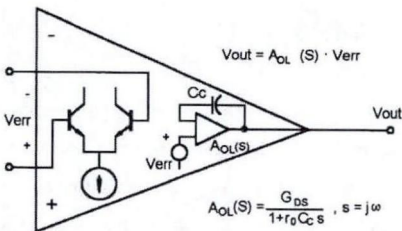


图1 VFA 结构图

2.3 电流反馈放大器(CFA)

CFA 的结构与 VFA 有明显区别,其输入端是一个连接同相端与反相段的单位增益缓冲器。同相端与反相端的输入阻抗相差极大^[9]。同相端的输入阻抗一般在 10Ω 以上,反相端的一般为 0 。CFA 的结构框图如图 2 所示。

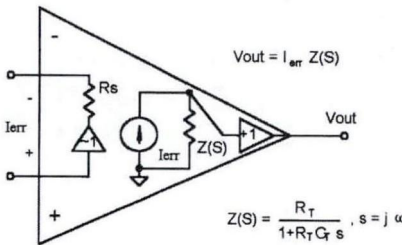


图2 CFA 结构图

CFA 电路能够实现在带宽不变下改变增益,能够抑制增益带宽冲突^[10]。CFA 在高速和高速放大器应用中性能非常好,这是因为其较高的转换速率、准确的端口跟踪特性、更大的线性度、低功耗等特性,因此在模拟信号调理和波形处理应用中具有吸引力。

进行微积分电路设计时,常出现微分泄漏和积分漂移引起的非线性误差,导致传统方法为了消除这种误差需要消耗大量无源元件,降低了微积分电路设计的效率。本文提出了一种基于反馈放大器的微积分电路设计方法。

3 微积分电路设计

3.1 典型积分器设计

在利用上述的微积分电路组成元件进行微积分电路设计。微积分电路设计包括微分电路设计和积分电路设计。首先进行积分电路设计,积分器是一种基于运算放大器构建的数学运算电路,其广泛应用于模拟信号调理、模数转换(ADC)和信号整波电路等^[11]。当输入方波时,积分器会输出一个三角波信号,图 3 显示了典型的积分器电路,其输出电压表达式如下

$$V_0 = -\frac{1}{R_1 C_f} \int_0^t v_{in} dt \quad (1)$$

阻抗 R_f 用来改善稳定性和校正低频衰减。积分器的频率响应如图 4 所示。

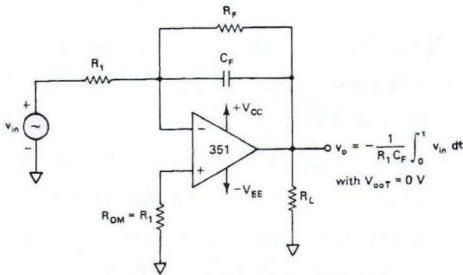


图3 典型的积分器电路

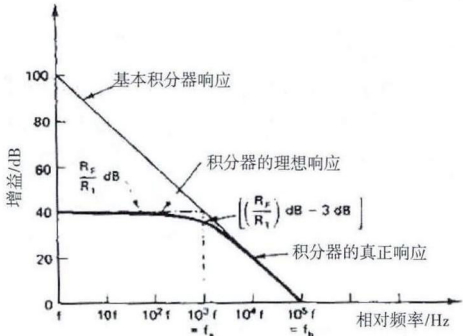


图4 积分器的频率响应

图 4 中 f 为相对频率,根据 R_f/R_1 可获得门限频率点

f_a 。 f_a 之后的增益下降速度为 20dB/decade , 当输入信号频率在 f_a 和 f_b 之间时, 电路可作为一个积分器使用, 增益下限频率 f_a 表达式为

$$f_a = \frac{1}{2\pi R_F C_F} \tag{2}$$

增益为 0 时的上限频率 f_b 表达式为

$$f_b = \frac{1}{2\pi R_1 C_F} \tag{3}$$

在选择 $R_1 C_F$ 和 $R_F C_F$ 的值时, 应满足 $f_a < f_b$ 。如果 $f_a = f_b/10$, 那么 $R_F = 10R_1$ 。对于一个合适的积分器, 输入信号的时间周期 T 应大于或等于 $R_F C_F$, 即: $T \geq R_F C_F$, 其中 $R_F C_F = \frac{1}{2\pi f_a}$ 。

3.2 传统 741IC 的积分器设计

图 5 显示了利用 Multisim 仿真器绘制的 741IC 积分器电路, 741IC 是一种单片集成 VFA, 其具备内部频率补偿电路, 电源电压的额定值为 22V 、转换速率为 $0.5\text{V}/\mu\text{sec}$ 、稳定时间为 $0.3\mu\text{sec}$ 和超调量为 45% 。它具有高增益、工作电压范围宽、具备在闭环电路中用于确保稳定性的补偿网络等优点。

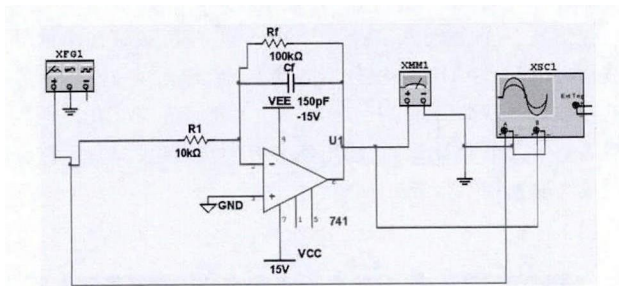


图 5 传统 741IC 的积分器电路

然后, 计算 741IC 积分器的理论频率范围。其中 $R_1 = 10\text{k}\Omega$, $R_f = 100\text{k}\Omega$, $C_f = 150\text{pF}$ 。那么可以得到: $f_a = \frac{1}{2\pi R_f C_f} = 10.61\text{kHz}$, $f_b = \frac{1}{2\pi R_1 C_f} = 106.15\text{kHz}$ 。由于输入信号频率在 f_a 和 f_b 之间时, 电路可作为一个积分器, 所以, 741IC 积分器的理论输入频率范围约为 $[10.61, 106.15]\text{kHz}$, 即最大输入频率近似为 106kHz 。

3.3 基于 AD844 的积分器设计

传统的 741IC 中需要消耗大量的无源元件才能都建积分电路, 耗时长、且降低了微积分电路设计的效果。本文利用 AD844 实现积分器的改进设计。AD844 是一种高速单片 CFA。对于一个完整的 20V 输出, 它的转换速率为 $2000\text{V}/\mu\text{sec}$, 稳定时间为 100 纳秒内, 且基本上与增益无关。其具有低失真、断路保护为 80mA , 可以在正 4.5V 到 18V 的电源下工作, 漂移为 $1\text{V}/^\circ\text{C}$ 且偏置电流为 $9\text{nA}/^\circ\text{C}$ 。图 6 显示了利用 Multisim 仿真器绘制的 AD844 积分器电路, 其中, 电阻 R_g 和 R_b 的交点为该汇聚点。

然后, 计算 AD844 积分器的理论输入频率范围。其中,

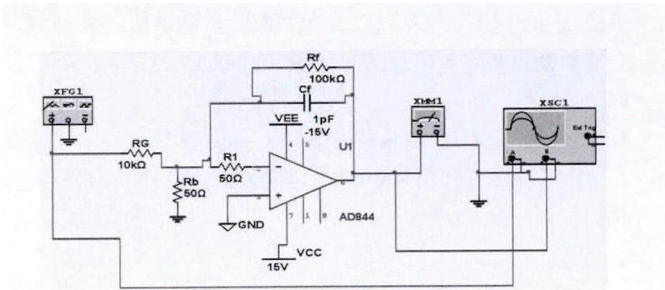


图 6 基于 AD844 的积分器电路

$R_g = 10\text{k}\Omega$, $R_f = 100\text{k}\Omega$, $C_f = 1\text{pF}$ 。那么可以得到: $f_a = \frac{1}{2\pi R_f C_f} = 1.59\text{MHz}$, $f_b = \frac{1}{2\pi R_g C_f} = 15.92\text{MHz}$ 。所以, AD844 积分器的理论输入频率范围约为 $[1.59, 15.92]\text{MHz}$, 最大输入频率近似为 15.9MHz 。

4 微分器设计

4.1 典型微分器

微分器主要用于脉冲电路和测量仪器中, 以获取蕴含在脉冲前沿和后沿中的信息^[12]。其可将输入的余弦波转变为一个正弦波输出, 或将输入的三角波转变为一个矩形波输出, 微分器电路的输出电压为

$$V_o = -R_F C_1 \frac{dV_m}{dt} \tag{4}$$

典型微分器电路如图 7 所示。其中, 两个元件 R_1 和 R_f 用于降低高频输入、放大器噪声和偏移的影响, 并防止增益随着频率增加。

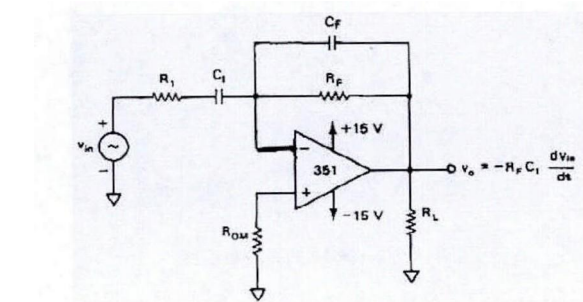


图 7 典型的微分器电路

f_a 是微分器增益为零时的下限频率, 表达式如下

$$f_a = \frac{1}{2\pi R_F C_1} \tag{5}$$

频率从 f 到 f_b 之间, 增益以 20dB/decade 的速率下降。增益速率是由 $R_1 C_1$ 和 $R_F C_F$ 共同决定的。增益上限频率率表达式如下

$$f_b = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \tag{6}$$

这里 $R_1 C_1 = R_F C_F$ 。同样地 $R_1 C_1$ 和 $R_F C_F$ 的选择需满足

下式: $f_a < f_b < f_c$ 。其中, f_c 为运算放大器的单位增益带宽。合适的微分器输入信号的时间域 T 应该大于或等于 $R_f C_1$, 即 $T \geq R_f C_1$ 。

4.2 传统的 741IC 微分器设计

图 8 显示了利用 Multisim 仿真器绘制的 741IC 微分器电路。

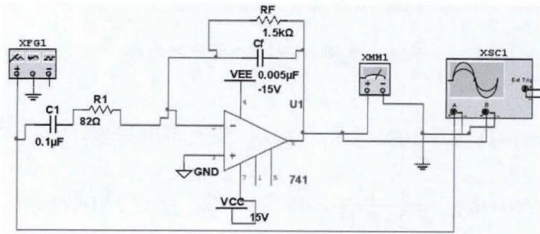


图 8 741IC 微分器电路

然后,计算 741IC 微分器的理论输入频率范围。其中, $R_1 = 82\Omega$, $C_1 = 0.1\mu F$, $C_f = 0.005pF$, $R_f = 1.5k\Omega$, $f_c = 1MHz$ 。那么可以得到: $f_a = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} = 1kHz$, $f_b = \frac{1}{2\pi R_f C_f} = 20kHz$ 。根据微分器的频谱特性,输入信号频率小于 f_a 时,微分器能够正常工作。所以,该微分器的最大输入信号频率为 $f_a = 1kHz$ 。

4.3 基于 AD844 的微分器

使用 AD844 构建微分电路时,其对电路的修改与积分器相同。图 9 显示了利用 Multisim 仿真器绘制的 AD844 微分器电路。

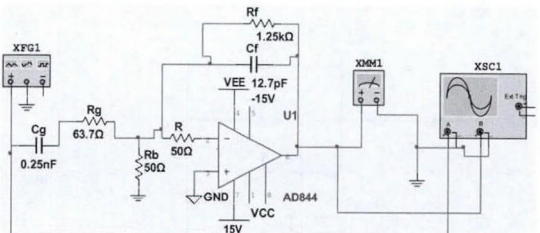


图 9 使用 AD844 的微分器电路

然后,计算 AD844 微分器的理论输入频率范围。其中, $R_g = 63.7\Omega$, $C_g = 0.25nF$, $C_f = 12.7pF$, $R_f = 1.25k\Omega$, $f_c = 30MHz$ 。那么可以得到: $f_a = \frac{1}{2\pi R_g C_g} = 500kHz$, $f_b = \frac{1}{2\pi R_g C_g} = 10MHz$ 。因此,AD844 微分器的最大输入信号频率高达 500kHz,远远高于 741IC 微分器的范围。

5 仿真结果与分析

在模拟电子技术实验中,仿真技术是一种非常重要的实验手段。

5.1 两种积分器的比较

仿真中,设置输入信号为 100kHz 的方波时,观察输出信号波形。图 10 为传统的 741IC 积分器的输入/输出信号和积分器输入信号的参数。可以看出,此时 741IC 积分器能够正常工作。但当输入信号大于 100kHz 时,输出信号有失真现象,即实际仿真的最大输入频率为 100kHz。

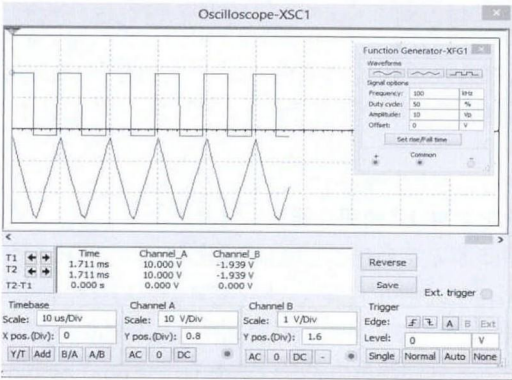


图 10 741IC 积分器的响应和输入信号参数

仿真中,设置输入信号为 15MHz 的方波,观察输出信号波形。图 11 为 AD844 积分器的输入/输出信号和输入信号的参数。可以看出,此时 AD844 积分器能够正常工作。但当输入信号大于 15MHz 时,输出信号有失真现象,即实际仿真的最大输入频率为 15MHz。

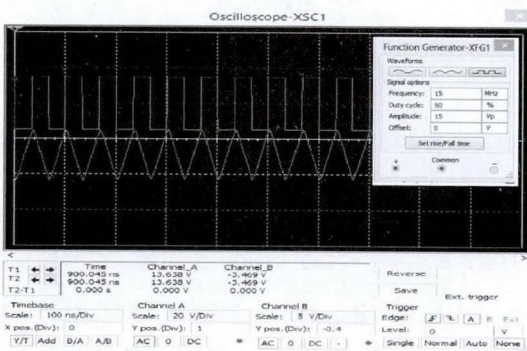


图 11 AD844 积分器的响应和输入信号参数

表 1 给出了 741IC 积分器和 AD844 积分器在最大理论输入频率和实际最大仿真频率方面的比较结果。可以看出,AD844 积分器的频率范围得到很大改善,可以处理高频输入信号,这是因为 AD844 具有较大转换速率和带宽。另外,仿真结果与理论结果相似,证明了仿真电路的正确性。

表 1 两种积分器的比较

type	Mt ₁	Bs ₁
741IC	106kHz	100kHz
AD844	15.9MHz	15MHz

其中, type 代表积分器型号, M_{t1} 代表最大理论频率, B_{s1} 代表最大仿真频率。

5.2 两种微分器的比较

仿真中, 设置输入信号为 1kHz 的三角波, 观察输出信号波形。图 12 显示了 741IC 微分器的输入/输出信号以及输入信号参数。可以看出, 此时 741IC 微分器能够正常工作。但当输入信号大于 1kHz 时, 输出信号有失真现象, 即实际仿真的最大频率为 1kHz。

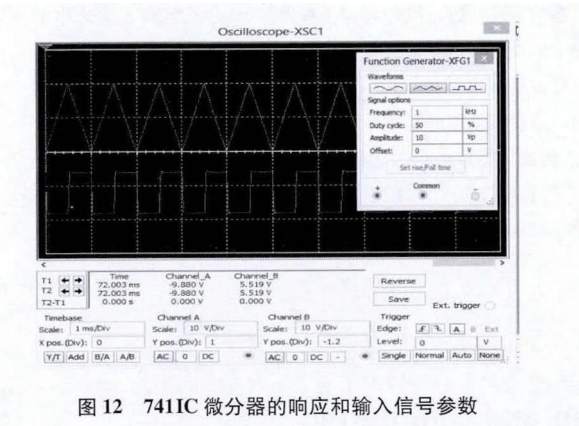


图 12 741IC 微分器的响应和输入信号参数

仿真中, 设置输入信号为 500kHz 的三角波, 观察输出信号波形。图 13 显示了 AD844 微分器的输入/输出信号以及输入信号参数。可以看出, 此时 AD844 微分器能够正常工作。但当输入信号大于 500kHz 时, 输出信号有失真现象, 即实际仿真的最大频率为 500kHz。

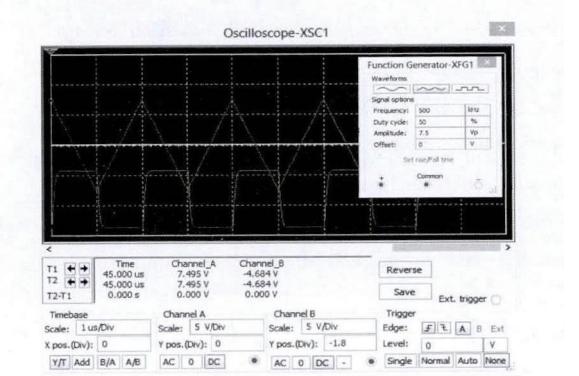


图 13 AD844 微分器的响应和输入信号参数

表 2 给出了 741IC 微分器和 AD844 微分器在最大理论输入频率和实际最大仿真频率方面的比较结果。可以看出, 和积分器一样, AD844 微分器的输入信号频率范围远远高于 741IC 微分器。

表 2 两种微分器的比较

type	G _b	M _{t2}	B _{s2}
741IC	1MHz	1kHz	1kHz
AD844	30MHz	500kHz	500kHz

其中, type 代表微分器型号, G_b 代表单位增益带宽, M_{t2} 代表最大理论频率, B_{s2} 代表最大仿真频率。

6 结论

本文提出了一种基于反馈放大器的微积分电路设计方法, 并利用 Multisim 对其频率范围进行了分析和实验验证, 仿真结果表明: 基于 AD844 积分器和微分器具有处理高频率输入信号的能力。另外, 实验结果和理论计算结果相似, 这也证明了本文仿真的正确性。

参考文献:

[1] 陈因, 韩丽俊. 基于 Multisim 的电力电子线路仿真与设计[J]. 电力学报, 2010, 25(4): 318-320.

[2] 张藤予. 基于 Multisim 仿真教学模式分析及应用[J]. 计算机仿真, 2014, 31(6): 230-232.

[3] 何伟欣, 江金光. 一种新型低功耗的多输出带隙基准电路[J]. 科技通报, 2016, 8(32): 191-196.

[4] J W Horng, G T Huang. A Grounded Capacitor Differentiator Using Current Feedback Amplifier[J]. Circuits & Systems, 2015, 4(2): 233-236.

[5] 高坤, 等. 基于曲波分析和 ELM 模拟电路故障诊断方法[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2014, 36(3): 111-116.

[6] 马敬敏. 虚拟 3D 旅游景观系统的设计及实验研究[J]. 电子设计工程 2016, 2(24): 99-100.

[7] F Esparza - Alfaro, et al. CMOS class - AB tunable voltage - feedback current operational amplifier[C]. IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems. Marseille: IEEE, 2015: 140-143.

[8] 杨阳, 徐佳丽, 钟英峻. 一种电压反馈型高速宽带运算放大器的设计[J]. 微电子学, 2012, 42(4): 466-468.

[9] 洪庆辉, 等. 基于电流反馈运算放大器的忆阻混沌电路设计与仿真[J]. 物理学报, 2014, 63(18): 90-97.

[10] X Z ia, M Li, Z Qi. Realizing wideband negative inductor using current feedback amplifier[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2016, 58(7): 1723-1728.

[作者简介]



陈 安(1979-), 男(汉族), 浙江东阳人, 硕士, 讲师, 研究领域: 智能控制理论与应用、Multisim 仿真等。

邢 航(1978-), 女(汉族), 陕西咸阳人, 博士, 讲师, 研究领域: 微机电测控系统设计、智能控制等。