

中频强磁场测量仪的误差分析与优化设计

陈明开,唐露新

(广东工业大学 信息工程学院,广东 广州 510006)

摘要:为了提高已有中频强磁场测量仪的精度、实时性和抗干扰能力,通过电路和信号分析,采用低输入失调电压、低噪声的运放构建输入信号调理电路,减少由电路静态输出电压和导通电阻引起的测量误差,对调理后信号直接ADC采样获取信号峰值,减少由整流滤波和数据拟合引起测量误差及实时性和一致性问题。对经过优化后测量仪进行测试,实验结果表明测量误差小于3%,小信号准确检测范围扩展30%,一致性误差小于1%,同时测量的实时性也得到提高。

关键词:中频强磁场;肿瘤热疗;ADC;误差分析;优化设计

中图分类号:TP937

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2012)12-0219-04

Error Analysis and Optimization Design of Intermediate Frequency Magnetic Measuring Instrument

CHEN Ming-kai, TANG Lu-xin

(College of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: To improve the existed measuring accuracy, real-time and anti-jamming capability of medium-frequency strong magnetic field measurement instrument, the low input offset voltage, low noise op-amp was used to reduce the measuring error of the signal recuperation electric circuit, which causes by the electric circuit static output voltage and the breakover resistance. The ADC sampled signal got peak value to reduce the measurement error, real-time and consistency issues caused by the rectifier filtering and data fitting. Testing the measuring instrument optimized, the experiment results show that measuring error is smaller than 3%, small signal accurate detection range extended 30%, consistency of measurement error is less than 1%, the real-time nature also has improved.

Key words: intermediate frequency strong magnetic field; tumor thermotherapy; ADC; error analysis; optimizing design

0 引言

随着经济的发展,磁场的应用越来越广泛,如高铁车轨检测、安全检测、医疗器械和探矿等领域,磁场检测技术和仪器也得到迅猛发展。但目前国内磁场检测仪器集中在工业用的低频强磁场和通信用的高频弱磁场^[1],而对于高频强磁场的测量研究,主要集中在瞬态磁场,也无法连续测量和显示空间点磁场。

而测量中频强磁场仍是测量领域一个难题。强场强和点场强测量是中频磁场检测的两个重点和关键。区域中频磁场检测技术和设备的研发与发展较为快速,而空间点中频磁场的测量技术相对滞后。现中频强磁场已经开始广泛应用于医学领域,造福人类^[2,3]。

国外能准确测量空间点磁场的测量仪器有法国

CA公司研发的低频/工频电磁场分析仪C.A42,能精确检测三维的电磁场参数,场强测量范围很宽,但空间点磁场测量频率范围较低,仅为0Hz~500Hz。本课题组研发的强磁场测量仪能检测的空间点磁场强度范围为10Gs~500Gs,频率范围为100Hz~300kHz。但该测量仪还存在测量精度和可靠性的问题。如实时性不高、较低频率强度磁场的检测误差较大、偶发测量读数跳跃与零输入时显示较大测量读数等。这些问题主要由信号调理、精密整流滤波和信号采集等硬件电路引起。

因此,文中将主要对中频强磁场测量仪的测量信号、硬件电路等进行深入分析与优化改进,并对优化后测量仪进行性能测试与分析。

1 测量仪的性能与设计框图

中频强磁场测量仪的研发源于检测中频磁感应热疗机的磁场参数。现中频强磁场测量仪能检测磁感应强度范围为10Gs~500Gs,频率范围为100Hz~300kHz之间的交变强磁场;实现单点、平面和立体(空间)三

收稿日期:2012-01-13;修回日期:2012-04-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10475020)

作者简介:陈明开(1985-),男,硕士研究生,研究方向为计算机测控与仪器智能化;唐露新,教授,教授级高工,研究方向为测控技术与仪器、微机应用、光机电一体化、交变磁场应用与测量、图像处理及在检测控制中的应用。

种模式测量及数据存储,并通过 USB 将测量数据存贮于 U 盘或传送至 PC 机进行显示与分析。

中频强磁场测量仪由磁场传感器和测量仪两部分组成。仪器的测量误差包括传感器误差和测量仪的误差。而测量仪的检测误差又包括硬件误差和软件误差。磁场传感器为一探测线圈,采用法拉第电磁感应定律将交变磁场信号转换为电信号(正弦波信号),实时采集空间各点的三维磁场参数^[4]。传感器的误差主要由线圈的起终位置、线圈间的距离、线圈拉伸程度等的误差组成,但现主要分析由硬件电路引起的测量误差和实时性。

测量仪硬件电路框图如图 1,其中信号调理电路和精密整流滤波电路的误差和实时性是影响测量仪的测量性能的主要因素^[5]。因此,现主要对信号调理和精密整流电路进行深入分析并优化设计。

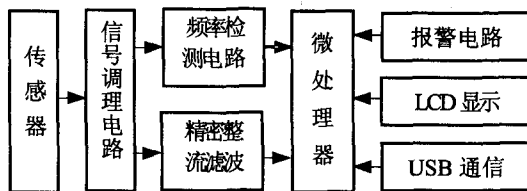


图 1 磁场测量仪硬件设计框图

2 硬件电路的分析

2.1 信号调理电路分析

由于中频强磁场源往往携带大量噪声和脉冲信号,为了提高测量仪的测量精度和可靠性,需要对传感器获取的中频磁场信号进行信号调理。信号调理电路如图 2 所示。

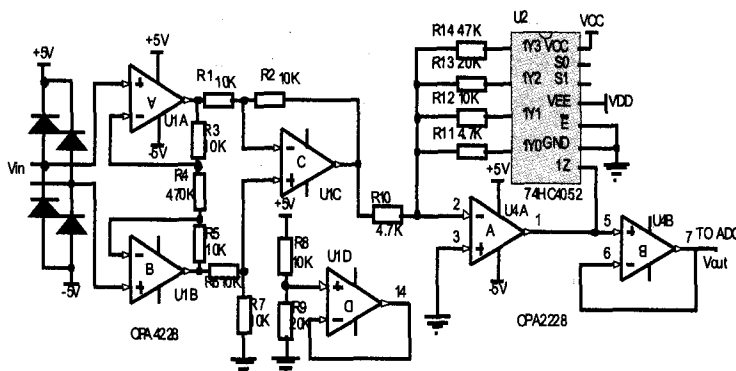


图 2 信号调理电路

2.1.1 仪器放大电路

采用四路运放 TL074C 构建三运放仪器放大电路,抑制共模干扰信号。增益为 $G = (1 + 2R_3/R_4) \approx 1$ 。同时电路采用外部二极管保护防止输入过载,提高电路可靠性。

然而器件的参数和外围电路会对仪器放大电路的信号调理精度^[6]有影响,现对其进行详细的分析。

1) 运算放大器的静态输出电压。

由于运放 TL074C 的输入失调电压 V_{io} 为 3mV,则由输入失调电压引起的运放静态输出电压^[7,8]为

$$E_{vol} = V_{io} \cdot G = 3\text{mV}$$

2) 噪声电压。

仪器放大电路的总噪声 E_{ol} 主要由等效输入噪声电压 e_n 、噪声电流 i_n 和电阻噪声组成^[9-11]。由于噪声电压、噪声电流随频率增大而减少至平滑(到一定频率),由 TL074C 数据手册可知,噪声频率曲线在 5KHz 已开始平滑, $e_n = 14\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、 $i_n = 4\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

而电阻热噪声 $e_R = \sqrt{4KTBR}$, 则有

$$E_{ol} = \left\{ B \left(1 + \frac{2R_3}{R_4} \right)^2 e_n^2 + e_1^2 + e_2^2 + B (i_n R_2)^2 + e_3^2 + B (i_n R_3)^2 + e_4^2 + e_5^2 + B (i_n R_5)^2 + e_6^2 + e_7^2 + e_8^2 + B \left(1 + \frac{2R_3}{R_4} \right)^2 (i_n R_4)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

其中 R_i 为传感器的内阻(2 欧姆),带宽 $B = 300\text{KHz}$, $e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7$ 分别为对应电阻的热噪声。将相关数据代入计算可得

$$E_{ol} = 0.041\text{mV}$$

3) 仪器放大电路的静态总输出电压 E_1 。

$$E_1 = E_{vol} + E_{ol} = 3.041\text{mV}$$

2.1.2 自动增益调整电路

测量仪能检测 30 ~ 3000mV 电压峰峰值的信号,输入范围较宽,为了提高测量精度,采用由多路模拟开关 74HC4052、电阻和运算放大器组成的程控放大电路。对信号分段为 30 ~ 200mV、200 ~ 700mV、700 ~

1400mV、1400 ~ 3000mV,并分别放大 R_{14}/R_{10} 、 R_{13}/R_{10} 、 R_{12}/R_{10} 、 R_{11}/R_{10} 倍。现主要分析电路产生最大的误差。

1) 运放的静态输出电压。

电路最大增益 (G_{\max}) 为 10,则由输入失调电压引起的静态输出电压为 $E_{vol(\max)} = 30\text{mV}$ 。

2) 噪声电压。

自动增益调整电路的最大总噪声

$E_{o2(\max)}$ 分别为

$$E_{o2(\max)} =$$

$$\sqrt{B \left(1 + \frac{R_{14}}{R_{10}} \right)^2 e_n^2 + e_{10}^2 + e_{14}^2 + B (i_n R_{14})^2}$$

将相关数据代入计算可得

$$E_{o2(\max)} = 0.14\text{mV}$$

3) 则电路由器件自身引起的最大误差电压 E_{\max} 为

$$E_{2\max} = E_{vol(\max)} + E_{o2(R_{14})} = 30.14\text{mV}$$

4) 74HC4052 的导通电阻引起的误差。

由于74HC4052在 $\pm 5V$ 供电时导通电阻 R_{on} 的典型值为70欧姆,则由 R_{on} 引起的典型误差为:

$$e_{R_{on}} = \frac{(R_{11} + R_{on})/R_{10} - R_{11}/R_{10}}{R_{11}/R_{10}} = R_{on}/R_{10} = 1.5\%$$

2.1.3 信号调理电路总误差分析

1) 信号调理电路的总静态输出电压。

$$E_{\text{总max}} = E_{2(\text{max})} + E_1 \cdot G_{\text{max}} = 60.55\text{mV}$$

2) 最大总误差。

当测量仪检测较小磁场信号 V_p (30~100mV)时,电路的静态输出电压将产生最大的误差。

$$e_p = \frac{E_{\text{总}}}{U} = \frac{E_{\text{总max}}}{V_p \cdot G_{\text{max}}} = \frac{60.55}{30 \times 10} = 20.1\%$$

$$e_{\text{max}} = \sqrt{e_{R_{on}}^2 + e_p^2} = 20.2\%$$

虽然其他段信号误差均在6%以内,但误差相对较大,影响测量仪的测量精度。

2.2 精密整流滤波电路分析

由运算放大器、二极管组合设计的经典精密整流电路对调理后的中频强磁场信号转换为直流信号,传送到微处理器进行处理。四个分段放大的输入信号经整流滤波后的信号幅值与理论值大都存在线性关系,但30~100mV信号幅值与理论值成类抛物曲线关系存在很大的误差(最大误差为15%)。

现采用最小二乘法对分段信号进行拟合,对30~200mV信号再分三段拟合。经测试表明,拟合后数据与理论磁场参数数据误差小于5%。但受硬件电路的静态输出电压误差的影响,在较小信号的测量误差较大;同时在分段信号间的间断点处会偶发测量读数跳跃或多次测量值不一致。因此,数据拟合虽能很好地提高测量精度,但降低测量的可靠性和一致性。

3 硬件电路的优化设计

通过电路分析,测量仪的测量精度、实时性和一致性还需进一步提高,因此现对各电路进行优化。

3.1 精密整流滤波电路优化

信号整流滤波后采用数据拟合方法不仅降低测量的实时性,而且容易受电路器件的参数(如允许误差)影响而降低测量的一致性。为了改善或消除以上问题,现对调理后的信号直接进行ADC转换^[12]获取信号的峰值。ADS2807是50Msps采样率的12-Bit双路的数转换器,其模拟信号输入范围为1~4V。而测量仪的检测信号峰值为3V,则需对信号平移+1V,同时为了提高采集转换精度,对平移前信号进行程控放大。如30~150mV、150~300mV、300~1000mV和1000~3000mV分别放大20、10、3和1倍。

3.2 信号调理电路优化

1) 增大反馈电阻 R_{10} 的阻值。

由 $e_{R_{on}} = R_{on}/R_{10}$,则增大 R_{10} 可以减少其误差。现选用精度为1%电阻 $R_{10} = 10K$,则误差 $e_{R_{on}} = 0.7\%$ 。

2) 改用低失调电压、低噪声运放OPA4228。

通过分析可知,运放TL074C的失调电压、输入噪声电压和输入噪声电流对信号调理引起较大误差,因此改用低失调电压、低噪声运放OPA4228。其失调电压 V_{io} 为10 μ V,噪声频率曲线在1KHz已平滑, $e_n = 2\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、 $i_n = 0.4\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

① 仪器放大电路的总静态输出电压。

经计算运放的静态输出电压 $E'_{oi} = 10\mu$ V、总噪声电压 $E'_{oi} = 17.1\mu$ V,则仪器放大电路的总静态输出电压 $E'_i = 27.1\mu$ V。

② 自动增益调整电路的总静态输出电压。

由 V_{io} 引起的静态输出电压 $E'_{oi(\text{max})} = 200\mu$ V,总噪声电压为 $E'_{oi(\text{max})} = 148\mu$ V,则自动增益调整电路的总静态输出电压为

$$E'_{2\text{max}} = E'_{oi(\text{max})} + E'_{oi(R_{10})} = 348\mu\text{V}$$

③ 信号调理电路的总失调电压。

$$E'_{\text{总max}} = E'_{2(\text{max})} + E'_i \cdot G_{\text{max}} = 890\mu\text{V}$$

④ 最大总误差。

原测量仪能检测较小磁场信号 $V_p = 30\text{mV}$ 时,电路的静态输出电压将产生最大的误差。

$$e_p = \frac{E_{\text{总}}}{U} = \frac{E_{\text{总max}}}{V_p \cdot G_{\text{max}}} = \frac{890\mu\text{V}}{30\text{mV} \times 20} = 0.15\%$$

$$e_{\text{max}} = \sqrt{e_{R_{on}}^2 + e_p^2} = 0.72\%$$

而当信号 $V_p = 3\text{mV}$ 时,

$$e_{3\text{mV}} = \frac{E_{\text{总}}}{U} = \frac{E_{\text{总max}}}{V_p \cdot G_{\text{max}}} = \frac{890\mu\text{V}}{3\text{mV} \times 20} = 1.5\%$$

$$e_{3\text{mV}} = \sqrt{e_{R_{on}}^2 + e_p^2} = 1.66\%$$

⑤ 误差结果分析。

优化后检测的最大误差仅为0.72%,而且将信号检测范围扩展到3mV时误差为1.66%。电路静态输出电压对其他段信号造成的误差很小(可忽略)。

3) 正确处理闲置运放。

原测量仪采用四路运算放大器TL074C构建三运放仪器放大器,因此有一路运放未用。未用的运放将会导致零信号输入时受噪声或高频的干扰而有测量读数,或正常测量时读数的跳跃^[13]。

因此,对未用的运放连接成由电源 V_{cc} 和两个电阻构成分压器的正向输入的电压跟随器,使运放输出端有固定输出。对连接好的运放电路进行测试,结果表明零信号输入时有测量读数的现象得到消除,而正常测量时读数的跳跃得到很好的改善,因为读数的跳跃还与检测磁场的变化和自动增益调整电路的临界点信号的跳跃有关。

4 优化后测量仪性能测量与数据分析

为了检测优化后测量仪的性能,以中频磁场感应热疗仪(频率为 110KHz)为磁场发生源,对测量精度、一致性和可靠性等进行测试。

中频磁场感应热疗仪的磁场分布不均匀,在同一平面以中心场强最大并向四周逐步减少,不同平面以中心平面场强最小并向两磁极逐步增大^[14,15]。

4.1 磁场测量仪精度测试

1)120mm 水平磁场平面,磁场强度的测量精度。

在 120mm 治疗平面,调节传感器与治疗平面垂直并位于中心点;固定传感器的位置,调节热疗仪磁场的激励电流(20A~100A,每次增加 5A),依次记录测量数据。测量数据曲线如表 1 所示。其中 $B_{测}$ 为点测量值的场强高斯值, $B_{理}$ 为场强理论高斯值。

表 1 120mm 水平磁场平面的磁场强度

$B_{测}$	20.1	32.8	45.8	60.0	75.8	84.2	102	128
$B_{理}$	19.9	32.5	45.4	59.6	75.4	83.7	101	128
误差	1.0%	0.9%	0.9%	0.7%	0.5%	0.6%	1.0%	0

2)100mm 水平磁场平面,小信号磁场强度测量精度。

调节传感器与治疗平面垂直并位于中心点,调节并固定热疗仪的激励电流为 30A,向外移动传感器的位置,并依次记录测量数据。测量数据曲线如表 2 所示。

表 2 100mm 水平磁场平面的磁场强度

$B_{测}$	2.46	4.26	6.18	8.69	9.56	10.5	12.9	14.8
$B_{理}$	2.40	4.18	6.06	8.56	9.40	10.4	12.7	14.6
误差	2.5%	1.9%	2.0%	1.5%	1.7%	0.9%	1.6%	1.4%

4.2 一致性(重复性)测试

在 200mm 水平磁场平面,调节传感器与水平磁场平面垂直并位于中心点,固定传感器位置;正反顺序分别调节热疗仪的磁场激励电流(30A、35A、50A、65A、70A)循环测量,但只记录中间 3 激励电流(2 台测量仪 A、B),测量数据如表 3 所示。

表 3 磁场强度测量的一致性

次数	中频强磁场测量仪							
	A	B	A	B	A	B	A	B
1	15.4	15.5	41.7	41.8	82.0	82.1	139	139
2	15.4	15.4	41.7	41.6	82.2	82.0	138	139
3	15.5	15.5	41.9	41.8	82.0	82.1	139	138
4	15.4	15.5	41.7	41.8	82.0	82.1	139	139
5	15.4	15.4	41.7	41.8	82.2	82.1	138	139
ΔB	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	1	1
误差	0.7%	0.7%	0.5%	0.9%	0.3%	0.3%	0.7%	0.7%

表 3 中数据是中频热疗仪磁场强度范围为 10~300Gs 的部分测量数据,表中的 5 组数据为多次测量的部分。多次测试结果表明,较大磁场信号与较小磁场信号相比具有更好的测量精度和一致性,因此表 3

主要列举较小磁场信号的数据。其中 ΔB 为多次测量数据之间的最大差值,误差为 ΔB 与测量数据平均值的比值。

4.3 测试数据分析及结论

由表 1 和表 2 数据可知,中频强磁场测量仪在检测小于 15Gs 场强时存在 1%~3% 的误差。但其他段检测误差大都小于 1%,因此具有较好测量精度。

由表 3 一致性测试数据可知,测量仪在正反顺序循环测试过程中测量结果基本一致,具有很好的测量可重复性。虽有个别偏差,但误差均小于 1%。

5 结束语

1)改用低失调电压、低噪声运放 OPA4228 将信号调理电路的静态输出电压所引起的最大误差 20.1% 减少为 0.72%,增大多路模拟开关 74HC4052 的输入电阻使因导通电阻引起的误差减少 1 倍。同时测量仪检测信号范围可以扩展到 3mV,比原小信号检测范围扩展 30%。

2)对调理后信号直接 ADC 采样获取信号峰值可有效减少由整流滤波和数据拟合引起测量误差、实时性和一致性问题。

3)现测量仪对信号采集后仅获取峰值,而未进行波形还原显示和频谱分析,因此测量信号波形动态显示与分析将是测量仪进一步改进的方向。

参考文献:

[1] 陈棣湘,潘孟春,罗飞路,等.高精度智能磁场测量仪的设计[J].测试技术学报,2004,18(3):259-262.

[2] Jordan A,Scholz R,Maier-Hauff K,et al. Presentation of a new magnetic field therapy system for the treatment of human solid tumors with magnetic fluid hyperthermia[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials,2001,225(1-2):118-126.

[3] Wust P,Hildebrandt B,Sreenivasa G,et al. Hyperthermia in combined treatment of cancer[J]. The Lancet Oncology,2002,3(8):487-497.

[4] 姜晓燕,唐露新,阳仲伯.中频强磁场传感器的设计分析与应用[J].传感器与微系统,2010,29(12):96-98.

[5] 姜晓燕.中频强磁场测量系统的研发设计[D].广州:广东工业大学,2010.

[6] 周胜海.模拟运算电路运算误差分析[J].电子质量,2009(9):10-14.

[7] 郭必广.运放失调电压自动补偿设计[J].科技信息,2010(15):88-89.

[8] 张佳民,杨宁.放大器失调电压对交流有效值转换器的影响分析[J].电测与仪表,2009,46(7):61-63.

[9] 张达.运放的噪声特性和放大电路的噪声分析[J].实用

(下转第 227 页)

文中采用两个算例来验证软件框架的正确性。首先,采用超声速平板算例,来流条件取为 $\text{Mach} = 2.244$, $\rho = 1.0 \text{ kg/m}^3$, 平板长 1 m , $T = 288.0 \text{ K}$ 。图4给出了摩擦分布。可以看到集成后的结果与原程序的基本一致,达到了预期的效果。

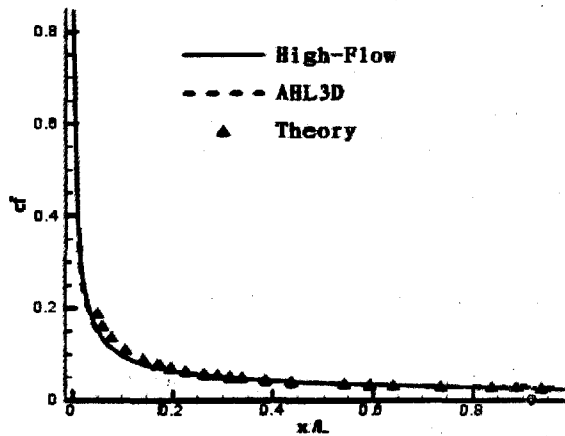


图4 平板壁面摩擦分布

然后,文中模拟了lehr的高超声速球头激波诱导燃烧,马赫数云图计算结果如图5所示,由结果可见,两者基本一致,再次证明了软件框架的正确性。

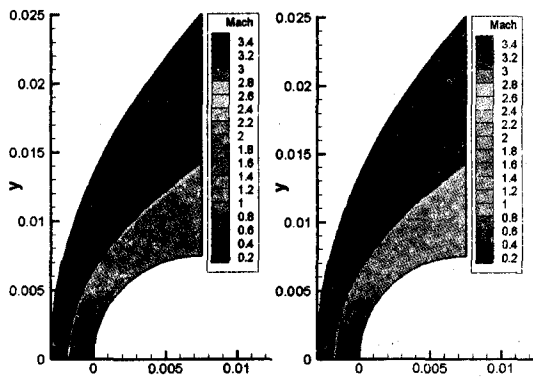


图5 马赫数云图(左图为AHL3D,右图为High-Flow)

5 结束语

文中针对未来大型CFD软件发展的趋势,在分析

和调研国外优秀CFD软件的基础上,架构设计了适用于大型通用的CFD软件框架。通过软件工程化开发使得软件框架实现完全的平台化、模块化,软件结构具有极强的扩展性和广泛的兼容性,很容易集成不同的解算器。通过简单算例的计算结果进行比较,验证了软件框架的正确性,为将来大规模软件平台的实现奠定坚实的基础。

参考文献:

- [1] 霍建华. 计算流体力学(CFD)的通用软件[J]. 河北科技大学学报, 2005, 26(2): 161-165.
- [2] 蒋平. 形式概念分析在软件工程中的应用[J]. 计算机技术与发展, 2008, 18(4): 127-129.
- [3] 赫新. 大型通用CFD软件体系结构与数据结构研究[C]. 出版地不详: 中国空气动力学会, 2011.
- [4] Shaw M. Toward higher-level abstractions for software systems[J]. Data & Knowledge Engineering, 1990(5): 119-128.
- [5] 吴家菊, 席传裕, 姜龙. 基于RUP的迭代式软件开发研究及应用[J]. 现代电子技术, 2009, 32(16): 95-96.
- [6] Barrett D J, Clarke L A, Tarr P L, et al. A framework for event-based software integration[J]. ACM Transactions on Software Engineering and Methodology, 1996, 5(4): 378-421.
- [7] 张志杰. 基于分层结构的管理信息系统架构设计[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(10): 146-149.
- [8] Fielding R T. Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures[D]. California: University of California, 2000.
- [9] 刘云楚. CFD软件系统集成技术研究[D]. 绵阳: 中国空气动力研究与发展中心, 2001.
- [10] 赵慧勇. 超燃冲压整体发动机并行数值模拟[D]. 绵阳: 中国空气动力研究与发展中心, 2005.
- [11] Zhang L P, Wang Z J. A block LU-SGS implicit dual time-stepping algorithm for hybrid dynamic meshes[J]. Computers & Fluids, 2004(33): 891-916.
- [12] 杨顺华. 碳氢燃料超燃冲压发动机数值研究[D]. 绵阳: 中国空气动力研究与发展中心, 2006.

(上接第222页)

影音技术, 2010(11): 61-65.

- [10] Felice C, Calogero P, Paolo M. Full Model and Characterization of Noise in Operational Amplifier[J]. IEEE Circuits and Systems Society, 2009, 56(1): 97-102.
- [11] Urs A M, Steve T, Pierre-André F. Fully differential low-noise amplifier with offset reduction for high-resolution neural signal recording[C]//2010 Conference on Research in Microelectronics and Electronics (PRIME). [s. l.]: [s. n.], 2010: 1-4.
- [12] 彭灿明, 曾德胜, 潘日明. 模数及数模转换中的精度问题分

析[J]. 电脑知识与技术, 2010, 6(15): 4001-4004.

- [13] Carter B, Mancini R. 运算放大器权威指南[M]. 姚剑清译. 第3版. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
- [14] Bae S, Lee S W, Hirukawa A, et al. AC Magnetic-field-induced Heating and Physical Properties of Ferrite Nanoparticles for a Hyperthermia Agent in Medicine[J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2009, 8(1): 86-94.
- [15] 熊奇欢. 中频磁感应热疗机空间磁场分析与建模[D]. 广州: 广东工业大学, 2010.