

ELECTRÓNICA COMPUTACIONAL (72 hrs.)

Profesor: Dr. Rodolfo Antonio Quintero Romo.

Introducción

El uso de computadoras para la solución de problemas del mundo físico es una experiencia casi universal para aquéllos que están en las áreas técnico-científicas. En el campo de la electrónica, los simuladores de circuitos como Spice surgen en los años 70, primero como herramienta altamente especializada, para convertirse con los años en un recurso al alcance de todos. Desde entonces, se han desarrollado y comercializado muchos otros simuladores de interés en la ingeniería.

Estas herramientas al alcance de todos han dado lugar a diversas reacciones que van de la trivialización –la más frecuente- hasta planteamientos filosóficos profundos. No poco de lo que “sabemos” del origen del universo es producto de la observación directa modelos teóricos y simulaciones por computadora.

El área de electrónica del estado sólido, es de interés, aparte de la simulación circuital tradicional, la de transporte de carga eléctrica en sólidos, y en particular en semiconductores, para el diseño de dispositivos semiconductores y circuitos integrados. También son de interés para la ingeniería la simulación de la propagación de calor y la de ondas ópticas en medios periódicos, incluyendo el transporte cuántico en transistores muy pequeños y en dispositivos fotónicos.

En el área de bioingeniería, por otra parte, se han utilizado modelos como el de Hodgkin-Huxley de la membrana celular, que pueden representarse como circuitos eléctricos, con características no-lineales diversas, en contraste con los transistores de la electrónica, donde la no-linealidad dominante es la exponencial del diodo o transistor. La difusión volumétrica de calor, tema clásico de la física, interesa en la terapia de calor. El cálculo de campos bioeléctricos de origen cardíaco o cerebral, en sus modalidades directa e inversa, tiene aplicaciones prácticas relevantes.

Un simulador computacional consta de modelos matemáticos que traducen el fenómeno físico a ecuaciones que se resuelven analítica o numéricamente, con la computadora como herramienta de cálculo. Este curso cubre diversos aspectos fundamentales de simulación comunes a la bioingeniería y la electrónica del estado sólido, ejemplificados en los dos párrafos anteriores. Al ser ambas multidisciplinarias, el número de disciplinas que tocan es consecuentemente muy grande: matemáticas, física, física del estado sólido, electrónica del estado sólido, mecánica, química, bioquímica, electroquímica, entre otras. Afortunadamente, se pueden aglutinar desde el punto de vista de modelos matemáticos y métodos computacionales, permitiendo así una visión integral que parte del concepto de modelo y desemboca en resultados numéricos.

La validez de una simulación descansa sobre todo en los modelos. El curso contiene elementos de filosofía de la ciencia, en particular sobre los conceptos de teoría, modelo y ley. Se

introducen las nociones sintáctica y semántica de modelo, que definen dos campos de simulación extremos: el primero de ciencias duras, representado por ejemplo por la teoría de los circuitos, y el segundo, propio de la biología, con el modelo de Lotka-Volterra de depredador-presa. El punto de vista semántico se puede identificar también en modelos compactos de circuitos eléctricos/electrónicos. Las diferencias entre ambas visiones y las intermedias, definen lo que se puede interpretar o deducir de una simulación.

El tema de circuitos eléctricos/electrónicos ilustra cómo se procede en todos los temas del curso. En el mismo, se empieza con la representación en forma de ecuación matricial de las ecuaciones de un circuito lineal de C.D. Se tocan los temas de álgebra lineal directamente relacionados, y de teoría de gráficas. La ecuación matricial de C.D. es la base de la solución de circuitos no-lineales, por medio del método de Newton-Raphson, que también es expuesto en clase. A continuación, se tratan numéricamente los circuitos dinámicos, mediante el método de Euler. A lo largo del proceso, se hace referencia a soluciones analíticas, y se contrastan con los resultados numéricos. Se tratan a continuación, con una línea de razonamientos similar, sistemas dinámicos representados con variables de estado, tanto continuos como discretos. Se analiza, con ayuda de conceptos filosóficos, la naturaleza de resultados en casos físicos diversos.

A continuación, se pasa a problemas distribuidos del medio continuo como el de difusión de calor, el de líneas de transmisión y potencial, y problemas de valores propios. Todos ellos modelados con ecuaciones diferenciales parciales. Se introducen soluciones tanto analíticas como numéricas, así como ejemplos de interés para la bioingeniería y la electrónica del estado sólido.

Por último, se aborda el tema de propagación de ondas en medios periódicos, de interés en electrónica del estado sólido y fotónica.

Con Mathematica, escogido para el curso, se pueden resolver problemas simbólicamente cuando la solución existe, y también numéricamente. Se cuenta ya con un número de ejemplos programados con Mathematica, de complejidades diversas, que van de ejercicios de tarea sencillos a un simulador simbólico de circuitos, y la simulación numérica de celdas solares.

Referencias

Electrónica del estado sólido:

A. Vladimirescu, "The Spice Book," John Wiley, 1994

S. Selverherr, "Analysis and Simulation of Semiconductor Devices," 1984

John D. Joannopoulos "Photonic Crystals: Molding the Flow of Light", Princeton University Press, 2008

Bioelectrónica:

Joseph D. Bronzino, "The Biomedical Engineering Handbook," Third Edition.

Hodgkin, A., Huxley, A. "A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve," Bulletin of Mathematical Biology, v.52, 1, 1990.

Bin He (editor) "Modeling & Imaging of Bioelectrical Activity: Principles and Applications (Bioelectric Engineering)", Springer, 2005.

Antecedentes

Este programa es precedido por 12 años de enseñanza del curso de Simulación Electrónica <http://www.sees.cinvestav.mx/simulacion/>. Difiere del programa del mismo en el reducido énfasis en la simulaciones circuital y de dispositivos, y a cambio, la introducción de más fenómenos descritos por ecuaciones diferenciales hiperbólicas, así como la propagación de ondas en medios periódicos como semiconductores cristalinos y cristales fotónicos. En los dos años que se ha impartido este curso, se ha enriquecido ya con la visión multidisciplinaria de la bioingeniería, y se espera que dicha visión ampliada se refleje claramente en este programa actualizado.

Contenido:

1.INTRODUCCIÓN.

Computación en las ciencias e ingenierías.

Física, química, geometría, ingeniería.

Grado de utilización según el campo.

Solidez e interpretación de resultados según el área, y fines perseguidos.

Algunos paquetes de software al alcance, según la aplicación.

Electrónica computacional.

Simuladores al alcance para electrónica y bioingeniería.

2. CIRCUITOS ELÉCTRICOS.

Representación para fines computacionales de circuitos eléctricos: modelos y método nodal modificado (MNA).

Elementos RLC como modelos de fenómenos electromagnéticos.

Leyes de Kirchhoff.

Modelos RLC fenomenológicos.

Desarrollo de modelos de elementos circuitales de dos terminales mediante la aplicación de una teoría o por simulación.

Relación entre la teoría de los circuitos y la teoría electromagnética: elementos RLC.

Ecuaciones de Maxwell: origen de los modelos R, L y C.

Relación entre la teoría de los circuitos con las ecuaciones de Maxwell: ecuaciones de Kirchhoff .

Método nodal modificado (MNA) de escritura automática de ecuaciones circuitales.

Circuitos eléctricos: resistivos y lineales.

Escritura por inspección de ecuaciones nodales de circuitos resistivos con sólo fuentes de corriente.

Escritura por inspección de ecuaciones de malla de circuitos resistivos con sólo fuentes de voltaje.

Método nodal modificado (MNA) para circuitos resistivos con fuentes de voltaje.

Plantillas para diversos elementos "anómalos" de 2 y 4 terminales: fuentes de voltaje, VCCS, etc.

Método STA y teoría de gráficas.

Definición de gráfica, y sus elementos: nodos, ramas de árbol y eslabones.

Matrices A de incidencia, independencia lineal. Matrices B, C y D. Relaciones entre estas matrices.

Formulación de ecuaciones circuitales.

Escritura sistemática de la matriz asociada al método STA.

Ventajas y desventajas del Método STA.

Solución de sistemas de ecuaciones algebraicas lineales.

Método de eliminación de Gauss.

Número de operaciones requerido.

Invertibilidad de matrices y dominancia de la diagonal.

Patrón de doblamiento de la matriz.

Obtención del número de condición. Relación del mismo con la singularidad de matrices.

Solución de sistemas algebraicos lineales con Mathematica.

Elementos de circuito no-lineales.

Elementos lineales y superposición.

Definiciones de función y de biyección.

Elementos no-lineales y superposición.

Ecuación exponencial del diodo: inyectiva monótona.

Soluciones gráficas: diodo con resistencia y fuente de voltaje en serie.

Diodo con fuente de corriente.

Clasificación de no-linealidades: no-lineal monótona, no-lineal monótona II.

Efecto de los elementos no-lineales en las ecuaciones MNA.

Ecuaciones de Maxwell y elementos no-lineales, definición de ecuaciones constitutivas.

Métodos numéricos para elementos dinámicos insertos en el algoritmo MNA.

Solución de circuitos RLC lineales grandes por el método MNA.

Solución numérica de una ecuación diferencial de primer grado en una variable.

Métodos de solución de Euler hacia delante y hacia atrás, y método trapezoidal.

Planteamiento general de estos métodos.

El método trapezoidal en lenguaje circuital adecuado al método MNA.

Regiones de estabilidad para los tres métodos.

Diagrama de flujos para un circuito con elementos dinámicos.

Perspectiva amplia de modelos electrónicos y simulación.

Circuitos eléctricos como modelos de fenómenos físicos.

Modelos de un transistor: modelos de dispositivo y modelos compactos.

Definición de modelo compacto.

Transistor bipolar y su modelo compacto.

Gummel-Poon del transistor bipolar.

Modelos compactos para la simulación circuital de circuitos integrados.

Modelo compacto de Gummel-Poon del transistor bipolar

Modelo compacto del transistor MOS

Comparación del análisis de circuitos con la síntesis de los mismos.

Ayudas para resolver analíticamente: realimentación negativa, desacoplamiento y pequeña señal.

Ayuda para la solución analítica: encapsulamiento de la complejidad.

Circuitos digitales fuertemente no-lineales: son más resistentes todavía a métodos analíticos.

Conforme crecen los circuitos, su solución analítica se va haciendo imposible.

Herramientas analíticas para cálculos de primer orden: realimentación negativa, linalización, división en bloques, desacoplamiento de DC, análisis de pequeña señal, etc. ¿Dónde encajan los simuladores?.

Dependencia de la temperatura.

Cálculo más exacto de la ganancia.

Distorsión armónica.

Variaciones por tolerancia de componentes.

¿Qué tan grandes puede ser un circuito?.

Ejemplos reportados y tiempos de simulación en diversas plataformas.

Referencias

W. E. Boyce, Richard R. C. DiPrima, "Ecuaciones diferenciales y problemas con valores en la frontera" Editorial Limusa (1998).

S. S. Skiena, "Graph Theory with Mathematica" (1990)

Farid N. Najm, "Circuit Simulation," John Wiley, 2010.

Jan Ogrodzki, "Circuit Simulation Methods and Algorithms".

A. Vladimiresku, "The Spice Book", John Wiley (1994).

Pozo cuántico: E. F. Schubert, "Physical Foundations of Solid-State Devices"

<http://www.docstoc.com/docs/8979481/Physical-Foundations-of-Solid-State-Devices>

Shooting method: N. J. Giordano, H. Nakanishi "Computational Physics, 2nd edition, Cap. 6" (QC20.7E4G56 2005 EJ.2 en IPN-ESFM).

Ecuaciones de Kirchoff: http://en.wikipedia.org/wiki/Kirchoff%27s_circuit_laws

Leyes de conservación: http://en.wikipedia.org/wiki/Conservation_law

3. Sistemas dinámicos.

Dinámicos continuos.

- Sistemas dinámicos y vectores de estado.
- Un oscilador mecánico lineal.
- Oscilador eléctrico RLC.
- Dinámica de zorros con rabia: ecuación de Lotka-Volterra.

Dinámicos discretos.

- El método de Newton-Raphson visto como sistema dinámico discreto.
- Un ejemplo de finanzas personales.

Estabilidad de sistemas dinámicos discretos y continuos.

- Puntos fijos y estabilidad en una variable.
- Puntos fijos y estabilidad en varias variables.
- Estabilidad de sistemas no-lineales.
- Puntos fijos y estabilidad.

Matemáticas asociadas (también a temas posteriores).

- Diagonalización de matrices.
- Propiedades de matrices diagonalizadas.
- Exponencial de una matriz.
- Valores y vectores propios de una matriz.
- Ecuación diferencial homogénea vista como problema de valores propios.
- Funciones y variables de estado como vectores.
- Operadores como matrices.
- Operadores hermitianos y sus propiedades.

Referencias

E. R. Scheinerman, "Invitation to dynamical systems".

4. Filosofía de la ciencia, modelos y arte de modelar

- Definiciones de modelo.
- Ejemplos de modelo: simulador de vuelo, maniquí para entrenamiento médico, simulador de caballo para aprender a montar.
- Razones comunes para el uso de muchos simuladores: economía y reducción de riesgos, ayudan también a construir modelos teóricos.
- Simuladores de mundos virtuales.

Dos definiciones de simulación.
Elementos constitutivos de un simulador.
El arte de modelar: modelado en matemáticas, física, biofísica e ingeniería.

Referencias

Rosenblueth, N. Wiener, "The Role of Models in Science".
A. Bird, "The Philosophy of Science", Introduction.
Modeling: Gateway to the Unknown by Rom Harré (2004).

5. Ecuaciones diferenciales parciales (EDPs).

Potencial: ecuación diferencial parcial elíptica.

EDPs elípticas: pueden representar campos estáticos, eléctricos y gravitacionales, entre otros.

Obtención a partir de las ecuaciones de Maxwell, de las ecuaciones de Poisson y Laplace de campos electrostáticos.

Ejemplos de condiciones de frontera de Dirichlet.

Solución de la ecuación de Laplace en dos dimensiones, por separación de variables.

Solución analítica de la ecuación de Poisson en coordenadas esféricas.

Solución por diferencias finitas por los métodos explícito e implícito de Crank-Nicholson.

Obtención del error de truncamiento y las condiciones de estabilidad en los casos anteriores.

Número de condición de la matriz característica.

Solución con Mathematica.

Difusión: ecuación hiperbólica.

Aplicaciones: en bioingeniería, terapia hipertérmica de cuerpo entero para curar cáncer, en electrónica, difusión térmica de impurezas en semiconductores.

Leyes de transporte y EDPs parabólicas.

Transporte de sustancia: ley de Fick.

Transporte de calor: ley de Fourier.

Transporte de carga: ley de Ohm.

Condiciones de frontera de Dirichlet, Neuman y Robin.

Obtención de las EDPs parabólicas de transporte asociadas a las leyes anteriores.

Línea de transmisión RC, leyes de Ohm y de Ampere.

Solución analítica de la EDP parabólica, lineal y homogénea, con condiciones de frontera, por separación de variables.

Solución de la EDP parabólica con condiciones infinitas por medio de transformadas integrales.

Solución numérica del problema con condiciones espaciales de frontera.

Sustitución de la EDP por un problema discreto de diferencias finitas.

Método explícito y método implícito de Crank-Nicholson.

Deducción del error de truncamiento local y de la condición de estabilidad.

Número de condición de la matriz resultante.

Solución con Mathematica.

Ondas estacionarias: ecuación hiperbólica con condiciones de frontera.

Aplicaciones: esferas micrométricas de sílica fundida, con aplicaciones en bioingeniería y la fotónica, cavidades resonantes láser, etc. También describen la acústica de instrumentos musicales y la de la Galería de Susurros de la Bóveda de la catedral de San Pablo en Londres, entre muchos fenómenos oscilatorios.

Obtención de la ecuación de onda a partir de las ecuaciones de Maxwell.

Condiciones de frontera de Dirichlet, Neuman y cíclicas.

Pozo cuántico infinito: un caso de solución analítica muy simple de la ecuación de Schroedinger.

Deducción de la EDP de una cuerda en vibración PDE, a partir de la segunda ley de Newton y de la ley de Hooke.

Solución analítica de la EDP hiperbólica, lineal y homogénea con condiciones de frontera de Dirichlet, por separación de variables.

Solución analítica de la EDP hiperbólica, lineal y no-homogénea, mediante una transformación integral.

Solución numérica por diferencias finitas.

Método explícito y método implícito de Crank-Nicholson.

Deducción del error de truncamiento local y de la condición de estabilidad.

Número de condición de la matriz resultante.

Solución con Mathematica.

Referencias

De Maxwell a Poisson http://en.wikipedia.org/wiki/Laplace_equation

Stanley J. Farlow, "Partial Differential Equations for Scientists and Engineers," Dover, 1993. Muchos de los temas de este temario son tratados matemáticamente, pero de forma accesible.

Dennis M. Sullivan "Quantum Mechanics for Engineers," Wiley, 2012. Ecuación de Schroedinger.

W. E. Boyce, Richard R. C. DiPrima, "Ecuaciones diferenciales y problemas con valores en la frontera" Editorial Limusa (1998). Trata separación de variables.

6. Ondas viajeras en medios continuos e infinitos.

Ecuación de onda en medios continuos y lineales.

Describe: la propagación de ondas de radio, ondas de ultrasonido en el cuerpo humano, propagación de luz en el espacio abierto, y en fibras ópticas, pozo infinito de la mecánica cuántica.

Deducción de la ecuación de onda a partir de las ecuaciones de Maxwell.

Condiciones de frontera aislante-metal y aislante-aislante.

Ondas acústicas y la ecuación de onda, misma ecuación, pero origen físico distinto.

Solución analítica de D'Alambert de la ecuación de onda.

Primera solución particular.

Segunda solución particular.

Ondas estacionarias.

Velocidad de grupo y velocidad de fase.

Solución numérica

Por descomposición en valores propios.

Por diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD).

Referencias

Stanley J. Farlow, "Partial Differential Equations for Scientists and Engineers," Dover, 1993. Muchos de los temas de este temario son tratados matemáticamente, pero de forma accesible.

Richard Feynman, "The Feynman Lectures on Physics," Vol. II (electromagnetismo).

7. Propagación de ondas en medios periódicos.

Ejemplos: propagación de una onda óptica por un medio cuya permitividad varía. Periódicamente con la distancia, propagación de ondas en cristales. Circuito resonante LC en el que C varía periódicamente. Filtros fotónicos de 1, 2 y 3 dimensiones.

Casos particulares con soluciones analíticas aproximada.

Solución de Floquet de la ecuación de Mathieu, en el caso de un medio cuya permitividad varía periódicamente en forma senoidal.

Método WKB combinado con el de perturbaciones.

Teorema de Bloch: Propagación de un electrón a través de un potencial rectangular periódico: modelo de Kronig-Penney.

Bandas prohibidas en cristales fotónicos.

Formulación general como problema de valores propios en 3 dimensiones.

Método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD).

Método espectral de ondas planas.

Solución con Mathematica de un problema en 1D por el método de matrices de 2×2 .

Referencias

Kronig-Penney: E. F. Schubert, "Physical Foundations of Solid-State Devices"

<http://www.docstoc.com/docs/8979481/Physical-Foundations-of-Solid-State-Devices>

Mathieu, Floquet y Brillouin: Lèon Brillouin, "Wave propagation in periodic structures pp 173-", (1946), QC661.B73.

Pochi Yeh, "Optical waves in layered media," John Wiley, 1988.

John D. Joannopoulos, S. G. Johnson, J.N Winn, R. D. Meade, "Photonic crystals: molding the flow of light", (2008), <http://ab-initio.mit.edu/book/>.

Programa de simulación: MPB (MIT Photonic-Bands (MPB).

http://ab-initio.mit.edu/wiki/index.php/MIT_Photonic_Bands

Programa de simulación: MEEP (Finite Differences Time Domain).

<http://ab-initio.mit.edu/wiki/index.php/MEEP>