SPICE指向型数値解析法による大規模集積回路解析に関する研究

研究代表者　山村清隆　研究員

非線形回路の全解探索

- 非線形回路のすべての解を求める問題
  - 回路設計の分野における重要な問題の一つ
  - これまでに多くのアルゴリズムが提案され、50,000変数の非線形方程式のすべての解を実用時間で求めることに成功
- 解の非存在判定テスト
  - 非線形回路の全解探索法における中核的な方法
  - 動作点が存在してはいけない領域に解が存在しないことを事前に確認する際にも有効
  - LPテスト（線形計画法を用いた強力な解の非存在判定テスト）
- 回路解析分野への導入
  - 解の非存在判定テストはSPICEにはない機能

　⇒ SPICE内部に実装することは極めて困難

- パス追跡回路を用いた線形計画問題の解法
- SPICE指向型解析法のアイデア

⇒ SPICE上に解の非存在判定テストを実現する方法を提案

修正節点方程式に対するLPテスト

- 修正節点方程式

$$H_1 g(H_1^T x) + H_2 x - s = 0$$

- LPテスト

最小化： $e_1^T \rho + e_2^T \sigma$

制約条件：

$$\begin{aligned}
&H_1 \tilde{z} + H_2 \tilde{x} - \tilde{s} + \rho = 0\\
&\tilde{y} - H_1^T \tilde{x} + r + \sigma = 0\\
&\tilde{x} + \lambda = \bar{x} - \underline{x}\\
&\tilde{y} + \mu = \bar{y} - \underline{y}\\
&\tilde{z} + \nu = \bar{z} - \underline{z}\\
&\tilde{x} \geq 0,\ \tilde{y} \geq 0,\ \tilde{z} \geq 0\\
&\lambda \geq 0,\ \mu \geq 0,\ \nu \geq 0\\
&\rho \geq 0,\ \sigma \geq 0
\end{aligned}$$

線形計画法を適用することにより解の非存在を確認する

- パス追跡回路を用いた線形計画問題の解法

最小化： $c^T x$

制約条件： $Ax = b,\ \ x \geq 0$

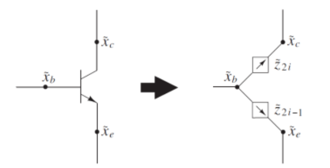
⇒

- 第1式 ･･･ $Ax - b - (1-t)(Ax^0 - b) = 0$
- 第2式 ･･･ $A^T y + s - c - (1-t)(A^T y^0 + s^0 - c) = 0$
- 第3式 ･･･ $Xs - (1-t)(X^0 s^0) = 0$

LPテストのSPICE上への実装

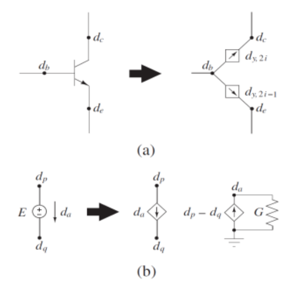
第1式

$$\begin{aligned}
&H_1 \tilde{z} + H_2 \tilde{x} - \tilde{s} + \rho\\
&\quad -(1-t)(H_1 \tilde{z}^0 + H_2 \tilde{x}^0 - \tilde{s} + \rho^0) = 0\\
&\tilde{y} - H_1^T \tilde{x} + r + \sigma\\
&\quad -(1-t)(\tilde{y}^0 - H_1^T \tilde{x}^0 + r + \sigma^0) = 0\\
&\tilde{x} + \lambda + \underline{x} - \bar{x} - (1-t)(\tilde{x}^0 + \lambda^0 + \underline{x} - \bar{x}) = 0\\
&\tilde{y} + \mu + \underline{y} - \bar{y} - (1-t)(\tilde{y}^0 + \mu^0 + \underline{y} - \bar{y}) = 0\\
&\tilde{z} + \nu + \underline{z} - \bar{z} - (1-t)(\tilde{z}^0 + \nu^0 + \underline{z} - \bar{z}) = 0
\end{aligned}$$



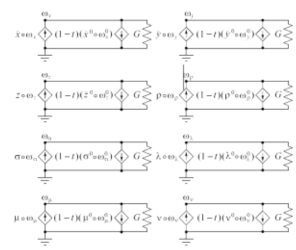
第2式

$$\begin{aligned}
&H_1 d_y + H_2^T d_x + d_\rho + \omega_x\\
&\quad -(1-t)(H_1 d_y^0 + H_2^T d_x^0 + d_\rho^0 + \omega_x^0) = 0\\
&d_y + d_z + \omega_y - (1-t)(d_y^0 + d_z^0 + \omega_y^0) = 0\\
&H_1^T d_x + d_\sigma + \omega_z - (1-t)(H_1^T d_x^0 + d_\sigma^0 + \omega_z^0) = 0\\
&d_x + \omega_\rho - e_1 - (1-t)(d_x^0 + \omega_\rho^0 - e_1) = 0\\
&d_y + \omega_\sigma - e_2 - (1-t)(d_y^0 + \omega_\sigma^0 - e_2) = 0\\
&d_\rho + \omega_\lambda - (1-t)(d_\rho^0 + \omega_\lambda^0) = 0\\
&d_z + \omega_\mu - (1-t)(d_z^0 + \omega_\mu^0) = 0\\
&d_\sigma + \omega_\nu - (1-t)(d_\sigma^0 + \omega_\nu^0) = 0
\end{aligned}$$



第3式

$$\begin{aligned}
&\tilde{x} \circ \omega_x - (1-t)(\tilde{x}^0 \circ \omega_x^0) = 0\\
&\tilde{y} \circ \omega_y - (1-t)(\tilde{y}^0 \circ \omega_y^0) = 0\\
&\tilde{z} \circ \omega_z - (1-t)(\tilde{z}^0 \circ \omega_z^0) = 0\\
&\rho \circ \omega_\rho - (1-t)(\rho^0 \circ \omega_\rho^0) = 0\\
&\sigma \circ \omega_\sigma - (1-t)(\sigma^0 \circ \omega_\sigma^0) = 0\\
&\lambda \circ \omega_\lambda - (1-t)(\lambda^0 \circ \omega_\lambda^0) = 0\\
&\mu \circ \omega_\mu - (1-t)(\mu^0 \circ \omega_\mu^0) = 0\\
&\nu \circ \omega_\nu - (1-t)(\nu^0 \circ \omega_\nu^0) = 0
\end{aligned}$$

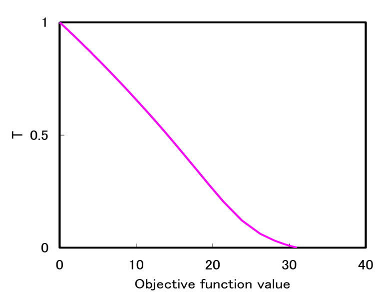


- 第１式～第３式を記述する回路とパス追跡回路をまとめてSPICEで過渡解析することにより LPテストを実現することができる
- SPICEに「解の非存在判定」という新しい機能を付加することができる

SPICE実験例（基準電圧回路）

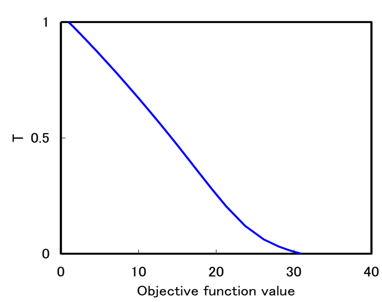
- $X = ([-5, 5], \cdots, [-5, 5])^T$

領域Xに解が存在する



- $X = ([-4, 4], \cdots, [-4, 4])^T$

領域Xに解は存在しない



発表国際会議：IEEE ICCCAS, IEEE ISCAS 等
発表論文誌：　IEEE Trans., Int. J. Circuit Theory & Appl. 等