

学 位 論 文 の 要 旨

論文題目：Explicit Circuit Parameter Design Methodology
for Operational Amplifier Stability
(オペアンプ安定性のための回路パラメータ設計手法)

氏 名 王 建 龍 印

近年 電子機器のデジタル化が進んでいるが、自然界の物理信号は温度、圧力、加速度など全てアナログである。そのためにその信号処理を行うアナログ回路は電子機器性能に直結しますます重要な要素になってきている。そのアナログ回路設計は、現在においても勘と経験が必要とされるノウハウの世界と言われており、「技術習得に時間が掛かる」「最適解が分からない」等の問題がある。アナログ信号をデジタル信号として集積回路内に取り込むためのアナログ・デジタル変換器を実現するため、およびセンサインターフェースのアナログ信号処理のためには高性能オペアンプが必要になる。また情報通信端末等のアナログバックエンド回路・電源回路においてオペアンプは多用されている。オペアンプ設計法を確立することは、広く情報通信システムのアナログ回路部の設計技術を取得するのに不可欠である。オペアンプ回路設計の際には周波数特性、安定性と周波数補償の考慮が重要である。オペアンプは高利得を得るために利得段を2段または複数段にするが、負帰還を掛けて使うため、2段以上の増幅段を用いると発振する恐れがある。発振せずに高利得を得る位相補償を用い、安定性を確保することが必須である。オペアンプ安定性の設計・解析には、多くの場合、その開ループ伝達関数のボード線図、ナイキスト線図が使われる。しかし、その安定化のためのシステマテックな回路パラメータ設計法は現状かならずしも明確でない。

この論文では従来アナログ回路分野に用いられていなかった制御工学分野の考え方を取り入れ、とくにオペアンプ回路安定性設計の問題の解決に取り組んだ。その結果、これまでは勘と経験で行っていた回路素子のパラメータ値の設定の理論的な導出を可能とした。これにより様々な回路方式のオペアンプ回路性能の向上のための明確な設計指針が得られる。制御理論の分野では、フィードバックシステムの安定性を判断するための多くの基準が開発されているが、その中でとくにナイキスト安定性基準およびラウス・フルビッツ安定性基準が広く使用されている。電子回路設計の分野では、ボード線図が回路設計者に最も頻繁に使用され、ナイキスト線図は時々使用される。しかしアナログ電子回路に関する関連テキスト・論文調査によると、ラウス・フルビッツ法のオペアンプ回路安定性の解析と設計への活用は言及されていない。しかしラウス・フルビッツ法を用いてオペアンプ設計者に有用な、その安定性を得るための陽な回路パラメータ公式を導出した。

この論文では、オペアンプ回路の安定性と位相余裕を得るための回路パラメータ条件を陽に得る手法を提案している。この導出した条件式により、回路設計者は様々な回路方式のオペアンプ回路の安定性を得るためには、どのパラメータ値を大きくしたらよいかまたは小さくしたらよいかを

知ることができる。この手法では最初にオペアンプの小信号等価回路を導出してその伝達関数を得る。次にそれにラウス・フルビッツ安定性基準を適用し、オペアンプ回路パラメータの明示的な安定条件を導出する。この論文の前半の理論的な部分では、ある条件下でのナイキストとラウス・フルビッツの安定性基準の等価性を示している。次に、ラウス・フルビッツ安定性基準のパラメータとオペアンプの位相余裕との関係を考察した。次に提案手法により十分な余裕を持つオペアンプの安定性のための明示的な回路パラメータ条件が得られることを示した。これらは、オペアンプの解析と設計に役立つが、従来の方法ではこの条件は取得できなかった。論文後半の検証部分では、トランジスタレベルのオペアンプ回路の回路シミュレーションで提案方法の有効性を検証した。

オペアンプに用いられている負帰還回路技術は、特性が不完全ではあるが高利得を有する増幅器と、主として抵抗や容量などの比較的安定な受動素子から構成される減衰器を組み合わせることで、全体の特性をほぼ理想的にする技術である。負帰還回路技術を増幅器に導入すると、利得変動の抑制、周波数帯域の拡大、歪み低減を図ることができるが、発振や不安定性を引き起こす場合もあるので、ループの安定化は重要課題の一つである。負帰還回路設計の方法に関しては、特にオペアンプ回路の安定性・位相余裕・ゲイン余裕を、従来はループを切断した開ループ伝達特性のボード線図から得ていたが、よく用いられる手法では帰還部を別回路で置き換えてしまうため、すこし条件が違う回路を用いて安定性を判定している可能性がある。そこで関連した研究成果としてオペアンプのフィードバックループを開くことなく、また追加の回路要素を挿入する必要なく、開ループ特性を直接取得する方法を提案した。これは対応する閉ループ測定で開ループ特性を取得するための、閉開ループ変換方法である。その理論・原理的な結果とシミュレーション検証を示した。実際に設計したオペアンプを実際に用いる閉ループ構成にし、この手法で得られた位相余裕が十分でなければ、この論文での主要な結果であるラウス・フルビッツ法による安定性・位相余裕を確保するためのオペアンプ回路パラメータ値の条件式に従って値を増減し、十分な位相余裕が得られるように値を最適設計する。

この論文の研究成果により、オペアンプ回路設計で安定性・位相余裕を得るための回路パラメータの条件が陽に得られ、実際に使われる閉ループ構成の状態でも位相余裕がどの程度得られているかをシミュレーション・実測で検証することが可能になった。

学 位 論 文 の 要 旨

論文題目 : Explicit Circuit Parameter Design Methodology
for Operational Amplifier Stability
(オペアンプ安定性のための回路パラメータ設計手法)

氏 名 王 建 龍 印

This dissertation proposes a method to derive explicit circuit parameter conditions for stability and phase margin of the operational amplifier circuit with various circuit topology. Based on the derived conditions, the circuit designer knows which parameter value should be increased and which one should be decreased to obtain its stability with enough margin. First, the small signal equivalent circuit model of the operational amplifier is derived and its transfer function is obtained. Then the Routh-Hurwitz stability criterion is applied and the explicit circuit parameter conditions for the stability are obtained, which were not obtained before. In the theoretical part, the equivalence between Nyquist and Routh-Hurwitz stability criteria under some conditions is shown. Next the relationship between parameters of Routh-Hurwitz stability criterion and phase margin of the operational amplifier are deduced. Then explicit circuit parameter conditions for the operational amplifier stability with enough margin are obtained, which are useful for operational amplifier analysis and design, and which could not have been obtained with the conventional methods. In the verification part, the above statement is confirmed with SPICE simulations at transistor level operational amplifier circuits.

In the later part of this dissertation, an additional method is proposed to obtain the open loop characteristics directly without opening up loop and not need to insert any extra circuit element. This operation is called as a closed-open conversion method to obtain the open loop characteristics with corresponding closed loop measurement. Its principle is introduced and simulation verification is shown. When this method reveals that the phase margin is not sufficient for the designed operational amplifier, some parameter values are increased or decreased based on the results obtained by the above-mentioned Routh-Hurwitz method so that its enough phase margin should be gained.