負性容量回路と容量増幅回路の湿度センサへの応用

正員 伊藤 秀明 (信州大)

非会員 林 部 林 平 (信州大)

非会員 寺 島 隆 幸 (信州大)

An Application of a Negative-Capacitor-Circuit and a Capacitance-Scaling-Circuit to Humidity Sensor

Hideaki Ito, Member, Rinpei Hayashibe, Non-member, Takayuki Terashima, Non-member (Shinshu University)

Recently there have been increasing demands for high precise information of humidity. The realization of driving circuit of a humidity sensor to satisfy them have been desired.

We produced a high precise and sensitive driving circuit of a capacitive humidity sensor used both a negative-capacitor-circuit and a capacitance-scaling-circuit on the basis of a Wien bridge oscillator as an experiment.

In detecting small capacitance change, removing unnecessary offset capacitance by the negative-capacitor-circuit leads to increasing capacitance sensitivity. The combined capacitance was amplified up to fit the Wien bridge oscillator by the capacitance-scaling-circuit and we detected a frequency change which the capacitance change converted into through its oscillator.

We investigated three circuits, our proposed new circuit, Wien bridge oscillator, and astable multivibrator one. As a result of experiment, the frequency stability, the capacitance resolution, and the temperature coefficient of a new circuit is -5.6×10^{-3} , 0.0015pF (at 100pF), and $-0.005\text{pF}/^\circ\text{C}$ (at 100pF), respectively. These values were improved to be about one order magnitude better than that of the conventional circuits.

キーワード：負性容量回路，容量増幅回路，感度，分解能，湿度，センサ

1. まえがき

近年，湿度情報は電気信号として扱われる場合が多く，特にクリーンルーム，研究室レベルの湿度管理，また広く産業面でこれを利用する場合，情報信号の高精度化がますます要求されている⁽¹⁾。

ところで，現在実用化されている電気式湿度センサは抵抗式と容量式に大別される。抵抗式湿度センサの抵抗値は，相対湿度に対して指数関数的に変化するため，一般のオペアンプではダイナミックレンジが不足してしまい30%RH～90%RHの測定が限界となっている⁽²⁾。一方，容量式の湿度センサはその容量値が相対湿度に対して直線的に変化するために全湿度領域での測定が容易となっている。また抵抗式に比べて温度依存性が少ないため回路構成が簡単になるほか，応答速度が十数秒と抵抗式に比べて速いことや，

ヒステリシスが小さいことから湿度センサとしての優位性は大きい。

現在市販されている容量式湿度センサ駆動回路の多くは，マルチバイブレーターを利用している⁽³⁾。センサ素子は発振周期を決める回路定数として組み込まれ，湿度の変化を周波数の変化あるいはデューティ比の変化として検出している。この方式は素子数が少ないためにコスト面では非常に有利であるが，回路の安定度はそれほど高くなく，容量分解能すなわち測定精度を上げることが難しい。

著者らはウィーンブリッジ発振回路をベースとして，微小な容量変化を高感度で安定に検出できる回路を試作した。本論文ではまずこの回路の原理を述べ，続いて本回路及び，従来の湿度センサ駆動回路を含む幾つかの回路の感度，分解能，温度依存性に関する評価実験について考察する。

2. 微小容量変化の測定原理

図1に示すウィーンブリッジ発振回路の発振周波数 f は次式で表される。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}} \quad \dots \dots \dots (1)$$

一方、図2はセンサ素子と容量増幅回路⁽⁴⁾及び負性容量回路から構成される等価容量回路で、微小容量変化の検出に用いられる。その際、センサ自身の不要なオフセット容量、及び回路とセンサ素子を結ぶ同軸ケーブルの容量を負性容量 C_- によって除去し、更にそれらの合成容量を容量増幅回路で増幅して扱いやすい任意の等価容量 C_2' を得る。 C_2' は次式で表される。

図1. AGC型ウィーンブリッジ発振回路
Fig.1. AGC type Wien bridge oscillator circuit.

$C_2' = k (C_s + C_c - C_-) \quad \dots \dots \dots (2)$
ここでは、等価容量 C_2' と、式(1)の容量 C_2 を置換し、センサの容量変化を発振周波数の変化として読み取る。

なお、負性容量 C_- 及び容量増幅率 k は、それぞれ抵抗 r_1 、 r_2 及び抵抗 r_3 、 r_4 の比を変えることで任意に設定できる。本システムでは、容量 C_2' がおよそ10pFから100pFの範囲で変化するように負性容量 C_- 及び容量増幅率 k を調整し、このとき発振周波数が10kHz以下になるようにウィーンブリッジの定数を選んである。

ところで式(1)を C_2 で微分すると、

$$\frac{df}{dC_2} = -\frac{f}{2C_2} \quad \dots \dots \dots (3)$$

となり、センサ部の容量 C_2 が ΔC_2 変化したときの周波数変化を Δf とすると、周波数変化率 $\Delta f/f$ は式(4)に示すように ΔC_2 と C_2 の比によって決定される。

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{\Delta C_2}{2C_2} \quad \dots \dots \dots (4)$$

湿度センサ C_s 及び同軸ケーブル容量 C_c を $C_s + C_c = C_0$ とすると、図2の等価容量 C_2' は、

$$C_2' = k (C_0 - C_-) \quad \dots \dots \dots (5)$$

で、式(4)と同じ表現とすると、

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{\Delta C}{2(C_0 - C_-)} \quad \dots \dots \dots (6)$$

となる (ΔC は相対湿度の変化によるセンサの容量変化)。式(6)より C_- を C_0 に十分近く選べば周波数変化率を増大できることは明らかで、もしこの回路自身の周波数変動がウィーンブリッジ発振回路単体のときと変わらなければ、後述する容量分解能を上げることが可能である。

3. 評価実験

以下に、図1のウィーンブリッジ発振回路、及び図2の等価容量回路とウィーンブリッジ発振回路の合成回路(以下合成回路と略す)、そして市販の容量式湿度センサの代表

図2. 湿度センサを接続した微小容量変化の検出回路

Fig.2. A circuit sensing a very small capacitance change connected to a humidity sensor.

図3. 容量式湿度センサ用無安定マルチバイブレーター回路⁽³⁾

Fig.3. Astable multivibrator circuit for a capacitive humidity sensor.

図4. 感度の測定方法

Fig.4. block diagram of sensitivity measurement system.

図5. 実験に用いた湿度センサ素子の容量-相対湿度特性 (1kHz, 25°C)

Fig.5. Capacitance vs. relative humidity curves of a humidity sensor used in this experiment.

的駆動回路として図3に示す無安定マルチバイブレーターの感度, 分解能, 温度特性の評価実験方法について述べる。

<3・1> 感度の測定 図4の測定系において, 実験回路はシールドケースに入れ室温放置し, 40cmの同軸ケーブル (50Ω type) を通して, 図5の容量-湿度特性を持つポリシロキサンを感湿膜とした容量式湿度センサを接続した。センサ部は分流式湿度発生装置にいて, 湿度 h を0%RH~90%RHまで変化させたときの発振周波数 f の変化を周波数カウンタで計測する。得られた発振周波数-相対湿度特性から感度 $s(h)$ は式(7)より求められる。

$$s(h) = \frac{df(h)}{dh} / f(h) \quad \dots \dots \dots (7)$$

なお, 実験に用いた高分子容量式湿度センサは, オフセット容量が60pF, 容量変化率が0.05[pF/%RH]である。現在市販されている容量式湿度センサの容量変化率は0.5~3[pF/%RH]程度である⁽⁹⁾から, このセンサは比較的容量変化の小さな部類である。

<3・2> 分解能の測定 分流式湿度発生装置を使用して, 実験回路を20°C, 50%RH雰囲気中に置き, 電源投入後60分から120分までの周波数を5分おきに測定する。そして, 測定した周波数の最大値 f_{max} と最小値 f_{min} , 及び平均値 f_{ave} から回路の周波数変動率を

$$\delta = (f_{max} - f_{min}) / f_{ave} \quad \dots \dots \dots (8)$$

として求め, 式(7)及び図5より

$$\Delta h = \delta \cdot \frac{1}{s} \quad \dots \dots \dots (9)$$

$$\Delta C = \frac{dC(h)}{dh} \cdot \Delta h \quad \dots \dots \dots (10)$$

として湿度分解能 Δh , 及び容量分解能 ΔC を得る。

センサ部分には, センサのオフセット容量60pFと同軸ケーブルの容量40pFを考慮しNP0セラミックコンデンサ100pFをダミーとして接続した。なお, セラミックコンデンサは湿度の影響を強く受けるため, シリコン系充填剤でこれを包み込んだ。また, 合成回路では相対湿度50%RHでの発振周波数 (4kHz) を採用してその変動を測定した。

<3・3> 温度依存性の測定 実験回路の雰囲気は湿度

表1. 各種回路の特性

Table 1. Characteristics of various circuits

	合成回路	ウィーンブリッジ	マルチバイブレーター
感度 s [1/%RH]	-5.6×10^{-3}	-2.3×10^{-4}	-3.0×10^{-4}
周波数変動率 δ	1.5×10^{-4}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-4}
分解能 Δh [%RH]	0.025	0.05	0.3
ΔC [pF](at 100pF)	0.0015	0.003	0.02
温度係数 [%RH/°C]	+0.1	+0.01	-10
[pF/°C](at 100pF)	+0.005	+0.0005	-0.6

注. 感度はそれぞれの回路の最低値。合成回路の周波数変動率, 分解能, 及び温度係数は相対湿度50%RHの周波数(4kHz)で実験して得た値。

50%RHで、温度を10℃から35℃まで変化させ、それぞれの設定温度において30分間放置後の周波数変化を計測した。センサ部に用いるダミーコンデンサ、及び合成回路の発振周波数は<3・2>と同様である。

4. 実験結果と考察

<4・1> 感度 図6は発振周波数-相対湿度特性、図7はそれを感度-相対湿度特性に変換したものである。合成回路では、相対湿度全域にわたって他者に比べ感度が大きく向上している。なお、低湿度域で、合成回路の感度が湿度の上昇とともに低下するのは、式(6)の($C_0 - C_1$)が大きくなるためであり、高湿度域で感度が上がるのは、図5か

らセンサ素子自身の感度がこの領域において増大するためである。

しかし、容量変化率がおよそ10%以下であれば、それが相対湿度レンジのどの範囲でも他回路に比へ十倍以上の感度を得ることが出来る。

<4・2> 分解能 表1に各回路の周波数変動率 δ 、及び分解能 Δh 、 ΔC を示す。無安定マルチバイブレーターの発振周波数は、トランジスタ及び電源の安定度に強く依存するために回路自身の周波数変動率を小さくすることが難しく、ここでは他者に比へ十分の一程度の分解能しか得られなかった。一方、合成回路では、等価容量 C_1 を使用したことにより感度はかなり向上するが、周波数変動率が大き

図6. 各種回路の周波数-相対湿度特性
Fig.6. The dependence of frequency vs. relative humidity for various circuits.

図7. 各種回路の感度-相対湿度特性
Fig.7. The dependence of sensitivity vs. relative humidity for various circuits.

図8. 各種回路の周波数-温度特性
Fig.8. The dependence of frequency vs. temperature for various circuits.

くなるため分解能はウィーンブリッジ発振回路単体に対し、数倍の改善に留まった。

ところで、実用に際し湿度センサシステムの最終的な湿度表示手段として、周波数あるいは電圧表示を考えたとき、前者については周波数カウンタの精度とコストとの兼ね合い、及び湿度センサ素子自身の応答速度からカウンタが受ける制限、後者については例えばF-Vコンバータの回路的性能などから、いずれの場合も総合的にシステムの周波数変動率 δ は 10^{-4} 程度に抑えることが限界と思われる。この場合の容量分解能は、ウィーンブリッジ発振回路、及び合成回路について、各々0.02pF及び0.001pFとなり、結果的に合成回路では周波数変動率は大きくなるが大幅に感度が上がるため、廉価で簡単な回路構成により高い分解能が得られた。

<4・3> 温度依存性 図8はそれぞれの回路の温度特性である。表1に温度係数をまとめた。合成回路及びウィーンブリッジ発振回路の温度係数はそれぞれ $+0.1[\%RH/^{\circ}C]$ 、 $+0.01[\%RH/^{\circ}C]$ で、通常の湿度計測において室温付近で温度補償がいらないほど良好な特性が得られた。無安定マルチバイブレーターの温度係数は $-10[\%RH/^{\circ}C]$ と非常に大きく、温度補償無しでは実用に耐え難い。

5. あとがき

微小な容量変化を検出する際に、センサ素子のオフセット容量を負性容量回路によって除去し、さらに全体容量を増幅して容量変化率を大きくすることにより検出感度を上げた。そして従来市販されている湿度センサによく使われるマルチバイブレーターを含めてそれぞれの回路の感度、分解能、及び温度特性を調べた。その結果マルチバイブレーターの十倍以上の分解能（容量変化率にして 10^{-4} ）が簡単な回路構成で得られた。また回路自体の温度特性も温度係数 $0.1[\%RH/^{\circ}C]$ と安定しており、湿度センサ用駆動回路として利用する場合温度補償は不要であった。

なお今回の等価容量回路とウィーンブリッジ発振回路を組み合わせたセンサ駆動回路は出力が容量値に対して直線的でないため、特に広範囲にわたる湿度計測においては出力のリニアライズが必要である。

今後は、湿度センサ以外に、圧力計などの容量式センサへの利用も考えている。

本研究を進めるにあたって、容量式湿度センサを提供し

てくださり、回路開発に多大な御助力をいただいた神栄株式会社の山内一雄氏、北靖司氏に感謝致します。

(平成5年6月28日受付)

文献

- (1)湿度計測・センサ研究会:湿度計測・センサのマニュアル, p89 (平1) 学献社
- (2)トランジスタ技術編集部:温度・湿度センサ活用ハンドブック, p180 (昭63) CQ出版社
- (3)トランジスタ技術編集部:温度・湿度センサ活用ハンドブック, p197 (昭63) CQ出版社
- (4)丹野頼元:演習オペアンプ回路, p102 (昭57) 森北出版
- (5)湿度計測・センサ研究会:湿度計測・センサのマニュアル, P68 (平1) 学献社

伊藤 秀明 (正員) 昭和26年4月30日生まれ。49年3月信州大学工学部電子工学科卒業。51年3月同大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了。56年同大工学部電子工学科助手。平成3年同大工学部電気電子工学科助教授、現在に至る。水晶振動子を用いた湿度センサ、真空センサの研究に従事。工学博士。電子情報通信学会、応用物理学会各会員。

林部 林平 (非会員) 昭和23年4月25日生まれ。44年3月長野工業高等専門学校卒業。46年信州大学工学部勤務。以来、電子計測、固体電子回路、医用電子などの研究に従事。電子情報通信学会会員。

寺島 隆幸 (非会員) 昭和45年5月7日生まれ。平成5年3月信州大学工学部電気電子工学科卒業。現在同大学院工学研究科電気電子工学専攻博士前期課程在学中。