高 Q 値化による渦電流型レール変位センサの高リフトオフ化の検討

Study on High Lift-Off of Eddy Current Type Rail Displacement Sensor by High Quality Factor

近松 具樹^{*1}(学生員), 佐野 太規^{*1}(学生員), 佐藤 光秀^{*1}(正員), 水野 勉^{*1}(正員),
榎木 茂実^{*2}, 旭 尊史^{*2}, 松浦 史明^{*2}

Tomoki CHIKAMATSU (Stu. Mem.), Taiki SANO (Stu. Mem.), Mitsuhide SATO (Mem.),
Tsutomu MIZUNO (Mem.), Shigemi ENOKI, Takafumi ASAHI, Humiaki MATSUURA

As the conventional eddy current type rail displacement sensor has a small distance (liftoff) from the railhead top surface to a sensor, there is the possibility that a sensor wakes up trouble and malfunction for a collision with the snow and the gravel. As the conventional triangle coil has low Q level, a change of the impedance to depend on rail displacement for when I raise a liftoff is not provided enough. Therefore, the problem that the detection precision of the rail displacement falls to occurs. In this article, I improved a Q level by becoming examination, the high frequency of the drive circuit of the coil structure and enabled measuring it at 50mm that was conventional double size by a liftoff.

Keywords: quality factor, eddy current, rail displacement, coil, high frequency drive, high lift off, impedance, output voltage.

(2020 年 5 月 20 日受付, 2020 年 12 月 29 日再受付)

1 緒言

渦電流型センサは新幹線や在来線の軌道狂いを測定するレール変位センサや 1km 毎の地点検知センサ, High Speed Surface Transport(HSST)の浮上制御用センサなどに採用されている[1-5]。

渦電流型レール変位センサは新幹線や在来線のレール検測のための軌道検測車に搭載されている。また渦電流型レール変位センサは非接触でレール間隔の変位に対応した出力電圧を測定できるセンサである[6]。レール変位センサは光学式と電磁式の二種類に大別され, 本論文で述べる電磁式(渦電流式)は, 測定精度において光学式よりも劣るが, 降雨や積雪の影響を受けにくいために天候に左右されず測定できる。

現在, 渦電流型レール変位センサはレール頭頂面からセンサまでの距離(リフトオフ)を 25 mm として運用されている。しかし, リフトオフが短いためにセンサが砂利や積雪と衝突して故障や誤作動を起こしており, リフトオフ延長が求められている。従来のセンサのコイルでは Q 値が低いためにリフトオフを大きくするとレール変位に依存するコイルのインピーダンス Z の変化が十分に得られない。

先行研究では駆動周波数を高周波化することでリフトオフは従来の 2 倍である 50mm への延長を可能としたが, 出力電圧変化量の目標値を満足できなかった[7]。

本論文では駆動周波数の高周波化に加え, コイルの構造検討を行うことで Q 値を向上させた。その結果, 出力電圧変化量の目標値を満足し, リフトオフを従来の 2 倍である 50mm への延長を可能とするとともに検出感度が向上した。

本論文の検討事項は以下の通りである

- 1) レール変位センサのインピーダンス Z 特性と出力電圧特性
- 2) レール変位センサのレール変位検出誤差 δ

2 レール変位センサの動作原理と構造

Fig. 1 にレールを配置したコイルの構造を示した。渦電流型レール変位センサは Fig. 1 のように 2 個の三角コイルが和動結合するよう配置されている。レール左右方向の変位をレール変位 x , レール頭頂面からセンサまでの距離をリフトオフ z とする。同図においてリフトオフ z は 50 mm である。またレール変位 x は最大 -30 ~ +30 mm の範囲で検出される。そのために実験では実際の検出範囲より少し広い -36 ~ +36 mm の範囲で測定を行った。コイルと回路基板(Fig.4 を参照)は同軸ケーブル(200 mm)で接続されている。

連絡先: 佐藤 光秀, 〒380-8553 長野市若里 4-17-1, 信州大学工学部電子情報システム工学科,
e-mail: mitsuhide@shinshu-u.ac.jp

^{*1} 信州大学 ^{*2} 新川センサテクノロジー株式会社

Fig. 1 に示したように、コイルに電流を流して磁束 ϕ を生じさせることでレールに渦電流が発生し、渦電流による磁束 ϕ_c によりコイルのインピーダンス Z が変化する。レールが x 軸方向に変位した場合、レールと鎖交する磁束の量は変化する。よって、コイルのインピーダンス Z はレール変位 x に依存して変化する。このインピーダンス Z の変化を出力電圧 V_o として出力する。

Fig. 1 Structure of rail displacement sensor.

Fig. 2 にコイルの構造を示した。Fig. 2(a)は従来のコイル構造を示した。従来のコイルはソレノイド状に巻かれており、導体径 0.5 mm のマンガニン線を使用している。従来コイルの外寸はFig.2(b)に示したコイルと同程度である。Fig. 2(b)に筆者が考案したコイルを示した。線材は銅の単線を使用しており、導体径 2.0 mm、コイルの巻線ピッチ 5.0 mm、各層の巻数 N は一層目が $N=2$ 、二層目が $N=1$ である。Fig. 2(a), (b)より新規コイルは従来コイルと比較して導体径は 4 倍に増加し、同層と層間の巻線距離は 0 mm から 2 mm に増加した。

Fig. 3 にコイルの等価回路を示した。左図はコイルの抵抗 R とインダクタンス L 、静電容量 C からなるコイルの等価回路を示しており、右図は左図のインピーダンス Z を実部 R_s 、虚部 L_s に分けたときの等価回路である。また、式(1)-式(3)にコイルの Q 値を算出する式を示した。Fig. 3 と式(1)-式(3)からコイルの Q 値を大きくするには抵抗 R と静電容量 C を小さくし駆動周波数を大きくする必要がある。本論文で用いたコイルは巻線距離を大きくとっているため、近接効果による

Fig. 2 Structure of coil (unit : mm).

Fig. 3 Equivalent circuit of coil.

Fig. 4 Equivalent circuit of displacement sensor.

交流抵抗 R と巻線間に生ずる静電容量 C が小さくなる。

$$R_s = \frac{R}{(1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega CR)^2} \quad (\Omega) \quad (1)$$

$$L_s = \frac{-CR^2 + L(1 - \omega^2 LC)}{(1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega CR)^2} \quad (\text{H}) \quad (2)$$

$$Q = \frac{\omega L_s}{R_s} = \frac{\omega L - \omega CR^2 - \omega^3 L^2 C}{R} \quad (3)$$

ここに、 R : 抵抗(Ω), L : インダクタンス(H),
 C : 静電容量(F), ω : 角周波数(rad/s)

Fig. 4 にレール変位センサの等価回路を示した。レール変位センサはコイル、同軸ケーブル、倍電圧整流

回路で構成されている。レール変位センサとレールはアースに接地した。コイルの等価回路は Fig.3 右図に示した通りである。発振器の電圧は $E = 10 \text{ V}_{\text{pp}}$ を印加し、駆動周波数は 14.2 MHz とした。レール変位センサの出力電圧 V_o は抵抗 R の端子間の電圧である。

3 レール変位センサのインピーダンス Z 特性

3.1 インピーダンス Z -周波数 f 特性

Fig. 5 にコイルのインピーダンス Z - 周波数 f 特性を示した。インピーダンス Z の周波数特性はネットワークアナライザ(Keysight Technologies E5061B)を用いて測定した。並列共振周波数は Q 値が 0 となるときの周波数である。Fig. 5(a)よりコイル 1, コイル 2 の並列共振周波数はそれぞれ 47 MHz , 45 MHz であった。

Fig. 5 Impedance vs. frequency characteristics of coil
($x = 0 \text{ mm}$, $z = 50 \text{ mm}$).

また、レール変位センサの励振周波数 f はレール変位 x に依存する出力電圧 V_o の変化が最も大きい周波数を選定し、14.2 MHz とした。Fig. 5(b)より、励振周波数 $f = 14.2$ MHz における、コイル 1, 2 の Q 値はそれぞれ 76.6, 77.8 である。ここで、Fig. 2(a)に示した従来コイルは励振周波数が 450 kHz で、 Q 値が 14 である[7]。したがって、導体径を 4 倍にし、同層と層間の巻線距離を 0 mm から 2mm にすることで静電容量が低減され、高周波駆動させることで Q 値は従来の 5 倍以上向上した。

(a) Impedance Z vs. rail displacement x .

(b) Resistance R vs. rail displacement x .

(c) Inductance L vs. rail displacement x

Fig. 6 Impedance vs. rail displacement characteristics ($f = 14.2$ MHz).

3.2 インピーダンス Z - レール変位 x 特性

Fig. 6 にコイル 1, 2 のインピーダンス Z - レール変位 x 特性を示した。なお、インピーダンス Z はレール変位 $x = -36 \sim +36$ mm, リフトオフ $z = 50$ mm で測定を行った。Fig. 7 に示したように、レールは固定し、治具を用いてコイルを x 軸方向に変位させた。インピーダンス Z のレール変位特性はネットワークアナライザ (Keysight Technologies E5061B) を用いて測定した。

Fig. 6 (a),(c)より、レール変位 x を増加させるとコイル 1 はインピーダンス Z , インダクタンス L とともに減少し、反対にコイル 2 はインピーダンス Z , インダクタンス L とともに増加した。また、Fig. 6(b)より抵抗の値はレール変位 x に依らずほぼ一定であった。Fig. 6(a)より、インピーダンス Z の変化量 ΔZ はコイル 1, 2 ともに 0.16Ω である。

4 レール変位センサのレール変位検出

4.1 レール変位センサの出力電圧特性

Fig. 8 にレール変位センサの出力電圧特性を示した。なお、出力電圧 V_o はレール変位 $x = -36 \sim +36$ mm, リフトオフ $z = 50$ mm で測定を行った。Fig. 7 に示したように、治具を用いてレールは固定しコイルを x 軸方向に変位させた。出力電圧 V_o はデジタルマルチメータ (Keysight Technologies 34465A) を用いて測定した。また、コイル 1, 2 の励振周波数は共に 14.2 MHz である。Fig. 8 より、レール変位 x が $x = -36 \sim +36$ mm の範囲で

Fig. 7 Experimental method.

変化したとき、コイル 1, 2 の出力電圧 V_o の変化量はそれぞれ 0.99 V, 0.8 V であった。従来のレール変位センサはリフトオフ 25 mm においてレール変位 x が $x = -36 \sim +36$ mm の範囲で変位したとき、出力電圧の変化量が 0.65 V である。従ってリフトオフ 50 mm において出力電圧 V_o の変化量が 0.65 V 以上であれば、従来

Fig. 8 Output voltage vs. displacement characteristics of the rail displacement sensor disposed rail.

Fig. 9 Output voltage vs. rail displacement characteristics after correction.

Fig. 10 Detection displacement vs. rail displacement characteristic.

と同様の検測を行うことが可能である。

以上のことから、出力電圧の変化量の目標値を 0.65 V 以上とした。コイル 1, 2 とともに 0.65 V 以上を満足した。この出力電圧の変化からレール変位の検出を行う。

レール変位センサを用いてレール変位を検出するために、レール変位 $x = -30 \sim +30$ mm の範囲出力電圧 V_o の変化量が ± 1.5 V となるよう出力電圧 V_o を補正する。補正後の出力電圧 V_o' は次式で与えられる。ここで ± 1.5 V に補正するので定数 M, m はそれぞれ $M = +1.5$, $m = -1.5$ とした。

$$V_o' = \frac{V_o(x) - V_{o\min}}{V_{o\max} - V_{o\min}} (M - m) + m \quad (\text{V}) \quad (5)$$

ここに、 $V_o(x)$: レール変位 x における出力電圧 (V), M : 補正後の最大値, m : 補正後の最小値

また、レール変位 $x = 0$ mm において、コイル 1, コ

Table 1 Constant used for calculating detection displacement.

Constant	Value(Unit)
K_3	2.4392
A_1	1.0022
A_2	6.8127
V_{x0}	5.000
V_{y0}	4.970
a	24.726 (mm)
α	0.176 (rad/V)
V_{ave}	0.008 (V)
b	0.031 (m)

Fig. 11 Rail displacement detection error vs. rail displacement characteristic.

イル 2 の補正後の出力電圧の差が 20 mV 以内となるようにした。

Fig. 9 に補正後の出力電圧 V_o' - レール変位 x 特性を示した。同図より、レール変位 $x=0$ mm において補正後の出力電圧の差は 19.5 mV であった。

4.2 レール変位検出

Fig. 10 に検出変位 x' - レール変位 x 特性を示した。検出変位 x' は式(6)、式(7)で導出する[8]。任意定数は変位検出誤差 ε_x (式(8)を参照)が小さくなるよう設定した。

$$x' = a \tan \left\{ \alpha (V'(x) - V_{ave}) \right\} + b \quad (\text{m}) \quad (6)$$

$$V'(x) = K_3 A_2 \frac{V_{o1}'(x) - A_1 V_{o2}'(x) - V_{x0} + A_1 V_{y0}}{A_1 V_{o1}'(x) - V_{o2}'(x) - A_1 V_{x0} + V_{y0}} \quad (7)$$

ここに、 $V_{o1}'(x)$, $V_{o2}'(x)$: 補正後のコイル 1, 2 の出力電圧 (V), $K_3, A_1, A_2, V_{x0}, V_{y0}, a, b, \alpha$, V_{ave} : 任意の定数, x : レール変位(m)

Table 1 に検出変位の計算に用いた定数を示した。

Fig. 11 にレール変位検出誤差 ε_x を示した。レール変位検出誤差 ε_x は式(8)を用いて導出した。

$$\varepsilon_x = x' - x \quad (\text{m}) \quad (8)$$

ここに、 x' : 検出変位(m), x : レール変位(m)

従来センサのレール変位検出誤差が ± 0.5 mm 以下であったために、レール変位検出誤差 ε_x の目標値を ± 0.5 mm 以下とした[7]。Fig.10 と Fig.11 に示したように、最大レール変位検出誤差はレール変位 $x = 30$ mm において $\varepsilon_x = 0.27$ mm であるため目標値を満足した。したがって、本センサはリフトオフを従来の 2 倍である 50 mm でのレール変位検出が可能であり、先行研究と比較して精度が向上した[7]。

5 結言

本論文で述べたことを以下に示す。

(1) レール変位センサのインピーダンス Z 特性と出力電圧特性

コイルの巻線距離を大きくすることで、近接効果による交流抵抗 R と巻線間に生ずる静電容量 C を低減させ、駆動回路を高周波化することより Q 値向上させた。コイル 1, 2 の Q 値はそれぞれ 76.6, 77.8 である。従来のコイルの Q 値が 14 であることから、コイル 1,

2 の Q 値は従来と比較して 5 倍以上向上し、出力電圧 V_o の変化量はそれぞれ 0.99 V, 0.8 V であった。コイル 1, 2 でそれぞれ目標値とした従来のレール変位センサの出力電圧変化量 0.65 V 以上を満足した。

(2) レール変位センサのレール変位検出誤差 ε_x

最大レール変位検出誤差は $\varepsilon_x = 0.27$ mm であった。レール変位検出誤差 ε_x の目標値は ± 0.5 mm 以下であり、条件を満足した。したがってリフトオフを従来の 2 倍である 50 mm でのレール変位検出が可能である。

参考文献

- [1] 中村 清寿, 「全天候型渦電流式高速軌道検出装置」, 新川技報, No. 1, pp. 5-10, 1980.
- [2] 中尾 信一, 全天候型渦電流式高速軌道検出装置「地点検知装置」, 新川技報, No. 1, pp. 11-13, 1982.
- [3] 藤野 政明, 真行寺 康明, 田中 正夫, 日比 修, 加藤 寿, 三輪 哲也, 松本 高幸, HSST-100 型の開発経過と試験結果-100L 型の試験結果と東部丘陵線の概要, 名古屋鉄道株式会社研究報告, No. 43, pp. 5-1-5-8, 1998.
- [4] 藤野 政明, 田中 正夫, 安藤 直樹, 長野 秀洋, HSST-100 型車輛の走行試験結果-電気ブレーキ領域拡大, 長期走行の試験結果について-, 名古屋鉄道株式会社研究報告, No.45, pp. 4-1-4-7, 1999.
- [5] 藤野 政明, 田中 正夫, 安藤 直樹, 長野 秀洋, HSST システムの最近の動向について -走行試験結果と東部丘陵線向け車輛-, 名古屋鉄道株式会社研究報告, No.46, pp. 5-1-5-6, 2001.
- [6] 大村 洗平, 下島 芳史, ト 穎剛, 水野 勉, 旭 尊史, 伊藤 誠, 摩耗有りレールが渦電流形レール変位センサの出力電圧に与える影響, 電気学会マグネティクス研究会資料, MAG-15-21, pp. 39-44, 2015.
- [7] 櫻 隼樹, 森 大輝, ト 穎剛, 水野 勉, 榎木 茂美, 旭 尊史, ショート形三角形コイルの高周波駆動による渦電流形レール変位センサの高リフトオフ化, 日本 AEM 学会誌, Vol. 26, No.1, pp.121-126, 2018.
- [8] 榎木 茂美, 渦電流式変位センサのレール保守管理への応用に関する研究, 信州大学博士學位論文, p.84, 2003.