

2705 アクティブ制御パンタグラフの制御パラメータ最適化

正 [機] ○小林 樹幸 (鉄道総研) 正 [機] 山下 義隆 (鉄道総研) 正 [機] 池田 充 (鉄道総研)

正 [機] 増田 新 (京工繊大) 正 [機] 射場 大輔 (京工繊大)

Optimization of Control Parameters for Active Control Pantograph

Shigeyuki KOBAYASHI, Railway Technical Research Institute 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji City, Tokyo

Yoshitaka YAMASHITA, Mitsuru IKEDA, Railway Technical Research Institute

Arata MASUDA, Daisuke IBA, Kyoto Institute of Technology, Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto

Contact force fluctuation is one of the most important factors to evaluate current collection performance for the high speed trains. Because overhead contact lines are supported by cyclic poles, feedforward control technique is an effective method to reduce contact force fluctuation. On the other hand, amplitude and delay have to be determined considering contact wire sags, wave propagation, support cycle and more. In this paper, these control parameters are optimized based on Steepest Descent Method, and this method is validated based on simulation and vibration test.

Keywords : pantograph, contact force, feedforward control, steepest descent method

1. 緒論

大量輸送手段である鉄道において移動時間の短縮は、重要な商品付加価値の一つである。しかし速度向上を実現するためには、集電系に関する様々な課題を克服する必要がある。この課題としては、沿線の環境への配慮から求められる空力騒音の低減だけではなく、安定した集電性能の確保も挙げられる。安定した集電性能は、架線の張力を上げて波動伝播速度を向上させることなどによって実現されてきた¹⁾。ところが、こうした架線の改良には大規模な工事が必要となるため、車両側での対策も重要な手段であるが、実際には空力騒音とのトレードオフのためパンタグラフの構造変更には多くの制約が存在する。

その解決策として、鉄道総研では制御技術を用いた架線・パンタグラフ間の接触力変動低減手法の開発に取り組んできた²⁾³⁾。架線が一定の間隔で支持されている周期構造物であることに着目すると、舟体に作用する外乱周波数が既知であるという条件下で、この周波数の正弦波を制御力としてパンタグラフに作用させることは有用であると考えられる。しかし、実際にはアクチュエータの遅れや架線とパンタグラフそれぞれの動特性の影響により、理想的な制御力と外乱との間には位相差が存在する。この位相差と制御力の絶対値については前述の要因に加えてトロリ線の弛度や波動伝播特性によって決定されるため、一般的には事前の決定が難しい。

そこで本研究では、制御力の絶対値や外乱に対する位相差を車両が走行しながら適応的に最適化する手法を提案する。この方法は、これら2つの制御パラメータを振動させることで差分感度を算出し、これに基づいて最急降下法によって最適解を探索するものであり、シミュレーションと加振試験からその妥当性について検証する。

2. 最適化手法

本章では初めにパンタグラフの力学モデルを構築するとともに制御力を定義する。次に制御パラメータの最適

化について述べる。

2.1 制御手法

本研究で考慮するパンタグラフの力学モデルは図1に示す二要素モデルとする。 f_c は接触力、 P_0 は静押上力を示し、枠組みに相当する質点2に次式で示される制御力 f_a を作用させる。

$$f_a = \sum_i A_i \sin(\omega_i t + \phi_i) \quad (1)$$

ここで i は支持点間隔やハンガ間隔に起因する外乱の種類を表す。このように本研究では、周波数 ω_i の外乱が作用する場合に位相を ϕ_i 進めた正弦波を制御力として質点2に作用させるフィードフォワード制御を用いる。なお最適化するパラメータは A_i 、 ϕ_i である。

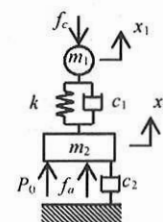


Fig.1 Pantograph model

2.2 最急降下法

本研究ではパラメータの推定手法として最急降下法を用いる。最急降下法は各反復において目的関数の減少が最大となる方向に向かってパラメータを修正する方法である。今回の場合では目的関数は接触力変動であり、接触力の各パラメータに対する微分感度を用いることで、ステップ k におけるパラメータの変更は次式で表される。

$$\begin{Bmatrix} A \\ \phi \end{Bmatrix}^{(k+1)} = \begin{Bmatrix} A \\ \phi \end{Bmatrix}^{(k)} - \begin{Bmatrix} \alpha \frac{\partial F_c(\omega)}{\partial A} \\ \beta \frac{\partial F_c(\omega)}{\partial \phi} \end{Bmatrix}^{(k)} \quad (2)$$

α と β はパラメータ更新時の倍率を決定する係数であり、 A と ϕ の次元が異なることを考慮すると本来は何らかのスケール処理が必要であるが、本研究ではこれらの値は試行錯誤的に決定する。 $F_c(\omega)$ は接触力における周波数 ω の成分を表わし、これらの感度は実際に A_i と ϕ_i を摂

動させることによって次式で得るものとする。

$$\frac{\partial F_c^{(k)}}{\partial A} = \frac{F_c|_{A^{(k)}+\delta A} - F_c|_{A^{(k)}}}{\delta A} \dots \dots \dots (3)$$

$$\frac{\partial F_c^{(k)}}{\partial \phi} = \frac{F_c|_{\phi^{(k)}+\delta \phi} - F_c|_{\phi^{(k)}}}{\delta \phi} \dots \dots \dots (4)$$

ここで δA , $\delta \phi$ は k ステップからのパラメータの増分であり, 任意に設定する必要がある. 式(2)ではテーラー展開の2次以上の項を無視しているため, シミュレーションのような理想的な条件においてはこれらの値は小さければ小さいほど正確な感度を求めることができる. しかし後で述べるように, 加振試験の場合にはある程度大きい値を設定しないと接触力に変化が生じないが, 大きすぎると式(2)における高次の成分を無視できないために正確な感度を求められなくなる.

3. シミュレーションによる検討

本章では Simulink を用いて架線・パンタグラフ間の相互作用を考慮したパンタグラフの走行シミュレーションを行ない, 制御パラメータを最適化する.

3.1 シミュレーション方法

使用する架線とパンタグラフおよび両者の接触を表す力学モデルを図2に示す. 走行するパンタグラフは1台とし, 走行速度は100km/hと270km/hの2通りで, 前者の場合には図中(a)のシンプル架線を, 後者の場合には(b)のコンパウンド架線を用いる. いずれの架線も0.5m間隔の質点で離散化し, 隣り合う質点同士をばね・減衰要素で結合する. 支持点間隔を50m, ドロップ間隔を10m, ハンガ間隔を5mとし, ドロップ・ハンガの剛性を 10^5N/m という比較的剛性の高いばねで表現している. 同様に支持点における構造物の剛性を表現するために, 吊架線を 10^5N/m のばねで50m毎に支持している. また, トロリ線とパンタグラフの接触は同様に 10^5N/m の剛性を有するばね要素を用いたペナルティ法によって表現し, 逐次積分の時間間隔を1/1000secとする. そして架線の減衰要素はばね要素と並列して配置されており, 次式で表される比例粘性減衰を仮定する. ただし $[C]$ は減衰行列, $[K]$ は剛性行列である.

$$[C] = 0.005[K] \dots \dots \dots (5)$$

使用したパンタグラフの定数を表1に示す. ハンガやドロップは浮かないものとし, その他支持金具の質量は考慮しないものとする. また, 感度を求めるためには接触力における特定の周波数成分が必要であり, 本研究ではロックインアンプ⁴⁾を用いてこれをリアルタイムに抽出する.

次に感度の算出法について述べるために, 走行速度100km/hの場合に得られた接触力波形を図3に示す. シミュレーション開始からの3秒間(約1径間半)は架線が過渡的な状態であるため接触力の評価には用いず, 3秒から1.8秒間(1径間)において $A^{(k)}$, $\phi^{(k)}$ のパラメータを用いて制御した場合の接触力を評価する. 次に A を δA だけ増加させてから架線が定常状態になるまでの1秒間は接触力の評価をせず, その後の1径間分の接触力を用いて A に関する感度を式(3)に基づいて算出し, 最後に ϕ を $\delta \phi$ だけ増加させて同様に ϕ に関する感度を式(4)から算出する. こうして得られた差分感度を用いて, 式(2)に基づいて A と ϕ を同時に更新する.

本シミュレーションでは, パンタグラフが第1径間から約6径間の架線を走行する計算を1回行うごとにパラメータを更新し, 再び同じ架線を第1径間目から走行し直すという過程をパラメータが収束するまで繰り返し実行する. なお本研究では, 8径間の径間長を有する架線モデルを使用し, シミュレーション開始3秒後から1.8秒間(1径間)における接触力のp-p値が低減されなくなったら計算が収束したものと判断する.

3.2 解析結果

本章のシミュレーションでは, シンプル架線・コンパウンド架線ともに支持点間隔とハンガ間隔に起因した接触力変動を低減させることを目標とする.

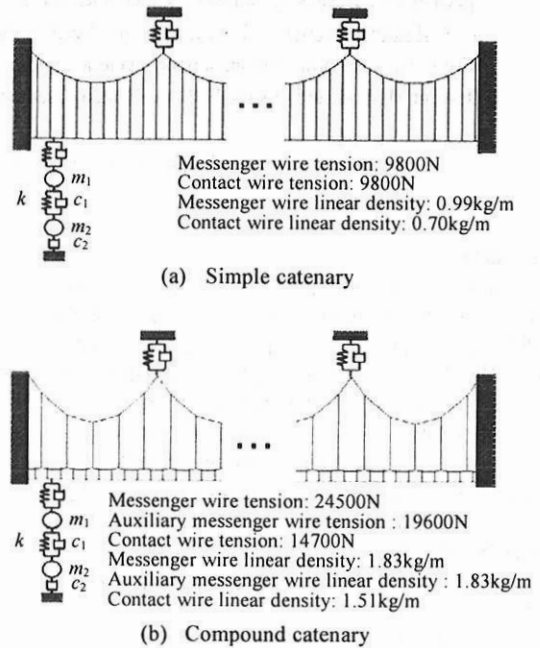


Fig.2 Catenary and pantograph model

Table1 Specifications of pantograph model

m_1	10.3kg
m_2	11.2kg
k	14700N/m
c_1	120Ns/m
c_2	120Ns/m
P_0	54N

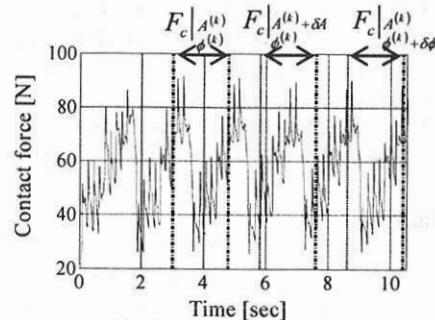


Fig.3 Simulation spans

反復計算によって与えられる制御の効果（1 径間を走行する間の接触力の時系列波形）を、走行速度 100km/h については図 4(a)に、270km/hについては図 4(b)に示す。そして得られたパラメータの値と、これらの制御パラメータを用いて制御を行なった場合の接触力のp-p値・標準偏差を表 2 に示す。なお表中の添え字_{sup}は径間周期、_{hg}はハンガ周期に関するパラメータであることを示している。

いずれも接触力変動が概ね低減されているが、支持点間隔以外に起因した接触力変動は十分に低減できていない。そこで走行速度 270km/h の場合の接触力変動のウェーブレット解析結果を図 5 に示す。支持点間隔に対応する周波数は 1.5Hz、ハンガ間隔は 15Hz である。図より、制御時における接触力変動は径間周期およびハンガ周期の整数次成分が顕著であることが分かる。従って、更なる接触力変動の低減のためにはこれらの整数次成分についても考慮する必要があると考えられる。

4. 加振試験による検討

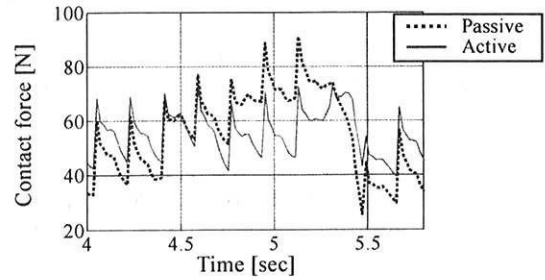
本章では架線を剛体として扱い、舟体に強制変位を与えた際に生じる接触力変動を低減させるという実験を行なう。なお本研究では、パンタグラフ実機に対するパラメータの収束性に関する基礎検討を行なうため、単一周波数の正弦波を入力変位とする。なお本章において A は空気圧アクチュエータへの指令電圧[V]とし、指令電圧から接触力へ換算する校正係数は 29.1N/V である。

4.1 試験方法

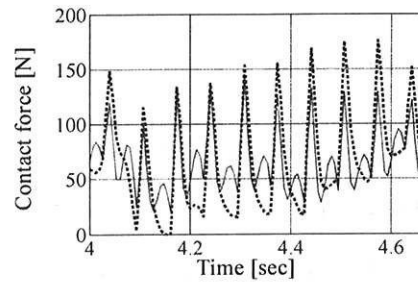
図 6 に示すように、空気圧アクチュエータを備えたアクティブ制御パンタグラフを用いて加振試験を行う。アクチュエータは枠組みに制御力作用させるように取付けられており、図 1 に示した力学モデルと等価である。加振位置は舟体中央とし、振幅 10mm、周波数 2Hz の正弦波で強制変位加振したときの接触力をロードセルで測定して、最急降下法を用いて最適な制御パラメータを探索する。制御パラメータ A と ϕ の初期値をそれぞれ 0 とし、感度を求める際の式(4)における $\delta\phi$ を 2.5° とした。式(3)の δA については、接触力の大きさに応じて可変とする。これは、 A の値が小さい場合には δA を大きくしないとアクチュエータの摩擦の影響で接触力変動に変化が生じず、また最適解近傍では δA を小さく設定しないと正確な感度を評価できないためである。本試験では接触力 F_c が 15N のときに δA が 0.5V、 F_c が 2N のときに δA が 0.05V とし、この 2 点間において線形関係が成り立つようにして δA を設定した（図 7）。

4.2 試験結果

最初に、 ϕ を -180° から 10° 間隔で 180° 、 A を 0V から 0.1V 間隔で 1V までそれぞれ変化させたときの接触力変動の 2Hz 成分をすべて測定した。パラメータの初期条件（ $A = 0V$ 、 $\phi = 0^\circ$ ）での接触力変動が 0N となるようにしたマップ上に、各反復計算によって得られた制御パラメータをプロットしたものを図 8 に示す。図中の実線の矢印はパラメータの軌跡を示しており、×印で示す最適解の方向へ向かっていることが分かる。



(a) Speed: 100km/h



(b) Speed: 270km/h

Fig.4 Control performances

Table2 Optimization results

(a) Speed: 100km/h

		Passive	Active	
A [N]		-	A_{hg} : 2.3	A_{sup} : 13.3
ϕ [deg]		-	ϕ_{hg} : -10.5	ϕ_{sup} : -38.8
Contact force [N]	p-p	65.6	36.0	
	std.	15.2	8.24	
Contact loss [%]		0	0	

(b) Speed: 270km/h

		Passive	Active	
A [N]		-	A_{hg} : 300.1	A_{sup} : 20.0
ϕ [deg]		-	ϕ_{hg} : -6.9	ϕ_{sup} : -0.5
Contact force [N]	p-p	176.4	124.5	
	std.	43.8	27.7	
Contact loss [%]		2.16	0	

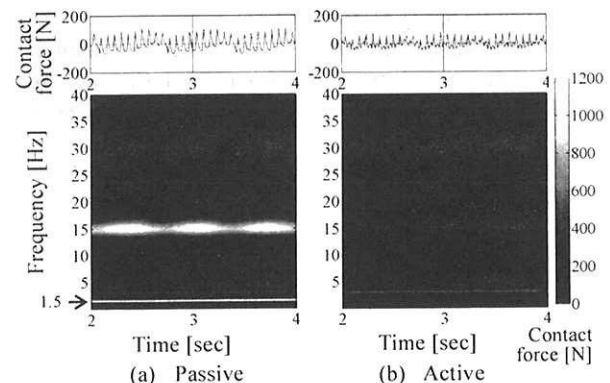


Fig.5 Time-Frequency analysis (Speed: 270km/h)

制御パラメータの初期値近傍ではアクチュエータの摩擦等の影響によって A の感度が低いため δA を大きくすることでパラメータの移動を可能にしており、一方でパラメータが最適解へ近づくほど δA が小さくなるため、最適解近傍においてもパラメータは収束する方向へ向かっている。

得られたパラメータによる制御効果を図9に示す。アクチュエータの摩擦の影響によって高調波成分が顕在化しているが、接触力の 2Hz 成分は 15.9N から 1.2N に低減されている。

5. 結論

本研究ではフィードフォワード制御による架線・パンタグラフ間の接触力変動低減手法において、制御パラメータを適応的にチューニングする方法について検討した。この手法では、パンタグラフの枠組みに作用する制御力の絶対値と外乱に対する位相差をパラメータとし、支持点間隔・ハンガ間隔など架線の構成が常に一定であるという仮定に基づき最急降下法を用いて上記のパラメータを探索する。

架線とパンタグラフ間の相互作用を考慮したシミュレーションを行ない、上記のパラメータ探索手法の妥当性について検討した。このシミュレーションでは径間周期とハンガ周期に起因した接触力変動のみを制御対象としていたため、これらの周波数成分を低減することはできたものの、更なる接触力変動の低減を目指すためには上記周波数の整数次成分も制御対象とする必要があることが分かった。

最後に、加振試験を用いて手法の妥当性を検証した。感度を求めるためのパラメータの変化量を可変にして収束性を向上させている。

架線の構造（支持点・ハンガ間隔や静高さなど）が位置によって異なる場合のパラメータの推定方法について検討する予定である。

参考文献

- 1) 網干光雄, 常本瑞樹: 新幹線の高速度運転に対応した電車線の架設指針, 鉄道総研報告, Vol.25 No.4, pp.17-22, 2011
- 2) 池田充, 菅原能生, 小山達弥: 高速用パンタグラフの接触力制御手法に関する基礎研究, 鉄道総研報告, Vol.20 No.9, pp.41-46, 2006
- 3) Y. Yamashita, M. Ikeda: Advanced Active Control of Contact Force between Pantograph and Catenary for High-Speed Trains, QR of RTRI, Vol.53 No.1, pp.28-33, 2012
- 4) 遠坂俊昭: 計測のためのフィルタ回路設計, CQ 出版, 1998

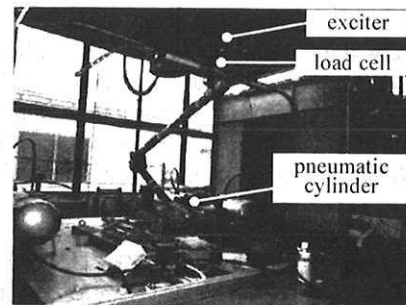


Fig.6 Vibration test set-up

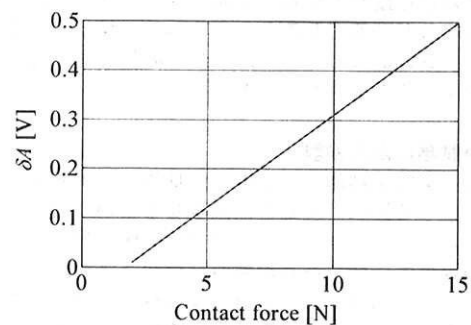


Fig.7 Table of variable δA

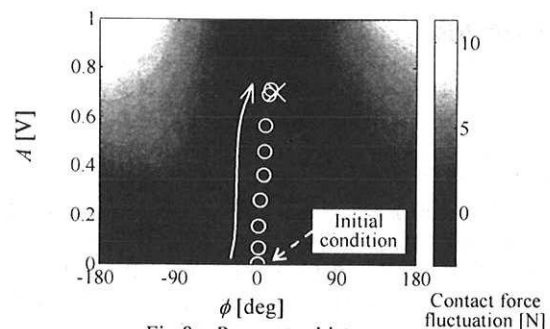


Fig.8 Parameter history

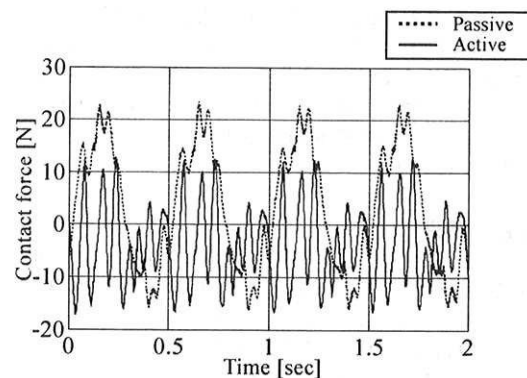


Fig.9 Control performances