108 加工ループの安定性解析と高速電極駆動ヘッドによる加工の高速化

Analysis of Stability of EDM Machining Loop
and Improvement of Machining Speed by Using High Speed Actuator

○正 家澤 雅宏 (三菱電機) 正 今城 昭彦 (三菱電機)
赤松 浩二 (三菱電機) 鈴木 智 (三菱電機エンジニアリング)

Masahiro IEZAWA, Mitsubishi Electric Corp., 8-1-1, Tsukaguchi honmachi, Amagasaki city, Hyogo
Akihiko IMAGI, Mitsubishi Electric Corp.
Koji AKAMATSU, Mitsubishi Electric Corp.
Satoshi SUZUKI, Mitsubishi Electric Engineering Co.Ltd.

In this paper, we investigated the stability of EDM machining loop using a high speed actuator. The stability condition of machining loop was obtained by describing function analysis. We performed the test of electric discharge machining and it was confirmed that the result of experiment were in good agreement with the result of simulation.

Key Words: Servo mechanism, Stability, Electrical Discharge Machining

1. はじめに

放電加工機において、加工制御系の高速化は加工速度の向上のために不可欠であり、従来よりボイスコイルモータや圧電素子を用いた電極駆動装置が加工速度の改善に有効であることが報告されている^{(1),(2)}。

本研究では、高速電極駆動装置の応答性能が加工制御系の安定性にどのように寄与するかを明らかにするために、非線形制御理論における記述関数法を用いて解析し、その妥当性をシミュレーションと実験で検証した。次に、細穴加工用電極を用いて加工実験を行い、高速駆動装置による加工速度の改善効果を確認したので、以下にその内容を報告する。

2. 放電加工制御系の構成

本研究における実験装置の構成を図1に示す。Z軸方向の一軸テーブル上に高速電極駆動装置を取り付け、一軸テーブルと高速電極駆動装置の協調動作によって電極・ワーク間の極間距離を制御する。駆動制御は、それぞれの位置センサーからの信号とNC装置からの極間平均電圧信号をもとにして、アンプを介してパソコン上で制御する。

図1 実験装置の構成

図2 加工制御系の構成

次に、加工制御系のブロック線図を図2に示す。伝達関数 $G_p(s)$ の電極駆動装置の外側に電極位置をフィードバックする速度ループと極間平均電圧をフィードバックする加工ループを設けている。電極駆動装置の電流制御系の伝達関数は1、電極・ワーク間の距離（極間隙間）と極間平均電圧の関係は飽和要素として近似している。また、実際の電極駆動装置は一軸テーブルとの協調制御をおこなっているが、一軸テーブルのストロークが加工を安定に保つ意味で十分であり、その応答性も一軸テーブルに比べて十分速いものとして、ここではその動特性は無視している。

3. 加工制御系の安定性解析

速度ループを含めた電極駆動装置の動特性を次の二次系とみなして加工ループの安定性を解析する。

$$G_p(s) = \frac{(1/K)\omega_p^2}{s^2 + 2\zeta_p\omega_p s + \omega_p^2} \quad (1)$$

ここで、 $1/K$ は電極駆動装置の剛性、 ω_p は固有振動数、 ζ_p は減衰比である。

図2の加工制御系は駆動系の線形要素と放電加工現象の非線形要素からなるので、ここでは非線形制御理論における記述関数法を用いて解析する。

飽和要素の記述関数は次式で表される⁽³⁾。

$$N(A) = \frac{2k}{\pi} \left[\sin^{-1} \frac{a}{A} + \frac{a}{A} \sqrt{1 - \frac{a^2}{A^2}} \right] \quad (2)$$

ここで、 A は発振状態における正弦波振幅、 k は飽和要素における比例部分の傾き、 a は飽和要素の上限値である。

式(1)、(2)より、次式を満たすような ω が存在するとき、加工制御系は発振する。

$$\frac{K_e}{j\omega} \cdot \frac{(1/K)\omega_p^2}{s^2 + (2\zeta_p + K_e/K)\omega_p s + \omega_p^2} \cdot N(A) + 1 = 0 \quad (3)$$

ここで、 K_e は加工制御系の積分ゲインである。

式(3)が解を持つためには、少なくとも $\omega = \omega_p$ である必要があり、これが加工ループの発振周波数である。

なお、加工ループの発振状態における電極駆動装置の振動変位は $Z = A \sin \omega_p t$ である。

次に、加工制御系の安定条件を導く。 $\omega = \omega_p$ を式(3)に代入して、

$$\frac{2k}{\pi} \left[\sin^{-1} \frac{a}{A} + \frac{a}{A} \sqrt{1 - \frac{a^2}{A^2}} \right] = \frac{(2\zeta_p \omega_p + K_i / K) \omega_p}{K_n / K} \quad (4)$$

が得られる。式(4)の等式は、加工ループの発振条件であるから、この等式が成り立たないときに加工ループは安定である。このことから、加工ループの安定条件は、

$$\left| \frac{a}{A} \right| > 1, K_n < \frac{(2\zeta_p + K_i / K) \omega_p}{k / K} \quad (5)$$

となる。加工ループが安定であるためには上式のいずれかを満足すればよい。

式(5)において、第1式は極間平均電圧が線形な領域でワークと電極との距離を維持しつづけることを示しているが、実際の加工では加工くずなどの外乱が存在するため、放電位置を常に線形領域に維持するのは難しいことと、加工を安定に維持するには加工くずを排出するためにある程度の電極移動量が必要であることから、第2式が加工制御系の安定条件になる。この条件によれば、電極駆動装置の固有振動数と速度フィードバックゲインを大きくすることによって、安定な加工制御系が得られることを示している¹⁴⁾。

4. シミュレーションと実験による検証

電極駆動装置の力指令値から電極位置までの周波数伝達特性を図3に示す。実線が実験結果、破線がシミュレーション結果である。約180Hzの急峻なピークがあり、これが電極駆動装置の固有振動数である。

次に、電極位置の擬似微分による速度フィードバックを行ったときの力指令値から電極位置までの周波数伝達特性を図4に示す。実験とシミュレーションはよく一致しており、速度フィードバックによってゲインピークが抑制されていることが確認できる。なお、式(5)によれば、速度フィードバックゲインを大きくすれば加工ループの安定性は増すが、過剰な速度フィードバックは極間平均電圧指令への追従性を劣化させるとともに、センサーノイズによる速度フィードバックループの不安定をまねくため、ここでは系の減衰比が0.7なるように速度フィードバックゲインを設定した。

以上のように調整した電極駆動装置を図1の装置に組み込み、加工制御系の応答を確認した。加工制御器の積分ゲインを安定限界以上に大きくしたときの極間平均電圧と電極駆動装置の電極位置の時間波形を図5に示す。図の(a)がシミュレーション結果、図の(b)が実測結果である。シミュレーション結果と実測結果ともに、加工制御系の発振周波数は165Hzであり、図3の固有振動数とほぼ一致していることが確認できる。

最後に、 $\phi 0.1\text{mm}$ のタングステン電極を用いて、材質SKS11、板厚1mmの加工を行ったときの極間平均電圧の時間波形の実測結果を図6に示す。加工制御器の積分ゲインは、式(5)を満たす範囲で適当に調整した。一軸テーブルのみの場合に比べて、電極駆動装置は連続して安定な放電加工を維持できている。加工速度を測定すると、一軸テーブルのみのときの29秒に対して、電極駆動装置ありでは11秒と2倍以上高速化できることを確認した。

5. まとめ

本研究では、記述関数法を用いて加工ループの安定条件を明らかにし、シミュレーションと実験で検証した結果、理論と実験がよく一致することを確認した。次に、 $\phi 0.1\text{mm}$ のタングステン電極を用いて加工実験を行い、一軸テーブルのみに比べて、電極駆動装置ありでは2倍以上高速化できることを確認した。

参考文献

- (1)増沢他、電機加工学会誌、Vol.8、No.16、(1975)、43-52。
- (2)今井他、電機加工学会誌、Vol.27、No.55、(1993)、23-30。
- (3)J.E.Slotine et al., Applied Nonlinear Control, Prentice Hall.
- (4)今城他、機論、63-609、C(1997)、1476-1483。

図3 力指令値から電極位置までの周波数伝達特性

図4 速度フィードバック後の周波数伝達特性

図5 極間平均電圧と電極位置の時間波形

図6 加工中の極間平均電圧の時間波形