リニアパルスモータの動特性の改善と板金曲げ加工機の定寸装置への応用

正員 水野 勉 (アマダ)
 正員 山田 一 (信州大)
 正員 山本 栄 (アマダ)
 非会員 和多田 雅哉 (アマダ)
 非会員 張 玉琛 (アマダ)

1. ま え が き

定寸装置とは、板金曲げ加工機の一つであるプレスブレーキの後部に設置された材料位置決め用の定寸定規のことである。従来の定寸装置は、回転形サーボモータとボールねじによって構成されている。

定寸装置にリニアパルスモータ（以下、LPM と略記）を用いる利点としては、以下の事項が挙げられる⁽¹⁾⁽²⁾。

- (1) 直線運動が変換機構なしに直接得られる。
- (2) 機構が簡単で、部品点数も少なく信頼性が高い。
- (3) 推力/面積比が他のリニアモータに比べて大きいので、定寸装置の小型軽量化が可能である。これにより、プレスブレーキの機械的変形を小さくでき、高精度の曲げ加工ができる。
- (4) 閉ループ制御を行うことにより高応答速度、優れた加速特性と共に、高精度位置決めが可能である。

本論文は、定寸装置への LPM の応用を主眼として LPM を閉ループ制御し、動特性の改善および LPM 形定寸装置の特性について検討した結果を述べたものである⁽³⁾。

Improved Dynamic Characteristics of Linear Pulse Motor and Application to the Back Gauge of the Bending Machine. By Tsutomu Mizuno, Member (Amada Co., Ltd.), Hajime Yamada, Member (Shinshu University), Sigeru Yamamoto, Member, Masaya Watada, Non-member & Yuchen Chang, Non-member, (Amada Co., Ltd.).

水野 勉: 正員, (株)アマダ
 山田 一: 正員, 信州大学工学部
 山本 栄: 正員, (株)アマダ
 和多田雅哉: 非会員, (株)アマダ
 張 玉琛: 非会員, (株)アマダ

まず、LPM の構造および制御システムについて説明している。

次に、静推力 260 N の LPM 試作 1 号機において、永久磁石と励磁電流による磁束を測定し、渦電流およびヒステリシスによる影響を明らかにしている。そして、この結果に基づき、磁束の位相遅れを補償することで LPM の動特性が改善されることについて考察している。

最後に、静推力 120 N の LPM 試作 2 号機を定寸装置に応用し、作業者が被加工物を定寸装置に突当てたときの LPM の整定時間および変位を測定し、曲げ加工に与える有害な影響がないことを確認した。

2. LPM の構造と閉ループ制御

〈2・1〉 LPM の構造 α, β の二相からなるハイブリッド二相四極形 LPM の構造を図 1 に示す。同図中において、鉄心 α, β を非磁性材を挟んで左右に配

図 1 リニアパルスモータの構造

Fig. 1. Structure of the linear pulse motor.

表 1 LPM 試作 1号機の仕様
Table 1. Specifications of trial machine 1.

項 目	数 値
磁 極 ピ ッ チ τ (mm)	1.6
磁 極 断 面 積 A (mm ²)	2,990 (46×65)
ギャ ッ プ g (mm)	0.1
ス ト ロ ッ ク L_s (mm)	500
定 格 電 圧 V (V)	130
励 磁 電 流 I (A/相)	8
静 推 力 F (N)	260
一 次 側 材 質	電磁鋼板 (積層)
二 次 側 材 質	ケイ素鉄 (塊状)

表 2 LPM 試作 2号機の仕様
Table 2. Specifications of trial machine 2.

項 目	数 値
磁 極 ピ ッ チ τ (mm)	1.6
磁 極 断 面 積 A (mm ²)	1,368 (38×36)
ギャ ッ プ g (mm)	0.1
ス ト ロ ッ ク L_s (mm)	500
定 格 電 圧 V (V)	65
励 磁 電 流 I (A/相)	2.5
静 推 力 F (N)	120
一 次 側 材 質	電磁鋼板 (積層)
二 次 側 材 質	純 鉄 (塊状)

置し、その上部の2枚の永久磁石およびヨークにより磁気回路を構成している。鉄心 α, β は電気角 90 度ずれており、それぞれ電気角 180 度ずれた二つの極をもっている。また、各極には励磁コイルが巻かれている。更に、永久磁石による磁束の磁路を破線で、励磁電流による磁束の磁路を一点鎖線で示す。

表 1 に LPM 試作 1号機の仕様、表 2 に LPM 試作 2号機の仕様を示す。各試作機の磁極ピッチは 1.6 mm、ギャップは 0.1 mm である。また、一次側材質は電磁鋼板 (積層) である。更に、二次側材質は試作 1号機ではケイ素鉄 (塊状)、試作 2号機ではコストダウンのために純鉄 (塊状) を用いた。

一般に二次側材質も電磁鋼板 (積層) とすれば、渦電流による磁束の減少によって生ずる動推力の低下は軽減されると考えられるが、以下に述べる理由により、ケイ素鉄 (塊状) または純鉄 (塊状) を用いた。

(1) 図 1 に示した永久磁石による磁束の磁路と励磁電流による磁束の磁路が直交し、積層構造を採用するのが困難である。

(2) 加工、組立ておよび磁気吸引力による騒音の点で二次側が塊状構造のほうが有利である。

〈2・2〉 LPM の閉ループ制御 LPM は、回転形パルスモータと同様に閉ループ制御が可能であるため駆動回路がシンプルであり、またパルス入力のためコ

図 2 リニアパルスモータの制御ブロック図

Fig. 2. Control block diagram of the linear pulse motor.

ントロールシステムの構成も容易である。反面、急加減速、高速駆動時に脱調現象を生じやすい。マイクロステップ駆動によって、位置分解能を小さくできるが、停止精度がディテント力および機械加工精度などによるため問題点が多い。更に、本応用例の定寸装置に見られるような突当て動作が伴う曲げ加工においては、LPM に衝撃が加わるため開ループ制御だけでは対応には限界がある。

従って外乱に強く、高応答速度、優れた加速特性と共に高精度位置決めを可能とする閉ループ制御を採用した。

図 2 に、LPM の閉ループ制御回路ブロック図を示す。この制御系は位置サーボアンプ、速度サーボアンプ、LPM、回転形エンコーダより構成されている。なお、エンコーダは一次側可動子に取付けられており、これはラックとピニオン方式である。速度サーボアンプの主な構成要素は、速度アンプ、 F/V 変換器 (速度検出器)、電流パターンおよび位相補償回路、乗算器、電流アンプ、PWM 回路である。電流パターン発生部では、位置フィードバック信号により α, β 相の電流パターンを生成する。また位相補償回路は、後に述べる理由により LPM の速度に従って、電流パターンの位相を進めている。

次に、閉ループ制御方法について説明する。ハイブリッド形 LPM の一相励磁における α 相の静推力 F_α は、パーミアンス法によって得られた磁気随伴エネルギーを変位で微分することで求められる。そして、永久磁石の作る磁束の変化を正弦波と仮定すると次式で与えられる⁽⁴⁾。

$$F_\alpha = -\frac{2\pi N \Delta \Phi_m I_\alpha \sin \frac{2\pi}{\tau} x}{\tau}$$

$$= -K_f I_\alpha \sin \frac{2\pi}{\tau} x \text{ (N)} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 N : コイル巻数 (回/相), $\Delta\Phi_m$: 永久磁石による磁束の振幅 (Wb), τ : 磁極ピッチ (m), I_α : α 相の励磁電流 (A), x : 変位 (m), K_f : 推力定数 (N/A) ($=2\pi N\Delta\Phi_m/\tau$)
 β 相の静推力 F_β は, α 相と β 相の位相差を考慮して次式となる。

$$F_\beta = F_\alpha(x - \tau/4) \\ = -K_f I_\beta \cos \frac{2\pi}{\tau} x \quad (\text{N}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 I_β : β 相の励磁電流 (A)

更に、図2の制御ブロック図で示したように、推力指令 F_c (V) と α, β 相の電流パターン $-E \sin(2\pi x/\tau)$, $-E \cos(2\pi x/\tau)$ (V) を乗算し、この値に比例した励磁電流 I_α, I_β を流すと

$$I_\alpha = -K F_c E \sin \frac{2\pi}{\tau} x \quad (\text{A}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$I_\beta = -K F_c E \cos \frac{2\pi}{\tau} x \quad (\text{A}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 K : 比例定数 ($\text{A} \cdot \text{V}^{-2}$)

(1)~(4)式より次式に示す静推力を得る。

$$F = F_\alpha + F_\beta = K_f E K F_c \quad (\text{N}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

上式は推力リップルがなく、また推力が推力指令に比例しているため、サーボモータに適していることを示している。しかし、実際にはギャップ部のパーミアンスの高調波成分の存在および歯部の磁気飽和などの磁気的要因、加工および組立て精度などの機械的要因によってディテント力、推力リップルが生ずる。更に、摩擦力などの非線形要素も加わるが、図2に示したように閉ループ系を構成し、十分なフィードバックゲインを与えることで高精度位置決めを可能とした。

次に、 α 相の速度起電力 V_α は次式で示される⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

$$V_\alpha = -K_f \sin \left(\frac{2\pi}{\tau} x \right) \frac{dx}{dt} \quad (\text{V}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

上式は LPM を等速運動させた場合、速度起電力が静推力特性から求めた推力定数 K_f より算出できることを示している。

3. LPM の動特性の改善

本章では、試作1号機において永久磁石と励磁電流による磁束を測定し、渦電流およびヒステリシスによる影響を明らかにしている。そして、この結果に基づき磁束の位相遅れを補償することで、LPM の動特性が改善されることを示す。

〈3・1〉 試作1号機の静推力および磁気特性

試作1号機の静推力-励磁電流特性を図3に示す。同図は、一相励磁、変位 $\tau/4$ における特性で、励磁電

図3 試作1号機の静推力-励磁電流特性
 Fig. 3. Static thrust vs. exciting current characteristics of trial machine 1 by one phase excitation.

図4 試作1号機における速度起電力-周波数特性

Fig. 4. EMF vs. frequency characteristics by trial machine 1.

流 4 A 程度から静推力に飽和傾向が認められ、8 A で 260 N を示している。また同図中で、破線で示した静推力の計算値は(1)式により求めた。なお、パーミアンス法で $\Delta\Phi_m$ を求めるときに補正係数(経験値)を用いているために、電流値が小さな領域で計算値は実測値よりも小さな値を示している。

図4に試作1号機における速度起電力の周波数依存性を示す。可動子を一定速度で移動させ、励磁コイルが発生する速度起電力、および図2の制御ブロック図で示した電流パターンに対する速度起電力の位相を測

定した。なお、測定時には電流パターンの位相補償は行っていない。同図では横軸に周波数 f をとっているが、速度 v と f との関係には $v = f\tau$ (τ : 磁極ピッチ) の関係がある。同図中で破線で示した速度起電力の計算値は、図 3 に示した静推力特性の実測値より推力定数 K_f を求め、(6) 式により計算した。また位相の計算値は、(6) 式において dx/dt が正值をとる場合、 α 相の電流パターン $-E \sin(2\pi x/\tau)$ と速度起電力の位相差がないことから求めた。

図 4 の速度起電力の実測値は、鉄心内の渦電流による影響で低周波から計算値より小さな値を示している。また、位相の実測値が低周波においても 0° をとらないのは、エンコーダと LPM との機械的取付け誤差によるものであり、このことを考慮すると鉄心内の渦電流およびヒステリシスによる位相遅れは 830 Hz で約 5° であることがわかる。

次に、励磁電流に対する励磁電流の作る磁束の周波数特性を測定し、その結果を図 5 に示す。同図は、励磁電流の振幅 1 A で、一次側可動子の極の先端に巻き付けた探りコイルの誘導起電力の基本波成分の振幅および励磁電流に対する位相を、FFT アナライザを用いて測定したものである。また、一次側可動子を二次側固定子に機械的に固定して測定した。同図中において、破線で示した誘導起電力 E_0 と位相 θ の計算値は、探りコイルを用いて直流磁気特性を測定し、励磁電流 1 A における磁束密度より次式で求めた。

$$E_0 = 2\pi f N_s B A \text{ (V)} \dots\dots\dots (7)$$

$$\theta = 90^\circ \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 f : 周波数 (Hz), N_s : 探りコイルの巻数 (回), B : 直流電流 1 A における磁束密

図 5 周波数の磁束への影響

Fig. 5. Effects of frequency on magnetic flux.

度 (T), A : 磁極の断面積 (m^2)

図 5 によれば、低周波領域より誘導起電力の実測値は、計算値より小さな値を示している。また、周波数 500 Hz において位相の実測値は 50° を示しており、これより磁束は励磁電流に対して 40° 遅れていることがわかる。更に、これ以下の周波数においても磁束は 25° 以上の位相遅れがあることが了解される。

〈3・2〉 サーボアンプの特性

図 6 にサーボアンプの周波数特性を示す。本特性は、一次側可動子を機械的に二次側固定子に固定し、電流指令に対する励磁電流の伝達特性を FFT アナライザを用いて測定したものである。同図から、500 Hz 程度 (一次側可動子の移動速度 0.8 m/s に相当) までゲインおよび位相が平坦な特性であることがわかる。

次に、速度起電力が励磁電流に与える影響を確認するために LPM を駆動させ、電流指令電圧および励磁電流を測定し図 7 に示す。同図は、周波数約 480 Hz (移動速度 0.77 m/s) における特性で、FFT アナライザの解析によれば電流指令電圧に対する励磁電流の基本波成分の位相遅れは 8° で、また励磁電流の減少も認められなかった。

以上より、サーボアンプの特性として 500 Hz 程度 (移動速度 0.8 m/s) まで電流指令に対する励磁電流の減少は少なく、位相遅れも 10° 以内であることが確認された。

図 6 サーボアンプの周波数特性

Fig. 6. Frequency characteristics of servo amplifier.

図 7 励磁電流の波形

Fig. 7. Waveforms of exciting current.

(3.3) 位相補償による加速特性の改善 永久磁石による磁束、励磁電流による磁束およびサーボアンプの周波数依存性について測定し、特に励磁電流に対してこれが作る磁束の位相遅れが顕著であることが確認された。この磁束の位相遅れに着目し、これを補償することによって動推力の減少を抑え加速特性の改善を行った。

LPM の動特性の一つに動推力がある。その測定方法として、LPM の可動子とばねを接続し、ばねを引っ張る方向に運動させ、LPM が脱調する寸前の推力をロードセルで測定する方法がある⁽⁶⁾。

板金機械に LPM を応用する場合には、高加速度かつ高速移動を要求される。また、前述の動推力の測定方法では、負荷イナーシャの影響を受けやすい問題点がある。

従って、以下に述べる方法により LPM の加速特性を測定した。図 2 に示した制御ブロック図において、ステップ状の推力指令電圧を与え、光学式変位計により可動子の変位を測定し、時間微分することにより加速特性を求めた。

図 8 に試作 1 号機の加速特性を示す。(a) 図は一定の位相進み角を与えた場合の加速特性であり、(b) 図は位相進み角を速度に比例して与えた場合である。なお、位相進み角は図 2 に示した制御ブロック図の位相補償回路にて設定した。同図は位相補償を行うことにより加速特性が改善されるばかりでなく、移動速度が増加することを示している。図 8 (b) において、0.8 m/s まで加速するのに要する時間は、位相進み角 0° (s/m) で 530 ms、位相進み角 84° (s/m) で 310 ms と 58% に減少している。また、速度 0.3 m/s までは位相進み角によらず一定の加速特性を有するが、高速になるに従って位相補償の効果が現れている。更に、進み角に対して加速特性に飽和傾向があることを示している。

以上に示した加速特性の改善は、前述した磁気特性およびサーボアンプの特性より、主として励磁電流による磁束の遅れを補償したためと考えられる。

4. 板金曲げ加工機の定寸装置への応用

本章では、前章で示した位相補償による加速特性の改善に基づいて、静推力 120 N の LPM 試作 2 号機を定寸装置へ応用した結果について述べる。

(4.1) LPM を用いた定寸装置の構造 プレスブレーキの後部に設置された定寸装置を用いた板金曲げ加工の概念図を図 9 に示す。同図中において、作業者が定寸装置に被加工物（板材）を突当て、ダイを上昇させて板金の曲げ作業を行う。

(a) 一定の位相進み角を与えた場合

(b) 位相進み角を速度に比例して与えた場合

図 8 試作 1 号機の加速特性

Fig. 8. Acceleration characteristics of trial machine 1.

LPM を用いたプレスブレーキを図 10 に示す。前面に見えるダイの後部に LPM 形定寸装置が設置されている。

図 11 は LPM 形定寸装置の構造を示したものである。一次側可動子のアルミニウム製フレームにストレッチャが取付けられており、作業者は突当てに被加工物を突当ててことで曲げ寸法を得る。位置検出は、一次側可動子に取付けられたエンコーダにより行っている。二次側可動子の側面にラックが取付けられており、エンコーダのシャフトに取付けられたピニオンをラックに適正な力によって押し付けることで、バックラッシュを軽減する構造となっている。

(4.2) 静推力特性 図 12 に一相励磁における

図 9 プレスブレーキによる板金曲げ加工の概念図

Fig. 9. Concept of bending by a press brake.

図 10 リニアパルスモータを用いたプレスブレーキ

Fig. 10. A press brake with the linear pulse motor.

静推力 - 励磁電流特性を示す。同図中で、破線で示した計算値は(1)式によって求めた。実測値は励磁電流 1A 程度から飽和傾向を示し、励磁電流 2.5 A において 120 N であることがわかる。

推力指令電圧をパラメータとして実測した静推力特性を図 13 に示す。同図において、推力指令電圧が大きくなるに従って推力リプルが大きくなる傾向を示しているが、これは歯部での磁気飽和に起因している。

更に、5 N のディテント力および 10 N の摩擦力が認められたが、閉ループサーボゲインを高めることで位置決め精度の低下を防いでいる。

〈4.3〉 動特性 動特性の評価として、積載質量に対する加速特性を測定した。図 14 に示すような台形駆動を行い、最高速度 v_m まで加速するのに要する時間(以下、加速時間と呼ぶ)を積載質量に対して測定

図 11 リニアパルスモータを用いた定寸装置の構造

Fig. 11. Structure of a back gauge with the linear pulse motor.

図 12 試作 2 号機の静推力 - 励磁電流特性

Fig. 12. Static thrust vs. exciting current characteristics of trial machine 2 by one phase excitation.

図 13 試作 2 号機の静推力 - 変位特性

Fig. 13. Static thrust vs. displacement characteristics of trial machine 2.

図 14 リニアパルスモータの速度パターン

Fig. 14. A speed pattern of the linear pulse motor.

図 15 加速時間 - 積載質量特性

Fig. 15. Acceleration time vs. load characteristics.

した。その結果を速度をパラメータとして図 15 に示す。同図は、速度 0.17 m/s と 0.33 m/s において、加速時間が積載質量に比例していることを示している。しかし、速度 0.5 m/s においては、積載質量に対して比例関係とはならず、加速時間が増加することを示している。これは、高速移動時に動推力が低下するためである。

リニアパルスモータの応用例として、衝撃力などの外力が働く装置への応用は、著者が知る限りにおいてまだないと思われる。曲げ加工においては、作業者が定寸装置に被加工物を突当ててことで目的の曲げ寸法を得る。従って、LPM 形定寸装置には十分な剛性と共に、衝撃に対して LPM の可動子の変位が曲げ加工に十分な時間内で整定することが要求される。

また、曲げ加工時の衝撃について定量的に測定された例はないようであるが、作業者によってその値は大幅に変化し数百～数千 N にもなる。

回転形モータとボールねじを用いた従来の定寸装置においては、突当て部で数千 N 以上の力を発生させることができる。しかし LPM 形定寸装置では、ダイレ

図 16 衝撃によるリニアパルスモータの応答

Fig. 16. Response of displacement by attack force.

表 3 LPM 形定寸装置の仕様

Table 3. Specifications of a back gauge with the linear pulse motor.

項 目	数 値
ストローク	L_s (mm) 500
最大速度	v_m (m/s) 0.5
加速時間	t_a (ms) 350
位置決め精度	ϵ_1 (μ m) 70
繰返し位置決め精度	ϵ_2 (μ m) ± 20
全質量	M_1 (kg) 80
可動部質量	M_2 (kg) 30

クトドライブであるため LPM の推力がそのまま突当て部で発生し得る力となる。この点が、従来の定寸装置と大きく異なる点である。

そこで、定寸装置に被加工物を突当て、LPM の変位の整定時間を光学式変位計を用いて測定した。その測定結果を図 16 に示す。同図は、被加工物の質量 16.5 kg、板寸法 540×980×4 mm の SUS 材を、曲げ加工に熟練した作業者が突当てたときの変位特性である。また、同図は最大変位が 1.05 mm で、整定時間 270 ms であることを示している。

更に、作業者および被加工物を変えた場合についてもそれぞれ測定したが、最大変位 1.1 mm、整定時間も 500 ms 以内であった。板を突当てたときからダイが上昇し、曲げ加工を行うまでの時間は約 2 秒である。従って、衝撃が曲げ加工に及ぼす影響は極めて小さく、実用上問題がないと考えられる。

表 3 に、LPM 形定寸装置の仕様を示す。従来機に比べて最大速度 0.5 m/s、繰返し位置決め精度 $\pm 20 \mu$ m と高速・高精度の位置決めが可能となったうえ、全質量も約 10% の軽量化となった。

5. あとがき

本論文では、LPM の加速特性の改善および LPM 形定寸装置の検討を行い、以下の結果を得た。

(1) 試作1号機において、永久磁石および励磁電流による磁束を測定し、特に励磁電流による磁束の位相遅れが顕著で、 25° 以上あることがわかった。

(2) 上記の位相遅れを補償するために励磁電流の位相補償を行った。これにより加速特性および最高速度が改善され、 0.8 m/s までの加速時間が位相補償を行わない場合と比較し58%に減少することを示した。

(3) LPM 形定寸装置において、衝撃が加わったときのLPMの応答を実測し、曲げ加工に与える影響が極めて小さく、実用上問題がないことを示した。

最後に、本研究に対し熱心な討論をいただいた電気学会リニア電磁駆動システム調査専門委員会(委員長、東京大学工学部 正田英介教授)の各委員、御支援と御助言を賜りました、アマダメトロックス 松本部

長、ならびに御協力いただいた多数の方々に深く感謝いたします。

(昭和62年11月2日受付, 同63年5月10日再受付)

文 献

- (1) 山田編著: リニアモータ応用ハンドブック (昭 61) 工業調査会
- (2) 和多田・水野・張: 「プレスブレーキ用バックゲージへのリニアモータの応用」, 精密工学会秋季大会先端技術紹介セッション (昭 62)
- (3) 水野・山田・山本・和多田・張: 「定寸装置用リニアパルスモータ」, 電気学会マグネテックス研資, MAG-87-145 (昭 62)
- (4) 山本・山田: 「平板状永久磁石形リニアパルスモータの磁気回路と始動特性解析」, 電学論B, 104, 265 (昭 59-5)
- (5) 横塚・馬場・斎藤・室伏: 「LPMの速度起電力定数に関する一考察」, 同上D, 107, 642 (昭 62-5)
- (6) 磁気アクチュエータ専門委員会編: リニアモータとその応用, p. 116 (昭 59) 電気学会