磁石可動形リニア直流モータの機械的時定数についての検討

Considerations on the Mechanical Time Constant of a Moving-Magnet-Type Linear Dc Motor

水野 勉・七原正輝・小山勝巳*・安西哲也*・脇若弘之・山田 一

信州大学工学部, 長野市若里 500 (☎380-8553)

*(株)アマダエンジニアリングセンター, 伊勢原市石田 350 (☎259-1196)

T. Mizuno, M. Nanahara, K. Koyama,* T. Anzai,* H. Wakiwaka, and H. Yamada

Faculty of Engineering, Shinshu University, 500 Wakasato, Nagano 380-8553

*Amada Engineering Center Co., Ltd., 350 Ishida, Isehara 259-1196

High-speed and high-precision hydraulic valves are required in industry. The authors have developed a linear servo valve (LSV) with a linear dc motor (LDM). This paper describes methods for designing the magnetic circuit, and for optimizing the mechanical time constant, of a moving-magnet-type LDM. The following results were obtained:

(1) The expression for the mechanical time constant of the LDM is derived by using the permeance analysis method. The proposed structure of the LDM, which has a minimum mechanical time constant, is obtained by using the permeance analysis method and the finite element method (FEM).

(2) The static thrust of the LDM is calculated also by the permeance analysis method and the FEM. The calculated values of the thrust constant are 61.3 N/A and 62.8 N/A, respectively. The measured value of the thrust constant is 60.7 N/A.

(3) The measured and calculated values of the mechanical time constant obtained by the permeance analysis method, and the values calculated by the FEM, are 1.7 ms, 1.6 ms, and 1.5 ms, respectively.

Key words: moving-magnet-type linear dc motor, mechanical time constant, motor constant, thrust constant

1. ま え が き

板金機械のプレスやプレスブレーキなどの加工軸には、油圧駆動が多く用いられている。油圧駆動は電動機と比較して、大きな推力を容易に発生でき、かつ力制御や速度・位置制御も比較的簡単にできるためである。現在、この油圧駆動システムにはコイル可動形リニア直流モータを用いた高応答油圧サーボバルブ（以下、リニアサーボバルブ、LSV と略記）が開発され、すでに実用化されている。

一般に、コイル可動形 LDM は可動子の質量が小さいため、高応答を実現しやすい。しかし、発生推力を大きくするためには、永久磁石を多量に使う必要があり、コスト高となる。そこで、筆者らは永久磁石の使用量が少なくても良い磁石可動形 LDM の開発を行ってきた¹⁾。永久磁石可動形 LDM の欠点として、コイル可動形 LDM と比較して機械的時定数が大きくなる傾向にある。油圧サーボバルブに用いる円筒状磁石可動形リニア直流モータの高応答化を実現するためには、電気的時定数と機械的時定数を低減する必要がある²⁾。LDM における電気

的時定数および機械的時定数は巻線抵抗 R 、インダクタンス L 、可動子質量 m 、推力定数 K_f （逆起電力定数）を用いて表した指標であり、他の LDM との特性比較をすることができるばかりでなく、回転形モータとの比較を行うこともでき、実用上重要な特性値の一つである。

本論文では、外径寸法が与えられた場合の LDM の機械的時定数の低減に主眼をおき、最大推力 400 N 以上、ストローク 15 mm で高応答な LDM の構造について検討した以下の事項について述べている。

- 1) LDM の機械的時定数の表現式の導出
- 2) 機械的時定数を最小とする LDM の構造の検討
- 3) 機械的時定数の計算値との比較

2. 機械的時定数の表現式とヨーク寸法の最適化

2.1 磁石可動形 LDM の解析モデル

Fig. 1 は油圧サーボ弁に用いる円筒状磁石可動形 LDM の解析モデルである。LDM の外形寸法は $\square 78 \times 150$ mm、固定子と可動子には共に S10C（機械構造用炭素鋼）の使用を想定し、可動子ロッドには永久磁石を配置する。また、4つのコイルは直列に接続を行う。

2.2 機械的時定数の表現式の導出

等価磁気回路法は有限要素法や境界要素法などと比較して簡素であり、かつ有効である³⁾。ここではパーミアンス法を用い

Fig. 1 Analytical model of a moving-magnet-type LDM (unit: mm).

Fig. 2 Magnetic equivalent circuit of a cylindrical moving-magnet-type LDM.

た LDM の磁気回路解析について述べる。LDM の磁気回路解析にあたり、以下の仮定を設ける。

- (1) 一次側および二次側の端部からの漏れ磁束は無視する(極数無限大の LDM として磁気回路の設計を行う)。
- (2) 一次側および二次側の磁性材料の透磁率は無限大とし、この部分の磁気抵抗は考慮しない。
- (3) 外形寸法を $\phi 78 \times 150$ mm の円筒状とする。

上記の仮定に基づき磁石可動形 LDM の磁気等価回路は、永久磁石 1 極分を考慮して Fig. 2 のようになる。同図において F_m は永久磁石の起磁力、 R_m は永久磁石の内部磁気抵抗、 R_g はギャップの磁気抵抗、および Φ_m は永久磁石の磁束である。

本 LDM に関して下式が成立する⁴⁾。

$$F_m = H_c h_m \quad [\text{A}] \quad (1)$$

$$R_m = \frac{\ln[(r_r + h_m)/r_r]}{2\pi\mu_0 w} \quad [\text{H}^{-1}] \quad (2)$$

$$R_g = \frac{\ln[(r_r + h_m + k_c \delta)/(r_r + h_m)]}{2\pi\mu_0 w} \quad [\text{H}^{-1}] \quad (3)$$

$$k_c = \frac{\tau_s}{\tau_s - \gamma_c s} \quad (4)$$

$$\gamma_c = \frac{(s/\delta)^2}{5 + s/\delta} \quad (5)$$

ここに、 H_c : 永久磁石の保磁力 [A/m]、 h_m : 永久磁石の厚さ [m]、 r_r : ロッドの半径 [m]、 μ_0 : 真空の透磁率 [H/m]、 w : 永久磁石の幅 [m]、 k_c : カータ係数、 τ_s : スロットピッチ [m]、 s : スロット幅 [m]、 δ : ギャップの長さ [m]

式(1)~(5)を用いて永久磁石 1 極当たりの磁束 Φ_m は次式で求められる。

$$\Phi_m = F_m / (R_m + R_g) \quad [\text{Wb}] \quad (6)$$

コイルの巻線スペースの断面積 A_c は下式で求めることができる。

$$A_c = (h_c - 2d_b)(W_c - 2d_b) \quad [\text{m}^2] \quad (7)$$

ここに、 d_b : コイルボbinの厚さ [m]

したがって、1 スロット当たりのコイルの巻数 n は、直径 d [m] の巻線を巻くとすると次式となる。

$$n = \text{INT} \left\{ \zeta \frac{A_c}{\pi(d/2)^2} \right\} \quad [\text{回}] \quad (8)$$

ここに、 ζ : コイルの占積率、 $\text{INT}(x)$: x の小数点以下を切り捨てる関数

また、1 巻当たりの巻線の平均長さ l_c は下式となる。

$$l_c = 2\pi(r - h_y - h_c/2) \quad [\text{m}] \quad (9)$$

さらに、すべてのコイルを直列に接続した場合の巻線抵抗 R は、次式で求められる。

$$R = \frac{\zeta l_c A_c p}{\sigma \pi^2 (d/2)^4} \quad [\Omega] \quad (10)$$

ここに、 σ : 巻線(銅)の導電率 [S/m]、 p : 極数 [極]
ギャップの磁束密度の平均値 B は下式となる。

$$B = \frac{\Phi_m}{2\pi(r_r + h_m + \delta/2)\tau} \quad [\text{T}] \quad (11)$$

ここに、 τ : 磁極ピッチ [m]

さらに BIL 則を適用すると 1 極当たりの静推力 F_1 は次式となる。

$$F_1 = nBIL_c \quad [\text{N}] \quad (12)$$

ここに、 L_c : BIL 則を適用する位置での巻線の等価長さ
($= 2\pi(r_r + h_m + \delta/2)$) [m]

Fig. 1 に示したように可動子のロッドの両端には、磁石の幅 $w/2$ の永久磁石を設けてある。この両端の永久磁石による磁束も推力の発生に寄与する。前述のように両端の磁石の幅は $w/2$ であり、両者を合わせて 1 極分の磁束を発生している。したがって、LDM の静推力は次式となる。

$$F_x = \frac{\Phi_m}{\tau} (p+1)nI \quad [\text{N}] \quad (13)$$

推力定数 K_f は次式となる。

$$K_f = \frac{\Phi_m}{\tau} (p+1)n \quad [\text{N/A}] \quad (14)$$

可動部の質量 m は、ロッドの質量 m_r と永久磁石の質量 m_m との和であり、それぞれ下式で表される。

$$m = m_r + m_m \quad [\text{kg}] \quad (15)$$

$$m_r = \pi r_r^2 \tau \rho_r (p+1) \quad [\text{kg}] \quad (16)$$

$$m_m = \pi[(r_r + h_m)^2 - r_r^2] w \rho_m (p+1) \quad [\text{kg}] \quad (17)$$

ここに、 ρ_r : ロッドの質量密度 [kg/m³]、 ρ_m : 永久磁石の質量密度 [kg/m³]

機械的時定数 T_m およびモータ定数 K_m は式(10)、(14)、(15)を用いて下式となる。

$$\begin{aligned} T_m &= \frac{mR}{K_f^2} = \frac{ml_c p \tau^2}{\zeta \sigma A_c (p+1)^2 \Phi_m^2} \\ &= \frac{ml_c p}{4\pi^2 \zeta \sigma A_c (p+1)^2 (r_r + h_m + \delta/2)^2 B^2} \quad [\text{s}] \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} K_m &= \frac{K_f}{\sqrt{R}} \\ &= \frac{\Phi_m}{\tau} \sqrt{\frac{\sigma \zeta A_c (p+1)^2}{l_c p}} \quad [\text{N}/\sqrt{\text{W}}] \end{aligned} \quad (19)$$

上式の機械的時定数 T_m とモータ定数 K_m とは次式に示す関係があり、この関係は回転モータにおいても成立している⁵⁾。

$$K_m^2 = m/T_m \quad [\text{N}^2/\text{W}] \quad (20)$$

2.3 ヨーク寸法の最適化

ロッドの断面積 A_r 、歯部の断面積 A_t 、およびヨークの磁路断面積 A_y は次式となる。

$$A_r = \pi r_r^2 \quad [\text{m}^2] \quad (21)$$

$$A_t = 2\pi(r_r + h_m + \delta + h_t)W_t \quad [\text{m}^2] \quad (22)$$

$$A_y = \pi r^2 - \pi(r - h_y)^2 \quad [\text{m}^2] \quad (23)$$

ここに、 h_t : 歯の高さ [m]、 W_t : 歯の幅、 r : LDM の外形半径 [m]、 h_y : ヨークの高さ [m]

永久磁石の磁束によるロッド、歯、およびヨークの磁束密度を

それぞれ B_{rod} , B_t , B_y とする。各ヨークの磁束密度が一致する場合に LDM は最適設計であると考えられるため、それらの値を B_p とすると下式が成立する。

$$B_{rod} = \frac{\Phi_m}{2A_r} = B_p \quad [T] \quad (24)$$

$$B_t = \frac{\Phi_m}{A_t} = B_p \quad [T] \quad (25)$$

$$B_y = \frac{\Phi_m}{2A_y} = B_p \quad [T] \quad (26)$$

式 (7)~(12) から歯の幅 W_t およびヨークの高さ h_y は次式で表すことができる。

$$W_t = \frac{\Phi_m}{2\pi B_p(r + h_m + \delta + h_t)} \quad [m] \quad (27)$$

$$h_y = r - \sqrt{r^2 - \frac{\Phi_m}{2\pi B_p}} \quad [m] \quad (28)$$

さらに、コイルの高さ h_c とコイルの幅 W_c は下式となる。

$$h_c = r - (h_y + h_t + \delta + h_m + r_t) \quad [m] \quad (29)$$

$$W_c = \tau_s - W_t \quad [m] \quad (30)$$

式 (1)~(30) を用いて LDM の概略設計を行うことができる。計算の手順は以下のとおりである。

- 1) 材料特性, LDM の外径半径 r , 磁極 (ポール) ピッチ τ などを設定
- 2) 永久磁石の厚さ h_m を入力
- 3) ロッドの磁束密度が B_p となるようにロッドの半径 r_t を算出
- 4) 歯の幅 W_t , ヨークの高さ h_y を計算
- 5) 機械的時定数 T_m などの特性値の算定

3. 機械的時定数の計算結果

3.1 磁極ピッチの検討

本間らの試作結果 (磁石の幅と磁極のピッチとの比: $w/\tau = 0.8$) によれば, ストローク L_s 全域において平坦な推力分布を得るためには, 下式を満足する必要がある⁶⁾。

$$\tau \geq 1.6L_s \quad [m] \quad (31)$$

ここに, τ : 磁極ピッチ [m]

上式から, $L_s = 15$ mm の場合, 磁極ピッチは $\tau = 24$ mm 以上となる。したがって, 以下の条件で LDM の特性を求めることにする。

$$\tau_s = \tau \quad [m] \quad (32)$$

$$w/\tau = 0.8 \quad (33)$$

ここに, τ_s : スロットピッチ [m], w : 永久磁石の幅 [m]

3.2 機械的時定数の計算

Table 1 に LDM の特性計算に用いた設計パラメータを示した。 B_p は永久磁石によるヨーク, ロッド, および歯の磁束密度の設定値であり, 計算においては $B_p = 1.2$ T に設定した。

Fig. 3 は LDM の機械的時定数 T_m の特性の計算結果である。永久磁石の厚さ h_m および磁極ピッチ τ が大きくなるに従って, 機械的時定数も増大することを示している。この原因は, h_m および τ が大きくなると式 (18) に示したように, 可動部の質量が増大, 巻線スペースの断面積 A_c が減少して, その結果機械的時定数 T_m が大きくなるためであると考えられる。

Table 1 Design parameters used for calculation of the LDM

Item	Symbol	Value	[unit]
Flux density at operating point	B_p	1.2	[T]
Space factor	ζ	0.7	
Density of magnet	ρ_m	7400	[kg/m ³]
Density of rod	ρ_r	7900	[kg/m ³]
Permeability of vacuum	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$	[H/m]
Electric conductivity of copper wire	σ	5.63×10^7	[S/m]

Fig. 3 Calculated results of the characteristics of the LDM vs. the thickness of the magnet.

永久磁石の厚さが 2 mm 以下の場合, LDM の駆動時に減磁のおそれがある。したがって永久磁石の厚さ $h_m = 3$ mm, ポールピッチ $\tau = 24$ mm, の場合のとき機械的時定数が最小となる。

4. 試作機の静推力特性と機械的時定数

4.1 試作機の構造

Fig. 4 に LDM の試作機の構造, Table 2 にその仕様を示した。LDM の外形寸法は $\square 78 \times 150$ mm であり, ヨークおよびロッドには構造用炭素鋼 (S10C) を用いた。S10C の飽和磁束密度は 1.6 T である。ロッドの表面には総質量 215 g の Nd-Fe-B 系永久磁石が接着してある。また, 定格ストロークは ± 7.5 mm である。

4.2 静推力特性と機械的時定数

Fig. 5 は変位 $x = 0$ mm における LDM の静推力-励磁電流

Fig. 4 Structure of an LDM designed by the permeance analysis method (unit: mm).

Table 2 Basic specifications of the moving-magnet-type LDM

Item		Symbol	Value	[Unit]
Mover	Number of poles	p	4	poles
	Pole pitch	τ	24	[mm]
	Thickness of magnet	h_m	3	[mm]
	Width of magnet	w	19.2	[mm]
	Materials	Permanent magnet	Nd-Fe-B alloy $-H_c: 903$ [kA/m], $B_r: 1.17$ [T] $(BH)_{\max}: 263$ [kJ/m ³]	
		Rod	Carbon steel (S10C)	
	Rated stroke	L_s	± 7.5	[mm]
Stator	Mass	m	1097	[g]
	Number of slots	N_s	4	slots
	Number of turns per slot	n	156	turns
	Slot pitch	τ_s	24	[mm]
	Slot width	s	3	[mm]
	Material		Carbon steel (S10C)	
Length of air gap		δ	0.5	[mm]

Fig. 5 Static thrust, F_x , vs. exciting current, I , characteristics of the LDM ($x=0$ mm).

Table 3 Measured and calculated results for the resistance, thrust constant, and mechanical time constant

Item	Symbol [unit]	Measured Value	Calculated Values	
			Permeance method	FEM
Resistance	R [Ω]	5.7	5.5	
Thrust constant	K_f [N/A]	60.7	61.3	62.8
Mass of mover	m [g]	1097	1097	
Mechanical time constant	T_m [ms]	1.7	1.6	1.5

特性である。推力は励磁電流に比例しており、実測、パーミアンス法、およびFEMによって得られた推力定数はそれぞれ60.7 N/A, 61.3 N/A, および62.8 N/Aとなった。実測値に対してパーミアンス法およびFEMでの計算値は誤差、1.0% および3.5%であった。また、機械的時定数の実測値は1.7 msであり、パーミアンス法およびFEMによる計算値はそれぞれ1.6 ms および1.5 msであったことから、実測値に対して計算値はそれぞれ誤差6% および12%であった。Table 2 に諸定数の実測値と計算値をまとめた。

5. あとがき

磁石可動形 LDM について、パーミアンス法を用いた磁気回路解析を行い LDM の設計仕様を決定し、有限要素法を用いて解析を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 磁石可動形 LDM の機械的時定数の表現式となる式 (18) を導出した。この表現式は簡便であり、物理的意味を把握できるので有用である。
- (2) LDM の外形寸法 ($\square 78 \times 150$ mm) が一定の条件のもとで、磁極ピッチ τ と永久磁石の厚さ h_m が機械的時定数に与える影響について検討した結果、 $\tau = 24$ mm, $h_m = 3$ mm の場合に機械的時定数が 1.6 ms と最小になること示した。
- (3) 機械的時定数の実測値 1.7 ms に対してパーミアンス法および有限要素法による計算値は、それぞれ、1.6 ms および 1.5 ms であり、計算誤差はそれぞれ 6% および 12% であった。

謝 辞 本研究の一部は(財)天田金属加工機械技術振興財団の研究助成により行われた。

文 献

- 1) 水野 勉, 安西哲也, 北村利光, 中村 明, 宮下利人, 山田 一: 日本応用磁気学会誌, **21**, 837 (1997).
- 2) 山田 一: リニアモータとその応用, p. 43 (工業調査会, 1981).
- 3) S. A. Nasar and C. Chen: *Electric Machines and Power System*, **13**, 361 (1987).
- 4) 水野 勉, 七原正輝, 小山勝巳, 安西哲也, 脇若弘之, 山田 一: 電気学会リニアドライブ研究会資料, **LD-97-52**, 39 (1997).
- 5) 長坂長彦: 電気学会誌, **110**, 195 (1990).
- 6) 本間一隆, 渡辺利彦: 電気学会リニアドライブ研究会資料, **LD-92-46**, 11 (1992).

1997 年 10 月 27 日受理, 1998 年 2 月 2 日採録