パラメトリックリニアモータの設計に関する考察

Considerations on the Design of Parametric Linear Motors

古川 崇・津久井智尚*・一ノ倉 理・菊地新喜**・村上孝一

東北大学工学部, 仙台市荒巻字青葉 (〒980)

*現 パイオニア(株), 所沢市花園 4-2610 (〒359)

**東北学院大学工学部, 多賀城市中央 1-13-1 (〒985)

T. Furukawa, T. Tsukui*, O. Ichinokura, S. Kikuchi** and K. Murakami

Dept. of Electrical Engng., Tohoku Univ., Aoba, Aramaki, Sendai, 980

*Presently Pioneer Electric Corp., 4-2610, Hanazono, Tokorozawa, 359

**Dept. of Electrical Engng., Tohoku Gakuin Univ., Chuo 1-chome, Tagajo, 985

This paper describes some considerations on the design of parametric linear motors. The following items are clarified:

- (1) The best performance characteristics of parametric linear motors with similar form are found in certain sizes.
- (2) The calculated values of static thrust force in a parametric linear motor agree well with the measured ones.

1. ま え が き

近年, 機械工学分野において, 機構の高精度化, 高速化, 単純化などの要求に伴い, リニアモータの適用範囲が広まり, 今後もその需要は増大していくものと思われる。これは, リニアモータが歯車やリンク機構などの補助機構を介せずに, 直接, 直線運動を得ることができ, さらに装置の構成, 保守などが簡単化されるという特徴を有しているためである^{1), 2)}。しかしながら, 従来のリニアモータは巻線を納めるためのスロットを必要とし, このために製造工程が複雑となり, 低価格化, 小形化への障害となっている。

これに対して, パラメトリックリニアモータ^{2)~4)}は, スロットがないために一次側固定子巻線を集中巻でき, 製作が簡単になり価格の低減化が期待できること, さらに単相入力で行進磁界が得られることなどの特徴を有している。

筆者らは, このようなパラメトリックリニアモータに関し, まずその寸法比と特性値の関係について実験的に検討し, 次に特性値に大きな影響を及ぼす静止推力の一算定法について検討したところ, 設計に役立つ事項を明らかにすることができた。

本論文はこれらの検討結果について報告するものである。

2. 一次側固定子の寸法比と特性値

Fig. 1 に, 最初に提案されたパラメトリックリニアモータの一次側固定子^{2), 3)} (以下, TYPE1 と称する.) の基本構成を示す。A₁ が励磁側磁路, A₂ が共振側磁路, B が共通磁路である。励磁用磁路 A₁, A₂ は共通磁路 B を介して平行に, かつ, 磁極 2 が磁極 1 と 3 の中央に位置するように配置してある。A₁ には巻線 N₁, A₂ には巻線 N₂ を施し, N₁ は単相交流電源 E₁ に, N₂ は同調用コンデンサ C に接続する。

Fig. 1 Structure of a parametric linear motor (TYPE 1).

以上のような構成で、 E_1 と C を適当な値とすればパラメトリック発振が生じ、共振側には E_1 より位相がほぼ 90° 進んだ電圧 E_2 が発生する。これより磁極上には、磁極 4 から 1 へ向かう進行磁界が形成され、その上部に置かれた二次導体 D は進行磁界の方向に駆動される。このように、パラメトリックリニアモータは単相交流電源から二相交流を得、それにより駆動推力を発生して動作する一種の二相リニア誘導モータである。

Table 1 に、大きさが互いに相似となるように試作したパラメトリックリニアモータの各部寸法を示す。同表において、 n は #2 を基準とする寸法の比率（以下、寸法比とする。）を示す。励磁用磁路には市販の U 形カットコアを用い、共通磁路には無方向性けい素鋼板を積層した棒状鉄心を用いた。二次導体は、閉磁路を形成するための磁性体板と非磁性導体板とで構成された複合二次導体であり、導体板には 1 mm 厚の銅板、磁性体板には 0.35 mm 厚のけい素鋼板を用いて、実験並びに検討を行った。

Fig. 2 に、各パラメトリックリニアモータの推力入力比 (F_s/P_1) と入力電圧 E_1 との関係の実測例を示す。各固定子の巻線数及び同調用コンデンサ C は、推力入力比が最大となるように定めている。同図より、推力入力比 (F_s/P_1) は適当な入力電圧 E_1 で最大値をとることが了解される。これは、入力電力 P_1 が E_1 のほぼ 2 乗に比例して増加するのに対し、静止推力 F_s は (0.8~1) 乗に比例し、さらに、 E_1 が大きくなると固定子と磁性体板間の垂直力の増加に伴い摩擦力が増加することにより F_s の値が飽和するためと考えられる。

Table 1 Dimensions of parametric linear motors made for trial.

unit of length: mm									
	a	b	c	d	e	f	g	n	n^3
# 1	8	56	16	2.0	8	36	128	0.8	0.512
# 2	10	70	20	2.5	10	45	160	1.0	1.0
# 3	15	105	30	3.7	15	67.5	240	1.5	3.38
# 4	20	140	40	5.0	20	90	320	2.0	8.0

n : dimension ratio of trial motors

Fig. 2 Input voltage dependence of static thrust force to input power ratio.

Table 2 は、推力入力比 (F_s/P_1) が最大となるときの各パラメトリックリニアモータの特性値を比較したものであり、各固定子の質量も併せて示した。同表において、質量比は寸法比の 3 乗にほぼ比例しているが、入力電力 P_1 、静止推力 F_s は共に寸法比の 3 乗に比例せず、小さな値となっている。これは垂直力の影響により静止推力 F_s が入力電圧 E_1 に対して飽和するためであり、その結果として推力入力比 (F_s/P_1)、推力質量比 (F_s/M) の値も小さくなっている。この傾向は固定子が大きくなるに従って顕著になる。これより、パラメトリックリニアモータには推力入力比を最大にする適当な大きさがあることが了解される。したがって、パラメトリックリニアモータの固定子を駆動装置として用いる場合には、その台数を調整することにより所望の推力を得る方が、設計上望ましいと思われる。

以上、TYPE1 の寸法比と特性値の関係について実験並びに考察を行い、同じ形状でも特性値を最良なものとする固定子寸法が存在することを明らかにした。しかしながら、この固定子の磁極は一直線上に配置されていないために、進行磁界が二次導体の駆動方向とは異なる成分を持っている。これより、磁極上部に発生した空隙磁束は、推力を発生させるために有効に利用されていないものと考えられる。

Fig. 3 に、この点を改善するために考案された一次側固定子⁴⁾ (以下、TYPE2 と称する。)の基本構成を示す。この固定子においては、磁極が一直線上に配置されているために、試作機にもかかわらず良好な特性が得られている。以下の実験では、導体板に 2 mm 厚のアルミ板、磁性体板には 0.70 mm 厚のけい素鋼板を用いた。

いま、 E_1 を一定として C を種々変えた場合に得られる推力入力比 (F_s/P_1) の最大値を (F_s/P_1)_m とする。Fig. 4 に、(F_s/P_1)_m と入力電圧 E_1 の関係を示す。これより、(F_s/P_1)_m の最大値は約 55 N/kW であり、TYPE1 よりも特性が改善されていることが了解される。以下では、パラメトリックリニアモータの特性に大きな影響を及ぼ

Table 2 Comparison of performance characteristics of parametric linear motors made for trial.

	M [kg]	R_m	P_1 [W]	R_p	F_s [N]	R_f	F_s/P_1 [N/kW]	F_s/M [N/kg]
# 1	0.87	0.507	28.4	0.59	0.41	0.435	14.6	0.47
# 2	1.72	1.0	48.0	1.0	0.95	1.0	19.8	0.55
# 3	6.31	3.68	101.0	2.11	1.94	2.04	19.2	0.31
# 4	16.27	9.48	202.0	4.22	3.56	3.75	17.6	0.22

R_m : ratio of mass in trial motors, R_p : ratio of input power in trial motors, R_f : ratio of static thrust force in trial motors

Fig. 3 Structure of a parametric linear motor (TYPE 2).

Fig. 4 Input voltage dependence of the maximum static thrust force to input power ratio.

す静止推力 F_s について、TYPE2 を例にとり算定法を検討する。

3. 静止推力の算定

Fig. 5 に解析モデルを示す。磁極 1, 3 はパラメトリックリニアモータの励磁側磁極、2, 4 は共振側磁極に対応する。解析モデルにおいては、空隙磁束密度の X 方向の空間的分布はポールピッチ τ を半周期とする正弦波状とし、Y 方向の分布は一樣とする。また時間的には正弦的に変化するものとしている。励磁側及び共振側の空隙磁束密度を B_1 , B_2 とし、 B_1 による二次導体中の面電流を I_1 , B_2 による面電流を I_2 とすれば、静止推力の時間平均値 F_s は、リニアモータの面積 $W \cdot L$ の範囲内で、 B_1 と I_2 による推力と、 B_2 と I_1 による推力との和として次式のごとく表わされる。

$$F_s = (1/2) \times \iint [Re(I_1 \cdot B_2^*) + Re(I_2 \cdot B_1^*)] dx dy \quad (1)$$

ここで、*は共役複素数を示す。いま、 B_1 及び B_2 の振幅を B_{g1} , B_{g2} とし、 B_1 と B_2 の時間的位相差を θ_e とする

Fig. 5 Analytical model of a parametric linear motor.

と、静止推力 F_s は次式のごとくなる。

$$F_s = \sigma f \tau W L B_{g1} B_{g2} \sin \theta_e \quad (2)$$

ただし σ は二次導体の面導電率、 f は電源周波数である。

解析モデルにおいては、各磁極で発生した磁束はすべて空隙中に流出するが、パラメトリックリニアモータには共通磁路が存在するために共通磁路内を流れる磁束 ϕ_i を考慮する必要がある。また、実際の空隙磁束密度分布は不均一であるという点も考慮して、以下、静止推力を算定する方法を導出してみた。

磁極 m ($m=1 \sim 4$) の上部の共通磁路に流入する磁束を ϕ_{am} とすると、その振幅 ϕ_{am} は

$$\phi_{a1} = E_1 / 4.44 f N_1 \quad (3)$$

$$\phi_{a4} = E_2 / 4.44 f N_2 \quad (4)$$

で与えられる。 ϕ_{a2} 及び ϕ_{a3} は ϕ_{a1} と ϕ_{a4} のベクトル和で与えられるものと考えて、電圧 E_1 と E_2 の位相差 θ を用いて次式のごとく表してみた。

$$\begin{aligned} \phi_{a2} &= \phi_{a3} \\ &= \sqrt{\phi_{a1}^2 + \phi_{a4}^2 + 2\phi_{a1}\phi_{a4}\cos\theta} \end{aligned} \quad (5)$$

磁極 m の上部の共通磁路より空隙中に流出する磁束を ϕ_m とする。 ϕ_m は ϕ_{am} と ϕ_i の差で与えられるものと考えて、実際には歪波形となるが、ここではその振幅 ϕ_m が次式で算出される正弦波とみなす。

$$\phi_m = \sqrt{\phi_{am}^2 - \phi_i^2} - (1/2) \phi_i (\pi - 2 \sin^{-1}(\phi_i / \phi_{am})) \quad (6)$$

この ϕ_m が空間的にポールピッチ τ を半周期とする磁束密度分布となると、固定子上面における励磁側及び共振側の空隙磁束密度はそれぞれ

$$B_{g1} = (\pi / 2\tau W) \{(\phi_1 + \phi_3) / 2\} \quad (7)$$

$$B_{g2} = (\pi / 2\tau W) \{(\phi_2 + \phi_4) / 2\} \quad (8)$$

と算出される。

動作時には、共通磁路と二次導体の間に空隙を設けるためにもれ磁束が存在し、固定子より流出した磁束がすべて二次導体とは鎖交しない。このことより、 K という

Fig. 6 Relation between θ_e and θ .

Fig. 7 Relation of coefficient K to gap length.

係数を導入して、静止推力の算出式は次式のごとくなる。

$$F_s = K \alpha r W L B_{g1} B_{g2} \sin \theta_e \quad (9)$$

この式において、 θ_e 及び K が定まれば F_s は算出できるが、観測結果によると θ と θ_e は必ずしも一致せず、 K の値も計算により求めることは容易ではない。ここでは、 E_1 、 E_2 及び θ を自由に設定することが可能な二相励磁による実験結果を用いることにした。

Fig. 6 に θ と θ_e の関係を示す。これより、一般には θ と θ_e が一致しないことが了解される。Fig. 7 に、 $\theta = 90^\circ$ とした対称二相励磁の実験結果から算出した K の値と空隙長の関係を示す。空隙長が大きくなると K の値は減少しているが、これはもれ磁束の量が大きくなること、二次導体側の磁気抵抗が増大することによるものと思われる。

Fig. 8 に、これらの K と θ_e を用い、 θ を変化させた場合の静止推力 F_s の実測値と計算値の比較を示す。 $\theta = 90^\circ$ における K の値を用いているにもかかわらず、 θ の広い範囲において電圧の値によらず良好な一致を示していることが了解される。したがって、この算定法はパラメトリックリニアモータの設計に有用な指針を与えるものと思われる。

4. あとがき

以上、パラメトリックリニアモータの設計法に必要な

Fig. 8 Relations of static thrust force to phase difference between E_1 and E_2 .

事項を明らかにすることを目的とし、静止推力に着目して実験並びに検討を行った。その結果、次の事項が明らかになった。

(1) 片側式パラメトリックリニアモータにおいては、静止推力は固定子寸法を増加させてもある大きさで飽和する傾向にあり、固定子に最適寸法が存在する。したがって、固定子を駆動装置として用いる場合には、その台数を調整することにより所望の推力を得る方が、設計上望ましい。

(2) 一次元モデルによる静止推力の算出式に、本リニアモータに使用している固定子の磁束分布を考慮した実験的な補正を加えることにより、対称及び非対称二相励磁における静止推力を計算することができた。したがって、本算定法はパラメトリックリニアモータの設計に有用な指針を与えるものである。

しかしながら、詳細な設計法の確立のためには、 θ と θ_e の関係、係数 K などについてさらに検討を行う必要がある。

文 献

- 1) 山田：リニアモータと応用技術，実教出版（1976）。
- 2) 電気学会 磁気アクチュエータ調査専門委員会編：リニアモータとその応用，電気学会発行（1984）。
- 3) 村上，菊地，渡辺，村上：日本応用磁気学会誌，7，151（1983）。
- 4) 津久井，村上：第9回日本応用磁気学会講演概要集，28pD-3（1985）。

1986年12月19日受理，1987年2月23日採録