永久磁石を内蔵したリニア振動アクチュエータの推力特性

Thrust Characteristics of a Linear Oscillatory Actuator with Built-in Permanent Magnets

高野 豊・松本好司・黄 于凱・水野 勉・西澤尚武*・山田 一

信州大学工学部, 長野市若里 500 (〒380)

*(株)エム・エー・ティー, 長野市若里 521-1 (〒380)

Y. Takano, K. Matsumoto, Y. Huang, T. Mizuno, N. Nishizawa,* and H. Yamada

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

*M.A.T. Co., Ltd., 521-1 Wakasato, Nagano 380

This paper describes the thrust characteristics of a linear oscillatory actuator (LOA) with built-in permanent magnets for a pulsator in a milking machine. The LOA consists of a cylindrical rod with two slots and a stator with two built-in permanent ring magnets. A cylindrical rod in the LOA can reciprocate motion by the driving current. The design variables of the LOA-96 are established, and the relations between the design variables and thrust characteristics are considered in the light of an analysis using the finite element method (FEM). The newly designed LOA-96 is 60% smaller and lighter than the LOA-95. It has a maximum thrust of 7.3 N and a stable point at a displacement of $x=2$ mm when the exciting current is 1.3 A. The difference between the measured values and the values calculated by FEM is approximately $\pm 10\%$. The stroke of the LOA-96 is a constant 4 mm, which means that it can be used in a pulsator.

Key words: milking machine, pulsator, linear oscillatory actuator (LOA), design variable

1. ま え が き

筆者らは、搾乳機に用いるパルセータの駆動源としてリニア振動アクチュエータ (Linear Oscillatory Actuator: LOA) の研究開発を行ってきた¹⁾。従来から用いられている空気圧式のパルセータは一定の周波数でしか駆動できないのに対して LOA を用いることにより拍動周波数を容易に変化できるようになるため、牛の生体に適した吸引と休止の搾乳リズムを取り入れることで乳頭障害の軽減が期待されている²⁾。

LOA とは交番電圧を与えることによって、可動子を往復運動させるアクチュエータの総称である。使用する用途に必要とされる動作に応じてさまざまな構造の LOA が開発されているが³⁾、可動子の材質によって分類すると鉄心可動型、磁石可動型、コイル可動型に大別することができ、本 LOA は円筒状の鉄心可動型を採用している。本論文ではパルセータ駆動用に小型化を目指した新たな構造の LOA (LOA-96) を考察し、設計・試作に関する以下の事項について述べる。

- (1) パルセータと LOA-96 の構造
- (2) LOA-96 の設計変数
- (3) LOA-96 の諸特性

2. パルセータとリニア振動アクチュエータ

2.1 パルセータの構造

Fig. 1 には LOA を駆動源としたパルセータと搾乳機の機構を示した。LOA の可動子にはスライダが連結され、可動子が変位することによりスライダに往復運動を与える。スライダの台には二つのオリフィス A, B が設けられており、LOA がスライダを往復させることにより、オリフィス A と B を接続したり、またはオリフィス A のみを閉じ B を開放するという二つの状態が作られる。この二つの状態に応じて、搾乳に吸引期と休止期を作り出す構造となっている。パルセータの駆動源としては、オリフィス A と B の間隔から 4 [mm] のストロークが安定して得られることが必要である。

Fig. 1 Structure of the pulsator in a milking machine.

2.2 リニア振動アクチュエータの構造

Fig. 2 にリニア振動アクチュエータ (LOA-96) の構造を示した。LOA-96 は中央のコイルの左右に永久磁石を 1 個ずつ配置し、それらを磁性体で狭み込んだ構造の磁極を設けている。同図のようにコイルに電流 I を流すと磁束は破線のように歯 T_A から極 A を通り、ヨーク、極 B' 、歯 T_B へと流れる。極 A と歯 T_A の間のギャップ A と、極 B' と歯 T_B の間のギャップ B で磁気吸引力が発生し、可動子が右方向へと移動する。電流の流れる方向を反対にすると可動子は左方向に移動する。よって交番電流を流すことにより、可動子に往復運動が与えられる。LOA-96 には可動子の往復で同様の推力が必要とされるため左右対称の構造とした。本論文では可動子が固定子の中央位置にあるときを変位 $x=0$ [mm] とする。

Fig. 2 Structure of the new cylindrical LOA-96 (x : displacement, F : thrust, unit: mm).

3. リニア振動アクチュエータの設計変数

LOA-96 の設計に当たり、以下の 3 か所の寸法を設計変数とした (Fig. 2 参照). (1) 歯の寸法 l, l_m, l' , (2) 切り込みの深さ d , (3) コイルの外形寸法 r_c . これらの設計変数は基本的に独立変数と考え、それぞれの設計変数が静推力特性やコイルの体積に与える影響について調べた.

3.1 歯の寸法と静推力特性

Fig. 3 にギャップ A とギャップ B のパーミアンス P_A と P_B の計算結果を示した. パーミアンスは次式から計算した.

$$P_n = \frac{A_n}{\delta_n \mu_0} \quad [\text{H}] \quad (n = A, B) \quad (1)$$

ここに、 μ_0 : 真空の透磁率 [H/m], A_A, A_B : それぞれギャップ A とギャップ B の磁路断面積 [m^2], δ_A, δ_B : それぞれギャップ A とギャップ B の磁路の長さ [m]

同図のように変位 x が $-l, -l'$ [mm] の位置からパーミアンス P_A, P_B はそれぞれ増加し始め、パーミアンス P_A は変位 x が $l_m + l'$ から減少する特性となる. 推力はパーミアンスが増大する方向に発生することから、LOA-96 の静推力特性は Fig. 4 のように想定される. すなわち変位 x が $-l, -l'$ のときにそれぞれ第 1 と第 2 のピークを持ち、また変位 x が $l_m + l'$ で、静推力が正から負に反転して安定点を形成する.

静推力特性を有限要素法 (FEM) による解析により実証を行った. ソフトは JMAG を用いて、磁性体の非線形性を考慮し、LOA を軸対称の円筒座標系に置き換え、二次元静解析を行った. Fig. 5 に設計変数 l, l' を変化させた時の静推力-変位特性の計算結果を示した. 同図 (a) は $l_m = 2$ [mm], $l' = 0$ [mm] と固定し、変数 l を変化させた時の静推力特性である. 変数 l を 2, 1, 0 [mm] と変化させたとき、推力の第 1 ピークの変位は $-2, -1, 0$ [mm] と変化する. しかし第 2 ピークの変位は 0 [mm], 安定点の変位は 2 [mm] と一定である. また同図 (b) では $l = l_m = 2$ [mm] と固定し、変数 l' を変化させた. 変数 l' を 1, 0, -1 [mm] と変化させたとき推力の第 2 ピークの変位は $-1, 0, 1$ [mm] と変化する. 第 1 ピークの変位は -2 [mm] と一定であった. しかし $l' = -1$ [mm] のとき安定点の変位は第 2 ピークの変位と重なるため $l_m + l'$ で表される位置とは異なり、約 2.5 [mm] となった.

ここで LOA-96 の推力が変位 $x = \pm 2$ [mm] の駆動範囲の全域で発生するように第 1, 2 ピークの変位をそれぞれ $-2, 0$

Fig. 3 Permeance characteristics of the two gaps in the LOA-96 (calculation).

Fig. 4 Static thrust F_s vs. displacement x in the reciprocating motion of the LOA-96.

Fig. 5 Calculated static thrust vs. displacement as a parameter of the design variables l, l_m , and l' .

[mm]とし、かつ変位 2 [mm] で安定点となるように $l=l_m=2$ [mm], $l'=0$ [mm] とした。

3.2 切り込みの深さ

LOA-96 は、永久磁石の両側の極に切り込みを設けて磁路の幅を狭めている。この切り込みの深さ d の静推力に及ぼす影響を FEM による計算により調べた。設計変数 l, l_m, l' は前節で決定した値を採用した。Fig. 6 は切り込みの深さ d と静推力の関係である。ここで LOA-96 の静推力を、変位 x と起磁力 NI の関数 $F_s(x, NI)$ として表すことにする。起磁力 $NI=500$ [A] を流したときの変位 -2 [mm] と変位 0 [mm] の静推力 $F_s(-2, 500)$, および $F_s(0, 500)$ は変数 d を大きくすると、Fig. 6 に示すように初め増加したあと、一定値で推移し、ある点で減少する特性となった。このことは適当な深さの切り込みを入れることで推力を増加させる効果があることを示している。

また変位 -2 [mm] における電流 0 [A] のときのディテント力 $F_s(-2, 0)$ は変数 d を大きくすると単調に増加した。LOA をパルセータに適用する上でディテント力は 2 [N] 以下であることが望ましい。これは LOA の省電力化のために可動子のストロークエンドにおいて入力電力を遮断しても可動子が移動しないようにするためである。よって Fig. 6 の結果から切り込みの深さ $d=2.1$ [mm] を採用した。

3.3 コイルの形状

Fig. 7 にはコイルの設計変数を示した。コイルの内径は FEM の解析に用いた可動子の寸法から $2r_i=11.5$ [mm] 一定として計算を行った。導線の抵抗は次式のように示される。

$$R = \rho \frac{l_w}{A_w} \quad [\Omega] \quad (2)$$

ここに、 ρ : 巻線の抵抗率 $=1.72 \times 10^{-8}$ [$\Omega \cdot m$], l_w : 巻線の長さ [m], A_w : 巻線の断面積 [m^2]

コイルの平均半径を $r_a = (r_e + r_i)/2$ としてコイルの巻線の長さは次式で求めることができる。

$$l_w = 2\pi r_a N = \pi(r_e + r_i)N \quad [m] \quad (3)$$

ここに、 N : コイルの巻数

また巻線の断面積 A_w は次式のように求めた。

$$A_w = \frac{\alpha}{N} w(r_e - r_i) \quad [m^2] \quad (4)$$

ここに、 α : コイルの占積率

次にコイルの体積 V_c をコイルの内側を占める部分を含めて次式のように定義する。

$$V_c = \pi r_e^2 w \quad [m^3] \quad (5)$$

式 (5) に式 (2)~(4) を代入し、整理すると次式となる。

$$V_c = \frac{\rho \pi^2 N^2 r_e^2 (r_e + r_i)}{\alpha R (r_e - r_i)} \quad [m^3] \quad (6)$$

Fig. 8 は占積率 α を 60%, 巻数 N を 500 回一定として、巻線抵抗を 3~9 [Ω] と変化させたときのコイルの体積 V_c とコイルの外径寸法 r_e の関係である。同図のようにコイルの体積は外形寸法に対して下に凸の特性を示し、巻線抵抗の値に関わらず外形寸法 9.5 [mm] のときに最小値をとった。また式 (6) のようにコイル体積は巻線抵抗に反比例するために巻線抵抗が大きいほどコイル体積は小さくできることを示している。ただし、巻線抵抗が大きいと銅損や発熱が上昇するため、従来機 LOA-

Fig. 6 Relationship between the static thrust and the depth of cut d (calculated by FEM).

Fig. 7 Design variable of the coil (r_a : average radius of coil).

Fig. 8 Relation between the volume and the external radius of the coil as a parameter of the resistance.

95^o) の銅損 9 [W] と同程度で、実用上問題とならないように巻線抵抗を 5 [Ω] とした。

以上の結果より Fig. 2, Fig. 7 中のそれぞれの設計変数を決定して、設計した LOA-96 の主な仕様を Table 1 に示した。本 LOA-96 は従来機 LOA-95^o) の体積 17.7 [mL] に対して 62%, 質量 142 [g] に対して 58% と小型軽量化が図られた。

4. リニア振動アクチュエータの推力特性

4.1 静推力特性

Fig. 9 は LOA-96 に電流 1.3 [A] を与えたときの静推力-変位特性である。同図のように LOA-96 の静推力は約 7.3 [N] の二つのピークと、ほぼ変位 2 [mm] の位置で推力が正から負に反転する安定点を得られた。ピークと安定点の位置は計算値と若干ずれ、実測値に対する計算値の誤差は $\pm 10\%$ となった。

Table 1 Principal specifications of the LOA-96

Item	Value	[unit]	Item	Value	[unit]
Size	∅21.2×32	[mm]	Material of stator	S45C	
Volume	11	[mL]	Material of mover	S45C	
Mass	82.5	[g]	Coil		
Permanent magnet			Number of turns	555	[turns]
Material	Nd-Fe-B alloy		Resistance	5.7	[Ω]
Coercive force	875	[kA/m]	Air gap	0.25	[mm]

Fig. 9 Static thrust vs. displacement characteristics of the LOA-96 (solid lines: measured, broken lines: calculated).

Fig. 10 System for measuring the stroke s and load F_L .

計算に誤差が生じた主な原因は、可動子の歯の角に面取りを施してあるが計算モデルには考慮に入れていないためであると考えられる。しかし、この計算結果においてもほぼ実測の特性を表せているものと判断する。また、電流 0 [A] のディテント力は最大 1.4 [N] であり、2 [N] 以下とすることができた。

4.2 ストローク特性

Fig. 10 のように LOA-96 をパルセータに装着し、スライダ内の圧力を変化させストロークを測定した。Fig. 11 はその測定結果である。ここで LOA の負荷 F_L は次式のように計算される。

$$F_L = \mu \{mg + (p_0 - p)A\} \quad [\text{N}] \quad (7)$$

Fig. 11 Stroke vs. load characteristics of the LOA-96.

ここに、 μ : スライダの摩擦係数、 m : スライダの質量 [kg]、 p : スライダ内の圧力 [Pa]、 p_0 : 大気圧 [Pa]、 A : スライダの投影面積 [m²]

同図のように LOA-96 のストロークは負荷が変動してもほぼ 4 [mm] 程度に安定している。実際の搾乳機で使用される一般的な真空圧は 40～60 [kPa] であり、同図から本 LOA-96 はパルセータに十分適用可能なことが確認できた。

5. あとがき

本研究で得られた主な成果をまとめると、以下のようになる。

(1) 搾乳機に用いるパルセータの駆動用アクチュエータとして新しい構造のリニア振動アクチュエータ (LOA-96) を試作し、設計変数と推力特性の関係を考察した。その結果、従来機 (LOA-95) に対して約 60% と小型軽量化できた。

(2) LOA-96 の静推力-変位特性は駆動電流 1.3 [A] のとき約 7.3 [N] の二つのピークと安定点を有した特性が得られた。FEM による静推力の計算値は、実測値に対して誤差は約 ± 10% で近似できた。

(3) LOA-96 をパルセータに装着し、負荷を変化させてストロークを測定した結果、一定ストローク 4 [mm] が得られ、パルセータ駆動に十分適用可能なことを確認できた。

文 献

- 1) 西澤尚武, 石井丈士, 山田 一: 日本応用磁気学会, 18, 543 (1994).
- 2) 山田 一, 高野 豊, 八重崎昌治, 松本好司, 西澤尚武, 穂谷敏幸: 日本応用磁気学会誌, 20, 601 (1996).
- 3) P.W. Curwen: P0996A AD Report, AD-A-211760, p. 337 (1987).
- 4) 高野 豊, 松本好司, 八重崎昌治, 黄 于凱, 西澤尚武, 水野勉, 山田 一: 電気学会研究会資料, LD-96-50, 80 (1996).

1996 年 10 月 15 日受理, 1997 年 1 月 16 日採録