

電磁石式磁気歯車の試作とその出力-効率特性試験

Trial Production and Performance Characteristics of an Output-Efficiency Test for Electromagnetic Gears

鶴本勝夫

東北学院大学工学部機械工学科, 多賀城市中央 1-13-1 (☎985-8537)

K. Tsurumoto

Dept. of Mechanical Engineering, Tohoku Gakuin Univ., 13-1 Chuo 1-chome, Tagajo 985-8537

One of the merits of permanent magnetic gears is that they can be product compactly. However, they have the demerit that the gear can not control the magnetic force between the driving wheel (pinion) and the driven wheel (gear) while maintaining a constant gap. This report describes the design and testing of electromagnetic gears and discusses the performance characteristics of an output-efficiency test.

The test showed that the current intensity to the magnetic pole I_c is larger and the output P_o is higher. With a constant gap, the I_c is smaller and the transmitted efficiency η' is higher. One of the reasons for this is the magnitude of the magnetic flux density of the gap between pinion and gear. The value of η' is increased by decreasing the thrust load in accordance with the electromagnetic attractive force.

Key words: electromagnetic gear, performance characteristics, output-efficiency

1. 緒 言

一般に使用されている歯車と異なり, 完全非接触型磁気歯車は, 振動や騒音の発生がなく, 無潤滑で運転できる特長がある。これまで主として永久磁石を利用した磁気歯車, すなわち一つの歯車で内接, 外接かみ合いが可能な磁気平歯車, 軸交差角を任意に変えられる磁気かさ歯車, コンパクトにできるトラス内接型磁気ウオーム歯車, 原動車の位置を任意に変えられる磁気食違い軸歯車など, 種々の磁気歯車を試作し, 現実のものにしてきた^{1)~3)}。しかし, 運転中に磁気力を制御するためには, 空隙を変える補助装置がさらに必要となる。したがって, 空隙を一定に保持し, 補助装置を不要とする電磁石式磁気歯車の出現が望まれる。

ここに, 電磁石式磁気歯車は汎用のモータと異なり, ロータに相当するピニオンと, ステータに相当するギアの位置(心間距離)を任意に変えることができる。これは隔壁動力伝達や装置の据付けに際し, 有利に働く。本報では, これまで報告されていない電磁石式磁気歯車の試作内容と, その出力-効率特性試験の結果について述べる。

2. 電磁石式磁気歯車の試作

Fig. 1 には試作した電磁石式磁気歯車装置を示す。ピニオンとギアは, 双方の磁極間の軸方向空隙 $g=1$ mm を介して, 内接かみ合いの状態を実験装置にセットされる。

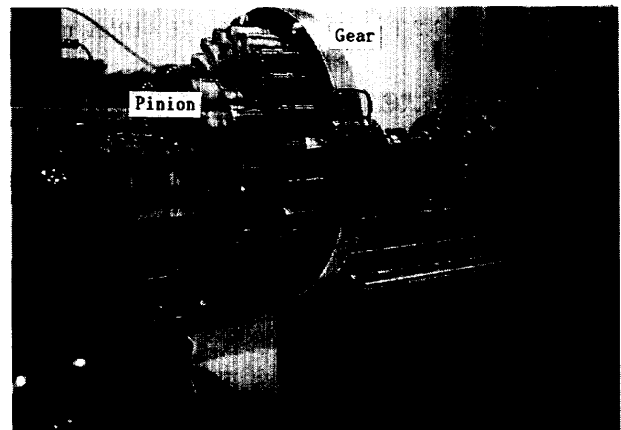


Fig. 1 Electromagnetic gear created in trial production.

Fig. 2 に磁気歯車の構成および動作原理を示す。ピニオンとギアの磁極はそれぞれ N, S, N, S と異極配列されており, 三日月形をしたかみ合い領域 $abcd$ は, ピニオンとギアの歯形が交差してみえる曲線交差部と, 両歯形がほぼ平行にみえる主かみ合い部で構成されている。原動側のピニオンが回転すると, 主かみ合い部の空隙に形成されていた軸方向に平行な磁束は, 負荷に応じて変形する。この場合, 軸方向に作用していた吸引力は, 一つの分力を生じる。この分力が接線力であり, こ

Table 1 Nomenclature of electromagnetic gear

Gear ratio	$i = 1/3$
Module	$m = 40$
Center distance	$L = 80$ mm
Tooth profile	circular arc tooth
Pinion	
Radius of iron core	$r_{1(ic)} = 54$ mm
Center angle of iron core	$\theta_1 = 72^\circ$
Height of iron core	$h_1 = 60$ mm
Number of teeth	$Z_1 = 8$
Diameter of pitch circle	$D_{p1} = 80$ mm
Diameter of outer circle	$D_{o1} = 160$ mm
Height of tooth	$H_1 = 40$ mm
Gear	
Radius of iron core	$r_{2(ic)} = 54$ mm
Center angle of iron core	$\theta_2 = 60^\circ$
Height of iron core	$h_2 = 60$ mm
Number of teeth	$Z_2 = 24$
Diameter of pitch circle	$D_{p2} = 240$ mm
Diameter of outer circle	$D_{o2} = 320$ mm
Height of tooth	$H_2 = 40$ mm

れは従動側のギアを回転させる原動力になる。

Fig. 3 にピニオンの鉄心形状を示す。本報では量産性と加工性を考慮し、円弧形状のものとした。材質は電磁ステンレス、パーマロイ、および純鉄の3種を用意し、その基本特性を比較して選択することにした。軟鋼ヨーク上の鉄心に0.5 mmの導線を1000巻きして磁極とし、空隙2 mmを介して対峙させたときの空隙中央での磁束密度の値は、磁極への入力電流 I_c が1 Aのとき、電磁ステンレス0.655 T、パーマロイ0.568 T、純鉄0.680 Tとなった。これより、パーマロイや純鉄と同程度の磁束密度が期待でき、安価で被削性に富む電磁ステンレスを磁極に採用することにした。電磁ステンレスの主成分は、Fe-13Cr-Al-Pbで、代表的な磁気特性は $B_1=0.36$ T、 $B_5=1.10$ T、 $B_{10}=1.2$ T、 $B_{25}=1.33$ T、 $H_c=76 \times 10^3$ A/mである。

Table 1 に電磁石式磁気歯車の寸法仕様を示す。原動車（ピニオン）と従動車（ギア）に共通な諸元は、歯数比 $i=1/3$ 、モジュール $m=40$ 、内接かみ合い時の心間距離 $L=80$ mm、歯形は円弧歯形である。鉄心の高さは60 mm。

Fig. 4 にギアの磁極巻線の接続図を示す。軟鋼ヨーク上に24個の磁極が取り付けられ、すべての磁極がブラシを介して、直流電源に並列に接続されている。磁極には、0.6~1.1 Aの範囲で通電する。

3. 実験装置の概要

Fig. 5 に磁気歯車の出力-効率特性試験を行う実験装置の概略図を示す。装置は、駆動部と従動部に分かれており、駆動部は心間距離や空隙の調整ができるように、前後左右への移動が可能となっている。ピニオンは負荷を受けても、一定速度で回転できるように直流モータに接続されており、ギアはトルク計測のため電磁ブレーキに接続されている。また、特性試験に際し種々の電気計測装置が用意された。

4. 出力-効率特性試験

出力-効率特性試験に際し、磁気歯車の伝達効率 η' は次式より求めた。

モータへの入力 P_i は、

$$P_i = VI \quad (\text{W}) \quad (1)$$

ここに、 V はモータの端子電圧(V)、 I はモータの負荷電流(A)ピニオンへの入力 P'_i は、

$$P'_i = P_i - P_B \quad (\text{W}) \quad (2)$$

ここに P_B は駆動部のモータ、ベルト、ベアリングなどの、個々の消費電力(W)を回転数に応じて測定し、集計したものである。

次に、ギアの出力 P_o は、

$$P_o = \omega T = 2\pi N_G T / 60 \quad (\text{W}) \quad (3)$$

ここに、 ω はギアの角速度(rad/s)、 N_G はギアの回転速度(rpm)、 T はギアトルク(Nm)。

以上のことより、

モータを含めた歯車装置全体の伝達効率 η は、

$$\eta = (P_o / P_i) \times 100 \quad (\%) \quad (4)$$

磁気歯車のピニオンからギアへの伝達効率 η' は、

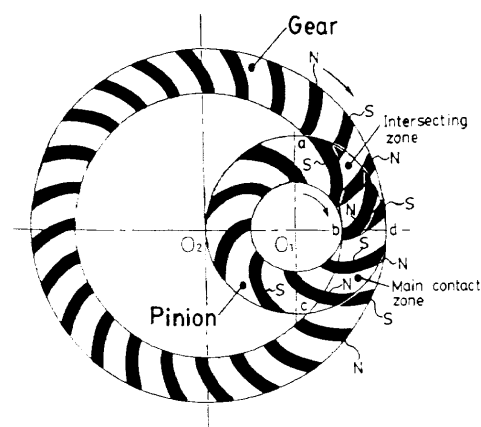


Fig. 2 Operating principle of the electromagnetic gear.

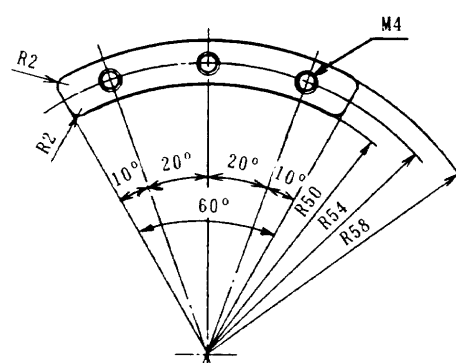


Fig. 3 Profile of the iron core.

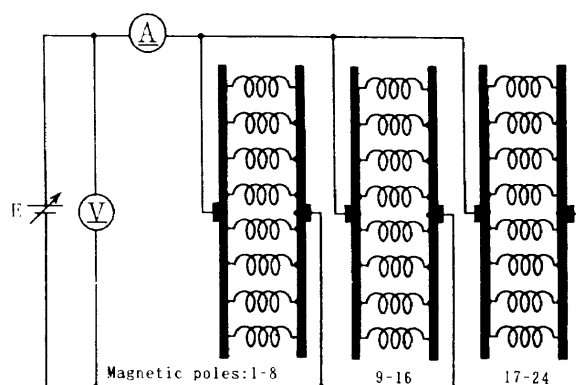


Fig. 4 Circuit diagram of the magnetic pole.

$$\eta' = (P_o / P'_i) \times 100 \quad (\%) \quad (5)$$

で示される。

特性試験は、(1) 磁極に対する入力電流 I_c 、(2) 磁極間の軸方向空隙 g をパラメータとして、 P_o - η' の関係を求めた。(1)の入力電流可変試験では、 $g=1$ mm一定とし、 $I_c=0.6 \sim 1.1$ A、ピニオン速度 $N_p=600 \sim 1400$ rpmのもと、電磁ブレーキで負荷をかけ、ピニオンの各回転速度が一定に保持されるように、モータの界磁電流を制御し、モータの端子電圧 V 、負荷電流 I 、ギアトルク T の測定を行った。次に(2)の軸方向空隙可変試験では、 $I_c=0.8$ A一定とし、 $g=1 \sim 5$ mm、 $N_p=600 \sim 1400$ rpmのもと、(1)と同様の試験を行った。

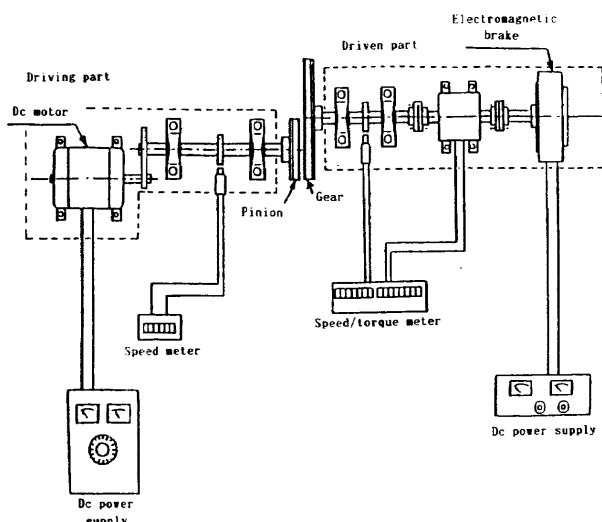


Fig. 5 Test apparatus of the electromagnetic gears.

特性試験の結果は次のとおりである。

Fig. 6 に、入力電流 I_c に対するピニオンとギアの磁極間空隙磁束密度 B とギアトルク T の関係を示す。磁束密度の測定は、Fig. 3 に示した鉄心に 0.5 mm の導線を 1000 巻きした磁極を軟鋼ヨーク上に取り付け、空隙 1 mm を介して対峙させて行った。測定値は、静止状態における空隙中央での値である。図より $I_c = 0.6$ A のとき $T = 0.7$ Nm, $I_c = 1.1$ A のとき $T = 7.5$ Nm と、 B の増大に伴い、ギアトルクも増大していくことがわかる。特に、1.0 A 以上で急激にトルクが増大しているのは、磁極が磁気飽和を迎えつつあり、その変曲点となっているためと考えられる。

Fig. 7 に N_p に対する P_o , T , および η' の関係を示す。ただし $g = 1$ mm, $I_c = 0.8$ A である。

Fig. 8 には、Fig. 7 と同様の関係を示す。ただし、 $g = 5$ mm, $I_c = 0.8$ A。

Fig. 7 と Fig. 8 から、 $N_p = 1400$ rpm の場合、空隙を $g = 1$ mm から $g = 5$ mm に変えると、 $P_o = 127 \rightarrow 48.8$ W, $T = 2.6 \rightarrow 1.8$ Nm, $\eta' = 50.4 \rightarrow 77.5\%$ とギアトルク T については 30% 減、伝達効率 η' については 53% 増となった。

Fig. 9 には入力電流 I_c をパラメータとしたときの、 P_o - η' の関係を示す。この図から、 I_c が増大するにつれて P_o も増すが、同一出力の場合、 η' は反対に減少していることがわかる。図中の破線は、出力-効率限界線である。

Fig. 10 は軸方向空隙 g をパラメータとしたときの、 P_o - η' の関係を示す。 g が小さくなるほど P_o は増大するが、同一出力の場合、 η' は減少していくことがわかる。図中の破線は、Fig. 9 同様、出力-効率限界線である。

5. 検討および考察

(1) 磁極への入力電流 I_c が大きいほど、高出力が得られた。しかし、同一出力の場合の伝達効率 η' は、 I_c が小さいほど高効率であることがわかる。これは、Fig. 6 から明らかなように、磁束密度 B の大きさが、直接伝達トルク T や出力 P_o に影響を与えたものである。 B が大きいほど、軸方向に吸引され

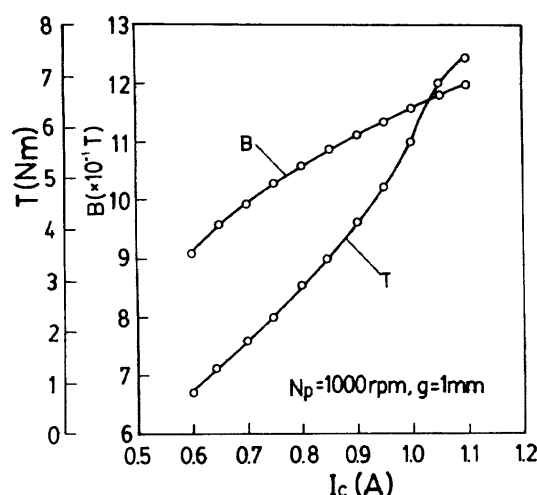


Fig. 6 Relationship of the magnetic flux density B and gear torque T to the current intensity I_c .

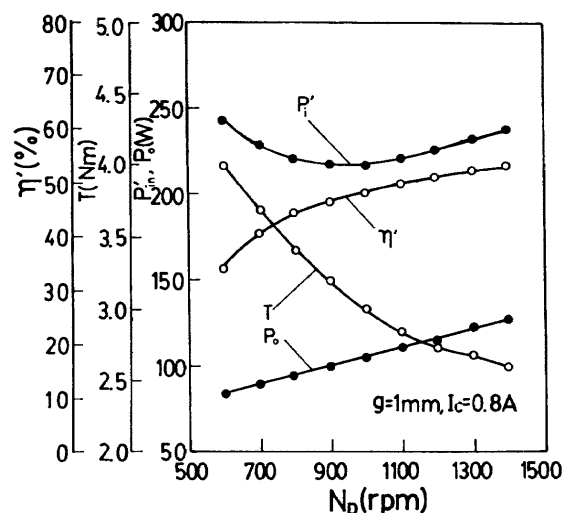


Fig. 7 Relationship of the output P_o and efficiency η' to the pinion speed N_p ($g = 1$ mm, $I_c = 0.8$ A).

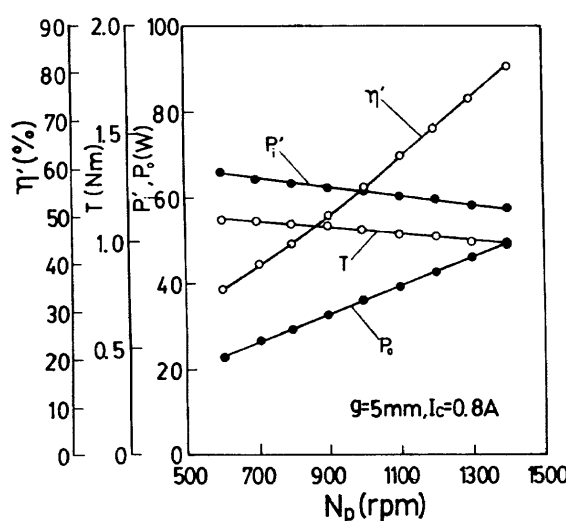


Fig. 8 Relationship of the output P_o and efficiency η' to the pinion speed N_p ($g = 5$ mm, $I_c = 0.8$ A).

る力が大きくなり、ベルトやベアリングなどに、スラスト荷重が付加された結果、 η' が減少したものと考えられる。

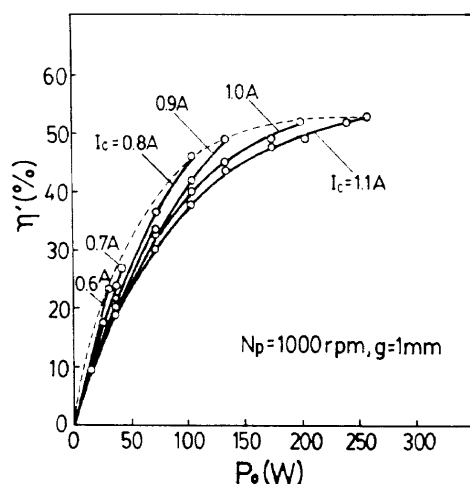


Fig. 9 Relationship of the output P_o and efficiency η' (parameter: I_c).

(2) Fig. 9 から、所要の出力 P_o に対して、高出力、高効率を保持して運転するための入力電流 I_c が、出力-効率線図から容易に求められる。すなわち、電磁石式磁気歯車は永久磁石式磁気歯車と異なり、 I_c を可変することで容易に磁気力の制御が行われる。

(3) 磁気吸引力によるスラスト荷重を軽減させ、出力や伝達効率を向上させるには、各磁極を分離独立させ、かみ合い領域を通過する磁極のみに通電することや、磁気吸引力をできるだけ回転に必要な接線力に有効に利用できるように、磁極形状を変えることなどが対策として考えられる。

6. 結 言

従来のモータとは異なり、心間距離を任意に変えられる電磁石式磁気歯車を試作し、二三の特性試験を行った。これより所要の出力、効率で運転可能となるなど、初期の目的を達するこ

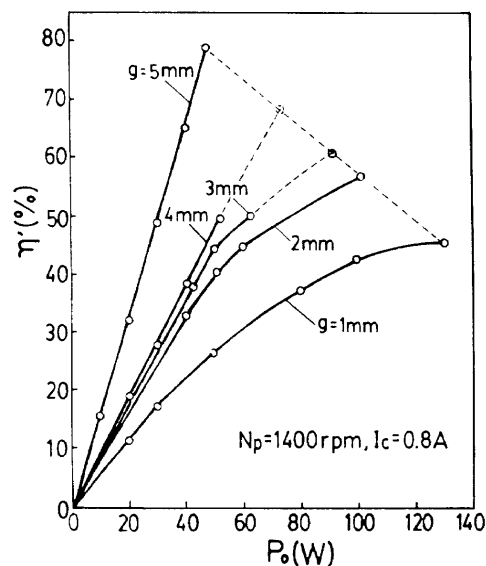


Fig. 10 Relationship of the output P_o and efficiency η' (parameter: g).

とができた。出力-効率特性試験より、ピニオンとギアの軸方向空隙を増すと、出力は低下するが、伝達効率は大きくなるという相反する関係にあることがわかった。また、一連の特性試験から、スラスト荷重の軽減策やハイブリット式磁気歯車（ピニオンは磁気力制御可能な電磁石式磁気歯車で、ギアはコンパクト化が可能な永久磁石式磁気歯車とする歯車装置）の実用化に、一定の見通しが得られた。

文 献

- 1) 鶴本勝夫：日本応用磁気学会誌，19, 521 (1995).
- 2) 鶴本勝夫：日本応用磁気学会誌，20, 545 (1996).
- 3) 鶴本勝夫：日本応用磁気学会誌，21, 821 (1997).

1997 年 10 月 27 日受理，1998 年 2 月 2 日採録