可変式円弧歯形を有する磁気歯車の試作研究

Study of a Trial Production of Magnetic Gear with Variable Circular Arc Tooth Profile

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)

K. Tsurumoto

Dept. of Mech. Engng., Tohoku Gakuin Univ., 13-1, Chuo 1-chome, Tagajo 985

The design, overlap area of permanent magnet in meshing area and performance characteristics of circular arc magnetic gear are described.

The transmitted torque of circular arc magnetic gear enlarges by 6% as compared with the same dimension involute magnetic gear. The reason of this is that the overlap area of permanent magnet in the meshing area becomes larger using a variable pinion arc tooth profile.

緒 言

近年, 最先端技術の導入に伴い, クリーンルームでの搬送や作業内容が多くなりつつある. 特に真空装置内でのタービンやモータの駆動に際しては, 気密保持や振動, 騒音, 発熱による温度上昇などが問題になる. これらの諸問題を解決する一つの方法として, 永久磁石を利用した隔壁搬送や隔壁動力伝達が挙げられる.

筆者らがこれまで提案した磁気歯車は, 減速, 増速, 隔壁, 軸心不一致(オフセット)状態での動力伝達が可能であり, 負荷性能も高い^{1)~3)}. 本報告では, インボリュート磁気歯車をさらに製作容易な歯形に改良した円弧磁気歯車の基本設計, かみ合い面積とその磁束量およ

び負荷性能について述べる. ここに, ピニオンの歯形は可変式となっており, かみ合い面積の関係で任意の心間距離でも高トルクが得られるのが特徴である. 最大伝達トルクは, 同一諸元のインボリュート磁気歯車より 6% 高い値を示した.

1. 基本設計

円弧磁気歯車の設計諸元を Table 1 に示す. ピニオンの歯形は, Fig. 1 に示すように, C 点を中心として $\pm\theta$ deg. 旋回することができる. ただし, ギアの歯形は固定

Fig. 1 Magnetic gear with variable arc tooth profile.

Table 1 Nomenclature

Number of Pinion Teeth: $Z_1=24$
Number of Gear Teeth: $Z_2=72$
Module: $m=40$, Gear Ratio: $i=1/3$
Tooth Profile, Circular Arc
variable angle(θ)
Pressure Angle: $\alpha=0^\circ$, $\alpha_b=37^\circ$
Pitch Circle Dia. of Pinion: $D_{p1}=80\text{mm}$
Pitch Circle Dia. of Gear: $D_{p2}=240\text{mm}$
Outside Dia. of Pinion: $D_{o1}=160\text{mm}$
Outside Dia. of Gear: $D_{o2}=320\text{mm}$
Height of Pinion Teeth: $H_1=40\text{mm}$
Height of Gear Teeth: $H_2=40\text{mm}$
Center Distance,
Internal Meshing: $L_1=80\text{mm}$
External Meshing: $L_2=200\text{mm}$

Fig. 2 Meshing of internal and external magnetic gear with arc tooth profile.

Fig. 3 Relationship of torque (T) and amount of offset (e).

Fig. 4 Axial overlap area of permanent magnet in meshing area of internal magnetic gear.

Fig. 5 Relationship of axial overlap area (s) and amount of offset (e) in case of internal magnetic gear.

式である。ピニオン、ギアとも歯形の磁極配列は、N, S, N, S と交互に配置されている。歯形を構成する磁石片は

Fig. 6 Relationship of torque (T) and amount of offset (e) for axial overlap area (B, C, D).

Fig. 7 Axial overlap area of permanent magnet in meshing area of external magnetic gear.

Fig. 8 Relationship of axial overlap area (s) and amount of offset (e) in case of external magnetic gear.

SmCo₅ で、寸法は $8 \times 5 \times 2$ mm、ヨーク上での表面磁束密度は 2.4 kG である。

Fig. 2 は、円弧磁気歯車の内接、外接かみ合いを示す。

図中の e は、オフセットかみ合い時のピニオンの移動量（以下これをオフセット量とよぶ。）である。

2. かみ合い面積と磁束量

Fig. 3 に、内接かみ合いにおけるピニオンとギアの空隙 $g=2\text{ mm}$ 、相対回転角 $\varphi=7.5\text{ deg.}$ のときのトルク(T)とオフセット量(e)の関係を示す。円弧歯車は、歯形可変角 $\theta=0\text{ deg.}$ の場合は最大トルク $T_{\max}\approx 10\text{ Nm}$ と、インボリュート歯車とほぼ同程度の負荷能力を示すが、 $\theta=5\text{ deg.}$ 、 $e=5\text{ mm}$ のときは最大トルク $T_{\max}=12\text{ Nm}$ と、インボリュート歯車よりも高い値を示した。これは以下に述べるかみ合い面積とその磁束量に関係している。

永久磁石を利用した円弧磁気歯車は、内接かみ合いの場合、Fig. 4 に示す三日月形のかみ合い領域 $abc(A)$ で行われる。歯形曲線に沿って配置した永久磁石の軸方向重なり面積(B)は、歯形の交差するかみ合い領域上部に位置する曲線交差部(C)とかみ合い領域の中央から下部に位置する主かみ合い部(D)の二つに分けられる。すなわち、重なり面積 B は $B=C+D$ で表される。

Fig. 5 は、以上の重なり面積(S)とオフセット量(e)の関係を示す。 C と D のそれぞれの黒めりの部分は、磁気歯車が全く静止している状態($\theta=0\text{ deg.}$ 、 $\varphi=0\text{ deg.}$)からトルク最大となる状態($\theta=5\text{ deg.}$ 、 $\varphi=7.5\text{ deg.}$)への推移を表す。この相対差が大きいほど、トルク発生要因となる磁気せん断力が増加する。

磁気歯車の伝達トルク T_t は一般に、かみ合い面積 S_t

とその磁束密度 B_t およびピニオンとギアの相対角変位 φ_t に関係するものと考えられる。したがって、磁束量 $\phi_t(=S_t B_t)$ も大きい方がトルクも大きくなることが了解される。

Fig. 6 は、重なり面積 B, C, D のそれぞれで発生するトルク(T)とオフセット量(e)の関係を示す。Fig. 5 では、 C が D より大きくなっているが、Fig. 6 より、 C でのトルク発生は小さく、 D でのトルク発生が大であることが了解される。また、Fig. 5 と Fig. 6 の D 曲線の傾向が一致しており、 $e=5\text{ mm}$ のときはそれぞれピークを迎えている。磁気歯車のトルクはこの D 曲線に依存し、その支配的影響を受けていることが明らかになった。Fig. 11 参照。

外接かみ合いの場合は、Fig. 7 に示すように、楕円形の領域 $defg(A)$ でかみ合いが行われる。内接かみ合いとの相違は、(1) かみ合い領域の面積が小さいこと、(2) かみ合い領域の中央を除く、上部と下部に曲線交差部が存在すること、(3) ピニオンとギアが反対方向に回転するため、磁束のせん断され方が異なること、などが挙げられる。

Fig. 8 に外接かみ合いの場合の、かみ合い領域における磁石片の重なり面積(S)とオフセット量(e)の関係を示す。 $-20\text{ mm}<e<0\text{ mm}$ では重なり面積が大きく、伝達トルクも大きくなると考えられるが、オフセット量 e の大小にかかわらず、平均したトルクが得られている。Fig. 12 参照。これは Fig. 6 に示したように、曲線交差部の面積(C)が大きくても、トルクは小さく、反対に主

Fig. 9 Distribution of magnetic flux density of internal magnetic gear.

Fig. 10 Polarity of magnetic flux density of internal magnetic gear.

かみ合い部の面積 (D) は小さいが、これがトルク発生に支配的影響を与えているためと思われる。

Fig. 9 に、内接かみ合いの場合の磁束密度分布を示す。 $e=5\text{ mm}$, $\theta=5\text{ deg.}$, $\varphi=7.5\text{ deg.}$ のとき、ピニオンとギアの軸方向空隙 $g=3\text{ mm}$ の中央で測定したものである。図から明らかのように、曲線交差部と主かみ合い部の境界には aa' で示す 0 gauss レベルの分離帯ができる。曲線交差部より主かみ合い部の方が広範囲にわたり、高い磁束密度の値となっている。このことから、主かみ合い部が、発生トルクに対して支配的影響を与えることがわかる。さらにこのことは、Fig. 10 に示す極性分布により明らかにされる磁気歯車に対しても、そのこわさが増大し、強い歯車が形成されることになる。

3. 負荷性能試験

負荷性能試験は、動的試験装置²⁾で行った。ピニオンは 2.2 kW の直流モータに接続されており、シリコン整流

Fig. 11 Dynamic performance characteristics diagram of T - e - N in case of internal magnetic gear.

Fig. 12 Dynamic performance characteristics diagram of T - e - N in case of external magnetic gear.

器で回転速度が制御される。ギアには 100 Nm までの負荷が電磁ブレーキによってかけられ、トルク計でトルクを測定する。ピニオンとギアが隔壁の状態や軸心不一致の状態でも試験ができるように、モータを含め原動側は前後左右に移動できるようになっている。

性能試験は、ピニオンとギアの軸方向空隙 (g : 1 mm 間隔), オフセット量 (e : 5 mm 間隔), ピニオンの回転数 (N : 100 rpm 間隔) をパラメータとして、ギア側のトルク (T : Nm) を測定する。

Fig. 11 は、内接かみ合いのオフセット量 e を種々変えた場合のトルク-速度曲線を示す。円弧磁気歯車は、歯形可変角 $\theta=5\text{ deg.}$, $e=5\text{ mm}$, $N=1100\text{ rpm}$ のとき、トルクは最大となり、最大伝達トルク $T_{\max}=13.81\text{ Nm}$ であり、インボリュート歯車に比べて円弧歯車の方が 6% 高い値となっている。

Fig. 12 は、外接かみ合いのオフセット量 e を変えた場合のトルク-速度曲線を示す。オフセット量にかかわらず、3~4 Nm の平均したトルクが得られた。

結 言

インボリュート磁気歯車のかみ合いの性質から、円弧磁気歯車のかみ合いを導き、ピニオンとギアが定角速比で回転する歯形の共役性については、動的試験によって確認した。

また本報告では、円弧磁気歯車のピニオンの歯形を可変式とすることにより、同諸元のインボリュート磁気歯車より 6% 負荷性能を増大することができた。これは基本的にかみ合い面積増加による磁束量の増加によるものであるが、特に内接かみ合いでは、かみ合い領域内の中央から下部に位置する主かみ合い部の磁石片重なり面積が、伝達トルクに支配的影響を与えていることが明らかになった。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、種々ご指導を賜った東北学院大学工学部電気工学科教授菊池新喜先生に、厚く感謝申し上げます。

文 献

- 1) K. Tsurumoto and S. Kikuchi: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-23**, 3622 (1987).
- 2) 鶴本勝夫: 日本応用磁気学会誌, **11**, 391 (1987).
- 3) 鶴本勝夫: 日本応用磁気学会誌, **12**, 411 (1988).
- 4) 鶴本勝夫: 第 12 回日本応用磁気学会学術講演集, 3pG-6, 427 (1988).

1988 年 11 月 24 日受理, 1989 年 2 月 10 日採録