研 究

平面形磁性接点ばねの負荷特性*

奥 川 守 文** 石 黒 銀 矢*** 石 野 喜 信**

Load Characteristics of a Flat Magnetic Contact Spring

Moribumi OKUGAWA, Ginya ISHIGURO
and Yoshinobu ISHINO

The stability in attitude of a flat magnetic contact spring is investigated. This spring has a gimbal property by which the moving contact moves parallel and the stable contact condition can be obtained. While, the rotational stiffness is small, so that load characteristics of the spring are influenced significantly by the eccentricity. Here, it is assumed that the moving contact is expressed by the three degree-of-freedom model. Then, it is proven that the moving contact can touch with the stationary one without rotation. The results from analyses and experiments are as follows: (1) The

stable contact condition is obtained if the rotational stiffness is large. (2) When the rotational stiffness is small, the influence of moment caused by concentration of magnetic flux is larger and the variation of force point of application is more remarkable as the eccentricity is larger. In this case, the force that applies to the moving contact is considered to be necessary as distributed load. (3) Load characteristics are obtained in the actuated state by magnetic force. The allowable eccentricity is obtained for practical usage, $\epsilon=0.12$ ($\epsilon=|e|/d$: e ; eccentricity, d ; diameter of stationary contact).

Key words: load characteristic, contact spring, gimbal property, rotational stiffness, eccentricity, moving contact, three degree-of-freedom, magnetic flux.

1. ま え が き

電々公社がD10形交換機用通話路スイッチとして新たに開発した多接点封止形スイッチは、大気汚染に対処して封入接点形を取り、部品点数や工数の削減を図り、高密度の実装が可能な形態として、多くの接点在同一の筐体内に封入される構造が採用されている¹⁾²⁾。そして、このスイッチに用いられている接点ばね負荷系は、1枚の磁性ばね材料(Fe-15%Ni)の薄板にクラッド圧延により接点層(Pd-40%Ag)を設け、可動片(接極子)、可動接点、ばね部ならびに固定部が平面的に一体に形成されている。この平面形磁性接点ばねは、従来のスイッチ・リレーに用いられているリフトオフ形式の接点ばねに比べて、可動片が平行に移動するため、固定接点と安定な接触状態が実現されるジンバル性を持つ反面、可動片の回転に対する剛性が小さいため、負荷力の位置変動はスティフネスの低下や接点閉成時の接触特性を損なう恐れがある。

本報告では、平面形磁性接点ばねを3自由度モデルと考へて、静負荷特性を解析し、負荷力と可動片の変位との関係を明らかにする。さらに、その結果を使って、励

磁状態における接点ばねを2自由度モデルに縮退して考へ、ばね負荷系の各部に作用する磁気吸引力を考慮して、可動片の運動姿勢を明らかにし、安定な接触状態を得るための条件を求めた。

2. 基 礎 式

図1に多接点封止形スイッチの基本構造を示す。接点

(a) 外 観

(b) 断面図

図1 多接点封止形スイッチの構造

* 原稿受付 昭和54年7月18日。昭和54年度精機学会春季大会学術講演会(昭和54年3月29日)にて発表。

** 正 会 員 日本電信電話公社横須賀電気通信研究所(横須賀市武1-2356)

*** 日本電信電話公社横須賀電気通信研究所

図2 ばね形状と座標系

ばねは薄板ばね材料により形成され、剛性の大きい平板の支持板に溶接で固定される。可動片はばねの平面に垂直に置かれた固定接点を溶接した駆動鉄心と対向しており、鉄心からの磁気吸引力によって動作し、磁気吸引力の作用が無くなると、ばね部の弾性復元力によって復旧する。図2に平面形磁性接点ばねの形状と、解析に使用した座標系を示す。二つのL字形ばねで結合されている矩形の部分は可動片であり、斜線を施した部分はクラッド圧延された接点である。もう一方の、溶接部を含む部分は固定部である。この可動片と固定部は、L字形ばねに比べて弾性的には剛体とみなして以下の議論を進める。従って、可動片は3自由度を有し、変位成分は図の座標系に対応して、 z 方向の並進 δ 、ならびに x 軸と y 軸まわりの回転 θ と ϕ となる。これは、ばね部の変形に曲げとねじりを伴うために生じる。図で、可動片内の点Oは座標原点で、 z 軸は固定接点の中心軸と一致するように設計される。また点Cは負荷中心*と呼ばれる。

さて、3自由度モデルでは、変位成分 (δ, θ, ϕ) に対応する力とモーメントの成分を (P, M, T) とすると、両者には次の関係が成り立つ^{3)~5)}。

$$\begin{pmatrix} P \\ M \\ T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{\delta} & k_{\delta}x_c & k_{\delta}y_c \\ k_{\delta}x_c & k_{\theta} + k_{\delta}x_c^2 & k_{\delta}x_cy_c \\ k_{\delta}y_c & k_{\delta}x_cy_c & k_{\phi} + k_{\delta}y_c^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta \\ \theta \\ \phi \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、 k_{δ} は点Cでの負荷点スティフネス、 k_{θ}, k_{ϕ} は点Cのまわりに単位の大きさの回転を与えるのに必要なモーメントである。また、 (x_c, y_c) は負荷中心Cの位置を示す。いま、負荷中心Cが座標原点Oと一致すると、 $x_c = y_c = 0$ であるから、式(1)は簡単に

$$\begin{pmatrix} P \\ M \\ T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{\delta} & 0 & 0 \\ 0 & k_{\theta} & 0 \\ 0 & 0 & k_{\phi} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta \\ \theta \\ \phi \end{pmatrix} \quad (2)$$

と表せる。

ところで、点Oに作用するモーメントの成分は、可動

* 負荷中心では、 z 方向の負荷力に対して、可動片は並進のみが生じ、回転成分は生じない。さらに、負荷点スティフネスは最大になることが知られている。

片(あるいは xy 平面内)の任意の点 (x, y) に作用する単一の負荷力によって表すことができる。 $M = Px$, $T = Py$ のように置き、式(1)を変位に関して解き、負荷点 (x, y) での並進 z は $z = \delta + x\theta + y\phi$ と表せるから、負荷点 (x, y) でのスティフネス k は

$$k = \frac{P}{z} = 1 / \left\{ \frac{1}{k_{\delta}} + \frac{(x-x_c)^2}{k_{\theta}} + \frac{(y-y_c)^2}{k_{\phi}} \right\} \quad (3)$$

となる。さらに、式(3)は次のようにも書ける。

$$\frac{(x-x_c)^2}{k_{\theta}} + \frac{(y-y_c)^2}{k_{\phi}} = \frac{1}{k} - \frac{1}{k_{\delta}} \quad (4)$$

式(4)より、スティフネス k が一定となる曲線は、 (x_c, y_c) を中心に、ここを通る x 軸と y 軸に平行な軸を主軸とする楕円となる。特に短径となる軸方向に負荷が偏心していると、負荷特性は大きな影響を受ける。また、負荷中心Cでスティフネスは最大となり、 $k_{\max} = k_{\delta}$ となる。

しかし、実際にスイッチを駆動した状態では磁束は分布して流れる。従って、可動片に作用する磁気吸引力は分布荷重として考える必要がある。磁気吸引力が作用する部分は次の三つである。

- <1> 可動片-固定接点間
- <2> 可動片-支持板間
- <3> 可動片-封着基板間

各部分の磁気抵抗は各部分をそれぞれ細分割すると、近似的には次式で与えられる。

$$R_{< n >} = 1 / \mu_0 \sum_{i=1}^N \left(\frac{S_i}{Z_i} \right)_{< n >}, \quad n=1, 2, 3 \quad (5)$$

ここで、 S_i, Z_i は細分割した分割部の面積と空隙長であり、 μ_0 は空気中の透磁率である。また、分割数 N については、可動片が傾斜している場合、その一端に磁束が集中するため、精度よく求めるには N を大きくする必要がある。本報告では $N=100$ とした。

次に、可動片と固定接点間の磁束が一定であるという条件のもとで、式(5)を使って磁束分布を各部分<1>~<3>について求め、各分割部に作用する磁気吸引力が得られる。その結果、可動片に作用する負荷力と原点Oに作用するモーメントは、各部分<1>~<3>について

$$\left. \begin{aligned} P_{< n >} &= \frac{1}{2\mu_0} \sum_{i=1}^N \frac{\phi_i^2}{S_i} = \frac{\mu_0}{2} (\Phi R)^2 \sum_{i=1}^N \frac{S_i}{Z_i^2} = \sum_{i=1}^N P_i \\ M_{< n >} &= \sum_{i=1}^N P_i x_i \\ T_{< n >} &= \sum_{i=1}^N P_i y_i \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

となる。ここで (x_i, y_i) は各分割部の位置座標であり、 ϕ_i と P_i はそれぞれ各分割部に流れる磁束と、作用する

図3 可動片の姿勢
(静負荷時)

図4 偏心負荷時の静負荷特性

図5 等スティフネス楕円 (5倍拡大モデル)

負荷力である。また Φ は各部分に流れる磁束である。式(6)から各部分について負荷力とモーメントを求め、それらの総和を可動片に作用する負荷力とモーメントとする。これらを用いて式(1)を解けば、可動片の変位 (δ, θ, ϕ) が得られる。引き続き、可動片と固定接点間の磁束を逐次増加させて可動片の変位を求め、励磁状態における可動片の負荷特性が得られる。

3. 偏心負荷問題

3.1 静負荷特性

図2のばね形状から、負荷中心Cがx軸上にあるのは明らかである。ここでは可動片の原点Oが固定接点の中心線上に一致しない場合、すなわち偏心している場合を調べていくが、問題を簡単にするため、x軸方向の偏心に限定する。励磁状態における負荷力とモーメントを単一の負荷力に置き換えて考えると、その負荷点は可動片の変位状態によって大きく変動すると予想されるが、まず第一段階として、固定接点の中心線上に単一の負荷力Pが作用すると仮定し、このときの可動片の姿勢を図3に示す。二点鎖線は可動片に対して鉄心がx方向に偏心して設置された状態を示し、このときの接点空隙を Z_g とする。実線は負荷力Pが作用し、可動片が固定接点に接触し、支点反力Fを受けている状態を示し、そのときの負荷点変位Zと、空隙 $Z^* = Z_g - Z$ が示されている。この問題は2自由度モデルとして考えてよく、さらに負荷中心を原点に一致させることにより、式(2)から

$$\begin{pmatrix} P \\ M = eP \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_\delta & 0 \\ 0 & k_\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta \\ \theta \end{pmatrix} \quad (7)$$

を解けばよい。

図4に負荷力が固定接点の中心線上に作用すると仮定したときの負荷特性を示す。縦軸は負荷力の無次元化量

表1 ばね定数 (計算値)

k_δ (gw/mm)	212.2
$k_\theta/k_\delta d^2$	0.97
$k_\phi/k_\delta d^2$	2.3
x_e (mm)	-0.872
y_e (mm)	0

但し、 $E=16\,500\text{ kgw/mm}^2$,
 $d=8.9\text{ mm}$ とした

$P/k_\delta Z_g$ 、横軸は負荷点の空隙 Z^*/Z_g である。負荷点が負荷中心に一致すれば、負荷特性は図の破線で与えられるが、偏心すると折線 OBA となる。点Bは可動片が固定接点に最初に接するときで、このときの負荷力 P_B と負荷点の空隙 Z_B^* はそれぞれ次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{P_B}{k_\delta Z_g} &= \frac{\gamma}{\gamma + \epsilon(\epsilon + 0.5)} \\ \frac{Z_B^*}{Z_g} &= \frac{0.5\epsilon}{\gamma + \epsilon(\epsilon + 0.5)} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ここで ϵ と γ は次のような無次元量である。

$$\epsilon = |e|/d, \quad \gamma = k_\theta/k_\delta d^2 \quad (9)$$

BA間では固定接点を支持点として反力Fを生じながらPの増大と共に傾斜角 θ はその絶対値を減じ、最終的には $\theta=0$ となり点Aの状態となる。このときの負荷力 P_A と支点反力 F_A はそれぞれ次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{P_A}{k_\delta Z_g} &= 1 + 2\epsilon \\ \frac{F_A}{k_\delta Z_g} &= 2\epsilon \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

これらの量は γ には関係なく、 ϵ によってのみ決定され、 $\epsilon=0$ のときには支点反力が生じないで可動片は最終閉成に達する。すなわち図4の破線のようになる。

図5は試作した平面形磁性接点ばねで、実験しやすいように5倍拡大モデルを使用した。このばね形状から式(1)の剛性マトリクス成分を求め、表1の結果を得た。次

図6 偏心量と初期閉成負荷力

図7 最終閉成負荷力と支点反力

に式(4)から k/k_s が等しくなる点を計算し、その等ステイフネス線図を図5に示す。実験値を併記したが計算値とよく一致し、このことから3自由度モデルの導入に対する妥当性が検証され、かつ楕円の短軸が x 軸に一致することがわかる。

表1のばね諸元を使って、式(8)から偏心量と初期閉成負荷力の関係を γ をパラメータにして計算し、その結果を図6に示す。また式(10)から、偏心量に対する最終閉成負荷力とそのときの支点反力を計算し、結果を図7に示す。実験では $d=8.9\text{ mm}$, $Z_g=1\text{ mm}$ として x 方向の偏心に対して行い、結果を図に併記した。図6に示すように、 γ の実験値はほぼ1となり、表1からの計算値 $\gamma=0.97$ とよく一致している。また、 γ が大きいほど初期閉成負荷力は大きくなり、安定な接触状態が実現される。図7に示すように、実験値は計算値とよく一致し、偏心量が増えるほど最終閉成負荷力と支点反力は増加する。以上の結果から、固定接点(鉄心)の位置変動として最大 $\epsilon=0.1$ を見込んだ場合、初期閉成負荷力は約6%低下し、最終閉成負荷力は20%の増加となる。

3.2 励磁状態における負荷特性

図8 励磁状態における負荷特性(計算値)

図9 励磁状態におけるモーメント(計算値)

先の結果から、可動片を固定接点に平面接触させるためには、負荷力は最終閉成負荷力 P_A より大きくななければならない。しかしながら、以上の結果は負荷点が固定接点の中心線上にあると仮定したもので、励磁状態においては負荷点の変動を考慮していく必要がある。

図8には偏心に対する負荷特性の計算結果を示す。横軸は可動片の空隙 Z^*/Z_g 、縦軸は負荷力 $P/k_s Z_g$ である。偏心量は可動片の原点 O から x 方向に取り、実線は励磁状態における負荷特性であり、破線は静負荷時の負

図 10 ばねの状態図

荷特性である。図 9 は可動片に作用するモーメントの計算結果を示したもので、縦軸に M/k_θ を取っている。偏心量が小さいときは負荷力、モーメントは静負荷特性も励磁状態においてもほぼ一致しているが、偏心量が大きくなると、両者の違いは顕著になる。特に励磁状態では負荷力とモーメントが増加しても空隙が一定になっているが、それは励磁状態では可動片の姿勢が図 10 に示すようになるからである。状態 ① では可動片が支持板から離れ、状態 ② で固定接点に閉成するが、可動片の一端が支持板にも接していると考えられ、双方から支点反力を受けている。この状態 ② の空隙一定の姿勢のまま、さらに負荷力とモーメントが増加すると、状態 ③ で可動片は支持板から離れ、状態 ④ で最終閉成に達する。このときモーメントが減少するのは、負荷点が固定接点の中心線の方へ移動するためと考えられる。また、図 8 で負荷力が負であるにもかかわらず空隙が減少するのは、モーメントがその間では速やかに増加するため、可動片の一端が支持板に接しながら回転しているためである。偏心量が小さい場合には、状態 ② は生じずに最終閉成に達する。また、図 10 において起磁力 $(NI)_1$ における磁気吸引力特性よりも負荷特性が下方にあれば、起磁力 $(NI)_1$ で最終閉成に達する。しかし負荷特性が上方にある場合には、 $(NI)_2$ の起磁力を必要とする。

以上のように、励磁状態における負荷特性は、偏心量が小さい場合には静負荷特性として取扱ってよいが、偏心量が大きくなると磁束を考慮して解く必要がある。次に、可動片と固定接点間の磁束一定の条件と各部分の磁気抵抗の関係から各状態に対する起磁力を算出し、可動片が初期閉成に達する最大起磁力（初期閉成起磁力）と、最終閉成に達する最大起磁力（最終閉成起磁力）を計算した結果を図 11 に示す。図 11 (a), (b) はそれぞれ x, y 方向の偏心に対する感動起磁力特性で、実線で初期閉成し破線で最終閉成する。特に x 方向の偏心では、破線は

図 11 平面形磁性接点ばねの感動値特性

偏心量が 1.1 mm, -3.4 mm で不連続となるが、これは図 10 の状態 ② でブリッジを形成した後に最終閉成に達することを示す。また、 y 方向では負荷中心に関して対称になっているが、 x 方向とはかなり違った特性となっている。これはばね形状の対称性と非対称性に起因していると考えられる。実験値を図に併記したが、計算値とよく一致している。○印が初期閉成、△印が最終閉成起磁力であり、偏心に対して△印が無いものは、初期閉成で最終閉成に達することを示す。図 11 (b) で y 方向の偏心に対してはかなり安定であるが、これは x 方向と比較して $r=2.7$ と回転に対する剛性がかなり大きいためであると考えられる。

実際の駆動では、初期閉成起磁力の 1.2 倍程度の起磁力を加えるため、 x 方向の偏心量が -3.4 ~ 1.1 mm では可動片と固定接点は平面接触となり、安定な接触状態が得られる。従って、見かけ上の許容偏心量は $\epsilon = |e|/d = 0.12$ 程度で、これを半径とする円 $(x/d)^2 + (y/d)^2 \leq \epsilon^2$ の内部では安定である。

4. ま と め

平面形磁性接点ばねについて、静負荷特性を調べ、さらに励磁状態における負荷特性を検討した結果、次のことが明らかになった。

- (1) 平面形磁性接点ばねは3自由度モデルとして扱ってよい。可動片内の等スティフネス線図は楕円となり、負荷中心でスティフネスは最大となる。
- (2) 固定接点の中心線上に負荷力が作用する場合に、静負荷特性では、偏心量の増加に伴って初期閉成負荷力は減少し、最終閉成負荷力は増加する。また、回転に対する剛性が大きいほど安定な接触状態が得られる。
- (3) 実際の駆動では励磁状態の負荷特性で考えていく必要があり、特に磁束の集中によるモーメントの影響、すなわち負荷点の変動が大きくなる。
- (4) 回転に対する剛性が小さい x 方向では、偏心量が大きくなると、可動片は支持板と固定接点とにブリッジを形成し、最終閉成に要する負荷力は非常に大きくなる。

- (5) 起磁力が初期閉成起磁力の1.2倍という条件では、安定な接触状態が得られる許容偏心量は $\epsilon \leq 0.12$ である。

実際にはばね形状と寸法に若干の手直しを加え、負荷中心を $x_c/d=0.83/8.9=0.093$ とすることにより、許容偏心量は $\epsilon < 0.24$ まで向上させた。

最後に、本研究を進めるにあたり、有益な助言をいただいた当所・松田宅内機器研究部長、加藤同部統括担当調査役、高橋継電器研究室長に深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) 鈴木英雄, 加藤勝洋: 多接点封止形スイッチの構造, 昭和52年度電子通信学会総合全国大会予稿集(1978) 195.
- 2) 石野喜信, 松田隆一, 奥川守文, 落合昭夫: 多接点封止形スイッチ接点ばねの設計, 通研研究実用化報告, 27, 5 (1978).
- 3) 奥川守文: 接点ばねの振動特性, 電子通信学会機構部品研究会資料, EMC 78-1 (1978).
- 4) 石黒銀矢, 奥川守文: 磁性ばねの運動に関する検討, 電子通信学会機構部品研究会資料, EMC 78-9 (1978).
- 5) 石野喜信, 奥川守文, 石黒銀矢: 平面形磁性接点ばねの負荷特性, 昭和54年度精機学会春季大会学術講演会前刷(1979) 528.

情 報

機械工業景気動向調査発表

日本機械工業連合会は、このほど今年6月までの売上高、受注などを見通した機械工業景気動向調査を発表した。これは2月中旬を調査時点とし、主要企業170社に対するアンケート調査をまとめたもので、それによると、①売上高は54年10～12月実績、55年1～3月、同4～6月予想額とも10%前後の増加となり、55年上期(1～6月)では前年同期比10.3%増と高い伸びとなる、②受注高はやや伸び悩むが、それでも55年上期は同7.0%増と堅調、③設備投資は54年度実績見込みが前年度比22.3%増、55年度計画も同15.1%増の1兆1384億円となり高水準——などの点が明らかになった。

今回の調査で特徴的なことは、機械工業(一般機械、電気機械、輸送機械、精密機械)の景気が当初予想以上に好調で、しかも先行き力強さが見られる点である。

これは国内投資活動の活発化に加え、円安による輸出の増加が大きな理由となっている。

まず売上高では昨年10～12月実績が前年同期比14.6%増、55年1～3月が同10.7%増、4～6月は同9.8%増で、今年1～6月では同10.3%増の13兆6630億円と予想される。昨年同期からの好調さを少なくとも上半期までは持続するとの明るい見通しをたてている。

(p. 631に続く)