糸等の張力測定装置について*

(第1報) 円管面のひずみを応用した張力変換器

(昭和32年4月23日受理)

会 員 久 世 栄 一**

→ 摘 要 ←

研究目的

本研究は紡織各工程における糸等の張力を合理的に観測できるようにするため、新しい“Strain gauge”の原理と構造を応用した張力変換器を試作する目的で行ったものである。

研究結果

- (1) 急速変化する微小張力を正確に観測できる張力変換器を試作した。
- (2) 張力変換部の構造を特別の設計にすることによって、新しい“Strain gauge”の原理を適用できることが見出された。
- (3) 重力、振動等の外力による測定誤差が生じない構造としたため、運転中の機械上に取付けて観測した結果は、忠実に糸張力を与えることが認められた。
- (4) 張力変換器の糸ガイド等に生ずる摩擦抵抗によって、観測中張力が異常変化することを極力減少できる機構を採用した。

1. 緒 言

一般に繊維工業においては工程の進むにしたがって、繊維の塊り→ラップ→スライバ→粗糸→糸→糸の集り→織物、あるいは単繊維の集り→糸→糸の集り→織物というふうに繊維の集団としてその形態を変えて行くと同時に、それぞれ次の工程に移る準備として管あるいはローラなどに巻取られたり巻返されたりされねばならない、というような他の工業では見られぬ特徴を有するものである。

したがってこれら各工程中常にある大きさの引っ張り力が作用するものであって、しかもその際に金属材料などでは見られぬ程度の大きな伸度(引っ張りの程度によっては金属線のクリープに近似したような傾向を示すものもある)を示すものが多いから、それぞれの工程中における加工品の張力およびこれに対応して生ずる伸度の発生状態は、製品の形成機能の生成機構を大きく支配する場合が多く、その品質に対して重大な影響を及ぼすものである。

かかる意味から常に品質の変動を管理して、すぐれた均一性の高いものを生産する上の一つの有力な管理方式

として、各工程における張力を連続測定し、これを制御することはきわめて有意義なこととなり、これに関する研究としては従来から多くのものが発表されている。著者も磁気現象を応用するもの¹⁾、ピエゾ電気現象を応用するものなどの電気的方法とか、ばねのたわみを応用するものなどの機械的方法の各種張力測定装置を従来より色々²⁾と発表し、その実用的応用の効果に関する二、三の研究³⁾についてもすでに発表して来たのであるが、今回円管面のひずみを応用した張力計の試作を完成したので、これについて報告することとする。

2. 構造並びに性能

紡織各工程における張力並びにその発生状態には、それぞれの製品の加工状態に応じてかなりの特徴を示すものが多いが、いまこれを大別すると下記ようになる。

- (1) かなり大きな張力を示すもの
- (2) かなり小さな張力を示すもの
- (3) 加工品の運動速度がかなり大きいもの
- (4) 加工品の運動速度がかなり小さいもの
- (5) 加工時の張力が加工品の切断強度に近いもの
- (6) 加工時の張力が加工品の切断強度よりも小さいもの

* Studies on New Tension Converter. Part 1.

** E. Kuze, Member. 東京工業大学

もの

(7) 加工時の張力でかなり大きく伸びるもの

(8) 加工時の張力でほとんど伸びないもの

したがってある加工状態における加工品の張力を測定する場合、どのような構造でどのような性能を有する張力測定装置を必要とするものかは、上記したような張力の大きさならびにその発生状態を十分考えて決定することが肝要である。

たとえば製織工程における各種張力の大きさならびにその発生状態は、ほぼ上記したようなすべての場合を含むこととなるが、管着中の張力、繰返中の張力、整経張力、緯糸解舒張力などは糸の走行速度が大きいこと、また製織中の経糸張力などは糸の走行速度は小さいが張力そのものはかなり大きくて、場合によっては糸の切断強度に近いものになることなどを考えて張力測定装置をつくることが必要となる。また紡績工程では比較的加工品（粗糸、スライバなど）の走行速度は小さいが、その切断強度はかなり低いという点とか、撚りの加えられる状態などを考慮してこれに相応した張力計をつくるべきであろう。

本報でのべようとするのはこのような張力の大きさとかその発生現象などを考えて、機構のみ改変すればほぼすべての工程における繊維製品の張力が正確かつ容易に観測でき、近い将来実現するであろういわゆる“Automatic tension compensator”の張力検出端としての役割りをも十分果し得る性能を具備させるように構成した、張力観測装置のいくつかの試作についてである。

(1) 構造

紡織工程の張力発生機構から推察して、張力観測装置の性能としては少なくとも(a)きわめて激しく急速に変動する張力変化によく追従して忠実度の高いものであること、(b)きわめて小さい張力をも十分検出し記録し得るものであることおよび(c)測定することによって加工品の運動条件がほとんど乱されないものであることの3点が実現できるものでなければならない。このような構造と性能を有するものであれば、ほぼあらゆる加工工程の張力状態の観測が可能になるものと考えて差しつかえないであろう。

このような観点から一般に測定器各部の慣性による影響を極力小さくし得る各種の電気的測定法が応用され、力の測定法としては適当な構造の受圧部によって力を微小変位に変換し、これを適宜の方法で電気量に変えて測定する方式が広く採用される。

張力を電気量に変換する方法としては、たとえば前にものべたように圧電気を利用する方法、磁歪による方法、いわゆる“Unbounded strain gauge”(Uゲージとも称される)を利用する方法、インダクタンスまたは容量変化による方法などがとりあげられているが、いずれも原理上外部からの重力、振動などの影響を受けやすく、またその固有振動数を高めることが困難であるため、高感度の張力計を得るには糸をかなり大きく屈曲させて、その張力の合力が大きく変換器に作用するように構成することが必要である。

本試作張力測定装置（特に張力変換器）の一つは、まず張力を回転力に変換することにより外部よりの平行力の影響を避け、次にこの偶力を薄肉の長い円管に伝えてこの円管表面に生ずるひずみの量から張力を測定しようとするものである。しかしてこの円管はその中心軸のまわりの慣性能率がきわめて小さいから、張力変換器の固有振動数もかなり高いものとなる。したがって変換器にかかる糸等がそれほど屈曲しなくて、張力にもとづく合力がそれほど大きくならなくても、重力や振動などの外力にもとづく雑音の侵入がかなり小さくできるから、いわゆるノイズ比を小さくすることができて電気的に大きな増幅を行うことが可能となり、結局高感度の張力測定器の実現が可能になるわけである。いいかえれば微小張力を、振動の大きい加工機械上で常時正確に観測できるような性能を有する張力計の一つの実現方法として、このような薄肉円管面のひずみを応用することがかなり有力な手段になるものといえよう。

そこでこのような原理を用いて試作してみた張力計の構造についていろいろと調べてみることにする。

第1図は肉厚0.1mmの中空パイプPをジュラルミンでつくり、その表面の適当な位置に抵抗線Aをはり付け、中空パイプの一端は固定して他端には測定すべき張力 F_t を偶力に変えて、この中空パイプの周りに回転力として作用させるような適当な構造の糸ガイドGを設けた試作張力変換器である。すなわち張力にもとづく偶力によって中空パイプがねじられるとパイプの表面にひずみを生ずるから、このひずみと一致して伸びを生ずるように抵抗線をはり付けておき、この伸びによる電気抵抗の変化を適当なブリッジ回路で電圧の変化に変換し、これを増幅して観測することにより張力を求めようとするものである。第2図は本張力変換器と併用すべく試作したひずみ計用搬送波発振器(3000 c.p.s.)と増幅器の回路を示すもので、適当な濾波回路をも設けて平均

(a)

(b)

(c)

ピッチ: P $P = \pi d_0$
 ピッチ長: L $L = \sqrt{2} \pi d_0$
 リボン寸法 巾: $0.50 \times 10^{-6} \text{ cm}$
 厚さ: $3 \times 10^{-6} \text{ cm}$
 抵抗: 約 $1 \Omega / \text{cm}$

(第 1 図)

的張力をも記録できるようにしてある。なお記録装置には各種のペン オシログラフ とか電磁型オシログラフを使用するようにしてある。

(2) 原理および性能

前にものべたように実際加工中の糸張力を測定するには、測定すべき糸の状態あるいは測定器(張力変換器)を、装置すべき場所に制約されて適当な構造の糸ガイドやこれを支持する機構を変換部に接続して力を伝える必要がある。すなわち第3図に示すようにいま F_t なる糸張力を測定しようとする場合は、この糸を3個の糸ガイド A, B, C を用いることによってV字型に角度 θ だけ屈曲させ、中央の糸ガイドに働く力

$$F = 2F_t \cos \frac{\theta}{2} \dots\dots\dots (1)$$

を変換部 M に作用させ、そのとき M 部から発生する適当な電気量から張力 F_t を測定するわけである。したがって糸ガイド等がある程度の質量を有することは避けられないから、この質量に働く外部からの加速度の F 方向の分力も測定すべき張力に重なり合って、場合によってはかなりの測定誤差を与える結果となる。特に張力変化の激しい場合あるいは振動のうけ易い場合は、その影響は相当大きくあらわれるものと考えられる。

(第 2 図)

(第 3 図)

第1図に示すひずみ計の原理を応用する張力変換器は、以上のような欠点を除く目的から糸張力を偶力に変え、この偶力で中空パイプをねじるとともにねじれの量から偶力の大きさをなわち張力を求めるように構成したものである。第4図は第1図の張力変換器に

(第 4 図)

おける糸の走行状態を示すものであるが、同図において糸ガイド B, B' における力の釣合は

$$F = 2 F_t \cos \frac{\theta}{2}$$

であるから、偶力 N の大きさは

$$\begin{aligned} |N| &= F \times L \times \sin \frac{\theta}{2} = 2 F_t L \cos \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \\ &= F_t L \sin \theta \end{aligned} \quad (2)$$

となる。θ は一定であるから |N| を測定することによって張力 F_t が測定できる。しかし偶力 N は力 F_t, F_t' の形成する平面を直角につらぬく軸の周りの回転力となるから、この回転軸が糸ガイド B, B' および回転力を電気量に変換する変換部の合成した質量の重心を通るようにえらべば、第3図の場合に問題になる重力とか振動あるいは衝撃的外力などはほとんど平行力と見なせて、これは回転軸上に働く拘束力と平衡して偶力とはならない。したがってこのような方法で張力の観測ができれば、かなり振動の激しい機械上に装置して急激に変化するであろう張力を測定しても、外力による影響はまず生じないものと考えられる。

さて張力 F_t によって回転力 M_t = F_t L sin θ が円管をねじるように作用すると、円管の表面にはせん断応力 τ が働く。τ は純粋せん断応力と見なされるから、これは円管表面で軸に 45° の方向の引張応力およびこれと直角方向の圧縮応力 σ と相等しくなる。

円管の外径を d_0, その肉厚を t とすると

$$\sigma = \tau \approx 0.64 \frac{M_t}{2d_0^2 t - 3d_0 t^2} \quad (3)$$

ただし t ≪ d_0, M_t は回転力

の関係になる。

円管材料のヤング係数を E, 単位長あたりの伸び (ひずみ) を Δε とすれば

$$\Delta \varepsilon = \frac{\sigma}{E} = 0.64 \frac{M_t}{(2d_0^2 t - 3d_0 t^2) \cdot E} \quad (4)$$

となる。

いま第1図に示すように円管の表面にその軸と 45° の方向およびこれと直角に交叉する方向にきわめて細い抵抗線 (または抵抗膜) をはり付けると、これらは (4) 式で与えられる伸びまたは縮みをうける。これらの抵抗体で四辺を形成する “Wheatston bridge” をつくり、ひずみを受けていないとき (M_t = 0 すなわち F_t = 0 のとき) このブリッジが平衡しているものとする、張力が働けばブリッジの相対応する二辺は Δl の伸びを受け、他の二辺は Δl の縮みを受けるにつれて各辺の抵抗は ΔR だけ増減する。(第1図参照) しかしてこのとき K を “gauge factor” とすると

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta l}{l} = K \Delta \varepsilon \quad (5)$$

の関係がある。K は抵抗材料により異なる常数であるが、一般に使用される抵抗体 (アドバンス, コンスタンタン等) ではほぼ 2 に等しいから (5) 式はさらに

$$\frac{\Delta R}{R} = 2 \frac{\Delta l}{l} = 2 \Delta \varepsilon \quad (6)$$

となる。

ブリッジの抵抗の四辺が ±ΔR だけ変化すると出力電圧は

$$\Delta V = \frac{\Delta R}{R} V \quad (7)$$

だけ変化する。ただし V はブリッジの励振電圧である。

したがって (2), (4), (6) 式より (7) 式は

$$\Delta V \approx 1.3 \frac{1}{2d_0^2 t - 3d_0 t^2} \cdot \frac{L \sin \theta}{E} F_t V \quad (8)$$

の関係のようにも表示できる。

(8) 式の関係よりブリッジの出力電圧は糸の張力 F_t に正比例することが認められよう。また ΔV は円管の寸法と材料のヤング係数, 糸の屈曲角度, 屈曲点の関係および励振電圧 V が定まれば張力 F_t のみに関係し、外部からの平行力の影響は受けぬこととなる。しかして試作したものでは抵抗線にアドバンスを使用し、円管にはジュラルミンを使用した、それらの弾性限度はひずみにしてそれぞれ 2000 × 10⁻⁶, 3000 × 10⁻⁶ であるから、本張力変換器はかなり大きなしかも激しく変化する糸張力を忠実に電気量に変換できることとなる。

本変換器の固有振動数 f は次式より計算できる。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{I}}$$

$$\text{ただし } S = 0.8(2d_0^3 t - 3d_0^2 t^2) - \frac{G}{l} - g$$

$$G = \frac{E}{2.6} \text{ (材料の横弾性係数)}$$

l : 円管の長さ

$$g = 980 \text{ cm/sec}^2$$

$$I = I_c + I_p \approx I_p \text{ (} I_c \ll I_p \text{)}$$

I_c : 円管の慣性モーメント

I_p : 滑車(糸ガイド)系の慣性モーメント

... (9)

ここで I_c がほとんど無視できる大きさであることが、固有振動数を大きくできるという本変換器の特長に対する一つの理論的根拠となる。(9)式の各符号に実際値を入れて計算してみると $f \approx 800 \text{ c.p.s.}$ となる。ただし $d_0 = 0.35 \text{ cm}$, $t = 0.005 \text{ cm}$, $l = 9.0 \text{ cm}$, $E = 7000 \text{ kg/mm}^2$ である。

また円管のねじれ角度 ϕ は

$$\phi \approx 1.3 \frac{M l}{G} \frac{1}{2d_0^3 t - 3d_0^2 t^2} \text{ radian} \dots\dots\dots (10)$$

となる。 $F_t = 100 \text{ g}$, $\theta = 165^\circ$ とした場合の計算を行ってみると $\phi \approx 0.3^\circ$ となる。しかしてこの場合の円管表面のひずみ $\Delta \varepsilon$ 及び応力 σ はそれぞれ (3), (4) 式より

$$\Delta \varepsilon = 40 \times 10^{-6} \text{ (ブリッジ四辺合計 } 160 \times 10^{-6})$$

$$\sigma = 280 \text{ g/mm}^2$$

となる。したがって繰返し荷重に耐えるひずみを静的な場合の1/3と仮定しても、この変換器は最大張力 2 kg まで十分使用できることとなる。

(3) 測定条件のかく乱について

糸等の観測物が張力変換器を通過するとき、一般に観測物とガイドとの間にすべり摩擦が生じたり、ガイド自体がこのすべり摩擦にもとづくトルクによって回転する際その軸受部に回転摩擦を生ずるため、加工物が各ガイドを通過することにその前後においてかなりの張力差を生じ、実際の加工条件とは異なった状態になるのが普通である。いいかえれば実際の運動とはかなり異なった運動をする糸等の張力を観測することとなり、張力測定の目的を害するばかりでなく、その加工状態に対しても悪影響を及ぼすようになるものである。

このような測定条件のかく乱を極力小さくすることは、すべての計測においてきわめて重要な事柄になるものである。本張力変換器の場合はこのような観点から車軸の回転摩擦のできるだけ小さい構造の滑車をガイドとして採用したが、それでもある程度の摩擦の影響が見られた。

すなわち第5図のように滑車に糸をかけたとき、 $F_t > F'_t$ となってまさに滑車が回り出そうとしている状態を考え、 F_t と F'_t との作用線の交点を D としよ

(第 5 図)

う。そしてこの点より軸の摩擦円に張力 F_t 側で切線 DM を引き、この線と軸の円周との交点を A とする。軸に働く全抵抗 R は A 点において AD の方向に働いており、 F_t と F'_t と R とによって滑車が平衡状態にあるから

$$\frac{F_t}{\sin(\alpha + \beta)} = \frac{F'_t}{\sin(\alpha - \beta)} = \frac{R}{\sin 2\alpha} \dots\dots\dots (11)$$

となる。また β は λ を摩擦角とすると

$$\sin \beta = \frac{OM}{OD} = \frac{r_2 \sin \lambda}{r_1 \csc \alpha} = \frac{r_2}{r_1} \sin \lambda \sin \alpha \dots\dots\dots (12)$$

となるから、第6図において各滑車を通過する前後の各部の張力の間には

$$T_3 = T_4 \frac{\sin(\alpha_{34} + \beta_d)}{\sin(\alpha_{34} - \beta_d)}$$

$$\text{ただし } \sin \beta_d = \frac{r_2}{r_1} \sin \lambda \sin \alpha_{34}$$

(第 6 図)

$$\begin{aligned}
 T_2 &= T_3 \frac{\sin(\alpha_{23} + \beta_c)}{\sin(\alpha_{23} - \beta_c)} \\
 \text{ただし } \sin \beta_c &= \frac{r_2}{r_1} \sin \lambda \sin \alpha_{23} \\
 T_1 &= T_2 \frac{\sin(\alpha_{12} + \beta_b)}{\sin(\alpha_{12} - \beta_b)} \\
 \text{ただし } \sin \beta_b &= \frac{r_2}{r_1} \sin \lambda \sin \alpha_{12} \\
 T_0 &= T_1 \frac{\sin(\alpha_{01} + \beta_a)}{\sin(\alpha_{01} - \beta_a)} \\
 \text{ただし } \sin \beta_a &= \frac{r_2}{r_1} \sin \lambda \sin \alpha_{01}
 \end{aligned} \quad \dots (13)$$

の関係がある。したがって滑車の両側の糸等の張力の差は接触角 α が大きいほど、また摩擦角 λ (摩擦係数) が大きいほど大きくなる。また滑車の径に反比例し、軸径に比例して変化するようになる。たとえば糸の下端におもりを吊って他端でこれを引き上げるときと引き下げるときとは軸の抵抗は逆方向に働くから、各部分の糸張力はかなり異なったものになるものである。

かようにガイドとして使用する滑車の軸受摩擦は走行中の糸に対してかなりの張力変化を与え、これはすべての張力計に共通する本質的な欠点になるものである。このような測定条件のかく乱を小さくするもっとも有効な方法の一つは糸のガイドに対する屈曲角(第4図の θ)を大きくして接触角 α を減少する方法で、 θ を増せば(2)式より感度は減少するが、実験によれば感度が減少する比率よりこのような誤差が少なくなる比率の方が大きく、また糸等の屈曲角を大きくすれば観測物の異常伸びによる損傷も防止できるものである。前にものべたように本張力変換器ではノイズ比がすこぶる小さいから増幅器の増幅度を大きくすることが容易で、このため糸等の屈曲角 θ をかなり大きくしても十分観測が可能であった。一例をあげれば $\theta = 165^\circ$ として 0.2 g 程度の張力を検出することが可能である。

3. む す び

本試作張力測定装置の構造ならびに性能は以上のべた通りで、近時数多く発表されている張力変換器に比べると加速度、振動、衝撃、摩擦などにもとづく測定誤差をはるかに少なくし得ることが認められた。

第7図は観測の一例として本張力変換器を力織機上に装置し、飛走するシャトルから緯糸が急速解舒される時の過渡的な緯糸解舒張力を電磁型オシログラフ(振動子はA型)で測定した結果を示すものであるが、かなり激しい力織機の振動による影響はほとんどあられず、急激に変化する張力状態が忠実に記録されることが認められよう。

本張力測定装置はかような急速度で変化する微小張力をも正確に観測する目的で、張力変換部の機械的構成について特に注意を払って試作したもので、電気的方法と

絹織機用シャトル A: タイミング軸
シャトル速度 11 m/sec B: 張力線図
120 den ビスコース レーヨン糸 C: 時間軸
(第 7 図)

しては現在広く応用されている“Unbounded strain gauge”の原理を採用したものの一例である。

著者はこのような電気的原理を応用する張力変換器を、さらにそれぞれの加工機械あるいは加工状態に適応するような構造にした幾つかのものを試作し、良好な結果を得ることができたので、次報ではこれらのものについて引続き発表する考えである。

なお本研究に対して種々御協力願ひ、その製品化に並々ならぬ御努力を続けられている株式会社渡辺測器製作所渡辺健次氏に対して深厚の謝意を表するとともに、実験その他の点で御協力願った東京工大酒井哲也氏に対し厚く感謝する次第である。

文 献

- 1) 内田豊作; “製織中における経糸張力記録の一方” 織工学誌, Vol. 5, No. 3, P. 145
F. Nistics, B. S. Sprague, R. W. Work; “A high-speed recording yarn tensiometer,” Text. Res. J., Vol. 22, No. 2 (1952)
R. F. Dyer, W. G. Fau, R. L. Beard; “Some of the factors influencing yarn tension in warping,” Text. Res. J., Vol. 22, No. 7 (1952)
W. Frenzel, H. Martin; “Messgeräte und Messverfahren zur Bestimmung der Kettfadenbeanspruchung beim Weben,” F. u. T., 257 (1951)
M. W. H. Townsend; “Weft tension in weaving,” J. Text. Inst., P. 699 (1954)
- 2) 久世, 川村; “磁歪現象を応用した二, 三の測定法” 織学誌, Vol. 6, No. 4, P. 67 (1950)
- 3) 内田, 久世; “緯糸張力に関する研究” 織学誌, Vol. 6~7, No. 36~46 (1950~1951)
- 4) 内田, 久世; “製織中の経糸張力を測定する一方” 織学誌, Vol. 6, No. 4, P. 67 (1950)