

デジタル世界にスリップリングは適合するか？

はじめに

さまざまな用途で、アナログからデジタルへの移行がますます増える中、設計者は、従来のアナログコンポーネントから、デジタルの同等品への変更の必要性に迫られています。これは、電気機械の業界において最も顕著に現れています。アナログレゾルバは次第にデジタルエンコーダに移行しつつあり、モータ制御ではデジタル駆動回路が主流となりました。システムの一部に回転が必要であり、電力およびデジタルデータにロータリ接続が必要な場合、設計者はどのように対応したらよいでしょうか。すべり電気接点を備えた従来のスリップリングで対応可能でしょうか。

問題点

スリップリングは元々、回転プラットフォームと静止構造体間で AC および DC 電力を伝送するために設計されました。また、多くの用途では、比較的低い帯域幅のアナログおよびデジタル制御信号の伝送も必要とされました(これは現在でも必要とされています)。このような環境で、従来のスリップリングは非常に優れた性能を発揮しています。上記に加えて、今日の制御システムでは、スリップリングで高帯域幅のアナログおよびデジタル信号を伝送することも求められています。その代表的な例は、アナログおよびデジタルのビデオ信号です。ごく最近まで、帯域幅の単位は、通常数十 MHz で十分でした。しかし今後は、これよりも何桁も高い帯域幅が必要とされます。

基本的なスリップリングの構成

基本的なスリップリング(図1に概要を示す)は、4つの要素(またはコンポーネント)で構成されます。

- 1個以上の回路経路を提供する、回路アセンブリ。各回路は導電性で、360°フル回転する回路アセンブリにおいて回路経路を提供します。
- アセンブリの回転体(通常は回路)と静止体間の電気接点を提供するブラシ。ブラシは、通常は静止構造体上に配置されているブラシブロックアセンブリに取り付けて、回路に搭載します。
- 外界と回路/ブラシを接続する入出力リード線。
- スリップリングアセンブリの配線に接続するコネクタ。コネクタはオプション部品であり、多くの場合はお客様が指定します。

スリップリングに影響する要素

スリップリングを経由して伝送されるデータのデータレートは、以下の要因によって決まります。

- 回路およびブラシの周波数応答または挿入損失
- アセンブリのインピーダンス(周波数関数として)
- デバイス通過の微分時間遅延(周波数関数として)
- 回路間のクロストーク
- リード線およびコネクタの周波数応答

最も主な要因は、周波数応答(帯域幅)です。帯域幅の不足により、デジタル受信機が受信した信号を正しく認識できない程度までデジタル信号が減衰または歪んでしまうと、デジタルデータストリームにエラーが発生し始めます。デジタル信号は、基本信号速度の基本周波数と、基本周波数の奇数調波で構成されます。スリップリングに必要な帯域幅は、データレートの数倍です。

たとえば、1MHz 方形波には、5～7MHz の帯域幅(第5および第7高調波)が必要です。データレートの上昇に伴い、最終的に高調波は外部システムの入力および出力インピーダンスに一致します。設計者は、伝送回線理論を使用して、回路のジオメトリ、スペース、および導電材料を変えることで、必要なインピーダンスを実現します。多くの場合、70～150Ωの回路およびブラシインピーダンスは実現可能ですが、これは、現在のデジタルシステムの多くに適しています。概して、直径の小さい回路のほうが、データレートは高くなります。データレートが高く回路の直径が大きい場合(またはそのいずれかが該当する場合)は、複数のタップと複数のブラシを使用して、信号経路の長さを最小限に抑えることが多いです。

最適なパフォーマンスを実現するためには、高周波のデジタル信号は別途駆動して、CAT5 または CAT5 などのシールド付きツイストペアケーブルを使用してスリップリングに接続することが推奨されます。この配線(シールドを含む)は、スリップリング内も通します。スリップリングの内部配線にもシールド付きツイストペアケーブルを使用することが理想的ですが、物理的な

制約のため、実現不可能な場合もあります。コネクタを使用する場合は、システム要件に準拠したインピーダンスおよび周波数応答を持つものを設計または選択する必要があります。

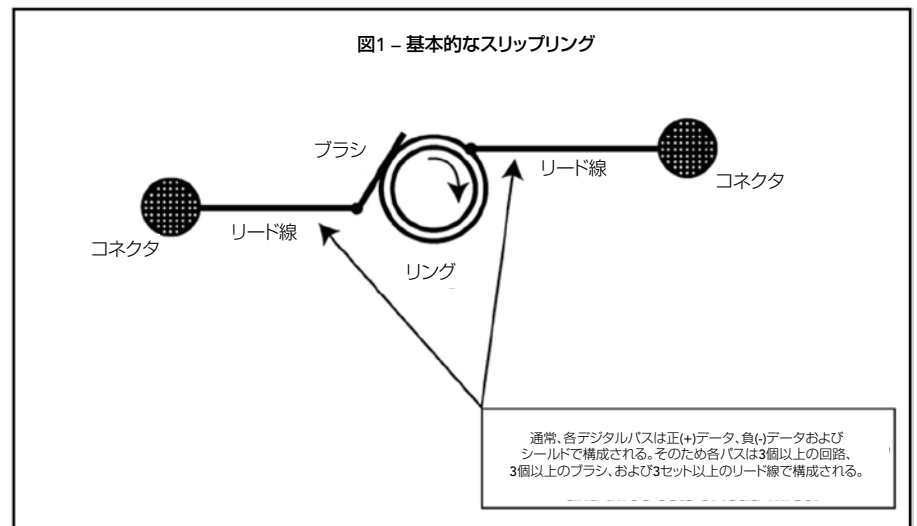
また、高感度回路間のクロストークも、適切なリード線経路の選択とシールドの使用により、最小限に抑えます。スリップリング内では、高感度回路(ビクティム)は、ノイズの多い回路(ソース)からできる限り離して配置する必要があります。未使用の回路はすべて、使用しているケーブルの特性インピーダンス内で終端する必要があります。

高性能スリップリングの指定

ここでは、スリップリングのパフォーマンスを決定する要因、およびスリップリングが動作するシステム全体により課せられる制限事項について説明しました。これで、単純に「50mbps を伝送する」デバイスを要求することが適切ではないとご理解いただけたはず。最適なソリューションは、システム全体を把握および理解して初めて見つかるものであり、多くの場合、パフォーマンス、サイズ、重量、回路数、外部の要因、およびコストといった要件間で折り合いをつける必要があります。

以下に、特定の用途で満足のいく動作を得るために、指定する必要のあるパラメータを示します。

- データ伝送に使用するデータバス(Profibus、イーサネット、Firewire など)
- スリップリングの接続に使用されるケーブルのタイプ
- 送信機と受信機間の最大ケーブル長
- 最大データレート
- 許容可能な最大エラー率
- 最大サイズ(直径、長さなど)
- 回路数および各回路の定格(電圧、電流など)
- 最大回転速度
- 動作環境



ムーグは、標準の「既製品」設計も含め、数千のスリップリングを設計しています。弊社の技術スタッフは、既存の設計の変更、または必要な場合は全く新規の設計を承ります。ただし、不要な改造のご注文を避けるため、お客様にはまず標準設計品を評価していただくことをお勧めしています。

弊社では、多くの標準設計品について、高データレートへの対応性能をテストしました。貫通穴を装備した、最大 152.4mm のデバイスがテスト済みです。このテストには、挿入損失、周波数応答、ビットエラー率、微分時間遅延、およびインピーダンス対周波数特性が含まれます。一部のケースでは、設計変更によりパフォーマンスが大幅に改善することを特定し、変更を実施しました。概して、テスト対象となったデバイスはすべて、50mbps 以上のデジタルデータレートに対応可能です。これは、弊社の標準ユニットが、世界中で使用されている、多岐にわたる標準データシステムにおいて、適切に動作することが可能であることを証明しています。その一例としては、Device Net、CAN Open、Profibus、イーサネット 10Base T などがあります。さらに、テスト対象の一部のモデルは、イーサネット 100Base T および Firewire (400 mbps) にも適していました。

スリップリングの基本

標準スリップリングは、4つの要素またはコンポーネントで構成

- 回路アセンブリは 1 個以上の回路経路を提供します。各回路は導電性で、360° フル回転する回路アセンブリにおいて回路経路を提供します。
- ブラシは、アセンブリの回転体（通常は回路）と静止体間の電気接点を提供します。ブラシは、通常は静止構造体上に配置されているブラシブロックアセンブリ上に取り付けて、回路に搭載します。
- 入出力リード線は、外界と回路 / ブラシを接続します。
- コネクタは、スリップリングアセンブリの配線に接続します。コネクタはオプション部品であり、多くの場合はお客様が指定します。

非常に要求の厳しい用途では、シングルチャネルおよびマルチチャネルの光ファイバロータリジョイント (FORJ) を弊社標準のスリップリングアセンブリに統合しました。FORJ は、非常にデータレートの高い信号を伝送する場合に使用されたり、超低クロストークまたは高ノイズ耐性が必要とされる回路に使用されたりします。この場合、従来のスリップリングテクノロジーは、電力およびその他の制御信号の伝送に使用されます。また、光電変換を行うハードウェアも提供しています。

用途

産業用および商用

- 半導体装置
- 工業用機械
- ロボット
- 医療機器
- 包装装置
- ケーブルリール
- 実験室用機器
- CCTV カメラ用マウント
- 照明
- ロータリインデックステーブル
- レートテーブル
- 医療用 CT スキャン装置
- アミューズメント施設の乗り物

航空宇宙用および軍事用

- 戦闘シミュレーション
- 慣性航行システム
- ミサイル兵器システム
- 衛星アセンブリ
- 無人航空機
- 航空カメラプラットフォーム
- 船舶通信システム
- レーダー
- 戦車
- 軽装甲車
- ヘリコプター
- 航空機

海軍用

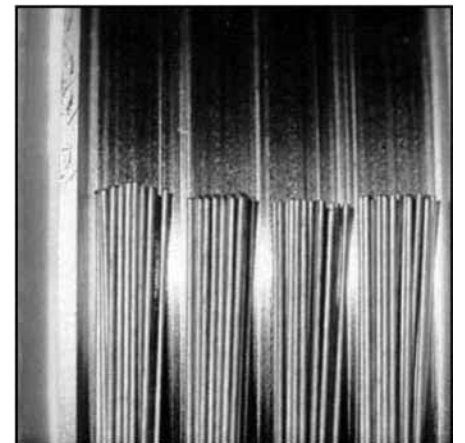
- 遠隔操作探査機 (ROV)
- 地震探査
- 海洋観測用ウィンチ
- 海中通信および制御
- 浮体式生産貯蔵積出設備 (FPSO)
- ダイビング
- 海軍用計装機器
- 油井掘削 / ワイヤログおよび掘削

ムーグのファイバブラシ接点テクノロジーは、当初、軍事および航空宇宙用途での重要な問題を解決するために開発されました。スリップリングが非常に重要な役割を担う用途において、何年にもわたり成功の実績を積み重ねてきたことにより、現在では、ファイバブラシテクノロジーは商用製品でも使用できるようになっています。

商用 / 産業用の用途でのファイバブラシテクノロジー

長年にわたり、従来のロータリ接点スリップリングは、潤滑モノフィラメントブラシまたは自己潤滑式合成ブラシの両方を使用してきました。これらの従来のアプローチはテストや現場での実際の使用において十分な性能を発揮していますが、それでも、より優れた性能は常に求められます。そのため、弊社ではファイバブラシテクノロジーを開発しました。さまざまな接点テクノロジーのメリットを比較した表を、109 ページに示します。

今日、産業用 / 商用装置のスリップリングの要件はますます厳しくなっています。高速動作、長寿命、メンテナンスの必要がないこと、およびデータ転送機能は、一般的にスリップリングの性能に求められる要素です。弊社では、先進材料研究開発部門でこれまで進めてきた開発を生かし、ファイバブラシテクノロジーを、コスト効率の高い商用製品に転換することで、今日の非常に重要な用途に対応しています。



軍事用 / 航空宇宙用の用途では、摩耗くずの発生が少ない、低電気ノイズ、高電流 / 低電流両方に対応できる伝送能力、低気体放出、および長耐久寿命といった特性を持つスリップリングが必要とされます。また、これらのスリップリングは、幅広い動作温度範囲やあらゆるブラシング表面速度、および大気 / 真空条件で問題なく動作することが必要です。

ファイバブラシ接点テクノロジー

ファイバブラシとは、すべり電気接点の特定の設計を指す用語です。ファイバブラシは、上記の図のように、平行に揃えられ、金属のチューブ内で終端している個別の金属繊維（ワイヤ）の集まりです。このカンチレバー設計では、ファイバブラシ束の終端されていない非固定の端が、回路表面の溝に乗ります。

ファイバブラシスリップリングテクノロジー

多くのメリット

軍事用 / 航空宇宙用の用途では、従来のスリップリング接点よりもファイバブラシのほうが多くの明確に測定できるメリットがあります。

- 1 ブラシ束で複数の回路接点
- 大気環境および真空環境で動作可能
- 接点表面に潤滑が不要
- 長寿命
- ファイバ 1 本あたりの接触力が弱い
- 低接触摩耗率
- 高電力回路密度
- 低動的接触抵抗 (ノイズ)
- 高電流 / 低電流伝送能力
- 低気体放出
- 摩耗くずがほとんど発生しない
- 広い動作温度範囲
- 広いブラシ / 回路表面速度範囲

実績のあるパフォーマンス

ムーグのファイバブラシは、従来のすべり接点設計に代わり、ますます高まるスリップリングの性能要求に対応するように開発されました。このテクノロジーは、以下のような、要求の厳しい用途で使用されています。

- CT スキャン装置
- 高速テスト
- ロボット溶接システム
- 高速インライン検査システム
- レーダープラットフォーム

発展の歴史

ムーグは、1953 年に、軍事および航空宇宙産業に信頼性の高いスリップリングを提供するサプライヤーとして発足しました。以降長年にわたり、宇宙、兵器、航空機、およびその他の極めて重要なプロジェクトの要求において、高品質で精度の高い製品を提供するサプライヤーとしての評価を得てきました。このような非常に厳しい品質およびテクノロジーは、現在、弊社商用製品グループに受け継がれています。弊社では、防衛用途で設計および製造されたテクノロジーを、成長を遂げている標準商用製品ラインで使用するよう適用しました。

弊社の経験、専門知識はすべて、お客様のために役立つものであり、実際にどの程度役立つかも測定可能です。お客様の用途を包括的に理解し、お客様とチームとして連携することで、お客様のニーズを、弊社の技術および製造部門に効率よく盛り込むことに成功しています。弊社では以前より商用スリップリングチームを設立しており、このチームでリードタイムの短縮、および迅速かつ正確な特殊設計の作成に重点的に取り組んでいます。

テクノロジーの比較

通常、航空宇宙用のスリップリングおよびブラシ (すべり電気接点) は、潤滑モノフィラメントワイヤブラシまたは自己潤滑式合成ブラシなどの従来の接点テクノロジーを使用して設計されます。これらのアプローチは、多数のテストと実際の飛行経験を通じて、成功が認められています。しかし、これらのアプローチにはデメリットもあります。

合成ブラシ

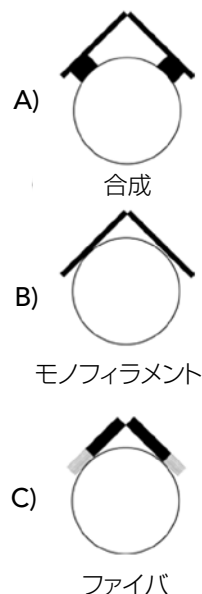
モノフィラメントブラシとは異なり、合成ブラシでは、ブラシ構成に組み込み式固体潤滑剤を追加することで、自己完結的に潤滑を行います。この潤滑機構の性質では、ブラシから回路に潤滑剤を移す際に、ブラシに摩耗が発生することは避けられません。この摩耗により、スリップリング内には、導電性の摩耗くずがある程度発生します。通常、適切な設計手法が守られていれば、この摩耗くずが少々発生しても問題はありますが、航空宇宙用スリップリングに長寿命が求められた結果として、許容できない程度までこの伝導性摩耗くずの量が増える可能性が生じるようになりました。

また、合成ブラシスリップリング設計で使用される接点材料は、気体の吸収により汚染されるおそれがあります。この汚染の最も主要なものには銀の硫化があり、これは表面の曇りとして現れます。178℃未満の温度にさらされた場合、この膜には、半導体特性 (温度の上昇に伴う導電性の上昇) が現れます。低温条件下で硫化銀の膜が存在すると、低電流回路において、許容できない程度の高い接触抵抗が発生するおそれがあります。以下に、さまざまなタイプの接点テクノロジーの特性をまとめた表を示します。

モノフィラメントブラシ

航空宇宙用のモノフィラメントブラシが正しく機能するかどうかは、接点表面の計画的な潤滑に依存します。使用されている潤滑剤の多くは、NASA の気体放出要件を満たしておらず、ほとんどの場合低温条件下で粘度特性が低下します。この設定テクノロジーを使用する設計では、システムの寿命要件期間全体にわたり、十分な潤滑を確保できるように、分析を行う必要があります。

ブラシのタイプ



材質の選択

軍事用または航空宇宙用の設計では、材質の選択が重要な特長の 1 つです。さまざまな考慮事項の中でも特に、気体放出の低減、異なる熱膨張の制御、電解腐食の低減、および核硬化に配慮して、材料を慎重に選択する必要があります。ファイバブラシスリップリングの材料選択は、従来のスリップリング設計に類似していますが、大きな違いは接点にあります。ファイバブラシの接点 (ファイバと回路の表面) は、銅、金、銀、およびパラジウムの合金を使用して製造できます。実際に接点材料を選択する際には、スリップリングの電気的要件が大きな決め手となります。ムーグは、すべての材質および材質サプライヤーをコントロールして、一貫した品質を確保しています。

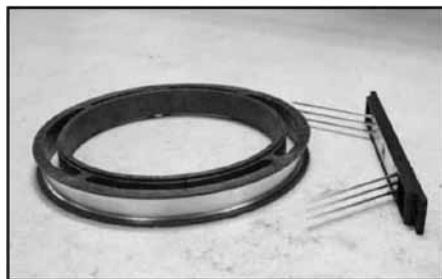
商用ファイバブラシ製品

弊社の商用ファイバブラシ製品には、最大 100A の電力機能と、低レベルのデータ伝送を同一のハウジング内で実現した、さまざまな製品が含まれます。これらの製品は、すぐに入手できる製品にお客様の要件を反映できるように、構成の自由度が非常に高くなっています。

ファイバブラシスリップリングテクノロジー

商用セパレート製品

これらの製品は、すぐに入手できる製品にお客様の要件を反映できるように、構成の自由度が非常に高くなっています。



これらの筐体スリップリングカプセルに加えて、弊社では、ファイバブラシセパレートも提供しています。システムのサイズまたはコストの制約により、「内蔵型」カプセルの使用が実用的でない場合、ファイバブラシセパレートは優れた代用品になります。これらのセパレートは、次の構成で使用できます。

穴径	電流
1.8"	2A
2.8"	5A 10A 30A 50A
4.0"	10A 30A 50A

ファイバブラシセパレートは、適切に取り付けおよび位置合わせすることで、内蔵型カプセル設計と同様の高い性能特性を発揮します。

弊社スタッフ

弊社は、電気、機械、製造、およびソフトウェアのエンジニア、冶金技術者、化学者、物理学者、および物質科学者をスタッフとして擁しています。研究および製品開発に重点を置くことにより、弊社は、実世界で製造に関する問題を解決できる、専門知識を培ってきました。分析施設内で最先端のツールを使用することで、包括的な環境テスト、較正、および検査サービスを提供しています。弊社には、トライボロジ(摩擦、摩耗の科学)、精密歯車、磁気回路設計、PWMアンプ設計、およびこれらを支える物質科学における専門知識があります。

弊社のエンジニアは、お客様の既存の設計をもとに設計を行うことも、カスタム設計を作成することも可能です。

一貫した品質

ムーグは、品質の高い製造および製品開発に継続して力を入れることで、弊社製品がお客様の要件および非常に厳しい品質目標を満たすようにしています。弊社では、総合的品質管理プログラムをコミットし、「初めから正しい方法で行う」と、「ゼロ不良」を方針として掲げています。また、ISO9001 認証も取得し、製品の一貫した品質と信頼性の高いパフォーマンスを確保しています。

最新の取り組みは、Demand Flow® Technology (DFT) です。DFT は、仕掛り在庫を経済的に管理する、需要志向の製造フローシステムです。このコンセプトは、すべての仕掛り品を可視的に管理できる「視線」を前提としています。このコンセプトは、お客様のスケジュール変更への柔軟かつ効率の良い対応、在庫低減、および、組織運営の改善に役立っています。

この取り組みによるメリットには、ターンアラウンドの短い作業に対応できるプロセスの合理化、サイクルタイムの短縮によりコスト削減、お客様への素早い対応などがあります。

(1) Roberts E.W. [Sliding Electrical Contacts in Space: Observations on Existing Technology and New Trends in Low-Speed Applications, European Space Tribology Laboratory]

Demand Flow® は、JC-I-T Institute of Technology, Inc. の登録商標です。

宇宙用途におけるすべり電気接点の比較

合成ブラシ Ag / MoS2 / グラファイト	モノフィラメントブラシ 潤滑あり	ファイバブラシ 潤滑なし
多数の飛行履歴	かなりの程度の飛行履歴	飛行履歴増加中
気体放出要件に対応	気体放出要件に非対応	気体放出要件に対応
自己潤滑接点(ブラシ内に固体潤滑剤)	接点表面に液体潤滑剤が必要	オイルまたはドライフィルムによる潤滑は必要なし
大きなリング間軸方向ピッチが必要	必要な軸方向ピッチは非常に小さい(合成ブラシのピッチの50%)	必要な軸方向ピッチは合成ブラシより小さい(合成ブラシのピッチの70%)
非常に多くの異なるプロセスを対象とした製造	異なるプロセスがごく少数の製造	異なるプロセスがごく少数の製造
摩耗くずの発生は大量(ファイバまたはモノフィラメントブラシの約100倍の摩耗率)	合成ブラシよりも摩耗くずの発生はかなり少ない	合成ブラシおよびモノフィラメントブラシよりも摩耗くずの発生はかなり少ない
湿度の高い環境で使用した場合、電気ノイズが高い	大気/真空環境で電気ノイズが低い	大気/真空環境で電気ノイズが低い
真空または乾燥した不活性雰囲気中で動作する必要あり	潤滑剤が存在する大気または真空環境で動作可能	大気または真空環境で動作可能
広い動作温度範囲	動作温度範囲は粘度により限定される	広い動作温度範囲
広い表面速度範囲	表面速度範囲は限定される	広い表面速度範囲