

卒業論文要旨

磁気浮上を用いた材料試験装置の制御

Control of material testing and equipment using magnetic levitation

システム工学群

機械・航空システム制御研究室 1230350 中村 響

1. 緒言

近年,磁気軸受,磁気浮上式鉄道,ベアリングレスモータなど広い分野で大きさや仕組みが違う磁気浮上技術を用いた機器が使われている.その理由としては,磁気浮上技術を用いることにより,機械的摩擦がなくなるため,潤滑油が不要となり,メンテナンスにかかるコストが大幅に削減できるからである.その他の用途として,磁気浮上技術を引張試験に応用したものが提案されている⁽¹⁾⁽²⁾.磁気機構を用いることにより,非接触で試験片を支持できるため,液体中などの環境での試験が容易になる.しかし,この方法は,磁気浮上機構は試験片の下方だけを非接触支持する機構であり,試験片の上方は機械的に接触しており,真空中などの試験を行うことが難しい.

この問題を解決するために,試験片を完全に非接触浮上させた非接触引張試験装置 (MLTTD) を提案する.真空,腐食性液体,腐食性ガスなどの特殊環境中に,試験片や浮上に必要な最小限の機構だけを設置するため,特殊環境を保持するスペースが少なくなり,材料試験が容易になる.また,磁気浮上装置の浮上機構を工夫することにより,引張試験だけではなく種々の応力試験に適用できる.今回は,提案する非接触引張試験装置の構造と動作原理を説明し,浮上のシミュレーションを行い,浮上実験と引張実験を行う.

2. 磁気浮上引張試験装置 (MLTTD) の構造と原理

提案された磁気浮上引張試験装置 (MLTTD) の構造を図 1 に示し,MLTTD の主要コンポーネントを表 1 に示す.図 1 と表 1 に示すように,上部 EM と呼ばれる 2 つの EM をフレームワークの上部に固定し,下部 EM と呼ばれる 1 つの EM をロードセルによってフレームワークの下部に固定する.3 つの EM の電流は,3 つのコントローラーによって個別に制御される.MLTTD の中央にある浮上物体は,2 つの上部フローター,1 つの上部ボルト,2 つの固定具,2 つの下部フローター,および 1 つの下部ボルトで構成されている.

MLTTD の動作原理は,まず,電流が個別に制御される 2 つの上部 EM(電磁石)に電流が流れることにより,電磁力が発生し,2 つの上部フローターを引きつけることで,浮上物体が浮上する.次に,2 つの渦電流センサーは,2 つの上部フローターの垂直方向の位置をコントローラーに送る.コントローラーは,2 つの上部 EM の電流を調整し,上部フローターと固定具を特定の高さに維持する.浮上安定後,底部の EM が帯電し,底部のフローターに張力が発生する.底部の EM の電流が徐々に増加することにより,底部 EM から発生する張力が大きくなるが,上部フローターと固定具は試験片が破壊されるまで元の位置に維持される.ロードセルは引張力を測定して記録する.

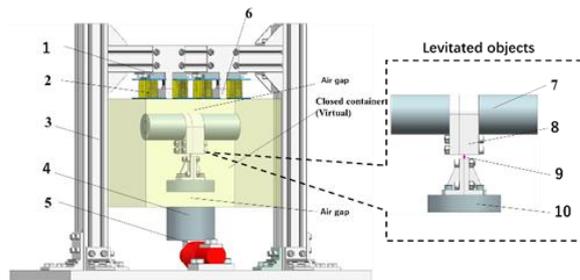


Fig.1 Structure of MLTTD

Table 1 Main components MLTTD

No	Name	Material	Number
1	Top EM core	SS400	2
2	Coil winding	UEW Copper coil	6
3	Aluminum Profile	A6063	3
4	Bottom EM core	SS400	2
5	Load cell	NEC 9E01-L35	1
6	Eddy current sensor	SENTEC HA-80R	2
7	Top floater	SS400	2
8	Fixture	A6063	2
9	Specimen	SUS304	1
10	Bottom floater	SS400	2

3. モデリングとシミュレーション

3.1 モデル化

今回は, PD コントローラーを使用する. 適切な PD ゲインを得るためには, 電磁石の磁力モデルを求め, それをもとにシステム線形モデルを得る必要がある. 磁力モデルは CAD モデルに基づいて, FEM 解析ソフトウェア (J-Mag) を用いて, 磁力を計算することができる. 得られた磁力を電流とエアギャップ, より

3.2 シミュレーション

シミュレーションでは, LQR 法で PD ゲインを調整し, システムが良好なダイナミクス性能を発揮する PD ゲインを見つける. 図 2 にエアギャップのステップ応答のシミュレーション結果を示す. P ゲインは 700 Am^{-1} , D ゲインは 10 Asm^{-1} に設定した. エアギャップが 2.0mm でコイルに 0.86A の電流を印加した状態を平衡状態としている. 1秒後に重心変位方向に 0.1mm のステップ外乱を入力した. シミュレーション時のダイナミクス性能の評価基準は, オーバーシュートと整定時間である. 基本的に, PD ゲインは, オーバーシュートをできるだけ小さくし, 整定時間は短くした.

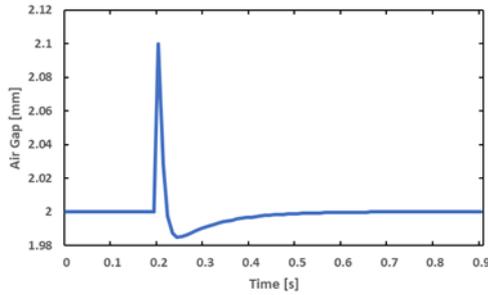


Fig. 2 Numerical simulation result of Air Gap

3.3 浮上実験

図 3 に、試験装置のモデルのパラメータを示す。U 字型電磁石への入力電流を i_1, i_2 、円筒形電磁石への入力電流を i_3 とする。また、U 字型電磁石の最下部と上部フローターの最上部との距離を z_1, z_2 、浮上物体への引張負荷力を F_t とした。

図 4 に、エアギャップ z_1, z_2 のステップ応答の結果を示す。P ゲインは、 2000 Am^{-1} 、D ゲインは 6 Asm^{-1} に設定した。LQR 法を用いて、シミュレーションでダイナミクス性能が良いゲインを参考にチューニングを行い試作機で浮上実験を行った。浮上実験の目的は、実験機のシステムのダイナミクス性能を評価することである。0.3 秒後に重心変位方向に 0.15mm のステップ外乱を入力し、その時のオーバーシュートと整定時間と定常誤差の値で評価する。結果、 z_1, z_2 の定常誤差は、0.008mm, 0.012mm と小さいので、システムの定常性能は良い。整定時間は 0.19 秒となり短い事が分かる。また、オーバーシュートは、0.01mm と大きい結果となった。この理由は、応答速度が速いと加速度が大きいので、目標値より行き過ぎてしまい、オーバーシュートが大きくなるからである。しかし、引張試験は非常に速い応答速度を必要とするため、ある程度のオーバーシュートは避けることはできない。

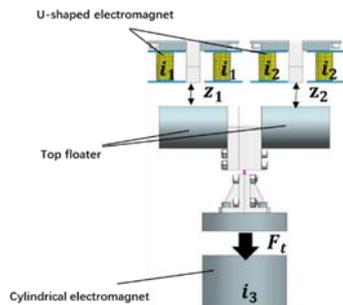


Fig.3 Test equipment parameters

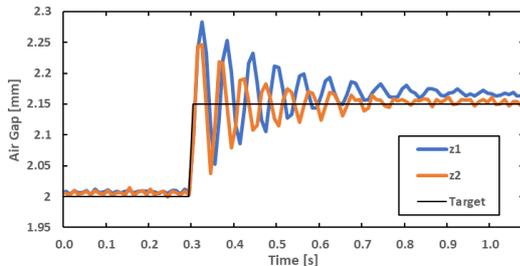


Fig.4 Air Gap in levitation experiment

4. 引張実験

3 章では、良いダイナミクス性能を持つ PD ゲインを求めた。更に、外乱に対して強いロバスト性を持たせたいので積分器を追加して、PID コントローラーにする。今回、外乱は引張力になる。引張実験の目的は、浮上物体に引張負荷力を加えた際、浮上物体が落ちないように入力電流を制御し、エアギャップの定常誤差を小さくすることである。今回、PID 制御器を用いて、浮上物体に引張負荷力を加えた際の U 字型電磁石への入力電流 i_1, i_2 、円筒形電磁石への入力電流 i_3 とエアギャップ z_1, z_2 の応答を見た (図 5, 6, 7, 8)。図 6, 7 より、入力電流 i_1, i_2, i_3 は、放物線の形になっている。しかし、入力電流 i_1, i_2 は、 i_3 に比べて緩やかな変化である。これは、入力電流 i_1, i_2 は、浮上物体の元々の重さがあり、装置の質量に比べて、負荷力の変化が小さいからである。

図 8 より、エアギャップ平衡点 2.0mm からの変位量は、0.015mm 以内だった。これは、積分器が引張力 (外乱) に対しての影響を低減しているからである。

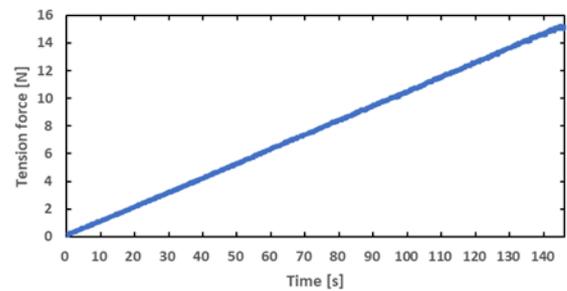


Fig.5 Tension force

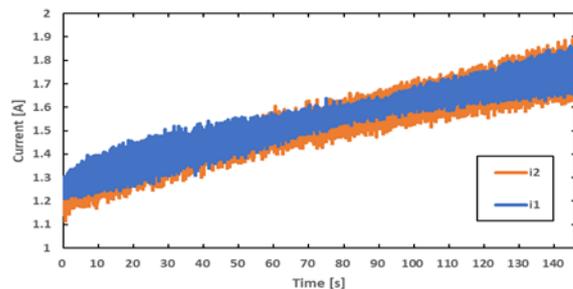


Fig.6 Current i_1, i_2 in tensile experiments

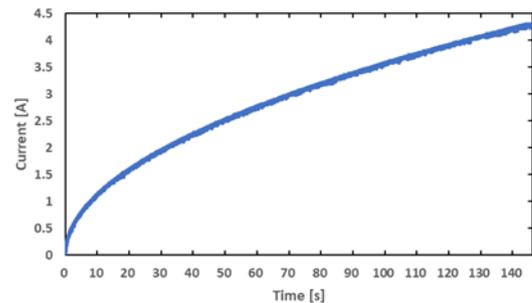


Fig.7 Current i_3 in tensile experiments

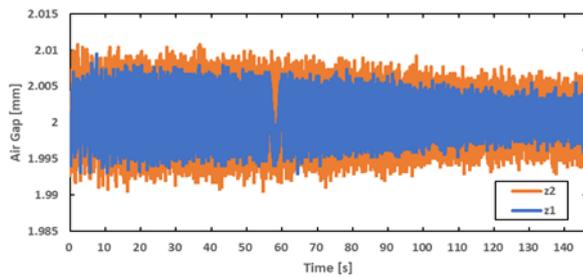


Fig.8 Air Gap in tensile experiments

5 結言

本論文では, 磁気浮上引張試験装置 (MLTTD) という新しい試験装置を提案した. これは, 試験片を非接触で磁力によって引っ張ることができる装置である. また, 浮上のシミュレーションは, 良い定常特性を示し, 浮上実験も安定して浮上させることに成功した. 実際の引張実験では, 浮上物体に引張力を与えた際, 落下することなく安定して試験を行うことができた. 今後は, 曲げ, ねじり, 圧縮などの他のタイプの荷重を可能にする磁気浮上材料力学試験装置に応用したいと考える.

参考文献

- (1) 多田直樹, 西原亮一, 真砂秀行, “永久磁石を用いた小型鉛フリーはんだ接合部の引張試験”, 台北, 台湾, 2012年, pp.145-148
- (2) 多田直樹, 西原亮一, 真砂秀行, “永久磁石を用いた小型鉛フリーはんだ接合部の引張試験”, 台北, 台湾, 2013年, pp.186-189