

上下振動の影響を抑えた車両左右振動加速度測定技術

車両構造技術研究部 車両運動

副主任研究員 城取岳夫

1. はじめに

鉄道車両用の台車を新しく開発する際には、安全性や安定性、乗心地の観点からばねの剛性やダンパーの減衰係数が決められる。しかしながら、実際に台車を製造し走行試験を行うと設計値と異なる場合がある。その原因の1つとして、台車枠、ばね、ダンパー受の剛性等により実際のばねやダンパーの諸元が設計値と異なっていることが考えられる。そこで、台車枠、ばね、ダンパー受の剛性等も含めた実際のばねの剛性やダンパーの減衰係数を走行時に同定する必要が生じる。

このため、走行時の軸箱加速度と車体加速度からばねやダンパーの各種諸元を同定する方法を検討している。左右系のばねやダンパーの同定のために軸箱の左右振動加速度を測定する際、左右振動加速度は数 m/s^2 (数G)程度のオーダーであるが、上下振動加速度の影響を考慮して、左右振動加速度測定にも上下振動加速度と同程度の容量の加速度計を使用しており、精度が高い左右振動加速度が得られない原因となっている。具体的には、走行時の軸箱には上下振動により $5 m/s^2 \sim 10 m/s^2$ (約 50G~100G)の加速度が発生するため、左右振動加速度の測定にも定格容量 $5 m/s^2 \sim 10 m/s^2$ の加速度計を使用しなければ加速度計が破損する。

そこで左右振動加速度の測定では上下振動の影響を抑えた環境を作り、その中で左右振動加速度を測定すれば定格容量の小さな加速度計を左右加速度測定に使うことができ、その結果、測定精度が上がると考え、その方法を検討したので報告する。

2. 測定を不正確にする要因

一般に、加速度の測定を不正確にする要因には、加速度計の非線形性、ヒステリシス特性、非再現性、横感度がある。これらは、加速度センサーの仕様において定格容量の数%と定義されている。それゆえ、測定対象となる現象に近い、より低い定格容量の加速度計を使うことが有利である。鉄道では曲線通過時の乗心地の基準 $0.008 m/s^2$ (0.08G)があり、同定は車内と軸箱の伝達関数を求めることから軸箱でも同程度の精度の測定を行うとすれば、 $0.001 m/s^2$ (0.01G)程度の分解能が必要である。しかしながら、許容過負荷が定格容量に依存するため、加速度計の破損を回避するには上下方向の著大加速度に見合った高い定格容量の加速度計を選ぶ必要が生じる。例えば、定格容量 $10 m/s^2$ (約 100G)で、定格容量の1%の線形性を持つ加速度計を左右に使用した場合、線形性誤差は $0.1 m/s^2$ (約 1G)程度となり、計測したい $0.001 m/s^2$ (0.01G)程度の分解能に対して大きくなり問題となる。

3. 高左右振動加速度精度測定装置の開発

精度の高い左右振動加速度測定装置を目指して開発を行ったので、その開発概要を示す。

3.1 高精度測定装置 I 型

最初に、上下方向と左右方向をばね要素により免振する装置を考案した。図1に装置の写真を示す。また、図2には機構の模式図を示す。この装置を車両の軸箱に取り付け鉄道総研内の試験

線で走行試験を行った。しかし、左右ばね剛性の調整により、所望の周波数に共振周波数を合わせることができなかった。これは、上下方向の減衰力が左右方向の剛性と連成していたためと考えられる。

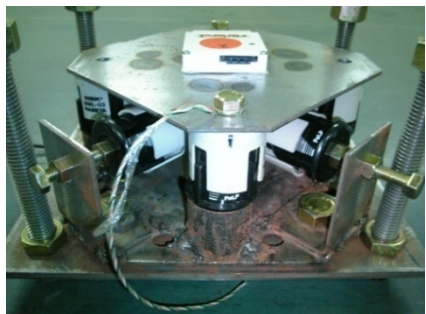


図1 高精度測定装置 I 型

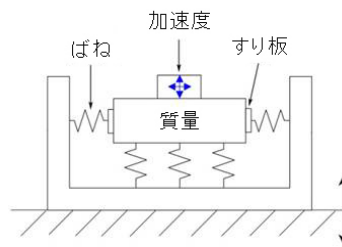


図2 高精度測定装置 I 型の機構

3. 2 高精度測定装置 II 型

I 型の機構で最適な左右方向のばね剛性と上下方向の減衰力を見出すのは困難とわかったので、別の観点から検討した。これは、上下方向は I 型と同様にスプリングばねとしてスライドテーブルにボルト締結し、左右方向は無敵大の剛性を得られるようにしたものである。

一般に免振機構では、共振周波数は低い方が有利なことや軸はりに取り付けること、入手性を考慮し、ばね定数 0.3N/mm とし許容変位 5mm とした。ばねが底着きしないように走行試験で質量を調整したところ、最終的に共振周波数 8Hz 程度とすることができた。

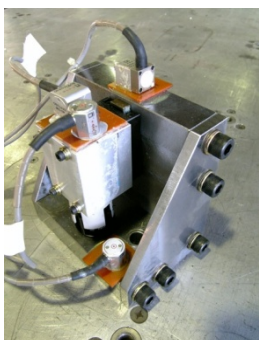


図3 高精度測定装置 II 型

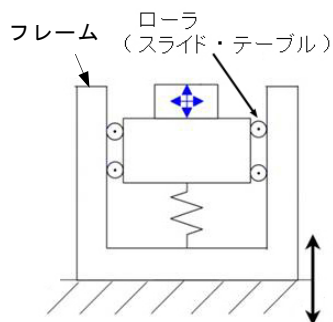


図4 高精度測定装置 II 型の機構

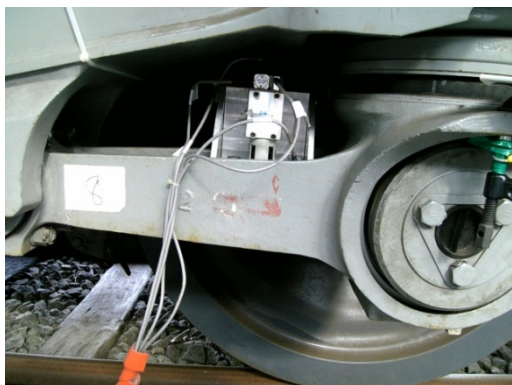


図5 軸はりへの装着

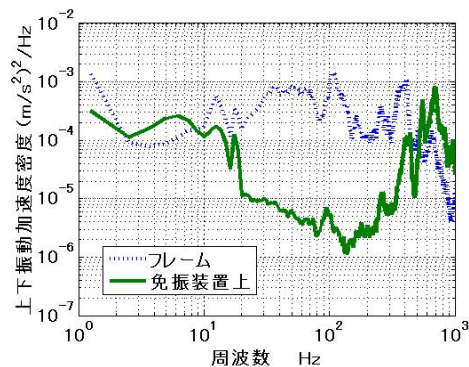


図6 高精度測定装置 II 型の PSD

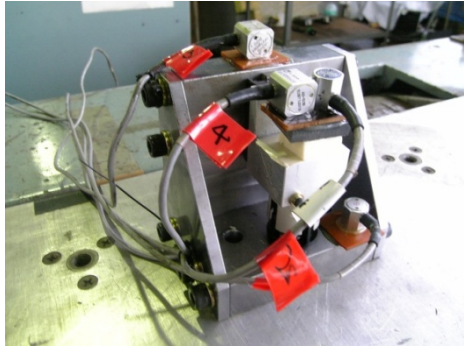


図 7 高精度測定装置 II a 型

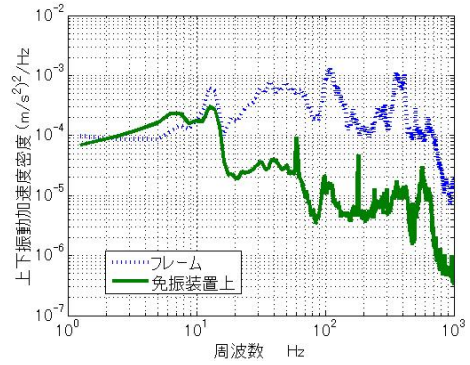


図 8 高精度測定装置 II a 型の PSD

図 3 に装置の写真を示す。また図 4 に、機構の模式図を示す。この機構により、上下方向は免振するとともに左右方向は各周波数で伝達率 1 になる。図 5 に、この装置を車両の軸箱付近の軸はりに取り付けた写真を示す。3.1 節と同様の走行試験を行い、得られた上下加速度波形のパワースペクトル密度を計算した結果を図 6 に示す。10Hz から 300Hz の上下加速度は良好に低下しているのが分かる。しかしながら、300Hz から 1000Hz の上下加速度は高くなっている。これは、ばね、質量あるいはスライドテーブルなどの部品間のガタによる機械的なノイズによるものと考えられる。

3.3 高精度測定装置 II a 型

300Hz 以上の上下加速度を低下させるために、高精度測定装置 II 型の免振機構上にさらに樹脂と鉄片でばねマス機構を付加した。高精度測定装置 II 型の免振機構上に載りかつ鉄片が転倒しな

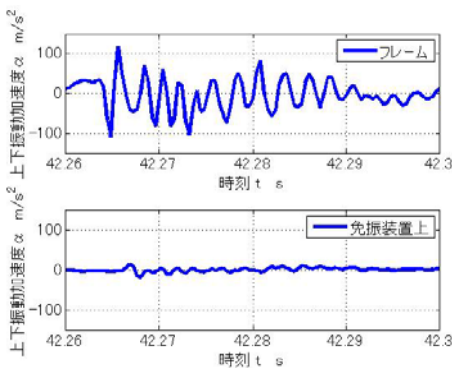


図 9 高精度測定装置 II a 型の時刻歴波形

い大きさとなるよう樹脂形状を決め、300Hz 程度を免振するよう鉄片の重さを調整した。その結果、80Hz 程度に共振周波数を持つ免振装置を作製することができた。装置の概要を図 7 に示す。3.2 節と同様に走行試験を行った結果を図 8 に示す。300Hz から 1000Hz の上下加速度が良好に低下している。図 9 に示すように時刻歴波形においても、著大上下加速度が大きく低下している。

4. 逆フィルタ

以上示したように、樹脂と鉄片で構成したばねマス機構により上下加速度が左右加速度に及ぼす影響を低下させることはできたが、ばね機構が樹脂のためその左右支持剛性による影響も考慮する必要がある。この左右方向の剛性が、鉄片上で測定された左右方向加速度を装置が受けた左右加速度と異なるものになっている。そこで、適切な逆フィルタを見つけることができれば、鉄片上で測定された左右方向加速度に逆フィルタを適応することにより真の装置が受けた左右加速度を求めることができる。ここでは、逆フィルタの設計方法の一つである最小二乗法による作成方

法を検討した。

4. 1 最小二乗法による逆フィルタ作成

以下では、樹脂と鉄片で構成したばねマス機構が線形時不変システムであると仮定する。すると、システムは、以下のように表現できる。

$$\mathbf{b} = \mathbf{H}\mathbf{g} \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{g} はシステムのインパルス応答、 \mathbf{b} はシステムの出力をベクトルで表現したものである。マトリックス \mathbf{H} は、インパルスを畳み込み演算マトリックス化したものである。

この時、 \mathbf{g} の最小二乗解 \mathbf{g}' は、以下のようになる¹⁾。

$$\mathbf{g}' = (\mathbf{H}^T\mathbf{H})^{-1}\mathbf{H}^T\mathbf{b} \quad (2)$$

逆フィルタを求めるには装置に加振した左右加速度と鉄片上左右加速度を計測し、式(2)においてそれぞれ \mathbf{b} 、 \mathbf{H} とすれば、 \mathbf{g}' が逆フィルタとなる。

4. 2 設計した逆フィルタの検証

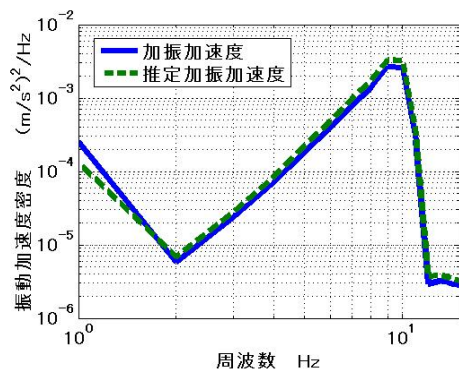


図 10 測定値と推定値の比較

設計した逆フィルタを検証するために、鉄片上左右加速度に \mathbf{g}' を適用した波形のパワースペクトル密度と、装置に加振した左右加速度のパワースペクトル密度を比較した。図 10 に示すように車両運動を観察する上で重要な 15Hz 付近までのパワースペクトル密度が、測定値と推定値でよく一致しているのが分かる。

5. まとめ

軸箱加速度を利用してばねやダンパーの諸元値を同定する際の、上下振動の影響を抑えた左右振動加速度測定技術について検討した。その結果、上下加速度を 1/10 に低下した環境で左右方向加速度を計測できる装置の基本機構を開発した。さらに装置上で計測した左右加速度が実際の装置を加振した左右加速度の値と異なることから、計測した加速度を補正する逆フィルタの例を示した。

今後は、装置の省スペース化と耐久性、さらに計測実験を重ね測定精度の信頼性を高めるとともに装置を 1 両分(8 個)製作し走行試験を行う計画である。

文献

1)例えば、中川ら、最小二乗法による実験データ解析、東京大学出版会(1991)。