タグチメソッドを用いた空圧式除振装置の公差設計の改良*

涌井伸二^{*1}, 長谷川雄三^{*2}, 高橋正人^{*3}

Improved Tolerance Design Using Taguchi Method for Air Spring Type Anti-Vibration Apparatus

Shinji WAKUI^{*4}, Yuzo HASEGAWA and Masato TAKAHASHI

^{*4} Institute of Symbiotic Science and Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology,
2-24-16 Nakamachi, Koganei-shi, Tokyo, 184-8588 Japan

Using an orthogonal table L_{36} well-known in the quality engineering, a tolerance design method was previously proposed. In this design procedure, a trial-and-error method was used. To simplify the above complicated procedure, an improved tolerance design method is proposed in this note. In detail, by introducing a weight between two characteristic values, the parameter tolerance for the anti-vibration control system can be straightly derived.

Key Words: Air Spring, Taguchi Method, Tolerance

1. 緒 言

外乱振動排除のため、精密位置決めや精密計測の分野では空王式除振装置が用いられている。著者らは、空気ばね剛性をキャンセルする正帰還、空気ばねの駆動力を管理する圧力のフィードバック（以降、FBと略記）、ダンピングを付与する加速度FB、そして除振台を定位させる位置FBを有する制御系を提案した⁽¹⁾。この制御系では、パラメータ設定に関し3箇所以最適値を持ち、そのうえ多重のループ構成であるため調整パラメータが多い。産業応用の場面では、パラメータ設定に関し過度に厳密性を要求されると実用性に欠く。合理的規範に基づき可調整および機械系パラメータの公差を決めねばならない。そこで、品質工学の分野で周知のタグチメソッドを導入して制御系の公差検討を実施した⁽²⁾。この検討過程では、厳しい公差に入れるパラメータの候補を選択するとき、試行錯誤の必要があった。本ノートでは、試行錯誤なしで、空王式除振装置の可調整および機械パラメータ全部の公差を決める一方法を示す。

2. 空圧式除振装置の制御系

2・1 制御系

図1に示す。図中の記号は、 $M[\text{kg}]$:除振台質量、 $D[\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}]$:粘性比例係数、 $K[\text{N}/\text{m}]$:機械ばね剛性、 $A_0[\text{m}^2]$:有効受圧面積、 $\beta_0[\text{1}/\text{Pa}]$:圧縮率、 $V_0[\text{m}^3]$:空気ばね容量、 $G_q[\text{m}^3/\text{s}/\text{V}]$:バルブの流量ゲイン、 $c[\text{m}^3/\text{s}/\text{Pa}]$:流量コンダクタンス、 $k_{px}[\text{V}/\text{m}]$:位置センサの検出感度、 $k_{un}[-]$:圧力応答の反共振・共振消去の正帰還ゲイン、 $k_g[\text{V}/\text{Pa}]$:圧力FBゲイン、 $k_{pr}[-]$:圧力FBの前向きゲイン、 $T_p[\text{s}]$:圧力PI補償器の時定数、 $k_a[\text{V}/\text{m}/\text{s}^2]$:加速度FBのゲイン、 $k_{ar}[-]$:加速度PI補償器の前向きゲイン、 $T_a[\text{s}]$:加速度PI補償器の時定数、 $k_s[-]$:位置FBのゲイン、 $x[\text{m}]$:除振台変位、 $x_0[\text{m}]$:床振動変位、 $w, w'[\text{V}]$:入力電圧、 $p[\text{Pa}]$:圧力、 $v_{px}[\text{V}]$:位置の目標値、を意味する。

2.2 従来の公差設計の方法

x/x_0 で規定され、これが小さいほど優れる。ここで、 k_{run} , T_p , T_a , k_g , k_{pr} , k_a , k_{ex} , k_s の可調整パラメータ 8 つと、機械系パラメータ M , D , K , $\beta_0 V_0$ の合計 12 個に対して、タグチメソッドを使って公差を求めた⁽²⁾。具体的に、 x/x_0 の共振ピークが 2[dB] となるように k_a を調整し、この状態を規準とした。この規準に対して全周波数域にわた

Fig.1 Schematic diagram of control system

* 原稿受付 2008 年 5 月 14 日.

*1 正員, 東京農工大学大学院共生科学技術研究院(☎ 184-8588 小金井市中町 2-24-16).

*2 東京農工大学大学院電子工学専攻.

*3 (株)ニコン(☎360-8559 熊谷市大字御稜威ヶ原 201-9).

E-mail: wakui@cc.tuat.ac.jp

って+2[db]ライン以下の管理限界を設定しこれを仕様とした。仕様を満たすため、全パラメータ一律の厳しい公差は産業応用の場面では嫌悪される。そこで、共振ピーク Mag と固有周波数 Fre. の2種を特性値とし、直交表 L_{36} に基づいて両者の分散分析表を作成し、妥当な公差を±1, 5, 10, 15%の4種類とした。ここで、空気ばね剛性 K_{ar} をキャンセルする正帰還ゲイン k_{unn} の安定性に及ぼす影響は大きいことがわかっており、 k_{unn} の公差は厳しくせざるを得ない。そこで1あるいは5%と決めた。そのうえで、 k_{unn} 以外のパラメータを一番緩い15%と設定し、周波数応答 x/x_0 が管理限界内に入るか否かをチェックした。同限界逸脱の場合、 Fre. と Mag. の分散分析表の両寄与率を参照し、ほとんどの場合、これが大きいパラメータの公差を15%から一段厳しく10%として、再度 L_{36} のシミュレーションを実施した。管理限界から逸脱の場合は10%から、さらに5%へ変更するという手順で公差を設定した。

3. 公差設計の改良

3・1 寄与率の算出方法の変更 L_{36} の実験番号の中で、全パラメータが公称値のときの特性値 Frq. に重み α を掛けて $\alpha \times \text{Frq.}$ とし、もう一つの特性値の Mag. と数値を一致させた。この α を他の実験番号の全データにも適用する。次に、 $\alpha \times \text{Frq.}$ と Mag. に関する分散分析表を作成する。従来は、特性値ごとの純変動に対して、着目するパラメータに関する変動の比率を計算し、これを寄与率とした。ここでは $\alpha \times \text{Frq.}$ と Mag. の各純変動の総和を計算し、純変動の総和に対するパラメータごとの変動の比率を新しい寄与率とした。すなわち、重み α の導入により、次元を異にする Frq. と Mag. を混合したのである。4種類の公差設計の振り分けに際しては、新しい寄与率の大小だけで判断することにした。

Fig.2 Tolerance design examples using various method

Fig.3 Tolerance design examples using various method

3・2 結果 まず、可調整パラメータ8個だけに関し、 Mag と Fre. の両寄与率の大小だけから公差を決めた結果を図2左側示す。すなわち、 k_{unn} は±1%、 k_{pr} は±5%、…の公差のとき、 x/x_0 の仕様を満たす。一方、同図右側は、 Mag と Fre. の寄与率の大小を参照するが、例えば寄与率が小さくともこの公差を厳しくする場合があるという試行錯誤の結果である。左右共に k_{unn} は±1%であるが、左側では±5%のパラメータ3個に対して、右側では2個で済む。厳しい公差が少ないほど、製造および調整にとって好ましく、図2右側の結論は有益である。そして、図2右側の試行錯誤の結果は、3.1節の新しい寄与率に基づく公差の決め方と一致した。次に、可調整および機械系パラメータを含めた合計12個の公差を決定した。結果を図3に示す。同図左側が、寄与率の大小だけを規準にした場合である。試行錯誤を行うと、図3中央のように厳しい公差のパラメータ数は減少する。そして、提案の3.1節の方法を使用すると、同図右側に示すように粘性比例係数 D を除外して、ほぼ試行錯誤による公差と一致した。

4. 結 論

重み α を導入して2種の特性値を混合する分散分析に基づき、公差設計の手順を合理化した。

文 献

- (1) Wakui, S. et al., Wide Frequency Band of Pressure Feedback Using Positive Feedback for an Air Spring Type Anti-Vibration Apparatus, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 72, No.719 (2006), pp.2219-2225.
- (2) Wakui, S. et al., A Tolerance Design Using Taguchi Method for Air Spring Type Anti-Vibration Apparatus, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 74, No.740 (2008), pp.851-858.