研削砥石車の精密バランスング*

小澤 則 光** 由井 明 紀*** 三井 公 之**

Precision Balancing of Grinding Wheels

Norimitsu OZAWA, Akinori YUI and Kimiyuki MITSUI

An unbalanced grinding wheel produces an uncompensated centrifugal force which induces a relative vibratory motion between wheel and workpiece. The visible chatter patterns which often occur on ground surfaces are attributed to this relative motion. Therefore, the periodical balancing of the grinding wheel is necessary to produce good surfaces. Two methods, which are applying the principle of centrifugal balancing, and are named Nomograph method and CAB method, have been developed. After the balancing operation by these new methods the residual unbalance was measured. The results of the experiments indicate that the Nomograph method is capable of balancing handily without trial and error and the CAB method is practicable to reduce the residual unbalance nearly to the noise level of measuring instrument.

Key words: wheel balancing, centrifugal balancing method, computer aided balancing, nomograph method, residual unbalance

1. 結 言

研削砥石は、もともと質量分布が不均一¹⁾な上、加工過程で砥粒の脱落等によってたえず不釣合いな状態になりやすい。しかも研削砥石は高速回転させるから、不釣合い量が微小であっても遠心力が変動して、砥石軸が加振され砥石と工作物間に相対変位が発生する。

各種の研削盤の中で小型の汎用平面研削盤は、最も広く使われているものであるが、最近、加工精度に対する要求がとみに厳しくなっている。特に、金型加工の分野では鏡面研削加工が必要なことが多く、高精度な砥石バランスングが要求されている。また、これらの研削盤は、そのほとんどが比較的低価格な機械であり、バランスング装置にも安価なことが要求される。一方、研削盤のNC化も次第に加速されつつあり、砥石の自動交換方式の採用等によるグライディングセンタ化の方向も模索され始めている。このような研削盤の自動化を進める上で、砥石バランスングの自動化、高能率化は必須の課題である。こうしたことか

ら、バランスの感度向上の研究²⁾や、コンピュータ利用による自動化の研究等³⁾が行われている。

このような背景から、自動化への1つのステップとして、手動による遠心力バランスング法を改良して、ノモグラフ法及びマイコン応用バランスング法(以下、CAB法という)の2つの方法を開発した。ここではその原理と構成について触れ、さらに従来からの静バランス法と比較した結果について述べる。

2. 新しい砥石バランス法

2.1 ノモグラフ法

図1に示すように、同一質量の2個の釣り合いおもり m_1, m_2 がスライド可能な環状の溝を有し、その外周に角度目盛を刻んだ砥石フランジを使用し、砥石頭の位置での垂直方向の振動を検出する振動計、砥石軸の回

Fig. 1 Balancing apparatus for centrifugal method

* 原稿受付 昭和61年3月31日。昭和59年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和59年10月3日)にて発表

** 正会員 機械技術研究所(茨城県新治郡桜村並木1-2)

*** 正会員 (株)岡本工作機械製作所(厚木市上依知字上の原3009)

Fig. 2 Principle of centrifugal method ($m \geq M$) Fig. 3 Nomograph ($m \geq M$)

回転に相当する振動のみを取り出すバンドパスフィルタ、砥石軸の回転に対応する信号を検出する近接センサ、およびこれらの信号を観察するオシロスコープ等

で装置を構成する。

この装置により図2に示すように、まず(a) m_1, m_2 をはずした場合の砥石車(砥石軸を含む)の不釣り合い

Fig. 4 Nomograph ($m < M$)

質量 M の遠心力による振動振幅 A と、基準の角度からの回転角 ϕ を測定し、次に (b) おもり m_1 を $(\phi + \pi)$ の位置に取り付けて、 M と m_1 との2つの質量による合成遠心力に相当する振動振幅 a を測定する。その結果、(c) 釣合いおもりの取付角度 α, β はこれら3つの測定値 A, a, ϕ より次式によって求めることができる。

$$\alpha = \phi + \pi - \cos^{-1} A/2(A \pm a) \quad (1)$$

$$\beta = \phi + \pi + \cos^{-1} A/2(A \pm a) \quad (2)$$

ここで、両式の右辺第3項の分母は、釣合いおもりの質量 $m(m_1, m_2)$ と不釣合い質量 M との関係から次のようになる。

$$m \geq M \text{ の場合 } 2(A+a) \quad (3)$$

$$m < M \text{ の場合 } 2(A-a) \quad (4)$$

この式 (1), (2) の解をノモグラフによって求める。すなわち、釣合いおもりが M より重い場合 ($m \geq M$) には、図3(a)に示すN型ノモグラフで

$$\theta = \cos^{-1} A/2(A+a) \quad (5)$$

の値を求める。同図の例では、 $A=0.14 \text{ m/s}^2$, $a=0.10 \text{ m/s}^2$ で $\theta=73^\circ$ となる。次に、この θ と、既に測定した ϕ とより同図 (b) のノモグラフにより α, β を求める。 $\theta=73^\circ$, $\phi=210^\circ$ の値により $\alpha=317^\circ$, $\beta=103^\circ$ と求められる。

一方、釣合いおもりが小さく $m < M$ の場合には、まず図4(a)の平行尺ノモグラフで $D=A-a$ の値を求め、次に同図 (b) の逆N型ノモグラフで θ を求めて、最後に同図 (c) で α, β を求める。

実際には機械によって発生する振動の値が異なるから、図3(a)及び図4(a), (b) の A および a 尺は、対象とする機械に応じて発生する振動の値が十分にカバーできる範囲のスケールを作るようにする。したがって、このノモグラフは機種別のスケールを作製し、透明なペーパーホルダ等に挟んで使用すれば、現場で十分に実用とすることができる。

ところで、この方法では不釣合い質量の位置 ϕ は近接センサからの基準位置信号と振動振幅のピーク位置との時間差として計測する。一方、不釣合い量が微小になると振動振幅も微小になる。このため、振動計の出力信号の S/N 比が低下し、 ϕ の測定結果がばらつく要因となる。

2.2 マイコン応用バランスング法 (CAB法)

1) 原理

図1と同じ砥石フランジと釣合いおもりを用いて、まず①釣合いおもりを取りはず

Fig. 5 Calculation of angle ϕ by three vectors

して回転させた場合の振動振幅を図5のように A とする。次に②基準の位置 (0°) に釣合いおもり m_1 を取り付けた場合に、①の場合との合成遠心力による振動振幅を B とすると図5(a)あるいは(b)のように2つのケースがとり得る。また③ m_1 を 180° ずれた位置 (D_2 の方向) につけ換えて回転させると①の場合との合成遠心力による振動振幅は C のようになる。この図で D_1 あるいは D_2 は、おもり m_1 の遠心力による振動振幅を表している。

このように、3通りの状態で得られた振動の値 A, B, C から、 D_1 および D_2 は次式で求められる。

$$D_1 = D_2 = \sqrt{(B^2 + C^2 - 2A^2)/2} \quad (6)$$

したがって、始めに m_1 を取り付けた位置 (0°) からみた不釣合いの存在位置、すなわち D_1 と A とのなす角度 ϕ_1 および ϕ_2 は次のように計算できる。

$$\phi_1 = \cos^{-1} \{(A^2 - C^2 + D_2^2)/2AD_2\} \quad (7)$$

$$\phi_2 = 2\pi - \cos^{-1} \{(A^2 - C^2 + D_2^2)/2AD_2\} \quad (8)$$

ところで実際には、このどちらが正しいかを判別する必要がある。そこで基準位置から 90° ずれた位置におもり m_1 を再度つけ換えた場合に、①の場合との合

Fig. 6 Determination of angle ϕ

Fig. 7 Apparatus for computer aided balancing

成遠心力による振動振幅を E とする。この場合にも図 6 に示すように 2 つのケースがあり、 E_1 および E_2 は次のようになる。

$$E_1^2 = A^2 + D_3^2 + 2AD_3 \sin \phi_1 \quad (9)$$

$$E_2^2 = A^2 + D_3^2 + 2AD_3 \sin \phi_2 \quad (10)$$

そこで、 E_1, E_2 の値と実際に測定して得られた値 (e と表す) とを比較して、どちらのケースかを判別し、正しい ϕ の値を確定する。

このようにして ϕ を確定してから、ノモグラフ法と同様にしておもり m_1 と m_2 の位置を振り分ける。すなわち、式 (1), (2) での $(A+a)$ あるいは $(A-a)$ は、釣合いおもり m_1 自身の遠心力による振動振幅であり、式 (6) で求めた $D_1 (=D_2)$ に相当する。ゆえに、釣合いおもりの取付位置 α, β は

$$\alpha = \phi + \pi - \cos^{-1} A/2D_1 \quad (11)$$

$$\beta = \phi + \pi + \cos^{-1} A/2D_1 \quad (12)$$

として算出することができる。

以上のように、CAB 法では都合 4 回の測定で得た値を使って ϕ の値を計算してから、 α, β を算出する。

2) 装置の構成

角度目盛付きフランジと同一質量の 2 個のおもりを用い、砥石ヘッド垂直方向の振動を検出する振動計と、そのフィルタの後に A/D コンバータとマイコンを接続した。本装置のブロックダイアグラムを図 7 に示し、バランスング作業の手順を図 8 のフローチャートに示す。

なお、この方法では図 5 に示す ϕ_1 の値が微小になると合成遠心力による振動振幅 C の値が小さくなる。同様に、 ϕ_2 が 180° の近辺になると振幅 B が小さくなる。その結果、振動計の出力信号の S/N 比が下がって、測定精度に影響を与える。そこで、 $-10^\circ < \phi_1 < 10^\circ$ の範囲と、 $170^\circ < \phi_2 < 190^\circ$ の範囲を不感帯として ϕ_1 および ϕ_2 がこの範囲に入った場合には基準点 (D_1 の方向) を 90° ずらして、再び振幅 B の測定からやりなおすようにしている。

3. 実験方法および実験結果

小型の平面研削盤を用いて現場でよく使われている静バランス法と今回開発した 2 つの方法で砥石車のバランスング実験を行った。

まず、静バランス法は、砥石をはずして天びん式バランスにより不釣合いの位置を検出しながら、3 つのおもりの位置を動かして重力のバランスをとった。その後、砥石を砥石軸に取り付けて表 1 の条件で運転し、砥石頭

の垂直方向で測定した振動振幅の値から残留不釣合い量を求めた。

ところで JIS では、修正半径 r (mm) の円周上に m (g) の不釣合い質量が存在する場合の残留不釣合い量を mr (g・mm) と規定している。そこで、本文でもこの値を使って残留不釣合い量を表している。

静バランス法での実験は、4 人の作業者がそれぞれ

Fig. 8 Flow chart of balancing algorithm

Table 1 Condition of experiment

Test machine	Surface grinding machine
Rotational speed of wheel spindle	3 000 rpm
Grinding wheel	WA 46 HmV
Dimension of wheel	205×19×50.8 mm
Motor of wheel spindle	1.5 kW/2 P
Radius of a circle for balancing	77 mm
Weight of compensating mass	8.34 g
Weight of wheel (with flange)	2.74 kg
Weight of wheel spindle	8.87 kg

Fig. 9 Experimental results by three different methods

数回以上行って残留不釣合い量を求めた。

ノモグラフ法での実験は、ノモグラフから得られた α, β の位置におもりを取り付けて回転させた場合に、砥石頭の垂直方向で検出した振動振幅の値から残留不釣合い量を求めた。

また、CAB法の場合も、マイコンで算出した α, β の位置におもりをつけてノモグラフ法と同様に、残留不釣合い量を求めた。

なお、砥石を取りはずして、砥石軸のみを回転させて、砥石頭の垂直方向で測定した振動振幅から、砥石軸系に残留する不釣合い量を求めたところ、砥石車における修正半径と同一修正円上での不釣合い量に換算して55 g・mmであった。また、振動計の出力側で測定した測定機器のノイズは、上記と同一修正円上での残留不釣合い量に換算して11 g・mmに相当する大きさであった。

以上、3種類の方法による実験結果をまとめたものを図9に示す。

静バランス法による結果は、実験の都度、あるいは作業者によって大きくばらついており、相加平均では110 g・mmとなった。これは、砥石軸のみに残留する不

釣合い量の2倍である。このようなばらつきの第一の要因として、もともと、この方法ではバラランシング作業後にも不釣合い質量が残留しやすいこと、もう1つは、砥石の残留不釣合いによる遠心力ベクトルと、砥石軸のみに残留する不釣合いによる遠心力ベクトルとの合成ベクトルの大きさと方向が、実験のたびに変化することによるものと考えられる。

ノモグラフ法では、実験結果は21~75 g・mmの範囲でばらつき、残留不釣合い量の相加平均値は49 g・mmであった。これは、静バランス法と比べると半分以下であり、砥石軸単体の残留不釣合い量よりも小さい。したがって、本方法では砥石軸自身の残留不釣合いをも補正していることを示している。

CAB法では残留不釣合い量は、相加平均で11 g・mmとなった。この値は、前述した測定機器のノイズレベルよりわずかに大きいだけである。またばらつきも極めて小さいのが特徴であり、高精度なバラランシング方法であることが実証された。

4. 結 言

研削砥石車のバラランシング法のうちで、手動による遠心力バラランシング法について改良を試みた。その結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 試行錯誤せずに、釣合いおもりの取付位置を求める方法として、ノモグラフによる方法とマイコンを応用したCAB法を開発した。
- (2) ノモグラフ法は簡便な方法ではあるが、静バランス法による場合よりも残留不釣合い量を半分以下にすることができる。
- (3) CAB法は、残留不釣合い量を測定機器のノイズレベル相当量にまで低減でき、しかも、ばらつきの少ない高精度なバラランシングが可能である。

本研究を進めるにあたって、あたたかい激励と御助言を下された岡本工作機械製作所技術開発本部細井睦生部長、ならびに機械技術研究所機械部工作機械課岡江義孝課長に厚く御礼申し上げます。また、有益な御意見を下さった機械技術研究所機械部岡崎祐一技官と岡本工作機械製作所木塚慶次氏に深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) 真壁芳夫：研削砥石の不平衡発見法，機械技術，8，2(1960) 11.
- 2) 佐藤見平：研削砥石のバランス修正法の開発，昭和55年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集(1980) 416.
- 3) S. Spiewak et al.: Computer-controlled Automatic Balancing, SME Tech. Paper, MR 84-533.