工作機械の温度制御に関する研究 (第6報)*

——温度制御の目標値決定法——

千 輝 淳 二** 垣 野 義 昭***

A Study on the Temperature Control of Machine Tools (6th Report)
- Determination of the Command Temperature -

Junji CHIGIRA and Yoshiaki KAKINO

This paper deals with the command of temperature control of machine tools. Customarily the fixed value control of the spindle head's temperature has been adopted for the machine tools found specially in the fixed room temperature. And follow-up controls to the room temperature and to the machine temperature have been widely used for the machine tools in the conventional machine shop. However the theoretical analysis has not been conducted concerning the command temperature. Computer simulations and cost-performance analysis have been conducted, and the following results are obtained: (1) For high quality machine tools in the conventional machine shop the temperatures of the spindle head and of the bed should be follow-up controlled to the room temperature. (2) For economical machine tools the follow-up control of the spindle head temperature to the machine temperature is very effective.

Key words: temperature control, machine tools, command temperature, follow-up control, fixed value control

1. 緒 言

工作機械の加工誤差の最大の原因として熱変形があげられる。この熱変形はコラムで代表される構成要素の曲げ、ねじりによるものと、主軸頭やテーブルで代表される構成要素間の伸びの差によるものとに大別することができる。

熱変形を抑制する有力な手段として温度制御が行われているが、制御対象である機械の温度をどのような値(目標値)に選べばよいかについてはほとんど検討されずに現在では恒温室内で目標値を定値とするもの(定値制御)、一般工場内(室温が変動する)で目標値を室温とするもの(室温追従制御)、および目標値を時定数の大きい他の構成要素温度とするもの(機温追従制御)等が実施されている。

そこで、本研究においては代表的な工作機械である立て形マシニングセンタを例にとって熱変形挙動をシミュレーション解析し、コストパフォーマンス関係から最適な目標値の与え方を研究することとした。

2. 熱変形とコストの定式化

熱変形とコストの定式化を行うためまず工作機械、温度制御方式および熱源をモデル化する。

2.1 工作機械のモデル化

マシニングセンタの熱変形挙動を簡単のためにi)主軸頭、ii)コラム、iii)テーブルとサドルを含むベッド、iv)工作物等の構成要素および、v)雰囲気との5つでモデル化する。前述のごとく熱変位には1構成要素内の温度分布による曲げ、ねじりと構成要素間の伸びの差がある。

いま解析を簡単化するために各構成要素には曲げ、ねじり、そのような複雑な熱変形は生じず、単純膨張のみが生じるものと仮定する。ただしコラムは長大でその中に生じる不均一な温度分布による変形(そり)が大きいのでそれらを単純化した形で考慮する。すな

* 原稿受付 平成2年1月6日。1989年度精密工学会秋季大会学術講演会(平成元年11月5日)にて発表

** 正会員 関東精機㈱(前橋市大渡町2-1-10)

*** 正会員 京都大学工学部(京都市左京区吉田本町)

Fig.1 Simulation model of the machine tool

わちコラム以外の構成要素温度は集中定数系で近似する。

主軸頭温度を $\theta_H(K)$ 、ベッド温度を $\theta_B(K)$ 、工作物温度を $\theta_w(K)$ とし、雰囲気温度も原則として一様と考えて $\theta_r(K)$ とする。コラムには内部に熱源がないので隣接する構成要素の影響を受け、前面は主軸頭温度 θ_H に近く、背面はベッド温度 θ_B に近いものとする(図1参照)。

主軸頭温度 θ_H は内部発熱 $Q(W)$ と外部熱源である雰囲気温度 θ_r の影響を受け、ベッド温度 θ_B と工作物温度 θ_w とは雰囲気温度 θ_r の影響のみを受けると仮定する。正弦波的に変動する雰囲気温度 θ_r の影響は各構成要素温度の周波数応答($\Delta\theta_{rH}$, $\Delta\theta_{rB}$, $\Delta\theta_{rw}$)を考える。工作物の時定数は他の構成要素に比べて非常に小さいので工作物温度は常に室温に等しいと仮定する。

内部発熱による主軸頭の温度上昇を $\Delta\theta_{QH}(K)$ とすれば、主軸頭ベッドの温度変化 $\Delta\theta_H(K)$, $\Delta\theta_B(K)$ はそれぞれ次のようになる。

$$\Delta\theta_H = \Delta\theta_{QH} + \Delta\theta_{rH} \quad (1)$$

$$\Delta\theta_B = \Delta\theta_{rB} \quad (2)$$

2. 2 温度制御方式のモデル化

温度制御法は簡単のためにすべて伝熱媒体を液体とする間接制御¹⁾とする。モデル化した工作機械の制御対象物は室温、主軸頭およびベッドの3者であり、温度制御の方式は制御なし(0で表す)、定値制御(Cで表す)、室温追従制御(Rで表す)および機温追従制御(Mで表す)の4種である。室温の制御方式は方式0と方式Cであるから全体の組合せは20方式となるが検討の必要がないものもあるので次の9方式について検討した。恒温室内の定値制御方式SSおよび一般工場内の方式00, C0, CC, R0, RR, M0, MC, MR等である。

2. 3 内部熱源のモデル化

前述のごとく主軸頭は集中定数系で近似するので熱源と冷却部の位置と形状は関係がなく、発熱量 $Q(W)$ と熱交換容量 $\alpha F(W/K)$ を考えればよい。また発熱量は一定であり、冷却液温には過渡偏差も定常偏差もないものとする。

放熱係数 $K_r(W/K)$ 、時定数 $T(s)$ の主軸頭の外乱に対する応答はそのステップ応答として次のようにモデル化できる。

$$\theta_H = \frac{Q + \theta_c \alpha F + \theta_r K_r}{\alpha F + K_r} + (\theta_{H1} - \frac{Q + \theta_c \alpha F + \theta_r K_r}{\alpha F + K_r}) e^{-t/T} \quad (3)$$

ここで θ_c は冷却液温度(K), θ_{H1} は主軸頭の最初の温度(K), t は時間(s)である。

$$\theta_{H1} = \theta_r, \quad t = 0$$

とすれば

$$\theta_H - \theta_r = \frac{Q + (\theta_c - \theta_r) \alpha F}{\alpha F + K_r} \quad (4)$$

となる。温度制御しないベッドの外乱に対するステップ応答 $\theta_B(K)$ は式(3)で

$$Q = 0, \quad \alpha F = 0$$

とおけばよく

$$\theta_B = \theta_r + (\theta_{B1} - \theta_r) e^{-t/T}$$

すなわち

$$\frac{\theta_{B1} - \theta_B}{\theta_{B1} - \theta_r} = (1 - e^{-t/T}) \quad (5)$$

となる。

2. 4 外部熱源のモデル化

2. 4. 1 雰囲気温度が室内で均一である場合

一般の工場内における室温の変動には外気温の変動に伴う緩やかな変動と始業時やシャッタの開閉に伴う急変とがある。緩やかな変動は日照変化に伴って24時間周期で変動するので次式で表す²⁾。

$$\theta_r = \theta_{rm} + a_B \sin \frac{2\pi}{24} (t - t_0) \quad (6)$$

ここで θ_{rm} は日平均室温である。定値制御の設定温度はこの $\theta_{rm}(K)$ とする。

冬季の始業時に生じた室温急変の実測値の1例を図2の鎖線で示す。この温度変化は対数曲線に近いが、これに対する構成要素温度の応答は計算が複雑になるので、これに近い温度変化を含む正弦波の立上りの1/2周期で次のように近似する。

$$\theta_r = \theta_{rm} + 4 \sin \frac{2\pi}{4} t \quad (7)$$

このようにある程度実際と異なる応答を想定しても室温変動による構成要素温度の変動の最大値を評価することが目的であるので、このような近似を用いてもシミュレーションに大きな影響を与えないものと思われる。

Fig. 2 Model of room temperature change

る。

2.4.2 雰囲気温度に局部的温度差がある場合
 一般に工作機械が設置されている床の温度は室温より低く、床に近いベッドは放射冷却を受ける。また低温の空気は下方に溜るからベッドの周辺の空気の温度は平均室温より低いことが多い。これらを勘案してベッドの周囲は室温より $a_r(K)$ だけ低い場合についても検討する。この影響によるベッドの温度降下はベッドを温度制御しない場合にのみ現れる。

2.5 熱変形の定式化

前述のごとく熱変形を大別すると構成要素の曲げ、ねじりと構成要素間の伸びの差となるが、前者はコラムの倒れ、後者は工作物とテーブルの寸法差で代表させることにする。テーブルは前述のごとく温度的にはベッドと同一と考えているので、実際には工作物温度とベッド温度の差で代表させる。

コラムの倒れはその前面と背面の温度差によって大部分決まるので、これは主軸頭温度 θ_H とベッド温度 θ_B の温度差 $|\theta_H - \theta_B|$ で代表させる。ただし前後壁の温度差1 Kによって生じるコラムの倒れによって主軸先端の熱変位は工作物とテーブルの温度差1 Kによって生じる熱膨張の差の b 倍だけ大きい³⁾。従ってコラムの倒れによる熱変形の評価関数 $P_1(K)$ を

$$P_1 = \max \{ b | \theta_H - \theta_B | \} \quad (8)$$

とする。

また工作物とテーブルの寸法差による熱膨張の差の評価関数 $P_2(K)$ は

$$P_2 = \max \{ | \theta_r - \theta_B | \} \quad (9)$$

とする。したがって全体の評価関数 $P(K)$ は

$$P = \max \{ b | \theta_H - \theta_B | + | \theta_r - \theta_B | \} \quad (10)$$

となる。

$\Delta \theta_H$ は近似的に発熱と冷却による温度上昇 $\Delta \theta_{QH}$ と室温変動に対する周波数応答 $\Delta \theta_{rH}$ の和となる。簡単のために室温追従制御でなくても常に

$$\theta_c - \theta_r \approx 0$$

とすれば式(4)より

$$\Delta \theta_{QH} = \frac{Q}{\alpha F + K_r} \quad (11)$$

となるから

$$\Delta \theta_H = \frac{Q}{\alpha F + K_r} + \Delta \theta_{rH} \quad (12)$$

となる。ベッドは発熱がないから $\Delta \theta_B$ は周波数応答 $\Delta \theta_{rB}$ に等しい。

室温に局部的温度差 $a_r(K)$ がある場合の温度制御しないベッドの温度降下 $\Delta \theta_a(K)$ は $-a_r(K)$ に対するステップ応答の $t = \infty$ の値とした。したがってこの場合の $\Delta \theta_B$ は次のようになる。

$$\Delta \theta_B = \Delta \theta_{rB} - \Delta \theta_a \quad (13)$$

式(3)を用いて制御対象 θ の室温 θ_r に対する周波数伝達関数を求めてベクトルで表すと表1の左側となる。

Table 1 Frequency transfer functions and frequency response to the room temperature change

$$\phi = \frac{1}{\sqrt{1+\omega^2 T^2}} \sin(\omega t - \tan^{-1} \omega T)$$

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{(1+\omega^2 T_n^2)(1+\omega^2 T^2)}} \sin(\omega t - \tan^{-1} \omega T_n - \tan^{-1} \omega T)$$

Controlling Method	Transfer Function	Frequency Response	
Non-Control	$\frac{e^{-j \tan^{-1} \omega T}}{\sqrt{1+\omega^2 T^2}} (\equiv M)$	$a \phi$	
Fixed Value Control	$\frac{k_r}{\alpha F + k_r} M$	$\frac{a k_r}{\alpha F + k_r} \phi$	
Follow-up Control to the Room Temperature	$\frac{\alpha F}{\alpha F + k_r} M$	$\frac{a \alpha F}{\alpha F + k_r} \phi$	
Follow-up Control to the Machine Temperature	Non-controlled Machine Temp.	$\frac{\alpha F}{\alpha F + k_r} M_{r \cdot T_n \cdot H}$	$\frac{a \alpha F}{\alpha F + k_r} \psi$
	Fixed Value Controlled Machine Temp.	$\frac{k_{r,n} \alpha F}{(\alpha_n F_n + k_{r,n})(\alpha F + k_r)} M_{r \cdot T_n \cdot H}$	$\frac{a k_{r,n} \alpha F}{(\alpha_n F_n + k_{r,n})(\alpha F + k_r)} \psi$
	Follow-up Controlled Machine Temp.	$\frac{\alpha_n F_n \alpha F}{(\alpha_n F_n + k_{r,n})(\alpha F + k_r)} M_{r \cdot T_n \cdot H}$	$\frac{a \alpha_n F_n \alpha F}{(\alpha_n F_n + k_{r,n})(\alpha F + k_r)} \psi$

従って周波数応答は同表右側となる。これらに対応するステップ応答は周波数応答の中の ϕ または ϕ を
 $(1 - e^{-t/\tau})$

で置き換えた値に等しい。

2. 6 コストの定式化

温度制御に必要なコストはインシヤルコストとランニングコストに分かれる。ランニングコストは温度制御に必要な消費電力 E (W)で代表させることができる。インシヤルコストは冷却機のように消費電力に比例する設備のコストと調節器や配管のように消費電力と無関係に定まるものがあるが、解析を簡単にするためにインシヤルコストは無視することとした。しかし一般的に言えばランニングコストである消費電力が多くかかる方式ほどインシヤルコストも多くかかることはいうまでもない。

構成要素内に発熱がない場合にその温度 θ_M (K)が
 $\theta_M = a_M \sin \omega t + \theta_{rM}$ (14)

となつたとし、室温との位相差を β_M (rad)とすると室温 θ_r (K)は次のようになる。

$$\theta_r = a \sin (\omega t + \beta_M) + \theta_{rM} \quad (15)$$

よって室内空気から構成要素への熱負荷 Q_r (W)は次のようになる。

$$\begin{aligned} Q_r &= K_r (\theta_r - \theta_M) \\ &= K_r (a \cos \beta_M - a_M) \sin \omega t \\ &\quad + K_r a \sin \beta_M \cos \omega t \end{aligned} \quad (16)$$

また、構成要素の保有熱量増加率 Q_n (W)はその熱容量を C (J/K)とすると

$$Q_n = C \frac{d\theta_M}{dt} = C a_M \omega \cos \omega t \quad (17)$$

となるから必要冷却(または加熱)容量 Q_{Rn} (W)は次のようになる。

$$\begin{aligned} Q_{Rn} &= Q_r - Q_n = K_r (a \cos \beta_M - a_M) \sin \omega t \\ &\quad + (K_r a \sin \beta_M - C a_M \omega) \cos \omega t \end{aligned} \quad (18)$$

よって1周期の間における Q_{Rn} の平均値 Q_{Rnm} (W)は例えば位相0から $\pi/2$ までの間では次のようになる。

$$Q_{Rnm} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} Q_{Rn} d(\omega t) \quad (19)$$

構成要素内に発熱 Q (W)がある場合は

$$Q_{Rnm} + Q > 0$$

ならばこれに等しい冷却容量 Q_R (W)が必要となり、

$$Q_{Rnm} + Q < 0$$

ならばこれに絶対値が等しい加熱容量 Q_H (W)が必要となる。加熱の場合の消費電力 E_H (W)は Q_H (W)に等しく、冷却の場合の消費電力 E_c (W)は冷凍機の成績係数を η とすれば Q_R/η (W)となる。

ベッドの周辺が室温より a_r (K)だけ低い場合の放熱

Table 2 Power increase when ambient temperature is a_r (K) lower than room temperature

Method	Controlling Method		Power Increase w		
	Spindle Head	Bed	Spindle Head	Bed	Total
OO	Non-control (O)	Non-control (O)	0	0	0
OD	Fixed Value	Non-Control (O)	0	0	0
CC	Control (C)	Fixed Value	0	$a_r k_{rB}$	$a_r k_{rB}$
		Control (C)			
RO	Follow-up	Non-control (O)	0	0	0
RR	Control to the Room Temp. (R)	Follow-up	0	$a_r k_{rB}$	$a_r k_{rB}$
		Control to the Room Temp. (R)			
MO	Follow-up	Non-Control (O)	$\frac{a_r k_{rH}}{2}$	0	$\frac{a_r k_{rH}}{2}$
MC	Control to the Machine Temp. (M)	Fixed Value	0	$a_r k_{rB}$	$a_r k_{rB}$
		Control (C)			
MR		Follow-up	0	$a_r k_{rB}$	$a_r k_{rB}$
		Control to the Room Temp. (R)			

Q' (W)はベッドの放熱係数を K_{rB} (W/K)とすると

$$Q' = (\theta_r - a_r - \theta_B) K_{rB}$$

となるから、ベッドを温度制御するものについてはベッドを $a_r K_{rB}$ だけ加熱する必要がある。方式M0では主軸頭温度が a_r (K)だけ低くなり、熱負荷が主軸頭放熱係数を K_{rH} (W/K)とすると、 $a_r K_{rH}$ だけ増加する。従って必要冷却容量が $a_r K_{rH}$ だけ増加する。よって局部的温度差がある場合の消費電力の増加は表2のごとくなる。

3. シミュレーション

3. 1 工作機械と熱負荷のモデル

工作機械のモデルは中型(5000 kg)の立て形マシニングセンタとし、その特性を表3のごとく想定した。主軸頭の熱交換容量はジャケット冷却のものであり、ベッドの熱交換容量は内面にシャワーをかけた場合を想定したものである。

主軸頭の発熱量 Q (W)は平均的な運転状態を想定して600 Wとした。緩やかな室温変動幅 a_0 は4 Kとし、局部的温度差 a_r は一般工場内を想定して、ない場合と2 Kある場合を想定した。これらの熱負荷の組合せを表4に示す。係数 b は参考文献3)などを参考にして $b=3$ と仮定した。冷凍機の成績係数 η は標準的

Table 3 Specifications of the machine elements

Element Specifi- cation	Spindle Head	Bed
Weight kg	5000	
Mass kg	400	1800
Heat Capacity kJ/K	184	828
Radiating Coefficient W/K	17	39
Heat Exchange Capacity W/K	600	0 * 2337
Time Constant s	298	21231 * 348
Heat Generation Rate W	600	0

* is the value at the case in which internal oil shower system is applied for the bed.

Table 4 Heat load

Internal Heat Load	External Heat Load	
	Temp. Change	Local Temp. Differene
600 W	Slow	Null
	$4\sin \frac{2\pi}{24} t$	2 K
	Rapid	Null
	$4\sin \frac{2\pi}{4} t$	2 K

なものをを使う場合を想定して $\eta = 2$ とした。

3. 2 計算結果と考察

まず周波数応答 $\Delta \theta_{rH}(K)$ と $\Delta \theta_{rB}(K)$ を求めてから前述の方法で評価関数 $P(K)$ と消費電力 $E(W)$ を求め、それらを用いてコストパフォーマンス関係を表すと図3および4となる。

3. 2. 1 室温の時間的変化が緩やかな場合

室温の変化が緩やかで局部的変化がない場合(図3)では方式SSの精度が最もよく、 P が2.3 Kと最小であるが消費電力は2300 Wと最大である。方式00は消費電力は0であるが精度が最も悪いことはい

Fig. 3 Relationship between costs and performances when room temperature change is slow

までもない。SSと00以外の方式の消費電力はいずれも内部熱源を奪うための電力300 W程度で大差はない。

これらの精度はベッドを室温追従制御する方式RRとMRが最もよく、 P の値が3.2~3.5 KとSSの P の値2.9に近い。次に精度がよいのはベッドを定値制御する方式MC, CCおよびベッドは制御なしの機温追従方式MOで、いずれも P の値はほぼ7 Kである。ベッドを制御しない方式COとROは P の値が10 K以上で精度は悪く、特に主軸頭を室温追従制御する方式ROは P の値が16で方式00を除けば最も悪い。

室温変化が緩やかで、局部的温度差が2 Kある場合(図3)はベッドを温度制御する方式RR, MR, MCおよびCCの精度は局部的温度差がない場合と同じであるが消費電力が増加する。それはベッドが雰囲気中で冷却されるので所定の温度に保つために加熱が必要になるからである。

ベッドを制御しない方式COとROは消費電力は変わらず精度が悪くなる。それは主軸頭とベッドの温度差が大きくなるためである。またベッドを制御しない機温追従方式MOは精度が悪くなると同時に消費電力がわずかに増加する。それは低温になったベッド温度に主軸頭温度を追従させるため冷却容量が増すからである。

もし工場を昼夜連続運転すれば、シャッタの開閉さえなければ室温変動は緩やかとなるから、方式RRを用いれば、局部的温度差があっても P の値は3.2 Kと小さく、消費電力も400 Wと比較的小さいので、前室を設けてシャッタ開閉に伴う室温の急変を緩和すれば方式RRでかなりよい加工精度が期待でき、ランニングコストも小さくてすむ。

3. 2. 2 室温の時間的変化が急激な場合

Fig.4 Relationship between costs and performances when room temperature change is rapid

この場合(図4)は各方式を表す点が方式SSと00を結ぶ斜線の上にはほぼ並んでいて、方式C0を除けばいずれも室温変動が緩やかな場合より精度が悪く、消費電力が大きい。方式C0だけが室温変動が緩やかな場合より精度がよくなっている理由は、室温変動の周期が短いのでその周波数応答としてのベッドの温度波の振幅が小さくなり、定値制御の主軸頭との温度差が小さくなるからである。

図4上の各点は左上から右下に向かってほぼ5つのグループに分けられる。第1のグループは方式SSで室温変動が緩やかな場合と同じである。第2のグループは方式RRとMRで共にベッドを室温追従制御するものであり、精度は方式RRのPの値が3.8Kで方式SSにかなり近く、方式MRも5Kでかなりよい。方式MRの精度がRRより悪くなる理由は方式MRの主軸頭温度の位相の遅れが方式RRより大きくなり、主軸頭とベッドの温度差が大きくなるためである。

消費電力は方式RRもMRも内部熱源を冷却するための電力300Wの約3倍でかなり大きい。方式SSに比べればその半分以下である。第3のグループはベッドを定値制御するものであり、Pの値は7Kで第2グループより悪くなるが消費電力は370Wと第2グループの40%以下である。

第4のグループはベッドを制御しないもので、精度は方式M0が第3グループとほぼ同じP=7Kで方式C0とR0はこれより悪く、特に主軸頭を室温追従制御するR0は制御なしの方式00について悪くPの値は18Kである。消費電力はいずれも300Wである。第5のグループは制御なしの方式00でこの精度は室温が緩やかに変動する場合とほぼ同じである。

室温が急変する場合で局部的温度差がある場合のP

とEの増加傾向は緩やかな変動の場合と同様である。

3.2.3 最適な温度制御方式

工作機械による加工仕事の中には並精度の量産もあれば高精度の少量生産もある。したがって精度に重点をおく場合もあればコストに重点をおく場合もあり、それぞれの場合における最適な方式がとられなければならない。工作機械の温度制御方式もコストパフォーマンスの立場で採用しなければならない。

コストに無関係に精度を重視する場合は方式SSが最適であることはいうまでもない。一般工場内で精度を重視する場合は図3~4で最も左にある点に対応する方式がよく、それは方式RRである。コストに重点をおく場合は図のなるべく下でなるべく左にある点に対応する方式が適する。それは室温が急変する場合は方式M0であり、室温変動が緩やかな場合は方式RRである。

前述のごとく昼夜連続稼働の工場では前室を設ければ方式RRが適する。従来主軸頭の室温追従制御がよく行われてきたが、ベッドを制御しないでこれを行う方式R0は精度が悪いことがわかった。

4. 結 論

コラムの曲げやねじりを主軸頭とベッドの温度差で評価し、工作物とテーブルの寸法差を室温とベッドの温度差で評価して目標値の異なるいろいろの温度制御方式についての精度と消費電力の関係を求めた結果次の結論を得た。

- (1) 一般工場内で精度を重視する場合は主軸頭とベッドの両者を室温追従制御するのが最もよい。
- (2) コストを重視する場合は一般工場内でベッドは制御なしで主軸頭を機温追従制御するのが最もよい。
- (3) 昼夜連続稼働の工場で前室を設け、シャッター開閉の影響を緩和すれば、主軸頭とベッドの両者を室温追従制御することにより低ランニングコストでかなり高精度が得られる。

参 考 文 献

- 1) 千輝淳二ほか：工作機械の温度制御に関する研究(第4報)，精密工学会誌，53，4(1987)625。
- 2) 垣野義昭ほか：工作機械の熱変形に関する研究(第4報)，精密機械，40，12(1974)1105。
- 3) 奥島啓志ほか：工作機械の熱変形に関する研究(第2報)，精密機械，38，7(1972)565。