

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl<sup>7</sup>

G05B 19/18

G05B 13/02 B23Q 15/12



# [12] 发明专利说明书

[21] ZL 专利号 99811978.4

[45] 授权公告日 2004 年 6 月 30 日

[11] 授权公告号 CN 1155862C

[22] 申请日 1999.9.2 [21] 申请号 99811978.4

[30] 优先权

[32] 1998. 9. 2 [33] IL [31] 126033

[86] 国际申请 PCT/IL1999/000477 1999.9.2

[87] 国际公布 WO2000/014612 英 2000.3.16

[85] 进入国家阶段日期 2001.4.10

[71] 专利权人 OMAT 有限公司

地址 以色列耶路撒冷

[72] 发明人 鲍里斯·菲恩斯坦 马克·祖克曼

伊格尔·鲁巴施金

艾杜尔德·塔巴奇尼克

审查员 毛 燕

[74] 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专利

商标事务所

代理人 马 浩

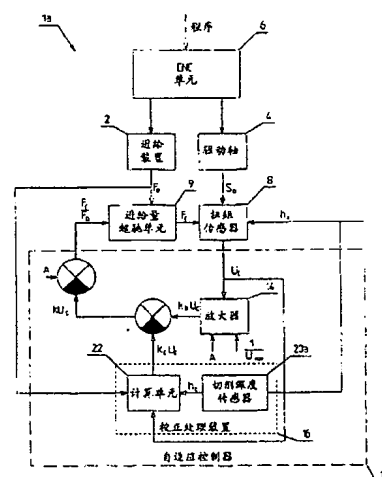
权利要求书 3 页 说明书 7 页 附图 5 页

[54] 发明名称 自适应控制车削操作的方法和系统

控制器(10)能计算  $k = f(k_o, k_c)$ 。

[57] 摘要

一种自适应地控制由车刀在工件上进行的车削操作的自适应控制系统, 调节一个已控制的输入操作参数  $F$  以将一个输出操作参数  $\Delta M$  实际保持在预定值  $\Delta M_o$  上并补偿由至少一个操作条件  $B = B(t)$  的变化所导致的输出操作参数  $\Delta M$  的变化。该系统包括用于提供与当前值  $\Delta M_o$  成正比的一个信号的输出操作参数  $\Delta M$  传感器(8), 和根据  $kU_o$  用于确定输入操作参数  $F$  应该被调节到的值  $F_c$  的一个自适应控制器(10), 其中  $k$  是一个信号传输系数, 它包括与  $\Delta M_o$  成反比的一个恒定信号传输系数分量  $k_o$ 。自适应控制器(10)包括将信号  $U_o$  转换成  $k_o U_o$  的一个放大器(14), 和将控制操作的输入参数调节为  $F_c$  的已控制的一个输入参数超驰单元(9)。自适应控制器(10)还包括计算  $k_o U_o$  的一个校正处理装置(16), 其中  $k_c$  是一个改变的信号传输系数分量其当前值取决于操作条件  $B = B(t)$  的变化。该自适应



1. 一种自适应地控制由车刀在工件上进行车削操作的方法, 控制车刀相对于工件运动的可调节输入操作参数  $F$ , 以将一个输出操作参数  $\Delta M$  实际保持在预定值  $\Delta M_0$  上并因此实际上补偿由随时间改变的至少一个操作条件  $B=B(t)$  的变化所导致的所述输出操作参数  $\Delta M$  的变化, 该方法包括如下步骤:

(a) 测量输出操作参数  $\Delta M$  的当前值  $\Delta M_c$ ,

(b) 通过  $\Delta M_c$  乘以具有与  $\Delta M_0$  成反比的恒定校正系数分量  $K_0$  的校正系数  $K$ , 估算  $\Delta M_c$  与  $\Delta M_0$  之间的关系, 其中恒定校正系数分量  $K_0$  被定义为:

$$K_0 = A / \Delta M_0$$

这里  $A = F_{id} / F_0$

用  $F_{id}$  表示空载进给速率而  $F_0$  表示预编程的基本进给速率, 及

(c) 根据  $K \Delta M_c$ , 确定可调节输入操作参数  $F$  应该被调至的值  $F_c$ ; 其特征在于

(d) 所述校正系数  $K$  包括一个变化的校正系数分量, 该变化的校正系数分量的当前值  $K_c$  根据所述操作条件  $B=B(t)$  的变化而改变, 步骤(b)还包括计算该变化的校正系数当前值  $K_c$  和计算  $K = K_0 - K_c$ 。

2. 如权利要求 1 所述的方法, 其中可调节操作输入参数  $F$  是车刀的进给速率。

3. 如权利要求 1 所述的方法, 其中输出操作参数  $\Delta M$  是由驱动旋转的工件所产生的切削转矩。

4. 如权利要求 1 所述的方法, 其中输出操作参数的预定值  $\Delta M_0$  是一个最大值  $\Delta M_{max}$ , 这个参数可以是在变化的操作条件  $B$  区别于其初始值或正常值最大程度时。

5. 如权利要求 1 所述的方法, 其中变化的操作条件  $B$  是一个表示工件材料的厚度的物理参数。

6. 如权利要求 1 所述的方法, 其中变化的操作条件  $B$  是一个表示切

削深度  $h_c=h_c(t)$  的物理参数。

7. 如权利要求 5 或 6 所述的方法, 其中根据感应所述物理参数的当前值获得变化的校正系数分量的当前值  $K_c$ 。

8. 一种自适应地控制由车刀在工件上进行车削操作的自适应控制系统, 通过调节被控制的可调节输入操作参数  $F$ , 以将输出操作参数  $\Delta M$  实际保持在预定值  $\Delta M_0$  上并因此实际补偿由至少一个操作条件  $B=B(t)$  的变化所导致的所述输出操作参数  $\Delta M$  的变化, 该系统包括:

用于提供与输出操作参数当前值  $\Delta M_c$  成正比的信号  $U_c$  的输出操作参数  $\Delta M$  传感器;

根据  $kU_c$ , 确定可调节输入操作参数  $F$  应该被调节到的值  $F_c$  的一个自适应控制器, 其中  $k$  是一个信号传输系数, 具有与  $\Delta M_0$  成反比的恒定信号传输系数分量  $k_0$ ,  $k_0=A/U_0$ 。

其中  $A=F_{id}/F_0$ 。

用  $F_{id}$  表示空载进给速率而  $F_0$  表示预编程的基本进给速率;  $U_0$  是来自操作输出参数的传感器对应于值  $\Delta M_0$  的一个信号, 所述的自适应控制器包括能将信号  $U_c$  转换成  $k_0U_c$  的一个放大器; 及

能由所述自适应控制器控制, 以将被控制的可调节输入操作参数调节到  $F_c$  的一个输入参数超驰单元;

其特征在于

所述的自适应控制器还包括计算  $k_cU_c$  的一个校正处理装置, 其中  $k_c$  是一个变化的信号传输系数分量, 其当前值取决于所述操作条件  $B=B(t)$  的变化, 该自适应控制器能计算  $k=k_0-k_c$ 。

9. 如权利要求 8 所述的自适应控制系统, 其中输出操作参数的预定值  $\Delta M_0$  是一个最大值  $\Delta M_{max}$ , 这个参数可以是在变化的操作条件  $B$  区别于其初始值或正常值最大程度时, 并且相应的传感器信号  $U_0$  等于  $U_{max}$ 。

10. 如权利要求 8 所述的自适应控制系统, 其中输出操作参数  $\Delta M$  传感器是一个由驱动旋转工件所产生的切削转矩传感器。

11. 权利要求 8 所述的自适应控制系统, 其中所述的输入参数超驰单元是一个进给速率超驰单元。

12. 如权利要求 8 所述的自适应控制系统,其中所述校正处理装置包括一个传感器或用于感应操作条件 B 的当前值,以连续地用于  $k_c$  的计算。

13. 如权利要求 8 所述的自适应控制系统,其中所述的校正处理装置包括计算操作条件 B 当前值的一个计算器,以连续地用于  $k_c$  的计算。

## 自适应控制车削操作的方法和系统

### 技术领域

这个发明涉及在数控机床上切削操作的自适应控制,其中表示切削刀具相对于工件移动特性的输入控制参数,在切削操作期间根据规定劳动生产率所测量的输出操作参数,被不断地调节。本发明尤其涉及在车床上进行的车削操作的自适应控制,其中输入控制参数是切刀的进给速率而输出参数是车床驱动轴的切削扭矩、切削力或消耗功率。

### 背景技术

在数控操作车床中,一个程序命令进给装置根据车刀用其切削工件的进给速率进给并命令车床驱动轴根据与此相关的工件应以此被旋转的速度旋转。进给速率和选择的速度是由程序根据预先编制的切削条件为每个切削操作正常确定的输入控制参数,该切削条件例如是切削深度、工件直径、要加工的工件材料、切削刀具类型等。

然而,数控程序的效果受它们不能考虑的切削条件的某些不可预见的实时变化限制,即切削深度的变化、工件材料的不均匀性、刀具磨损等。

在数控机床上以及在很多其它机床上最佳的切削操作方案,通常与切削刀具相对于工件移动的自适应控制有关并且尤其与根据测量的由机床所产生的切削扭矩调节切刀进给速率有关,以补偿切削条件的变化。

图3说明一种供数控操作机床使用,用各个输入控制参数  $F_0$  即切刀的基本进给速率和  $S_0$  即主轴的基本旋转速度的预编程值,自适应控制车削操作的已知控制系统;数控操作机床具有由数控程序所命令的一个进给装置和一个驱动轴,以分别建立切削刀具和接近主轴的工件的移动(切刀和工件未表示)。

如图3所看到的,控制系统包括测量由驱动轴所产生的切削扭矩  $\Delta M$  的扭矩传感器。根据切削条件  $B$  不可预见的变化,切削扭矩  $\Delta M$  可以具有不同的当前值  $\Delta M_C$ ,据此扭矩传感器产生与  $\Delta M_C$  成正比的当前信号

$U_c$ 。控制系统也包括含带信号传输系数  $k'_0$  的放大器的已知自适应控制器, 它将信号  $U_c$  转换成  $k'_0 U_c$  并随后确定进给速率  $F_c$ 。借助进给速率超驰单元应该被调节的一个值  $F_c/F_0=f(k'_0 U_c)$  以便补偿切削条件  $B$  的变化并由此保持切削扭矩  $\Delta M_c$  尽可能地接近其最大金属加工能力所要求的最大值  $\Delta M_{\max}$ 。

最大切削扭矩值  $\Delta M_{\max}$  是在以最大切深切削由驱动轴所产生的预定切削扭矩, 而放大器的信号传输系数被定义为:

$$k'_0=1/U_{\max}$$

其中  $U_{\max}$  是来自扭矩传感器对应于最大扭矩  $\Delta M_{\max}$  的一个信号。

根据下列关系式由自适应控制器按照其信号传输系数  $k'_0$ 、预编程的基本进给速率  $F_0$  和信号  $U_c$  来规定当前值  $F_c/F_0$ :

$$F_c/F_0=A-k'_0 U_c \quad (1)$$

其中  $A=F_{id}/F_0$ , 而  $F_{id}$  是空车进给(无切削进给速率)。

系数  $A$  表示进给速率  $F_c$  相对于它的预编程值  $F_0$  可以被增加的程度, 通常不超过 2。

如上文所提到的, 因为信号  $U_c$  与切削扭矩  $\Delta M_c$  成正比, 为了解释自适应控制器的物理模型, 关系式(1)可以被表示如下:

$$F_c/F_0=A-K'_0 \Delta M_c=a_c \quad (2)$$

其中  $K'_0$  是对应于自适应控制器信号传输系数  $K'_0$  的一个修正系数并因此被换算为:

$$K'_0=1/\Delta M_{\max}$$

在图 4 中说明了自适应控制器的物理模型。如所见的, 切削条件  $B$  的变化影响由自适应控制器所使用的切削扭矩的当前值  $\Delta M_c$ , 以确定表示进给速率应被调至的当前值  $F_c$  特性的系数  $a_c$ , 并补偿已改变的切削条件  $B$ 。

据知, 在车削操作中, 不可预料地随时改变的切削条件和引起切削扭矩变化的主要原因是切削深度  $h_c=h_c(t)$ 。当车削给定直径的工件时, 切削扭矩  $\Delta M_c$  与切削深度  $h_c$  成如下的比例关系:

$$\Delta M_c=cF_c h_c=CF_0 a_c h_c \quad (3)$$

其中  $c$  是为车削操作所建立的静态系数而  $a_c$  在等式(2)中被规定。

根据等式(3)和(2), 切削扭矩  $\Delta M_c$  可以表达为:

$$\Delta M_c = A c F_0 h_c / (1 + c F_0 h_c K'_0) \quad (4)$$

如果在等式(4)中, 系数  $A=2$  而  $h_c=h_{\max}$ , 最大切削扭矩可以被表示为

$$\Delta M_c = 2 c F_0 h_{\max} / (1 + (c F_0 h_{\max} K'_0)) \quad (5)$$

同样, 当切削深度是很小的值  $h_{\min}$  这样使得  $h_{\min}/h_{\max} \ll 1$ , 切削扭矩  $\Delta M_{\min}$  也将很小:

$$\Delta M_{\min} \approx 2 c F_0 h_{\min} \ll \Delta M_{\max} \quad (6)$$

从上文根据所描述的自适应控制器得出, 如在图 5 的曲线 I 中所说明的, 在切削期间切削深度在较宽范围内变化, 还可以引起切削扭矩  $\Delta M_c$  的显著变化。

#### 发明内容

本发明的目的是提供一种车削操作自适应控制的方法和系统。

根据本发明的一方面, 提供了一种通过控制车刀相对于工件移动的可调节输入操作参数  $F$ , 使输出操作参数  $\Delta M$  实际保持在预定值  $\Delta M_0$  并由此补偿由随时改变的至少一个操作条件  $B=B(t)$  的变化所导致的所述输出操作参数  $\Delta M$  的变化, 自适应地控制在工件上由车刀进行车削操作的方法, 该方法包括以下步骤:

(a) 测量输出操作参数  $\Delta M$  的当前值  $\Delta M_c$ ,

(b) 通过  $\Delta M_c$  乘以校正系数  $K$  来估算  $\Delta M_c$  与  $\Delta M_0$  之间的关系, 系数  $K$  包括与  $\Delta M_0$  成反比的一个恒定的校正系数分量  $K_0$ , 恒定的校正系数分量  $K_0$  被定义为

$$K_0 = A / \Delta M_{\max}$$

其中  $A = F_{id} / F_0$

$F_{id}$  是空车进给速率而  $F_0$  是预编程基本进给速率, 及

(c) 根据  $K \Delta M_c$ , 确定可调节输入操作参数  $F$  应被调至的数值  $F_c$ ; 其特征在于

(d) 所述校正系数  $K$  包括一个变化的校正系数分量, 该变化的校正系数分量的当前值  $K_c$  根据所述操作条件  $B=B(t)$  的变化而改变, 步骤(b)进一步包括计算变化的校正系数当前值  $K_c$  和计算  $K = K_0 - K_c$ 。

操作输入参数  $F$  最好是车刀的进给速率而操作输出参数  $\Delta M$  最好是由驱动旋转工件所产生的切削扭矩。然而, 操作输出参数也可以是由刀具

作用于工件所产生的切削力或者由驱动所消耗的功率。

输出参数的预定值  $\Delta M_0$  最好是最大值  $\Delta M_{\max}$ , 在改变操作条件 B 区别于其初始值或正常值最大时。

改变的操作条件 B 可以是实际的物理参数, 例如切削深度  $h_c = h_c(t)$ , 工件材料的厚度等, 因此可以根据感应这个参数的当前值随后获得改变的系数分量  $K_c$  的当前值。另一方面, 改变的操作条件 B 可以是切削过程中一个或多个物理参数的数字关系式。

根据本发明的另一方面, 提供了一种通过调节被控制的可调节输入控制操作参数 F, 以将输出操作参数  $\Delta M$  实际保持在预定值  $\Delta M_0$  并实际上由此补偿由至少一个操作条件  $B=B(t)$  的变化所导致的所述输出操作参数  $\Delta M$  的变化, 自适应地控制由车刀在工件上进行车削操作的自适应控制系统, 该系统包括:

用于提供与输出操作参数当前值  $\Delta M_c$  成正比的信号  $U_c$  的一个输出操作参数  $\Delta M$  的传感器;

根据  $kU_c$ , 用于确定可调节输入操作参数 F 应该被调节到的值  $F_c$  的一个自适应控制器, 其中 k 是一个信号传输系数, 具有与  $\Delta M_0$  成反比的一个恒定信号传输系数分量  $k_0$ ,  $k_0 = A/U_0$

其中  $A = F_{id}/F_0$ 。

$F_{id}$  是空车进给速率而  $F_0$  是预编程基本进给速率;  $U_0$  是来自操作输出参数传感器, 对应于值  $\Delta M_0$  的一个信号; 所述的控制器包括能将信号  $U_c$  转换成  $k_0 U_c$  的一个放大器; 及

能由所述的自适应控制器所控制以将被控制的可调节操作输入参数调节为  $F_c$  的一个输入参数超驰单元;

其特征在于

所述逢适应控制器还包括计算  $k_c U_c$  的校正处理装置, 其中  $k_c$  是变化的信号传输系数分量, 其当前值取决于所述操作条件  $B=B(t)$  的变化, 该自适应控制器能计算  $k = k_0 - k_c$ 。

最好,  $\Delta M_0 = \Delta M_{\max}$  且  $U_0 = U_{\max}$ 。

最好, 输出操作参数  $\Delta M$  的传感器是一个由驱动旋转的工件所产生的切削转矩传感器而输入参数超驰单元是进给速率超驰单元。

校正处理装置可以包括分别用于感应和计算操作条件 B 当前值的传感器或计算器,以连续地用于  $k_c$  的计算。

#### 附图说明

为了了解本发明及观察它实际上可以如何被进行,现在将通过非限制性的例子,参照附图来描述最佳实施例,其中:

图 1A 和 1B 是根据本发明二个不同的实施例,具有自适应控制器的自适应控制系统框图;

图 2A 和 2B 说明分别在图 1A 和 1B 中所表示的自适应控制器的物理模型;

图 3 是具有已知自适应控制器的控制系统框图;

图 4 说明图 3 所示的已知自适应控制器的物理模型;

图 5 说明在具有如图 3 和图 4 所示已知的自适应控制器(曲线 I)和具有根据本发明的自适应控制器(曲线 II)的系统中,切削扭矩  $\Delta M_c$  取决于切削深度  $h_c$ 。

#### 具体实施方式

图 1A 和 1B 说明根据本发明供自适应控制由切削刀具(未示出)在工件上进行车削操作的数控操作机床使用的一个自适应控制系统的二个不同的实施例。

分别在图 1A 和 1B 中指定的 1a 和 1b 的控制系统,各具有连接于切削刀具的进给装置 2 和与工件相连的驱动轴 4,它们由数控单元 6 的一个程序所指令,以使用各个切削刀具基本进给速率  $F_0$  和主轴基本旋转速度  $S_0$  的预编程值建立切削刀具和工件之间的相对运动。

各个控制系统 1a 和 1b 还包括,用于测量由驱动轴所产生并根据切削深度  $h_c = h_c(t)$  随时改变的切削扭矩  $\Delta M_c$ ,和产生与切削扭矩  $\Delta M_c$  成正比的一个信号  $U_c$  的扭矩传感器 8。它也具有调节进给速率  $F_c$  的进给速率超驰单元 9,以便保持切削扭矩  $\Delta M_c$  尽可能地接近其最大金属加工能力所要求的最大扭矩值  $\Delta M_{max}$ 。进给速率超驰单元 9 通过一个自适应控制器 10 处理来自扭矩传感器 8 的信号  $U_c$  来控制,以确定超驰单元 9 应该将

进给速率  $F_c$  调节的程度  $F_c/F_0$ 。

根据在本发明的背景技术中所提到的等式(1), 本文所描述的已知车削操作自适应控制器确定  $F_c/F_0$  为:

$$F_c/F_0 = A - k'_0 U_c$$

其中  $k'_0$  是已知的自适应控制器的信号传输系数。

现在将解释在本发明自适应控制器 10 中, 信号传输系数  $k$  或它的物理等效量——校正系数  $K$  如何以计及切削深度  $h_c$  变化的方式被计算。

如在本发明的背景技术中所说明的, 在车削操作中的切削转矩  $\Delta M_c$  可以根据等式(4)被表示, 其中对于本说明来说,  $A$  是表示进给速率  $F_c$  相对于编程值  $F_0$  可以被增加的程度的一個系数。

为了确保条件  $\Delta M_c = \Delta M_{\max}$ , 从等式(4)得到校正系数  $K$  应该是:

$$K = A/\Delta M_{\max} - 1/cF_0 h_c \quad (7)$$

其中根据本发明,  $A/\Delta M_{\max} = AK'_0$  构成恒定的第一正系数分量  $K_0$  而  $1/cF_0 h_c$  构成根据切削深度  $h_c$  的变化而变化的第二校正系数分量  $K_c$ 。

根据等式(3)

$$1/cF_0 h_c = a_c/\Delta M_c$$

由此校正系数  $K$  也可以表示为:

$$K = A/\Delta M_{\max} - a_c/\Delta M_c \quad (8)$$

从上文得出, 第二系数分量  $K_c$  可以表示为  $1/cF_0 h_c$  或者  $a_c/\Delta M_c$ 。

在  $K$  不小于零和不超过  $1/\Delta M_{\max}$  的逻辑条件下, 将完成校正系数  $K$  的确定。

图 2a 和 2b 表示根据上面的等式(7)和(8)确定系数  $K$  的物理模型。

在本发明控制系统 1a 和 1b 中, 由构制的自适应控制器 10 来执行在图 2A 和 2B 中表示的物理模型, 以确定  $kU_c = k_0 U_c - k_c U_c$ , 其中  $K_0$  是预定的恒定信号传输系数分量而  $k_c$  是取决于切削深度  $h_c$  的变化的信号传输系数分量。

系数分量  $k_0$  和  $k_c$  以与校正系数  $K_0$  和  $K_c$  同样的方式被确定。即, 恒定的系数分量  $k_0$  被确定为:

$$k_0 = A/U_{\max}$$

其中  $U_{\max}$  是来自转矩传感器 8 对应于最大转矩  $\Delta M_{\max}$  的一个信号。  
变化的系数分量  $k_c$  或者被确定为

$$k_c = 1/cF_0 h_c \quad (9)$$

或者, 根据等式(3)确定为

$$k_c = a_c/U_c \quad (10)$$

为确定  $kU_c$ , 自适应控制器 10 包括带有恒定信号传输参数  $K_0$  的放大器 14 和带有变化的信号传输系数  $k_c$  的校正处理装置 16。根据确定变化信号传输系数分量  $k_c$  (根据等式 9 或等式 10) 的方式, 校正处理装置 16 可以具有切削深度传感器 20a(图 1a)或者一个切削条件变化计算器 20b(图 1b), 和根据在图 2A 和 2B 中各自的物理模型分别按照等式(9)或等式(10)确定  $k_c U_c$  当前值的计算元件 22。

借助于由本发明控制系统提供的自适应控制, 考虑到切削深度  $h_c$  的变化, 可以调节车刀的进给速率, 以便在实际上较宽的切削深度范围内, 保持切削转矩  $\Delta M_c$  尽可能接近它的最大值  $\Delta M_{\max}$ , 因此增加了金属加工的生产率。在图 5 中, 以及在表示用已知的自适应控制系统和根据本发明的自适应控制系统获得的实验结果的下列表格中, 说明了这点:

|                     | $h_c/h_{\max}$                    | 1   | 0.9  | 0.8  | 0.7  | 0.6  | 0.5  | 0.4  | 0.3  | 0.2  | 0.1  | 0   |
|---------------------|-----------------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| 已知的自适应<br>控制系统(I)   | $a_I$                             | 1.0 | 1.0  | 1.1  | 1.1  | 1.2  | 1.3  | 1.4  | 1.5  | 1.6  | 1.8  | 2.0 |
|                     | $\Delta M_I / \Delta M_{\max}$    | 1.0 | 0.90 | 0.80 | 0.72 | 0.70 | 0.62 | 0.50 | 0.43 | 0.30 | 0.20 | 0   |
| 本发明的自适<br>应控制系统(II) | $a_{II}$                          | 1.0 | 1.1  | 1.3  | 1.6  | 1.9  | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 2.0 |
|                     | $\Delta M_{II} / \Delta M_{\max}$ | 1.0 | 0.98 | 0.98 | 0.98 | 0.98 | 0.9  | 0.82 | 0.70 | 0.43 | 0.25 | 0   |
| 比较的生产率              | $(a_{II}/a_I - 1) \times 100\%$   | 0   | 10   | 18   | 41   | 58   | 54   | 43   | 33   | 25   | 11   | 0   |

根据本发明自适应控制系统的上述实施例, 表示了它的非限制性例子, 而对熟练的技术人员显而易见的是在本权利要求的范围之内这个系统可以具有区别于在图中所描述和表示那些特点。

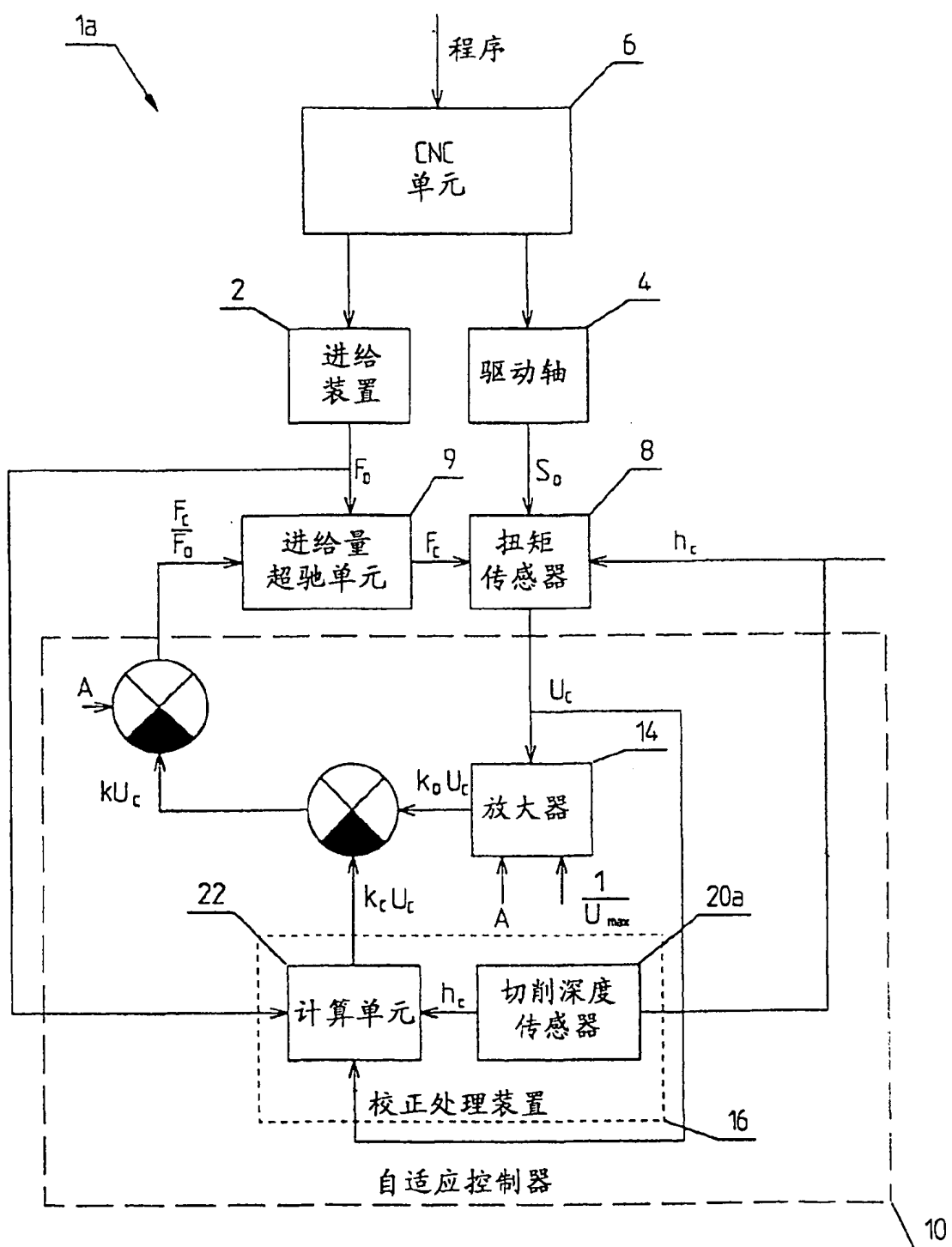


图 1A

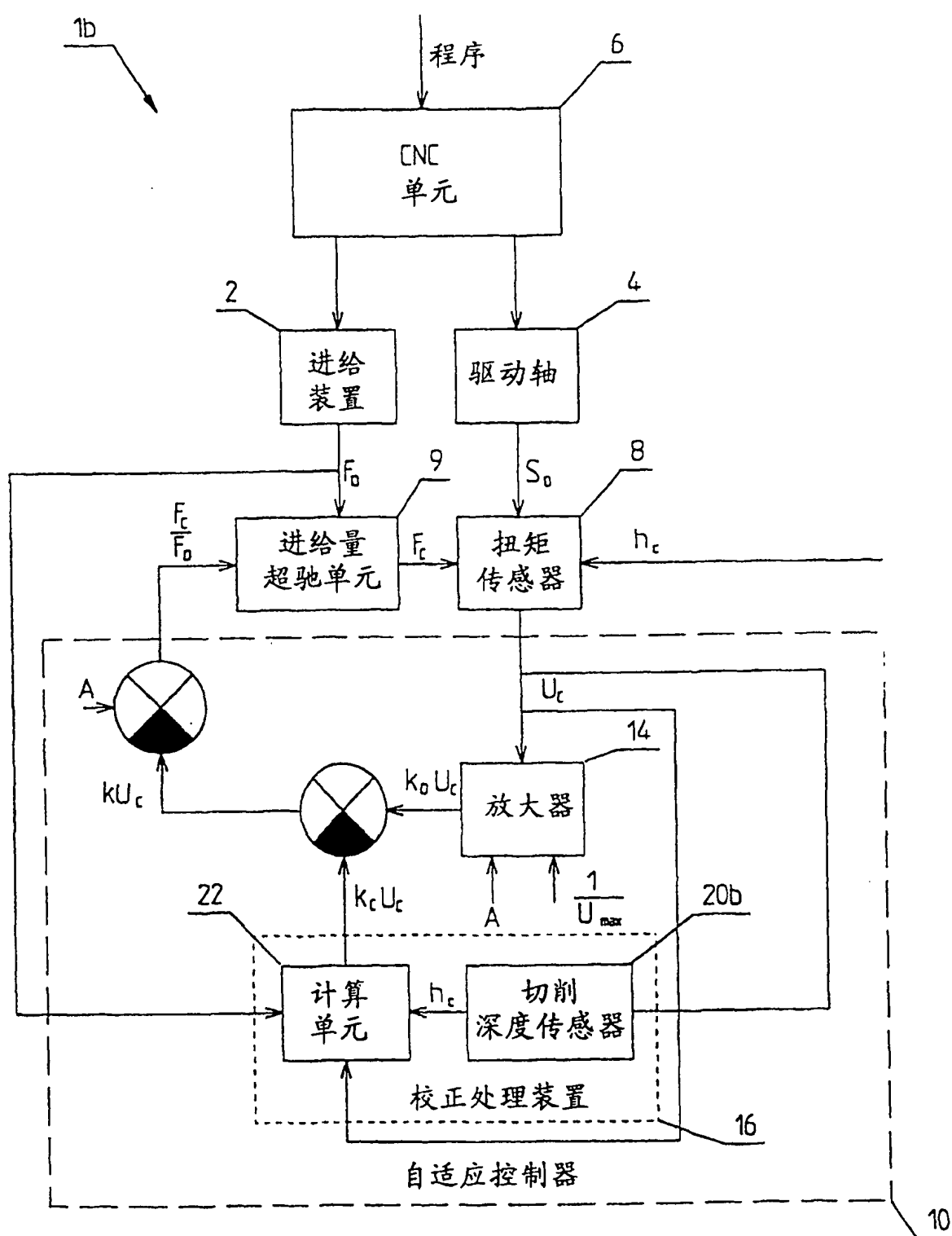


图 1B

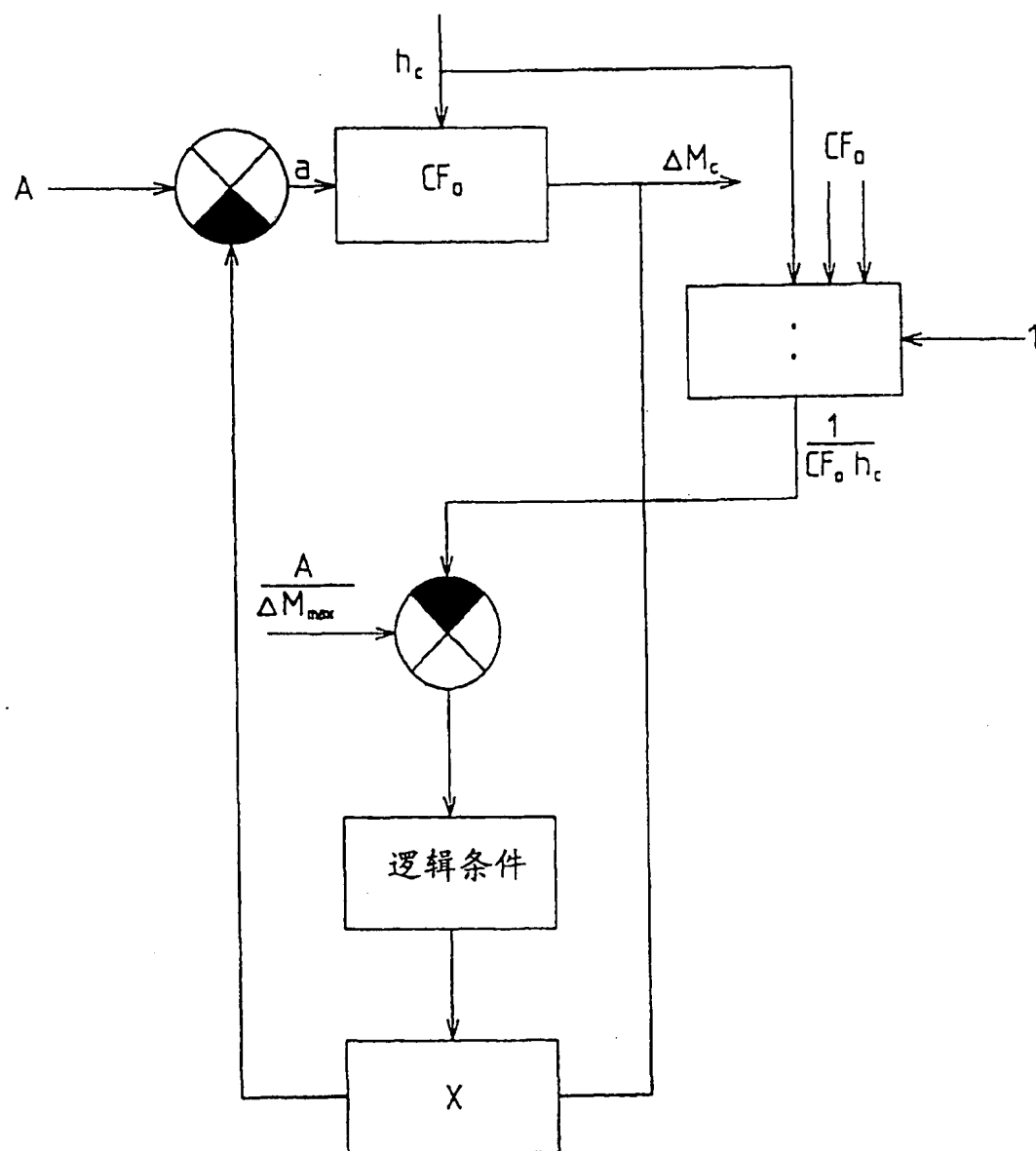


图 2A

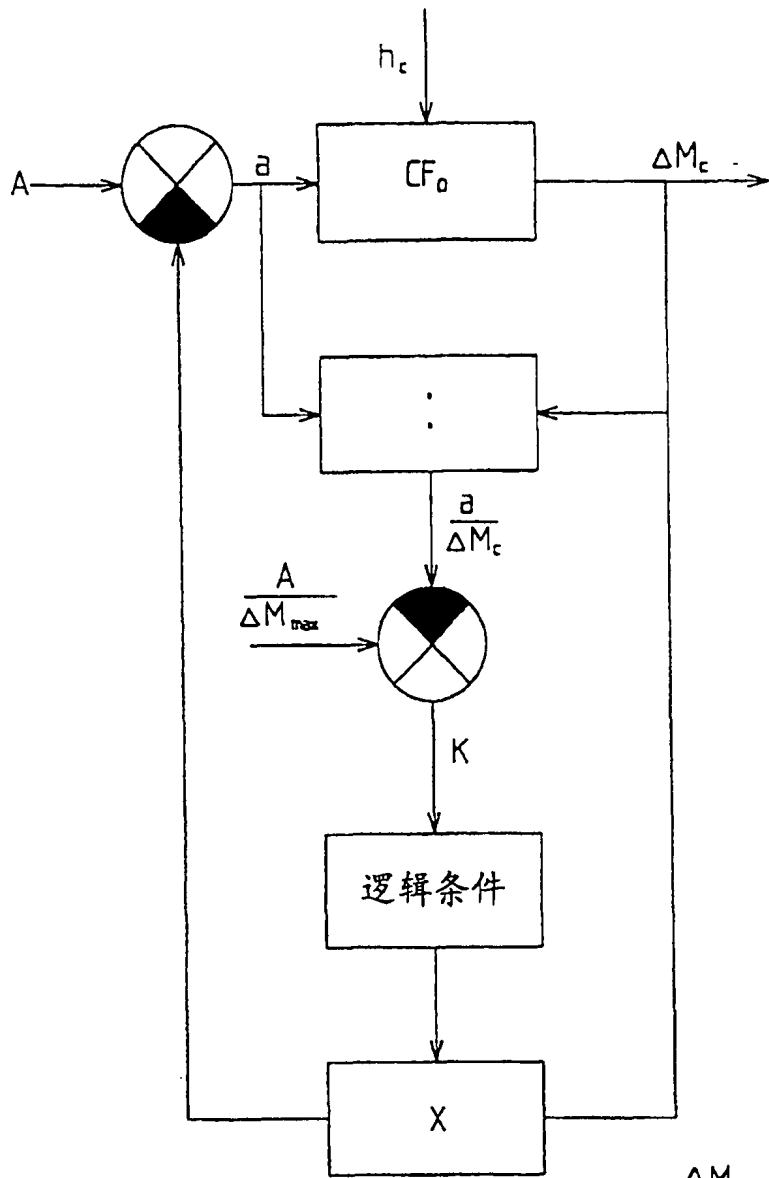


图 2B

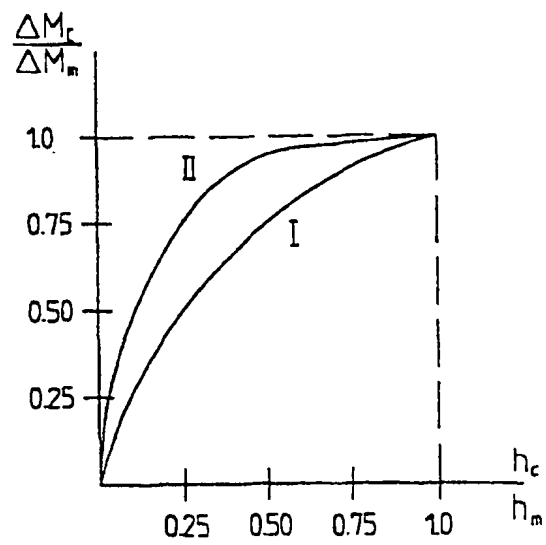


图 5

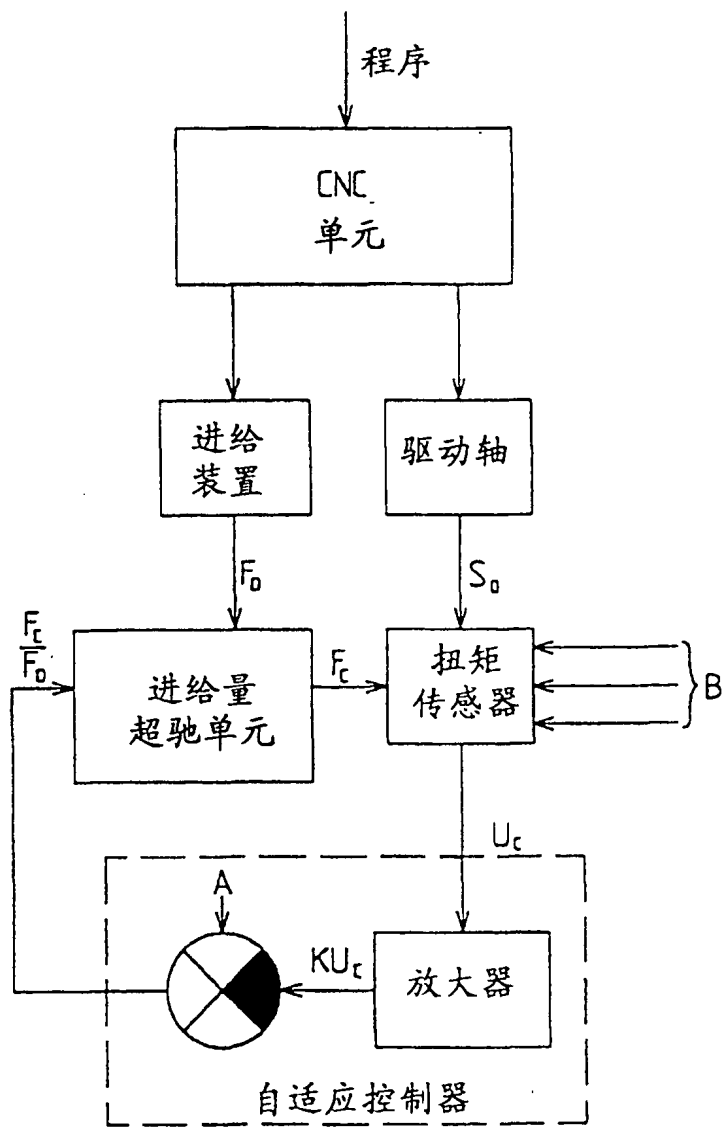


图 3 (现有技术)

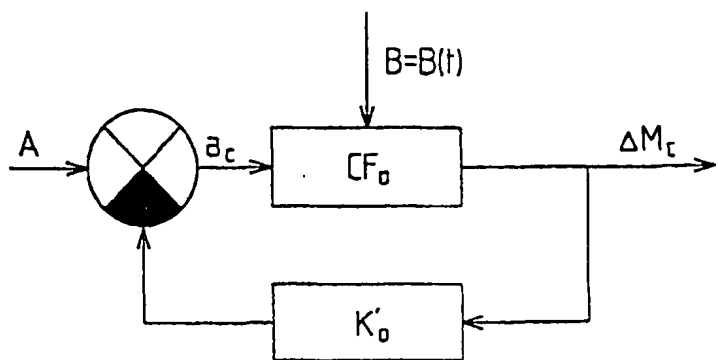


图 4 (现有技术)