



[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 96193564.2

[43]公开日 1998年5月27日

[11] 公开号 CN 1183148A

[22]申请日 96.4.26

[30]优先权

[32]95.4.28 [33]US[31]08/431,244

[86]国际申请 PCT/US96/05907 96.4.26

[87]国际公布 WO96/34324 英 96.10.31

[85]进入国家阶段日期 97.10.28

[71]申请人 埃克森化学专利公司

地址 美国得克萨斯

[72]发明人 雷蒙德·多那尔德·巴图夏克

罗伯特·威廉姆·富台那

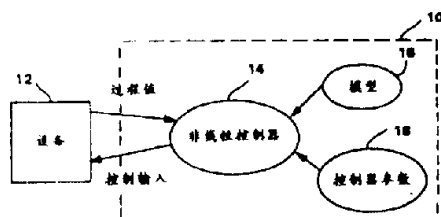
[74]专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专利商标
事务所
代理人 王以平

权利要求书 2 页 说明书 8 页 附图页数 3 页

[54]发明名称 控制非线性过程的反馈方法

[57]摘要

一系统用于特别包括受控变量(例如输入状态)和控制变量(例如输出状态)的过程。该系统中有测量控制变量的传感器电路和用于存储修正时间常数和至少一个控制变量的上下限值的存储器。上、下限限定一个控制变量的可被接受的范围。一处理器包含有描述一过程模型的数据,该模型使受控变量的成本与控制变量相关,并根据求得的解为一个控制变量提供预计值。处理器内的逻辑电路响应于处在上下限以外的一控制变量的测量值,确定使该控制变量的预计值返回到可接受的范围内的最低成本受控变量。可根据处理器信号操作设备内的仪器以改变受控变量(和输入状态)。



权 利 要 求 书

1. 包含包括输入状态的受控变量和包括输出状态的控制变量的设备过程的控制系统，所述系统包括：

用来测定至少上述控制变量的传感器装置；

存储至少一个控制变量的上、下限和修正时间常数的存储装置，上述上限和下限限定该控制变量可被接受的范围；

与上述传感器装置和上述存储器装置相连的处理器装置，它包含有描述上述设备过程的模型的数据，所述模型使受控变量的成本与控制变量相关，并根据求解进一步为所述至少一个控制变量提供预计值，所述处理器装置还包括逻辑电路装置，当所述至少一个控制变量的测量值在所述上下限之外时，该逻辑电路装置产生一个信号，以在取得其最低成本的方向上改变所述受控变量，所述受控变量在一个方向上改变以使所述至少一个控制变量的预计值处在所述上下限之内；

响应于所述控制信号的控制信号装置，它用作操作所述设备的装置以控制所述受控变量。

2. 权利要求1所述的设备过程控制系统，其中所述存储器装置还存储有这样的数据，这些数据描述所述模型的一个轨线响应函数，当所述控制变量突破所述上限时，该响应函数规定了所述一控制变量向所述可接受的上下限返回的返回速率，并描述所述模型的一个轨线响应函数，当所述至少一个控制变量突破所述下限时，该响应函数规定了所述一控制变量向所述可接受的上下限返回的返回速率；这两个轨线响应函数包含有修正时间常数并表述所述至少一个控制变量的测量变化速率与要求变化速率之间的关系；所述逻辑电路装置采用上述数据求出所述极小成本输入状态。

3. 权利要求2所述的设备过程控制系统，其中用于所述至少一个控制变量的所述轨线响应函数为：

$$dy_k/dt=(SPH_k-(y_k+b))/T+Vhp_k-Vhn_k$$

$$dy_k/dt=(SPL_k-(y_k+b))/T+Vlp_k-Vln_k$$

$$k=1 \text{ 至 } K$$

$V_{lp} \geq 0.0$

$V_{ln} \geq 0.0$

$V_{hp} \geq 0.0$

$V_{hn} \geq 0.0$

其中：

SPH = 控制变量或制约的上限；

SPL = 控制变量或制约的下限；

y = 预计的控制变量；

b = 说明预计与测量的误差的偏置值；

V_{hp} = 测得的变量从 SPH 的正变化；

V_{hn} = 测得的变量从 SPH 的负变化；

V_{lp} = 测得的变量从 SPL 的正变化；

V_{ln} = 测得的变量从 SPL 的负变化；

k = 进入未来的时间间隔；

K = 在控制器中所用的时域上的时间间隔；

T = 控制变量的所需闭环响应速率的时间常数。

4. 权利要求 3 所述的设备过程的控制系统，其中所述逻辑电路装置提供极小化关系的解，以为所述至少一个控制变量移入到所述数值带内求出最低成本受控变量，所述极小化关系表示为：

$$\text{Min Sum } (W_h * V_{hp_k} + W_l * V_{ln_k}) + C(x, u)$$

式中：

W_h, W_l = 罚权重

V_{hp_k}, V_{lp_k} = 违规变量；

$C(x, u)$ = 成本罚函数

说明书

控制非线性过程的反馈方法

本发明涉及过程控制系统，更确切地说涉及设备受控变量与设备控制变量之间存在非线性关系的、以模型为基础的反馈控制系统。

Prett 等人题为“动态矩阵控制方法”的美国专利 4,349,869 叙述用于生产条件下若干相关过程的控制与最佳化作业的方法和装置。为完成控制动作，使设备的输入变量承受测得的扰动并记录对输出的动态效应，以能预计在线作业中过程的响应。为实施该控制法，Prett 等人编制了初始试验阶段中导出的数据表。表中列入不同输入和所产生的输出，在随后设备作业中作为基本参考点。

Prett 等人的方法特别适合控制线性系统的运行或可模拟成线性的系统的运行。但是，对于非线性设备，尤其是有多种控制和受控变量时，不适合使用他们的方法。一控制变量是设备的一个输出量，它受一个或多个受控变量（例如设备输入量）的变化的影响。

动态矩阵控制法在聚合过程上的应用见 Peterson 等人的“非线性 DMC 算法及其在半分批聚合反应器上的应用”，Chem. Eng. Science, Vol. 47, No. 4, pp. 737-753(1992)。Peterson 等采用了非线性控制器和数字算法求解，但他们的方法在获取控制解中未谋求使输入状态成本趋于最小。Brown 等在“限定的非线性多变量控制算法”中（Trans I ChemE, Vol. 68 (A), Sept. 1990, pp. 464 - 476）叙述一种非线性控制器，它包含有制止控制动作的一规定大小的可接受输出量值。但是，Brown 等未试验哪些输入量值能取得最低成本而又能实现输出控制。

以往的技术专利对于使用同时采取线性和非线性表达式建立控制和受控变量关系的、以模型为基础的系统很有教益。Axelby 等的美国专利 4,663,703 介绍一种参考预计模型控制器，它采用一分系统脉冲模型模拟和预计未来输出。系统有一增益可调的反馈与控制回路，经调整该回路使动态系统即使在其动态特性变化时看来仍具有恒定特性。

Beauford 等的美国专利 5,260,865 叙述用于蒸馏工艺的、以非线性模型为基础的系统，它采用一非线性模型计算生产过程中的蒸气和馏分的流量。Sanchez (4,358, 822) 叙述一种自适应预计控制系统，它由一模型确定将用于一过程的控制矢量，使过程的输出在未来一瞬间处在所要求的值上。在实时的基础上对模型参数作了修正，使输出矢量逼近实际过程矢量。Sanner 等的美国专利 5,268,834 采用神经网络构成控制用的设备模型。

设备的操作为一动态非线性过程并包含有多个操作与控制变量时，将以模型为基础的系统推广到设备操作上并不是一个简单问题。到目前为止，容量和成本合理的过程控制计算机不足以处理这些动态设备工艺产生的许多联立议程的求解。

已发展了参考合成技术 (reference synthesis techniques) 应用于非线性控制问题 (例如 pH 值控制问题)。希望一非线性生产系统遵从一参考轨线，并且一旦设备延迟中止时达到符合一次或二次轨线的一设定点。

Bartusiak 等在“参考系合成法设计的非线性前馈/反馈控制结构”中 (Chemical Engineering Science, Vol, 44, No. 9, pp. 1837-1851 (1989)) 介绍一种可应用于高度非线性生产作业的控制方法。Bartusiak 等基本上阐述由一组微分方程控制的设备。一闭环控制系统的所需特性被描述成一组可设计成非线性的积分微分方程。所需特性称为参考系。

Bartusiak 等通过调整受控变量使系统特性尽可能近似于参考系而取得所需闭环特性。使开环系统与所需闭环系统相等或通常通过最大限度减小两系统之间的差别来确定受控变量的作用。这样就确定了所需设备特性。控制变量与一调谐参数一并确定，该参数控制控制变量达到设定点的速率。更具体地说，设定所需设备输出参数在控制阶段控制系统达到所需输出参数的速率由调谐参数确定。因此是引起控制功能使输出达到规定参数值而并未考虑受控变量的成本函数。这一结果未考虑受控变量成本的变化。该变化不但能作有效的设备操作控制，而且还能最大限度降低成本。

因此，本发明的目的在于提供一种用于非线性过程控制的一种改进方法，该法能将调谐参数应用于控制变量。

本发明的另一目的是提供一种控制非线性过程的改进方法，该控制方法能降低控制变量输入成本而同时取得所需控制变量。

一系统用于控制包括受控变量（例如输入状态）和控制变量（例如输出状态）的过程。该系统中有测量控制变量的传感器电路和用于存储修正时间常数和至少一个控制变量的上下限值的存储器。上、下限限定一个控制变量的可被接受的范围。一处理器包含有描述一过程模型的数据，该模型使受控变量的成本与控制变量相关，并根据求得的解为一个控制变量提供预计值。处理器内的逻辑电路响应于处在上下限以外的一控制变量的测量值，确定使该控制变量的预计值返回到可接受的范围内的最低成本受控变量。可根据处理器信号操作设备内的仪器以改变受控变量（和输入状态）。

图 1 本发明所用系统的框图。

图 2 本发明所用控制功能示意图

图 3、4 可用来理解本发明运作的流程图。

在本发明后面的叙述中将使用以下术语：

过程模型：一过程模型确定了设备系统的运行，它在一连续时间范畴内以代数方程和微分方程的形式表述。

受控变量离散化：操作步骤为离散的时间变量。采用零阶保持函数来提供用于过程模型中的离散操作步骤变量。

参考轨线：参考轨线规定控制器的性能，作为控制变量的响应速率。

目标函数：目标函数定义最佳控制性能。目标函数包括偏离控制设定点的代价和经济成本（利润）函数。

受控变量极限：设定受控变量极限来反应辅助控制器的极限或状态，诸如范围极限、设定点极限和防终止（anti wind-up）条件。

反馈：反馈在参考轨线中用作一偏置值，它表示过程测量结果与模型预计值之间的差。

状态估计：过程模型状态和输出的预计，在每一控制器扫描时根据来自操作与前馈变量的当前值和前一控制器扫描时间内导出的预计值通过动态模型的积分而产生。

起始化：控制点输出的起始化系通过读取每次扫描时的当前控制变量值和提供作为这些值的增量的控制器变化（controller moves）来完成。当控制器程序运行时（闭环或开环），模型的状态和输出在前一控制器扫描中预计的值上起始。首次接通程序时，通过对静态模型求解当前操作和前馈值对模型状态和输出进行起始化。

由图 1 可见，一利用数字计算机的控制系统监控设备 12 中出现的过程。过程数值馈送给数字控制系统 10 内的非线性控制器 14。过程模型 16 存储在数字控制系统 10 内并呈现为一系列非线性方程，向非线性控制器 14 提供一参考系。多个控制参数 18 制约着非线性控制器 14 导出的控制数值。将过程数值的测量结果与由求解模型 16（结合控制参数 18）导出的预计值相比较而导出修正值并用作设备 12 的控制输入。

在图 2 中，非线性控制器 14 包含动态过程模型 16，它为系统受控变量、独立变量和偏置值的变化确定过程状态的变化速率。非线性控制器 14 还包括一个或多个调谐值用来确定闭环过程的响应特性。确切地说，每一过程响应特性确定了响应于受控变量变化的控制变量应遵从的轨线。最佳化功能块 19 确定了在给定测量值与过程模型 16 导出的预计值之差时达到所要求的响应轨线的最小受控变量成本。

下面将说明非线性控制器 14 为设备 12 的一个或多个变量（例如输出）建立极限边界。一旦确立了一控制变量的上、下限，非线性控制器 14 便执行一控制程序，该程序结合至少一个极限将一控制变量的测量变化速率与该控制变量所需要的变化速率进行比较。如果控制变量在上、下限以内，便不采取控制动作。如果控制变量在两极限以外，则由测得的动态变化速率与模型动态变化速率的比较能导出变化值的误差率。于是，该变化值误差率为目标函数所采用，以便能确定一组受控变量，该组变量将表示使控制变量返回上、下限之内的最低成本。通过利用上、下限确定控制变量数值的允许范围，便能检验不同的受控变量成本，以确定怎样组配可使控制变量返回极限值以内而同时最大限度地降低受控变量的成本。

参照图 3 和 4 来介绍非线性控制器 14 的工作原理。非线性控制器 14 在与设备 12 一体化的通用计算机上运行。非线性控制器 14 以规定的频率



或扫描速率（例如每分钟 1 次）运行，从而监视控制变量，并计算受控变量而导出各受控变量的变动以执行控制动作。

程序以把设备数据读入数字控制系统 10（框 30）开始。这些数据包括控制变量的当前值、受控变量及辅助或前馈变量。设备的测量结果或者由现场仪表提供，或者通过脱线实验室分析提供。接着将每一控制变量的当前值与相应的模型预计相比较。算出测量值与预计值之差（框 32）作为设备与模型失配的偏置值。

如框 34 中所示，然后确认输入数据（例如排除得不到测量值或值在范围以外等不正常状态）。还要进行数据整理，这包括以操作员规定的极限和设备控制系统状态值为根据的受控变量范围的滤波和设定。

在非线性控制器 14 开始工作时，进行冷起动初始化（见判定框 36）。受控或前馈独立变量的值从存储在数字控制系统 10 内的数据库中读取（框 38）。初始化计算模型状态和设备的输出，它们表示温度、成份和产品性能等设备状态。

为说明本程序，下面将使用状态空间模型。各状态定义为“ x ”矢量，设备输出用“ y ”矢量表示。独立变量由“ u ”值作如下表示：

$$\dot{x} = F(x, u) \quad (1)$$

$$y = H(x) \quad (2)$$

把设备状态值用作非线性控制器 14 的初始值（见框 40 和 42）。然后估算状态值并将之写入存储器（框 44）。这时非线性控制器 14 开始过程控制算法的运行（框 46）。

如图 4 所示，控制过程从设备控制系统硬件读取过程数据（框 48）以确定过程的当前状态。这些数据包括：

- 各模型状态的初始值；
- 预计设备输出的初始值；
- 表示设备/模型误差的偏离值；
- 模型参数；
- 独立变量的当前测量值；
- 控制变量和约束的目标值或设定点；



受控变量范围；

输入状态条件。

模型状态值和预计设备输出值或者是由上一次控制器运行得到的值，或者是冷起动的初始值。控制变量（例如将要控制的输出）和约束的设定点由操作员输入。输入的设定点作为一上限值和一下限值。利用这些值能调整受控变量（输入），以在一控制变量值到达上、下限值之间的条件下取得最低成本。模型参数值是预定的。独立变量的当前测量值由设备现场仪表或实验室分析导出。如上文指出，受控变量的范围是基于操作员定的极限和设备控制系统状态值。

然后设定控制器工作方式（框 50）。一种控制器工作方式能计算模型预计值并导出控制信号而不把控制信号加给设备。此后将认定数字控制系统被调成完全工作方式，这时可依据模型计算和测得的系统状态有效地控制受控变量。

输入数据被变换成配用于模型/控制系统的形式（框 52），并开始状态估计程序（框 54）。每个状态采用设备的动态模型加以估计。在下面方程 3 和 4 所示的状态/空间模型中，状态表示为“ x ”变量，设备输出表示为“ y ”变量，独立变量表示为“ u ”。

$$\frac{dx}{dt}=F(x, u) \quad (3)$$

$$y=H(x) \quad (4)$$

方程 3 表明模型状态的变化速率是模型状态本身和独立变量的一个函数。方程（4）表明，输出是模型状态的一个函数。模型估计值系通过方程 3 和 4 从非线性控制器 14 的上一次运行至当前时间进行积分而取得。优选的一种计算方法包括正交排列（orthogonal collocation），即把方程 3 和 4 分成时段，从而能在一相同的时间增量上并行求解微分方程。

非线性控制器 14 进行的控制计算系采用顺序二次规划技术完成（框 56）。控制计算求出能与将来的控制性能最佳匹配的受控变量未来的变动。非线性控制器 14 利用设备模型、定义特定控制器性能的参考轨线、目标函数（将在下面介绍）和受控变量范围。受控变量的移动在时域上是离散的。

利用了方程 3 和 4 示出的模型。如上所述，“ u ”变量表示独立变量，

且其子集为受控变量（即输入）。所有独立变量的值系通过在每个时间间隔 k 上离散的受控变量的“零阶保持函数”取得。零阶保持函数假定受控变量的值在两次执行程序之间保持不变。

参考轨线规定了控制器在根据所加约束改变控制变量时的性能。下面的参考轨线方程 5 和 6 表示控制变量变化速率与控制变量设定点和测得的控制变量间的误差（或差）之间的关系。

$$dy_k/dt=(SPH_k-(y_k+b))/T+Vhp_k-Vhn_k \quad (5)$$

$$dt_k/dt=(SPL_k-(y_k+b))/T+Vlp_k-Vln_k \quad (6)$$

$k=1$ 至 K

$Vlp \geq 0.0$

$Vln \geq 0.0$

$Vhp \geq 0.0$

$Vhn \geq 0.0$

式中，

SPH = 控制变量或约束的上限；

SPL = 控制变量或约束的下限；

y = 预计控制变量；

b = 与预计值和测量值间的误差相关的偏置值；

Vhp = 测得的变量从 SPH 的正变化；

Vhn = 测得的变量从 SPH 的负变化；

Vlp = 测得的变量从 SPL 的正变化；

Vln = 测得的变量从 SPL 的负变化；

k = 进入未来的时间间隔

K = 在控制器中使用的时域上的时间间隔

T = 所需的受控变量闭环响应速度的时间常数。

各变量 Vlp , Vhp , Vln 和 Vhn 在下面称为“违规”变量。每个“违规变量容许将不等变换成相等关系，并可通过在目标函数中加权重函数使约束优先。目标函数（即控制动作应予满足的关系）表示为：

$$\text{Min Sum} \quad (Wh*Vhp_k + Wl*Vln_k) + C(x, u) \quad (7)$$



式中,

W_h, W_l = 罚权重;

V_{hp_k}, V_{lp_k} = 上面定义的违规变量;

$C(x, u)$ = 成本罚函数。

方程 7 表述一 最小和函数用作违规出现时控制变量的上限或控制变量的下限。能视情况而定, 方程 7 应用加重 (或去加重) 一正违规值或一负违规值的权重因子。方程 7 还有一个项 (即 $C(x, u)$), 它是一成本函数, 与受控变量 u 和模型状态 x 均有关。

当试图多次改变受控变量时, 控制系统求解方程 7 并计算从各次解算得出的和。其目的在于使控制变量 y 返回到由上限 (SPH) 和下限 (SPL) 界定的范围内。因为 SPH 和 SPL 界定控制变量的范围, 故可求出受控变量的许多可能变化, 以确定怎样的组合产生最低的受控变量成本, 同时使控制变量回到可接受的范围。受控变量 (在任一控制动作中) 能使设备输出返回 SPH 与 SPL 之间的范围内时, 方程 7 中前两个表达式均为零, 函数的解严格地与受控变量表示的成本相关。

方程 7 的优化解受以方程 8 和 9 表述的附加受控变量范围限制:

$$ulb < u_k < uhp \quad (8)$$

$$ABS(u_k - u_{(k-1)}) < dub \quad (9)$$

式中:

uhb = 一受控变量的上边界

ulb = 一受控变量的下边界

dub = 时间间隔之间 u 的变化范围

一旦取得适宜的解, 便对照系统约束检验由未来每一时间间隔的受控变量值组成的输出 (框 58)。若认定输出数据有效, 便把数据写入存储器 (框 60), 并把计算所得受控值发送给设备 (框 62) 来操作现场控制件 (例如阀)。

应当清楚, 以上叙述仅是说明本发明。熟练技术人员可以不脱离本发明而设计出各种替代型式和改进型式。因此, 本发明的意图是涵盖所有这样的替代型、改进型和演变型, 它们都在所附权利要求的范围内。

图1

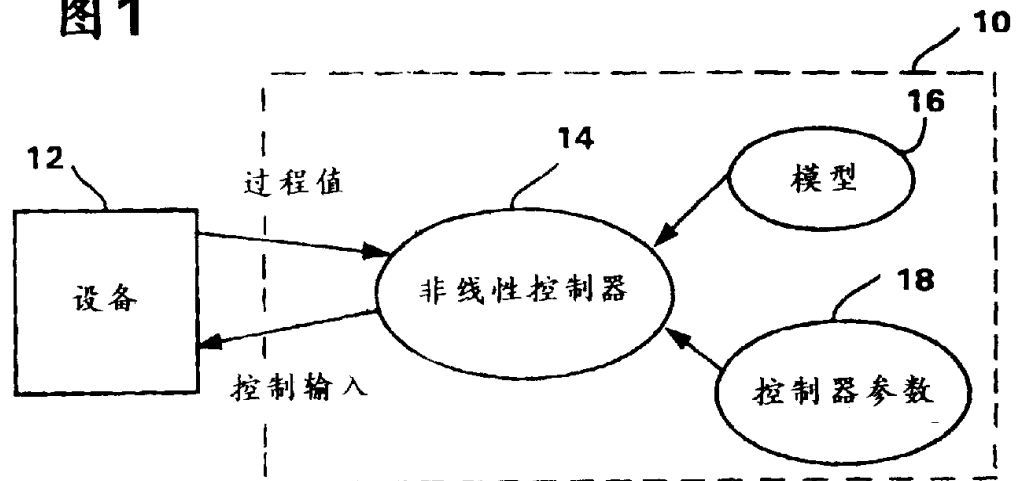


图2

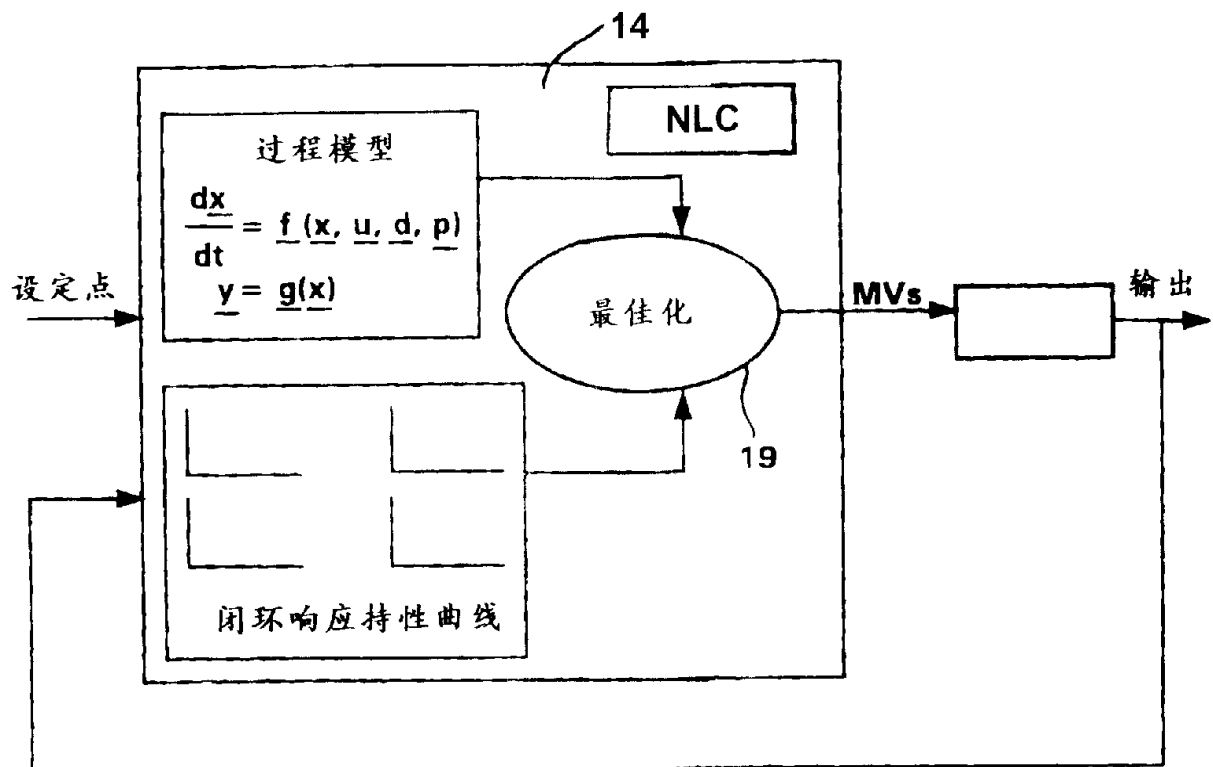


图3

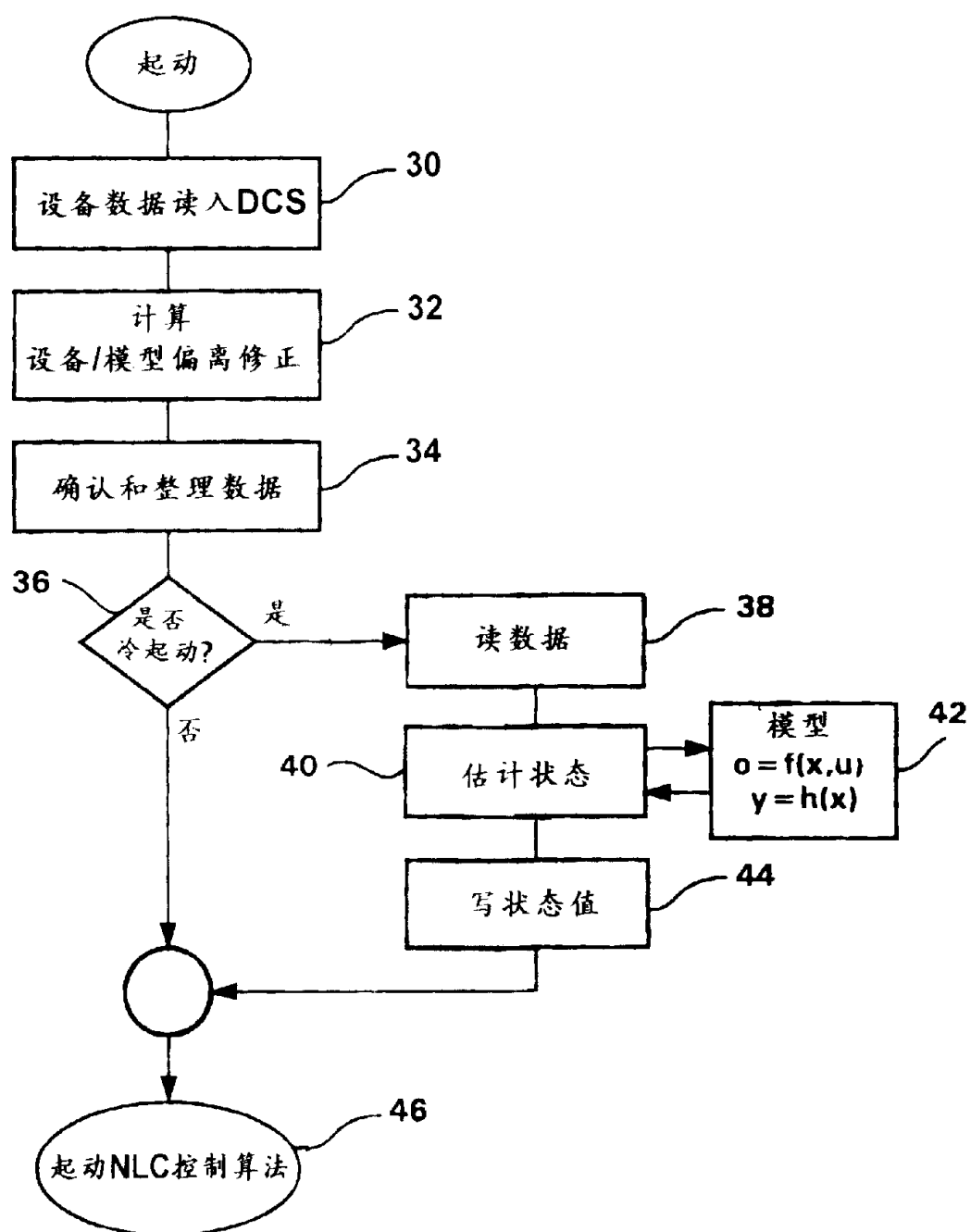


图4

