

一种受限机械手的自适应力/位置控制方法*

苏春翌 周其节

(华南理工大学自动化系, 广州, 510641)

摘要: 对于受限机械臂, 本文提出了一种自适应的力/位置控制方法. 其实现是基于给出的新的降阶动力学模型, 在反馈信号中引入力的累积误差信号, 利用降阶模型的本身特性从而达到自适应力/位置控制的目的. 给出的自适应律是通过跟踪误差信号来调节的. 仿真结果证实了本方法的正确性.

关键词: 受限机械手; 自适应控制; 力/位置控制

1 引言

在实际机器人的许多应用场合, 如装配, 轮廓跟踪, 抛光等都需要与外界环境进行接触, 因而产生相互作用力, 这时机器人的控制目标不仅仅是手臂的位置轨迹, 还有机器人终端与环境之间的相互作用力, 即所谓力/位置控制. 由于机械臂的终端与外界环境的接触, 因而机械臂的位置为任务所约束, 机械臂的运动是受限的. 早期机器人力/位置控制主要有二种方式. 一种方式称为力/位置混合控制 (Hybrid Control)^[1]. 这种控制方式是利用力和位置的正交原理, 将终端坐标分成两组, 对一组采用位置控制, 对另一组采用力控制. 另一种方式称之为阻抗控制 (Impedance Control)^[2]. 它不直接控制机器人与环境的作用力, 而是通过建立力/位置之间的关系, 然后通过控制位置而达到力控制的目的. 若机械臂所接触的外部环境是刚性, 无摩擦的表面, 此时机器人的动力学方程可由一组非线性奇异微分方程所描述^[3]. 对于这样的系统的控制, 称之为受限控制 (Constrained Control)^[4,5], 近年来引起了广泛的重视, 这主要是由于一方面它给出了机械臂与一般刚性表面接触时的一种好的近似, 另一方面给出了机械臂与外界环境接触时, 其动力学的数学描述, 因而有可能从一般的角度对受限机器人进行探讨. 目前对它的研究发展很快, 已经提出了各种控制方法, 如广义计算力矩法^[4], 描述变量法^[5], 非线性解耦控制法^[6], 自适应控制法^[7]及变结构控制法^[8].

本文给出了一种新的自适应受限机械手的力/位置控制方法. 其实现是基于给出的新的降阶动力学模型, 在反馈信号中引入力的累积误差信号, 利用降阶模型的本身特性从而达到自适应力/位置控制的目的. 与文献^[7]相比较其优点是通过引入实际接触力的反馈, 从而可直接控制力/位置, 而不必在持续激励的条件下来实现力的跟踪.

本文的内容组织如下: 在第2节给出了受限机器人的一种新型降阶动力学方程, 然后得到这个方程的几个重要特性. 在第3节通过将受限机械臂的动力学方程表示为已知结

* 国家教委博士点基金资助.

本文于1990年11月20日收到. 1991年4月12日收到修改稿.

构矩阵和机械臂及负载的未知参数的乘积形式,引入自适应律,从而达到了按给定的接触力进行轨迹跟踪的目的.第4节给出了具体的仿真结果.

2 受限机械手的降阶动力学方程

2.1 受限机械手的动力学方程

根据 Euler-Lagrangian 公式,具有 n 个关节的受限机械臂在关节空间的动力学方程为

$$D(q)\ddot{q} + B(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau + f. \quad (1)$$

其中 $q \in R^n$ 为关节空间中关节的位置向量; $D(q)$ 为正定对称惯性矩阵; $B(q, \dot{q})\dot{q} \in R^n$ 中含有哥氏力,向心力; $G(q) \in R^n$ 为重力作用向量; $\tau \in R^n$ 为作用于每个关节的力矩向量; $f \in R^n$ 为关节空间的约束力.

设 $P \in R^n$ 表示终端在作业空间的位置. 而对终端的约束是一平滑的表面,即

$$\Phi(P) = 0. \quad (2)$$

其中映射 $\Phi: R^n \rightarrow R^m$ 为二次连续可微函数. 若作业空间中位置 P 在关节空间的表示为

$$P = H(q). \quad (3)$$

其中映射 $H: R^n \rightarrow R^n$ 是可逆的,两次可微的函数. 此时约束方程(2)在关节空间可表示为

$$\Psi(q) = \Phi(H(q)) = 0, \quad (4)$$

方程(4)的 Jacobian 矩阵为

$$J = \frac{\partial \Psi}{\partial q} = \frac{\partial \Phi}{\partial P} \frac{\partial H}{\partial q}, \quad (5)$$

这里假设机械臂是非冗余的,故 J 为非奇异矩阵.

由于 $\Psi(q) = 0$ 始终成立,故 $J\dot{q} = 0$ 也成立. 因此,对机械臂终端的约束所产生的影响可以看作是机械臂约束在流形 Ω 上,即

$$\Omega = \{(q, \dot{q}); \Psi(q) = 0; J(q)\dot{q} = 0\},$$

而不是在空间 R^{2n} 中.

当机械臂沿约束表面运动时,在关节空间的约束力可以表示为

$$f = J(q)^T \lambda. \quad (6)$$

其中 $\lambda \in R^m$ 为 Lagrangian 乘子^[3,4].

这时受限机械臂的动力学方程(1)变为

$$D(q)\ddot{q} + B(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau + J^T(q)\lambda, \quad (7)$$

$$\Psi(q) = 0. \quad (8)$$

这里 λ 可看作为机械臂终端与约束表面的接触力^[4,5].

2.2 受限机械手的降阶动力学方程

由于约束方程(8)使系统方程(1)丧失了 m 个自由度,仅剩下 $n-m$ 个自由度,因此用 $n-m$ 个线性独立的关节变量完全可以描述受限机械臂的运动. 我们从 n 个关节变量中选取 $n-m$ 个变量,记为

$$q^1 = [q_1^1 \cdots q_{n-m}^1]^T, \quad (9)$$

来描述受限机械臂的运动. 剩余的 m 个关节变量记为

$$q^2 = [q_1^2 \cdots q_m^2]^T, \quad (10)$$

根据隐函数定理,约束方程(8)可以表示为

$$q^2 = \Delta(q^1), \quad (11)$$

我们假设 q^1 中的元素为 q 中前 $n-m$ 个元素, 否则重新排列方程(1), 使前 $n-m$ 个方程对应 q^1 , 后 m 个方程对应 q^2 .

定义

$$L(q^1) = \begin{bmatrix} I_{n-m} \\ \frac{\partial \Delta(q^1)}{\partial q^1} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

由方程(11), 我们可以得到

$$\dot{q} = L(q^1)\dot{q}^1, \quad (13)$$

$$\ddot{q} = L(q^1)\ddot{q}^1 + \dot{L}(q^1)\dot{q}^1. \quad (14)$$

由方程(13)、(14), 则受限机械臂的动力学方程可写为其降阶形式

$$D(q^1)L(q^1)\ddot{q}^1 + B_1(q^1, \dot{q}^1)\dot{q}^1 + G(q^1) = \tau + J^T(q^1)\lambda. \quad (15)$$

其中 $B_1(q^1, \dot{q}^1)$ 定义为

$$B_1(q^1, \dot{q}^1) = D(q^1)\dot{L}(q^1) + B(q^1, \dot{q}^1)L(q^1). \quad (16)$$

说明 方程(15)由于将等式约束隐含进去, 因而适合进行控制的研究.

对于方程(15), 有三个重要特性需要注意.

特性 1 对于选定的一组适当的机械手和负载参数, 系统(15)的动态特性与这组参数可表示为线性关系, 即

$$D(q^1)L(q^1)\ddot{q}^1 + B_1(q^1, \dot{q}^1)\dot{q}^1 + G(q^1) = Y_1(q^1, \dot{q}^1, \ddot{q}^1)\alpha.$$

其中 $Y_1(q^1, \dot{q}^1, \ddot{q}^1)$ 为结构已知矩阵, $\alpha \in R^r$ 为选定的系统参数.

特性 2 定义矩阵 $\hat{A}(q^1) = L^T(q^1)D(q^1)L(q^1)$, 则 $\hat{A} - 2L(q^1)B_1(q^1, \dot{q}^1)$ 为反对称矩阵.

特性 3 $J(q^1)L(q^1) = L^T(q^1)J^T(q^1) = 0$.

上述特性由机械臂的动力学方程的基本特性, 很容易证明.

3 控制器的设计

综合的目的是: 给定理想的关节轨迹 q_d 和所要求的约束力 f_d , 或等价参数 λ_d , 使其满足条件 $\Psi(q_d) = 0$ 及 $f_d = J(q_d)^T \lambda_d$, 当系统某些或全部参数未知时, 确定控制律, 使得当 $t \rightarrow \infty$ 时, $q \rightarrow q_d, f \rightarrow f_d$.

由于方程(11), 因此只需求出控制律使得 $q^1 \rightarrow q_d^1$ 即可. 定义

$$e_m = q^1(t) - q_d^1(t), \quad (17)$$

$$e_f = \int_0^t (f - f_d) dt, \quad (18)$$

$$\dot{q}_d^1 = \dot{q}_d - A_1 e_m - A_2 e_f. \quad (19)$$

其中 e_m 为跟踪误差; e_f 为力的累积误差; $\dot{q}_d^1$ 为一参考轨迹; A_1 和 A_2 为可调正定矩阵.

设 $\alpha \in R^r$ 为未知参数向量, 它仅与机器人实体, 负载, 几何和物理参数有关; 设 $\hat{\alpha}$ 为其估计; 设 $\hat{D}, \hat{B}_1$ 和 $\hat{G}$ 为用 $\hat{\alpha}$ 代替 α 时, D, B_1 和 G 的估计值. 根据机器人动力学方程(15)的特性 1, 则有

$$\bar{D}(q^1)L(q^1)\ddot{q}_d^1 + \bar{B}_1(q^1, \dot{q}_d^1)\dot{q}_d^1 + \bar{G}(q^1) = Y_1(q^1, \dot{q}_d^1, \ddot{q}_d^1)\alpha.$$

其中 $\bar{\alpha} = \hat{\alpha} - \alpha$ 为参数估计误差, $Y_1 \in R^{n \times r}$ 为已知矩阵.

取控制律为

$$\begin{aligned} \tau &= \hat{D}L\ddot{q}_r^1 + \hat{B}_1(q^1, \dot{q}^1)\dot{q}_r^1 + \hat{G}(q^1) - Ls - J^T(q^1)\lambda_d \\ &= Y_1\hat{a} - Ls - J^T(q^1)\lambda_d. \end{aligned} \quad (20)$$

其中 s 定义为

$$s = \dot{q}^1 - \dot{q}_r^1 = \dot{e}_m + A_1 e_m + A_2 e_f. \quad (21)$$

若方程(20)中的估计参数 $\hat{a}$ 按下述规律确定

$$\dot{\hat{a}} = -PY_1^T(q^1, \dot{q}^1, \ddot{q}_r^1, \ddot{q}_r^1)Ls. \quad (22)$$

其中 P 为已知可调正定矩阵, 则我们有

定理 若给定的理想轨迹 $q_d, \dot{q}_d$ 和 $\ddot{q}_d$ 及约束力 f_d 有界, 则在控制律(20)和自适应律(22)的作用下, 系统(7)是全局渐近稳定的. 即对于任意 $(q(0), \dot{q}(0)) \in \Omega$, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 有 $q \rightarrow q_d, \dot{q} \rightarrow \dot{q}_d$.

证 可以验证:

$$DL\dot{s} = Y_1\dot{\hat{a}} - B_1s - Ls - J^T(\lambda_d - \lambda), \quad (23)$$

因而由降阶动力学方程的特性 3, 可得

$$A\dot{s} = L^TDL\dot{s} = L^TY_1\dot{\hat{a}} - L^TB_1s - L^TLs. \quad (24)$$

取下述李雅普诺夫函数

$$V = \frac{1}{2}[s^TAs + \hat{a}^TP^{-1}\hat{a}], \quad (25)$$

对 V 微分, 有

$$\dot{V} = s^TA\dot{s} + s^TL^TB_1s + \hat{a}^TP^{-1}\dot{\hat{a}}.$$

将(22)式和(24)式代入上式, 并注意到 $\dot{\hat{a}} = \dot{\hat{a}}$, 则

$$\dot{V} = -s^TL^TLs < 0. \quad (26)$$

故由(25)和(26)式可知, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\|s\|$ 趋于零. 由于 $\dot{e}_m, e_m$ 和 e_f 线性无关. 故这意味着当 $t \rightarrow \infty$ 时, $q \rightarrow q_d$ 及 $\dot{q} \rightarrow \dot{q}_d$. 由于(11)式, 故 $q^1 \rightarrow q_d^1$ 表示 $q \rightarrow q_d$, 因而定理得证.

说明 自适应(22)是一个典型的梯度型, 若系统存在未建模动态特征时, 则有可能会导系统不稳定^[9]. 针对这个问题, 文献[10]给出了一种改善的方法, 即将自适应律(22)改为

$$\dot{\hat{a}} = -\eta(t)P\hat{a} - PY_1^T(q^1, \dot{q}^1, \ddot{q}_r^1, \ddot{q}_r^1)s. \quad (27)$$

其中 $\eta(t)$ 取为

$$\eta(t) = \begin{cases} 0, & \|\hat{a}\| < \alpha_0, \\ \alpha_0 \left(\frac{\|\hat{a}\|}{\alpha_0} - 1 \right), & \alpha_0 < \|\hat{a}\| < 2\alpha_0, \\ \alpha_0, & \|\hat{a}\| > 2\alpha_0. \end{cases}$$

α_0 为可调正数, 且满足条件 $\alpha_0 > \|\alpha\|$. 可以证明(27)式对未建模动态特征是鲁棒的.

4 仿真结果

这里取文献[7]中的例子来说明上述算法的正确性. 这里机械臂为二个关节, 约束为圆轨迹, 如图 1 所示. 此时方程(1)中的矩阵为:

$$D(q) = \begin{bmatrix} \alpha + \beta + 2\eta\cos q_2 & \beta + \eta\cos q_2 \\ \beta + \eta\cos q_2 & \beta \end{bmatrix},$$

$$B(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -\eta \dot{q}_2 \sin q_2 & -\eta(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin q_2 \\ \eta \dot{q}_1 \sin q_2 & 0 \end{bmatrix},$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} \alpha e_1 \cos q_2 + \eta e_1 \cos(q_1 + q_2) \\ \eta e_1 \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix}.$$

其中 $e_1 = g/l_1$, g 为重力加速度; 三个未知参数 α, β, η 分别为

$$\alpha = (m_1 + m_2)l_1^2,$$

$$\beta = m_2 l_2^2,$$

$$\eta = m_2 l_1 l_2.$$

约束方程为

$$\phi(P) = x^2 + y^2 - r^2 = 0, \quad P = [x, y]^T. \quad (28)$$

由作业空间到关节空间的变换为

$$H(q) = \begin{bmatrix} l_1 \cos(q_1) + l_2 \cos(q_1 + q_2) \\ l_1 \sin(q_1) + l_2 \sin(q_1 + q_2) \end{bmatrix},$$

故在关节空间中, 这个约束可表示为

$$\psi(q) = l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos q_2 - r^2 = 0. \quad (29)$$

方程(29)的解为

$$q_2 = \cos^{-1} \left(\frac{r^2 - (l_1^2 + l_2^2)}{2l_1 l_2} \right) = q_2^*. \quad (30)$$

方程(29)的 Jacobian 矩阵为

$$J(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ -2l_1 l_2 \sin q_2 \end{bmatrix}^T. \quad (31)$$

故由方程(12), 所定义的矩阵 L 为

$$L(q^1) = [1 \quad 0]^T. \quad (32)$$

此时受限机械臂的降阶动力学方程(15)可以表示为

$$\begin{bmatrix} \alpha + \beta + 2\eta \cos q_2^* \\ \alpha + \eta \cos q_2^* \end{bmatrix} \ddot{q}_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ \eta \dot{q}_1 \sin q_2^* \end{bmatrix} \dot{q}_1 + \begin{bmatrix} \alpha e_1 \cos q_2^* + \eta e_1 \cos(q_1 + q_2^*) \\ \eta e_1 \cos(q_1 + q_2^*) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -2l_1 l_2 \sin q_1^* \end{bmatrix} \lambda. \quad (33)$$

约束力为

$$f_1 = 0,$$

$$f_2 = -2l_1 l_2 (\sin q_2^*) \lambda. \quad (34)$$

控制的目的是确定控制律使得 q_1 跟踪 q_{1d} , 并使约束力 f_2 保持给定值 f_d . 其中 q_{1d} 和 f_d 满足约束方程.

由于 $\lambda \rightarrow \lambda_d$ 意味着 $f_2 \rightarrow f_d$, 因而在仿真中, q_{1d} 和 λ_d 分别取为

$$q_{1d} = \begin{cases} -90^\circ + 52.5(1 - \cos(1.26t)), & t < 2.5, \\ 15, & t \geq 2.5, \end{cases}$$

$$\lambda_d = 10.$$

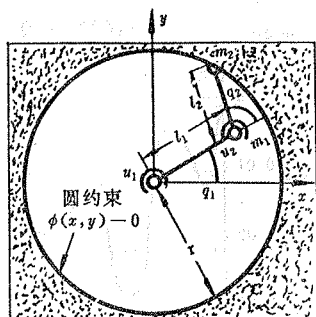


图1 两关节机械臂及圆约束

未知参数 (α, β, η) 的真实值为 $(0.8, 0.32, 0.4)$, 初始值取为 $(0.5, 0.25, 0.2)$. 同时我们取

$$q_2^* = 80^\circ, \quad P = (1, \frac{1}{5}, \frac{1}{3}), \quad A_1 = 30, \quad A_2 = 1.$$

机械臂的初值选为

$$q_1(0) = -90^\circ, \quad q_2(0) = 80^\circ, \quad \dot{q}_1(0) = \dot{q}_2(0) = 0, \\ f_2(0) = 0.$$

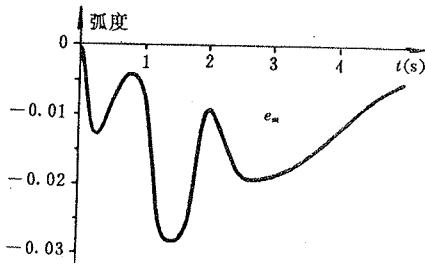


图 2 关节轨迹跟踪误差

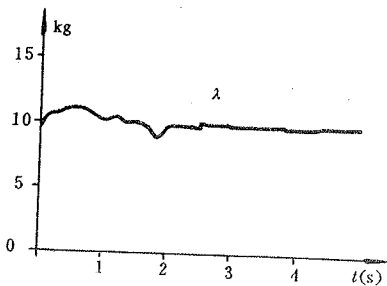


图 3 实际接触力

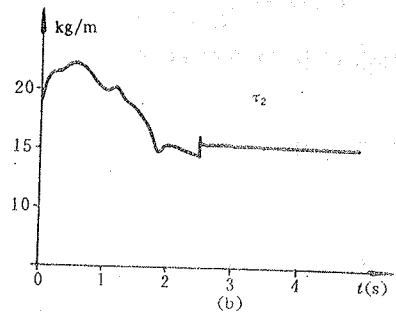
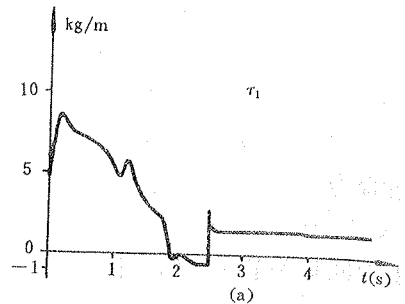


图 4 作用于关节的力矩

在控制律(20)和自适应律(22)的作用下, 则图 2 表示关节跟踪误差, 图 3 表示实际接触力, 图 4 (a)和图 4(b)分别表示作用于关节 1 和关节 2 的力矩, 图 5 表示估计参数. 由图 2 和图 3 可见, 系统实现了在给定接触力下的轨迹跟踪. 但由于是采用输出误差信号来调节自适应律, 因而只能保证跟踪误差收敛, 估计参数只有在 $L^2 Y_1$ 满足持续激励的条件下, 才有可能收敛至其真实值.

5 结 论

本文给出了一种受限机械臂的自适应力/位置控制方法. 其实现是基于给出的新的降阶动力学模型, 在反馈信号中引入力的累积误差信号, 利用降阶模型的几种特性从而得到自适应力/位置控制器的. 而自适应律是通过跟踪误差信号来调节的. 仿真结果证实了本方法的正确性.

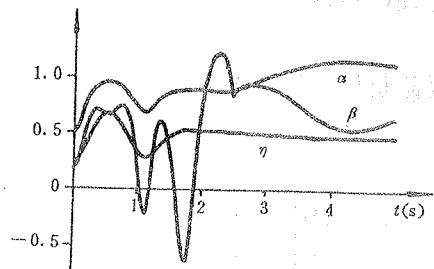


图 5 估计参数

参 考 文 献

- [1] Raibert, M. H. and Craig, J. J.. Hybrid Position/Force Control of Manipulators. *J. Dynam. Syst. Measur. and Contr.*, 1981, 102:126—133
- [2] Hogan, N.. Impedance Control; an Approach to Manipulator Part II—Implementation. *J. Dynam. Syst. Measur. and Contr.*, 1985, 107:8—16
- [3] McClamroch, N. H. and Huang, H. P.. Dynamics of a Closed Chain Manipulator. *Proc. American Contr. Conf.*, 1985, 50—54
- [4] McClamroch, N. H. and Wang, D.. Feedback Stabilization and Tracking of Constrained Robots. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1988, 33:419—426
- [5] Mills, J. K. and Goldenberg, A. A.. Force and Position Control of Manipulators During Constrained Motion Tasks. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 1989, 5:30—46
- [6] Yun, X.. Dynamic State Feedback Control of Constrained Robot Manipulators. *Proc. IEEE Conf. Decision and Contr.*, 1988, 622—626
- [7] Su, C. Y., Leung, T. P. and Zhou, Q. J.. Adaptive Control of Constrained Robot Manipulators under Constrained Motion. *Proc. IEEE Conf. Decision and Contr.*, 1990, 2650—2655
- [8] Su, C. Y., Leung, T. P. and Zhou, Q. J.. Force/Motion Control of Constrained Robots Using Sliding Mode. Accepted by *IEEE Trans. on Automatic Contr.*
- [9] Rohrs, C. E., Valavani, L., Athans, M. and Stein, G.. Robustness of Continuous-Time Adaptive Control of Algorithm in the Presence of Unmodelled Dynamics. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1985, 30:881—889
- [10] Reed, J. S., and Ioannou, P. A.. Instability Analysis and Robust Adaptive Control of Robotic Manipulators. *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 1989, 5:381—386

An Adaptive Force/Position Scheme for Constrained Robot Manipulators

SU Chunyi and ZHOU Qijie

(Department of Automation, South China University of Technology • Guangzhou, 510641, PRC)

Abstract: An adaptive force/position control scheme is presented for constrained robot manipulator. The development of the algorithm is based on a new formulation of the dynamic model and the expansion of feedback signals to include the accumulated constraint force errors. By exploiting the properties of this new formula, the adaptive force/position control algorithm is obtained, where the adaptive law is adjusted by tracking errors. Simulation result verifies the correctness of the proposed method.

Key words: constrained robot manipulator; adaptive control; force/position control

本文作者简介

苏春翌 1962年生。1982年于陕西机械学院自动控制系获学士学位。1987年和1990年于华南理工大学自动化系分别获硕士和博士学位。1988年11月至1990年5月于香港理工学院机械与轮机工程系进修。1990年8月在华南理工大学自动化系任讲师。主要研究兴趣为自适应控制理论,变结构系统理论,机器人及其控制,非线性系统控制。

周其节 1931年生。1951年毕业于中山大学。1955年于哈尔滨工业大学研究生毕业。现为华南理工大学自动化系教授,博士生导师。主要研究兴趣为非线性控制系统,线性系统理论,自适应控制系统,变结构控制理论,机器人及其控制,神经网络在控制系统中的应用。