

工业机器人的三种新的控制技术

大连组合机床研究所 姚志良

主题词：工业机器人 控制技术

随着工业机器人在生产中应用的不断扩大，日本FANUC公司针对工业机器人在实际使用中出现的课题和问题，近期开发出了提高工业机器人动作性能的三项最新的技术，分别介绍如下。

1 缩短点焊作业时短间距移动时间的技术

在点焊作业中，工业机器人要多次作短间距的重复移动以进行点焊作业。由于移动距离短，使工业机器人达不到最高速度而是重复进行加速及减速。为了缩短节拍时间就需要工业机器人用高的加、减速度进行动作，此时由于伺服的滞后，增大了定位时间，并引起手臂前端大的振动。为了解决这些问题，FANUC公司开发了一种把减少伺服滞后量的滑动状态控制和抑止臂端振动的抑振控制组合在一起的新的控制技术。

1.1 滑动状态控制 (Sliding Mode Control)

为了减小伺服滞后量，以前一般都采用前馈控制方式，该方式是机器人动特性的逆特性，也就是在输入动作指令时按运动方程计算出所需要的扭矩量并同时予以输入。由于工业机器人在工作时姿态有变化，因此惯量 J 、动摩擦系数 A 、重力 G 的重心位置都有很大的变化，使正确的反馈控制不能进行。此外由 J 决定的系数 K 也同样在变化，所以不能进行正确的补偿。图1为采用滑动状态控制的框图。由图可见，采用了滑动状态控制技术即使 J 、 A 、 G 有变化，也能对变动的控制对象的动特性作前馈补偿和反馈补

偿。根据Lyapunov的稳定理论，图1的滑动状态的位相面为0，因而可高速进行两种增益的切换，由此能实现适合控制对象的特性控制。图2显示了工业机器人用以往的控制方式和采用滑动状态控制方式的对比结果。由图2a可见，采用滑动状态控制方式后机器人的位置偏差量逐渐减少，跟踪性能得到大的提高。由此使得机器人到达点位的时间大幅度缩短，从而实现了节拍时间的大幅度缩短。

1.2 抑振控制 (Vibration Control)

滑动状态控制方式对于刚体的惯量变动和非线性的重力项的补偿是非常有效的。但由于工业机器人是一个刚性差、阻尼小的机械，在低频段容易振动，且振动衰减困难。

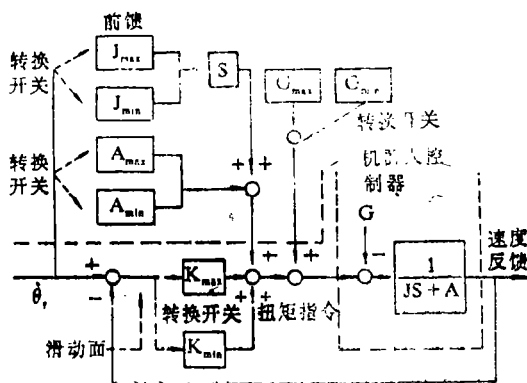


图1 滑动状态控制框图

$$J_{\max} > J > J_{\min} \quad A_{\max} > A > A_{\min}$$

$$G_{\max} > G > G_{\min}$$

J ——惯量 A ——动摩擦系数 G ——重力

K ——速度环增益 θ_r ——位置指令

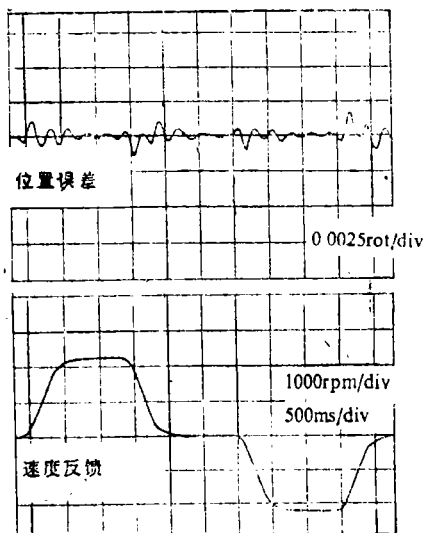


图2 (a)滑动状态控制

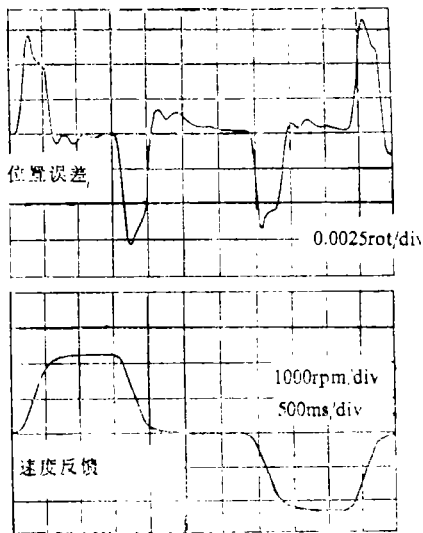


图2 (b)以往的PI控制

因此仅用滑动状态控制方式来控制高响应性能的电机电, 在手臂停止工作时会产生大的振动, 且使振动完全停止需要较长的时间, 这将使作业的节拍时间延长。为了解决该问题, 就有必要采用抑振控制方法。图3为附加了抑振控制的滑动状态控制方式的框图。根据扭矩指令和电机速度来推定电机位置和

手臂位置差值的变化量, 并将此值附加反馈到速度指令中, 在滑动状态控制中能按此反馈值变更滑动状态的位相面, 从而起到了增大减速器的阻尼的作用, 达到了抑制手臂前端振动的目的。

采用 FANUC S420F 工业机器人进行 50毫米短间距移动, 用电机允许的最大加速度工作, 并用非接触式激光应

变仪来测定手臂前端的振动状况。如图4所示。从图中可以看到在没有抑振控制时, 手臂前端在超程后有1秒左右的残留振动, 而后才稳定。当有抑振控制时, 手臂前端在超程后振动很快就被抑制, 效果十分明显。

2 提高轨迹精度的适应控制技术

激光切割和焊接要求切面 and 焊缝有良好的加工质量, 为此, 要求工业机器人要有高的轨迹精度。众所周知, 一般的工业机器人要实现高速、高

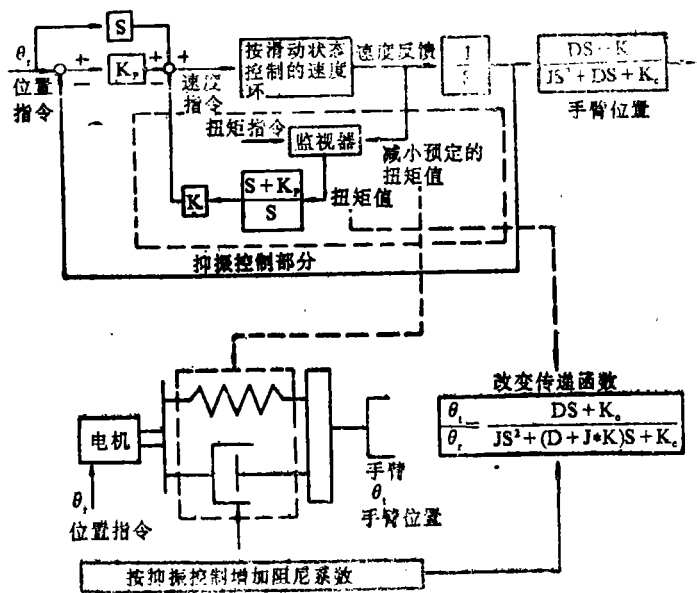


图3 具有抑振控制的滑动状态控制框图

J—Inertia惯量 D—Damping factor阻尼系数
Kc—Spring constant弹簧常数

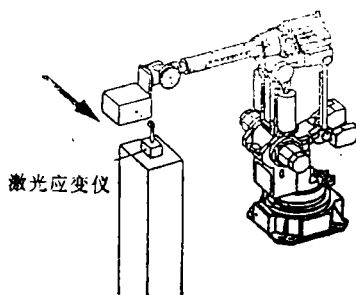
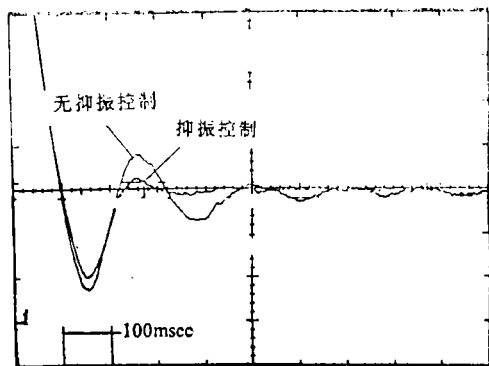


图4 机器人手臂前端的残留振动波形

精度，主要受到惯量变动、非线性干扰和大的摩擦等的影响，控制系统会产生跟踪误差，使机器人的轨迹精度恶化。上述的滑动状态控制系统在非线性状态时实际上是一个同时会产生增益急剧变化的控制系统，因而当高频干扰施加到扭矩指令值上时，手臂前端会产生微小的振动，给激光切割的加工质量带来恶劣的影响。对此日本FANUC公司开发了适应控制方式，用来提高机器人的轨迹精度。

图5是适应控制系统的框图，图中虚线箭头表示按适应控制将前馈增益值向最合适值收敛。根据Lyapunov 稳定理论将速度偏差值收敛到0，使各个变化的增益实向向最适值收敛，从而达到减少跟踪误差、提高机器人轨迹精度的目的。图6为采用适应控制的小型机器人其增益值从0状态向最适值收敛过程的实测结果。图7是用机器人画圆的

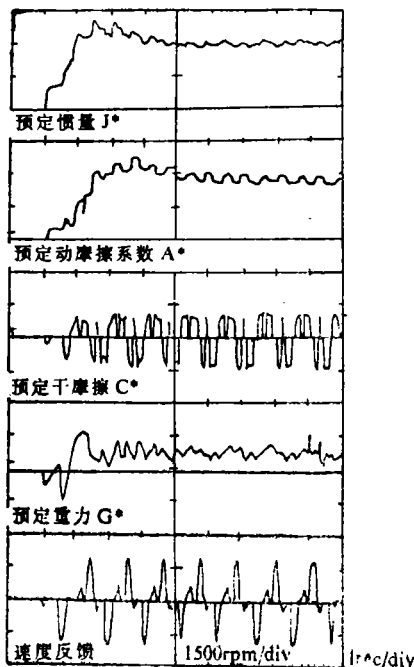


图6 各增益的收敛情况

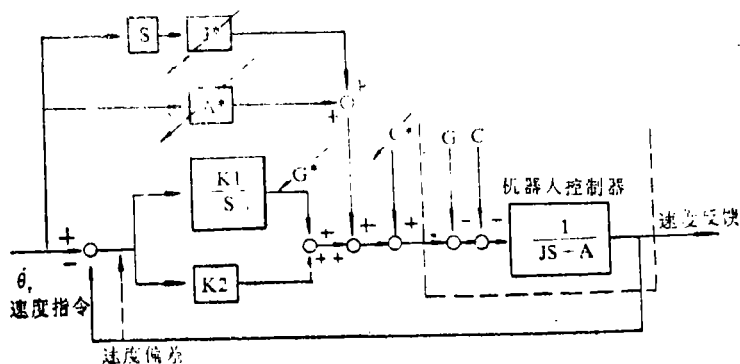


图5 适应控制系统框图

J—Inertia 惯量 A—Dynamic friction coefficient 动摩擦系数 C—Coulomb friction 干摩擦
G—Gravity 重力 *—Online estimated value 在线预定值

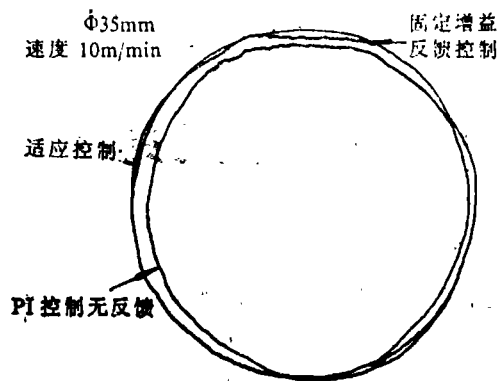


图7 各种控制方法下的圆轨迹比较

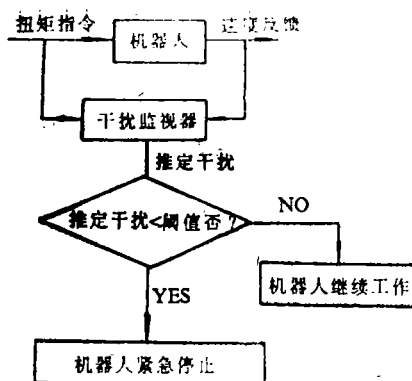


图8 碰撞检出功能框图

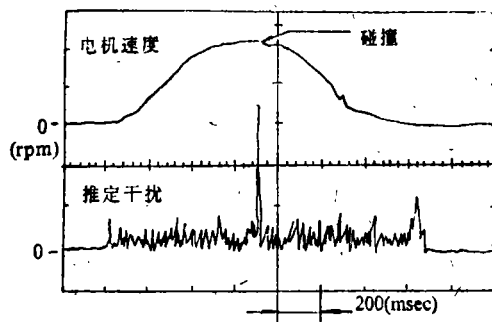


图9 (a)无碰撞检出功能情况下, 碰撞时的电机动作

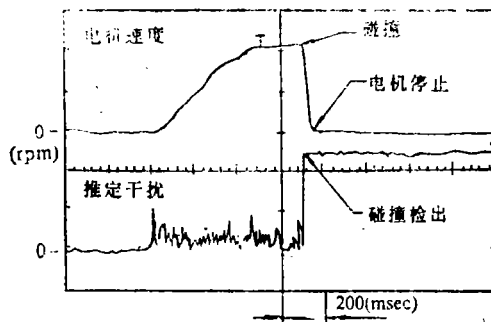


图9 (b)有碰撞检出功能情况下, 碰撞时的电机动作

轨迹实况, 由图可见, 在用以往的 PI 控制时, 由于产生了跟踪滞后现象, 圆的半径明显变小。在用计算的固定增益值反馈控制时, 为使圆半径不减小, 增益值与最适值要没有太大的差别, 但此时还会有微小的振动, 因而其轨迹与理想的轨迹还有小的变化。当采用适应控制后, 增益值经常保证在最适值, 从而使机器人动作时上述现象完全被消除了。轨迹精度得到了大的改善。

3 碰撞检出功能

由于机器人动作的高速化, 因操作的失误等原因发生机器人手臂与外部干涉物体相碰撞。为了防止机器人碰撞, FANUC 公司在机器人的控制系统内增加了碰撞检出功能。图 8 为碰撞检出功能的框图。根据扭矩指令值和速度的反馈值, 通过监控推定干扰

值, 当此值大于预定的阈值时, 判断为碰撞, 机器人就紧急停止。图 9 a 为无碰撞检出功能情况下的电机的速度变化曲线。当发生碰撞时, 手臂受到大的冲击, 但电机还是继续运转, 直到手臂等发生破坏为止。图 9 b 为采用了干涉推定装置, 机器人在具有碰撞检出功能情况下电机的运行状态, 可以看到当监控的干涉外力大于预定值时, 也就是在发生碰撞受到大的冲击力前就使电机停止运转, 防止机器人碰撞时的损伤。

目前, FANUC 公司已将这些技术用于工业机器人, 实现了机器人的高速、高精度, 为用户使用工业机器人提供了方便。

参考文献

- 1 工业机器人及系统说明 FANUC (株)
- 2 Technical Review FANUC, 1994, 7(1)

(编辑 王谦和)