

# 机器人控制器中应用加速度反馈的 几个问题讨论<sup>1)</sup>

李 杰 韦 庆 常文森

(国防科技大学自动控制系 长沙 410073)

**摘 要** 加速度正反馈与近似积分负反馈相结合的综合加速度反馈在机械手位置控制中的应用有明显的增阻尼效果,而在力控制中的应用却受到了很多条件的限制.利用 PUMA560 机械手力控制的辨识模型,通过仿真手段分析了影响加速度反馈效果的原因,得出了机械手驱动电机的动态、连杆的柔性 and 采样延迟是制约加速度反馈作用的主要因素.最后在此结论指导下的实验结果验证了这个结论的正确性,同时指出了应用加速度反馈的希望所在.

**关键词** 加速度反馈,机器人力控制,采样延迟.

## DISCUSSION ON SEVERAL PROBLEMS USING ACCELERATION FEEDBACK IN ROBOT CONTROLLER

LI Jie WEI Qing CHANG Wen-Sen

(Dept. of Automatic Control, National Univ. of Defence Technology, Changsha 410073)

**Abstract** The application of integration acceleration feedback which combines acceleration positive feedback and integral negative feedback has obvious effect on enhancing damp in manipulators position control, but the effect is limited by some factors in force control. This paper analyses the factors that limit the effect of acceleration feedback by simulation using the PUMA560's force control identification model. And we draw the conclusion that the dynamic of motors, the flexibility of links and the delay in sampling control are the main issues that limit the effect of acceleration feedback in robot force control. In the end the experiment results on PUMA 560 manipulator verify the conclusion and point out the hope in using acceleration feedback.

**Key words** Acceleration feedback, manipulator force control, sampling delay.

1) 国家自然科学基金(68685009)和“八六三”智能机器人专家组基础研究资助项目.

收稿日期 1999-04-10 收修改稿日期 1999-09-08

# 1 引言

近年来,随着传感器技术的发展以及加速度反馈在其它控制领域的成功应用,加速度反馈在机器人控制中的应用逐渐受到了人们的重视. Studenny<sup>[1,2]</sup>将加速度反馈与 LQ 控制及前馈补偿策略相结合,提出了基于加速度反馈的鲁棒控制策略,利用加速度的敏感性和加速度闭环的高反馈增益来抑制扰动和关节耦合. Yoichi H<sup>[3]</sup>将加速度反馈的思想用于电机的伺服控制实验,由模拟的加速度反馈闭环来抑制干扰,用另一个同样的电机给测试电机施加扰动来验证闭环的抑制干扰能力. 加速度信号由测速电机信号差分而得. Youfu Li<sup>[4,5]</sup>分析了由于机械手连杆和关节的柔性,使由关节速度运算得到的连杆末端速度与真实速度不一致的情况后,提出在机械手末端装加速度计的方法来修正连杆末端速度,将这个速度用于单关节机械手的力冲击实验,来缩短它的稳定时间. 中国科学院沈阳自动化研究所也研究了基于加速度计获得阻尼和关节解耦的方法<sup>[6]</sup>,对两关节直接驱动机械手的控制实验取得了较好的效果.

然而,加速度反馈因其特有的属性远没有速度和位置反馈控制那样简单成熟,它的有效性必须满足许多条件. 上述应用中,Studdenny 的结论是在模拟控制条件下得出的,而且所需要的高增益必须假设机器人的纯刚性;Yoichi H 的实验是在简单的伺服电机上进行的;Youfu Li 的方法只能用于特定的力冲击实验,不具有推广性;沈阳自动化研究所的实验对象是直接驱动机械手,其加速度环是连续的.

我们对加速度反馈也进行了研究<sup>[7]</sup>. 在位置控制中提出了一种加速度正反馈与积分负反馈结合的综合加速度反馈方法<sup>[8]</sup>来改善机械手对轨迹的跟踪性能,取得了较好的效果. 在力控制中,加速度反馈有一定的作用,但不如位置控制效果明显. 本文在机械手力控制辨识模型的基础上,通过仿真和 PUMA560 机械手上的实验分析了影响力控制中加速度反馈效果的原因,并指出了应用加速度反馈的希望所在.

# 2 刚性机器人的加速度反馈

为了对比,我们从纯刚性机械手入手. 将刚性机械手与环境的接触模型简化为一个质量弹簧系统<sup>[7]</sup>,如图 1(a)所示. 该连续系统的传递函数描述为

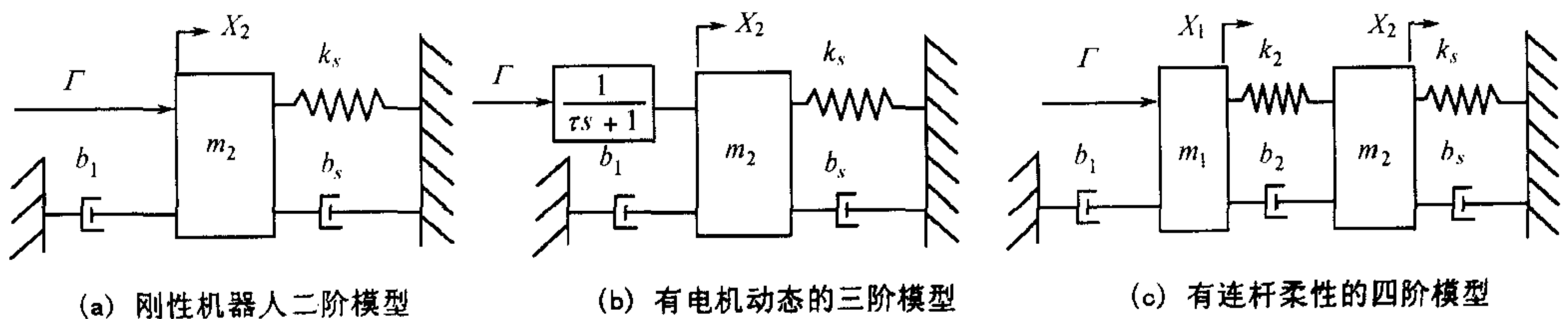


图 1 机器人力控制模型

$$G(s) = \frac{X_2(s)}{\Gamma(s)} = \frac{1}{m_2s^2 + (b_1 + b_s)s + k_s}, \tag{1}$$

其中  $\Gamma(s)$  和  $X_2(s)$  分别是控制量和机械手位移的拉氏变换,  $b_s$  和  $k_s$  分别是环境的阻尼和刚度,  $m_2$  为机械手的等效质量.

对于(1)式所示的系统,采用比例-微分-加速度控制律(PDA),有

$$\Gamma(s) = k_p E(s) - k_d s X_2(s) - k_a s^2 X_2(s). \quad (2)$$

上式中  $E(s)$  为力控制误差;  $k_p, k_d$  和  $k_a$  分别是力、速度和加速度反馈增益. 将(2)式代入(1)式,并利用关系  $F(s) = k_s X_2(s)$ , 得到系统的开环传递函数为

$$\frac{F(s)}{E(s)} = \frac{k_p k_s}{m_2 s^2 + (b_1 + b_s) s + k_s + k_a s^2 + k_d s}. \quad (3)$$

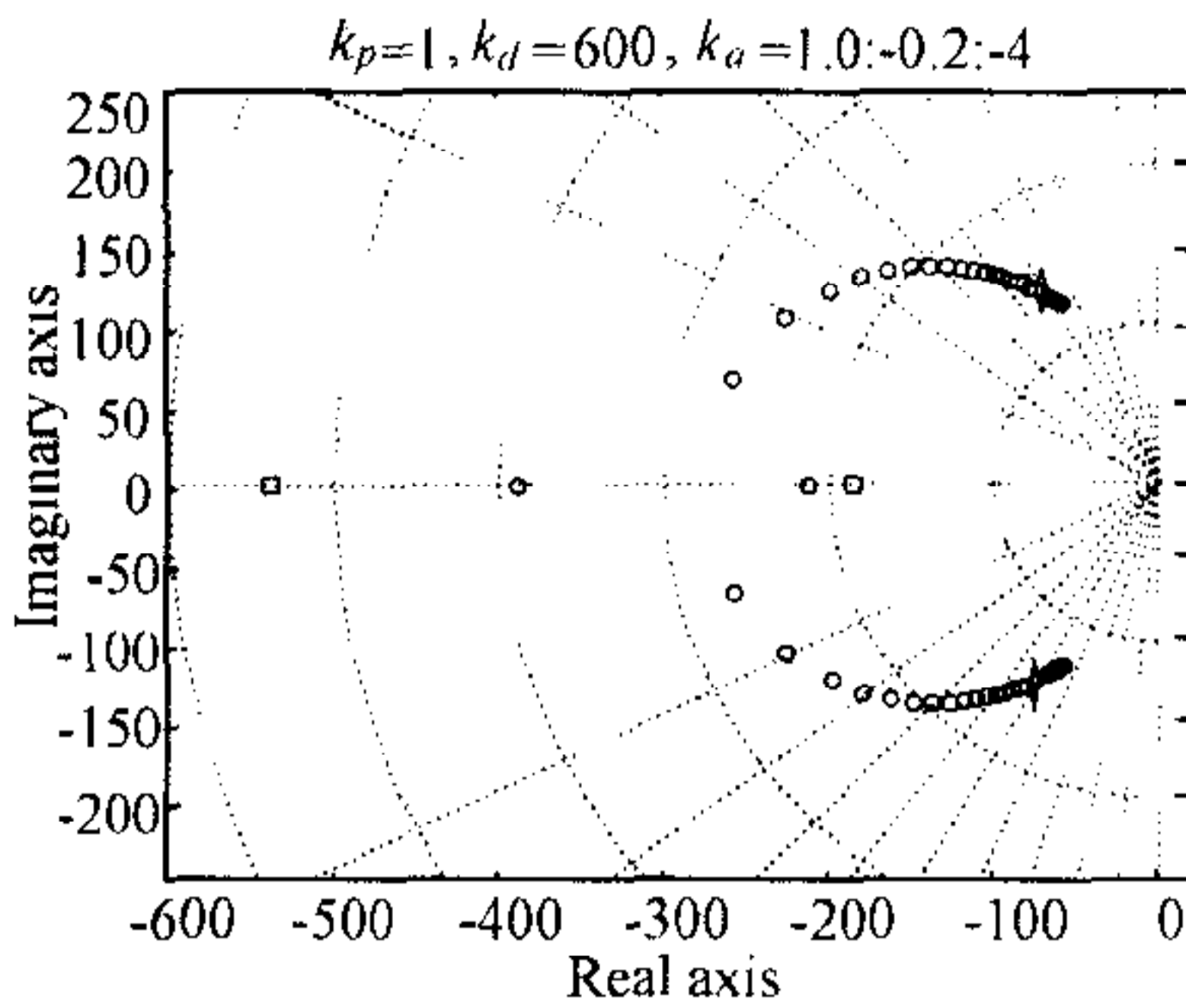


图2 二阶刚性系统  $k_a$  变化的根轨迹

令  $m_2 = 5 \text{ kg}$ ,  $b_1 = 14 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ ,  $b_s = 110 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ ,  $b_v = 110 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ ,  $k_s = 5 \times 10^4 \text{ N/m}$  (取值根据见第4部分). 并令  $k_p = 1, k_d = 600$ , 作出  $k_a$  从1递减到-4 (负值为正反馈) 的闭环系统的根轨迹, 如图2所示. 图中菱形对应  $k_a = 0$  的根, 矩形对应  $k_a = -4$  的根, 即跟轨迹的末端, 以下同. 从图中看到, 对于刚性机械手的力控制, 加速度正反馈能提高系统的带宽和阻尼, 使系统从欠阻尼变为过阻尼; 加速度负反馈与正反馈相反, 使系统向欠阻尼方向发展.

### 3 电机动力学对加速度反馈的影响

机器人的驱动电机可以用一阶惯性环节来表示. 于是含有电机动力学的机械手力控制的三阶模型如图1(b)所示. 其传递函数为

$$\frac{X_2(s)}{\Gamma(s)} = \frac{1}{(\tau s + 1)(m_2 s^2 + (b_1 + b_s) s + k_s)}, \quad (4)$$

其中  $\tau$  为电机的电磁时间常数, 其它参数含义同前.

采用(2)式的PDA控制律, 可得到系统的力控制开环传递函数为

$$\frac{F(s)}{E(s)} = \frac{k_p k_s}{(\tau s + 1)(m_2 s^2 + (b_1 + b_s) s + k_s) + k_a s^2 + k_d s}, \quad (5)$$

取与(3)式相同的参数(这里  $k_p = 0.6$ ). 为了对比, 电机的电磁时间常数分别取  $\tau = 0.001 \text{ s}$  和  $\tau = 0.01 \text{ s}$ , 作出  $k_a$  从1到-2变化的根轨迹如图3所示. 对比两图可见,  $\tau$  较小时加速度正反馈使系统主导极点向左半平面移动; 而  $\tau$  大时, 正反馈使系统主导极点向右半平面移动.

从上述分析看到, 驱动电机的动态似乎对加速度反馈的影响很大. 小的时间常数(大的带宽)使系统趋向二阶系统, 加速度正反馈对系统性能有利; 大的时间常数(小的带宽)使得加速度负反馈对系统有利. 实际上, 当考虑驱动延迟时, 机械手力控制系统为三阶系统, 此时PDA反馈为系统的全状态反馈, 如果知道系统确定的数学模型, 可以用最优控制的方法设计出理想的控制器, 从而无论电机的延迟多大, 加速度反馈总是有利的. 但是, 力控制的模型随机器人的姿态、环境刚度等的变化而变化, 这可能使加速度反馈的最佳系数存在符号上的差异, 保守地选择反馈增益很难奏效, 增加了应用加速度反馈的难度.

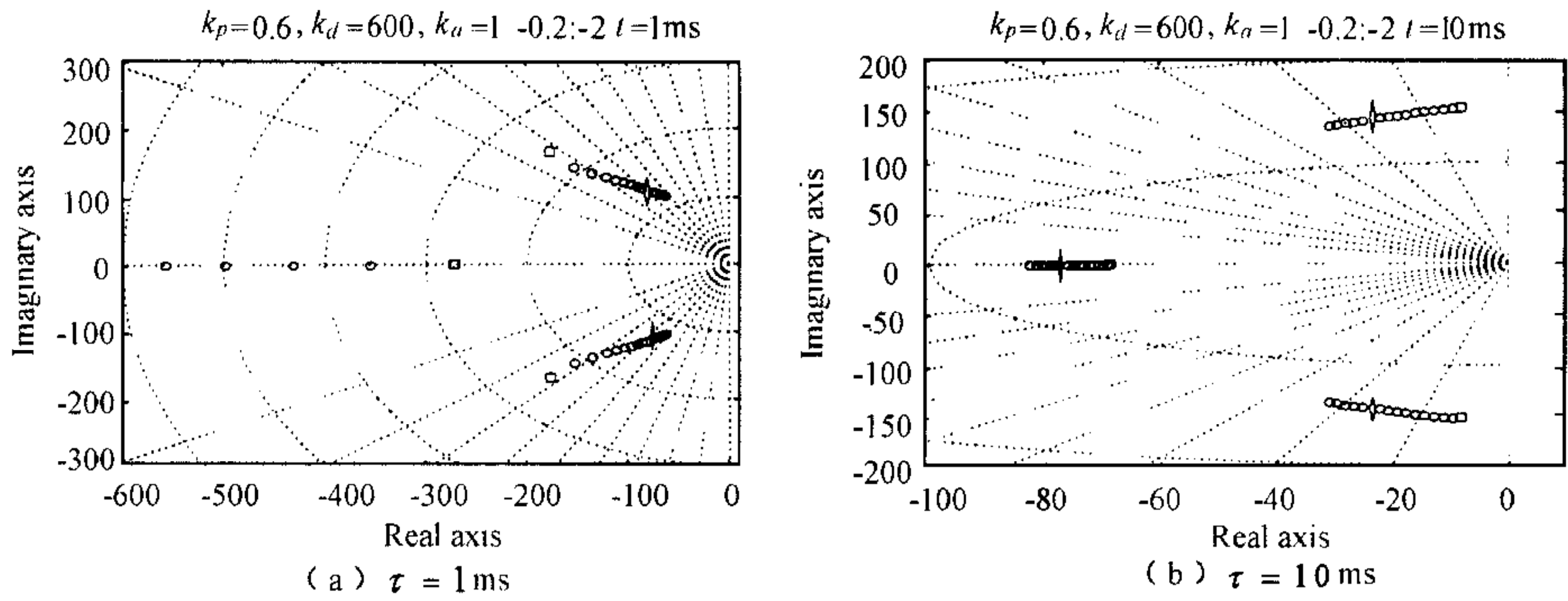


图 3 不同电机常数下  $k_a$  变化的根轨迹

### 4 连杆柔性对加速度反馈的影响

机器人的传动和连杆都有一定的柔性,它们在力控制情况下一般是不可忽略的.考虑柔性因素,可将机械手用弹簧阻尼连接的二质量块<sup>[4~6]</sup>来表示,建立机器人力控制的四阶模型如图 1(c)所示.图中  $k_2$  为连杆刚度,  $k_s$  为力传感器和环境的刚度,  $b_1, b_2$  和  $b_s$  分别为执行器、手臂和环境的阻尼,  $x_1$  和  $x_2$  为关节位移和连杆末端位移.

从输入力矩到关节位移的传递函数为

$$G_0(s) = \frac{X_1(s)}{\Gamma(s)} = \frac{m_2 s^2 + (b_2 + b_s)s + (k_2 + k_s)}{[m_1 s^2 + (b_1 + b_2)s + k_2][m_2 s^2 + (b_2 + b_s)s + (k_2 + k_s)] - (b_2 s + k_2)^2} \quad (6)$$

从输入力矩到连杆末端位移的传递函数为

$$G_1(s) = \frac{X_2(s)}{\Gamma(s)} = \frac{b_2 s + k_2}{\Delta_1 \Delta_2 - (b_2 s + k_2)^2} \quad (7)$$

其中  $\Delta_1 = m_1 s^2 + (b_1 + b_2)s + k_2, \Delta_2 = m_2 s^2 + (b_2 + b_s)s + (k_2 + k_s)$ .

为了得到上述模型参数的合理取值,我们利用实际系统输出在 Matlab 下对上模型进行了参数辨识,各参数的取值为  $m_1 = 1.5 \text{ kg}, m_2 = 5 \text{ kg}, b_1 = 14 \text{ N} \cdot \text{s/m}, b_2 = 1.0 \text{ N} \cdot \text{s/m}, b_s = 110 \text{ N} \cdot \text{s/m}, k_2 = 3 \times 10^5 \text{ N/m}$ ,环境刚度可以变化.第 2,3 两部分的参数也是由此简化而得.

在实际中,力传感器和加速度传感器都安装在机器人的末端连杆上,因此作为反馈的力信号和加速度信号分别为  $f = k_s x_2$  和  $a = \ddot{x}_2$ .力控制中的阻尼反馈项有两种选择,一是用  $\dot{f}$  (等价于  $\dot{x}_2$ ) 作反馈信号,二是用  $\dot{x}_1$  作反馈信号.可以验证,用  $\dot{x}_1$  作反馈信号的阻尼效果比  $\dot{f}$  好得多.这不仅仅因为  $\dot{f}$  的信噪比低,更重要的是由于连杆的柔性,  $\dot{f}$  的引入加重了传感器与执行器的分离性问题.

用关节速度  $\dot{x}_1$  作反馈,PDA 控制律取为

$$\Gamma(s) = k_p E(s) - k_d s X_1(s) - k_a s^2 X_2(s), \quad (8)$$

可以得到力控制开环传递函数为

$$G_{\text{open}}(s) = \frac{k_p k_s (b_2 s + k_2)}{(\Delta_1 + k_d s) \Delta_2 + k_a s^2 (b_2 s + k_2) - (b_2 s + k_2)^2} \quad (9)$$

取  $k_s = 3 \times 10^5, k_p = 0.6, k_d = 800$ , 并使  $k_a$  从 4 变化到 -3, 分别作出  $k_2 = 10^6$  (高连杆刚度) 和  $k_2 = 2 \times 10^5$  (低连杆刚度) 时的闭环系统的跟轨迹如图 4(a) 和 (b) 所示. 从图中看到, 连杆刚度高时, 加速度正反馈能在一定范围内使系统的主导极点向左半平面移动; 而连杆刚度低时, 正反馈使主导极点向右半平面移动, 使系统趋向于不稳定.

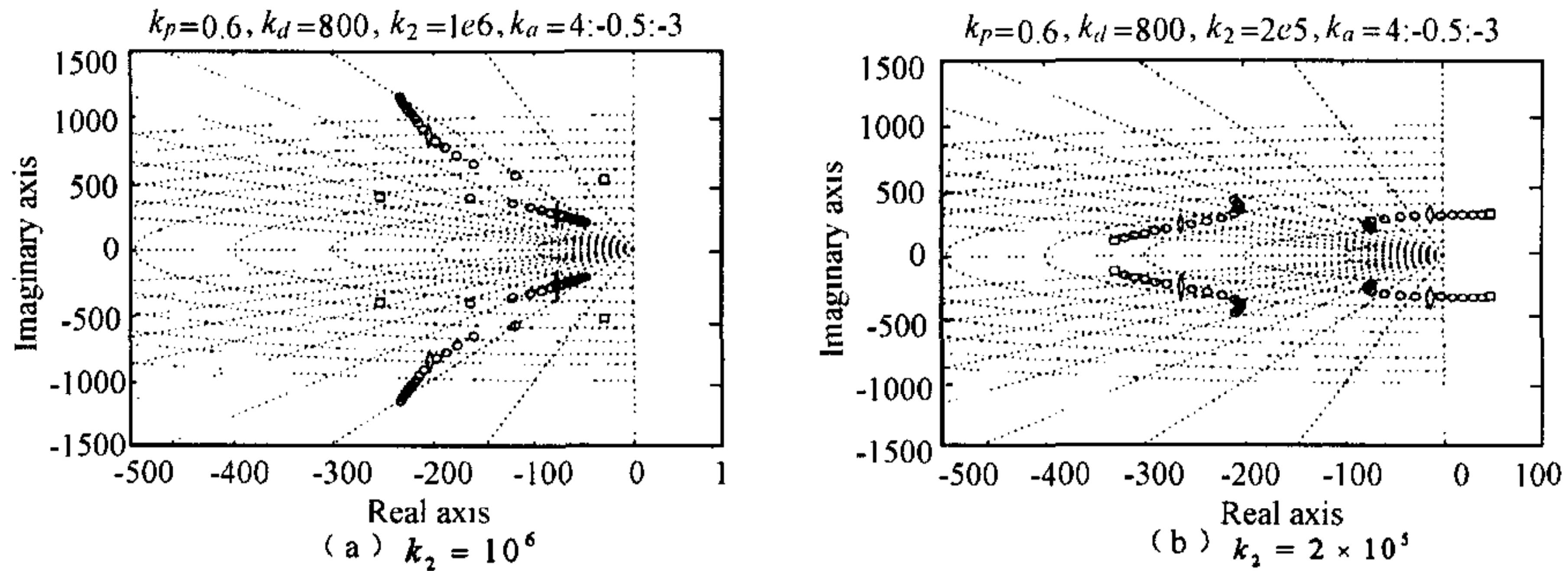


图 4 不同连杆刚度下  $k_a$  变化的根轨迹

从上述分析可知, 加速度反馈的效果与机器人传动连杆的刚度以及环境刚度有密切的关系. 当连杆刚度大于环境刚度时, 连杆表现出刚性特点, 加速度正反馈有一定的作用; 当连杆刚度小于环境刚度时, 连杆表现出大的柔性, 关节加速度与连杆末端加速度基本反相, 加速度负反馈有一定的作用. 这样, 使实际中因无法确定机械手的刚度与环境刚度的关系而很难确定加速度反馈的符号, 即使能确定加速度反馈的符号, 也因反馈系数的有效范围小, 体现不出加速度反馈的效果. 换句话说, 在机械手的传动和连杆存在较大柔性的条件下, 末端连杆(操作空间)加速度反馈对改善力控制性能作用不大. 可以验证, 此时无论用关节加速度反馈还是操作空间加速度积分反馈也都无法明显地改善力控制性能.

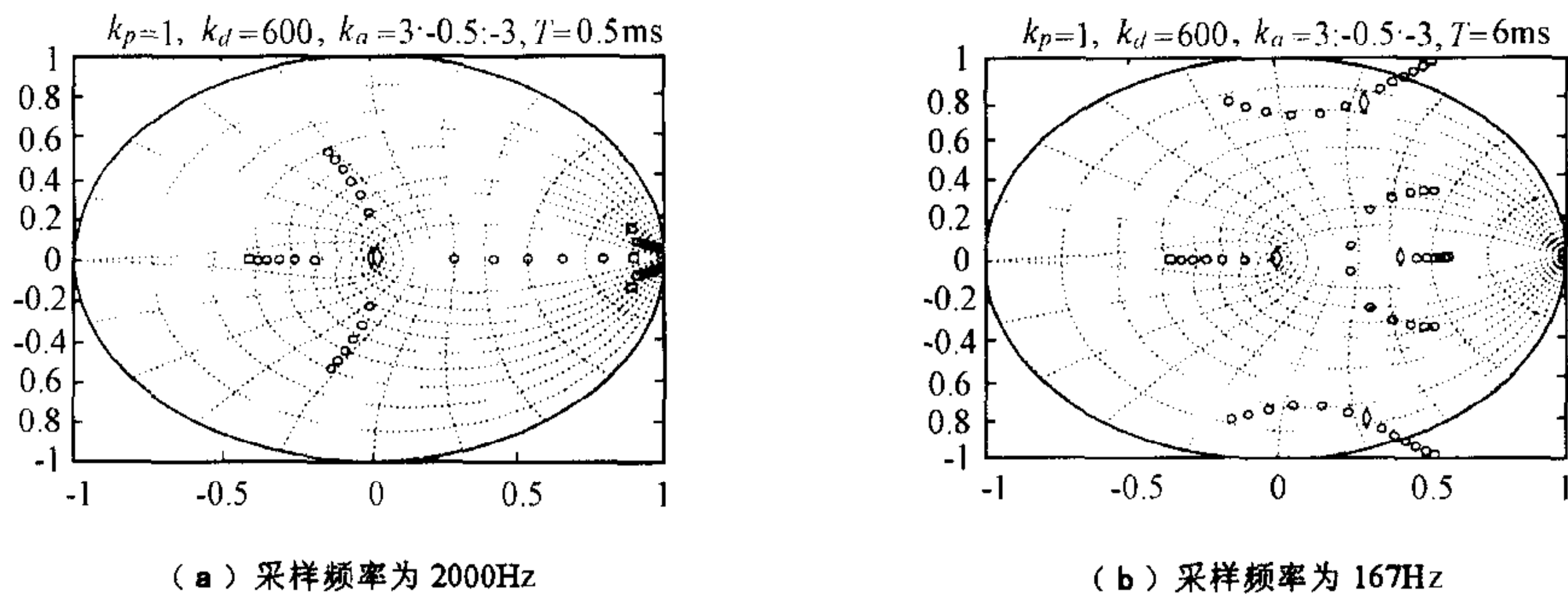
### 5 采样延迟对加速度反馈的影响

加速度信号是一种不连续的信号, 可以阶跃地产生或消失, 因此它覆盖的频率范围很宽. 在离散控制系统中, 对速度和位置满足要求的采样频率不一定满足加速度采样的要求. 为了检验采样延迟对加速度反馈的影响情况, 我们建立图 1(a) 所示连续二阶系统的 PDA 控制的开环脉冲传递函数为

$$\frac{F(z)}{E_1(z)} = \frac{k_p k_s G(z)}{1 + G(z) D_{ad}(z)}, \tag{10}$$

其中  $G(z)$  为(1)式中  $G(s)$  的具有零阶保持器的脉冲传递函数,  $D_{ad}(z)$  为速度和加速度数字控制器, 采样周期为  $T$ .

现在看采样周期对加速度反馈的影响. 取  $k_p = 1, k_d = 600$ , 此时连续系统的截止频率由第 1 部分求出约为 24Hz, 按工程上采样频率 6~20 倍的标准, 采样周期为  $T = 2.1\text{ms}$ . 这里为了对比, 分别选择两个不同的采样周期  $T_1 = 0.5\text{ms}$  和  $T_2 = 6\text{ms}$ , 作出(10)式的  $k_a$  从 3~-3 的闭环系统根轨迹如图 5(a) 和 (b). 从图 5(a) 看到, 当采样频率较高时, 加速度正反馈能在一定范围内提高系统的阻尼和收敛速度, 对系统有利, 但正反馈系数小于 -2.5 后系统阻尼又会变小. 从图 5(b) 看到, 当采样频率满足采样定理但较低时, 加速度负反馈在一定范围内(反馈系数 0~2.0 之间)使系统阻尼、收敛速度都提高, 超过该范围,

图 5 不同采样频率下  $k_a$  变化的根轨迹

或用加速度正反馈都使系统向不利方向发展. 之所以如此, 是因为采样频率在其中起了重要的作用. 当采样频率高时, 系统性能接近连续的二阶系统, 此时影响系统性能的主要矛盾是系统的带宽, 加速度正反馈使系统带宽提高, 对系统有利. 当系统带宽高到一定值后, 采样频率又成了影响系统性能的主要矛盾, 此时再提高系统带宽只能使性能下降, 限制了加速度正反馈的效果. 当采样频率低时, 影响系统性能的主要矛盾是采样频率, 加速度负反馈降低了系统的带宽, 缓和了这个矛盾, 对系统有利. 当加速度负反馈的增强使系统带宽成为主要矛盾后, 再增大反馈增益就起反作用.

由上述分析看到, 影响加速度反馈效果的不是采样后能否对加速度信号实现无损的恢复(一般系统带宽有限, 在系统带宽内对加速度满足 Shannon 采样定理是容易做到的), 而是采样频率是否给加速度反馈保留了发挥能力的充分余地. 因此, 对二阶系统而言, 要使加速度反馈发挥更大的潜力, 必须尽可能地提高系统的采样频率. 对于本节的例子, 经仿真验证, 采样频率约是系统转折频率的 35 倍以上时加速度正反馈才有作用; 当采样频率在系统转折频率的 10 倍以下时加速度负反馈有作用.

## 6 实验

我们在 PUMA560 机械手的操作空间分别进行了 6 维的位置控制和力控制的加速度反馈实验. 控制器由基于 VME 总线的 Delta3000 工业控制机构成. 加速度信号由固定于机械手末端连杆的线加速度计获得, 经模拟滤波由 A/D 采样后进入数字伺服控制环.

位置控制的采样周期为 2ms. 此时, 机械臂在空间自由运动, 连杆柔性表现不明显, 采样频率相对系统转折频率较高, 加速度反馈易发挥作用. 我们提出的加速度正反馈与近似积分负反馈相结合的综合加速度反馈策略<sup>[8]</sup>的控制效果如图 6(a)所示. 从图中看到, 引入综合加速度反馈后系统的阻尼明显增加, 不仅抑制了系统的超调震荡, 而且提高了收敛速度.

在力控制中, 采用不同的硬件计算结构, 可以得到 2.2ms 和 1.2ms 两种控制周期. 我们首先以厚钢板作为机械手的施力环境, 钢板可以认为是刚性环境, 系统的转折频率在 22Hz 左右. 两种周期下, 采样频率分别是系统转折频率的 20 和 42 倍. 经实验验证, 这两种情况下无论加速度正反馈还是负反馈对改善控制性能都没有明显的作用.

第二组实验选择软木板作为受力环境(刚度约为  $4.4 \times 10^4 \text{ N/m}$ ), 整个系统的转折频

率经实测约为 11Hz, 采样频率 454Hz, 是转折频率的 41 倍左右. 图 6(b) 是有无加速度反馈的力控制过度过程的实验结果. 从图中看到, 加速度正反馈使过度过程时间由 0.6s 缩短到了 0.24s, 超调量也有所减小. 当采样周期为 1.2ms 时, 效果比图 6(b) 略好. 对比这两组实验结果可以看到, 连杆柔性和采样延迟对加速度反馈的影响是不可忽视的. 在连杆刚度相对较大、采样频率较高的情况下, 用加速度反馈提高系统力控制质量是有效的. 反之, 加速度反馈很难发挥作用.

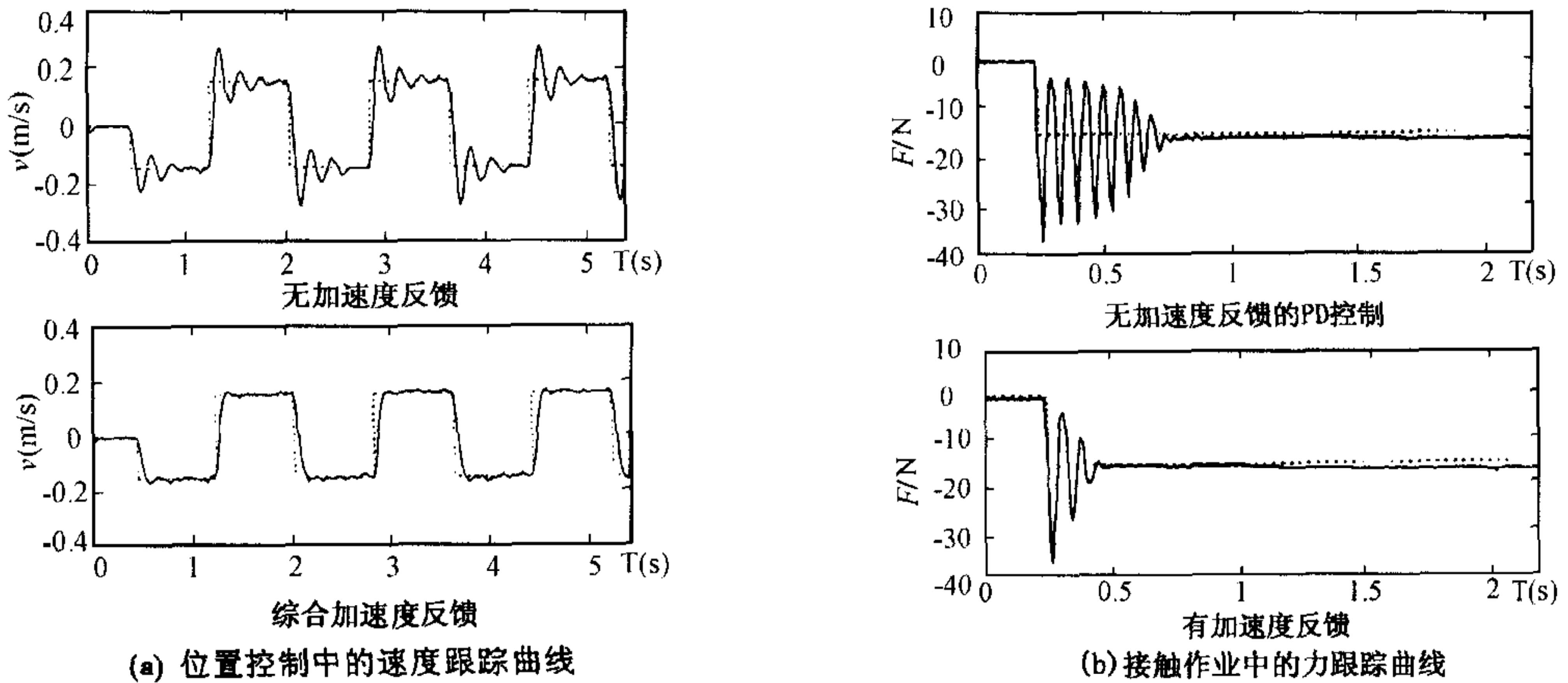


图 6 加速度反馈实验曲线

## 7 结论

机器人的接触力控制远比位置控制复杂, 比如采样频率低、连杆柔性大以及驱动电机时间常数大等因素在位置控制中的影响并不象力控制中那样明显, 它们是制约加速度反馈应用效果的主要因素. 当然, 正象实验部分所示, 在明确了以上诸因素的影响以后, 我们可以针对某一类问题应用加速度反馈来改善机械臂接触作业的控制性能. 随着计算技术的发展, 采样延迟将不再是主要矛盾, 只要连杆的柔性不是很明显, 加速度反馈的应用还是有很大意义的.

## 参 考 文 献

- 1 Studenny J, Belanger P R. Robot manipulator control using acceleration feedback. In: IEEE Conf. Decision and Control, 1984, 1 070~1 072
- 2 Studenny J, Belanger P R. Robot manipulator control by acceleration feedback; stability, design and performance issues, In: IEEE Conf. Decision and Control, 1986, 80~85
- 3 Yoichi Hori. Disturbance Suppression on an Acceleration Control Type DC Servo System. PSCE'88 Record, 1988, 222~229
- 4 Li Youfu, Daniel R W. Robot tip velocity measurement for direct End effector position control. In: Proc. 1992 IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Raleigh, NC(July), 1992, 998~1103
- 5 Li Youfu. On the Use of Velocity Feedback for Robot Impact Control. *Robotics and Autonomous Systems*, 1994, 13: 297~305
- 6 韩建达, 成海, 谈大龙. 一种基于运动状态反馈的机器人接触力控制. *机器人*, 1997, 19(6): 412~419
- 7 李杰, 韦庆, 常文森, 张彭. 机器人操作空间加速度信号应用研究. *国防科技大学学报*, 1998, 20(1): 36~41

8 李杰,韦庆,常文森.基于加速度反馈的机械手位置控制研究.国防科技大学学报.1999,21(3):93~97

**李 杰** 1971年生.1994年毕业于国防科技大学自动控制系,同年考入自动控制系的硕士研究生,1996年免试提前一年攻读博士学位,1999年获自动控制系机器人控制专业博士学位.研究领域为机器人力控制、智能机器人控制、多手协调.

**韦 庆** 见本刊第23卷第4期.

**常文森** 见本刊第21卷第6期.

---

## 中国自动化学会和中国系统工程学会将联合举办 “钱学森学术思想研讨会”

钱学森先生是自动化学会第一届(1961—1965)和第二届(1965—1980)理事长,一直是系统工程学会名誉理事长,今年是他90岁华诞.为了弘扬、总结和回顾钱学森先生在工程控制论、系统工程以及大成智慧工程等众多学科的科学思想、方法和理论,中国自动化学会和中国系统工程学会将在2001年11月在北京联合举办“钱学森学术思想研讨会”。

回顾、展望、创新、发展——将是此次研讨会的主题.钱老早期是以应用力学和工程控制论的研究成果而闻名于世.他1955年回国后对“两弹一星”所作出的贡献是全国家喻户晓的.近些年来,他把系统工程发展到大成智慧工程.提出开放的复杂巨系统的概念;从定性到定量综合集成方法论;现代科学技术体系;大成智慧;在自然科学与社会科学的结合、理论与实践的结合、现实与未来发展的结合等方面都作出重大贡献。

钱学森先生几十年如一日,在科学技术发展的前沿辛勤耕耘.他在担任自动化学会理事长的20年间,对进行国际学术思想的交流,促使我国进入国际自控联,加强国际合作,开阔视野等方面起到了非常重要的作用。

希望学会系统,社会各界积极关注、支持和参加此次研讨会.希望参加者提早做准备,并将发言的题目告知学会。

中国自动化学会

联系人:李爱国 电话:62544415

中国系统工程学会

联系人:经士仁 电话:62541827