

空间机器人系统的自适应控制

马保离 霍 伟

(北京航空航天大学第七研究室·北京, 100083)

摘要: 对于载体姿态可控的空间机器人系统, 本文给出了一种笛卡尔空间自适应控制算法, 当系统的动力学参数未知时, 该算法可以保证对手端期望位置轨迹的渐近跟踪, 并且不需要测量关节加速度. 应用文中算法对二杆平面空间机器人系统进行了仿真研究, 证实了算法的有效性.

关键词: 空间机器人系统; 机器人控制; 自适应控制; 机器人运动学与动力学

1 引言

空间机器人系统在未来的空间活动中将发挥越来越重要的作用. 遥控机器人可代替宇航员的舱外活动, 减少宇航员的危险并能增加作业时间. 此外大型空间站的组装和空间自动化都为机器人在空间的使用提供了广阔的应用前景.

当对携带空间机械臂的载体的位置和姿态可进行独立控制时, 空间机器人系统可看作一冗余机器人系统, 其运动学和动力学等价于一个具有固定基座的 $(n+6)$ 关节的机器人系统^[1] (n 为机械臂关节个数). 为了节约载体控制燃料, 很多文章讨论了载体完全不加控制的情况下空间机器人的控制问题^[2~4]. 但是由于载体姿态的改变会直接影响安装在载体上的通信设备的工作, 而载体位置的变化则对通信设备的影响不大; 此外控制载体姿态不象控制位置那样一定要用燃料, 还可用安装在载体上的由太阳能驱动的反作用轮的适当运动来实现. 因此研究载体姿态控制不变而其位置可随机械臂的运动而自由浮动的空间机器人的运动和控制问题是很必要的.

当不对载体的位置进行控制时, 整个系统不受外力作用, 因此其动量守恒, 由此可得到联系机械臂上任意一点的线速度和关节角速度的广义雅可比阵; 该雅可比阵不仅与机械臂的几何参数有关, 而且和机械臂及载体和负载的惯性参数有关. 由于系统的惯性参数很难精确获得, 特别是负载的惯性参数在一般情况下是未知的, 所以我们只能得到系统的近似广义雅可比阵. 文 [5] 指出, 在关节空间内空间机器人系统的动力学方程可以表示为惯性参数的线性函数, 但在手端笛卡尔任务空间内其运动方程却不能表示为惯性参数的线性函数. 当惯性参数未知时, 为了能在关节空间内实施自适应控制, 首先必须把期望的手端任务空间轨迹实时转换成期望的关节空间轨迹. 由于系统的广义雅可比阵不能精确得到, 因此无法进行精确转换; 若直接用近似广义雅可比阵进行转换, 将会引起较大的手端位置跟踪误差. 在文献 [5] 中, 作者用近似雅可比阵将期望的手端轨迹实时转换为期望的关节轨迹, 并在关节空间内进行自适应控制, 进而每间隔一段时间利用在关节空间内辨识得到的惯性参数修正系统的雅可比阵. 上述方法存在两个问题, 首先整个系统的稳定性得不到保

证;其次如果在关节空间内辨识得到的惯性参数不收敛到其真值,则不能保证对手端期望轨迹的渐近跟踪.为克服以上困难,我们首先讨论了系统的运动学,证明了系统的雅可比阵可以表示为一组适当选择的惯性参数的线性函数,进而给出了一种组合自适应控制器,该控制器不需要测量关节角加速度,并可渐近跟踪手端的期望笛卡尔位置轨迹;而且当雅可比阵中的参数估计值收敛到其真值时,控制器还可保证对手端期望笛卡尔速度轨迹的渐近跟踪.本文算法完全克服了文[5]中算法的缺陷.

2 系统的运动学和动力学

考虑图 1 所示的空间机器人系统, $O_A X_A Y_A Z_A$ 为惯性坐标系,体 0 表示载体,体 i ($i = 1, 2, \dots, n$) 表示机械臂的第 i 杆,体 $n+1$ 为负载, c_G 为系统质心, r_G 为系统质心位置向量, c_i ($i = 0, 1, 2, \dots, n+1$) 为体 i 的质心, r_i ($i = 0, 1, 2, \dots, n+1$) 为体 i 质心的位置向量; m_i 为体 i 的质量; a_i, b_i 分别为关节 i 至体 i 质心和体 i 质心至关节 $i+1$ 的距离向量.

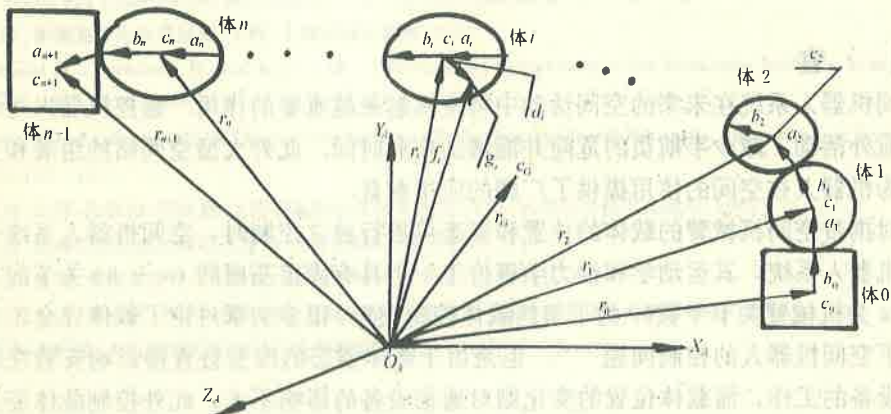


图 1 空间机器人系统

根据质心的定义知:

$$\sum_{i=0}^{n+1} m_i r_i = M r_G. \quad (2.1)$$

式中 $M = \sum_{i=0}^{n+1} m_i$ 为系统的总质量.

由上图可得如下几何关系:

$$r_i = r_0 + \sum_{j=1}^i (a_j + b_{j-1}). \quad (2.2)$$

(2.2)式代入(2.1)式可解出 r_0 为

$$r_0 = r_G - \frac{1}{M} \left[\sum_{i=1}^{n+1} m_i^{n+1} + \sum_{i=1}^{n+1} m_i^{n+1} b_{i-1} \right]. \quad (2.3)$$

式中

$$m_i^{n+1} = \sum_{j=i}^{n+1} m_j.$$

设机械臂杆 i 之质心到其上任意一点 g_i 的距离向量为 d_i , g_i 点的位置向量为 f_i , 则有

$$f_i = r_i + d_i = r_0 + \sum_{j=1}^i (a_j + b_{j-1}) + d_i \quad (2.4)$$

将(2.3)式代入(2.4)式并化简得

$$f_i = r_G + \sum_{k=1}^{n+1} (\bar{a}_k + \bar{b}_{k-1}). \quad (2.5)$$

式中

$$\left\{ \begin{array}{ll} \bar{b}_k = \frac{m_0^k}{M} b_k, & (k = 0, 1, 2, \dots, i-1), \\ \bar{a}_k = \frac{m_0^{k-1}}{M} a_k, & (k = 1, 2, \dots, i-1), \\ \bar{b}_k = -\frac{m_0^{n+1}}{M} b_i, & (k = i), \\ \bar{a}_k = \frac{m_0^{i-1}}{M} a_i + d_i, & (k = i), \\ \bar{b}_k = -\frac{m_0^{n+1}}{M} b_k, & (k = i+1, i+2, \dots, n), \\ \bar{a}_k = -\frac{m_0^{n+1}}{M} a_k, & (k = i+1, i+2, \dots, n+1). \end{array} \right. \quad (2.6)$$

设 $\bar{a}_k, \bar{b}_k$ 在与杆 k 固联的坐标系中的表示为 $\bar{a}_k^k, \bar{b}_k^k$, 则 $\bar{a}_k^k, \bar{b}_k^k$ 为常向量, 且有

$$\bar{a}_k = R_A^k(q) \bar{a}_k^k, \quad \bar{b}_k = R_A^k(q) \bar{b}_k^k. \quad (2.7)$$

式中 R_A^k 为联系惯性坐标系和与杆 k 固连的坐标系之间的旋转变换阵, q 为机械臂的相对关节角向量. (2.7)式代入(2.5)式得到

$$f_i = r_G + \sum_{k=1}^{n+1} (R_A^k a_k^k + R_A^{k-1} \bar{b}_{k-1}^k). \quad (2.8)$$

微分(2.8)式两边有

$$\dot{f}_i = \dot{r}_G + J_{g_i} \dot{q}. \quad (2.9)$$

其中 J_{g_i} 为杆 i 上任意点 g_i 的广义雅可比阵, 它可以表示为

$$J_{g_i} = \left\{ \sum_{k=1}^{n+1} \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial R_A^k}{\partial q_i} \bar{a}_k^k + \frac{\partial R_A^{k-1}}{\partial q_i} \bar{b}_{k-1}^k \right] s_i \right\}. \quad (2.10)$$

式中 s_i 为 $1 \times n$ 行向量, 其第 i 个元素为 1, 其余元素均为 0. 由于系统不受外力作用, 所以 $\dot{r}_G$ 为常向量; 若系统的初始动量为零, 则 $\dot{r}_G = 0$. 由上式可看出, 雅可比阵 J_{g_i} 为惯性参数 $\bar{a}_k^k, \bar{b}_k^k$ 的线性函数. 当取 $i = n, d_i = b_n$ 时, $\dot{f}_n$ 表示机械臂手端的线速度. 对于手端的角速度, 由于其雅可比阵仅与 q 有关^[2], 因此关于手端线速度和角速度的组合雅可比阵仍可表示为 $\bar{a}_k^k, \bar{b}_k^k$ 的线性函数. 一般地, 若令 x 表示任务向量(可以是体 i 的角速度或其上任意点的线速度), $h = [h_1, h_2, \dots, h_{n_h}]^T$ 为由 $\bar{a}_k^k, \bar{b}_k^k$ 的元素组成的参数向量, 其中 n_h 为参数的个数. 则有

$$\dot{x} = J(q, h) \dot{q}. \quad (2.11)$$

其中 J 可表示为

$$J(q, p) = J_0(q) + \sum_{i=1}^{n_h} J_i(q) h_i. \quad (2.12)$$

现在考虑系统的动力学, 系统的动能为

$$T = \sum_{i=0}^{n+1} T_i, \quad T_i = \frac{1}{2} m_i \dot{r}_i^T r_i + \frac{1}{2} \omega_i^T (I_i \omega_i).$$

式中, ω_i 为体 i 的角速度, I_i 为体 i 的转动惯量阵. 因 $\dot{r}_i$ 可表示为惯性参数的线性函数, 所以 $\dot{r}_i^T r_i$ 也可表示为一组适当选择的组合惯性参数的线性函数. 另外 ω_i 仅与 $q, \dot{q}$ 有关, I_i 为惯性参数的线性函数, 因此 T_i, T 可以表示为一组适当选择的惯性参数的线性函数, 从而系统的动力学方程可以表示为惯性参数的线性函数(详细证明见[5].)

将系统的动能表达式代入拉格朗日方程, 可以得到系统的动力学方程为

$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} = \tau. \quad (2.13)$$

式中, $H(q)$ 为惯性张量阵, $C(q, \dot{q})\dot{q}$ 为伽氏力和哥氏力项 τ 为机械臂的关节力矩. 此外 $H(q), C(q, \dot{q})$ 满足性质: ① $H(q), C(q, \dot{q})$ 为适当选取的惯性参数的线性函数. ② 适当选择 $C(q, \dot{q})$ 的形式可使 $\dot{H} - 2C$ 为反对称阵^[5].

3 自适应控制器的设计

考虑系统

$$\dot{x} = J\dot{q}, \quad (3.1)$$

$$H\ddot{q} + C\dot{q} = \tau. \quad (3.2)$$

记期望的手端笛卡尔轨迹为 $x_d(t)$; J, H, C 的估计分别为 $\hat{J}, \hat{H}, \hat{C}$; $e_1 = x_d - x, J = \hat{J} - J, \bar{H} = H - \hat{H}, \bar{C} = C - \hat{C}$. 假定 J 为方阵, $\hat{J}$ 非奇异, 则可定义参考关节角速度及相应的误差:

$$\dot{q}_r = \hat{J}^{-1}(\dot{x}_d + K_1 e_1), \quad (3.3)$$

$$\dot{e}_2 = \dot{q}_r - \dot{q}. \quad (3.4)$$

式中 K_1 为对称正定阵.

利用(3.3), (3.4)式可将(3.1)式化为

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (\hat{J} + \bar{J})\dot{q}_r - \bar{J}\dot{q}_r - \bar{J}\dot{e}_2 \\ &= \dot{x}_d + K_1 e_1 + \bar{J}\dot{q}_r - \bar{J}\dot{e}_2 \\ &= \dot{x}_d + K_1 e_1 + Y_1 \bar{p}_1 - \bar{J}\dot{e}_2. \end{aligned}$$

式中 $Y_1 \bar{p}_1 = \bar{J}\dot{q}_r, \bar{p}_1 = p_1 - \hat{p}_1, p_1, \hat{p}_1$ 分别为 J 中所含惯性参数的真值和估计值. 由此得到误差方程

$$\dot{e}_1 + K_1 e_1 = -Y_1 \bar{p}_1 + \bar{J}\dot{e}_2. \quad (3.5)$$

再由(3.4)式有

$$\ddot{q} = \ddot{q}_r - \ddot{e}_2, \quad (3.6)$$

其中 $\ddot{q}_r$ 可由(3.3)式得到

$$\ddot{q}_r = \hat{J}^{-1}(\ddot{x}_d + K_1 \dot{e}_1 - \dot{\hat{J}}\dot{q}_r), \quad (3.7)$$

由(2.12)式及 Y_1 的定义可得到如下计算 $\hat{J}\dot{q}_r$ 的公式

$$\dot{\hat{J}}\dot{q}_r = \hat{J}\ddot{q}_r + Y_1 \dot{\hat{p}}_1. \quad (3.8)$$

$\dot{\hat{p}}$ 在下面的定理 1 中给出.

利用(3.4), (3.6)式可将(3.2)式化为

$$H\ddot{q}_r + C\dot{q}_r = H\ddot{e}_2 + C\dot{e}_2 + \tau. \quad (3.9)$$

设计如下控制器

$$\tau = \hat{H}\ddot{q}_r + \hat{C}\dot{q}_r + K_2\dot{e}_2. \quad (3.10)$$

将(3.10)式代入(3.9)式可得到系统的误差动力学方程

$$H\ddot{e}_2 + C\dot{e}_2 + K_2\dot{e}_2 = Y_2\bar{p}_2. \quad (3.11)$$

其中 $Y_2\bar{p}_2 = \bar{H}\ddot{q}_r + \bar{C}\dot{q}_r$, $\bar{p}_2 = p_2 - \hat{p}_2$, $p_2, \hat{p}_2$ 分别为 H, C 中所含惯性参数的真值和估计值; K_2 为对称正定阵.

定理 1 控制器(3.10)和参数调整律:

$$\dot{\bar{p}}_1 = Y_1^T W e_1, \quad \dot{\bar{p}}_2 = -Y_2^T \dot{e}_2. \quad (3.12)$$

可以保证: $\lim_{t \rightarrow \infty} e_1 = 0$. 若 $\lim_{t \rightarrow \infty} \bar{p}_1 = 0$, 则还可保证: $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{e}_1 = 0$.

证 选择以下拟 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} e_1^T W e_1 + \frac{1}{2} r \dot{e}_2^T H \dot{e}_2 + \frac{1}{2} r \bar{p}_1^T \bar{p}_1 + \frac{1}{2} r \bar{p}_2^T \bar{p}_2. \quad (3.13)$$

其中 W 为对称正定阵, r 为一正常数.

对 V 沿(3.5), (3.11) 式求导数, 并利用(3.12)式及性质 2 有

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e_1^T W \dot{e}_1 + \frac{1}{2} \dot{e}_2^T H \dot{e}_2 + r \dot{e}_2^T H \dot{e}_2 + \bar{p}_1^T \dot{\bar{p}}_1 + r \bar{p}_2^T \dot{\bar{p}}_2 \\ &= -e_1^T W K_1 e_1 - e_1^T W Y_1 \bar{p}_1 + e_1^T W J \dot{e}_2 - r \dot{e}_2^T K_2 \dot{e}_2 + r \dot{e}_2^T Y_2 \bar{p}_2 + \bar{p}_1^T \dot{\bar{p}}_1 + r \bar{p}_2^T \dot{\bar{p}}_2 \\ &= -e_1^T W K_1 e_1 + e_1^T W J \dot{e}_2 - r \dot{e}_2^T K_2 \dot{e}_2. \end{aligned}$$

显然 $\dot{V}$ 为 $e_1, \dot{e}_2$ 的二次型, 因 J 有界, 所以当选择 r 足够大时可保证 $\dot{V} \leq 0$, 并且 $\dot{V} = 0$, 当且仅当 $e_1 = 0, \dot{e}_2 = 0$.

由 $\dot{V} \leq 0$ 知, V 有界, 所以 $e_1 \in L_n^\infty, \dot{e}_2 \in L_n^\infty, \bar{p}_1 \in L_n^\infty, \bar{p}_2 \in L_n^\infty, \dot{p}_1 \in L_n^\infty, \dot{p}_2 \in L_n^\infty$. 因 $e_1 \in L_n^\infty$, 所以 $\hat{q}_r \in L_n^\infty, \dot{\hat{p}}_1 \in L_n^\infty$, 再由 $\dot{e}_2 \in L_n^\infty$ 知, $\dot{q} \in L_n^\infty, \dot{e}_1 \in L_n^\infty$. 由(3.7), (3.8) 式知, $\ddot{q} \in L_n^\infty$. 由(3.10) 式知 $\tau \in L_n^\infty$. 由(3.2) 式知 $\ddot{q} \in L_n^\infty$, 因此 $\ddot{e}_2 \in L_n^\infty$. 由 $\dot{e}_1 \in L_n^\infty, \ddot{e}_2 \in L_n^\infty, J, J$ 有界知, $\dot{V} \in L_n^\infty$, 因此由文献[6] 中的引理 4.3 可知, $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{V} = 0$, 即: $\lim_{t \rightarrow \infty} e_1 = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{e}_2 = 0$.

进一步若 $\lim_{t \rightarrow \infty} \bar{p}_1 = 0$, 则由(3.5) 式知, $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{e}_1 = 0$. 证毕.

为了进一步说明以上自适应控制算法, 我们画出了算法的系统框图, 如图 2 所示.

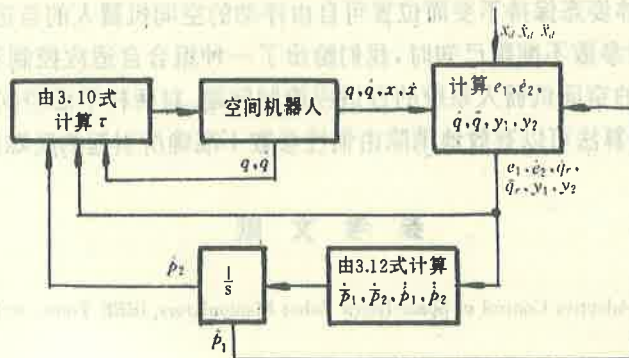


图 2 空间机器人系统自适应控制算法框图

4 仿真结果

针对二杆空间机器人系统,我们应用定理 1 中的算法进行了数字仿真,所用机器人的几何参数及惯性参数如下:

$$b_0 = 3\text{m}, \quad b_1 = 3\text{m}, \quad b_2 = 3\text{m}, \quad a_1 = 3\text{m}, \quad a_2 = 3\text{m},$$

$$a_3 = 0\text{m}, \quad m_0 = 30\text{kg}, \quad m_1 = 10\text{kg}, \quad m_2 = 10\text{kg}, \quad m_3 = 100\text{kg}.$$

期望的手端位置轨迹为

$$x_{1d}(t) = 9.0 + 0.6\sin\omega t, \quad x_{2d}(t) = 6.0 + 0.6\cos\omega t.$$

其中 $\omega = 1$ 弧度/秒. 关节角的初始值为

$$q_1(0) = \frac{\pi}{2}, \quad q_2(0) = -\frac{\pi}{2}.$$

初始的手端位置为

$$x_{10} = 10.0, \quad x_{20} = 6.0.$$

仿真时机器人手端所持负载质量 m_2 未知,并假定其初始估计值为零.图 3,图 4 中的实线为采用定理 1 中自适应算法时所得到的手端位置轨迹跟踪误差曲线,虚线为关闭参数自适应(即取 m_3 恒等于零)时所得到的手端位置轨迹跟踪误差曲线.可以看出在自适应的情况下手端位置误差很快收敛到零,而在非自适应的情况下手端的位置跟踪误差较大且不收敛.

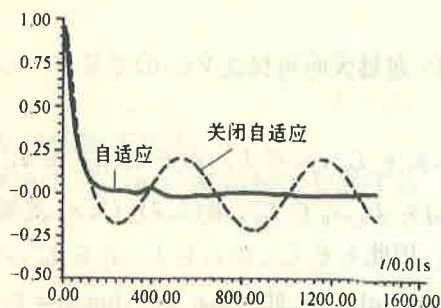


图 3 手端位置跟踪误差 e_{11}

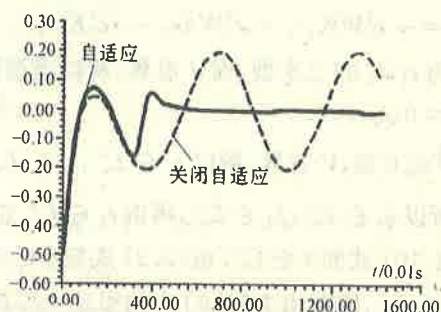


图 4 手端位置跟踪误差 e_{12}

5 结 论

本文讨论了载体姿态保持不变而位置可自由浮动的空间机器人的自适应控制器的设计问题.当系统的惯性参数不准确已知时,我们给出了一种组合自适应控制器,解决了雅可比阵中含有惯性参数的空间机器人系统的自适应控制问题.对两杆平面空间机器人的仿真结果表明,文中自适应算法可以有效地消除由惯性参数不准确所引起的跟踪误差.

参 考 文 献

- [1] Michael, W. Walker. Adaptive Control of Space-Based Robot Manipulators. IEEE Trans. on Robot. and Automat., 1992, 7(6): 828—835
- [2] Vafa and Dubowsky. On the Dynamics of Space Manipulator Using the Virtual Manipulator with Application to Path Planning. The Journal of the Astronautical Science, 1990, 38(4): 441—472

- [3] Yoji Umetani and Kazuya Yoshida. Resolved Motion Rate Control of Space Manipulators with Generalized Jacobian Matrix. IEEE Trans. on Robotics and Automation, 1989, 5(3)303—314
- [4] Nakamura, Y. and Mukherjee. Bi-Directional Approach for Nonholonomic Path Planning of Space Robots. Proc. Fifth International Symposium of Robotics Reserach, 1990, 405—416
- [5] Yangsheng Xu and Heungyeung Shum. Adaptive Control of Space Robot System with Attitude Controlled Base. Proc. of the IEEE Intel. Conference on Robotics and Automation, 1992, 2005—2010
- [6] J. J. E. 斯洛廷[美], 李卫平著, 蔡自兴, 罗光亮, 桂卫华等译. 应用非线性控制. 北京: 国际工业出版社, 1992

Adaptive Control of Space Robot System

MA Baoli and HUO Wei

(The Seventh Research Division, Beijing University of Aeronautics and Astronautics • Beijing, 100083, PRC)

Abstract: An adaptive control scheme is proposed for the space robot system with an attitude controlled base. When the dynamic parameters are unknown, the adaptive scheme guarantees a zero Cartesian tracking error without the need of joint acceleration measurement. Two-link planar space robot system is simulated to verify the proposed adaptive control scheme.

Key words: space robot system; robot control; adaptive control; robot kinematics and dynamics

本文作者简介

马保离 1965年生, 1984年毕业于西北工业大学电子工程系, 1990年获西北工业大学控制理论与应用专业硕士学位, 现在北京航空航天大学七研攻读博士学位, 主要从事机器人动力学与控制的研究工作。

霍伟 1951年生, 1977年毕业于北京航空航天大学自动控制系, 1983年获该校应用数理系控制理论与应用硕士学位, 1983月至88年4月曾在美国密执安大学机器人系统部作访问学者, 1990年获北京航空航天大学控制理论与应用博士学位。现为北京航空航天大学教授、博士生导师。主要研究方向为机器人动力学与控制, 智能控制, 大系统稳定性与分散控制, 用图论方法研究线性系统结构性质等。