

# 民主德国科学院力学研究所 机器人技术研究综述

B. Heimann

**提要** 本文介绍了民主德国力学研究所自1981年以来在机器人技术方面的研究概况。这项研究是两个研究所（力学研究所，控制与信息中心研究所）同冶金工业设备制造联合企业合作进行的。这种合作，有助于将基础研究同应用研究在以下几个领域内结合起来：①建立机器人结构的数学模型，用作实验研究和控制设计的基础；②机器人领域的专门实验研究；③为发展新一代机器人的研究工作（传感器开发，离线编程等等）。

**关键词** 工业机器人；多体系统；在线算法；触觉传感器；离线编程

## 1 引言

与传统的机械不同，机器人/机械手（工业机器人，IR）在任一自由度都有自身的传动装置，各个自由度都是“活动的”。另一些特点是：各种不同的边界条件和加工任务下运动结构的多样性，强烈的非线性和各自由度间的耦合以及具有冗余度等等。从这些特点可以看出，对机器人控制系统的要求是很高的，而控制系统的设计又以合适的数学模型为基础。因此，要掌握机器人技术，既要透彻了解系统的各个部件，又要综合考察整个系统。

## 2 多体系统（MKS），尤其是工业机器人多体系统数学模型的建立

建立数学模型的问题产生于：①工业机器人控制调节系统的设计方面；②作为结构设计基础，对工业机器人及其构件进行的应力分析方面。

这两方面的目标对建立数学模型提出的要求是截然不同的。对于①，主要研究工业机器人的定位性能。建立数学模型必须考虑主要的运动学和动力学的影响（最低阶模型），以便在线算法可用微机实现。其他次要的影响视为系统干扰，由合适的调节器予以补偿。对于②，要求尽可能精确地建立工业机器人构件的数学模型，其目的是考察应力状态（应力、变形、力、力矩等等）。相应的程序开发以离线方式进行，并采用大型计算机（例如有限元法）。

2.1 定义 图1是最常见的工业机器人运动学示意图。

对于工业机器人的运动学和动力学描述，多体系统是合适的模型。可以将其理解为由有限多个刚体组成的机械替代模型。广义地说，多体系统也包括弹性体（混合多体系统）。体与体之间的连接件都是无质量的主动元件或被动元件如弹簧、阻尼器或伺服马达。另外通过

轴承、导轨和关节实现运动学上的连接。对于当今研制的工业机器人，其多体系统的拓扑结构受到如下条件的严格限制：支架多半是平的，空间运动由旋转框的转动完成；关节都有一个活动自由度，它们的轴互相平行或垂直。

图 2 和 3 是描述一个刚体在空间的位置和取向所需的坐标系。图中  $\{KS\}_0$  为惯性系； $\{KS\}$  为固定在物体上的坐标系； $r_c$  为质心  $C$  的矢径； $R(V)$  为体积元  $dV$  在  $\{KS\}_0$  中的矢径； $r(V)$  为体积元  $dV$  在  $\{KS\}$  中的矢径。

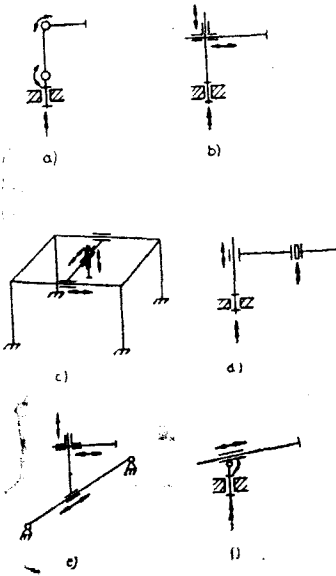


图 1 最常见的机器人运动学示意图

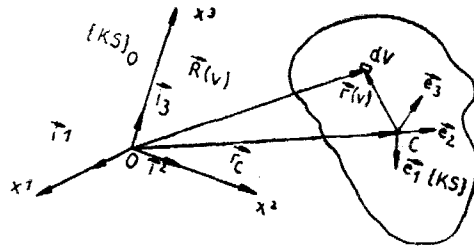


图 2 描述一个刚体的坐标系

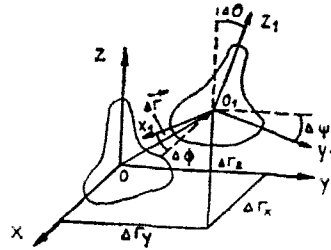


图 3 与给定位置偏差的测量

工艺任务一般作为 ptp, mp 或 cp 控制，用环境坐标  $x^T = (x_1, x_2, x_3, l_1, l_2, l_3)$  来表述。此坐标明确地描述一个工业机器人肢体在  $\{KS\}_0$  上的位置和取向。

一个有  $n$  个肢体的机器人，其机器人坐标  $q^T = (q_1, \dots, q_n)$  是用来描述该工业机器人结构的广义坐标，一般说来是作为相对坐标而引入的<sup>[31]</sup>。

2.2 运动学模型 本模型借助于机器人坐标系来描述机器人在惯性系  $\{KS\}_0$  中的运动状态，从而也描述了机器人坐标和环境坐标之间的变换关系以及其导数间的变换关系。描述机器人运动学的可能性，是基于齐次变换理论<sup>[1,2]</sup>，定向图和入射矩阵理论<sup>[3]</sup> 以及螺旋理论<sup>[4]</sup>，并基于引入的各种坐标系<sup>[1-3]</sup> 和变换关系<sup>[6,3,2]</sup>。

图 4, 5, 6 示出基本结构为 DSS, DDS 和 DDD 的机器人以及相应的描述 Denavit-Hartenberg 参数 (D 代表旋转关节, S 代表滑动关节)。

重要的问题是求解运动学正问题 (DKP) 和运动学逆问题 (IKP)。这两个问题的求解，必须实时进行，以形成机器人控制的指令参数。这里要求给出正问题和逆问题的数值解。在能给出显式解的情况下，要求在给定精度下使计算时间最短 (例如通过采用定点运算和特殊函数表)。

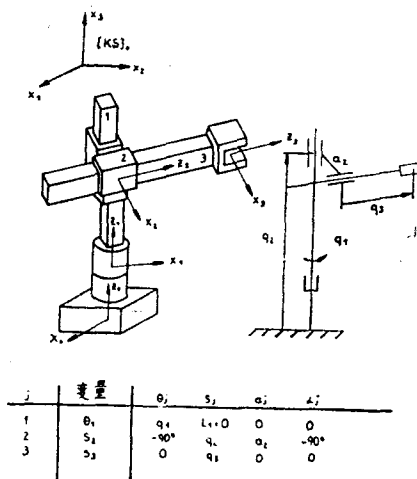


图 4 机械手及DSS结构的Hartenberg-Denavit参数的运动学图解

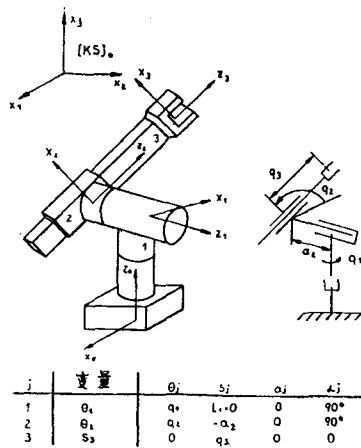


图 5 机械手及DDS结构的Hartenberg-Denavit参数的运动学图解

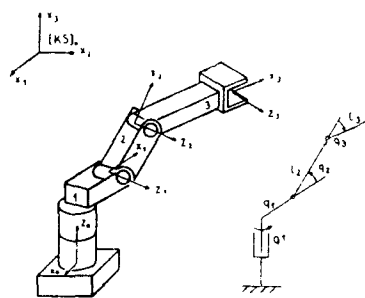


图 6 机械手及DDD结构的Hartenberg-Denavit参数的运动学图解

然而逆问题一般没有显式解。由于抓手在空间的位置和方向由六个量唯一确定，故可区别以下情况：

①无冗余度的机械手 ( $n \leq 6$ ) 结构形式多样性是有限的；

$$K_M = \{q^i(t_1) : x_n(t_1) = x_n(q^i(t_1)), i = 1, M\} \quad (1)$$

②有冗余度的机械手 ( $n > 6$ ) 一般作为逆问题的解有无限多个结构形式  $K_\infty$ 。

逆问题解有两种选择方法：或者采用数值算法，例如以足够短的时间步长  $\Delta t$  进行递推

$$q(t + \Delta t) = q(t) + H^{-1}(x_n(t + \Delta t) - x_n(t)) \quad (2)$$

式中  $H^{-1}$  为 Jacobi 矩阵  $H = \partial x_n / \partial q$  的伪逆，或者通过增加假设（限制条件、自由度间的联系，最优判据）来求解，例如通过下列最优问题来求解：

$$J[q(t_1)] = \min \|q^i(t_1) - q^i(t_0)\|, \quad q^i(t_1) \in K_M \quad (3)$$

工业机器人的几何特性和运动学特性是判断结构好坏的主要依据（参见第 3 节）。

2.3 动力学模型 在下列情况下必须考虑动力学模型：①在动作速度较高而要考虑惯性力、向心力和科氏力时；②在降低目前不利的自重同有效重之比时；③在提高定位精度以及研究如何优化运动性能时。

文献中众所周知的方法和算法，是基于第二类 Lagrange 方程<sup>[2,8,9]</sup>，Newton-Euler 方程<sup>[10]</sup>，方块矩阵法<sup>[3]</sup>，Gauss 原理<sup>[1,11]</sup>，Gibbs-Appell 方程<sup>[8]</sup>，d'Alembert 原理<sup>[3]</sup>等。

图 7 和 8 给出了 DSSD 结构工业机器人所必须的符号和坐标系。从动力学观点看，将随体坐标系安置在机器人肢体的质心上，并使其取向与主要惯量轴方向一致是有利的。

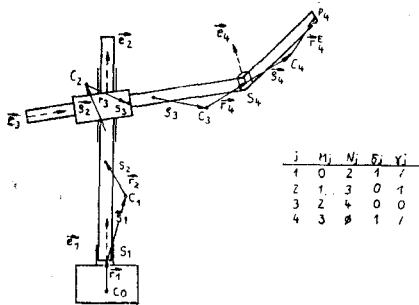


图 7 DSSD 结构机器人符号图示

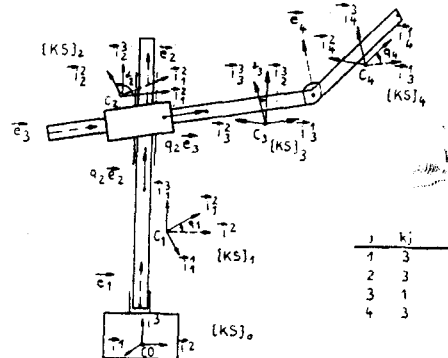


图 8 DSSD 结构机器人所用坐标系及广义坐标

运动方程的一般形式为

$$\mathbf{A}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{Q} \quad (4)$$

或

$$\sum_{i=1}^n \left\{ A_{i,j}(\mathbf{q})\ddot{q}_i + B_{i,j}(\mathbf{q})\dot{q}_i^2 + 2 \sum_{k=i+1}^n B_{i,k,j}(\mathbf{q})\dot{q}_i\dot{q}_k + B_{j,i}(\mathbf{q}) + B_{j,i}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \right\} = Q_j, \quad j=1, n \quad (5)$$

式中， $A_{i,j}(\mathbf{q})\ddot{q}_i$  为惯性力； $\mathbf{A}(\mathbf{q})$  为惯量矩阵； $B_{i,j}(\mathbf{q})\dot{q}_i^2$  为向心力， $B_{i,k,j}(\mathbf{q})\dot{q}_i\dot{q}_k$  为科氏力； $B_{j,i}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  为非保守力； $Q_j$  为广义力。

2.4 机器人技术中的计算机仿真 计算机的普及使用，为高效率地研制、设计和操作技术产品创造了条件（解决办法：计算机辅助设计/计算机辅助制造（CAD/CAM））。

动力学领域的计算机仿真是，能以下列形式自动定性和定量地显示出多体系统的动力学性能：①列表；②绘制图形；③屏幕活动显示（实时）。

定量显示的内容包括：位置、速度、加速度和反作用等量随时间的变化；最优系统参数；最优过程。

定性显示的内容包括：模型方程的结构；系统参数的影响；运动的稳定性(Lyapunov)；第一积分存在与否；运动的周期性；通过变换获得合适的模型方程。

运用计算机来解决上述各项问题时，计算机生成模型方程是高效率 CAD/CAM 系统软件不可缺少的。它们既可以用数值也可以用符号来表达。

用纯数值的算法（例如用于自动生成模型方程），提供的是单个情况的结果，看不出所研究的刚体系物理结构方面的情况，因而一般也显示不出系统参数对动态性能的影响。

在求解多体系的动力学性能时，将上述两种做法有意义地结合起来，常能实质性地提高效率和精度。

在机器人技术领域中，发展了 CAD 系统 CAE-IR，用它可以完成下列任务<sup>[12]</sup>：

①对话输入：机械手的结构和几何关系，质量参数和惯性参数，外力和力矩。

②第一类任务（动力学正任务）：对于机械手的一个给定运动过程  $q(t)$ ，求出要加的力  $Q(t)$ ， $Q(t) = Q(q(t))$ 。

③第二类任务（动力学逆任务）：对于给定的力  $Q(t)$  和机械手的给定初始状态

$$q(0) = q^0, \quad \dot{q}(0) = \dot{q}^0$$

求机械手的运动过程  $q(t)$ ：

$$q(t) = q(Q(t), q^0, \dot{q}^0)$$

此外，还要算出描述机械手运动状态和载荷状态的下述参数：

①机械手在惯性系中的运动  $\{R_j(t)\}_{j=1,n}, \{OH_j(t)\}_{j=1,n}$

②各肢体的运动状态  $\{v_j(t), \omega_j(t), a_j(t), \varepsilon_j(t)\}_{j=1,n}$

③关节的载荷  $\{F_j(t), M_j(t)\}_{j=1,n}$

图 9, 10 示出 CAE-IR 程序的一些结果。

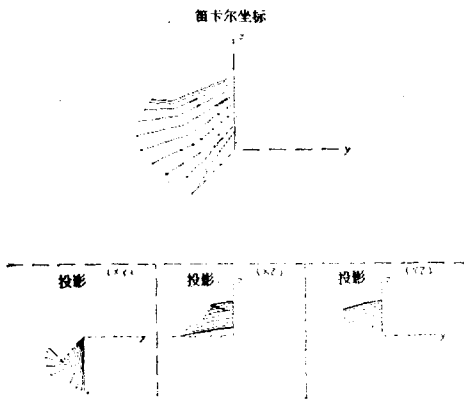


图 9 弯臂结构运动过程

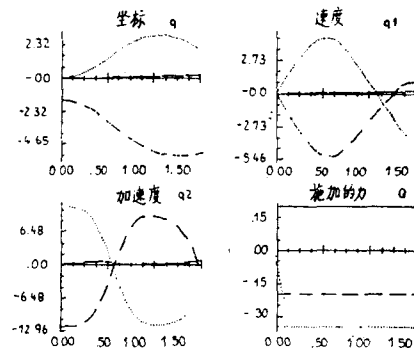


图 10 CAE 工业机器人的结果

与 ANSSR 的 LIIAN 研究所合作，为“工业机器人 CAD”程序制造了 SM4 计算机的小型机变体，从而大大改进了图形输出。

为了上述目的，即为了把数字和符号方法有意义地结合起来建立运动方程，以求得刚体系统动力学的定性和定量表示，我们将 Lagrange 形式作为这方法的基础。

从 1984 年至今，完成了两类刚体系统的 Lagrange 模型方程的数字和符号生成：开放的未分叉和分叉的运动链（树形结构系统）。这种算法和相应的软件一起构成了“受约束力学系统”的动力学建模进行仿真的出发点。

2.5 带有弹性肢体的系统（混合多体系统） 如果要求机器人/机械手动作速度更快，能量消耗更小，改善有效重量和自重之比，那么就需大大降低其结构重量。只有在控制方案中考虑到了构件的变形，才能达到尽可能好的不变的工作精度。

在时域中设计回路控制的基础是假定准确了解对象模型。为了建立混合多体系统的运动方程，既可使用精确方法，也可使用近似方法以及辨识方法<sup>[13,14]</sup>。主要问题是，对于相当简单的结构，方程组已经是非常繁冗，不适于控制之用。必须通过在建模时附加一些限制，

找出能够精确地反映主要特性的最低阶模型。

一个作为研究出发点的体系如图11所示，它由以下几部分组成：①一个传动部件，用于手臂的旋转和移动；②截面为矩形的弹性梁；③终端质块，由抓手和有效质量组成。

依据下列限制性假设，可把图12所示的机械模型作为弹性机器人的最低阶模型来研究：

- ①根据梁的理论，只需考虑周向上的弹性变形，在铅直方向上可假定梁是刚性的。
- ②根据测量结果可以假定，基频振动占主导地位，只有它是必须予以控制的。
- ③机械臂的移动可以同转动及弹性变形分开来考察。在此种情况下不依赖于其他运动来确定  $l(t)$ 。

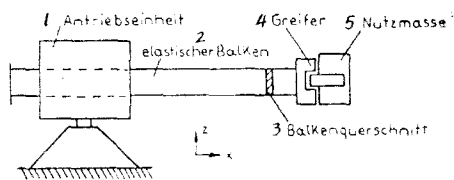


图 11 一个弹性机械手的模型

1 传动部件 2 弹性梁 3 梁断面 4 抓手 5 有效质块

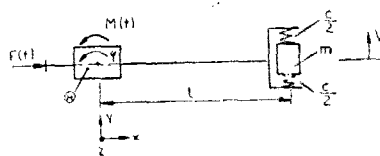


图 12 一个长度可变的弹性臂的最低阶模型

在图12的机械模型中弹性梁为一个刚性的无质量的臂所代替，梁的弹性包含在端点的弹簧中。

已对图11, 12所示模型进行了数字仿真，并在实验室条件下进行了试验研究。它表明，对于 ptp 运动，在最低阶模型基础上导出的数学模型对于控制器在线设计已足够了，它能很好地反映出运动情况和控制性能。

从大量的控制方案中选用线性状态反馈

$$u = -Kq$$

设计问题就在于算出增益矩阵  $K$ ，例如通过预先规定闭路特征值来求

$$[\lambda E - (A + BK)]q = 0 \quad (6)$$

这种设计方法是以对整个状态矢量的认识为前提的。从实际观点来看，不可能给  $q$  的所有坐标都配上测量装置。现有的可观测性保证了以少量离散的测量就能渐近地重构出这些状态，所以显然可以使用“观测器”。若将状态矢量中的状态变量重新排列，就得到一个最低阶“观测器”的设计为

$$q = [0 : E_r] \left\{ \begin{array}{l} q_{n-r} \\ \dots \\ q_r \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{不可测} \\ \dots \\ \text{可测} \end{array}$$

从实际观测来看，一种显而易见的可能性是：将弹性坐标的控制叠加到现有的位置和速度调节回路上。重构系统状态所需的测量将通过测量值采集器送给观测器<sup>[16]</sup>。

### 3 工业机器人的实验研究

最近10年工业机器人技术蓬勃发展，对此领域实验研究的实施战略和方法提出了新的要求，这是由于要求它在许多方面性能高于迄今一般机器人和机械的性能的缘故。

下面列出机器人力学实验室得出的几条经验<sup>[6,7]</sup>。

3.1 工业机器人的特征量 工业机器人需执行的基本任务有：①在给定点处精确起动；

②工件或工具的精确定位；③精确地沿给定的轨道运动；④按规定施加作用力。

对工业机器人的这些功能要求，需要有一系列特征量，通过它们来检查和保证其功能的正确性。这些量是：几何参数（工作空间、定位精度、轨道精度等）；运动学参数（处理时间、速度、加速度等）；动力学参数（力、动力学挠性等）。

工业机器人还有其他一些特征参数，如有效功率、噪声和热参数，但相对于上述功能要求而言，它们是次要的。

### 3.2 测量任务和测量数据处理

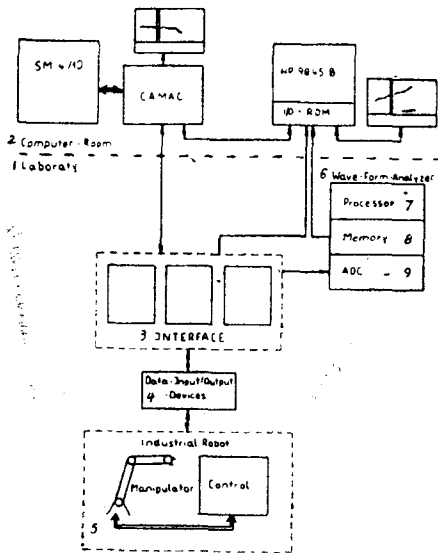


图 13 测量装置和计算装置的连接

- 1 实验室 2 计算室 3 接口 4 数据输入输出装置 5 工业机器人、机械手、控制 6 波形分析器 7 处理机 8 存储器 9 模拟数字转换器

从上述特征参数可导出工业机器人研究中的下列几项基本测量任务：①求一个物体在空间的实际位置与规定位置的偏差。局部任务是：求一个点在空间的实际位置同规定位置的偏差。②求一个物体在空间的总体运动。局部任务是：求一个点在空间的总体运动。③求力和力矩的一个分量或多个分量。④振动研究（特征频率、振动形式、阻尼性能）。

解决了这些测量任务，就有可能全面评价工业机器人的功能可靠性，载荷状态以及在机械结构和控制（硬件和软件）之间的协调情况。

表 1 按上述 4 项测量任务列出了工业机器人的特征量。对所有测量项目都要求：①测量范围大；②分辨率或测量精度高；③测量数据多；④测量值的在线采集和处理；⑤实时提供测量结果（对某些研究项目）。

这些要求决定了要用计算机对测量数据自动进行采集和处理。

图 13 示出测量装置和计算装置以及它们的在线连接，正象目前在机器人技术力学实验室所实现的那样。

### 3.3 要解决的测量任务

3.3.1 一个点在空间的实际位置与给定位置的偏差 工业机器人位置精度的研究，首先是以解决局部任务的形式来进行的，即求一个点在空间的实际位置与给定位置的偏差<sup>[7]</sup>。

解决测量任务的方案如图 14 所示，测量数据串行输入计算机，这就是说，机器人使该点达到规定位置 1 后，三个正交安装的位移传感器 (2,3,4) 将测量值输入计算机 10。用这种测量可以得出机器人相继达到的多个点。各个传感器由测量位置转换开关 9 来切换，按预先编定的测量时间进行。机器人到

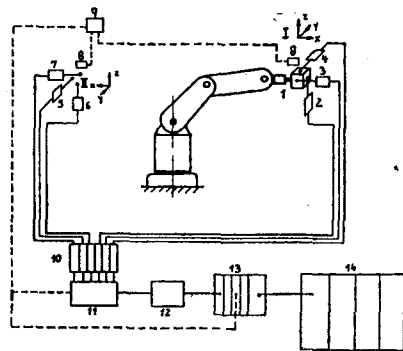


图 14 定位精度的测量

- 1 参考体 2-7 位移传感器 8 接近式起动器 9 门段开关 10 应变片电桥 11 测试台转换开关 12 应变片放大器 13 CAM AC 14 SM4 计算机 I II 规定位置  
——测量值流程 ---控制信号

达规定位置的同时，借助于接近式起动器使用 S11.2 的指示信号触发测量过程。选择合适的测量值以及中止测量，均按程序进行。

紧接着的测量值处理以及图表和统计值的输出，都由程序调用来完成。

3.3.2 一个点在空间的总体运动 由于测取一个物体在空间的运动很复杂，难度大，故在力学实验室作为第一步研制了一个测量系统来解决一个点的问题。此测量系统(图15)连续测量固定在空间的三个观测点和动点之间距离的变化。在这具体情况下，优先选择的方案是将动点和三个安置在空间的固定点之间机械连接起来。用专门的绳索，并将其按规定方式卷成一个卷筒。卷筒的转动用一个增量传感器来离散化。用一个可逆计数器确定长度的变化。为了保证绳索的拉力不变，使用一台转数不变的直流马达；通过流体动力学耦合将转矩传给卷筒。按图15中所给公式计算测量系统和动点

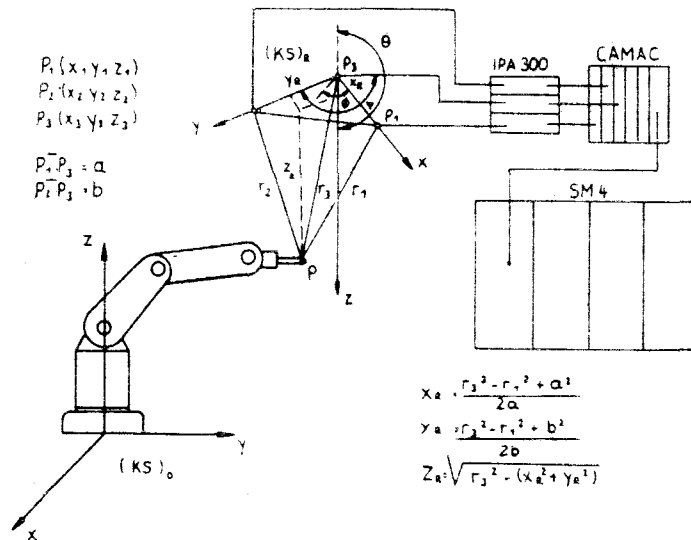


图 15 测量系统技术数据

要研究的空间	2000×2000×2000mm	最大速度	2 m·s <sup>-1</sup>
分辨率	0.0125mm	最大加速度	10m·s <sup>-2</sup>
测量误差	0.2mm	测量值处理	在线

所构成的几何结构。以机器人脚为参考的坐标的换算可通过参考坐标系的移动和转动来实现。

3.3.3 一维和多维力和力矩 从大量一维和多维的力和力矩测量任务中，只举一个例子：工业机器人传动中动态应力的研究。为了了解机器人传动中的动态载荷，使用了试验台(图16)。由驱动马达和齿轮箱组成的传动装置象摆一样借助于测量杆支撑在齿轮箱壳上。为了模拟相应轴的惯性，使用不同的摆动质量。前置齿轮用于减小所需代用质块的尺寸。在传动装置机壳上测得的反作用力矩，就与齿轮箱中作用的应力相对应。

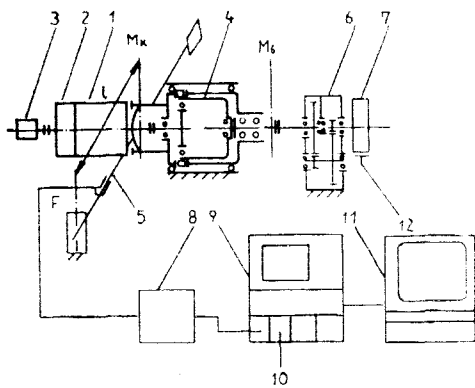


图 16 传动装置的转矩测量

- 1 驱动马达 2 测速发生器 3 IGR 4 渐波齿轮
  - 5 带应变片的测量杆 6 前置齿轮 7 代用质块
  - 8 应变片桥 9 信号形成分析系统 10 控制和测速应力的入口 11 计算机HP9845 12 调节阻尼的摩擦制动器
- $M_M$  马达驱动力矩  $M_R = Fl = M_C + M_M = M_M(i_C + 1)$   
 $M_6$  齿轮驱动力矩  $i_C$  齿轮箱变速比  
 $M_R$  齿轮箱壳上的反力矩

对工业机器人传动装置的研究(在这种试验台上进行的)表明，通过改变运动过程有可能使动态应力降低40%<sup>[80]</sup>。

3.3.4 工业机器人的振动研究 一台机器人的振动情况同位置有关，即同结构有关。换句话说，振动的特征频率和特征形状同q有



关。在设计和进行实验研究时应考虑到此种情况。

机器人自由振动的理论和实验研究，对工业机器人另外还有一层意义：它能说明机器人在停机时的超调。振荡的幅度和衰减时间对加工过程有不良影响，因此应将其降低（增大阻尼，适当的制动性能）。

为了实现以上测量任务，使用了图17所示试验结构。此试验结构保证振幅-频率响应特性和相位-频率响应特性的测定是全自动的。电动激励器3对机器人的激励，是计算机12通过CAM AC系统11，编程单元10和信号发生器9预先规定的。调节器8保证以近于不变的力来进行激励，此力的大小由压力计2控制。在几个规定测点上的振幅，将用3-D压电传感器1通过积分放大器5来测量。在激励器调整到稳定状态后，其激励频率为计算机预先所给定，这时积分放大器的信号，通过测量台转换开关6串行传送

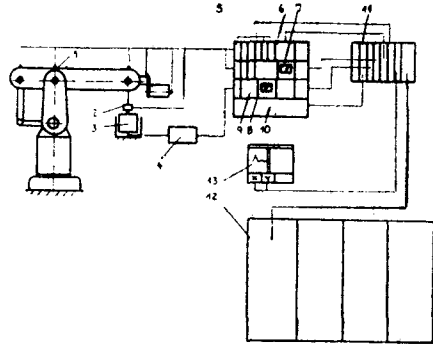


图 17 振动研究

- 1 3-D压电传感器 2 压力计 3 电动激励器  
4 功率放大器 5 积分放大器 6 测量位置转换开关  
7 显示部件 8 调节/显示部件 9 信号发生器  
10 编程器 11 CAM AC 12 计算机SM4  
13 x-y记录器

表 1 工业机器人测量任务

序号	测量任务	特征量	对测量范围和测量精度的要求
1	一个物体在空间位置与规定位置的偏差 局部任务：一个点的偏差	同步点的精度 重复精度 位置精度 长时间性能 超调 定向精度	对于物体：用 6-D 测量头 ±2.5mm (移动) ±2° (角度) ±0.011 mm ±0.01° 对于点：用 3-D 测量头
2	测量一个物体在空间的整体运动 局部任务：一个点在空间的运动	工作空间 轨道精度 紧急停机后的行程 同步运行速度 速度 加速度 定向	要测量的空间： 2000×2000×2000 mm $V_{max}=2 \text{ ms}^{-1}$ $b_{max}=10 \text{ ms}^{-2}$ ±0.2 mm
3	测量力和力矩的一个或多个分量	抓力 挤压力  驱动力矩 应力研究	力： 0+1000N ±1N  力矩： 0+1000Nm ±1Nm
4	振动研究	特征频率 振动形式 衰减特性 超调	频率范围 1+120Hz 加速度范围 0+100ms <sup>-2</sup> 振幅范围 0+5mm

到显示部件 7，并作为正的最大振幅输入计算机。相移由并行输入的激励力的振幅和压电传感器的测量信号给出。在输入最后一轮测量值后即终止测量。随后的测量数据处理包括测量数据的规范化以及振幅-频率特性曲线和相位-频率特性曲线的输出<sup>[18]</sup>。

#### 4 新一代机器人的研究

第二代工业机器人用传感器反馈来控制运动从而实现更大的灵活性。关于第三代工业机器人，在文献[18]中有这样的阐述：“只有机器人能够感觉和识别环境的改变并成功地对此作出反应，即在判定过程中，求出在新条件下应如何处理并相应作出计划，进一步提高灵活性才是可能的。对此，需要有完全新型的程序，它不仅能按运动要求行事，而且能按任务要求行事。”

4.1 工业机器人“代”的概念 在民主德国，根据 ZAK“工业机器人”和 MWT 的共同建议，能完成下列任务的工业机器人算作第三代机器人（图18）：①信息采集（编程序、操作、传感器技术）；②信息处理（控制功能、人工智能）。机器人所必需具有的控制功能，在图19中以方框图表示出。在总体方案中，除了轨道控制模块和坐标逆（或正）变换模块外，可以将功能模块分成以下几级<sup>[17]</sup>：轨道产生（TG）；传感器调节器（SR），传感器数据整理（SDA）；第三代机器人的部件。

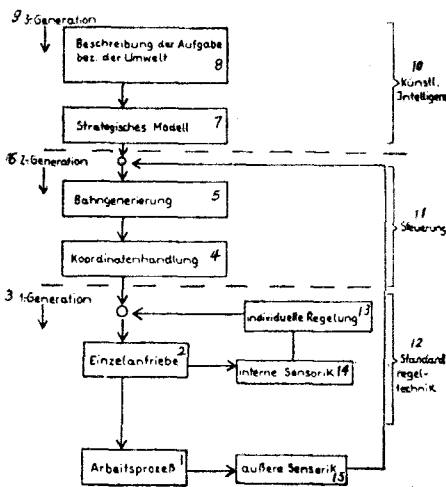


图 18 工业机器人技术中“代”的定义

1 工作过程	9 第三代机器人
2 单独传动	10 人工智能
3 第一代机器人	11 控制
4 坐标处理	12 标准控制技术
5 轨道设计	13 单独控制
6 第二代机器人	14 内传感器
7 战略模型	15 外传感器
8 任务和环境的描述	

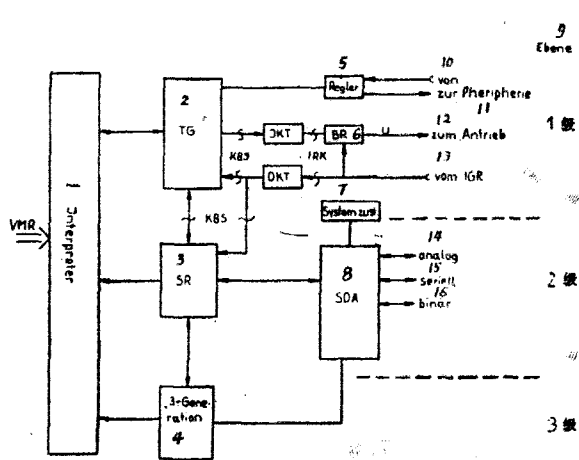


图 19 先进的机器人控制系统

1 转换器	9 级
2 轨道生成	10 来自外部设备
3 传感器调节器	11 送往外部设备
4 第三代机器人	12 到驱动装置
5 控制器	13 来自 IGR
6 轨道控制	14 模拟
7 主管系统	15 串行
8 数据处理	16 二进制

传感器的信号处理在第二级进行。在这一级，传感器调节器（SR）计算出对预先设计的和在 TG 产生的轨迹的修正值，并使这些修正值具体化。传感器数据整理块（SDA）除了完成下述组织任务，如传感器的应答，数据格式转换和给物理地址安排逻辑地址以外，还要有下述算法功能，如实现传感器的校准，特征曲线线性化，滤波。

以下几方面，如机械手的运动学及机械上的灵活度，构件基础，应用范围，则不是划分的特征。

#### 4.2 工业机器人的触觉传感器

4.2.1 概述 对于灵活的自动化来说，在许多应用情况下触觉传感器比其他系统（如光学系统）更为优越，其主要特点是：由触觉传感器提供的信息，可精确地确定抓力大小和位置校正量；更高的速度处理（在极端情况下纯模拟的信号处理）；消耗小，从而能降低成本；适应极端环境条件（例如热，肮脏）。

除了使用主动传感器系统将测量参数提供给工业机器人的控制计算机以便算出控制量以外，也使用被动传感器（自调整系统，RCC 传感器）。

属于触觉传感器的最重要的一类是力-力矩传感器，此外还有接触传感器和滑动传感器。传感器部件的组成一般如图20所示。

对传感器部件有如下要求<sup>[19]</sup>：对要测的信号转换是线性的；灵敏度高；有过载能力；对温度的敏感度低；使用温度范围宽；耐温度变化；耐腐蚀性；可靠性高；结构利于实现（尺寸、重量、安装）；受外界机械干扰和电干扰的损害小；经济性好。

国际上，随着微电路学的日益普及，出现了把传感器和计算处理电路集成在一起的趋势。建立在硅-平面工艺基础上的传感器尤其适合于这种集成化，因为传感器元件和基本电路能在同一工序中制造出来。图21示出了传感器系统的集成级别。

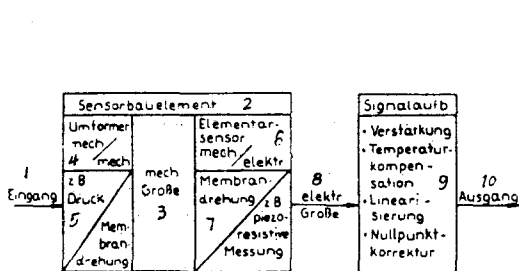


图 20 传感器部件组成简图

- 1 输入
- 2 传感器元件
- 3 机械量
- 4 转换器：机械/机械
- 5 如压力/膜片的转动
- 6 基本传感器：机械/电
- 7 薄膜旋转/如压电阻测量
- 8 电量
- 9 信号整理，放大，温度补偿，线性化，零点校正
- 10 输出

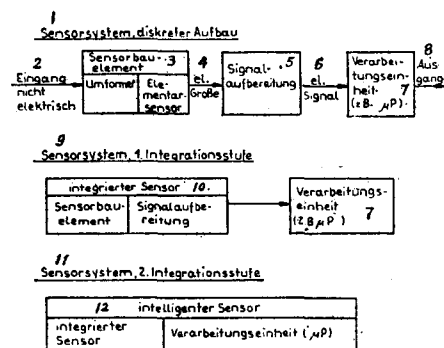


图 21 传感器系统集成级别

- 1 传感器系统，离散结构
- 2 输入，非电
- 3 传感器元件，转换器，基本传感器
- 4 电量
- 5 信号处理
- 6 电信号
- 7 处理单元
- 8 输出
- 9 传感器系统，第一集成级
- 10 集成传感器
- 11 传感器系统，第二集成级
- 12 智能传感器

4.2.2 多分量的力/力矩传感器 在机器人技术领域发展一些力/力矩传感器，利用它们可测定机械手关节上完整的截面量（3个力，3个力矩）<sup>[19-21]</sup>。

在此项发展中，出现了两种力/力矩传感器的原型：一种以电阻应变片（DMS）为基础的力/力矩传感器，其测力和力矩的范围直至 100N 和 20Nm；另一种以感应测量原理为基础的力/力矩传感器，测量力和力矩的范围分成 3 级（300N 到 600N，110Nm）。

后一种情况，不能采用现成的基本传感器，因此特制了所需的频率模拟基本传感器。图 22 示出了其测量值采集和处理的原理。

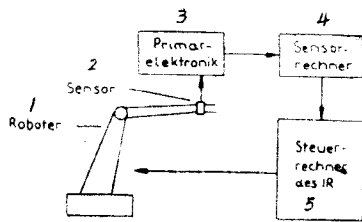


图 22 测量值采集和处理原理

- 1 机器人
- 2 传感器
- 3 基本电路
- 4 传感器计算机
- 5 工业机器人的控制计算机

4.2.2.1 以电阻应变片为基础的力/力矩传感器。当变形体的刚度大时，要获得足够的灵敏度，首先要选用半导体电阻应变片，其次要测取弯曲边缘的应变。

选用了一种弯曲梁结构，以在测量有效区内获得近似一维的变形状态（图23）。

一个基本的选型原则是取对称结构，以便变化量能包含在模拟预处理中。

上下两个星形部分的各四根梁是进行测量用的。四根竖直梁起弹性支撑作用。安装在其中的环防止外应力引起星形部分弯曲梁的倾斜，从而有助于互相解耦。

4.2.2.2 按感应测量原理制作的力/力矩传感器。为已研制成的进行不接触测量的基本传感器设计了测距用的变形体。由于采用频率模拟测量法，不用进行信号预处理，只需用6个基本传感器（最少数目）。为了在各坐标方向获得相同的灵敏度，这些基本传感器相隔120°安装。

图24示出此传感器的结构原理。图上所示基本传感器中的三个测量z方向的移动（标记1），其余3个测量三个与轮毂（标记3）和环固定联结处处切线方向的移动（标记2）。

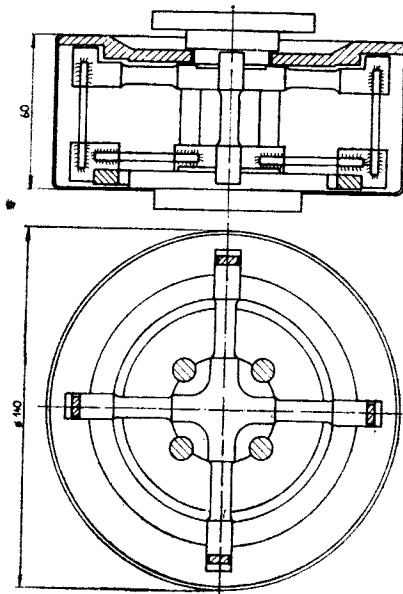


图 23 电阻应变片传感器安装示意图

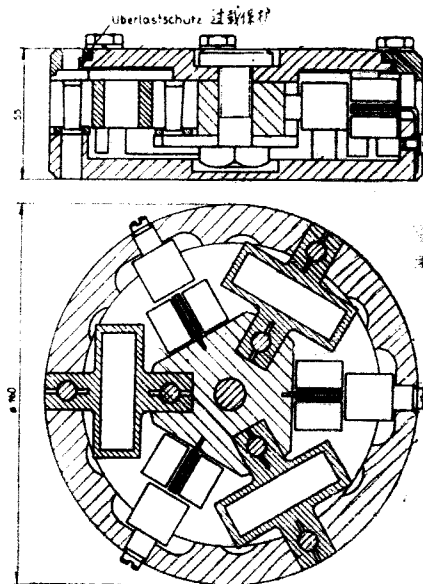


图 24 感应传感器安装示意图

与前述以电阻应变片为基础的变形体相反，在此种传感器布局下，基本传感器与真正变形部分（矩形弹簧）是分开的。

为确定尺寸而进行的变量计算表明，可用适当的方式配置矩形弹簧，保证灵敏度近似相

同。对传感器结构形式的主要要求是，弹簧元件可更换并有超载荷的机械保护。

基本传感器由两个 LC 感应振荡回路组成。贴有磁性瓷片的舌簧的移动产生频率差  $f_1 - f_2 = 300\text{kHz}$ ，此频差是移动的度量，从而也与力的作用成正比。

4.2.2.3 微电子部件。截面量是通过实时求解方程求出的。测量值的采集和截面量的计算是以最小节拍时间节拍式进行的。

与本文提出的问题有关的大量计算任务需要使用以 K1520 为基础的用户系统。研制的软件分成四个主要部分：①测量值的采集；②截面量的求取（算术部分）；③在传感器检验时输出这些截面量；④供机器人控制用的接口操作。

其中③和④两项，对感应传感器和电阻应变片传感器是一样的。

4.2.3 工业机器人技术中触觉传感器的应用 使用机器人加工的场合有：点焊和线焊，磨削和去毛刺，抛光，等等。在对轨道历程不够清楚的情况下，使用外部传感器进行自适应跟踪是不可避免的。在精确进行轨道跟踪前，机器人先要进行搜寻以发现轨道的开端。并按任务不同，使用完全不同的外部传感器。对于那些决定了工件和刀具有接触的过程，采用触觉传感器作力的自适应轨道跟踪是最合适的（磨削，抛光，铣削）。

另一个未来非常重要的使用领域是用工业机器人进行装配工作。

初步使用的情况表明，机器人特别适宜于做象放入、堆叠、插入、推入、有弹性的张开等操作。

利用传感器的信息，就可以知道位置，避免碰撞，在大范围内消除干扰，并调整各装配步骤所用的力，并进行监视。要在装配中有成效地使用传感器技术，重要的是根据具体任务，在主动和被动传感器之间进行折衷选择。图 25 示出力/力矩传感技术的主要应用。

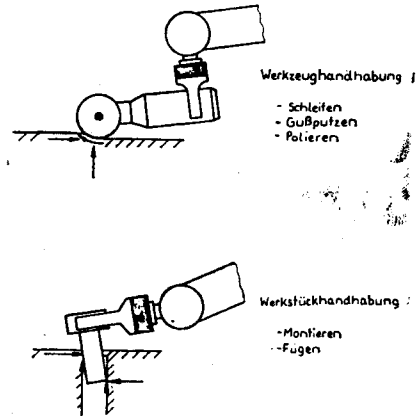


图 25 力/力矩传感器主要使用领域  
1 刀具操作：磨，铸件清理，抛光  
2 刀具操作：装配，连接

4.3 运动的最优化，离线编程的一个部分 工业上使用机械手时，必须通过机器人控制系统来实现抓夹动作，要求其具有速度高（周期短），轨道跟踪精确和终端定位精度高等特点，因而有必要研制机械手的动态控制系统。借助于最优控制策略可以得出相应的指令输入量。这样就有可能考虑对于要实现的动作提出附加的品质要求（例如能量消耗和时间消耗最小）<sup>[22-24]</sup>。

4.3.1 最优控制问题的数学表达 轨道的最优控制问题的数学表达，要求以下几方面能用公式来描写：

①工艺任务的提出：

$$\left. \begin{aligned} q(t^A) &= q^A, \quad q(t^E) = q^E && \text{边界条件} \\ \dot{q}(t^A) &= \dot{q}^A, \quad \dot{q}(t^E) = \dot{q}^E && \text{(一般情况, } \dot{q}^A = \dot{q}^E = 0) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

(对于点跟踪)

$$h_i^k(q_1^i, \dots, q_n^i) = 0, \quad k = 1, \dots, n \quad \text{对于姿态量的等式} \quad (8)$$

(对于轨道跟踪)

$$h^k(q_1(t), \dots, q_n(t)) = 0, \quad k = 1, \dots, n-1, \quad t \in [t^A, t^E] \quad (9)$$

②机械手的动力学模型:

$$M_D : \mathbf{A}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{Q}, \quad t \in [t^A, t^E] \quad \text{微分附加条件} \quad (10)$$

③对传动和运动的限制条件 (结构上的, 几何的, 运动学的和动力学的):

$$g_s(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t), \mathbf{Q}(t)) \leq 0 \quad \text{对状态参数和控制} \quad (11)$$

$$s = 1, \dots, s; \quad t \in [t^A, t^E] \quad \text{参数的不等式限制条件}$$

④对所规划的运动的品质要求:

$$J[\mathbf{q}(t), \mathbf{Q}(t)] = \int_{t^A}^{t^E} L[\mathbf{q}(t), \mathbf{Q}(t)] dt \quad \text{最优判据} \quad (12)$$

**最优控制问题是:** 在满足附加条件 (7) — (11) 的所有运动  $\{\mathbf{q}(t), \mathbf{Q}(t)\}$  中, 找出那个使最优判据 (12) 取最小值的解:

$$J[\mathbf{q}^*(t), \mathbf{Q}^*(t)] = \min_{\mathbf{q}, \mathbf{Q}} J[\mathbf{q}(t), \mathbf{Q}(t)] \quad (13)$$

$\mathbf{q}^*(t)$  表示**最优轨道**,  $\mathbf{Q}^*(t)$  表示**最优控制作用**。

由于微分附加条件 (10) 和限制条件 (8), (9), (11) 的非线性, 最优控制的解一般不能以封闭形式或者作为反馈定律来给出。所求的解同边界条件 (7) 有关, 因而必须对每个使用情况作为**时间平面上的控制作用**的数值解出。因此, 用已知方法 (例如 Pontrjagin 的极大值原理, Bellman 最优原理) 求得最优控制问题的解并得出相应在线计算控制量的算法。然而, 这方法即使能实现, 在经济上也是难以承受的。

4.3.2 最优控制问题的变换 特殊的最优控制问题 (13) 同一般的最优控制问题相比有以下优点:

①初始条件和终端条件是固定的 (两点边界值问题):

$$\mathbf{q}(t^A) = \mathbf{q}^A, \quad \mathbf{q}(t^E) = \mathbf{q}^E, \quad \dot{\mathbf{q}}(t^A) = \dot{\mathbf{q}}(t^E) = 0$$

②微分附加条件 (10) 对控制量是显式可解的:

$$\mathbf{Q}(t) = \mathbf{A}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$$

③可通过选择独立矢量  $\mathbf{x}^T = (x_1, \dots, x_n)$ ,  $\mathbf{u}^T = (u_1, \dots, u_{n^*})$  ( $n^* \leq n$ ) 使等式约束限制条件 (8), (9) 自动满足 (例如轨道跟踪时的轨道参数  $\mathbf{x}$ )。

应用特殊形式 Ritz 尝试式

$$x(\tau) = \varphi_0(\tau) + \sum_{k=1}^n \alpha_k^T \varphi_k(\tau) \stackrel{\text{def}}{=} x[\alpha] \quad (14)$$

其中  $\varphi_0(\tau) \in x[x^0, x^1]$ ,  $\{\varphi_k(\tau)\}$  为  $x[0, 1]$  的基本函数 ( $k = 1, N$ )。将最优控制问题参数化 [23-25], 即可将最优控制问题 (13) 化为一个涉及  $(N \times n^* + 1)$  个自由参数  $\{z, \alpha_{kj}, k = 1, N; j = 1, n^*\}$  的**有限维最优问题**。由于特殊 Ritz 尝试式 (14), 函数  $x(\tau)$  自动满足边界条件 (7)。

参数最优问题是说：寻求最优参数

$$\{z^*, \alpha_{kj}\}_{\substack{k=1, N \\ j=1, n^*}} \in R^{N \times n^* + 1} \quad (15)$$

使函数  $\phi[z, \alpha] \stackrel{\text{def}}{=} L, x[\alpha]$  取最小值，并满足限制条件  $G[z, \alpha] \stackrel{\text{def}}{=} G, x[\alpha]$ 。

### 4.3.3 程序系统

4.3.3.1 程序系统 OPTIM。在 EDVA BESM 6 上研制的程序系统 OPTIM，是用来计算工业机器人（结构为 DSS, DDS 和 DDD(ZIM)）及其子系统的最优点控制问题的。OPTIM 含有若干可置换的子程序，它们用于：①使参数最优化；②考虑限制条件；③计算近似函数和最优判据，还含有实现输入和输出操作的模块。文献[26]详细介绍了此程序系统 OPTIM。

4.3.3.2 程序系统 CFOPTI。为了求出工业机器人在最佳轨道跟踪问题中的运动过程，在 EDVA BESM 6 上实现了程序系统 CFOPTI。本程序是为 DSS, DDS, DDD(ZIM) 结构的工业机器人及其子系统研制的。组织程序 CFOPTI 同可交换的子程序有关，这些子程序用于：①使参数最佳化；②考虑限制条件；③计算近似函数和最优判据等，并同进行输入和输出操作的模块联系。

本程序系统是为给定轨道情况用的，这些轨道是由下列曲线，更确切地说由这些曲线段所定义的：①直线；②圆；③椭圆；④双曲线；⑤抛物线以及⑥由圆和直线段组成的斜率连续变化的轨道。这些给定轨道仅通过一定数目的点输入。

本程序系统在文献[27]中有详细介绍。

4.3.3.3 程序包 BASBIR。采用程序包 BASBIR（工业机器人实际运动轨道的生成和仿真），已在 EDVA SM4-10 上对结构 DSS, DDD(ZIM) 的最优点控制、点和轨道跟踪等任务实现了投影法，并将其推广，使其包括在有 E 驱动装置的动力学模型的情况下仿真实际运动的模块。

用 BASBIR 得到了一个易于为用户使用的程序包，数据输入减到只提出任务，而且数据输入以及程序流程的控制（结构、限制、任务类型、记录等）都以对话方式实现。此程序包 BASBIR 在文献[29]中有详细介绍。

## 5 结 语

同工业机器人应用有关的开发工作，主要是在以下三个方面：①工件的操作；②操作工件和刀具加工；③装配。

为此必要的前提是：①一个工作足够可靠的机械手，它具有较高的活动能力，同时还要有较高的定位精度；②一个用于先进的工业机器人控制的模块化的函数系统，它能充分地描述机械系统、控制和调节之间的相互作用；③能检测出变化的工艺边界条件的外部传感器系统。

## 参 考 文 献 (31篇, 略)

李素琴译自：民主德国科学院力学研究所报告 R-MECH-03/86  
(1986)。(王长龙校)