

变参数控制系统 自动机械手随动系统

Г. С. 契尔纳鲁茨基等著
姚琼荟译 张盖凡审校

重庆大学出版社

变参数控制系统

自动机械手随动系统

Г.С.契尔纳鲁茨基 等著

姚琼荃 译

张盖凡 审校

重庆大学出版社

**СЛЕДЯЩИЕ СИСТЕМЫ
АВТОМАТИЧЕСКИХ
МАНИПУЛЯТОРОВ**

Г. С. ЧЕРНОРУЦКИЙ

А. П. СИБРИН

В. С. ЖАБРЕЕВ

МОСКВА "НАУКА"

ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1987

*

**变参数控制系统
自动机械手随动系统**

Г. С. 契尔纳鲁茨基 等著

姚琼荃 译

责任编辑 曾令维

*

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆大学印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/32 印张: 10.5 字数: 236 千

1992年7月第1版

1992年7月第1次印刷

印数: 1—2000

标准书号: ISBN 7-5624-0535-2 定 价: 6.60 元

TP·34

(川)新登字020号

译者的话

我在前苏联访问期间,柯弗钦教授(С.А.Ковчин)以此书相赠。回国后,我希望将前苏联的科技信息介绍给国内同行,遂将此书译为中文。

本书原名《自动机械手随动系统》。著者将多年来研究机器人技术系统的经验,以自动控制理论的形式表达出来。实际上,这是一本研究变参数系统的控制理论书籍。因此,在出版中文本时,在书名前加上《变参数控制系统》,以便一目了然。

译文改正了原书中一些明显的笔误,有些地方作了注明。

在译书过程中,得到张盖凡教授的热情鼓励和悉心指导,他对译稿全文进行了认真审查和校对,在此深表谢忱。孙才新教授、王大华教授、徐葆正副教授给了我大力支持,在此谨致谢意。

译文中不当和疏漏之处,在所难免,敬请国内同行批评指正。

译者

1991.12.武汉

前 言

本书介绍了参数值制约性不好的自动调节系统的理论，适用于自动机械手装置和机器人的执行随动系统。

研究实际的机械手执行随动系统的实践说明，参数变化往往引起系统动态指标从根本上发生质变，直至丧失稳定性。本书包含有设计执行随动系统动态性质的一些方法，使我们能够计算系统的稳定性和过渡过程品质，并顾及到一组选好的参数的不确定性。书中指出，象这样的系统，其动态性质及品质估计（稳定性，稳定储备，平方积分估计，阻尼系数，振荡频率，过渡过程时间等等），只能用统计方法来表征。此时，可以确定从动态特性散布程度的观点来看所允许的参数最大变动。在许多情况下，有可能综合校正装置，使参数变动的的影响变得最小。研究工作的依据是：古典调节理论的方法，状态空间和模态控制法，非线性和随机规划法，应用电子计算机的数值解法，非线性滤波法。

所提供的资料是多年来制作自动机械手的研究成果，而且在作者看来，这些资料是对现有的大量随动系统文献的补充。

第一章研究了机械手执行随动系统的直接综合法。该方法利用系统的状态空间描述，使我们能够确定校正装置的参数，以保证按要求配置闭环系统特征方程的根。系统的综合是靠引进硬反馈或者引进合理的扩展系统状态空间的校正滤波器来得以实现的。在所推荐的方法的范围内还研究了用非

线性规划问题来进行系统综合，该方法求解综合问题具有一般性，并提供了计算多变量系统动态品质的可能性，这一情况在研究机械手机器人执行系统的动态品质时，具有特别的意义，因为系统可以看作是通过控制对象在某种程度上相互作用的一些随动系统的复合体，还研究了综合的例子。

第二章旨在计算机械手机器人执行随动系统，并考虑了参数的随机性，把系统品质的概率估计当作随机参数的函数进行了研究。用系统品质指标范围和随机参数分布函数已知的特征方程的根分布相吻合的办法确定了系统动态特性的概率性质，用频率法确定了系统稳定性和品质的概率特性，介绍了按米哈依诺夫曲线方差决定系统品质指标方差的方法，引入了分析非线性随机拟平稳随动系统的方法，在顾及到系统的线性和非线性部分中参数的随机性的同时，提供了计算系统绝对稳定性的方法，建议了作诺谟图来确定随动系统动态性质的方法。

在第三章中，研究了具有多个非线性的控制系统辨识方法。这些非线性以任意方式加到控制系统的回路之中，该方法允许作出等效系统的有序结构图。本章指出了估计周期运动参数的可能性，也指出了在输入信号不同幅值之下按频率特性估计闭环随动系统品质特性的可能性，对系统静特性参数随机性的考虑（不灵敏区，限幅，滞环宽度，陡峭性），使我们可以确定自激振荡可能参数的区域以及随动系统谐波线性化频率特性的散布情况。研究了应用上述方法的例子。

在第四章中，包含有根据马尔柯夫非线性滤波法求解综合执行随动系统和状态估计器问题的内容。这些方法的应用，受到下述因素的制约：现代机器人装备有感觉系统，它包含非线性一次变送器（传感器），形成了复杂的调制信

号；干摩擦，存在弹性联系，干扰和噪声造成了信号本质上失真；在控制理论的古典提法中，综合有干扰的非线性系统是困难的。所以随机过程的估计理论得以发展，适用于闭环随动系统的综合问题。经过修改的非线性滤波方程，使我们能够综合随动系统的前向通路。应用马尔柯夫非线性滤波理论综合机电随动系统的状态估计装置，使我们能够得到具有感应式角度传感器的装置的最优结构图。

著书的工作按如下方式分配：前言、引论、第一章的 § 1.1—1.3 以及 1.5—1.8、第二章的 § 2.1—2.8 由 Г.С. 契尔纳鲁茨基撰写，第三章（不包括 § 3.6）由 А.П. 西伯林撰写，第四章（不包括 § 4.4）由 В.С. 查伯涅耶夫撰写，§ 1.4 由 Г.С. 契尔纳鲁茨基和 А.П. 肖斯达柯夫撰写，§ 2.9 由 Г.С. 契尔纳鲁茨基、А.П. 肖斯达柯夫及 А.А. 阿赫马托夫撰写，§ 2.10 由 Г.С. 契尔纳鲁茨基、А.П. 肖斯达柯夫及 А.В. 罗瓦谢洛夫撰写，§ 3.6 由 М.Н. 乌斯狄戈夫及 В.А. 帕拉西奇撰写，§ 4.4 由 С.Г. 巴雷金撰写。

著者向 П.Д. 克鲁吉柯教授和 Ф.С. 彼得诺夫编辑深表谢忱，感谢他们提出了宝贵意见，使得本书的内容和阐述方法从根本上得到改善。

著者

内 容 提 要

本书研究了参数制约性不好（随机参数）的自动机械手随动系统的分析和综合问题。对机械手随动系统的研究，以一类拟平稳随机系统为依据，着重注意了按直接品质指标进行系统综合。介绍了具有多个非线性的系统辨识方法，它使我们能够把非线性系统的结构变换为有序形式。研究了以非线性滤波理论为基础的在干扰存在条件下综合随动系统的方法。本书反映了应用电子计算机对机械手随动系统进行分析 and 综合的问题。

目 录

前言.....	(I)
引论.....	(1)
第一章 机械手执行随动系统的直接综合法.....	(9)
§ 1.1 控制系统状态空间.....	(9)
§ 1.2 数学规划方法的应用.....	(15)
§ 1.3 执行随动系统的直接综合法问题的提出.....	(23)
§ 1.4 在系统综合时非线性方程的求解.....	(28)
§ 1.5 随动系统的多准则综合.....	(32)
§ 1.6 推导状态方程的例子.....	(40)
§ 1.7 综合随动系统希望的米哈依诺夫函数的根方法.....	(53)
§ 1.8 关于多交联机械手执行随动系统的计算.....	(57)
第二章 随机拟平稳机械手随动系统动态性质的 确定.....	(63)
§ 2.1 研究方法基础.....	(63)
§ 2.2 确定动态性质的根方法.....	(69)
§ 2.3 拟平稳随机系统品质的平方积分估计.....	(77)
§ 2.4 在状态参数空间中系统动态品质指标概率的 确定.....	(84)
§ 2.5 在非线性系统中产生自激振荡的概率的确定.....	(89)
§ 2.6 分析随机拟平稳系统的频率法.....	(98)
§ 2.7 随机拟平稳随动系统的绝对稳定性.....	(124)
§ 2.8 米哈依诺夫曲线方差的确定.....	(135)
§ 2.9 在电子计算机上计算米哈依诺夫函数方差的 算法.....	(143)

§ 2.10 用蒙特-卡诺法计算拟 平 稳随动系统.....	(170)
第三章 机械手谐波线性化随动系统的辨识 与分析.....	(185)
§ 3.1 谐波线性化随动系统的辨识.....	(185)
§ 3.2 谐波线性化随动系统的结构变换.....	(207)
§ 3.3 具有多个非线性的控制系统周期解的分析.....	(227)
§ 3.4 闭环非线性控制系统的频率特性及校正装置 的综合.....	(234)
§ 3.5 具有多个非线性的随机拟平稳系统的分析.....	(242)
§ 3.6 动态系统的频域参数辨识.....	(254)
第四章 马尔柯夫非线性滤波方法在设计执行 随动系中的应用.....	(259)
§ 4.1 在干扰存在的条件下机械手执行随动系统 的综合问题.....	(259)
§ 4.2 根据马尔柯夫非线性滤波理论综合闭环 随动系统的方法.....	(264)
§ 4.3 最优机电随动系统的综合.....	(276)
§ 4.4 用来估计运动参数的装置的综合.....	(289)
文献目录.....	(311)

引 论

目前,在设计自动机械手和机器人执行随动系统时,愈来愈广泛地采用了数值计算方法,而数值计算方法又广泛地应用了电子计算机(EBM),用计算机可以算得极快极准,计算机记忆大量的信息,自动实现必要的逻辑计算序列,在研制复杂的现代自动控制系统(CAY)时,人们不得不花费大量机时来研究不同工作方式和不同环境(有时是随机的)下的要求。然而在这里,必须牢牢记住,计算机不适合于提出问题和解决问题,只不过能对不同的方案进行研究和计算而已。一般说来,建立控制系统,往往存在许多方案,自动控制系统工作的条件又是千差万别,最后还有,建立系统应当满足的准则,存在有好多种,它们不一致,常常还是相互矛盾的。但幸运的是,建立类似系统的实际经验,还有系统研制者的洞察力乃是设计时最为重要的因素,这些东西允许我们顺利求解提出的问题,包括选定总体方案,确定品质准则,提出工作条件。在这一工作阶段,应用电子计算机有助于深刻理解系统的研制工作。

调节系统参数综合的含义是,用专门加入校正装置的办法保证给定的系统指标。校正装置的参数应当合理地确定,而后在安装实际系统时予以校准。校正装置的计算和选择是相当复杂的问题,这是由于它的解不是单值的,因为必须考虑各种各样的,有时是互相矛盾的要求和限制条件。按作用原理来说,任一校正装置都是指定来改变系统的潜性质,在一个别情况下,它是超低频滤波器,可以作成为线性回路,非

线性回路或离散滤波器，校正装置可以用电气的、电磁的、机械的、气动的、液压的和其它元件或它们的组合来实现。电气元件最为风行，这是因为结构简单，回路调整较容易，而且稳定性好。电气回路是由电阻、电容（RC电路）与电压放大器组合而成的有源网络构成。这里研究的直流校正回路更为普遍，交流校正回路，不大通用，应用得颇少。

现有的一些选择自动控制系统校正的方法，依赖于系统的幅相特性。这些方法物理意义是深刻的，对工程计算是方便的，但不够精确，因为这些方法是面向间接性能指标的方法。这些方法使我们计算有给定结构和固定参数值的自动控制系统的动态性质。

然而，设计和调整机械手机器人的随动系统的经验说明，执行电动机的工作是在带负载的条件下进行的，负载按机器人外形变化的程度作急剧变化。此外，在动态工作方式中，由于机械手各环节的相互影响，负载的惯性分量也发生极大的变化。系统参数的变动，比方说，也可能是在加工和筛选时把自动控制系统的实际元件的特性偶尔弄乱了的的结果。物理参数往往由于不可控制的周围条件，象时间、温度、湿度、振动、放射性及类似的东西的作用而发生缓慢变动。尤其困难的是足够精确地确定线性化系数值，因为这些系数取决于调节对象的随机工作方式。

液压随动系统很普遍地用来作为机械手装置的执行传动机构。通常，这些系统的参数，本质上就具有不确定性，这是由于在温度、工作时间、工质污染程度等发生变化时，油的粘度会发生变化。在所有这些情况下，参数的数值变化与系统过渡过程相比，进行得相当慢。机械手机器人技术系统（图0.1）规定操作人员直接参与系统的闭合回路，在作系统计

算时，考虑参数制约性不好具有特别的意义。预报操作人员的行为必须用一些和描述控制对象 $W_o(s)$ 的作用并行不悖的方法来进行，就是说，要把操作员当作系统组成部分对其动态性质进行仿真并预报其行为，往往便产生了一个很自然的问题，即从技术设计观点来看，以足够精度预言操作人员和机械的行为的可能性问题。对于定量的仿真而言，人的行为不是太纷繁复杂了吗？的确如此，实验证明，操作人员的典

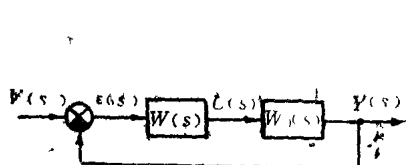


图0.1

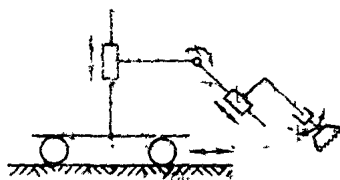


图0.2

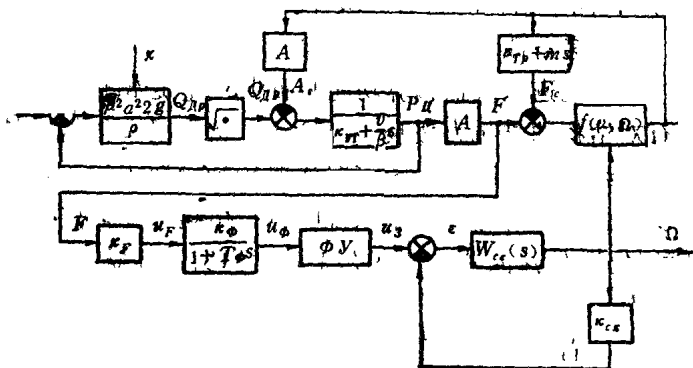


图0.3

型传递函数 $W(s)$ 形如(99),

$$W(s) = \frac{K(1+sT_2)e^{-\tau s}}{(1+sT_1)(1+sT_3)}$$

式中, $\tau \approx 0.2s$, $T_1 \approx 10s$, $T_2 \approx 0.5s$, $T_3 \approx 0.1s$, $K \approx 2 \div 100$ 。
上述时间系数的数值取决于人的状态，并可能从根本上发生

变化。

矿山开采中的钻孔机器人技术控制系统，似乎可当作一个最典型的例子，来说明有必要考虑一组选好的参数的不确定性，我们稍微详细地对它加以研究。自适应机器人〔103, 107, 108〕预定用来作钻井之用，岩石的情况是不完全确定并会随机变化的，机器人要适应岩石的情况。机器人自动地建立起工具的轴向力和转速，以达到最优的探井掘进方式，包括深钻作业，深钻作业对于钻头是最复杂危险的事。机器人具有旋转—移进机构(图0.2)。液压动力活塞的轴向力平稳调节是靠液压系统实现的。钻头转速调节由随动系统的执行电动机来进行。系统结构图示于图0.3。机器人技术系统利用传递系数为 κ_F 输出信号为 u_F 的压力传感器，根据建立起来的轴向压力 F ，测量钻探时岩石对破坏的抵抗力， u_F 加到低频滤波器上，其传递系数为 κ_ϕ ，时间常数为 T_ϕ ，输出电压为 u_ϕ 。接下去，信号便进入模拟解算功能装置 ΦY ，它送出信号 u_3 ， u_3 与岩石对钻探的抵抗力成反比。这个 u_3 信号用来作为控制随动系统的给定值，随动系统前向通路传递函数为 $W_{cs}(s)$ ，速度反馈传递系数为 κ_{cs} 。随动系统的执行电机保证钻探工具有必要的转速，转速的建立要适合于岩石的钻探性质，并按照功能装置 ΦY 给定的双曲线规律合理地工作。这种情况与最优钻探方式，满意的钻头强度以及在具有不同物理力学性质的岩石中稳定（无颤动）地工作是相适应的。钻孔速度 v 由非线性随机函数关系或 $f(v, \Omega)$ 决定，依赖于凿岩机转速 Ω ，依赖于移动油缸在掌子面上的作用力，以及对移进的阻力 F_c ，而 F_c 自身又依赖于摩擦系数 κ_{Tp} 和移进系统带来的质量 m 。

作用在掌子面上的力由活塞面积 A 和液压传动油缸中的

压力 P_H 决定。 P_H 依赖于掘进速度 v , 规定的流量 A_v , 被压缩液体的体积 V , 泄漏系数 $\kappa_{T\tau}$ 和工作液体的压缩系数 β 。流量 $Q_{\Delta p}$ 取决于输油干线上的压力 p 和油缸中的压力 p_H 的压差, 流量系数 μ , 重力加速度 g , 工作液体比重 ρ 及油门通道流通截面积 a , 后者是油门注射泵位移 x 的函数。

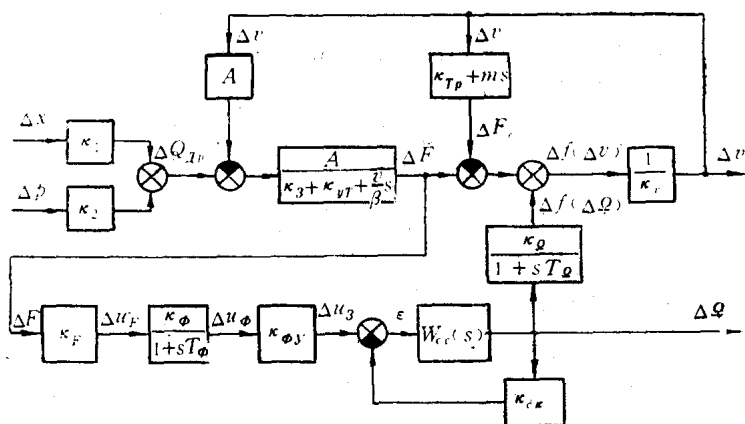


图 0.4

可以指出, 将系统(图0.3)中存在的非线性关系展为台劳级数, 并略去二阶和更高阶的项, 就可得到线性化控制系统, 其结构图示于图0.4。线性化在工作点进行, 其坐标为 v_0, Ω_0, x_0, p_0 , 它们是所建立的钻探方式——钻井速度, 工具转速, 油门注射泵位置, 油缸中的压力。对上述坐标的对应偏差表为 $\Delta v, \Delta \Omega, \Delta x, \Delta p$ 。此外, 还表示: ΔF ——油缸压力偏差, 其分量为 $\Delta F_0, \Delta f(\Delta v)$; $\Delta Q_{\Delta p}$ ——油门流量偏差; Δu_F ——压力传感器输出信号偏差; Δu_4 ——滤波器输出信号偏差; Δu_3 ——随动系统给定信号偏差; $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ ——相应的系数; T_Q ——时间常数。

所介绍的系统含有象线性化系数 $\kappa_v = |\partial f / \partial v|$ 和 $\kappa_\Omega = |\partial f / \partial \Omega|$ 这样一些随机参数，它们相应表征在钻孔速度 v 和凿岩机转速 Ω 变化时岩石抵抗力的变化。根据各种岩石现有实验资料〔83〕，这些系数是随机的，其变动范围对 κ_v 而言大到40倍，对于 κ_Ω 而言大到160倍，当由一种岩石转到另一种岩石时，这些系数的变化又非常缓慢。

往后的叙述将涉及到范围相当宽的一类具有随机参数的动态平稳系统，同时也涉及到其参数在时间上随机变化，但与迅速进行的过渡过程相比却极其缓慢的系统。注意，恰恰是这些方式适合于许多机器人技术系统。

由于上述限制，有可能简化问题的数学表达式，与已知的旨在研究非平稳随机系统的文献相比，有可能从根本上简化具有随机参数的系统运动稳定性及品质指标的分析。

在所研究的一类（拟）平稳随机控制系统中，其结构不变，计算方法统一，可以根据造成动态性质随机变动的原因挑出几类系统。

第一类。一些相同系统的群体，其参数值在元件制造、挑选和保存中由于工艺原因是随机的，但在系统工作期间实际上是不变化的。象这样的一些系统，其动态性质是按群体随机的，就是说，从一个样机到另一个样机，从一种产品到另一种产品都有变化。

第二类。有些系统，合闸接通之前，它们就有某些参数是偶然选定的。例如机器人安装零件，零件质量的大小取决于偶然的需要，但是，在系统工作时间内，其参数实际上保持不变。象这样一些系统的动态性质按合闸是随机的，即对于不同的工作周期是随机的。

第三类。有些系统，在工作过程中，在事先没有确定的

瞬时，其参数值跳变到任意随机量。在比过渡过程时间大得多的时间间隔上，在运动参数的两个跳变之间，自动控制系统用常系数线性微分方程描述。

第四类。非本质非线性的线性化机器人技术系统，其动态特性按其与工作点坐标的小偏差来确定。工作点在自动控制系统元件的静特性上的位置要么可能作跳跃变化，要么当实验证明过程（拟）平稳性的假设是正确时，作比较缓慢的变化。这样一些系统的动态性质按状态向量坐标和按系统群体是随机的。这样的情况是非常普遍的。

第五类。有些系统，其参数在时间上的变化慢得实际上不影响过渡过程。然而，在足够大的时间间隔内，动态性质会有本质的变化。

在考虑参数的随机性时，元件微分方程不化成描述典型动态环节运动所普遍采用的规范型式，往往是合适的。

的确是这样，对一机械回路，利用传递函数的非规范写法

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{ms^2 + rs + c}$$

式中， Y ——位移的映象， X ——施加的力的映象， m ——质量， r ——机械阻力， c ——弹簧刚度，我们得到一个关系式，其中，所有表征回路的物理参数是相加和分开的。这意味着，它的随机性可以比较容易地加以考虑。若化为传递函数的规范型写法，那么，可得：

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{1 + 2\zeta Ts + T^2 s^2}$$

式中，系数