自适应控制系统的构造与设计原理

〔苏〕
Б.Н.彼得诺夫
В.Ю.鲁特柯夫斯基
И.Н.克鲁托娃
С.Д.泽姆梁柯夫

自适应控制系统的构造与设计原理

〔苏〕 Б.Н.彼得诺夫　В.Ю.鲁特柯夫斯基
И.Н.克鲁托娃　С.Д.泽姆梁柯夫 著

林泽仁　史之群　译

陈忠信　校

国防工业出版社

内容简介

本书是苏联机械制造出版社出版的《飞行器控制系统的设计基础》丛书之一。书中介绍了自适应系统的工作原理和设计方法，分析了从系统总运动中分出适应过程的方法，论述了自适应回路的设计计算与参数选择问题。

书中着重论述了无搜寻自适应系统的设计与构造问题，详细地介绍了具有模型的自适应系统综合的梯度法和李亚普诺夫直接法，研究了具有监督时间特性的无搜寻自适应系统，简要地叙述了在系统中寻找最优脉冲过渡函数的问题。

此外，还介绍了几种在实际中得到广泛应用的能在一定程度上具有适应能力的非自适应系统的构造原则。

本书可供从事自动控制系统设计和制造工作的工程技术人员阅读，也可供高等院校有关专业的教师和学生参考。

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ САМОНАСТРАИВАЮЩИХСЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
Б. Н. Петров В. Ю. Рутковский
И. Н. Крутова С. Д. Земляков
Москва «Машиностроение» 1972

自适应控制系统的构造与设计原理

林泽仁 史之群 译
陈忠[illegible]

国防工业出版社 出版
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 1/32 印张7 1/16 179千字
1982年11月第一版 1982年11月第一次印刷 印数：0,001—6,100册
统一书号：15034·2415 定价：0.90元

前言

随着航空(天)技术的发展和飞行器性能的提高,当控制飞行器飞行时,如果不改变自动驾驶仪的参数,要在飞行器整个飞行高度与速度范围内保证控制的高质量,是很困难的。与此同时,对控制过程的品质,对结构设计的经济性,对缩短控制系统的研制与改进周期,对其规格化等指标,都不断地提出新的、更高的要求。因此,为解决自动控制技术所面临的问题及其发展的需要,五十年代末和六十年代初,在研究自动控制的文献中出现了许多文章,论述无搜寻自适应系统(CHC)的计算方法与构造原理。这类系统恰恰适用于解决飞行过程中参数变化范围很大的飞行器的控制问题。无搜寻自适应控制系统的应用,给自动驾驶仪的设计和制造提供了新的方法。

这样,在实际应用中无搜寻的自适应系统成为一个新的和有价值的重要领域。

目前,人们正加紧解决在控制回路中接入数字计算机(ЦВМ)的问题,例如,将小型专用机载数字计算机(БЦВМ)用于飞行器的控制系统。机载数字计算机的应用大大开拓了采用自适应系统的可能性,因为这在结构上使自适应回路的实现变得容易多了。此外,由于可以利用计算机的记忆装置进行存储和应用各种外推法原理进行计算,从而可以在自适应算法中减少对被调坐标求导数的数量。

书中叙述了无搜寻自适应系统的构造问题。讨论了根据不变性原理对自适应系统主回路进行综合的方法。研究了为构造各种类型自适应系统获取所必需之信息的方法,并论述了具有频率特性信息的无搜寻自适应系统。得到了从系统总的运动中分解出适

应过程的系统分析方法和自适应回路的计算方法。

对具有标准模型的无搜寻自适应系统的论述在书中占有重要位置。书中阐述了有模型的自适应系统综合的梯度法。根据李亚普诺夫直接法详细地研究了具有模型的自适应系统的综合问题。

书中研究了具有监督时间特性的无搜寻自适应系统。简要地叙述了更为完善的，但也更为复杂的系统。在这个系统中寻找最优脉冲过渡函数（ИПФ），并对实际的脉冲过渡函数进行调整，使其成为最优。此外，叙述了能在一定程度上保证系统的运动与对象的非平稳特性无关的非自适应系统的构造原则。

目　录

导　论

当代自动调节理论与实践发展的特点是加强了适应控制方法的研究。适应控制用于动态特性变化范围很宽的对象。当关于系统工作条件的信息不完全时，为了实现给定的要求必须确定系统的某些特性和重新调整调节器的参数或结构。存在根据现时信息得到关于系统工作条件之补充数据的过程，以及在控制过程中应用这些数据，这些成为适应系统的突出特点。

适应系统分为自适应系统与自组织系统。

根据在工作过程中得到的关于外部作用参数、对象或系统动态特性的信息，主动改变调节器的参数，以保证闭环系统工作在某种意义上的最优状态，这种系统称为自适应系统。

自组织系统的特征是存在控制算法的形成过程；该过程不仅与参数的变化有关，而且与寻求使系统最优的调节器结构有关。

与非适应控制相比，应用适应原则能够：

а．实现对象工作状态的最优化；

б．在对象动态性能变化很大的条件下，确保系统的工作能力；

в．提高系统的可靠性，使单个调节器或调节器的组合规格化，并使其适用于同类，但不同型的对象；

г．降低系统的各个组件和元件在制造过程中的工艺要求；

д．缩短系统研制与改进的周期。

自适应系统（CHC）的方块图可表示为如图 B.1[90]所示。图中：P_1——调节器；$\boldsymbol{y}$——被调参数矢量；$\boldsymbol{x}$——系统状态矢量；$\boldsymbol{u}$——输给对象的控制量；$\boldsymbol{g}$——控制作用；$\boldsymbol{f}$——干扰；P_2——在系统工作过程中，为保证矢量$\boldsymbol{y}$或控制量$\boldsymbol{u}$按给定的规律变化而

用来处理信息的装置。

自适应系统的工作原理如下：对系统给定某一品质量度Q，通常它可能是与系统的坐标和参数x、u、g、f、y、t等有关的泛函或函数。在系统工作过程中，品质量度的值随输入控制作用g和干扰作用f的变化，以及对象动态性能的变化而改变。在此条件下，自适应的任务归结为：根据控制矢量u或被重调参数矢量y保证$Q=Q_{min}$。有时要求保证$Q\leqslant Q_{зад}$(给定的品质量度)。就物理意义而言，要求$Q=Q_{min}$或$Q\leqslant Q_{зад}$可以表示发动机以最大效率工作、系统过渡过程的时间最短、系统的动力学特性与对象系数的变化无关、有干扰时均方差最小等等。

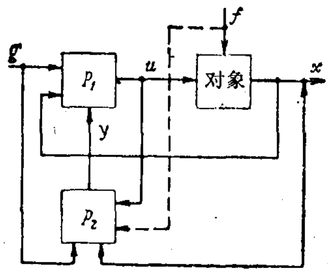

图 B.1　自适应系统方块图

利用搜索过程可找到Q_{min}[90]。对控制矢量u或参数矢量y给以试探性的偏离，评定增量ΔQ，并根据该增量，借助矢量u或y来搜索。用上述搜索过程寻求Q_{min}的自适应系统称为搜寻式自适应系统。

除搜寻式自适应系统外，还有无搜寻类型的自适应系统，其中为实现$Q=Q_{min}$的系统运动过程或保证$Q\leqslant Q_{зад}$不采用搜索过程。在无搜寻自适应系统中采用根据偏差或根据干扰来实现控制的原则。根据输入作用和系统状态的预测和现时信息，计算某个要求的品质量度$Q=Q_{зад}$的值。将$Q_{зад}$值与品质量度的现时值Q相比较，并计算出某一失调量度$\Delta Q=Q_{зад}-Q$。而后根据信息ΔQ改变控制矢量u或参数矢量y，以使失调值ΔQ趋近于零或最小的可能值。这时需要解决两个问题：

a．选择$Q_{зад}$，以实现$Q_{зад}\geqslant Q_{min}$的条件；另一方面，为了保证系统有足够高的工作质量，必须使$Q_{зад}$尽量靠近Q_{min}。这时，在系统中已有的限制条件下，系统的结构原则上应允许获得等式$Q=Q_{зад}$。

6．寻求控制矢量 $\boldsymbol{u}$ 或参数矢量 $\boldsymbol{y}$ 的重调算法，保证 Q 以所要求的动态指标向 $Q_{зад}$ 收敛。

在无搜寻自适应系统中，$Q_{зад}$ 的建立与确定过程可以称为某种标准-模型的寻求过程，根据该标准模型实现实际系统的特性调整。通常标准-模型为一实际的动态环节，它可以是平稳的，或者需要在工作过程中加以调整。在另外一些系统中，标准-模型变成某些不变的或可变的装置。有时标准-模型成为表征自适应系统构造原则的某个参数的标准值。因此，作为建立 $Q_{зад}$ 手段的标准-模型是任何无搜寻自适应系统的固有特点。

没有搜索过程使得无搜寻自适应系统获得的适应过程的速度可与系统中被调坐标之过渡过程的速度相比拟，并保证比在搜寻式自适应系统中具有高得多的适应过程的快速性。从结构设计的观点看，目前无搜寻自适应系统找到了比搜寻式更简单的解决办法。当构造飞行器控制系统时，最重要的是要求快速性、简单、可靠、具有最小的体积和重量，所以无搜寻自适应系统得到了更广泛的应用。

现在我们较详细地研究无搜寻自适应系统的广义方块图（图B.2）。由对象与调节器 P_1 组成的闭环回路称为主回路。向部件1输入全部可应用的信息，而后分配给其它部件。在装置3中，根据来自部件1的信息，确定判据或品质量度 Q 的现时值。借助装置2和4，计算要求的品质量度 $Q_{зад}$。$Q_{зад}$ 的计算过程分成两个阶段，这对许多无搜寻自适应系统具有代表性。在装置2中，根据来自部件1的信息，找寻满足品质量度 $Q_{зад}$ 的某个标准-模型。在装置4中进行 $Q_{зад}$ 的测量。装置5测量失调量 $\Delta Q=Q_{зад}-Q$。最后，装置6根据失调量 ΔQ 与来自部件1的现时信息，产生保证 $Q=Q_{зад}$ 所必需的控制矢量 $\boldsymbol{u}$ 或矢量 $\boldsymbol{y}$ 的变化规律。

由无搜寻自适应系统的广义方块图明显地看到其构造的等级原则。确实，主回路实现第一级控制，它的任务是建立对象调节机构应有的运动规律。第二级控制调节器的参数或结构，其目的

是保证主回路所要求的工作质量指标。适应过程也依赖于外界干扰和主回路的变系数，所以可能有第三级控制，其目的是为了获得自适应过程所要求的品质指标。例如，可能在系统工作过程中实现标准-模型的重新调整、在装置6中调整自适应回路的系数等等。

无搜寻自适应系统的自适应回路可按闭环或开环原则构造。

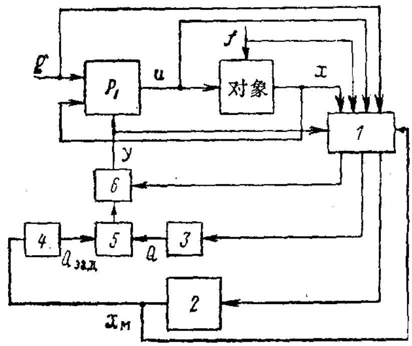

图 B.2 无搜寻自适应系统的广义方块图

在多数情况下，表征系统动态性能的某个数值用作品质量度 Q。根据建立 Q 与 $Q_{зад}$ 判据时所得动态特性的形式，无搜寻自适应系统可分为三类：

a. 具有频率特性信息的自适应系统[5、27、39、40、41、73、74、89、96、110、117、118]；

б. 具有时间特性信息的自适应系统[1、9、21、27、36、59、67、70、76、82、83、100、101、103、109、113]；

в. 具有模型的自适应系统[15、16、17、20、24、29、45、50、105、119、120]。

在第一类里，用对象或整个系统的频率特性作判据 Q，而用标准-模型的频率特性作 $Q_{зад}$，它于事先引入或在装置2的工作过程中得到（见图 B.2）。在特殊情况下，$Q_{зад}$ 可变为某种装置，在某些点上系统频率特性的现时值与它进行比较。

在具有时间特性信息的自适应系统中，选择表征过渡函数或脉冲过渡函数的某些值作品质量度 Q，例如：过渡函数与零线的交点数；展开为正交规范函数级数的系数等等。$Q_{зад}$ 可借助于事先引入的或在装置2中得到的实际标准-模型环节来建立（见图 B.2），或以事先给定的或在工作过程中被调整的装置形式存在。

如果装置 2 是对应于主回路期望特性的动态 环 节——标准-模型，则系统与模型的坐标失调量中有关于系统动态性能偏离模型性能的信息，并可用它来调整参数矢量 y。这样在线路中 就不再需要品质指标 Q 和 $Q_{зал}$ 的测量器（在图 B.2 线路中的装置 3、4)。

在无搜寻自适应系统中，如果控制 u 或参数矢量 y 需根据实际系统运动坐标和必须以实际动态环节形式存在的标准模型运动坐标之间的失调误差予以调节，那么这种无搜寻自适应系统称为具有模型的自适应系统。

无搜寻自适应系统在飞行器控制中的主要功用是当对象的动态特性变化很大时，保证系统工作正常。在一定程度上，非适应系统也能胜任这一任务。目前已知有三类非适应系统，它们在一定范围内能保证系统的动态特性与控制对象的变化特性无关。这三类系统是：

a．具有无限大(实际上足够大) 放大系数的系统[55、69、104]；

б．具有自振状态的系统[6、22、27、46、95]；

в．具有变结构的系统(СПС)[11、79]。

在飞行器控制系统中，上述三类系统在许多情况下给出了良好的结果，所以将其与无搜寻自适应系统同样看待是相宜的。

在具有无限大放大系数的系统中，问题归结为对主回路的结构进行综合，该回路可保证建立无穷大或实际上足够大的放大系数，这时系统的动态特性与非平稳对象的性能无关，或在很小的程度上有关。

具有自振状态系统的特征是向主回路引入专门的非线性，靠它在系统中产生自振。自振参数由对象的参数决定，并随对象参数的变化而改变。随着自振参数的改变，等效复数非线性放大系数也在变化。同时这样综合系统，以便在一定程度上使这一变化补偿对象的变系数对整个闭环系统动态特性的影响。

在具有变结构的系统里（СПС），其动态特性相对于对 象非

平稳性能的独立性借助于形成专门形式的运动——滑动状态来保证。

无搜寻自适应系统通常是变参数非线性系统。自适应系统属于由非线性、非平稳微分方程式所描述之系统，而对这类系统的分析与综合在一般情况下是相当困难的。因此在自适应系统的理论中广泛应用准平稳性假说。根据这一假说认为，自研究的瞬间开始，变系数保持不变。这时系数值具有为给定区域所限的相对某些额定值的事先未知的小偏离值或任意偏离值。在这些条件下，对系统进行综合，以使适应过程在时间间隔T内结束，在该期间内变系数没有显著变化。变系数相对于用不同方式所确定之额定值的偏差通常称为参数干扰。

为了综合与分析无搜寻自适应系统，准平稳性假说允许采用自动控制理论中用于平稳系统的研究方法。

在无搜寻自适应系统的理论中可分为综合方法，即获得能实现适应任务的自适应系统结构的方法，和自适应系统动态特性的分析与计算方法。

综合方法建立在不变性原理和敏感性原理的基础上，不变性原理能保证得到被调坐标运动与参数干扰无关的系统结构。敏感性原理允许找到使参数干扰对系统动态特性影响最小的结构。李亚普诺夫直接法得到了广泛的应用。该方法用于得到保证主回路及适应过程运动稳定的结构。

无搜寻自适应系统动态特性的计算方法建立在线性化原则和线性平稳系统计算方法的应用上，或建立在非线性系统计算方法的应用上。在自适应系统中分解运动的方法得到广泛的应用，即分别研究主回路和自适应回路。在有足够根据能进行分离的系统中，可成功地将问题归结为研究更简单的调节系统。

基于线性化方法的无搜寻自适应系统动态特性的解析分析通常与一系列重要的假设连系在一起。例如，假设相对某些特征状态有小偏差时研究系统的运动；假定参数干扰是慢变化的，而在

一系列情况下系统的某些坐标和外界作用也是慢变化的。

当设计无搜寻自适应系统时，所取之假设是否可行，因而其解析结果是否正确，必须通过数学模拟来检查。

目前，在系统回路中广泛应用带计算机的控制系统的构造原则。在无搜寻自适应系统中应用计算设备，显著地扩大了应用更复杂和更现代化适应算法的可能性，且显著地扩大了自适应系统所解决问题的范围。但是计算机的应用并未明显地改变无搜寻自适应系统的构造原理。因为本书主要是阐述上述系统的构造原理和设计基础，所以关于在系统中应用数字计算机的问题，实际在书中并未涉及。

第一章　无搜寻自适应控制系统中的主回路与信息

1.1　自适应控制系统的某些问题

现在研究由对象与调节器组成的闭环控制系统。系统方程式写成以下形式：

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{g} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{f}, \tag{1.1}$$

式中　$\boldsymbol{x} = (x_1, x_2, \cdots, x_n)$——系统坐标矢量；

$\boldsymbol{g} = (g_1, g_2, \cdots, g_n)$——控制作用矢量；

$\boldsymbol{A}$——元素 a_{ij}（i、$j = 1, 2, \cdots, n$）的 $n \times n$ 方阵，$a_{ij} = a_{ij}(\eta, \xi)$，这里，$\eta$——控制对象参数的集合；$\xi$——调节器参数的集合；

$\boldsymbol{B}$——元素 $b_{\alpha j}$（$\alpha = 1, 2, \cdots, m$）的 $m \times n$ 的矩阵，$b_{\alpha j} = b_{\alpha j}(\eta, \xi)$；

$\boldsymbol{f} = f_1, f_2, \cdots, f_n$——干扰矢量。

对于系统（1.1）的主要控制任务是保证最好地逼近能使控制过程的质量指标达到给定要求的条件。泛函（或函数）作为控制质量的量度，一般情况下可写成以下形式：

$$I = Q(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{g}, t)。 \tag{1.2}$$

如果泛函（1.2）在轨迹 $\boldsymbol{x}^*$ 上达到极小值，则系统的运动为最优

$$Q(\boldsymbol{x}^*, \boldsymbol{g}, t) \leqslant Q(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{g}, t), \tag{1.3}$$

式中　$\boldsymbol{x}^*$——系统运动的最优轨迹。

自调节器输出端至控制对象输入端的最优控制作用u对应于最优轨迹。如果对象的参数η为常值，则最优问题的解为确定调节规律和调节器的参数ξ，以实现对给定作用$g(t)$的最优控制。

当对象的参数η变化时，则情况较复杂。此时最优化问题应包括确定最优调节规律和确定对于给定作用g以及变参数η的最优调整。选出调节器的参数，最优化条件可写成：

$$Q(x^*,\ \xi^*,\ g,\ t)\leqslant Q(x,\ \xi,\ g,\ t), \tag{1.4}$$

式中 ξ^*对应于最优调整的调节器参数。

从条件（1.4）中可分出比较特殊的问题——仅对于控制对象的变参数实现系统运动的最优化，这时最优化条件为：

$$Q(x^0,\ \xi^0,\ g,\ t)\leqslant Q(x,\ \xi,\ g,\ t), \tag{1.5}$$

式中 ξ^0——当η变化时，最优调整的调节器参数。

为了控制调节器的参数，必需给系统引入控制参数作用。这样，我们得到了适应系统。在适应系统中主控制回路将由方程式（1.1）描述，在此方程式中

$$a_{ij}=a_{ij}(\eta,\ \xi(y)), \tag{1.6}$$

式中 $y=(y_1,\ y_2,\ \cdots,\ y_m)$——控制参数作用矢量。

按参数实现系统运动的最优化包括两项任务：1）在控制过程中保证系统中参数的最优比例关系，以实现按参数的最优运动轨迹x^0；2）当在参数空间向最优点运动时，实现控制参数作用y_i（$i=1,\ 2,\ \cdots,\ m$）变化过程的最优化。解决上述两个任务的适应系统的最优化条件，可写成：

$$Q(x^0,\ \xi^0,\ y^*,\ g,\ t)\leqslant Q(x,\ \xi,\ y,\ g,\ t), \tag{1.7}$$

式中 y^*——最优参数作用。

在无搜寻自适应系统里，在控制过程中选择参数的最优化比例关系的问题，不是总能得到解决。为了保证给定的控制质量，应事先确定所必须的参数或特性，并以模型（或装置）的形式提供给系统。在个别情况下，模型可对应于事先确定参数的最优关

系。此时系统要保证满足质量判据的给定值，该值可用条件

$$Q(x, \xi, y, g, t)=Q_0 \tag{1.8a}$$

或条件

$$Q_0' \leqslant Q(x, \xi, y, g, t) \leqslant^{●} Q_0'' \tag{1.8б}$$

来表示，式中，Q_0，Q_0'，Q_0''——给定值。

如果在无搜寻自适应系统中实现控制参数作用的最优化，那么这将对应于条件

$$Q(x, \xi, y^*, g, t)=Q_{0\min} \leqslant Q(x, \xi, y, g, t)。 \tag{1.9}$$

无搜寻自适应系统的任务在于，当参数 a_{ij} 存在偏差时，如果最优问题有解，则改变参数 a_{ij}，以满足条件（1.9），如果无解，则满足条件（1.8a，б）。为了解决无搜寻的自适应问题，可以应用各种不同的原则。

下面将比较详细地讨论考虑到条件（1.8a）时系统参数偏差的补偿问题。这个问题的解法将在以后的章节里，在按照各种不同原则构造的无搜寻自适应系统的实例中加以说明。

假定作用在系统（1.1）主回路的控制作用 $g_i(i=1, 2, \cdots, n)$ 为给定的时间函数 $g_i(t)$，$f=0$ 和给定了系统的工作状态，对于该状态控制对象的全部系数已确定。这时对此状态可以综合控制规律，以满足条件（1.8a）。我们称这种状态为额定状态，而对应这一状态的系统系数值 $a_{ij}(i, j=1, 2, \cdots, n)$ 及系数的矩阵用 $a_{ij}^0(a_{ij}^0=\text{const})$ 和 $\boldsymbol{A}^0$ 表示。

实际上系统的工作状态总是区别于额定状态，而参数 a_{ij} 相对 a_{ij}^0 将有偏差。

这些偏差可能是由装置制造过程中的工艺误差、维护使用中系统参数的变化、外界条件改变时控制对象的特性变化等等因素造成的。因此，应取 $a_{ij}=a_{ij}^0+\Delta a_{ij}(i, j=1, 2, \cdots, n)$，式中，$\Delta a_{ij}$ 为任意值。这时，矩阵 $\boldsymbol{A}$ 可表示成：

● 原文漏掉不等号。——译者