

914158

电力系统状态空间控制

王仁洲 编

能源出版社

电力系统状态空间控制

华北电力学院 王仁洲 编著

能源出版社

电力系统状态空间控制

王仁洲 编 著

能源出版社出版 新华书店经销

北京北七家印刷厂印制

787×1092 1/32开本 11.59印张 243千字

1989年12月第一版 1989年12月第一次印刷

印数1—2,100册

ISBN7—80018—129—4/TB·6 定价：6.50元

内 容 简 介

本书系统地阐述了状态空间控制理论在电力系统线性及非线性控制中的应用。研究线性最优控制及非线性系统分析与控制的理论、方法及实用化措施。

主要内容包括：数学基础，状态空间分析法，线性最优控制原理，状态调节器、输出调节器，电力系统线性最优控制的研究方法，发电机励磁线性最优控制，发电机电气制动的最优时间控制，汽轮发电机组快速汽门的线性最优控制，非线性系统的分析及控制方法，李雅普诺夫直接法，变量——梯度法，克拉索夫斯基法，波波夫法，微分几何非线性控制法，通过相角控制提高电力系统的暂态稳定性，发电机的非线性励磁控制，电力系统稳定的非线性综合控制，二轴机系统的基本理论，二轴机系统李雅普诺夫函数的构成及稳定评价，二轴机系统稳定的非线性控制。

前 言

状态空间控制理论自六十年代以来得到迅速发展，特别是计算机数字仿真技术和微型计算机控制技术的广泛应用，为控制理论在工程技术中的推广应用提供了条件。

状态空间控制理论是以描述状态空间的状态方程为数学工具，采用时域法，研究多变量控制、线性最优控制、非线性最优控制及自适应控制等为其主要内容。已在航海、航空、宇航、机械、化工等领域内得到广泛推广。

由发电机、变压器、高压输电线及用电设备构成的电力系统，要求安全可靠供电，提供优质电能，并且保证经济性。因而迫切需要实现高度自动化、现代化。近年来将现代空间控制理论应用于电力系统引起普遍重视，取得了许多科学研究成果，并迅速转化为生产力。

本书力图把状态空间控制理论与电力系统工程实际紧密地结合起来，力求做到深入浅出，循序渐进，便于自学。全书共分三个部分：第一部分是状态空间控制导论，线性及非线性控制所需要的数学基础，状态空间分析方法，以及在电力系统的应用领域；第二部分是线性最优控制理论及其在电力系统工程实际中的应用，具有二次型性能指标的最优控制，状态调节器，输出调节器，跟踪系统，以及发电机励磁最优控制，电力系统稳定的最优控制等；第三部分是电力系统的非线性控制，主要包括非线性系统的分析与控制方法，如描述函数法，相平面法，微分几何非线性控制法，李雅普诺

夫直接法等，重点讨论了李雅普诺夫直接法在电力系统控制中的应用，例如通过相角控制提高非线性电力系统的暂态稳定性；利用克拉索夫斯基法构成李雅普诺夫函数，研究发电机非线性励磁控制，考虑非线性特性电力系统稳定的综合最优控制等。还讨论了二轴励磁同步发电机系统的非线性控制，推导了二轴机系统的基本方程式，进行了稳态及暂态运行分析，介绍了二轴机电系统李雅普诺夫函数的构成及稳定评价方法，研究二轴机系统稳定的非线性控制方法等。每章均附有一定数量的习题，力求理论联系实际，学以致用。

本书反映了国内外在该领域所取得的先进科学技术成果，也反映了作者近年来教学及科学研究的成果。书中的主要章节作为本院电力系统及其自动化专业研究生的选修课曾多次讲授过。本书除供给电力系统及其自动化专业研究生作为选修课教材外，还可供给大专院校有关专业的教师、高年级学生作为参考书，供给从事发电厂、电力系统自动化工作的科研人员、工程技术人员作为参考书。

在本书的编写过程中及进行电力系统线性、非线性最优控制课题的研究过程中，经常得到华北电力学院杨以涵教授及日本国大阪府立大学谷口经雄教授、新潟大学具津弘幸副教授的指导与帮助，在此一并表示衷心地感谢。

由于作者水平有限，书中难免有不妥之处，诚请读者批评指正。

作者

1989年12月

本书反映了作者近几年来教学和科研成果，论述深入浅出，理论联系实际，各章均选编了适量的习题。

本书除供给电力系统及其自动化专业研究生作为教材外，还可供给高等院校有关教师、高年级大学生作为教学参考书，作为从事发电厂、电力系统自动化专业工作的工程技术人员、科研人员的参考书。

目 录

第一篇 状态空间控制导论

第一章 绪论	(1)
§1-1 控制理论及控制系统概述	(1)
§1-2 状态空间控制理论在电力系统中的应用	(3)
第二章 数学基础	(8)
§2-1 矩阵分析基础	(8)
§2-2 变分法基础	(27)
习题	(42)
第三章 状态空间分析法	(44)
§3-1 引言	(44)
§3-2 系统的状态空间表达式	(47)
§3-3 定常系统状态方程的解法	(54)
§3-4 线性时变系统	(62)
§3-5 线性离散系统的状态空间表达式及状态方程的解	(66)
习题	(72)

第二篇 线性最优控制及在电力系统的应用

第四章 线性最优控制系统	(76)
§4-1 概述	(76)
§4-2 最优控制与性能指标的概念	(80)
§4-3 线性系统的可控性	(84)
§4-4 线性系统的可观测性	(92)

§4-5 用变分法解最优控制问题.....	(97)
§4-6 最大值原理.....	(105)
§4-7 线性最优控制系统设计原理.....	(119)
习题.....	(126)
第五章 具有二次型性能指标的最优控制.....	(129)
§5-1 有限时间的状态调节器.....	(130)
§5-2 通常情况下无穷大时间的状态调节器.....	(136)
§5-3 输出调节器.....	(141)
§5-4 跟踪系统.....	(147)
习题.....	(152)
第六章 电力系统稳定的线性最优控制.....	(155)
§6-1 引论.....	(155)
§6-2 发电机线性最优励磁控制.....	(172)
§6-3 发电机电制动的最优时间控制.....	(189)
§6-4 汽轮发电机组快速汽门的线性最优控制.....	(205)
习题.....	(213)
第三篇 电力系统非线性控制	
第七章 非线性系统分析与控制方法.....	(216)
§7-1 引言.....	(216)
§7-2 用描述函数法分析非线性控制系统的稳定性	(222)
§7-3 相平面法.....	(229)
§7-4 非线性系统的微分几何控制.....	(241)
§7-5 李雅普诺夫稳定性理论及非线性系统稳定分 析与控制.....	(249)
习题.....	(281)

第八章 李雅普诺夫直接法在电力系统非线性控制中的应用.....	(282)
§8-1 通过相角控制提高电力系统暂态稳定性.....	(282)
§8-2 考虑非线性特性发电机最优励磁控制.....	(288)
§8-3 考虑调速系统反馈作用的非线性稳定控制.....	(306)
习题.....	(310)
第九章 二轴励磁同步发电机系统非线性控制.....	(321)
§9-1 概述.....	(321)
§9-2 二轴机系统的基本方程式.....	(324)
§9-3 二轴机的稳态运行特性.....	(329)
§9-4 二轴机的暂态过程分析.....	(332)
§9-5 二轴机系统李雅普诺夫函数构成及稳定评价.....	(336)
§9-6 二轴机系统的暂态稳定控制.....	(341)
习题.....	(352)
习题答案.....	(354)
参考文献.....	(361)

第一篇 状态空间控制导论

第一章 绪 论

§1-1 控制理论及控制系统概述

近几十年来，控制理论有了很大发展，并在航海、航空、宇航、机械制造及化工等领域得到了广泛地应用。

在工程技术上，把五十年代前后发展起来的控制理论称为“古典控制论”，它是以单变量控制与调节为主要内容，是以传递函数为其数学工具，采用频域法进行控制系统的分析与设计，仅适用于单输入和单输出的线性定常系统。

古典控制理论的主要缺点是不能用于时变系统、非线性系统及多输入、多输出系统，因而不能应用于最优控制和适应性控制系统的设计。

60年代以后发展起来的分析和设计复杂控制系统的新方法——状态空间控制理论，通常称为现代控制论。它是以多变量控制、最优控制、自适应控制以及智能控制为主要内容，是以状态方程为数学工具，采用时域法进行控制系统的分析和设计，适用于多输入、多输出系统，该系统可以是线性的或非线性的，可以是定常的或时变的。

现代电力系统是由大机组、高电压、远距离输电线构成的多输入、多输出的大系统。所以可以广泛地应用现代控制理论进行电能生产及系统运行的最优控制，以求得运行的可

靠性、安全性和经济性。

控制系统分为闭环控制系统、开环控制系统，此外还有适应性控制系统和自学习控制系统等。

闭环控制系统是指系统输出信号对控制作用有直接影响的系统。闭环控制系统也就是反馈控制系统，利用输出量和参考输入量的偏差来进行控制。输入信号与反馈信号之差，称为误差信号，将误差信号加到控制器上，以减小系统的误差，使系统的输出量趋于所希望的值。

如图1-1所示。

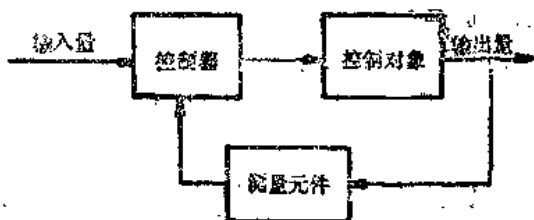


图1-1 闭环控制系统



图1-2 开环控制系统

开环控制系统是指输出量对系统的控制作用没有影响，即不进行反馈控制的系统。如图1-2所示。在开环控制系统中，不需要对输出量进行测量，也不需要将输出量反馈到系统输入端与输入量进行比较。对应于每一个参考输入量，便有一个固定工作状态与之相对应。如果输入量和输出量之间

的关系已知，并且不存在内扰和外扰，则可以采用开环控制。当系统出现扰动时，开环控制系统就无法对扰动起到控制作用。因此，只有当系统的输入量能预先知道，且不存在任何扰动时，才采用开环控制系统。

适应性控制系统是指系统本身能够随着环境条件、结构、参数的变化，进行自动调整或自动修改系统参量及控制对策，这种本身具有适应能力的控制系统称为适应性控制系统。

在适应性控制系统中，动态特性必须随时识别，以便调整控制器参数，从而获得最优性能。

自学习控制系统是一种具有自动地学习能力的控制系统。如果把人工操作视为控制器，完成输入量与输出量的比较，并根据其差值进行修正控制，把这种人工控制过程视为闭环控制系统进行分析。操作人员在反复实践中积累了丰富的经验，起到一个较好的控制器的作用，在分析这种系统时，考虑到学习已经积累的经验，来进行自动地修正、调整及控制，就构成了自学习控制系统。例如中医诊脉、电焊切割等都可用自学习控制来实现。

自适应控制和自学习控制系统是控制发展达到的最新阶段，在一般工程上及电力系统中的广泛应用尚待进一步研究，但确有广阔地应用前景。

§1—2 状态空间控制理论在电力系统中的应用

一、电力系统运行的特点及对控制的要求

现代电力系统是由若干个发电厂的发电机、电力变压器、不同电压等级的输电线路及各种用电设备构成生产、输送、分配和消耗电能的统一的联合系统。电能的生产与国民

经济各部门有着密切的关系，在“四个现代化”建设中，电能是最主要的能源之一。

电能生产及电力系统运行有以下特点：

1. 发电机发出的交流电是不能储藏的，电能的生产、输送、分配、使用是同时进行的，在任意时刻发电厂发出的功率与用户消耗的功率是平衡的。

2. 电力系统的过渡过程非常迅速，电能的传输速度甚快，电力设备的投入、切除均在瞬间完成，当发生短路故障，失去稳定等过程均极为暂短，由一种运行状态过渡到另一种运行状态是非常迅速的。

3. 电能适于大量生产、集中管理和远距离输送，便于实现高度地自动控制。

4. 庞大的电力系统，一旦发生故障，迫使局部或全部供电中断，将给国民经济带来严重损失，给人们的社会生活带来极大地不便。

鉴于上述，对电力系统运行及控制提出了较高要求：

1. 保证供电可靠性

由于供电中断将影响工农业生产，给国民经济带来严重损失，造成生活不便，甚至危及人身安全及设备安全。因此，要求电力系统必须做到持续地可靠地供电。为此，只靠人工手动操作是难以实现的。要求把状态空间控制理论应用于电能生产及电力系统运行进行安全监视与控制，使电力系统实现高度自动化。

2. 提供优质电能

衡量电力系统电能质量的指标是系统的频率和各结点运行电压，要求保持在容许的范围内。为此，除了要有合理

地、优化地系统结构设计之外，还必须对系统的有功功率与频率、无功功率与电压进行在线自动调节，对系统运行参数进行监测、辨识，采取跟踪控制及适应性控制等对策，以确保电能质量。

3. 保持运行的经济性

这是电能生产及电力系统运行的一项重要指标。要求电能生产、输送、分配及使用的损耗小，效率高，最大限度地降低电能成本。因而需把优化理论用于能源管理、功率分配及电力系统经济运行之中，采取必要的行之有效的节能措施，以及实现线性、非线性最优控制，以求达到令人满意的经济运行指标。

由此可见，把现代控制理论应用于电力系统，对电力系统运行实行全盘地自动控制是十分必要的，是势在必行的。

二、在电力系统中应用现代控制理论具有广阔的前景

自六十年代以来，由于电子计算机、微型控制机及微处理机的迅速发展和广泛使用，为现代控制论在电力系统中的应用提供了有力的条件。

1. 发电厂电能生产过程的在线识别及自适应控制

现代发电厂的发电机组向大容量、高度自动化的方向发展，在电能生产过程中，对锅炉、汽机、发电机等的运行参数，如汽温、汽压、功率、电压、频率、相角等进行在线识别，对机组启动、并车以及运行调整实行适应性控制，可以实现安全生产及经济运行，并把运行人员从复杂而繁重的劳动中解放出来。

2. 电力系统稳定的最优控制

在电力系统中并联运行的发电机，正常时原动机输入的

机械功率与发电机输出的电磁功率是平衡的，各发电机是以恒定的同步速度运行。但是这种功率或转矩平衡是相对的、暂时的。当系统发生了负荷变化、结构变化，或者发生短路、断线等故障时，均将使平衡状态遭到破坏。

当系统受到小干扰时，经过暂态过程，如果系统仍能恢复到原来的运行状态，则称系统是静态稳定的（有的文献称动态或微动态稳定），否则是静态不稳定的。

当系统受到大干扰时，将发生一系列电磁和机电暂态过程，若暂态过程逐渐衰减，系统过渡到一个新的稳定运行状态，各发电机之间仍然保持同步运行，则称系统是暂态稳定的。否则，如果在暂态过程中，出现某些发电机之间的相对角度随时间不断增大，以致这些发电机之间或某发电机与系统之间失去同步，并由此导致系统功率和电压的强烈振荡，甚至造成系统解列、瓦解，则称系统是暂态不稳定的。

由于稳定的破坏后果是非常严重的，所以把现代控制理论应用于电力系统的稳定控制就更显得迫切。因而引起了国内外专家学者的重视。理论分析与实验研究均证明，应用线性最优控制理论，采用反映相角、速度及功率的状态反馈控制系统，进行系统稳定的最优或次最优控制，可以提高静态稳定极限、暂态稳定极限；近年来又把非线性稳定控制的研究提到日程上来，例如应用微分几何控制理论来研究和设计非线性稳定控制方案，应用李雅普诺夫直接法来研究非线性系统稳定的在线最优控制与评价等。这些控制措施能不同程度地改善电力系统运行的稳定性。

3. 发电机最优励磁控制

对于远距离输电系统，提高发电机的励磁电流、励磁电

势，不仅可以提高静态稳定的功率极限，扩大稳定运行范围，而且可以改善系统运行的暂态稳定性。

电力系统实际上是一个非线性的动态系统，为了简化分析，许多专家学者采用固定增益的线性最优励磁控制器来实现发电机的励磁控制，既可以提高系统运行的稳定性，又可改善系统的动态品质。通常这种方法是按照线性化理论设计最优励磁控制器，然后在非线性系统模型上校核所设计控制器的作用，收到了良好的效果。

近几年来，开始应用非线性控制论研究非线性励磁控制器，取得了一定进展，与线性励磁控制器相比显示出了优越性，可望在不久的将来得到广泛地推广使用。

4. 快速汽门的最优控制

电力系统在正常运行状态下，汽轮发电机组处于转矩平衡状态，发电机转子以同步速度旋转。当系统发生短路等大干扰时，突然甩掉一部或全部负荷，平衡状态遭到破坏，转子开始加速，如果随着时间的增长，机组间的相对角度不断增大，则可能导致机组失步。对于采用电液调速系统汽轮发电机，可以采取快速汽门最优控制。所谓快速汽门控制，就是当机组加速时，迅速发出控制信号，自动关闭中压调节汽门，致使汽轮机的进汽量减少，即减小原动机的机械功率，从而减小加速面积，增大减速面积，可大幅度地提高暂态稳定极限。

实行快速汽门最优控制，可以取代紧急故障时切除发电机等不够经济的提高稳定的措施。

状态空间控制理论在电力系统的应用范围很广，目前正在深入地进行理论及实用研究。除了上述列举的各项外，还