

177060

## 高等学校教材



# 电力系统数字仿真

上海交通大学 黄家裕  
天津大学 陈礼义 合编  
上海交通大学 孙德昌

水利电力出版社

(京)新登字115号

高等学校教材

电力系统数字仿真

上海交通大学 黄家裕

天津大学 陈礼义 合编

上海交通大学 孙德昌

\*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京市朝阳区小红门印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 16开本 14.75印张 329千字

1995年5月第一版 1995年5月北京第一次印刷

印数 0001—1980册

ISBN7-120-02274-1/TM·562

定价 8.40元

# 前 言

过去,研究电力系统机电暂态过程,主要是研究电力系统中的同步发电机在扰动情况下能否保持同步运行,即通常所说的稳定性的问题。在《电力系统暂态分析》课程中,“静态稳定”和“暂态稳定”这两部分内容讨论的就是这一问题。在电力系统稳定性问题的分析中,发电机定子绕组和网络元件的电磁过程不是用微分方程而是用代数方程描述的,这些元件电磁过程的暂态特性没有被考虑。

随着大容量(300~600MW及以上)发电机组和输电线串联电容补偿技术的应用,在电力系统运行中出现的发电机组轴系扭振和次同步谐振等新技术问题需要研究,它们都属于“机—网相互作用”的范畴。此外,为提高电力系统运行安全性,也需要研究大容量发电机在对称短路、不对称短路、误同期等故障和非正常方式中的暂态过程。研究这些问题,需要采用计及变压器电势项的完整的发电机数学模型。

本教材的重点是电力系统机—网相互作用动态数字仿真,包括在机端短路、误同期、自励磁、输电线短路重合等各种故障、非正常运行方式下的数学模型和计算方法等。

作为比较,书中也讨论了电力系统暂态稳定计算问题,包括面向微分方程和面向结构图的暂态稳定计算。

为对系统数字仿真,包括电力系统数字仿真有一个总的概念,本书安排了第一章。第二、三章为学习本课程所需的有关数学基础知识。

本书的第一、二、三章和第七章第六节由天津大学陈礼义编写,第五、六章由上海交通大学孙德昌编写,上海交通大学黄家裕编写了第四章和第七章的其余部分,并对全书作了统稿。

东南大学陈珩教授担任本书主审,提出了不少中肯的意见和建议,在此表示深切的谢意。

由于编者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

1993年1月

# 目 录

## 前言

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 第一章 概述 .....                 | 1   |
| 第一节 系统数字仿真 .....             | 1   |
| 第二节 实现系统数字仿真的步骤 .....        | 3   |
| 第三节 系统数字仿真的用途 .....          | 5   |
| 第四节 电力系统数字仿真 .....           | 7   |
| 小 结 .....                    | 8   |
| 第二章 连续系统数字仿真计算方法 .....       | 9   |
| 第一节 古典数值积分法 .....            | 9   |
| 第二节 数值积分法的误差、数值稳定性与刚性 .....  | 17  |
| 第三节 离散相似法 .....              | 25  |
| 第四节 面向结构图的数字仿真 .....         | 35  |
| 小 结 .....                    | 42  |
| 第三章 线性和非线性方程组的解法 .....       | 43  |
| 第一节 线性方程组的解法 .....           | 43  |
| 第二节 非线性方程组的解法 .....          | 53  |
| 小 结 .....                    | 59  |
| 第四章 电力系统数学模型 .....           | 60  |
| 第一节 综合相量和坐标变换 .....          | 60  |
| 第二节 同步发电机的数学模型 .....         | 64  |
| 第三节 网络元件的数学模型 .....          | 71  |
| 第四节 变压器的数学模型 .....           | 75  |
| 第五节 电动机负荷的数学模型 .....         | 78  |
| 第六节 励磁调节系统的数学模型 .....        | 82  |
| 第七节 调速系统的数学模型 .....          | 83  |
| 小 结 .....                    | 85  |
| 第五章 简单电力系统的数字仿真 .....        | 87  |
| 第一节 无限大功率电源供电系统的三相短路分析 ..... | 87  |
| 第二节 同步发电机突然短路的暂态过程分析 .....   | 92  |
| 第三节 发电机的自励磁方式分析 .....        | 109 |
| 第四节 同步发电机组次同步谐振分析 .....      | 123 |
| 第五节 同步发电机误同期合闸暂态过程仿真 .....   | 137 |
| 第六节 输电线路的波过程计算 .....         | 141 |
| 小 结 .....                    | 158 |
| 第六章 复杂电力系统的数字仿真 .....        | 159 |
| 第一节 输电网络的数学模型 .....          | 159 |

|      |                              |     |
|------|------------------------------|-----|
| 第二节  | 机—网接口·····                   | 172 |
| 第三节  | 发电机调节系统的处理方法·····            | 178 |
| 第四节  | 故障/操作的模拟及数值振荡问题·····         | 182 |
| 第五节  | 提高计算速度的方法·····               | 191 |
| 第六节  | 电力系统机—网相互作用暂态过程数字仿真的总流程····· | 194 |
| 小 结  | ·····                        | 199 |
| 第七章  | 电力系统暂态稳定计算·····              | 201 |
| 第一节  | 同步发电机数学模型·····               | 201 |
| 第二节  | 电动机负荷数学模型·····               | 209 |
| 第三节  | 输电网络模型·····                  | 210 |
| 第四节  | 故障/操作的模拟·····                | 211 |
| 第五节  | 暂态稳定的解算方法·····               | 217 |
| 第六节  | 面向结构图的电力系统动态仿真·····          | 217 |
| 小 结  | ·····                        | 225 |
| 参考文献 | ·····                        | 226 |

# 第一章 概 述

系统数字仿真是一门新兴的技术科学，它的产生和发展是同现代科学技术发展分不开的。现代科学技术的发展要求把事物运动按各自的系统来研究，但有许多系统由于条件的限制不可能在真实的系统上进行试验和研究，这样就可以采用数字仿真的方法，即用数学模型代替真实系统，在数字计算机上进行试验和研究。目前系统数字仿真的方法不仅用于许多工程系统的试验和研究，而且也应用于非工程系统。

本章着重介绍系统数字仿真的含义、目的、实现的步骤、用途以及电力系统数字仿真概况。

## 第一节 系统数字仿真

### 一、系统数字仿真的定义

一个系统是由一些能够完成某种特定功能的部分组成的，或者说是由一些子系统组成的。系统的规模、运动规律各不相同，描述系统的形式、研究的方法也不相同。按照系统的物理特征，通常把它们分为工程系统（例如机械、电力、化工、热力系统等）和非工程系统（例如生态、交通、经济、管理、社会系统等）。本书所涉及的系统属于工程系统。

为了保证系统运行的功能和质量，在设计、分析和研究这些系统时必须确切、完整地了解实际系统的静态和动态特性。由于经济性、安全性和可能性等原因，在实际系统上进行试验和研究时，常常会遇到困难，有些困难甚至是不可能解决的。因此，利用模型系统进行试验和研究是一种有效的途径。最初，人们在相似理论的指导下设计并构成物理模型系统。通过在物理模型系统上做试验来代替在实际系统上的试验，这就是所谓的动态模拟。例如，电力系统动态模拟就是一种用于研究电力系统动态特性的物理模型系统。它把实际电力系统的各个部分，如同步发电机、变压器、输电线路、负荷等按照相似条件设计、建造并组成一个电力系统模型，用这种模型代替实际电力系统进行各种正常与故障状态的试验和研究。

随着实际系统的发展，系统的规模和复杂程度发生很大变化，采取物理模型的动态模拟方法受到很大限制。与此同时，数字计算机和数值计算技术飞速发展，数字计算机的性能价格比不断提高，出现了用数学模型代替物理模型的新型模型系统，我们把建立数学模型并在数字计算机上做试验的过程称为系统数字仿真。显然，系统数字仿真的主要步骤为建立数学模型、建立数字仿真模型和进行仿真试验。建立数学模型是处理物理原型与数学模型之间的关系，建立数字仿真模型是处理数学模型与计算之间的关系。有些数学模型是利用数字计算机和模拟计算机的混合数学模型系统。

## 二、系统数字仿真的分类

根据原型系统、数学模型和数字计算机三者的特征可以把系统数字仿真分成各种不同的类型。

按照原型系统状态变化的时间过程，可分为连续系统仿真和离散事件系统仿真。连续系统仿真的系统状态量随时间连续变化，它的数学模型是一组方程式，包括连续模型（用微分方程描述）、离散时间模型（用差分方程描述）和连续与离散混合模型。离散事件系统仿真的系统状态量只在一些时间点上由某随机事件的驱动而发生变化，这类系统在两个事件之间其状态量保持不变，它的数学模型一般只用流程图或网络图描述。例如单服务台排队系统，顾客是随机到达的，服务员为顾客服务的时间也是随机的，这就可以通过离散事件系统仿真来估计服务台的工作情况。

按照有无实物参与仿真过程，可分为实时仿真和非实时仿真。例如航天器的仿真系统要求把实物连接在仿真系统进行实时仿真，而有些复杂计算需要用数字计算机完成。

按照仿真目的，可分为以分析研究为目的的研究用系统仿真和以培训运行人员为目的的培训系统仿真。培训用的仿真是为了训练系统运行、调度人员对系统环境的反应和判断能力，因此要求仿真的环境尽可能逼真，而对于仿真精度，只由培训的要求决定。

按照研究系统运动的状态可分为系统动态仿真和系统静态仿真。当我们需要研究系统处于相对平衡状态的运动特性时，采用系统静态仿真；当研究系统处于受扰动状态的运动特性时，则采用系统动态仿真。两者的数学模型不同，仿真方法也不相同。

按照仿真模型的性质可分为物理仿真、数学仿真或两者的混合仿真。当然，按照仿真对象所属的不同工程系统类别，还可分为各种专业系统仿真，例如电力系统仿真、化工系统仿真、热工系统仿真、交通运输系统仿真和航天器仿真等。

## 三、系统数字仿真的优点

上述各种类型的系统仿真在近50年中有了很大发展，尤其是数字仿真在工程系统和非工程系统中都得到广泛应用。为什么数字仿真在系统研究中有如此快速的发展呢？这是因为除了计算机技术和软件技术的飞速发展以外，系统数字仿真的独特优点是促使其快速发展的重要因素。这些独特优点是：

（1）不受被研究系统的规模和复杂性的限制。当今科学技术的发展使各种系统的规模和复杂程度发生很大变化，出现了许多规模庞大、结构复杂的大系统。大系统的试验和研究很难在原型系统上进行，早期发展起来的物理模型系统也很难适应大系统的要求，并且它的试验费用高，建设周期长。例如，在电力系统动态模拟上做几十台发电机、几十条输电线路的电力系统暂态过程试验是相当困难的。如果采用数字计算机进行电力系统数字仿真就不存在这些困难，可以进行数百台发电机和上千条输电线路的大型电力系统数字仿真。

（2）保证被研究系统的安全性。许多系统试验，例如电力系统故障试验、稳定性破坏试验、核电站控制系统试验等，直接在原型系统上做试验有很大危险性，甚至是不允许的，这时，用系统数字仿真的方法是唯一可行的途径。

（3）系统试验的经济性。在实际电力系统上做试验要暂停部分用户供电，需要配备

各种测量设备、测量通道、通信工具，要求很多运行、调度人员和测试人员密切配合，花费大量人力、物力和财力，因此这种试验很难实现。如果用数字仿真做试验，所需费用就要少得多。数字仿真试验的设备一般都可重复使用，而且只需少数计算人员参加，试验时间很短。

(4) 可用于对未来系统发展的预测。在电力系统设计和规划阶段，需要对未来系统的特性做预测性的分析和研究。这些工作在实际电力系统中很难实现，而系统数字仿真却可以对设计方案进行大量试验和计算，进行经济技术比较和优化，也可以对未来系统的假设条件的合理性进行验证。

## 第二节 实现系统数字仿真的步骤

系统数字仿真是用系统数学模型在数字计算机上进行试验和研究的过程。实现系统数字仿真一般包括建立数学模型、建立数字仿真模型和仿真试验三个主要步骤。

### 一、建立数学模型

建立数学模型的任务是根据仿真试验的目的和原型与模型之间的数学相似原则，确立描述系统特性的数学表达式。在建立数学模型时应该认真考虑以下问题。

(1) 系统仿真的目的。在建立系统仿真数学模型之前，应明确仿真的目的、仿真试验的主要内容和确定系统数学模型的形式和规模。例如，电力系统暂态过程数字仿真主要有三种研究目的和内容，即波过程、电磁暂态过程和机电暂态过程。波过程数字仿真着重研究运行操作或雷击时引起的过电压问题，涉及电流、电压波的传播，研究时应建立反映电流和电压波过程的数学模型。电磁暂态过程数字仿真着重研究短路或自励磁等引起的电流、电压变化过程，其变化频率比波过程低，这种数字仿真的数学模型应反映同步发电机电磁暂态过程和各种故障类型。机电暂态过程的过渡过程较长，数字仿真数学模型应着重反映电力系统振荡、稳定性破坏和异步运行等现象，涉及功率、发电机相角、转速等参数的变化和调压、调速控制系统的作用。

(2) 系统的统一性。复杂的电力系统往往由多个子系统组成，系统的数学模型也是由各子系统数学模型组成，并联接成一个统一的整体。因此，在建立数学模型时应考虑各子系统之间的联系和相互作用。例如，研究多机电力系统暂态稳定性，电力系统是由多个同步发电机和电力网组成，而各发电机组又是由转子运动系统、自动励磁调节系统和速度调节系统组成。因此，建立数学模型时必须考虑各个子系统间的相互作用，并建立统一的坐标系。

(3) 系统的数学描述。为了进行数字仿真，必须建立被仿真系统的统一数学描述，即数学模型。各种工程系统一般都可以通过分析或者试验得到数学模型，这种数学模型应适合于在通用或专用数字计算机系统上进行仿真计算。因此，这种数学模型应以原型系统和仿真系统数学方程式的相似性为基础，具有简明的逻辑关系和灵活的模型结构，以便进行系统模型的增、减或更换，减少修改工作量，这对于提高系统数字仿真的适应能力十分有益。

当有些系统比较复杂，以至于不能确切得到数学模型或数学模型不够完善时，可以采取系统辨识和参数估计的方法得到数学模型。系统辨识用来确定描述系统数学模型的类型，参数估计用来确定某种类型数学模型的系数和初始条件。有些控制系统仿真还可利用建模仿真过程的专用软件来建立数学模型。

## 二、建立数字仿真模型

### 1. 建立数字仿真模型的任务

建立数字仿真模型的任务是针对不同形式的数学模型设计相应的算法，编制计算程序和数字仿真过程，使数学模型成为存在于数字计算机中的“活的数学模型”。

在连续系统数字仿真中，数学模型的主要形式有三种，即高阶微分方程形式、传递函数形式和状态方程形式。当采用一阶微分方程的数值积分法进行数值计算时，应把高阶微分方程和传递函数形式变换为  $n$  个一阶微分方程形式，这种变换也可通过程序来实现。

建立数字仿真模型的一个重要工作是选择数值计算方法，在选择算法时应考虑以下几个方面：

(1) 应根据数学模型的形式和仿真系统动态过程中所有状态变量的动态特性，估计数值计算过程中算法的误差特性和误差对解的影响，即所谓数值稳定性；

(2) 要考虑到被仿真系统数学模型在各种仿真状态下对数值计算误差的敏感性，即所谓方程的刚性问题；

(3) 对线性代数方程的求解计算，要估计到计算过程中舍入误差对计算结果的影响，有些代数方程对舍入误差十分敏感，甚至可能得到错误的结果，这就是所谓方程的病态问题；

(4) 在代数方程和微分方程交替求解时，应注意到交替计算的交接误差，采用联立求解法可以完全消除交接误差。

### 2. 吸收数字仿真和计算机系统的新成果

在电力系统数字仿真中通常选择古典数值积分法求解微分方程，例如改进欧拉法、龙格-库塔法等。这种方法简单、容易理解和掌握，但是存在一些缺点。自70年代以后，出现了现代数值计算方法，它为数字仿真提供了有效、可靠和快速的算法。这种方法利用了数据采样和离散系统的概念，依据时间域和频率域两者的数学模型和计算式进行数值计算，它比单纯基于时间域或单纯基于频率域的算法有较好的数值稳定性和计算速度。这些新的仿真算法对于电力系统数字仿真的发展非常有益。

新一代的小型巨型计算机、阵列计算机、多处理机系统和并行算法等方面的新型硬件设备和计算方法将使电力系统数字仿真的速度大幅度提高，应引起重视。

### 3. 引用先进的程序设计技术

设计和编制仿真计算程序是建立数字仿真模型的另一个重要工作。为了提高数字仿真计算程序的质量，应注重程序设计技术。采用先进的仿真程序设计技术可以使程序的结构简洁、明晰，便于程序的维修和阅读，例如在程序中加入必要的注释和程序的文件化。在设计仿真程序时应使程序具有扩展功能和规模的可能性。仿真程序是试验研究人员的工具，应具有人机对话的功能，使计算人员随时了解仿真过程，对仿真过程进行调整和控制。为

便于对仿真结果进行分析, 仿真程序还应具有列表、打印、图形输出和记录的功能以及特性分析、优化等功能。因为一个好的仿真程序需要经过多次修改、扩充规模、增加功能才能逐渐完善和成熟。

为了实现上述仿真程序的功能, 提高程序的质量, 有许多优秀的数字仿真程序采用了程序文件化、模块化和结构化等程序设计技术。

程序的文件化就是对程序加上注解, 使程序成为一个可阅读的文件。例如, 在程序的开始应有简明注释, 说明程序的名称、功能, 设计者姓名, 完成时间, 修改记录和研制单位等; 在每段专门功能的程序前面应说明该段程序的专门功能, 变量含义, 使用算法。带有注解的程序有较好可读性, 也便于程序的检查和调试。

程序的模块化是把整个程序分为若干个彼此独立的具有专门功能的模块, 模块彼此独立意味着各模块彼此不能互相修改。模块化设计可以保证在程序局部维修时不会影响全局, 并使得查找故障方便, 也有利于扩展程序功能。在划分模块时应注意合理分工, 有效组织。

在处理复杂程序的故障时, 光靠调试不可能完全解决问题, 我们需要有一种好的程序结构来降低调试难度, 提高设计工作效率。按照结构程序设计原理, 一个程序可以包含三种基本结构; 即顺序结构、WHILE-DO结构和IF-THEN-ELSE结构。只由这三种基本结构组成的程序称为结构程序。结构程序设计与模块程序设计的区别在于, 结构程序设计可把一个模块分为更小的基本模块。

当程序具有模块化和结构化特点时, 整个程序的设计和调试就可以采用自上而下的设计和调试方法。在这种方法中, 由于程序中各模块是分层排列的, 因此当设计高层模块时可以略去低层模块细节。高层设计、编码、调试完成后再进行下一层的设计、编码、调试, 直到最低层。高层模块所调用的低层模块可以暂时当作空模块处理。这种设计方法在程序调试时容易发现程序的错误, 不需设计专门的模拟调试程序来查找程序的错误。

以上程序设计技术的应用应根据具体情况灵活掌握, 以利于提高数字仿真程序的质量。

### 三、仿真试验和分析

数字仿真试验的任务是在数字计算机上模拟实际系统完成各种试验和研究项目, 并对结果进行分析和评价。为了完成这些任务, 仿真程序应具有人机对话功能, 为计算人员提供各种仿真结果的信息, 如过程曲线、图形、数据表格、数据记录等。为了便于分析结果, 可以增加对结果特性进行分析的功能, 例如对有关变量进行谐波分析、幅值比较、对比显示和记录等。有些用于辅助设计的仿真程序还可增加设计参数的优化、方案比较和绘图功能。

在培训用的仿真程序中, 为提高培训效果, 应具有向接受培训的人员提问、提示以及成绩考核、评估、记录和档案管理等功能。

## 第三节 系统数字仿真的用途

系统数字仿真得以发展的重要原因由于它带来的社会效益。使用系统数字仿真可以降低研制成本, 提高系统调试和训练过程的安全性, 尤其对于航空、航天、核反应堆、

电力、化工和军事武器等工程系统是十分重要的。对于社会、经济等非工程领域，由于很难直接进行试验，系统数字仿真成为研究的必要手段。系统数字仿真作为一种研究、试验工具，几乎可以用于任何一个工程与非工程领域，就工程领域而言，它的主要用途有以下几方面。

### 一、系统数字仿真在系统设计及试验方面的应用

系统设计是指根据使用者对系统的要求设计出一种新的系统。由于新系统尚未建成，无法在实际系统上进行试验，因此系统数字仿真是必不可少的设计手段。通过系统数字仿真确定系统的结构和参数，了解新系统的性能。越是复杂的系统，采用这种手段越有价值。有资料表明，在系统设计中使用的总投资1%~2%的系统数字仿真费用，可以得到10%~50%的效益。

有些系统数字仿真由实物和仿真系统组成的，实物一般是新设计的产品样机或半成品，而控制对象是数字计算机及其仿真系统。这种数字仿真往往要求反映实际时间过程，即所谓实时的仿真。它适合于对样机或半成品进行性能、整定参数或改进设计方案的试验。

### 二、系统数字仿真在系统动态特性分析与研究中的应用

在系统动态特性分析与研究中应用的系统数字仿真称为研究用的系统数字仿真。它是对已建成的系统进行精确的数字仿真，复现系统在正常运行状态或非正常运行状态下的动态行为，以便详细分析和研究系统的动态特性和稳定性，或者分析系统故障的发生、发展和产生的后果。这种系统数字仿真也常用于验证理论研究的正确性或验证所拟定的数学模型的准确性。

研究用的系统数字仿真在工程系统中应用最为广泛，因为对于任何一种工程系统一般都可以得到数学模型，因而都可以进行数字仿真。

### 三、系统数字仿真在辅助决策中的应用

系统数字仿真可以再现系统的动态行为，因此可以用于辅助运行，帮助调度人员对系统运行做出正确的决策，以避免由于对决策考虑不周而在实际系统进行操作时发生失误。

系统数字仿真对于那些复杂的、变化速度很快，对安全性要求很高的工业生产系统更为必要。例如电力系统中心调度所的在线系统数字仿真，可以辅助现场调度人员进行经济调度、预测和分析未来电力系统的安全性，检验电能管理软件的性能，确定电能生产管理决策等。

在军事指挥方面，可应用系统数字仿真建立作战数学模型，并利用这种模型的试验来表现战场上敌我双方态势的变化，研究作战指挥方案的正确性，辅助指挥官作出正确的决策。

在生产管理方面，生产调度人员可应用生产管理系统数字仿真，发现生产计划在执行过程中出现的问题，能帮助生产调度人员及时对生产过程作出相应的调整，以保证生产计划的正常执行。

### 四、系统数字仿真在人员培训方面的应用

许多重要的工程系统需要有一个或一组熟练的工作人员对系统进行操作、控制、管理和决策，为了提高他们的管理水平，一般都需要在上岗以前对这些工作人员进行训练和培

养。早期的培训方法是在实际系统运行中进行。随着生产和科学技术水平的发展,系统规模的日益扩大,复杂程度不断提高,系统的造价昂贵,现场训练因培训人员操作不当引起的破坏和危险性增加而受到很大限制。因此需要一种能模拟实际系统工作状况及环境的系统,操作人员可以在这个系统上进行教学培训,这就是培训仿真系统。

培训仿真系统由数字计算机、数据通信系统、图形图像系统、仪表和操作机构等组成,它能复现被仿真系统的工作状态与环境,配以存贮于数字计算机中的计算程序、培训课程、教学指导、和成绩评定、记录等软件而形成的一整套培训仿真系统。根据训练目的,培训仿真可分为三大类:

(1) 载体操纵型。这是一种与运载工具有关的培训仿真器,如飞机、战舰等训练仿真器。

(2) 过程控制型。这是一种训练人对系统过程的控制能力的培训工具,如发电厂汽轮发电机组培训仿真器、核电站培训仿真器、电力系统调度培训仿真器、石油化工生产过程培训仿真器等。

(3) 博弈决策型。如战术、经营,生产管理等培训仿真器。

#### 第四节 电力系统数字仿真

电力系统数字仿真发展十分迅速,应用日益广泛,主要应用于以下几个方面。

##### 一、研究用的电力系统数字仿真

电力系统数字仿真最先应用于电力系统暂态过程的研究。电力系统电磁暂态计算程序(EMTP)就是一种功能很强,适用性很广的研究用数字仿真程序,它可用于研究电磁暂态、电磁谐振、机—电振荡、机组轴系扭转和由断路器切换、雷电冲击引起的暂态过程。这种数字仿真程序的功能近几年来又有新发展,包括了潮流计算、超高压直流输电换流器、控制系统和统计分析等内容。除此以外,还有大量适合于专门功能的电力系统数字仿真程序,它们具有小型、灵活、适用性强的优点。

最近发展起来的既有研究功能又有辅助设计功能的数字仿真系统是电力系统继电保护装置的计算辅助分析仿真系统,它是一种有实物(例如线路保护装置)接入的数字仿真系统。为了使数字仿真系统与研究的实物相连接,必须通过数字计算机和功率放大器生成单回线或双回线输电线路的电压、电流直流分量和各次谐波分量。这种数字仿真系统软件可以仿真各种谐波分量、相角、电弧和电流互感器饱和,同时可用于研究和改进线路保护装置在电力系统正常和各种短路故障状态下的性能。

##### 二、培训用的电力系统仿真器

目前用于电力系统培训的仿真器有电力系统调度培训仿真器、发电厂单元机组培训仿真器和变电站培训仿真器等。培训仿真器和研究用仿真器有很大区别。培训仿真器以培训运行、操作人员为目的,所以要求培训仿真环境尽可能逼真,要求仿真器的操作机构、仪表、信号和音响与实际系统相同,使学员有身临其境之感,只有在认真严肃的培训环境中,才有利于培养学员对系统变化的反应能力和判断力,提高运行技术水平。相对而言,培训

仿真器对于动态过程的计算精度和数学模型要求不高，因而这方面的费用可以节省。研究用仿真器则要求精确的算法和完善的数学模型，对仿真环境不要求逼真。但是，也有一些电力系统调度培训仿真器要求具有研究仿真器的功能，所以这种仿真器的价格较高。

电力系统调度培训仿真器是一种比较复杂的仿真设备，具备如下基本功能。

(1) 电力系统运行管理、各种操作的培训功能。内容包括运行人员分析安排日计划，研究运行方式、反事故措施；电网正常操作，如系统调压、调频、倒闸操作；事故处理训练，如各种对称、不对称短路，复故障，系统振荡和解列；系统恢复的训练，如故障消除、电压调整、热备用机组出力调整、系统并列等。

(2) 系统仿真的功能。为实现各项培训项目，仿真系统应能逼真地模拟发、输、变电设备元件，各种运行方式的电网结构变化，负荷分配以及继电保护与自动装置等的静态和动态特性。

(3) 系统计算的功能。为仿真电力系统运行状态，必须具备潮流计算，负荷—频率计算等功能。

(4) 调度中心的功能。能正确反映总调度室的环境，并具有仿真调度中心的数据采集与监视(SCADA)系统和某些高级应用软件工作情况的功能。

(5) 教学培训的功能。为保证培训任务的完成，必须具有各种方便、完善的教学培训功能，包括各项培训课程的管理、调用、演示；培训过程的监视；培训过程的控制，如暂停、恢复、重放、冻结；培训成绩的评定和学员成绩档案管理等。

## 小 结

系统数字仿真是一门新兴的技术科学，它可以脱离实际系统，用数学模型代替真实系统，在数字计算机上用数字仿真的方法对实际系统的运行特性等进行试验和研究。系统数字仿真在工程和非工程领域都得到广泛的应用。

本章扼要介绍系统数字仿真科学的研究内容、特点、它的发展及其独特优点，实现它的主要步骤，它的应用范围以及它在电力系统中的应用等内容。

## 第二章 连续系统数字仿真计算方法

### 第一节 古典数值积分法

#### 一、引言

我们在本书第一章中已经说明了连续系统是一个状态随时间连续变化的系统，电力系统的动态过程表明它就是一个连续系统，描述连续系统动态特性的数学模型通常是一组高阶常微分方程。在这个模型中，独立变量是时间，因变量是系统中各物理变量。

对于  $n$  阶常微分方程，可以用引入新变量的方法把它转化为  $n$  个一阶常微分方程组来求解。因此，本章将着重讨论一阶常微分方程的数值计算问题。例如，对于二阶常微分方程

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = -K^2 y \quad (2-1)$$

式中  $K$  为常数。如果引入新变量  $z = \frac{dy}{dt}$ ，上式可写成一阶微分方程组

$$\left. \begin{aligned} \frac{dz}{dt} &= -K^2 y \\ \frac{dy}{dt} &= z \end{aligned} \right\} \quad (2-2)$$

在进行连续系统数字仿真时，首先要考虑的一个重要问题是数字仿真的精确性。影响仿真结果的精确性有许多因素，其中主要有建模误差、截断误差和计算机计算时的舍入误差，后两种误差问题将在本章后面讨论。在这里，我们先讨论电力系统数字仿真时建模误差的来源及其处理方法。为构造一个数学模型，必须对模型进行检验。对于电力系统来说，我们所构造出的数学模型是依据电工学和动力学的基本理论。一般来说，以这些理论为基础建立的数学模型能满足数字仿真的要求，但是在复杂电力系统的仿真中，由于数学模型很复杂，仿真的计算量很大，影响了仿真效率。而且有些环节对于所研究的问题影响很小，因此在建立数学模型时可能把它们忽略。这种简化严格来说应该用实际实验，或者用精确的物理模拟实验来检验，以确定简化的合理性。

数学模型中的参数对仿真结果，或者说对所研究的问题有不同程度的影响。这些参数一般都可以通过各种测量和实验得到，这是一件十分烦琐和工作量很大的工作，但却是数字仿真的基础。目前，我国电力系统数字仿真模型参数的精确性仍是一个尚未得到满意解决的问题，有些参数甚至只能凭经验给出，其合理性没有经过分析和严格检验。这个问题应该引起从事电力系统仿真的理论工作者和仿真计算人员的重视。

在电力系统仿真工作中的另一个重要的问题是数学模型的求解问题。对于微分方程，除少数可以得到解析解以外，大多数只能采用数值解法。早在18世纪末，就有很多人提出

过常微分方程精确而有效的数值积分方法。后来，特别是在参考文献[12]系统地阐述了这些方法，并讨论了它们的数值稳定性、收敛性、误差估计和步长的合理选取。

如果数字仿真所求得的是方程式(2-2)的数值解，也就是对时间 $t$ 的一些值计算出 $y(t)$ 和 $z(t)$ 的值，那么对于不同的积分常数，微分方程的积分是一簇曲线。通常，在给定 $y$ 和 $z$ 的初值后，解就确定了。假设经过变换，使 $t_0 = 0$ ，然后确定 $y$ 和 $z$ 在 $t_0$ 以后时刻 $t$ 的值，这种问题在计算数学中称为初值问题。本章所讨论的是一阶常微分方程的初值问题。表示为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dy}{dt} &= f(y, t) \\ y(t_0) &= y_0 \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

得到微分方程的数值近似解有两种基本的方法。一种方法是把近似解表示成有限个独立函数之和；另一种方法是差分法，这是本章要讨论的方法。

差分方法是寻求在一系列离散点上 $y$ 的近似值，这些离散点称为结点。在多数情况下这些结点是等距的，并记作

$$t_n = nh$$

式中 $h$ 是相邻两结点间的距离，称为步长。显然，步长影响计算的误差，在不同的结点这种误差不同。差分方法是一种递推算法，它使求解过程能顺着结点的顺序一步一步向前推进，即可用 $y$ 在 $t_{n-1}$ 上的值（单步法）或者前面几个结点上的值（多步法）来计算第 $n$ 步上 $y(t_n)$ 的近似值。所以，用结点之间的插值方法能够逼近到很高的精度。但是，在研究和选择各种差分方法时，应注意以下问题：

(1) 由于差分法是一种近似解法，每一步计算都会出现误差，而精确解一般是未知的，所以差分法求得的解是另外问题的解，它和精确解之间的差称为截断误差。另外，数字计算机只能表示有限数位的数，在计算中将产生舍入误差。为了保证解的精确性，应该分析研究这些误差对以后各步计算结果的影响。研究本步误差是否会在以后计算中引起误差的繁殖，这就是数值稳定性问题。稳定性好的方法应该使本步误差不会在以后的计算中增殖。本章将专门讨论这个问题。

(2) 解决误差增殖问题关键在于把某种算法的误差和计算结果的关系搞清楚，而且能对误差的增殖进行有效控制。

(3) 计算过程的启动问题。对于单步法启动问题很简单，它能自启动。但是，对于多步法，计算一开始就需提供前面几步的值，这些值需要利用同级精度的单步法来求得，因此多步法是不能自启动的。

(4) 计算量问题。在电力系统仿真计算中，即使在高速计算机上计算，当方程式的阶次很高时，计算量的问题仍是很重要的。计算量是评价一种算法好坏的标准之一。

## 二、单步法

所谓单步法就是用前一结点 $t_n$ 的值 $y_n$ 计算后一结点 $t_{n+1}$ 上的近似值 $y_{n+1}$ 的方法。本章将介绍常用的单步法，即欧拉法、改进欧拉法（预测—校正法），隐式梯形法和龙格—库塔法等。

## 1. 欧拉法

研究最简单的单步法——欧拉法是有益的，因为它容易分析，可作为了解其它方法的基础。对一阶微分方程式

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y) \quad (2-4)$$

假定  $y(0) = y_0$  已给定，于是可计算出  $\left. \frac{dy}{dt} \right|_{t=0} = f(0, y_0)$  的值。要求出满足式 (2-4) 的解  $y(t)$ ，我们可以把式 (2-4) 写成数值积分法的计算形式

$$y(t) = y(t_0) + \int_{t_0}^t f(t, y) dt$$

图2-1是这种数值积分法的几何表示，由图可知，当  $t_0 = 0$ ， $y(t)$  通过点  $P_0(t_0, y_0)$  的斜率为  $f(t_0, y_0)$ 。如果  $t_1$  十分靠近  $t_0$ ，那么在  $t_0$  附近，曲线  $y(t)$  可以近似地用切线来表示，切线方程为

$$y = y_0 + f(t_0, y_0)(t - t_0) \quad (2-5)$$

式 (2-5) 为数值积分法的最简单近似计算式。利用切线方程式可以求得  $t = t_1$  时  $y(t_1)$  的近似值  $y_1$

$$y_1 = y_0 + f(t_0, y_0)(t_1 - t_0) \quad (2-6)$$

重复此过程，当  $t = t_2$  时，得出  $y(t_2)$  的近似值  $y_2$

$$y_2 = y_1 + f(t_1, y_1)(t_2 - t_1)$$

依此类推得

$$y_{n+1} = y_n + f(t_n, y_n)(t_{n+1} - t_n) \quad (2-7)$$

令  $t_{n+1} - t_n = h_n$ ， $h_n$  称为第  $n$  步计算步长，若取等步长，则  $t_{n+1} - t_n = h$ 。

以上过程给出了求解微分方程的最简单方法。

尽管这种方法精度不高，但却提出了一种设想，就是可以通过逐次计算，用数值计算方法得出式 (2-4) 所示微分方程的近似解，这种方法称为欧拉法。因为是用折线来近似表示曲线  $y(t)$ ，故又可称为折线法。

## 2. 隐式梯形法和预测—校正法

从欧拉法可以看出，为提高精度，可以用  $t_0$  处  $y(t_0)$  的切线斜率  $f(t_0, y_0)$  和  $t_1$  处  $y(t_1)$  的切线斜率  $f(t_1, y_1)$  的平均值作为求  $t_1$  处  $y(t_1)$  的切线斜率，计算式改为

$$y_1 = y_0 + \frac{h}{2} [f(t_0, y_0) + f(t_1, y_1)] \quad (2-8)$$

式 (2-8) 的等号两边均含有未知量  $y_1$ ，故此式称为隐式梯形公式，这种方法称为隐式梯形法。隐式梯形公式不能用递推的方式直接做数值计算。如果用欧拉法求得值作为预测值，用  $\hat{y}_1$  表示，再用隐式梯形公式求  $y(t_1)$  的校正值  $y_1$ ，则计算步骤为

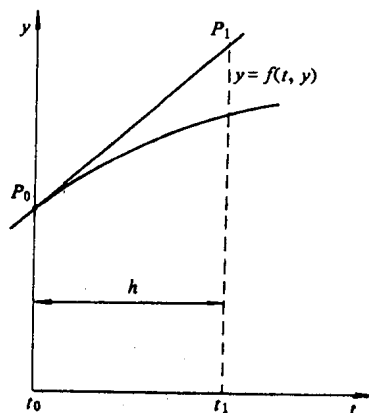


图 2-1 欧拉法数值积分的几何表示

$$\left. \begin{array}{l} \text{预测} \quad \hat{y}_{n+1} = y_n + hf(t_n, y_n) \\ \text{校正} \quad y_{n+1} = y_n + \frac{h}{2} [f(t_n, y_n) + f(t_{n+1}, \hat{y}_{n+1})] \end{array} \right\} \quad (2-9)$$

这就是预测—校正计算过程，这种方法称为预测—校正法，也称为改进欧拉法。

利用欧拉法和预测—校正法求微分方程的数值解，如果选取步长相同，预测—校正法的计算需要计算两次右端函数，而欧拉法只需计算一次右端函数。但是，预测—校正法的精度高。反过来说，如果两种方法要求精度相同，则预测—校正法可以选取较大步长，总的计算量可以节省，舍入误差也可减小。

### 3. 龙格—库塔法

如果把预测—校正法的式 (2-9) 看成是取  $y(t)$  在  $t_n$  处的切线斜率  $f(t_n, y_n)$  和在  $t_{n+1}$  处切线斜率  $f(t_{n+1}, \hat{y}_{n+1})$  的算术平均值作为计算  $y_{n+1}$  的斜率，同理可以设想在  $t_n$  和  $t_{n+1}$  区间内，取不同的  $t_i$  所对应的  $f(t_i, y_i)$  求加权平均值，用它作为该区间的斜率，可以得出以下计算式

$$y_{n+1} = y_n + \sum_{i=1}^N R_i K_i \quad (2-10)$$

其中  $K_1 = hf(t_n, y_n)$

$$K_i = hf\left(t_n + h \sum_{j=1}^{i-1} B_{ij}, y_n + \sum_{j=1}^{i-1} B_{ij} K_j\right) \quad (i = 2, 3, \dots, N)$$

式中  $B_{ij}, R_i$  为系数，且  $\sum_{i=1}^N R_i = 1$ 。

这种计算式称为自启动的  $N$  阶龙格—库塔法。当  $N = 1$  时为欧拉法；当  $N = 2$  时为改进欧拉法。通常采用的各阶龙格—库塔法计算公式的系数如表 2-1 所示。

表 2-1 各阶龙格—库塔法的系数表

| $N$ | $B_{ij}$                                                                                             | $R_i$                                                  | 通常采用的名称                |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------|
| 1   | 全为零                                                                                                  | $R_1 = 1$                                              | 欧拉法                    |
| 2   | $B_{21} = \frac{1}{2}$<br>$B_{21} = 1$                                                               | $R_1 = 0, R_2 = 1$<br>$R_1 = R_2 = \frac{1}{2}$        | 改进的隐式折线法<br>改进的欧拉法或海恩法 |
| 3   | $B_{21} = \frac{1}{2}, B_{31} = -1$<br>$B_{32} = 2$                                                  | $R_1 = R_3 = \frac{1}{6}$<br>$R_2 = \frac{2}{3}$       | 三阶龙格—库塔法               |
| 4   | $B_{21} = \frac{1}{2}, B_{31} = 0$<br>$B_{32} = \frac{1}{2}, B_{41} = 0$<br>$B_{42} = 0, B_{43} = 1$ | $R_1 = R_4 = \frac{1}{6}$<br>$R_2 = R_3 = \frac{1}{3}$ | 四阶龙格—库塔法               |