

浙江大學出版社
賀益康 編著



交流电机调速系列教材之二

交流电机调速系统 计算机仿真

(浙)新登字10号

内 容 简 介

本书是校际联合编写的交流电机调速技术教育丛书之二。

计算机仿真技术是现代工程设计、产品开发研究的新型手段,在交流电机调速系统的研究、分析、设计、运行中得到了广泛的应用。本书介绍交流电机(异步电机、同步电机)各类调速系统采用数字计算机进行仿真的基础、原理、方法、技术。

全书共分五章。前三章分别介绍计算机仿真的基本概念,仿真中应用的数学基础以及交流调速系统仿真中采用的交流电机数学模型。第四、五章详细地讨论了各类交流调速系统时域模型及复域模型的仿真方法和实用程序。

本书可作为电机、电力拖动自动控制、电力电子技术专业研究生的教材或教学参考书,还可作为电气工程师进修提高的学习用书。对于从事电机、电气传动系统设计、研究、运行的工程技术人员也有较好的参考价值。

交流电机调速系统计算机仿真

黄益康 编著

责任编辑 龚建勋

浙江大学出版社出版

浙江良渚印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

850×1168 1/32 印张: 14.5 字数: 364千字

1993年3月第1版 1993年3月第1次印刷

印数: 0001~1500

ISBN 7-308-01173-9

TP·086 定价: 4.65元

前 言

交流电机调速是现代电气传动的主要发展方向，它对提高电气传动系统运行性能和节约能源具有重要意义。但交流电机调速技术比较复杂，是一门新型交叉学科，牵涉到电机、电力电子技术、电气传动自动控制和计算机仿真等几个方面。我国以前由于高等院校专业设置内容偏窄，工程技术人员要全面深入地掌握交流电机调速技术往往比较困难。为此，浙江大学组织校内外有关专家编写了《交流电机调速系列教材》，全面系统地对交流电机调速技术进行介绍，本书是该系列教材的第二本。

计算机仿真技术是应用电子计算机对所研究对象的数学模型进行计算和分析，以替代对实际系统进行实验、研究的新方法，是现代工程设计、产品研究开发的新型手段，具有巨大的优越性。目前国际上交流电机调速系统的研究、分析、设计中已广泛采用了这项技术，国内也开始了这方面的研究。为帮助高等院校有关专业学生学习、掌握交流电机调速系统的计算机仿真技术，编著者根据近几年在浙江大学电机系从事科学研究和研究生教学的成果和经验，参考有关资料，编著出本书。根据学科交叉的特点和读者的需要，编写中着重注意了本书的基础性、综合性和实用性。既有理论分析，又有实践应用，附录中的程序可直接用于实际问题分析。

全书共分五章。前三章为基础部分，分别介绍了计算机仿真的基本概念，计算机仿真中应用的数学基础，以及交流调速系统仿真中采用的交流电机数学模型。第四、五章为应用部分，详细

地讨论了各类交流调速系统时域模型及复域模型的仿真方法，并给出了实用的仿真程序及算例。

本书可作为电机、电力拖动自动控制、电力电子技术专业研究生和高年级本科生的教材或教学参考书，还可作为电气工程师进修提高的教学用书。对于从事电机、电力传动系统及机电一体化产品开发、设计、研究、运行的工程技术人员也有较好的参考价值。

本书是在系列教材主编、浙江大学许大中教授(博士生导师)组织和指导下编写的。全书由浙江大学吴兆麟副教授审阅，他对本书的内容安排、具体提法、书写错误都提出了宝贵的修改意见。对于他们对本书的贡献深表衷心的感谢。

由于编著者水平和篇幅的限制，本书存在的错误和疏漏之处，恳切希望广大读者批评指正。

编著者

1992年3月

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1-1 仿真的基本概念	(1)
§ 1-2 计算机仿真在交流调速技术中的应用	(14)
第二章 计算机仿真中应用的数值方法	(16)
§ 2-1 调速系统数学模型的形式及其转换	(16)
§ 2-2 状态变量方程数值解法	(36)
§ 2-3 数字仿真中的计算稳定性问题	(89)
第三章 交流电机的数学模型	(96)
§ 3-1 任意速坐标系理论	(96)
§ 3-2 异步电机的数学模型	(110)
§ 3-3 同步电机的数学模型	(129)
第四章 交流调速系统时域模型的仿真	(143)
§ 4-1 基础变换的状态空间方法	(145)
§ 4-2 异步电机调压调速系统的仿真	(168)
§ 4-3 六阶梯波逆变器—异步电机变频调速系统的仿真	(198)
§ 4-4 脉宽调制型逆变器(PWM)—异步电机变频调速系统的仿真	(239)
§ 4-5 异步电机串级调速系统的仿真	(259)
§ 4-6 晶闸管无换向器电机的仿真	(268)
第五章 交流调速系统复域模型的仿真	(295)
§ 5-1 结构图法仿真	(296)

§ 5-2 离散相似法仿真	(307)
参考文献	(330)
附录	
附录一 程序《 STAEQ·FOR 》	(332)
附录二 程序《 PLOT·BAS 》	(336)
附录三 程序《 AUGMAT·FOR 》	(343)
附录四 程序《 SSVCM·FOR 》	(346)
附录五 程序《 TSVCIM·FOR 》	(360)
附录六 程序《 INVIM·FOR 》	(373)
附录七 程序《 VSIIM·FOR 》	(385)
附录八 程序《 CSIIM·FOR 》	(391)
附录九 程序《 PWM·FOR 》	(404)
附录十 程序《 PWMIM·FOR 》	(415)
附录十一 程序《 SKDS·FOR 》	(423)
附录十二 程序《 SCSM·FOR 》	(427)
附录十三 程序《 BLOCK·FOR 》	(446)
附录十四 程序《 DTS·FOR 》	(450)

第一章 绪 论

§ 1-1 仿真的基本概念

一、仿真的定义

交流电机以及由它们构成的调速系统是一种其输入、输出及内部状态量都处于连续变化的动态系统。对于这样一个连续动态系统的分析、研究，通常有三种方法可以采用：理论分析，实物试验，系统仿真。

理论分析是应用一些基本的物理规律，对所要进行分析的对象写出描述它们运动规律的数学方程式，然后运用拥有的数学知识和实际运行条件，对数学方程式进行理论计算，求得它的解答（这种解答一般为解析解形式），进而分析系统的品质、特性、性能等。这种研究方法花费很少，也很省时间。但是，由于理论本身的局限性，理论分析大多比较麻烦，有的情况下难以求得解析解答。为此，往往在求解过程中采取一些假定和近似，使条件理想化，这也就使得理论分析的结果与系统实际特性之间会产生较大的误差；如果一些被忽略的次要因素在某种条件下变得占主导地位，理想化条件下的理论分析所产生的巨大误差甚至会导致错误的结论，这是理论分析方法的不足之处。但是，合理假定和近似条件下的理论分析结果仍揭示了系统物理过程的内在规律，具有普遍性，其结论可以指导一般。如辅之实物模型进行中间试验，可给实际系统分析和研究提供可靠的依据。

实物试验是对真实系统或试验对象进行实际特性测试、试验分析。这个真实系统可能是已有的或者是为研究的需要而试制的

中间样机。这种研究方法可对理论分析、工程设计提供实践的验证，也可从中发现新的现象、新的规律。实物试验的困难所在是要真正地建造一个实际的系统，这要花费大量的人力、物力和时间，而且一次性成功的把握也不大，随意改变已成型系统的结构、参数就更加困难。有时由于条件的限制很难或者根本不允许在实际系统上进行某些实验，否则将造成整个实际系统的永久性破坏。再者，在一个系统未建造起来之前也是不可能采用实物试验的方法来进行研究的。一种解决的办法是建立起所需研究的系统的模型而不是实际系统本身，用对系统模型的计算、测试来替代对实际系统的实验研究。这种基于模型而不是基于真实系统的研究方法就叫仿真或模拟。

系统仿真的基础是真实系统模型。模型是实际系统（原型）在某些特定条件下的真实体现或描述，通过对它的分析、研究，可以使对系统原型的分析、研究更集中、更深刻。系统仿真中采用的模型有两种：物理模型和数学模型。物理模型是用缩小或放大的尺寸，制作与原型相同的物理系统，因而模型的变量与原型（真实系统）的变量完全相同，也就保留了真实系统的物理本质，唯一差异只是数量上的大小不同。例如研究电力系统时，我们可以用许多缩小容量的同步电机、异步电机、直流电机、变压器，开关等元件构成一个电力系统的模型，然后进行模拟真实系统中所发生过程的实验研究，这个电力系统的动态模拟装置就是电力系统的物理模型。数学模型则是运用数学工具对实际系统运动规律进行描述而形成的一些数学方程式，它们通常可能是高阶微分方程式、状态变量方程式（一阶微分方程组）或传递函数。它们表达了所研究系统运动过程各量间的关系，是分析、综合系统的依据。

依照所基于的模型不同，仿真方法又可以分为两类，即基于物理模型的物理仿真和基于数学模型的数学仿真。物理仿真的最

大优点是仿真中保持了系统原型的物理本质，能观察到难以进行数学描述和不可能包含在数学方程式中但真实过程又具有的现象，如非线性及某些次要因素等。然而物理仿真具有相当大的局限性：不同研究对象需要建立各自不同的物理模型，而建造一个系统的物理模型一般都要消耗大量材料和花费巨大精力，不但制造周期长，进行一次仿真研究的准备工作也十分繁重。每当被研究对象的参数改变时，往往就得进行模型的改装甚至重建，这就大大限制了物理仿真的应用范围。物理仿真一般用于系统中影响因素复杂或无法预测，而实际系统又十分重要，关系到国计民生、人民生命财产安全等重要领域，如航空动力工程、水力工程、土木建筑工程等。

数学仿真要比物理仿真优越得多。在数学仿真中，模型与原型各自基于的物理现象本质可以不同，但具有相同的数学描述，即遵循同一数学方程式所描述的变化规律。由于数学仿真是以不同物理系统在数学描述上的相似性为基础进行的，完全脱离了实际系统特有的物理本质，因而可以用同一仿真工具（如计算机）来解决不同类型问题的研究。进行数学仿真研究所需做的全部工作只是在仿真装置中建立所谓的仿真模型以及使这个模型在仿真装置中“运转”的过程，这比建造一个物理模型所需投入的大量制造、安装、调整、试验等工作容易得多，周期短得多，花费也少得多。而且一旦对某个对象的研究工作完成，模型“拆除”，仿真设备依然完好，可以继续进行其他对象的研究，十分灵活。这就是数学仿真应用广泛、具有强大生命力的原因。

数学仿真的基础是数学模型，但从一个实际系统抽象出数学模型还只是第一步，因为这一步仅仅是将所研究的实际系统变成数学方程式，是第一次模型化过程，称之为系统取模。系统取模的方法可以是理论推导，也可以采用系统辨识来实现。得到的数学模型必须使用一定的仿真工具才能求解，将已获得的数学模型

变成能在一定仿真工具中进行运算求解的仿真模型，这是第二次模型化过程。从严格的意义上讲，系统仿真指的是第二次模型化过程。

二、计算机仿真

如果数学仿真中采用的仿真工具是能够进行独立数学运算的计算机（模拟计算机或数字计算机），那么这种方式的仿真就是计算机仿真。所以计算机仿真就是将一个描述实际系统的数学模型通过第二次模型化，变成一个能够采用计算机运算求解的仿真模型（模拟计算机的模拟结构图或数字计算机的源程序），并在计算机内进行“运转”（解算）的过程，以此获得有关实际系统的定量信息、数据或资料，深化对实际系统的认识和研究。计算机仿真的全过程和它在科学研究及工程设计中的作用可用图 1-1 来说明，即

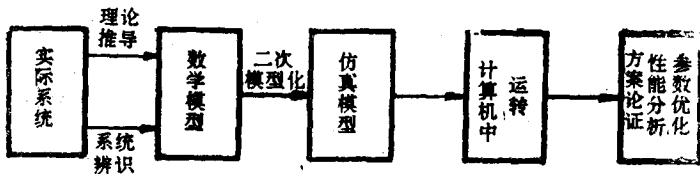


图1-1 计算机仿真全过程

- (1) 建立描述实际系统的数学模型；
- (2) 经二次模型化建立仿真模型；
- (3) 仿真模型在计算机内“运行”，有必要再根据技术要求修改仿真模型并校验；
- (4) 分析仿真运行结果，为研究、分析、设计和调整所研究的实际系统提供可靠的信息、数据。

可以看出，计算机仿真是在数学模型基础上，利用计算机作工具进行实验研究的一种先进方法，是建立在系统科学、系统辨

识、计算机技术和控制工程基础上的一门综合性很强的实验科学技术，是分析、综合各类系统，特别是复杂大系统的一种有力研究手法和工具。由于计算机仿真具有巨大优越性，应用普遍，我们一般所说的仿真都是指计算机仿真。

根据仿真中所采用的计算机类型的不同，计算机仿真可分为模拟仿真、数字仿真、混合仿真及全数字并行仿真。

(一) 模拟仿真

采用模拟计算机作为仿真工具所进行的仿真称为模拟仿真。

模拟计算机是一种连续变量的解算装置。它将被研究系统的各种物理量用机器电压来表示，通过由模拟电子器件构成的各种运算部件（如加法器、反号器、乘法器、积分器、比例系数器、非线性函数发生器等），进行模拟量的连续解算。

模拟仿真时，首先根据所研究系统的数学模型，用连续积分、降阶求解的方法变成仿真模型——模拟结构图，再选择合适的变量幅值比例尺，使实际系统变量与机器电压之间建立数量上的折算关系，然后将计算机中有关的运算部件按比例尺化后的模拟结构图进行连接（排版）。通过上机调试、运行，获得仿真结果。下面通过一个简单的例子说明模拟仿真的过程。

图1-2为一机械谐振系统，由质量为 M ，阻尼系数为 B 、弹性系数为 K 的几个物理元件构成。在外力 $F(t)$ 作用下系统的运动规律可以用位置 $x(t)$ 作变量的二阶微分方程来描述

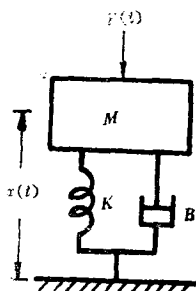


图1-2 机械谐振系统

$$M \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + B \frac{dx(t)}{dt} + Kx(t) = F(t) \quad (1-1)$$

$$\text{初始条件为 } \left. \frac{dx(t)}{dt} \right|_{t=0} = 0, \quad x(0) = x_0$$

为了将系统的数学模型（微分方程式）经二次模型化变成仿真模型（模拟结构图），考虑模拟仿真中采用连续积分、降阶求解的方法，故将系统微分方程改写成最高阶导数项放在等式左边，其他各项放在等式右边的形式

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} = -\frac{B}{M} \cdot \frac{dx(t)}{dt} - \frac{K}{M} x(t) + \frac{1}{M} F(t) \quad (1-2)$$

要求解这个方程式，需进行积分、加法、反号、乘以常数等各项运算，如采用模拟计算机进行解算，可将相应的运算部件按图 1-3 连接。图中，1——加法器，2、3——积分器，4——反号器。连接时注意到加法器和积分器等有源模拟运算部件的输出与输入有反相位关系，积分器积分运算时还要加上初始条件。最后，积分器3的输出 $x(t)$ 就是所要求的仿真结果，可用慢扫描

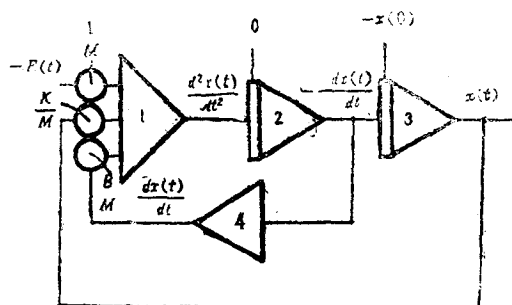


图1-3 机械谐振系统模拟结构图

示波器、多笔记录仪或 $X-Y$ 记录仪显示或记录下来。图 1-4 表示了 $K=40$, $M=20$, $B=5.656$ 及 $x(0)=x_0=0$ 时，在单位阶跃力 $F(t)$ 的作用下机械谐振系统位置 $x(t)$ 变化的仿真结果。这是一条随时间连续变化的曲线，形象地表示了单位阶跃外力作用下机械谐振系统的时域响应。

模拟仿真的突出特点是仿真结果非常接近于实际系统的真实

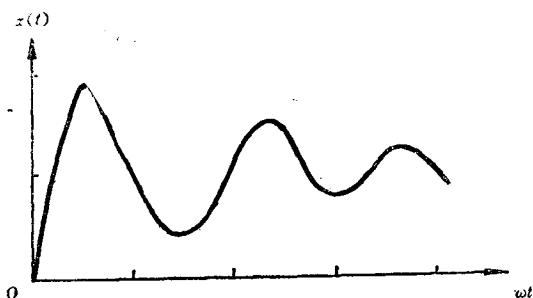


图1-4 单位阶跃力作用下，机械谐振系统位置的模拟仿真纪录

情况。这是因为模拟计算机采用机器电压代表实际系统的变量参加运算和输出结果，它是一个有正、负极性和连续变化的量，用它来描述连续系统的动态过程就显得特别自然、逼真，和真实系统在测试设备上观察到的波形几乎完全相同。此外，模拟计算机运算部件采用的电路及所用的信号很简单，人们可以通过系数电位器的设置、调节和运算部件连接关系的改变，方便而迅速地改变系统的参数和修改系统的仿真模型，即人机联系很方便。

模拟仿真的另一特点是运算速度快。这是由于模拟计算机中配置有众多的运算部件，而每一个运算部件都能独立地完成一种运算，使得解题过程中所有的运算都是在同一时间内平行地进行，这种“并行”工作方式决定了运算速度快。例如混合模拟计算机重复计算频率可达 $100 \sim 10000$ 次/秒，即在百分之一至万分之一秒内可获得一次完整的求解。这样，无论简单的小型题目或是复杂的大型题目，在运算时间上并无多大差别，几乎均是瞬时完成的。数字计算机的运算速度高是公认的，可达上亿次/秒，但这种“次”是指的机器码“0”、“1”的一次运算，而不是一次完整的解题。同时它的工作方式是一步步“串行”地进行运算，使得总的解题速度一般要比模拟计算机慢。模拟计算机的这

种快速性使它在实时和超实时仿真中具有十分重要的意义，因为实时仿真时仿真装置中有实物或半实物参加，仿真模型的时间尺度与实际系统的时间尺度完全一样，要求仿真计算机必须有极高的运算速度，才来得及与实物的响应速度相匹配。

模拟仿真的缺点首先是仿真精度不够高。影响模拟计算机解算精度有两个因素：一是运算部件的误差。模拟计算机各运算部件大多由直流运算放大器和无源运算网络元件构成，它们本身的误差及组合后的误差较大。二是计算机的机器电压大小有限（100V制的为100V，10V制的为10V）。用有限的机器电压来表示数值范围广泛的各种实际系统变量时，有限的分辨率将带来误差。模拟计算机的解算精度一般为0.1%~1%，由于工程上所给出的原始数据本身精度有限，在一般情况下这种解算精度还是可以满足工程实际要求的。

模拟仿真第二个缺点是需要进行比例尺化。由于模拟仿真中采用模拟计算机的机器电压来表示被研究实际系统的变量，而机器电压有一定的范围（100V或10V），因而有个实际系统变量与机器电压之间的幅度比例尺问题，即单位实际系统变量要用多少伏的机器电压来表示的问题。此外，如果想要将被仿真的过程加速或减慢以利观察、研究和记录，则还有个时间比例尺的问题。变量比例尺化是模拟仿真中易于混淆、出错和费事的工作，可以说是模拟仿真的不便之处。

除此之外，由于模拟计算机内缺乏相应的部件，使得模拟仿真中表现出模拟量的存储和逻辑判断功能差，产生多变量函数也十分困难，对于代数方程、超越方程的求解以及采样控制系统的仿真就更加困难。这些都是模拟仿真不足之处。

鉴于模拟仿真运算速度快、变更系统方案和改变参数容易、人机联系方便等优点，使得它更适合于科学研究或工程设计初步阶段的仿真分析，例如对方案可行性论证以及系统参数对系统性

能影响的研究等。因此模拟仿真在工程实践特别是与自动控制系统有关的领域中，如交流电机调速系统研究中，仍得到了广泛的应用。

(二) 数字仿真

使用数字计算机作为仿真工具所进行的仿真叫数字仿真。数字计算机是一种离散量的计算装置，它将实际系统数学模型中连续变化的物理量离散成一组组二进制码表示的数字量，经过机器码的运算求得数学模型的解答，输出一组组时间离散节点上的数值解答。

在数字仿真中，仿真模型是以程序的形式出现，因此进行数字仿真首先需要编写源程序。仿真程序可以用诸如 BASIC、FORTRAN、ALGOL 等通用计算机语言来编写。有时仍嫌不够方便，在 FORTRAN 和其他语言基础上创造了很多专门适合数字仿真的所谓“仿真语言”。适合连续动态系统仿真语言有 CSMP、CSS、CSSF、CSSL、ACSL、MIMIC、SIMULA 等。由于一条仿真语言可以独立完成一种数学运算，因此使用方便，写出仿真程序简炼，大大缩短编程时间，在数字仿真中越来越受到广泛应用。由于仿真语言需要有专门的软件配置，目前还不够普遍，因此本书的数字仿真中，仍采用最普及的 FORTRAN 语言来编写源程序。

由于数字计算机是应用二进制数码表示数值大小的一种数字运算装置，所以在数字仿真中首先都要用数值计算方法(算法)，将描述实际系统的数学模型转换成数字计算机能够实现运算的仿真程序，这也就是数字仿真时的仿真模型。然后输入计算机，由计算机逐条执行计算，完成仿真任务。

仍然以图 1-2 的机械谐振系统为例来说明数字仿真的过程。

为了便于仿真程序的编写，将式 (1-2) 改写成如下形式：

$$\ddot{x} = -\frac{B}{M}\dot{x} - \frac{K}{M}x + \frac{1}{M}F(t) \quad (1-3)$$

这样, 采用逐次积分的方法, 可以逐步降阶求得方程解答,
即

$$\dot{x} = \int_0^t \ddot{x} dt + \dot{x}(0) \quad (1-4)$$

$$x = \int_0^t \dot{x} dt + x(0) \quad (1-5)$$

其中初始条件为 $\dot{x}(0) = 0$, $x(0) = x_0 = A$ 。

在数字仿真中, 积分运算是采用数值积分方法, 诸如欧拉法、预报—校正法、龙格—库塔法、阿达姆斯法等。选定了积分

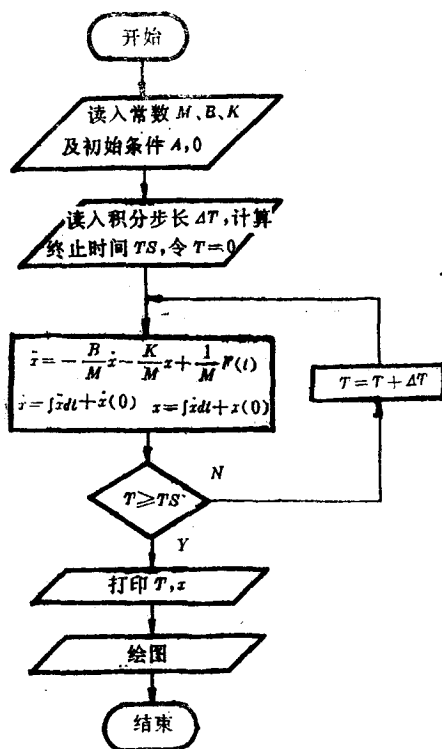


图1-5 机械谐振系统数字仿真框图

算法,根据式(1-3)至式(1-5),就可以编写出这个机械谐振系统的仿真程序,其程序框图可如图1-5所示。

如果将仿真程序键入数字计算机,通过编译、连接后就可送入数据运行,其计算结果往往为时间节点 $K\Delta T$ ($K=1,2,3,\dots$)上,位移量 x 的一组组离散的数值解答,很不直观。为此,常引入绘图程序,将仿真结果以随时间变化曲线的形式给出。

归纳起来,数字仿真的大致过程是:

- (1) 建立被仿真系统的数学模型;
- (2) 将数学模型经数值计算方法改造成仿真模型;
- (3) 编写仿真程序;
- (4) 键入并运行仿真程序,获得仿真结果。

数字仿真的最大优点是仿真精度高。这是因为数字计算机运算部件无精度问题,也不象模拟计算机那样受机器电压大小的限制,只要增加字长就可以把数值达到所需精度,其精度可高达千万分之一至百万分之一。但是值得注意的是数字仿真的精度还与计算方法有很大关系。求解连续动态系统数学模型中的微分方程式要进行积分运算,积分运算的精度一方面取决于所采用的数值积分方法,另一方面还和所用积分步长有关。不适当的数值积分方法将产生很大的计算误差,严重时会产生计算不稳定现象而导致计算失败。

数字仿真其他方面的优点也是和数字计算机的特点紧密联系在一起。由于数字计算机的硬件具有浮点运算功能,使机器所能表达的数值范围极大,有如 $10^{-38} \sim 10^{+39}$ 之广。因此使用数字计算机仿真时,不必担心被仿真对象实际变量的大小,因而没有幅度比例尺的问题。在大多数情况下也不需要时间比例尺,因为积分计算步长是可以选择的。此外数字计算机逻辑运算功能很强,可以写出很多逻辑判断语句来进行条件转移,这对于系统的数学模型不仅仅是由一些微分方程所构成时更具有重要意义。