

系统仿真是一项应用技术,离不开应用需求的驱动,更与控制工程、系统工程及计算机等技术的发展密切相关。当前,各应用领域对系统仿真提出了更高的要求,迫使人们对仿真的相关理论和方法进行更为深入的研究,相继提出了一系列新的技术方案,同时也总结出了相应技术实现的有效途径。

本章将在介绍仿真基本概念和仿真验证的基础上,重点介绍连续系统数值仿真方法,分析蒙特卡洛仿真的基本原理,并结合数字通信系统的特点给出二进制通信系统的准解析(QA)法,最后简要介绍离散事件系统仿真基本策略。

5.1 仿真的基本概念

鉴于条件的约束与限制,当前各应用领域对系统仿真的要求主要包括:

- (1) 提高仿真的逼真性、可靠性和精确性。
- (2) 提高仿真的效率。
- (3) 改进仿真系统的体系结构。

为了满足这些要求,人们相继提出了一系列新的技术方案,并总结出了相应理论和方法。

5.1.1 仿真的策略

建立并运行系统仿真,需要解决很多具体的问题,归纳起来,可以分为“艺术性”和“科学性”两大类。其中,系统仿真的科学性包含理论分析和定量分析等多方面的知识,而仿真的艺术性则是仿真过程各种技巧的综合,合理地使用这些技巧,对于构建、运行仿真系统至关重要,而关于如何构建和怎样运行仿真系统的理论,实际上就是系统仿真的方法论。

1. 仿真与分析

理想的仿真系统应该是实际系统的完美复制品,因此,要实现这样的系统,需要较高的仿真成本,也就是需要构建更为复杂的仿真模型,以及调用尽可能多的计算机运行时间和存储空间等。但是在实际设计过程中,需要在限定的条件下建造符合实时要求和近似度要求的模型,这正是系统仿真的艺术性所涉及的内容。传统的系统分析也是对系统描述的一种有效方式,与仿真相比,系统分析同样包含对系统的近似处理,但是,二者在系统描述方面仍

然存在较大的差异。主要表现在以下几方面。

(1) 动态特性。

在分析过程中,典型的计算就是用数来代表某个感兴趣的物理量;而在仿真中,系统模型的输入是随时间动态变化的。仿真系统可以提供动态特性,而分析系统则不能,这是两者在动态特性方面的区别。这一点在工程设计上是十分重要的,因为,仿真系统的动态特性可以实现对系统不同状态、不同观测点的检测,从而使设计者能够对系统开展更为深入和具体的研究。

(2) 模型构建。

在仿真过程中,模型可以根据实际系统的具体情况进行构建,约束程度较小;而在分析过程中,由于采用解析法进行处理,因此,模型通常按理想方式进行构建。

(3) 灵活性。

仿真的另一个优点就是它的灵活性,在不影响系统中其他部分性能的前提下,它可以改变某一部分的特性;而在分析系统中,只要改变系统中的某一部分就必须对整个系统进行重新分析。仿真的灵活性使系统的设计者实现了对系统从始至终的跟踪。通过对系统中元件的更新,以及性能指标的改善,系统模型也得到了相应的更新和改善。当然,如果一个系统模型可以提供足够深刻和精确的研究,那么系统也可以通过分析得到准确的系统描述。因此,在解决具体问题时,通常都是将仿真与分析结合起来运用的。

2. 复杂系统的处理

实际的系统通常是较为复杂的,因此,很难完整、无偏差地实现仿真。这时只有在允许的近似范围内,以较为简单的形式建立系统模型,才能实现对系统的仿真。归纳起来,实现系统仿真通常采用以下两种方案。

(1) 以某种方式降低模型描述的复杂程度。

(2) 将一个大问题分解为多个小问题。

为了说明上述两种处理复杂系统的思想,下面以一个时间离散系统为例进行说明。

设某时间离散系统的输出为 V_t , 可表示为

$$V_t = h(\Omega) \quad (5-1)$$

其中, h 表示系统的传输特性, $\Omega = (Z_1, Z_2, \dots, Z_k)$ 表示离散的输入序列,仿真的目的就是要得到一组序列输出。按照方案一的思路,可以简化系统模型,实现降低模型描述的复杂程度。这时简化了的系统可以表示为

$$V_t = h'(\Omega) \quad (5-2)$$

式中, h' 表示降低了复杂程度的系统传输特性。

方案二实际上是将一个大问题转化为简单形式,由一个或几个条件实验来完成。其条件实验产生的输出为

$$V_t = h(\Omega'_l) \quad (5-3)$$

式中,用 $\Omega'_l = (Z_1 = \xi_1, Z_2 = \xi_2, \dots, Z_l, Z_{l+1} = \xi_{l+1}, \dots, Z_k = \xi_k)$ 来表示 $\Omega = (Z_1, Z_2, \dots, Z_k)$ 。

利用 Ω'_l 来替代 Ω 表明,离散的输入序列为某种确定条件下的输入,因此,这个实验也称为条件实验。这种条件实验简单、省时,其结果更容易理解,例如,线性时不变系统的全响应通常可以用零输入响应和零状态响应之和来表示。如果这类条件实验经过多次实验,并证明可以提供足够的实验数据,就可以替代由式(5-1)所得到的实验结果。当

然,也可以将第一、二种方案合理结合,构建出简化系统的条件实验方式,即

$$\mathbf{V}_t = \mathbf{h}'(\boldsymbol{\Omega}') \quad (5-4)$$

总之,系统模型的建立,需要综合考虑系统实际设计与具体实施情况。

5.1.2 通信系统分层仿真

根据复杂系统的仿真处理策略,对于复杂的通信系统,例如卫星网通信系统,通常采用分层的形式来进行描述,以实现复杂通信系统的简单化处理。例如,可以将通信系统顶层设置为通信网络层,中间层设置为通信链路层,低层设置为各个模块单元。具体分层描述方式如图 5-1 所示,各层的仿真目标、方法和工具各不相同。

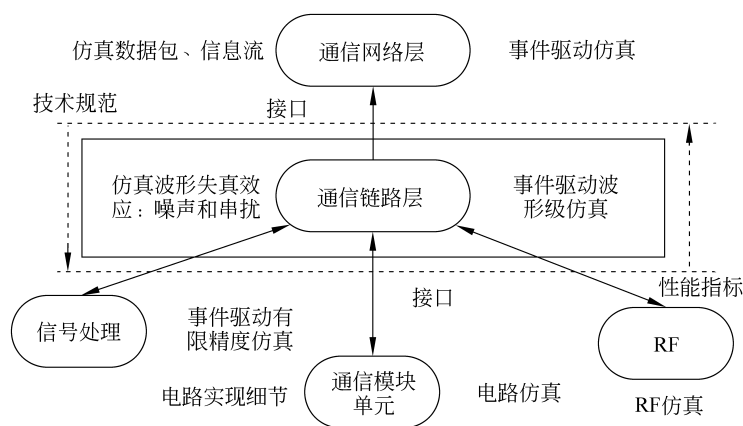


图 5-1 通信系统仿真分层描述形式

1. 通信网络层

从图 5-1 可以看到,在通信系统模型案例当中,通信网络层在最高层,它由通信节点(处理机)通过通信链路或传输系统相互连接构成。在通信网络层仿真时,网络上的数据包和信息流以事件形式来驱动系统仿真,因此,属于离散事件系统仿真。为了进行这类仿真,首先需要确定的网络主要技术参数,这些参数包括处理机速度、节点上缓存器的大小和链路容量等;然后,再利用已知的网络参数,测试网络的性能指标,主要包括网络吞吐率、响应时间等;最后,根据这些性能指标建立网络通信协议,确定链路数据技术规范。目前,常用的通信网络层仿真软件主要包括 NS-2、OPNET 等。

2. 通信链路层

通信链路层在通信网络层之下,由各类通信模块单元组成。链路层仿真得到的性能参数,可以上传给通信网络层,用来验证通信网络的性能。数字通信链路层研究的主要对象是信道、调制方式、编码方式等,其性能通常用误码率来表示。由于上述内容的研究形式多种多样,因而误码率可以通过在对应通信过程中的波形仿真得到,这种仿真通常采用蒙特卡洛原理。目前,常用的仿真软件包括 SystemView、Matlab(Simulink)、SPW、COSSAP 等。

3. 通信模块单元

通信链路层由一些模块单元组成,这些模块单元包括调制器、编码器、滤波器、放大器、解码器和解调器等;其类别可以是模拟电路、数字电路、可编程阵列、数字信号处理芯片等,根据它们各自的特点进行不同的仿真分析研究,目前,所常使用的软件工具包括 Spice、

HDL、DSP、RF 仿真软件等。

上述通信系统分层仿真策略,不仅降低了通信系统模型描述的复杂程度,也将大问题分解为多个小问题,在保证系统仿真逼真性、可靠性和精确性的同时,提高了仿真的效率。

5.1.3 案例：链路层仿真

利用计算机辅助技术对通信系统性能进行估计时,需要考虑估计精度与计算机运算量之间的折中,因此,对通信系统的性能估计和“折中”问题,将成为通信系统仿真研究的重点。上一节通过对复杂通信系统分层处理,简化了系统仿真过程,本节将以链路层仿真为例,分别利用系统分析(公式计算)和系统仿真进行比较研究。

1. 系统分析

系统分析也称为解析分析,是建立在简化系统模型基础上的。它利用确切的公式,计算出设计参数和系统性能之间的对应关系。例如,在计算通信系统性能,如误码率时,通常假设信道中的噪声是加性高斯白噪声,接收滤波器满足线性特性。当 2PSK 信号采用同步检测时,系统误码率可以表示为

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{r}) \quad (5-5)$$

式中, r 为输入解调器的信噪比。

上面对信道特性、噪声特性和滤波器的假设,实际上就是对系统模型的简化和理想化。从这个例子中可以看到,利用公式计算法很难准确评估复杂的通信系统性能,但是在系统设计的初期阶段,利用它可以给出通信系统性能的概括性分析。

2. 系统仿真

当采用系统仿真的方法评估通信系统性能时,可以按需求建立各种形式、各种复杂程度的系统模型。与解析分析法相比,设计者的想象空间得以最好地利用和发挥,因为利用系统仿真可以轻易地将数学模型和经验模型结合在一起,同时还能够把测试器件和实际信号组合到一起,进行深入细致的分析和设计;不仅如此,还可以利用仿真所产生的波形测试和验证硬件的功能。但是,系统仿真也有它的不足之处,主要表现在计算量过大,需要强大的计算机仿真平台的支撑,不过这个缺陷可以通过合理地选择建模和仿真技术予以缓解,这也是本书研究的重要内容。

3. 案例分析

通信系统的形式是多种多样的,为了说明通信系统仿真方法所涉及的问题,首先来考察一个数据通信系统的模型,如图 5-2 所示。

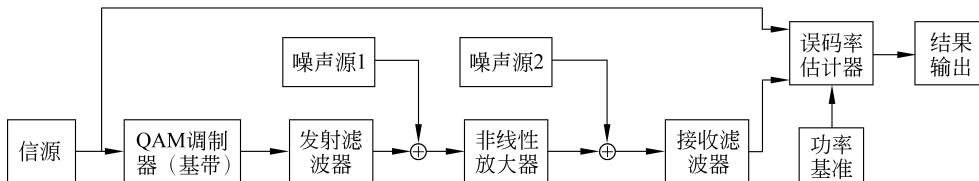


图 5-2 数字通信系统仿真模型

图 5-2 中的数据通信系统性能估计,实际上就是确定系统误码率与滤波器参数、非线性放大器参数以及信噪比之间的函数关系。在图 5-2 中,由于存在发送滤波器和非线性放大

器,使得利用解析分析法评估该系统的性能变得十分困难。不仅如此,带限滤波器所造成的码间串扰,以及噪声经过非线性放大器所导致的非高斯和非加性效应,都使得利用解析分析法对系统的描述变得不太可能。因此,只能利用系统仿真法对图 5-2 的系统模型进行研究,具体研究过程如下。

- (1) 产生输入过程(波形)的采样值,包括信源和两个噪声。
- (2) 利用滤波器和非线性放大器模型处理输入的采样值,产生系统输出采样值。
- (3) 通过比较输入序列的仿真值和输出波形来估计误码率。

为了简化系统仿真的复杂度,可以适当地引入解析分析对系统进行描述与分析。此时需要对某些功能模块进行必要的近似,具体近似内容如下。

- (1) 假设两个噪声源均服从正态分布。
- (2) 忽略发送滤波器和非线性放大器对系统的影响,将两个噪声源合并,并将这两个噪声源的总效应当做加性高斯噪声源处理,构成简化后的系统仿真框图,如图 5-3 所示。

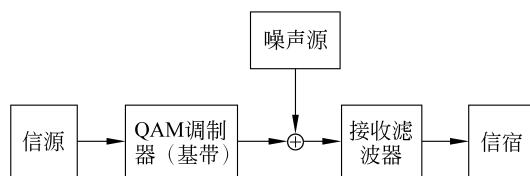


图 5-3 数字通信系统简化仿真分析模型

上述这些简化将会影响性能分析的精度,但对于得到系统性能的初步评估是非常有效的。无论是对图 5-2 所示的通信系统采用系统仿真法,还是对图 5-3 所示的通信系统采用简化仿真分析法,它们对通信系统设计和工程实现都能起到各自的重要作用。

除了上述两种方法外,在系统设计的后期,经常会制造出系统中部分重要的子模块来确定通信系统总体性能,这就是硬件样机测试研究方法。这是一种精确、可靠的系统性能测试研究方法,但是通常造价较高,研制周期较长,并且很不灵活。当设计的可选择对象较多时,这种方法显然是不可取的。

5.1.4 通信系统性能评估

系统仿真研究通常关系到两方面的问题,其一是系统模型的构建,其二是系统性能评估。其中第一个问题已经在前面章节中进行了讨论,本节将以链路层仿真为例,重点讨论系统仿真时的另一个重要问题,也就是如何评估系统仿真的性能。

1. 估计精度与仿真时间

在能够准确构建完美系统模型条件下,如图 5-2 或图 5-3 的模型所示,如果对运行时间和计算机存储没有限制,那么利用系统仿真,就可以准确地评估系统的性能。这是由于在系统仿真过程中,需要测量的物理量是一个随机变量,仿真运行的时间越长,观察值与实际值就越接近,因此,仿真时需要综合考虑运行时间和测量精度的相互关系。以图 5-2 通信系统为例,如果单纯从运行时间上来考虑,为了估计系统的误码概率(误码率),则需要适时调整系统仿真时间。

例如,如果某一系统的误码率 p 为 10^{-5} ,那么这意味着每 10^5 个码元中就有可能出现 1 次误码。为了用系统仿真估计这个系统的误码率,仅仅观测 10^5 个码元是完全不够的,如果

观测多个 10^5 位产生的误码情况,估计的误码率就有可能接近真实情况,因此误码率 p 计算公式为

$$p = \frac{\text{误码数}}{\text{测定的总位数}} \quad (5-6)$$

当然,观测的位数越多,估计的误码率与系统真实情况越接近,但是这时仿真运行的时间也会越长。通过理论分析和实际验证得出结论,仿真的观测位数应当在 $10/p \sim 100/p$ 之间。因此,对于误码率 $p = 10^{-5}$ 的通信系统,依据 $10/p$ 对观测位数的定义,需要观测至少 10^6 位数据。对于实际系统,当已知码元速率 $R_B = 10000$ 波特,误码率 $p = 10^{-5}$ 时,出现 10 个误码的大概观测时间可以利用下式得到

$$T = \frac{10}{R_B \times p} = \frac{10}{10000 \times 10^{-5}} = 100(\text{s}) \quad (5-7)$$

从式(5-7)可以看出,实际通信系统的参数误码率 p 的确定并不需要太长的系统运行时间。但是当仿真系统比较复杂,运算量较大时,由于仿真时需要计算每一位码元通过仿真系统的情况,时间就会变得比较长。例如,同样考虑上述误码率为 10^{-5} 的数字通信系统,假设仿真时每一位码元通过仿真系统的运行时间为 0.1s ,要让 10^6 位测试数据经过系统,则需要 10^5s 的运行时间。进一步设想,当系统的误码率更低时,仿真运行时间会急剧增长。这时,选用正确的性能估计方法,对于估计系统的误码率显得尤为重要。

2. 方法改进

(1) 基于高斯和线性的处理。

很显然,简化系统和简化操作可以减少仿真的运行时间。例如,当系统为线性系统时,不仅可以采用系统仿真法对系统的误码率进行估计,还可以利用解析分析法去替代耗时的仿真处理。不仅如此,甚至可以根据高斯随机过程所具有的特性来简化系统,这是因为高斯随机过程通过线性系统后其分布仍然满足高斯分布。因此,在仿真时经常假设噪声满足高斯分布,就是基于上述原因。根据上述假设与分析,在整个系统仿真时,可以将解析分析法与无噪声系统仿真结合起来,以获得有效的误码率估计。这种将解析知识与仿真方法结合的技术,就是准解析(QA)技术。在后面章节中,我们将详细分析 QA 的工作原理。

(2) 基于快慢过程的处理。

当一个系统性能由两个时间变化率不同的随机过程决定时,也可以利用某种改进的性能估计法,来提升系统性能的估计效率。例如,可以将这两个随机过程分为“快”过程和“慢”过程。在通信系统中,快过程可能是热噪声,而慢过程可能是衰落等随机过程。如果后者变化得足够慢,那么就可以认为它在信号传输过程中近似保持为稳定的状态。接收到的波形的变化可以看作时间分段的序列,每个时间段内的慢过程不同,但是固定不变。这时可以利用这些信号段中的某一段建立仿真系统,进而得到基于某一条件的仿真系统。最终系统性能值由各个条件下性能值的平均值来确定。这种方法可以用于慢衰落信道中的高速传输系统仿真。

(3) 有限记忆功能的应用。

在许多性能评估方法中,还使用另一种简化方式,即假定系统具有有限记忆功能。所谓有限记忆功能的系统是指,对于任意时刻,只考虑输入数据的有限长度对系统的作用,其他数据对此刻系统输出没有任何影响。根据这个假设条件,可以相应地修改仿真实验的模型。

仿真时,不必采用连续的信号和噪声波形,而只要将一组数据送入仿真系统即可。这组数据的长度至少为系统所能记忆的长度,这种仿真方法被称为批仿真方法,而与这种方法对应的仿真被称为“流”仿真。以研究通信过程中的码间串扰为例,假设串扰仅影响后 3 个码元,这时系统则具有长度为 4 的有限记忆能力。根据 m 序列的特点,只需要 4 位移位寄存器,产生周期 $p=15$ 的 m 序列,就可以将所有可能的 4 位码元组合表示出来,进而完成码间串扰现象仿真再现。

当然,在这里不可能将影响仿真性能评估的各种因素都进行详尽分析,因此,在实际工作中需要从具体系统应用进行考虑,选择关键的性能指标,采取科学有效的方法进行评估。

5.2 系统仿真验证

系统仿真验证就是研究系统仿真结果与正确结果的接近程度,但是需要注意,接近的标准与应用的具体目的有关,同时还带有一定的主观性。实际上,在系统仿真时,事先并不知道将要处理的系统的具体性能和特征,因此,系统仿真的验证可以在实际系统已经给出或完成说明后再进行。当然,还可以独立于特定系统对系统仿真中的单元进行验证,这些单元是构造系统模块的基本部分,例如,对某一滤波器性能进行验证等。

系统仿真的验证过程可以采用多种方法来实现,并且还可以在不同难度层次上进行。对于系统仿真的验证,根据验证的对象不同,主要包含以下几方面内容。

- (1) 设备或子系统模型的验证。
- (2) 随机过程模型(简称过程模型)的验证。
- (3) 系统模型的验证。

图 5-4 说明了仿真各个组成部分之间进行验证的内在联系。“仿真环境”模块仅仅表示仿真所使用的软件,双向箭头表明验证过程是反复循环的,也就是说,如果某一仿真被证明无效,那么其产生的结果的某些方面必须改进,仿真过程必须重新开始。

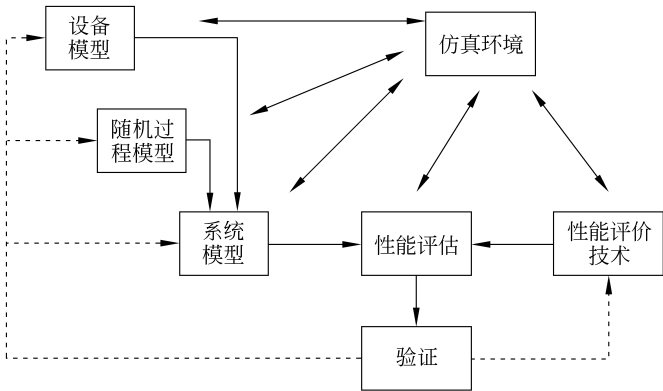


图 5-4 验证过程说明

5.2.1 设备模型验证

每一个仿真工具包都有一套具有不同功能的设备(器件)模型,这些设备模型的集合就

构成了模型库,例如 Simulink 中的模拟和数字调制模块等。如果模型库中所有的模型都被验证是有效的,那么就能够确定,由该设备模型组成的系统将有可能产生正确的结果。当然,这种“可能”建立在组成的系统是一个“好的”系统模型的基础之上。因此,验证仿真系统有效性的第一步,就是分别验证模型库中各个设备模型的有效性。下面就以一个理想的具有 5 个极点的切比雪夫滤波器(5PC)为例,说明设备模型的有效性验证。

在这里,假设 5PC 滤波器是实际器件的准确描述。为了能够精确地描述这种滤波器,可以采用复频域内的多项式 $H(s)$ 表示。显然,利用 $H(s)$ 模型化的滤波器可以达到仿真的目的。 $H(s)$ 只是该滤波器的数学抽象仿真模型,它由一系列方程或算法组成。计算机是实现数学抽象仿真模型的工具,但是计算机仿真是利用设备模型进行表述的,由于存在处理误差,计算机仿真模型不能够完美地再现数学抽象模型。例如,即使 $H(s)$ 模型准确已知,也要在对 $H(s)$ 离散化处理之后,才能进行计算机仿真;采用双线性变换法时会出现 s 域到 z 域频率的非线性对应,采用脉冲响应不变法时会出现频率混叠现象,同时对冲激响应的截断也会产生误差等。在这种情况下,为确保 5PC 滤波器输出误差不大于某一设定值,有效性的验证也就成为确定仿真操作的条件,这些条件包括设置采样间隔,确定截断时间的极限等。

出现的误差可以表示成多种形式,例如峰值误差、均方误差等。为了确定这些误差值,就必须已知正确值,在某些情况下这是可能的,例如,理想 5PC 滤波器的冲激响应或阶跃响应都可以通过数学计算得到。而在多数情况下,正确值通常难以确定。这时,有效的方法就是尽量地减小处理误差,例如缩短采样间隔,然后经过多次迭代使其输出结果稳定。

应该指出,仿真模型和抽象模型并不总是存在差异或者误差的。当需要处理的系统是离散或逻辑系统时,仿真模型就可以精确地再现相应的抽象模型。例如,计数器就可以无差错地实现,因为计算机可以准确无误地执行整数加法,这时的仿真模型绝对有效。

对于非理想设备的模型,在进行有效性验证时,需要考虑模型本身的一些性质。为了完成验证工作,模型本身必须有一些可以调整的特性或参数,这些特性或参数在某种程度上能够反映设备产生误差的缺陷类型。使用者可以在实际设备上直接测量这些特性或参数,甚至通过设备说明书获得。获得这些特性或参数后,就可以在仿真模型上设置合适的值,并假设该模型可以很好地模拟实际的设备。

对设备模型进行进一步有效性验证,则需要对实际系统和仿真模型输出的一个或更多特性参量进行测量。这些特性参量也许是一个波形、一个平均值或一条性能曲线。如果在处理多个设备,且遇到的设备质量存在明显的变化时,就要重复测量多次。如果输入会影响输出特性,还要观察不同输入条件下的输出情况,根据某一拟合准则,比较仿真和测量结果的差异,再确认仿真的模型。

需要指出,即使仿真模型是实际器件的精确再现,要获得完美一致的仿真结果也肯定是不现实的,因为它仍然存在物理测量的误差。

5.2.2 过程模型验证

实际上,随机过程模型(过程模型)的验证要比设备模型验证复杂许多,这是因为设备模型仅仅涉及输入与输出确定性的对应关系,而过程模型输出本身就是不确定的、随机的,给出的仅仅是在统计意义上的描述。因此,即使在定义非常清晰的情况下,每一个被研究的随

机过程也不能获得明确的输出形式或者波形。

对随机过程来说,其抽象模型通常只能给出随机过程的类型,如高斯过程、泊松过程等,以及它们的相关统计特征。因此,抽象模型一般可以准确定义,而作为抽象模型执行形式的仿真模型,只是实现了随机数字发生器(RNG)的功能,其输出是待研究的随机过程采样序列。不能期望 RNG 能够确切地代表它所仿真的随机过程,只希望它在某种程度上能够按要求,合理地进行仿真。这时验证的标准通常是主观判断。

最简单的描述准则是一阶概率密度满足某种要求,例如,均匀分布。或者对于不相关的采样值,此时需要测量自相关函数,当测得的自相关函数小于某一门限时,如式(5-8)所示:

$$\hat{R}(\tau) \leq \delta, \quad \tau \neq 0 \quad (5-8)$$

这里 δ 取较小的值,就可以认为仿真满足了要求。

当然,仿真时也希望 RNG 的性质尽可能满足更严格的测试。上面提到的准则,仅仅是针对 RNG 本身特性提出的,由于 RNG 并不是完美的,所以可以采取间接测试,通过间接测试能够进一步推出 RNG 性能参数。例如,由于很多基于高斯随机过程的理论表达式是已知的,如误比特率(BER),如果 RNG 的测试表明其仿真结果(BER)与理论值仅有很小的误差,那么就可以断定 RNG 通过了测试。

5.2.3 系统模型验证

如果模型库的设备都已经通过了有效性验证,则可以说明包含各类设备模型的仿真软件包是有效的,但是不能因此确定多个设备模块串联在一起,构成的系统就一定是有效的。这是因为,尽管对所有设备模块都经过了验证,但是由于这些设备类型和数目的不同,单个设备的误差可能会累加起来,进而使仿真的结果超过可接受的精度范围。因此,为验证仿真系统的有效性,可以将几个特性已知的系统构建出来,并将其性能与仿真结果进行比较。如果比较的结果满足规定的精度标准要求,就可断定仿真软件包对于某一复杂程度的系统集成是有效的,也就是进行这类复杂程度的系统集成是可行的。

1. 确保系统建模有效性的处理

为了实现系统模型的有效性,通常在系统建模时进行以下 3 类处理。

(1) 对系统的复杂度需要进行一定的简化。对于一个给定的实际系统,在进行系统仿真时,首先就会遇到减小系统复杂度的问题,也就是将实际系统“映射”成一个合适仿真的简化方框图。虽然这个仿真框图是由多个单元模块组成的,但是对于实际系统来讲,系统模型还是简单了很多。实际上,这种简化是必要的,是保证系统模型的有效性的关键。但是需要注意,有些关键性模块不能够被简化。

(2) 对实际系统进行准确测量。通过对实际系统的准确测量,可以得到与系统相关的参数值,这些值通常可以作为仿真的输入值。上述操作的目的是使仿真系统尽可能接近实际系统,如有可能,还可以将实际系统和仿真系统置于相同的条件下运行,而这种条件应当能够更为准确地反映所希望的实际工作环境。

(3) 将仿真结果与物理测量结果在不同环境下进行比较。在每一组环境条件下,把仿真结果与物理测量结果比较,并按适当的近似程度准则来确定仿真过程是否成功。以通信系统为例,通常用于比较的物理测量结果包括波形、电平、谱线、BER 等。

上述处理过程不仅可以用来提高各个系统模型的有效性,也可以提高设备模型有效性。

例如,在通信系统仿真过程中,可以将所有相位噪声源的影响都归结为接收端的一个等价随机过程,这种等效过程可以应用在系统建模技术当中。

2. 无法实现理想有效性的原因

即使按上述方式进行处理,系统模型也需要验证其有效性,这是因为与系统相关的测量结果本身仍存在误差。

(1) 输入系统模型的参数测量值在一定程度上存在误差。例如,测量的滤波器传输函数在每个振幅和相位点上都有一定误差,这些误差本身将导致仿真与测量性能的不一致。

(2) 由于测量设备存在误差,使得用来与仿真结果比较的测量结果包含误差,这个误差也会影响对系统模型的有效性验证。例如,如果要测量的参数是 BER,但是测到的 BER 曲线的横坐标(E_b/N_0)与真实曲线的横坐标存在差异,就会使得测到的 BER 出现水平移位。

总之,在进行系统模型验证时,首先必须明确相关误差的来源,了解或者掌握系统误差先验知识,然后,才能在一定的误差范围内对仿真系统进行验证。

5.3 连续系统数值仿真方法

连续系统是工程实践中最常见的系统,连续系统仿真是系统仿真技术中最基本、最常用和最成熟的方法之一。系统仿真的基础是建立数学模型,并将此模型转换成计算机可接受的、与原模型等价的仿真模型,然后编制仿真程序,使模型在计算机上运转。而如何将连续系统的数学模型转换成计算机可接受的等价仿真模型,采用何种方法在计算机上求解此模型,就是连续系统数字仿真算法要解决的问题。通常,连续系统数字仿真主要包括数值积分法和分布参数系统仿真算法等。本节将重点介绍数值积分法。

5.3.1 数学原理

连续系统的数学模型,通常用微分方程的形式来表示,因此,连续系统仿真算法可归结为用计算机求解微分方程的问题。数值积分法(或称数值解法),就是对常微分方程建立离散形式的数学模型,即差分方程,并求出其数值解。为了在计算机上进行仿真,通常先要对描述某系统的高阶微分方程进行模型变换,将其变换为一阶微分方程组或状态方程的形式,然后用数值积分法进行计算。

已知某系统的一阶向量微分方程及其初值为

$$\begin{cases} \dot{y} = f(t, y) \\ y(t_0) = y_0 \end{cases} \quad (5-9)$$

其中, $y(t)$ 既可以是标量,也可以是矢量,为了简化起见,这里假设为标量。

设式(5-9)在 $t = t_0, t_1, \dots, t_n, \dots$ 处的连续解为

$$y(t_{n+1}) = y(t_0) + \int_{t_0}^{t_{n+1}} f(t, y) dt = y(t_n) + \int_{t_n}^{t_{n+1}} f(t, y) dt \quad (5-10)$$

令 $Q_n \approx \int_{t_n}^{t_{n+1}} f(t, y) dt$, 则式(5-10)就可以用一个近似公式来近似,即

$$y_{n+1} \approx y_n + Q_n \quad (5-11)$$

式中, y_n 为准确解 $y(t_n)$ 的近似解,后续将沿用此描述; Q_n 是积分值的近似值。