

第1章 绪 论

1.1 电力系统仿真

1.1.1 系统及系统仿真

系统是由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合而成的、具有特定功能的有机整体。系统仿真是以系统理论、控制理论、相似原理和信息技术为基础,以计算机和/或专用物理设备为工具,借助系统模型对实际或设想的系统进行动态实验研究的理论和方法^[1]。

系统仿真在理论上体现了实验思考的方法论,用它可以探索高技术领域和复杂系统深层次的运动机理和规律性,给出人们直观逻辑推理不能预见的系统动态特征,具有科学的先验性。系统仿真是继理论分析和实物试验之后,认识客观世界规律性的有力手段,它可以把复杂系统的运行放在实验室中进行,具有良好的可控性、无破坏性、可复现性和经济性,在辅助决策、计划优化、管理调度、方案比较及辅助设计等方面发挥着重要作用^[2]。

系统仿真经历了从物理模型动态模拟到数学模型数字仿真的多个阶段。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实验来代替在实际系统上的试验,这就是动态模拟。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^[2]。电力系统动态模拟的优点是可以较为真实地反映被研究系统的全动态过程;包括同一系统内不同时间常数的动态过程;局限性在于仿真的规模受实验室设备和场地限制,试验工作量大,效率较低,而且每一次不同类型的试验都要重新进行电气接线,费力耗时。

随着实际系统的发展,系统的规模和复杂程度日益增大,采用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,数字计算机的性价比不断提高,出现了用数字模型代替物理模型的新型模拟系统,建立数学模型并在数字计算机上做实验的过程称为系统数字仿真。例如,电力系统数字

仿真就是一种用于研究电力系统动态特性的数字模型系统。它通过建立电力系统各元件的数学模型,根据系统的具体结构组成全系统的数学模型,在数字计算机上,采用数值计算方法来模拟电力系统的稳态、暂态和动态的过程,并在此基础上进行各种正常与故障状态的试验和研究。

数字仿真的基本步骤为:①建立数学模型;②确定数值计算方法和建立数字仿真模型;③数字仿真试验和分析。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,确定描述系统特性的数学表达式;确定数值计算方法和建立数字仿真模型的任务,是针对不同形式的数学模型选择并设计相应的数值计算方法,编制计算程序;数字仿真试验和分析的任务,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^[3]。数字仿真不受被研究系统规模和结构复杂性的限制,可以保证被研究和试验系统的安全性,使用灵活,扩展方便,成本相对低廉,可以用于对未来系统发展的预测,近年来在电力系统中得到较为广泛的应用。

1.1.2 电力系统实时仿真

电力系统实时仿真指的是仿真过程与实际系统的运行过程保持一致的一种仿真形式,一般用于电力系统自动控制和保护系统的设计,以及投产前的实验和检测,也可用于电力系统专业的教学和培训以及相关科研工作。

按照仿真工具和发展阶段的不同,电力系统实时仿真一般分为物理实时仿真、数字-物理混合实时仿真和全数字实时仿真三大类。

20世纪五六十年代出现的物理实时仿真(又称为动态模拟)基于相似理论,将电力系统实际元件,如发电机、调压器、调速器、电动机、变压器、输电线等,用参数成倍数缩小的真实物理元件模拟,根据实际元件的连接关系连接物理模拟元件,组成模拟的电力系统。其中输电线路由于真实物理元件比例缩小建模的困难,采用数学模型和参数而用物理元件加以实现的建模方法。物理实时仿真的优点是直观明了、物理意义明确。其缺点是设备昂贵,占地面积大,可模拟的电力系统规模受制于实验室设备和场地限制,难以模拟大规模电力系统,可扩展性和兼容性差;另外试验工作量大,效率较低,当所仿真的网络条件发生变化时,需要重新接线,花费大量时间和人力。

20世纪七八十年代出现的数字-物理混合实时仿真(又称数模混合式仿真),采用的是数字仿真元件、电力网络的数学-物理模型和基于相似理论的物理模型。发展这种实时仿真技术的主要原因在于当时计算机技术水平还不能实现规模较大电力系统的实时数字仿真,特别是电力网络暂态过程的求解达不到实时的要求。因此,在这一类仿真中,通常采用的仿真方式是:输电网络采用数学模型的物理建模,即所谓数学-物理模型,其仿真过程完全与实际物理过程同步,而发电机及其控

制系统等动态元件则采用基于微处理器或 DSP(数字信号处理器)芯片等数字仿真技术模拟。中国电力科学研究院于 1996 年从加拿大 TEQSIM 公司(现更名为 TransEnergy 公司)引进的数模混合式电力系统实时仿真系统就属于这一类装置。数字-物理混合实时仿真装置,较之早期的物理实时仿真,其使用的灵活性和对电力系统的研究范围都有了较大提高和扩展。其主要优点是实时仿真范围可以覆盖电力系统的动态全过程,即:可以仿真从电磁暂态过程到机电暂态过程再到中长期动态过程的电力系统动态全过程;可用于控制系统和继电保护试验,以及经适当简化的电力系统分析研究。由于这种数字-物理混合实时仿真装置的主要部分电力网络仍采用数学-物理模型,因而也具有前述物理实时仿真装置的缺点,即设备昂贵,占地面积大,可模拟的电力系统规模受制于实验室设备和场地限制,难以模拟大规模电力系统,可扩展性和兼容性差。

20 世纪 90 年代以来出现的电力系统全数字实时仿真(又称实时数字仿真)装置,基于现代计算机技术和信息技术,试图克服大规模电力网络数字仿真实时性的困难,采用全系统数学建模和数值计算方法来模拟整个电力系统包括电力网络、各种动态元件的稳态、暂态和动态的过程。全数字实时仿真要求在一个时间步长里完成各种状态量的求解计算,以设备测试为目的仿真还要求在同一步长内完成数模/模数转换和功率放大等。由于实时仿真对于软件和计算机运算处理速度的要求很高,因此受计算机性能限制,20 世纪 90 年代后很长时间内,电力系统实时仿真技术并没有得到很大发展。

近年来,随着芯片制造技术的突破,计算机和通信技术得以高速发展,出现了由多个服务器组成的计算机集群系统,利用并行计算算法和高速通信手段,使电力系统特别是大规模电力网络的实时计算成为可能。基于高性能多节点集群计算机的电力系统全数字实时仿真装置,具有使用灵活、易升级、扩展性好、性价比高等优点,正在成为电力系统全数字实时仿真的主流。

1.2 电力系统数字仿真及数字仿真方法

1.2.1 电力系统数字仿真分类

根据原型系统、数学模型和数字计算机三者的特征可以把电力系统数字仿真分成各种不同的类型。按照仿真目的,可以分为分析研究用的系统仿真和培训运行人员用的培训系统仿真;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;根据数据来源,可分为离线仿真和在线仿真;根据考察的动态过程,可分为电磁暂态仿真、机电暂态仿真、中长期动态仿真 3 类;按模型中物理量与实际系统中物理量之间时间尺度的关系可分为实时仿真和非实时仿真。如果模型与实际系统中的时间比例系数为 1,即模型中的动态过程与实际系统中的动态过程以

相同的速度进行,这种仿真是实时仿真;如果这一比例系数不等于1,则是非实时仿真。随着数字仿真技术的发展,现在对大规模电力系统已能实现仿真时间比实际系统过程短的超实时仿真。

1.2.2 电力系统3类动态过程及其数字仿真方法

电力系统是一个由发电、输电、配电、用电等设备,及其辅助控制和保护系统构成的超大规模复杂人造系统,系统规模庞大,元件众多。电力系统对电压和频率变化的动态响应时间可从微秒、毫秒到分钟级甚至数小时,很难在一次仿真过程中完成对时域范围如此广泛、时间尺度相差几个数量级的动态过程的仿真。工程上通常是根据仿真需要,对所关心的动态过程详细模拟,而对其他过程近似简化,针对不同的动态过程,采用不同的仿真方法。

电磁暂态过程主要指各元件涉及的电场和磁场以及相应的电压和电流变化的过程。电磁暂态过程仿真的主要目的在于分析和计算故障或操作后可能出现的暂态过电压和过电流,以便对电力设备进行合理设计,确定已有设备能否安全运行,并研究相应的限制和保护措施。此外,对于研究新型快速继电保护装置的动作原理,故障点探测原理以及电磁干扰等问题,也常需进行电磁暂态过程分析。由于电磁暂态过程变化很快,一般只需分析和计算持续时间在毫秒级以内的电压、电流瞬时值变化情况,因此,分析中需要考虑元件的电磁耦合、计及输电线路分布参数所引起的波过程,有时还要考虑线路三相结构的不对称、线路参数的频率特性以及电晕等因素的影响^[4]。这类电力系统现象变化快,持续时间短,而急剧变化过程中振荡频率往往高达几千赫兹。在电磁暂态仿真中通常采用时域瞬时值分析计算。由于在电力系统电磁暂态仿真中所用的数学模型非常复杂,因而其仿真的规模受到一定限制,通常不超过几百个母线节点或线路。电磁暂态数字仿真的计算步长常常取 $20\sim 200\mu\text{s}$ 。

目前,工程应用中普遍采用的电磁暂态仿真程序有:最早由 H. W. Dommel 等人开发,后来又在此基础上发展成多个版本的 EMTP^[5];加拿大 Manitoba 直流研究中心的 PSCAD/EMTDC^[6];德国西门子公司开发的 NETOMAC^[7],等等。另外,PSIM^[8]、SABER^[9]、SPICE、PSPICE^[10]等,由于具有较强的电力电子器件的仿真功能,因而在电磁暂态仿真分析中也有应用。

机电暂态过程主要指由于发电机和电动机电磁转矩的变化所引起电机转子机械运动的变化过程。电力系统机电暂态过程的仿真主要用于分析电力系统的稳定性,即电力系统在某一正常运行状态下受到某种干扰后,能否经过一定的时间后回到原来的运行状态或过渡到一个新的稳定运行状态^[5,6]。其主要内容包括:系统受到大扰动后的暂态稳定性和受到小扰动后的小干扰稳定性。其中,暂态稳定分析是研究系统受到大扰动(如发生短路故障、负荷瞬间发生较大的突变、切除大容

量的发电、输电或变电设备等)后,电力系统的动态行为和保持同步运行的能力,分析影响电力系统暂态稳定的各种因素,研究提高暂态稳定性的措施。小干扰稳定分析是研究电力系统受到小扰动后的稳定性,分析小干扰稳定破坏和低频振荡事故的原因,为选择发电机励磁调节系统、电力系统稳定器和其他控制调节装置的结构和参数提供依据。暂态稳定性分析一般采用时域仿真法。小干扰稳定性分析可采用时域仿真法或特征值计算法。机电暂态变化过程的持续时间常常在几秒到十几秒,这期间由于系统频率变化不大,仿真时采用基波相量理论进行分析计算,也即网络用基于复阻抗的代数方程描述。机电暂态时域数字仿真的计算步长常取 $10\mu\text{s}$ 左右。

目前,工程应用中较普遍采用的机电暂态仿真程序,国内的有中国电力科学研究院开发的电力系统分析综合程序(PSASP)^[13,14];中国电力科学研究院消化吸收并改进的中国版 BPA 电力系统分析程序^[15]。国际上常用的有美国 PTI 公司的 PSS/E^[16],瑞典 ABB 公司开发的 SIMPOW 程序^[17],德国西门子公司开发的 NETOMAC^[18]等。

中长期动态过程仿真主要关注大规模系统扰动以及由此引发的有功和无功功率、发电量和用电量之间不平衡等持续时间较长、动作较缓慢的现象。这类现象的分析一般考虑:热力机组的锅炉动态特性,水轮机机组压力水管及其阀门动作的动态特性,自动发电控制,发电和输电系统的保护和控制,变压器饱和特性以及核反应系统的动态响应等。利用中长期动态过程仿真可以研究的内容包括:①电力系统复杂和严重事故的事后分析,研究紧急无功功率支援等反事故措施的有效性,训练调度运行人员紧急处理能力;②电力系统中长期过程动态过程分析和控制,如中长期电压稳定性分析和控制、自动发电控制(AGC)等;③对规划设计的电力系统,考核系统承受极端严重故障的能力,研究相应对策。系统中长期动态过程在大型电力系统中所经历的时间较长,中期现象一般持续十几秒到几分钟,而长过程现象则持续几分钟到几十分钟,甚至数小时。中长期动态过程中电压和频率的变化范围较大,涉及的电力系统元件较多,特别要考虑具有中长期过程特性的模型,如电站锅炉、核电站等模型。中长期动态仿真通常采用适合刚性系统的变阶变步长计算方法,如吉尔(Gear)法,计算步长通常取十毫秒至几秒不等^[19,20]。

目前,国际上主要的中长期动态仿真程序主要有:法国电力公司 EDF 开发的 EUROSTAG;美国电力科学研究院开发的 LTSP;美国通用电气公司和日本东京电力公司共同开发的 EXTAB。另外美国 PTI 的 PSS/E,捷克电力公司的 MODES 等程序也具有中长期过程动态稳定计算功能。在国内,中国电力科学研究院开发了中长期过程计算软件“电力系统全过程动态仿真程序”,于 2001 年投入使用。

1.2.3 电力系统实时数字仿真装置

进行继电保护装置及其他控制装置的闭环试验,是当前电力系统实时数字仿真的主要应用领域。由于电力系统是高阶非线性复杂动态系统,对系统暂态过程的仿真计算需要求解高阶微分方程和网络方程,有时还包括耗时的迭代过程,计算时间随着网络规模的增大而呈级数增加。因此,基于普通单 CPU 计算机的常规仿真计算,无法满足实际同步电网或交直流混合电网实时仿真的需要。国际上现有的几种商品化的电力系统全数字仿真系统,采用多节点集群计算机、多 CPU 共享内存的工作站或专用芯片和板卡,并通过并行处理技术予以实现。下面介绍国内外几种典型的实时数字仿真系统。

1. 基于高速处理器的实时仿真装置——RTDS^[21]

RTDS 是国际上研制和投入商业化应用最早的实时数字装置,也是目前国际上广泛应用的电力系统实时数字仿真装置。RTDS 由加拿大 RTDS 公司研制,一个 CPU 模拟一个电力系统元器件,CPU 间的通信采用并行—串行—并行的方式。RTDS 使用电磁暂态方程建立电力系统的仿真模型。目前应用 RTDS 规模最大的我国南方电网科学研究所的装置,有 33 个机箱(RACK),可模拟百余台发电机,1000 个三相节点,数条直流输电线路。RTDS 的仿真规模受用户所购买设备(RACK 数量)的限制,对只有 2~4 个 RACK 的 RTDS 仿真系统,可模拟的电力系统规模只有几十个三相节点。RTDS 基于专用硬件开发,不利于系统的升级换代,模拟大规模电网有困难。

RTDS 主要用于继电保护、自动装置试验,以及高压直流输电(HVDC)系统的实时仿真研究及控制器试验。

2. 基于 HP 并行计算机或 HP 工作站的实时仿真——ARENE^[22]

法国电力公司(EDF)开发的全数字仿真系统 ARENE,有实时仿真和非实时仿真版本。实时版本有:①RTP 版本,硬件为 HP 公司基于 HP-CONVE 工作站的多 CPU 并行处理计算机,该并行处理计算机的最大 CPU 数量已达 32 个,可以用于较大规模系统的电磁暂态实时仿真;②URT 版本,HP-UNIX 工作站,用于中小规模系统的电磁暂态实时仿真;③PCRT 版本,PC-Linux 工作站,用于中小规模系统的电磁暂态实时仿真。

ARENE 实时仿真器可以进行如下物理装置测试:继电保护和自动装置,高压直流输电和灵活交流输电系统(FACTS)控制器,可以用 $50\mu\text{s}$ 步长进行闭环电磁暂态实时仿真。ARENE 不作电力系统机电暂态过程仿真。ARENE 采用基于 HP 工作站的并行处理计算机,是一种基于通用计算机的全数字实时仿真装置。

3. 基于集群计算机的实时仿真装置 HYPERSIM^[23]

加拿大魁北克 TEQSIM 公司开发的电力系统数字实时仿真装置 HYPERSIM,

可用于机电暂态实时仿真和电磁暂态实时仿真。HYPERSIM 有如下两种支撑硬件：

(1) 基于 PC Cluster(集群计算机, 又称机群服务器)。操作系统采用 UNIX 和 Linux 平台, 可以进行中小规模电力系统的电磁暂态仿真和较大规模电力系统的机电暂态仿真, 但未见进行电磁暂态和机电暂态混合仿真的报道。具有对继电保护、FACTS 控制器、自动重合设备及电力系统稳定器(PSS)等进行闭环测试的能力。

(2) 基于多 CPU 超级并行处理计算机(如 SGI2000 和 SGI3000)。其仿真规模可以相当大, 也可用于装置试验, 但造价高昂。

4. 基于高速 PC 的实时仿真装置 DDRTS^[24]

深圳殷图科技发展有限公司开发的数字动态实时仿真系统 DDRTS, 基于高速 PC, 是全数字化的动态模拟实验及测试系统, 可以进行潮流计算和电磁暂态仿真, 主要用于继电保护和控制设备测试。

5. 电力系统全数字实时仿真装置 ADPSS^[25,26]

中国电力科学研究院开发的电力系统全数字实时仿真装置 ADPSS, 基于机群服务器, 可进行大规模复杂交直流电力系统的机电暂态实时仿真和机电、电磁暂态混合实时仿真, 可以外接物理装置(如继电保护、安全自动装置、FACTS 和直流输电控制装置)进行闭环试验。该装置能与调度自动化系统相连接取得电力系统在线数据进行仿真。仿真电力系统的规模达 1000 台机、10000 条母线。可同时进行大电网机电暂态和局部电网快速电磁暂态过程的混合仿真。在用于装置试验测试时, 可通过模拟实际规模的背景电网的运行特性, 全面考察被测试对象在大电网中的行为及其对电网的影响。ADPSS 采用机群服务器作为硬件, 具有高性价比、易升级扩充等特点。

1.3 电力系统数字仿真技术的新发展

随着我国电力系统的发展, 对数字仿真技术提出了新的要求, 例如: 我国电力系统互联的规模不断扩大, 要求提高电网数字仿真计算的规模和速度; HVDC、FACTS 等大功率电力电子技术及装备在电力系统中的广泛应用, 要求提高数字仿真计算的精确度; 大规模风力发电等可再生能源电力的接入、分布式电源和微网的发展, 要求建立相应的数学模型和仿真算法; 为适应大量随机性电源接入和未来电力市场化后运行方式多变的特点, 进一步提高电力系统安全稳定运行水平, 要求由离线仿真计算向在线仿真计算发展; 全国大区交直流混合联网的趋势和特点, 要求解决大规模互联电力系统的协同计算问题; 新型继电保护、安全自动装置、自动调节和控制装置的广泛应用, 要求建立与实际电力系统类似的实时仿真试

验环境。

上述需求为电力系统数字仿真技术带来了新的发展机遇,主要有:

- ① 大规模电力系统的并行数字仿真;
- ② 机电和电磁暂态混合仿真;
- ③ 分布式并行数字仿真;
- ④ 数字-物理混合仿真;
- ⑤ 在线仿真。

1. 大规模电力系统的并行数字仿真

将大电力网络分割为若干子网,分配给机群不同的节点机计算,选择机群中一台节点机作为主控机,计算子网间联络方程,从而实现大规模电力系统的并行数字仿真^[27]。采用并行数字仿真技术,大大提高了仿真速度,从而有可能实现大规模电力系统的超实时仿真,进而通过进程间的同步和实时控制,实现大规模电力系统的实时仿真。图 1.1 给出了大规模电力系统并行数字仿真示意图。

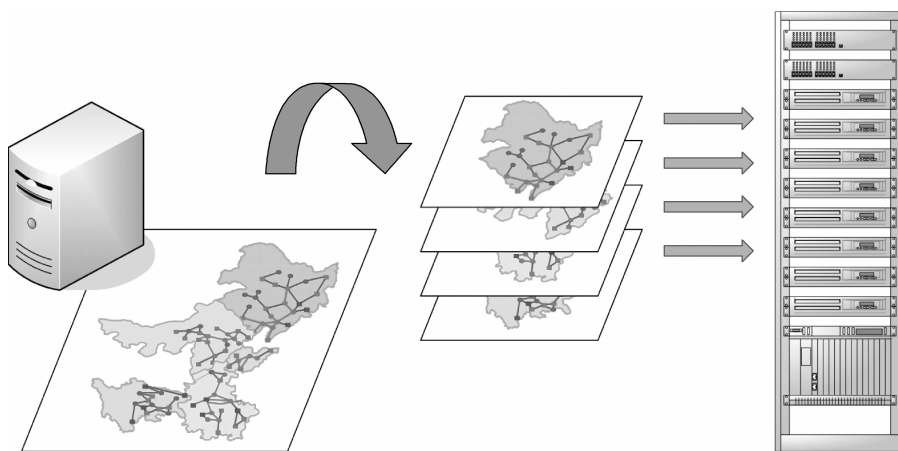


图 1.1 大规模电力系统并行数字仿真示意图

2. 机电和电磁暂态混合仿真

在对含 HVDC 系统和 FACTS 设备的电力系统进行仿真时,现有的机电暂态仿真和电磁暂态仿真手段都有一定局限,机电暂态仿真采用准稳态模型模拟 HVDC 系统和 FACTS 设备,不能模拟其快速暂态特性和非线性元件引起的波形畸变,而电磁暂态仿真由于受限于仿真规模,需要对电力系统进行等值化简,降低了仿真分析的准确性。

机电和电磁暂态混合仿真技术^[28]在一次仿真过程中实现对大规模电力系统的动态仿真 and 局部电网的快速电磁暂态过程仿真,集中了机电暂态仿真和电磁暂态仿真各自的优点,既可以反映特定系统如 HVDC、FACST 中详细的电磁暂态变

化过程,又可仿真较大规模的电力系统,适用于进行 FACTS 设备对系统的影响研究、交直流系统相互影响的研究等。

图 1.2 给出了对交直流混合系统进行机电和电磁暂态混合仿真的示意图。图中,直流输电系统用电磁暂态仿真,交流系统用机电暂态仿真,为了加快仿真速度,各自均可分网并行计算。

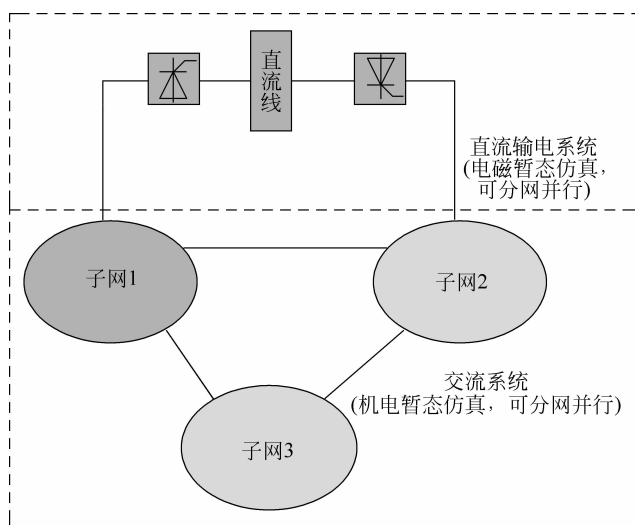


图 1.2 机电和电磁暂态混合仿真示意图

在进行机电和电磁暂态混合仿真时需要一个接口来处理两类仿真模型及积分步长的不同所带来的交接问题,其关键技术在于接口等值电路设计及数据交换时序。

3. 分布式并行数字仿真

电力系统的运行和管理具有典型的分层分区的特点,各区域电力系统的数据分布存储,分级维护管理。

分布式并行数字仿真技术^[29,30]可以整合不同调度中心的异构计算资源,是实现多区域电力系统一体化仿真的有效手段。相对于集中式并行仿真,分布式并行仿真不要求数据的集中存储和共享,便于数据的维护管理,适应在市场化运营方式下互联电力系统的协同计算。与集中式并行仿真不同,由于采用广域通信方式,要求仿真过程中尽可能减少协调求解过程中所需的通信次数以及交换的信息量。

图 1.3 给出了大型互联电力系统分布式并行数字仿真示意图。各地只存储本区域电力系统的数据,仿真程序异地运行,只进行本区域电力系统的仿真计算,但在每一积分步长内需要与相邻区域电力系统的仿真程序交换边界信息。



图 1.3 大型互联电力系统分布式并行数字仿真示意图

4. 数字-物理混合仿真

传统的数字-物理混合实时仿真(又称数模混合式仿真)采用数字仿真技术模拟电机及其控制系统,其余元件仍采用物理模型进行模拟。近年来出现的新型数字-物理混合仿真技术包括两种类型:一种类型的数字-物理混合仿真采用数字仿真技术模拟整个电网,物理模型为待检测的控制保护设备,如励磁调节器、继电保护设备等,在数字仿真和物理仿真之间仅有控制信号连接^[26];另一种类型的数字-物理混合仿真采用数字仿真与物理仿真设备的功率连接技术^[31,32],即数字仿真技术模拟大部分电力系统,物理模型模拟部分电力系统,在数字仿真和物理仿真之间既有电气信号连接也有功率的交换。由于目前数字仿真程序普遍对直流输电系统模拟得不够精细,因而后一种类型的仿真方式适用于大规模交直流混合输电系统的仿真试验研究,即采用物理模型模拟直流输电系统,数字仿真技术模拟交流网络。数字-物理混合仿真的关键技术在于实时数字仿真中进程同步及实时控制,以及数字仿真与物理模型的输入输出接口。现有实时数字仿真装置如 RTDS、HYPERSIM、ADPSS 等都实现了第一种类型的数字-物理混合仿真,而第二种类型的数字-物理混合仿真目前仍处于实验室研究阶段。

图 1.4、图 1.5 分别给出了上述两种类型的数字-物理混合仿真示意图。

5. 在线仿真

在线仿真与离线仿真的区别在于仿真数据来源不同,离线仿真的数据为人工制定的各种运行方式数据,基于预想运行工况进行仿真;在线仿真则取用调度自