面向华东电网DTS的动态全过程仿真*

杨志新　李乃湖　陈　珩
（东南大学电气工程系·210018·南京）

王力科　姚建国　王元林
（电力部电力自动化研究院·210003·南京）

【摘　要】 探讨了用于华东电网DTS的电力系统动态全过程仿真问题；建立了一套较为完整的元件模型库，并可实现各种模型自动组装；通过加人工阻尼等手段，实现了由暂态到中期动态过程及到长期动态过程的正确转换，并引入了与之相配合的变步长手段，从而大大加快了仿真计算速度。

【关键词】 动态全过程仿真　人工阻尼　调度员培训仿真器

1　引言

现代电力系统要求调度人员准确无误地进行运行操作，尤其在紧急事故时必须具有快速的应变能力。因此，对调度人员的培训显得越来越重要。现有的电力系统调度员培训仿真器(DTS)大都假定全网同一频率，忽略机组间的摇摆，采用“潮流”型分析方法来模拟电力系统。尽管其具有简单、快速的优点，但以此并不能正确地模拟事故及事故后的稳态。对于我国结构较薄弱的电力系统而言，使学员通过DTS掌握系统在暂态过程中的行为是十分重要的。但迄今为止，国内外尚没有在DTS中完整地计及电力系统从短期暂态到中期和长期的动态全过程的仿真[1-2]。本文是在与电力部电力自动化研究院合作研制华东电力系统DTS动态全过程数字仿真软件的基础上完成的，重点讨论在DTS中动态全过程仿真的软件实现问题，从而使DTS能更详细、准确地描述操作、事故引起的暂态过程，以及随后延续下去的中长期过程；正确描述继电保护和自动装置的行为，以提高DTS的功能和培训效果。

考虑到仿真计算的速度和整个动态过程的物理特性，本文提出将整个动态过程划分为三个阶段：短期(暂态过程)、中期动态过程和长期动态过程。这三个阶段是相互联系的，中期过程是暂态过程的延续，长期过程又是中期过程的扩展。在不同阶段采用不同精度的元件数学模型，并根据系统所处的状态自动进入三个不同阶段的仿真计算；通过加人工阻尼的方法实现从中期过程到长期过程的平稳过渡。此外还利用稀疏技术和变步长控制等手段[3-5]，以保证仿真计算的快速性。

2　DTS动态全过程仿真数学模型

由于在动态全过程仿真中，必须考虑系统在三个不同阶段的响应，应采用与之相适应的不同复杂程度的数学模型。而DTS的要求又迫使除了要精确地重现动态过程外，还必须给受训学员一个实时的仿真效果。因此，实现不同仿真阶段模型之间的切换，以采用尽可能大的步长，从而提高计算速度是十分必要的。

---

* 1994年9月收稿

杨志新，男，1967年生，在读博士研究生。
李乃湖，男，1960年生，博士，副教授，主要从事电力系统优化运行和仿真方面的研究。
陈　珩，男，1928年生，教授，博士生导师，从事电力系统数字仿真和电压稳定性的研究。

当系统中发生扰动后，可能在短短几秒钟内失稳，系统解列，而伴随机组间机电振荡的逐渐衰减，仿真可转入中长期动态计算。值得注意的是，这时系统振荡并没有完全平息。为了从中期仿真平稳地过渡到长期仿真，采用了在转子运动方程中加人工阻尼的方法，这样可以人为地将系统振荡抑制下去，使全网具有同一频率而转入长期仿真，从而采用简化模型和较大的步长，使仿真速度得到极大提高。因此，在建立模型时，必须考虑到它能适应仿真过程的切换。为此，引入了系统惯性中心(COI)的概念。

对于常规暂态稳定计算，发电机转子运动方程为

$$\dot{\omega}_i = \frac{P_{acci}}{M_i} - \alpha_N \cdot \omega_i$$

$$\dot{\delta}_i = (2\pi f_0) \cdot \omega_i \qquad i = 1,\cdots,n \tag{1}$$

其中 M_i：惯性时间常数；

ω_i：相对于同步参考轴的转速偏差量；

P_{acci}：加速功率；

α_N：等值机械阻尼系数 (D_i/M_i)，这里假设全网为均匀阻尼[2]；

δ_i：相对于同步参考轴的功角。

将处于同一孤立系统所有发电机的转子运动方程相加，得到系统惯性中心方程：

$$\dot{\omega}_0 = \frac{P_{acct}}{M_t} - \alpha_N \cdot \omega_0$$

$$\dot{\delta}_0 = (2\pi f_0) \cdot \omega_0 \tag{2}$$

并且有

$$M_t = \sum_{i=1}^{n} M_i \tag{3}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{M_t} \sum_{i=1}^{n} M_i \cdot \omega_i \tag{4}$$

$$\delta_0 = \frac{1}{M_t} \sum_{i=1}^{n} M_i \cdot \delta_i \tag{5}$$

$$P_{acct} = \sum_{i=1}^{n} P_{acci} \tag{6}$$

如果对转子运动方程进行修正，即在转子运动方程中引入人工阻尼项，且该阻尼项与每台发电机转速和发电机所在系统的惯性中心转速之差成正比，并设每台发电机的人工阻尼系数相同，则有修正后的转子运动方程：

$$\dot{\omega}_i = \frac{P_{acci}}{M_i} - \alpha_N \cdot \omega_i - \alpha_s \cdot (\omega_i - \omega_0)$$

$$\dot{\delta}_i = (2\pi f_0) \cdot \omega_i \qquad i = 1\cdots,n \tag{7}$$

其中 α_s 是人工阻尼系数。

在一个子系统中，将所有引入人工阻尼项的发电机转子运动方程式(7)相加，可得与式(2)相同的结果。可见，在转子运动方程中加人工阻尼项后，并不影响整个系统的频率变化，但它却可抑制机组间的振荡，为放大步长和模型切换创造条件。

由于 DTS 动态全过程仿真必须同时兼顾仿真的准确性和快速性，所采用的元件动态模型具有以下特点：模型比较全，可供教练员选择、增删；为减轻计算负担，模型在保证一定精度的前提下，作了适当简化，以保证计算步长即使在系统故障时，也不致太小；便于短期、中期、长期间

的切换等。在华东电力系统DTS动态全过程仿真中考虑的元件动态模型包括：

(1) 发电机模型：E'_q 恒定、E'_q 变化、E'_q 和 E'_d 变化以及 E''_q 和 E''_d 变化的二阶至五阶模型。

(2) 励磁系统模型：直流旋转电机励磁系统、交流旋转电机励磁系统、无刷励磁系统、自并励系统和复式励磁系统。

(3) PSS模型：包括一阶滤波、输出限幅、三个相位导前环节。

(4) 调速系统模型：机械油压式、GE系列电液式和西屋系列电液式等调速器。

(5) 原动机模型：非再热式、中间再热式等汽轮机模型以及水轮机模型。

(6) 锅炉模型：可计及直流炉、气泡炉的通用简化模型。

(7) 负荷模型：恒定阻抗、恒定功率、恒定电流模型，感应电动机负荷模型以及计及电压、频率变化影响的综合负荷静特性模型。

(8) 直流系统模型：在长期动态过程中考虑恒定功率、恒定电流控制，在短中期过程中按准稳态模型。

(9) 核电站模型：压水堆模型。

(10) 抽水蓄能电站模型：模拟拟建的华东电网抽水蓄能电站。计及发电、调相、抽水三种工况以及三者之间转变的简单过程。

详细步骤可参见文献[6、7、8、9]等，此处不再赘述。以上各种模型均备有一套标准参数，教练员可根据实际系统情况加以选择或修改。

综合系统中各元件模型和网络模型，电力系统动态全过程可用具有下列形式的一组微分方程组和代数方程组来描述：

$$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = f_1(X,Y)$$
$$0 = f_2(X,Y) \tag{8}$$

3 DTS动态全过程仿真的计算方法

由于方程(8)的特点以及仿真时间一般较长的特殊性，本文采用了隐式梯形积分对式(8)进行求解。为了充分利用稀疏矩阵技术，首先将微分方程差分化，然后与代数方程联立求解。仿真流程图如图1所示。在进行事件处理后，根据扰动的性质自动判断进入的仿真阶段。在仿真过程中又可根据计算结果实现不同过程的切换。

3.1 暂态过程仿真

当系统发生较大扰动后，DTS首先进入暂态过程仿真计算。在此过程中，考虑励磁系统、PSS、调速系统的动态特性。不加人工阻尼($\alpha_s = 0$)，计算步长亦较小。几个摇摆后即可转入中期动态过程的仿真计算。

3.2 中期动态过程

进入中期动态过程后，除考虑上述调节装置外，还需计及锅炉和反应堆的动态特性。在仿真计算中，人工阻尼不能过早地引入，否则，可能导致系统动态过程仿真的失真。加人工阻尼判据是：当相对于惯性中心的转速低于某一限值时，加人工阻尼。即：

$$\omega_i - \omega_0 < \omega_{\mathrm{limit1}} \tag{9}$$

其中 ω_{limit1} 是加人工阻尼的转速限值。

对于算例中的24节点系统，ω_{limit1} 取为1.5rad/s，当满足此条件时，α_s 不再为0。此时，再结合变步长技术，提高计算速度。

当机组间的摇摆被抑制后，即可转入长期动态仿真过程。其判据为：

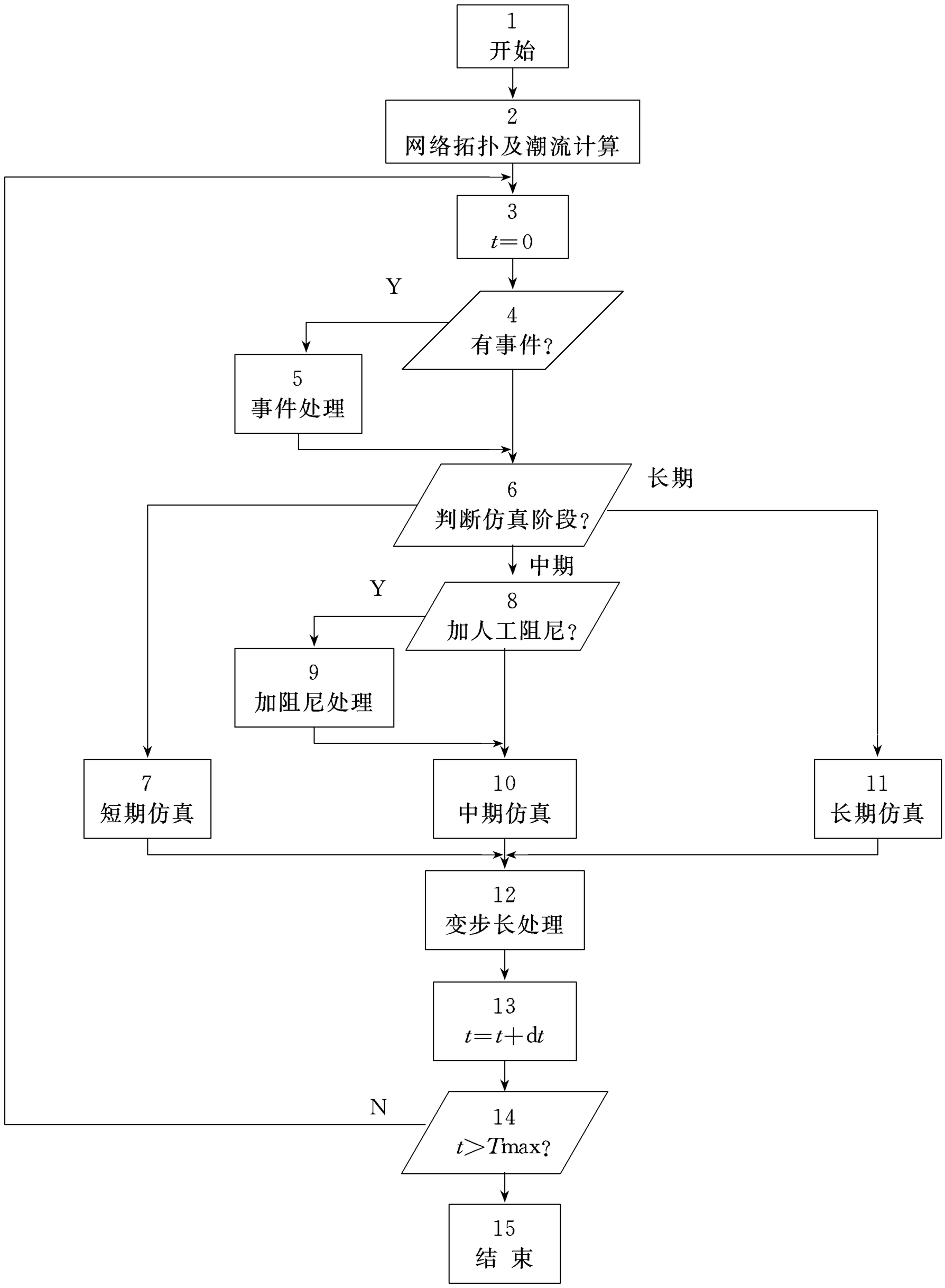

图1　DTS动态全过程仿真流程

Fig. 1　Flow chart of DTS dynamic simulation

$$\omega_i - \omega_0 < \omega_{\mathrm{limit2}} \tag{10}$$

其中 ω_{limit2} 是中期转长期的转速限值。对于24节点系统，此限值定为0.3rad/s。相反，如在此过程中又发生扰动，或转速又超出某一限值，则应减小阻尼或完全去掉人工阻尼，并根据扰动的大小和性质，判断仿真是否转入暂态过程或仍在中期。

3.3　长期动态过程

进入长期动态过程后，由于机组间摇摆已被平息，可认为全网具有同一频率。这时，发电机的角度和角速度由惯性中心决定。在仿真计算时，不必再计算每一台发电机的转子运动方程，只需计算惯性中心的转子运动方程。这样，就减少了发电机方程的阶数，加快了仿真速度。

在长期仿真过程中，每台发电机的 δ_i 和 ω_i 由下式决定：

$$\delta_i(t+\triangle t)=\delta_i(t)-(\delta_0(t+\triangle t)-\delta_0(t)) \tag{11}$$

$$\omega_i(t+\triangle t)=\omega_0(t+\triangle t) \tag{12}$$

为进一步提高在长期仿真过程中的计算步长，此时将同步转速参考轴坐标转换为惯性中心参考坐标。这样可在较大步长下(一般为0.5～3s[4])减少迭代次数。从而大大地提高了仿真速度。

4 算例及其分析

为验证本文提出的模型和算法的正确性，本文首先选择了24节点6机系统作为模型系统，在micro VAX Ⅱ机上进行了试算，并将仿真结果同我国电科院综合稳定程序进行了比较。

仿真事件为：0.1s 线路8—9距离8号节点10%处三相短路，0.2s 线路三相开断；50s 线路9—22距离9号节点20%处三相短路，50.1s 线路三相开断，100s 仿真结束。

对下列几种不同情况进行了计算：

a、常规稳定程序，定步长(0.05s)。

b、加人工阻尼($\alpha_s=1$)，定步长(0.05s)，用中期模型计算，不考虑中期至长期的切换。

c、加人工阻尼($\alpha_s=1$)，定步长(0.05s)，考虑中期至长期的转换。

d、加人工阻尼($\alpha_s=1$)，初始步长为0.05s，结合变步长技术，最后步长上限定为2s，考虑中期至长期的转换。

上述四种情况下的计算时间和迭代次数列于表1中。由表1可见：加人工阻尼，进行中期至长期的转换，并结合变步长技术，可以使计算速度得到极大提高。从24节点计算结果来看，情况 d 的计算速度比常规稳定程序提高了两倍多。

表1 不同计算条件下的仿真 CPU 时间和迭代次数

Table 1 CPU time and number of interations for different conditions

	CPU (s)	总迭代次数
a	533.0	4316
b	528.5	4302
c	333.8	3076
d	151.8	1410

表2 不同阻尼下的仿真 CPU 时间

Table 2 CPU time for different artificial dampings

	阻 尼	CPU(s)
e	0.1	162.2
f	1.0	151.8
g	5.0	166.5

为比较人工阻尼系数的大小对仿真结果的影响，分别在 $\alpha_s=0.1$，1.0，5.0时，对情况 d 进行计算，所花费的仿真时间列于表2中。由表2可见：当 α_s 取0.1至5时，人工阻尼能有效地抑制振荡。对24节点系统，建议取 $\alpha_s=1$。

图2中给出了仿真计算所得摇摆曲线。其中，实线所示为情况 a 的计算结果，点划线为 b、c 的结果(两曲线重合)，双点划线为 d 的结果。由图可见，本文所采用的在转子运动方程中加人工阻尼项的方法，可以有效地抑制机组间的机电振荡，但并不改变系统动态的发展趋势，不影响整个系统的频率变化。此外，在图2中 b、c 两曲线重合，说明本文采用的中、长期转换是正确可行的。

5 结论

从对 DTS 动态全过程仿真模型和算法的分析可以看出：由于将动态全过程划分为短期、中期和长期三个阶段；在转子运动方程中加入人工阻尼项，实现仿真过程模型的切换；在不同仿真阶段对元件模型进行适当简化；采用变步长技术，可在保证 DTS 动态全过程仿真准确性的同时，极大地提高计算速度。

参 考 文 献

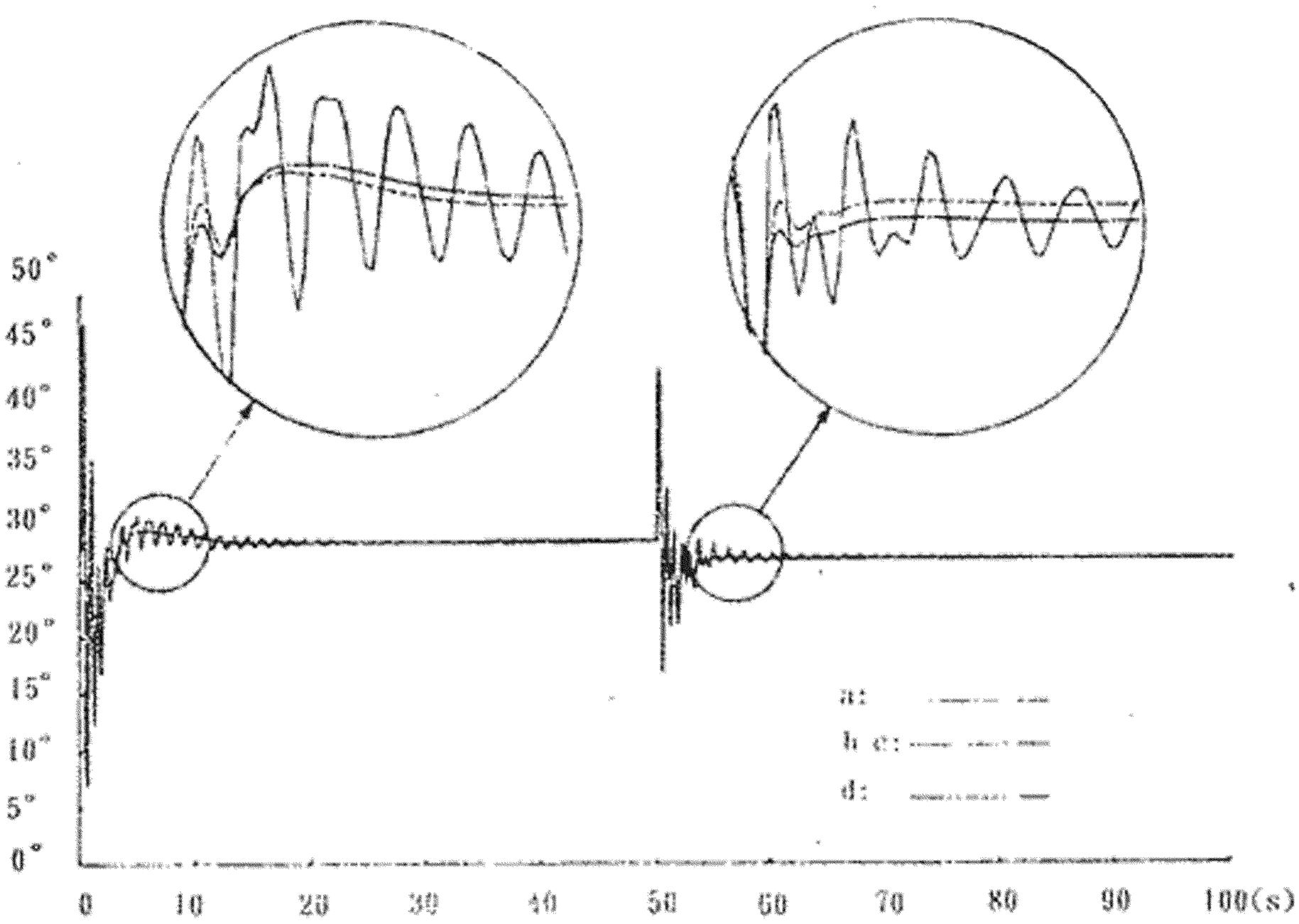

图2 摇摆曲线

Fig. 2 Swing curves

1 Zhang Guorui, Dondi P. Dispatcher Training Simulators in Energy Management System

2 袁 斌，马维新等，东北电网仿真系统动态部分的功能及技术要点. 电力系统及自动化，1993，(11)

3 Frowd R J, Ciri J C, Podmore R. Transient Stability and Long—Term Dynamics Unified, IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol. PAS—101, 1982. 10, (10)

4 Sanchez—Gasca J J, D'Aqnila K, Paserba J J. Extended—Term Dynamic Simulation Using Variable Time Step Integration. IEEE Computer Applications in Power, 1993. 10, 6 (4)

5 吴际舜编. 电力系统稳态分析的计算机方法. 上海交通大学出版社：1992

6 ［日］关根泰次. 电力系统暂态解析论. 机械工业出版社：1989

7 Anderson P M, Fouad A A. Power System Control and Stability. Iowa State University Press, Ames, IA 1977

8 Rafian M, Sterling M J H. Real Time Power System Simulation. IEEE Proceedings, Pt. C, 1987. 5, 1 34 (3)

9 西安交通大学等合编. 电力系统计算. 水利电力出版社：1978

UNIFIED DYNAMIC SIMULATION ORIENTED TO EAST—CHINA POWER SYSTEM DISPATCHER TRAINING SIMULATOR

Yang Zhixin, Li Naihu, Chen Heng (Southeast University, Nanjing)

Wang Like, Yao Jianguo, Wang Yanlin (Nanjing Automation Research Institute)

Abstract This paper describes the unified dynamic simulation of power systems oriented to East China Power System Dispatcher Training Simulator. Dynamic and static models of system elements are developed and can be automatically assembled. To transfer the simulation mode among short, mid and long terms, an artificial damping term is incoporated into the rotor swing equation, such that the simulation can be carried out rapidly with long integration step.

Keywords dynamic simulation artificial damping power system simulator