

● 研究生教材 ●

ATP-EMTP

及其在电力系统中的应用

李云阁 / 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

● 研究生教材 ●

ATP-EMTP

及其在电力系统中的应用

主编 / 李云阁

编写 / 刘 青 王 倩 赵丹丹 赵文彬

主审 / 施 围



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为研究生教材。全书共分为 9 章, 主要包括电磁暂态计算程序, 图形界面综合平台, 电力系统电磁暂态数值计算原理, 电力系统电磁暂态计算中设备及装置的模型, 算例 I: 模型建立, 算例 II: 稳态计算, 算例 III: 暂时过电压和过电流计算, 算例 IV: 操作过电压和过电流计算, 算例 V: 雷电过电压计算。

本书适用于初、高级 ATP 用户, 既能满足具有电力系统相关专业人员自学 ATP 的需要, 又能满足具有 ATP 使用经验者更加深入了解 ATP, 以及学习高级功能和技巧的需要。

图书在版编目 (CIP) 数据

ATP-EMTP 及其在电力系统中的应用 / 李云阁主编. —北京: 中国电力出版社, 2016.8

研究生教材

ISBN 978-7-5123-9327-1

I. ①A… II. ①李… III. ①电力系统—暂态特性—电磁计算—计算机仿真—研究生—教材 IV. ①TM74

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 103737 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 8 月第一版 2016 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 26.25 印张 642 千字

定价 65.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签, 刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

ATP (The Alternative Transients Program) 是电磁暂态程序 EMTP (Electro-Magnetic Transient Program) 最为普遍使用的版本, 掌握 ATP 的原理、使用规则、技巧是对电力系统电磁暂态分析人员的基本要求。

ATP 的主要开发时间为 20 世纪 80 年代, 但时至今日掌握 ATP 仍然较为困难, 其原因有以下几点: 第一, ATP 的开发基于当时的计算机软硬件水平, 且计算机的类型、操作系统、内存容量、硬盘容量、CPU 运行速度也是程序开发中的重要考虑因素, 因此程序开发人员设计了很多专用命令。现在计算机的软硬件能力已有质的飞跃, 相当一部分专用命令已经过时, 但 ATP 使用手册多年没有更新, 这些过时的命令仍然与其他命令交织出现在 ATP 使用手册中, 使后来的初学者难以理解这些命令的意图。第二, 我国绝大部分用户使用英语版本的 ATP 程序及其用户手册, 用户手册达八百余页, 涉及计算机软硬件、电力系统设备、数学计算方法的专业术语较多, 加之 ATP 本身又增加了相当数量的专门术语, 给国内用户掌握 ATP 造成了一定困难。第三, ATP 使用手册内容按各种数据出现的顺序编排, 初学者不易分清主次, 给自学者造成障碍。第四, 不同于在 Windows 操作系统下的其他应用软件, 至今 ATP 也没有真正的集成平台, 数据输入、仿真、数据后处理需要不同的软件, 使用不便。尽管如此, ATP 仍凭借其专业方面的优势在教学、工程、科研等领域发挥着巨大的作用。

本书以目前的个人计算机软、硬件水平为编写条件, 介绍了电磁暂态计算的历史、原理、功能、模型和应用。本书适用于初、高级 ATP 用户, 既能满足具有电力系统相关专业人员自学 ATP 的需要, 又能满足具有 ATP 使用经验者更加深入了解 ATP, 以及学习高级功能和技巧的需要。

全书内容共分为 9 章, 其中第 1、2 章介绍 ATP 及其使用, 第 3、4 章为电磁暂态计算理论基础, 第 5~9 章为实际工程仿真算例。为了编写和阅读方便, 在第 1 章介绍 ATP 功能时提及了将在第 2 章详细介绍的程序 ATPDraw。

本书共有算例 50 余个, 涉及参数计算、稳态和暂态计算等多个方面, 详细介绍了 TACS (Transient Analysis of Control System) 和 MODELS 的使用。为满足读者的不同需求, 有的算例以建立模拟系统为主, 有的则以分析模拟结果为主, 而有的则兼而有之。为了方便读者学习, 书中附有所有算例的 ATP 输入数据文件的主要内容, 也有部分算例输出数据文件的主要内容。同时, 作者在数据文件中添加了注释, 以便读者理解。

为了规范和方便交流, 也为了便于初学者理解, 书中对 ATP 中经常使用的部分词条进行了汉语命名, 如控制卡、特殊请求卡、数据分类卡。ATP 中词条繁多, 且大多数词条的英语单词就是其实际含义, 故书中对大多数词条仍沿用其英语名称。对于书中出现的外国人名、地名, 除业内耳熟能详者之外, 仍然采用其英文名称。

为了便于查阅和写作逻辑需要, 编写中对 ATP 的内部参数、控制卡、特殊请求卡等进行集中描述, 这在一定程度上导致相关章节的阅读枯燥乏味, 使读者对相关内容印象不深刻。

为了克服这一不足，将在后文中通过举例说明其使用方法。

在编写本书过程中，作者仔细查阅了 1989～2000 年所有《Can/Am EMTP NEWS》（加拿大/美国 EMTP 新闻），有关内容在编写本书时单独引用或融入相关内容中，以使读者了解 EMTP 开发历史中的人和事，理解其中控制命令、变量的含义和来源，增加本书的可读性。

书中数据来自于工程实际，如杆塔参数、线路参数、变压器参数，且在大多数算例中对计算结果进行了比较、分析。因此本书不仅是一本教科书，也是一本资料书。如用户手头没有现成数据，使用本书提供的数据进行分析、模拟，结果也具有一定参考价值。

建议不同层次的用户按照不同的顺序阅读本书。对于 ATP 的初学者而言，建议先认真阅读 ATP、ATPDraw 用户手册，进行一些简单的仿真计算之后，再阅读本书。初学者也可以首先阅读本书“第 2 章 图形界面综合平台”，循序渐进学习简单电磁暂态模拟技巧，对 ATP、ATPDraw 建立初步感性认识；再阅读 ATP、ATPDraw 用户手册，同时阅读本书其他内容。建议阅读算例部分时按从前向后顺序进行，因为前面算例中介绍 ATP、ATPDraw 中元件内容较多、较详细，而后面算例中则较少，以免重复。对于 ATP 的其他用户，可以按自己的需要阅读本书的部分或全部内容。

ATP 的使用涉及很多技巧，如回路开路或短路设置、电流测量、变量赋值等。有些技巧可以提高模拟效率，而有些技巧则决定模拟的成败，这些技巧分散在本书的所有算例中。例如，对于统计合闸、分闸中开关动作时间的设置和统计变量的分组，本应在一次计算中都涉及，但为了避免某个算例内容过多，书中将两者在不同的算例中分别进行详细说明。另外，ATP 的使用技巧不宜显示在算例标题中，因此建议用户通读所有算例。

尽管 ATPDraw 为建立模拟电路（包括电网络和 TACS 网络）及建立 ATP 输入数据文件提供了便捷，但 ATPDraw 建立的 TACS 网络并不直观，自动生成的 ATP 输入数据文件有时显得冗长，而且 ATP 的相当部分功能尚未在 ATPDraw 中实现。初学者可通过使用 ATPDraw 来逐步掌握 ATP 的功能，而对于有经验的用户，建议将使用 ATPDraw 建立电路与直接编写、修改输入数据行相结合，以使 ATPDraw 的方便与命令行的简洁充分融合，相得益彰。

要熟练掌握 ATP 和 ATPDraw，必须具备扎实的电路稳态、暂态理论知识，足够的英语水平，以及丰富的电力、计算方法等英语词汇。要了解 ATP 的发展，还需一定的微机硬件、内存管理、FORTRAN 和 C 编程及其编译知识。

本书主要介绍 ATP 和 ATPDraw 的使用，但不能替代用户手册。

限于篇幅和时间，ATP 的很多模型和功能在书中没有介绍，如旋转电机模型、潮流计算功能、Kizilcay 频率相关支路等。

本书编写分工如下：

章、节	作者姓名	作 者 单 位
1、2、5、6.1、7.1、7.2、7.4、7.6、8.1、8.3	李云阁	国网陕西省电力公司电力科学研究院
3	王倩	西安理工大学
4	刘青	西安科技大学
6.2、7.3、7.5、8.2、8.4、9	赵丹丹	国网上海市电力公司电力科学研究院 （华东电力试验研究院有限公司）
	赵文彬	上海电力学院

全书由李云阁统稿。西安交通大学施围对全书进行了审核。西安科技大学付周兴、国网陕西省电力公司电力科学研究院康林贤、西安理工大学段建东对本书的编写提出了宝贵的建议。西安科技大学巨迪、郭佳萌参加了本书的算例校核、绘图等工作，西安理工大学谭王景提供了部分算例。本书的出版受到了国网陕西省电力公司电力科学研究院温智平、张小庆的大力支持。中国 EMTP-ATP 用户分委会为本书编写提供了最新的软件和相关资料。

ATP 知识博大精深，由于作者水平有限，加之时间仓促，书中不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者
2016 年 4 月

目 录

前 言

1	电磁暂态计算程序	1
1.1	EMTP 发展简史	1
1.2	ATP 简介	4
1.3	ATP 的安装和运行	20
1.4	ATP 的输入数据文件	21
1.5	文件 STARTUP	46
1.6	文件 Listsize.big	49
1.7	支持子程序	51
1.8	模块化数据文件	53
1.9	非线性元件	62
1.10	ATP 的辅助软件	63
2	图形界面综合平台	64
2.1	安装 ATPDraw	65
2.2	ATPDraw 的文件类型	69
2.3	ATPDraw 中的元件	70
2.4	应用示例 1——基本功能	76
2.5	应用示例 2——变量和暂态仿真输出文件	91
2.6	应用示例 3——TACS 简单应用	98
3	电力系统电磁暂态数值计算原理	106
3.1	集中参数元件的暂态等值计算	106
3.2	分布参数元件的暂态等值计算	112
3.3	线路损耗的近似处理方法	121
3.4	旋转电机的电磁暂态数值计算	124
3.5	变压器的电磁暂态数值计算	130
3.6	电抗器和互感器的数学表示	132
3.7	电磁暂态计算中的开关元件	134
3.8	非线性元件及避雷器的数学表示	138

4	电力系统电磁暂态计算中设备及装置的模型	144
4.1	概述	144
4.2	电网元件模型	150
4.3	快速暂态过电压 (VFTO) 计算中的元件模型	174
5	算例 I：模型建立	177
5.1	线路参数	177
5.2	动态电弧模型建立	214
5.3	变压器模型建立	229
6	算例 II：稳态计算	279
6.1	750kV 输电线路地线上电流、电压及损耗	279
6.2	500kV 工频过电压计算	294
7	算例 III：暂时过电压和过电流计算	300
7.1	10kV 系统 PT 三角形绕组短路故障	300
7.2	20kV 系统中性点消弧线圈电压	309
7.3	22kV 中性点不接地系统铁磁谐振	314
7.4	110kV 中性点接地系统空母线铁磁谐振	324
7.5	500kV 系统工频谐振过电压	337
7.6	750kV 线路单相接地潜供电流	344
8	算例 IV：操作过电压和过电流计算	353
8.1	400kV 架空输电线路合闸统计分析	353
8.2	500kV 架空输电线路操作过电压计算	360
8.3	750kV 空载变压器合闸涌流	372
8.4	直流输电系统操作过电压计算	387
9	算例 V：雷电过电压计算	399
9.1	220kV GIS 变电站雷电侵入波模型建立	399
9.2	220kV GIS 变电站雷电侵入波仿真结果	405
	参考文献	408

电磁暂态计算程序

电力系统中, 由于断路器或隔离开关操作、内部故障、雷击等而发生电磁暂态过程, 电容、电感中存储的电场能、磁场能互相转换, 使得系统中出现过电压、过电流, 威胁着电力设备和电网的安全稳定运行。通过研究电磁暂态过程, 掌握过电压、过电流的大小及持续时间, 才能采取适当的预防、限制措施, 防患于未然。

早期采用暂态网络分析仪 (Transient Network Analyser, TNA) 模拟电力系统内部暂态过程, TNA 是对真实电力系统数学物理过程的模拟工具。所谓数学, 是指将电力系统中设备的电气、几何参数按比例缩小; 所谓物理, 是将这些缩小的设备连接成缩小的电网, 这个电网中的电压、电流波形与原系统中的相同, 只是存在着时间和数值尺度上的差异。TNA 的物理意义清晰, 单次仿真过程快, 仿真结果为模拟量, 用波形记录仪器直接记录。但 TNA 的缺点也明显, 它占地广, 投资大, 建立和改变算例复杂, 效率低, 仿真结果共享、验证困难。同时, 由于 TNA 所使用元件频率的限制, 研究雷电过电压不能使用 TNA, 必须使用防雷分析仪。

随着电力系统朝着大容量、高电压、远距离的方向发展, 系统内部交直流混连, 存在水电、火电、风电、太阳能、生物质等多种能源形式, 因此利用计算机仿真电力系统电磁暂态过程已成为主流仿真方式。计算机仿真简洁、高效、灵活, 不仅能够仿真内部过电压, 也能仿真雷电过电压, 还能仿真复杂的控制系统。

EMTP (Electro-Magnetic Transient Program, 电磁暂态计算程序) 是目前国际通用的电磁暂态仿真程序, 广泛用于工程、教学和科研领域。在长达 50 多年的发展过程中, 先后出现了多个 EMTP 开发组织, 也出现了多个 EMTP 版本, 如 BPA-EMTP、ATP-EMTP、DCG-EMTP、UBC-EMTP, MicroTran 等, 它们统称为 EMTP。本书将主要介绍 ATP-EMTP。

1.1 EMTP 发展简史

1960~1963 年 H.W.Dommel 在德国慕尼黑进行电磁暂态分析程序的研究、开发工作, 他对包含电阻、电感、电容、无损线路、一个开关、一个电源的单相回路进行电磁暂态模拟, 基本算法为集中参数用梯形积分法, 输电线路采用贝杰龙法 (即特性线法)。1966 年, Dommel 就职于美国邦纳维尔电力管理局 (Bonneville Power Administration, BPA) 继续 EMTP 的开发。1968 年完成了约 4000 行的 EMTP 原型。1969 年 4 月 IEEE PAS 上发表了 Dommel 的文章《Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single-and Multiphase Networks》, 标志着 EMTP 雏形的建立。1969 年, 随着一些组织和个人不断推进, 又加入了多相 π 输电线路、多相分布参数 (包括不同换位情况) 和随频率变化特性模型, EMTP 功能不断得到完善。



1970 年 CIGRE (International Council on Large Electric System, 国际大电网会议) 的开关专业学术委员会 SC13 (Study Committee 13) 设立工作组 WG13-05 (Working Group13-05) 对过电压计算精度进行研究, 肯定了 EMTP 的绝对优越性。

1973 年 Dommel 离开 BPA, 就职于加拿大不列颠哥伦比亚大学 (University of British Columbia, UBC), W. Scott Meyer 和 Tsu-huei Liu 博士接替 EMTP 的开发和管理工作。

Meyer 博士于 1942 年出生在美国明尼苏达州。他于 1972 年加入 BPA, 从此全身心投入到电磁暂态的计算机仿真研究之中。Meyer 博士于 1995 年 5 月从 BPA 正式退休, 但之后自愿继续在 BPA 从事研究工作直到 2004 年。

Liu 博士于 1943 年出生于中国贵州省。她于 1975 年加入 BPA, 之后把大部分时间用于电磁暂态软件的开发, 2007 年 Liu 博士从 BPA 退休。

1974 年, Meyer 博士完成了能够在不同计算机上运行 EMTP 的机器编译工作。

1975 年, Meyer 博士提出对 Electro-Magnetic Transient Program 简称为 EMTP, 从此 EMTP 这一名称逐渐通用至今。

1976 年完成可应用于各种计算机的通用源码 (Universal Transients Program File, UTPF) 和编译器 (Editor/Translator Program)。

1978 年在威斯康星大学开办了第一期 EMTP 培训班, 自此以后举办了多期夏季培训班。

1982 年 9 月, 由 6 家机构成立了 EMTP 联合开发机构 DCG (Development Coordination Group), 包括 3 个美国政府部门 (BPA、西部地区电力管理局、美国垦务局), 3 家加拿大机构 (魁北克水电、渥太华水电以及代表加拿大其他公共事业用户的加拿大电气联合会)。1983 年 3 月, DCG 同意 EMTP (UTPF) 仍处于公共领域内。之后美国电力研究院 (Electric Power Research Institute, EPRI) 加入 DCG。在 EMTP 的知识产权方面, BPA 和 DCG/EPRI 意见相左。BPA 是美国的政府机构, 主张继续无偿使用; 而 EPRI 是私营企业, 主张商业化有偿使用。

在 1984 年以前的 10 多年里, BPA 主导了 EMTP 程序的开发工作, 它在人力和财力上对 EMTP 程序的开发工作给予了极大的支持。当时的工作属于公共域, 其成果可以免费提供给任何一个感兴趣的团体。1985 年 4 月, 根据美国信息自由法案, BPA 公布了当时最新版的 UTPE, 同年 BPA 终止 EMTP 的开发, BPA-EMTP 的最终版为 M42。1987 年 BPA 退出 DCG。

1984 年初, 由于不同意 DCG 和 EPRI 对 EMTP 商业化的建议, Tsu-huei Liu 博士辞去了 DCG 主席一职。原 BPA-EMTP 的开发者之一 Meyer 博士终止了 12 年的 EMTP 开发合同, 在公共域 BPA-EMTP 基础上, 利用他所有的业余时间开发 BPA-EMTP 的替代程序。

在 Meyer 博士、Liu 博士的领导下, 1984 年秋, ATP (Alternative Transients Program) 程序正式诞生, 现通常称之为 ATP 版本的 EMTP, 或 ATP-EMTP, 简称 ATP。ATP 不归属于公共领域, 使用免费, 但使用相关资料之前必须获得许可。

1986 年, Dommel 向 BPA 提交了《电力系统电磁暂态计算理论》(EMTP Theory Book) 一书, 这是电力系统电磁暂态数值计算的经典理论著作。

1986 年底, Herbert Konkel 在 IBM PC XT 兼容机上成功使用 ATP, 打开了大规模使用 ATP 的大门。

1987 年, 在比利时鲁汶举办了 ATP 培训班, 这也是 ATP 首次在公众场合亮相。

1989 年, MODELS 被引入电磁暂态分析, 大大扩展了 ATP 的功能和灵活性。

1989 年, 经过中国台湾 Chun-Heng Chinag、德国 Kizilcay 的先后努力, ATP 超越了 MS-DOS



640K 内存的限制, 能够使用虚拟内存, 使得应用 ATP 进行大型仿真成为可能。

在 Meyer、Liu 两位博士的领导和不懈努力下, 通过国际间的合作, ATP 成为目前国际上电磁暂态分析最广泛使用的程序, 源程序约 21.8 万行。

DCG 推出的 EMTP, 即 DCG-EMTP 为商业软件, 最新版本是 2016 年 1 月发布的 EMTP-RV 3.3 版本, 其图形接口为 EMTPWorks。

H.W.Dommel 到达加拿大不列颠哥伦比亚大学后开发了 UBC 版本的 EMTP。为了使 EMTP 能够在 IBM 兼容的个人计算机上使用, 1987 年, H.W.Dommel、J.Marti、L.Marti 等人成立了 UBC 的子公司 MicroTran Power System Analysis Corporation, 将 UBC EMTP 的代码进行了扩展, 这就是 MicroTran 版本的 EMTP, 称之为 MicroTran。MicroTran 的最新版本是 2008 年发布的 3.22 版。MicroTran 也是商业化软件, 用户范围较小。

由 BPA 最早无偿提供的 BPA-EMTP 已停止开发更新, 其用户现大多已转用 ATP。

ATP 的算法、整体架构在 20 世纪 80 年代末完成。ATP 是在当时的 DOS、UNIX 操作系统下开发的, 与当今其他主流用户软件相比, ATP 的用户界面落后, 人机交互功能弱。当时研究人员花费了很大精力对程序进行优化, 如不断升级编译系统、引入各种请求卡、丰富显示和打印命令等, 以使程序能在不同型号的计算机上、以较低的计算速度和使用少量内存容量情况下运行, 如从 1992~1999 年几乎每期的《Can/Am EMTP NEWS》(EMTP 新闻, 加拿大/美国 EMTP 用户总会主办的内部季刊)上, 头两条报道标题均为“Salford Compiler and DOS Extender (Salford 编译器和 DOS 扩展器)”、“Improvements to Salford TPLOT (Salford 绘图程序 TPLOT 的发展)”。这无疑增加了程序使用的复杂程度。当今 PC 主流操作系统为 Windows, 由于 ATP 的初学者对 DOS、UNIX 操作系统知之甚少, 这些均导致 ATP 的推广普及工作相对缓慢。

我国学者从 20 世纪 70 年代末参与 EMTP 开发和推广, 主要人员有施围、曹祥麟、马仁明 (见图 1-1) 等。1979 年底, 施围赴加拿大不列颠哥伦比亚大学电气工程系进修, 与 H.W.Dommel 一起在 UBC-EMTP 中加入了金属氧化物避雷器 (MOA) 单指数模型。施围于 1982 年 2 月回国, 当年 5 月在西安交通大学的 Prime-550 计算机上成功引入了 EMTP, 并在全国推广, 先后在广州、沈阳、武汉等地举行了不同类型的 EMTP 短训班和研讨会。

曹祥麟于 1990 年 4 月开始在东京电力公司工作, 直至 2008 年 9 月退休。1997 年, 他开发了 58 型同步电机模型, 该模型在相域求解。比之以前在 dq0 域求解的 59 型同步电机模型, 58 型模型有更好的稳定性和精度。1999 年, 他开发了基于电流源迭代法并可考虑系统不对称性的潮流计算辅助程序 NEW LOAD FLOW。在此之前 ATP 中潮流计算辅助程序由 F. Rasmussen 开发, 其缺点是将发电机和电动机均作为三相对称电压源, 且收敛较慢。2006 年, 曹祥麟开发了 56 型感应电机模型 (即 IM56 型)。此前 EMTP 使用通用电机模型来模拟各种同步电机、异步电机和直流电机, 应用范围广, 但使用不太方便; 而且, 该模型在 dq0 域求解电机方程, 可造成数值不稳定。而 IM56 型模型在相域求解, 计算稳定, 使用方便。另外, 曹祥麟利用低通滤波器和阶层系数解决了 TACS (Transient Analysis of Control System) 导致的时延问题, 并提出了基于瞬时值 TACS 变量初始化方法 (通常手工初始化), 这两处改进均用于东京电力公司内部使用的 ATP 中。曹祥麟对 ATP 的贡献见其发表的各类英、日文文章。

1982~1985 年, 马仁明赴美国邦纳维尔电力局 (BPA) 做访问学者, 成为当时 EMTP 研发团队的核心成员。期间, 他重新梳理 TACS 源程序, 改进 TACS 计算逻辑, 设置 TACS 元

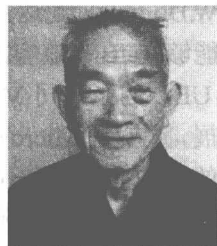
件标识,用 88 型元件替代了所有非内置的 TACS 装置,极大简化了数据准备,提高了 TACS 的编译速度。在 M32 版以前的 EMTP 中,开关元件互联时必须用小阻抗元件对其进行隔离。马仁明修改开关模型的计算逻辑,实现了开关元件的任意互联。此外,马仁明对 EMTP 潮流计算进行了精细化处理。回国后,马仁明与多位其他同志一起,在武汉、北京等地举办 EMTP 应用培训班,将 EMTP 推广至全国。



施围



曹祥麟



马仁明

图 1-1 我国早期参加 EMTP 开发和推广的学者

20 世纪 80 年代初,在原水利电力部的领导下,我国也引进了 BPA-EMTP。1988 年,又通过电力部引进了 ATP-EMTP。目前,国内电力系统研究人员广泛使用的版本是 ATP-EMTP。

EMTP 在我国每一项超高压、特高压交直流工程的建设 and 运行中都发挥了重要作用,对我国电力系统的发展功不可没。

1.2 ATP 简介

1.2.1 功能

ATP 广泛应用于电力系统过电压分析、绝缘配合、轴系研究、继电保护模拟、谐波和电能质量研究、高压直流和柔性交流输电系统(Flexible Alternating Current Transmission System, FACTS)的模拟以及可以转换为电路求解的一切技术问题。ATP 的基本原理是:将分布参数元件采用特性线法转化为集中参数元件,用隐式梯形积分法在时域内求解网络的微分方程,在每一时间步长求解代数方程组,方程组为节点导纳矩阵,未知量为节点电压。计算结果包括各种元件相关的量,如节点电压、支路电压、支路电流、元件消耗的功率或能量,计算结果的输出形式为文本文件和绘图文件。

网络微分方程的非零初始状态的确定通过以下几种方式:由稳态相量解法自动确定、由用户通过简单元件输入、采用稳态+暂态法。在稳态相量分析中,非线性元件(如非线性电感、避雷器)被忽略。

ATP 中的典型元件包括:

- (1) 集中参数电阻 R 、电感 L 和电容 C 。
- (2) 多相 π 型等值电路,这种情况下(1)中的 R 、 L 、 C 变为矩阵 $[R]$ 、 $[L]$ 、 $[C]$ 。
- (3) 多相分布参数输电线路,既有恒定参数模型,又有频率相关模型。
- (4) 非线性电阻,如金属氧化物避雷器(MOA)等。
- (5) 非线性电感,既可模拟常规的单值特性曲线,也可包括剩磁和磁滞。



(6) 时变电阻。

(7) 开关, 用来模拟断路器、火花间隙或其他网络连接的改变, 二极管和晶闸管也包括在内。

(8) 电压和电流源, 除了可用标准数学函数描述的波形外(如正弦函数、阶跃函数、斜波函数), 用户还可用 Fortran 或 TACS 来定义波形。

(9) 动态旋转电机, 除了模拟最常用的三相同步电机外, 还可模拟单相、两相和三相感应电机, 以及直流电机, 这些模型与 TACS 控制系统连接, 可模拟电压调节器和调速器等的动态特性。

(10) TACS 能够模拟非线性特性和逻辑运算, 其输入、输出可与所模拟的网络接口实现综合计算, 所有的 TACS 模型都可被用户编辑修改。

(11) MODELS 可以灵活实现电网络与控制系统的交互, 大大扩展了 ATP 的功能。

1.2.2 版本

目前, EMTP 用户总会提供的 ATP 版本有: ①MS-DOS、Windows 3.x/95/98 操作系统: Salford ATP, 32 位软件, 需 Salford 的 DOS 扩展器 DBOS/486。②Windows 95/98/NT/2000/XP/Vista/7 操作系统: GNU-Mingw32 ATP, Watcom ATP, 均为 32 位软件。③Linux 操作系统: GNU-Linux ATP。

下面对 ATP 的几个版本做一简单介绍:

(1) Salford ATP。Salford ATP 使用 Salford Software 的 Fortran 编译, 程序执行需要 32 位 DOS 扩展器 Salford DBOS (能够对虚拟内存进行管理), 不能同时执行多个 ATP 算例。如在 Windows 3.x、Windows 95 下运行, 需在系统文件 SYSTEM.INI 中增加 WDBOS.386。避免使用长文件名称或长目录名, 文件名中不能有空格。1989 年 Salford 的 DOS 扩展器对 EMTP 用户的售价为每台计算机 55 美元。

(2) Watcom ATP。Watcom ATP 使用 Watcom Fortran 编译, 支持长文件名, 程序变量维数可增加。Watcom ATP 的功能不及 Salford ATP, 最大的区别是 Watcom ATP 在绘图时不支持 SPY。它可执行长达 150000 行的数据文件, 便于进行大型网络的模拟。在 Windows NT 下运行时, Watcom ATP 可在同一工作目录下同时执行多个任务。

(3) GNU-Mingw32 ATP。首先对 GNU 做一简要介绍。1983 年 9 月 27 日, Richard Stallman 公开发起 GNU 计划, 其目标是创建一套完全自由的操作系统, GCC (GNU Compiler Collection, GNU 编译器集合) 是 GNU 计划的关键部分, 以 GPL 及 LGPL 许可证形式发行。由 GNU GCC 导出了其他版本的编译器, 其中 Mingw32 是 WIN32 平台下的编译器, Djgpp 是 DOS 下的 32 位编译器。Mingw 全名为 Minimalist GNU for Windows, 是一套用于 Windows 平台的 GNU 工具集, 实现了 GNU 的基本功能, 编译后的程序无需第三方运行库 (DLL) 便可在 Windows 系统上运行。

GNU-Mingw32 ATP, 使用本地 GNU/Mingw32 Fortran 进行编译, 开发者、使用者无需购买昂贵的 Watcom Fortran 或者 Salford Fortran 编译器, 对于使用编译 TACS 或者 FOREIGN MODELS 的用户, 其优势更加明显。如同 Watcom ATP 一样, GNU-Mingw32 ATP 彻底避开了本地 DOS。GNU-Mingw32 ATP 支持长文件名, 启动快, 需要的实际内存少, 运行性能与

Watcom ATP 相当。但是如果使用绘图支持程序 DISLIN, GNU-Mingw32 ATP 的运行速度降低。

ATP 的另外一个版本 GNU-Djgpp ATP, 使用 GNU/Djgpp Fortran (g77) 编译和链接。其运行系统为 MS-DOS、Windows 3.x/95/98/NT, 它必须有 go32-v2.exe 才能使用。该版本目前使用较少。

(4) GNU-Linux ATP。这是利用 GNU 编译的 ATP 版本，在 Linux 下运行。

不同 ATP 版本之间的区别很小,见表 1-1。本书将以 GNU-Mingw32 ATP 为例,介绍 ATP 的功能及使用。

表 1-1 不同 ATP 版本之间的区别

版本	Salford ATP	Watcom ATP	GNU-Mingw32 ATP	GNU-Djgpp ATP	GNU-Linux ATP
执行文件名	Tpbig.exe	Atpwnt.exe	Tpbig.exe	Tpbig.exe	Tpbig
操作系统	MS-DOS、Windows	Windows	Windows	MS-DOS、Windows	Linux
编译器	Salford Fortran	Watcom Fortran	GNU-Mingw32 Fortran	GNU- Djgpp Fortran	GNU Fortran

1.2.3 世界范围内用户委员会

ATP 是个人工作成果，加拿大/美国 EMTP 总会（Canadian/American EMTP User Group）受委托代理 ATP 的使用授权、分委会建立。各分委会负责 ATP/EMTP 软件包的发布；负责分委会网站的建设、更新、维护与日常管理；负责该地区 ATP/EMTP 用户的资格审查和版权授予；为本地区 ATP/EMTP 用户提供软件的技术咨询和疑难问题解答；为本地区 ATP/EMTP 用户提供网上技术论坛、组织参与世界 ATP/EMTP 协会的各种学术活动和国际交流，并组织参加下一代 ATP/EMTP 软件的开发与完善等。目前 ATP 的主要用户组织有：

Canadian/American EMTP User Group (加拿大/美国 EMTP 用户总会)

Argentinian EMTP User Group (CAUE) (阿根廷 EMTP 用户分委会)

Australian EMTP User Group (AEUG) (澳大利亚 EMTP 用户分委会)

Brazilian EMTP User Group (CBUE) (巴西 EMTP 用户分委会)

Chinese EMTP-ATP Users Group (中国 EMTP-ATP 用户分委会)

European EMTP-ATP Users Group Group (EEUG) (欧洲 EMTP-ATP 用户分委会)

Indian EMTP User Group (印度 EMTP 用户分委会)

Japanese ATP User Group (JAUG) (日本 ATP 用户分委会)

Korean EMTP User Group (韩国 EMTP 用户分委会)

Latin American EMTP User Group (CLAUE) (拉丁美洲 EMTP 用户分委会)

Republic of China EMTP Users Group (中国台湾 EMTP 用户分委会)

South African ATP User Group (南非 ATP 用户分委会)

1.2.4 《Can/Am EMTP NEWS》摘录

1984 年，欧洲最早的 EMTP 用户中心——鲁汶 EMTP 中心（the Leuven EMTP Center of the European EMTP User Group，欧洲 EMTP 用户分委会鲁汶 EMTP 中心，简称为 LEC）成立。约从 1986 年开始，LEC 出版季刊《EMTP News》，早期的《EMTP News》每期约 100



页, 记载 ATP 发展和应用的重要事件。1993 年 LEC 解散, 取而代之的是欧洲 EMTP-ATP 用户分委会 (European EMTP-ATP Users Group, EEUG)。

由于 W. Scott. Meyer 和 Tsu-huei Liu 博士任加拿大/美国 EMTP 用户总会主席, 所以加拿大/美国 EMTP 用户总会总体负责 ATP 的完善工作。总会也出版季刊《Can/Am EMTP NEWS》, 每逢 1、4、7、10 月发行, 每期 20 页, W.Scott Meyer 任编辑, Tsu-huei Liu 一家 (包括她的丈夫、儿女) 负责出版和邮寄。《Can/Am EMTP NEWS》的内容包括计算机的发展、程序开发使用中的问题以及处理。早期的《Can/Am EMTP NEWS》多处引用了 LEC《EMTP News》中的内容。目前 ATP 的最新使用手册为 1995 年版本, 之后 ATP 的新支持程序、更新信息均在《Can/Am EMTP NEWS》中披露, 因此《Can/Am EMTP NEWS》是 ATP 使用手册的有益补充。

为了深入了解 ATP 的开发历史, 尤其是随着计算机的发展对 ATP 的优化过程, 加深对程序中所使用的参数、命令的理解, 体会 Meyer 博士和 Liu 博士以及其他众多开发人员坚持不懈的追求、精益求精的境界, 以下摘抄了 1989~2000 年《Can/Am EMTP NEWS》的部分内容, 以飨读者。为了前后内容连贯和编排需要, 部分内容的顺序不同于原文。

1. 1989 年, 一月期

Meyer 博士连续 4 年利用秋季假期 4 周时间, 在比利时鲁汶大学开发 ATP。鲁汶大学是 LEC 的家, LEC 负责 ATP 使用授权。

2. 1989 年, 七月期

4 月 10~14 日, EMTP 短训班如期在佛罗里达大学进行, 学员机使用英特尔 80286 或 80386 型 CPU, 安装 MS-DOS 操作系统, 单色或彩色 EGA 显示器。教员机使用英特尔 80386 型 CPU。教员机连接了投影, 投影图形为单色 CGA 模式。

3. 1989 年, 十月期

Laurent Dubé 教授在短训班上介绍了新的 TACS (即 MODELS)。由于受计算机内存限制, MODELS 并不能用在所有 EMTP 版本中。用 Salford 的 DOS 扩展器管理 80386 计算机的虚拟内存, 实践证明效果良好。80386 的前景看好, 为 80386 开发的软件将来可以运行在功能更加强大的 80X86 系列机型上。当月 25MHz 的 80486 大量上市。

4. 1990 年, 十月期

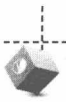
EMTP NEWS 是关于 EMTP 使用和开发的国际季刊。在过去两年, EMTP NEWS 由 LEC 发行, 每期大约 50~60 页。加拿大/美国 EMTP 用户委员会进行二次印刷、邮寄, 从此这两国 ATP 注册用户订阅 EMTP NEWS 更加便宜、便捷。具体订购方法: 通过支票支付给 Tsu-huei Liu, 每年 15 美元。

5. 1991 年, 四月期

Salford EMTP 现在能够支持 3 种类型的绘图文件, 包括类 C (语言) 格式绘图文件, 用户可通过 TPLOT 绘制这 3 种文件。类 C 格式绘图文件的显著优点是: 如果在暂态计算过程中将绘图数据存储在 RAM 中 (文件 STARTUP 中 LUNIT4 取负值), 创建类 C 格式绘图文件将比无格式绘图文件快得多。

6. 1991 年, 七月期

直到最近, DBOS 2.42 用户才发现/VDISK 对 Salford EMTP 非常重要。如果 DBOS 无法自动避开 RAM 中从 640K~1024K 区域 (如 IBM PS/2、AT&T 6386 计算机), 或出现冲突, /VDISK 能迫使 DBOS 避开这一区域。



为了鼓励续费, LEC 可能会收取额外的初装费用, 大约为会员年费的 5 倍, 对工业用户来说为 $3800 \times 5 = 19000$ 美元。如同 1984 年 DCG/EPRI 的行为, 任何对 EMTP 的商业化行为都是不能接受的。LEC 销售 ATP 是对本编辑(作者注: 指 W. Scott Meyer 博士)的冒犯, 本编辑决定年底(1991 年 12 月 31 日)前终止该行为。如 LEC 不改变自己的政策, 加拿大/美国 EMTP 用户委员会将与其断绝关系, 开始在全球发放 ATP 的使用许可证, 并鼓励用户自由扩大 ATP 的使用。

执行 EMTP 时新增了 BOTH 选择项, LUNIT6 通道同时输出到屏幕和磁盘。

德国 Wehrend 先生总结了 4 台不同 80386 计算机使用 DESQview 的情况(作者注: DESQview 是 DOS 下的多任务控制软件, 于 1985 年 7 月发布, 早于微软 Windows 4 个月):

(1) 16MHz 386-SX, 2 M RAM, MS-DOS 3.3。

(2) 16MHz 80386, 4 MRAM, DR-DOS 5.0。

(3) 25MHz 80386, 4 MRAM, DR-DOS 5.0。

(4) 33MHz 80386, 4 MRAM, MS-DOS 3.3。

以上配置包括了从最慢到最快的 80386, 也使用了不同的操作系统。MS-DOS 系微软产品, DR-DOS 系 Digital Research 公司产品, 两者功能类似。使用情况证实在 DR-DOS 下、在 DESQview 中可以运行 Salford EMTP。

7. 1991 年, 十月期

过去 3 个月内发生的大事之一就是用 TPLOT 进行绘图时, 鼠标操作可以替代大部分的键盘输入。其基本原理是: 屏幕显示多个选项, 用户利用鼠标进行选择。

LEC 目前仍然对垄断欧洲 ATP 使用许可踌躇满志, 但明年这种情况不会继续存在。北美用户委员会已经决定最迟于年底开始自行发放 ATP 使用许可。与 LEC 分道扬镳不会对 ATP 的开发产生影响。

与 LEC 断绝关系后, 北美用户不能免费得到 EMTP NEWS (季刊, 每年收取 15 美元的重印、邮寄费), 1992 年的续订尚未开始。

8. 1992 年, 一月期

BPA 的 Jerry Almos 将 Ned Mohan 教授的 64 个专利算例从 TACS 转换为 MODELS。

意大利 Pisa 大学创造性地试用 MODELS 来模拟蓄电池的电气—化学动态过程。尚不清楚是谁将 MODELS 引入 Pisa 大学, 如果是研究人员自学成才, 这确实是一个励志故事。

多数读者知道 PC 机使用的 BASIC 通常是解释性的, 经过 BASIC 编译器编译过的程序运行速度要快很多。MODELS 也是解释性的, 因此 MODELS 的作者 Laurent Dubé 建议使用 C 语言编译 MODELS, 以加快其运行速度。

总会 Tsu-huei Liu 主席已经将线路模型频率扫描功能(Line Model Frequency Scan, LMFS)的程序代码从 BPA 的 EMTP 植入 ATP。BPA 的程序仅限使用在 VAX/VMS 计算机上, 而 ATP 应用则更加广泛。

9. 1992 年, 七月期

期盼已久的编译器 FTN77/486 和 DOS 扩展器 DBOS/486 (两个的版本号都是 Rev 2.66) 已经在 BPA 使用。

当使用 DBOS/486 Rev 2.66 时, Microsoft Windows 3.0 or 3.1 不支持 Salford EMTP 和 TPLOT。本编辑认为 Microsoft Windows 3.1 的性能比 Quarterdeck 的 DESQview 逊色, 但是



Windows 使用却更加广泛。Digital Research 的 DR-DOS 也比 Microsoft 的 MS DOS 好,但是 DR-DOS 却没有被广泛使用。本编辑提醒读者,受欢迎并不表示性能更好 (IBM 早先已有类似评论)。

多年来挪威的博士生 Hans Kristian Høidalen 致力于将 EMTP 图形化,用鼠标和下拉菜单绘制、连接示意图和 EMTP 卡。

大多数试验算例 BENCH MARK DC-XX 都不是真实算例,本编辑比任何人更清楚这点,因为过去 20 多年来他一直在维护这些算例。BENCH MARK DC-XX 系列算例用来测试程序的不同选项,而不是用来测试计算速度。为了便于研究所关心的主要问题,尤其是对于速度慢的计算机,多数算例的规模有意做的很小。

新的应用程序 OLD TACS 将 1983 年的 TACS 格式转换为标准 M39 格式 (1984 年 7 月)。

BPA 的 Gerald Lee 首次报告了在 Windows 3.0 增强模式下使用 Salford EMTP 的情况, DBOS 不再包含在 AUTOEXEC.BAT 中,而是在批处理文件 ATP.BAT 中。

10. 1992 年,十月期

9 月 26、27 日, Apollo 格式的 UTPF (the Universal Transients Program File) 程序模块被转换为 Salford 格式模块,这标志着一个新时代的开始。UTPF 最早创建于 1974 年,是 CDC (Control Data) 格式的模块。1979 年,从 CDC 格式发展到 DEC VAX/VMS 格式。1984 年,开始开发 ATP,使用的是 Apollo 格式。现在,在 BPA 停止使用 Apollo 格式之后两年多,为了使用 DBOS/486, Apollo 格式终于被 Salford 格式取代。

10 月 1 日, BPA 用 COMPAQ 公司的 33MHz、486 PC 机更换了 Liu 博士的 Sun-3/140 工作站,这是一个巨大的进步,现在所有在俄勒冈州进行的 ATP 开发工作均在 PC 机上进行,使用 Salford 的 FTN77/386 或者 486 编译器。

11. 1993 年,一月期

除非出现新的硬件,否则在 MS Windows 下输出 Salford EMTP 的计算结果的速度之慢难以忍受。

11 月 7 日,通过 E-mail 发送了 10 月的期刊,与传统的邮局邮寄相比,普通北美用户能够提前 5 周收到期刊。电子出版最终战胜了机械式印刷和邮寄。

Hatch Associates 咨询公司位于加拿大渥太华,其工作人员 James Wikston 建立了一个包含 32768 个或更多数据卡的巨型数据文件,以模拟在电弧炉存在情况下的 SVC 动作情况。10 月 26 日, James Wikston 电话告知,受 16 位限制的 Salford EMTP 拒绝执行这一数据文件。本编辑很快意识到受 16 位限制的不仅是 Salford EMTP,而是所有的计算机。当天晚些时候,这一问题得到解决,并向 James Wikston 寄出了扩展的 Salford EMTP。

文件 GRAPHICS.AUX 从另外一个文件 GRAPHICS 衍化而来,例如,水平总像素 NXMAX 其实可根据垂直总像素 NYMAX 计算。

中国南京的 Yin Yuexin 将得到最新的 Salford EMTP。他目前是佛罗里达大学的研究生,已离开家乡三四年了,将回国一周。1990 年 10 月,本编辑与他在鲁汶共事。

绘图软件 Salford TPLOT 能够输出 COMTRADE 格式文件,这是后处理的结果,但 ATP 不能直接输出 COMTRADE 格式文件。

12. 1993 年,4 月期

明尼苏达大学的 Ned Mohan 教授将在温哥华举办一期 EMTP 短训班,时间在 1993 年 7