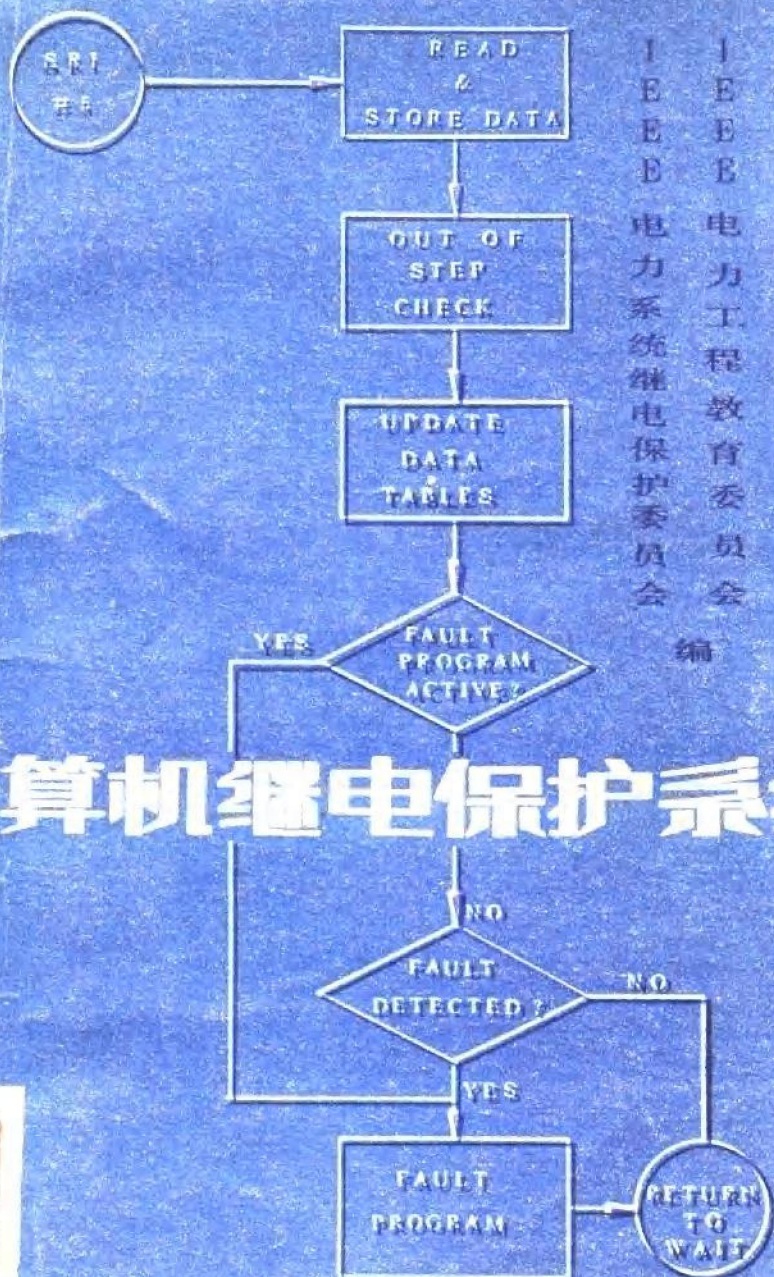




IEEE 电力系统继电保护委员会

黄焕焜

李菊

编译

计算机继电保护系统

水利电力出版社

70571b

内 容 提 要

本书是美国 I E E 编撰的计算机继电保护教材。全书共分九章，包括计算机继电保护系统简介，信号的处理，计算机继电保护系统的算法以及线路、发电机、变压器差动保护的具体方案等，书末还列出了大量的数字计算机继电保护系统文献目录。内容深入浅出，叙述扼要而有系统，既便于初学，又可作为深入研究这方面课题的参考。

本书供从事计算机继电保护的技术人员、大专院校教师和研究生阅读。

IEEE TUTORIAL COURSE COMPUTER RELAYING

The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 1979

计算机继电保护系统

IEEE 电力系统继电保护委员会 编
IEEE 电力工程教育委员会
黄焕焜 李 菊 译

*

水利电力出版社出版

(北京德胜门外大钟庙)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 5.375印张 140千字

1983年2月第一版 1983年2月北京第一次印刷

印数 0001—6620册 定价 0.70元

书号 15143·5038

译 者 的 话

本书是美国 IEEE 编撰的计算机继电保护教材。全书共分九章，包括计算机继电保护原理框图，信号处理，计算机继电保护系统的算法以及线路、发电机、变压器保护的具体方案示例等。全书均由高水平的专家精心编辑、分章执笔撰写，内容深入浅出，叙述扼要而有系统，既方便初学，又可作深入研究这方面课题的参考。此书是值得从事计算机继电保护的工程技术人员、大专院校教师和研究生一读的。最近（1980年），Westinghouse 公司刊印一篇文献“Digital Protective Relaying Algorithms and System”中对此书曾特加推荐。

目前计算机技术迅速发展，计算机的应用日趋广泛，继电保护技术应用计算机将是必然趋势。同时，电力系统日渐扩大，系统对继电保护的要求不断提高，这将促进继电保护中应用计算机问题的研究和试验工作的开展。现将该书译成中文，以供国内读者参阅。

本书由浙江大学黄焕焜、李菊两同志合译，华北电力学院杨奇逊同志校订。

限于水平，漏误之处请读者指正。

1982年6月10日

教程主编:

M.S. Sachdev, Senior Member IEEE
Power Systems Research Group
University of Saskatchewan
Saskatoon, Sask., Canada

章
序

执 笔 者

- 言 G.D. Rockefeller, Fellow IEEE
Consolidated Edison Co.
New York, N.Y.
- I A.G. Phadke, Senior Member IEEE
American Electric Power Service Corporation
New York, N.Y.
- II B.D. Russell, Member IEEE
Department of Electrical Engineering
Texas A & M University
College Station, TX
- III E.A. Udren, Member IEEE
Westinghouse Electric Corporation
Pittsburg, PA
- IV W.D. Breingan, Member IEEE
General Electric Company
Philadelphia, PA
- V L.N. Walker, Member IEEE
C.O. Harbourt, Member IEEE
Department of Electrical Engineering
University of Missouri-Columbia
Columbia, MO
- VI M.S. Sachdev, Senior Member IEEE
Power Systems Research Group
University of Saskatchewan
Saskatoon, Sask., Canada
- VII M.S. Sachdev, Senior Member IEEE
Power Systems Research Group
University of Saskatchewan
Saskatoon, Sask., Canada
- VIII A.G. Phadke, Senior Member IEEE
American Electric Power Service Corporation
New York, N.Y.
- IX T.C. Baird, Member IEEE
Iowa Power and Light Company
Des Moines, IO

序 言

追溯发展过程，计算机继电保护在12年以前已开始出现了。当时数字硬件虽已有商品出现，但储存程序处理机除少数试验装置外，仍未得到应用。可是，目前与那些更复杂的专用硬件继电保护系统相比较，微处理机系统的价格，似乎并不昂贵。

本书是由高水平的专家们撰写的。这些材料经过精心编辑成为全日制教程的基础，其中除发电机保护和计算机硬件与软件的一般要求外，还包括在变电所应用方面的大量论述。

本人对这问题的回忆大约可回溯到1965年，当时 Idaho 电力公司提出了减载和失步继电保护最好能由调度中心操作的计算机来控制。这两个任务都超过少数的变电所所能提供信息的范围，它们应是系统问题，而不是有关继电保护区域的问题。计算机的文献中几乎没有牵涉到这方面的应用问题，本书也将不包括它们。

计算机继电保护开始于小型计算机时代。有些早期的研究工作是考虑用一台中心变电所计算机，以执行变电所中所有的继电保护任务。根据当时可用的硬件，把它作为一种可能的途径，是合于逻辑的。但是，现在微处理机技术似乎已将争论平息下来，对快速保护来说，用分散的并联的处理机将是唯一要考虑的解决办法。用了这种办法，中心变电所计算机将降为执行非继电保护的任務，用以作为许多微处理机与调度中心操作的计算机总体之间的中间联络。

许多企业继电保护工程师不赞成一揽子的解决办法，我认为他们是对的，对于企业继电保护工程师接受这种新技术而言，采用许多微处理机是相当重要的。许多小型计算机另一关键性的优点是它导致的相当高的组件批量。这里的关键更多地牵涉到软件

价格，而不是硬件。硬件研制的价格可以大大地由其他应用方面负担，而软件的价格则需继电保护生产工业来降低。但这生产工业的特点是使用量不大，特别是在较复杂的输电线路保护中的应用。这生产工业不可能提供设计与维修中心变电所所用的成套软件。按照保护区装设许多微处理机的方法，其软件费用可以由许多单位分担，从而使它降低。

在1971年，电力系统继电保护委员会建立了一个计算机继电保护分会，本书所有参与者都已与它有所联系，而且有些人在开始就参加了。也许会感到惊讶的是这分会已于1978年被解散。因委员会感到当前把他们的活动结合到其它主要方面的时机已成熟，即应将计算机应用小组的活动并入旋转电机保护、线路继电保护和继电保护输入电源等分会中去。目的是促使研究人员与使用人员之间的互相启发。委员会的改组标志着储存程序计算机的商品实现对电力系统新兴领域的迫切性。

作为委员会副主席和作为本专业的先行者，我希望读者从该书中取得最大的好处。

G. D. Rockefeller

1979. 4. 18.

目 录

译者的话

各章执笔者

序言

第 I 章	计算机继电保护系统简介	1
第 II 章	信号的处理	11
第 III 章	继电保护系统的算法	26
第 IV 章	线路继电保护 I	52
第 V 章	线路继电保护 II——非传统的方法	76
第 VI 章	用数字计算机的发电机保护	103
第 VII 章	变压器差动保护	123
第 VIII 章	继电保护系统和硬件设计的依据	137
第 IX 章	数字计算机继电保护系统文献目录	154

计算机继电保护系统简介

本书介绍电力系统数字计算机继电保护领域的最新发展。大家知道，电力工业是大型数字计算机最主要的使用部门之一。事实上，电力工业最早就把计算机用作工程分析的主要工具。当前存在的最大的工作程序中，有一些就是电力系统的分析程序。小型的过程控制机在电力工业上的应用是一个比较新的发展。这种应用的例子是用计算机的控制系统和数据收集系统。这些用计算机的系统正在处理许多复杂的电力系统运行问题，包括状态估计、电能生产控制、电能的经济调度等等。同时，小型计算机也正被运用于许多监视控制系统中。

过程控制计算机在市场上的出现，促进了它们在许多工业系统的使用。这些计算机体积小，比较耐用，并且比主机具有较小的操作系统，它们的外围设备包括较多的模拟的和数字的输入/输出，而它们的文件处理系统大都是设计成节选形式的，以适应特殊应用的需要。早期的过程控制机是小型计算机，而现在的趋向则是微型计算机。小型和微型计算机之间的差别随着时间的推移似乎变得很不明显，尽管在目前的情况下，这二类计算机在价格和大小上还相差一个数量级。

采用数字计算机作为电力系统设备的保护——计算机继电保护——是最近产生的想法。这方面大量的研究工作正在继续进行。虽然对这些系统将来的情况如何已有所启示，但至今在商业上还未有完善的用数字计算机继电器作成的保护系统。这是一个新的、具有吸引力的尚在变化的领域。在技术文献中，正经常地提出许多新的想法。对于研究人员和制造工程师来说，这是一个

可以从事的有希望的和有效益的领域。可以有把握地说，这领域正在发展的一些看法和本书所述的内容，在将来的继电保护系统中均会得到具体的实现。

本章开头先对计算机继电保护系统作一般介绍。接下来用计算机继电器发展趋势的讨论来回顾其历史背景。最后将说明计算机继电保护系统的主要元件，并对以后各章的内容作扼要的概括。

历 史 背 景

在一篇值得注意的文章〔7〕*中，Rockefeller对用一台数字计算机作为一个变电所内所有电力设备的保护作了研究。虽然这是一篇没有任何验证性实验的理论文章，但内容是十分全面的。它已涉及到继电保护程序编制的实质性细节，并且清楚地认识到采用那时候可得到的过程控制机所碰到的问题和困难。事后认识到，单用一台计算机来保护一个变电所内的所有设备——并用重复设置以提高可靠性——从现有的硬件看来，不是一种可行的想法。但是该文的几项成果依然是有用的。Rockefeller文章中列举的用计算机继电保护系统可予期的好处，几乎与今天所觉察的一样。如果有一点不同的话，那就是数字技术与传统继电器设备相比较，在经济上的情景已有了变化，甚至比文章所预期的变化更快。有关这些经济上的考虑以后再说明。

其它的研究者差不多在文献〔7〕发表同时也已开始考虑用数字计算机组成继电保护系统的问题。在两篇局限于推导出用数字计算机来作为输电线路保护的算法方面的文献〔19、21〕中，Morrison和他的同事提出了相当完整的计算机程序，更为重要的是，为实现他们的程序，作者显然已考虑到专用的计算机硬件。对线路上可能发生的不同故障提供保护的问题是用故障分类程序来解决的。这种分类程序可执行比较简单的电压波形校核，而把

* 为参考文献的序号，请参看第九章。

耗时的阻抗计算一直推迟到明确辨别故障类型之后。上述文章所提出的方法适用于在当时所能利用的小型过程控制机。与上述基本类似的方法已使用在两个设计的系统中：一为 Rockefeller 等报导的西屋和太平洋煤气和电气公司工程〔24、25〕，一为由 Phadke 等报导的美国电力公司工程〔55、62〕。这两套装置已进行过现场试验，然而还没有一个系统把用计算机的继电器作为实际的线路保护。但从这些装置已获得了大量的实践经验。

在所有的计算机继电保护系统的课题中，线路继电保护比其它任何保护引起更多研究者的注意，这是鉴于这样一些原因：线路保护计算比较复杂，因而它是对计算机能力的一种重要考验；而且传统线路继电器的昂贵价格更使它成为一个值得重视的问题。在后面有一章，将更多地述及输电线路继电保护系统。Morrison 等〔16〕和 M. Poncelet〔29〕在线路继电保护系统算法方面提出了一种重要的改进。这种方法试图求解故障回路的微分方程。奇异公司和费城电气公司〔66〕最近在一条 550 千伏线路两端用小型计算机距离保护的重要工程中，使用了类似的算法。其它一些计算机继电保护系统的重要研究中心有伦敦的帝国大学，在那里 Cory 及其同事发表了许多这方面的论文〔13、18、63等〕；在卡尔加里大学 Hope 和同事发表了文献〔20、21等〕；萨斯喀彻温大学 Sachdev 及其同事发表了文献〔27、34、36等〕以及在密苏里大学 Walker, Tudor 及其同事发表了文献〔5、9、10等〕。此外，在欧洲和日本的大多数主要的电气设备制造厂都有数字计算机保护方面的活动计划。几家电力公司象邦维尔电业管理局，太平洋煤气和电气公司、费城电气公司、宾夕法尼亚电力和电灯公司也都有进行计算机继电保护系统的研究计划。作者与其合作的美国电力公司，自1970年以来在这方面已有重点的研究计划。如果注意到 I E E E 电力系统继电保护委员会主办的最新技术论文报告，可以看到数字继电保护显然是一个继续鼓舞许多研究者的课题。电力研究院最近资助了这方面的一项研究计划，这显然是对电力工业在这一课题上所作的一个有很大价值的表示。

数字式保护系统的好处

考虑到数字计算机继电保护领域中正在进行的广泛研究，讨论一下由数字式继电保护技术的适应性所得到预期的好处是值得的。虽然，早期这方面的研究者考虑可运用单台计算机（小型计算机）来执行一个变电所内所有保护的功能，但是现在的看法则认为，使用许多专用微型计算机作为完成各个继电保护任务之用是合适的途径。在这些微型计算机之间应有数据交换的方便性，为此肯定要考虑把微型计算机以某种形式互连起来。通过这种互连可得到单台计算机系统的主要优点——继电器之间共有数据——而没有用中心计算机的继电保护系统所伴有的缺点。

数字式继电保护系统的最主要好处可归纳为如下几点：

（1）经济性：

在最终分析时，经济性是最重要的因素。数字硬件的价格一直在下降，而传统继电器的价格在同期内却一直上升。例如在1970年用小型计算机构成一个继电保护系统价格需要10万美元。而1979年用微型计算机可降价到1万美元。相反地，传统的输电线路保护系统的价格从1968—1978年却增加1倍左右。显然，这价格未包括计算机继电器软件的设计费用。尽管软件费用高——象任一新设备的研制费用一样——这些费用将被分摊到很多这类的单元上去。而且，数字计算机是一个可编制程序的装置，它能实现多种功能。只要在不会危害各别任务的安全性范围之内，这样的经济比较显得更有利于数字保护。

（2）性能：

可以预料数字保护的性能至少可等同于传统继电器。继电器某些特性——例如距离保护的最优速度和保护范围之间的关系——是由系统本身决定，而不是由所采用的继电器硬件所确定的。对于上述这样的关系，数字保护通常能设计成具有尽可能好的性能——可与设计良好的传统继电保护比美。但是另一方面，数字

继电器自然更有一定的特点。例如在记忆作用，动作特性的复杂形状等方面——可使数字继电器比相应的传统继电器更好。

(3) 可靠性:

数字继电器的最重要优点之一——在最早的技术文献所指出的——就是数字计算机是连续工作的，因此在数字继电器内部可不断地进行极高级的自检查。另外还能容易地编制外加诊断程序——比如监视它的许多外围设备的程序，因此可以立即检察出数字继电保护系统内部的大多数随机故障，而采取适当的纠正措施。虽然传统继电器中通常也有一些诊断功能，但数字继电器的特点是用起来更加灵巧。

(4) 灵活性:

由于计算机是一种可编制程序的装置，所以通过不同的予编程序的存储器模片的置换就可以较容易进行程序的修改，以适应由于运行情况变化的需要。同时还可以预期：设计出几个继电器公用的硬件系统，通过不同的予编程序存储器模片来构成不同继电器。这将使修理和维护的备件减少。在一些继电器中，某些或所有的输入信号是完全相同的，则可备置另外的输入通道。这些通道在系统正常情况下可以不用，而当正常输入通道发生故障时，在程序控制下，使它投入运用。这种灵活性使得在一定硬件数目下的保护有较高的可靠水平。

(5) 系统的相互联系:

现在，在电力用户变电所中有大量的子系统，这些子系统和远处——通常是控制中心——交换数据。警报装置系统就是这方面的一个例子，它或者使用一种简单的具有二个报警码的电路：监视报警和维护报警，或者使用提供外加说明信息的较为复杂的系统。另一个例子就是数据收集系统，它可利用变电所的远动装置，为中心调度提供系统的运行数据——例如功率潮流。监视控制系统是这种系统的第三个例子。在所有的这些例子中都需要在遥远处和变电所间有通讯联系。变电所内装设计算机，可将这些通讯功能集成单一的通讯系统。某些使用现在的技术还不能予

见到的远距离互通情报的方式，在将来联通各个继电器的可能性得到实现时会变成事实。

(6) 附带的收获：

当采用计算机继电保护系统时，其它完全新的而现有方法没有能与它相比拟的应用也可得到实现。现在可以先举几个例子。当然，随着这些保护运行经验的不断积累，在将来肯定会产生比它更有意义的想法。例如，由计算机继电器可以对所有观察到的暂态现象进行故障后的分析；计算机距离继电器可以在故障发生后立即计算出到故障点的距离。这讯息可供维护人员用于在永久性故障而需要检修线路时，方便地找到故障地点。借助于几个继电保护系统之间的故障后暂态数据的交换，可在当地或远处完成事故顺序的周详分析。另一例子就是数据多路作用，这在目前技术上还处于某种孤立状态，但它势必要成为数字数据流。因此，更多的数据可与用计算机的变电所保护构成多路传输。这当然有利于减少变电所室外场地和控制室之间的电缆费用。还有另一附带好处的例子，就是和机电型继电器相比较，计算机作为继电保护时可使变换器的负载减小。在最近的技术文献中已讨论到使用现代电子技术和光纤技术的低负担电流和电压变换器，它可将高压设备上的数据传送到地电位。这样的变换器与低负担继电器可以自然配对，因而也促进了这种变换器商业上的发展。考虑到传统的HV和EHV变换器成本高，这样合一的保护系统的成功研制，将可能成为在所有附带收获中最重要的收获。

计算机继电保护作用框图

图1是用数字计算机继电保护的作用框图。随着所实现的具体继电器的功能不同，各方框重要程度不同。但是，在本书要讨论的所有继电保护系统中，这种作用框图的描述方式还是适用的，只有某些用于输电线路的新型距离保护例外，它将在另外章节中叙述。

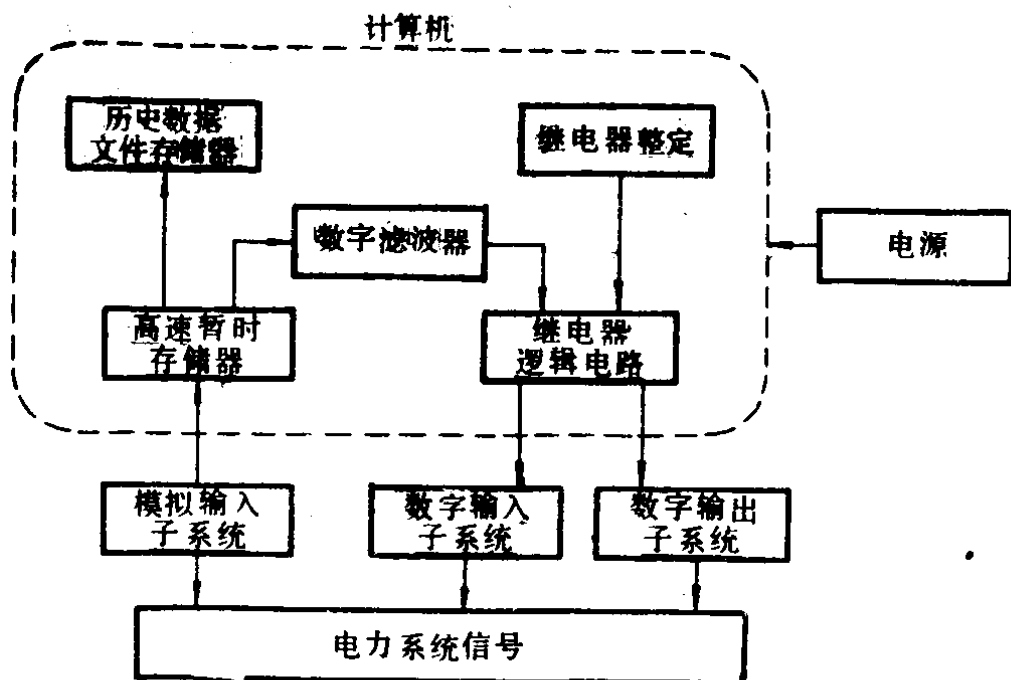


图1 计算机继电保护作用框图

计算机继电器输入量是电力系统来的模拟信号和数字信号。模拟信号由系统电流和电压组成——主要是60赫稳态值。所需要的模拟信号数目取决于继电保护系统的功能。例如距离继电器最少需要三相电流和三相电压，另外，如果有五条线路接在母线上，则母线差动继电器可能要多达15个电流输入量。由此可见，接入数字继电器的模拟量数目必定是随继电器的功能而定。在所有情况下，模拟信号的数目大约处于3~30之间。

一次模拟量数值是非常大的——以千安和千伏来计。传统的变换器可将这些信号降到对地低电平（例如：5安培和67伏相电压）。当然，应用数字继电器的一个办法是从这些变换器取二次信号来作为继电器的输入，事实上，这是实际中至今所采用的唯一办法。这些信号值必须进一步把它降低到适合作为计算机输入量的数值——通常最大为 ± 10 伏。降低数值须由一些电路来实现，这些电路可以屏蔽计算机不受二次引线上发生的暂态电压的损害。然后这些经过屏蔽和降低数值的信号由模数变换器变换成数字形式，所有这些功能由图1中的模拟输入子系统来执行。

数字输入子系统可控制继电器所需的接点或继电器所需的电压感受信息。大多数继电器的数字输入数目，大致为5到10个。

数字输入信号是接点状态的变化（“通”或“断”）或者是电压值的变化（例如：+48伏和0伏）。在采用接点的情况下，须有一辅助电源和读出装置，以读出接点的状态。如在模拟信号引线中一样，在数字输入引线中也有暂态电压。在计算机输入口屏蔽这些暂态电压的影响以及在需要的场合备有缓冲的电源都是数字输入子系统的任务。

数字继电器的输出要通过它的数字输出子系统。对大多数继电保护系统来说，最多为5到10个输出就足够了。计算机的数字输出通常是从其并行输出接口输出的，大多数为TTL电平讯号。这些讯号经过缓冲并通过数字输出子系统，把来自计算机的TTL电平输出转化为适当的电流或电压数值。

将模拟数据连续采样，采样速率的范围如许多作者所描述的约在240~2000赫之间。连续产生的采样系列通过程序控制或通过直接存取通道送入计算机存储器。不论那种方法，数据均被保留在随机暂时存储器[RAM]中。这种存储器被做成像转盘式，并由适当的指示器指出当时的数据位置，以便数据的恢复。

在大多数的数字继电保护系统的应用中，原始采样值也被存储在二次数据文件中，以作为电力系统重大暂态事故的历史数据记录。这历史数据文件的组织和字长，取决于用户需要和可取用的RAM。这些数据应尽可能快地移入二次存储器中，为下一次暂态过程的出现准备存储场所。故障前适当间隔内的数据以及相应的时间记载和信息也要存入这历史数据文件中。这些文件存储器最后的处理取决于各个系统设计的细节。如果一变电所内装有带有磁盘空位的主计算机，历史数据就可移入磁盘。如果有遥讯通道，则历史数据也可转移到远方主机，或者也可以在当地制成复制件。在任何情况下，最重要的是要使历史数据文件尽快抹净。

对所有继电保护系统应用来说，数字滤波程序是必要的。模拟数据采样值常掺杂有多方面的噪声，电力系统的暂态过程是一个非常复杂的时间函数，从继电保护系统的应用来看，其频谱的

主要部分是噪声。此外，模数变换器也会带来噪声。为了能获得正确的结果，数字滤波器必须把所要的模拟信号分量从干扰分量中分离出来。这个功能就是由数字滤波程序完成的。在多数应用中，滤波方程是递归函数，所以在作出非常快速的数字滤波算法时要花很多的心思。

继电器的逻辑程序决定继电器的功能特性。经滤波的数据是用来计算二次量的，这些二次量应是描述继电器特性的一个方便的媒介量。例如线路距离保护特性在复数阻抗平面上是一个区域，因此，故障阻抗是一对经滤波后的电压和电流量的比值，这就是距离继电器程序所需要的二次量。同样，差动继电器就需要计算动作电流和制动电流。谐波制动继电器需要计算一定谐波分量的加权和。

把这些导出量（或二次量）和各种预定的继电器特性进行比较，由继电器整定程序把这些特性的大小和形状输入计算机。通过程序使用者——继电保护工程师——可给定所要的继电器特性。

继电器的电源不能靠站内交流电源供给。因此，继电保护计算机电源需要蓄电池 / 充电设备系统和直流变换器来供给。从这一观点来看，采用直流电源的计算机用单一电压等级是很受欢迎的。

下面各章将详细讨论这些主要功能。第 II 章将研究信号处理，这涉及到计算机的模拟和数字输入及数字输出。一次信号减到较低电平级和 A/D 变换等问题，也将在这一章中加以讨论。同时对特殊的变换器——比如电子型电流互感器——也将加以说明。

第 III 章叙述数字滤波的算法，如前所指出的，在所有继电保护系统应用中主要考虑的一点，是从有干扰输入源抽取有用的信号。继电保护系统中的数字滤波器的特征是数据窗狭窄，含有较少的采样数目。特别适用于这种应用的算法在该章中将给予专门的叙述。

后四章讨论具体设备的继电保护系统的应用程序。这包括发电机、变压器和母线保护。其中讨论到差动保护的接线方式和变压器保护的谐波制动功能以及发电机负序功率保护等。此外有二章讨论线路保护，其中的前一章涉及到传统的多段距离保护，而后一章是讨论某些新型继电保护系统最近的研究工作，比如行波继电器。

最后一章将涉及到数字继电保护系统领域中通常都感兴趣的问题。其中一个例子就是用估算理论观点来探讨输电线路的距离保护，从而引导出距离保护概念中本有的某些约束，这样分析可以帮助明确继电保护系统程序的目的，并且在数字计算机上实现任一继电保护系统之前就应考虑成熟，接着还说明实现数字计算机保护所需要的硬件。其中仍以距离保护为例，并介绍 A E P 公司为作现场试验所计划的一个专用计算机的结构。这章最后以一个变电所内的计算机网络可能的分层结构的设想来结束。