

顾毓琇是中国电机学会的创始人之一，是国际上公认的电机权威和现代自动控制理论的先驱，生前是美国电气和电子工程师学会（IEEE）资深院士，曾获得该组织颁发的“兰姆”金质奖章、千禧奖章和杰出贡献奖。顾毓琇还是一位集科学家、教育家、诗人、戏剧家、音乐家、佛学家于一身的文理大师，在海内外都有着广泛影响。

顾毓琇工程奖是中国电机学会与IEEE于2010年共同发起和管理的国际性奖项，旨在表彰在电力、电机系统工程及相关领域取得杰出成就的专业人士。

2012年7月24日晚，第三届顾毓琇电机工程奖颁奖典礼在美国圣迭戈隆重举行。中国电力科学研究院于尔铿教授被授予该奖项，以表彰其为中国电力系统经济调度、状态估计、能量管理系统等领域做出的开创性贡献。

“于尔铿是中国能量管理系统领域杰出的技术领导者和权威。”——顾毓琇电机工程奖遴选委员会

智者乐水 敢为人先

——记三界顾毓琇电机工程奖获得者于尔铿

◆ 整理 闫文丽 贾健莹



“仁者乐山，智者乐水”。水具有高贵的品质和力量。自古以来，人们总以滴水穿石、上善若水、勇往直前、海纳百川等水的精神来赞誉人的品格。我国知名电力系统专家于尔铿正是穷其大半生的精力诠释了涓涓细流汇聚成江河的道理。

于尔铿长期从事电力系统自动化专业研究工作，对包括经济调度、状态估计、能量管理系统，以及电力市场在内的国内众多技术领域发展做出了巨大贡献。他的大部分研究成果已在中国电力系统中有实际应用。其中，由他负责开发的CC-2000 EMS高级应用软件系统让中国第一次在大型电力

调度自动化系统方面与国际先进水平站在了同一高度，实现了历史性的跨越。2012年7月24日晚，于尔铿在美国圣迭戈举行的第三届顾毓琇电机工程奖颁奖典礼上发表了获奖感言。他说：“今天能登上这一领奖台，是我一生最高兴的时刻，幸运的是没错过近几十年计算技术在电力系统发展应用的历史机遇。”然而，历史机遇固然重要，但能够做到敢为人先、适时而为、执著不渝、目标明确才是幸运之神眷顾他的理由。于尔铿做到了，他是一位如水般灵动的智者，沉静而不失活跃，内敛而富有激情，单纯而又丰厚，顺应而不乏坚韧。

情系“丰满”，梦开始的地方

在吉林省松花江上，屹立着这样一座饱经风霜的水电厂，它就是被誉为“中国水电之母”的丰满水电厂。虽然这座电厂已经服务了近70个年头，但它至今仍然担负着东北电网骨干电厂之一的重任。可能很少有人了解，这座中国最早建成的大型水电厂，竟是在日本人的指令下修建的。

“九一八”事变后，日本侵略者对发源于我国长白山天池的松花江水力资源垂涎三尺。1936年



便制定了5年内在松花江上建成当时亚洲最大水电厂的规划。

1937年4月，工程破土动工。虽然形式上是为日本人服务，但这座当时亚洲最大的电站毕竟即将出现在中国的土地上，为了让中国的百姓早点享受到由它提供的汨汨电流，包括电厂设计者、原东三省电力调度总司令孙继超在内的一批中国优秀水利专家怀着满腔热忱投身于大坝的建设中。这其中就有于尔铿的父亲于开泉。

于尔铿是在大坝开工一年之后诞生的，可能谁也不会想到，幼小的他会对这座水电厂产生独特的情怀，也于无形中塑造了他如水一般的品格。

在于尔铿的童年记忆中，最深的痕迹便是父亲为之倾注了无数心血的丰满水电厂。1945年日本撤退时，大坝尚未竣工，已浇的混凝土质量很差，处于危险状态。随后，前苏联的军队进驻丰满，但很快以缴获战利品的名义，将大部分机组的主体部件强行运回自己的国家，只剩两台厂用机组和1号、4号机组维持最低发电需要。

1948年东北解放后，由于经历了多年战乱，百废待兴，为了经济建设的需要，国家决定重新恢复和建设丰满水电厂。于尔铿的父亲随即被从中长铁路局电务处调回丰满水电厂的建设工程处，担任恢复和建设的总工程师。由于父亲工作调动，1950年，12岁的于尔铿转学来到丰满水电员工子弟小学。当时的学校就建在半山腰，山上有防空洞，山下蜿蜒着一条清澈的小河。夏天，于尔铿和伙伴们一起上山采浆果、蘑菇，下河抓鱼、嬉戏，在松花湖畔钓鱼、野炊，这种无忧无虑的日子一直持续到1952年他小学毕业，随后到沈阳读中学。

在丰满度过的两年，是于尔铿人生中最重要、最幸福时光。之所以说最重要，是因为在当时的时代背景下，“共产主义=苏维埃政权+全国电气化”的著名公式指导着无数少年树立自己的理想。当时，正建设得热火朝天的丰满水电厂理所当然地成为宣传的焦点。每当新闻报道社会主义成果的时候，工业界总是将丰满水电站列在其中。这座雄伟的纪念碑式的大坝给社会带来了光明和动力，给十多

岁的于尔铿带来了极大的鼓舞。身为水利工程师的儿子，他感到非常骄傲。他视自己的父亲为偶像，更是在自己的心中悄悄种下了梦想的种子——长大以后成为一名水电工程师，像父亲那样为人民的光明和工业的发展造福。

在理想的牵引下，1957年，于尔铿从沈阳二中毕业后，直接考取了他父亲的母校哈尔滨工业大学电机系。

入学一年后，系里开始分专业。于尔铿怀着激动的心情准备选择水电专业，正式投身国家的水电事业，实现自己的梦想，不料却遭到了父亲的反对。当时正值“大跃进”，身为水电专家的于开泉对我国水电事业的发展前景感到担忧。他劝于尔铿选择“高压输电专业”，这样更符合国家建设的需要。于尔铿采纳了父亲的建议，忍痛与自己的水电之梦告别。虽然没能将自己的梦想变成一生的事业，但他在为我国的电力发展辛勤耕耘的同时，也仍然密切关注着我国的水电事业。

1961年，哈尔滨工业大学转为军工院校，由于于尔铿所学的专业属于非军工类而被调整到1958年成立的北京电力学院（现在的华北电力大学），并由原来的专业划归到电力工程系发电厂电力网及电力系统专业，师从杨以涵教授。杨教授是我国电力系统及其自动化学科的奠基人之一，20世纪50年代，他在哈尔滨工业大学创办了我国第一个发电专业。

在大学期间，于尔铿很少参与文娱活动，他把大部分的时间都用在了读书和学习上。1962年，于尔铿迈出了大学校门，作为北京电力学院首届毕业生中的一员，跻身“全国电气化”建设一线。

一线实习，入地而思喷涌

于尔铿毕业时恰好赶上计算机在电力系统尝试应用阶段，他被分配到原水电部技术改进局电力系统室，从事这一新科技的应用研究。刚一到岗，当时的毛钧焘主任就安排他开展一项新的课题——电力系统经济调度，并让他直接前往东北电网实习。该课题小组由东北电管局总工程师，当时的学部委员蔡昌年负责指导，分为两个阶段：一是

直接到各发电厂编制发电耗煤微增率曲线；二是计算东北电网的网损修正系数。上半年，于尔铿先后到抚顺、阜新、吉林（热电）、大连、辽宁和丰满（水电）等东北主要电厂，了解生产过程，按试验结果编制耗煤微增率曲线，并编制了厂内等微增率调度计划。下半年，又来到东北技术改进局，在马念祖工程师的指导下计算东北电网的网损修正B系数。

当时，东北电网网损模型是14个节点、7个电厂，计算一个运行方式的B系数需要3~4个小时。那时用的是手摇计算机，与现在的电脑相比非常落后，通常要花一上午的时间才能算出一套系数，而且每一步都要校核，否则到最后一步才发现错误，半个工作日就白费了，只好再重来。虽然当时的条件非常艰苦，但却充分磨练了于尔铿的研究能力和实践能力。

开展电网网损修正课题的过程，使于尔铿认识到了自己在学校学习时的不足。由于受到大学阶段勤工俭学和“大跃进”的影响，他的电子学课程几乎荒废，仅集中学过几个小时，而矩阵、变分学、概率论、外语等基础课水平也都难以满足以后的研究。他意识到，要想完成好工作，必须补课。

实习的经历让于尔铿有机会与各个电厂的工作人员建立了联系，了解到基层的实际水平和真实需要，这使他在日后选题时能够立足于电力系统的实际需求，而且凡是他想做的科研项目，都知道去哪里寻找合作对象。这段经历让刚走出校园的于尔铿第一时间走进了基层，在电网这片科研沃土上，他如暗流涌动，为日后的喷薄而出积蓄着力量。于尔铿坦言，在东北电网这段实习与合作的经历让他受益终生。

从东北回来后，于尔铿查阅了经济调度的技术发展历史，以确定研究路线，全面认识经济调度课题。1965年，他接受了极具实用前景的京津唐电力系统经济调度程序项目，该项目主要解决水火电经济调度问题。当时的测试题目是由留苏回国的柴玉和工程师针对调度和极端情况出的200个运行方式。从实用角度来讲，如果算出的结果不收敛或算得不对，应用时就会引起大麻烦。后来，于尔铿终于通过了这200个方式的严格考试，但这个过程足足花了他半年时间。到1965年10月，于尔铿共完成

了3篇研究报告：协调方程式法（发电与输电）、火电分配梯度法和微增动态规划法（水火电分配），解决了实际运用的不收敛问题，探索出了在迭代中自动计算雅可比矩阵的方法，加快了计算速度。但受到文革的影响，京津唐电力系统经济调度程序项目自1966年被迫中断了两年，直到1968年才做了试算经验小结。这一项目真正得到应用则推迟到了20世纪80年代初，当时微型计算机的可靠性和方便性已达到实用条件，开发了负荷预测、机组组合（优先级法）和经济负荷分配3个程序。京津唐经济调度负责人吴永新将其应用到了实际的计划中，为此，该项目荣获1985年国家科技进步三等奖。谁也没想到，这个项目由开题到实用竟然花了近20年！

历经波折，不舍昼夜奔腾向前

至高思远，及低有容。当水在流淌的过程中遇到石头、泥沙阻挡的时候，它便及时提升自己的高度来逾越障碍。在文革那段动荡的日子里，虽然无法继续进行研究和试验，但于尔铿绝不盲从，始终保持着冷静的头脑。他不参与政治活动，而是潜心“充电”，一心只专注于技术的进步和自身能力的提高。由于大学期间学的是俄语，而在工作中需要阅读很多英语材料，这使于尔铿吃了不少苦头。他暗下决心，一定要攻克这个难关。文革开始后，几乎所有人都卷入了那场运动，而于尔铿则来到异常冷清的北京图书馆，“两耳不闻窗外事”，自学起了英语和数学。在没有老师指导的情况下，零基础的他硬是通过俄语自学了英语，这为他后来阅读国外文献资料，以及赴美学习打下了基础。

1969年6月，于尔铿和其他科技人员一起被下放到河南平舆干校，进行劳动和思想改造。他虽然人在干校，心却从未离开自己钟爱的事业。他不怕苦和累，唯一担心的就是再也没有机会回去搞专业了。

1971年底，于尔铿终于接到了从干校返回北京的通知。回到北京后，他的第一感觉就是：“干校方三日，世上已千年”，自己已经落伍了，但他并没有灰心。

会到工作岗位之后接到的第一个课题就是与原



水电部水文局、水科院、华东水利学院合作研发国内第一套水文预报程序。于尔铿此前从未学过水文学，更没学过水文预报，专业知识的欠缺是摆在面前的一个难题。为此，他边做计算，边向华东水利学院的刘光文教授请教学习。刘光文教授的专业水平给予尔铿留下了深刻的印象。他从来不用带教学资料，每次上课时只带两根粉笔，仅用短短几堂课的时间就将洪水预报的数学模型讲得一清二楚。一次，于尔铿在编程序时需要用到自然常数 e ~9位有效数字，刚要查阅资料，刘教授就将9位数字脱口而出。于尔铿惊讶地问道：“您一共能记住多少位？”刘教授说：“如果你需要的话，我能背50位。”这并不是一句玩笑话，而是老师的真实水平。在他的帮助下，于尔铿很快就编写出了降雨汇流（单位线法）、河道传播（马斯京报法）和水库调洪程序。

由于当时还没有做到对实用数据进行采集，这套水文预报程序编好后，只得由人工值班了两年，最后因为没有洪水而停止。不巧的是，在停止监测的第二年（1975年）就赶上河南发洪水，却没能捕捉到相关数据。该应用程序后来由水文专业的人员继续进行研发。

在做水文预报项目的同时，于尔铿一直关注着电力系统分析和控制的发展。原本他在经济调度方面已接近国外的水平，却因为文革的影响落后了一大截。编写水文预报程序项目结束后，于尔铿有机会可以避重就轻继续搞水文计算，但他却不舍得放弃自己多年来在电力事业上的努力，开始思考后面的选题。那时候，国外计算机应用已到了成熟期。在文革之前，潮流还难以解决的收敛性问题，此时已通过牛顿法和稀疏矩阵技术得到了解决；经济调度在解决水电调度、机组组合及最优潮流方面也有了新的模型和算法；特别在实时分析和控制方面提出了状态估计。在阅读大量资料的过程中，他读到了一篇关于预测20世纪后25年电力发展情况的文章。文章提出，状态估计到时候能派上用场，“稳定”仍然会一步一步地进行计算，而“直接法”等将难以实用。于是，于尔铿在浏览了一系列课题后，以其敏锐的视角首选了潮流作为研究对



1980年中国电力科学研究院

象，而他真正的目标则是研究状态估计。原因是潮流已定型，引入就可以见到实效，它是所有分析程序的基础，也是状态估计的试验工具。

那时候，试验量非常大。由于在干校时耽误了很长时间，于尔铿觉得能够再回来，机会难得，时间宝贵，所以一边学，一边干，白天上班做份内工作，夜里看文献总要到一两点钟。于尔铿回忆说：“也不知道那时候哪来的那么大劲头，就觉得自己应该能干好，也有这个信心，真的想把失去的时间找回来。”为了早日赶上国外水平，于尔铿坚持长期夜读和高强度的工作量，导致他连续三年春天都因胃出血入院。幸运的是，每次急诊都赶上中医科的大夫值班，均通过保守治疗保住了他的胃没有被切除。

尽管如此，于尔铿并没有放松自己的工作和学习。在此期间，他凭借自己的数学造诣和仅学了一个月的日语翻译了日文书《电力系统潮流计算》；编制了快速分解法潮流计算程序，引入稀疏矩阵技术和会话技术，将计算机潮流计算推向了实用化。

电力系统状态潮流计算是 n 个方程（已知）解 n 个未知量，而状态估计是用 m 个方程（量测）解 n 个状态量（ $m > n$ ），量测余度（ $m - n$ ）可用于纠正量测错误，还可以提高估计精度。从理论上讲，潮流计算是状态估计的特例，或者说状态估计是广义的潮流计算。这一应用软件是在线/实时网络分析的前提，没有良好的状态估计就不可能实现在线/实时网络分析和控制。1978年，于尔铿设计开发出了用于电力系统状态估计的模拟实验系统，并从国外已有



1986年美国电力系统计算机技术研究所（ESCA）

的4种状态估计算法中，试验选择出最适合的模型和算法；1979年，与清华大学的相年德和王世缨老师合作，提出多个不良数据的估计辨识法，同时还提出了零残差辨识法；1980年，在京津唐地区完成了局部电网实时状态估计试验；1985年，在湖北引进的CLASIC计算机上安装了状态估计软件，并进行了试运行。7年的研发，于尔铿从模型、算法等方面已赶上了国外先进水平，在不良数据辨识方面还有所提高，并出版了《电力系统状态估计》一书。该书被业内誉为学习状态估计的经典著作，是目前为止中文类电力系统状态估计著作中的代表之作。

上世纪80年代，于尔铿与来自中国电力科学院、哈尔滨工业大学、清华大学等高校的大批研究生全面开展了计算机在线应用软件的研究，完成了在线潮流计算、电厂间经济负荷分配、负荷预测、机组组合、互联系统经济调度、网损修正、安全故障分析、安全约束调度、最优潮流、检修计划等多项研究任务。全面试验了国外的模型和算法，其中多项研究均在20世纪80年代中期湖北引进的SCADA系统上做了试验。电力系统在线/实时应用软件荣获1987年科技进步三等奖，同时还撰写了《现代电力系统经济调度》一书。

这一阶段，于尔铿通过对模型、算法的研究和试验，培养了大批研究生，给他们开设了“电力系统状态估计”和“电力系统经济调度”两门课程，这为他后来进一步开展能量系统的研发打下了理论和人才基础。

“十年磨一剑”，CC-2000的诞生之路

电网是一个国家具有战略意义的基础设施，其运行是否安全稳定、电能质量的好坏，直接影响着社会经济的安定和发展。电力调度自动化系统作为保障电网经济可靠运行的三大手段之一，无疑具有重要作用。20世纪90年代以前，中国共有27套省级以上电力调度自动化系统运行，其中引进系统为19套，主要是数据采集、监控和自动发电控制系统（SCADA/AGC）。这些系统基本上体现了当时集中式系统的设计思想，但在运行中日益暴露出其CPU负载高、增加EMS（电力自动化系统的管理系统）应用软件困难、系统兼容性差等弊端。

1986年，华北、华东、华中、东北四大电网确定，向美国电力系统计算机应用公司（ESCA）购买EMS支持系统（HABITAT）和SCADA/AGC，其他如发电计划、网络分析等应用软件则由国内开发。为了配合该项目，1986年9月，于尔铿与杨秋恒、刘佩娟等6人被派到ESCA参加了培训。在美国，于尔铿发现，在湖北电网引进的项目中，国内开发的许多应用软件如负荷预测、发电计划、机组组合、状态估计和最优潮流等，都是按国外应用软件菜单分给不同的人独立开发的，而ESCA则是“自上而下”设计的系统EMS。他们在分析了所有应用软件的数据、功能模块、信息、画面和保存方式的基础上，再通过“自上而下”的方式系统分配开发任务，削减了大量的重复工作量，应用风格一致，更加方便、可靠，同时降低了维护量。这相当于城市建设有了规划，即上下水、煤气、电等进行统一设计和施工。这是电力系统自动化技术进展和使用中的一次飞跃，而当时国内在这方面整整落后了一个时代。

1987年4月，在全面学习了美国的EMS和Habitat技术平台后，于尔铿结束了在ESCA的32周



培训。回国后，于尔铿立即组织人员按照“自上而下”的设计思想和原则，分工协作开发应用软件，在Habitat上实现了与ESCA一致的应用软件，并且将其应用于华中、华东、华北几大电网。在5年的时间里，于尔铿几乎不参加会议、不出差，他把所有的精力都用在了提高软件队伍的能力水平上，培养出了一批研究生。1994年，于尔铿主办了国内第一次EMS技术研讨班，给中国电科院的研究生开设了EMS课程，在杂志上发表了国内第一批EMS论文，并在1998年出版了《能量管理系统》一书。“十年磨一剑”，在于尔铿10年的不懈努力下，EMS高级应用软件基本实现了自主研发，该软件荣获1997年国家科技进步二等奖。

在学习ESCA的EMS平台Habitat的基础上，上世纪90年代中期，中国电科院与东北电网合作成功开发出具有自主知识产权的EMS平台CC-2000，其后国家电网公司组织了电科院、东北电网公司、南自院和清华大学等国内顶尖的队伍，研发中国的EMS高级应用软件。于尔铿担任该项目的第一执行人。CC-2000项目于1996年10月通过了国家鉴定。CC-2000系统和基于CC-2000支撑平台的EMS高级应用软件分别于2000年和2003年荣获国家科技进步奖的一、二等奖。此后，以CC-2000为代表的具有自主知识产权的国产调度系统产品基本占领了国内市场，CC-2000系统成功运行在国家电力调度中心、南方电网调度中心、华北电网和东北电网调度中心以及辽宁、贵州、天津等大型电力调度中心和大量地市级电力调度中心。

认准目标，期待电力市场早日形成

在获得两次国家科技进步奖以后，于尔铿并没有停住探索与创新脚步。上世纪90年代初期，他在北京图书馆看到《现货电价》一书，深受启发。书的作者是麻省理工大学的Schwepp。此前，于尔铿最早读到的3篇电力系统状态估计的文章，均是出自他之手。文章规定了状态估计的模型、功能、数学原理等等。事实证明，他对状态估计直至今日的远见均得以实现。而后，Schwepp一直研究电力市

场的电价问题，直到1987年写出《现货电价》一书。然而Schwepp没有等到该书出版就去世了。于尔铿则被他的智慧所折服，决定研究电力市场。

那时候，在IEEE PES上电网自动化的论文也由经济调度上升到电力市场研究，而且国内改革已提出电力商业化运营问题。于尔铿通过分析这些信息意识到，电力市场是技术发展的必然方向。电力市场实际上是更高级的经济运行和更高级的自动化，这是一次理论和技术上的巨大飞跃。以前，自动化都是从发、输、调度角度出发，负荷是被动的接受方，但市场是从供、用双方考虑，用方针对电价变化自发参加电力平衡的调控，这符合“诸葛亮不兵而胜”的原理。而且，双方均为自己的利益而努力，客观上使社会效益提高，这是靠原来的自动化做不到的。于尔铿认为：“电力市场的根本是机制的改革，关键是公平竞争。没有公平便没有市场，不能进一步提高社会效益。”认识到了电力市场的重要性之后，于尔铿立即与华北电力大学合作展开这一研究课题，并在1995年10月组织了第一个电力市场技术研讨班，开始了电力市场研究。此后的十几年中，他到处讲课宣传电力市场，并把1995年的讲义整理出版成为我国第一本关于电力市场的专著（1998年）。

由于受到体制的制约，该课题一直无法取得实质性进展。这是于尔铿在退休之前做的最后一个课题，也是一个没有完成的遗憾。但于尔铿始终坚信，电力市场是中国电力改革的必由之路，而且一定会走向零售市场，这样才能实现智能电网，才能接纳21世纪新出现的新的发电/蓄电的新能源。

水善利万物而不争。于尔铿对金钱和仕途无私无欲。在职业生涯中，他不是院长、所长、主任，但却是教授、导师和科研领军人物。他抱着真诚交流、决不保守、共同进步的态度，带出了大批的研究生，如雨露般润物于无声之中。退休后他在许继电气股份有限公司担任监事一职时，因为没有具体工作，而要求主动退出，不接受报酬。

于尔铿并非数学天才，也并不以计算为乐，但由于当时电力系统自动化的需要，而主动担负起了

推动电力系统发展的重任。

“木秀于林，风必摧之；行先于人，众必非之。”但于尔铿并不惧怕第一个吃螃蟹的危险，开拓创新，敢为人先。他从不急功近利、更不贸然出击，而是站在技术与实用的角度，不停地求索与奋进，发现自动化发展的动向和需求。即便是在荣获一项科技大奖后，当周围的人还在为此庆祝时，于尔铿却早已奔向下一个目标。🚩

