



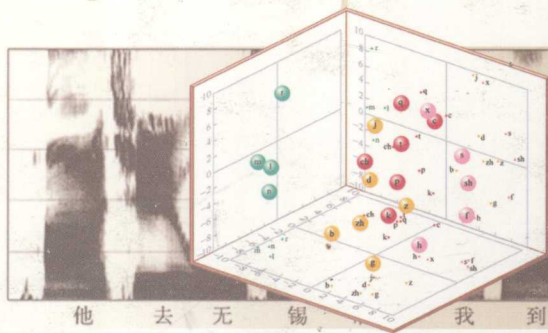
科学

前沿进展

汉语人机语音 通信基础

张家骅 著

KEXUE
QIANYAN
JINZHAN



他去无锡

我到黑龙江

上海科学技术出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

科学前沿进展

汉语人机语音通信基础

张家骅 著

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

汉语人机语音通信基础 / 张家驷著. —上海: 上海科学技术出版社, 2010.4

(科学前沿进展丛书)

ISBN 978-7-5323-9710-5

I. 汉… II. 张… III. 人-机语言—语言信号处理—研究 IV. TP312

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第205157号

上海世纪出版股份有限公司出版、发行
上海科学技术出版社

(上海钦州南路71号 邮政编码200235)

新华书店上海发行所经销

常熟市兴达印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 51.25 插页 5

字数 718千字

2010年4月第1版 2010年4月第1次印刷

ISBN 978-7-5323-9710-5/N·278

定价 196.00元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,
请向工厂联系调换

内 容 提 要

本书首先系统地阐述了言语科学和言语工程赖以建立的电学、语音学和声学的基础理论与实用知识,继而介绍了语音产生的声学理论和语音分析的技术与方法,进一步给出有关汉语的语音分析结果和部分原始数据,还对言语可懂度试验和言语可懂度理论,以及言语质量评价做了深入的讨论。最后,综述构建人机语音通信的言语输出、言语输入和对话系统。读者通过本书可以集中方便地获取人机语音通信这个新兴多学科交叉领域的基础知识和有关汉语语音特征的研究结果。

本书可作为言语科学与技术、语音信息处理和电话通信等专业的研究生或大学高年级学生的教材或参考书,也可供听力学和噪音医学界的从业人员阅读参考。

《科学前沿进展》序

科学是人类文化知识宝库中最具创造力和最有价值的一个部分，是人类文明高度发展的重要标志。科学的前沿处在人类探索自然由已知领域向未知领域推进的边界，是科学最富生命力的部分。科学前沿的推进，意味着人类对未知世界有了新的发现，有了新的认知。这必然会带来技术的发明、工业的应用和文化的进步。科学的发现越基本，发现的规律越普遍，所产生的技术和应用便会越重要，对社会的文明进步所起的作用也会越巨大。

经过好几代人的艰苦奋斗，中国的现代化进程已发展到一个重要时期，一个依靠增强科学技术自主创新能力来推进社会全面、协调和可持续发展的时期。而科学技术自主创新的源头，或者说原始性创新的初始源头，正是来自于科学向未知领域推进的新发现，来自于科学前沿探索的新成果。

前沿探索成果的价值在于首创。首创是无法靠摹拟仿效、引进跟踪来实现的，要靠推陈出新、标新立异。要在科学前沿研究上推陈出新、标新立异，有许多重要的事要做，其中有一样就是著书立说，即在大量研究实践的基础上，有创见地做学问，出版学术著作。

学术著作是研究成果的总结，它的价值也在于其原创性。一个国家，一个地区，学术著作出版的水平是这个国家、这个地区科学研究水平的重要标志。科学研究具有系统性和长远性，继承性和连续性等特点，科学发现的取得需要有充沛的好奇心和丰富的想象力，也需要有长期的、系统的研究成果的积累。因此，学术著作的出版也需要有长远的安排和持续的积累，来不得半点的虚浮，更不能急功近利。

学术著作的出版，既是为了总结、积累，更是为了交流、传播。交流传播了，总结积累的效果和作用才能发挥出来。为了在中国传播科学而于

2 汉语人机语音通信基础

1915 年创办的《科学》杂志,在自身发展的历程中,一直也在尽力促进中国学者的学术著作的出版。

几十年来,《科学》的编者和出版者,在不同的时期先后推出过好几套中国学者的科学专著,其中有早期的《**科学丛书**》,以及在 2000 年前后两个五年中的《**科学专著丛书**》和《**科学前沿丛书**》,形成了一个以刊物的名称和字样**科学**为标识的学术专著系列。在《**科学专著丛书**》名下,共出版了 14 部专著;在《**科学前沿丛书**》名下,共出版了 6 部专著,其中有不少佳作,受到了科学界和出版界的欢迎和好评。

为了促进中国学者对前沿工作做有创见的系统总结,在纪念《科学》创刊 90 周年的时候,《科学》的编者和出版者决定对**科学**系列学术著作做新的延伸,出版《**科学前沿进展**》学术丛书,继续为中国学者著书立说尽一份力。

坚持这种努力,随着中国科学研究向世界前列的挺进,在**科学**系列的学术专著之中,一定会有更多中国学者推陈出新、标新立异的佳作问世,也一定会有传世的名著问世!

周老召

(《科学》杂志编委会主编)

2005 年 10 月 25 日

序 一

1936年，我大学毕业，开始作研究生，范围是电声学。我在大学没有上过声学课，只是在萨本栋先生的大学物理课上，听他讲过中国棉衣的吸声特性，所以对声学的内容和发展一无所知。于是，就按导师朱物华先生和任之恭先生的指导，去检索文献。那时，现代声学还很幼稚，国际上唯一有组织的美国声学学会只有七年历史。好在当时北大物理系的藏书非常丰富，美国声学学会会刊和其他可检索的期刊、杂志如科学索引、哲学杂志等都有收藏，而且是开架展览。所以，我很快地就浏览了所有会刊论文和其他有关声学的摘要，并且做了笔记。在此基础上，写出了“声学的发展和展望”的综述报告，概括地论述了当时的声学水平和发展趋向。并且，提出了两个值得注意的方向：一个是“声定位器”，利用双耳定位原理通过声音定出来袭飞机的方位，这是准备反抗日本侵略所需，不久发展了雷达，声学定位就无用了；另一个方向是“语言声的频谱分析”，当时电话上讲话不大清楚，很费劲，频谱分析的目的是找出改进电话的方法，这对我们也是重要问题。

导师朱物华先生的研究工作是电信网络的过渡现象，他有一具阴极射线示波器（只有管子，没有扫描线路）和一架高速照相机可以借给我用。我又向中国文学系语言学家罗常培教授借来一台留声机，买来留声机上用的电磁拾声器。最后，自己找来零件做了一台电阻耦合放大器。这样，攒成了中国第一套声波波形记录设备，这套设备也成了一个小段语言的波形记录系统。它读下波形就可以进行傅里叶分析了，这是中国的第一台电子式语言分析系统。

过去，我国研究语音主要靠研究人员的听力，只有刘复（半农）先生发明的声调推断尺，在烟熏纸上划出波形，测出波长，推出频率。我利用他的原理，用波形记录器记录下大量小段语言波形，在每一个波上读出几十

2 汉语人机语音通信基础

个点上的幅值,用算盘算出 24 个傅里叶分量,得到大量成果。在计算中,每一个点上的幅值要乘上一个相当的常数,但计算了一些以后,我发现第一个点上乘的常数和同一个波最后的一点要乘的常数相同。这样就可以先把两点上的幅值相加,以后再乘上那个常数,两次相乘再相加就变成了一次相加和一次相乘,减少了计算。第二个点也相似,第三个点也相似,等等。24 个点就可变成 12 个点,12 个点还可变成 6 个点,如此下去就大大减少了计算量。现在想起来,这就是快速傅里叶分析的原理。当时还没有计算机,没有想到这里,只是思想上的收获。不久,七七事变发生,北京被占领,学校也进了日本兵,所有计算结果连同草稿都失掉了,也只有思想上的收获。这是我最早的经历。

后来 1940 年学习结束了,回国路上去访问赵元任先生,可惜人很多没有来得及细谈。经过纽约正好举行世界博览会,贝尔实验室在会有语声合成器(Voder)的表演。一位女秘书,前面有像是一台英文打字机的机器,下面还有个踏板,女秘书用两手操纵机器上几个按键,脚踏踏板,就发出人讲话的声音。一个人提个问题,人们就听到“Oh, yes”的回答,活像女秘书亲自讲话,很吸引人。这是语言合成的开始,给我深刻印象。经过芝加哥,去工厂参观“sound mirror”,这实际是钢丝录音机,在机器前面说句话,一会儿机器就说回来。这也是颇有前途的设备,虽然当时质量还不好。后来,到西岸去看了老师努特森,就乘船回国了。

到昆明除了在西南联大教书外,也到当地工厂参观,如无线电厂、有线电研究所、机械厂、光学厂等,都没有需要研究的课题,只有有线电研究所还不了解电话机的原理,我就给他们讲了电声学,还写了讲义。我在空闲时间做了汉语按声、韵、调的统计,受到文科研究所的重视。

1956 年到电子所,后来分开到声学所恢复声学研究工作才又谈到语音通信问题。1958 年,国际上流行在电子线路上识别几个字的实验,我们认为可以以此为开端,进行语声识别工作。张家骥、李炳光等同志很快制好设备,能识别十个元音。读一个“阿”字,屏幕上就打出 a,读一个“一”字,屏幕上就打出 i。但是这个系统很难发展,识别一百个字就要一百个共振线路;识别一千个字,就要一千个共振线路,不现实。张家骥同志就转而从语音通信的基本理论、规律出发进行探讨,研究涉及语音学、声学基本问题,语声产生的基本理论,语声分析和处理技术以及有关数

据,特别是汉语普通话的特殊问题,等等。内容非常丰富,现在写出来,几乎成了语音通信的百科全书,是语音通信工作的最好参考书。

语言合成在 20 世纪 30 年代就比较成熟,但是不太自然,直到现在还不令人完全满意。语言识别 20 世纪 60 和 80 年代几次让人高兴,直到最后 ViaVoice 让人认为最了不起,后来还是冷了下来。要想什么地方都用,还是不成。语音通信如何保密,现在办法还不多。语音通信的研究工作还有长路要走。

马太敏
2006.09.10

序 二

今年之春,老友张家骥兄以其新著《汉语人机语音通信基础》的光盘见示,并索为序。我于新兴的人机通信研究本属外行,作序自难称职,姑且怀着钦佩的心情看完自序和目录,即深感其规模宏备。迨将原稿的各章略加涉猎之后,更觉其引证翔实,而多数成果是由作者亲自实验得来。凡自上世纪以来、关于人际通话的、人机通信的、在物理和生理方面的研究资料,都有了大量评述。从上世纪以来,语音学者和言语工程学者双方花的气力不可谓不多,而到了今天在人机通信中,语音识别和合成的质量仍还不够理想。对此,作者画龙点睛地指出:

“语音科学是一门边缘性相当强的学问。”过去言语工程方面的研究多只着重实验数据,而语音学在语言学中的地位则低于语法,其研究范围仍停留在传统音韵学的阶段,文科和理科间的壁垒甚深。人们的语音“决不是经验主义统计模型的产物。可以预见,当经验主义和理性主义相结合的时候,当统计数据被加以理性分析的时候,当语音产生过程和言语知觉过程被更加深入了解的时候,语音科学和语音技术本身会达到一个全新的发展阶段,而且会对人类社会生活产生不可估量的影响。”

作者提出“统计数据”要加以“理性分析”,这是绝对需要的。但是语音的理性分析有些什么内容,由谁来分析?这就不是理工学者单方面的任务,而必须由语音学者来共同挑起这重担了。所幸我国在上世纪初已经有文理双方的两位大师高瞻远瞩地看到它的重要性,而各为创立这项任务作了准备。我有幸躬逢其事,记忆犹新,略述于下。

文科方面有语文学大师罗常培先生。早期任北大兼清华的语言学教授,后期任中国科学院(后归社会科学院)语言研究所所长。他是汉语声调实验创始人刘复(半农)教授在北大创立的“语音乐律实验室”的继承人,他对中国音韵学的研究,在上世纪 30 年代就已贯通古今百家。当时,

2 汉语人机语音通信基础

国内一般语言学者研究汉语语音,仍埋头于传统音韵学的故纸堆中,而不去理会现代的科学分析方法。他在《中国音韵沿革》的讲义中指出:当前还有不少学者,研究语音既不懂实验,又缺乏仪器,只凭个人的成见和方言习惯来分析语音,结果是“考古功多,审音功浅”;而现代语音学家“分析音素,可用音标以济汉字之穷”,“解决积疑,可资实验以补听官之缺”,“举凡声韵现象,皆可据生理、物理讲明”。这是早期在语言学界提倡实验的最强音号召。

理科方面有声学大师马大猷先生。他是我国早期研究物理声学最全面的专家。他在中国科学院声学研究所所长任内,对现代各种声学的理论和应用,都做了大量的实验研究。对于语言声学,特别是汉语语音的各种词类在不同话语中的出现概率,也通过大规模的实验统计,取得了空前丰富的数据。但他在《声学手册》的“语言声学”一章中,对此并不认为万事俱备,而仍明确指出:“在任何一种语言中,各个音位、音节、语词等等,都不是平均使用的”;“因为每人讲话都有所不同,不完全是电子学的问题,所以长期不能解决”;“历史上长时期发展的结果,由于两种相反力量(富余量和自然度),各个语声的出现频率不同”;“统计分析是必要的,但统计规律只是使用语声的规律,与表示的思想、意义无关”;“出现概率是随机形成的”。可见,他早就注意到,言语工程中信息处理质量的提高,不完全是科技方面的问题,而必须在自然言语的规律上加强研究。他在《以科学的方法领导科研事业》一文中所引爱因斯坦的话,正说明我们今后应该注意的新问题。爱氏是这样说的:

“提出一个问题比解决一个问题更重要。因为解决一个问题也许是一个数学上或实验上的技巧;而提出新的问题、新的可能性,从新的方向看旧问题,需要创造性的想象力,而且标志着真正进步。”

我在大学本来是学了一年工程,后转中国文学的。我幼读家塾,兴趣在古典文学,要做旧体诗词,就得研究声韵。一个偶然的机会选了罗先生的《音韵学》课,才明白“考古功多,审音功浅”之失。毕业后考进南京中央研究院历史语言研究所,为赵元任先生的助理。从此就以用实验手段调查方言为专业。解放后蒙罗先生之召,进了中科院的语言研究所为助研,专事普通话语音的实验研究和实验室的建立。遇到语声上的问题,就向科学院的声学所取经。那时家骅兄在马先生领导下,已成为得力助手,发

表过好几篇师生合写的语言声学论文。我得到他们的无私帮助,又多了学术交流的机会。我既提高了语音实验的技术知识,也发现了一些值得研究的新课题。

最近言语工程的信息处理方面,通过有关院校和技术单位的不懈努力和文理双方队伍的加强,通过群策群力以及设备的更新,过去所认为的难题已逐渐解决了不少。这是几十年前所难想象的,但数典不能忘祖。家骅书中所载的都是前人“筚路蓝缕”铺路的经历。经过语音研究文理双方半个多世纪的惨淡经营,书中所说的“理性与实验并重”,已能较好地实现了。因此我以为,本书不但是本行必读的资料,还应该当作本学科的“史诗”看待。

我对本书中的一些属于隔行的项目,虽未能有所月旦;但是其中关于语音实验和通信工程的联系,却也打过好几年的交道,或可提供一点史实。

回忆我和作者从上世纪中期以来的交往,种种经历如在目前。特别是我们各自研究领域相互切磋的历程,如果不嫌夸大的话,可以说多少是跟我国现代语音学和通信工程学的发展同步了。我们双方早期的接触,先是“互窥门径”,接着是“相濡以沫”,后来做到“同源合流”了。千里之行起于跬步。时代的推动固然“事有必至”;而运转的迟早,既有境遇,亦在人为。学术方面是,上世纪之初,从传统语音学的“口耳之学”进到现代的生理、物理和心理的实验语音学,差不多用了半个多世纪;现在是更进一步到应用于言语工程的自然语音的规则研究了。言语工程方面也是在上世纪开始,从单音的声学分析到语句的数据编码,最近进展到自然语言的分析与合成了。我同家骅兄在这大的浪潮中是各有机遇而择业终身,多少带点传奇性的。

余不敏,前事既有亲历,爰不惮词费,谨记其因缘如上,并祝本书之不脛而走,“洛阳纸贵”。

二零零七年孟秋之月,吴宗济序于补听缺斋,时年九十有八

前 言

电话发明以后,语音科学和语音技术就越来越受到人们的注意;电子管的发明和电子线路的发展,又大大地促进了语音技术的进步。语音技术的进步继而推动了语音科学的提高。纵观 20 世纪,语音技术除了帮助人类言语交际超越空间、时间的限制以外,最重要的贡献在于把人机语音通信提上日程,并引领机器进入人类语言集团。语言是人类最重要的交际工具和思维工具的定义,正在面临被扩展的境遇。电子计算机的普及和功能扩展,使人类正在逐步接受机器成为语言集团的新成员。当然,现在距离真正普遍实现,还有很长的路要走。

面对当前语音技术攻坚的需求,语音科学理论武库所能提供的利器嫌少了些。理论的发展落后于技术的进步。对语音产生来说,仍然只是声源-滤波器模型;对语音接收来说,主要是利用纯音测得的听觉模型。对于全面了解复杂多变的语音信号作为语言信息负载者的编码和解码过程的本质,从而达到人机语音通信与人人语音通信一样的水平来说,这还是远远不够的。与之相对的是,统计方法的运用,使语音技术取得了突破性的进展,推向了一个走向实用的新阶段。

所以,人们便从“更好的语音技术来自于更好的语音科学”的理性主义,转向了“数据越多越好”的经验主义。为了降低语音识别的误识率和提高语音合成的自然度,都乞灵于统计方法;不断地扩大语音数据库和沉湎于一些信号处理算法,成了言语工程的不二法门。特别是,只注意公式和算法而忽视研究对象的物理过程,几乎成了计算机时代研究人员的国际通病。很多事情都推给计算机去做,而不愿探究问题中的未知规律。这样对待兼有自然属性和社会属性两种特征的语音信号,就难免不断遭遇知识壁垒的挑战。

继“第五代”计算机的流产和语音听写机的沉默之后,经历了

2 汉语人机语音通信基础

Tangora和 ViaVoice 的兴奋和鼓舞,现在又走到了一个新的十字路口。很多人都在想:我们应当看看路线图了。这正好给我们提供了一个冷静思考的机会。

语音产生的声学理论和声源-滤波器模型,为现代语音信号处理和语音技术的发展提供了理论基础,它仍然是指导语音技术进步的指南。但是,声源-滤波器毕竟只是一个语音产生在音段层次上的静态模型。自然言语是一个动态过程,不但声源和滤波器之间存在相互作用,而且在音段和音段之间、音段和超音段之间也有相互影响,有些影响还可以是远程的。在语音接收过程中,这些超音段(韵律)特征和各种相互作用又是传递副语言学和非语言学信息的重要手段。言语可懂度和自然度取决于语音信号在听觉过程中的正确解码。当前只利用内耳分析器的纯音模型和设计的一些算法(如美频率倒谱系数 MFCC、感知线性预测分析 PLP),就已经显示出明显的优点,可以想象,如能利用反映听觉高层次在语音信号分析中的作用,必将会使语音分析达到新的更高水平。

语言是一个开放的系统,每个人的语言输出是一个有规划的符号组织系列。随着社会的发展变化,新词语新用法不断涌现,再大的语音数据库也避免不了数据稀疏问题的存在。语言作为交际工具是社会公用的,多数统计数据反映的是语言的公用特征。然而,语言交际又都是个人行为,允许创造性的表达,这种表达必然会与公用的平均特征有一定偏离。这也正是语言丰富多彩的地方。所以,采用统计方法注定也不能完全解决问题。经验和可懂度理论分析表明,人类可能是采用理性分析和统计判断相结合的方法来解决问题的。有一个实例令我印象十分深刻:一次在公共汽车站等车,一位姥姥抱着外孙女,她来到车站就把怀中的小外孙女(大约两岁)放到了地上。可小女孩不干,非要缠着姥姥抱她。姥姥无奈,一边抱起来,一边顺口说了一句,“你这个白眼儿狼”(本来这句话的意思通常是北京老年人对忘恩负义的晚辈的责备,可这里是对小孩儿爱多于恨的一种表达)。小女孩想都没想,立即报以“你这个红眼儿狼”。我想这决不是经验主义统计模型的产物。可以预见,当经验主义和理性主义相结合的时候,当统计数据被加以理性分析的时候,当语音产生过程和言语知觉过程被更加深入了解的时候,语音科学和语音技术本身会达到一个全新的发展阶段,而且会对人类社会生活产生不可估量的影响。

本书只是想唤起语音技术和语音科学研究人员对语音科学基础理论的重视,让大家了解语音技术基础的来龙去脉,以及它与相关学科的关系。同时,也向大家系统地呈现多年来我们在语言声学研究领域所取得的一些主要成果。本书并不着重介绍各种具体的语言机器和算法,因为随着技术发展,它们是变化很快的,况且还有众多现成的开发工具可供利用。本书只是对一些在语音技术发展进程中,起了重要作用、有代表性的系统加以描述。

语音科学是一门边缘性相当强的学问,它不但是语言学和语音学的新发展,还与声学、生理学和心理学有着密不可分的关系。它难以把握之处也正在这里。

本书的第0章,专门讲述语音科学和语音技术的发展史。

第1、2、3、4章,介绍语音科学相关的基础理论,其中包括我们的一些研究结果(诸如,汉语拼音字母和汉语语音的信息量、汉语区别特征系统、Lund模型用于汉语语调研究、听觉部位学说的新解释等)。有关电学、生理学和心理学的问题,分别放在第1章电学基础、第2章语音学基础和第3章声学基础中加以叙述。这样便于从不同领域涉入言语科学和言语技术的人可以各取所需。第4章专门对语音产生的声学特性加以较详细的介绍,因为它是语音信号处理的物理基础。

第5章,介绍语音分析方法,这是最基本的知识。

第6章,则具体介绍汉语普通话的一些分析结果。

第7章,着重讨论清晰度试验、可懂度理论以及语音质量的主观、客观评价问题。这一章的篇幅大一些,因为我们一向把言语交际从说到听作为一个统一过程来研究,了解言语知觉过程,可以指导如何更有效地进行言语分析、合成与识别。

第8、9、10章,分别介绍语音合成、语音识别和对话系统,它们是建立人机语音通信必要的组成部分。

为了便于读者阅读和参考,各章内容的叙述尽量相对独立。又由于语音科学界与技术界的中文名词术语很不统一,特别是海峡两岸同一英文名词常有不同译法,加上众多名词又是跨学科的,因而带来诸多不便。本书对常用专业名词术语尽量括注英文名,并建立中英对照的索引,以便检索参考。所以,希望本书也可以被读者当作一本语音科学和技术的手

册来用。

本书是在两种外力的作用下才得以完成的。

首先,是一股来自于我的老师马大猷教授的推动力。他曾建议我,在这个领域里工作四十多年了,应当写一本书。可是,我一来是“懒惰”,二来是犹豫。“懒惰”使我提不起笔来;犹豫又使我落不下笔去。因为对语音科学研究得越多,越感到它广阔无边、深不可测,对一些问题就更不敢轻下结论。1993年,当我们研究小组获得国家自然科学三等奖以后,答应了上海科学技术出版社的约稿,但我没能履约,失信了。2004年,我的老师89岁高龄,一年就写了两本书,其中一本是专著——《现代声学理论基础》。他以原稿让我先睹为快,还写了书评。现在他还每周一三五上午,到研究所去上班。他的这种为科学献身的敬业精神,鼓舞了我,也鞭策了我。受老师不言之教的推动,我终于大胆动笔。书稿又蒙老师不辞劳苦加以审阅,并欣然命笔作序。序中有些往事是他以前不曾谈过的。他所做的语音信号傅里叶级数分析工作,其实已具今日快速傅里叶变换的雏形,这段往事实在是对本书第0章的很好的补充。

其次,是来自上海科学技术出版社的支持力。2004年蒙段韬主任和静晓英编辑不弃,又来电话重续前约,令我既惭愧又感动。

正是这两股力打破了我的惯性,用近两年的时间完成了这本书。在这里向他们表示衷心的感谢。

书是写完了,可头脑中还有许多问题,有待进一步的研究。即使是已经写下来的,也不可避免的会有诸多疏漏和错误,敬希读者批评指正。

张家骅

于北京团结湖

2006年12月16日

目 录

《科学前沿进展》序

序一

序二

前言

第 0 章 绪论	1
§ 0.1 初创时期	2
§ 0.2 机械模拟时期	3
§ 0.3 波形原理时期	5
§ 0.4 参数提取时期	7
§ 0.5 信息处理时期	12
参考文献	15
第 1 章 电学基础	16
§ 1.1 电学的发展	17
§ 1.2 电的物理性质	18
§ 1.3 电路基本元件	22
1.3.1 电阻	22
1.3.2 电感	24
1.3.3 变压器	26
1.3.4 电容	28
§ 1.4 电路分析的数学工具	31
1.4.1 三角函数	31
1.4.2 双曲函数	35