

清华大学优秀博士学位论文丛书



Tsinghua
theses

大规模集成电路片上供电网络 仿真与验证算法研究

杨建磊 著 Yang Jianlei

On-Chip Power Supply Network
Simulation and Verification for Large
Scale Integrated Circuits

清华大学出版社
TSINGHUA UNIVERSITY PRESS

清华大学优秀博士学位论文丛书

大规模集成电路片上供电网络 仿真与验证算法研究

杨建磊 著 Yang Jianlei

On-Chip Power Supply Network
Simulation and Verification for Large
Scale Integrated Circuits

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书针对供电网络形式化矩阵方程的数学特点,结合供电网络物理结构,利用局部性原理,研究了大规模供电网络的快速分析方法,探讨了大规模复杂供电网络的静态分析、瞬态分析以及和无向量验证相关的理论和实验分析方法。

本书适合信息领域的科研人员、企业工程师及高等院校的教师、研究生阅读参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

大规模集成电路片上供电网络仿真与验证算法研究/杨建磊著. —北京:清华大学出版社,2018

(清华大学优秀博士学位论文丛书)

ISBN 978-7-302-45846-3

I. ①大… II. ①杨… III. ①大规模集成电路—供电网—计算机仿真 IV. ①TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 288606 号

责任编辑:薛 慧

封面设计:傅瑞学

责任校对:王淑云

责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市铭诚印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:155mm×235mm 印 张:11 插 页:2 字 数:190 千字

版 次:2018 年 6 月第 1 版 印 次:2018 年 6 月第 1 次印刷

定 价:89.00 元

产品编号:071886-01

一流博士生教育 体现一流大学人才培养的高度(代丛书序)^①

人才培养是大学的根本任务。只有培养出一流人才的高校,才能够成为世界一流大学。本科教育是培养一流人才最重要的基础,是一流大学的底色,体现了学校的传统和特色。博士生教育是学历教育的最高层次,体现出一所大学人才培养的高度,代表着一个国家的人才培养水平。清华大学正在全面推进综合改革,深化教育教学改革,探索建立完善的博士生选拔培养机制,不断提升博士生培养质量。

学术精神的培养是博士生教育的根本

学术精神是大学精神的重要组成部分,是学者与学术群体在学术活动中坚守的价值准则。大学对学术精神的追求,反映了一所大学对学术的重视、对真理的热爱和对功利性目标的摒弃。博士生教育要培养有志于追求学术的人,其根本在于学术精神的培养。

无论古今中外,博士这一称号都是和学问、学术紧密联系在一起,和知识探索密切相关。我国的博士一词起源于2000多年前的战国时期,是一种学官名。博士任职者负责保管文献档案、编撰著述,须知识渊博并负有传授学问的职责。东汉学者应劭在《汉官仪》中写道:“博者,通博古今;士者,辩于然否。”后来,人们逐渐把精通某种职业的专门人才称为博士。博士作为一种学位,最早产生于12世纪,最初它是加入教师行会的一种资格证书。19世纪初,德国柏林大学成立,其哲学院取代了以往神学院在大学中的地位,在大学发展的历史上首次产生了由哲学院授予的哲学博士学位,并赋予了哲学博士深层次的教育内涵,即推崇学术自由、创造新知识。哲学博士的设立标志着现代博士生教育的开端,博士则被定义为独立从事学术研究、具备创造新知识能力的人,是学术精神的传承者和光大者。

^① 本文首发于《光明日报》,2017年12月5日。

博士生学习期间是培养学术精神最重要的阶段。博士生需要接受严谨的学术训练,开展深入的学术研究,并通过发表学术论文、参与学术活动及博士论文答辩等环节,证明自身的学术能力。更重要的是,博士生要培养学术志趣,把对学术的热爱融入生命之中,把捍卫真理作为毕生的追求。博士生更要学会如何面对干扰和诱惑,远离功利,保持安静、从容的心态。学术精神特别是其中所蕴含的科学理性精神、学术奉献精神不仅对博士生未来的学术事业至关重要,对博士生一生的发展都大有裨益。

独创性和批判性思维是博士生最重要的素质

博士生需要具备很多素质,包括逻辑推理、言语表达、沟通协作等,但是最重要的素质是独创性和批判性思维。

学术重视传承,但更看重突破和创新。博士生作为学术事业的后备力量,要立志于追求独创性。独创意味着独立和创造,没有独立精神,往往很难产生创造性的成果。1929年6月3日,在清华大学国学院导师王国维逝世二周年之际,国学院师生为纪念这位杰出的学者,募款修造“海宁王静安先生纪念碑”,同为国学院导师的陈寅恪先生撰写了碑铭,其中写道:“先生之著述,或有时而不章;先生之学说,或有时而可商;惟此独立之精神,自由之思想,历千万祀,与天壤而同久,共三光而永光。”这是对于一位学者的极高评价。中国著名的史学家、文学家司马迁所讲的“究天人之际、通古今之变,成一家之言”也是强调要在古今贯通中形成自己独立的见解,并努力达到新的高度。博士生应该以“独立之精神、自由之思想”来要求自己,不断创造新的学术成果。

诺贝尔物理学奖获得者杨振宁先生曾在20世纪80年代初对到访纽约州立大学石溪分校的90多名中国学生、学者提出:“独创性是科学工作者最重要的素质。”杨先生主张做研究的人一定要有独创的精神、独到的见解和独立研究的能力。在科技如此发达的今天,学术上的独创性变得越来越难,也愈加珍贵和重要。博士生要树立敢为天下先的志向,在独创性上下功夫,勇于挑战最前沿的科学问题。

批判性思维是一种遵循逻辑规则、不断质疑和反省的思维方式,具有批判性思维的人勇于挑战自己、敢于挑战权威。批判性思维的缺乏往往被认为是中国学生特有的弱项,也是我们在博士生培养方面存在的一个普遍问题。2001年,美国卡内基基金会开展了一项“卡内基博士生教育创新计划”,针对博士生教育进行调研,并发布了研究报告。该报告指出:在美国和

欧洲,培养学生保持批判而质疑的眼光看待自己、同行和导师的观点同样非常不容易,批判性思维的培养必须要成为博士生培养项目的组成部分。

对于博士生而言,批判性思维的养成要从如何面对权威开始。为了鼓励学生质疑学术权威、挑战现有学术范式,培养学生的挑战精神和创新能力,清华大学在2013年发起“巅峰对话”,由学生自主邀请各学科领域具有国际影响力的学术大师与清华学生同台对话。该活动迄今已经举办了21期,先后邀请17位诺贝尔奖、3位图灵奖、1位菲尔兹奖获得者参与对话。诺贝尔化学奖得主巴里·夏普莱斯(Barry Sharpless)在2013年11月来清华参加“巅峰对话”时,对于清华学生的质疑精神印象深刻。他在接受媒体采访时谈道:“清华的学生无所畏惧,请原谅我的措辞,但他们真的很有胆量。”这是我听到的对清华学生的最高评价,博士生就应该具备这样的勇气和能力。培养批判性思维更难的一层是要有勇气不断否定自己,有一种不断超越自己的精神。爱因斯坦说:“在真理的认识方面,任何以权威自居的人,必将在上帝的嬉笑中垮台。”这句名言应该成为每一位从事学术研究的博士生的箴言。

提高博士生培养质量有赖于构建全方位的博士生教育体系

一流的博士生教育要有一流的教育理念,需要构建全方位的教育体系,把教育理念落实到博士生培养的各个环节中。

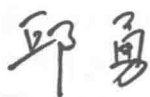
在博士生选拔方面,不能简单按考分录取,而是要侧重评价学术志趣和创新潜力。知识结构固然重要,但学术志趣和创新潜力更关键,考分不能完全反映学生的学术潜质。清华大学在经过多年试点探索的基础上,于2016年开始全面实行博士生招生“申请-审核”制,从原来的按照考试分数招收博士生转变为按科研创新能力、专业学术潜质招收,并给予院系、学科、导师更大的自主权。《清华大学“申请-审核”制实施办法》明晰了导师和院系在考核、遴选和推荐上的权利和职责,同时确定了规范的流程及监管要求。

在博士生指导教师资格确认方面,不能论资排辈,要更看重教师的学术活力及研究工作的前沿性。博士生教育质量的提升关键在于教师,要让更多、更优秀的教师参与到博士生教育中来。清华大学从2009年开始探索将博士生导师评定权下放到各学位评定分委员会,允许评聘一部分优秀副教授担任博士生导师。近年来学校在推进教师人事制度改革过程中,明确教研系列助理教授可以独立指导博士生,让富有创造活力的青年教师指导优秀的青年学生,师生相互促进、共同成长。

在促进博士生交流方面,要努力突破学科领域的界限,注重搭建跨学科的平台。跨学科交流是激发博士生学术创造力的重要途径,博士生要努力提升在交叉学科领域开展科研工作的能力。清华大学于2014年创办了“微沙龙”平台,同学们可以通过微信平台随时发布学术话题、寻觅学术伙伴。3年来,博士生参与和发起“微沙龙”12000多场,参与博士生达38000多人次。“微沙龙”促进了不同学科学生之间的思想碰撞,激发了同学们的学术志趣。清华于2002年创办了博士生论坛,论坛由同学自己组织,师生共同参与。博士生论坛持续举办了500期,开展了18000多场学术报告,切实起到了师生互动、教学相长、学科交融、促进交流的作用。学校积极资助博士生到世界一流大学开展交流与合作研究,超过60%的博士生有海外访学经历。清华于2011年设立了发展中国家博士生项目,鼓励学生到发展中国家亲身体验和调研,在全球化背景下研究发展中国家的各类问题。

在博士学位评定方面,权力要进一步下放,学术判断应该由各领域的学者来负责。院系二级学术单位应该在评定博士论文水平上拥有更多的权力,也应担负更多的责任。清华大学从2015年开始把学位论文的评审职责授权给各学位评定分委员会,学位论文质量和学位评审过程主要由各学位分委员会进行把关,校学位委员会负责学位管理整体工作,负责制度建设和争议事项处理。

全面提高人才培养能力是建设世界一流大学的核心。博士生培养质量的提升是大学办学质量提升的重要标志。我们要高度重视、充分发挥博士生教育的战略性、引领性作用,面向世界、勇于进取,树立自信、保持特色,不断推动一流大学的人才培养迈向新的高度。



清华大学校长

2017年12月5日

丛书序二

以学术型人才培养为主的博士生教育,肩负着培养具有国际竞争力的高层次学术创新人才的重任,是国家发展战略的重要组成部分,是清华大学人才培养的重中之重。

作为首批设立研究生院的高校,清华大学自20世纪80年代初开始,立足国家和社会需要,结合校内实际情况,不断推动博士生教育改革。为了提供适宜博士生成长的学术环境,我校一方面不断地营造浓厚的学术氛围,一方面大力推动培养模式创新探索。我校已多年运行一系列博士生培养专项基金和特色项目,激励博士生潜心学术、锐意创新,提升博士生的国际视野,倡导跨学科研究与交流,不断提升博士生培养质量。

博士生是最具创造力的学术研究新生力量,思维活跃,求真求实。他们在导师的指导下进入本领域研究前沿,吸取本领域最新的研究成果,拓宽人类的认知边界,不断取得创新性成果。这套优秀博士学位论文丛书,不仅是我校博士生研究工作前沿成果的体现,也是我校博士生学术精神传承和光大的体现。

这套丛书的每一篇论文均来自学校新近每年评选的校级优秀博士学位论文。为了鼓励创新,激励优秀的博士生脱颖而出,同时激励导师悉心指导,我校评选校级优秀博士学位论文已有20多年。评选出的优秀博士学位论文代表了我校各学科最优秀的博士学位论文的水平。为了传播优秀的博士学位论文成果,更好地推动学术交流与学科建设,促进博士生未来发展和成长,清华大学研究生院与清华大学出版社合作出版这些优秀的博士学位论文。

感谢清华大学出版社,悉心地为每位作者提供专业、细致的写作和出版指导,使这些博士论文以专著方式呈现在读者面前,促进了这些最新的优秀研究成果的快速广泛传播。相信本套丛书的出版可以为国内外各相关领域或交叉领域的在读研究生和科研人员提供有益的参考,为相关学科领域的发展和优秀科研成果的转化起到积极的推动作用。

感谢丛书作者的导师们。这些优秀的博士学位论文,从选题、研究到成文,离不开导师的精心指导。我校优秀的师生导学传统,成就了一项项优秀的研究成果,成就了一大批青年学者,也成就了清华的学术研究。感谢导师们为每篇论文精心撰写序言,帮助读者更好地理解论文。

感谢丛书的作者们。他们优秀的学术成果,连同鲜活的思想、创新的精神、严谨的学风,都为致力于学术研究的后来者树立了榜样。他们本着精益求精的精神,对论文进行了细致的修改完善,使之在具备科学性、前沿性的同时,更具系统性和可读性。

这套丛书涵盖清华众多学科,从论文的选题能够感受到作者们积极参与国家重大战略、社会发展问题、新兴产业创新等的研究热情,能够感受到作者们的国际视野和人文情怀。相信这些年轻作者们勇于承担学术创新重任的社会责任感能够感染和带动越来越多的博士生们,将论文书写在祖国的大地上。

祝愿丛书的作者们、读者们和所有从事学术研究的同行们在未来的道路上坚持梦想,百折不挠!在服务国家、奉献社会和造福人类的事业中不断创新,做新时代的引领者。

相信每一位读者在阅读这一本本学术著作的时候,在吸取学术创新成果、享受学术之美的同时,能够将其中所蕴含的科学理性精神和学术奉献精神传播和发扬出去。

清华大学研究生院院长

2018年1月5日

导师序言

超大规模集成电路的制造工艺已经步入了纳米阶段,与此同时,芯片的高性能、低功耗和成品率问题成为本领域备受关注的研究热点。电路性能、系统功耗和参数成品率非常依赖于芯片的供电系统,高性能芯片对供电网络设计提出了非常高的设计需求,要求供电网络能够提供更大的功率、更小的供电电压噪声、更快的瞬态响应以及更低的供电系统设计成本。这给供电网络设计、分析和验证带来了巨大的挑战。首先,在纳米工艺下的集成电路设计中,由于芯片功耗急剧增加以及芯片供电电压不断降低,导致供电网络的工作电流越来越大,而噪声容限越来越低,很小的供电噪声就会造成电路工作失常,迫使供电网络设计的分析精度不断提高,需要在 0.1mV 以下。第二,供电网络规模越来越大,结构越来越复杂,整个供电网络的建模及分析效率面临严峻的挑战。第三,大规模供电网络的仿真,其对内存的消耗是极大的,不仅传统的电路分析工具(如 SPICE)无法应对,即使是现有的一些商用工具(如 FastSPICE)也难以胜任。第四,随着芯片工作频率的不断提高,供电网络上的寄生电容(C)、寄生电感(L)对噪声的影响日益增大,供电网络分析已从较简单的以电阻(R)为主的静态分析变为复杂的 RLC 瞬态分析。

供电网络的设计通常有几个重要的性能指标。首先,是芯片全负荷工作时供电网上的最大电压降,最大电压降越小代表供电性能越好,否则将由于供电不足引起芯片性能下降;其次,是供电网上的电流分布要尽可能均匀,各个供电分支上的最大电流密度不能超过规定的阈值,否则将使芯片产生局部发热点,甚至出现金属电迁移现象,导致集成电路寿命降低甚至失效;第三,在瞬态工作的情况下,供电瞬态噪声必须低于一定的噪声阈值,否则将导致电路逻辑错误;最后,在满足性能要求的前提下,应优化供电网的面积,减小对布线资源的占用率,降低设计成本。总的来讲,对供电网络进行更加精细的分析和验证,对于仿真精度的要求越来越高,同时由于供电网的规模日益庞大,对供电网进行精细的分析在时间和空间方面开销巨大。

对于仿真算法和工具而言,迫切需要能够快速分析含有千兆量级节点的供电网络。

在供电网的仿真分析中,一般可将供电网等效为一个线性系统,工业界广泛采用直接求解的方法进行求解分析,但是直接求解算法的内存开销随着供电网规模的增大而急剧地增加,不适用于大规模供电网络仿真的需求。从 20 世纪 90 年代开始,国际上开始有不少研究小组致力于研究新的供电网仿真方法。首先出现了不少模型降阶方面的研究工作,如 Carnegie Mellon 大学,IBM 公司等。这些方法将大规模供电网络视为一个多端口的网络,采用了多种正交子空间逼近的方法对原有系统进行近似处理,通过降低求解方程的阶数以达到简化求解时间的目的。2000 年前后,Wisconsin 大学的研究小组将 Krylov 子空间迭代方法引入到大规模供电网的仿真分析中,迭代法的引入大大增强了仿真器的求解能力,使其能够处理大规模的供电网络,这极大地促进了供电网瞬态分析技术的发展,供电网络设计也从静态分析进入到了考虑瞬态分析的时代。随着供电网规模的进一步增加,迭代法也出现了收敛性逐渐变差的问题。2002 年左右,供电网络仿真的研究工作主要集中在如何开发一种不受网络规模限制的求解算法上,这些算法的一大特点就是非常的稳定,计算复杂度随着规模的变化并没有明显的增长,于是分而治之的策略应运而生,并被应用到大规模供电网的分析求解中,把整体供电网络划分成为若干小的子网进行求解,并通过一定的处理方法保证边界上的精度。分治策略的成功应用推动了学术界对供电网特殊性质的研究,不少层次化的仿真方法先后出现,然而这些方法都没有完全解决供电网络划分之后子网络之间存在强烈耦合的问题,要么分块计算相当繁杂,要么求解精度受到影响。2004 年,Intel 公司 CAD 战略发展研究室的 Eli. Chiprout 等人提出了在 Flip-Chip 封装模型下供电网存在局部性的概念,并直接采用了局部性原理对 Pentium IV 芯片进行了大规模的仿真,获得了很好的结果,在学术界引起了不小的反响。此后不少研究人员把局部性原理引入供电网的设计中,结合宏模型的方法对供电网进行分析,获得了很好的仿真效果。由于局部性原理只存在于 Flip-Chip 封装的供电网络中,在 Wire-Bond 封装下的供电网没有很好的局部性,这限制了局部性原理的应用。

对于目前的高端微处理器等芯片设计来说,其供电网络系统规模达到数百兆,因此对仿真求解的性能有着更高的要求,主要体现在对求解精度、效率、内存以及算法稳定性几个方面。从供电网络系统形式化后的矩阵方

程特性上分析,其方程系数矩阵具有稀疏、对称、正定以及对角占优等良好性质,针对这些特点已经研究和发展出了一系列的高效仿真方法,包括:矩阵分解、多重网格方法、预条件共轭梯度法、区域分解、层次式矩阵、快速泊松求解器、网络节点等效电阻、层次化方法和随机行走方法等。上述方法中高效的预处理迭代型算法适用于静态分析,因为其只需进行一次求解;而对于瞬态分析,由于其对同一电路需进行多次仿真求解,所以高效的矩阵分解技术将更加有效。

本论文作者针对供电网络形式化矩阵方程的数学特点,结合供电网络物理结构,利用局部性原理,研究了大规模供电网络的快速分析方法,探讨了大规模复杂供电网络的静态分析、瞬态分析以及和无向量验证相关的理论和实验分析方法。首先,提出一种基于泊松预条件的快速静态仿真算法。该算法依据电路局部性原理,采用网格近似思想,用快速泊松求解器构造一种解析的预条件子,大大提高了非结构化供电网络仿真中共轭梯度迭代算法的收敛率和稳定性。第二,提出一种接近线性复杂度的代数多重网格预条件共轭梯度静态分析算法。该算法采用双重网格聚合方法,提高多层次网格间粗化的效率,采用 Krylov 子空间加速循环策略,提高误差平滑化效率。第三,提出一种线网级并行加速的瞬态仿真方法。该方法通过消除电感支路电流变量并重新形式化为对称正定矩阵方程的方法,可以解决 RLC 模型下由于封装电感导致的瞬态仿真矩阵失去对称正定性的问题;在此基础上,提出了基于 AMG-PCG 求解器和 Cholmod 求解器的线网级并行加速的瞬态仿真方法。第四,提出一种基于选择性求逆算法的无向量验证方法。该方法根据电路局部性原理,选择性地构造稀疏矩阵近似逆,并提出全局电流约束局部性的概念,保证无向量验证的精度。

我们推出此书,希望书中所述的算法、方法和实验能够给读者一些有益的启示和借鉴。

以上,权作序言。

蔡懿慈

清华大学计算机科学与技术系

2016年8月18日

摘 要

随着集成电路特征尺寸持续降低,电路寄生效应的影响愈发严重,电源完整性问题显著,片上供电网络的设计与分析日趋复杂化。集成度的不断攀升导致了片上供电网络规模急剧增长,电路节点数目达千万级以上,如此规模的供电网络分析过程极为耗时,快速有效的大规模供电网络分析技术遇到了前所未有的挑战。本论文针对大规模片上供电网络的快速仿真和验证问题开展了深入的研究,提出了一系列高效而稳定的仿真和验证算法,主要研究工作包括:

首先,针对早期供电网络仿真问题,提出一种基于泊松预条件的快速迭代算法。根据电路局部性原理,采用网格近似思想,将快速泊松求解器作为一种解析的预条件子来提高非结构化供电网络仿真中共轭梯度迭代算法的收敛率稳定性。理论分析和实验结果表明,泊松预条件共轭梯度迭代算法的收敛率随着问题规模增长而显得非常稳定,同 ICCG 和 Hybrid 求解器相比,可取得 20 倍以上的加速比。

第二,针对工业界大规模供电网络静态仿真问题,提出一种接近线性复杂度的代数多重网格预条件共轭梯度迭代算法。该算法采用双重网格聚合方法,提高多层次网格间粗化的效率,并采用 Krylov 子空间加速循环策略,在多层次网格水平上提高误差平滑化效率,改善预条件迭代算法的收敛率稳定性。理论分析表明,其收敛性只与电导矩阵的非零元数目有关,与电路节点数目规模的增长成线性关系。实验结果表明,该算法平均 1 秒内可求解一百万节点规模供电网络静态分析问题,在求解速度和内存消耗方面同时优于 Cholmod 求解器和 Hybrid 求解器。

第三,针对 RLC 模型下由于封装电感导致的瞬态仿真矩阵失去对称正定性的问题,本文通过消去电感支路电流变量的方法将其重新形式化为对称正定矩阵方程,并基于高效的 AMG-PCG 求解器和 Cholmod 求解器提出一个基于线网级并行化加速的完整瞬态仿真流程。实验结果表明,该仿真

器比基于 KLU 求解器的仿真方法快 4 倍左右,并节省 50%左右的内存消耗。

第四,针对早期供电网络无向量验证问题,提出一种基于选择性求逆算法的无向量验证技术。根据电路局部性原理选择性地构造稀疏矩阵近似逆,并提出全局电流约束局部性的概念来保证无向量验证的精度。理论分析表明,该方法可以显著改善以往基于直接求逆算法的无向量验证过程的复杂度。实验结果表明,该算法与基于直接求逆和层次式求逆的验证算法相比可以取得上百倍的加速比。

关键词: 超大规模集成电路;片上供电网络;电路仿真;无向量验证;电源完整性

Abstract

With the continuous scaling of process technology, a trend of increasing integration density has been observed to have a critical impact on parasitic effect and power integrity which leads to the increasingly complicated design and optimization of on-chip power supply network. How to design robust power supply network is becoming more and more challengeable for high performance chip designs. Efficient methodologies of simulation and verification are becoming a big concern for resolving the power integrity issues. Since the number of on-chip transistors is continuously increasing along with aggressive process technology scaling, the exploding complexity of corresponding on-chip power grids make the analysis and verification very challenging in the terms of excessive runtime and huge memory consumption. In order to satisfy the required capabilities of extremely large scale power grid analysis, several efficient and robust algorithms are proposed in this work for difference scenarios of simulation and verification. The major contributions of this paper are listed as follows:

First, a friendly fast Poisson solver preconditioned method is proposed for efficient early stage power grid simulation. The fast Poisson solver is adopted as an analytical preconditioner for conjugate gradient iterative method on unstructured power grid simulation. The preconditioning technique is performed by grid transformation procedure according to the characteristic of grid locality. Theoretical proof and experimental results demonstrate that the preconditioning performance is extremely robust with the increasing of grid size. The proposed approach obtains more than 20X speedups compared with incomplete Cholesky factorization preconditioned conjugate gradient method and random walk

based Hybrid solver.

Secondly, an algebraic multigrid preconditioned conjugate gradient solver is proposed with nearly linear complexity for efficient static analysis. Double pairwise aggregation based algebraic multigrid with K-Cycle acceleration is adopted as an implicit preconditioner to improve the robustness and scalability of iterative method. Experimental results for large scale power grids have shown that the proposed approach has remarkable scalability when compared with widely used direct solver Cholmod and well-developed Hybrid solver both on runtime and memory consumption. DC analysis of power grid with 60-million nodes can be solved by our simulator for 0.01mV accuracy within 150 seconds and 21.99GB total memory used.

Thirdly, a comprehensive flow is proposed for efficient transient simulation of large scale RLC network. By eliminating the current variables of inductor branch, the nodal analysis equation on RLC network is reformulated as a symmetric positive definite system. Consequently the Cholesky factorization based solvers and algebraic multigrid preconditioned iterative solvers could be adopted for improving simulation efficiency. Meanwhile, a scheme of partitioning based parallel transient simulation is implemented for naturally independent subnets without accuracy lost. Several industrial power grid benchmarks are evaluated for high accurate transient simulation while the proposed approach with AMG-PCG solver and Cholmod solver obtains several speedups and about 50% memory consumption compared with KLU solver.

Finally, we propose a selected inversion technique to reduce the computation cost of matrix inversion for vectorless power grid verification. The locality existence among power grids is exploited to decided which blocks of matrix inversion should be computed while remaining blocks are not necessary. The vectorless verification could be purposefully performed by this manner of selected inversion while previous direct approaches are required to perform full matrix inversion and then discard small entries to reduce the complexity of linear programming. Meanwhile, constraint locality is proposed to improve the verification accuracy. Additionally, a

concept of Quasi-Poisson block is introduced to exploit grid locality among realistic power grids and a scheme of pad-aware partitioning is proposed to enable the selected inversion approach available for practical use. Experimental results show that the proposed approach could achieve significant speedups compared to direct inversion and hierarchical inversion approaches while still guaranteeing the quality of solution accuracy.

Key words: VLSI; On-Chip Power Supply Network; Circuit Simulation; Vectorless Verification; Power Integrity