

Finite Element Method and Analysis of Plates and Shells

有限元法与板壳分析

袁 驷 崔京浩 主编

清华大学出版社

Finite Element Method and Analysis of Plates and Shells

有限元法与板壳分析

袁 驷 崔京浩 主编

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

龙驭球院士是结构工程领域的一代名师,学问深厚、文著充栋、弟子众多、桃李天下、厚德载物、名驰中外,为我国结构工程学科的发展和建设做出了重要的贡献。

值此龙驭球先生八十华诞之际,清华大学土木系袁驷和崔京浩两位教授主编本书,回顾了龙先生在有限元法和板壳分析方面的重要工作、选编了代表性学术论文 40 余篇;并辅以序言和附录,比较全面地介绍了龙先生的生平、主要论著、获奖和在其他领域的建树。

本书不仅是献给龙驭球先生八十华诞的礼物,同时也可以作为对有限元法和板壳分析有兴趣的读者的参考文献。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

有限元法与板壳分析/袁驷,崔京浩主编:—北京:清华大学出版社,2006.1
ISBN 7-302-12255-5

I. 有… II. ①袁… ②崔… III. 建筑结构—有限元分析—文集 IV. TU31-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 152398 号

出 版 者:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

地 址:北京清华大学学研大厦

邮 编:100084

客户服务:010-62776969

责任编辑:徐晓飞

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:北京雅昌彩色印刷有限公司

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×235 印张:40 字数:873 千字

版 次:2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-12255-5/O · 508

印 数:1~1000



龙驭球先生

中国工程院院士

清华大学土木工程系教授

序

2006年，在迎来清华大学土木工程系建系八十周年之际，也迎来了龙驭球院士的八十华诞——双喜临门、共贺同庆！

龙驭球院士是结构工程领域的一代名师，学问深厚、文著充栋、弟子众多、桃李天下、厚德载物、名驰中外。学生和同行们平时都习惯于亲热地称龙驭球院士为龙先生——良师益友的情感同含。

龙先生是清华大学土木工程系的第一名博士生导师、第一位院士，为土木工程系培养出第一名博士，指导出第一篇全国优秀博士论文——为土木工程系赢得了众多荣誉，做出了突出的贡献。

龙先生是力学学会第一届结构工程专业委员会主任委员，是全国结构工程学术会议第一届学术委员会主席，是中国力学学会将《工程力学》学报委托清华大学土木系承办时第一任主编——为我国结构工程学科的发展和建设做出了重要的贡献。

龙先生的“第一”很多，以上只是挂一漏万。

龙先生长期主持教育部结构力学课程教学指导工作。他主编的《结构力学》教材，更是誉满天下、几代传诵，获得了本科教材所能获得的最高奖励——国家科技进步二等奖；其历史地位、社会效益、学术意义、示范价值很难用寻常标准来评说。

龙先生一手科研、一手教学，互促并举、相长并进、双取共赢。科研上“平中创奇、泥里挖金”，教学上“深入浅出、精益求精”。龙先生凡事从容大度，举重若轻，于幽默中见睿智，在朴实中见谦逊。人们称颂龙先生是“名师出高徒”，龙先生风趣而谦逊地送了一句“回文”：

应该倒过来读——“徒高出师名”！

龙先生厚重寡言、外憨内秀；作为一代名师，诲人的态度令人亲近，奉献的精神令人景仰，创新的思维让人钦佩，执着的追求让人感奋；心甘于学，业精于勤，行胜于言，功大于名。

在龙驭球先生八十华诞之际，在诸多庆祝方案之中，我们最后选择了一个既符合龙先生朴实风格也让我们可以长久珍存的方式，即将龙驭球先生几十年来代表性的论文、文章、随笔、杂记及其他资料整理汇编成集——希望也相信它可以让先生成为更多人的益友良师。

让我们翻开这部珍贵的文集，透过字里行间的笔痕墨迹，深深地感受和领悟龙驭球先生为学、为人、为师、为业的精神、境界和风范！

袁 驷

清华大学土木水利学院院长

中国土木工程学会副理事长

中国力学学会结构工程专业委员会主任

2005年秋于清华园

寡言多论著，质朴蕴才华

崔京浩 袁 驷 辛克贵 须 寅 岑 松

我们作为龙先生的学生，多年来蒙先生言传身教，受益匪浅。深感龙先生既是治学的典范，也是做人的楷模。值此龙先生八十华诞之际，特撰写此文表达我们对老师的崇敬之情。

龙驭球先生，1926年1月15日出生，湖南安化人，汉族，中共党员，土木工程和结构力学专家。1948年毕业于清华大学土木工程系，毕业后留校工作至今，1978年任教授，1984年任博士生导师，1995年当选为中国工程院土木、水利与建筑工程学部院士。长期从事结构力学、壳体结构与有限元的教学科研工作，国内外首创七项学术成果，包括两个新型变分原理——分区变分原理、含参变分原理；五个新型有限元构造理论与方法——广义协调元理论、分区混合元法、解析试函数法、四边形面积坐标法、样条元法。这些成果博采众长，新颖独到，拓宽了学科新领域，形成颇具特色的方法体系。发展了壳体计算的解析法和数值法，科研成果被编入建设部批准全国施行的薄壳设计规程和中国建筑科学研究院研制的大型有限元分析与设计软件，广泛应用于大型壳体工程 and 高层建筑设计中，并为潜艇和海洋平台设计解决薄壳大孔口、管节点和减冰振等关键问题。撰写了我国最有影响的结构力学著作，

长期主持全国结构力学指导委员会工作，公认为全国结构力学学术带头人之一。

曾任中国力学学会第一届结构工程专业委员会主任委员(1998—2003)，教育部高等学校工科力学课程指导委员会主任委员(1995—2000)，中国土木工程学会第四届理事(1984—1988)，中国力学学会固体力学专业委员会计算结构力学专业组组长(1957—1985)和第一届计算力学专业委员会委员(1985—1990)，《工程力学》学报主编(1991—1999)，《结构工程学报》主编(1989—1991)、《计算结构力学及其应用》副主编(1983—1996)、《力学学报》第四、五届编委(1985—1993)，1999年首届国际结构工程会议主席，2004年第6届世界计算力学大会科学顾问委员会委员，第1届至第14届全国结构工程学术会议学术委员会主席(1991—2005)；现任第二届结构工程专业委员会委员(2003—)，《工程力学》名誉主编(2000—)，《Advances in Structural Engineering》(SCI源刊，1997—)和《International Journal of Structural Stability and Dynamics》(SCI源刊，2001—)国际期刊编委，《应用数学和力学》学报编委(SCI源刊，1979—)，《空间结构》学报编委兼顾问(1994—)，《建筑科学与工程学报》编委(2005—)。



龙先生大学毕业照(1948)

出版著作21部，论文235篇，被SCI(20)、EI(58)和ISTP(4)收录80余篇次，并为国内外学者广泛引用，截止到2005年12月的不完全统计达到2000多次，包括SCI论文他引71次。获中国工程科技奖、国家科技进步奖、国家级教学成果奖、全国百篇优秀博士论文指导教师奖省部级以上奖励共22项。

一、有限元法与变分原理

——开拓学科领域

在有限元和变分原理方面，龙先生和他的学生取得7项国内外首创性成果：广义协调有限元(1987)；分区混合有限元(1982)；样条有限元(1984)；四边形面积坐标有限元(1997)；解析试函数有限元(2002)；分区、分项、分层变分原理(1980)；含可选参数变分原理(1986)。前五项是有限元的新成果，后两项是变分原理的新理论。

上述五类新型有限元的创立，拓宽了有限元学科新领域：广义协调元是在传统的协调元与非协调元之间另辟的一条新路，使二十多年来困扰学术界的关于保证非协调元收敛这个难题终于找到了有效的解决方法，在薄板、厚板、薄壳、薄膜、层合板壳等各领域构造出百余种新型单元，大大扩展了国际文献已有的单元库。分区混合有限元法是混合法的新发展，文献中已有的混合杂交元法是在单元局部水平上独立假设位移场与应力场的混合法，而分区混合有限元法则是在结构整体水平上分区采用



50年代的龙先生

位移元与应力元的混合法。由于巧妙地将位移元与应力元结合，将常规元与奇异元结合，发扬两种单元的长处，从而为含应力奇点的断裂与切口等难题提供了迄今最优的新颖解法。样条有限元法的创新处是突破了样条整体插值只适用于规则区域的局限性，具有单元间连续性强，精度高，总自由度少，灵活方便，适用于复杂边界等性能，真正显示出样条函数连续性强和有限元法适应性好的双重优点。四边形面积坐标有限元法是将面积坐标法由三角形传统领域开拓应用于四边形新领域后构造出的新型单元模型，由于面积坐标与直角坐标之间始终保持线性关系，使得基于面积坐标的四边形单元在克服畸变敏感性方面优于传统等参坐标法，这为构造抗畸变的四边形元提供了新颖而有效的工具。解析试函数有限元法是通过在有限元的试函数中采用关键的基本解析解后得到的新型单元模型，它加强了离散法与解析法的互补和渗透，从而巧妙地提高有限元计算精度，可以解决单纯离散法难以有效处理的疑难问题和新问题。

上述两类新型变分原理的提出，把传统理论提到新高度。分区、分项、分层变分原理是对传统变分原理加以改造，适应有限元特点而创立的新型变分原理，为创立和发展新型有限元奠定了坚实的理论基础。例如上述两种新型有限元(广义协调元和分区混合元)就是由此导出的。含可选参数变分原理，是在变分原理中引入可选参数后而得到的变分泛函新形式，扩大了应用范围，提供了优选空间。



60年代的龙先生

张维院士等鉴定意见认为：上述科研成果居国际领先地位，使有限元离散理论得到创新，对发展计算结构力学具有普遍的指导意义；石钟慈院士在《Chinese Annals of Mathematics》上专文指出广义协调元的精度优于国际著名的Zienkiewicz单元和Specht单元；钟万勰院士和程耿东院士在评述计算力学在中国的进展时，把广义协调元和分区混合元纳入中国标志性成果之列；应SCI源刊《Advances in Structural Engineering》主编J. M. Ko教授邀请，在其创刊号上刊登“广义协调元”的专论。在2004年第六届世界计算力学大会和1999年首届结构工程国际会议上作邀请和大会特邀报告。科研成果被编入中国建筑科学研究院研制的大型高层建筑有限元分析与设计软件SATWE(国内外有九千余家用户，1999年曾获国家科技进步二等奖)中，进行了大量的工程计算，效益显著。这方面的论著被世界权威检索系统SCI(20)、EI(58)和ISTP(4)收录80余篇次，在外文文献中被完全他引90多次(包括SCI论文他引71次)，在国际学术界产生广泛影响。在中文文献中被他引的次数更多，达到870多次。龙驭球作为第一获奖者，上述科研获中国工程科技奖一项，教育部提名国家自然科学奖一等奖一项，国家教委科技进步一等奖、二等奖、三等奖各一项，两项北京市学术成果奖，光华科技基金一等奖一项。



龙驭球教授在备课(1978)

二、壳体计算理论与设计规范

——提高工程设计水平

龙驭球先生长期研究壳体计算理论，科研成果被编入建设部壳体设计规程，在国防工程、海洋平台工程、大型壳体工程、高层建筑工程等应用方面取得显著成效。

发展了壳体计算理论。在解析解方面，1962年提出分析柱壳和折板结构的力法，比符拉索夫院士提出的混合法更为简捷。1964年提出圆底扁球壳的初参数解法，优于当时的已有方法。在数值法方面，基于广义协调法理论，创立了新型薄壳单元和含转角自由度的新型薄膜单元，消除了传统平板型壳元有时出现零刚度和不收敛的缺陷。

1963—1965年参加建设部《薄壳设计规程》(BJG16—65)的制定工作，1992—1998年又作为主要起草人(排名第二)，制订《钢筋混凝土薄壳结构设计规程》(JGJ/T22—98)。他的球壳开孔、壳体受偏心集中荷载、薄壳结构的有限元分析法、广义协调壳元和膜元等科研成果被编入有关的条文、公式和表格。《规程》对全国壳体工程的设计和建造起到了指导作用。

科研成果应用于国防工程。1963—1965年受国防部门委托，研究潜艇薄壳发射孔应力集中这一难题。在国际封锁下，独立地创立了薄壳大孔口问题的摄动法，突破了卢里耶和萨文方法只能用于小孔口问题的局限性。根据当时文献资料，该项研究处于国际领先地位，提高了设计水平。



80年代的龙先生

科研成果应用于海洋平台工程。承担国家经委攻关项目，研究海洋平台管节点应力集中与裂纹缺陷分析，提出基于厚壳理论的高精度厚壳元，指出基于薄壳理论的传统设计方法的误差和局限性。由中国海上平台管节点委员会刊印专辑，推荐给海洋工程设计与研究单位使用。

科研成果应用于高层建筑设计。著名的Coull方法是框筒结构的传统设计方法，但只能用于矩形型式。在1984年国际高层建筑会议上提出一种可用于复杂型式的新能量法，突破了Coull方法的局限性，提高了设计计算水平。

鉴于龙驭球先生对中国工程科学技术事业所做出突出成就和贡献，在2000年两院院士大会上获得了第三届中国工程科技奖，并由李岚清副总理颁发了奖励证书。



龙驭球先生（左）在荷兰Delft大学访问讲学（1986）



龙先生与夫人黄克慧女士（1999）

三、日夜勤著述，中外设讲台

由高等教育出版社出版的《结构力学》三卷(1979)，《结构力学教程》两卷(1988)，《结构力学》(第二版)两卷(1994和1996)，《结构力学教程I》和《结构力学教程II》(2000和2001)，这些教材被林皋、吕志涛等院士誉为“经典之作”，分别获得了全国高等学校优秀教材奖(1988)，第二届普通高等学校优秀教材全国优秀奖(1992)，国家科技进步二等奖(1999)和全国普通高等学校优秀教材一等奖(2002)，龙驭球先生作为第一作者，成为全国结构力学教材迄今仅有的四项大奖的第一获奖者。这些精品著作被全国几十所大学的土木、水利、力学等专业采用作为结构力学课

程教材，二十多届大学生是学习了这些书而进入了结构工程领域。此外，这些著作还被各类科学文献他引1100多次，是当今我国最有影响的结构力学教材，也是被工程界和力学界广泛参考和引用的著作。

截止到2005年底，龙驭球教授出版著作21本。2004年出版的《新型有限元论》以“七项成果的立异、百余单元的标新、五宗疑难的破解”为主线详细总结了20余年龙先生及其课题组在有限元领域的研究成果，沈世钊院士、程耿东院士、杨卫院士等有关专家给予了很高的评价。

龙先生自1980年起受国家教委聘任，长期主持全国结构力学指导委员会工作，公认为全国结构力学学术带头人之一。受国家教委委托，制定全国结构力学指导性文件，组织八所大学研制结构力学国家级题库，1993年获高校优秀教学成果国家级二等奖。主持五届全国结构力学和弹性力学教师培训班，培训了骨干教师逾千人。在清华大学本科生教学工作中，龙先生参与完成的(第二完成人)“结构力学课程新体系的建设与实践”荣获了2001年国家级教学成果奖一等奖和北京市教育教学成果(高等教育)一等奖；进而“结构力学”课程又被评为2003年首届国家级精品课，在网上专家评审中获全国最高分，专家平均打分97.55分。

多次应邀在国际学术会议上作综述报告、任大会和分会主席。1984年和1986年到英国Wales大学和日本东京大学讲学，讲学内容为“泛函变换格式与含参变分原理”和“断裂力学分区混合元分析”。1986年应邀到荷兰



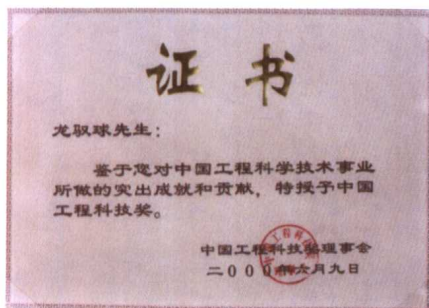
《结构力学》(第二版)
获得国家科技进步二等奖(1999)

Delft大学土木系和机械系作新型变分原理、新型有限元及其应用的系列讲座，应邀到荷兰土力学研究所和荷兰建筑结构研究所讲学。1991年应邀到香港理工大学作板壳结构广义协调元的系列讲学，并为研究生讲授“计算结构力学”和“薄壁杆理论”，用英文撰写了两本参考书。1998年应邀到香港大学讲学。

早在60年代龙先生就以讲师的身份开始培养2名副博士研究生，迄今共培养研究生31名，包括博士生18名，其中岑松获2002年全国百篇优秀博士学位论文奖，龙先生因而获全国优秀博士学位论文指导教师奖杯一座。这些研究生绝大多数都已成为学术骨干并具有高级职称，有的在学术部门担任领导职务。



李岚清副总理向龙先生颁发
“中国工程科技奖证书”（2000）



中国工程科技奖证书

四、厚重勤奋是吾师

龙驭球先生出生于湖南资水支流伊水之滨的安化梅城镇，祖父龙知德，父亲龙云轸，母亲谭富金。四五岁时，作为小学教师的祖父每天清晨携他沿伊水散步，学作对联。每当镇上知书识字的客人来家，祖父总要把孙儿新作的对联朗诵给客人听，从中得到莫大的欢乐。

他的中学和大学生活是在抗日战争和国内战争的动荡年代里度过的。在日寇逞凶的年月，作为稚嫩的中学生曾在防空洞里思考着“中国会不会亡？中国的脊梁在哪里？”的严肃问题，大学一年级就读唐山交大，由于日寇逼近，学校匆忙从贵州平越迁往四川璧山，他背着行李在黔山蜀水间跋

涉了整整一个月。大学二年级转学到西南联大，靠卖学生报和当家庭教师来支持生活。大学三四年级回到北平清华园，有生以来第一次生活在优越的学习环境里，真想之窗明几净的图书馆里尽多地享受静穆的读书气氛，但又不时被学生运动的口号声和三大战役的胜利炮声所吸引。1948年大学毕业，结束了十年颠沛清苦的学生生活，从救亡岁月中接受了“科学救国”的思想。

毕业后继续在清华作研究生，迎来了解放，迎来了明朗的天，在动荡的生活之后珍惜着每一刻学习时光。在陆士嘉教授指导和关怀下，踏进了科学研究之门，1949年发表了第一篇流体力学方面的学术论文。担任助教和讲师后，在从事结构力学教学的同时，师从张维教授研究壳体结构，协助张先生编辑《壳体结构文汇》5期，发表论文多篇。1961年开始指导研究生。在杨式德教授的鼓励和推荐下，1963年和1966年出版了《壳体结构概论》和《结构力学》两本处女著作。1978年越级由讲师晋升为教授，1981年开始指导博士研究生，1995年当选为中国工程院院士。

龙驭球先生在学术领域辛勤耕耘近六十年，取得了丰实的成果，显示出多方面的才华。他进行科研工作特点是学风严谨，锲而不舍；长于解剖问题，化整为零，化难为易；善于博采众家之长，综合创新，形成自己独特的方法。下表概括了龙先生在不同科研成果中“综合创新”方法的运用。



国家级教学成果奖

科研成果	“综合创新”方法的运用
分区、分项、分层变分原理	传统变分原理与有限元离散方法的结合
含参变分原理	势能、余能。H-R、胡-鹭津原理的综合
分区混合有限元法	位移元与应力元、常规元与奇异元的结合
广义协调有限元法	有限元法与加权残值法的结合
样条有限元法	样条函数与有限元法的结合
四边形面积坐标有限元法	面积坐标方法与四边形单元相结合
解析试函数有限元法	解析法与离散法相结合



全国百篇优秀博士学位论文
指导教师奖杯(2002)



教育部提名国家自然科学奖一等奖证书
(2003)

他的著作平实流畅，言简意深，深入浅出，于平易中见高远，深得学生的仰慕和同行的赞誉。他写的结构力学系列获奖教材，从五十年代编写讲义开始，历时四十年，数易其稿。讲法上的推敲，内容上的翻新，体系上的改革，用长夜伏案的辛劳，精益求精的执着，去换取读者学习上的高效率，去追求教材的高质量。许多读者来信都称道作者的才华，而作者的才华实际上是来源于他的勤奋。

他尊敬老师，四五十年前导师的言传身教，他总是带着感激的心情，牢记在心。张维先生八十华诞时，他在庆祝会上报告了自己在新型有限元方面所作的系统工作，并以这方面的成果当作寿桃献给老师，会上赋诗一首如下

一代宗师德望高，桃红李白竞妖娆，
书斋弟子颂华诞，有限新元作寿桃。

他爱护学生，期望学生超过自己。当他得知自己的学生晋升教授或在学术上有所建树时，总是高兴地告诉家庭成员(夫人黄克慧女士，植物保护专家；儿子龙志飞，中国矿业大学教授；儿媳杨嘉丽，北京2008年奥运