



力学课程报告论坛

2009

论文集

力学课程报告论坛组委会



高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS



力学课程报告论坛

2009

论文集

力学课程报告论坛组委会

Lixue Kecheng Baogao Luntan Lunwenji



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本论文集收录了2009年10月23—25日在西安举办的第四届力学课程报告论坛上提交的部分入选论文。论文集共收录论文92篇,其中大会报告论文2篇,分会场报告论文41篇,书面交流论文49篇。论文集对于促进各个高校的教学改革,提高教学质量将起到积极作用。

图书在版编目(CIP)数据

力学课程报告论坛论文集. 2009/力学课程报告论坛
组委会组编. —北京:高等教育出版社, 2010. 8

ISBN 978 - 7 - 04 - 029241 - 1

I. ①力… II. ①力… III. ①力学 - 教学研究 -
高等学校 - 文集 IV. ①O3 - 42

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 124243 号

策划编辑 孙成奇
版式设计 马敬茹

责任编辑 孙成奇
责任校对 俞声佳

封面设计 张 志
责任印制 尤 静

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120

购书热线 010 - 58581118
咨询电话 400 - 810 - 0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京铭成印刷有限公司

网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

开 本 850 × 1 168 1/16
印 张 21.25
字 数 600 000

版 次 2010年8月第1版
印 次 2010年8月第1次印刷
定 价 56.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 29241 - 00

前 言

第四届力学课程报告论坛于2009年10月23—25日在西安交通大学举办。全国高等学校教学研究中心常务副主任杨祥，论坛组委会副主任、教育部高等学校力学教学指导委员会副主任、上海交通大学洪嘉振教授和北京大学苏先樾教授，论坛组委会副主任、力学基础课程教学指导分委员会副主任、上海大学副校长叶志明教授和浙江大学副校长张士乔教授，西安交通大学副校长卢天健教授，美国工程院院士、哈佛大学锁志刚教授，西安交通大学俞茂宏教授，中国科学技术大学尹协振教授，以及来自200所高校的300多位专家、学者和一线教师出席了本届论坛。

本届论坛以“面向创新人才培养的力学课程建设”为主题，采用大会报告、分组研讨、书面论文展示等交流形式。俞茂宏、尹协振、锁志刚三位教授以不同的视角和体会为与会代表奉上精彩的大会报告：俞茂宏教授以自己多年的教学经验和科研实践对基础力学教材和教学的创新两个方面谈了自己的看法和意见；尹协振教授结合中国科学技术大学实验力学的发展、改革和具体实践，对实验力学课程教学和改革提出了具体的意见和建议；锁志刚教授则以自己几十年在美国大学的经历和体会，从课程设置、人才培养等方面对中美两国力学教育体系进行了对比和分析。围绕课程，三个不同视角的报告引起了与会代表的广泛讨论和深入思考。

本届论坛以课程建设为切入点，面向广大高校教师征集论文。收到各类交流论文120多篇。经组委会组织专家评审，遴选出分会场交流论文41篇、书面交流论文49篇。三个分会场共49个分会场报告，按理论力学、材料力学（工程力学）、结构力学、弹性力学、流体力学（水力学）、振动力学、计算力学、实验力学和力学专业建设为单元进行分组报告和讨论，内容涉及力学课程建设、创新能力培养、教学观念改革、教学方法与教学模式创新、计算机辅助教学等多个方面。

为了更好地总结论坛取得的成果，并将会议的成果介绍给全国广大高校教师，特将大会报告论文和遴选出来的论文以文集形式编辑出版，以期对广大高校教师开展教学和提高教学质量有所帮助。

此外，广大高校教师还可通过登录“中国高校力学课程网”（网址：<http://mechanics.cncourse.com>）下载论坛相关资料、了解相关会议信息和教改信息，并通过在线论坛与专家、同行及时地探讨和交流教学问题和教学经验。

最后，很多老师对论坛的举办给予了极大的关注和支持，特别是哈尔滨工业大学土木工程学院的周广春、王伟、吕大刚和李强老师，为论坛提供了很多很好的意见和建议，在此谨向所有支持和关心力学课程报告论坛的教师，为论坛的顺利举办提出宝贵意见和建议的专家、学者及相关组织，表示深深的感谢！

力学课程报告论坛组委会秘书处

2010年3月30日

目 录

大会报告

论基础力学教材和教学创新	俞茂宏 李跃明	3
实验力学教学实践中的做法和思考	尹协振	15

理论力学组

理论力学应用能力培养问题	屈本宁 杨邦成 郭 然	21
高校理论力学实验开设情况调查与教学实验设计	傅芳芳 盛惠琴 陆 韬	25
关于新版理论力学课程教学基本要求	陈立群	28
MATLAB 在理论力学中的应用	李 彤 李银山	31
普通高校机械类专业理论力学教学改革的探索	宋秋红 袁军亭 兰雅梅等	35
力学课程的计算机助学尝试	薛 纭 罗剑平 米红林等	38
理论力学中两个问题的讨论	梅凤翔 尚 玫	41
关于航天类专业理论力学课程标准制订的思考	黄海兵 张 翼 李海阳	45
理论力学中的旋量概念	刘延柱	48
机电实验班 48 学时理论力学教学体会	李剑敏 俞亚新 周 迅等	51
应用型工科大学理论力学教学方法的探讨	刘立厚 潘 颖 曹丽杰	55
理论力学试题库系统的设计与实现	罗亚中 张 翼	59
MATLAB 在理论力学教学中的应用	李校兵 杨 芳 王 军	63
从源头改起——大刀阔斧改革理论力学教材的探索	邱支振 谢能刚 王 彪等	66
少学时理论力学课程的教学设计	赵宝生 吴寒客 于 新等	69
对理论力学习题课教学法的探讨	陈 玲 张宏文	72
关于“三力平衡定理条件的证明”	王 斌 刘 杉 凌 伟	74
关于理论力学教学的思考	丁 科 唐小弟 陈自力	77
关于一个相对运动问题的讨论	陈 平	81
基础力学课程课后辅导的探索与实践	杨静宁 宋 曦 赵永刚	83
理论力学教学的几点建议	张代全 李 朗	87
理论力学教学中的教学改革模式探讨	兰姣霞	90
突出学生创新能力培养, 提高理论力学课堂教学质量	叶红玲 刘赵森 李晓阳	93
土建类独立学院理论力学教学改革研究	梁丽杰 常伏德 李文华	97
拔尖人才培养中贯彻钱学森教育思想在基础力学教学中的探索与实践	凌 伟 赵 挺 文 毅等	100
基础力学作业改革的初步探索	赵国华 舒庆琏	103
研究性教学方法的剖析与实践	陈玲莉	106

材料力学（工程力学）组

教学研究型大学材料力学课程教学模式的探索与实践	罗迎社 余 敏 殷水平等	111
概率统计与基础力学——随机基础力学探索	庄表中 王惠明 李振华	114

应用型本科院校材料力学课程研究型教学的几点实践	张田梅 高 春 王志伟	119
基于网络教学的材料力学课程改革	蒋 明 陈留凤 陈旭元	122
面向军校学员的工程力学改革探讨	杨晓蓉 蔺金太 梁忠雨等	126
海渔专业工程力学双语教学的实践与思考	袁军亭 宋秋红 兰雅梅	129
研究与工程能力并重的材料力学双语教学	陈永进 许 尉 杨邦成等	132
关于工程力学课程教学改革的几点思考	伍晓红 刘 睫 张亚红	135
网上作业系统中学习纪律的监控	龚 晖 王 建	138
高等有限元与工程力学教学互补强化教学效果	白瑞祥 杨春秋 张洪武	142
工程力学精品课程建设的问题与解决措施	李冬霞 王锦燕 海 然	145
材料力学研究型教学的探索与实践——Maple 材料力学	李银山 李 彤 李欣业等	148
基于工程实践问题的材料力学教学改革	张 昭 杨春秋 张洪武	152
精品课程建设是培养创新人才的基本保障	孟广伟 聂毓琴 朱伟民等	155
材料力学双语教学的探索与实践	米红林 薛 纭	158
材料力学课程教学和考试改革的探索与实践	龙卫国	161
工程力学课程新型教学法的探索与实践	王 瑾	164
航空院校工程力学教学改革探讨	杨兆海 蒋晓明	167
浅谈工程力学例题讲解及考试改革	张 力 郑冬黎 尹长城	170
一个材料力学学习题的几种解法	李 彤 何录武 项四通等	173
关于工程力学学习题课的教学探讨	刘立健 张镔于 兰姣霞等	175
力学课堂教学中要善于运用生活素材	褚瑞花	178
影响工程力学课堂效果的心理因素分析	王 静 蔺金太 杨晓蓉	180
转变观念 培养学生的创新精神	张镔于 刘立健 王艳红等	183
关于精品课建设的思考与探讨	沈晓阳 王 平	186
材料力学授课中的学习兴趣激发方法初探	王 博	189
工科力学的教学与课外科技活动实践	尚新春 肖久梅 马文江等	192
基础力学课程教学方法的探讨	杨在林 杨 勇	196
教与学的理解和体会	李 强	199

结构力学组

发现式学习与研究性学习——结构力学教学方法应用探索	朱怀亮	205
结构力学课程中虚功原理的教学实践	赵荣国 张 平 张俊彦等	209
结构力学中的基本结构	罗 健 戚承志	213
结构力学教学中启发学生思维, 提高分析能力的体会	张长平	216
关于结构力学的叠加原理	戚承志 罗 健	219
凝练知识, 深入实质——定性结构力学教学目标思考之一	袁海庆	223
提升境界, 走近工程——定性结构力学教学目标思考之二	袁海庆	226
提高结构力学课程教学效果的探索	孙 云	229
结构力学课程开展课外研究性学习的探索	王彦明	232
结构力学教学中的几点体会	史 姣 蔡 坤	235

弹性力学组

论弹性力学课程教学的基本要求和基本内容	王润富	239
深入理解, 讲深讲透, 提高弹性力学课程的教学质量	王润富	242

试论教材与课堂教学和自学的关系	王润富	245
-----------------------	-----	-----

流体力学组

对工科流体力学教学改革的一些思考	张鸣远	251
计算流体力学教学方法思考	李 朗 张代全	255

振动力学组

振动实验在教学环节中的重要作用	刘习军 张素侠 贾启芬	259
振动力学教学中深化概念的思考与实践	徐 晖	262
振动控制技术创新教学与实践	张 娟 高行山 朱西平	265

计算力学组

应用力学辛数学方法的教材与课程建设	钟万勰 高 强	271
计算力学中的可视化研究在教学中的应用	蒲军平 江爱民 吴以莉	274
浅议计算力学课程教学	李录贤 赵桂平 李跃明等	277
谈谈计算力学课程体系建设与改革——基于调查问卷的分析	王省哲 蒋一萱	280
有限元法课程教学改革与 CAE 应用人才的培养	尹长城 马 迅	283

实验力学组

分层次的理论力学实验教学体系	杨文刚 王璋奇	289
应用型本科基础力学课程实验教学的几点实践	李 威 王志伟	292
土木专业力学课程群中联合设置试验项目	杜永峰 李 慧	296
基于流变学平台的多学科交叉开放式实验室建设	陈胜铭 罗迎社 邓瑞基等	300
工科力学实验教学方法的反思与创新	黄跃平 韩晓林	303
我院力学实验室建设发展探讨	梁忠雨 孟 泉 蔺金太	307
采用激光测振仪测试材料的阻尼	张素侠 刘习军	310
对材料力学实验教学方法的思考与探索	张烈霞	313

力学专业建设组

工程力学专业建设的研究与实践	沈火明 杨翊仁 康国政	319
工程力学教学团队建设思考	王元勋 陈传尧 杨新华等	323
工程力学专业毕业设计特色研究	董羽蕙 蓝 虹 王惠民等	326

大会
报
告

论基础力学教材和教学的创新*

俞茂宏 李跃明

(西安交通大学力学实验教学国家示范中心, 西安, 710049)

摘 要: 本文简单介绍了西安交通大学材料力学近年的发展以及在教学、科研和教材建设等方面的工作, 并以强度理论为例, 讨论了在材料力学和工程力学等基础力学课程中强度理论教学和教材的创新, 同时, 阐述了双剪统一强度理论的基本模型、数学建模、理论公式、极限面形状以及国内外学者关于统一强度理论的研究、应用和评价。最后, 提出了材料力学强度理论教材改革的具体方案。

1 引言

材料力学是工科机械类、土木水利类、航空航天类、航海类、道路桥梁类和力学类等专业的最重要的技术基础课程之一。它不仅在提高学生的学习能力和分析能力方面有重要的作用, 而且是很多后续课程的基础, 对学生毕业以后的实际工作都有十分重要的意义。中国的材料力学教学学时(机械、土木类)从20世纪50年代的150~180学时(五年制)到60年代的120~144学时, 再到70年代的0学时(1966—1978大学停办), 又到80年代的120学时, 90年代的100~80学时, 现在是64或者72学时。

2 西安交通大学材料力学的发展

交通大学材料力学教研室1956年由上海迁到西安, 后来又有一批1956—1960年的大学毕业生加入, 材料力学教研室有约40人。当时交大基础部除了数学、物理和化学外, 还包括理论力学、材料力学、机械原理和机械零件教研室, 称为四大力学。1957年, 交通大学(当时全国除台湾外只有一个交通大学)以四大力学老师为基础, 创办了当时为数不多的应用力学专业, 发展到现在的工程力学、工程与结构分析及飞行器设计三个专业, 以及固体力学国家重点学科、力学一级学科博士授予点、博士后流动站, 力学实验教学国家级示范中心、强度与振动教育部重点实验室等国家级教学科研基地。1959年, 交通大学分为西安交通大学和上海交通大学两个独立的大学。

20世纪50年代和60年代的力学教学经历了院系大调整。1966年至1978年的13年, 全国大学停止招生, 所以材料力学的学时为0。

西安交通大学材料力学老师由于工作需要, 参加并完成了一批关于电力工业大型设备的强度和振动问题的研究^[1-12]。如1970年完成的西安灞桥热电厂变压器提高出力的强迫油冷却系统研制, 当时国内最大的330 V高压输电工程(刘家峡水电站到西安)中的大型电抗器振动和强度问题研究、330 V超高压绝缘子强度问题研究、大型轴承的固体流体润滑理论研究、第一台60万千瓦大型调相发电机的振

* 教育部科学技术研究重点项目 109146 (2009—2012) 和国家自然科学基金项目 40972181 (2010—2012)。

动和强度问题研究、第一台 30 万千瓦大型发电机定子的电磁振动问题研究、第一台原子能发电机定子压圈的强度分析，并建立了大型发电机隔振机座的结构模型试验室（如图 1 所示）。

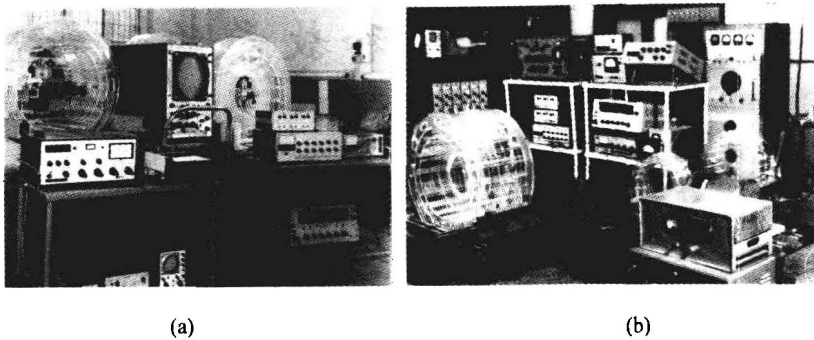


图 1 西安交通大学材料力学实验室的隔振机座结构模型试验室

1979 年 2 月，上海市经济委员会由于两台巨型发电机的激烈振动和零件疲劳断裂，组织了发电机的激烈振动消振攻关小组。这个由旋转电磁场引起的倍频振动使发电机机座产生激烈的振动和巨大的噪声，其能量犹如几十万匹马在奔跑，在现场除了超高度的噪声外，听不到其他声音。发电机和楼板都发生激烈的振动，非常令人震撼，非常危险，情况十分危急^[5,6]。

经过大量的理论和试验研究，俞茂宏提出一个新的消振方案^[2-4]，并被上海市经济委员会、上海电机厂和望亭电厂所接受。实施后，消振效果非常显著，其中 12 号机组的振动由 14 丝消减为 1 丝，技术指标达到国际大电机机座振动的先进水平^[5]。与原来的消振方案不同，新方案可以不停机就消除巨大的振动和噪声，取得了极其巨大的经济效益（当时两台机组停产一天的经济损失是 6 000 万元）。图 2 为望亭电厂的大型发电机的激烈振动消除后的照片，可以作为大型机械激烈振动减振研究取得显著效果的一个实例。图 3 为大型发电机座消振效果对比图。能够将如此巨大能量的振动和噪声消减下来，在世界上并不多见，成果获得广泛好评^[5-8]，有关论文陆续发表^[9-12]。

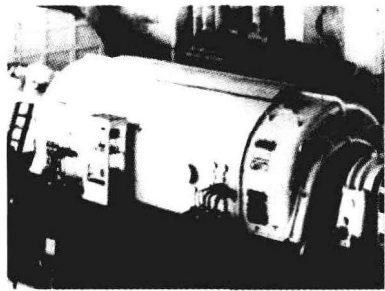


图 2 激烈电磁振动消振后的大型发电机照片

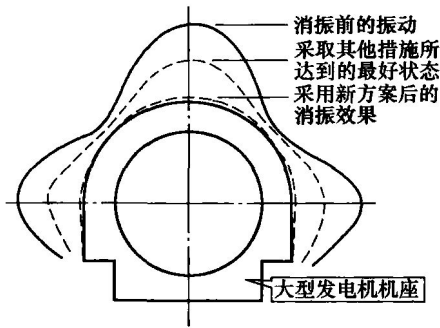


图 3 大型发电机座消振效果对比图

近年来，材料力学实验室经过 211 工程、985 工程以及教育部专项资金的支持，设备与环境得到大幅改善。实验室研发了“结构稳定性实验”等实验装置，这些装置突破传统材料力学的单一概念，显现了创新性、综合性的特点。研制的项目包括：“空气动力学实验技术”课程实验项目建设；“航天结构、材料综合力学性能测定实验”系列；“框/刚架结构优化实验”；“结构稳定性实验”等，并成为开放性实验项目。继材料力学、理论力学两个教研室组合，申请获得国家级力学实验教学示范中心建设单位的称号后，实验室建设进入数字化，已创立了结构虚拟仿真实验室，并开展了杆件数值仿真实验。

3 西安交通大学与材料力学有关的教材和学术著作

教材方面，由高等教育出版社出版的有：朱城的《材料力学》（上册）（1958）；庄懋年等的《工

程塑性力学》(1983)^[13], 是改革开放后较早出版的塑性力学参考书之一; 俞茂宏等的《材料力学》(1986), 是中学时材料力学的全国通用教材^[14], 它是在全国近 10 种中学时材料力学教材中评选出来的, 为国内很多学校的老师采用。

西安交通大学出版社出版的材料力学本科生教材。编写者先后有林毓绮、陈翰、楼志文(1986), 陆才善、蒋璐、何丽南、蔡怀崇(1989), 闵行、岳渝、凌伟(1999), 蔡怀崇, 闵行、凌伟(2004)等。此外, 还有毛祖德和张克猛的《工程力学概论》(1994), 张克猛的《机械工程基础》(2000)等, 都有材料力学的内容。

专著方面, 俞茂宏和李跃明的《强度理论研究新进展》, 反映了强度理论从单剪到双剪到统一的发展; 俞茂宏的《强度理论新体系》^[15]、《双剪理论及其应用》^[16], 屡获殊荣; 之外, 还有相关英文学术专著^[26—28]。

4 创新! 什么是新?

我们现在讲创新, 什么是新? 科学上的创新比生活中的创新有更严格的要求。

在建筑的美和理中, 德国哲学家叔本华长期致力于分析研究建筑学这门学科, 他发现: “最动人的美, 好像是最完善地表达材料的强度和荷重之间的斗争所形成的, 这是建筑学中特别重要的概念”。这些表明, 研究建筑应该特别重视对结构力学的研究和发挥材料的强度。可见, 即使在发达国家, 对建筑的经济性也是十分重视的。

世界著名建筑家奈尔维(Nervi P L)在哈佛大学演讲时说: “一个结构物, 不论其大小, 都必须坚固和耐久, 并满足这一建筑物的功能要求, 同时还必须以最少的代价获得最大的效果。坚固、耐久、功能以及用最少的代价获得最大的效果——或用现代术语来说, 即经济效率——这些条件在从小小泥屋到岿然大厦的所有建筑中都能在一定程度上找到”。他认为: “大型建筑群的规划及其实施所得到的经济利益, 对所有的国家, 哪怕是最富的国家, 也都有巨大的经济效果问题”。

“我认为最好的办法是——回顾结构类型从古至今的发展, 对这些结构类型予以力学上的评价, 以揭示出在所用材料和施工工艺与所得技术效果和艺术效果之间的关系。”从奈尔维的论述中可以看到, 对各种建筑结构进行力学上的评价是重要的工作。这也是我们力学老师可以和应该做的工作之一。

因此, 对于科学上新的概念、新的理论、新的方法、新的准则等的新, 不但是指世界上以前所没有的, 并且应该比原来的更好。这些可以归纳为创新三要素: (1) 从未有过的; (2) 比原来的更好; (3) 能够实施, 便于应用。清华大学沈珠江院士指出^[17,18], 有的“新”东西, 实际上不是改进, 而是改退。有的所谓“修正”, 往往不是修正, 而是修偏。

5 创新的最高境界——美

古今中外关于科学美有很多论述, 如: “判天地之美, 析万物之理”(庄子); “数学家找寻美的境界, 讲求简单的定律, 解决实际问题”(丘成桐)等。

科学美的基本要素。创新的更高的要求则是美的要求。基础力学课程的创新要求更大的努力和更深入的研究。科学研究的“美”不是抽象的, 而有具体的要求, 即科学美的基本要素, 它们是: 清晰性、简约性、统一性、自然性、和谐性、对称性和类比性。

强度理论的美的研究。2004年, 在世界历史文化名城克拉科夫召开了塑性和强度理论国际会议, 以纪念Huber-Mises准则100周年。俞茂宏应邀作大会特邀闭幕报告: “On the Beauty of Strength Theories”, 报告中对强度理论的美作了探讨。在此之前, 2001年在澳大利亚的计算力学国际会议上, 新加

坡教授第一次提出了“统一强度理论的美”的概念。

科学美的进一步要求。“美”的应用：可用性；“美”的普适：从一个学科扩展到更多学科，如从力学到土木、机械、航空、军工、水利等多种学科；“美”的空间：从一个地域（国家）发展到更多的地域（国家）；“美”的时间：美的时间性，“美到秋天依然美”；“美”的评价：他评。

6 强度理论研究的意义

强度是各种地上、地下、水上、水下、空中和上天结构的最基本要求。在载荷作用下，各种结构的各个部位的材料都将受到各种不同的应力的作用，如图 4 所示。这种应力一般都是复杂应力，可以归纳为单元体在主应力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 作用下的三维空间应力状态。二维平面应力状态材料和单向应力状态是它的特例。在复杂应力作用下的屈服和破坏规律就是强度理论所要研究的一个普遍性问题。

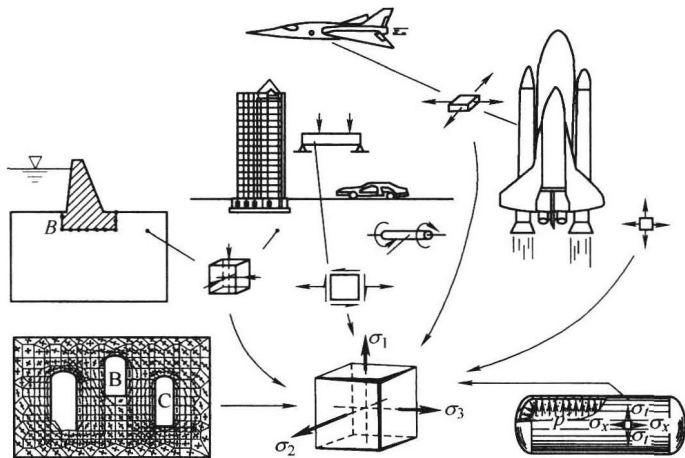


图 4 复杂应力状态的普遍性

强度理论研究材料在复合应力作用下的屈服和破坏的规律，并为工程结构的分析提供理论基础和计算准则，在理论上和工程实际中都具有重要的意义。强度理论具有普遍性，在很多学科的教学中得到应用：例如材料力学、工程力学、弹塑性力学、塑性力学、机械零件、土力学、岩石力学、混凝土力学、岩土塑性力学、高等土力学、结构塑性分析、金属压力加工、塑性成型原理、非线性有限元、计算塑性力学、混凝土结构非线性分析、岩土工程数值分析、各种结构的强度设计（如船舶强度设计、汽轮机强度设计、电机强度设计、火炮强度设计等）。因此，材料力学和工程力学的创新教学，强度理论内容的掌握，不仅对学生掌握材料力学的基础理论有重要作用，而且对学好相关的后续课程以及在工程实际中的应用也有积极的意义。

7 统一强度理论的形成（1961—1990）

7.1 统一强度理论的力学模型

广义双剪强度理论是 1985 年提出的^[19]；统一强度理论是 1991 年提出的^[20]。双剪统一强度理论的力学模型、数学建模方法、数学表达式、一系列有序变化的极限面和极限线，都是以前所没有的，也就是说国际创新的，或者说是原始创新的理论^[19—23]。图 5 是双剪统一强度理论的力学模型。图中显示了单元体从主应力单元体到单剪单元体到双剪单元体的发展。双剪统一强度理论的应力状态，也

可以不从双剪单元体模型得出，而从材料力学中大家熟识的应力圆中得出（图6）。

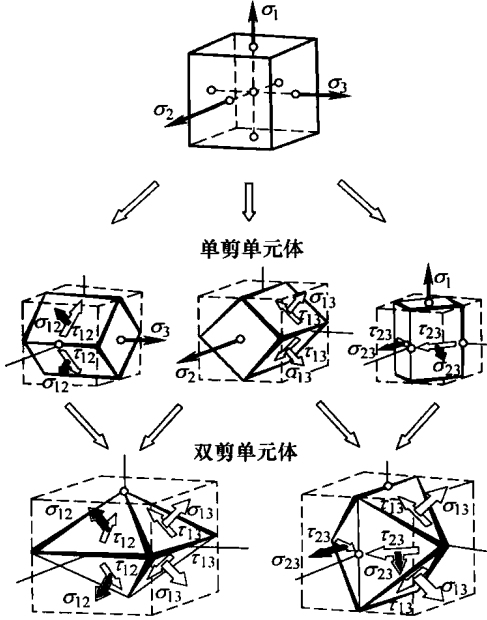


图5 双剪统一强度理论的力学模型

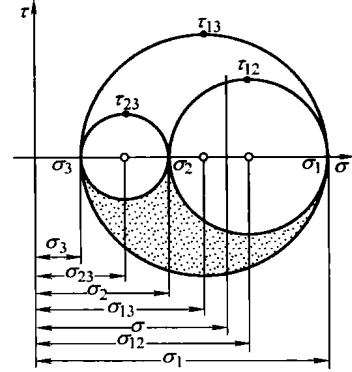


图6 应力圆和相关点的应力状态

τ_{13} , τ_{12} , τ_{23} 和 σ_{13} , σ_{12} , σ_{23} 为三个主剪应力以及作用在三个主剪应力面上的三个正应力，如图5和图6所示。但是，三个主剪应力中只有两个独立量，因为最大主剪应力的数值恒等于另两个剪应力的和，即 $\tau_{13} = \tau_{12} + \tau_{23}$ 。

7.2 统一强度理论的数学建模

考虑图5双剪单元体的所有应力以及它们对材料破坏的不同贡献，并且尽可能减少材料参数的数量，统一强度理论的数学建模方程为

$$F = \tau_{13} + b\tau_{12} + \beta(\sigma_{13} + b\sigma_{12}) = C, \text{ 当 } \tau_{12} + \beta\sigma_{12} \geq \tau_{23} + \beta\sigma_{23} \text{ 时} \quad (1a)$$

$$F = \tau_{13} + b\tau_{23} + \beta(\sigma_{13} + b\sigma_{23}) = C, \text{ 当 } \tau_{12} + \beta\sigma_{12} \leq \tau_{23} + \beta\sigma_{23} \text{ 时} \quad (1b)$$

式中 β 和 C 为材料常数，由实验确定。

7.3 统一强度理论中常数的实验确定

统一强度理论数学建模公式中的材料常数 β 和 C 可以由拉伸和压缩条件实验确定，即

$$\sigma_1 = \sigma_{\text{拉}}, \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (2)$$

$$\sigma_1 = \sigma_2 = 0, \sigma_3 = -\sigma_{\text{压}} \quad (3)$$

将主剪应力公式和式(2)代入统一强度理论的数学建模公式(1a)；主剪应力公式和式(3)代入统一强度理论的数学建模公式(1b)，可联立求得统一强度理论的数学建模公式中的常数为

$$\beta = \frac{\sigma_{\text{压}} - \sigma_{\text{拉}}}{\sigma_{\text{压}} + \sigma_{\text{拉}}} = \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha}, C = \frac{2\sigma_{\text{压}} \sigma_{\text{拉}}}{\sigma_{\text{压}} + \sigma_{\text{拉}}} = \frac{2\sigma_{\text{拉}}}{1 + \alpha} \quad (4)$$

7.4 统一强度理论的数学表达式

将主剪应力公式和式(4)代入统一强度理论的数学建模公式，即可得统一强度理论的表达式为

$$F = \sigma_1 - \frac{\alpha}{1+b} (b\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_{\text{拉}}, \text{ 当 } \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \text{ 时} \quad (5a)$$

$$F' = \frac{1}{1+b} (\sigma_1 + b\sigma_2) - \alpha\sigma_3 = \sigma_t, \text{ 当 } \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \text{ 时} \quad (5b)$$

式中 $\alpha = \sigma_t / \sigma_c$ 为材料的拉压强度比, b 为统一强度理论中引进的破坏准则选择参数, 它也是反映中间主剪应力及相应面上的正应力对材料破坏影响程度的参数。

对于拉压同性材料, 统一强度理论退化为统一屈服准则, 可以直接应用于拉压同性材料。统一屈服准则公式为

$$F = \sigma_1 - \frac{1}{2}(b\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_t, \text{ 当 } \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1 + \alpha} \text{ 时} \quad (6a)$$

$$F' = \frac{1}{1+b}(\sigma_1 + b\sigma_2) - \sigma_3 = \sigma_t, \text{ 当 } \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1 + \alpha} \text{ 时} \quad (6b)$$

统一强度理论和统一屈服准则的数学表达式十分简单, 但是它需要两个表达式和一个判别式, 这也是它与众不同的一个特点。统一强度理论是经过 1961 年的双剪屈服准则到 1985 年的广义双剪强度理论, 再到 1991 年的统一强度理论的发展过程。研究工作前后历经 30 年, 效率不高。但令人感兴趣的是, 它们从不同的数学建模方程出发, 得出数学方程十分相似的结果, 以十分简洁的表达式反映了不同材料的强度理论^[19-23]。

1985 年的广义双剪强度理论适合于拉压异性材料, 它的数学表达式为

$$F = \sigma_1 - \frac{\alpha}{2}(\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_{tk}, \text{ 当 } \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1 + \alpha} \text{ 时} \quad (7a)$$

$$F' = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) - \alpha\sigma_3 = \sigma_{tk}, \text{ 当 } \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1 + \alpha} \text{ 时} \quad (7b)$$

1961 年的双剪屈服准则适合于拉压同性材料, 它的数学表达式为

$$F = \sigma_1 - \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_s, \text{ 当 } \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \text{ 时} \quad (8a)$$

$$F' = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) - \sigma_3 = \sigma_s, \text{ 当 } \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \text{ 时} \quad (8b)$$

显然, 统一强度理论在 $b=0$ 时, 公式退化为

$$F = F' = \sigma_1 - \alpha\sigma_3 = \sigma_t \quad (9)$$

这就是 Mohr-Coulomb 强度理论。可见 Mohr-Coulomb 强度理论可以从统一强度理论退化得出, 它是统一强度理论的一个特例。广义双剪强度理论是统一强度理论在 $b=1$ 时的特例。各种不同的材料可以分为两大类。

(1) $\alpha=1$ (拉压同性材料): $b=0$, 第三强度理论; $b=1/2$, 第四强度理论的线性代替式; $b=1$, 双剪强度理论; $0 < b < 1$, 一系列新的屈服准则。

(2) $\alpha \neq 1$ (拉压异性材料): $b=0$, Mohr-Coulomb 强度理论; $b=1$, 广义双剪强度理论; $0 < b < 1$, 可以得出系列以前所没有的新准则。这在下节的极限面中可以清晰地看到。

7.5 统一强度理论的极限面

根据统一强度理论公式, 可以得出系列统一强度理论极限面。图 7 是统一强度理论在平面应力状态下的极限线。这些系列化的极限面也是从前所没有的。

由图 7 可以看到:

- (1) 统一强度理论的方程是线性的, 便于结构分析的应用。
- (2) 统一强度理论是一系列有序变化的线性方程组合, 其极限面覆盖了域内的所有范围。
- (3) 统一强度理论将单剪强度理论和双剪强度理论作为特例而包含于其中。
- (4) 它包含了单剪和双剪两个上下限, 可以适应于从下限到上限的众多不同的材料。
- (5) 它可以比传统的单剪理论更好地发挥材料的强度潜力, 它的工程应用可以更好地发挥土体结构的强度潜力并取得显著的经济效益。

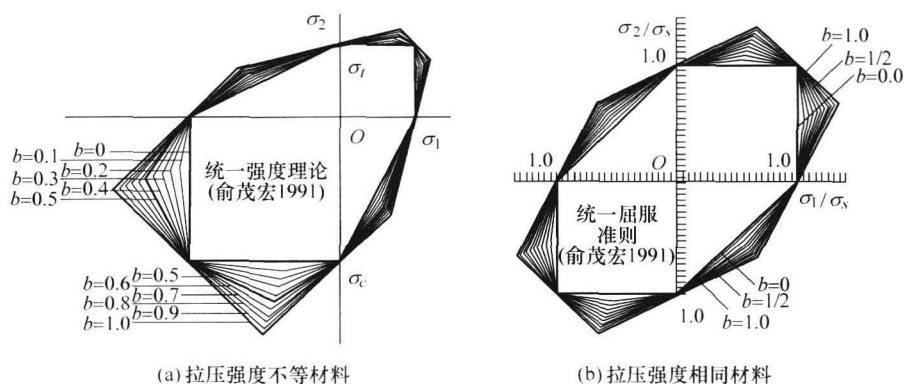


图 7 统一强度理论的极限面（平面应力）

(6) 它的交线具有角点，其奇异性可以用很简单的方法得到解决。此外，统一强度理论的发展是缓慢的，但是它的发展是自然的；它与其他强度理论是和谐的，它并不与其他理论对立，而是将它们作为特例或线性逼近而包容于其中。

统一强度理论具有数学公式简单、概念清晰、理论统一、发展自然、与其他强度理论和谐、模型和极限面对称以及可类比等科学美的特点。

统一强度理论与实验结果的对比：材料在复杂应力的极限面有很多研究。实验得出的极限面一般都大于 Mohr-Coulomb 强度理论的极限面，而在内边界的 Mohr-Coulomb 强度理论与外边界的广义双剪强度理论之间。因此，采用 Mohr-Coulomb 理论也导致结构的极限承载力的计算公式小于工程结构的实际承载力，造成计算的误差和工程的不必要耗费。强度理论的发展，以及统一强度理论的系统内容 and 应用分别总结在 1992 年出版的中文书^[15]和 2004 年出版的英文书^[23]。

8 统一强度理论的应用及其经济意义

材料力学教学的一个中心思想是在保证结构安全的条件下，达到最大可能的经济性，也就是用同样的材料制造更多的结构。统一强度理论的产生和发展为我们发挥材料强度提供了一个新的合理的理论基础。

受内压作用的薄壁压力容器和汽车主传动轴的强度计算是材料力学中大家熟知的最常用的简单实例。统一强度理论可以非常简单地应用于它们的强度校核和强度设计。下面我们以薄壁压力容器和承受扭转的汽车的主传动轴为例，进行具体说明。

8.1 薄壁压力容器的强度设计

承受内压 p 的薄壁压力容器，圆筒直径为 $D = 200 \text{ cm}$ （图 8），低碳钢材料的屈服极限 $\sigma_s = 200 \text{ MPa}$ ，如取安全系数为 $n = 1.5$ ，壁厚为 10 mm ，则用不同强度理论求得的许用内压 $[p]$ 为多少？

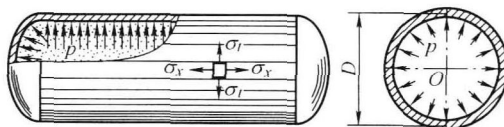


图 8 薄壁压力容器圆筒的受力状态

解：薄壁圆筒的应力分别为

$$\sigma_1 = \frac{pD}{2t}, \quad \sigma_2 = \frac{pD}{4t}, \quad \sigma_3 = 0 \quad (10)$$

统一强度理论的公式为

$$F = \sigma_1 - \frac{\alpha}{1+b}(b\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_t, \text{ 当 } \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \text{ 时} \quad (11a)$$

$$F' = \frac{1}{1+b}(\sigma_1 + b\sigma_2) - \alpha\sigma_3 = \sigma_t, \text{ 当 } \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \text{ 时} \quad (12b)$$

薄壁圆筒的应力条件公式 (12) 满足 $\sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \leq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha}$, 故选用统一强度理论第一式 (7a), 将式 (12) 代入式 (7a) 得

$$F = \sigma_1 - \frac{\alpha}{1+b}(b\sigma_2 + \sigma_3) = \frac{pD}{2t} - \frac{\alpha b}{1+b} \frac{pD}{4t} = \sigma_t \quad (13)$$

可得到薄壁圆筒的极限压力和容许压力分别为

$$p_e = \frac{1+b}{2+2b-\alpha b} \frac{4t}{D} \sigma_t; [p] = \frac{1+b}{2+2b-\alpha b} \frac{4t}{D} [\sigma], [\sigma] = \frac{\sigma_t}{n} \quad (14)$$

可见统一强度理论在材料力学中的应用十分简单。式中 $\alpha = \sigma_t/\sigma_c$ 为材料的拉压强度比, b 为统一强度理论中引进的破坏准则选择参数。对于不同拉压比的材料, 薄壁圆筒的极限压力与统一强度理论参数 b 的关系如图 9 所示。薄壁圆筒壁厚与统一强度理论参数 b 的关系如图 10 所示。

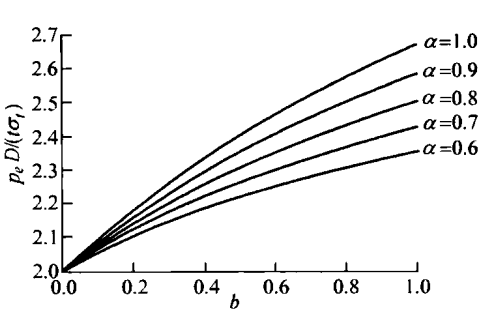


图 9 极限压力与统一强度理论参数 b 的关系

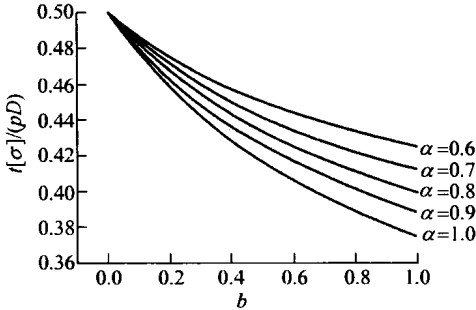


图 10 壁厚与统一强度理论参数 b 的关系

如圆筒材料为低碳钢, 则材料拉压强度比 $\alpha = 1$, 上二式可简化为

$$p_e = \frac{1+b}{2+b} \frac{4t}{D} \sigma_t, [p] = \frac{1+b}{2+b} \frac{4t}{D} [\sigma], \quad (15)$$

如圆筒直径为 $D = 200$ cm, 壁厚为 10 mm, 则可由式 (14) 求得不同强度理论得到的容许压力如表 1 所示。表中统一强度理论简称为 UST (Unified Strength Theory)。

表 1 不同强度理论得到的容许压力

强度理论	UST	Tresca	UST	UST	Mises	UST	UST	UST
统一强度理论参数 b	0		1/4	$(\sqrt{3}-1)/2$		1/2	3/4	1
容许压力 $[p]/\text{MPa}$	1.33	1.33	1.48	1.54	1.54	1.60	1.70	1.78
较第三强度理论提高压力的百分比/%	0	0	11.3	15.8	15.8	20.3	30.0	33.8

由以上结果可知:

(1) 各种强度理论的结果相差很大, b 的数值越大, 压力容器的容许压力也越大。与第三强度理论 ($b=0$) 相比, 最高 ($b=1$ 时) 许用压力可增加 33.8%。

(2) $b=0$ 的统一强度理论的结果与第三强度理论的结果完全相同, 因此第三强度理论的计算结果可由统一强度理论的特例 $b=0$ 得出。

(3) $b = (\sqrt{3}-1)/2 = 0.366$ 的统一强度理论的结果与第四强度理论的结果一致, 因此第四强度理论的计算结果可由 $b=0.366$ 的统一强度理论得出。