

东南交通青年教师

科研论丛

# 岩土工程 现代原位测试理论 与工程应用

童立元 刘 激 Binod Amatya 编著  
刘松玉 高新南 杜广印 蔡国军

TRANSPORT

MECHANISM AND APPLICATION  
OF IN-SITU TESTING TECHNIQUES  
IN GEOTECHNICAL ENGINEERING

东南大学出版社

东南交通·青年教师·科研论丛

# 岩土工程现代原位测试 理论与工程应用

童立元 刘 澍 Binod Amatya 编著  
刘松玉 高新南 杜广印 蔡国军

东南大学出版社  
·南京·

## 内 容 提 要

本书是作者们多年从事岩土工程原位测试技术研究理论与实践的总结,强调岩土工程原位测试技术的基础理论、数学力学模型以及实际工程应用,特别是大量介绍了该领域国内外的最新研究成果,全书共分4章,分别介绍基于弹塑性理论、电磁波理论及波动理论的原位测试技术,具体内容包括:现代多功能CPTU技术理论与应用、剑桥式旁压仪测试理论及应用、光纤传感技术及其在岩土工程中的应用、瞬态瑞利面波(SASW)原位测试新技术等。本书的理论阐述深入,反映了该领域国内外最新成果,同时还注重理论研究成果的实际应用介绍,在书中大量展现了各种原位测试技术的现场试验研究成果,以期对各种现代原位测试技术的推广应用有所裨益。

本书可供土木建筑、市政及交通、水利、地下工程和地质工程等专业的科技人员参考,也可作为岩土工程、地质工程、地下工程等专业的研究生教材。

## 图书在版编目(CIP)数据

岩土工程现代原位测试理论与工程应用/童立元等  
编著. —南京:东南大学出版社, 2015. 10

(东南交通青年教师科研论丛)

ISBN 978-7-5641-5982-5

I. ①岩… II. ①童… III. ①岩土工程—原位试验—研究 IV. ①TU413

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 199285 号

## 岩土工程现代原位测试理论与工程应用

编 著 童立元 刘 澍 Binod Amatya 刘松玉 高新南 杜广印 蔡国军

责任编辑 丁 丁

编辑邮箱 d. d. 00@163. com

出版发行 东南大学出版社

社 址 南京市四牌楼2号 邮编:210096

出 版 人 江建中

网 址 <http://www.seupress.com>

电子邮箱 [press@seupress.com](mailto:press@seupress.com)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 江苏凤凰数码印务有限公司

版 次 2015年10月第1版

印 次 2015年10月第1次印刷

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 19.25

字 数 470千

书 号 ISBN 978-7-5641-5982-5

定 价 68.00元

## 总 序

在东南大学交通学院的教师队伍中,40岁以下的青年教师约占40%。他们中的绝大多数拥有博士学位和海外留学经历,具有较强的创新能力和开拓精神,是承担学院教学和科研工作的主力军。

青年教师代表着学科的未来,他们的成长是保持学院可持续发展的关键。按照一般规律,人的最佳创造年龄是25岁至45岁,37岁为峰值年。青年教师正处于科研创新的黄金年龄,理应积极进取,以所学回馈社会。然而,青年人又处于事业的起步阶段,面临着工作和生活的双重压力。如何以实际行动关心青年教师的成长,让他们能够放下包袱全身心地投入到教学和科研工作中?这是值得高校管理者重视的问题。

近年来,我院陆续通过了一系列培养措施帮助加快青年人才成长。2013年成立了“东南大学交通学院青年教师发展委员会”,为青年教师搭建了专业发展、思想交流和科研合作的平台。从学院经费中拨专款设立了交通学院青年教师出版基金,以资助青年教师出版学术专著。《东南交通青年教师科研论丛》的出版正是我院人才培养措施的一个缩影。该丛书不仅凝结了我院青年教师在各自领域内的优秀成果,相信也记载着青年教师们的奋斗历程。

东南大学交通学院的发展一贯和青年教师的成长息息相关。回顾过去十五年,我院一直秉承“以学科建设为龙头,以教学科研为两翼,以队伍建设为主体”的发展思路,走出了一条“从无到有、从小到大、从弱到强”的创业之路,实现了教育部交通运输工程一级学科评估排名第一轮全国第五,第二轮全国第二,第三轮全国第一的“三级跳”。这一成绩的取得包含了几代交通人的不懈努力,更离不开青年教师的贡献。

我国社会经济的快速发展为青年人的进步提供了广阔的空间。一批又一批青年人才正在脱颖而出,成为推动社会进步的重要力量。世间万物有盛衰,人生安得常少年?希望本丛书的出版可以激励我院青年教师更乐观、自信、勤奋、执着地拼搏下去,搭上时代发展的快车,更好地实现人生的自我价值和社会价值。展望未来,随着大批优秀青年人才的不断涌现,东南大学交通学院的明天一定更加辉煌!



2014年3月16日

# 前 言

土工测试技术是土力学与岩土工程研究和应用的基础,也是论证土力学理论、优化岩土工程设计的有效手段。进入 21 世纪,随着传感器技术、计算机技术、网络通信技术等岩土工程领域的广泛应用,国际上岩土工程与环境岩土工程原位测试新技术不断涌现,在岩土工程勘测、岩土工程设计计算、岩土工程检测和监测方面发挥了巨大作用,既解决了工程实际问题,又推动了现代岩土力学飞速发展。

近十几年来,我国经济建设高速发展,高速公路、铁路、桥梁、港口码头、轨道交通及高层建筑等大型基础设施建设日新月异,工程规模与建设水平处于国际空前水平。在岩土工程领域,我国某些技术、理论领先国际(如软基处理技术、冻土处理技术等),但某些方法差距较大,特别是受限于传感器技术、制造技术、理论与应用研究等方面的缺陷,岩土工程室内外试验设备研究开发方面总体落后于英国等欧美发达国家,特别是原位测试技术与理论差距更大(20 年),一些“高精尖”岩土试验设备,主要靠从欧美国家进口,制约了我国岩土工程理论研究及工程应用水平的提高,沈珠江院士等也曾大力呼吁“21 世纪应加强原位测试研究与应用”。

“工欲善其事,必先利其‘器’”(《论语》),岩土工程问题的复杂性决定了理论研究、工程实践都离不开可靠的室内外试验设备,国内岩土工程界也逐步意识到仅仅从国外引进先进设备不利于该领域的可持续发展,因此,在过去的十几年中,国内采用“原装引进—消化吸收—再开发”的技术创新路线,在岩土工程和环境岩土工程原位测试技术方面开展了大力研究,取得了巨大进步。

本书即是在此背景下,针对目前我国原位测试技术与国际先进技术在理论研究与应用上的巨大差距及在岩土工程和环境岩土工程应用中存在的困难,系统展示了作者们近年来在原位测试理论与工程应用方面的研究成果,以供同行参考,并期望为推动岩土工程和环境岩土工程原位测试技术的进步尽一份绵薄之力。

本书在考虑各种原位测试技术的理论机理基础上进行章节安排,将本书涉及的测试技术分成三大篇:第一篇—基于弹塑性理论的现代原位测试技术,重点介绍多功能静力触探(CPTU)和剑桥式旁压仪(PMT)新技术;第二篇—基于电磁波理论的现代原位测试技术,重点介绍光纤传感新技术;第三篇—基于(弹性)波动理论的现代原位测试技术,重点介绍 SASW 测试技术。

其中,本书第1章是东南大学原位测试课题组近年来围绕CPTU原位测试新技术在基坑工程与地下工程领域应用研究成果的部分展示,反映了国家自然科学基金(40702047)、国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAJ01B02-01)、江苏省交通科技计划项目、苏州市科技计划项目—轨道交通专题(ZXJ0805、SZGDKY2013003)等资助研究的部分成果,其中南京农业大学高新南博士,东南大学杜广印副教授和蔡国军副教授,安徽理工大学王强副教授,中铁第四勘察设计院集团有限公司涂启柱高级工程师,博士研究生张明飞、车鸿博、杨溢军、李伟、郑灿政、哈斯、陈欢等参与了课题部分研究内容。在此,对原位测试研究课题组所有成员的辛勤工作致以衷心感谢!

本书第2章是英国Mott MacDonald Ltd的刘激博士在剑桥大学攻读博士学位期间,联合Cambridge Insitu Ltd进行的SPMT技术开发及理论研究成果的集中展示;本书第3章是英国剑桥大学毕业的Binod Amatya博士近年来在土木工程结构健康监测光纤新技术开发应用方面最新研究成果的展示;本书第4章还结合具体案例展示了作者们在SASW测试技术方面的应用研究成果。

本书有幸出版,得到了江苏省优势学科建设资助,还要感谢东南大学交通学院青年教师发展委员会给予青年教师专著出版的支持与帮助。本书还得到国家自然科学基金和国家“十二五”科技支撑项目等的资助。本文撰写过程中,参阅引用了东南大学刘松玉教授课题组、剑桥大学Kenichi Soga教授课题组成员公开发表的文献和资料,并得到南京大学张巍副教授等国内外专家的指教和帮助,在此一并表示衷心感谢!另外,作者们特别感谢Cambridge Insitu Ltd提供产品手册、现场图片和部分测试数据;特别感谢欧美大地有限公司提供了部分关于CPTU、光纤监测技术、SASW测试技术的研究资料。

本书第一、第二、第三作者曾经于2009—2010年度,共同在剑桥大学Geotechnical and Environmental Research Group, Kenichi Soga教授课题组学习,对本书展示的几种原位测试技术进行了共同研究,研究过程得到了Kenichi Soga教授的悉心指导,并得到了研究组内多位成员的大力帮助(Dr. Echo Ouyang, Dr. Akio Hada, Dr. Koson Janmonta, Mohammed Elshafie等),在此一并表示衷心感谢!

由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,望读者批评指正。

作者

2015年3月于南京

# 目 录

## 前言

## 第一篇 基于弹塑性理论的现代原位测试技术

<b>第 1 章 现代多功能 CPTU 技术理论与应用</b> .....	<b>3</b>
1.1 国内外研究现状 .....	3
1.1.1 静力触探技术的发展历史 .....	3
1.1.2 国内外 CPT/CPTU 技术比较 .....	6
1.1.3 国内外 CPT/CPTU 应用比较 .....	6
1.2 CPT/CPTU 测试机理分析 .....	7
1.2.1 理论分析 .....	8
1.2.2 数值分析方法 .....	24
1.2.3 室内模型试验 .....	24
1.2.4 比较和评价 .....	27
1.3 CPT/CPTU 在土性参数确定中的应用 .....	28
1.4 CPT/CPTU 在岩土工程实践中的应用 .....	31
1.4.1 土分层与分类 .....	31
1.4.2 CPT/CPTU 在岩土工程设计中的应用 .....	33
1.5 CPTU 在基坑与地下工程中的应用研究 .....	34
1.5.1 试验概况 .....	34
1.5.2 精细化分层与薄(夹)层的探测识别 .....	39
1.5.3 基坑工程设计中抗剪强度参数确定方法 .....	49
1.5.4 基坑工程设计中变形参数确定研究 .....	57
1.5.5 基于 CPTU 的基坑工程渗透系数确定方法试验研究 .....	60
1.5.6 深基坑工程静止土压力系数原位测试研究 .....	79
1.5.7 土体小应变条件下特性及基坑围护结构变形分析 .....	87
参考文献 .....	103
<b>第 2 章 剑桥式旁压仪测试理论及应用</b> .....	<b>109</b>
2.1 旁压仪发展简介 .....	109
2.1.1 旁压仪及旁压测试简介 .....	109
2.1.2 旁压测试特点 .....	110

2.1.3	旁压仪分类 .....	111
2.2	旁压实验的基本过程及土的变化 .....	112
2.3	剑桥式旁压仪 .....	113
2.3.1	剑桥预钻式旁压仪 .....	113
2.3.2	剑桥自钻式旁压仪 .....	115
2.3.3	剑桥式旁压仪的典型曲线 .....	118
2.3.4	剑桥旁压仪的优势及不足 .....	120
2.3.5	预钻式和自钻式旁压仪的选择 .....	121
2.4	剑桥式旁压测试数据分析 .....	122
2.4.1	基本概念及定义 .....	123
2.4.2	弹性形变分析及模量推导 .....	124
2.4.3	土体剪应力推导 .....	126
2.4.4	弹塑性分析及土体剪切强度推导 .....	128
2.4.5	土体的非线性 .....	130
2.4.6	土体非线性的常数推导 .....	132
2.4.7	土体初始侧压力( $\sigma_{h0}$ ) .....	133
2.4.8	砂土的摩擦角( $\varphi$ )和膨胀角( $\psi$ ) .....	140
2.5	旁压测试分析实例 .....	145
2.5.1	数据初步处理 .....	145
2.5.2	粘土测试 .....	147
2.5.3	砂土测试 .....	152
2.6	土体的非线性特征对工程设计的影响 .....	155
2.6.1	土体的非线性 .....	156
2.6.2	地表沉降及隧道衬砌的受力分析 .....	157
2.7	自钻式旁压仪在不排水土体中的钻进扰动 .....	162
2.7.1	应变路径法 .....	162
2.7.2	高级剑桥模型(Advance Cambridge Model) .....	163
2.7.3	钻进扰动和旁压测试的有限元分析 .....	163
2.7.4	扰动作用及旁压测试评估 .....	166
2.7.5	土体初始侧压力( $\sigma_{h0}$ ) .....	176
2.7.6	不排水剪切强度( $c_u$ ) .....	177
2.7.7	极限压力( $p_L$ ) .....	178
	参考文献 .....	178

## 第二篇 基于电磁波理论现代原位测试技术

第3章	光纤传感技术及其在岩土工程中的应用 .....	183
3.1	岩土工程光纤测试技术简介 .....	183
3.2	光纤技术基础 .....	183



3.2.1	光学基本知识 .....	183
3.2.2	光纤结构 .....	184
3.2.3	光纤传播原理 .....	185
3.2.4	常用光纤器件 .....	185
3.3	光纤传感基本原理 .....	188
3.4	光纤传感分类及其优势 .....	188
3.5	光纤传感器封装 .....	189
3.6	FBG 传感技术 .....	189
3.6.1	基本原理 .....	189
3.6.2	FBG 调制解调仪 .....	191
3.6.3	FBG 传感器 .....	192
3.6.4	岩土工程测试 FBG 应用要点 .....	192
3.6.5	岩土测试 FBG 应用 .....	192
3.7	全分布式光纤传感技术 .....	193
3.7.1	光纤的背向散射光 .....	193
3.7.2	光时域反射(OTDR)技术 .....	194
3.7.3	自激布里渊光时域反射(BOTDR)技术 .....	197
3.7.4	受激布里渊光时域反射(BOTDA)技术 .....	199
3.7.5	受激布里渊散射光频域分析(BOFDA)技术 .....	201
3.7.6	拉曼光时域反射(ROTDR)技术 .....	203
3.7.7	各种分布式光纤传感技术比较 .....	204
3.8	工程案例分析 .....	205
3.8.1	海岸边坡变形监测(UK) .....	205
3.8.2	伦敦地铁隧道衬砌监测 .....	213
3.8.3	公路路堑边坡土钉监测 .....	221
3.8.4	伦敦能源桩的现场监测试验 .....	230
	参考文献 .....	238

### 第三篇 基于(弹性)波动理论的现代原位测试技术

第 4 章	瞬态瑞利面波(SASW)原位测试新技术 .....	245
4.1	前言 .....	245
4.2	SASW 法测试原理与测试方法 .....	246
4.2.1	SASW 法测试的基本原理 .....	246
4.2.2	SASW 法测试设备与测试方法 .....	251
4.2.3	资料解释方法 .....	254
4.3	SASW 法在评价高速公路液化地基处理效果中的应用 .....	257
4.3.1	高等级公路地基液化实用评判方法 .....	257
4.3.2	液化地基强夯法加固效果 SASW 评价 .....	260

4.3.3	液化地基碎石桩法处理效果 SASW 法评价 .....	266
4.4	瑞利波速与岩土物理力学性质关系统计 .....	272
4.5	SASW 法在煤矸石路基填筑质量控制中的应用 .....	276
4.5.1	路基填压层剪切波速获取方法 .....	276
4.5.2	路堤试验方案 .....	278
4.5.3	试验成果与分析 .....	279
4.6	SASW 法在旧沥青路面冲击压实养护效果评价中的应用 .....	280
4.6.1	现场测试概况 .....	281
4.6.2	测试结果与分析 .....	281
4.7	SASW 法在路基裂缝处治效果评价中的应用研究 .....	283
4.7.1	现场测试 .....	283
4.7.2	测试结果分析 .....	283
4.8	SASW 法在建筑地基工程中的应用研究 .....	285
4.8.1	建筑场地类别 SASW 法划分 .....	285
4.8.2	地基振动特性 SASW 法研究 .....	286
4.9	SASW 法在土石混填路堤填筑质量评价中的应用 .....	291
4.9.1	现场填筑试验 .....	291
4.9.2	SASW 方法测试结果分析 .....	292
4.9.3	测试结果的比较与分析 .....	294
	参考文献 .....	296

## 第一篇

# 基于弹塑性理论的现代原位 测试技术



# 第 1 章 现代多功能 CPTU 技术理论与应用

## 1.1 国内外研究现状

静力触探技术(CPT)是土木工程原位测试的主要技术之一,具有快速便捷、不需取样、采集数据量大、干扰小及费用低廉的优点,尤其适用于在高速公路、铁路这种线性分布、延伸范围较广的工程中推广。但目前,在国内土木工程设计过程中,主要采用 20 世纪我国 60 年代的单桥和双桥静探技术,近 20 多年来发展缓慢,测试精度低,分辨率低,重复性和可靠性不高,稳定性差,功能单一,应用粗糙,严重影响了工程设计水平的提高<sup>[1-3]</sup>。

孔压静力触探(CPTU)是 20 世纪 80 年代在国际上兴起的新型原位测试技术,与我国传统的单双桥静探相比,具有理论系统、功能齐全、参数准确、精度高、稳定性好等优点<sup>[4-6]</sup>。既可以用超孔压的灵敏性准确划分土层、进行土类判别,又可求取土的原位固结系数、渗透系数、动力参数、结构参数、承载特性等,在国外土木工程设计中已得到广泛应用,在国内土木工程领域则应用较少。

### 1.1.1 静力触探技术的发展历史

如表 1.1 所示,从 1932 年始,国际上 CPT 技术经历了机械式→电测式→电子式→数字式的发展历程,测读精度逐步得到提高,测试功能越来越多样化,特别是国际上于 20 世纪

表 1.1 CPT/CPTU 技术发展过程简表<sup>[6-8]</sup>

阶段	特征	优缺点
第一阶段 (1932—1948)	机械式 CPT	简单、方便与便宜;存在严重缺点,主要是套管与钢杆之间的摩擦、侧挠相互作用及泥土挤入等因素,大大影响了贯入阻力的测试精度;测试装置本身的测读精度及连续性,也限制了该技术的推广。(目前在中国已经淘汰使用)
第二阶段 (1948—1970)	电测式 CPT	简单;地层阻力—空心柱变形—电阻变化—电压变化—微电压测量;要求测量设备精度很高,电缆噪音对数据影响较大;目前电阻应变仪、数字式测力仪(手动记录)和自动记录仪(应用最广,可连续记录,但灵敏度不如应变仪),微机采集处理系统有应用,提高了效率,但精度不能令人满意。(目前在中国得到广泛使用)
第三阶段 (1970—1985)	电子式 CPTU	探头中的电子装置进行信息测量并传输至电缆末端的数据采集系统;采集计算机向下发送电压激励—调制—通过应变仪,信号放大后通过电缆传输至计算机,模-数转换后,显示记录。与电测式探头比较,电压在探头中经过调制与放大,然后传输,不受电缆的影响;问题是每个通道都需要独立的一套线来传输数据,这就限制了探头功能的扩展。
第四阶段 (1985—)	多功能、数字式 CPTU	数字式将上述工作在探头中进行了处理:计算机输送电压,调制后通过应变仪;探头拥有自己的模-数转换电路板和微处理器、温度补偿,在探头中收集数据后,以 ASC II 格式连续的传输到地表计算机;所有的信号都可以通过同一根线传输,减少了电缆线的冗余,允许探头有更多的测试通道,即实现了探头的多功能化,多参数测试功能。(目前在中国一些重大工程建设中得到有限应用)

80年代初成功研制了可测孔隙水压力的孔压静力触探(Piezocone Penetration Test, 英文简称 CPTU, 图 1.1)。它可以同时测量锥尖阻力、侧阻力和孔隙水压力, 为了解土的更多的工程性质及提高测试精度提供了极大的可能性和现实性。

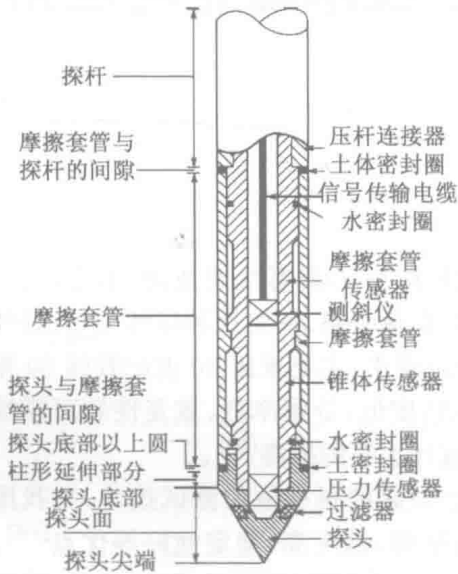


图 1.1 孔压静力触探探头结构示意图

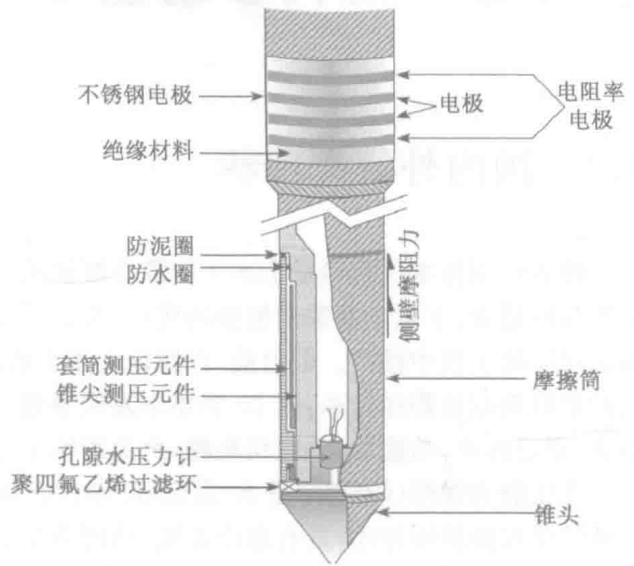


图 1.2 多功能 RCPTU 探头结构示意图

从 20 世纪 90 年代以来, 探头的研制朝着多功能化方向发展, 在新型传感器技术的支持下, 出现了许多新型的功能(表 1.2, 图 1.1—图 1.3), 如测地温、测斜、地震波孔压静力触探(SCPTu)、电阻率孔压静力触探(RCPTU)、可视化静力触探(VisCPT)、无缆静力触探等, 特别是近 20 年来, 国际上多功能孔压静力触探技术在岩土和环境岩土工程领域得到了广泛应用和进一步的发展。

表 1.2 基于 CPTU 的新型传感器一览表<sup>[9-16]</sup>

传感器名称	测量参数	应用情况	研制时间及单位
侧压力传感器(Lateral Stress)	侧向应力	尚未投入使用	美国 UCB (1990)
静探旁压仪(Cone Pressuremeter)	应力, 应变确定模量	有应用, 未成熟	Fugro (1986)
地震波传感器(Vibro CPT)	波速 $v_p$ 、 $v_s$	有应用, 基本成熟	加拿大哥伦比亚大学 (UBC, 1986)
电阻率传感器(RCPT)	电阻率	有应用	荷兰 (1985)
热传感器	热传导率	尚未投入使用	Fugro (1986)
放射性传感器	重度、含水量	有应用	Delft Geotechnics (1985)
激光荧光器传感器(LIF)	荧光强度	试验成功, 有应用	Hirshfield (1984)
可视化静力触探(VisCPT)	图像、能量、波谱	试验成功	Hryciw, R. D. (1997)
(动态)伽马射线传感器(GCPT)	$\gamma$ 射线强度	应用于环境岩土工程	ConeTec
大直径触探头	多参数功能	应用于砾石土层中	—
球形触探头、T形探头(T-bar)	多参数功能	海底极软弱土层, 研制中	Randolph(2004)

我国在上世纪 30 年代也出现了机械式的荷兰静力触探仪, 是由当时上海的外国工程师组织研制而成。1954 年, 陈宗基教授自荷兰引进该项技术, 并在黄土地区进行了试验研究。

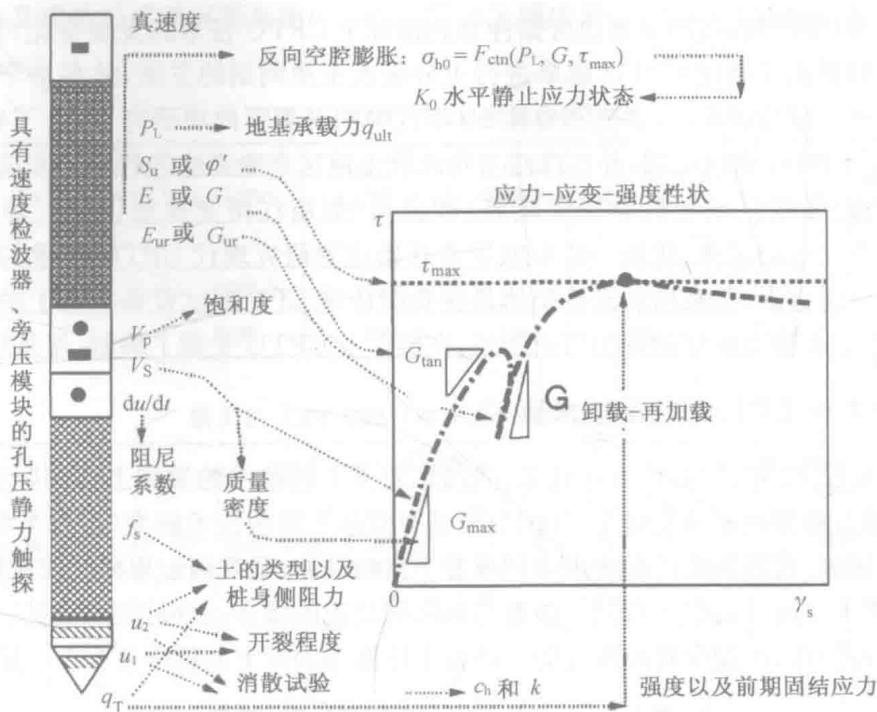


图 1.3 多功能 SPCPMT<sub>0</sub> 探头功能概念设计图<sup>[17]</sup>

1964 年,王钟琦教授<sup>[7]</sup>等独立成功地研制出我国第一台电测式触探仪,这是一种“单桥式”电测静力触探仪(图 1.4a),测定包括锥尖阻力和侧壁摩擦阻力的总贯入阻力,以后在 70 年代研制出能区分侧阻力和锥尖阻力的“双桥探头”(图 1.4b)。但在 80 年代以后对探头传感器技术改进很少。目前,我国静力触探技术虽然得到了广泛应用,但大量使用的仍然是“单桥”和“双桥”探头,而且,探头规格与国际通用的不同,给测试成果的比较和国际学术交流造成了很大的困难。另外在 CPT 理论研究、CPTU、环境 CPT 等技术方面与先进国家存在明显差距。

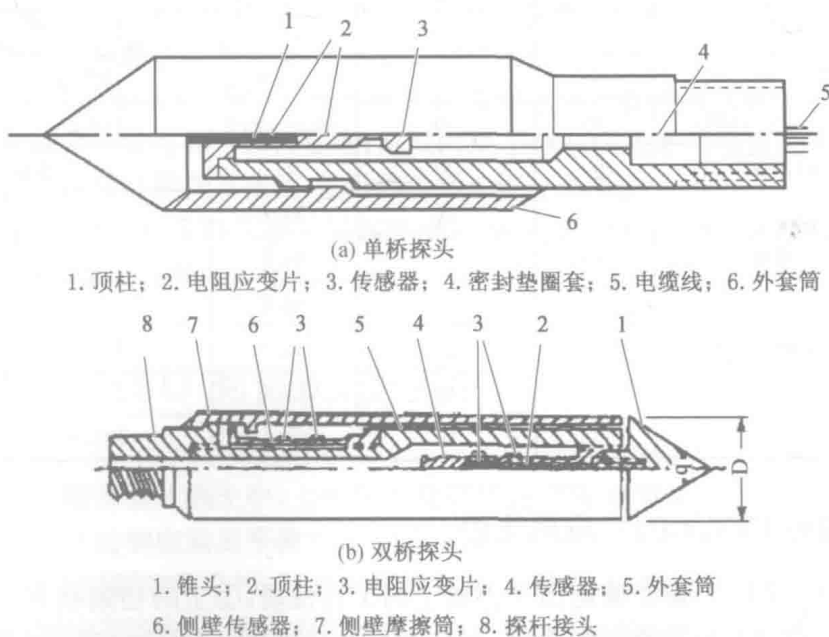


图 1.4 我国单桥和双桥 CPT 探头结构图

上世纪 90 年代初,我国学者也开始注意到国际上 CPTU 技术的发展变化,如张诚厚利用荷兰的资料提出了利用 CPTU 成果进行土分层及土质判别的方法,并在沪宁高速、同三高速宁波段进行试验研究<sup>[4]</sup>;孟高头也在 90 年代中期开展了此项研究,进行了室内模型槽试验,探讨了 CPTU 测试机理,并在珠江三角洲软土地区京珠高速进行了初步应用<sup>[5]</sup>;国内一些研究机构(如南京水利科学研究所等)和公司(如浙江南光地质仪器厂等)也仿制了 CPTU 探头<sup>[6]</sup>。总的说来,我国一些专家学者开始注意研究现代 CPTU 技术,在理论和应用上取得了一定进展,但采用的设备仍然是在我国传统 CPT 测试设备基础上的改进,未有本质变化,且单桥静力触探的使用历史较长,在推广上 CPTU 受到了限制,使其难以发展。

### 1.1.2 国内外 CPT/CPTU 技术比较

由于上世纪 60 年代初到 70 年代末,我国在岩土工程技术的发展上与国际交流相对较少,因此在静力触探技术的发展上,我国形成了与国际不同的技术标准(见表 1.3)。单桥探头是我国常用的,在我国的工程应用中积累着丰富的经验,是我国运用得比较成熟的一种探头,而该种探头在国外则很少用到。随着与国际间交流的增多,双桥探头在近二十年来在工程中也大量被使用,但我国双桥探头的一些技术标准与国际上的标准还存在一定的差异。

表 1.3 我国与国际 CPT 技术规格比较表

机构名称		规格				
		锥角 (°)	锥底截面积 (cm <sup>2</sup> )	锥底直径 (mm)	摩擦筒(侧壁) 长度(mm)	摩擦筒(侧壁) 面积(cm <sup>2</sup> )
ISSMFE(IRTP, 1989)		60	10	34.8~36	133.7	150
瑞典岩土工程协会推荐标准 (SGF1993)		60	10	35.4~36	133.7	150
挪威岩土工程协会(NGF, 1994)		60	10	34.8~36	133.7	150
ASTM(1995)		60	10	35.7	133.7	150
		60	15	43.7	164.0	225
荷兰标准(1996)		60	10	35.7~36.0	未规定,按实际面积	
法国标准(NFP94-113, 1989)		60	10	34.8~36.0	133.7	150
日本岩土工程协会(1994)		60	10	35.7	未规定	
中国	单桥	60	10	35.7	57	64
			15	43.7	70	96
			20	50.4	81	128
	双桥	60	10	35.7	178.3	200
			15	43.7	218.5	300
			20	50.4	189.5	300

### 1.1.3 国内外 CPT/CPTU 应用比较

对于工程应用来说,需要确定四个方面土的工程性质:①土的初始状态;②变形特性;③强度特性(抗剪强度);④渗流与固结。由于土的特殊性,采用原位试验方法确定设计参数



比室内试验及理论公式具有更高的可靠性。下表为国内外 CPT/CPTU 测试参数及其应用比较总结。

表 1.4 CPT/CPTU 所测参数比较

静力触探	比贯入阻力 $p_s$ (MPa)	锥尖阻力 $q_c$ (MPa)	侧摩阻力 $f_s$ (MPa)	孔压 $u$ (MPa)	电阻率 $\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )	剪切波速 $V_s$ (m/s)	测斜	温度
单桥	可测							
双桥		可测	可测					
多功能 CPTU		可测	可测	可测	可测	可测	可测	可测

表 1.5 CPT/CPTU 在岩土工程中的应用比较

静力触探	土质分类	剖面分层	岩土工程性质指标									岩土和环境岩土工程设计					
			状态参数	变形参数	强度参数	固结系数	渗透系数	孔隙水压力	静止土压力系数	超固结比	动力参数	桩基、浅基承载力	桩基浅基沉降	液化评价	地基处理评价	污染场地评价	
单桥	✓	✓	✓	✓	✓	—	—	—	—	—	—	—	✓	—	✓	✓	—
双桥	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

(注:✓ 表示可提供)

通过国内外 CPT 测试成果的工程应用对比不难发现,我国 CPT 技术的应用与国外有较大差距:

(1) 测试指标方面:我国主要用  $q_c$ 、 $f_s$ 、 $p_s$ , 而国外则已普遍采用  $B_q$ 、 $R_f$ , 即可测孔压的 CPTU 技术已经广泛使用;而且随着探头的多功能化发展,亦可提供地震剪切波速、电阻率等指标。

(2) 理论研究方面:国际 CPT 的应用建立在较完善的理论基础之上,包括 CPT 贯入机理、影响因素相关指标的选取等方面,已达到较理性的程度。

(3) 工程应用方面:国际 CPTU 测试成果在确定土体工程性质指标、岩土工程设计方面广泛应用,且成果一致性和可靠性稳定;而国内由于单双桥技术规格变化大,各地差异较大,使得工程设计应用可靠性不高,往往只作为初步设计参考。

(4) 国外的 CPTU 技术已大量应用在环境岩土工程领域,而且已运用得比较成熟,而我国在这一方面还是一片空白。

## 1.2 CPT/CPTU 测试机理分析

CPT/CPTU 锥头贯入到土中,土的变形及破坏过程非常复杂。若把贯入过程看成是准静态的,整个问题的解应满足平衡方程、几何方程(大变形)、力与位移边界条件以及土的本构关系等。由于问题的复杂性,要得到精确解非常困难,只能做一些近似理论分析。目前,主要的近似理论方法包括:承载力理论(bearing capacity theory),孔穴扩张理论(cavity