

沥青路面结构电算

蒋 鑫 邱延峻 著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内容简介

本书主要包括两大部分内容,第一部分主要是介绍基于 BISAR、KENLAYER、MICHPAVE、EverStressFE 和 3D-Move Analysis 等 5 款代表性专用软件的电算技术,首先从标准算例入手,然后针对前处理、计算求解和后处理等,阐释各软件应用的原理算法、技术细节和注意事项;第二部分主要是结合著者团队近年来所开展的工作,阐述这些软件在路面结构层次组合方案比选、路面工程课程设计中的实际应用,指出针对这些实例应用各软件的核心之处。书末以附录形式列出了美国肯塔基大学 (University of Kentucky) 的 Yang H. Huang 教授所著 *Pavement analysis and design (Second Edition)* 第 3 章“KENLAYER Computer Program”末共 14 道题的 KENLAYER 电算求解数据输入文件及扼要注释。

本书是著者团队近年来在路面结构精细化数值模拟领域研究心得的阶段性总结,可供从事沥青路面结构电算分析、计算力学软件开发等相关人员参考,亦可作为高等院校道路与铁道工程专业研究生及土木工程、道路桥梁与渡河工程专业高年级本科生教材。

图书在版编目 (C I P) 数据

沥青路面结构电算 / 蒋鑫, 邱延峻著. —成都:
西南交通大学出版社, 2022.11
ISBN 978-7-5643-8870-6

I. ①沥… II. ①蒋… ②邱… III. ①沥青路面—结构分析—应用软件 IV. ①U416.217-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2022) 第 150693 号

Liqing Lumian Jiegou Diansuan

沥青路面结构电算

蒋鑫 邱延峻 著

责任编辑 韩洪黎

封面设计 GT 工作室

出版发行 西南交通大学出版社
(四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号
西南交通大学创新大厦 21 楼)

邮政编码 610031

发行部电话 028-87600564 028-87600533

网址 <http://www.xnjdcbs.com>

印刷 四川煤田地质制图印刷厂

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印张 21.25

字数 451 千

版次 2022 年 11 月第 1 版

印次 2022 年 11 月第 1 次

书号 ISBN 978-7-5643-8870-6

定价 59.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话：028-87600562



P 前言

REFACE

行车荷载作用下沥青路面结构应力、应变、弯沉等力学响应的求解分析是路面工程的重要研究课题之一。随着电子计算机硬件与计算方法的快速发展,以及相应电算程序的纷纷涌现,人们已普遍接受、认可并采用电算技术于沥青路面结构分析之中。然而,令人遗憾的是,尽管科技期刊、学术会议上已经发表了诸多关于沥青路面结构电算分析的论文,但根据我们所能接触到的资料看,目前仍缺少一本专门地、系统地介绍电算技术,尤其是专用软件(程序)在沥青路面结构分析中应用的著作,这无疑严重阻碍了电算技术在沥青路面结构计算分析中的推广应用。

我们注意到,一方面,了解、掌握弹性层状体系理论、有限单元法等基础理论,并不意味着会正确、灵活使用各种电算程序(软件)于沥青路面结构分析之中,导致相关人员不愿、不敢、不擅运用这些优秀的程序,将其束之高阁,实为可惜;另一方面,又产生了错用、滥用电算程序的趋势,轻视各程序背后的假设、前提,粗暴地视这些高级工具为数字计算器。这些现状促使我们深思,如何将理论算法与软件应用有机融合,实现从初步入门到高级进阶,把这些由

前辈付出巨大心血所开发的电算程序（软件）切实用于实际工作当中，从而极大促进生产力发展。为此，我们结合近年来的科学研究与教学实践，着手组织构思、编撰了此书。

本书主要包括两部分内容，第一部分主要是介绍基于 BISAR、KENLAYER、MICHPAVE、EverStressFE 和 3D-Move Analysis 等 5 款代表性专用软件的沥青路面结构电算技术，即第 2~6 章，首先是借助各软件帮助文档（或经典书籍）所附原始算例，描述其使用流程，然后重点讨论软件使用中的各种细节、技巧、注意事项等；第二部分主要是结合著者团队近年来所开展的工作，阐述这些软件在路面结构层次组合方案比选、路面工程课程设计中的实际应用，并指出针

对这些实例应用各软件的核心之处，即第 7~9 章。本书还以附录形式列出了美国肯塔基大学 (University of Kentucky) 的 Yang H. Huang 教授所著 *Pavement analysis and design (Second Edition)* 第 3 章“KENLAYER Computer Program”末共 14 道习题的 KENLAYER 电算求解数据输入文件及扼要注释。

本书是著者团队近年来在路面结构精细化数值模拟领域研究心得的阶段总结。4 位硕士生参与了本书的编撰工作，他（她）们分别是：姚康（第 2 章、第 5 章）、张免（第 3 章、附录）、姜金（第 4 章）、陈戈（第 6 章）。第 7、8 章应用实例主要分别引自著者指导硕士生冯文青、博士生吴玉所开展的工作，第 9 章则为著者结合本科生课程“路面工程课程设计”，利用 KENLAYER 程序于公路新建沥青路面结构设计方面的探索。著者早年所指导毕业的硕士生曾诚、梁雪娇、高小峰、Nonde Lushinga 等亦曾为深入理解、灵活运用这些程序进行了辛勤探索。

本书具有如下特色：

(1) 主要阐述专用电算软件，这是因为大型通用软件虽然功能强大但过于庞杂，初学者往往过多纠结于有限元网格剖分、荷载施加等环节，而忽视了物理合理抽象、模型科学概化等关键之处，而专用软件短小精悍、设计巧妙，易于帮助读者迅速抓住沥青路面结构电算的核心。事实上，运用大型通用软件开

展沥青路面结构电算时必须妥善考虑这些专用软件内嵌的特色（如荷载的非均匀分布）才能获得预期效果。

(2) 选取的 5 款专用软件在研发过程中均开展过较为严格的校验，并已获学术界高度认可，分别涵盖弹性层状体系理论、轴对称有限元法、三维有限元法和三维连续有限层法，各自特色鲜明，代表性突出，在路面结构电算发展历程中占有一席之地，值得进一步深入探讨。

(3) 第一部分内容算例均源自各软件帮助文档（或经典书籍），这些文档亦提供了相应的解答。本书直接一步一步讲解这些算例，并将所获结果与上述结果校核，确保两者一致，从而充分说明本书所述分析步骤、流程正确，避免

了著者理解、应用这些程序时可能产生的主观偏差。

(4) 站在用户角度去思考，采用先叙后议的手法，讲解每个算例的分析流程后，重点结合著者使用经验、体会，讨论各电算软件的精妙之处，帮助读者实现入门到进阶的跨越；同时为了方便读者，列出了若干相关的代表性文献目录，供读者进一步深入钻研。

(5) 第二部分内容源自著者团队近年来在科研、教学中所开展的工作，主要为利用 BISAR、KENLAYER 软件分别开展路面结构层次组合方案比选、路面工程课程设计等，扼要指出了针对这些实例应用各软件的核心环节（如建模或后处理技巧、数据输入文件和结果输出文件、尚有待改进之处）。

本书主要供从事沥青路面结构电算分析、计算力学软件开发等相关人员参考，亦可作为高等院校道路与铁道工程专业研究生及土木工程、道路桥梁与渡河工程专业高年级本科生教材。著者期待本书的出版能对提高沥青路面结构电算应用技术的水平，加强沥青路面结构电算基础理论的认识深度有所裨益。作为这方面工作的率先尝试，书中定有疏漏不当之处，欢迎读者批评指正。

本书研究工作得到西南交通大学本科教育教学研究与改革项目（项目编号：2103005）、西南交通大学学位与研究生教育改革建设类项目（项目编号：YJG-2022-JD01）的支持，西南交通大学本科教育教材建设研究课题对本书出版予以资助，谨致谢意。

蒋 鑫

2022 年 8 月于西南交通大学



C 目录 CONTENTS

第 1 章	绪 论	001
1.1	沥青路面结构计算分析方法	001
1.2	我国路面结构电算技术的发展历程	005
1.3	沥青路面结构分析代表性电算软件简介	006
1.4	本书主要内容	016
第 2 章	基于弹性层状体系理论的 BISAR 软件电算技术	018
2.1	BISAR 程序简介	018
2.2	BISAR 程序入门	019
2.2.1	程序安装	019
2.2.2	算例应用	023
2.3	BISAR 程序进阶	031
2.3.1	前处理	031
2.3.2	计算求解	044
2.3.3	输出结果	046
2.3.4	程序数据管理	054

2.3.5 建议进一步阅读的文献	057
------------------------	-----

第 3 章 基于弹性层状体系理论的 KENLAYER 软件电算技术 ...058

3.1 KENLAYER 程序简介	058
-------------------------	-----

3.2 KENLAYER 程序入门	058
-------------------------	-----

3.2.1 程序安装	058
------------------	-----

3.2.2 算例应用	059
------------------	-----

3.3 KENLAYER 程序进阶	069
-------------------------	-----

3.3.1 前处理	069
-----------------	-----

3.3.2 计算求解	116
------------------	-----

3.3.3 后处理	117
-----------------	-----

3.3.4 建议进一步阅读的文献	117
------------------------	-----

第 4 章 基于轴对称非线性有限元的 MICHPAVE 软件电算技术 ..119

4.1 MICHPAVE 程序简介	119
-------------------------	-----

4.2 MICHPAVE 程序入门	119
4.2.1 程序安装	119
4.2.2 程序运行所需内存量	120
4.2.3 程序使用相关说明	120
4.2.4 算例应用	122
4.3 MICHPAVE 程序进阶	137
4.3.1 前处理	137
4.3.2 计算求解	146
4.3.3 程序结果输出	149
4.3.4 MFPDS (MICHPAVE Windows 版本) 的改进	157
4.3.5 建议进一步阅读的文献	164
第 5 章 基于三维有限元的 EverStressFE 软件电算技术	166
5.1 EverStressFE 程序简介	166
5.2 EverStressFE 程序入门	166
5.2.1 程序安装	166
5.2.2 算例应用	171
5.3 EverStressFE 程序进阶	179
5.3.1 前处理	179

5.3.2 计算求解	191
5.3.3 后处理	194
5.3.4 建议进一步阅读的文献	205

第 6 章 基于三维连续有限层法的 3D-Move Analysis 软件电算技术 206

6.1 3D-Move Analysis 程序简介	206
6.2 3D-Move Analysis 程序入门	207
6.2.1 程序安装	207
6.2.2 算例应用	210
6.3 3D-Move Analysis 程序进阶	230
6.3.1 黏弹性分析	230
6.3.2 荷载库	239
6.3.3 性能分析	248
6.3.4 计算点位	257

6.3.5 建议进一步阅读的文献	261
第 7 章 沥青路面结构力学分析典型专业软件评析	262
7.1 概 述	262
7.2 四款典型专业软件比较	262
7.2.1 模型建立	263
7.2.2 模型求解	266
7.2.3 结果输出	267
7.3 算例分析与讨论	267
7.4 一些进一步的体会	271
第 8 章 基于 BISAR 软件的沥青路面结构层次组合方案比选	272
8.1 概 述	272
8.2 计算模型建立及验证	272
8.3 主要力学响应比较与讨论	274
8.3.1 路表弯沉	274

8.3.2 面层层底拉应变	275
8.3.3 土基顶面压应变	277
8.3.4 路面结构横向剖面应力和应变分布	278
8.4 本次电算分析实施的几个核心环节	280
第 9 章 KENLAYER 软件应用于路面工程课程设计之思考	282
9.1 概 述	282
9.2 在路面工程课程设计中引入 KENLAYER 软件的缘由	282
9.3 在路面工程课程设计中应用 KENLAYER 软件的方法	285
9.3.1 算例描述	286
9.3.2 具体实施过程	286
9.4 在路面工程课程设计中应用 KENLAYER 软件的其他益处	294
9.5 算例数据文件及进一步的思考	295
附录 <i>Pavement analysis and design (Second Edition)</i> 习题 KENLAYER 数据输入文件	301
主要参考文献	327

1.1 沥青路面结构计算分析方法

作为路面分析与设计中的主要内容之一，沥青路面结构的力学计算分析至关重要。

一方面，通过计算分析，可以获得荷载作用下路面结构的力学行为，从而揭示路面受损破坏机制；另一方面，随着力学-经验设计方法的普及，准确、快速获得荷载作用下路面结构重要部位（如沥青面层底、土基顶面等）的关键力学响应（如沥青面层底的拉应变、土基顶面的竖向压应变等），可为路面结构设计中的性能预测提供必需的输入条件。

与刚性的水泥混凝土路面结构分析多同时考虑行车荷载与温度梯度不同，沥青路面结构分析多只考虑行车荷载，温度、湿度等气候环境因素多通过调整结构层材料属性得以体现，故沥青路面在行车荷载作用下的分析本质上属于附加应力分析范畴。

为获得行车荷载作用下沥青路面结构的力学响应，可采用解析推导、数值计算等方法。其中，解析推导系经合理必要的简化后，主要运用弹性力学、塑性力学、流变力学等知识，推导获得荷载作用下路面结构的力学响应。早年代表性的工作包括 Boussinesq 创立均质各向同性及弹性介质表面点荷载应力公式、Burmister 获得双层及三层弹性体系的应力及位移分析公式等。国内诸多老一辈学者亦在这方面取得了丰硕成果。

以单圆垂直均布荷载作用于均质半空间体（图 1-1）为例，该问题具有轴对称特征，最不利的应力、应变和挠度出现在圆面积中心的对称轴上，该处剪应力 $\tau_{rz} = 0$ 而法向应力 $\sigma_r = \sigma_t$ ，经解析推导后单圆荷载中心以下的应力可用式 (1-1)、式 (1-2) 计算：

$$\sigma_z = q \left[1 - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{1.5}} \right] \quad (1-1)$$

$$\sigma_r = \frac{q}{2} \left[1 + 2\mu - \frac{2(1+\mu)z}{(a^2 + z^2)^{0.5}} + \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{1.5}} \right] \quad (1-2)$$

根据式 (1-1)、式 (1-2)，如果知晓荷载圆半径 a 、荷载集度 q 及距路表的深度 z 、半空间体的泊松比 μ ，自然即可求得单圆荷载中心以下 z 深度处的应力。

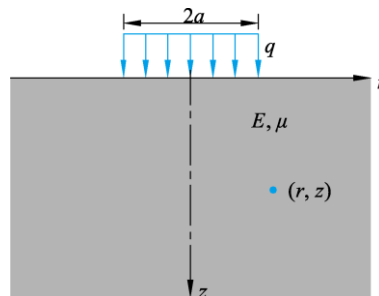


图 1-1 单圆垂直均布荷载作用下的均质半空间体

解析法（解析推导）最大的优势在于可通过解析公式，将主要影响因素（或变量）以“显式”形式明确展现，这对于工程判断具有积极意义。如从式 (1-1)、式 (1-2) 可看出， σ_z 与半空间体的弹性模量 E 和泊松比 μ 无关，而 σ_r 与半空间体的弹性模量 E 无关。事实上，开展解析推导的过程，本身就是删繁就简的过程，即抓住主要矛盾或矛盾的主要方面，撇开无关紧要的若干因素，从而获得显式呈现的解析表达式。但注意到，解析推导涉及积分变换、特殊函数等工程数学，无疑是非常困难和烦琐的，当问题复杂时往往束手无策，当某一条件稍加改变，公式即不再适用，又需要重新予以推导。

为了便于实际工程应用，人们尝试开发了各种图表供快速计算，其中图 1-2 所示常被称为诺谟图 (Nomogram)，该图可用于求解圆形荷载作用下均质半空间体的竖向应力。参考图 1-1，假设半空间体不可压缩，泊松比为 0.5，荷载作用在半径为 a 和均布压力为

q 的圆面积上，欲确定空间坐标为 (r, z) 某点的竖向应力，则可先计算求得 r/a ，依图 1-2 确定是哪条曲线，然后由 z/a 值画一水平线，获得该水平线与由 r/a 值所确定曲线的交点，再由该交点向上画一垂直线，对应求得 $(\sigma_z/q) \times 100\%$ ，自然就可得到竖向应力 σ_z 。不难看出，使用诺谟图最大的缺陷在于过多受使用者主观判断影响，误差较大。

当然也可采用类似“中学数学用表”的查表法开展路面结构计算分析，类似表 1-1 所示的三层体系的应力系数。当数值不在表中所列时，需通过插值确定。

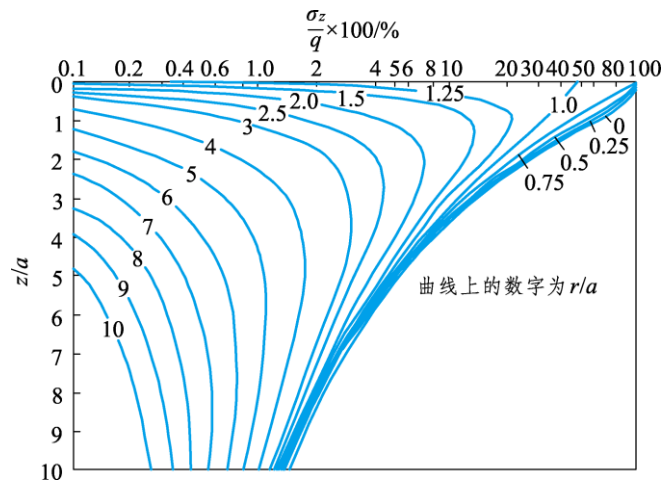


图 1-2 圆形荷载作用下的竖向应力

(注：该图引自 Yang H. Huang, 1993)

表 1-1 三层体系的应力系数

H	k ₂	A	k ₁ =2				k ₁ =20				k ₁ =200			
			ZZ1	ZZ2	(ZZ1-RR1)	(ZZ2-RR2)	ZZ1	ZZ2	(ZZ1-RR1)	(ZZ2-RR2)	ZZ1	ZZ2	(ZZ1-RR1)	(ZZ2-RR2)
0.125	2	0.1	0.429 50	0.008 96	0.706 22	0.017 16	0.145 29	0.008 10	1.811 78	0.015 42	0.034 81	0.005 49	3.022 59	0.009 69
		0.2	0.784 24	0.034 93	0.979 56	0.066 47	0.387 99	0.031 70	3.768 86	0.060 03	0.114 91	0.021 67	8.024 52	0.038 12
		0.4	0.980 44	0.126 67	0.709 70	0.235 31	0.786 51	0.116 50	5.167 17	0.216 40	0.332 18	0.082 29	17.641 75	0.142 86
		0.8	0.994 34	0.369 32	0.223 19	0.630 03	1.022 18	0.349 41	3.436 31	0.604 93	0.726 95	0.273 07	27.277 01	0.452 08
		1.6	0.993 64	0.721 13	-0.199 82	0.977 07	0.990 60	0.690 14	1.152 11	0.971 46	1.002 03	0.639 16	23.386 38	0.908 61
		3.2	0.999 22	0.961 48	-0.289 16	0.840 30	0.998 93	0.934 87	-0.068 94	0.883 58	1.008 28	0.925 60	11.870 14	0.914 69
	20	0.1	0.430 22	0.002 28	0.693 32	0.034 67	0.144 47	0.001 82	1.806 64	0.029 85	0.033 36	0.001 28	3.177 63	0.019 80
		0.2	0.784 14	0.008 99	0.920 86	0.135 41	0.384 69	0.007 16	3.745 73	0.116 97	0.109 28	0.005 09	8.660 97	0.078 27
		0.4	0.974 93	0.033 92	0.465 83	0.495 23	0.773 94	0.027 10	5.054 89	0.432 63	0.310 94	0.019 72	20.122 59	0.298 87
		0.8	0.978 06	0.113 50	-0.665 35	1.496 12	0.986 10	0.090 61	2.925 33	1.337 36	0.659 34	0.070 45	36.299 43	1.016 94
		1.6	0.969 21	0.312 63	-2.828 59	3.285 12	0.937 12	0.245 28	-1.270 93	2.992 15	0.879 31	0.209 63	49.408 57	2.643 13
		3.2	0.985 91	0.684 33	-5.279 06	5.059 52	0.963 30	0.554 90	-7.353 84	5.064 89	0.933 09	0.499 38	57.843 69	4.898 95
0.25	0.1	0.155 24	0.007 10	0.283 62	0.013 53	0.043 81	0.005 30	0.632 15	0.009 62	0.009 09	0.002 59	0.965 53	0.004 07	
	0.2	0.428 09	0.027 83	0.702 25	0.052 78	0.142 82	0.020 91	1.837 66	0.037 81	0.032 69	0.010 27	3.107 63	0.016 11	
	0.4	0.779 39	0.103 06	0.966 34	0.191 78	0.378 82	0.079 33	3.867 79	0.141 59	0.106 84	0.040 00	8.378 52	0.062 21	
	0.8	0.967 03	0.317 71	0.668 85	0.552 11	0.759 04	0.262 78	5.507 96	0.447 10	0.304 77	0.145 13	18.955 34	0.218 60	
	1.6	0.981 56	0.667 53	0.173 31	0.950 80	0.987 43	0.616 73	4.242 81	0.901 15	0.667 86	0.429 40	31.189 09	0.585 53	
	3.2	0.998 40	0.937 98	-0.056 91	0.893 90	1.000 64	0.912 58	1.974 94	0.932 54	0.984 47	0.845 45	28.985 00	0.891 91	

续表

H	k ₂	A	k _i =2						k _i =20						k _i =200													
			ZZ1	ZZ2	(ZZ1-RR1)	(ZZ2-RR2)	ZZ1	ZZ2	(ZZ1-RR1)	(ZZ2-RR2)	ZZ1	ZZ2	(ZZ1-RR1)	(ZZ2-RR2)	ZZ1	ZZ2	(ZZ1-RR1)	(ZZ2-RR2)										
0.25	20	0.1	0.154 36	0.001 79	0.257 80	0.027 28	0.042 36	0.001 23	0.650 03	0.019 30	0.007 76	0.000 65	1.087 38	0.008 61	0.2	0.424 62	0.007 06	0.671 15	0.107 10	0.137 08	0.004 88	1.906 93	0.076 23	0.027 41	0.002 57	3.594 48	0.034 21	
		0.4	0.766 47	0.026 97	0.844 62	0.399 19	0.357 16	0.018 88	4.139 76	0.290 72	0.086 34	0.010 14	10.309 23	0.133 65	0.8	0.927 57	0.092 85	0.219 51	1.265 65	0.689 47	0.067 41	6.489 48	0.985 65	0.231 37	0.038 44	26.414 42	0.491 35	
		1.6	0.913 93	0.264 54	-1.224 11	2.948 60	0.854 90	0.201 15	6.956 39	2.552 31	0.468 35	0.131 48	57.464 09	1.538 33	3.2	0.952 43	0.607 54	-3.043 20	4.898 78	0.903 25	0.486 47	6.058 54	4.762 34	0.710 83	0.373 42	99.290 34	3.609 64	
		0.1	0.043 30	0.004 65	0.082 50	0.008 78	0.011 22	0.002 59	0.179 97	0.004 40	0.002 15	0.000 94	0.266 20	0.001 28	0.2	0.153 25	0.018 36	0.283 18	0.034 54	0.041 72	0.010 28	0.647 79	0.017 44	0.008 26	0.003 73	0.987 72	0.005 09	
		0.4	0.420 77	0.069 74	0.701 19	0.129 54	0.134 80	0.039 98	1.898 17	0.067 22	0.029 46	0.014 74	3.195 80	0.019 96	0.8	0.756 83	0.232 56	0.966 81	0.411 87	0.351 75	0.144 19	4.095 92	0.234 76	0.095 08	0.056 22	8.719 73	0.074 34	
		1.6	0.934 47	0.562 98	0.707 26	0.859 30	0.702 21	0.421 06	6.220 02	0.620 46	0.271 35	0.193 58	20.157 65	0.238 38	3.2	0.988 01	0.886 55	0.338 78	0.963 53	0.974 20	0.822 56	5.418 28	0.938 31	0.623 99	0.529 12	34.252 29	0.549 31	
	0.5	20	0.1	0.041 93	0.001 17	0.080 44	0.017 78	0.009 90	0.000 63	0.198 72	0.009 11	0.001 49	0.000 23	0.318 47	0.002 57	0.2	0.148 08	0.004 64	0.275 74	0.070 27	0.036 48	0.002 51	0.722 64	0.036 20	0.005 64	0.000 94	1.195 98	0.010 25
			0.4	0.400 86	0.017 99	0.671 74	0.268 17	0.114 48	0.009 88	2.195 20	0.141 16	0.019 11	0.003 72	1.027 32	0.040 47	0.8	0.690 98	0.064 76	0.861 91	0.911 68	0.279 34	0.037 31	5.247 26	0.515 85	0.055 74	0.014 53	12.008 85	0.154 52
			1.6	0.793 38	0.198 03	0.395 88	2.383 77	0.507 90	0.126 54	10.302 12	1.593 41	0.139 46	0.053 99	32.770 28	0.538 36	3.2	0.859 40	0.492 38	-0.410 78	4.470 22	0.709 03	0.358 07	16.385 20	3.691 09	0.302 47	0.180 91	77.629 43	1.564 09

注：该表引自 Yang H. Huang, 1993。

随着电子计算机及计算方法的快速发展，人们尝试开展三层以上弹性体系力学电算，如 1967 年 Verstraeten 完成了在圆形均布垂直荷载、单向水平荷载和向心水平荷载作用下四层弹性连续体系的应力和位移计算，后陆续诞生了 BISTRO、BISAR、CIRCLY 等多层弹性体系力学计算标志性程序。1968 年，美国加州大学伯克利分校 (University of California, Berkeley) 的 J. M. Duncan、C. L. Monismith 和 E. L. Wilson 率先尝试将有限元法运用于沥青路面结构分析。

通过电算，可以准确、高效地获得行车荷载作用下路面结构的力学响应，目前电算技术已在沥青路面结构分析中得到广泛应用，在较为经典的教材类书籍当中，Rajib B. Mallick 和 Tahar El-Korchi 所著 *Pavement engineering—principles and practice* 一书的第二版^[1] (2013 年出版)、第三版^[2] (2018 年出版) 均专门开辟章节，介绍了部分用于路面结构分析的计算机程序；Ghazi G. Al-Khateeb 在其所著 *Traffic and pavement engineering* 一书中阐述了 WinJULEA 程序的实际应用^[3]；Yang H. Huang 所著 *Pavement analysis and design* 一书的第一版^[4] (1993 年出版)、第二版^[5] (2004 年出版)，则用相当大的篇幅介绍了其所研发的 KENLAYER (基于弹性层状体系理论，用于沥青路面结构分析)、KENSLABS (基于有限单元法，用于水泥混凝土路面结构分析) 两款路面结构电算程序，注意在该书第二版中这两个程序被整合命名为 KENPAVE。

另外，包括 *International Journal of Pavement Engineering*、*Road Materials and Pavement Design*、*Journal of Transportation Engineering Part B-Pavements* 和 *International*

Journal of Pavement Research and Technology 等路面工程领域国际知名学术期刊也都纷纷刊载了不少关于沥青路面结构电算方法及其应用的科技论文。

1.2 我国路面结构电算技术的发展历程

电算技术应用于我国道路路面工程，始于 20 世纪 80 年代初。1983 年，张起森编写了《道路工程有限元分析法》一书^[6]，介绍了有限元法在路面结构、路基工程、工程动力学问题和各种非线性问题中的应用，这或为国内该领域的第一本专著，书末附有垂直圆形均布荷载作用下多层路面应力分析的有限元电算程序（以四层为例）、多层路面应力非线性有限元分析的电算程序。这两个程序均按 719 机算法语言编写。

1990 年，王秉纲和邓学钧编写了《路面力学数值计算》一书^[7]，叙述了路面力学课题的解析与数值计算方法，但限于篇幅，作者未能将计算程序编入该书。

1994 年，唐勇编写了《道路工程电算——从技能到软件》一书^[8]，该书第十章介绍了柔性路面设计指标计算、柔性路面厚度设计与验算等内容。

1997 年，邓学钧、黄卫和黄晓明编写了《路面结构计算和设计电算方法》一书^[9]，介绍了沥青路面、水泥混凝土路面应力分析理论及计算机程序，沥青路面及水泥混凝土路面的设计方法和设计程序等，列出了若干利用 FORTRAN 语言编制的计算与设计程序源代码。

1998 年，齐诚和余定选翻译了 Yang H. Huang 教授所著 *Pavement analysis and design*

一书第一版，中文译本^[10]对促进著者 Yang H. Huang 所开发的 KENLAYER、KENSLABS 程序应用发挥了积极作用。

2001 年，邓学钧和黄晓明编写了《路面设计原理与方法》^[11]，书中列出了一些用于路面结构电算分析的 FORTRAN 源代码。

2003 年，夏永旭和王秉纲编写了《道路结构力学计算》(下册)^[12]，介绍了道路结构数值计算的原理和方法。

2016 年，刘俊卿编写了《路面结构数值分析方法》一书^[13]。

2016 年，王凯编写了《层状弹性体系的力学分析与计算》(第二版)^[14]，系统介绍了 BISAR 程序 2.0 版本的力学计算公式、程序结构组成、计算方法和数值计算。

2017 年，赵彬强编写了《路面结构设计及数值分析软件应用》一书^[15]，主要介绍了路面结构设计及数值分析软件，包括 BISAR、EverStressFE1.0、EverFE2.25、URPDS、ABAQUS、Origin8.0 等。需要说明的是，BISAR 并非有限元程序，同时 BISAR、EverStressFE1.0、EverFE2.25、ABAQUS 等软件并不具有路面设计功能，而是分析软件，且 Origin 主要用于数据处理、图形绘制，实则不能直接用于结构分析。

2021 年，蒋鑫、邱延峻和姚康编写了《沥青路面结构力学分析软件 KENLAYER》^[16]，蒋鑫、邱延峻和古含焱编写了《水泥混凝土路面结构力学分析软件 KENSLABS》^[17]，分别全面深入地阐述了 KENLYAER、KENSLABS 两款电算软件的运用方法、注意事项。

在通用软件方面，2008 年廖公云和黄晓明编写了《ABAQUS 有限元软件在道路工

程中的应用》(2014年该书发行第二版)^[18-19], 2016年严明星和王金昌编写了《ABAQUS有限元软件在路面结构分析中的应用》^[20], 2015年陈俊、张东和黄晓明编写了《离散元颗粒流软件(PFC)在道路工程中的应用》^[21], 这些著作都积极促进了 ABAQUS 有限元软件、PFC 离散元颗粒流软件在国内路面领域电算技术的发展。

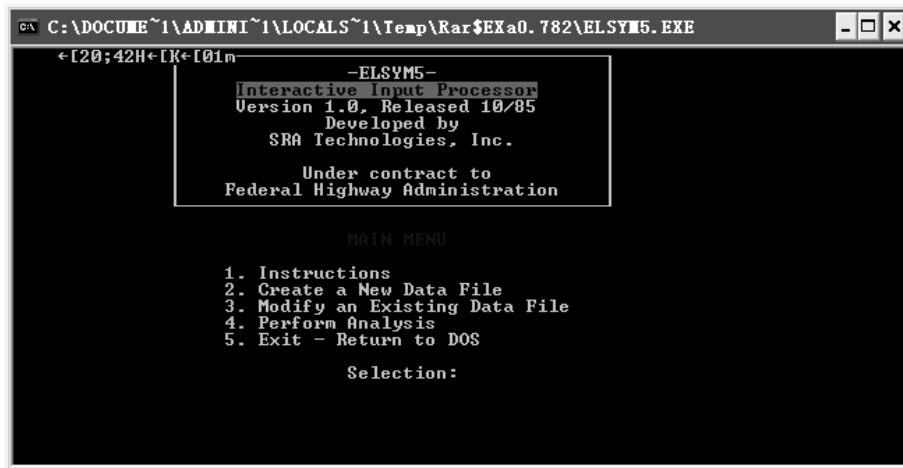
1.3 沥青路面结构分析代表性电算软件简介

目前, 沥青路面结构分析的电算方法主要包括弹性层状体系理论、有限元法及其他方法, 并纷纷涌现出一批各有特色的电算软件。下面扼要介绍一些国外代表性软件。

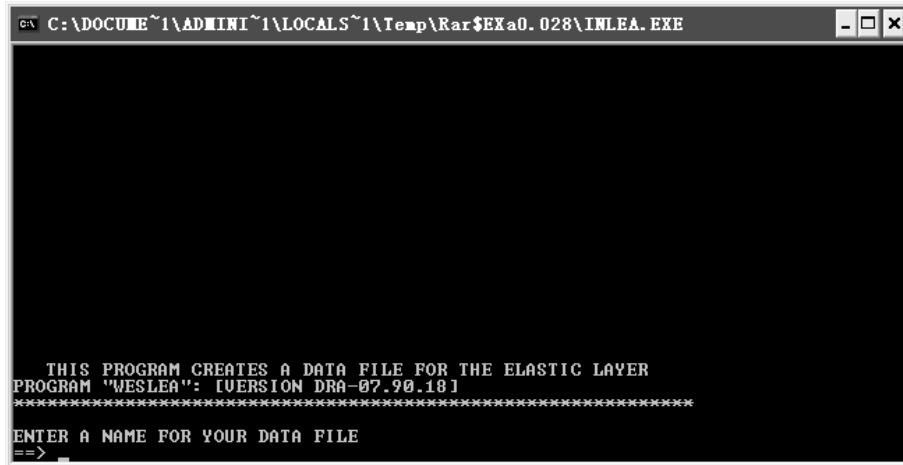
1. 在弹性层状体系理论方面

主要有 BISAR (Bitumen Stress Analysis in Roads, 荷兰 Bitumen Business Group 开发)、CIRCLY (澳大利亚 Mincad Systems Pty. Ltd. 开发)、ELSYM (美国 SRA TECHNOLOGIES, INC. 开发)、CHEVPC、JULEA、WinJULEA、GAMES (General Analysis of Multi-layered Elastic System, 日本 Tokyo Denki University 开发)、WESLEA (Waterways Experiment Station Linear Elastic Analysis)、KENLAYER (美国 University of Kentucky 开发)、EverStress (美国 Washington State Department of Transportation 开发)、Flexible Pavement System (FPS) 中内嵌的 Stress and Strain Analysis for Pavement 模块 (美国 Texas Transportation Institute 开发) 等, 这些程序的主要差异体现在可考虑的结构层层数、计算点数量、荷载 (包括是否可考虑水平荷载, 荷载圆个数、轮轴组合情况等)、结构层是否可考虑非线性、黏弹性、结构层层间结合条件等。在支持的操作系统方面, DOS、

Windows 均有。后处理方面，多为文本性质的输出，有些程序已具备较好的图形化后处理功能。图 1-3 为若干程序界面。



(a) ELSYM5



(b-1) 用于 WESLEA 数据文件创建的 INLEA.EXE