

样条无网格法

秦荣 著



科学出版社



样条无网格法

秦 荣 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍固体力学、结构力学、智能结构力学、计算力学、工程技术科学及相关交叉学科的样条无网格法及其应用,内容包括基本概念、样条函数、样条有限点法、样条加权残数法、样条边界元法、样条无网格法及其在工程线弹性分析、非线性分析、动力分析、稳定性分析、极限承载能力分析、可靠性分析、智能结构分析、电磁场分析及相关交叉学科中的应用。本书内容丰富、新颖,富有创造性,因此对促进固体力学、结构力学、计算力学、工程技术科学及交叉学科的科技进步有重大意义。

本书可供工程力学、固体力学、计算力学、土木工程、水利工程、建筑工程、抗灾工程、国防工程等专业的科技人员及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

样条无网格法/秦荣著. —北京:科学出版社,2012
ISBN 978-7-03-035806-6

I. ①样… II. ①秦… III. ①计算力学 IV. ①0302

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 246169 号

责任编辑:杨家福 / 责任校对:王万红

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年12月第一版 开本:B5(720×1000)

2012年12月第一次印刷 印张:36

字数:699 000

定价:110.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换<双青>)

销售部门电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(HA08)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

有限元法是一种网格法,为解决工程中的力学问题开创了新局面,贡献很大,但在实践中,其缺陷也日益暴露。例如,在大变形问题中,网格会发生严重的变形,计算过程中需要网格重构。网格重构不仅计算费用昂贵,而且会严重损伤计算精度。有限元法由于为网格法,不仅迭代收敛慢,甚至收敛于错误解,为复杂结构分析带来巨大困难和严重缺陷,因此国内外在研究有限元法的同时,还致力研究无网格法,出现了研究无网格法高潮,许多国际上著名的有限元法专家如 Zienriewiz、Oden 也致力于研究无网格法及加权残数法。

无网格法起源于 20 世纪 70 年代。《计算力学学报》2004 年第 2 期有一篇关于无网格法的论文指出:在国外,1977 年 Lucy 及 Ginglod 提出了光滑质点流动体动力学法,它是一种无网格法,成功地用于天体物理领域。在国内,1979 年秦荣提出了样条有限点法,它是一种样条无网格法,成功地用于工程力学及结构工程领域。1992 年以后,国内外研究无网格法的科技人员越来越多,使无网格法有很大的进展。

1980~1982 年,作者又创立了样条加权残数法、样条能量配点法、样条边界元配点法、样条伽辽金配点法、样条最小二乘配点法、样条广义伽辽金配点法、样条广义能量配点法、样条能量高斯配点法,它们都是样条无网格法。2001 年,作者在上述成果的基础上又进行发展,完善了样条无网格法,正式定名为样条无网格法。2002 年,《力学进展》第 32 卷第 4 期指出秦荣提出了样条无网格法,它可以彻底消除网格,可以保证计算精度,大大减少计算的难度。

无网格法是基于点的近似,可以彻底消除网格,抛弃了网格的初始划分及重构,不仅可以保证计算的精度,而且还会大大减少计算难度,这是近年来迅速兴起的一种很有发展前途的新方法。样条无网格法比无网格法更优越,不仅计算简便,精度高,而且克服了无网格法存在的缺陷。样条无网格法包括无网格法,无网格法是样条无网格法的特例。

1978 年以来,作者致力研究样条无网格法,获得一系列新成果,创立了样条无网格法。这些成果获广西自然科学优秀论文成果一等奖一项,省部级科技进步奖二等奖七项,全国优秀学术成果一等奖一项,同行专家鉴定认为,这些成果为国内外首创,达到国际先进水平。这些成果大多数在国内外已公开发表,被引用很多,从而在国内外学术界产生了广泛影响。

本书是在上述基础上撰写成的,是作者科研成果的总结,是一部科研成果专

著,内容包括基本概念、样条函数、样条有限点法、样条加权残数法、样条边界元法,以及样条无网格法及其在结构线弹性分析、非线性分析、动力分析、稳定性分析、极限承载能力分析、可靠性分析、智能结构分析、电磁热结构体系分析中的应用。本书内容丰富、新颖、富有创造性,因此对促进固体力学、计算力学、工程力学及结构工程的科技进步有重要意义。

本书主要介绍固体力学的样条无网格法及其应用,共二十三章。第一章主要介绍样条函数,在介绍基本概念的基础上重点介绍作者的新成果:建立新的样条基函数。第二章主要介绍变分原理,重点介绍作者的新成果。第三章主要介绍样条有限点法,这是作者创立的新方法,它是一种样条无网格法,奠定了样条半解法及样条无网格法的基础。第四章至第六章主要介绍样条加权残数法,这是作者创立的新方法,它是一种样条无网格法,奠了样条半解析法及样条无网格法的基础,奠定了创立结构动力反应分析新算法的基础。第七章主要介绍样条边界元配点法,这是作者创立的新方法,它是一种样条无网格法,奠定了创立新型边界元法的基础。第八章主要介绍建立样条无网格法的新方法,在简介基本概念的基础上重点介绍作者的新成果。

第九章至第十二章主要介绍结构线弹性分析及非线性分析的样条无网格法,在简介基本概念的基础上重点介绍作者的新成果:新的本构关系,新的变分原理,非线性样条无网格法,新模型,新算法。第十三章至第十六章主要介绍结构线性及非线性动力分析的样条无网格法,在简介基本概念的基础上重点介绍作者的新成果:新的动力变分原理,新模型,利用样条加权残数法创立结构动力及静力分析的一系列新算法。

第十七章主要介绍结构稳定性分析的样条无网法。结构稳定性包括静力稳定性及动力稳定性,在简介基本概念的基础上本章重点介绍作者的新成果:新模型,新算法。第十八章主要介绍结构极限承载能力分析的样条无网格法。结构极限承载能力包括静力极限承载能力及动力极限承载能力,它们包括线弹性及非线性,在简介基本概念的基础上重点介绍作者的新成果:建立新模型,新算法(塑性铰模型-样条无网格法,弹性调整-样条无网格法)。

第十九章主要介绍结构体系可靠度分析的样条无网格法,在简介基本概念的基础上重点介绍作者的新成果;建立新模型,新算法(极限承能力-样条无网格法,模糊功能函数-样条无网格法,等效功能函数-样条无网格法)。

第二十章至第二十二章主要介绍智能结构分析的样条无网格法,在简介基本概念的基础上重点介绍作者的新成果:智能本构关系,智能变分原理,智能广义变分原理,智能样条无网格法,新模型,新算法。

第二十三章主要介绍电磁热弹塑性体系分析的样条无网格法,在简介基本概念的基础上重点介绍作者的新成果:电磁热固体力学中的瞬时变分原理及瞬时广

义变分原理,结构与电磁场相互作用的样条无网格法。

1982年以来,上述内容对作者的硕士生及博士生先后讲授过,反映很好,已写成博士生讲义,本书是在该讲义的基础上修改及补充写成的。本书对作者以前论著的有些内容进行了修改及补充,有新进展。

1978年来,作者对结构分析研究过许多项目,这些项目分别获得国家自然科学基金项目、广西自然科学基金项目、广西科学研究与技术开发项目的资助,本书包括这些项目的许多成果,现借此机会对相关单位表示衷心的感谢!

本书获得广西大学土木建筑工程学院资助出版,特此对学院表示衷心感谢!

在本书的写作过程中,作者得到许多同行的热情关照及大力支持,作者的许多博士生和硕士生利用这些新理论、新方法编制程序,算过许多例题,分析过一些工程实例,其中研究生周小全及朱旭辉为本书做过许多有益的工作,特此对他们表示衷心感谢!

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请指正。

样条无网格法是一种有发展前途的新方法,还有许多问题需要深入研究,欢迎国内外同行及科技人员致力于这方面的研究及应用;希望作者的本科生、硕士生、博士生及博士后继续努力,共同致力于这方面的研究及应用,争取获得更大的新成果,作出更大的新贡献!

目 录

前言

第一章 基本概念	1
1.1 样条函数	1
1.1.1 B样条函数构造的方法	1
1.1.2 B样条函数的性质	2
1.1.3 B样条函数的数值方法	2
1.2 样条基函数	4
1.2.1 构造样条基函数的方法	4
1.2.2 求 $[Q]=[S]^{-1}$ 值	8
1.2.3 式(1.19)所示样条基函数的具体形式	10
1.2.4 构造样条基函数	14
1.3 样条离散化	16
1.4 非均匀分划问题	18
1.5 梁的振型函数	20
1.6 压杆稳定函数	23
1.7 板条函数	27
1.8 正交多项式	29
1.9 附录	31
1.9.1 B样条内积的积分法	31
1.9.2 几个重要矩阵	33
1.9.3 $[Q]$ 矩阵	42
参考文献	45
第二章 弹性力学变分原理	46
2.1 加权残数法	46
2.2 基本方程	47
2.3 最小势能原理	47
2.4 广义变分原理	48
2.5 广义虚功原理	51
参考文献	51

第三章 样条有限点法	52
3.1 基本原理	53
3.2 薄板样条有限点法	57
3.2.1 计算原理	57
3.2.2 计算方法	61
3.2.3 简化计算方法	65
3.2.4 解决偶联问题	67
3.2.5 利用对称条件简化计算	74
3.3 扁壳样条有限点法	75
3.3.1 扁壳的总势能泛函	75
3.3.2 基本方程	76
3.3.3 对边界条件的处理	79
3.3.4 简化计算方法	80
3.3.5 Lagrange 乘子法	81
3.4 厚板样条有限点法	83
3.4.1 基本方程	83
3.4.2 Lagrange 乘子法	85
3.4.3 计算例题	86
3.5 网架弯曲问题	87
3.5.1 正交网架结构	87
3.5.2 斜向正交网架结构	88
3.5.3 三角形网架	90
3.6 弹性力学平面问题	91
3.7 弹性力学空间问题	92
3.8 计算例题	95
参考文献	95
第四章 样条加权残数法	97
4.1 加权残数法	98
4.2 样条基函数	101
4.3 样条配点法	104
4.3.1 计算原理	104
4.3.2 双样条配点法	106
4.3.3 利用对称性简化计算	109
4.3.4 单样条配点法	109
4.3.5 计算例题及方法	113

4.4	样条 Galerkin 法	114
4.5	样条最小二乘法	115
4.5.1	最小二乘法	115
4.5.2	双样条最小二乘配点法	116
4.5.3	单样条最小二乘配点法	118
4.6	样条矩量法	120
4.6.1	样条矩量配点法	120
4.6.2	双样条矩量配点法	122
4.6.3	单样条矩量配点法	122
4.7	扁壳问题	124
4.7.1	扁壳的微分方程及边界条件	124
4.7.2	三种双样条配点法	126
4.7.3	单样条最小二乘配点法	128
4.7.4	四边简支球面扁壳的简化计算方法	131
4.8	附录	134
4.8.1	简支板的 $[A_x]$ 、 $[B_x]$ 及 $[C_x]$	134
4.8.2	固定板的 $[A_x]$ 、 $[B_x]$ 及 $[C_x]$	136
4.8.3	自由边的 $[A_x]$ 、 $[B_x]$ 及 $[C_x]$	137
4.8.4	对称情况	138
4.8.5	$[K_x]$ 及 $[K_y]$ 的形式	139
4.8.6	$[A_x]$ 、 $[B_x]$ 及 $[C_x]$ 的组合	139
4.8.7	薄板的位移函数	139
	参考文献	140
第五章	样条 Galerkin 配点法	141
5.1	广义 Galerkin 法	141
5.2	样条 Galerkin 配点法	142
5.3	双样条 Galerkin 配点法	145
5.4	单样条 Galerkin 法	147
5.5	单样条 Galerkin 配点法	149
5.6	扁壳的样条 Galerkin 配点法	153
5.6.1	扁壳的基本方程	153
5.6.2	扁壳的样条 Galerkin 配点法	155
5.7	样条广义 Galerkin 配点法	160
5.8	计算实例	160
	参考文献	163

第六章 样条能量配点法	164
6.1 变分法	164
6.1.1 Ritz 法	164
6.1.2 Lagrange 乘子法	165
6.1.3 梁的广义变分原理	169
6.1.4 板壳广义变分原理	169
6.2 基本原理	170
6.3 双样条能量配点法	173
6.4 单样条能量配点法	176
6.5 能量 Gauss 配点法	178
6.5.1 梁的能量 Gauss 配点法	178
6.5.2 薄板的能量 Gauss 配点法	179
6.6 扁壳问题	180
6.7 结语	184
6.8 附录	184
6.8.1 五次 B 样条函数 $[g_x]$ 、 $[g'_x]$ 及 $[g''_x]$ 的具体形式	184
6.8.2 三次 B 样条函数及其导数值	186
6.8.3 五次 B 样条函数及其导数值	187
6.8.4 B 样条函数积分结果	187
参考文献	187
第七章 样条边界元法	189
7.1 基本原理	191
7.2 弹性体边界积分方程	193
7.2.1 基本方程	193
7.2.2 外功互等定理	193
7.2.3 积分方程	194
7.2.4 边界积分方程	195
7.3 样条边界元法	197
7.4 无限域及对称问题	201
7.4.1 无限域问题	201
7.4.2 对称性问题	201
7.4.3 简化方法	202
7.5 开孔板壳的样条边界元法	203
7.5.1 边界积分方程	203
7.5.2 极坐标公式	204

7.5.3 基本解	205
7.5.4 样条边界元法	207
7.6 计算例题	211
参考文献	211
第八章 样条无网格法	213
8.1 径向样条基函数	214
8.1.1 3次样条基函数	214
8.1.2 5次样条基函数	216
8.2 利用样条配点法构造样条无网格法	217
8.3 利用样条最小二乘配点法构造样条无网格法	219
8.4 利用样条 Galerkin 配点法构造样条无网格法	220
8.5 利用样条能量配点法构造样条无网格法	220
8.6 利用样条有限点法构造样条无网格法	222
参考文献	222
第九章 结构弹性样条无网格法	223
9.1 拱的弹性问题	223
9.1.1 基本方程	223
9.1.2 样条无网格法	224
9.1.3 扁拱问题	226
9.2 剪力墙弹性问题	226
9.2.1 弹性平面问题	226
9.2.2 样条剪力墙模型	232
9.3 高层框架弹性问题	240
9.3.1 内力与位移的关系	241
9.3.2 位移函数	241
9.3.3 建模	242
9.4 网壳弹性问题	244
9.4.1 内力与位移的关系	244
9.4.2 位移函数	246
9.4.3 建模	247
9.5 变截面结构	247
9.5.1 分段积分	248
9.5.2 变截面弹性梁	248
9.5.3 变截面高层建筑结构	249
9.6 非规则结构	250

9.6.1	基本原理	250
9.6.2	梯形薄板	251
9.6.3	六边形薄板	253
9.6.4	三角形薄板	253
9.6.5	非规则壳体	253
9.7	开洞结构	254
9.7.1	复杂框架	254
9.7.2	开洞剪力墙	255
9.8	计算例题	256
9.9	附录	256
9.9.1	开洞结构双样条有限点法	256
9.9.2	几个重要的矩阵	258
	参考文献	267
第十章	结构材料非线性样条无网格法	268
10.1	弹塑性本构关系	268
10.1.1	单向拉伸状态	268
10.1.2	简单加载状态	269
10.1.3	复杂加载状态	272
10.1.4	应力-应变关系	272
10.2	热弹塑性应变增量理论	273
10.2.1	材料性质与温度无关的本构关系	273
10.2.2	材料性质与温度有关的本构关系	274
10.3	新的本构关系	275
10.4	弹塑性变分原理	276
10.4.1	虚功原理	276
10.4.2	弹塑性变分原理	279
10.4.3	弹塑性广义变分原理	282
10.5	结构弹塑性样条无网格法	283
10.5.1	建立弹塑性体总势能泛函	283
10.5.2	建立径向样条位移函数	283
10.5.3	建立结构弹塑性样条无网格变分方程	284
10.5.4	建立结构弹塑性样条无网格法模型	285
10.5.5	新算法	286
10.6	梁的弹塑性问题	286
10.6.1	梁的弹塑性分析的样条有限点法	286

10.6.2 塑性矩阵	294
10.7 深梁弹塑性问题	295
10.7.1 样条离散化	295
10.7.2 建立样条离散化总势能泛函	296
10.7.3 建立样条离散化刚度方程	297
10.7.4 求深梁的位移及应力	297
10.8 剪力墙弹塑性问题	297
10.8.1 样条初应力法	297
10.8.2 样条变刚度法	299
10.8.3 增量迭代法	300
10.9 计算例题	304
参考文献	305
第十一章 结构几何非线性样条无网格法	306
11.1 结构几何非线性理论	306
11.1.1 梁的小变形几何非线性理论	306
11.1.2 薄板的小变形几何非线性理论	308
11.1.3 两个重要性质	311
11.1.4 有限变形理论	311
11.1.5 两个重要性质	314
11.1.6 结构几何非线性分析的关键问题	315
11.2 结构几何非线性变分原理	315
11.2.1 几何非线性变分原理	315
11.2.2 最小势能原理	316
11.2.3 几何非线性广义变分原理	316
11.3 结构几何非线性样条无网格法	320
11.3.1 结构几何非线性样条无网格法第一种格式	320
11.3.2 结构几何非线性样条无网格法第二种格式	323
11.3.3 结构几何非线性样条无网格法第三种格式	324
11.4 梁的几何非线性问题	325
11.5 板壳几何非线性	325
11.5.1 基本理论	325
11.5.2 板壳几何非线性样条有限点法第一种格式	327
11.5.3 板壳几何非线性样条有限点法第二种格式	330
11.5.4 板壳几何非线性样条有限点法第三种格式	331
11.6 高层框架几何非线性问题	332

11.6.1	非线性几何方程	332
11.6.2	应力与应变关系	333
11.6.3	位移函数	333
11.6.4	应变函数	333
11.6.5	样条无网格法	334
11.7	网壳几何非线性问题	335
11.7.1	内力与应变的关系	336
11.7.2	非线性样条有限点法	336
11.8	计算例题	337
	参考文献	337
第十二章	结构双重非线性样条无网格法	338
12.1	大变形弹塑性本构关系	338
12.2	结构双重非线性变分原理	340
12.2.1	基本方程	340
12.2.2	有限变形弹塑性变分原理	340
12.2.3	有限变形弹塑性广义变分原理	341
12.2.4	带权参数变分原理	342
12.3	结构双重非线性样条无网格法	343
12.3.1	结构双重非线性样条无网格法第一种格式	343
12.3.2	结构双重非线性样条无网格法第二种格式	344
12.3.3	结构双重非线性样条无网格法第三种格式	345
12.4	梁的双重非线性问题	346
12.4.1	基本理论	346
12.4.2	初应力理论与几何非线性结合的格式	348
12.4.3	变刚度理论与几何非线性结合的格式	350
12.5	扁壳双重非线性问题	354
12.5.1	初应力理论与几何非线性结合的格式	354
12.5.2	变刚度理论与几何非线性结合的格式	357
12.6	高层框架双重非线性问题	361
12.6.1	初应力理论与几何非线性结合的格式	361
12.6.2	变刚度理论与几何非线性结合的格式	362
12.7	网壳双重非线性问题	364
12.8	框筒双重非线性问题	364
12.8.1	内力与应变的关系	364
12.8.2	位移函数	365

12.8.3	应变函数	367
12.8.4	建立 $[H]$ 及 $[J]$ 矩阵	368
12.8.5	内力表达式	369
12.8.6	框筒双重非线性样条有限点法	369
12.9	内筒双重非线性问题	370
12.9.1	简化方法	370
12.9.2	仿照外筒分析的方法	370
12.9.3	结构双重非线性模型	371
12.10	计算例题	371
	参考文献	372
第十三章	结构动力样条无网格法	373
13.1	动力变分原理	373
13.2	动力本构关系	373
13.3	建立动力模型	374
	参考文献	376
第十四章	结构动力反应分析的新算法	377
14.1	结构线弹性动力反应分析的新算法	377
14.1.1	基本方程	377
14.1.2	建立递推格式	378
14.1.3	建立无条件稳定算法	380
14.1.4	建立条件稳定算法	382
14.2	结构非线性动力分析的新算法	383
14.2.1	非线性动力方程	383
14.2.2	第三种样条递推算法	384
14.2.3	几种新算法	389
14.3	状态方程的算法	393
14.3.1	精细算法	393
14.3.2	样条加权残数法(一)	395
14.3.3	样条加权残数法(二)	398
14.4	样条无条件稳定算法	400
14.5	计算例题	400
	参考文献	401
第十五章	结构静力非线性分析的新算法	402
15.1	结构非线性刚度方程	402
15.1.1	第一种格式	403

15.1.2	第二种格式/第三种格式	404
15.2	样条递推法	404
15.2.1	第一种样条递推算法	404
15.2.2	第二种样条递推法	408
15.2.3	第三种样条递推法	408
15.3	样条增量迭代法	409
15.3.1	第一种增量迭代法	409
15.3.2	第二种增量迭代法	411
15.3.3	第三种增量迭代法	411
15.4	材料非线性分析的新算法	412
15.4.1	样条初应力递推法	412
15.4.2	样条初应力增量迭代法	412
15.4.3	样条变刚度增量迭代法	413
15.5	双重非线性分析的新算法	414
	参考文献	414
第十六章	结构动力特性的新算法	416
16.1	基本问题	416
16.2	特征值问题	416
16.3	特征值问题解法	418
16.4	滤频迭代法	418
16.5	结构非线性动力特性的新算法	422
16.5.1	建立新模型	422
16.5.2	新算法	422
16.5.3	结构非线性振动周期的算法	423
16.5.4	求自振频率	424
16.5.5	结构的质量矩阵及阻尼矩阵	424
	参考文献	425
第十七章	结构非线性稳定性分析的样条无网格法	426
17.1	基本概念	426
17.1.1	结构失稳特性	426
17.1.2	判断结构稳定性的能量准则	427
17.1.3	结构动力稳定性	428
17.2	结构非线性静力稳定性问题	428
17.2.1	建模	428
17.2.2	算法	429

17.2.3 迭代收敛准则	434
17.3 结构非线性平衡路径跟踪算法	435
17.3.1 切线刚度法	436
17.3.2 特征刚度法	438
17.3.3 位移收敛控制增量迭代法	440
17.4 结构非线性静力稳定性简化算法	441
17.4.1 基本原理	442
17.4.2 计算步骤	443
17.4.3 算例	443
17.5 结构非线性动力稳定性问题的新模型	444
17.6 结构非线性动力稳定性问题的新算法	445
17.7 求解结构动力失稳临界荷载的实用方法	448
17.7.1 动力时程分析法	448
17.7.2 静力变换法	448
17.7.3 静力法	449
17.7.4 几点注意	450
17.8 计算例题	450
参考文献	451
第十八章 结构承载能力分析的新方法	453
18.1 基本概念	453
18.1.1 基本理论	453
18.1.2 塑性极限理论	453
18.1.3 塑性铰模型	455
18.2 结构塑性极限分析的塑性铰模型-样条无网格法	456
18.2.1 一阶塑性铰模型-样条无网格法	456
18.2.2 二阶塑性铰模型-样条无网格法	457
18.3 精化塑性铰模型-样条无网格法	460
18.4 结构塑性极限分析的弹性调整-样条无网格法	461
18.4.1 一阶弹性调整-样条无网格法	461
18.4.2 二阶弹性调整-样条无网格法	465
18.5 结构动力极限承载能力分析的样条无网格法	466
18.5.1 建立新建模	466
18.5.2 选用新算法	467
18.6 一阶动力弹性调整-样条无网格法	468
18.6.1 计算原理	468