

大规模时滞电力系统 特征值计算

EIGENVALUE COMPUTATION
FOR LARGE TIME-DELAYED
POWER SYSTEMS

叶 华 刘玉田 著



科学出版社

大规模时滞电力系统特征值计算

**Eigenvalue Computation for Large Time-delayed
Power Systems**

叶 华 刘玉田 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

大规模时滞电力系统特征值计算,是揭示广域通信时滞对广域阻尼控制的影响机理,进而优化设计广域阻尼控制器的重要手段。本书针对广域阻尼控制中的通信时滞问题,总结基于谱离散化特征值计算的大规模时滞电力系统稳定性分析方面的理论研究结果,反映目前考虑通信时滞影响的电力系统特征值计算的最新进展。全书共 12 章,分为基础篇、方法篇和测试篇。基础篇包括第 1 章~第 3 章,建立时滞电力系统稳定性分析模型,介绍谱离散化中的三种数值方法,是方法篇的理论基础。方法篇包括第 4 章~第 10 章,建立基于谱离散化的大规模时滞电力系统特征值计算框架。基于该框架,本书提出高效地计算大规模时滞电力系统部分关键特征值的七种数值方法。测试篇包括第 11 章和第 12 章,从两个方面分别测试和验证基于谱离散化特征值计算方法的准确性、高效性和对大规模电力系统的适应能力。

本书内容新颖,推导翔实,既可作为高等院校电气工程专业研究生教材,也可作为从事电力系统稳定性分析和控制的科研人员与工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大规模时滞电力系统特征值计算=Eigenvalue Computation for Large Time-delayed Power Systems /叶华,刘玉田著. —北京:科学出版社,2018.9

ISBN 978-7-03-058659-9

I. ①大… II. ①叶… ②刘… III. ①时滞系统-电力系统-特征值-计算 IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018) 第 200956 号

责任编辑:范运年 王楠楠/责任校对:彭 涛

责任印制:师艳茹/封面设计:铭轩堂

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>

河北鹏润印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 9 月第 一 版 开本:720 × 1000 1/16

2018 年 9 月第一次印刷 印张:17 3/4

字数:352 000

定价:158.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

现代电力系统的运行和控制无时无刻不依赖于一个可靠的信息系统。基于计算机技术、通信技术和传感技术的电力信息系统与电力一次系统紧密而有机地结合在一起。电力系统本质上是一个信息物理融合的动力系统。20 世纪 90 年代以来,基于相量测量单元的广域测量系统得到迅猛发展,已能够实时、同步、高速采集地理上分布在数千公里范围内的系统的动态信息,为大规模互联电力系统的状态感知、广域保护和协调控制提供了新的信息平台。广域阻尼控制通过引入有效反映区间低频振荡模式的广域反馈信号,如发电机相对转速和功角、联络线功率等,能够显著增强对制约大规模互联电网输电能力的区间低频振荡的控制能力。然而,广域测量信号在采集、路由、传输和处理过程中存在数十到几百毫秒的时延,对广域阻尼控制器的性能产生重要影响并为电力系统带来运行风险。考虑通信时滞影响后,电力系统成为时滞信息物理融合的动力系统,需要相应的建模、分析、优化和控制方法体系。

广域阻尼控制提出的初衷在于解决大规模互联电力系统中出现的区间低频振荡问题。大规模电力系统的应用背景对已有的考虑时滞影响的电力系统稳定性分析方法在规模的适应性、计算的准确性和分析的高效性等方面提出更高的要求。目前,考虑时滞影响的电力系统稳定性分析方法主要有函数变换法和基于 Lyapunov 理论的时滞依赖稳定性判据。函数变换法利用有理多项式等直接对时滞系统特征方程中的指数项进行变换或近似,存在一定的不足。例如,基于 Rekasius 变换只能求解得到系统位于虚轴上的部分特征值,而 Padé 有理多项式在对大时滞(如 500 ms 以上)进行逼近时存在较大的近似误差。时滞依赖稳定性判据一方面存在一定程度的固有保守性,另一方面待求变量多、计算量大的特点使得其仅适用于较小规模(100 阶左右)的系统。

鉴于此,本书将应用数学领域中基于谱离散化的时滞系统特征值计算方法引入电力系统中,用于大规模时滞电力系统的小干扰稳定性分析与控制。谱离散化方法的核心思想是,利用两个半群算子——解算子和无穷小生成元,建立时滞系统的转移方程并将描述系统动态的时滞微分方程转化为常微分方程。进而,将时滞系统的特征值转化为解算子和无穷小生成元的谱,避免了时滞电力系统特征方程中指数项导致的特征值求解困难。本书针对广域阻尼控制中的通信时滞问题,总结作者所在科研团队在大规模时滞电力系统特征值计算方面的部分研究成果。特色在于,其继承了基于特征值的电力系统小干扰稳定性分析完善的理论框架和丰富的

理论成果,提出考虑通信时滞影响的大规模电力系统部分关键特征值的高效计算方法,为深入揭示广域通信时滞对广域阻尼控制的影响机理、优化设计广域阻尼控制器等奠定基础。

本书的研究工作得到下列基金的资助:高等学校博士学科点专项科研基金新教师基金资助课题(编号:20100131120038),国家自然科学基金青年基金项目(编号:51107073)、面上项目(编号:51677107),山东大学青年学者未来计划资助课题(编号:2016WLJH06)。

本书撰写的过程中,受到国内外众多老师、同事和朋友的关爱与帮助,山东大学电气工程学院和电网智能化调度与控制教育部重点实验室的领导及老师给予了大力支持。博士研究生牟倩颖和硕士研究生王燕燕、高卫康参与了部分研究工作。牟倩颖帮助整理了第11章算例结果并绘制了书中部分插图。多位研究生参与了文字编辑和校对工作。在此谨对他们表示衷心的感谢。

由于作者学识有限,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

作 者

2017年10月于山东大学

主要符号表

A, B, C, D	电力系统增广状态矩阵
$\tilde{A}$	电力系统状态矩阵
$A_i, B_i, C_i, D_i (i = 0, 1, \dots, m)$	时滞电力系统增广状态矩阵
$\tilde{A}_i (i = 0, 1, \dots, m)$	时滞电力系统状态矩阵
$\tilde{A}'_i, \tilde{A}''_i (i = 0, 1, \dots, m)$	预处理后时滞电力系统状态矩阵
A', B'	由 A_0, B_0 经简单运算形成的矩阵函数
s	位移点/ 隐式龙格-库塔方法的级数/IDR(s) 算法中“阴影”子空间维数
α	切比雪夫多项式的参数/旋转-放大预处理中的放大倍数
θ	滞后时间 $\theta \in [-\tau_{\max}, 0]$ /坐标轴旋转角度
h	解算子转移步长
n, l	状态变量维数, 代数变量维数
λ, u, v	特征值, 左特征向量, 右特征向量
$\tau_i (i = 1, 2, \dots, m)$	时滞常数, 满足 $\tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_m \triangleq \tau_{\max}$
$\mathcal{A}$	无穷小生成元
$\mathcal{A}_N, \mathcal{A}_{Ns}$	无穷小生成元离散化矩阵
$\mathcal{T}(h)$	解算子
$T_{M,N}, T_N, T_{Ns}$	解算子离散化矩阵

首字母缩略词表

AB	Adams-Bashforth (explicit Adams)	亚当斯-巴什福思 (显式亚当斯)
AFDE	advanced functional differential equation	超前型泛函微分方程
AM	Adams-Moulton (implicit Adams)	亚当斯-莫尔顿 (隐式亚当斯)
BC	boundary condition	边界条件
BDF	backward differentiation formulae	反向差分公式
Bi-CGSTAB	bi-conjugate gradient stabilized	稳定双共轭梯度
BVP	boundary value problem	边值问题
CPPS	cyber-physical power system	信息物理融合电力系统
DAE	differential-algebraic equation	微分-代数方程
DDAE	delayed differential-algebraic equation	时滞微分-代数方程
DDE	delayed differential equation	时滞微分方程
DCPPS	delayed cyber-physical power system	时滞信息物理融合电力系统 (时滞电力系统)
EMS	energy management system	能量管理系统
EIGD	explicit infinitesimal generator discretization	显式无穷小生成元离散化
FACTS	flexible alternative current transmission system	柔性交流输电系统
FDE	functional differential equation	泛函微分方程
GMRES	generalized minimal residual	广义最小残差
GPS	global positioning system	全球定位系统
HVDC	high voltage direct current	高压直流
IC	initial condition	初始条件
IDR (s)	induced dimension reduction	诱导降维
IGD	infinitesimal generator discretization	无穷小生成元离散化
IGD-Euler	IGD with Euler	无穷小生成元欧拉离散化
IGD-IRK	IGD with implicit Runge-Kutta	无穷小生成元隐式龙格-库塔离散化
IGD-LMS	IGD with liner multi-step	无穷小生成元线性多步离散化
IGD-PS	IGD with pseudo-spectral differencing	无穷小生成元伪谱差分离散化
IIGD	iterative IGD	迭代无穷小生成元离散化
IRA	implicitly restarted Arnoldi	隐式重启 Arnoldi
IRK	implicit Runge-Kutta	隐式龙格-库塔
LFC	load frequency control	负荷频率控制
LMI	linear matrix inequality	线性矩阵不等式
LMS	linear multi-step	线性多步
LQR	linear quadratic regulator	线性二次型调节器

续表

MIVP	matrix inversion-vector product	矩阵逆-向量乘积
MVP	matrix-vector product	矩阵-向量乘积
NFDE	neutral FDE	中立型泛函微分方程
ODE	ordinary differential equation	常微分方程
PDC	phasor data concentrator	相量数据集中器
PDE	partial differential equation	偏微分方程
PMU	phasor measurement unit	相量测量单元
PSASP	Power System Analysis Software Package	电力系统分析综合程序
PSS	power system stabilizer	电力系统稳定器
RFDE	retarded FDE	滞后型泛函微分方程
RTU	remote terminal unit	远方终端单元
SCADA	supervisory control and data acquisition	数据采集与监视控制
SOD	solution operator discretization	解算子离散化
SOD-IRK	SOD with implicit Runge-Kutta	解算子隐式龙格-库塔离散化
SOD-LMS	SOD with liner multi-step	解算子线性多步离散化
SOD-LMS-MXO	SOD with maximum order LMS	解算子最高阶线性多步离散化
SOD-PS	SOD with pseudo-spectral collocation	解算子伪谱配置离散化
SVC	static var compensator	静止无功补偿器
TCSC	thyristor controlled series compensator	可控串联补偿器
WAMS	wide-area measurement system	广域测量系统

插图目录

图 1.1	本书的结构示意图	8
图 2.1	多机电力系统动态模型框架	10
图 2.2	采用可控硅调节器的直流励磁机励磁系统传递函数框图	15
图 2.3	PSS 的传递函数框图	15
图 2.4	水轮机及其调速系统的传递函数框图	16
图 2.5	系统增广状态矩阵的稀疏结构	27
图 2.6	将 DDAE 转化为 DDE 的两种思路	37
图 2.7	时滞电力系统示意图	38
图 3.1	滞后型时滞系统的谱特性	52
图 3.2	切比雪夫点的图释 ($N = 4$)	59
图 3.3	AB 方法的绝对稳定域 ($k = 2 \sim 6$)	65
图 3.4	AM 方法的绝对稳定域 ($k = 2 \sim 6$)	65
图 3.5	BDF 方法的绝对稳定域 ($k = 1 \sim 6$)	66
图 3.6	Lobatto IIIA 方法、Lobatto IIIB 方法和 Gauss-Legendre 方法的绝对稳定域 ($s = 2 \sim 4$)	70
图 3.7	Lobatto IIIC 方法的绝对稳定域 ($s = 2 \sim 4$)	71
图 3.8	Radial IA 方法和 Radial IIA 方法的绝对稳定域 ($s = 1 \sim 3$)	71
图 3.9	SDIRK 方法的绝对稳定域 ($\gamma = (3 + \sqrt{3})/6, s = 2$)	71
图 4.1	FDE 的分类	76
图 4.2	将 DDE 转换为 RFDE 的原理示意	77
图 4.3	$\mathcal{T}(h)$ 的图解	80
图 4.4	式 (4.11) 的解	81
图 4.5	时滞系统特征值 λ 和解算子特征值 μ 之间的映射关系	85
图 4.6	位移-逆变换的原理	90
图 4.7	利用 IGD 类方法计算大规模 DCPPS 最右侧的关键特征值的原理	90
图 4.8	坐标轴旋转后的谱映射关系	91
图 6.1	EIGD 方法的流程图	121
图 7.1	单时滞情况下 IGD-LMS 方法中的离散点集合 Ω_N	123
图 7.2	多重时滞情况下 IGD-LMS 方法中的离散点集合 Ω_N	126
图 7.3	单时滞情况下 IGD-IRK 方法中的离散点集合 Ω_N	129

图 7.4	多重时滞情况下 IGD-IRK 方法中的离散点集合 Ω_N	133
图 8.1	离散点集合 Ω_M	141
图 8.2	$t_{N,j} - \tau_i$ 落入第 k 个子空间的判别	151
图 8.3	$t_{N,j} - \tau_{\max}$ 落入第 Q 或第 $Q-1$ 个子空间的判别	152
图 9.1	离散点集合 Ω_N	162
图 9.2	映射 $\Sigma(\mathbb{C}^+)$ 示例	167
图 9.3	安全半径 $\rho_{\text{LMS},\varepsilon}$ 示例	171
图 9.4	步长 h 选择示例	172
图 10.1	离散点集合 Ω_{Ns}	176
图 11.1	四机两区域系统单线图	202
图 11.2	广域阻尼控制器结构	203
图 11.3	16 机 68 节点系统单线图	203
图 11.4	山东电网主网架	204
图 11.5	华北-华中特高压互联电网示意图	205
图 11.6	当 $N = 50$ 时, $\mathcal{A}_N$ 的特征值	206
图 11.7	系统机电振荡模式对应的特征值 (图 11.6 局部放大)	208
图 11.8	$N = 20, 40$ 和 60 时, $\mathcal{A}_N$ 的特征值	209
图 11.9	当 $N = 50$ 时, 由 EIGD 方法计算得到系统特征值的估计值	209
图 11.10	当 $s = j7$ 和 $j13$ 时, 稀疏近似矩阵 $\mathcal{A}_N$ 的特征值	211
图 11.11	随机时滞分布	212
图 11.12	随机时滞下, 系统阻尼比最弱的特征值	212
图 11.13	当 $M = N = 3$ 和 $h = 0.0153\text{s}$ 时, DCPPS 的准确特征值 λ 及其估计值 $\hat{\lambda}$	213
图 11.14	当 $M = N = 3$ 和 $h = 0.0153\text{s}$ 时, $\mathcal{T}(h)$ 的准确特征值 μ 及其离散化矩阵 $T_{M,N}$ 特征值的估计值 $\hat{\mu}$	214
图 11.15	图 11.13 和图 11.14 的局部放大图	214
图 11.16	不同预处理条件下, DCPPS 的准确特征值 λ 及其估计值 $\hat{\lambda}$	215
图 11.17	大时滞情况下 SOD-PS 方法计算得到的 $r = 15$ 个特征值估计值 $\hat{\lambda}$	217
图 11.18	SOD-PS 方法 ($\theta = 5.74^\circ$) 和 EIGD ($s = j7$) 方法计算得到的特征值估计值 $\hat{\lambda}$	218
图 11.19	SOD-PS ($\theta = 17.46^\circ$) 和 EIGD ($s = j7$ 和 $j13$) 计算得到的特征值的估计值	219
图 11.20	当 $\theta = 1.72^\circ$ 时, SOD-PS 方法计算 $r = 5$ 个关键特征值	222
图 11.21	当 $N = 50$ 、 $k = 2$ 和 $s = 3$ 时, EIGD 方法、IIGD 方法和	

	IGD-LMS/IRK 方法计算得到的 $\mathcal{A}_N/\mathcal{A}_{Ns}$ 的特征值 ·····	223
图 11.22	系统机电振荡模式对应的特征值 (图 11.22 局部放大) ·····	224
图 11.23	当 $k = 2$, $N = 20, 40$ 和 50 时, IGD-LMS 方法计算得到的 $\mathcal{A}_N$ 的特征值 ·····	224
图 11.24	当 $N = 50$, $k = 2 \sim 4$ 时, IGD-LMS 方法计算得到的 $\mathcal{A}_N$ 的特征值 ·····	225
图 11.25	当 $s = 3$, $N = 20, 40$ 和 50 时, IGD-IRK 方法计算得到的 $\mathcal{A}_{Ns}$ 的特征值 ·····	225
图 11.26	当 $N = 50$, $s = 2$ 和 3 时, IGD-IRK 方法计算得到的 $\mathcal{A}_{Ns}$ 的特征值 ·····	226
图 11.27	当 $N = 20, 40$ 和 50 时, IIGD 方法计算得到的 $\mathcal{A}_N$ 的特征值 ·····	226
图 11.28	IGD-LMS 方法和 EIGD 方法得到的 $\mathcal{A}$ 附近的 r 个特征值 ·····	228
图 11.29	SOD-LMS/IRK 方法计算得到 $\mathcal{T}(h)$ 特征值的估计值 $\hat{\mu}$ ·····	230
图 11.30	SOD-LMS/IRK 方法计算得到系统特征值 λ 的估计值 $\hat{\lambda}$ ·····	230
图 11.31	当 $\alpha = 2$ 和 $\theta = 8.63^\circ$ 时, SOD-LMS/IRK 方法计算得到系统机电振荡模式的近似值 $\hat{\lambda}$ ·····	231
图 11.32	不同 SOD-LMS/IRK 方法计算得到系统机电振荡模式的近似值 $\hat{\lambda}$ ·····	232
图 11.33	SOD-LMS (BDF, $k = 2$) 方法和 SOD-IRK (Radau II A, $s = 2$) 方法计算得到的系统特征值的近似值 $\hat{\lambda}$ ·····	235
图 11.34	SOD-LMS (AB, $k = 2$) 方法和 SOD-LMS (AM, $k = 4$) 方法计算得到的系统特征值的近似值 $\hat{\lambda}$ ·····	235
图 11.35	SOD-LMS (BDF) 方法、SOD-IRK (Radau II A) 方法和 SOD-PS 方法分别计算系统阻尼比最小的部分特征值 ·····	236
图 12.1	指数时滞项和 Padé 近似有理多项式 ($k = 2 \sim 4$) 的相频响应对比 ·····	242
图 12.2	指数时滞项和 Padé 近似有理多项式 ($k = 4, 6, 9$) 的相频响应对比 ·····	242
图 12.3	原始系统和降阶系统的频率响应 ·····	247
图 12.4	区间振荡模式及其估计值随时滞的变化轨迹 ·····	249
图 12.5	局部振荡模式及其估计值随时滞变化的轨迹 ·····	249
图 12.6	Padé 近似方法和 EIGD 方法计算位移点 $s=j7$ 和 $j13$ 附近的 $r=80$ 个特征值 ·····	251
图 12.7	图 12.6(b) 的局部放大 ·····	251

表格目录

表 3.1	AB 方法、AM 方法和 BDF 方法的系数	63
表 4.1	计算数学和数值分析领域中的谱离散化方法	86
表 4.2	各系统 MVP 和 MIVP 计算量比较	102
表 11.1	谱离散化方法特性对比	201
表 11.2	无穷小生成元 A 的部分特征值及其对时滞的灵敏度	206
表 11.3	QR 算法和 EIGD 方法计算时间比较 ($N_{\text{IRA}}/(\text{CPU 时间}/\text{s})$)	210
表 11.4	EIGD 方法计算时间 ($N_{\text{IRA}}/(\text{CPU 时间}/\text{s})$)	211
表 11.5	四机两区域系统下, SOD-PS 方法的计算时间	216
表 11.6	当 $\theta = 17.46^\circ$ 时, SOD-PS 方法计算得到的虚假特征值	220
表 11.7	SOD-PS 方法和 EIGD 方法计算山东电网部分特征值的效率比较 ($N_{\text{IRA}}/(\text{CPU 时间}/\text{s})$)	221
表 11.8	当 $r = 20$ 时, 四种方法的测度指标和计算时间	227
表 11.9	当 $N = 20、30、40$ 和 50 时, 四种方法的测度指标和 计算时间	227
表 11.10	当 $N = 25$ 时, 四种方法的测度指标和计算时间	229
表 11.11	不同的 SOD-LMS/IRK/PS 方法的测度指标和计算时间	232
表 11.12	各种 SOD 方法的测度指标和计算时间	234
表 11.13	各种 SOD 方法的测度指标和计算时间	236
表 12.1	三种 DCPPS 稳定性分析方法的定性比较	246
表 12.2	系统时滞稳定裕度计算结果	248
表 12.3	不同时滞下, 区间振荡模式及 Padé 近似的估计误差	250
表 12.4	不同时滞下, 局部振荡模式及 Padé 近似的估计误差	250

目 录

前言

主要符号表

首字母缩略词表

基 础 篇

第 1 章 时滞电力系统稳定性分析方法	3
1.1 时滞电力系统	3
1.1.1 广域测量系统	3
1.1.2 时滞特性	4
1.2 DCPPS 稳定性分析方法	5
1.2.1 函数变换法	5
1.2.2 时域法	5
1.2.3 预测补偿法	6
1.2.4 特征分析法	7
1.3 本书的章节安排	8
第 2 章 DCPPS 稳定性分析建模理论	10
2.1 电力系统动态模型	10
2.1.1 系统模型概述	10
2.1.2 动态元件模型	11
2.2 小干扰稳定性分析模型	17
2.2.1 小干扰稳定性分析原理	17
2.2.2 线性化微分方程	19
2.2.3 线性化代数方程	21
2.2.4 线性化 DAE	24
2.3 DDAE 转化为 DDE	27
2.3.1 指数不为 1 海森伯格形式的 DDAE	29
2.3.2 将 DDAE 转化为包含二阶及以上时滞项的 DDE	29
2.3.3 式 (2.82) 和式 (2.83) 的证明	31
2.3.4 式 (2.84) 的证明	32
2.3.5 由无时滞项和一阶时滞项表示的 DDE	35

2.3.6	DCPPS 的 DDAE 转化为 DDE	36
2.3.7	小结	37
2.4	DCPPS 稳定性分析模型	38
2.4.1	一般模型	38
2.4.2	具体模型	48
第 3 章	谱离散化方法的数学基础	51
3.1	时滞特征方程及其偏导数、摄动	51
3.1.1	时滞特征方程	51
3.1.2	时滞系统的谱特性	52
3.1.3	特征值对时滞的灵敏度	53
3.1.4	特征值对运行参数的灵敏度	54
3.1.5	时滞特征方程的摄动	55
3.2	谱离散化中的数值方法	58
3.2.1	切比雪夫离散化	58
3.2.2	LMS 法	61
3.2.3	IRK 法	66

方 法 篇

第 4 章	大规模 DCPPS 特征值计算框架	75
4.1	半群算子	75
4.1.1	解算子	75
4.1.2	无穷小生成元	81
4.2	谱映射	83
4.2.1	算子谱定义	83
4.2.2	谱映射	84
4.3	谱离散化	86
4.3.1	方法分类	86
4.3.2	研究现状述评	87
4.4	谱变换	88
4.4.1	位移-逆变换	88
4.4.2	旋转-放大预处理	91
4.4.3	特性比较	95
4.5	谱估计	95
4.5.1	克罗内克积变换	95

4.5.2	IRA 算法	98
4.5.3	MVP 和 MIVP 的稀疏实现	100
4.6	谱校正	102
第 5 章	基于 IIGD 的特征值计算方法	104
5.1	IGD-PS 方法	104
5.1.1	基本原理	104
5.1.2	离散化矩阵	105
5.2	IIGD 方法	107
5.2.1	克罗内克积变换	108
5.2.2	位移-逆变换	108
5.2.3	稀疏特征值计算	108
5.2.4	特性分析	110
第 6 章	基于 EIGD 的特征值计算方法	111
6.1	IGD-PS-II 方法	111
6.1.1	基本原理	111
6.1.2	IGD-PS-II 方法	112
6.1.3	A_N 的特性分析	116
6.2	EIGD 方法	117
6.2.1	克罗内克积变换	117
6.2.2	位移-逆变换	118
6.2.3	稀疏特征值实现	118
6.2.4	算法流程及特性分析	120
第 7 章	基于 IGD-LMS/IRK 的特征值计算方法	122
7.1	IGD-LMS 方法	122
7.1.1	单时滞情况	122
7.1.2	多时滞情况	125
7.2	IGD-IRK 方法	128
7.2.1	单时滞情况	128
7.2.2	多重时滞情况	132
7.3	大规模系统特征值计算	138
7.3.1	位移-逆变换	138
7.3.2	稀疏特征值计算	138
7.3.3	牛顿校验	139
7.3.4	特性分析	140

第 8 章 基于 SOD-PS 的特征值计算方法	141
8.1 SOD-PS 方法的基本原理	141
8.1.1 空间 X 的离散化	141
8.1.2 空间 X^+ 的离散化	143
8.1.3 解算子的显式表达式	144
8.1.4 伪谱配置离散化	146
8.2 解算子伪谱离散化矩阵	146
8.2.1 矩阵 Π_M	146
8.2.2 矩阵 $\Pi_{M,N}$	149
8.2.3 矩阵 $\Sigma_{M,N}$	150
8.2.4 矩阵 Σ_N	154
8.3 大规模系统特征值计算	155
8.3.1 坐标旋转预处理	155
8.3.2 旋转-放大预处理	156
8.3.3 稀疏特征值计算	157
8.3.4 算法流程及特性分析	160
第 9 章 基于 SOD-LMS 的特征值计算方法	162
9.1 SOD-LMS 方法	162
9.1.1 LMS 离散化方案	162
9.1.2 时滞独立稳定性定理	165
9.1.3 参数选择方法	170
9.2 大规模 DCPPS 的特征值计算	172
9.2.1 旋转-放大预处理	172
9.2.2 稀疏特征值计算	173
9.2.3 特性分析	175
第 10 章 基于 SOD-IRK 的特征值计算方法	176
10.1 SOD-IRK 方法	176
10.1.1 离散状态空间 X_{Ns}	176
10.1.2 方法的基本思路	177
10.1.3 Radau II A 离散化方案	178
10.1.4 其他 IRK 离散化方案	182
10.2 大规模 DCPPS 的特征值计算	195
10.2.1 旋转-放大预处理	195
10.2.2 稀疏特征值计算	196
10.2.3 特性分析	197

测 试 篇

第 11 章 谱离散化方法性能对比分析	201
11.1 理论对比	201
11.2 算例系统	202
11.2.1 四机两区域系统	202
11.2.2 16 机 68 节点系统	203
11.2.3 山东电网	204
11.2.4 华北-华中特高压互联电网	204
11.3 EIGD 方法	206
11.4 SOD-PS 方法	213
11.5 IGD 类方法	222
11.6 SOD 类方法	229
第 12 章 与其他方法的性能对比分析	237
12.1 时滞系统稳定性判据	237
12.1.1 单时滞情况	237
12.1.2 多重时滞情况	238
12.2 Padé近似	241
12.2.1 Padé 近似	241
12.2.2 状态空间表达	243
12.2.3 闭环系统模型	244
12.2.4 特性分析	245
12.3 理论对比	245
12.4 算例分析	247
12.4.1 时滞依赖稳定性判据的保守性	247
12.4.2 Padé近似的精确性	248
参考文献	253