

文章编号: 1001-0920(2008)03-0310-05

基于 Moore-Spence 扩展系统鞍结分岔点的降阶新算法

安祎春, 张庆灵, 邢伟, 李琴

(东北大学系统科学研究所, 沈阳 110004)

摘要: 为了克服 Moore-Spence 系统的计算复杂性, 通过引入辅助方程形成扩展的 Moore-Spence 系统, 得到一种求解 Moore-Spence 扩展系统的矩阵降阶新算法. 该算法可大幅度降低系数矩阵的阶数, 解决了 Moore-Spence 方程高维数求解的困难. 算例仿真结果表明, 该方法对于求解微分代数电力系统模型的鞍结分岔点是行之有效的.

关键词: 电力系统; Moore-Spence 系统; 微分代数方程; 鞍结分岔

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Extended Moore-Spence system based direct method for computing saddle-node bifurcation points

AN Yi-chun, ZHANG Qing-ling, XING Wei, LI Qin

(Institute of Systems Science, Northeastern University, Shenyang 110004, China. Correspondent: AN Yi-chun, E-mail: anyichun625@sina.com)

Abstract: To overcome the complexity caused by Moore-Spence system in computation, by introducing an auxiliary equation to form an extended Moore-Spence system, an efficient matrix reduction technique is derived. The high dimensionality of Jacobian matrix can thus be reduced and the complexity involved in matrix factorization can be simplified. The simulation results show that the method is efficient and applicable to compute the saddle-node bifurcation points of the differential-algebraic power system model.

Key words: Power system; Moore-Spence system; Differential-algebraic equation; Saddle-node bifurcation

1 引言

20 世纪 70 年代以来, 非线性动力学问题引起了众多学者的重视. 非线性系统具有独特的现象, 如极限环、分岔、混沌等, 致使研究工作更加复杂. 分岔理论作为一种重要的数学方法, 是分析非线性系统的有力工具. 所谓分岔是指非线性系统的特性, 包括平衡点数目、稳定性、轨道的拓扑结构等在一定参数值处发生突变, 不能从一种流连续地变为另一种流. 发生分岔时, 对应的参数值及状态变量称为分岔点.

在研究电力系统分岔时, 分析和计算分岔点对于理解系统的非线性动态特性以及确定系统的临界状态具有重要作用^[1,2]. 鞍结分岔 (SNB) 是电力系统静态分岔的主要研究对象, 事实证明, SNB 常常引起电力系统电压的突然崩溃、系统失稳、低频振荡等复杂现象^[3-5], 因此研究鞍结分岔有着重要的现实意义. 在鞍结分岔点处, 非线性微分代数系统的 Jacobi

矩阵奇异, 因而 Newton 迭代法将失效. 目前对于鞍结点的求解方法主要有两种: 连续法和直接法. 连续法主要是利用连续潮流从系统初始状态开始追踪潮流的解曲线, 直至 PV 曲线的拐点 (鼻尖点), 也就是鞍结分岔点. 连续潮流法的鲁棒性较好, 但对预测环节的步长控制要求较为严格, 而且计算量大, 难以实现在线计算^[6]. 直接法从 SNB 的定义出发, 列出了满足条件的代数方程组, 即用决定性系统来计算鞍结分岔点, Moore-Spence 方程是最常用的一种决定性系统^[7]. 决定性系统的 Jacobi 矩阵在分岔点处是非奇异的, 给定恰当的初值, Newton 迭代法便可求出这个决定性系统的解, 从而精确地确定鞍结分岔点.

对于大型电力系统而言, Moore-Spence 方程的维数很高, 直接求解计算量很大. 为了解决上述问题, 文献[8]对求解鞍结分岔点的特征方程组重新参

收稿日期: 2007-05-11; 修回日期: 2007-09-02.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60574011); 辽宁省普通高校学科带头人基金项目 (124210).

作者简介: 安祎春 (1980—), 女, 山西大同人, 博士生, 从事非线性系统分岔和混沌的研究; 张庆灵 (1956—), 男, 辽宁营口人, 教授, 博士生导师, 从事广义系统、时滞系统等研究.

数化, 将 $(2n + 1)$ 维的特征方程组降为 $(n + 1)$ 维, 给出了分岔点的测试函数, 并用连续性方法逐步跟踪到分岔点. 文献[9]在此基础上, 进一步提出潮流解曲线在 SNB 点附近可用二次型曲线来近似描述, 利用解曲线上的 2 个或 3 个点, 可近似估计出鞍结分岔点的位置.

本文针对 Moore-Spence 方程提出一种矩阵降阶方法. 该算法的关键在于通过引入辅助变量和辅助方程, 将 Newton 迭代法中的高维线性方程组简化为两个小规模方程组, 以此实现对原方程组的简化求解, 它具有计算量小、计算速度快、容易在程序中实现的优点. 实例仿真表明, 本文提出的算法对于计算鞍结分岔点是有效而可行的.

2 数学基础

一般的电力系统可表示为参数化 DAE, 即

$$\dot{x} = f(x, y, \mu), \quad 0 = g(x, y, \mu). \quad (1)$$

其中: $f: R^{n+m+p} \rightarrow R^n, g: R^{n+m+p} \rightarrow R^m; x \in R^n, y \in R^m, \mu \in R^p; x$ 是描述各种元件动态行为的微分状态变量, 如发电机功角或角速度、负荷电压幅值或相角等; y 是代数状态变量, 可表示母线电压; μ 是时不变的控制参数, 可表示负荷无功或有功.

DAE 在化工、航天^[10]、生物医学^[11]、力学等领域具有广泛的应用. 在不同的背景下, 式(1)有着不同的含义. 如果 $D_y g$ 可逆, 则可得平衡解集 E 和 Jacobi 矩阵 J 分别为

$$E = \{(x, y, \mu) \in R^{n+m+p} \mid f(x, y, \mu) = 0, g(x, y, \mu) = 0\}, \quad (2)$$

$$J = D_x f - (D_y f)(D_y g)^{-1}(D_x g). \quad (3)$$

其中 D_x 和 D_y 分别表示对 x 和 y 的偏导数.

2.1 鞍结分岔^[12]

鞍结分岔又称折叠分岔, 是电力系统静态分岔分析中主要的研究对象. SNB 是指系统的 Jacobi 矩阵的实特征值由负变正而出现的分岔, 在 SNB 点必有一零特征值. 在二维情况下, 一个是鞍点, 另一个是结点, 故得其名. 零特征值对应的右特征向量表明系统在状态空间中的演变方向, 左特征向量表明各状态变量对零特征值的影响程度. 这里给出 SNB 定理, 用于说明判断鞍结分岔点的条件.

定理 1^[12] 当 DAE(1) 满足 $\det(D_y g) \neq 0$ 时, 由隐函数定理知, 存在唯一的映射 f_R , 使系统可降阶成微分系统 $\dot{X} = f_R(X, \mu), X = (x, y)$. 如果系统满足下列横截条件:

1) Jacobi 矩阵

$$D_x f_R = D_x f - (D_y f)(D_y g)^{-1}(D_x g)$$

有一个简单零特征值, 其对应的左特征向量为 w , 右特征向量为 v , 且其他特征值都有非零的实部;

$$2) w^T (D f_R) = w^T [D f - (D_y f)(D_y g)^{-1} \times (D_x g)] \neq 0;$$

$$3) w^T [D_x^2 f_R(v, v)] \neq 0.$$

则系统(1)发生了鞍结分岔, 满足条件的点称为鞍结分岔点.

2.2 平衡解流形

当 DAE(1) 发生鞍结分岔时, 矩阵 J 在 SNB 点必有一零特征值. 文献[13]据此构造了如下 Moore-Spence 系统, 通过解此方程组可获得 SNB 点.

$$\begin{cases} f(x, y, \mu) = 0, & g(x, y, \mu) = 0, \\ A v = 0, & v^T v - 1 = 0. \end{cases} \quad (4)$$

其中: $A = \begin{bmatrix} f_x & f_y \\ g_x & g_y \end{bmatrix}$ 为式(1)的增广 Jacobi 矩阵; v

$= \begin{bmatrix} v_n \\ v_m \end{bmatrix} \in R^{n+m}$ 为与零特征值对应的右特征向量,

前 n 个分量记为 v_n , 后 m 个分量记为 v_m .

式(4)的含义很明确: 前两个方程为分岔点应满足的潮流方程, 即平衡点方程; 由 Schur 公式, 如果 g_y 可逆, 则据第 3 个方程可推导出增广 Jacobi 矩阵 A 在分岔点处有一零特征值; 第 4 个方程是对特征向量 v 的规范化.

Moore-Spence 系统给出了直接计算鞍结分岔点的途径. 当用 Newton 迭代法求解式(4)时, 每一步迭代需要求解下列方程组:

$$\begin{bmatrix} f_x & f_y & f & 0 \\ g_x & g_y & g & 0 \\ A_x v & A_y v & A v & A \\ 0 & 0 & 0 & v^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ v \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(x, y, \mu) \\ g(x, y, \mu) \\ A v \\ v^T v - 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

需要指出的是, 式(5)的系数矩阵是 $(2n + 2m + 1) \times (2n + 2m + 1)$ 阶矩阵. 对于具有 N 个节点的大型电力系统, 考虑到每个节点的有功和无功平衡方程个数, 该系数矩阵的规模可达 $(4n + 4m + 1) \times (4n + 4m + 1)$ 阶, 因此求解式(5)的计算量很大. 为此, 本文提出一种有效的矩阵降阶方法, 克服了式(5)高维求解的困难.

3 方法描述

3.1 建立 Moore-Spence 扩展系统

引入辅助变量 x 和辅助方程 $v_n^T x + v_m^T y - 1 = 0$, 将其插入式(4), 得到扩展的 Moore-Spence 系统如下:

$$\begin{cases} f(x, y, v) = 0, & g(x, y, v) = 0, \\ v_n^T x + v_m^T y - 1 = 0, \\ Av = 0, & v^T v - 1 = 0. \end{cases} \quad (6)$$

很明显,式(6)与式(5)具有相同的解 (x, y, v) .采用 Newton 法求解式(6)时,其线性化方程组为

$$\begin{bmatrix} f_x & f_y & f & 0 & 0 \\ g_x & g_y & g & 0 & 0 \\ v_n^T & v_m^T & 0 & 0 & -1 \\ A_x v & A_y v & A v & A & 0 \\ 0 & 0 & 0 & v^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f(x, y, v) \\ -g(x, y, v) \\ -v_n^T x - v_m^T y + 1 \\ -Av \\ -v^T v + 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

式(7)可进一步化成

$$\begin{bmatrix} f_x & f_y & f & 0 & 0 \\ g_x & g_y & g & 0 & 0 \\ v_n^T & v_m^T & 0 & 0 & 0 \\ A_x v & A_y v & A v & A & [f \ g]^T \\ 0 & 0 & 0 & v^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f(x, y, v) \\ -g(x, y, v) \\ -v_n^T x - v_m^T y + 1 \\ -Av \\ -v^T v + 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

为方便起见,记

$$M = \begin{bmatrix} f_x & f_y & f \\ g_x & g_y & g \\ v_n^T & v_m^T & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & [f \ g]^T \\ v^T & 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$N = \begin{bmatrix} A_x v & A_y v & A v \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

则式(8)可分解成下列两个矩阵方程组:

$$M \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} f(x, y, v) \\ g(x, y, v) \\ v_n^T x + v_m^T y - 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$M \begin{bmatrix} v \end{bmatrix} + N \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} [f \ g]^T \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Av \\ v^T v - 1 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

由式(11)和(12)可知,如果矩阵 M 是非奇异的,只要求出辅助变量 x, y , 便可从式(11)中解得.因此,矩阵 M 的非奇异性及能否求得辅助变量,便成为式(7)中高阶系数矩阵能否降为低阶

分块矩阵 M 和 N 的关键.

3.2 矩阵降阶算法的描述

定理 2 矩阵 M 在鞍结分岔点处是非奇异的.

证明 假设以 M 为系数矩阵的方程组为

$$\begin{bmatrix} f_x & f_y & f \\ g_x & g_y & g \\ v_n^T & v_m^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

其中: $p \in R^n, q \in R^m, r \in R^p$.如果能证明式(13)只有零解,则定理得证.式(13)的第1个和第2个方程为

$$f_x p + f_y q + f r = 0, \quad (14)$$

$$g_x p + g_y q + g r = 0. \quad (15)$$

由于 g_y 可逆,从式(15)可求得 $q = -g_y^{-1}(g_x p + g r)$.代入式(14),得

$$f_x p - f_y g_y^{-1} g_x p - f_y g_y^{-1} g r + f r = 0.$$

由式(2)和定理1的条件可知,上式即为

$$Jp + (Df_r) r = 0. \quad (16)$$

欲使式(16)成立,则必有 $p = r = 0$.将其代入式(13)的第3个方程,即可得到 $q = 0$.

当矩阵 M 非奇异时,由式(11)可解得

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ w \end{bmatrix}. \quad (17)$$

其中: $u_x, w_x \in R^n, u_y, w_y \in R^m, u, w \in R^p$ 是下列方程组的解:

$$\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u \end{bmatrix} = -M^{-1} \begin{bmatrix} f(x, y, v) \\ g(x, y, v) \\ v_n^T x + v_m^T y - 1 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ w \end{bmatrix} = M^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

式(17)代入式(12),得

$$\begin{bmatrix} v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_v \\ u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_v \\ w \end{bmatrix}. \quad (20)$$

其中: $u_v, w_v \in R^{n+m}$ 和 $u, w \in R$ 是下列方程组的解:

$$\begin{bmatrix} u_v \\ u \end{bmatrix} = -M^{-1} N \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u \end{bmatrix} - M^{-1} \begin{bmatrix} Av \\ v^T v - 1 \end{bmatrix}, \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} w_v \\ w \end{bmatrix} = M^{-1} \begin{bmatrix} [f \ g]^T \\ 0 \end{bmatrix} - M^{-1} N \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ w \end{bmatrix}. \quad (22)$$

由式(20)可解出辅助变量

$$= \frac{u}{1-w} \quad (23)$$

式(23)代入式(17)和(20),便可求解得到 x, y, v .

以上分析过程在每一步迭代中,只需分解 $(n+m+1) \times (n+m+1)$ 阶矩阵 M , 它比原 Moore-Spence 系统 $(2n+2m+1) \times (2n+2m+1)$ 阶 Jacobi 矩阵规模要小得多,这对于提高大型电力系统分岔点的计算效率是很重要的.

4 电力系统潮流方程鞍结点的计算

在电力系统电压稳定性分析中,首先追踪给出的系统模型在参数变化时的平衡解曲线,称为解的延拓.对于含有 N 个节点的电力系统,其单参数追踪潮流方程的数学模型可表示为

$$P(V, \delta) = 0, Q(V, \delta) = 0. \quad (24)$$

其中: $V \in R^N$ 和 $\delta \in R^N$ 分别表示节点电压和相角; $P, Q \in R^N$ 表示负荷有功和无功潮流方程,它们是节点电压和相角的函数.

式(24)是各种电力系统模型潮流追踪问题的统一表达形式.在鞍结分岔点处,与零特征值对应的右特征向量 u 满足

$$\begin{bmatrix} P_V & P \\ Q_V & Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_P \\ u_Q \end{bmatrix} = 0. \quad (25)$$

其中: $u_P, u_Q \in R^N$ 为与 Jacobi 矩阵的有功和无功部分对应的子特征向量,表明分岔点处 Jacobi 矩阵是奇异的.为了得到唯一的特征向量,要求

$$u_P^T u_P + u_Q^T u_Q = 1. \quad (26)$$

式(24)~(26)构成了决定电力系统鞍结分岔点的 Moore-Spence 系统.按照 3.2 节的矩阵降阶算法求解方程组,便可得到系统的鞍结分岔点.

5 算例分析

本节对一简单电压稳定系统的微分代数模型,利用第 3 节 Moore-Spence 扩展方程的矩阵降阶法,直接求得系统发生鞍结分岔时的参数值.所研究系统为一台发电机通过输电线路对一负荷供电,如图 1 所示,图中控制装置是励磁控制器.该系统是 Zaborsky 研究组在分析电压稳定中分岔现象的主要研究对象^[14].

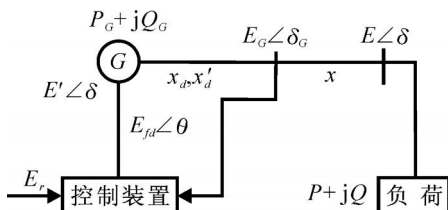


图 1 电路系统示意

系统微分代数方程为

$$\begin{cases} \dot{E} = \frac{1}{T_{\infty}} \left(\frac{x+x_d}{x} E + \frac{x_d - x_d E^2 + xQ}{x E} + E_{fd} \right), \\ \dot{E}_{fd} = \frac{1}{T} \left\{ - (E_{fd} - E_{fd}^0) - k \left[\frac{1}{E} \sqrt{(xP)^2 + (xQ + E^2)^2} - E_r \right] \right\}, \\ 0 = E^2 E^2 - (xP)^2 - (xQ + E^2)^2. \end{cases} \quad (27)$$

系统各变量的含义及上述方程的推导可参阅文献 [14]. 其中各参数的初值如下:

$$\begin{aligned} T_{\infty} &= 5.0, E_{fd}^0 = 1.6, E_r = 1.0, \\ x_d &= 1.2, x_d = 0.2, T = 1.2, \\ x &= 0.1, k = 7.5, P = 0.7. \end{aligned}$$

选取负荷的有功 P 作为可变参数,且在有功功率 P 变化过程中,负荷的无功与有功的比值 $Q/P = 0.5$ 保持不变.利用 3.2 节的矩阵降阶法求解系统(27)的 Moore-Spence 扩展方程,可直接得到系统发生鞍结分岔时的参数值为 1.366.利用 Matlab 作图追踪计算方程(27)的解曲线随可变参数 P 的变化情况,结果如图 2 所示.

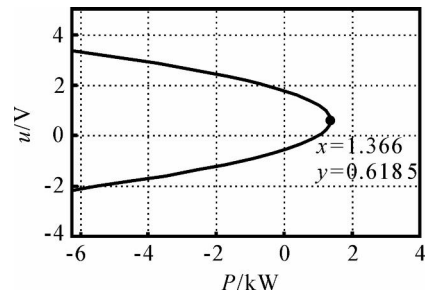


图 2 系统(27)的平衡解曲线

由图 2 可见,求解 Moore-Spence 扩展方程所得结果与作图结果完全一致,数值仿真证实了本文所提出方法对于求解微分代数电力系统模型鞍结分岔点的有效性.

6 结 论

对于电力系统模型,鞍结分岔是引起电压失稳的重要原因之一.本文通过引入辅助变量和辅助方程,建立了 Moore-Spence 扩展方程,针对 Moore-Spence 方程提出了矩阵降阶新算法.即将 Newton 迭代法中高维线性方程组简化为两个小规模的方程组,以便求得鞍结分岔点.该方法解决了潮流方程 Jacobi 矩阵奇异的问题,克服了 Moore-Spence 系统高维求解的困难,并且计算量小,计算速度快.对于大型电力系统求解鞍结分岔点,该降阶技术是一种简单、快速且行之有效的办法.

参考文献(References)

- [1] Govaerts W. Numerical method for bifurcation of dynamic equilibria[M]. Philadelphia: SIAM, 1999.
- [2] Kwanty H G, Fischl R F, Local bifurcation in power system: Theory, computation and application[J]. Proc of the IEEE, 1995, 83(11): 1456-1483.
- [3] 彭志炜. 基于分岔理论的电力系统电压稳定性分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
(Peng Zhi-wei. Analysis on power voltage stability based on bifurcation theory[M]. Beijing: Chinese Power Press, 2005.)
- [4] 余贻鑫. 电压稳定研究述评[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(21): 1-8.
(Yu Yi-xin. Review on voltage stability studies [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(21): 1-8.)
- [5] 王庆红, 周双喜, 胡国根. 电力系统静态分岔及其控制[J]. 电网技术, 2004, 28(13): 6-12.
(Wang Qing-hong, Zhou Shuang-xi, Hu Guo-gen. Steady state bifurcation of electric power system and its control[J]. Power System Technology, 2004, 28(13): 6-12.)
- [6] 李宏仲, 程浩忠, 朱振华, 等. 分岔理论在电力系统电压稳定研究中的应用述评[J]. 继电器, 2006, 34(4): 69-73.
(Li Hong-zhong, Cheng Hao-zhong, Zhu Zhen-hua, et al. Review on application of bifurcation theory in power system voltage stability[J]. Relay, 2006, 34(4): 69-73.)
- [7] 刘永强, 严正, 倪以信, 等. 基于辅助变量的潮流方程二次转折分岔点的直接算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 9-13.
(Liu Yong-qiang, Yan Zheng, Ni Yi-xin, et al. An auxiliary variable based direct method for computing quadratic turning bifurcation points of power flow equations[J]. Proc of the CSEE, 2003, 23(5): 9-13.)
- [8] Jean Jumeau R, Chiang H D. Parameterizations of load flow equation for eliminating ill-conditioning load flow solution[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(3): 1004-1012.
- [9] 王成山, 江伟, 江晓东. 一种新的电力系统鞍型分岔点计算方法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(8): 20-24.
(Wang Cheng-shan, Jiang Wei, Jiang Xiao-dong. A new computation method for saddle node bifurcation point of power system[J]. Proc of the CSEE, 1999, 19(8): 20-24.)
- [10] Krstic M, Fontaine D, Kokotovic P V, et al. Useful nonlinearities and global stabilization of bifurcation in a model of jet engine surge and stall[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1998, 43(12): 1739-1745.
- [11] Wang H O, Chen D, Chen G R. Bifurcation control of pathological heart rhythms[C]. Proc of IEEE Conf on Control Applications. Trieste, 1998, 12: 858-862.
- [12] Venkatasubramanian V, Schättler H, Zaborszky J. Local bifurcations and feasibility regions in differential-algebraic systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1995, 40(12): 1992-2013.
- [13] 曹国云, 刘丽霞, 赵亮, 等. 基于延拓法的电力系统稳定模型中二维参数局部分岔边界的计算[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 13-16.
(Cao Guo-yun, Liu Li-xia, Zhao Liang, et al. Continuation method to trace two-parameter local bifurcation segment in power systems electromechanical stability model [J]. Proc of the CSEE, 2005, 25(8): 13-16.)
- [14] Venkatasubramanian V, Schättler H, Zaborszky J. Voltage dynamics: Study of a generator with voltage control, transmission and matched MW load[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1992, 37(11): 1717-1733.

下 期 要 目

- 熵在决策分析中的应用综述 周荣喜, 等
- 服务网络中基于请求生命期的资源预留方法和策略 梁 泉, 等
- 基于步进均值子时段 MPLS 的荒管质量预测模型研究 肖 冬, 等
- 动态电源管理超时策略自适应优化算法 江 琦, 等
- 非线性系统的输入多采样率模糊优化控制 蒋 林, 等
- 基于稳定匹配的电子中介匹配研究 张振华, 等
- 一种基于样本评价集群竞争环境与组合效率的方法 马占新
- 非线性离散系统的信息融合最优预见控制 王志胜