

文章编号: 1001-0920(2007)04-0403-05

电力系统微分代数模型耗散 Hamilton 实现

刘艳红^{1,2}, 李春文¹

(1. 清华大学 自动化系, 北京 100084; 2. 郑州大学 电气工程学院, 郑州 450001)

摘要: 对非线性微分代数模型电力系统的耗散 Hamilton 实现问题进行了研究. 首先提出了非线性微分代数系统的耗散 Hamilton 实现结构, 给出了完成常值耗散 Hamilton 实现的充分条件; 然后证明单机单负荷电力系统必然存在耗散 Hamilton 实现, 并构造出系统的一个耗散 Hamilton 实现.

关键词: 非线性微分代数系统; 单机单负荷电力系统; 耗散 Hamilton 实现

中图分类号: TP13; TM 76

文献标识码: A

Dissipative Hamiltonian realization of power systems with nonlinear differential algebraic system model

LIU Yan-hong^{1,2}, LI Chun-wen¹

(1. Automation Department of Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China. Correspondent: LIU Yan-hong, E-mail: liuyh99@mails.tsinghua.edu.cn)

Abstract: A dissipative Hamiltonian realization (DHR) problem is investigated for the power system presented by nonlinear differential algebraic system model. A DHR formulation is presented for nonlinear differential algebraic systems. A sufficient condition to complete DHR with constant structure matrix is proposed. It is proved that the DHR exists in a single-machine single-load power system, and the DHR formulation for the power system is constructed.

Key words: Nonlinear differential algebraic systems; Single-machine single-load power systems; Dissipative Hamiltonian realization

1 引言

很多大型复杂系统, 包括电力系统^[1-3]、机器人系统^[4,5]、化工过程^[6]等均包含若干动态子系统和静态子系统, 其中各动态子系统除了分别具有各自的动态特性之外, 还与其他子系统存在复杂的联系和制约. 由于动态子系统的特性一般用微分方程来描述, 而静态子系统以及各子系统之间的联系和制约用代数方程来描述, 这些系统的数学模型是由动态模型和静态模型组成的混合模型——微分代数模型. 对电力系统, 如果假设所有的负荷均为恒阻抗负荷, 则可以把微分代数系统模型电力系统化为微分方程系统, 但是当考虑实际负荷的非线性特性时不能实现模型化简^[1].

近年来, Hamilton 函数方法在电力系统稳定性分析和控制中受到越来越多的重视^[7-12]. 该方法的

优点是在控制器设计过程中能充分利用系统内在的结构性质, 所设计的控制器结构简单, 易于实现. 在采用 Hamilton 函数方法对系统进行分析与设计时, 一个关键的步骤是把所研究的系统表示为耗散 Hamilton 系统, 即完成系统的耗散 Hamilton 实现. 目前电力系统微分方程模型的 Hamilton 实现以及基于系统 Hamilton 实现的分析与控制研究已取得了不少成果. Cheng 等^[8,9]完成了三阶模型和五阶模型单机无穷大系统的 Hamilton 实现, 并设计了镇定控制器. Xi 等^[10]对多机系统提出一种伪 Hamilton 实现, 并设计了期望的控制器. Sun 等^[11]也提出了一种新的 Hamilton 函数构造方法. Wang 等^[12]还研究了多机系统的反馈耗散实现, 并设计了控制器以提高系统动态性能. 但对更具普遍意义的微分代数模型电力系统的耗散 Hamilton 实现问题

收稿日期: 2006-01-16; 修回日期: 2006-04-19.

基金项目: 国家自然科学基金项目(69774011, 69934010); 国家重点基础研究专项基金项目(G1998020307).

作者简介: 刘艳红(1970—), 女, 河南孟州人, 博士, 从事非线性微分代数系统控制、电力系统控制等研究; 李春文(1957—), 男, 河南武陟人, 教授, 博士生导师, 从事非线性控制、电力系统控制等研究.

目前还没有得到研究。

本文考虑了电力系统微分代数模型的耗散 Hamilton 实现问题. 首先对非线性微分代数系统提出一种耗散 Hamilton 实现结构, 基于该结构能方便地完成系统稳定性分析和控制器综合. 对常值实现问题, 即结构矩阵为定常矩阵的 Hamilton 实现问题, 给出了能够完成 Hamilton 实现的充分条件; 然后通过一种典型的单机单负荷电力系统, 证明了虽然不能直接完成系统的耗散 Hamilton 实现, 但通过变量转换后必然存在耗散 Hamilton 实现. 本文还进一步构造出了单机单负荷电力系统的一个耗散 Hamilton 实现.

2 非线性微分代数系统的 Hamilton 实现

完整的电力系统控制数学模型可以表示为如下的非线性微分代数系统:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, z) + g(x, z)u, \\ 0 = (x, z). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x \in X \subset R^n$ 是状态变量; $z \in Z \subset R^s$ 是代数变量; $u \in U \subset R^r$ 是控制量; $f(\cdot), g(\cdot), (\cdot)$ 是适当维数的充分可微向量函数. 对电力系统, 典型的状态变量包括发电机动态、励磁控制动态、负荷动态以及电力电子装置动态变量, 典型的代数变量包括系统中母线电压幅值和相角变量. 在正常运行条件下, 电力系统微分代数模型(1) 满足指数 1 特性, 即 $\nabla_z(x, z)$ 在运行点邻域内满秩.

定义 1 如果存在连续可微函数 $H(x, z)$, 使得非线性微分代数系统(1) 可表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = (J(x, z) - R(x, z)) \nabla_x H(x, z) + g(x, z)u, \\ 0 = (x, z) = \nabla_z H(x, z). \end{cases} \quad (2)$$

其中: $J(x, z)$ 为反对称矩阵, $R(x, z)$ 为半正定矩阵. 则系统(2) 称为非线性微分代数系统(1) 的耗散 Hamilton 实现. 进一步, 如果 $R(x, z)$ 为正定矩阵, 则系统(2) 称为非线性微分代数系统(1) 的严格耗散 Hamilton 实现. 相应地, $H(x, z)$ 称为 Hamilton 函数. 令 $T(x, z) = J(x, z) - R(x, z)$. $T(x, z)$ 称为结构矩阵. 耗散 Hamilton 实现的一种典型而重要的情形是 $T(x, z)$ 中各元素为常数, 这时式(2) 称为常值 Hamilton 实现.

如果一个非线性微分代数系统能够表示为耗散 Hamilton 系统, 则其在一定条件下能够容易地完成系统稳定性分析, 并根据需要完成控制器设计以提高系统性能. 事实上, Hamilton 函数沿系统轨线的导数为

$$\begin{aligned} \dot{H}(x, z) = & \\ & - (\nabla_x H(x, z))^T R(x, z) \nabla_x H(x, z) + \end{aligned}$$

$$(\nabla_z H(x, z))^T g(x, z)u. \quad (3)$$

如果 Hamilton 函数在平衡点某邻域内正定, 则可以选择其作为系统的 Lyapunov 函数. 当输入为零时, 有 $\dot{H}(x, z) = 0$, 根据指数 1 非线性微分代数系统的 LaSalle 不变集原理^[13], 可知非线性微分代数系统是稳定的. 进一步, 如果集合 $S = \{(x, z) \in M / \dot{H}(x, z) = 0, (x, z) = 0\}$ 仅包含平衡点, 则系统是渐近稳定的.

根据定义 1, 要完成微分代数系统的耗散 Hamilton 实现, 需要找到合适的 $n \times n$ 矩阵 $T(x, z)$ 及函数 $H(x, z)$, 使得

$$\begin{cases} T(x, z) \nabla_x H(x, z) = f(x, z), \\ \nabla_z H(x, z) = (x, z). \end{cases} \quad (4)$$

在 $T(x, z)$ 可逆条件下, 根据 Poincare 引理, 存在连续函数 $H(x, z)$ 满足矩阵方程(4) 的充要条件是如下的可积性条件成立:

$$\nabla_{(x,z)} K(x, z) = [\nabla_{(x,z)} K(x, z)]^T, \quad (5)$$

其中

$$K(x, z) = \begin{bmatrix} T(x, z) & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} f(x, z) \\ (x, z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T^{-1}(x, z) f(x, z) \\ (x, z) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

对常值 Hamilton 实现, 有如下结论:

定理 1 非线性微分代数系统(1) 存在一个常值实现的充分条件是如下矩阵方程成立:

$$\begin{cases} T^{-1} \nabla_x f(x, z) = (\nabla_x f(x, z))^T T^{-T}, \\ T^{-1} \nabla_z f(x, z) = (\nabla_z (x, z))^T, \\ \nabla_z (x, z) = (\nabla_z (x, z))^T, \end{cases} \quad (7)$$

并且常数矩阵 T 可以分解为 $T = J - R$, 其中 J 为反对称矩阵, R 为半正定矩阵.

证明 因结构矩阵为常数矩阵, 式(5) 可化为

$$\begin{bmatrix} T^{-1} \nabla_x f(x, z) & T^{-1} \nabla_z f(x, z) \\ \nabla_z (x, z) & \nabla_z (x, z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\nabla_x f(x, z))^T T^{-T} & (\nabla_z (x, z))^T \\ (\nabla_z f(x, z))^T T^{-T} & (\nabla_z (x, z))^T \end{bmatrix}. \quad (8)$$

式(8) 即为式(7). 再考虑到矩阵 T 的分解形式, 定理得证.

定理 1 表明了微分代数系统存在常值 Hamilton 实现时, 向量函数 $f(x, z)$, (x, z) 以及结构矩阵 T 之间必须满足的关系, 依据该条件还可以确定结构矩阵. 下面将根据这个关系来判断单机单负荷电力系统是否存在 Hamilton 实现, 如果存在, 则构造出系统的一个 Hamilton 实现.

3 电力系统非线性微分代数模型

考虑图 1 所示由无损耗传输线连接的单机单负

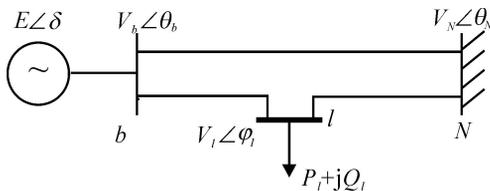


图 1 单机单负荷电力系统结构图

荷电力系统,其中 b 为同步电机机端母线, l 为负荷母线, N 为无穷大母线.

选取无穷大母线作为参考节点,即令 $V_N = 1 \angle 0$. 假定同步电机采用单轴模型,且系统负荷为恒功率负荷,即有功功率 P_l 和无功功率 Q_l 为恒值,则整个系统的数学模型由发电机动态方程和母线上的有功功率及无功功率平衡方程共同组成.

(1) 同步电机动态方程如下:

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega(\delta - 1), \\ \dot{\omega} = \frac{1}{H}(P_m - P_e) - \frac{D}{H}\omega(\delta - 1), \\ \dot{E}_q = \frac{x_d - x_d'}{T_{d0}}K(\delta, E_q, V_b, V_l, V_l) + \frac{1}{T_{d0}}V_f. \end{cases} \quad (9)$$

其中

$$P_e(\delta, E_q, V_b, V_l, V_l) = \frac{x_d - x_q}{2x_d x_q} V_b^2 \sin 2(\delta - \theta_b) + \frac{1}{x_d} E_q V_b \sin(\delta - \theta_b), \quad (10)$$

$$K(\delta, E_q, V_b, V_l, V_l) = \frac{x_d}{x_d(x_d - x_d')} E_q + \frac{1}{x_d} V_b \cos(\delta - \theta_b). \quad (11)$$

(2) 同步电机机端母线以及负荷母线上的功率平衡方程如下:

$$\begin{aligned} 0 &= g_b(\delta, E_q, V_b, V_l, V_l) = \\ &= -\frac{x_d - x_q}{2x_d x_q} V_b^2 \sin(2(\delta - \theta_b)) - \\ &= \frac{1}{x_d} E_q V_b \sin(\delta - \theta_b) + B_{bN} V_b \sin(\delta - \theta_b) + \\ &= B_{bl} V_b V_l \sin(\theta_l - \theta_b), \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} 0 &= h_b(\delta, E_q, V_b, V_l, V_l) = \\ &= \frac{x_d + x_q}{2x_d x_q} V_b^2 - \frac{1}{x_d} E_q V_b \cos(\delta - \theta_b) - \\ &= \frac{x_d - x_q}{2x_d x_q} V_b^2 \cos(2(\delta - \theta_b)) - B_{bb} V_b^2 - \\ &= B_{bN} V_b \cos(\delta - \theta_b) - B_{bl} V_b V_l \cos(\theta_l - \theta_b), \end{aligned} \quad (13)$$

$$0 = g_l(\delta, E_q, V_b, V_l, V_l) = B_{lb} V_l V_b \sin(\theta_l - \theta_b) + B_{lN} V_l \sin(\theta_l - \theta_N) - P_l, \quad (14)$$

$$\begin{aligned} 0 &= h_l(\delta, E_q, V_b, V_l, V_l) = \\ &= -B_{ll} V_l^2 - B_{lb} V_l V_b \cos(\theta_l - \theta_b) - \\ &= B_{lN} V_l \cos(\theta_l - \theta_N) - Q_l. \end{aligned} \quad (15)$$

其中: ω 为发电机的角速度, $\omega_0 = 2f_0$; P_m 为同步电机的输入机械功率,本文假定其为常数; P_e 为同步电机输出的电磁功率; H 和 D 分别为发电机的转子转动惯量和阻尼系数; x_d 和 x_q 分别为 d 轴和 q 轴同步电抗; x_d' 为 d 轴暂态电抗, $x_d > x_d'$; T_{d0} 为 d 轴暂态开路时间常数; E_q 为 q 轴次暂态电势; V_f 为同步电机励磁电压; V_b 、 V_l 和 V_N 分别为母线 b 和 l 的电压相量. $B_{ij}(i, j = b, l, N)$ 为节点导纳.

方程(9) ~ (16) 构成了单机单负荷电力系统控制数学模型. 令

$$x = (\delta, \omega, E_q)^T, z = (V_b, V_l, V_l)^T, u = V_f,$$

$$f(x, z) = \begin{bmatrix} \omega(\delta - 1) \\ \frac{1}{H}(P_m - P_e) - \frac{D}{H}\omega(\delta - 1) \\ \frac{x_d - x_d'}{T_{d0}}K(x, z) \end{bmatrix},$$

$$g(x, z) = \begin{bmatrix} g_b(x, z) \\ h_b(x, z) \\ g_l(x, z) \\ h_l(x, z) \end{bmatrix}, \quad g(x, z) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_{d0}} \end{bmatrix},$$

则单机单负荷电力系统可以表示为式(1)所示的标准微分代数系统.

4 单机单负荷电力系统耗散 Hamilton 实现

直接验证可知 $\nabla_z(x, z) = (\nabla_z(x, z))^T$, 即单机单负荷电力系统不能直接表示为 Hamilton 系统. 主要原因在于对母线电压幅值变量求偏导时,会造成对应项阶数的降低. 为了解决该问题,需要对母线电压幅值变量进行变量变换. 考虑到对实际电力系统总有 $V_b, V_l > 0$, 可令 $v_b = \ln V_b, v_l = \ln V_l$, 同时令 $z = (v_b, v_b, v_l, v_l)^T$, 则可以验证

$$\nabla_z(x, z) = (\nabla_z(x, z))^T. \quad (16)$$

又因为

$$\nabla_z f(x, z) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{H}a_{21} & -\frac{1}{H}a_{22} & 0 & 0 \\ \frac{x_d - x_d'}{T_{d0}}\alpha_{31} & \frac{x_d - x_d'}{T_{d0}}\alpha_{32} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$\nabla_x(x, z) = \begin{bmatrix} a_{21} & 0 & -a_{31} \\ a_{22} & 0 & -a_{32} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

其中

$$\begin{aligned} a_{21} &= -\frac{x_d - x_q}{x_d x_q} e^{2v_b} \cos 2(\delta - \theta_b) - \\ &= \frac{1}{x_d} E_q e^{v_b} \cos(\delta - \theta_b), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a_{22} &= \frac{x_d - x_q}{x_d x_q} e^{2v_b} \sin 2(\delta - \beta) + \\
 &\quad \frac{1}{x_d} E_q e^{v_b} \sin(\delta - \beta), \\
 a_{31} &= \frac{1}{x_d} e^{v_b} \sin(\delta - \beta), \\
 a_{32} &= \frac{1}{x_d} e^{v_b} \cos(\delta - \beta).
 \end{aligned}$$

从而有

$$\frac{\partial f(x, z)}{\partial z} = T \left(\frac{\partial f(x, z)}{\partial x} \right)^T, \quad (19)$$

其中

$$T = \begin{bmatrix} 0 & t_1 & 0 \\ -\frac{1}{H} & t_2 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{x_d - x_q}{T_{d0}} \end{bmatrix},$$

t_1, t_2 为待定参数. 当 $t_1 = 1/H$ 时, 矩阵 T 可分解为 $T = J - R$, 其中

$$J = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{H} & 0 \\ -\frac{1}{H} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (20)$$

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -t_2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{x_d - x_q}{T_{d0}} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

下面确定参数 t_2 , 并使得 $T^{-1} \nabla_x f(x, z)$ 为对称矩阵. 由于

$$\nabla_x f(\cdot) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{H} \frac{\partial P}{\partial \delta} & -\frac{D}{H} & -\frac{1}{H} \frac{\partial P}{\partial E_q} \\ -\frac{x_d - x_q}{T_{d0}} \frac{\partial K}{\partial \delta} & 0 & -\frac{x_d - x_q}{T_{d0}} \frac{\partial K}{\partial E_q} \end{bmatrix}, \quad (22)$$

要使 $T^{-1} \nabla_x f(x, z) = (T^{-1} \nabla_x f(x, z))^T$, 须有 $t_2 = -D/H^2$. 至此可得到结构矩阵

$$T = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{H} & 0 \\ -\frac{1}{H} & -\frac{D}{H^2} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{x_d - x_q}{T_{d0}} \end{bmatrix}, \quad (23)$$

并且

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{D}{H^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{x_d - x_q}{T_{d0}} \end{bmatrix}. \quad (24)$$

矩阵(20)所示 J 为反对称矩阵, 由于 $x_d > x_q$, R 为半正定矩阵.

综合上述讨论, 根据定理1可知单机单负荷电力系统必存在耗散 Hamilton 实现. 下面构造单机单负荷系统的耗散 Hamilton 实现.

考虑函数

$$H(\delta, \omega, E_q, \beta, v_b, \delta_l, v_l) = \frac{1}{2} H_0 (\omega - 1)^2 + P(\delta, E_q, \beta, v_b, \delta_l, v_l), \quad (25)$$

其中

$$\begin{aligned}
 P(\delta, E_q, \beta, v_b, \delta_l, v_l) &= \\
 &= -P_m - P_l - Q_l v_l - \frac{E_d e^{v_b} \cos(\delta - \beta)}{x_d} - \\
 &= \frac{e^{2v_b}}{4} \frac{e^{2v_b} (x_d - x_q) \cos 2(\delta - \beta) - (x_d + x_q)}{x_d x_q} - \\
 &= B_{bb} \frac{e^{2v_b}}{2} - B_{bN} e^{v_b + v_l} \cos(\beta - \delta_l) + \\
 &= \frac{E_d 2 x_d}{x_d (x_d - x_q)} - B_{bN} e^{v_b} \cos \beta - \\
 &= B_{lN} e^{v_l} \cos \delta_l - \frac{1}{2} B_{ll} e^{2v_l}. \quad (26)
 \end{aligned}$$

$H(\cdot)$ 关于 x 和 z 的偏导数分别为

$$\nabla_x H(\cdot) = \begin{bmatrix} -P_m + P_e \\ H_0 (\omega - 1) \\ -K(\cdot) \end{bmatrix}, \quad \nabla_z H(\cdot) = \begin{bmatrix} g_b(\cdot) \\ h_b(\cdot) \\ g_l(\cdot) \\ h_l(\cdot) \end{bmatrix}.$$

故

$$\nabla_x H(\cdot) = Tf(\cdot), \quad \nabla_z H(\cdot) = f(\cdot).$$

至此可得到单机单负荷电力系统的一个耗散 Hamilton 实现, 其结构矩阵如结构(23)所示, 相应的 Hamilton 函数如式(25)所示. 该 Hamilton 函数具有明确的物理意义: 其中的第1项 $\frac{1}{2} H_0 (\omega - 1)^2$ 表示电力系统中的动能, 而 $P(\cdot)$ 表示系统中的势能, 所以 Hamilton 函数(25)表示了单机单负荷电力系统的总能量.

5 结 语

本文研究了电力系统微分代数模型的耗散 Hamilton 实现问题. 首先对非线性微分代数系统提出一种耗散 Hamilton 实现结构, 给出了系统完成常值 Hamilton 实现的充分条件. 基于该条件, 针对能够完成耗散 Hamilton 实现的微分代数系统, 可以构造出 Hamilton 实现的结构矩阵. 然后, 针对单机单负荷电力系统, 证明了系统必存在耗散 Hamilton 实现, 并构造出一个 Hamilton 实现形式. 本文提出的电力系统微分代数模型 Hamilton 实现, 能够为稳定性分析和控制器设计提供便利.

参考文献(References)

- [1] Bergen A R, Hill D J. A structure preserving model for power system stability analysis [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and System, 1981, 100: 25-35.
- [2] Vaithianathan Venkatasubramanian, Heinz Schattler, John Zarorszky. Dynamics of large constrained nonlinear systems — A taxonomy theory[J]. Proc of the IEEE, 1995, 83(11): 1530-1561.
- [3] Denis Lee Hau Aik, Goran Andersson. Nonlinear dynamics in HVDC systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(4): 1417-1425.
- [4] Harris McClamloch, Danwei Wang. Feedback stabilization and tracking of constrained robots [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1988, 33(5): 419-426.
- [5] Krishnan H, McClamloch N H. Tracking in nonlinear differential algebraic control systems with application to constraint robot systems [J]. Automatica, 1994, 30(12): 1885-1897.
- [6] Kumar A, Daoutidis P. Feedback control of nonlinear differential algebraic equation systems [J]. AIChEJ, 1995, 41(4): 619-636.
- [7] Ortega R, Van der Schaft A J, Maschke B, et al. Interconnection and damping assignment passivity-based control of port-controlled Hamiltonian systems [J]. Automatica, 2002, 38(4): 585-596.
- [8] Cheng D, Xi Z, Hong Y, et al. Energy-based stabilization in power systems [C]. Proc of the 14th IFAC World Congress. Beijing, 1999: 297-303.
- [9] Wang Y, Cheng D, Hong Y. Stabilization of synchronous generators with Hamiltonian function approach[J]. Int J of Systems Science, 2001, 32(8): 971-978.
- [10] Xi Z, Cheng D, Lu Q, et al. Nonlinear decentralized controller design for multimachine power systems using Hamiltonian function method[J]. Automatica, 2002, 38(3): 527-534.
- [11] Sun Y, Shen T, Ortega R, et al. Decentralized controller design for multi-machine power systems on Hamiltonian structure[C]. Proc of the 40th IEEE Conf on Decision and Control. Orlando, 2001: 3045-3050.
- [12] Wang Y Z, Cheng D Z, Liu Y H, et al. Adaptive H excitation control of multimachine power systems via the Hamiltonian function method[J]. Int J of Control, 2004, 77(4): 336-350.
- [13] Wang H S, Yung C F, Chang F R. H control for nonlinear descriptor systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2002, 47(11): 1919-1925.

(上接第 402 页)

参考文献(References)

- [1] Kuster T. Advances in strip-casting carbon and stainless [J]. New Steel, 1996, 7(11): 68-76.
- [2] 刘青荣, 宋锦春, 张志伟. 液压传动[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.
(Liu Q R, Song J C, Zhang Z W. Hydraulic transmission[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1999).
- [3] 刘长年. 液压伺服系统优化设计理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1989.
(Liu C N. The theory of hydraulic servo system optimum design [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1989.)
- [4] 王春行. 液压伺服控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
(Wang C X. Hydraulic servo control system [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1989.)
- [5] 臧怀泉, 发黄镇海, 尹汝波. 液压伺服系统建模的新方法[J]. 计算机仿真, 2002, 19(5): 53-55.
(Zang H Q, Huang Z H, Yin R P. A new method for modeling the hydraulic servo system [J]. Computer Simulation, 2002, 19(5): 53-55.)
- [6] 王伟, 郭戈, 柴天佑. 连铸过程的建模与控制[J]. 控制与决策, 1997, 12(增刊): 1-6.
(Wang W, Guo G, Chai T Y. Modeling and control of continuous casting process [J]. Control and Decision, 1997, 12(S): 1-6.)
- [7] Michel D, Sylvie G, Laurent P F. Application of fuzzy logic control for continuous casting mold level control [J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 1998, 6(2): 246-256.
- [8] 郭戈, 王伟, 柴天佑, 等. 连铸过程自动化技术综述[J]. 冶金自动化, 1998, 26(2): 1-4.
(Guo G, Wang W, Cai T Y, et al. On automation technologies in continuous casting process [J]. Metallurgical Industry Automation, 1998, 26(2): 1-4.)
- [9] 王国栋, 刘相华. 金属轧制过程人工智能优化[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
(Wang G D, Liu X H. Intelligent optimization in metal rolling [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000.)
- [10] 张殿华. 热带钢连轧活套和张力的智能控制[D]. 沈阳: 东北大学, 2003.
(Zhang D H. Looper and tension intelligent control for a hot strip mill [D]. Shenyang: Northeastern University, 2003.)
- [11] 薛定宇, 陈阳泉. 基于 Matlab/Simulink 的系统仿真技术与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
(Xue D Y, Chen Y Q. System simulink technique and application based on Matlab/Simulink [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.)