

计算机代数在电力系统非线性控制中应用

王 旻, 郑应平

(同济大学 控制科学与工程系, 上海 200092)

摘要: 阐述了精确线性化的原理, 讨论了非线性系统状态反馈精确线性化的计算机代数设计方法, 采用 Matlab 完成了相应软件包的开发, 并使用该软件包对电力系统中汽轮发电机组汽门开度的非线性控制实例进行了仿真研究。仿真结果表明, 引入了设计得到的非线性控制量后, 电力系统的稳定性得到了有效提高。

关键词: 非线性控制; 计算机代数; 电力系统

中图分类号: TM 712; TP 273

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)04-0015-03

实际电力系统多为非线性系统, 其控制较困难。近 20 年来, 非线性控制理论与应用研究取得了较大进展, 特别是以微分几何为工具的精确线性化方法受到普遍重视, 并得到了广泛应用^[1-2]。以微分几何为工具的精确线性化方法有许多优点, 但在应用中往往涉及到复杂的符号运算。为了将精力集中在对系统的分析上而不是运算、推导上, 一套相应的计算机辅助分析和设计工具是必要的, 其采用的是计算机代数的方法, 即通过计算机进行表达式、方程、公式等数学符号的运算, 实现了符号运算的“计算机化”^[3]。

本文用计算机代数的方法对非线性系统进行状态反馈精确线性化的分析和设计。采用 Matlab 中的符号运算语言, 开发出非线性系统状态反馈精确线性化方法的计算机代数软件包, 并用其分析和设计了电力系统中汽轮发电机组汽门开度的非线性控制。

1 精确线性化原理

设讨论的非线性系统为

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})u \quad (1)$$

式中 $\mathbf{x} \in R^n$ 为状态向量; $u \in R^1$ 为输入控制量; $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ 和 $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ 为状态空间中 n 维向量场。

该系统在 $\mathbf{x}_0$ 点处状态反馈精确线性化问题^[4]是指: 存在 $\mathbf{x}_0$ 点的一个邻域 U , 反馈控制 $u = \alpha(\mathbf{x}) + \beta(\mathbf{x})v$ 及 U 到 R^n 开集的微分同胚 $\mathbf{z} = \Phi(\mathbf{x})$, 使反馈系统

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})\alpha(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})\beta(\mathbf{x})v \quad (2)$$

变为一个完全能控的线性系统^[5-6]

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}\mathbf{z} + \mathbf{B}v \quad (3)$$

$$\mathbf{A}_{n \times n} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I}_{n-1} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{n \times 1} = [0 \cdots 0 \quad 1]^T$$

式中 v 为新的输入量。

该系统在 $\mathbf{x}_0$ 点处状态反馈精确线性化问题可

解的充要条件^[7]是:

a. 矩阵 $[\mathbf{g}(\mathbf{x}) \quad \text{ad}_f \mathbf{g}(\mathbf{x}) \cdots \text{ad}_f^{n-2} \mathbf{g}(\mathbf{x}) \quad \text{ad}_f^{n-1} \mathbf{g}(\mathbf{x})]$, 对于在 $\mathbf{x}_0$ 附近的所有 $\mathbf{x}$, 其秩不变且等于 n ;

b. 向量场集合 $D = \{\mathbf{g}(\mathbf{x}), \text{ad}_f \mathbf{g}(\mathbf{x}), \text{ad}_f^2 \mathbf{g}(\mathbf{x}), \cdots, \text{ad}_f^{n-2} \mathbf{g}(\mathbf{x})\}$ 在 $\mathbf{x} = \mathbf{x}_0$ 处是对合的。

2 计算机代数软件包设计

从上述原理可知, 非线性控制系统的状态反馈精确线性化方法涉及到复杂的符号运算, 为了将精力集中在对系统的分析上而不是运算、推导上, 可采用计算机代数的方法简化这一过程。

根据前面介绍的非线性系统状态反馈精确线性化的原理, 采用 Matlab 中的符号运算语言, 开发出非线性系统状态反馈精确线性化的计算机代数软件包 NSEL^[8], 该软件包分为基本函数模块 BASIC、系统函数模块 SYSTEM 2 部分, 下面介绍各模块中的函数。

2.1 基本函数模块 BASIC

基本函数模块中的函数为微分几何运算中的基本函数, 由 2 个函数组成。

a. lx: 计算标量函数 $w(\mathbf{x})$ 对向量场 $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = [f_1, \cdots, f_n]^T$ 的李导数。

b. adx: 计算向量场 $\mathbf{g}(\mathbf{x}) = [g_1, \cdots, g_n]^T$ 对向量场 $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = [f_1, \cdots, f_n]^T$ 的李括号。

2.2 系统函数模块 SYSTEM

系统函数模块用于分析和设计非线性系统式 (1), 由 5 个函数组成。其中, con1 用于判断精确线性化条件 1 是否成立; con2 用于判断精确线性化条件 2 是否成立; x2z 用于计算坐标变换 $\mathbf{z} = \Phi(\mathbf{x})$; getv 用于计算二次型线性最优控制设计得到的线性系统输入量 v ; getu 用于计算非线性状态反馈控制规律 u 。

3 软件包应用实例

应用该软件包中的函数, 可对一类非线性系统进

行状态反馈精确线性化的分析和设计。以电力系统中汽轮发电机组汽门开度的非线性控制为例说明。

3.1 计算机代数设计

某单机无穷大系统中汽轮发电机组主调节汽门控制系统的状态方程^[9]为

$$\dot{I}_H(t) = -\frac{1}{\tau_{H\Sigma}}P_H(t) + \frac{C_H}{\tau_{H\Sigma}}P_{m0} + \frac{C_H}{\tau_{H\Sigma}}u(t) \quad (4)$$

$$\dot{\omega}(t) = \frac{\omega_0}{H}P_H + \frac{\omega_0}{H}C_{ML}P_{m0} - \frac{\omega_0}{H}\frac{E'_q U}{x'_{d\Sigma}}\sin\delta(t) \quad (5)$$

$$\dot{\delta}(t) = \omega(t) - \omega_0 \quad (6)$$

式中 P_H 为高压缸机械功率; $\tau_{H\Sigma}$ 为高压缸时间常数 τ_H 与高压油动机时间常数 τ_{Hg} 之和; C_H 为高压缸功率分配系数; P_{m0} 为总机械功率稳态初始值; u 为高压主调节汽门控制量; ω 为转速; $\omega_0 = 2\pi f_0$ 为额定角速度; H 为转子转动惯量; C_{ML} 为中低压缸功率分配系数; E'_q 为暂态电势; U 为无穷大系统母线电压; $x'_{d\Sigma}$ 为系统各部分电抗之和; δ 为转子运行角。

写成非线性系统状态方程的标准形式为

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})u \quad (7)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} P_H \\ \omega \\ \delta \end{bmatrix}, \quad \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} C_H / \tau_{H\Sigma} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_{H\Sigma}}P_H + \frac{C_H}{\tau_{H\Sigma}}P_{m0} \\ \frac{\omega_0}{H}P_H + \frac{\omega_0}{H}C_{ML}P_{m0} - \frac{\omega_0}{H}\frac{E'_q U}{x'_{d\Sigma}}\sin\delta \\ \omega - \omega_0 \end{bmatrix}$$

对于上述的非线性系统,应用计算机代数软件包 NSEL 中的函数编制一个将该系统精确线性化的程序 STEAM。运行该程序,经检验该仿射非线性系统满足精确线性化的条件,并得到坐标变换式为

$$\mathbf{z} = \Phi(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \delta - \delta_0 \\ \omega - \omega_0 \\ \frac{\omega_0}{H} \left(P_H + C_{ML}P_{m0} - \frac{E'_q U \sin\delta}{x'_{d\Sigma}} \right) \end{bmatrix} \quad (8)$$

LQR 法设计得到的线性系统控制量 v 为

$$v = -5\sqrt{2}(\delta - \delta_0) - \frac{577194216841967}{70368744177664}(\omega - \omega_0) - \frac{2280110374473083}{562949953421312}\frac{\omega_0}{H} \left(P_H + C_{ML}P_{m0} - \frac{E'_q U \sin\delta}{x'_{d\Sigma}} \right) \quad (9)$$

非线性状态反馈控制规律 u 为

$$u = \left[-5\sqrt{2}(\delta - \delta_0) - \frac{577194216841967}{70368744177664}(\omega - \omega_0) - \frac{2280110374473083}{562949953421312}\frac{\omega_0}{H} \left(P_H + C_{ML}P_{m0} - \frac{E'_q U \sin\delta}{x'_{d\Sigma}} \right) \right] \frac{H \tau_{H\Sigma}}{\omega_0 C_H}$$

$$\frac{2280110374473083}{562949953421312}\frac{\omega_0}{H} \left(P_H + C_{ML}P_{m0} - \frac{E'_q U \sin\delta}{x'_{d\Sigma}} \right) - \frac{\omega_0}{H} \left(-\frac{P_H}{\tau_{H\Sigma}} + \frac{C_H}{\tau_{H\Sigma}}P_{m0} \right) + \frac{\omega_0 E'_q U \cos\delta(\omega - \omega_0)}{x'_{d\Sigma} H} \left] \frac{H \tau_{H\Sigma}}{\omega_0 C_H} \quad (10)$$

可见,求得的非线性状态反馈控制规律 u 较为复杂,对其分析后进一步化简得:

$$u = P_m - P_{m0} + \frac{\tau_{H\Sigma}}{C_H} \dot{I}_e - \left(7.07 \int_0^t \Delta\omega dt + 8.20\Delta\omega + 4.05\Delta\dot{\omega} \right) \frac{H \tau_{H\Sigma}}{\omega_0 C_H} \quad (11)$$

式(11)即为该汽轮发电机组主调节汽门的非线性控制规律表达式。

3.2 非线性控制规律仿真检验

为充分展示所得到的非线性控制规律在电力系统发生故障时所能起到的作用,采用 Matlab 中的仿真工具 Simulink 对一单汽轮发电机—无穷大输电系统^[10]进行仿真分析与研究,其接线图如图 1 所示。

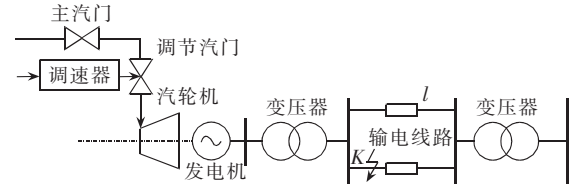


图 1 汽轮发电机—无穷大输电系统示意图

Fig.1 Steam turbine generator-infinite transmission system

对于图 1 所示系统,在 K 点发生两相短路故障,故障过程为 0 s 发生短路故障, t_c 后继电保护装置动作切除故障线路。

在 Simulink 中建立该系统的仿真模型,先不引入主调节汽门非线性控制规律,当故障切除时间 $t_c = 0.2$ s 时,Simulink 中运行该系统的仿真模型得到转子运行角 δ 的过渡过程波形如图 2 所示。

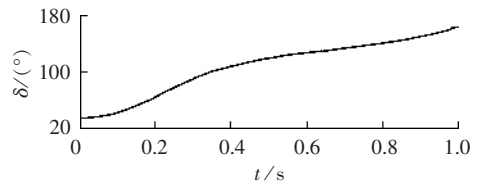


图 2 未引入非线性控制规律时 $\delta-t$ 曲线

Fig.2 $\delta-t$ curve before importing nonlinear control rule

由图 2 可知,故障切除时间 $t_c = 0.2$ s 时,转子运行角 δ 从 δ_0 开始一直增大,表明该系统稳定性遭到破坏。

现引入前面应用计算机代数软件包所计算得出的主调节汽门非线性控制规律,在故障切除时间 $t_c = 0.2$ s 的情形下仿真,得到转子运行角 δ 及机械功率 P_m 的过渡过程波形分别如图 3(a)(b)所示。

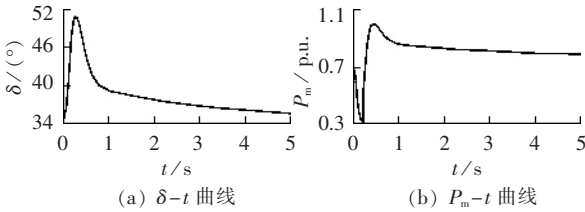


图3 引入非线性控制规律时的 $\delta-t$ 、 P_m-t 曲线

Fig.3 $\delta-t$ curve and P_m-t curve after importing nonlinear control rule

由图3可知,引入主调节汽门非线性控制规律后,转子运行角 δ 在 $t=0.3\text{s}$ 附近达到峰值约 51° 后,立即回落,到 $t=5\text{s}$ 时已接近短路故障前的初始角度;而机械功率输出 P_m 在发生短路故障后先是急剧减小,这正是与发生短路故障后发电机有功功率输出突然降落相对应的,并且到 $t=5\text{s}$ 时 P_m 接近稳定,其值约为 0.78p.u. ,这也是与实际情况中故障线路切除后所需功率减小一致的,表明系统仍然是暂态稳定的。进一步的仿真试验表明,故障切除时间 t_c 即使进一步延长,系统仍能够保持暂态稳定,可见该非线性控制规律作用较强。

综合以上仿真结果得出:在引入主调节汽门非线性控制规律后,即使继电器动作较迟缓而致使故障切除时间变长,系统仍然能够保持暂态稳定,这就表明了运用状态反馈精确线性化设计得到的非线性控制规律作用是有效且强大的,这也从另一个侧面表明开发得到的非线性系统状态反馈精确线性化方法的计算机代数软件包的实用性。

4 结语

本文阐述了非线性控制系统精确线性化的计算机代数设计方法,开发出相应的计算机代数软件包,并以该软件包为工具对电力系统中汽轮发电机组汽门开度非线性控制的实例进行了分析和设计,仿真结果表明该系统的稳定性得到了提高。由于非线性系统设计方法多种多样,该软件包可进一步扩展,从而能够为更多的实际电力系统非线性控制问题提供高效的解决方案。

参考文献:

- [1] SLOTINE J J E, LI Wei-ping. Applied nonlinear control [M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [2] 胡跃明. 非线性控制系统理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [3] BUCHBERGER B, COLLINS G E, LOOS R. Computer algebra: symbolic and algebraic computation [M]. Beijing: World Publishing Corporation, 1988.
- [4] 康惠骏. 状态空间精确线性化的计算机代数设计方法[J]. 上海大学学报: 自然科学版, 2002, 8(1): 44-46.
KANG Hui-jun. A computer based algebraic method for high precision linearization of state space [J]. **Journal of Shanghai University: Natural Science**, 2002, 8(1): 44-46.
- [5] CHEN D, TARN T J, ISIDORI A. Global linearization of control systems via feedback [J]. **IEEE Trans. Aut. Control**, 1983, 30(8): 808-811.
- [6] KRENER A J. On the equivalence of control system and the linearization of nonlinear systems [J]. **SIAM J Contr.**, 1997(11): 670-676.
- [7] JAKUBCZYK B, RESPONDEK W. On linearization of control systems [J]. **Bull Acad Polon Sci., Math.**, 1980(28): 517-522.
- [8] 杨光宇, 郑应平. 控制系统计算机代数工具 Symbol CAD [J]. 自动化学报, 1998, 24(6): 733-738.
YANG Guang-yu, ZHENG Ying-ping. A computer algebra tool for control system symbol CAD [J]. **Acta Automatica Sinica**, 1998, 24(6): 733-738.
- [9] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [10] 李光琦. 电力系统暂态分析 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

王 旻(1979-), 男, 浙江宁波人, 硕士研究生, 主要研究方向为非线性系统、复杂系统(E-mail: zdlhwm@yahoo.com.cn);

郑应平(1941-), 男, 福建福州人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为复杂系统、智能控制等。

Application of computer algebra in nonlinear control of power system

WANG Min, ZHENG Ying-ping

(Department of Control Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The principle of exact linearization is presented and the computer algebra design method for the exact linearization of state feedback in nonlinear control system is discussed. The corresponding software package is developed with Matlab and applied in the nonlinear control of steam valve in steam turbine generator set of power system for simulative analysis. Simulative result shows that the system stability is effectively improved after the nonlinear control variable is imported.

This project is supported by the National Natural Science Fund of China(60343002).

Key words: nonlinear control; computer algebra; power system