

文章编号: 1001-0920(2001)02-0254-03

利用时间序列重构永磁同步电动机混沌吸引子

张波¹, 李忠², 毛宗源², 庞敏熙³

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640; 2. 华南理工大学 自动控制工程系, 广东 广州 510640; 3. 香港大学 电气电子工程系, 香港)

摘要: 利用永磁同步电动机 (PM SM) 一个状态变量的时间序列, 重构了 PM SM 混沌吸引子, 并与原相空间中的混沌吸引子进行比较。从比较结果看出, 重构的吸引子与原吸引子具有相同的拓扑结构和概率特征。这对于在某些状态变量无法实验测得的情况下, 通过测量 PM SM 的某一状态变量的时间序列来重构系统的吸引子, 以便研究系统的动力学行为, 进而利用所得数据控制 PM SM 的混沌现象, 具有重要意义。

关键词: 时间序列; 永磁同步电动机 (PM SM); 混沌吸引子

中图分类号: TM 219 **文献标识码:** A

Using Time-series to Reconstruct the Chaotic Attractors of the Permanent-magnet Synchronous Motors

ZHANG Bo¹, LI Zhong², MAO Zong-yuan², PANGM in-xi³

(1. Electrical Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Department of Automatic Control Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Hong Kong, Hong Kong, China)

Abstract: The chaotic attractors of permanent magnet synchronous motor (PM SM) are reconstructed with the time-series of one state. The chaotic phenomena in PM SM are analyzed. Comparing the reconstructed attractors of PM SM with the originals, it can be seen that they have similar topological structures and probability features. If the dynamical equations of the system are unknown, only one state needs to be measured for reconstructing the phase-space of the system, and then the dynamics of the system can be studied.

Key words: time-series; permanent magnet synchronous motors (PM SM); chaotic attractor

1 引言

以往关于 PM SM 混沌现象的讨论大多是在其混沌模型的基础上开展的, 但在进一步的实验研究中发现, 对 PM SM 实验测得的数据都是变量的时间

序列, 甚至有些变量无法用实验方法测得, 因而难以按 PM SM 的模型开展研究。为此, 本文提出采用基于时间序列的状态空间重构法来研究这类问题的动力学现象 (如混沌现象)。

收稿日期: 1999-11-22; 修回日期: 2000-08-31

基金项目: 国家自然科学基金项目 (59777008); 广东省自然科学基金项目 (980579)

作者简介: 张波 (1962—), 男, 福建三明人, 教授, 博士, 从事交流传动和电力电子技术研究; 毛宗源 (1936—), 男, 浙江江山人, 教授, 博士生导师, 从事现代控制理论及应用、电力电子技术研究。

状态空间重构法亦称嵌入技术,它是用状态的一个元素的时间采样波形来重构奇异吸引子,所得的新系统保持了原系统的本质特征,如系统吸引子的拓扑结构及其概率特性。如果数据是从一个物理系统中测得的,则只需测量一个状态,便可降低实验设备和数据存贮的成本。对于高维或无限维系统,如果其中一个或多个状态不能直接测得,则状态空间重构法便可能是唯一可用于观察吸引子的方法^[1]。

该方法是在实验条件下非常有用的一项技术,它不仅可通过实验数据来重构吸引子进行混沌分析,还可用于计算 Poincare 映射、Lyapunov 指数、分数维、特征值和特征向量等,也可用于分析混沌特性和控制混沌。本文利用 PM SM 模型的一个状态变量的时间序列重构其吸引子,并与文献[2]给出的混沌吸引子的仿真图形进行比较。从比较结果可以看出,它们有着相同的拓扑结构和分数维,说明基于时间序列的状态空间重构法可用于实验分析 PM SM 的混沌现象^[3]。

2 基于时间序列的状态空间重构法

假设动力学方程形式为 $dx/dt = F(x)$, 其中 x 为 M 维向量。如果描述系统的动力学方程是未知的,但某一变量 $z(t)$ 的时间序列可通过实验测得,则可利用时滞为 τ 的时滞坐标构成时滞坐标向量,亦称嵌入向量^[3],即

$$Z_x(t) = [z(t), z(t - \tau), z(t - 2\tau), \dots, z(t - d\tau)] \quad (1)$$

其中, τ 为时滞, d 为嵌入维数。嵌入向量提供了足够的信息,以刻画原系统的本质特征^[1],并可用以求得 Poincare 映射及其概率特征(如 Lyapunov 指数和分数维等)。

根据嵌入定理,条件 $d \geq 2M + 1$ 一般可保证向量 $Z_x(t)$ 是系统状态的全局 1-1 表示,而不需要一个全局的嵌入,仅需要在周期轨道的一个小邻域内的一个 1-1 对应,因而只需 $d = M$ 即可。

利用状态空间重构法仍有两个问题难以解决,即时滞 τ 的选取和某些问题的维数 d 是未知的^[1]。对于时滞 τ , 尽管可以任意选取,但是如果 τ 太小, $\phi_{k+\tau}$ 和 $\phi_{k+1+\tau}$ (ϕ_j 表示轨道的第 j 个元素), 则重构的吸引子将限制在重构空间的对角线上; 如果 τ 太大且系统是混沌的, 则 $\phi_{k+\tau}$ 和 $\phi_{k+1+\tau}$ 将变得不相关, 以致重构的吸引子的结构丧失; 如果 τ 接近于系统的周期, 则具有周期性的元素将难以表示重构的状态。如果维数

d 是未知的, 则按文献[4] 给出的方法求解。即设 n_τ 为重构空间 R^{n_τ} 的维数, 令 $n_\tau = 1$ 并计算重构吸引子的相关维 D_c ; 重复这一计算过程, 每次 n_τ 增加 1 维, 直到 D_c 不再变化为止。于是 D_c 就是相关维的值, 最小的 n_τ 的值就是重构空间的最小维数。

3 重构永磁同步电动机的混沌吸引子

文献[2] 给出了气隙均匀的永磁同步电机的混沌模型为

$$\begin{cases} d\tilde{i}_d/dt = -\tilde{i}_d + \tilde{\omega}\tilde{i}_q + \tilde{u}_d \\ d\tilde{i}_q/dt = -\tilde{i}_q - \tilde{\omega}\tilde{i}_d + \gamma\tilde{\omega} + \tilde{u}_q \\ d\tilde{\omega}/dt = \sigma(\tilde{i}_q - \tilde{\omega}) - \tilde{T}_L \end{cases} \quad (2)$$

其中, \tilde{u}_d 和 \tilde{u}_q 分别为 d 轴和 q 轴电压, \tilde{T}_L 为外部输入转矩, γ 和 σ 为参数。考虑一种典型的情况, 即 $\tilde{u}_d = \tilde{u}_q = \tilde{T}_L = 0$, $\sigma = 5.46$, $\gamma = 20$, 其仿真图形如图 1 所示^[2]。

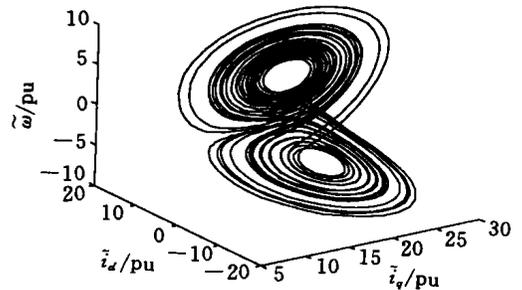


图 1 PM SM 的混沌吸引子

现在用第 3 个元素(即 $\tilde{\omega}$) 来重构其状态空间。如果选取 $t = 0.2$, $\tau = 0.05$, 则其重构状态空间图形如图 2 所示; 如果选取 $t = 0.2$, $\tau = 0.01$ 和 $t = 0.8$, $\tau = 0.2$, 则其重构状态空间图形如图 3 和图 4 所示。

如果用第 1 个元素 \tilde{i}_d 或第 2 个元素 \tilde{i}_q 来重构吸引子, 则可得到完全类似的结果。

将图 2 与图 1 进行比较, 可看出重构的状态空间图形与原状态空间图形具有相同的拓扑结构, 并

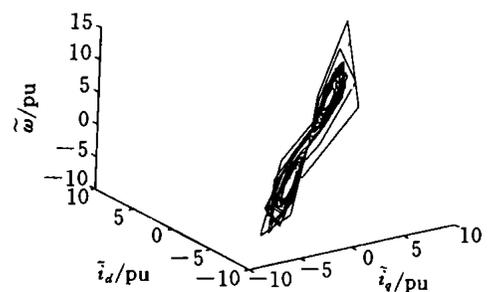


图 2 $t = 0.2, \tau = 0.05$ 时重构的吸引子

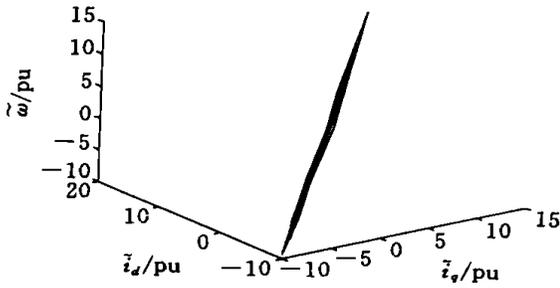


图3 $t = 0.2, \tau = 0.01$ 时重构的吸引子

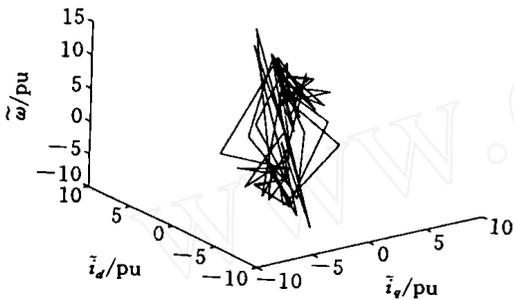


图4 $t = 0.8, \tau = 0.2$ 时重构的吸引子

可计算出它们具有相同的概率特征(如Lyapunov指数和分数维^[5,6]);从图3可以看出,如果时滞 τ 太小,则其图形为重构空间中的对角线;从图4可以看出,如果时滞 τ 太大,则其图形难以反映状态空间图形。因此,在重构系统的状态空间时,应选取适当的 τ ,但迄今尚无更好的方法,只能通过试错的方法来适当调节。对于高维甚至不知维数的情形,也可用这种方法进行研究。

4 结 论

本文利用时间序列重构了永磁同步电机的混沌吸引子,并与文献[2]中的仿真图形进行比较。从比

较结果可以看出,重构的状态空间图形与原来的状态空间图形具有相同的拓扑结构。因此,如果在PM SM 实验中某些变量无法测得,则可利用状态空间重构的方法,通过实验数据来构造PM SM 的状态空间图形,以便研究PM SM 的动力学特性。同时可用该方法构造PM SM 的Poincare 映射,以及求得它的概率特征(如Lyapunov 指数和分数维,稳定和不稳定流形的特征值等),进而对PM SM 中的混沌现象进行控制。

状态空间重构法是在实际中非常有用的一种方法,它不需要系统模型,可以降低实验设备和数据存贮的成本,并能解决系统某些元素无法测量的矛盾。这对研究PM SM 这样复杂系统的预测和控制具有较高的价值。

参考文献:

- [1] Parker T S, Chua L O. Chaos: A tutorial for engineers [J] Proc of the IEEE, 1987, 75(8): 982-1008
- [2] Li Z, Zhang B, Mao Z Y. Strange attractors in permanent magnet synchronous motors[A] Proc of the IEEE 1999 Int Conf on Power Electronics and Drive Systems [C] Hong Kong: IEEE Society, 1999. 150-155
- [3] Packard N H, Crutchfield J P, Farmer J D *et al*. Geometry from a time series[J] Physical Review Letters, 1980, 45(9): 712-716
- [4] Grassberger P, Procaccia I. Measuring the strangeness of strange attractors[J] Physica D, 1983, 45(9): 139-208
- [5] Ott E, Grebogi C, Yorke J A. Controlling chaos[J] Physical Review Letters, 1990, 64(11): 1196-1199
- [6] Shinbrot T, Grebogi C, Ott E *et al*. Using small perturbations to control chaos[J] Nature, 1993, 363(3): 411-417.