

水轮机调速器的混沌现象分析及控制

张发寿

(甘肃畜牧工程职业技术学院, 甘肃 武威 733006)

摘要: 水轮机调速器是水轮机调节系统中的最重要部件。为了更好对其控制, 对其进行复杂动力学分析, 包括 Lyapunov 指数谱、分岔图、Poincare 映射图、时域波形图、频谱图等。基于稳定流形原理, 提出了只含一个控制项的新的控制器的设计方法, 并给出了数学证明, 以调速器的两种典型工作状态为例, 使系统稳定在其中之一的不稳定平衡点(0, 0, 0)处, 利用 MATLAB 进行数值模拟实验。结果证明, 该控制方法简单实用, 能很好的使处于混沌状态的水轮机调速器稳定在平衡点。该控制策略能有效地改善水轮机调速器的动态特性, 提高其抗干扰能力。

关键词: 水轮机; 调速器; 混沌; 混沌控制

中图分类号: TM612

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2012)04—0069—05

Study and Control for Chaos Phenomena of Hydraulic Turbine's Speed Governor

ZHANG Fa-shou

(Gansu Vocational and Technical College of Animal Husbandry Engineering, Wuwei, Gansu 733006, China)

Abstract: Speed governor is the most important part of a hydraulic turbine's governing system. In order to control it better, a chaotic mathematical model is given by analysing its complex dynamics, such as Lyapunov exponent spectrum, bifurcation diagram, Poincare diagram, time-domain waveform diagram, spectrogram and so on. A controller's design method with only one control term is put forward based on stable manifold theory, and its mathematical proof is also proposed. The system is controlled in a saddle in the two kinds of working conditions through the simulation of MATLAB. The results show that the control method is simple and practical, and could also greatly improve the dynamic performance and anti-disturbance capacity of the system.

Keywords: hydraulic turbine; speed governor; chaos; chaos control

0 引言

水轮机调速器是水轮机调节系统中最重要部件^[1]。其控制性能优劣直接影响到水力发电机组对电力系统大、小干扰稳定性的改善与提高^[2-3]。本文探讨了其复杂动力学行为, 计算分析了相图, Poincare 映射, Lyapunov 指数谱和分岔图等, 为较好的控制水轮机调速器的混沌行为奠定基础。

1990年, 美国马里兰大学物理学家 Ott, Grebogi 和 Yorke 通过参数微扰法(即 OGY 法)成功地控制了混沌, Pecore 和 Carroll 又提出了混沌同步方案^[4]。由于混沌控制及同步在信息科学、医学、生物、工程等领域具有很大的应用潜力及发展前景, 引起了人

们的广泛关注与兴趣, 科学工作者在理论和实验上都已做了大量的工作^[5-8]。混沌控制, 研究的是将混沌系统控制到周期轨道或平衡点, 典型的控制方法有 OGY 法^[9]、反馈控制方法^[10]、自适应控制方法^[11]等。就目前混沌控制方法论的发展所取得的成就而言, 上述方法并不是对所有混沌系统的控制或同步都有效, 不同的方法有各自的优缺点, 具体情况要具体分析。

为此, 本文以稳定流形原理为基础提出了一种控制器的设计方法, 该方法只含一个控制项, 该控制器能很好的控制处于混沌状态的离心轮系统稳定于任一个不稳定的平衡点。

1 数学模型

离心调速器系统如图 1 所示,水轮机以角速度 ω 驱动飞轮旋转。飞轮通过齿轮箱与轴连接在一起,所以,轴的角速度也为 ω 。杆 1、2、3、4 的一端分别连接在轴的两段,它们的另一端各连着两个质量为 m 的球。一个刚度系数为 k 的线性弹簧套在轴的上半部。下面的发动机,这个发动机是由套管上的机械装置控制的,即让飞轮以一定的角速度 ω_0 旋转。随着 $V_w = \omega - \omega_0$ 值的增大和减小,两个球也会向外或向内移动,套管也会向上或向下滑动。

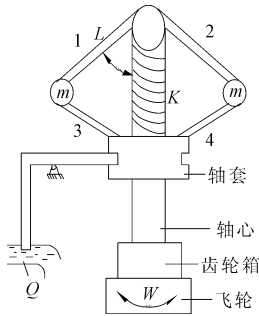


图 1 调速器系统

调速器的动力学方程^[12]为:

$$\begin{cases} \frac{df}{dt} = j \\ \frac{dj}{dt} = d\omega^2 \cos f + (e + p\omega^2) \sin f \cos f - \sin f - bj \\ \frac{dw}{dt} = q \cos f - F \end{cases} \quad (1)$$

在上述离心调速器系统的动力学方程(1)的建立中,假设负载转矩为常数。反之,当负载转矩为非常数时,可以用 1 个常数项和 1 个哈密顿项 $F + a \sin \bar{\omega} t$ 来表示,其中, $F, a, \bar{\omega}$ 均为常数。

$$\begin{cases} \frac{df}{dt} = j \\ \frac{dj}{dt} = d\omega^2 \cos f + (e + p\omega^2) \sin f \cos f - \sin f - bj \\ \frac{dw}{dt} = q \cos f - F - a \sin \bar{\omega} t \end{cases} \quad (2)$$

方程(2)中, $q = \frac{\gamma}{J\Omega_n}, F = \frac{\beta}{J\Omega_n}, d = \frac{n^2 m r}{2kl + mg},$

$e = \frac{2kl}{2kl + mg}, p = \frac{n^2 ml}{2kl + mg}, b = \frac{c}{2ml^2 \Omega_n}, \Omega_n =$

$$\sqrt{\frac{2kl + mg}{ml}}.$$

为了便于分析,现对调速器系统模型作如下假

设:① 忽略杆和套管的质量;② 假设杆轴头与刚性球连接处存在粘性摩擦因数 c ;③ J 为飞轮转动惯量;④ F 为外部作用力;⑤ n 为比例系数。方程(2)中,为了研究数学问题方便,令 $x = f, y = j$ 和 $z = w$,则方程(2)可变为:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = y \\ \frac{dy}{dt} = dz^2 \cos x + (e + pz^2) \sin x \cos x - \sin x - by \\ \frac{dz}{dt} = q \cos x - F - a \sin \bar{\omega} t \end{cases} \quad (3)$$

2 系统的复杂动力学分析

2.1 相轨迹图

对公式(3),取一组状态参数对系统进行仿真, $d = 0.08, e = 0.5, p = 0.01, F = 1.942, a = 0.4, b = 0.3, \bar{\omega} = 1, q = 2.26$ 时,系统的混沌吸引子的三维相轨迹图如图 2 所示。

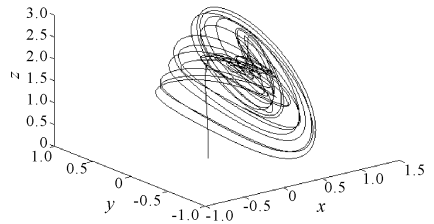
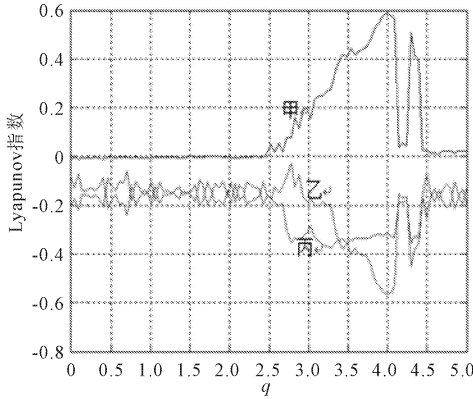


图 2 三维相图

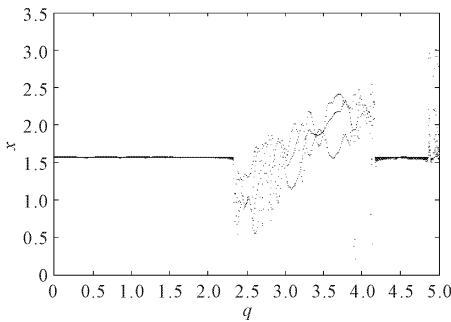
观察方程(3)及图 2 的各维相图的奇怪吸引子,可初步判定其具有混沌的动力学特征。

2.2 Lyapunov 指数谱、分岔图

当调速器系统分别取如下述参数时, $d = 0.08, e = 0.5, p = 0.01, F = 1.942, a = 0.4, b = 0.3, \bar{\omega} = 1$ 时方程(3)系统的 Lyapunov 指数谱、分岔图如图 3(a)、3(b)所示,我们知道,从 Lyapunov 指数谱、分岔图可以直观地反映非线性动力学系统随参数 q 变化的动态特性,当 $2.26 < q < 4.2$ 时,系统出现混沌明显。当有一个 Lyapunov 指数大于 0 时,系统处于混沌状态。由图 3(a)可见,系统的最大 Lyapunov 指数谱是从 0 变化到大于 0,其中甲为最大 Lyapunov 指数谱,乙、丙为次最大 Lyapunov 指数谱或最小 Lyapunov 指数谱,也就是说系统先是出现周期运动,然后变化为混沌运动,从分岔图(图 3(b))可以知道,系统(3)是从周期运动分岔走向混沌运动的。



(a) Lyapunov指数谱



(b) 分岔图

图 3 系统(3)的 Lyapunov 指数谱和分岔图

2.3 系统的其他性质

Poincare 映射是一种经典的分析动力系统的技术,我们可以通过观察 Poincare 截面上截点的情况判断是否发生混沌:当 Poincare 截面上是一些成片的具有分形结构的密集点时,运动是混沌的, Poincare 映射图有利于观察系统的动力学行为,通过观察 Poincare 截面上点的情况,可以判断系统的运动的情况。本文在平面 $z = 2.29$ 中,取 Poincare 截面,得到系统的 Poincare 映射图如图 4 所示。

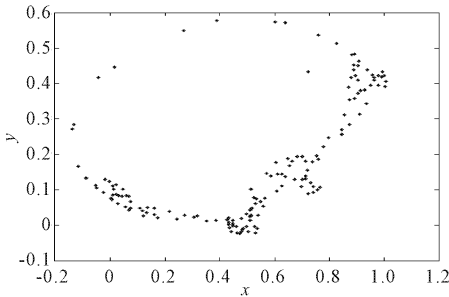


图 4 Poincare 映射图

系统的时域波形如图 5 所示,可见其具有非周期性。

系统的频谱图如图 6 所示,可以得出其是连续谱。

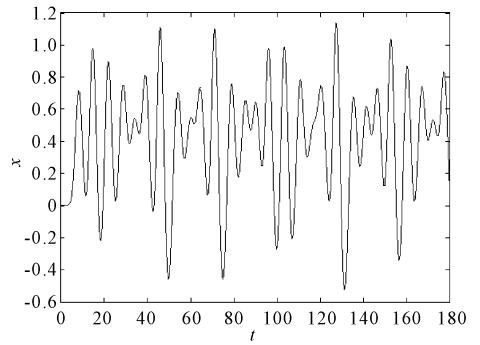


图 5 时域波形图

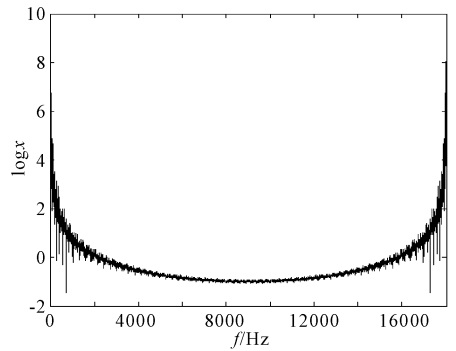


图 6 频谱图

3 稳定流形原理

设受控系统为:

$$\dot{x} = F(x) + C \tag{4}$$

其中, $x \in R^n$ 表示 n 维状态向量, $F: R^n \rightarrow R^n$ 的非线性函数, C 是控制量。当 $C = 0$ 时,方程(4)是混沌的。控制的目标就是设计一个合适的控制输入信号 C 使系统稳定于一个非稳定的平衡点 x_e 。

如果混沌系统为耗散系统,即混沌系统的轨道不发散,且轨道是有界的,所以至少存在一维稳定流作为一个不变流形。

下面从数学的角度,简要证明。设存在一个包含 $r = 0$,为了使系统的各状态变量渐进地趋向于期望目标,要设计一个合适的控制量 C ,使得稳定流形 $r = 0$ 。若选择 Lyapunov 函数为: $L = \frac{1}{2} r^2$,则控制器应满足 $\dot{L} = \dot{r}r = -\mu r^2 \leq 0$,其中 μ 为一个正常数,则根据全局不变集理论,所有的解收敛于包含所有点的最大不变集,即动力系统的轨道渐进地稳定于目标轨道上,从而达到混沌控制的目的。

4 控制器的设计

4.1 理论分析

由方程(3),取 Lyapunov 函数:

$$V(x, y, z) = \frac{1}{2}(x^2 + y^2 + z^2) \quad (5)$$

则

$$\begin{aligned} \dot{V}(x, y, z) &= x\dot{x} + y\dot{y} + z\dot{z} \\ &= xy + y[dz^2\cos x + (e + pz^2)\sin x\cos x - \sin x - by] \\ &\quad + z(q\cos x - F - a\sin\omega t) < 0 \end{aligned} \quad (6)$$

又因为 $\Delta V = \frac{\partial \dot{x}}{x} + \frac{\partial \dot{y}}{y} + \frac{\partial \dot{z}}{z} < 0$, 所以系统是耗散系统。

易知, 方程(3)的系统有三个不稳定的平衡点, 为了不失一般性, 我们以 $S(0, 0, 0)$ 为例, 构造一个控制量, 使系统的轨道收敛于不稳定的平衡点 $S(0, 0, 0)$ 。

若在方程(3)上加一个控制量 C , 则其变为:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = y \\ \frac{dy}{dt} = dz^2\cos x + (e + pz^2)\sin x\cos x - \sin x - by \\ \frac{dz}{dt} = q\cos x - F - a\sin\omega t + C \end{cases} \quad (7)$$

若让流形以 $r = z$ 的形式存在, 显然, 一旦, 有 $r \rightarrow 0$, 方程(7)的系统, 变为:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = y \\ \frac{dy}{dt} = (e + pz^2)\sin x\cos x - \sin x - by \end{cases} \quad (8)$$

满足 $\frac{d}{dt}(\frac{1}{2}r^2) \leq 0$, 这就意味着 $r = z = 0$ 的渐进趋向于原点, 则系统(3)将稳定在非稳定的平衡点 $S(0, 0, 0)$ 。

设控制器为 $C = -q\cos x + F + a\sin\omega t - kz$, 其中 k 是一个正的常数。

则当 $t \rightarrow \infty$ 时, $x \rightarrow 0, y \rightarrow 0, z \rightarrow 0$, 即系统(7)是渐进稳定于点 $S(0, 0, 0)$ 。

4.2 数值模拟

取 $k = 1$, 初始值为 $(0.2, 0.2, 0.2)$, 时间步长为 $\tau = 0.01$ s, 采用四阶 Runge - Kutta 法去求解系统(7)。为了不失普遍性, 取两种典型的工作状态参数对系统(7)进行混沌控制。

(1) 情况一:

$d = 0.08, e = 0.5, p = 0.01, F = 1.942, a = 0.4, b = 0.3, \bar{\omega} = 1, q = 2.26$

(2) 情况二:

$d = 0.07, e = 0.7, p = 0.04, F = 1.943, a = 0.6, b = 0.5, \bar{\omega} = 2, q = 2.75$

情况一时, 系统受控前, 即 $C = 0$ 的运动图形如

图 7 所示, 加入控制量之后, 系统的运动图形如图 8 所示, 在 t 接近 25 s, 27 s, 4 s 时, 方程(7)系统达到稳定状态。

情况二时, 系统受控前, 即 $C = 0$ 的运动图形如图 9 所示, 加入控制量之后, 系统的运动图形如图 10 所示, 在 t 接近 16 s, 26 s, 4 s 时, 方程(7)系统达到稳定状态。

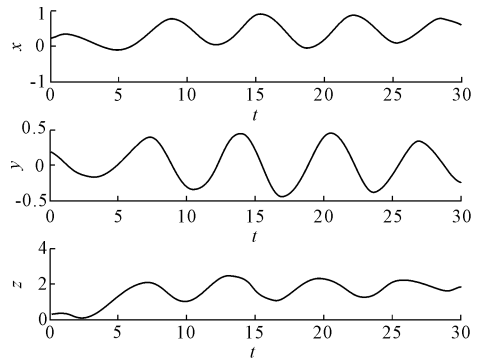


图 7 受控前系统的运动图形

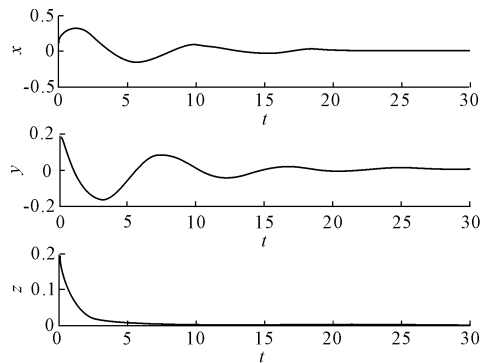


图 8 受控后的系统运动图形

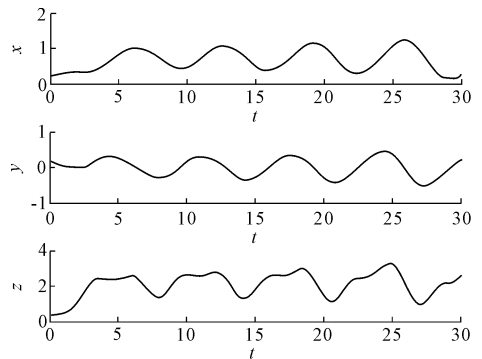


图 9 受控前系统的运动图形

5 结论

本文对水轮机离心调速器的数学模型进行了理论分析和 MATLAB 仿真, 分析了它的复杂动力学特征, 并分别对该系统进行了控制。可得出以下结论:

(1) 证实了水轮机离心调速器混沌系统的存在性, 且具有丰富的复杂动力学特征。

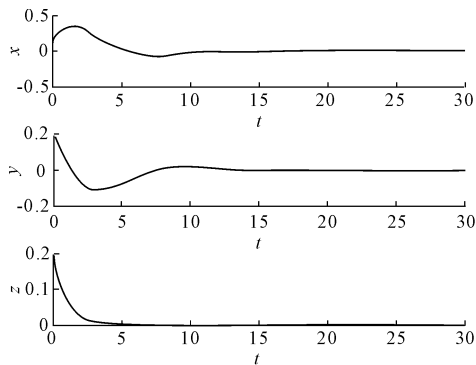


图 10 受控后的系统运动图形

(2) 提出了一种新的控制器的设计方法,并给出了数学证明,并且该控制器只含一个控制项。

(3) 该控制器能够很好的控制处于混沌状态的离心调速器系统迅速的稳定在任一不稳定的平衡点上。

参考文献:

- [1] 桂小阳,梅生伟,刘 锋,等.水轮机调速系统的非线性自适应控制[J].中国电机工程学报,2006,26(8):66-71.
- [2] 陈帝伊,杨朋超,马孝义,等.水轮机调节系统的混沌现象分析及控制[J].中国电机工程学报,2011,31(14):113-120.
- [3] 郭 磊,王雪丰,沈祖诒.智能控制技术在水轮机调节系统中的应用[J].人民黄河,2007,29(1):67-68.
- [4] Miliou A N, Stavriniades S G, Valaristos A P, et al. Nonlinear electronic circuit, Part I: Multiple routes to chaos[J].

Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications, 2009, 71(12):3-20.

- [5] Chiang T Y, Hung M, Yan J J, et al. Sliding mode control for uncertain unified chaotic systems with input nonlinearity [J]. Chaos Solitons & Fractals, 2007,34(2):437-442.
- [6] 申 滔,陈帝伊,马孝义,等.圆柱罐中液体振动的混沌分析及滑模变结构控制[J].水利与建筑工程学报,2010,8(6):76-80.
- [7] 龙 燕,陈帝伊,杨福增.超混沌系统的电路仿真及其自适应同步[J].电子设计工程,2010,18(7):63-67.
- [8] Prabhakar A, Fisher J, Bhattacharya R. Polynomial chaos-based analysis of probabilistic uncertainty in hypersonic flight dynamics[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2010,33(1):222-234.
- [9] 陈帝伊,申 滔,马孝义.参数不定的旋转圆盘在有界扰动下混沌振动的滑模变结构控制[J].物理学报,2011,60(5):1-8.
- [10] Wang C C, Pai N S, Yau H T. Chaos control in AFM system using sliding mode control by backstepping design[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2010,15(3):741-751.
- [11] 陈帝伊,陈海涛,马孝义,等.只含一个非线性项的超混沌系统及其控制比较[J].计算机应用,2010,30(8):2045-2048.
- [12] 陈帝伊,石 琳,马孝义,等.一类离心轮系统的混沌数学模型及其线性反馈控制[J].中国机械工程,2010,21(24):2932-2935.