

摩擦学复杂系统及其问题的量化研究方法

葛世荣, 朱 华

(中国矿业大学 机电与材料工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 以摩擦学的三个公理为基础, 提出摩擦学系统复杂性质的具体定义, 即摩擦学系统的动力性、摩擦学系统的非线性、摩擦学系统的随机性、摩擦学系统的混沌性和摩擦学系统的分形性, 并且指出摩擦学系统是一个复杂的非线性动力系统, 因而将摩擦学研究与动力学相结合有助于摩擦学问题的定量化描述。根据摩擦学系统及其行为的特定性质, 从系统学观点出发, 将摩擦磨损过程分为自组织阶段、混沌阶段和失稳阶段等 3 个阶段, 并提出了磨合吸引子的概念, 同时讨论了研究摩擦学非线性复杂问题的正解和反解方法。

关键词: 摩擦学; 摩擦学系统; 摩擦磨损; 动力学; 混沌; 分形

中图分类号: TH117.1

文章标识码: A

文章编号: 1004-0595(2002)05-0405-04

长期以来, 人们为复杂且变化莫测的摩擦磨损现象所困惑。为了实现机械系统的摩擦学主动设计和控制, 人们始终坚持对摩擦学定量规律的探索和研究。Amontons 和 Coulomb 提出的摩擦力与接触正压力成正比的摩擦定律^[1], Archard 提出的材料磨损与载荷和滑动距离成正比的磨损规律^[2], 以及当今许多著名摩擦学学者的研究成果, 都以寻找解释和表征摩擦学现象的定量方法为目的。然而, 实际的摩擦学系统是多样学科行为相互耦合的复杂非线性动力系统, 因此有必要将摩擦学研究的主导方法同动力学相联系, 用动力学理论来解释这个系统所表现出的摩擦磨损行为, 以推进摩擦磨损规律的量化研究。

1 摩擦学复杂系统

复杂性科学将复杂性粗略地定义为对初始状态的敏感的依赖性以及与这种敏感依赖性相联系的每一事件, 或表征人们在描述或构造一个系统时所必需遵循的一组指令的长度^[3]。一般认为, “由大量数目的部分所构成”和“具有复杂的行为”是复杂系统的基本特征^[4]。

摩擦磨损是一个复杂的过程。发生在摩擦学系统内的摩擦磨损行为所表现出的对初始条件的敏感依赖性、变化过程的不稳定随机性以及时间和空间的不规则性等, 都表明摩擦学系统是一个非常复杂的系统。谢友柏^[5]指出: 摩擦学行为是系统依赖的; 摩擦学

元素的特性是时间依赖的; 摩擦学行为是多个学科行为之间强耦合的结果。摩擦学复杂系统的特性具体表现为摩擦磨损行为或过程的动力性、非线性、随机性、混沌性和分形性。

1.1 摩擦学系统的动力性

一个系统的输出或状态随时间变化的性质称为系统的动力性(或时变性)。摩擦学系统的复杂行为决定了摩擦学行为具有动力性质。众所周知, 磨损率与时间的关系为“浴盆曲线”; 另外摩擦系数和摩擦温度等也表现出时变特性^[6], 这都是摩擦学动力性的具体表现。

摩擦学系统的动力性表明, 摩擦学系统是系统状态随时间变化的动力学系统, 发生在系统内的摩擦磨损现象属于动力学现象。摩擦学研究就是要在适当的时间尺度上研究系统的动态特征和规律。因此, 摩擦学研究必须与动力学问题相联系。

1.2 摩擦学系统的非线性

用非线性数学模型描述的系统或不能用线性模型描述的系统(不论能否给出数学模型)称为非线性系统^[7]。摩擦学系统是典型的非线性系统, 它几乎具有非线性系统的所有特性, 如变比性、饱和性、非单调性、振荡性和滞后性等。近代摩擦学理论研究表明, 摩擦系数、摩擦温度和磨损量与接触载荷、滑动速度、接触面积及环境温度等之间的关系为强弱程度不同的非线性关系。大家熟知的经典摩擦学理论是关于少数

基金项目: 国家自然科学基金资助(59875081)。

收稿日期: 2001-11-18; 修回日期: 2002-05-20/联系人葛世荣, E-mail: gesr@cumt.edu.cn

作者简介: 葛世荣, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 目前主要从事摩擦学理论及应用等方面的研究。



材料在小尺度内的摩擦磨损规律, 是对摩擦学非线性系统的线性化描述

1.3 摩擦学系统的随机性

摩擦学系统是一个具有统计确定性的随机系统, 发生在摩擦学环境下的摩擦磨损行为属于摩擦学随机系统行为。大量的摩擦学研究表明: 摩擦系数、摩擦温度、磨损率和表面形貌参数等摩擦学系统的输出值, 都表现出稳定或非稳定的随机性。导致摩擦学系统随机性的原因是系统受到随机的初始条件(如表面形貌)、或随机的系统参数(如结合面的刚度和阻尼)、或随机的外界作用(如环境扰动)。

1.4 摩擦学系统的混沌性

所谓混沌, 是指在确定性系统中出现的一种貌似无规则, 类似随机的现象, 它是出现在非线性动力系统中的一种由自身产生的非周期运动, 它对初值条件敏感, 存在貌似无序的高级有序性^[8]。

摩擦学系统表现出的混沌特性以磨损过程为代表。进入磨合期的摩擦磨损行为是系统的混沌运动行为, 它是由从初始状态开始的摩擦磨损运动走向磨合吸引子(我们将达到磨合状态的分形吸引子称为磨合吸引子)的貌似无序的高级有序运动。这时的表面形貌、磨屑形貌、表面接触应力和表面温度分布等具有稳定的分形维数^[9]。摩擦学系统存在混沌性的根源在于摩擦学系统的非线性, 它是摩擦学复杂系统随时间演化的必然结果。

1.5 摩擦学系统的分形性

摩擦磨损是能量耗散的过程, 因而摩擦学系统也是一个非线性耗散动力系统。摩擦磨损过程中, 摩擦学系统中形态不断发生变化(局部不稳定), 而整体形态又被限制在有限的空间中(整体稳定), 这就必然导致系统中含有量级差别很大的时空尺度及在这些尺度上的构形, 这种构形就是分形。其特征是自相似性和标度不变性。发生在摩擦磨损过程中的许多摩擦学行为都具有这种分形性, 如材料磨损、磨损表面形貌、摩擦温度分布、磨屑结构和形貌、摩擦振动、摩擦噪声和磨合吸引子等。

摩擦表面的微观形貌具有自相似性。采用电子显微镜, 在不同放大倍数下观察摩擦表面形貌, 可以发现表面形貌的结构具有相似的细部特征, 表现为具有无穷多的层次嵌套, 从任何尺度去看都具有更小尺度上的精细结构; 磨损行为具有自相似性。材料磨损是摩擦时间累积的过程, 将时间作为尺度来观察磨损过程, 虽然在各个特定时间段的磨损特征并不相同, 但从总体上来看, 小时间段的磨损与大时间段的磨损相

似

磨损表面的粗糙轮廓具有标度不变性。粗糙表面的测度可以采用曲线长度、凸峰高度、相关长度、功率谱和结构函数等, 但它们形成的标度律会有所不同。如果以表面凸峰的均方根作为测度, 而以步长间距作为尺度, 测度与尺度的标度律有以下形式^[10]:

$$\sigma \sim \tau^{-D} \quad (1)$$

材料磨损也具有标度不变性。根据著名的 Archard 磨损模型, 磨损体积与接触载荷和滑动距离成比例^[2]。依据摩擦磨损机理的现代概念, 在中、低温下材料线性磨损率的简化公式为^[11]:

$$J = \frac{dh}{ds} = k_A A P^B \quad (2)$$

式中: dh 为磨损的微小厚度, ds 为相对滑动行程的微小长度; K_A 为介质减磨性系数; P 为接触载荷 (MPa); A 、 B 为由材料耐磨性能决定的参数。上式即为分形理论标度律的表达形式, 说明磨损率测度对于载荷尺度具有标度不变性。也就是说, 在磨损载荷尺度上, 磨损率将表现出自相似行为。

2 磨损的动力过程

磨损过程具有典型的动力过程特征。按照非线性动力系统原则可以把磨损过程划分为 3 个阶段, 即自组织阶段、混沌阶段和失稳阶段, 分别与摩擦学表述的磨合磨损、正常磨损和急剧磨损 3 个阶段相对应。

所谓自组织就是在某一系统或过程中自发形成时空有序结构或状态的行为, 也可以称作合作行为^[12]。磨合磨损过程是一个典型的自组织过程, 它使初始表面形貌接触产生的磨损逐渐匹配适应, 最终形成互适表面, 接触面积达到最大化。在这个过程中, 摩擦表面的形貌不断修正调整, 以适应偶件表面作用和外界载荷, 是一个试探、学习、适应和修正的过程。这个过程用离散时间来表达, 可以得到以下迭代式:

$$x_{n+1} = F(x_n) = F^n(x) = F(F(F(\dots F(x)\dots))) \quad (3)$$

式中: x 是磨损状态变量, 函数 F 表示某种处理规则, 它由非线性函数组成。

同时, 磨合也是一个非常复杂的过程, 对于不同的初始状态, 磨合系统的表面形貌会出现许多不稳定的变化周期轨迹, 但最终表面将趋于互适状态。达到互适状态的表面形貌是一种磨合吸引子, 它取决于载荷和接触面积等条件, 滑动速度和润滑状态将影响磨合过程的变化轨迹, 而可能很少会对磨合吸引子产生影响。

随着磨损过程的自组织运动阶段的结束, 摩擦学

系统达到有序的平稳运动状态, 即进入磨损混沌阶段。这时的磨损行为、特征和现象都将形成平稳有序结构, 摩擦温度分布稳定, 摩擦系数变化平稳, 摩擦表面相互适应, 磨损速率几乎不变。

磨损的混沌行为是基于磨合吸引子的高级有序运动, 属于磨损行为的定态, 因此也认为该阶段是稳定磨损阶段或正常磨损阶段。与自组织磨损阶段相比, 在摩擦副的生命期内, 混沌阶段具有较长的时间尺度。正是在系统的混沌磨损阶段, 摩擦副才得以实现其机械功能。

磨损失稳阶段或叫吸引子消失阶段, 俗称急剧磨损阶段。随着磨损过程的进行, 系统润滑状况逐渐恶化, 磨粒积聚逐渐增多, 摩擦表面温度越来越高; 相应的表面磨损加快, 系统振动加剧, 混沌运动规则进而被打破, 磨合吸引子消失。这时的摩擦学系统失稳, 功能丧失。

3 摩擦学复杂问题的量化研究方法

3.1 数学建模方法(正解法)

有些摩擦学问题目前可以通过动力学数学建模方法来研究。文献[5]对摩擦学系统的系统特性进行了动力学方程的表达研究, 认为摩擦学系统的系统特性是系统对输入的响应, 可以由系统的状态方程和输出方程来描述, 即:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= A(t)X + B(t)U, \\ Y &= C(t)X + D(t). \end{aligned} \quad (4)$$

根据上述理论, 状态方程表达的是在时间历程中系统本身的状态 X 在自身和环境作用下的变化, 自身的作用由系统结构阵 A 表达, 环境则通过关系阵 C 、 D 决定输出 Y 的当前值。据此可以认为, 用状态方程和输出方程描述摩擦学系统的特性是目前较好的方法。

摩擦学问题的动力学数学建模研究方法在摩擦噪声研究中已得到了普遍的运用^[13], 例如通过建立摩擦学系统的单自由度和多自由度自激振动模型, 研究汽车制动器的摩擦啸叫噪声问题。文献[13]的作者通过综述近 20 年来摩擦噪声的理论与实验研究现状, 分析了摩擦学系统产生噪声的机理, 提出应从摩擦学与动力学交叉的角度来研究和分析摩擦噪声。

3.2 分形几何方法(反解法)

从理论上讲, 任何摩擦学问题都可以通过动力学方程来求得摩擦学系统特性的正解, 但由于系统的复杂性使得目前能够建模解决的摩擦学问题还不多, 能否通过有效的新方法从复杂现象中获得摩擦学规律的反解, 是一个值得研究的问题。分形几何作为处理

自然界零碎而复杂现象的数学工具, 使人们能透过扑朔迷离的无序混乱现象和不规则形态, 揭示隐藏在复杂现象背后的规律, 发现局部和整体之间的本质联系。研究表明, 摩擦学系统的特性及其许多行为规律可以用分形参数来描述。

近年来, 分形理论在摩擦学研究中的应用受到了广泛关注, 在粗糙表面的表征、表面接触问题、磨损预测模型、摩擦温度分布以及磨屑定量分析等方面已取得了一定的进展^[14~17]。分形方法的引入促进了摩擦学问题的量化研究, 为解决难以处理或表达不准确的复杂摩擦学问题提供了新的途径, 对摩擦学理论的深入研究起到了一定的推动作用。

4 结论

a 摩擦学系统复杂多变, 但具有动力性、非线性、随机性、混沌性和分形性等基本特性; 摩擦学系统是复杂的非线性动力系统。

b 磨损的动力过程分为 3 个阶段, 自组织阶段、混沌阶段和失稳阶段, 它们分别与磨合磨损、正常磨损和急剧磨损 3 个阶段相对应。

c 处理摩擦学的复杂非线性问题, 数学建模方法是值得尝试和探索的方法。由于摩擦学行为具有显著的分形特征, 采用分形方法处理摩擦学复杂问题具有简单和实用的优势。

参考文献:

- [1] Zhai Y S (翟玉生), Li A (李安), Zhang J Z (张金中). Applied Tribology (应用摩擦学) [M]. Petroleum University Press (石油大学出版社), 1996: 4-6.
- [2] Gui C L (桂长林). The Archard Design Calculation Model and its Application Methods (Archard 的磨损设计计算模型及其应用方法) [J]. Lubrication Engineering (润滑与密封), 1990, 1: 12-21.
- [3] Lorenz E N. Translated by L DU S D (刘式达), L DU S S (刘式适), YAN Z W (严中伟). The Essence of Chaos (混沌的本质) [M]. Weather Press (气象出版社), 1997: 152-159.
- [4] Haken H. Information and Self-Organization (信息与自组织) [M]. Sichuan Education Press (四川教育出版社), 1988: 10-15.
- [5] Xie Y B (谢友柏). Three Axioms in Tribology (摩擦学的三个公理) [J]. Tribology (摩擦学学报), 2001, 21(3): 161-166.
- [6] So H. Characteristics of wear results tested by pin-on-disc at moderate to high speeds [J]. Tribology International 1996, 29(5): 415-423.
- [7] Miao D S (苗东升). Compendium of System Science (系统科学精要) [M]. Press of China People's University (中国人民大学出版社), 1998: 102-115.

- [8] Chan S H (陈士华), Lu J A (陆君安). Introduction to chaotic dynamics (混沌动力学初步) [M]. Press of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering (武汉水利电力大学出版社), 1998 37-80
- [9] Ge S R (葛世荣), Zhu H (朱华). The Complex Dynamical Problems of Tribology and its Fractal Research methods (摩擦学复杂性动力问题及其分形研究方法) [C]. Chengdu (成都): National Surface Engineering and Tribology Congress (表面工程及摩擦学学术会议论文集), 2000 109-113
- [10] Ge S R (葛世荣), Tonder K. The Fractal Behavior and Fractal Characterization of Rough Surfaces (粗糙表面的分形特征与分形表达研究) [J]. Tribology (摩擦学学报), 1997, 17(1): 73-80
- [11] Zhang J S (张家驷). New Concept of Friction and Wear Mechanism and Wear Calculation (摩擦磨损机理现代概念及磨损计算探讨) [J]. Lubrication Engineering (润滑与密封), 2001, 5: 80
- [12] Zhang J Z (张济忠). Fractal (分形) [M]. Tsinghua University Press (清华大学出版社), 1995 1-14
- [13] Cheng G X (陈光雄), Zhou Z R (周仲荣), Xie Y B (谢友柏). Current State and Progress of the Research of Friction-Induced Noise (摩擦噪声研究的现状和进展) [J]. Tribology (摩擦学学报), 2000, 20(6): 478-481
- [14] Chen G A (陈国安), Ge S R (葛世荣). Application of Fractal Geometry in Tribology (分形理论在摩擦学研究中的应用) [J]. Tribology (摩擦学学报), 1998, 18(2): 179-184
- [15] Ge Shirong, Chen Guoan. Fractal prediction models of sliding wear during the running-in process [J]. Wear, 231 (1999): 249-255
- [16] Ge S R (葛世荣), Zhang X Y (张晓云). The Fractal Characterization of the Wear Particles Accumulation in the Wear Process of Copper Against Steel (钢-铜磨损过程中磨粒积聚的分形研究) [J]. Tribology (摩擦学学报), 2001, 21 (2): 122-125
- [17] Zhu H (朱华), Ge S R (葛世荣), Chen G A (陈国安). Characterization of Surface Topography During Running-in Process with Fractal Parameter (磨合表面形貌变化的分形表征) [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering (机械工程学报), 2001, 37(5): 68-71

Complicate Tribological Systems and Quantitative Study Methods of Their Problems

GE Shi-rong, ZHU Hua

(College of Mechatronic and Material Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: The complicated non-linear nature of tribological system is studied on the basis of the three axioms in tribology. It is pointed out that the complicated tribological system and its behavior are characterized by time-dependence, non-linearity, randomness, chaos, and fractals of the friction and wear. Therefore, it would be helpful for further understanding the tribological features to apply the non-linear system theory to the researches of friction and wear behavior. In terms of the non-linear dynamic characteristics of a tribological system, the wear process consists of three newly defined stages that are different to the traditionally named ones. They include the self-organizing wear stage, the chaotic wear stage, and the unsteady wear stage. A definition of the fractal attraction factor is introduced to characterize the running-in of rubbing surface. It is supposed that mathematical model method and the fractal method could be suitable to analyzing and solving the complicated non-linear problems in a tribological system.

Key words: tribology; tribological system; friction and wear behavior; dynamics; chaos; fractal

Author: GE Shi-rong, male, born in 1963, Ph. D., Professor, E-mail: gesr@cumt.edu.cn