

高等学校物理实验教学示范中心参考教材

基础物理 特色实验集锦

◎主编 葛惟昆

◎副主编 孙腊珍 何振辉

高等教育出版社

高等学校物理实验教学示范中心参考教材

基础物理 特色实验集锦

Jichu Wuli Tese Shiyan Jijin

◎主编 葛惟昆

◎副主编 孙腊珍 何振辉

高等教育出版社·北京

内容提要

本书是由全国实验教学示范中心物理学科组多所高校共同编著的特色实验集锦,汇集了各示范中心多年辛勤积累的成果,反映了中国高校物理实验的前沿水平。本书根据特色实验的内容分为普通物理实验和近代物理实验两篇,普通物理实验篇收录了力学、热学、声学、电磁学、光学共28个实验,近代物理实验篇收录了量子信息、凝聚态物理、光学、等离子体物理、近代技术共35个实验。

本书可作为高等学校物理实验课程的参考书,也可供从事相关工作的人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

基础物理特色实验集锦 / 葛惟昆主编. -- 北京: 高等教育出版社, 2015.1

ISBN 978 - 7 - 04 - 041444 - 8

I. ①基… II. ①葛… III. ①物理学 - 实验 - 高等学校 - 教学参考资料 IV. ①O4 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 262004 号

策划编辑	马天魁	责任编辑	郭亚嫫	封面设计	张申申	版式设计	童 丹
插图绘制	杜晓丹	责任校对	刘娟娟	责任印制	张泽业		

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	网 址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印 刷	北京丰源印刷厂	网上订购	http://www.landaco.com
开 本	787mm×1092mm 1/16		http://www.landaco.com.cn
印 张	27.5	版 次	2015 年 1 月第 1 版
字 数	670 千字	印 次	2015 年 1 月第 1 次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	37.10 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物 料 号 41444-00

高等学校物理实验教学示范中心系列教材编委会

主 编:

葛惟昆

副主编:

张新夷 王玉凤 孙腊珍 张朝晖 何振辉

顾 问:

吴思诚 霍剑青 吕斯骅 段家祗 李相银 高立模

吴念乐 张兆奎 王植恒 耿完楨

编 委:

程福平	董有尔	方建兴	何焰蓝	黄志高	霍 雷	李海洋
李 华	李美亚	李学慧	刘 肃	刘 伟	钱 锋	权王民
盛新志	隋成华	孙晶华	孙 骞	陶纯匡	王合英	王红理
王文全	吴先球	熊 俊	熊永红	徐富新	徐建强	荀 坤
闫海青	杨卫平	姚合宝	叶庆好	余 虹	张增明	周 进
周鲁卫	朱 俊					

前 言

由全国实验教学示范中心物理学科组各单位共同编著的《基础物理特色实验集锦》，经过近两年的努力，终于得以完成。这是各参与单位共同努力的成果，它汇集了各示范中心多年辛勤积累的成果，凝聚了各校同仁们多年的心血，反映了中国高校物理实验的前沿水平，也为进一步发展建设实验物理教学工作提供了有益的参照和启示。

作为实验科学的物理学是以实验为基础的，物理实验教学无疑是物理教学中不可或缺的重要组成部分，它对理工科人才物理基础的教育，特别是实践能力和创新能力的提高，至为重要；对优秀的物理人才的培养，尤其具有基础的意义。

国家对实验教学给予特别的重视。1999 年国家颁布的《中共中央、国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》和 2010 年发布的《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020 年)》，对我国高等教育人才培养提出了新要求，强调了实践教学在培养学生实践能力和创新能力中具有的重要作用，是高等教育的创新体系的重要组成部分。

2005 年教育部、财政部启动“国家级实验教学示范中心建设工作”(教高[2005]8 号)，2007 年教育部、财政部联合下发教高[2007]1 号文件，启动“质量工程”，重点建设 500 个左右实验教学示范中心。目的是推动高等学校加强学生实践能力和创新能力的培养，加强实验教学改革和实验室建设，促进优质资源整合和共享，提升办学水平和教育质量。

在“十一五”期间，全国评审出了 501 个国家级实验教学示范中心，其中，物理学科先后评出 37 个国家级实验教学示范中心，涵盖理工院校、师范院校和综合院校等。物理学科组经过协商，推选中国科技大学为组长单位，清华大学和中山大学为副组长单位。经过几年的建设，各中心加强内涵建设，在实验教学内容、教学方法、队伍建设管理和运行机制等方面进行改革、探索与创新，使人才培养质量显著提高，在全国高校实验教学改革中发挥了引领和示范作用；实验教学获得前所未有的重视，实验教学环境明显改善，实验教学内容和教学方法推陈出新，学生的学习积极性和教学效果也有明显改善；各校涌现出一批有特色的教学实验，包括体现学校学术研究特色的、体现学校专业特色的实验。

为了加强交流，把特色实验项目成果辐射到更多的高校，国家实验教学示范中

心物理学科组经讨论决定从各示范中心挑选出有代表性的特色教学实验,整理成教材的形式,委托高等教育出版社出版,以期与其他兄弟院校分享示范中心建设成果,推动素质教育的发展。特色实验集锦由物理学科组的组长单位牵头编写,以清华大学葛惟昆教授为主编,中国科技大学孙腊珍教授和中山大学何振辉教授为副主编。

根据特色实验的内容,入选实验分为基础物理实验和近代物理实验两篇。入选的基本标准是,必须达到实验物理教科书的水平;实验内容和技术路线必须正确。初审分别由北京大学蒋莹莹、复旦大学周鲁卫、华南师范大学吴先球、南京大学苏为宁、武汉大学李美亚、西安交通大学王红理负责;复审由三位主编负责,其中,葛惟昆负责光学、量子信息以及凝聚态物理中与光和波谱相关的实验,孙腊珍负责电磁学、等离子体物理和近代技术实验,何振辉负责力学、热学、声学和凝聚态物理中的其他实验。

由于入选的特色实验都具有创新、探索的特点,因此可能还需假以时日来完善和检验。在编写和编辑过程中,都有可能存在偏误或遗漏之处,尚祈全国高校同仁、参与物理实验教学的师生以及广大读者批评指正。编者衷心希望读者能从中挑选到适合自己的实验,或借鉴开展特色实验的教学方法,取长补短,并进而有所创新和发展,共同努力,推动我国高等教育物理实验教学的水平进一步提高,更富有实效。

我们向参与本书编写和审校的各物理实验示范中心和老师们致以诚挚的谢意。

本书承高等教育出版社担负出版事宜,谨向相关编辑出版人员表示感谢!

葛惟昆 清华大学物理系

孙腊珍 中国科学技术大学物理系

何振辉 中山大学物理科学与工程技术学院

2014年3月

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010) 58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010) 82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

目 录

(注: * 为基础型实验, ** 为基础拓展型实验, # 为综合型实验, ## 为研究型实验)

第一篇 普通物理实验

第一章 力学

- ** 实验 1 周期性外力驱动的混沌摆实验 华南师范大学 3
- # 实验 2 耦合摆实验 清华大学 8
- * 实验 3 波尔振动系列实验 中山大学 16
- * 实验 4 液体表面张力系数的测量 大连大学 23
- * 实验 5 切变模量和转动惯量的测量 苏州大学 30
- ## 实验 6 应变式传感器及电子秤的设计 重庆大学 35
- ** 实验 7 毛细力的测量及毛细自组装纳米颗粒 西北大学 38

第二章 热学

- # 实验 8 非线性热对流斑图 北京大学 45
- ** 实验 9 室温磁熵变测量 吉林大学 54
- * 实验 10 热敏电阻温度计的设计安装和使用 大连大学 59
- * 实验 11 晶体的各向异性热扩散系数测量和热传导特性研究 山东大学 65

第三章 声学

- ** 实验 12 超声波传播特性及应用 北京交通大学 73
- ## 实验 13 人耳听觉听阈规律研究 复旦大学 81
- ** 实验 14 声波与超声波实验 长春理工大学 85

第四章 电磁学

- * 实验 15 测量霍尔元件的不等位电势差 河北工业大学 91
- # 实验 16 太阳能电池的特性测量及应用设计 哈尔滨工程大学 96
- * 实验 17 铁磁材料的磁滞回线和磁化曲线测量 青海师范大学 102
- ** 实验 18 磁场的测量 西南交通大学 109
- ** 实验 19 电子束聚焦和偏转研究及示波器的组装调试与测量 西南交通大学 118

第五章 光学

- ## 实验 20 成像法研究牛顿环 上海交通大学 130

* 实验 21	互联网远程控制牛顿环实验	复旦大学	136
** 实验 22	利用干涉方法测量玻璃的热膨胀系数和折射率温度系数	复旦大学	140
* 实验 23	光栅传感器特性测试	重庆大学	144
** 实验 24	热辐射与红外扫描成像系列实验	华中科技大学	147
# 实验 25	荧光温度传感与玻耳兹曼常量测量	南昌航空大学	157
* 实验 26	使用 CCD 较差测光方法绘制变星的光变曲线	云南师范大学	161
* 实验 27	光栅温度传感及波长移动解调	长春理工大学	168
* 实验 28	光的干涉和衍射现象与微小尺寸测量	天津大学	179

第二篇 近代物理实验

第六章 量子信息

## 实验 29	BB84 量子密码的实验模拟	东南大学	187
* 实验 30	电磁感应透明	山西大学	189
## 实验 31	量子纠缠实验	清华大学	198

第七章 凝聚态物理

# 实验 32	材料微波介电常量和磁导率测量	南京大学	209
# 实验 33	周期性有限弦球链系统振动模研究	北京大学	214
# 实验 34	约瑟夫森效应实验	北京大学	220
# 实验 35	巨磁阻抗效应的研究	上海交通大学	230
# 实验 36	电子俘获材料荧光光谱实验	西安交通大学	235
# 实验 37	不同材料薄膜的电阻温度特性研究	北京交通大学	241
## 实验 38	铯原子在磁光阱中的冷却与俘获	山西大学	247
# 实验 39	铁氧体微波吸收特性研究	中南大学	256
* 实验 40	液晶电光效应实验	河北工业大学	263
** 实验 41	流水式核磁共振	吉林大学	267
# 实验 42	锂离子电池正极材料 $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ 的制备及其电化学性能研究	福建师范大学	274
# 实验 43	太阳能光伏电池原理及其特性测量	福建师范大学	277
# 实验 44	ZnO 薄膜的制备和光学性能分析	华中科技大学	282
# 实验 45	表面磁光克尔效应 (SMOKE)	山东大学	288

第八章 光学

** 实验 46	双光栅测量微弱振动位移量	南京大学	295
# 实验 47	晶体光折变效应与光学存储	南开大学	302
* 实验 48	自组迈克耳孙干涉仪精确测量空气折射率	南开大学	307
## 实验 49	染料敏化太阳能电池制备	中南大学	311

# 实验 50	压电器件特征参量的光学测定	武汉大学	316
** 实验 51	空间单点光学相干层析技术	大连理工大学	321
# 实验 52	有机电致发光二极管的制备	兰州大学	325
** 实验 53	相位物体成像方法的实验研究	华南师范大学	330

第九章 等离子体物理

** 实验 54	用表面等离子体共振传感器测量金胶体溶液的折射率	西安交通大学	336
# 实验 55	表面等离子体共振传感测量	浙江工业大学	342
** 实验 56	基于表面等离激元共振测量液体折射率	武汉大学	349
# 实验 57	低温等离子体的发射光谱诊断	苏州大学	355
# 实验 58	大气压低温等离子体射流聚合物表面处理改善水接触角	大连理工大学	360

第十章 近代技术

## 实验 59	高压物理的实验研究	中国科学技术大学	365
# 实验 60	宇宙线 μ 子平均寿命的测量	中国科学技术大学	381
** 实验 61	基于锁相放大的弱信号测量及应用	中山大学	386
** 实验 62	扫描隧穿显微镜应用实验	西北大学	400
* 实验 63	虚拟仪器技术实验	兰州大学	408

第一篇

普通物理实验

第一章 力学

实验 1 周期性外力驱动的混沌摆实验

华南师范大学物理学科基础实验教学示范中心 程敏熙

一、实验目的

了解本实验系统产生混沌的条件,理解混沌的基本特征。通过对混沌摆不同参量的调节,观察不同的混沌现象,从而得到角度时序图、角速度时序图和相图,理解混沌的特性。

二、实验内容

了解实验系统的构成和各个部分的功能,熟悉基于 LabVIEW 的虚拟混沌数据处理分析仪。选定某一摆长和驱动轮的半径,选择不同的驱动速度,观察出现混沌的条件,观察随驱动速度不同而相图不同的混沌现象;选定某一驱动速度和驱动轮的半径,通过改变摆长来观察相关的混沌现象;选定某一摆长和某一驱动速度,通过改变驱动轮的半径来观察相关的混沌现象。

三、实验原理

由周期性外力驱动的混沌摆的装置示意图如图 1 所示。电机带动一个圆盘,圆盘与驱动杆连接,驱动杆固定了一个单摆的小车作往复运动,可以理解为此时单摆作受迫振动。设 O 为系统往复运动的中心,以此点建立惯性坐标系 $O-xy$ 。但小车运动是非匀加速的,是一个非惯性系,故选支架上的悬点 O' 为非惯性系 $O'-x'y'$ 的原点。根据装置图建立如图 2 所示的坐标系。以摆为研究对象,取悬点 O' 为参考点,根据质点对参考点的角动量定理,可得摆锤在非惯性系中

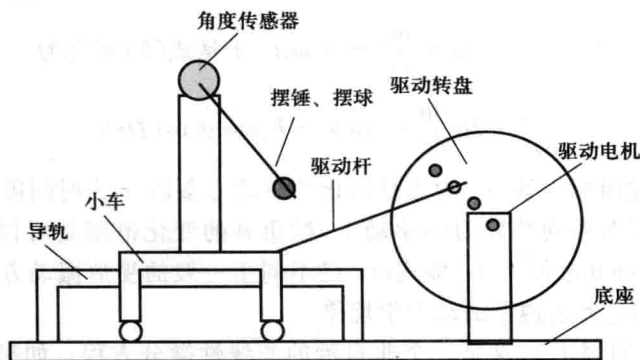


图 1 混沌摆装置示意图

的动力学方程为

$$\frac{dL}{dt} = M_G + M_{F_1} + M_{F_R} + M_{F_N} + M_{F_2} \quad (1)$$

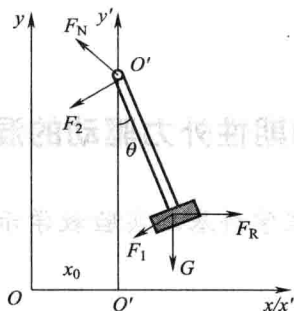


图2 混沌摆坐标系

其中, G 是摆锤所受重力, F_1 是阻尼力, F_R 是惯性力。支持力 F_N 对转动力矩无贡献, 故 $M_{F_N} = 0$ 。 F_2 是轴与轴承间的摩擦力, 也对转动力矩没有贡献, 即 $M_{F_2} = 0$ 。式中 L 表示总角动量, M_G 、 M_{F_1} 和 M_{F_R} 分别为重力矩、阻尼力矩和惯性力矩。

非惯性系坐标原点 O' 在惯性系 $O-xy$ 中的运动规律为

$$x_{O'}(t) = x_0 + r_0 \cos(\omega_d t) \quad (2)$$

$$\ddot{x}_{O'}(t) = -r_0 \omega_d^2 \cos(\omega_d t) \quad (3)$$

所以, 惯性力为

$$F_R = -m\ddot{x}_{O'}(t) = mr_0 \omega_d^2 \cos(\omega_d t) \quad (4)$$

其中, x_0 为连接小车与转盘的驱动杆长度, r_0 为连接驱动电机的转盘上某一固定点的半径, ω_d 为电机的转动角频率, 即系统的周期驱动频率, $\ddot{x}_{O'}(t)$ 是非惯性系相对于惯性系的加速度。于是式(1)可写成

$$ml^2 \frac{d^2 \theta}{dt^2} = -mgl \sin \theta - \gamma l^2 \frac{d\theta}{dt} + mlr_0 \omega_d^2 \cos(\omega_d t) \cos \theta \quad (5)$$

其中, l 为摆长, γ 为空气阻尼系数。将式(5)无量纲化, 令固有频率 $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$, 并用 ω_0^2 除式(5)

得每一项, 令 $\beta = \frac{\gamma}{2m\omega_0^2}$, $F_0 = \frac{r_0 \omega_d^2}{l\omega_0^2}$, $\Omega = \frac{\omega_d}{\omega_0}$, $\tau = \omega_0 t$, 于是式(5)可化为

$$\frac{d^2 \theta}{d\tau^2} + 2\beta \frac{d\theta}{d\tau} + \sin \theta = F_0 \cos \theta \cos(\Omega \tau) \quad (6)$$

式(6)中, β 为无量纲化阻尼因素, F_0 为无量纲化的驱动力参量, τ 为时间因子。式(6)左边出现了一个非线性项 $\sin \theta$, 在周期性外力的驱动下, 摆角 θ 的变化范围是可以很大的 ($-\infty < \theta < +\infty$), 所以不能再将 $\sin \theta$ 近似为 θ 。即式(6)已不同于一般的受迫振动方程, 它反映了单摆在非惯性系 $O'-x'y'$ 中的运动所遵循的动力学规律。

式(6)右边显含时间因子 τ , 这是一个非自治的非线性微分方程。如果引进变量 φ , 令 $\varphi = \Omega \tau$, 则可将式(6)化为下面的方程组:

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \omega \\ \dot{\omega} = -2\beta\omega - \sin\theta + F_0\cos\theta\cos\varphi \\ \dot{\varphi} = \Omega \end{cases} \quad (7)$$

方程组(7)中每一个式子的右边都不显含时间因子,因此这是一个自治的动力学系统。而一阶自治微分方程要出现混沌,必须具备两个条件:

① 方程右侧至少有一个非线性项;

② 至少要有三个变量。

可见,该系统具备了这两个基本条件,可以出现混沌现象。

因为该系统单摆的摆长并不长,所以系统是一个复摆。将以上单摆模型换成复摆模型,由以上推导易得出复摆的运动方程为

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} = -mgr_c \sin\theta - \gamma r_c^2 \frac{d\theta}{dt} + mr_0 \omega_d^2 r_c \cos(\omega_d t) \cos\theta \quad (8)$$

令 $\omega_0 = \sqrt{mgr_c/I} = \sqrt{g/l_0}$, $\beta = \frac{\gamma r_c^2}{2\omega_0^2 I}$, $F_0 = \frac{mr_0 r_c \omega_d^2}{I\omega_0^2}$, $\Omega = \frac{\omega_d}{\omega_0}$, $\tau = \omega_0 t$, 可得

$$\frac{d^2\theta}{d\tau^2} + 2\beta \frac{d\theta}{d\tau} + \sin\theta = F_0 \cos\theta \cos\Omega\tau \quad (9)$$

同样可以化成下面方程组:

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \omega \\ \dot{\omega} = -2\beta\omega - \sin\theta + F_0\cos\theta\cos\varphi \\ \dot{\varphi} = \Omega \end{cases} \quad (10)$$

可见,该复摆系统同样具备了出现混沌的两个基本条件,只要系统的参量调节适当,就可以出现混沌现象。

四、实验装置

混沌摆的实物图如图3所示。驱动电机速度可调,驱动盘上预留了几个与连杆固定的孔,用于改变驱动幅度。单摆的摆长可以通过旋转摆杆末端的摆球改变(100~115 mm),固定了摆球的带轴承小车在驱动盘和连杆的驱动下作往复运动,带动摆球摆动,摆角 θ 的变化范围: $-\infty < \theta < +\infty$ 。实验装置中用于采集摆角数据的是无触点角度传感器,以串口通信的方式连接计算机,

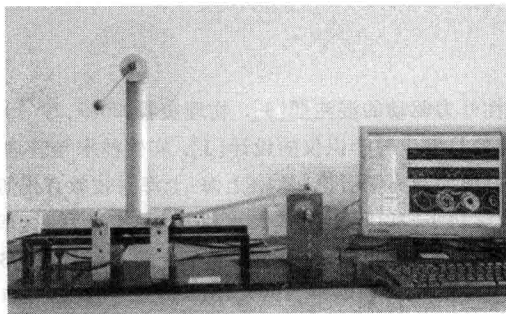


图3 混沌摆的实物图

基于 LabVIEW 的虚拟混沌数据处理分析仪实现数据采集、计算和呈现相图(注:建立一个 $\theta\dot{\theta}$ 坐标平面,称为单摆的状态空间或相空间,每给定单摆的角位移 θ 及相应的角速度 $\dot{\theta}$,就确定了单摆的一个运动状态,便可以在相空间中找到一个对应点,这样的图叫相图)实验系统的基本构成见图 4。

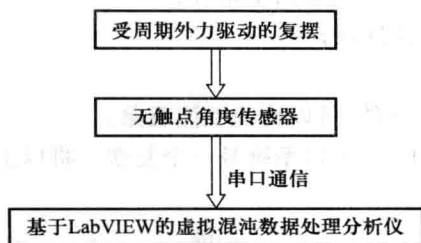


图 4 实验系统的基本构成

五、实验步骤

- (1) 选用数字显示电压的稳压电源,先测量一组在不同电压下驱动电机的驱动角速度 ω_d ,记录摆长。打开虚拟混沌数据处理分析仪,输入摆角静止时的参量、摆长长度数据和驱动角速度 ω_d 数据。
- (2) 选定某一摆长和驱动轮的半径,依次改变不同的驱动速度,观察出现混沌的条件,观察随驱动速度不同而相图不同的混沌现象。
- (3) 选定某一驱动速度和驱动轮的半径,通过改变摆长来观察相关的混沌现象。
- (4) 选定某一摆长和某一驱动速度,通过改变驱动轮的半径来观察相关的混沌现象。
- (5) 保存各个实验条件下的相图,根据实验条件和实验结果做比较分析。

六、思考题

- (1) 试比较单摆的振动方程与受驱动的混沌摆的动力学方程,分析它们的物理意义以及产生混沌的条件。
- (2) 试比较分析单摆的相图与本实验混沌摆的相图,理解用相图分析非线性运动规律的优越性。

七、参考资料

- [1] 程敏熙,曾碧芬,等. 周期性外力驱动的混沌摆[J]. 物理实验,2009,29(1):7-13.
- [2] 曾碧芬,程敏熙. 虚拟混沌信号发生与辨识仪的设计[J]. 实验技术与管理,2008,25(4):48-51.
- [3] 郝柏林. 从抛物线谈起——混沌动力学引论[M]. 上海:上海科技教育出版社,1993.
- [4] 陈士华,陆君安. 混沌动力学初步[M]. 武汉:武汉水利电力大学出版社,1998.
- [5] 刘君华. 基于 LabVIEW 的虚拟仪器设计[M]. 北京:电子工业出版社,2003.
- [6] 常树人,吕可诚. 浅说“混沌”[J]. 大学物理,1999,18(9):32-35;1999,18(10):39-42;1999,18(11):36-38.
- [7] 李曙华. 从系统论到混沌学[M]. 桂林:广西师范大学出版社,2002.

- [8] 龙运佳. 混沌振动研究方法与实践[M]. 北京:清华大学出版社,1996.
- [9] 侯国屏,王坤,叶齐鑫. LabVIEW7.1 编程与虚拟仪器设计[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [10] 黄润生. 混沌及其应用[M]. 武汉:武汉大学出版社,2001.
- [11] 杨家富,杨家宽. 试论混沌理论对现代科学技术的影响和作用[J]. 南京林业大学学报(人文社会科学版),2003(9):20-26.