



现代数学译丛 31

动力系统仿真，分析与动画 ——XPPAUT 使用指南

〔美〕 Bard Ermentrout 著
孝鹏程 段利霞 苏建忠 译



科学出版社

现代数学译丛 31

动力系统仿真，分析与动画

—— XPPAUT 使用指南

〔美〕 Bard Ermentrout 著

孝鹏程 段利霞 苏建忠 译

科学出版社

北 京

图字: 01-2017-1588

内 容 简 介

本书结合大量例子和作者科研工作中提炼出的问题,由浅入深地介绍了 XPPAUT 在动力系统模拟、分析和动画中的使用方法.全书分为 XPPAUT 安装、XPPAUT 在各类微分方程分析中的使用方法、分岔分析工具 AUTO 在 XPPAUT 中的使用、XPPAUT 动画制作、XPPAUT 各类使用技巧 5 个部分,共 9 章.

本书可作为数学等有关专业的本科生和研究生的教材,也可供动力系统学、生物数学、神经动力学等领域的科研人员参考使用.

Simulating, Analyzing and Animating Dynamical Systems: A Guide to Xppaut for Researchers and Students copyright © 2002 Society for Industrial and Applied Mathematics. Published by Science Press with permission. Chinese edition copyright © 2018 by Science Press.

图书在版编目(CIP)数据

动力系统仿真,分析与动画: XPPAUT 使用指南/(美)巴德·埃门创特(Bard Ermentrout)著;孝鹏程,段利霞,苏建忠译. —北京:科学出版社,2018.3

(现代数学译丛; 31)

书名原文: *Simulating, Analyzing, and Animating Dynamical Systems*
(A Guide to XPPAUT for Researchers and Students)

ISBN 978-7-03-056535-8

I. ①动… II. ①巴… ②孝… ③段… ④苏… III. ①动力系统(数学)-系统分析 IV. ①O19

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018) 第 025935 号

责任编辑: 李静科 / 责任校对: 邹慧卿

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 3 月第 一 版 开本: 720 × 1000 B5

2018 年 3 月第一次印刷 印张: 18 3/4 插页: 1

字数: 355 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

中文版前言

我并不是真的有兴趣写一个新版本,但在过去十年里 XPPAUT有了很多变化,所以我觉得是时候进行一些修改了.这样做的目的并不是为了钱,因为版税会被捐赠. XPPAUT有了很多新的功能,所以本书的很大一部分专门介绍如何使用新功能. XPPAUT可以自定义字体、颜色,甚至背景.如果你想要一个凯蒂猫版的 XPPAUT,你可以实现!真正新的是 XPPAUT现在可以在 iPad/iPhone 上使用. iPad 的界面很不同,现在有一章专门针对该平台进行介绍. iPad 的运行速度很快,足以求解实际问题,并且容易在课堂上进行展示.此外,安装非常容易.说到这一点,我在其他平台上也简化了安装.

我特别想感谢两个人,因为他们, XPPAUT再次复兴.密歇根州立大学的 Daniel Dougherty 在 XPPAUT 中加入了很多新选项,并且还编写了一个程序来使用多线程计算,另外他还负责大部分的用户化代码. Ashutosh Mohan (现在澳大利亚国立大学)负责 XPPAUT 的 iPad/iPhone 版本,他用 Objective C 写了数千行的代码,并且在用户界面上提出了许多伟大的想法.

Bard Ermentrout

译者序

第一次接触 XPPAUT 是读博时候导师让我做分岔图. 一开始我没有系统地学习, 而是从网上查找一些关于如何使用的文章, 包括作者在网站上的辅导资料. 后来我发现国内介绍使用 XPPAUT 的教材比较少, 清华大学雷锦志老师的《系统生物学——建模, 分析, 模拟》中对于 XPPAUT 有些简单的使用介绍. 随之我就有了翻译这部著作的想法. 因为翻译这本书是一项不小的工程, 我便邀请北方工业大学的段利霞老师和得克萨斯大学阿灵顿分校的苏建忠老师一起进行翻译和校对, 整个过程两位老师都给予了大量的帮助和支持, 才使得翻译过程比较顺利.

数值模拟分析在动力系统建模中扮演着重要的角色. XPPAUT 是其中一款非常出色的软件. 该软件是由匹兹堡大学的 Bard Ermentrout 教授开发, 并逐渐被相关领域的科研人员所熟知和使用. 在跟科学出版社签订翻译合同后, 我随即联系了原作者表明要翻译这本书, Ermentrout 教授邮件中表示非常支持, 并告知我他一直在更新这本书的计划. 因为距离第一版出版已经 14 年, 这期间 XPPAUT 也添加了一些功能, 而且也有了在手机和平板电脑上运行的应用程序. 无奈教授日程太忙, 所以就一直这样拖着. 随即 Ermentrout 教授发给我他已经部分更新过的书稿 (修订版, 未出版), 并准许我参照这个书稿进行翻译. 在此对 Ermentrout 教授的支持表示衷心的感谢.

全书共 9 章. 第 1 章主要介绍如何在不同的操作系统环境下进行软件安装. 相对于英文版, 第 1 章还添加了如何在 iPhone 和 iPad 上安装, 如何使用命令行启动软件, 还有如何对 XPPAUT 进行自定义. 第 2 章和第 3 章分别介绍 XPPAUT 的基本使用方法和如何针对微分方程写 ode 文件, 包括非线性方程分析中的方向场和零位线的绘制, 如何定义非自治系统, 如何定义方程、附加量、临时量以及非连续微分方程的处理方法. 第 4 章介绍如何将 XPPAUT 应用到课堂教学中, 包括一维离散动力系统中的分岔图和周期点、一维图中李雅普诺夫指数、非自治一维系统、非线性平面系统, 以及三维和高维系统的案例分析. 第 5 章介绍高级微分方程的使用, 包括时滞方程、积分方程、奇异积分方程、随机方程, 以及微分代数方程. 第 6 章介绍如何分析空间问题、偏微分方程和边界值问题. 第 7 章介绍著名的分岔分析工具 AUTO 如何在 XPPAUT 中使用. 第 8 章着重介绍如何使用 XPPAUT 制作动画, 相对于英文版也有很多的内容补充. 第 9 章介绍 XPPAUT 使用过程中的技巧和高级方法. 附录中包括选项设置、数值方法、微分方程文件结构、完整命令列表、报错信息等很多实用的归纳信息.

该书是一本针对动力系统分析的软件使用工具介绍书, 所以书中的案例要求对动力系统有一定的了解, 而且很多案例是作者在科研过程中提炼出来的, 需要阅读文献和相关资料才能进一步了解案例的背景知识. 动力系统是一个发展迅速的领域, 由于译者知识水平有限, 翻译过程中难免有不恰当的表述, 诚恳地希望相关领域的专家学者批评指正, 我们将努力改正.

最后, 再次感谢作者 Bard Ermentrout 教授对翻译本书的大力支持. 感谢科学出版社的赵彦超先生和李静科编辑的大力支持和帮助, 也感谢家人对于这项工作的理解、鼓励和关心!

译者

2017 年 10 月于伊凡斯维尔大学

前 言

XPPAUT是一个用于模拟、动画和分析动力系统的工具. 程序最初是使用 DOS 程序写出的, 因此 John Rinzel 和我可以对简单的可兴奋细胞膜模型进行动力学分析. 相应的 DOS 程序——PHASEPLANE, 后来成为了一个商业软件, 很多痴迷的用户使用了很多年. 20 世纪 90 年代初, 我在数学科学研究所 (MSRI) 的美丽的办公室中参与了一个月的生物数学项目. 每个夜晚, 我在 UNIX 环境下将 DOS 程序移植到 X-Windows, 同时, 享受在夕阳落日中一遍又一遍聆听着同一盘磁带 (我忘了它是什么). 从早期的程序开发至今, XPPAUT 已经成为一个非常强大的分析工具, 而且完全免费. 我也在各种 32 位的 Windows 和新的 Mac OS X 系统中成功编辑了 X 版本.

我已经加入了非常多的积分器和工具, 以及调用功能强大的延续工具包 AUTO 的特殊接口. 对于离散或者连续动力学的大多数问题, 都可以通过使用 XPPAUT 的一些技巧来进行解决, 而这正是本书的要点. 假设很多使用者并没有完全利用程序的很多特性, 这多半是我的过错, 因为程序与使用手册是同时发布的, 而手册中对于程序所有功能的全面描述的编制非常混乱.

为什么要使用 XPPAUT? 有很多可以解决微分方程的软件. 很多人使用 MATLAB、MAPLE, 或 MATHEMATICA 来研究和分析动力系统. 这些通用的工具可以解决本书中描述的所有问题. 然而, 当遇到数值求解微分方程时, 上述软件的符号包运行得非常慢. 此外, 积分方法的选择并不灵活, 而且没有交互式的积分过程. 也就是说, 在计算完成之前不能看到方程解的进展. 标准的定性分析工具 (如向量场和零等值线) 都需要额外的工具包或者手动写入. MATLAB 有很大的灵活性, 甚至可以积分非连续的微分方程, 如 integrate-and-fire 方程. 然而, 数值积分的速度一般比 XPPAUT 要慢. 上述软件没有一个提供 AUTO 的接口, 而这也是很多人使用 XPPAUT 的主要原因. 相比于其他程序, XPPAUT 中设置微分方程的语法非常简单. 最后, XPPAUT 是免费的软件, 不需要每年更新一次证书, 可以从一台计算机随意复制到另一台, 而且源代码永远开放.

如何使用这本书 本书的读者对象分两类: 一类是进行系统模拟和分析的科研或建模人员; 另一类是正在学习建模或者微分方程的学生. 从大学二年级的工程课程到研究生的动力系统课程, 我都把 XPPAUT 应用到这些课堂教学中. 同时在神经科学和生理学的一些应用课程中也使用了 XPPAUT. 本书包含许多例子和习题, 可以对分析微分方程某些特性的概念教学提供帮助. 大多数的问题和例子都出

自于科研论文,很大一部分是我研究的方向,也就是生物应用.

如果所有你想做的是求解微分方程和绘制方程的解,那么大多数你想要的可以在第 3 章中找到. 第 4 章介绍 XPPAUT 的课堂应用, 所研究的问题涉及更完整的工具集合. 第 5 章介绍包括函数方程和随机方程在内的高级微分方程. 第 6 章讲解如何离散化偏微分方程以及如何求解, 边界值问题也在本章中讨论. 使用技巧和特殊类别的微分方程会在第 9 章中进行讨论. 第 7 章介绍分岔理论以及如何在 XPPAUT 中使用 AUTO. 第 8 章展示如何使用内置的动画器制作动画. 第 9 章中会介绍制作动画的其他方法.

致谢 从很多用户各种版本的程序中我受益匪浅. 对那些发邮件表示程序如何有用而不是希望我加入新的功能或者指出哪些功能经常报错的人, 我向你们表示感谢. 对于其他人, 我也表示感谢, 因为您的评论使得 XPPAUT 有了新的功能, 同时也产生了新的漏洞. 更重要的是, 要感谢 John Rinzel 和 Artie Sherman 多年来对于不同版本的辛勤付出. 最后, 感谢我妻子 Ellen 的耐心, 还有我的儿子 Kyle 和 Jordan, 没有他们的“支持”, 本书会在 2000 年出版.

Bard Ermentrout

目 录

中文版前言

译者序

前言

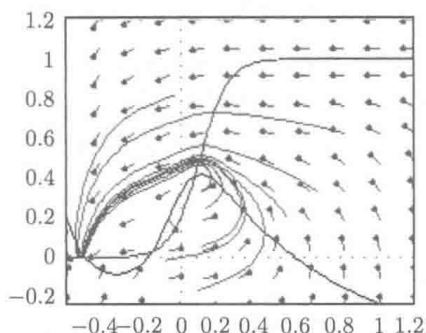
第 1 章	安装	1
1.1	UNIX 系统安装	1
1.1.1	从源代码进行安装	1
1.1.2	二进制文件	2
1.1.3	额外的 UNIX 设置	2
1.1.4	在 Linux 上运行	3
1.2	MS Windows 下安装	3
1.3	Windows 下的 X-Windows 版本	3
1.4	Mac OS-X	4
1.5	iPhone 和 iPad 安装	5
1.6	拖动与命令行	5
1.6.1	启动命令行提示符	5
1.6.2	命令行命令	6
1.7	自定义 XPPAUT	6
1.7.1	命令行选项	6
1.7.2	RC 文件	8
1.7.3	颜色	8
1.7.4	字体	9
1.7.5	.xpprc 文件示例	9
第 2 章	XPPAUT 简介	11
2.1	创建 ODE 文件	11
2.2	运行程序	13
2.2.1	主窗口	13
2.2.2	关闭程序	14
2.3	求解方程, 绘图	14
2.4	改变参数和初始值	17
2.5	数据观察器	18

2.6	保存和恢复 XPPAUT 状态	19
2.7	非线性微分方程	20
2.7.1	方向场	21
2.7.2	零等值线和不动点	22
2.7.3	命令摘要	24
2.8	最重要的数值参数	24
2.9	练习	25
第 3 章	微分方程 ODE 文件	26
3.1	介绍	26
3.2	常微分方程和映射	27
3.2.1	非自治系统	28
3.3	函数	30
3.3.1	用户自定义函数	30
3.4	辅助量和临时量	31
3.4.1	固定变量	32
3.4.2	练习	33
3.5	离散微分方程	34
3.5.1	积分放电模型	34
3.5.2	钟表: 常态和非常态	37
3.5.3	滴水龙头	39
3.5.4	练习	40
第 4 章	XPPAUT 课堂应用	42
4.1	绘图函数	42
4.2	一维离散动力系统	46
4.2.1	分岔图	47
4.2.2	周期点	49
4.2.3	一维图中的李雅普诺夫指数	51
4.2.4	魔鬼阶梯	52
4.2.5	一维复映射	54
4.2.6	迭代函数系统	59
4.3	一维常微分方程	62
4.3.1	非自治一维系统	65
4.4	平面动力系统	66
4.5	非线性系统	68
4.5.1	平面守恒动力系统	70

4.5.2 练习	73
4.6 三维及更高维	75
4.6.1 庞加莱映射, 快速傅里叶变换和混沌	77
4.6.2 庞加莱映射	79
4.6.3 练习	80
第 5 章 高等微分方程	84
5.1 函数方程	84
5.1.1 时滞方程	84
5.1.2 积分方程	87
5.1.3 制作三维动画	89
5.1.4 奇异积分方程	89
5.1.5 有趣的技巧	90
5.1.6 练习	93
5.2 随机方程	95
5.2.1 马尔可夫过程	96
5.2.2 Gillespie 方法	98
5.2.3 棘轮和游戏	104
5.2.4 尖峰时间统计	108
5.2.5 练习	110
5.3 微分代数方程	111
第 6 章 空间问题, 偏微分方程和边界值问题	115
6.1 边界值问题 (BVP)	115
6.1.1 求解边界值问题	117
6.1.2 无穷域	121
6.1.3 练习	127
6.2 偏微分方程和数组	130
6.2.1 动画文件	133
6.2.2 刚性问题	134
6.2.3 特殊积分器	137
6.2.4 练习	149
第 7 章 使用 AUTO: 分岔和延续	155
7.1 标准示例	157
7.1.1 极限环	160
7.1.2 一个“真实”案例	162
7.1.3 练习	166

7.2	映射图, 边界值问题, 受迫系统	168
7.2.1	映射	168
7.2.2	练习	171
7.3	边界值问题	171
7.3.1	同宿轨迹和异宿轨迹	174
7.3.2	练习	180
7.4	周期性受迫方程	182
7.5	将图导入 XPPAUT	184
第 8 章	动画	188
8.1	介绍	188
8.2	第一部分	188
8.2.1	摆	188
8.2.2	动画互动	192
8.2.3	回顾空间问题	196
8.2.4	滑翔机和花式滑翔机	197
8.2.5	耦合振荡器	200
8.3	我的最爱	202
8.3.1	更多的摆	202
8.3.2	过山车	206
8.3.3	链式机动车	207
8.3.4	洛伦茨方程	211
8.4	动画脚本语言	212
第 9 章	技巧和高级方法	215
9.1	简介	215
9.2	画图技巧	215
9.2.1	更好的图像	215
9.2.2	从范围积分绘制结果	217
9.3	外部数据仿真拟合	217
9.4	数据浏览器作为电子表格	220
9.5	振荡器、相位模型和平均值	221
9.5.1	计算极限环和伴随解	222
9.5.2	平均值	223
9.5.3	相位响应曲线	224
9.5.4	相模型	227
9.6	秘方	229

9.6.1 固定变量迭代	229
9.6.2 计时器	231
9.6.3 基于参数的初始数据	233
9.6.4 回顾庞加莱映射	239
9.7 不要忘记	239
9.8 与外部 C 程序的动态链接	243
9.8.1 数组示例	246
9.8.2 使用导入方法	248
参考文献	249
附录 A 颜色与线型	252
附录 B 选项	253
附录 C 数值方法	256
C.1 不动点和稳定性	256
C.2 积分器	256
C.3 AUTO 的工作原理	261
附录 D ODE 文件的结构	264
附录 E 完整命令列表	269
E.1 主菜单	269
E.2 AUTO	270
E.3 浏览器命令	270
附录 F 错误信息	271
F.1 便捷表	272
索引	278
《现代数学译丛》已出版书目	283
彩图	



第 1 章

安 装

正如福尔摩斯的所有推理,事情在解释后看上去是如此的简单.

——柯南道尔,股票经纪人的秘书

安装 XPPAUT 可以通过下载源代码后进行编译或者下载二进制的版本. 对于 UNIX, Windows 和 Mac OS X, 我将提供安装示范. 如果你对编译源代码无能为力, 最好请系统管理员为你安装或下载预编译的二进制版本. 编译版本可用于 Ubuntu Linux, Windows 和 Mac OS X 操作系统. iPad 版本只需要在 iTunes 商店下载后即可安装. 所有的文件都可以在 XPPAUT 网站找到:

<http://www.math.pitt.edu/~bard/xpp/xpp.html>

1.1 UNIX 系统安装

1.1.1 从源代码进行安装

创建一个名为 xppaut 的目录并通过输入以下代码更改到此目录:

```
mkdir xppaut
```

```
cd xppaut
```

第一步 从下面的网址上下载压缩的源代码 xppaut_latest.tar.gz 到这个新目录:

```
http://www.math.pitt.edu/~bard/xpp/xpp.html
```

第二步 解压存档:

```
tar zxvf xppaut_latest.tar.gz
```

这将创建一系列文件和子目录。

第三步 输入

```
make
```

在滚动中会偶尔出现警告 (你可以放心地忽略)。如果没有报错, 那么可能已经成功编译。如果编译很快停止, 那么可能需根据计算机的架构来编辑 Makefile。查看 README 文件和 Makefile, 里面有很多对于不同平台的建议。

第四步 如果成功编译程序, 那么在目录中应该有 xppaut 文件。查看该文件输入

```
ls xppaut
```

如果看到 xppaut* 列出, 那么已经编译成功。如果没看到这些, 则编译不成功。请查阅 README 文件以获得各种可能的修复信息。此外, 在 Makefile 的包中有很多评论。目前为止还没有找到一个我无法编译的计算机。一个常见的问题是 X Windows 资源库的路径错误。**提醒:** 我使用 -m32 标志来编译到一个 32 位架构。你可以尝试编译到一个 64 位的架构, 但是在 64 编译版本上运行 AUTO 有很多问题, 所以不建议这么做。

第五步 一旦编译完成, 将可执行文件移动到路径中的某个位置 (通常是 /usr/local/bin, 但是必须有 root 权限才能执行)。XPPAUT 不需要环境信息, 但是可以通过下面即将要描述的 .xpprc 来进行很多方面的修改。

第六步 如果没有 root 权限, 在命令行输入 make install, XPPAUT 将安装在默认目录中。

1.1.2 二进制文件

我通常会对 UBUNTU Linux 编译一个版本, 你可以找到相应的二进制文件。它可能适用于任何基于 Intel 的 Linux 系统。下载 Linux 二进制文件, 创建一个名为 xppaut 的文件夹 (目录)。把下载的文件移动到该目录。输入

```
tar zxvf xppaut6.11-ubuntu32.tgz
```

应该可以看到二进制文件 xppaut。如果使用目录 /usr/local/bin, 可以将其移动到全局可访问的目录中。

1.1.3 额外的 UNIX 设置

在一些系统中, 缩放和光标移动不总是正常工作。在这些系统中, 需要使用额外的命令来调用 XPPAUT:

```
xppaut -xorfix file.ode
```

通常会解决上述问题。

1.1.4 在 Linux 上运行

我通常只在命令行调用 XPPAUT:

```
xppaut file.ode
```

然而, 在 Ubuntu 中非常容易进行拖放. 右键单击桌面并选择添加启动器, 然后填写对话框; 唯一稍微困难的事情是在 xppaut 中输入正确的命令, 建议包括完整路径. 这样做完后, 可以拖动 ODE 文件到启动器或者双击文件.

1.2 MS Windows 下安装

将程序 winpp.zip 下载到一个文件夹中, 例如 wpp, 然后使用 Winzip 或类似的程序解压缩该文件. 创建一个 winpp 的快捷方式. 这个版本具备完整版本的所有功能. 此外, 用户界面也有很大不同. 大部分的方程文件可以在这个版本下运行, 而且大多数标准功能也都可以使用. 但是我将不再维护此版本, 不过它仍然存在并可用.

1.3 Windows 下的 X-Windows 版本

这是在 Windows 环境中运行该程序的推荐方式, 只是有点难安装. 它不使用 Windows API, 但工作方式与 UNIX 版本相同. 这看起来相当复杂, 因为我已经加入了一些非常简单的步骤.

1. 下载.

```
http://www.math.pitt.edu/~bard/bardware/binary/Xming-20050131  
-setup.exe
```

2. 下载完成后, 双击并允许打开.

3. 将出现 Xming 设置向导. 按照指示操作并在桌面上创建一个快捷方式.

4. 安装后可能会启动, 为了确保 X11 服务器正在运行, 单击屏幕底部的小隐藏图 标栏, 你应该看到一个 X. 如果没有 X, 点击桌面上的 Xming, 再次检查. 有时 服务器会被防火墙屏蔽, 应该确保没有被屏蔽.

5. 下载 Windows 的 XPPAUT 最新版本.

```
http://www.math.pitt.edu/~bard/bardware/binary/latest/xppwin.zip
```

6. 文件会出现在目标路径下.

7. 双击 xppwin (Zip 文件).

8. 资源管理器将打开, 而且会看到名为 xppall 的文件夹.

9. 点击提取文件.

10. 这一步非常重要! 对于目标路径, 只选择 C:\. 不能选择其他路径!!

11. 如果操作正确, 应该能够从资源管理器中单击“计算机”或者“我的电脑”来看到本地磁盘 C:.
12. 双击本地磁盘 C:, xppall 文件应该在里面. 如果没有就回到第 9 步.
13. 双击 xppall 文件夹.
14. 查找名为 xpp (批处理文件) 的文件, 然后右键单击创建快捷方式. 将快捷方式拖动到桌面.
15. 做如下尝试, 在 xppall 文件夹中双击 ode 文件夹.
16. 将一个文件, 例如 lorenz.ode (lorenz: type ODE-File) 拖动到桌面上的 XPP 快捷方式上, XPP 应该启动. 如果没有, 那是因为没有把 xppall 放在正确的位置, 或者 X11 服务器没有运行.
17. 要编辑 ODE 文件或自己创建, 右键单击并使用 wordpad 或其他编辑器. 当保存 ODEs 时, 应保存为纯文本格式! 对于创建新的 ODE 文件, 建议使用 NotePad, 但要始终保存为纯文本. 扩展名与 XPP 无关, 因此可以将其保存为 .txt.

1.4 Mac OS-X

现在讲述如何在 Mac 上安装二进制应用程序.

1. 进入网站.
<http://www.math.pitt.edu/~bard/bardware/binary/latest/>
2. 找到 Mac 对应的文件, 名字是 xppaut7.0osx.dmg.
3. 点击文件下载.
4. 打开下载的相应文件夹.
5. 双击 xppaut DMG 文件 (对我来说是 xpp611fosx.dmg), 一个新文件夹 xppmac 出现.
6. 将此文件夹拖动到桌面.
7. 双击文件夹, 一个新的查找窗口出现.
8. 将小 xpp 图标拖动到停靠栏中.
9. 打开新的查找窗口 (文件新查找窗口或者命令键+N).
10. 点击新查找窗口中的应用程序.
11. 将文件 xppaut 从 xppmac 文件夹拖动到应用文件夹.
12. 设置测试.
13. 在 xppmac 文件夹中, 单击 ode 文件夹. 将 ode (例如 lin.ode) 文件拖动到停靠栏的小鸚鵡图标上, 可能会请求许可, 回复 yes.
14. 如果一切正常, Mac 将自动启动 X11 服务器, 然后运行 XPP.