

输液管动力学 分析和控制

Dynamics and Control of
Fluid-Conveying Pipe Systems

徐 鉴 王 琳 著



科学出版社

非线性动力学丛书 21

输液管动力学分析和控制

Dynamics and Control of Fluid-Conveying Pipe Systems

徐 鉴 王 琳 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书应用振动力学、流固耦合力学、非线性动力学的理论与方法,结合振动控制理论,详细介绍输液管系统的稳定性、动力学与控制。本书内容主要包括:输液管的动力学建模,输液管在定常内流下的稳定性和振动特性以及微纳尺度的影响,输液管在脉动内流下的参数振动、内共振和分岔,涡激力作用下输液管的非线性动力响应,以及输液管系统稳定性的被动控制和时滞主动控制等。本书既有理论研究和数值分析,又包含与实验结果的对比,反映该学科近年来的一些研究成果,可以引导读者尽快进入本领域的前沿。

本书可供力学、数学、机械、物理、船舶与海洋工程等专业的教师、高等院校本科生、研究生和相关专业的工程技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

输液管动力学分析和控制/徐琳,王琳著. —北京:科学出版社, 2015
(非线性动力学丛书; 21)

ISBN 978-7-03-043263-6

I. ①输… II. ①徐… ②王… III. ①输油管道—动力学分析 IV. ①TE973

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015) 第 023304 号

责任编辑:刘信力/责任校对:钟 洋

责任印制:肖 兴/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>

文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 2 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 2 月第一次印刷 印张:20 3/4

字数:394 000

定价:118.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

“非线性动力学丛书”编委会

主 编 胡海岩

副主编 张 伟

编 委 (以汉语拼音为序)

陈立群 冯再春 何国威

金栋平 马兴瑞 孟 光

余振苏 徐 鉴 杨绍普

周又和

“非线性动力学丛书”序

真实的动力系统几乎都含有各种各样的非线性因素，诸如机械系统中的间隙、干摩擦，结构系统中的材料弹塑性、构件大变形，控制系统中的元器件饱和和特性、变结构控制策略等。实践中，人们经常试图用线性模型来替代实际的非线性系统，以求方便地获得其动力学行为的某种逼近。然而，被忽略的非线性因素常常会在分析和计算中引起无法接受的误差，使得线性逼近成为一场徒劳。特别对于系统的长时间历程动力学问题，有时即使略去很微弱的非线性因素，也会在分析和计算中出现本质性的错误。

因此，人们很早就开始关注非线性系统的动力学问题。早期研究可追溯到 1673 年 Huygens 对单摆大幅摆动非等时性的观察。从 19 世纪末起，Poincaré, Lyapunov, Birkhoff, Andronov, Arnold 和 Smale 等数学家和力学家相继对非线性动力系统的理论进行了奠基性研究，Duffing, van der Pol, Lorenz, Ueda 等物理学家和工程师则在实验和数值模拟中获得了许多启示性发现。他们的杰出贡献相辅相成，形成了分岔、混沌、分形的理论框架，使非线性动力学在 20 世纪 70 年代成为一门重要的前沿学科，并促进了非线性科学的形成和发展。

近 20 年来，非线性动力学在理论和应用两个方面均取得了很大进展。这促使越来越多的学者基于非线性动力学观点来思考问题，采用非线性动力学理论和方法，对工程科学、生命科学、社会科学等领域中的非线性系统建立数学模型，预测其长期的动力学行为，揭示内在的规律性，提出改善系统品质的控制策略。一系列成功的实践使人们认识到：许多过去无法解决的难题源于系统的非线性，而解决难题的关键在于对问题所呈现的分岔、混沌、分形、孤立子等复杂非线性动力学现象具有正确的认识和理解。

近年来，非线性动力学理论和方法正从低维向高维乃至无穷维发展。伴随着计算机代数、数值模拟和图形技术的进步，非线性动力学所处理的问题规模和难度不断提高。已逐步接近一些实际系统。在工程科学界，以往研究人员对于非线性问题绕道而行的现象正在发生变化。人们不仅力求深入分析非线性对系统动力学的影响，使系统和产品的动态设计、加工、运行与控制满足日益提高的运行速度和精度需求，而且开始探索利用分岔、混沌等非线性现象造福人类。

在这样的背景下，有必要组织在工程科学、生命科学、社会科学等领域中从事非线性动力学研究的学者撰写一套“非线性动力学丛书”，着重介绍近几年来非线

性动力学理论和方法在上述领域的一些研究进展,特别是我国学者的研究成果,为从事非线性动力学理论及应用研究的人员,包括硕士研究生和博士研究生等,提供最新的理论、方法及应用范例。在科学出版社的大力支持下,我们组织了这套“非线性动力学丛书”。

本套丛书在选题和内容上有别于郝柏林先生主编的“非线性科学丛书”(上海教育出版社出版),它更加侧重于对工程科学、生命科学、社会科学等领域中的非线性动力学问题进行建模、理论分析、计算和实验。与国外的同类丛书相比,它更具有整体的出版思想,每分册阐述一个主题,互不重复。丛书的选题主要来自我国学者在国家自然科学基金等资助下取得的科研成果,有些研究成果已被国内外学者广泛引用或应用于工程和社会实践,还有一些选题取自作者多年的教学成果。

希望作者、读者、丛书编委会和科学出版社共同努力,使这套丛书取得成功。

胡海岩

2001年8月

前 言

输液管道是工程中广泛存在的一类动力学系统,它在海洋工程、机械化工、能源动力、航空航天和微流体器件等领域都有重要应用。当流体作用在管道上时,往往会诱发结构出现变形或振动;与此同时,结构的这种变形或振动又会影响流体的形态。因此,输液管道是一种典型的流固耦合结构。在内部或/和外部流体力的激励下,管道系统可能出现静力失稳或动态失稳,使系统的力学性质发生本质改变,甚至诱发管道出现大幅振动,引起严重后果。例如,曾有美军直升机在高空加油时,其柔性输油管道因复杂的流体力作用,出现了上下大幅摆动,迫使受油直升机调整飞行高度和姿态,最后引发旋翼切断受油管道的事故。可见,输液管道的动力学问题工程背景明确,其动力学机理远非人们所想象的那样简单。

在结构稳定性方面的研究中,压杆和转子是其中比较经典的例子;人们熟知的 Duffing 方程、van der Pol 振子和 Lorenz 方程也对动力学理论发展及其应用有重要影响。而目前有学者认为,输液管道已逐渐成为动力学问题研究的一个新范例,此系统可呈现出纷繁复杂的动力学行为,其分析方法、研究结果和新认识对应用力学特别是流固耦合动力学、含移动质量连续体力学的发展都有理论辐射意义。事实上,输液管系统是一个比压杆更一般的力学问题;由于管内液体流动的影响,系统的运动方程含有离心力和科氏力项,故管道可以从流体中吸收能量。此外,输液管道可能是几何构形最简单的流固耦合系统,可以用相对简洁的方程来描述,在实验方面也便于实现。因此,对输液管问题的研究,可以促进动力学与控制学科的进步,还可推动相邻学科的发展。

正是基于上述原因,在综述近几十年来输液管动力学方面的研究进展的基础上,结合作者近年来在该方面所取得的研究成果,汇总而成本书。全书共分 13 章,首先简要介绍了输液管模型和非线性动力学的相关概念。然后,针对输液管系统的稳定性及微纳米尺度的影响进行了分析。其次,应用非线性动力学理论与分析方法深入研究了非保守和保守输液管系统的分岔、内共振、参数振动和混沌性质等。再次,介绍了时滞反馈控制对输液管稳定性和动力响应的控制效果,以及一种有效的被动控制手段。最后,在输液管动力学方程的基础上,利用中心流形定理,阐述了欧拉梁模型弹性体的参数共振问题。

在本书撰写过程中,得到了华中科技大学力学系黄玉盈教授、倪樵教授和密歇根大学王光伟教授的大力支持和指导。黄玉盈教授和陈立群教授在审稿过程中,提

出了许多宝贵建议和意见,胡海岩教授主编的“非线性动力学丛书”给本书的出版提供了机会。特别要感谢齐欢欢、杨前彪、尹莉、代胡亮和唐敏为丰富本书的内容所作出的努力和贡献,本书部分章节素材来自于他们的研究生学位论文,他们还为本书的部分章节绘制了计算结果示意图。感谢科学出版社刘信力编辑对本书出版所给予的支持和帮助。

本书部分内容得到国家杰出青年基金项目(编号:10625211)、国家自然科学基金重点项目(编号:11032009)、国家自然科学基金(编号:10802031、11172107、11172109)和教育部新世纪优秀人才支持计划(编号:NECT-11-0183)的资助,在此深表谢意。

此外,本书参考了国内外同行学者的许多论文和专著,无法一一列举,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中疏漏在所难免,恳请广大读者批评指正。

作 者

2014 年 4 月于上海

目 录

第 1 章 数学预备知识和输液管动力学模型	1
1.1 分岔理论	1
1.1.1 分岔的基本概念	1
1.1.2 极限环	2
1.1.3 Hopf 分岔定理	2
1.1.4 分岔的余维数	3
1.2 分岔分析方法	4
1.2.1 中心流形约化	4
1.2.2 多尺度法	5
1.2.3 规范型方法	6
1.2.4 Poincaré 截面	6
1.3 通向混沌的道路	7
1.3.1 倍周期分岔	7
1.3.2 概周期分岔	7
1.4 输液管建模基本假设	8
1.4.1 符号和坐标系	8
1.4.2 不可延伸性条件	8
1.4.3 曲率表达式	9
1.5 输液管动力学模型	10
1.5.1 悬臂输液管梁模型	10
1.5.2 两端支承输液管梁模型	11
1.5.3 输液管薄壁壳模型	12
1.6 关于书中符号标记的说明	13
参考文献	14
第 2 章 悬臂输液管稳定性	15
2.1 悬臂输液管建模	15
2.1.1 悬臂输液管力学模型	15
2.1.2 悬臂输液管横向小振幅运动微分方程	15
2.2 复超越方程数值求解方法	19
2.2.1 割线法	19

2.2.2 复方程复根的割线算法	20
2.2.3 割线法和牛顿法比较	21
2.2.4 割线法求解复杂超越方程	21
2.3 悬臂输液管道颤振失稳分析	23
2.3.1 模态分析方法	23
2.3.2 伽辽金法	25
2.3.3 输液管颤振失稳分析	28
2.4 伽辽金模态截断数对特征值的影响	30
2.5 模态形状的演化	36
2.5.1 微分求积法简介	37
2.5.2 控制方程的微分求积格式	38
2.5.3 模态形状演化	39
2.6 本章小结	41
参考文献	42
第 3 章 非均匀悬臂输液管稳定性	43
3.1 问题介绍	43
3.2 悬臂变截面输液管的稳定性	44
3.2.1 运动微分方程	44
3.2.2 稳定性分析	47
3.3 双材料悬臂输液管的稳定性	53
3.3.1 运动微分方程	53
3.3.2 算法验证	55
3.3.3 铝管和钢管组合	56
3.3.4 铝管和环氧树脂管组合	59
3.4 本章小结	63
参考文献	63
第 4 章 两端支承输液管稳定性	65
4.1 两端支承输液直管的屈曲失稳	65
4.1.1 运动微分方程	65
4.1.2 动力刚度法	66
4.1.3 屈曲失稳分析	68
4.2 两端支承输液曲管的稳定性	71
4.2.1 运动微分方程	71
4.2.2 固有频率和稳定性	72
4.3 随从力对两端支承输液管稳定性的影响	76

4.3.1 运动微分方程	76
4.3.2 稳定性分析	78
4.4 本章小结	82
参考文献	82
第 5 章 微尺度输液管稳定性	84
5.1 微尺度输液管的力学模型	85
5.1.1 修正偶应力理论	85
5.1.2 应变梯度理论	86
5.1.3 微尺度输液管力学模型的基本假设	87
5.2 微尺度输液管的运动方程	88
5.2.1 基于修正偶应力理论的运动微分方程	88
5.2.2 基于应变梯度弹性理论的运动微分方程	90
5.2.3 非均匀流速分布对运动方程的影响	92
5.3 微尺度输液管的稳定性分析	93
5.3.1 修正偶应力理论的计算结果	94
5.3.2 应变梯度理论的计算结果	97
5.3.3 非均匀流速分布对系统稳定性的影响	99
参考文献	101
第 6 章 纳尺度输液管稳定性和波传播	104
6.1 纳尺度输液管动力学分析的基本假设	104
6.2 基于非局部弹性理论的输液管模型	106
6.2.1 运动方程	106
6.2.2 稳定性分析	109
6.3 基于应变/惯性梯度理论的输液管模型	111
6.3.1 运动方程	111
6.3.2 稳定性分析	113
6.3.3 波传播分析	115
6.4 基于表面能理论的输液管模型	117
6.4.1 运动方程	117
6.4.2 稳定性分析	118
6.5 本章小结	120
参考文献	120
第 7 章 悬臂输液管流致颤振和混沌运动	123
7.1 带有喷嘴和非线性约束的悬臂输液管动力学模型	123
7.2 带有喷嘴和非线性约束的悬臂输液管伽辽金截断	127

7.3 带有喷嘴和非线性约束的悬臂输液管失稳分岔分析	127
7.3.1 失稳临界条件	127
7.3.2 分岔分析	129
7.3.3 分岔分析结果数值仿真验证	134
7.4 具有非线性约束圆弧形输液曲管的动力响应	141
7.5 本章小结	143
参考文献	144
第 8 章 水平悬臂输液管内共振和余维 2 分岔	145
8.1 水平输液管动力学模型	145
8.1.1 弧坐标和曲率	146
8.1.2 管单元力学分析	146
8.1.3 控制方程	148
8.1.4 无量纲化方程	149
8.2 水平输液管内共振临界流速	149
8.2.1 量级分析	149
8.2.2 多尺度分析	149
8.2.3 临界流速	150
8.2.4 3:1 内共振和可解性条件	153
8.3 水平悬臂输液管的 3:1 内共振分岔	156
8.3.1 平衡解及其稳定性	156
8.3.2 分岔分析	158
8.4 水平悬臂输液管主参数和 3:1 联合共振	164
8.4.1 3:1 内共振和主参数共振联合响应	164
8.4.2 平衡解及其稳定性	166
8.4.3 余维 2 分岔	170
8.4.4 倍周期分岔和混沌	175
8.5 本章小结	177
参考文献	178
第 9 章 两端支承输液管非线性动力响应	180
9.1 简支输液直管的参数振动及非线性约束力的影响	180
9.1.1 运动微分方程	181
9.1.2 偏微分方程转化为常微分方程组	183
9.1.3 非线性动力响应计算	185
9.2 微弯简支输液管的后屈曲	191
9.2.1 运动微分方程	192

9.2.2	偏微分方程转化为常微分方程组	192
9.2.3	后屈曲形态	193
9.3	圆弧形输液曲管的参数振动	197
9.3.1	非线性控制方程	197
9.3.2	求解方法	200
9.3.3	固有频率	203
9.3.4	面外参数振动的稳定性边界	203
9.3.5	非线性动力响应数值分析	205
9.3.6	与实测值的对比验证	206
9.4	本章小结	207
	参考文献	207
第 10 章	两端支承输液管涡激振动	209
10.1	问题背景	209
10.2	涡激振动原理介绍	210
10.3	定常内流下输液管的涡激振动	212
10.3.1	模型假设	212
10.3.2	运动方程	213
10.3.3	屈曲前的动力学行为	214
10.3.4	屈曲后的动力学行为	218
10.4	脉动内流下输液管的涡激振动	223
10.4.1	运动方程	223
10.4.2	分析方法	224
10.4.3	结果分析	229
10.5	本章小结	232
	参考文献	233
第 11 章	输液管稳定性控制	235
11.1	引言	235
11.2	悬臂输液管道时滞控制的力学和数学模型	236
11.2.1	控制器力学模型	236
11.2.2	数学模型	237
11.3	悬臂输液管道时滞控制稳定性分析	239
11.3.1	无控制系统的稳定性	242
11.3.2	时滞控制系统的稳定性分析	243
11.3.3	时滞控制系统的稳定性判定	245
11.4	时滞稳定性控制实例	246

11.5 带 Y 型喷头输液管的稳定性控制	256
11.5.1 力学模型	256
11.5.2 运动微分方程	257
11.5.3 稳定性的控制	259
11.6 本章小结	261
参考文献	262
第 12 章 输液管颤振时滞控制数值仿真	264
12.1 问题介绍	264
12.2 输液管道颤振失稳的数值模拟	265
12.2.1 差分格式	265
12.2.2 差分格式的算法实现	269
12.2.3 利用差分法的数值仿真	270
12.3 输液管道颤振失稳时滞控制的数值仿真	275
12.3.1 差分格式	275
12.3.2 差分格式的算法实现	278
12.3.3 利用差分法的数值仿真	279
12.4 改进时滞控制策略展望	281
12.4.1 输液管道时滞控制策略的改进方法	282
12.4.2 改进后时滞控制系统的数值模拟	282
12.4.3 其他的时滞控制改进策略	285
参考文献	286
第 13 章 欧拉梁模型弹性体参数共振	287
13.1 问题介绍	287
13.2 伽辽金离散	288
13.3 中心流形分析	290
13.3.1 正交变换	290
13.3.2 非自治方程变换为自治方程	291
13.3.3 中心流形计算	292
13.4 中心流形上的动力学及规范型	293
13.4.1 ω 远离 $2\omega_0$ 情形	296
13.4.2 ω 远离 ω_0 情形	298
13.4.3 ω 接近 $2\omega_0/3$ 情形	299
13.4.4 ω 接近 ω_0 情形	300
13.4.5 ω 接近 $2\omega_0$ 情形	302
13.5 本章小结	303

参考文献	304
附录 A	306
附录 B	308
附录 C	311
索引	312
“非线性动力学丛书”已出版书目	314

第 1 章 数学预备知识和输液管动力学模型

本章介绍在研究输液管动力学与控制过程中涉及的数学基础知识, 包括分岔理论 (Guckenheimer and Holmes, 1983)、分岔分析方法 (Kuznetsov, 2004)、混沌的基本概念 (Wiggins, 2003), 以及输液管的动力学模型及其分类 (Paidoussis, 1998).

1.1 分岔理论

分岔理论研究非线性微分动力系统由于参数的改变而引起的解的不稳定性, 从而导致解的数目的变化行为. 分岔现象是非线性动力系统中普遍存在的重要复杂动态现象之一, 如高速列车的蛇行、压杆的动态屈曲、装于滑动轴承上的大型高速转子的油膜振荡、化学反应中的突变等. 系统参数的扰动常常会引起系统的分岔. 分岔在理论和应用上都具有重要意义, 是把平衡解、周期解的稳定性和混沌联系起来的一种机制.

1.1.1 分岔的基本概念

考虑含参数的系统

$$\dot{x} = f(x, \mu) \quad (1.1.1)$$

其中, $x \in \mathbb{R}^n$ 为状态变量, $\mu \in \mathbb{R}^m$ 为分岔参数. 如果参数 μ 在连续变动时, 系统 (1.1.1) 的轨线的拓扑结构在 $\mu = \mu_0$ 处发生突然变化, 则称系统 (1.1.1) 在 $\mu = \mu_0$ 处出现分岔. μ_0 称为临界值或分岔值, (x, μ_0) 称为分岔点. 在参数 μ 的空间 $\mathbb{R}^m$ 中, 由分岔值构成的集合称为分岔集. 在 (x, μ) 的空间 $\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m$ 中, 平衡点和极限环随参数 μ 变化的图形称为分岔图.

分岔理论包括动态和静态两方面. 平衡点的个数及其稳定性随参数的变化称为静态分岔; 而静态分岔以外的分岔现象称为动态分岔. 双曲平衡点静态分岔的基本形式有叉型分岔、鞍结分岔、跨临界分岔等. 闭轨迹的个数及其稳定性的变化属于动态分岔.

若系统在平衡点或闭轨的某个邻域中存在分岔, 这类分岔问题称为局部分岔. 若要考虑相空间中大范围的分岔性态, 则称为全局分岔. 根据分岔性态是否受小扰动的影响而改变, 分岔可以分为通有性的和退化性的.

1.1.2 极限环

运动微分方程的解在相平面上所确定的相轨迹是一条孤立的封闭曲线, 它所对应的周期运动由系统的物理参数唯一确定, 与初始运动状态无关, 这种孤立的封闭相轨迹称为极限环.

闭轨迹的稳定性定义 若给定任意小的正数 ε , 存在正数 δ , 使得在初始时刻 $t = t_0$ 时, 从闭轨迹 Γ 的任一侧距离 δ 处出现的受扰相轨迹上的点在 $t > t_0$ 时总留在闭轨迹 Γ 的 ε 距离以内, 则称未扰闭轨迹为稳定; 反之为不稳定. 若未扰闭轨迹稳定, 且受扰轨迹与未扰闭轨迹的距离当 $t \rightarrow \infty$ 时趋近于零, 则称无扰闭轨迹为渐近稳定.

李雅普诺夫的稳定性 (庞加莱 (Poincaré) 稳定性) 在相平面内作线段 L 使在任何位置均不与相轨迹相切, 称为无切点线段. 从 L 上任一点 p 出发的相轨迹若再一次与线段 L 相交, 则交点 p' 称为 p 的后继点. 设 p 和 p' 相对于 L 上的参考点 O 的坐标为 s 和 s' , 则 s' 是 s 的函数, 称为后继函数.

$$s' = f(s) \quad (1.1.2)$$

此函数建立起线段 L 上的点 p 与后继点 p' 之间的点影射关系. 定义 $d(s) = s' - s$ 为 p 与 p' 的距离, 若 $f(s_0) = s_0$ 或 $d(s_0) = 0$, 则 s_0 是点影射的不动点, 即过该点的相轨迹 Γ 为孤立闭轨迹, 即极限环. $d'(s_0) < 0$ 时 Γ 为稳定极限环, $d'(s_0) > 0$ 时 Γ 为不稳定极限环. 极限环也可能出现一侧稳定但另一侧不稳定的情形, 称为半稳定极限环.

1.1.3 Hopf 分岔定理

考虑单参数平面系统

$$\dot{x} = P(x, y, \mu), \quad \dot{y} = Q(x, y, \mu) \quad (1.1.3)$$

不失一般性, 设零点 $(0, 0)$ 对 $\mu = 0$ 邻域内的任意参数 μ 值均为平衡点, 且 $\mu = 0$ 时在零点处的线性近似系统的平衡点为原点. 对 x 和 y 进行适当的非奇异线性变换后, 坐标仍然用 x 和 y 表示, 系统 (1.1.3) 可以重新写为

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \alpha(\mu)x - \beta(\mu)y + f(x, y, \mu), \\ \dot{y} &= \beta(\mu)x + \alpha(\mu)y + g(x, y, \mu) \end{aligned} \quad (1.1.4)$$

其中, $(x, y) \in U \subset \mathbb{R}^2$, $\mu \in J \subset \mathbb{R}$. 函数 f 和 g 是关于 x 和 y 不低于二次的项, 且具有四阶连续偏导数, 满足

$$f(0, 0, \mu) = g(0, 0, \mu) = 0 \quad (1.1.5)$$