

· 工程力学丛书 ·

运动稳定性 及其应用

Stability of motion and its
applications

王煦林



高等教育出版社

• 工程力学丛书

运动稳定性 及其应用

Stability of motion and its
applications

王照林

内 容 简 介

本书分三个部分,共十四章。前两个部分比较系统地讲述了两类稳定性理论的基本内容:里雅普诺夫稳定性理论、系统输入输出特性的稳定性理论;第三部分结合科学研究工作分析了运动稳定性在卫星姿态动力学、充液系统晃动动力学、弦索系统动力学中的应用以及失重流体动力学、流-固-控耦合等问题对空间飞行器姿态控制(姿态稳定与姿态机动)的影响,最后,讨论了运动稳定性与突变论、耗散结构论、协同论之间的某些联系。

本书可供研究生、高年级大学生(力学、应用数学、自动控制、系统工程、工程物理与化学、空间科学技术等专业),以及有关专业的教师和科技工作者阅读,也可以作为自学运动稳定性及其应用者的参考书。

(京)112号

运动稳定性及其应用

王照林

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 14.75 字数 350 000

1992年5月第1版 1992年5月第1次印刷

印数 0001—1 893

ISBN7-04-002525-6/TB·150

定价11.65元



作者简介

王照林, 山东掖县人, 1928年生。1953年毕业于唐山交通大学铁道工程系, 1963年毕业于莫斯科大学研究生院, 并获数学物理副博士学位。现任清华大学教授、博士生(含博士后)导师, 中国力学学会一般力学专业委员会主任, 《力学学报》编委等职。长期从事运动稳定性与卫星姿态动力学、充液系统动力学与控制、大系统理论与现代应用力学等方面的研究工作。其中主要有: 飞机大扰动的稳定性、大角度静电陀螺仪研制、三轴稳定平台研制、卫星内部液体晃动稳定性研究、航天器内部液体晃动对控制系统的影响、挠性卫星稳定性及近地卫星精密定位、广播通信卫星液体晃动数学模型的研究、应用现代控制理论研究复杂系统动力学、空间站动力学研究、空间交会对接技术等。

主要著作与论文有:《现代控制理论基础》、《陀螺相关非孤立系统的不稳定性定理》、《现代应用力学中的分布参数大系统》、《运动稳定性与卫星姿态动力学》、《充液系统动力学与航天高技术问题》等 60 余种。

有关的科研成果,曾获得“全国科学大会奖”及“国家教委科学技术进步奖”等多次奖励。

前 言

本书是作者在清华大学多年来科学研究成果的基础上并结合研究生教学经验写成的(主要是 1978~1988 年期间)。本书适当地引进国内外当前研究运动稳定性的新课题、新方法和新成果,使教学工作、科学研究工作和现代工程技术问题有机地结合起来,体现了一定的实践性、科学性和先进性。

本书首先考虑到,使读者在基本概念、基本定理和基本应用方面,从理论与工程技术的结合上来掌握这门科学;同时,也注意了运动稳定性在学术上和在新技术与高技术应用中的深度,为研究生、高年级大学生(主要是力学、应用数学、自动控制、系统工程、工程物理学与化学、空间科学技术等专业)以及有关专业的教师和科技工作者今后的科学研究工作打下一个良好的基础;本书也可以作为有志于运动稳定性研究者的自学参考书。

运动稳定性的理论与应用研究,近二十年来,已经有了很大的发展。它是现代应用力学与数学、现代控制理论、大系统理论和空间高技术(卫星、飞船、空间站、航天飞机、空天飞机各领域)等研究工作的重要基础之一。近十年来,运动稳定性理论在非线性非平衡态热力学、耗散结构理论、协同论、突变论、生态系统以及神经网络的研究中,也有了重要的应用,这些新的研究方向进一步显示了运动稳定性理论的功能和巨大的优越性。从六十年代起,国内外关于运动稳定性研究的论文与专著多了起来,内容也比较丰富,而且各有特色,为运动稳定性的研究与发展作出了创造性的贡献,也是我们学习参考的重要文献。

本书包括三个方面的内容,共十四章。第一部分,里雅普诺夫(Ляпунов)稳定性理论及其推广,包括有,运动稳定性的基本定理、系统平衡状态的稳定性、按首次近似判别非线性系统的稳定性、陀螺相关系统的稳定性、约束阻尼系统的稳定性、关于系统的部分变量稳定性、大范围渐近稳定性等七章。第二部分,系统输入输出特性的稳定性理论,包括有,泛函分析基础、控制理论基础、输入输出稳定性等三章。第三部分,专题研究与应用问题,其中有,大系统方法与卫星姿态动力学、充液系统晃动动力学、弦索系统动力学、现代科学技术问题与运动稳定性等四章。

在学习本书时,需要一些数学和力学方面的基础知识,如:常微分方程、数学物理方程、应用泛函分析基础和系统分析力学、陀螺系统、现代控制理论基础等。

作者谨对蒲富全同志、张乃恭同志的精心审稿,以及胡方同志、盛宝英同志在组织和整理书稿时的悉心协助,表示深切的感谢。

王照林于清华大学

1988年2月

主要符号表

a 贮箱半径

$a(r) \in K$ 函数 $a(r)$ 属于 K 类

$a(\|y\|)$ 函数

$b(\|y\|)$ 函数

A, B, C 主惯量矩

$A = [a_{ij}]_{i,j=1}^n$ 矩阵

div 散度

$D = [d_{ij}]_{i,j=1}^n$ 矩阵

D 区域

$D(\varphi), D_\varphi$ 映射 φ 的定义域

e 参数

esssup 本性最大模

f “新月形”液面高

F 主动力矢量

$F(t, x)$ 非线性函数矢量

g 重力加速度

$g(t)$ 无扰运动矢量

$G(t, y)$ 非线性函数矢量

H 动量矩

$H(t, q, p)$ 哈密顿(Hamilton)函数

$H(t, \tau)$ 脉冲响应阵

$H = (R^n, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ 希尔伯特(Hilbert)空间

$\inf$ 下确界

I 单位矩阵

$I=[\tau, \infty)$ 时域

$I \times \Omega$ 叉乘空间

$J[u(\cdot)]$ 性能指标泛函

$K=\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)$ 中曲率

$K(q)=-K^T(q)$ 斜对称矩阵

l 特征长度

$\lim$ 极限

$\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) \dot{=} f(x)$ 几乎处处收敛

$L(t, q, \dot{q})$ 拉格朗日 (Lagrange) 函数

$Lp[0, \infty]$ Lp 空间

Lpe Lp 空间的延拓

$(Lp[0, \infty], \|\cdot\|_p)$ 线性赋范空间

m^*E 外测度

m_*E 内测度

M 主矩

n 单位法线矢量

N_{Bo} BOND 数

$O(\delta^2)$ 对 δ 的二阶以上小量

p, q, r 瞬时角速度分量

$p=(p_1, \cdots, p_n)^T$ 广义冲量矢量

$q=(q_1, \cdots, q_n)^T$ 广义坐标矢量

$Q=(t, q, \dot{q})$ 广义力

$Q, \tilde{Q}$ 区域

R 矢量

$\overline{R}$ 张量

$\tilde{R}$ 斜对称张量

$R(t, q, \dot{q}, \beta)$ 劳思(Routh)函数

$R_0(q, \beta)$ 参变力函数

R^n n 维欧氏空间

$R = \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q}$ 瑞利(Rayleigh)阻尼函数

$R = \dot{q}^T K(q) q$ 约束阻尼函数

$\sup$ 上确界

S_f 自由液面

S_w 腔体壁与液体的交面

S 面积

$S_1(A) (\|x\| = A)$ 以 O 点为中心的 (A) 球

$S_2(\lambda) (\|x\| = \lambda)$ 以 O 点为中心的 (λ) 球

$T(t, q, \dot{q})$ 动能

$(\cdot)^T$ 转置

$U(q)$ 力函数

$u(t)$ 输入

$V(t, x)$ V 函数

$V = \sum_{i=1}^n \beta_i V_i$ 加权 V 函数

$V = (V_1, \dots, V_n)^T$ 矢量 V 函数

$V(q)$ 势函数

$W(x)$ W 函数

$W(q, \omega)$ 参变力函数

$W(s)$ 传递函数阵

$x = (x_1, \dots, x_n)^T$ n 维矢量

- $\|x\|$ 矢量 x 的范数
 $X(t)$ 基本解阵
 X 非空集
 $x_T(t)$ $x(\cdot)$ 在区间 $[0, T]$ 上的截函数
 $(X, \mathcal{T})$ 拓扑空间
 $X_K^+[t_0, t_a]$ 能控子空间
 $X_K^-[t_0, t_a]$ 不能控子空间
 $X_g^+[t_0, t_a]$ 能观子空间
 $X_g^-[t_0, t_a]$ 不能观子空间
 $\hat{X}$ 随机矢量 X 的估计
 $\hat{X}_M$ X 的最小方差估计
 $\hat{X}_L$ X 的线性最小方差估计
 $\tilde{X}$ 估计误差
 $E\tilde{X}\tilde{X}^T$ 均方误差阵
 $\text{Var}X$ 方差阵
 $\text{Cov}(X, Z)$ 协方差阵
 $\langle x, y \rangle = x \cdot y = x^T y$ 内积
 $x \times y$ 矢性积
 α_{ij} 表面张力系数
 α, β, γ 夹角或参变量
 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ 方向余弦
 δ_{ij} Kronecker 符号
 δT T 的一阶变分
 δW 主动力所做的虚功
 $\delta(t-t_i)$ 单位 δ 广义函数
 e 充液比
 η 垂直于自由液面的扰动波高

θ_c	接触角
λ	参数
λ_j	特征值
μ	粘性运动系数
$\mu_1, \dots, \mu_n$	特征频率
ν	粘性系数
π	圆周率
ρ	密度
$\rho(x, y)$	点 x 与 y 之间的距离
$\rho(x, x_0) < \delta (\delta > 0)$	以 x_0 为中心的 δ 邻域
σ_j	振动频率
τ	时间参量或时间常数
Γ	陀螺力
φ	势函数
$\{\phi_j\}$	特征矢量
$R(\varphi)$ 或 R_φ	映射 φ 的值域
$\Phi(t, t_0)$	状态转移阵(跃迁阵)
$\omega = (p, q, r)^T$	瞬时角速度矢量
Ω	欧氏空间的连通开集(含零点)
Π_1, Π_2, Π_3	势函数
$\in$	属于
$\bar{\in}$	不属于
$\subset$	包含
$\cup$	和或并
$\cap$	积或交
$\forall$	对所有, 给定
$\exists$	对某些, 存在

$\rightarrow$ 从而、使得

$\&$ 以及

$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)^T$ 哈密顿算子

$\Delta = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$ 拉普拉斯 (Laplace) 算子

$\nabla \varphi = \text{grad} \varphi$ 梯度

$\nabla \cdot \mathbf{a} = \text{div} \mathbf{a}$ 散度

$\nabla \times \mathbf{a} = \text{rot} \mathbf{a}$ 旋度

$\frac{d\varphi}{dn} = \text{grad}_n \varphi = (\nabla \varphi) \cdot \mathbf{n}$ 函数 φ 在法线 $\mathbf{n}$ 方向上的变率等

于梯度在该方向上的射影

φ_x φ 对 x 的偏导数

φ_{xx} φ 对 x 的二阶偏导数

$\left[\frac{\partial F(t, \mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right]_{\mathbf{x}=\mathbf{0}}$ 雅可比阵 (Jacobian)

$\det A = |A|$ 矩阵 A 的行列式

$\det \left[\frac{\partial^2 L}{\partial q_i \partial q_j} \right]_{i,j=1}^n$ 海氏式 (Hessian)

$<$ 定向的

Σ 原始系统

Σ^* 对偶系统

Σ_H 闭环系统

目 录

主要符号表	I
绪论	1

第一部分 里雅普诺夫稳定性理论及其推广

第一章 运动稳定性的基本定理	7
§ 1.1 引言	7
§ 1.2 系统的受扰运动微分方程	8
§ 1.3 运动稳定性的基本定义	11
§ 1.4 V 函数的基本性质	13
§ 1.5 直接法的基本定理	16
§ 1.6 注记	32
第二章 系统平衡状态的稳定性	37
§ 2.1 引言	37
§ 2.2 系统的运动微分方程	37
§ 2.3 拉格朗日定理	41
§ 2.4 契达耶夫定理	42
§ 2.5 系统相对平衡状态的稳定性	45
§ 2.6 耗散力与陀螺力对平衡状态的影响	51
§ 2.7 注记	63
第三章 按首次近似判别非线性系统的稳定性	67
§ 3.1 引言	67
§ 3.2 非定常系统的首次近似微分方程	68
§ 3.3 定常系统的首次近似微分方程	71
§ 3.4 引理	74
§ 3.5 定常线性系统的 V 函数存在定理	79

§ 3.6	里雅普诺夫矩阵方程	82
§ 3.7	按首次近似判别非线性系统的稳定性定理	86
§ 3.8	关于稳定性的判据	90
§ 3.9	注记	97
第四章	陀螺相关系统的稳定性	101
§ 4.1	引言	101
§ 4.2	劳思方程	102
§ 4.3	系统动能和劳思函数分析	104
§ 4.4	劳思稳定性定理	109
§ 4.5	关于劳思逆定理	112
§ 4.6	注记	121
第五章	约束阻尼系统的稳定性	124
§ 5.1	引言	124
§ 5.2	关于约束阻尼系统	125
§ 5.3	大系统加权 V 函数方法	127
§ 5.4	约束阻尼系统的稳定性定理	128
§ 5.5	上述定理的推论及其应用	131
§ 5.6	研究约束阻尼系统稳定性的其它方法	133
§ 5.7	注记	138
第六章	关于系统的部分变量稳定性	143
§ 6.1	引言	143
§ 6.2	部分变量稳定性的基本定义	144
§ 6.3	V 函数的性质	146
§ 6.4	关于部分变量稳定性定理和不稳定性定理	148
§ 6.5	关于部分变量渐近稳定性定理	153
§ 6.6	部分变量稳定性的某些推广	158
§ 6.7	注记	167
第七章	大范围渐近稳定性	168
§ 7.1	引言	168
§ 7.2	全局渐近稳定性的基本定义	169
§ 7.3	V 函数的性质	170

§ 7.4	引理	171
§ 7.5	全局渐近稳定性定理	171
§ 7.6	空间飞行器在轨道上翻滚的控制问题	176
§ 7.7	控制系统的绝对稳定性	178
§ 7.8	分析非线性系统稳定性的其它方法	187
§ 7.9	全局渐近稳定性的某些推广	194
§ 7.10	注记	200
§ 7.11	第一部分小结	201

第二部分 系统输入输出特性的稳定性理论

第八章	泛函分析基础	211
§ 8.1	引言	211
§ 8.2	集及其基本运算	211
§ 8.3	距离空间	219
§ 8.4	拓扑空间	221
§ 8.5	线性赋范空间	224
§ 8.6	内积空间·完备性	226
§ 8.7	线性算子与泛函	230
§ 8.8	L_p 空间及延拓的 L_p 空间	234
§ 8.9	注记	237
第九章	控制理论基础	239
§ 9.1	引言	239
§ 9.2	系统的状态空间表示	240
§ 9.3	控制系统的分析问题	241
§ 9.4	系统的能控性与能观性	245
§ 9.5	反馈控制系统	253
§ 9.6	最优控制问题	256
§ 9.7	最优滤波问题	268
§ 9.8	注记	274
第十章	输入输出稳定性	276
§ 10.1	引言	276

§ 10.2	输入输出稳定性定义	277
§ 10.3	输入输出稳定性与里雅普诺夫稳定性之间的关系	279
§ 10.4	开环系统的稳定性	282
§ 10.5	反馈系统的稳定性	285
§ 10.6	波波夫稳定性判据	287
§ 10.7	注记	293
§ 10.8	第二部分小结	294

第三部分 专题研究与应用问题

第十一章 大系统方法与卫星姿态动力学 299

§ 11.1	引言	299
§ 11.2	大系统方法	300
§ 11.3	大系统加权 V 函数方法与陀螺运动的稳定性	305
§ 11.4	大系统加权 V 函数方法与挠性卫星的姿态稳定性	311
§ 11.5	注记	326

第十二章 充液系统晃动动力学 333

§ 12.1	引言	333
§ 12.2	充液系统的状态方程	334
§ 12.3	充液系统的微重晃动动力学	336
§ 12.4	微重条件下方形贮箱内液体晃动问题	339
§ 12.5	部分充液球形偏置贮箱的卫星系统旋转稳定性	347
§ 12.6	部分充液卫星系统的三轴姿态稳定性	361
§ 12.7	注记	370

第十三章 弦索系统动力学 376

§ 13.1	引言	376
§ 13.2	旋转力学系统的状态方程	377
§ 13.3	关于旋转系统的稳定性	383
§ 13.4	全充液刚体弦索系统动力学	386
§ 13.5	部分充液刚体弦索系统动力学	392
§ 13.6	注记	396