

航天飞行器 最优控制理论与方法

Spacecraft Optimal Control Theory and Method

程国采 编著

国防工业出版社

09902143

航天飞行器最优控制
理论与方法
Spacecraft Optimal Control
Theory and Method

程国采 编著

国防工业出版社

• 北京 •

图书在版编目(CIP)数据

航天飞行器最优控制理论与方法/程国采编著. —北京:
国防工业出版社, 1999. 4

ISBN 7-118-01967-4

I. 航… II. 程… III. 航天器-飞行控制; 最佳控制 IV.
V488.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 21309 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 11 $\frac{7}{8}$ 307 千字

1999 年 4 月第 1 版 1999 年 4 月北京第 1 次印刷

印数: 1-1000 册 定价: 20.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄 宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允 曾 铎

秘书长 崔士义

委 员 于景元 王小谟 尤子平 冯允成

(以姓氏笔划为序) 刘 仁 朱森元 朵英贤 宋家树

杨星豪 吴有生 何庆芝 何国伟

何新贵 张立同 张汝果 张均武

张涵信 陈火旺 范学虹 柯有安

侯正明 莫梧生 崔尔杰

序 言

近年来,由于电子计算机软、硬件技术和控制理论的发展,最优控制理论日益得到广泛的应用。在航天飞行器的动力学、制导和控制方面,如飞行器飞行轨道的选择,制导、控制方案的确定,控制参数的选择,人造卫星发射、轨道转移、回收、变轨和交会、对接等都广泛的采用了最优控制理论。

本书叙述航天飞行器最优控制理论和方法,共分六章:第一章是在集合论的基础上,叙述了函数和泛函数的极值问题;第二章介绍了庞特里亚金(Понтрягин)极小原理的各种形式,并给出一个直观的证明,举例说明了极小原理的用法;第三章叙述线性系统最优控制理论,并以潘兴Ⅱ导弹再入制导规律的选择为例,阐明二次型性能指标的用法;第四章概略的介绍了别尔曼(Bellman)的动态规划法和微分对策原理;第五章和第六章以人造地球卫星和航天飞机作为对象,介绍近年来国内外有关的研究成果,综合的论述了最优控制理论在航天飞行器动力学、制导和控制方面的应用。

本书的内容,曾在有关部门和单位多次讲授过,并曾以讲义形式作为飞行力学、飞行器控制系统和飞行器总体设计专业研究生的教材。今正式出版本书,目的是总结本人多年来教学和研究成果,奉献给广大自动控制、飞行力学、航空航天科技工作者参考。

在本书编写过程中,陈克俊副教授和博士研究生吴美平同志曾提出过一些修改和补充意见,特此表示感谢。

编著者

内 容 简 介

全书内容可划分为两部分。(1)最优控制理论部分:包含庞特里亚金的最小原理,并介绍了别尔曼动态规划方法和微分对策原理。(2)最优控制理论在以下几方面的应用:航天飞行器的轨道转移、拦截、交会、对接、返回再入和航天飞机的制导与控制。

本书可作为大学本科高年级和研究生的教材,并可用作从事自动控制和航天飞行器的工程设计者和科学研究者参考。

The whole text of this book is divided into the following two major parts: (1) Theory of optimal control including the minimum principle of Pontryagin and introduction of Bellman dynamic programming and Differential games. (2) Applications of optimal control theory in the following fields: Orbit transfer, Interceptions, Rendezvous, Docking, Reentry of spacecraft and to study Guidance and control of shuttle.

This book can serve as textbook of Senior-graduate and Postgraduate. It can also be used for reference of scientist and engineer of automation and spacecraft.

目 录

绪论	1
第一章 函数的极值	4
§ 1.1 函数的极值理论	4
§ 1.2 条件极值	10
§ 1.3 极值必要条件与拉格朗日乘子	14
§ 1.4 泛函的极值	16
§ 1.5 泛函数极值的研究——变分法基础	18
§ 1.6 用变分法研究最优控制问题	32
§ 1.7 自由端点固定时间最优控制问题的充分条件	43
§ 1.8 固定端点固定时间的最优控制问题	47
第二章 庞特里亚金极小原理	52
§ 2.1 有关庞特里亚金极小原理的一些基本假设	52
§ 2.2 各种控制问题的庞特里亚金极小原理	55
§ 2.3 庞特里亚金极小原理的一个直观证明	85
§ 2.4 关于极小原理的讨论	115
§ 2.5 最优控制的充分条件——哈密顿-雅可比方程	117
§ 2.6 具有轨线约束的动态系统的最优控制	129
第三章 线性系统最优控制理论	134
§ 3.1 动力系统的能控性和能观测性	134
§ 3.2 线性动力系统的能控性和能观测性的基本定理	136
§ 3.3 二次型性能指标的最优控制	143
§ 3.4 用二次型性能指标最优方法确定潘兴 I 导弹 再入制导规律	161
§ 3.5 奇异最优控制	168

第四章 动态规划与微分对策原理简介	179
§ 4.1 动态规划原理概述	179
§ 4.2 连续系统的动态规划法	185
§ 4.3 微分对策简介	189
§ 4.4 追逐与逃避问题	195
第五章 大气层外航天飞行器的最优控制	198
§ 5.1 大气层外飞行器最优控制运动方程的建立	199
§ 5.2 特征矢量 λ_v 沿轨道变化特性的研究	206
§ 5.3 脉冲推力作用下的轨道机动	223
§ 5.4 霍曼转移及其最优轨道转移条件	240
§ 5.5 冲量式拦截、交会的研究	247
§ 5.6 在有限推力作用下空间拦截的最优控制	253
§ 5.7 在有限推力作用下,两沿椭圆轨道运行卫星 的交会问题	261
§ 5.8 两航天飞行器交会对接问题的研究	285
第六章 发射运载段和返回再入段的最优控制	305
§ 6.1 人造卫星运载火箭推力程序的选择	305
§ 6.2 优化理论在航天飞机轨道设计中的应用	313
§ 6.3 载人飞船返回段的最优控制	332
§ 6.4 再入机动弹道的最优设计	349
§ 6.5 空气动力控制再入飞行器的最优制导	354
参考文献	363

Contents

Introduction	1
Chapter 1 Functions Extremum	4
1.1 Theory of Functions Extremum	4
1.2 Functions Extremum with Constraints	10
1.3 Necessary Conditions and Lagrange Multipliers	14
1.4 Extremum of Functional	16
1.5 Theory of Functionals Extremum—Fundamental variation.	18
1.6 The Variational Approach to control problem; Necessary conditions for a Free-end-point problem.	32
1.7 The Variational Approach to control Problem; Sufficient conditions for the Free-end-point problem.	43
1.8 The Variational Approach to control problem; A Fixed-end-point problem.	47
Chapter 2 The Minimum Principle of Pontryagin.	52
2.1 The Minimum Principle of Pontryagin; Fundamental hypotheses.	52
2.2 The various theorems of the Minimum Principle of Pontryagin.	55
2.3 A Heuristic Proof of Minimum Principle.	85
2.4 Some Comments on the Minimum Principle.	115
2.5 Sufficient conditions for optimality;	

Hamilton-Jacobi equation	117
2. 6 Dynamical System of Optimal control with constraints	129
Chapter 3 The linear Dynamical Systems of Optimal Control	134
3. 1 Controllability and Observability of Dynamical System.	134
3. 2 Fundamental theorems of Controllability and Observability.	136
3. 3 The control of Optimal linear Systems with Quadratic criteria.	143
3. 4 The Optimal Reentry Guidance Law of PI Missile with Quadratic criteria.	161
3. 5 Singular Problem of Optimal control	168
Chapter 4 Dynamic Programming and differential games	179
4. 1 Introduction of Dynamic Programming	179
4. 2 Dynamic Programming of the continuous System	185
4. 3 Introduction of Differential games	189
4. 4 Tracker and Escape trajectory	195
Chapter 5 Spacecraft Optimal Control out of the atmosphere	198
5. 1 The motion Equations of Spacecraft Optimal control out of the atmosphere.	199
5. 2 Primer Vector λ_v on a conic orbit	206
5. 3 Optimal Transfer Maneuver by the Impulsive thrusters	223
5. 4 Hohmann Transfers and the conditions of Optimal Transfer	240

5. 5	Interceptions and Rendezvous by the Impulsive thrusts	247
5. 6	Interceptions of Optimal control by the finite thrusts	253
5. 7	Transfer between two ellipse orbits by the finite thrusts	261
5. 8	Rendezvous and Docking Technology between two Spacecrafts	285
Chapter 6 Optimal Control for the Launch and Reentry Path		305
6. 1	Optimal Thrust Programming for a Launch of Satellite	305
6. 2	Optimal Control theory for Shuttle trajectory	313
6. 3	Optimal Control of manned Spacecrafts Reentry Path	332
6. 4	Design of Maneuverable Trajectories of Reentry vehicle	349
6. 5	Optimal Guidance for Aerodynamically Controlled Reentry Vehicles	354
REFERENCES		363

绪 论

在研究航天飞行器动力学、制导和控制问题时,经常遇到最优控制问题。60年代以来,由于计算机和控制技术的发展,优化理论得到了迅速的发展和应用。诸如飞行器轨道的选择,制导控制方案的确定,控制参数的选择,人造卫星的轨道转移、变轨与交会等,都广泛地采用了优化理论。

在利用优化理论研究问题时,往往把受控对象用微分方程形式表示,如果用 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 表示各状态参量,用 $u_1, u_2, \dots, u_m$ 表示控制参量,则动态系统微分方程可写成

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n, u_1, u_2, \dots, u_m, t) \quad (0.1)$$
$$i = 1, 2, \dots, n, \quad m \leq n$$

其矢量形式为

$$\frac{dX}{dt} = F(X, U, t) \quad (0.2)$$

式中 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$;

$U = (u_1, u_2, \dots, u_m)^T$;

$F(X, U, t) = [f_1(x_1, x_2, \dots, x_n, u_1, u_2, \dots, u_m, t), \dots, f_n(x_1, x_2, \dots, x_n, u_1, u_2, \dots, u_m, t)]^T$

为 n 维矢量函数。

如果给定起始状态

$$X_0 = (x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0})^T$$

则最优控制就是按什么样的性能指标来选择控制参数问题。即

$$U(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)]^T$$

在终端时刻最优地达到预期目标。为此需要引入性能指标函数

$$J(U) = K[X(t_f), t_f] + \int_{t_0}^{t_f} f_0[X(t), U(t), t] dt \quad (0.3)$$

所谓最优,即是选择控制变量 $U(t)$ 使性能指标函数 $J(U)$ 达到极小(或极大)。

控制 U 的定义域通常为有界闭域,它们可能是作用在飞行器上的力、力矩,发动机燃料的重量、温度,电流强度、电压等等。它们之间也可能存在某些关系(控制变量约束)。

在时间 t 的某一闭区间 $t_0 \leq t \leq t_1$ 上,在允许控制域 U 内取值的每一个函数 $U=U(t)$ 称为控制,而把任何逐段连续可以具有第一类间断点的控制称为允许控制。这就意味着除有限个时刻外, $U(t)$ 对所考虑的全部时间 t 都是连续的。

关于不连续函数的间断点有如下两种定义。

定义 1:第一类不连续点。如果在此点函数 $U(t)$ 虽然不连续,但是左、右两极限存在,即

$$U(\tau - 0) = \lim_{\substack{t \rightarrow \tau \\ t < \tau}} U(\tau); \quad U(\tau + 0) = \lim_{\substack{t \rightarrow \tau \\ t > \tau}} U(\tau)$$

但为了确定起见,以后假定在每一间断点 τ , 控制 $U(\tau)$ 的值等于左极限,即

$$U(\tau) = U(\tau - 0)$$

定义 2:第二类不连续点,如果在此点,函数 $U(t)$ 不连续,且至少两个极限之一不存在。

例

$$f(x) = \begin{cases} -1 & \text{当 } x < 0 \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } x = 0 \text{ 时} \\ 1 & \text{当 } x > 0 \text{ 时} \end{cases} \quad \text{为第一类间断点}$$

$$f(x) = \begin{cases} \sin \frac{1}{x} & \text{当 } x > 0 \text{ 时} \\ x & \text{当 } x \leq 0 \text{ 时} \end{cases} \quad \text{为第二类间断点}$$

$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 为状态矢量,表示 n 维空间的相点,它刻画了动态系统的每一瞬间的动态特性。这样,最优控制问题亦可叙述为在相空间 X 内,给定两个点 X_0 和 X_1 ,在所有能把相点从位置

X_0 转移到位置 X_1 的允许控制中(如果这样的控制存在的话), 寻找这样一个允许控制, 能使性能指标

$$J(U) = K[X(t_f), t_f] + \int_{t_0}^{t_f} f_0[X(t), U(t), t] dt$$

取最小(或最大)可能值。

这样的控制 $U=U^*$ 称为最优控制, 由此所确定的轨线 $X(t)=X^*(t)$ 称为最优轨线。

最优控制理论是关于函数的极值理论, 是变分法的应用与发展。为此, 首先介绍函数与泛函(变分法)的极值理论, 然后叙述庞特里亚金极小原理, 别尔曼动态规划, 微分对策等最优控制理论及其计算方法。

第一章 函数的极值

§ 1.1 函数的极值理论

一、一元函数

设 R 为一维欧氏空间 $L \subset R, R = \{-\infty < x < \infty\}$, 则两点 x, y 的距离 $d(x, y)$ 定义为

$$d(x, y) = |x - y|, \quad x \in R, y \in R$$

设一元函数 $f(x)$ 定义在集合 L 上, 则得极值定义如下。

定义 1 x^* 称为 $f(x)$ 在 L 上局部极小值点, 是指存在一个 $\epsilon > 0$, 使得对于 $\{|x - x^*| < \epsilon\} \cap L$ 的一切 x

$$f(x) \geq f(x^*) \quad (1.1)$$

定义 2 x^{**} 称为 $f(x)$ 在 L 上的绝对极小值点, 是指

$$f(x) \geq f(x^{**}) \quad (1.2)$$

对 L 内一切 x 均成立。

通常 $f(x)$ 的函数值, 不一定定义在整个 R 上, 可能定义在 R 的某一区间 $L = [a, b]$ 上, 设 $f(x)$ 定义在 L 上, $\bar{L}$ 表示集合 L 的闭包, L' 表示所有凝聚点, 则

$$\bar{L} = L \cup L', \bar{L} \subset R$$

如果 $f(x)$ 在 $\bar{L}$ 上连续, 则它一定在 $\bar{L}$ 的某处达到极小值(绝对极小值)。从图 1.1 可以看出, 局部极小值有各种不同情况, 有不同的确定方法。

如果 x^* 是 $[a, b]$ 的一个内点, $f'(x^*)$ 存在, 若 x^* 是 $f(x)$ 的极小值点, 则必要条件是

$$f'(x^*) = \left. \frac{df(x)}{dx} \right|_{x^*} = 0 \quad (1.3)$$