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

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11⅞ 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

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

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

Contents

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 $x_1,x_2,\cdots,x_n$ 表示各状态参量，用 $u_1,u_2,\cdots,u_m$ 表示控制参量，则动态系统微分方程可写成

$$\frac{\mathrm{d}x_i}{\mathrm{d}t}=f_i(x_1,x_2,\cdots,x_n,u_1,u_2,\cdots,u_m,t) \tag{0.1}$$

$$i=1,2,\cdots,n,\qquad m\leqslant n$$

其矢量形式为

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{X}}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{F}(\boldsymbol{X},\boldsymbol{U},t) \tag{0.2}$$

式中　$\boldsymbol{X}=(x_1,x_2,\cdots,x_n)^T$；

$\boldsymbol{U}=(u_1,u_2,\cdots,u_m)^T$；

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

为 n 维矢量函数。

如果给定起始状态

$$\boldsymbol{X}_0=(x_{10},x_{20},\cdots,x_{n0})^T$$

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

$$\boldsymbol{U}(t)=[u_1(t),u_2(t),\cdots,u_m(t)]^T$$

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

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

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 $t_0 \leqslant t \leqslant t_1$ 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

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

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

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

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

$X=(x_1, x_2, \cdots, x_n)^T$ 为状态矢量，表示 n 维空间的相点，它刻划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

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

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

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

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 $\varepsilon>0$，使得对于 $\{|x-x^*|<\varepsilon\} \cap L$ 的一切 x

$$f(x) \geqslant f(x^*) \tag{1.1}$$

定义 2　x^{**} 称为 $f(x)$ 在 L 上的绝对极小值点，是指

$$f(x) \geqslant f(x^{**}) \tag{1.2}$$

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

$$f'(x^*)=\left.\frac{\mathrm{d}f(x)}{\mathrm{d}x}\right|_{*}=0 \tag{1.3}$$