

飞行力学手册

第 二 册

國防工業出版社

飞行力学手册

第二册

——飞行器运动的计算与分析——

〔苏〕 C. A. 高尔巴钦科等 编

常伯浚 滕衣虹 关世义 于风仙 译

关世义 常伯浚 校

国防工业出版社

内 容 简 介

手册中讲述了飞行器运动(弹道、过渡过程、稳定性和操纵性)的计算与分析方法。其内容包括:飞行器对目标的各种导引法的计算方法及特性;飞行器作为控制对象的研究方法,这些方法是以线性自动控制理论、非线性力学和非线性系统的稳定性理论为基础的;应用于飞行器的最优控制理论的基本问题及其解法;弹道、过渡过程、平衡飞行状态的数值计算方法和求解控制最优化问题的数值方法。同时,给出了说明各种计算与分析方法的运用技巧的例子。

所有关于飞行器及其特性的数据都是假想的。

本手册的主要对象是从事飞行力学和研究飞行器控制系统的科学工作者和工程技术人员。同时,对于高等学校相应专业的大学生也是有益的。

Механика Полета

—Расчет и анализ движения летательных аппаратов—

С. А. Горбатенко, Э. М. Макашов,

Ю. Ф. Полушкин, Л. В. Шефтель

Издательство «Машиностроение»

Москва 1971

*

飞行力学手册

第 二 册

——飞行器运动的计算与分析——

[苏] С. А. 高尔巴钦科等 编

常伯浚 滕衣虹 关世义 于凤仙 译

关世义 常伯浚 校

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业登记证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张13¹/₈ 277千字

1975年12月第一版 1975年12月第一次印刷 印数: 0,001—4,400册

统一书号: 15034·1411 定价: 1.35元

目 录

第一章 导引方法	11
1.1 导引弹道要素的某些定义	14
1.2 追踪曲线法	16
1.2.1 追踪曲线法运动学弹道的图解法	16
1.2.2 追踪曲线法的运动方程及导引法方程	17
1.2.3 按追踪曲线截击等速直线飞行的目标 ($\omega_n = 0, v_n = \text{常数}$) 且截击机的速度为常数 ($v = \text{常数}$) 时, 运动方程的解	18
1.2.4 按追踪曲线截击沿对数螺旋线等速运动的目标 ($\psi - \psi_n = \text{常数}$, $v_n = \text{常数}$) 且截击机的速度为常数 ($v = \text{常数}$) 时, 运动 方程的解	28
1.3 平行接近法	31
1.3.1 平行接近法运动学弹道的图解法	31
1.3.2 平行接近法的运动方程及导引法方程	32
1.3.3 按平行接近法截击等速直线飞行的目标 ($\omega_n = 0, v_n = \text{常数}$) 且截击机的速度为常数 ($v = \text{常数}$) 时, 运动方程的解	34
1.3.4 按平行接近法截击等速圆周运动的目标 ($\omega_n = \text{常数}, v_n = \text{常数}$) 且截击机的速度为常数 ($v = \text{常数}$) 时, 运动方程的解	37
1.4 常值目标方位角导引法	44
1.4.1 常值目标方位角导引法运动学弹道的图解法	45
1.4.2 常值目标方位角导引法的运动方程和导引法方程	45
1.4.3 按常值目标方位角法截击等速直线飞行的目标 ($\omega_n = 0, v_n = \text{常数}$) 且截击机的速度为常数 ($v = \text{常数}$) 时, 运动方程 的解	47
1.5 三点法	56
1.5.1 三点法运动学弹道的图解法	56
1.5.2 三点法的运动方程和导引法方程	57
1.5.3 按三点法截击等速直线飞行的目标 ($\omega_n = 0, v_n = \text{常数}$) 且截击机的速度为常数 ($v = \text{常数}$) 时, 运动方程的解	59

1.5.4	按三点法截击等速直线飞行的目标 ($\omega_n = 0$, $v_n = \text{常数}$) 且截击机的速度变化 ($v = \text{变数}$) 时, 运动方程的解	76
1.6	比例接近法	78
1.6.1	比例接近法的运动方程和导引法方程	78
1.6.2	按比例接近法截击等速直线飞行的目标 ($\omega_n = 0$, $v_n = \text{常数}$) 且截击机的速度为常数 ($v = \text{常数}$) 时, 在极坐标系中运动 方程的解	79
1.7	直接导引法	81
1.7.1	直接导引法运动学弹道的图解法	81
1.7.2	直接导引法的运动方程和导引法方程	83
1.7.3	按直接导引法截击等速直线飞行的目标 ($\omega_n = 0$, $v_n = \text{常数}$) 且量 $1/t_M$ 和截击机的速度为常数 ($v = \text{常数}$) 时, 在极坐标 系中运动方程的解	84
第二章	作为控制对象的飞行器	85
	主要符号	85
2.1	线性自动控制理论的基本知识	88
2.1.1	飞行器运动控制系统	88
2.1.2	自动控制理论的基本概念和定义	90
2.1.3	飞行器作为控制系统中的一个环节	97
2.1.4	传递函数——飞行器动态特性的表示方法	101
2.1.5	频率特性——飞行器动态特性的表示方法	108
2.1.6	结构图的变换	113
2.1.7	运动的稳定性	113
2.2	飞行器的纵向扰动运动	123
2.2.1	运动方程	123
2.2.2	特征多项式和特征方程式	124
2.2.3	自由运动	125
2.2.4	传递函数	127
2.2.5	频率特性	143
2.2.6	过渡函数	149
2.3	飞行器的横侧扰动运动	153
2.3.1	运动方程	153
2.3.2	特征多项式和特征方程式	154

2.3.3	自由运动	156
2.3.4	偏航运动方程	158
2.3.5	偏航运动中, 飞行器的传递函数和频率特性	158
2.3.6	滚转运动方程	159
2.3.7	滚转运动中, 飞行器的传递函数和频率特性	160
2.3.8	滚转操纵面阶跃偏转时, 滚转角和滚转角速度的过渡过程	162
2.4	飞行器作为非线性的控制对象	162
2.4.1	运动方程	162
2.4.2	关于按一次近似方程来研究飞行器未扰动运动稳定性的 适用性	164
2.4.3	研究飞行器定常运动稳定性的李亚普诺夫 (А.М.Ляпунов) 直接法	166
2.4.4	研究飞行器非定常运动稳定性的李亚普诺夫直接法	176
2.4.5	在经常(连续)作用的干扰下, 飞行器运动的稳定性	180
2.4.6	飞行器在有限时间内的运动稳定性	182
2.4.7	用邦加来 (Пуанкаре) 的小参量法计算飞行器的运动	185
2.4.8	用克雷洛夫-波哥留波夫 (Крылов-Боголюбов) 的均值法 计算飞行器的运动	192
第三章	飞行器控制和设计参数的最优化方法	201
	主要符号	201
3.1	以最优控制过程数学理论为基础的最优化方法的 一般特性	204
3.1.1	最优控制的技术问题及其数学模型	204
3.1.2	最优过程理论方法的分类	206
3.1.3	控制最优性的必要条件, 控制最优性的充分条件和最优控 制的存在性问题	208
3.1.4	最优控制理论方法所获得的结果的一般特性	210
3.1.5	合理应用最优化方法的条件	211
3.2	最优控制过程数学理论的基本概念和定义	212
3.2.1	数学模型	212
3.2.2	可控过程的状态变量(相座标)	216
3.2.3	控制	217
3.2.4	系统状态的演化. 运动微分方程	219
3.2.5	泛函. 控制的品质指标	220

3.2.6	自主系统	221
3.2.7	允许的程序控制	222
3.2.8	允许的控制规律	224
3.2.9	允许轨迹和允许过程	224
3.2.10	边界条件。边值问题	225
3.3	最优控制基本问题的提法	227
3.3.1	最优程序控制的基本问题	227
3.3.2	最优坐标控制的基本问题	228
3.3.3	最优轨迹	228
3.3.4	最优控制基本问题的几何解释	230
3.4	程序控制基本问题的最优性必要条件。极大值原理	232
3.4.1	问题的简述	232
3.4.2	某些辅助的作法和术语	233
3.4.3	庞特里亚金 (Л.С.Понтрягин) 的极大值原理	234
3.4.4	极大值原理的一些推论	239
3.5	控制规律综合的基本问题的最优性必要条件。动态规划方法	256
3.5.1	最优控制规律的综合问题	256
3.5.2	动态规划的最优性原理	256
3.5.3	弱必要条件	260
3.6	特殊控制最优性的必要条件	279
3.6.1	问题的简述	279
3.6.2	寻求特殊控制的步骤	282
3.6.3	特殊控制最优性的必要条件	284
3.6.4	特殊控制和正规控制共轭点上的必要条件	284
3.7	当不等式类型的约束仅仅包含相坐标 x 时, 控制最优性的必要条件	285
3.7.1	问题的简述	286
3.7.2	最优性的必要条件	287
3.8	当不等式类型的约束同时包含相坐标 x 和控制 u 时, 控制最优性的必要条件	292
3.8.1	问题的简述	293
3.8.2	边界条件的类型	294

3.8.3	最优性的必要条件	294
3.8.4	克列布什 (Клебш) 必要条件的类比	296
3.9	古典变分学的基础	299
3.9.1	波尔泽 (Больц), 迈耶 (Майер), 拉格朗日 (Лагранж) 问题	299
3.9.2	波尔泽问题中, 泛函极值的第一类必要条件	301
3.9.3	在波尔泽问题中, 对 $f \equiv 0$, $f_k \equiv 0$ 的情况, 泛函极小值的 第二类必要条件 (威尔斯特拉斯 (Вейерштрасс) 条件)	305
3.9.4	在波尔泽问题中, 对 $f = 0$, $f_k = 0$ 的情况, 极小值的 第三类必要条件 (勒让得 (Лежандр)-克列布什条件)	306
3.9.5	波尔泽问题中的第四类必要条件 (雅可比 (Якоби)-迈耶- 克涅泽尔 (Кнезер) 条件)	307
3.10	在具有间断相座标的问题中, 最优性的必要条件	309
3.10.1	问题的简述	309
3.10.2	最优性的必要条件	310
第四章	求解飞行力学问题的数值方法	314
	主要符号	314
4.1	飞行器运动微分方程的数值积分方法	317
4.1.1	阿当姆斯 (Адамс) 法	320
4.1.2	预测和修正法	331
4.1.3	龙格-库塔 (Рунге-Кутта) 法	339
4.1.4	在飞行力学问题中选择和应用数值积分方法的一般意见 和建议	360
4.2	计算飞行器平衡飞行状态的数值方法及求解飞行力学 边值问题的方法 (求解非线性方程组的数值方法)	362
4.2.1	求解非线性方程组的迭代法	366
4.2.2	简单迭代法	376
4.2.3	牛顿法	383
4.2.4	割线法	393
4.3	飞行器的弹道和飞行控制最优化的数值方法	408
4.3.1	泛函的梯度法	408
4.3.2	惩罚函数法	413
4.3.3	牛顿-康托洛维奇 (Канторович) 法	415
参考文献		419

飞行力学手册

第二册

——飞行器运动的计算与分析——

〔苏〕 C. A. 高尔巴钦科等 编

常伯浚 滕衣虹 关世义 于风仙 译

关世义 常伯浚 校

国防工业出版社

内 容 简 介

手册中讲述了飞行器运动(弹道、过渡过程、稳定性和操纵性)的计算与分析方法。其内容包括:飞行器对目标的各种导引法的计算方法及特性;飞行器作为控制对象的研究方法,这些方法是以线性自动控制理论、非线性力学和非线性系统的稳定性理论为基础的;应用于飞行器的最优控制理论的基本问题及其解法;弹道、过渡过程、平衡飞行状态的数值计算方法和求解控制最优化问题的数值方法。同时,给出了说明各种计算与分析方法的运用技巧的例子。

所有关于飞行器及其特性的数据都是假想的。

本手册的主要对象是从事飞行力学和研究飞行器控制系统的科学工作者和工程技术人员。同时,对于高等学校相应专业的大学生也是有益的。

Механика Полета

—Расчет и анализ движения летательных аппаратов—

С. А. Горбатенко, Э. М. Макашов,

Ю. Ф. Полушкин, Л. В. Шефтель

Издательство «Машиностроение»

Москва 1971

*

飞行力学手册

第 二 册

——飞行器运动的计算与分析——

[苏] С. А. 高尔巴钦科等 编

常伯浚 滕衣虹 关世义 于凤仙 译

关世义 常伯浚 校

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业登记证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张13¹/₈ 277千字

1975年12月第一版 1975年12月第一次印刷 印数: 0,001—4,400册

统一书号: 15034·1411 定价: 1.35元

前 言

计算和分析飞行器运动的工程方法正在不断地发展和完善。对此过程起着促进作用的因素是：1. 飞行器所面临新问题的不断出现以及原有问题的复杂化；2. 新的科学成就和最优过程理论、非线性力学、自动控制理论以及用电子数字计算机求解问题的数值方法应用于设计实践。

考察一下研究飞行器飞行力学问题的现代方法，可以发现这样的趋向，这些方法可进一步分为两类：一类是对于具有给定特性的运动的综合（设计）方法，另一类是对于已被充分描述的运动的分析方法。不过应当注意，这些方法之间的界限有时是人为规定的。导引方法、最优控制理论的方法、自动控制理论的综合方法属于第一类；非线性力学方法、自动控制理论的分析方法以及求解方程的某些数值方法属于第二类。本手册将研究这两类方法，而主要研究导引弹道、飞行器运动的稳定性、符合某一品质指标的最优控制方法和弹道，以及飞行器绕质心的运动。

同时，本手册还给出了求解许多飞行力学问题的数值方法。求解代数方程、超越方程和微分方程的具体数值方法的选取，是从应用这些方法在电子数字计算机上进行计算的有效性和准确度出发的。

本手册采用了第一册中给定的符号、坐标系和飞行力学方程的描述形式。如果第一册是建立飞行器运动的数学模型

的话，那么，第二册将给出这一运动的计算和分析方法以及具有必要技术特性的运动的综合方法（例如，满足一定的边界条件或按某一品质指标的最优化条件）。

全书共分四章。

第一章研究飞行器对目标的各种导引方法并给出了描述这些方法的运动学方程的解。这些解将按导引方程在两种坐标系（直角坐标系和相对极坐标系）中的描述形式给出。

第二章提供了飞行器作为（线性和非线性的）控制对象的研究方法。本章的方法可用来估计飞行器的质心运动（弹道）和绕质心运动的稳定性和品质。

第三章给出了关于飞行器最优控制或最优设计参数问题的各种提法，这里所谓的“最优”是指使飞行器的某一品质指标达到极小或极大值而言的。叙述了基于极大值原理、动态规划和古典变分学的最优控制的必要条件的提法。

第四章相应于飞行器飞行力学的不同问题，叙述了运动方程的数值积分方法、平衡飞行状态的计算方法、边值问题的解、控制函数最优化的数值方法。

书中材料的叙述形式力求便于实际应用。大多数方法的叙述伴以典型例子，以说明这些方法在工程计算中应用的步骤。

所用的主要符号列于每章的开始，其余符号在正文中给出。

目 录

第一章 导引方法	11
1.1 导引弹道要素的某些定义	14
1.2 追踪曲线法	16
1.2.1 追踪曲线法运动学弹道的图解法	16
1.2.2 追踪曲线法的运动方程及导引法方程	17
1.2.3 按追踪曲线截击等速直线飞行的目标 ($\omega_n = 0, v_n = \text{常数}$) 且截击机的速度为常数 ($v = \text{常数}$) 时, 运动方程的解	18
1.2.4 按追踪曲线截击沿对数螺旋线等速运动的目标 ($\psi - \psi_n = \text{常数}$, $v_n = \text{常数}$) 且截击机的速度为常数 ($v = \text{常数}$) 时, 运动 方程的解	28
1.3 平行接近法	31
1.3.1 平行接近法运动学弹道的图解法	31
1.3.2 平行接近法的运动方程及导引法方程	32
1.3.3 按平行接近法截击等速直线飞行的目标 ($\omega_n = 0, v_n = \text{常数}$) 且截击机的速度为常数 ($v = \text{常数}$) 时, 运动方程的解	34
1.3.4 按平行接近法截击等速圆周运动的目标 ($\omega_n = \text{常数}, v_n = \text{常数}$) 且截击机的速度为常数 ($v = \text{常数}$) 时, 运动方程的解	37
1.4 常值目标方位角导引法	44
1.4.1 常值目标方位角导引法运动学弹道的图解法	45
1.4.2 常值目标方位角导引法的运动方程和导引法方程	45
1.4.3 按常值目标方位角法截击等速直线飞行的目标 ($\omega_n = 0, v_n = \text{常数}$) 且截击机的速度为常数 ($v = \text{常数}$) 时, 运动方程 的解	47
1.5 三点法	56
1.5.1 三点法运动学弹道的图解法	56
1.5.2 三点法的运动方程和导引法方程	57
1.5.3 按三点法截击等速直线飞行的目标 ($\omega_n = 0, v_n = \text{常数}$) 且截击机的速度为常数 ($v = \text{常数}$) 时, 运动方程的解	59

1.5.4	按三点法截击等速直线飞行的目标 ($\omega_n = 0$, $v_n = \text{常数}$) 且截击机的速度变化 ($v = \text{变数}$) 时, 运动方程的解	76
1.6	比例接近法	78
1.6.1	比例接近法的运动方程和导引法方程	78
1.6.2	按比例接近法截击等速直线飞行的目标 ($\omega_n = 0$, $v_n = \text{常数}$) 且截击机的速度为常数 ($v = \text{常数}$) 时, 在极坐标系中运动 方程的解	79
1.7	直接导引法	81
1.7.1	直接导引法运动学弹道的图解法	81
1.7.2	直接导引法的运动方程和导引法方程	83
1.7.3	按直接导引法截击等速直线飞行的目标 ($\omega_n = 0$, $v_n = \text{常数}$) 且量 $1/t_M$ 和截击机的速度为常数 ($v = \text{常数}$) 时, 在极坐标 系中运动方程的解	84
第二章	作为控制对象的飞行器	85
	主要符号	85
2.1	线性自动控制理论的基本知识	88
2.1.1	飞行器运动控制系统	88
2.1.2	自动控制理论的基本概念和定义	90
2.1.3	飞行器作为控制系统中的一个环节	97
2.1.4	传递函数——飞行器动态特性的表示方法	101
2.1.5	频率特性——飞行器动态特性的表示方法	108
2.1.6	结构图的变换	113
2.1.7	运动的稳定性	113
2.2	飞行器的纵向扰动运动	123
2.2.1	运动方程	123
2.2.2	特征多项式和特征方程式	124
2.2.3	自由运动	125
2.2.4	传递函数	127
2.2.5	频率特性	143
2.2.6	过渡函数	149
2.3	飞行器的横侧扰动运动	153
2.3.1	运动方程	153
2.3.2	特征多项式和特征方程式	154

2.3.3	自由运动	156
2.3.4	偏航运动方程	158
2.3.5	偏航运动中, 飞行器的传递函数和频率特性	158
2.3.6	滚转运动方程	159
2.3.7	滚转运动中, 飞行器的传递函数和频率特性	160
2.3.8	滚转操纵面阶跃偏转时, 滚转角和滚转角速度的过渡过程	162
2.4	飞行器作为非线性的控制对象	162
2.4.1	运动方程	162
2.4.2	关于按一次近似方程来研究飞行器未扰动运动稳定性的 适用性	164
2.4.3	研究飞行器定常运动稳定性的李亚普诺夫 (А.М.Ляпунов) 直接法	166
2.4.4	研究飞行器非定常运动稳定性的李亚普诺夫直接法	176
2.4.5	在经常(连续)作用的干扰下, 飞行器运动的稳定性	180
2.4.6	飞行器在有限时间内的运动稳定性	182
2.4.7	用邦加来 (Пуанкаре) 的小参量法计算飞行器的运动	185
2.4.8	用克雷洛夫-波哥留波夫 (Крылов-Боголюбов) 的均值法 计算飞行器的运动	192
第三章	飞行器控制和设计参数的最优化方法	201
	主要符号	201
3.1	以最优控制过程数学理论为基础的最优化方法的 一般特性	204
3.1.1	最优控制的技术问题及其数学模型	204
3.1.2	最优过程理论方法的分类	206
3.1.3	控制最优性的必要条件, 控制最优性的充分条件和最优控 制的存在性问题	208
3.1.4	最优控制理论方法所获得的结果的一般特性	210
3.1.5	合理应用最优化方法的条件	211
3.2	最优控制过程数学理论的基本概念和定义	212
3.2.1	数学模型	212
3.2.2	可控过程的状态变量(相座标)	216
3.2.3	控制	217
3.2.4	系统状态的演化. 运动微分方程	219
3.2.5	泛函. 控制的品质指标	220

3.2.6	自主系统	221
3.2.7	允许的程序控制	222
3.2.8	允许的控制规律	224
3.2.9	允许轨迹和允许过程	224
3.2.10	边界条件。边值问题	225
3.3	最优控制基本问题的提法	227
3.3.1	最优程序控制的基本问题	227
3.3.2	最优坐标控制的基本问题	228
3.3.3	最优轨迹	228
3.3.4	最优控制基本问题的几何解释	230
3.4	程序控制基本问题的最优性必要条件。极大值原理	232
3.4.1	问题的简述	232
3.4.2	某些辅助的作法和术语	233
3.4.3	庞特里亚金 (Л.С.Понтрягин) 的极大值原理	234
3.4.4	极大值原理的一些推论	239
3.5	控制规律综合的基本问题的最优性必要条件。动态规划方法	256
3.5.1	最优控制规律的综合问题	256
3.5.2	动态规划的最优性原理	256
3.5.3	弱必要条件	260
3.6	特殊控制最优性的必要条件	279
3.6.1	问题的简述	279
3.6.2	寻求特殊控制的步骤	282
3.6.3	特殊控制最优性的必要条件	284
3.6.4	特殊控制和正规控制共轭点上的必要条件	284
3.7	当不等式类型的约束仅仅包含相坐标 x 时, 控制最优性的必要条件	285
3.7.1	问题的简述	286
3.7.2	最优性的必要条件	287
3.8	当不等式类型的约束同时包含相坐标 x 和控制 u 时, 控制最优性的必要条件	292
3.8.1	问题的简述	293
3.8.2	边界条件的类型	294

3.8.3	最优性的必要条件	294
3.8.4	克列布什 (Клебш) 必要条件的类比	296
3.9	古典变分学的基础	299
3.9.1	波尔泽 (Больц), 迈耶 (Майер), 拉格朗日 (Лагранж) 问题	299
3.9.2	波尔泽问题中, 泛函极值的第一类必要条件	301
3.9.3	在波尔泽问题中, 对 $f \equiv 0$, $f_k \equiv 0$ 的情况, 泛函极小值的 第二类必要条件 (威尔斯特拉斯 (Вейерштрасс) 条件)	305
3.9.4	在波尔泽问题中, 对 $f = 0$, $f_k = 0$ 的情况, 极小值的 第三类必要条件 (勒让得 (Лежандр)-克列布什条件)	306
3.9.5	波尔泽问题中的第四类必要条件 (雅可比 (Якоби)-迈耶- 克涅泽尔 (Кнезер) 条件)	307
3.10	在具有间断相座标的问题中, 最优性的必要条件	309
3.10.1	问题的简述	309
3.10.2	最优性的必要条件	310
第四章	求解飞行力学问题的数值方法	314
	主要符号	314
4.1	飞行器运动微分方程的数值积分方法	317
4.1.1	阿当姆斯 (Адамс) 法	320
4.1.2	预测和修正法	331
4.1.3	龙格-库塔 (Рунге-Кутта) 法	339
4.1.4	在飞行力学问题中选择和应数值积分方法的一般意见 和建议	360
4.2	计算飞行器平衡飞行状态的数值方法及求解飞行力学 边值问题的方法 (求解非线性方程组的数值方法)	362
4.2.1	求解非线性方程组的迭代法	366
4.2.2	简单迭代法	376
4.2.3	牛顿法	383
4.2.4	割线法	393
4.3	飞行器的弹道和飞行控制最优化的数值方法	408
4.3.1	泛函的梯度法	408
4.3.2	惩罚函数法	413
4.3.3	牛顿-康托洛维奇 (Канторович) 法	415
	参考文献	419