

无人驾驶飞行器的 飞行动力学

[苏联]A. A. 列别捷夫, Л. С. 契尔诺勃洛夫金 合著



国防工业出版社

无人駕駛飞行器的 飞行动力学

[苏联]A. A. 列別捷夫、J. C. 契尔諾勃洛夫金 合著

張炳暄 楊为民 王祖澧 等譯
肖业倫 韓貴凤 趙震炎
趙震炎 張炳暄 肖业倫 等校



國防工業出版社

1964

內容簡介

书中讲述了无人駕駛飞行器在大气层内飞行时的空气动力学和飞行力学問題。其内容包括：飞行器的运动方程，各种不同气动外形飞行器的空气动力特性近似确定方法，飞行器重心运动的飞行动力学問題，以及将飞行器看作綫性控制对象的动态特性等。

本书可以作为高等学校的教学参考书，而且对于工程技术人员也有益处。

ДИНАМИКА ПОЛЕТА БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

[苏联] А. А. Лебедев, Л. С. Чернобровкин 合著

ОБОРОНГИЗ 1962 第一版

无人駕駛飞行器的飞行动力学

張炳暄 楊为民 王祖澧 等譯
肖业倫 韓貴凤 赵震炎
赵震炎 張炳暄 肖业倫 等校

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印装

850×1168¹/₃₂ 印張 177/8 455 千字

1964年9月第一版 1964年9月第一次印刷 印数：0,001—2,800册

統一书号：15034·738 定价：(科六)2.60元

目 录

原序	10
主要符号	12
緒論	19
§ 1. 无人駕駛飞行器飞行动力学課程的对象	19
§ 2. 控制飞行的一般知識	21
2.1. 作用在飞行器上的力	21
2.2. 飞行器的操纵机构	27
2.3. 飞行器的控制系统	32
参考文献	33
第一章 噴气飞行器的运动方程	34
§ 1. 变組成系統动力学的基本定理	34
1.1. 运动学关系式	34
1.2. 动量定理	37
1.3. 动量矩定理	40
1.4. 固化原則	40
§ 2. 噴气发动机的推力	41
§ 3. 运动方程的建立原則	45
3.1. 慣性中心运动方程	46
3.2. 相对于慣性中心的旋轉运动方程	49
§ 4. 坐标軸。几何学和运动学关系式	50
4.1. 坐标軸	50
4.2. 角 Ψ 、 Θ 、 γ_c 和角 ψ 、 θ 、 γ 、 β 、 α 之間的联系	56
4.3. 描述飞行器繞地面軸轉动的运动学方程	57
4.4. 飞行器重心运动的运动学方程	59
§ 5. 飞行器运动方程組的建立	64
5.1. 动力学方程	64
5.2. 飞行器运动方程組	68
§ 6. 控制系统加到飞行器运动上的約束	72

参考文献	81
第二章 运动方程的研究方法	83
§ 1. 运动方程简化的主要方法	83
1.1. 将飞行器一般运动分为纵向和侧向运动	83
1.2. 将飞行器一般运动分为重心运动和绕重心的转动	88
1.3. 重心运动方程的简化研究	94
§ 2. 运动方程解法的一般知识	97
§ 3. 欧拉数值积分法	101
§ 4. 解运动方程所用的原始数据	104
4.1. 飞行器的重量	104
4.2. 推力和燃料消耗量与飞行速度和高度的关系	106
4.3. 关于确定空气动力及力矩的一些意见	113
参考文献	114
第三章 升力	116
§ 1. 单独机翼的升力	116
§ 2. 单独机身的升力	126
§ 3. 机翼-机身组合体的升力	131
§ 4. 尾翼的升力	142
4.1. 气流的下洗和阻滞	142
4.2. 舵不偏转时尾翼的升力	151
4.3. 舵偏转时尾翼的升力。舵的相对效率	158
§ 5. 燃气舵的升力	165
§ 6. 整个飞行器的升力	167
6.1. 平置机翼式飞行器	167
6.2. 十形和X形机翼式飞行器	171
6.3. 无机翼式飞行器	178
§ 7. 侧力	179
参考文献	181
第四章 迎面阻力	183
§ 1. 单独机翼的阻力	183
1.1. 型阻	183
1.2. 波阻(当 $\alpha=0$ 时)	194
1.3. 临界 M 数	202

1.4. 诱导阻力	205
§ 2. 单独机身的阻力	209
2.1. 摩擦阻力	209
2.2. 头部阻力	210
2.3. 有进气道的头部阻力	213
2.4. 尾部阻力	224
2.5. 底部阻力	225
2.6. 诱导阻力	228
§ 3. 机翼-机身组合体的阻力	230
3.1. 在零升力时的阻力	230
3.2. 诱导阻力	231
§ 4. 尾翼的阻力	234
§ 5. 整个飞行器的阻力	235
5.1. 正常式	236
5.2. “鸭”式	236
5.3. “无尾”式	236
5.4. 可转机翼式	238
5.5. 在有迎角和侧滑角飞行时诱导阻力的计算	238
参考文献	239

第五章 俯仰力矩和偏航力矩 241

§ 1. 俯仰力矩的一般表达式。平均气动弦	241
§ 2. 单独机翼的压力中心	245
§ 3. 单独机身的压力中心	249
§ 4. 机翼-机身组合体中机翼的压力中心	252
4.1. “ α ”情况下压力中心坐标的计算	252
4.2. “ δ ”情况下压力中心坐标的计算	258
4.3. 一般情况下压力中心坐标的计算	258
§ 5. $\omega_z = \dot{\alpha} = \dot{\delta} = 0$ 时的俯仰力矩	259
5.1. 平置机翼式飞行器	261
5.2. 十形和X形机翼安置的飞行器	264
5.3. 无机翼式飞行器	266
§ 6. 纵向静稳定性	267
§ 7. 飞行器的焦点和中立重心位置	271
§ 8. 飞行器绕轴 Oz_1 转动所引起的俯仰力矩	276

8.1. 单独机翼的阻尼力矩	277
8.2. 单独机身的阻尼力矩	281
8.3. 机身存在时机翼的阻尼力矩	281
8.4. 尾翼的阻尼力矩	282
8.5. 整个飞行器的阻尼力矩	283
8.6. 科里奥利力的内力矩	285
§ 9. 定态飞行状态中的纵向平衡	286
§ 10. 飞行器非定态运动时的附加俯仰力矩	289
§ 11. 偏航力矩	293
11.1. 偏航力矩的一般表达式	293
11.2. 静导数 m_y^{δ} 和 $m_y^{\dot{\delta}}$	295
11.3. 旋转导数 $m_y^{\omega_y}$ 、 $m_y^{\dot{\delta}}$ 、 m_y^{δ}	297
11.4. 旋转导数 $m_y^{\omega_x}$	297
11.5. 无倾斜飞行时的侧向平衡	300
参考文献	300
第六章 倾斜力矩	302
§ 1. 机翼侧滑所引起的倾斜力矩	302
1.1. 机翼后掠度和翼端形状对倾斜力矩的影响	302
1.2. 机翼的上反角对倾斜力矩的影响	307
1.3. 机身和机翼的干扰对倾斜力矩的影响	310
1.4. +形机翼的倾斜力矩	312
§ 2. 尾翼所产生的倾斜力矩	312
§ 3. 机翼和尾翼的相互影响所引起的倾斜力矩(不对称洗流所引起的力矩)	313
3.1. 平置机翼式飞行器	314
3.2. 轴对称外形的飞行器	316
§ 4. 横向静稳定性	319
§ 5. 生产误差所引起的倾斜力矩	322
§ 6. 副翼和差动舵的效率	324
6.1. 差动舵	325
6.2. 副翼	327
§ 7. 飞行器转动所引起的倾斜力矩	331
7.1. 旋转导数 $m_x^{\omega_x}$	331
7.2. 旋转导数 $m_x^{\omega_y}$ 和 $m_x^{\omega_z}$	335

§ 8. 傾斜力矩系数的一般表达式	340
参考文献	341
第七章 铰链力矩	342
§ 1. 铰链力矩的概念。舵的气动补偿	342
§ 2. 铰链力矩系数的确定	345
2.1. 全动舵	346
2.2. 翼端舵	348
2.3. 位于安定面后面的舵	349
2.4. 副翼	350
2.5. 燃气舵	350
参考文献	351
第八章 飞行器的机动性能	352
§ 1. 飞行器的机动性和过载的概念	352
§ 2. 飞行中作用在飞行器上的过载	353
2.1. 过载的测量	353
2.2. 过载矢量的投影	355
2.3. 过载与弹道的运动学参数之间的关系	357
2.4. 法向过载与迎角、侧滑角及操纵机构偏转角的关系	362
§ 3. 需用和可用法向过载	365
3.1. 需用过载	365
3.2. 最大允许的迎角、侧滑角和操纵机构的偏转角	365
3.3. 可用法向过载	367
3.4. 需用过载和可用过载之间的关系	369
3.5. 产生法向过载所需的铰链力矩	371
参考文献	374
第九章 方案飞行的计算	375
§ 1. 垂直平面内的方案飞行	376
1.1. 按给定俯仰角或迎角的飞行	378
1.2. 按给定过载的飞行	383
1.3. 按给定弹道倾角的飞行	384
§ 2. 水平平面内的方案飞行	386
2.1. 水平飞行时的迎角	388
2.2. 无倾斜的机动飞行	389
2.3. 无侧滑的机动飞行	391

2.4. 直綫飞行	392
§ 3. 确定飞行速度、高度和航程的近似方法。計算举例	394
3.1. 地对空导弹	395
3.2. “空对空”导弹	401
3.3. “空对空”导弹可能攻击区的作法	406
参考文献	411
第十章 导引彈道的研究及其計算	412
§ 1. 导引彈道基本特性的运动学研究方法	412
§ 2. 导引方法	414
2.1. 追踪法	415
2.2. 常值前置角导引	422
2.3. 瞬时相遇点导引-平行接近	426
2.4. 比例接近	432
2.5. 重合法	435
2.6. 角度法	442
2.7. 常值目标方位角导引	443
2.8. 导引方法的分类	445
§ 3. 导引彈道的計算	445
3.1. 垂直平面内的导引	445
3.2. 水平平面内的导引	448
参考文献	449
第十一章 飞行器扰动运动方程	450
§ 1. 飞行器运动方程的綫性化	452
1.1. 未扰动彈道和扰动彈道	452
1.2. 微分方程綫性化的方法	453
1.3. 空气动力和力矩表达式的綫性化	457
1.4. 运动方程的綫性化	460
1.5. 扰动运动分为纵向和側向扰动运动	465
1.6. 飞行器稳定性和操纵性的特性	468
§ 2. 纵向扰动运动方程的簡化方法及其分析	471
2.1. 纵向运动方程	471
2.2. 飞行器自由扰动运动的一般特性	474
2.3. 自由扰动运动的分析	480
2.4. 扰动运动短周期阶段的方程	486

§ 3. 侧向扰动运动方程的简化方法及其分析	489
3.1. 侧向运动方程	489
3.2. 自由扰动运动的特性	492
3.3. 侧向运动方程的简化	497
§ 4. 动力系数的确定	499
参考文献	503
第十二章 作为自动控制线性对象的飞行器	505
§ 1. 系数“冻结”法	506
§ 2. 飞行器的传递系数	508
§ 3. 飞行器的传递函数	511
3.1. 倾斜运动	512
3.2. 俯仰运动及偏航运动	512
§ 4. 操纵机构阶跃偏转时的过渡过程	529
4.1. 倾斜操纵机构偏转时的过渡过程	530
4.2. 俯仰操纵机构和偏航操纵机构偏转时的过渡过程	531
§ 5. 飞行器的频率特性	543
5.1. 概述	543
5.2. 倾斜运动	549
5.3. 固定机翼式飞行器的俯仰运动和偏航运动	552
5.4. 可转机翼式飞行器频率特性的举例	560
参考文献	564
附录	566
I. 30公里高度以下的标准大气表	566
II. 高度从30至100公里的大气特性	567
III. 某些几何关系式	567

无人駕駛飞行器的 飞行动力学

[苏联]A. A. 列別捷夫、J. C. 契尔諾勃洛夫金 合著

張炳暄 楊为民 王祖澧 等譯
肖业倫 韓貴凤 趙震炎
趙震炎 張炳暄 肖业倫 等校



國防工業出版社

1964

內容簡介

书中讲述了无人駕駛飞行器在大气层内飞行时的空气动力学和飞行力学問題。其内容包括：飞行器的运动方程，各种不同气动外形飞行器的空气动力特性近似确定方法，飞行器重心运动的飞行动力学問題，以及将飞行器看作綫性控制对象的动态特性等。

本书可以作为高等学校的教学参考书，而且对于工程技术人员也有益处。

ДИНАМИКА ПОЛЕТА БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

[苏联] А. А. Лебедев, Л. С. Чернобровкин 合著

ОБОРОНГИЗ 1962 第一版

无人駕駛飞行器的飞行动力学

張炳暄 楊为民 王祖澧 等譯
肖业倫 韓貴凤 赵震炎
赵震炎 張炳暄 肖业倫 等校

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印装

850×1168¹/₃₂ 印張 177/8 455 千字

1964年9月第一版 1964年9月第一次印刷 印数：0,001—2,800册

統一书号：15034·738 定价：(科六)2.60元

目 录

原序	10
主要符号	12
緒論	19
§ 1. 无人駕駛飞行器飞行动力学課程的对象	19
§ 2. 控制飞行的一般知識	21
2.1. 作用在飞行器上的力	21
2.2. 飞行器的操纵机构	27
2.3. 飞行器的控制系统	32
参考文献	33
第一章 噴气飞行器的运动方程	34
§ 1. 变組成系統动力学的基本定理	34
1.1. 运动学关系式	34
1.2. 动量定理	37
1.3. 动量矩定理	40
1.4. 固化原則	40
§ 2. 噴气发动机的推力	41
§ 3. 运动方程的建立原則	45
3.1. 慣性中心运动方程	46
3.2. 相对于慣性中心的旋轉运动方程	49
§ 4. 坐标軸。几何学和运动学关系式	50
4.1. 坐标軸	50
4.2. 角 Ψ 、 Θ 、 γ_c 和角 ψ 、 θ 、 γ 、 β 、 α 之間的联系	56
4.3. 描述飞行器繞地面軸轉动的运动学方程	57
4.4. 飞行器重心运动的运动学方程	59
§ 5. 飞行器运动方程組的建立	64
5.1. 动力学方程	64
5.2. 飞行器运动方程組	68
§ 6. 控制系统加到飞行器运动上的約束	72

参考文献	81
第二章 运动方程的研究方法	83
§ 1. 运动方程简化的主要方法	83
1.1. 将飞行器一般运动分为纵向和侧向运动	83
1.2. 将飞行器一般运动分为重心运动和绕重心的转动	88
1.3. 重心运动方程的简化研究	94
§ 2. 运动方程解法的一般知识	97
§ 3. 欧拉数值积分法	101
§ 4. 解运动方程所用的原始数据	104
4.1. 飞行器的重量	104
4.2. 推力和燃料消耗量与飞行速度和高度的关系	106
4.3. 关于确定空气动力及力矩的一些意见	113
参考文献	114
第三章 升力	116
§ 1. 单独机翼的升力	116
§ 2. 单独机身的升力	126
§ 3. 机翼-机身组合体的升力	131
§ 4. 尾翼的升力	142
4.1. 气流的下洗和阻滞	142
4.2. 舵不偏转时尾翼的升力	151
4.3. 舵偏转时尾翼的升力。舵的相对效率	158
§ 5. 燃气舵的升力	165
§ 6. 整个飞行器的升力	167
6.1. 平置机翼式飞行器	167
6.2. 十形和X形机翼式飞行器	171
6.3. 无机翼式飞行器	178
§ 7. 侧力	179
参考文献	181
第四章 迎面阻力	183
§ 1. 单独机翼的阻力	183
1.1. 型阻	183
1.2. 波阻(当 $\alpha=0$ 时)	194
1.3. 临界 M 数	202

1.4. 诱导阻力	205
§ 2. 单独机身的阻力	209
2.1. 摩擦阻力	209
2.2. 头部阻力	210
2.3. 有进气道的头部阻力	213
2.4. 尾部阻力	224
2.5. 底部阻力	225
2.6. 诱导阻力	228
§ 3. 机翼-机身组合体的阻力	230
3.1. 在零升力时的阻力	230
3.2. 诱导阻力	231
§ 4. 尾翼的阻力	234
§ 5. 整个飞行器的阻力	235
5.1. 正常式	236
5.2. “鸭”式	236
5.3. “无尾”式	236
5.4. 可转机翼式	238
5.5. 在有迎角和侧滑角飞行时诱导阻力的计算	238
参考文献	239

第五章 俯仰力矩和偏航力矩 241

§ 1. 俯仰力矩的一般表达式。平均气动弦	241
§ 2. 单独机翼的压力中心	245
§ 3. 单独机身的压力中心	249
§ 4. 机翼-机身组合体中机翼的压力中心	252
4.1. “ α ”情况下压力中心坐标的计算	252
4.2. “ δ ”情况下压力中心坐标的计算	258
4.3. 一般情况下压力中心坐标的计算	258
§ 5. $\omega_z = \dot{\alpha} = \dot{\delta} = 0$ 时的俯仰力矩	259
5.1. 平置机翼式飞行器	261
5.2. 十形和X形机翼安置的飞行器	264
5.3. 无机翼式飞行器	266
§ 6. 纵向静稳定性	267
§ 7. 飞行器的焦点和中立重心位置	271
§ 8. 飞行器绕轴 Oz_1 转动所引起的俯仰力矩	276

8.1. 单独机翼的阻尼力矩	277
8.2. 单独机身的阻尼力矩	281
8.3. 机身存在时机翼的阻尼力矩	281
8.4. 尾翼的阻尼力矩	282
8.5. 整个飞行器的阻尼力矩	283
8.6. 科里奥利力的内力矩	285
§ 9. 定态飞行状态中的纵向平衡	286
§ 10. 飞行器非定态运动时的附加俯仰力矩	289
§ 11. 偏航力矩	293
11.1. 偏航力矩的一般表达式	293
11.2. 静导数 m_y^{δ} 和 $m_y^{\dot{\delta}}$	295
11.3. 旋转导数 $m_y^{\omega_y}$ 、 $m_y^{\dot{\delta}}$ 、 m_y^{δ}	297
11.4. 旋转导数 $m_y^{\omega_x}$	297
11.5. 无倾斜飞行时的侧向平衡	300
参考文献	300
第六章 倾斜力矩	302
§ 1. 机翼侧滑所引起的倾斜力矩	302
1.1. 机翼后掠度和翼端形状对倾斜力矩的影响	302
1.2. 机翼的上反角对倾斜力矩的影响	307
1.3. 机身和机翼的干扰对倾斜力矩的影响	310
1.4. +形机翼的倾斜力矩	312
§ 2. 尾翼所产生的倾斜力矩	312
§ 3. 机翼和尾翼的相互影响所引起的倾斜力矩(不对称洗流所引起的力矩)	313
3.1. 平置机翼式飞行器	314
3.2. 轴对称外形的飞行器	316
§ 4. 横向静稳定性	319
§ 5. 生产误差所引起的倾斜力矩	322
§ 6. 副翼和差动舵的效率	324
6.1. 差动舵	325
6.2. 副翼	327
§ 7. 飞行器转动所引起的倾斜力矩	331
7.1. 旋转导数 $m_x^{\omega_x}$	331
7.2. 旋转导数 $m_x^{\omega_y}$ 和 $m_x^{\omega_z}$	335

§ 8. 傾斜力矩系数的一般表达式	340
参考文献	341
第七章 鉸鏈力矩	342
§ 1. 鉸鏈力矩的概念。舵的气动补偿	342
§ 2. 鉸鏈力矩系数的确定	345
2.1. 全动舵	346
2.2. 翼端舵	348
2.3. 位于安定面后面的舵	349
2.4. 副翼	350
2.5. 燃气舵	350
参考文献	351
第八章 飞行器的机动性能	352
§ 1. 飞行器的机动性和过载的概念	352
§ 2. 飞行中作用在飞行器上的过载	353
2.1. 过载的测量	353
2.2. 过载矢量的投影	355
2.3. 过载与弹道的运动学参数之间的关系	357
2.4. 法向过载与迎角、侧滑角及操纵机构偏轉角的关系	362
§ 3. 需用和可用法向过载	365
3.1. 需用过载	365
3.2. 最大允許的迎角、侧滑角和操纵机构的偏轉角	365
3.3. 可用法向过载	367
3.4. 需用过载和可用过载之间的关系	369
3.5. 产生法向过载所需的鉸鏈力矩	371
参考文献	374
第九章 方案飞行的計算	375
§ 1. 垂直平面內的方案飞行	376
1.1. 按給定俯仰角或迎角的飞行	378
1.2. 按給定过载的飞行	383
1.3. 按給定弹道傾角的飞行	384
§ 2. 水平平面內的方案飞行	386
2.1. 水平飞行时的迎角	388
2.2. 无傾斜的机动飞行	389
2.3. 无侧滑的机动飞行	391