

直升飞机计算和设计

第一卷

空气动力学

〔苏〕M. Л. 米里等 著

景山 译 宁航 校

国防工业出版社

内 容 简 介

《直升飞机计算和设计》共三卷：

第一卷——空气动力学；第二卷——振动和动强度；第三卷——部件设计。

本书是第一卷。书中介绍了直升飞机的发展简史、设计的基本原则及直升飞机在无机场飞行器中所占的地位。重点阐述了旋翼的各种理论和确定旋翼空气动力特性的各种方法：直升飞机在曲线运动的一般情况下，具有铰接式桨叶旋翼的经典理论；理想旋翼的冲量理论及动力计算方法的应用；采用数值积分法时的经典理论；涡流理论以及在飞行试验和风洞中实验确定旋翼特性的方法。书中还详细说明了直升飞机空气动力计算的各种方法和旋翼颤振理论以及在悬停和前飞状态下的颤振计算方法。尤其注意到桨毂轴向铰中摩擦力的计算和各片桨叶振动通过自动倾斜器的耦合时的计算。最后，本书描述了颤振的实验。

本书可供直升飞机工厂、科研等有关部门的工人和工程技术人员参考，对高等航空院校的师生也有一定的助益。

ВЕРТОЛЕТЫ РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ

1 АЭРОДИНАМИКА

М. Л. МИЛЬ

«Машиностроение» 1966

*

直升飞机计算和设计

第一卷

空气动力学

〔苏〕М. Л. 米里等 著

*

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 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张22 508千字

1977年10月第一版 1977年10月第一次印刷 印数：0,001—2,600册

统一书号：15034·1566 定价：2.25元

出版者的话

我们遵照伟大领袖毛主席“**洋为中用**”的教导，为了配合我国航空直升飞机技术发展的需要，翻译出版了〔苏〕米里等人编写的《直升飞机计算和设计》一书，供从事直升飞机设计和有关人员参考。

本书为《直升飞机计算和设计》一书的第一卷，主要介绍直升飞机空气动力学理论。书中重点介绍了旋翼的各种理论、确定旋翼和直升飞机空气动力特性的各种方法，以及旋翼的颤振理论和实验。

虽然我们对原书内容繁琐之处做了删改，对书中错误之处译校者做了改正并加了注，但书中谬误之处仍在所难免，请同志们遵照毛主席“**排泄其糟粕，吸收其精华**”的教导，批判地去阅读参考。

目 录

主要符号	9
第一章 直升飞机的发展及其设计的基本原则 (参数和型式的选择)	11
§ 1 直升飞机制造业的发展	11
1. 直升飞机在尺寸方面的发展	12
2. 直升飞机在质量方面的发展	15
3. 特殊用途的直升飞机	19
4. 带有辅助推进器的复合式直升飞机——旋翼-定翼机	20
§ 2 直升飞机与垂直起落和短距起落运输机的比较	21
1. 西方的垂直起落和短距起落军用运输机的战术技术要求	22
2. 增大直升飞机航程的方法	25
3. 滑跑起飞的直升飞机	26
4. 直升飞机的滑跑距离	28
5. 评定各类运输飞行器经济性的准则	29
6. 提高最大飞行速度的可能性	33
§ 3 设计的基本原则	34
1. 发动机功率与旋翼直径的选择	34
2. 多旋翼式直升飞机的分析	38
第二章 旋翼空气动力学	43
§ 1 旋翼理论与实验确定旋翼特性方法的发展	43
1. 旋翼理论的发展	49
2. 实验方法的发展	49
§ 2 铰接式旋翼的经典理论、一般情况、曲线运动	51
曲线运动时的旋翼理论	51
1. 座标轴系及运动的物理图象	51
2. 作用在桨叶上的各项惯性力	53
3. 作用在桨叶上的空气动力	56
4. 绕水平铰的力矩方程	57
5. 结果的物理解释	60
6. 反作用力矩方程	61
7. 旋翼的拉力和迎角	63
8. 侧向力	64
9. 纵向力	65
10. 曲线运动时诱导速度分布规律的变化	66
结果分析	70
11. 桨叶挥舞运动	70
12. 曲线运动对旋翼自转的影响	71
13. 直升飞机做曲线运动时空气动力合力的性质	74
旋翼参数和桨毂型式对旋翼挥舞运动与阻尼的影响	74
14. 翼型压力中心可变的旋翼	75
15. 桨叶重心的影响	75
16. 有挥舞调节器的旋翼	76

旋翼轴以变角速度做曲线运动时旋翼的挥舞运动	78
17. 旋翼轴的匀加速倾转	78
18. 旋翼轴的谐波振动	81
铰接式旋翼的空气动力特性	83
19. 桨叶挥舞运动的物理意义	83
20. 由于挥舞运动使空气动力沿旋翼桨盘的重新分布	84
21. 挥舞运动系数公式的近似推导	86
22. 诱导速度场不均匀性对挥舞运动的影响	87
桨距随方位变化时旋翼空气动力特性的计算方法	90
23. 等效旋翼理论	90
24. 把带水平铰的旋翼看成是无铰式旋翼时的公式推导, 铰接式和固接式旋翼的等效条件	97
25. 确定桨叶桨距变化分量 φ_0 、 φ_1 和 φ_1 的一般表达式	103
26. 有挥舞调节器的旋翼的挥舞运动系数的确定	107
27. 自动倾斜器倾斜时桨叶桨距变化分量 φ_1 和 φ_1 的确定	108
28. 桨距随方位变化的旋翼空气动力计算的程序	111
§ 3 旋翼的冲量理论	112
1. 直升飞机的理想旋翼理论	113
2. 真实旋翼反作用力矩系数表达式的推导	120
3. 旋翼的型阻损失	123
4. 选择桨叶形状和翼型的一些设想	125
5. 旋翼型阻损失的近似确定	129
6. 空气压缩性对旋翼型阻损失的影响	130
7. 真实旋翼的诱导损失	134
8. 旋翼迎角与桨距的确定	138
§ 4 旋翼的经典理论。数值积分法	138
1. 旋翼的力和力矩的计算公式	139
2. 计算方法	144
3. 旋翼桨叶上常用翼型的空气动力特性	146
4. 空气动力沿旋翼桨盘的分布	150
5. 旋翼空气动力特性	153
6. 旋翼在自转状态下的空气动力特性	156
7. 直升机允许的飞行状态边界 (气流分离边界)	159
8. 型阻损失沿旋翼桨盘的分布。型阻损失与桨叶翼型空气动力特性的关系	162
§ 5 旋翼涡流理论	167
1. 涡流理论的任务	167
2. 有限片数桨叶的旋翼涡流理论所采用的理论模型	168
3. 自由涡的形状	169
4. 按毕奥-沙伐尔公式确定诱导速度	170
5. 毕奥-沙伐尔公式用于建立旋翼涡流理论	170
6. 由附着涡引起的诱导速度的轴向分量	171
7. 由螺旋 (纵向) 涡引起的诱导速度的轴向分量	172
8. 由径向 (横向) 涡引起的诱导速度的轴向分量	173
9. 旋翼涡流理论的积分-微分方程	173
10. 关于自由涡环量沿平行于倾斜涡柱轴的直线的不变性以及因此而可能的简化	174
11. 升力线和升力涡面模型的应用特点	176
12. 与桨叶相连的涡以及跟桨叶脱离的涡的划分。“定常假设”的应用	176
13. 瞬时的和时均的诱导速度以及桨叶交变空气动力载荷的产生	177
14. 外激诱导速度场的特点	177
15. 无穷多片桨叶的旋翼涡流理论	178
王适存的涡流理论	178

16. 旋翼模型	179
17. 诱导速度的确定	179
18. 确定诱导速度的计算公式	179
19. 王适存涡流理论的应用及评价	180
巴斯金的涡流理论	181
20. 旋翼绕流模型	181
21. 由偶极子柱引起的诱导速度的确定	183
22. 偶极子盘所激起的流动	183
23. 边界条件	184
24. 将式 (5.67) 转换为旋翼座标. 圆柱函数加法定理的应用	185
25. 整个偶极子柱总速度势的确定	186
26. 诱导速度的确定	187
§ 6 旋翼空气动力特性的实验确定	188
1. 确定直升飞机空气动力特性的飞行试验	188
2. 确定旋翼空气动力特性的风洞试验	191
旋翼空气动力特性的换算法	193
3. 旋翼实度不同时空气动力特性的换算	193
4. 当桨叶剖面最小阻系数 $c_{x,p0}$ 改变时空气动力特性的换算	196
5. 旋翼圆周速度 (M_0 数) 改变时空气动力特性的换算	197
6. 在改变自动倾斜器的倾斜量、挥舞调节距和桨叶质量特性时旋翼迎角和桨距的换算	197
7. 使用换算公式的实例	198
§ 7 旋翼升阻比和前进效率	200
1. 霍海涅姆塞提出的旋翼升阻比和效率	200
2. 旋翼升阻比和前进效率的确定	201
3. 根据实验数据确定旋翼升阻比和效率	204
4. 根据计算曲线确定旋翼升阻比和效率	205
5. 旋翼参数改变时升阻比和效率的换算	207
6. 旋翼升阻比和效率的小结	208
§ 8 悬停状态和垂直上升状态旋翼特性的计算 (空气螺旋桨的冲量理论)	209
1. 空气螺旋桨冲量理论简介	209
2. 旋翼特性的计算结果	210
3. 确定 m_K 与 t 的关系的近似方法	213
4. 旋翼实度改变时空气动力特性的换算	216
5. 考虑到旋翼特性与 M_0 的关系时旋翼最佳空气动力参数的确定	216
第三章 直升飞机的空气动力计算	220
§ 1 直升飞机空气动力计算的基本方程	220
1. 直升飞机空气动力计算的内容	220
2. 直升飞机的运动方程	220
3. 确定旋翼空气动力特性以及计算空气动力的各种方法	221
4. 复合式与多旋翼式飞行器的计算	222
5. 双旋翼直升机和带翼式直升飞机的诱导系数	225
§ 2 按米里-雅罗申柯法进行直升飞机空气动力计算	230
1. 运动方程和计算原则	230
2. 旋翼空气动力特性的确定	231
3. 飞行性能计算	233
4. 方法的适用范围	235
§ 3 复合式飞行器空气动力计算的一般方法	236
1. 绘制确定直升飞机飞行性能的辅助曲线	236
2. 直升飞机飞行性能的确定	242

3. 确定直升飞机最佳空气动力参数的图表	250
§ 4 利用旋翼升阻比和效率概念进行直升飞机空气动力计算	253
1. 直升飞机的升阻比	253
2. 多旋翼式和复合式直升飞机的升阻比	253
3. 直升飞机飞行性能的确定	260
4. 带拉力螺旋桨直升飞机的计算	264
5. 直升飞机与飞机的比较	265
6. 纵列式直升飞机前后旋翼的功率	266
7. 直升飞机起落架的收起	267
§ 5 按功率法进行直升飞机空气动力计算	268
1. 直升飞机平飞需用功率的确定	269
2. 直升飞机飞行性能的确定	272
3. 单旋翼直升飞机平飞时 N_{np} 、 N_{HHA} 和 N_{bp} 之间的关系	273
第四章 旋翼颤振	275
§ 1 基本假设和颤振计算方法的特点	276
1. 桨叶的弯扭振动。失稳的各种可能情况	276
2. 桨叶与桨毂连接形式的影响和单片桨叶的颤振理论研究	276
3. 振型不同的两种桨叶颤振——挥舞颤振和弯曲颤振	276
4. 桨叶扭转振型的特点及其有关的各种假设	277
5. 关于桨叶在旋转平面内振动的假设	277
6. 在振动的翼型上空气动力的确定	278
§ 2 在轴流状态下单片桨叶的挥舞颤振	280
1. 桨叶模型	280
2. 颤振微分方程的推导	280
3. 微分方程组的特解	283
4. 受扰运动微分方程	283
5. 微分方程组的矩阵形式	283
6. 桨叶振动微分方程组的求解	284
7. 颤振临界转速的确定	286
8. 桨叶的发散	286
9. 桨叶重心参数（有效重心位置）	287
10. 桨叶重心位置和挥舞调节系数同颤振临界转速的关系	287
11. 桨叶布局	289
12. 操纵刚度的影响	289
13. 不发生颤振的条件	290
14. 颤振激励力的产生机理	290
§ 3 颤振时摩擦力的影响	294
1. 颤振时摩擦力的作用特点	294
2. 摩擦力的线性化	294
3. 计及摩擦时颤振临界转速的确定	295
4. 轴向铰中强迫运动的影响	296
§ 4 桨叶振动通过自动倾斜器的耦合时的旋翼颤振	299
1. 直升飞机试验中所见到的旋翼颤振振型	299
2. 旋翼循环振型的解析式	299
3. 循环振型的几种具体情况以及操纵系统的载荷	300
4. 各片桨叶振动通过自动倾斜器的耦合时旋翼颤振的微分方程	302
5. 当循环振型是旋翼颤振微分方程的解时微分方程（4.18）的变换	304
6. 纵向和横向操纵线系刚度不等时的旋翼颤振	305
§ 5 前飞时旋翼的挥舞颤振	306
1. 前言	306

2. 前飞时桨叶振动微分方程	306
3. 微分方程的解	308
4. 不计桨叶运动谐波分量时颤振临界转速的确定	308
5. 前飞速度对颤振临界转速的影响	309
§ 6 考虑桨叶弯曲和扭转变形时的颤振计算	310
1. 颤振时桨叶的弯曲和扭转变形	310
2. 弯曲桨叶上反作用力矩的确定	311
3. 桨叶弯-扭振动微分方程	312
4. 微分方程的解	314
5. 三自由度颤振计算	315
6. 不计桨叶扭转的三自由度颤振计算	319
7. 计算结果	323
8. 弯曲颤振	323
9. 确定颤振时弯曲振型的近似方法	325
§ 7 飞行中旋翼颤振及桨叶弯曲应力的一般计算方法	326
1. 计算方法及其可能性	326
2. 基本假设	327
3. 微分方程	328
4. 边界条件	328
5. 操纵系统等效刚度的确定	329
6. 空气动力的确定	330
7. 微分方程的解法	332
8. 偏微分方程变换为常微分方程	333
9. 桨毂轴向铰内摩擦力矩的确定	335
10. 计算程序	336
§ 8 颤振实验研究	339
1. 地面颤振试验	339
2. 飞行颤振试验	343
3. 轴流状态下实验与计算的比较	344
4. 飞行颤振试验与计算的比较	345
5. 颤振检查	345
6. 操纵系统刚度的实验测定	346
7. 动力相似模型实验	347
参考文献	350

直升飞机计算和设计

第 一 卷

空气动力学

〔苏〕M. Л. 米里等 著

景山 译 宁航 校

国防工业出版社

内 容 简 介

《直升飞机计算和设计》共三卷：

第一卷——空气动力学；第二卷——振动和动强度；第三卷——部件设计。

本书是第一卷。书中介绍了直升飞机的发展简史、设计的基本原则及直升飞机在无机场飞行器中所占的地位。重点阐述了旋翼的各种理论和确定旋翼空气动力特性的各种方法：直升飞机在曲线运动的一般情况下，具有铰接式桨叶旋翼的经典理论；理想旋翼的冲量理论及动力计算方法运用；采用数值积分法时的经典理论；涡流理论以及在飞行试验和风洞中实验确定旋翼特性的方法。书中还详细说明了直升飞机空气动力计算的各种方法和旋翼颤振理论以及在悬停和前飞状态下的颤振计算方法。尤其注意到桨毂轴向铰中摩擦力的计算和各片桨叶振动通过自动倾斜器的耦合时的计算。最后，本书描述了颤振的实验。

本书可供直升飞机工厂、科研等有关部门的工人和工程技术人员参考，对高等航空院校的师生也有一定的助益。

ВЕРТОЛЕТЫ РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ

1 АЭРОДИНАМИКА

М. Л. МИЛЬ

«Машиностроение» 1966

*

直升飞机计算和设计

第一卷

空气动力学

〔苏〕М. Л. 米里等 著

*

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 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张22 508千字

1977年10月第一版 1977年10月第一次印刷 印数：0,001—2,600册

统一书号：15034·1566 定价：2.25元

出版者的话

我们遵照伟大领袖毛主席“**洋为中用**”的教导，为了配合我国航空直升飞机技术发展的需要，翻译出版了〔苏〕米里等人编写的《直升飞机计算和设计》一书，供从事直升飞机设计和有关人员参考。

本书为《直升飞机计算和设计》一书的第一卷，主要介绍直升飞机空气动力学理论。书中重点介绍了旋翼的各种理论、确定旋翼和直升飞机空气动力特性的各种方法，以及旋翼的颤振理论和实验。

虽然我们对原书内容繁琐之处做了删改，对书中错误之处译校者做了改正并加了注，但书中谬误之处仍在所难免，请同志们遵照毛主席“**排泄其糟粕，吸收其精华**”的教导，批判地去阅读参考。

目 录

主要符号	9
第一章 直升飞机的发展及其设计的基本原则 (参数和型式的选择)	11
§ 1 直升飞机制造业的发展	11
1. 直升飞机在尺寸方面的发展	12
2. 直升飞机在质量方面的发展	15
3. 特殊用途的直升飞机	19
4. 带有辅助推进器的复合式直升飞机——旋翼-定翼机	20
§ 2 直升飞机与垂直起落和短距起落运输机的比较	21
1. 西方的垂直起落和短距起落军用运输机的战术技术要求	22
2. 增大直升飞机航程的方法	25
3. 滑跑起飞的直升飞机	26
4. 直升飞机的滑跑距离	28
5. 评定各类运输飞行器经济性的准则	29
6. 提高最大飞行速度的可能性	33
§ 3 设计的基本原则	34
1. 发动机功率与旋翼直径的选择	34
2. 多旋翼式直升飞机的分析	38
第二章 旋翼空气动力学	43
§ 1 旋翼理论与实验确定旋翼特性方法的发展	43
1. 旋翼理论的发展	49
2. 实验方法的发展	49
§ 2 铰接式旋翼的经典理论、一般情况、曲线运动	51
曲线运动时的旋翼理论	51
1. 座标轴系及运动的物理图象	51
2. 作用在桨叶上的各项惯性力	53
3. 作用在桨叶上的空气动力	56
4. 绕水平铰的力矩方程	57
5. 结果的物理解释	60
6. 反作用力矩方程	61
7. 旋翼的拉力和迎角	63
8. 侧向力	64
9. 纵向力	65
10. 曲线运动时诱导速度分布规律的变化	66
结果分析	70
11. 桨叶挥舞运动	70
12. 曲线运动对旋翼自转的影响	71
13. 直升飞机做曲线运动时空气动力合力的性质	74
旋翼参数和桨毂型式对旋翼挥舞运动与阻尼的影响	74
14. 翼型压力中心可变的旋翼	75
15. 桨叶重心的影响	75
16. 有挥舞调节器的旋翼	76

旋翼轴以变角速度做曲线运动时旋翼的挥舞运动	78
17. 旋翼轴的匀加速倾转	78
18. 旋翼轴的谐波振动	81
铰接式旋翼的空气动力特性	83
19. 桨叶挥舞运动的物理意义	83
20. 由于挥舞运动使空气动力沿旋翼桨盘的重新分布	84
21. 挥舞运动系数公式的近似推导	86
22. 诱导速度场不均匀性对挥舞运动的影响	87
桨距随方位变化时旋翼空气动力特性的计算方法	90
23. 等效旋翼理论	90
24. 把带水平铰的旋翼看成是无铰式旋翼时的公式推导, 铰接式和固接式旋翼的等效条件	97
25. 确定桨叶桨距变化分量 φ_0 、 φ_1 和 φ_1 的一般表达式	103
26. 有挥舞调节器的旋翼的挥舞运动系数的确定	107
27. 自动倾斜器倾斜时桨叶桨距变化分量 φ_1 和 φ_1 的确定	108
28. 桨距随方位变化的旋翼空气动力计算的程序	111
§ 3 旋翼的冲量理论	112
1. 直升飞机的理想旋翼理论	113
2. 真实旋翼反作用力矩系数表达式的推导	120
3. 旋翼的型阻损失	123
4. 选择桨叶形状和翼型的一些设想	125
5. 旋翼型阻损失的近似确定	129
6. 空气压缩性对旋翼型阻损失的影响	130
7. 真实旋翼的诱导损失	134
8. 旋翼迎角与桨距的确定	138
§ 4 旋翼的经典理论。数值积分法	138
1. 旋翼的力和力矩的计算公式	139
2. 计算方法	144
3. 旋翼桨叶上常用翼型的空气动力特性	146
4. 空气动力沿旋翼桨盘的分布	150
5. 旋翼空气动力特性	153
6. 旋翼在自转状态下的空气动力特性	156
7. 直升机允许的飞行状态边界 (气流分离边界)	159
8. 型阻损失沿旋翼桨盘的分布。型阻损失与桨叶翼型空气动力特性的关系	162
§ 5 旋翼涡流理论	167
1. 涡流理论的任务	167
2. 有限片数桨叶的旋翼涡流理论所采用的理论模型	168
3. 自由涡的形状	169
4. 按毕奥-沙伐尔公式确定诱导速度	170
5. 毕奥-沙伐尔公式用于建立旋翼涡流理论	170
6. 由附着涡引起的诱导速度的轴向分量	171
7. 由螺旋 (纵向) 涡引起的诱导速度的轴向分量	172
8. 由径向 (横向) 涡引起的诱导速度的轴向分量	173
9. 旋翼涡流理论的积分-微分方程	173
10. 关于自由涡环量沿平行于倾斜涡柱轴的直线的不变性以及因此而可能的简化	174
11. 升力线和升力涡面模型的应用特点	176
12. 与桨叶相连的涡以及跟桨叶脱离的涡的划分。“定常假设”的应用	176
13. 瞬时的和时均的诱导速度以及桨叶交变空气动力载荷的产生	177
14. 外激诱导速度场的特点	177
15. 无穷多片桨叶的旋翼涡流理论	178
王适存的涡流理论	178

16. 旋翼模型	179
17. 诱导速度的确定	179
18. 确定诱导速度的计算公式	179
19. 王适存涡流理论的应用及评价	180
巴斯金的涡流理论	181
20. 旋翼绕流模型	181
21. 由偶极子柱引起的诱导速度的确定	183
22. 偶极子盘所激起的流动	183
23. 边界条件	184
24. 将式 (5.67) 转换为旋翼座标. 圆柱函数加法定理的应用	185
25. 整个偶极子柱总速度势的确定	186
26. 诱导速度的确定	187
§ 6 旋翼空气动力特性的实验确定	188
1. 确定直升飞机空气动力特性的飞行试验	188
2. 确定旋翼空气动力特性的风洞试验	191
旋翼空气动力特性的换算法	193
3. 旋翼实度不同时空气动力特性的换算	193
4. 当桨叶剖面最小型阻系数 $c_{x,p0}$ 改变时空气动力特性的换算	196
5. 旋翼圆周速度 (M_0 数) 改变时空气动力特性的换算	197
6. 在改变自动倾斜器的倾斜量、挥舞调节距和桨叶质量特性时旋翼迎角和桨距的换算	197
7. 使用换算公式的实例	198
§ 7 旋翼升阻比和前进效率	200
1. 霍海涅姆塞提出的旋翼升阻比和效率	200
2. 旋翼升阻比和前进效率的确定	201
3. 根据实验数据确定旋翼升阻比和效率	204
4. 根据计算曲线确定旋翼升阻比和效率	205
5. 旋翼参数改变时升阻比和效率的换算	207
6. 旋翼升阻比和效率的小结	208
§ 8 悬停状态和垂直上升状态旋翼特性的计算 (空气螺旋桨的冲量理论)	209
1. 空气螺旋桨冲量理论简介	209
2. 旋翼特性的计算结果	210
3. 确定 m_K 与 t 的关系的近似方法	213
4. 旋翼实度改变时空气动力特性的换算	216
5. 考虑到旋翼特性与 M_0 的关系时旋翼最佳空气动力参数的确定	216
第三章 直升飞机的空气动力计算	220
§ 1 直升飞机空气动力计算的基本方程	220
1. 直升飞机空气动力计算的内容	220
2. 直升飞机的运动方程	220
3. 确定旋翼空气动力特性以及计算空气动力的各种方法	221
4. 复合式与多旋翼式飞行器的计算	222
5. 双旋翼直升机和带翼式直升飞机的诱导系数	225
§ 2 按米里-雅罗申柯法进行直升飞机空气动力计算	230
1. 运动方程和计算原则	230
2. 旋翼空气动力特性的确定	231
3. 飞行性能计算	233
4. 方法的适用范围	235
§ 3 复合式飞行器空气动力计算的一般方法	236
1. 绘制确定直升飞机飞行性能的辅助曲线	236
2. 直升飞机飞行性能的确定	242

3. 确定直升飞机最佳空气动力参数的图表	250
§ 4 利用旋翼升阻比和效率概念进行直升飞机空气动力计算	253
1. 直升飞机的升阻比	253
2. 多旋翼式和复合式直升飞机的升阻比	253
3. 直升飞机飞行性能的确定	260
4. 带拉力螺旋桨直升飞机的计算	264
5. 直升飞机与飞机的比较	265
6. 纵列式直升飞机前后旋翼的功率	266
7. 直升飞机起落架的收起	267
§ 5 按功率法进行直升飞机空气动力计算	268
1. 直升飞机平飞需用功率的确定	269
2. 直升飞机飞行性能的确定	272
3. 单旋翼直升飞机平飞时 N_{np} 、 N_{HHA} 和 N_{bp} 之间的关系	273
第四章 旋翼颤振	275
§ 1 基本假设和颤振计算方法的特点	276
1. 桨叶的弯扭振动。失稳的各种可能情况	276
2. 桨叶与桨毂连接形式的影响和单片桨叶的颤振理论研究	276
3. 振型不同的两种桨叶颤振——挥舞颤振和弯曲颤振	276
4. 桨叶扭转振型的特点及其有关的各种假设	277
5. 关于桨叶在旋转平面内振动的假设	277
6. 在振动的翼型上空气动力的确定	278
§ 2 在轴流状态下单片桨叶的挥舞颤振	280
1. 桨叶模型	280
2. 颤振微分方程的推导	280
3. 微分方程组的特解	283
4. 受扰运动微分方程	283
5. 微分方程组的矩阵形式	283
6. 桨叶振动微分方程组的求解	284
7. 颤振临界转速的确定	286
8. 桨叶的发散	286
9. 桨叶重心参数（有效重心位置）	287
10. 桨叶重心位置和挥舞调节系数同颤振临界转速的关系	287
11. 桨叶布局	289
12. 操纵刚度的影响	289
13. 不发生颤振的条件	290
14. 颤振激励力的产生机理	290
§ 3 颤振时摩擦力的影响	294
1. 颤振时摩擦力的作用特点	294
2. 摩擦力的线性化	294
3. 计及摩擦时颤振临界转速的确定	295
4. 轴向铰中强迫运动的影响	296
§ 4 桨叶振动通过自动倾斜器的耦合时的旋翼颤振	299
1. 直升飞机试验中所见到的旋翼颤振振型	299
2. 旋翼循环振型的解析式	299
3. 循环振型的几种具体情况以及操纵系统的载荷	300
4. 各片桨叶振动通过自动倾斜器的耦合时旋翼颤振的微分方程	302
5. 当循环振型是旋翼颤振微分方程的解时微分方程（4.18）的变换	304
6. 纵向和横向操纵线系刚度不等时的旋翼颤振	305
§ 5 前飞时旋翼的挥舞颤振	306
1. 前言	306

2. 前飞时桨叶振动微分方程	306
3. 微分方程的解	308
4. 不计桨叶运动谐波分量时颤振临界转速的确定	308
5. 前飞速度对颤振临界转速的影响	309
§ 6 考虑桨叶弯曲和扭转变形时的颤振计算	310
1. 颤振时桨叶的弯曲和扭转变形	310
2. 弯曲桨叶上反作用力矩的确定	311
3. 桨叶弯-扭振动微分方程	312
4. 微分方程的解	314
5. 三自由度颤振计算	315
6. 不计桨叶扭转的三自由度颤振计算	319
7. 计算结果	323
8. 弯曲颤振	323
9. 确定颤振时弯曲振型的近似方法	325
§ 7 飞行中旋翼颤振及桨叶弯曲应力的一般计算方法	326
1. 计算方法及其可能性	326
2. 基本假设	327
3. 微分方程	328
4. 边界条件	328
5. 操纵系统等效刚度的确定	329
6. 空气动力的确定	330
7. 微分方程的解法	332
8. 偏微分方程变换为常微分方程	333
9. 桨毂轴向铰内摩擦力矩的确定	335
10. 计算程序	336
§ 8 颤振实验研究	339
1. 地面颤振试验	339
2. 飞行颤振试验	343
3. 轴流状态下实验与计算的比较	344
4. 飞行颤振试验与计算的比较	345
5. 颤振检查	345
6. 操纵系统刚度的实验测定	346
7. 动力相似模型实验	347
参考文献	350

主 要 符 号

气 动 特 性

α ——旋翼迎角;

α_r ——桨叶剖面迎角;

α_0 ——桨叶翼型的零升力迎角;

$\Delta\alpha$ ——洗流角;

$a_\infty = \frac{dc_y}{d\alpha} = c'_y$ ——翼型升力系数对迎角曲线的斜率;

$\Phi = \arctg \frac{U_x}{U_y}$ ——桨叶剖面的来流角;

Γ ——桨叶剖面的环量;

M ——桨叶剖面的M数;

M_0 ——桨尖M数沿方位角的平均值 ($M_0 = \frac{\omega R}{a}$);

$M_{\text{пол}}$ ——飞行M数 ($M_{\text{пол}} = \frac{V}{a}$);

$T, t = \frac{C_T}{\sigma}$ ——旋翼的拉力及拉力系数 $\left(t = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho \sigma \pi R^2 (\omega R)^2} \right)$;

$M, h = \frac{C_H}{\sigma}$ ——旋翼的纵向力及纵向力系数 $\left(h = \frac{H}{\frac{1}{2} \rho \sigma \pi R^2 (\omega R)^2} \right)$;

$S, s = \frac{C_S}{\sigma}$ ——旋翼的侧向力及侧向力系数 $\left(s = \frac{S}{\frac{1}{2} \rho \sigma \pi R^2 (\omega R)^2} \right)$;

$M_\kappa, m_\kappa = \frac{\bar{m}_\kappa}{\sigma}$ ——旋翼的扭矩和扭矩系数 $\left(m_\kappa = \frac{M_\kappa}{\frac{1}{2} \rho \sigma \pi R^3 (\omega R)^2} \right)$;

N ——发动机功率 (在第二章中为旋翼的功率);

$Y, t_y = \frac{C_Y}{\sigma}$ ——旋翼的升力及升力系数 $\left(t_y = \frac{Y}{\frac{1}{2} \rho \sigma \pi R^2 (\omega R)^2} \right)$;

$X, t_x = \frac{C_X}{\sigma}$ ——旋翼的前进力及前进力系数 $\left(t_x = \frac{X}{\frac{1}{2} \rho \sigma \pi R^2 (\omega R)^2} \right)$;

c_y, c_{x_p} ——桨叶 (机翼) 剖面相应于动压 $\frac{1}{2} \rho V^2$ 的升力系数与型阻系数;

B ——桨尖损失系数。