

# 直升机动力学手册



航空航天工业部科学技术研究院

编著

航空工业出版社

# 直升机动力学手册

航空航天工业部科学技术研究院 编著

航空工业出版社

1991.

## 内 容 简 介

《直升机动力学手册》内容包括：直升机的振源，旋翼、尾桨动力学，机体动力学，动力/传动系统及操纵系统动力学，直升机减振技术，旋翼—机体耦合系统动不稳定性分析与综合，直升机振动、噪声环境，直升机动力学试验，旋翼动力相似模型设计和试验，直升机动力学飞行试验。

本手册主要供从事直升机动力学分析和试验的工程技术人员使用，也可供直升机其它专业的工程技术人员参考，对有关高等院校的师生也有一定的助益。

直 升 机 动 力 学 手 册  
航空航天工业部科学技术研究院 编著

航空工业出版社出版发行  
(北京市和平里小关东里 14 号)

——邮政编码 100029——

南京航空学院飞达印刷厂印刷

|                  |                   |
|------------------|-------------------|
| 1991 年 4 月第 1 版  | 1991 年 4 月第 1 次印刷 |
| 787×1092 毫米 1/16 | 印张: 34.81         |
| 印数: 1—700 册      | 字数: 835.5 千字      |

ISBN 7-80046-338-9/V·074

定价: 精装 45 元, 平装 35 元



# 前 言

《直升机动力学手册》(以下简称“动力学手册”)是航空航天工业部下达的“七五”预研课题之一。从1987年开始,“动力学手册”的编写工作和“直升机载荷手册”一样,在各级领导关怀与大力支持下,经过编审委员会和全体编、校、审人员共同努力,于1990年11月通过部级鉴定,按计划完成编写任务。

“动力学手册”涉及的范围为结构动力学和气动弹性动力学,不包括传统的飞行动力学。直升机设计和使用中遇到的动力学问题,几乎涉及这两门学科所有的主要方面,包括强迫振动、暂态振动和动稳定性问题。研制直升机的实践表明,这些问题常常成为型号研制进程中的难关或者影响其它性能发挥的限制,这些问题解决得好坏,常常成为直升机研制成败的关键和衡量直升机先进性的重要指标。鉴于动力学问题的重要性,动力学理论、技术的发展,相关学科的发展,以及处理动力学问题的经验的积累,在我国最新的直升机强度规范《军用直升机强度和刚度规范》GJB720-89中,对直升机动力学问题的解决提出了较高的要求。“动力学手册”的编写,主要为贯彻《军用直升机强度和刚度规范》提供解决动力学问题的分析、试验、试飞等方面的方法和技术。材料主要选自我国多年来在研究和自行研制直升机过程中积累的经验,必要时,从使用的角度出发,搜集了有关国外资料中的适用内容。

编写这样一部大型手册,在国内以及已见到的国外材料中,尚属首次。我们深感力不从心,尽管全体编写人员作了极大努力,但鉴于直升机动力学问题的复杂性和我们技术水平的限制,内容上一定有许多不足或不妥不外,恳请读者批评指正,共同促进这一领域技术的发展。

## “直升机载荷手册”和“直升机动力学手册”编审委员会名单

主任委员 张阿舟

副主任委员 王适存 李祖钊 郭泽弘 张克荣 刘广润

委 员 杨学勤 杨俊严 张曾钊 刘家杰 张炳瀛

“动力学手册”编、校、审人员分工名单:

| 主 编 | 张曾谔                          |      |     |     |  |
|-----|------------------------------|------|-----|-----|--|
| 副主编 | 程金送                          |      |     |     |  |
| 章 次 | 内 容                          | 编 写  | 校 对 | 主 审 |  |
| 1   | 引论                           | 张曾谔  | 张晓谷 | 朱德懋 |  |
| 2   | 直升机的振源                       | 张晓谷  | 徐桂祺 | 张令弥 |  |
| 3   | 旅翼、尾桨动力学                     | 徐桂祺* | 汤德满 | 赵淳生 |  |
|     |                              | 樊光华  | 杜先珍 |     |  |
|     |                              | 余 林  |     |     |  |
| 4   | 机体动力学                        | 朱德懋  | 李祖钊 | 周传荣 |  |
|     |                              |      | 刘家杰 |     |  |
| 5   | 动力/传动系统及<br>操纵系统动力学          | 张晓谷* | 刘广润 | 朱德懋 |  |
|     |                              | 汤德满  |     |     |  |
|     |                              | 顾仲权  |     |     |  |
|     |                              | 雷友益  |     |     |  |
| 6   | 直升机减振技术                      | 顾仲权  | 郭光海 | 张令弥 |  |
| 7   | 旅翼——机体耦合系<br>统动不稳定性分析<br>与综合 | 程金送* | 张晓谷 | 张令弥 |  |
|     |                              | 凌爱民  | 汤德满 |     |  |
| 8   | 直升机振动、噪声<br>环境               | 张曾谔  | 顾仲权 | 朱德懋 |  |
|     |                              | 杨惠琴  | 陈修兰 |     |  |
| 9   | 直升机动力学试验                     | 汤德满* | 顾仲权 | 李祖钊 |  |
|     |                              | 程金送  |     |     |  |
| 10  | 旅翼动力相似模型<br>设计和试验            | 张明珍  | 徐桂祺 | 张振芳 |  |
|     |                              |      | 汤德满 |     |  |
| 11  | 直升机动力学飞行<br>试验               | 申仲安  | 钟德钧 | 张克荣 |  |

注: 编写人员多于一人时, 带\*者为本章主编。

航空工业出版社程志远同志对本书进行了认真的出版审查, 航空航天工业部六〇二研究所王靖同志和航空工业出版社邵箭同志为本书出版给予了热情支持和帮助, 在此一并表示感谢。

# 基本符号表

|                        |                                                |                                          |
|------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------|
| $a$                    | 加速度                                            | $\text{m} / \text{s}^2$                  |
| $b$                    | 桨叶宽度,弦长                                        | $\text{m}$                               |
| $C$                    | 阻尼矩阵                                           |                                          |
| $c$                    | 粘性阻尼系数                                         | $\text{N} \cdot \text{s} / \text{m}$     |
| $C_x$                  | 翼型阻力系数                                         |                                          |
| $C_y$                  | 翼型升力系数                                         |                                          |
| $C_y^\alpha(a_\infty)$ | 翼型升力线斜率, $C_y^\alpha = \frac{dC_y}{d\alpha}$   | $1 / \text{rad}$                         |
| $D$                    | 旋翼直径                                           | $\text{m}$                               |
| $d$                    | 直径                                             | $\text{m}$                               |
| $f$                    | 频率                                             | $\text{Hz}$                              |
| $g$                    | 重力加速度                                          | $\text{m} / \text{s}^2$                  |
| $I$                    | 质量惯性矩,面积惯性矩,加下角<br>标表示参考轴,如 $I_x, I_y, I_z$    | $\text{kg} \cdot \text{m}^2, \text{m}^4$ |
| $i$                    | 减速比,传动比                                        |                                          |
| $K$                    | 刚度矩阵                                           |                                          |
| $K$                    | 刚度                                             | $\text{N} / \text{m}$                    |
| $k$                    | 桨叶片数                                           |                                          |
| $l$                    | 外伸量,加下角标表示对不同的铰,<br>如 $l_{cj}, l_{pj}$         | $\text{m}$                               |
| $M$                    | 质量矩阵                                           |                                          |
| $M$                    | 质量,力矩,扭矩,马赫数                                   | $\text{kg}, \text{N} \cdot \text{m}$     |
| $m$                    | 质量                                             | $\text{kg}$                              |
| $N$                    | 功率                                             | $\text{W}, \text{马力}$                    |
| $n$                    | 旋翼转速,<br>过载系数,过载,加下角标表示方向,如<br>$n_x, n_y, n_z$ | $\text{r} / \text{min}$                  |
| $p$                    | 压力,压强                                          | $\text{Pa}$                              |
| $R$                    | 旋翼半径                                           | $\text{m}$                               |

|           |            |                      |
|-----------|------------|----------------------|
| $R_e$     | 雷诺数        |                      |
| $r$       | 半径         | m                    |
| $S$       | 静矩         | kg · m               |
| $T$       | 旋翼拉力       | N                    |
|           | 拉力         | N                    |
|           | 动能         | J                    |
|           | 周期         | s                    |
|           | 热力学温度,绝对温度 | K                    |
| $t$       | 时间         | s                    |
|           | 摄氏温度       | ℃                    |
| $U$       | 位能,应变能     | J                    |
| $V$       | 速度         | m / s, km / h, 节     |
|           |            | 1 节 = 0.514444 m / s |
|           | 体积         | m <sup>3</sup>       |
| $v$       | 诱导速度       | m / s                |
| $W$       | 外力功        | N · m, J             |
| $\alpha$  | 迎角         | rad, ° 度, '分, "秒     |
| $\beta$   | 桨叶挥舞角      | rad, ° 度, '分, "秒     |
| $\xi$     | 相对阻尼系数     |                      |
| $\theta$  | 桨叶扭转角      | rad, ° 度, '分, "秒     |
| $\mu$     | 前进比        |                      |
| $\zeta$   | 桨叶摆振角      | rad, ° 度, '分, "秒     |
| $\rho$    | 质量密度       | kg / m <sup>3</sup>  |
| $\sigma$  | 旋翼实度       |                      |
|           | 正应力        | Pa                   |
| $\tau$    | 剪应力        | Pa                   |
| $\varphi$ | 桨叶安装角      | rad, ° 度, '分, "秒     |
| $\psi$    | 桨叶方位角      | rad, ° 度, '分, "秒     |
| $\Omega$  | 旋翼旋转角速度    | rad / s              |
| $\omega$  | 角速度        | rad / s              |
|           | 圆频率        | rad / s              |



# 目 录

|                                   |      |
|-----------------------------------|------|
| 1 引论 .....                        | (1)  |
| 1.1 直升机的动力学问题及其在型号研制中的地位 .....    | (1)  |
| 1.1.1 直升机动力学的基本问题 .....           | (1)  |
| 1.1.2 直升机动力学在型号研制中的地位 .....       | (2)  |
| 1.2 解决直升机动力学问题的技术路线 .....         | (3)  |
| 1.3 编写本手册的考虑 .....                | (3)  |
| 2 直升机的振源 .....                    | (4)  |
| 2.1 直升机的主要振源概况及分类 .....           | (4)  |
| 2.1.1 振源分析的重要性与地位 .....           | (4)  |
| 2.1.2 外部环境引起的激振力 .....            | (4)  |
| 2.1.3 内部环境引起的激振力 .....            | (4)  |
| 2.1.4 分类 .....                    | (5)  |
| 2.2 旋翼的激振力 .....                  | (5)  |
| 2.2.1 桨叶由于交变气动环境及操纵引起的气动激振力 ..... | (5)  |
| 2.2.2 桨叶根部的作用力及力矩 .....           | (7)  |
| 2.2.3 桨根力的合成及旋翼整体振型 .....         | (12) |
| 2.2.4 桨毂激振力 .....                 | (19) |
| 2.2.5 桨毂激振力的传递 .....              | (26) |
| 2.3 尾桨的激振力 .....                  | (27) |
| 2.4 旋翼的质量及气动不平衡引起的激振力 .....       | (29) |
| 2.5 旋翼尾流的激振力 .....                | (31) |
| 2.6 机体结构振动引起的平台环境 .....           | (31) |
| 2.7 旋翼激振力的预估及抑制 .....             | (33) |
| 2.7.1 预估的一般方法及现状 .....            | (33) |
| 2.7.2 抑制旋翼激振力的设计措施 .....          | (34) |
| 参考文献 .....                        | (34) |
| 3 旋翼、尾桨动力学 .....                  | (35) |
| 3.1 概述 .....                      | (35) |
| 3.2 旋翼动力学设计 .....                 | (37) |
| 3.2.1 旋翼动力学设计要求 .....             | (37) |
| 3.2.2 改善桨叶气动弹性响应的设计途径 .....       | (37) |
| 3.2.3 旋翼各参数对桨叶气动弹性响应的影响 .....     | (38) |
| 3.2.4 桨叶运动自由度之间的耦合 .....          | (42) |
| 3.2.5 改善旋翼气动弹性稳定性的设计途径 .....      | (45) |
| 3.2.6 失速颤振 .....                  | (47) |
| 3.2.7 旋翼与机体耦合的稳定性 .....           | (48) |
| 3.3 旋翼桨叶动力特性分析 .....              | (49) |



|       |                                |       |
|-------|--------------------------------|-------|
| 3.3.1 | 引言 .....                       | (49)  |
| 3.3.2 | 旋转桨叶在挥舞面内的弯曲振动 .....           | (49)  |
| 3.3.3 | 旋转桨叶在摆振面内的弯曲振动 .....           | (50)  |
| 3.3.4 | 旋转桨叶扭转振动 .....                 | (51)  |
| 3.3.5 | 桨叶动力特性计算方法 .....               | (51)  |
| 3.3.6 | 旋转桨叶挥舞-摆振-扭转耦合振动分析 .....       | (59)  |
| 3.3.7 | 桨叶振动的共振图 .....                 | (73)  |
| 3.3.8 | 固定坐标系内旋翼的整体运动 .....            | (75)  |
| 3.3.9 | 复杂结构的动力特性分析 .....              | (77)  |
| 3.4   | 旋翼桨叶气动弹性响应分析 .....             | (80)  |
| 3.4.1 | 引言 .....                       | (80)  |
| 3.4.2 | 气动力 .....                      | (80)  |
| 3.4.3 | 桨叶气动弹性响应计算的伽辽金法 .....          | (83)  |
| 3.4.4 | 桨叶气动弹性响应计算的逐步积分法 .....         | (84)  |
| 3.5   | 旋翼桨叶气动弹性稳定性分析 .....            | (85)  |
| 3.5.1 | 引言 .....                       | (85)  |
| 3.5.2 | 变距-挥舞耦合气动弹性稳定性分析 .....         | (86)  |
| 3.5.3 | 挥舞-摆振耦合的气动弹性稳定性分析 .....        | (91)  |
| 3.5.4 | 无铰式或无轴承式旋翼桨叶气动弹性响应和稳定性分析 ..... | (96)  |
| 3.6   | 尾桨动力学特点 .....                  | (106) |
| 3.6.1 | 引言 .....                       | (106) |
| 3.6.2 | 尾桨的结构形式 .....                  | (106) |
| 3.6.3 | 尾桨结构动力学参数特点 .....              | (107) |
| 3.6.4 | 尾桨动力学设计特点 .....                | (109) |
| 3.6.5 | 尾桨动力稳定性问题 .....                | (113) |
| 3.7   | 旋翼、尾桨动力学试验要求 .....             | (117) |
| 3.7.1 | 概述 .....                       | (117) |
| 3.7.2 | 旋翼、尾桨的动力特性试验 .....             | (117) |
| 3.7.3 | 旋翼、尾桨气动弹性稳定性试验 .....           | (118) |
| 3.7.4 | 旋翼、尾桨的气弹响应试验 .....             | (119) |
| 附录 I  | 有限元素法在桨叶动力特性计算中的实例 .....       | (120) |
| 附录 II | 经典颤振的算例 .....                  | (123) |
| 参考文献  | .....                          | (129) |
| 4     | 机体动力学 .....                    | (131) |
| 4.1   | 机体动力学概论 .....                  | (131) |
| 4.1.1 | 机体的功能与结构 .....                 | (131) |
| 4.1.2 | 机体动力学的研究内容 .....               | (131) |
| 4.1.3 | 机体动力学研究方法 .....                | (132) |
| 4.2   | 机体的有限元模型 .....                 | (132) |

|       |                                               |       |
|-------|-----------------------------------------------|-------|
| 4.2.1 | 机体结构的基本假设 .....                               | (132) |
| 4.2.2 | 有限元的基本概念 .....                                | (134) |
| 4.2.3 | 桁架式和梁式机体结构的有限元模型 .....                        | (135) |
| 4.2.4 | 薄壁机体结构的有限元模型 .....                            | (140) |
| 4.3   | 机体结构的固有特性分析 .....                             | (142) |
| 4.3.1 | 固有模态理论 .....                                  | (142) |
| 4.3.2 | 机体结构的固有振动特性——瑞利商 .....                        | (145) |
| 4.4   | 机体结构的自由度减缩 .....                              | (146) |
| 4.4.1 | 机体结构的特点 .....                                 | (146) |
| 4.4.2 | 超单元的基本概念 .....                                | (147) |
| 4.4.3 | 内部自由度减缩 .....                                 | (147) |
| 4.4.4 | 自由度减缩后的动力学方程 .....                            | (148) |
| 4.4.5 | 界面自由度减缩——超节点的形成 .....                         | (149) |
| 4.4.6 | 质量矩阵的非一致形成法 .....                             | (150) |
| 4.5   | 粘性阻尼机体的动力学分析 .....                            | (151) |
| 4.5.1 | 比例粘性阻尼机体的动力学特性 .....                          | (151) |
| 4.5.2 | 一般粘性阻尼机体的动力学特性 .....                          | (152) |
| 4.5.3 | 粘性阻尼机体动力学的一般解——时域响应分析 .....                   | (154) |
| 4.5.4 | 粘性阻尼机体动力学的传递函数——拉氏域响应分析 .....                 | (157) |
| 4.6   | 机体结构的动力修改 .....                               | (160) |
| 4.6.1 | 动力修改的基本概念 .....                               | (160) |
| 4.6.2 | 小修改情况的模态摄动法 .....                             | (161) |
| 4.6.3 | 耦合模态摄动法 .....                                 | (164) |
| 4.7   | 机体结构的动力学设计 .....                              | (168) |
| 4.7.1 | 问题的提出 .....                                   | (168) |
| 4.7.2 | 机体结构的动特性优化设计问题 .....                          | (168) |
| 4.7.3 | 机体结构动特性优化设计方法 .....                           | (171) |
| 4.8   | 机体结构数学模型优化技术 .....                            | (173) |
| 4.8.1 | 机体结构数学模型优化问题的提法 .....                         | (173) |
| 4.8.2 | 试验建模与分析建模的相关性分析 .....                         | (174) |
| 4.8.3 | 动力学特性矩阵优化技术 .....                             | (176) |
| 4.8.4 | 有限元模型优化技术 .....                               | (179) |
|       | 参考文献 .....                                    | (180) |
| 5     | 动力/传动系统及操纵系统动力学 .....                         | (181) |
| 5.1   | 动力/传动系统及操纵系统动力学的基本问题 .....                    | (181) |
| 5.1.1 | 动力/传动/旋翼(尾桨)机械扭振系统的强迫振动 .....                 | (181) |
| 5.1.2 | 动力/传动/旋翼(尾桨)机械扭振系统与发动机控制系统耦合的<br>动稳定性问题 ..... | (181) |
| 5.1.3 | 发动机振动及传动轴的横向振动 .....                          | (181) |



|       |                                          |       |
|-------|------------------------------------------|-------|
| 5.1.4 | 操纵系统的“轴向”运动的动力特性 .....                   | (182) |
| 5.1.5 | 操纵拉杆的横向弯曲振动 .....                        | (182) |
| 5.2   | 动力/传动系统的扭转振动 .....                       | (182) |
| 5.2.1 | 当量系统 .....                               | (182) |
| 5.2.2 | 只考虑旋翼基阶模态的动力/传动系统扭转固有特性计算 .....          | (188) |
| 5.2.3 | 计入桨叶弹性变形的动力/传动系统扭转固有特性计算 .....           | (198) |
| 5.3   | 动力/传动机械扭振系统与发动机控制系统耦合的动稳定性问题 .....       | (202) |
| 5.3.1 | 动力学模型的建立 .....                           | (203) |
| 5.3.2 | 动稳定性的分析 .....                            | (204) |
| 5.3.3 | 消除动不稳定性的设计措施与设计方法 .....                  | (205) |
| 5.4   | 操纵系统“轴向”运动的动力特性 .....                    | (207) |
| 5.4.1 | 系统的构成 .....                              | (207) |
| 5.4.2 | 动力特性的确定 .....                            | (208) |
| 5.4.3 | 动刚度特性的应用 .....                           | (218) |
| 5.5   | 操纵拉杆的横向(弯曲)振动 .....                      | (219) |
| 5.5.1 | 系统的构成 .....                              | (219) |
| 5.5.2 | 振源及设计准则 .....                            | (219) |
| 5.5.3 | 动力学模型 .....                              | (219) |
| 5.5.4 | 设计及减振分析 .....                            | (220) |
|       | 参考文献 .....                               | (220) |
| 6     | 直升机减振技术 .....                            | (222) |
| 6.1   | 概述 .....                                 | (222) |
| 6.1.1 | 一般的减振技术 .....                            | (222) |
| 6.1.2 | 降低直升机全机振动水平的途径 .....                     | (226) |
| 6.2   | 直升机被动减振技术 .....                          | (228) |
| 6.2.1 | 动力减振 .....                               | (228) |
| 6.2.2 | 振动隔离 .....                               | (242) |
| 6.3   | 直升机主动减振技术 .....                          | (256) |
| 6.3.1 | 主动减振概述 .....                             | (256) |
| 6.3.2 | 主动动力吸振 .....                             | (257) |
| 6.3.3 | 主动振动隔离 .....                             | (260) |
| 6.3.4 | 高阶谐波控制 .....                             | (265) |
|       | 附录 I 矩阵 $P$ 的元素 .....                    | (271) |
|       | 附录 II 矩阵 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 的元素 ..... | (273) |
|       | 参考文献 .....                               | (276) |
| 7     | 旋翼—机体耦合系统动不稳定性分析与综合 .....                | (279) |
| 7.1   | 旋翼—机体耦合振动系统的动不稳定性问题及其预防措施 .....          | (279) |
| 7.1.1 | 旋翼—机体耦合振动系统的动不稳定性问题的物理本质 .....           | (279) |
| 7.1.2 | 旋翼振动系统 .....                             | (280) |

|       |                                |       |
|-------|--------------------------------|-------|
| 7.1.3 | 机身振动系统 .....                   | (281) |
| 7.1.4 | 发生“地面共振”时的现象和处置办法 .....        | (281) |
| 7.1.5 | 预防措施 .....                     | (281) |
| 7.2   | “地面共振”分析模型及动力稳定性计算方法 .....     | (284) |
| 7.2.1 | 平面动力模型 .....                   | (284) |
| 7.2.2 | 空间动力模型 .....                   | (293) |
| 7.2.3 | 安全转速图 .....                    | (304) |
| 7.3   | “地面共振”动力学参数测定 .....            | (305) |
| 7.3.1 | 质量、转动惯量和重心位置的测定 .....          | (305) |
| 7.3.2 | 刚度、阻尼特性的测定 .....               | (306) |
| 7.3.3 | 机体动力特性(桨毂中心频响函数)的测定 .....      | (312) |
| 7.4   | 基于机体频响函数实测数据的“地面共振”判别方法 .....  | (314) |
| 7.4.1 | 基于低频段频响函数实测数据的“地面共振”判别方法 ..... | (314) |
| 7.4.2 | 基于高频段频响函数实测数据的“地面共振”判别方法 ..... | (316) |
| 7.5   | “地面共振”地面开车试验 .....             | (321) |
| 7.5.1 | 试验目的 .....                     | (321) |
| 7.5.2 | 试验条件 .....                     | (321) |
| 7.5.3 | 激振方法 .....                     | (322) |
| 7.5.4 | 数据记录和处理 .....                  | (322) |
| 7.6   | 系留状态的“地面共振”分析 .....            | (322) |
| 7.6.1 | 直升机系留状态的种类 .....               | (322) |
| 7.6.2 | 钢索无预紧系留状态“地面共振”分析 .....        | (322) |
| 7.6.3 | 钢索预紧系留状态“地面共振”分析 .....         | (323) |
| 7.6.4 | 其它类型系留状态“地面共振”分析 .....         | (323) |
| 7.7   | 滑跑时的“地面共振”分析 .....             | (324) |
| 7.7.1 | 直升机滑跑时的特点及产生“地面共振”的机理 .....    | (324) |
| 7.7.2 | 轮胎滚动时侧向刚度、阻尼特性计算 .....         | (324) |
| 7.7.3 | 直升机滑跑时桨叶减摆器阻尼特性计算 .....        | (325) |
| 7.7.4 | 滑跑时的“地面共振”计算 .....             | (327) |
| 7.7.5 | 算例计算结果 .....                   | (331) |
| 7.8   | 一个减摆器失效时的“地面共振”分析 .....        | (332) |
| 7.8.1 | 运动方程 .....                     | (332) |
| 7.8.2 | 基于基础各向同性假设下的计算方法 .....         | (332) |
| 7.8.3 | 基础各向异性情况下的计算方法 .....           | (333) |
| 7.8.4 | 算例计算结果 .....                   | (336) |
| 7.9   | 无铰旋翼直升机“地面共振”和“空中共振”分析 .....   | (337) |
| 7.9.1 | 分析模型 .....                     | (338) |
| 7.9.2 | 无铰旋翼直升机“空中共振”和“地面共振”计算方法 ..... | (341) |
| 7.9.3 | 算例计算结果 .....                   | (353) |



|                                  |              |
|----------------------------------|--------------|
| 参考文献 .....                       | (355)        |
| <b>8 直升机振动、噪声环境 .....</b>        | <b>(356)</b> |
| 8.1 座舱的振动及噪声环境 .....             | (356)        |
| 8.1.1 振源及噪声源 .....               | (356)        |
| 8.1.2 振动及噪声在结构里的传递 .....         | (357)        |
| 8.1.3 振动、噪声的一般特性 .....           | (357)        |
| 8.2 振动、噪声环境问题 .....              | (360)        |
| 8.2.1 振动环境对设备的影响 .....           | (360)        |
| 8.2.2 振动环境对人体的影响 .....           | (361)        |
| 8.2.3 噪声对设备及人体的影响 .....          | (363)        |
| 8.2.4 振动、噪声联合环境对设备和人体的影响 .....   | (363)        |
| 8.3 处理振动、噪声环境问题的一般考虑 .....       | (367)        |
| 8.3.1 一般考虑 .....                 | (367)        |
| 8.3.2 改善振动、噪声环境技术措施举例 .....      | (368)        |
| 8.3.3 乘坐品质标准及设备振动环境试验标准 .....    | (372)        |
| 8.4 振动环境条件的制订及振动环境试验技术 .....     | (385)        |
| 参考文献 .....                       | (385)        |
| <b>9 直升机动力学试验 .....</b>          | <b>(387)</b> |
| 9.1 强度规范对动力学试验的要求 .....          | (387)        |
| 9.1.1 一般结构类部件动力学试验要求 .....       | (387)        |
| 9.1.2 特殊动力学试验要求 .....            | (387)        |
| 9.2 动力学特性试验的基本方法 .....           | (388)        |
| 9.2.1 模态参数识别技术 .....             | (388)        |
| 9.2.2 试验确定部件的物理参数 .....          | (390)        |
| 9.2.3 试验确定稳定性边界 .....            | (390)        |
| 9.3 动力学试验的一般技术 .....             | (390)        |
| 9.3.1 试件的安装和边界条件的模拟 .....        | (390)        |
| 9.3.2 激励方式选择 .....               | (393)        |
| 9.3.3 测量信号的标定 .....              | (395)        |
| 9.3.4 动力学试验应注意的一些问题 .....        | (402)        |
| 9.3.5 试验数据的检验 .....              | (408)        |
| 9.3.6 试验仪器及其选用 .....             | (410)        |
| 9.4 动力学参数的确定 .....               | (416)        |
| 9.4.1 惯量与刚度 .....                | (416)        |
| 9.4.2 着陆系统的刚度和阻尼 .....           | (422)        |
| 9.4.3 桨叶减摆器的刚度与阻尼 .....          | (429)        |
| 9.4.4 阻抗特性测量 .....               | (430)        |
| 9.5 机身在起落架上振动时, 桨毂中心频响函数测量 ..... | (434)        |
| 9.5.1 试验目的 .....                 | (434)        |

9.5.2 试验条件 ..... (434)

9.5.3 激振系统 ..... (435)

9.5.4 测量系统 ..... (437)

9.5.5 数据处理及实例 ..... (437)

9.6 旋转部件的动力特性测试 ..... (438)

9.6.1 旋转部件上信号传输 ..... (438)

9.6.2 旋转旋翼的固有动力特性测试 ..... (445)

9.7 旋翼气动弹性和机械稳定性试验 ..... (454)

9.7.1 确定稳定性边界的方法 ..... (454)

9.7.2 悬停稳定性试验 ..... (460)

参考文献 ..... (469)

10 旋翼动力相似模型设计和试验 ..... (472)

10.1 旋翼动力相似模型概述 ..... (472)

10.1.1 旋翼动力相似模型试验目的 ..... (472)

10.1.2 相似条件 ..... (472)

10.1.3 旋翼模型分类 ..... (472)

10.2 旋翼动力模型的相似准则数 ..... (472)

10.3 缩尺因子及旋翼模型设计 ..... (475)

10.3.1 基本量的缩尺因子 ..... (475)

10.3.2 旋翼动力相似模型设计方法的分类 ..... (476)

10.3.3 旋翼动力相似模型设计准则的选择 ..... (476)

10.3.4 风洞介质对模型旋翼参数缩尺因子的影响 ..... (478)

10.3.5 旋翼动力相似模型设计要点 ..... (478)

10.4 旋翼动力相似模型的检验 ..... (480)

10.4.1 模型旋翼桨叶弯曲刚度分布, 扭转刚度分布及质量分布检验 ..... (481)

10.4.2 不旋转桨叶模型固有特性检验 ..... (483)

10.4.3 模型旋翼的静平衡检验 ..... (486)

10.4.4 模型旋翼的动平衡检验 ..... (488)

10.5 旋翼动力相似模型试验装置的一般考虑 ..... (491)

10.5.1 对旋翼试验台设计的要求 ..... (491)

10.5.2 试验装置概述 ..... (491)

10.5.3 旋转桨叶的激振及固有特性测试 ..... (500)

10.5.4 数据处理系统 ..... (505)

10.6 试验结果的误差分析 ..... (506)

10.7 旋翼模型动不稳定性风洞试验示例 ..... (514)

10.7.1 旋翼模型参数及试验台系统 ..... (514)

10.7.2 试验程序 ..... (515)

10.7.3 试验结果 ..... (517)

参考文献 ..... (520)



|                                 |       |
|---------------------------------|-------|
| 11 直升机动力学飞行试验 .....             | (521) |
| 11.1 概述 .....                   | (521) |
| 11.2 测量系统的标定和检查 .....           | (521) |
| 11.2.1 静态标定 .....               | (522) |
| 11.2.2 动态特性的标定和检查 .....         | (523) |
| 11.3 直升机飞行参数的测量 .....           | (524) |
| 11.3.1 一般飞行参数的测量 .....          | (524) |
| 11.3.2 特殊飞行参数的测量 .....          | (524) |
| 11.4 载荷测量 .....                 | (526) |
| 11.4.1 机身载荷识别技术 .....           | (526) |
| 11.4.2 桨叶铰链力矩的测量(以旋翼桨叶为例) ..... | (530) |
| 11.4.3 动力传动轴的扭矩测量 .....         | (532) |
| 11.4.4 压力测量 .....               | (533) |
| 11.5 结构的应变测量 .....              | (534) |
| 11.5.1 应变片及其使用技术 .....          | (534) |
| 11.5.2 测量电桥及导线连接 .....          | (536) |
| 11.5.3 直流放大器 .....              | (538) |
| 11.5.4 磁带记录器 .....              | (539) |
| 11.5.5 集流环 .....                | (541) |
| 11.5.6 无线电遥测系统 .....            | (541) |
| 11.5.7 应变测量的特殊问题 .....          | (545) |
| 11.5.8 测量的保证和实施 .....           | (546) |
| 11.5.9 测量误差 .....               | (547) |
| 11.6 振动测量 .....                 | (547) |
| 11.6.1 振动测量设备 .....             | (547) |
| 11.6.2 振动测量设备的安装 .....          | (548) |
| 11.6.3 飞行试验状态 .....             | (548) |
| 11.7 直升机声学噪声的测量 .....           | (548) |
| 11.7.1 内部噪声 .....               | (548) |
| 11.7.2 外部噪声 .....               | (549) |
| 11.7.3 武器噪声测量 .....             | (550) |
| 11.7.4 旋翼气动噪声的测量 .....          | (551) |
| 11.8 瞬态响应测量 .....               | (551) |
| 11.8.1 着陆载荷响应 .....             | (551) |
| 11.8.2 滑跑载荷响应 .....             | (551) |
| 11.8.3 武器发射时的冲击载荷响应 .....       | (551) |
| 11.9 机械和气动弹性不稳定性试验 .....        | (552) |
| 11.9.1 机械不稳定性试验 .....           | (552) |
| 11.9.2 气动弹性不稳定性试验 .....         | (552) |



11.10 数据处理..... (553)

11.10.1 一般动力学数据的处理 ..... (554)

11.10.2 直升机动力学数据处理 ..... (554)

11.10.3 数据处理误差 ..... (555)

参考文献 ..... (556)

# 1 引 论

## 1.1 直升机的动力学问题及其在型号研制中的地位

### 1.1.1 直升机动力学的基本问题

现代直升机依靠旋翼实现飞行。为了达到高效率的垂直飞行,旋翼采用大直径、低桨盘载荷设计,桨叶为大展弦比的弹性结构。这种结构在复杂的流场及离心力场里,构成典型的振动系统或气动弹性系统,成为直升机产生一系列动力学问题最主要的根源。这里,直升机动力学指其结构动力学和气动弹性动力学,不包括传统的飞行动力学。

结构动力学研究结构的强迫振动、暂态振动和动稳定性。结构动力学不考虑空气动力与结构的弹性力、阻尼力和惯性力之间的相互作用,如果涉及空气动力,也只把它作为与结构振动运动无关的外力对待。气动弹性动力学研究气流中的弹性结构,由于作用在结构上的空气动力及由此引起的结构振动反作用力之间的相互作用而产生的一系列动力学问题,包括气动弹性动稳定性问题和气动弹性动响应问题。

我们可以从这一学科的分类来归纳直升机上遇到的动力学基本问题。

强迫振动是结构在外加周期激振力或激振运动作用下的稳态振动。主要应避免过大的振幅,以免恶化结构疲劳强度和振动环境,特别应避免结构的固有频率与有影响的激振力频率相接近而落入共振区的共振现象。直升机上的外加激振力主要来自升、尾桨和动力传动系统。直升机机体振动、动力传动系统扭转振动、传动轴横向弯曲振动和操纵拉杆横向弯曲振动等为直升机上常遇到的强迫振动。在直升机型号研制的历史上,曾屡次因为强迫振动问题,严重地影响了直升机性能的发挥、有关部件的疲劳寿命或预定的研制计划。在现代,强迫振动问题仍然是直升机研制中首先要解决的几个核心问题之一。

暂态振动是结构由冲击激励引起的随时间衰减的振动。主要应正确估计振动过程中产生的最大动响应或过载,并避免其量值过大。着陆撞击、铰接直升机桨叶扬起下坠等为直升机应考虑暂态振动问题。

结构系统的动稳定性是考察系统在平衡位置受到初始扰动作用后振幅随时间衰减还是扩大的问题。振幅随时间衰减,平衡状态为稳定的,系统称为动稳定系统;振幅随时间扩大,则为不稳定的,系统称为动不稳定系统。对于结构或机械系统来说,动不稳定是由于系统内不同自由度之间的耦合存在正反馈效应,因而能够在初始扰动作用后从定常能源吸取能量并转变为交变的性质用以不断扩大自身振动而造成的。在有些情况下,动不稳定系统在初始扰动作用后其振幅随时间扩大的速度极快,几秒钟内就可使结构达到严重破坏的程度。起落架前轮摆振、铰接式直升机“地面共振”为直升机上可能遇到的动不稳定性问题。在直升机使用范围内不允许存在动不稳定性问题并应具有足够的稳定裕度。历史上,曾一再因为“地面共振”的问题造成灾难性事故,并一度成为阻碍直升机发展的技术难关。

气动弹性稳定性问题是指气动弹性系统在平衡位置附近动稳定与动不稳定的问题。在初始扰动作用后,振幅随时间衰减,系统为稳定的,振幅随时间扩大,系统为动不稳定的。这和结构系统动稳定性问题的本质是一致的,不过这里不仅涉及弹性系统的弹性力、阻尼力和惯性力的相互作用,而且涉及它们和空气动力之间的相互作用。这种空气动力一般均具有非定常的性质,问题更趋复杂,处理起来更加困难。气动弹性稳定性是气动弹性系统的