

江苏高校品牌专业建设工程资助项目

飞行器设计与工程力学品牌专业系列教材



直升机飞行动力学

(第二版)

陈仁良 高正 著



科学出版社

飞行器设计与工程力学品牌专业系列教材

直升机飞行动力学

(第二版)

陈仁良 高 正 著

科学出版社

内 容 简 介

本书全面、系统地介绍直升机的基本飞行特点和飞行操纵方法；分析旋翼的挥舞运动对直升机的配平、稳定性和操纵性的关键作用；给出直升机的平衡、稳定性和操纵性的分析方法；介绍直升机飞行品质规范的基本内容、应用及其发展；阐述倾转旋翼机飞行动力学的建模方法及直升机模式与固定翼飞机模式之间的相互转换。

本书可作为高等院校“直升机飞行动力学”课程的教材或参考书，也可供航空工厂、研究所、部队及民航领域从事直升机设计、制造、使用、维护和管理工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

直升机飞行动力学 / 陈仁良, 高正著. —2 版. —北京: 科学出版社, 2019.10

飞行器设计与工程力学品牌专业系列教材

ISBN 978-7-03-062109-2

I. ①直… II. ①陈… ②高… III. ①直升机-飞行力学

IV. ①V212.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 179193 号

责任编辑: 余 江 张丽花 陈 琼 / 责任校对: 王萌萌

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京盛通商印快线网络科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2003 年 4 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2019 年 10 月第 二 版 印张: 15 3/4

2020 年 4 月第二次印刷 字数: 383 000

定价: 59.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

第一版序

21 世纪的直升机，尤其是军用直升机，它的技术要求和研究重点，已不仅是追求飞行性能指标，如飞得多高、多快等，而是更关注于完成任务的能力和驾驶品质等级，如稳定性指标、操纵性优劣等，属于飞行动力学范畴。

进入 21 世纪以来，我国直升机事业发展到一个新的时期，多种直升机正处在研制和改进、改型之中。由南京航空航天大学高正和陈仁良两位教授合作的这本《直升机飞行动力学》融汇了中外大量资料的精华和他们学科组的长期研究成果。该书的及时推出，必将为我国直升机技术水平的提高做出重要贡献。

全书共 8 章。第 1 章“绪论”，介绍了直升机飞行动力学的研究内容和各坐标系的选用及其转换。第 2 章“直升机的飞行操纵”，说明了直升机上起作用的各种外力和怎样进行配平及改变飞行状态的操纵方式。第 3 章“旋翼的挥舞”，专门解释了旋翼在不同状态中独特的挥舞运动和由此产生的桨尖轨迹平面的挥舞角变化。第 4 章“直升机运动方程”，建立起直升机作为刚体在空间运动时六自由度的全量方程及其线性化方程，这是研究稳定性和操纵性的基础。第 5 章“直升机的稳定飞行”，阐述了直升机主要是单旋翼带尾桨式直升机处于正常飞行时的平衡计算。第 6 章“直升机的稳定性”，即直升机偶然受扰后的动态过程的分析。第 7 章“直升机的操纵响应”，即直升机在操纵输入下的动态过程分析。第 8 章“直升机的飞行品质和飞行品质规范”，引入了美国 2000 年的规范，这是与时俱进的，有别于过去评价直升机飞行品质优劣的创新部分。

此外，书中还附有四个附录，其中附录 A“不同坐标和符号对照表”对读者参阅西方文献时大有裨益。

该书论述全面，内容先进，既可供直升机界设计、制造、使用单位技术人员参考之用，也可作为直升机专业研究生教材。值此出版之际，欣然为之代笔作序。

王适存

2003 年 2 月于南京

前 言

本书第一版自 2003 年出版以来已经 16 年。在此期间，我国直升机研发、生产及应用各方面都有了长足的发展，又有一代新人进入了直升机领域。这自然地引发了对直升机科技书籍的新需求。

国内外直升机技术仍在不断发展，提高直升机的飞行速度是重点之一，其中最醒目的成果是倾转旋翼机的成功。这种飞行器保留了直升机能够垂直起降、悬停和低速飞行的特点，又可像飞机那样以较高的速度和更好的经济性巡航，成为独具优势的运输机。由于在空气动力学、飞行动力学和飞行控制等方面遇到若干新问题，其研发过程历经波折，耗时数十年才得以实用。

倾转旋翼机的优势已经显现，其新的发展和改善是令人期待的。我与合作者陈仁良教授持此共识，决定对倾转旋翼机进行研究，着重针对其技术关键——直升机模式与飞机模式之间相互转换过程，研究其空气动力学及飞行动力学问题。怎奈我年事已高，不能身体力行了。所幸有陈仁良教授带领他的学生们辛勤钻研数年，取得了可喜的研究成果。

陈仁良教授接受我的建议，将其研究成果的核心部分补充到本书中作为第 9 章、第 10 章，从而形成了第二版。我有幸能在耄耋之年看到第二版的出版，本书实现了与时俱进，应归功于陈仁良教授。为了反映陈仁良教授对第二版的贡献，特意将作者姓名排序进行了调整。

此外，第一版中的个别错误已在第二版中改正，并结合热心读者的意见对第 7 章有所补充，借此对读者表示感谢。衷心希望并欢迎读者对本书提出指正和建议。

高玉

2019 年 2 月

主要符号表

A_F	机身特征面积
A_H	平尾面积
A_V	垂尾面积
A_1	旋翼横向周期变距
a_0	旋翼锥度角
$a_{0,T}$	尾桨锥度角
a_{10}	吹风引起的旋翼挥舞后倒角
a_{1c}	操纵引起的旋翼挥舞后倒角
a_{1s}	旋翼挥舞后倒角(相对于旋翼构造平面)
$a_{1\omega}$	随动挥舞引起的旋翼挥舞后倒角
a_∞	桨叶翼型升力线斜率
$a_{\infty,H}$	平尾翼型升力线斜率
a_H	平尾实际升力线斜率
B_1	旋翼纵向周期变距
b	桨叶弦长
b_{10}	吹风引起的旋翼挥舞侧倒角
b_{1c}	操纵引起的旋翼挥舞侧倒角
b_{1s}	旋翼挥舞侧倒角(相对于旋翼构造平面)
$b_{1\omega}$	随动挥舞引起的旋翼挥舞侧倒角
C_{DF}	机身阻力系数
C_{DH}	平尾阻力系数
C_{DV}	垂尾阻力系数
C_{II}	旋翼后向力系数
C_{LF}	机身升力系数
C_{LH}	平尾升力系数
C_{LV}	垂尾升力系数
C_{MxF}	机身滚转力矩系数
C_{MyF}	机身偏航力矩系数
C_{MzF}	机身俯仰力矩系数
C_S	旋翼侧向力系数
C_{SF}	机身侧向力系数
C_T	旋翼拉力系数

$C_{T,T}$	尾桨拉力系数
C_x	桨叶翼型阻力系数
$C_{x,H}$	平尾翼型阻力系数
C_{x7}	桨叶 0.7 半径处翼型的阻力系数
C_y	桨叶翼型升力系数
D_F	机身阻力
D_H	平尾阻力
D_V	垂尾阻力
E	无铰旋翼桨叶弹性模量
e	水平铰偏置量
F_x, F_y, F_z	直升机气动合力三分量
$F_{x,M}, F_{y,M}, F_{z,M}$	旋翼气动力在体轴系中的三分量
$F_{x,T}, F_{y,T}, F_{z,T}$	尾桨气动力在体轴系中的三分量
$F_{x,H}, F_{y,H}, F_{z,H}$	平尾气动力在体轴系中的三分量
$F_{x,V}, F_{y,V}, F_{z,V}$	垂尾气动力在体轴系中的三分量
$F_{x,F}, F_{y,F}, F_{z,F}$	机身气动力在体轴系中的三分量
$F_{x,G}, F_{y,G}, F_{z,G}$	直升机重力在体轴系中的三分量
G	直升机重量
H	作用于直升机的动量矩
H	旋翼后向力
h_x, h_y, h_z	动量矩三分量
I	无铰旋翼桨叶等效惯量
I_b	铰接式旋翼桨叶绕水平铰惯量
I_x, I_y, I_z	绕机体轴系的全机惯性矩
I_{xy}, I_{yz}, I_{zx}	对机体轴系的全机惯性积
J_0	悬停旋翼诱导速度修正系数
K_{P0}	旋翼型阻功率修正系数
K_{MH}	旋翼对平尾的下洗因子
K_{QH}	平尾动压损失系数
K_{QV}	垂尾动压损失系数
K_{QT}	尾桨动压损失系数
K_v	垂尾对尾桨的阻塞系数
K_{\perp}	垂直增重系数
k	旋翼桨叶片数
L_F	机身升力
L_H	平尾升力

L_V	垂尾升力
l_F	机身特征长度
M	直升机合外力矩
M_b	桨叶质量矩
M_C	桨叶离心力对挥舞铰的力矩
M_F	桨叶惯性力对挥舞铰的力矩
M_g	桨叶重力对挥舞铰的力矩
M_{Gx}, M_{Gz}	桨毂力矩
M_k	旋翼反扭矩
$M_{k,T}$	尾桨反扭矩
M_T	桨叶气动力对挥舞铰的力矩
M_x, M_y, M_z	直升机外力矩在体轴系中的三分量
$M_{x,M}, M_{y,M}, M_{z,M}$	旋翼空气动力在体轴系产生的三分量力矩
$M_{x,T}, M_{y,T}, M_{z,T}$	尾桨空气动力在体轴系产生的三分量力矩
$M_{x,H}, M_{y,H}, M_{z,H}$	平尾空气动力在体轴系产生的三分量力矩
$M_{x,V}, M_{y,V}, M_{z,V}$	垂尾空气动力在体轴系产生的三分量力矩
$M_{x,F}, M_{y,F}, M_{z,F}$	机身空气动力在体轴系产生的三分量力矩
$\Delta M_{x,F}, \Delta M_{y,F}, \Delta M_{z,F}$	机身模型与真实机身重心差异引起的力矩变化
m	桨叶质量分布
m_k	旋翼反扭矩系数
$m_{k,T}$	尾桨反扭矩系数
p	旋翼桨盘载荷
q	自由来流动压
q_H	平尾处动压
R	旋翼半径
R_T	尾桨半径
r	桨叶剖面距桨毂中心的距离
S	旋翼侧向力
S_F	机身侧向力
T	旋翼拉力
T_T	尾桨拉力
u_T	桨叶剖面切向速度分量
u_P	桨叶剖面垂向速度分量
V_0	直升机质心速度
V	直升机上任意点速度
V_H	平尾速度
V_V	垂尾速度

V_x, V_y, V_z	飞行速度在体轴系中的三分量
V_{XH}, V_{YH}, V_{ZH}	平尾速度在体轴系中的三分量
V_{XM}, V_{YM}, V_{ZM}	旋翼桨毂中心速度在体轴系中的三分量
V_{XT}, V_{YT}, V_{ZT}	尾桨桨毂中心速度在体轴系中的三分量
V_{XV}, V_{YV}, V_{ZV}	垂尾速度在体轴系中的三分量
v_0	旋翼平均诱导速度
v_1	旋翼诱导速度
v_{1d}	旋翼等效诱导速度
$v_{0,T}$	尾桨平均诱导速度
x_H	平尾相对于直升机重心的纵向位置
x_M	旋翼桨毂中心相对于直升机重心的纵向位置
x_T	尾桨桨毂中心相对于直升机重心的纵向位置
x_V	垂尾相对于直升机重心的纵向位置
Δx_G	模型与真实直升机重心的纵向偏差
y_H	平尾相对于直升机重心的垂向位置
y_M	旋翼桨毂中心相对于直升机重心的垂向位置
y_T	尾桨桨毂中心相对于直升机重心的垂向位置
y_V	垂尾相对于直升机重心的垂向位置
Δy_G	模型与真实直升机重心的垂向偏差
z_H	平尾相对于直升机重心的侧向位置
z_M	旋翼桨毂中心相对于直升机重心的侧向位置
z_T	尾桨桨毂中心相对于直升机重心的侧向位置
z_V	垂尾相对于直升机重心的侧向位置
Δz_G	模型与真实直升机重心的侧向偏差
Ω	旋翼转速
α	机身迎角
α_H	平尾迎角
α_s	旋翼迎角
α_V	垂尾迎角
β	旋翼挥舞角
β_s	机身侧滑角
β_*	翼型剖面来流角
δ	旋翼轴前倾角
δ_T	尾桨轴倾斜角
δ_e	总距杆操纵位移
δ_c	驾驶杆横向操纵位移
δ_s	驾驶杆纵向操纵位移
δ_p	脚踏操纵位移

φ_7	旋翼总距
φ_H	平尾安装角
φ_T	尾桨总距
φ_V	垂尾安装角
γ	直升机侧倾角
γ_b	旋翼桨叶洛克数
γ_T	尾桨桨叶洛克数
κ	叶尖损失系数
λ_0	旋翼流入比
λ_1	旋翼合速度流入比
$\lambda_{0,T}$	尾桨流入比
$\lambda_{1,T}$	尾桨合速度流入比
λ_H	平尾展弦比
λ_i	直升机运动模态诸特征根
μ	旋翼前进比
μ_T	尾桨前进比
μ_x, μ_y, μ_z	旋翼速度对应的无量纲值
$\mu_{x,T}, \mu_{y,T}, \mu_{z,T}$	尾桨速度对应的无量纲值
θ	航迹角, 桨距角
θ_0	桨叶根部安装角
θ_1	桨叶扭度
θ_T	尾桨桨叶根部安装角
ϑ	直升机俯仰角
ρ	空气密度
σ	旋翼实度
σ_T	尾桨实度
ζ	阻尼比
τ_p	延迟时间
ω	直升机运动角速度
ω_{BW}	带宽
ω_n	自然频率
$\omega_x, \omega_y, \omega_z$	直升机角速度三分量
$\bar{\omega}_x, \bar{\omega}_y, \bar{\omega}_z$	角速度三分量无量纲值
$\omega_{x,T}, \omega_{y,T}, \omega_{z,T}$	尾桨角速度三分量
$\bar{\omega}_{x,T}, \bar{\omega}_{y,T}, \bar{\omega}_{z,T}$	尾桨角速度三分量无量纲值
ψ	直升机偏航角, 旋翼桨叶方位角

下标:

M	旋翼
T	尾桨
H	平尾
V	垂尾
F	机身
G	重力

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 直升机飞行动力学的研究内容	1
1.1.1 直升机飞行动力学的内容及其相互关系	1
1.1.2 直升机飞行操纵的特点	2
1.1.3 直升机飞行动力学的分析方法	3
1.2 坐标系及特征角度	4
1.2.1 地面坐标系	4
1.2.2 机体坐标系及姿态角	5
1.2.3 速度轴系及迎角和侧滑角	5
1.2.4 桨轴系	5
1.2.5 各坐标系之间的转换关系	5
第 2 章 直升机的飞行操纵	9
2.1 直升机上的外力	9
2.1.1 重力在体轴系中的分解	9
2.1.2 旋翼力	10
2.1.3 直升机其他部件的空气动力	10
2.2 直升机的操纵方式	11
2.2.1 单旋翼带尾桨式直升机的操纵方式	11
2.2.2 双旋翼直升机的操纵方式	12
2.2.3 倾转旋翼式飞行器的操纵方式	12
2.3 直升机的操纵机构及其力学特性	14
2.3.1 自动倾斜器	14
2.3.2 典型的操纵系统	14
2.3.3 操纵系统的力学特性	14
2.3.4 旋翼的其他操纵方式	17
2.4 直升机操纵系统的发展	18
2.4.1 简单机械式	18
2.4.2 液压助力式	18
2.4.3 电传操纵	18
2.4.4 光传操纵	19
2.4.5 侧杆操纵器	19
第 3 章 旋翼的挥舞	21
3.1 桨叶的挥舞运动方程	21
3.1.1 桨叶挥舞运动方程的建立	21

3.1.2	桨叶在挥舞面内的空气动力	23
3.1.3	桨叶挥舞运动方程的解和桨尖轨迹平面	24
3.2	挥舞运动的三个起因	25
3.2.1	吹风挥舞	25
3.2.2	操纵挥舞	26
3.2.3	随动挥舞	28
3.3	挥舞铰偏置量 e 对挥舞运动的影响	29
3.3.1	挥舞自然频率增大	30
3.3.2	挥舞阻尼减小	31
3.3.3	桨毂力矩	32
3.3.4	无铰旋翼的等效铰	34
第 4 章	直升机运动方程	37
4.1	直升机刚体运动方程	37
4.1.1	直升机质心移动的动力学方程	37
4.1.2	直升机绕质心转动的动力学方程	39
4.2	直升机的线化运动方程	41
4.2.1	简化假设	41
4.2.2	运动方程的线化	42
第 5 章	直升机的稳定飞行	47
5.1	稳定飞行的研究内容	47
5.2	直升机各部件空气动力	47
5.2.1	旋翼	47
5.2.2	尾桨	50
5.2.3	平尾	52
5.2.4	垂尾	54
5.2.5	机身	56
5.2.6	全机重力	57
5.3	平衡方程及求解	57
5.3.1	悬停	57
5.3.2	前飞	62
5.4	低速飞行的特殊性	65
5.4.1	速度范围	65
5.4.2	飞行特点	66
5.4.3	平衡计算的特殊性	66
5.5	自转飞行	66
5.5.1	概述	66
5.5.2	稳定自转	66
5.5.3	下降率	67
5.5.4	稳定自转飞行的配平	67

第 6 章 直升机的稳定性	69
6.1 稳定性概念	69
6.2 直升机的静稳定性	70
6.2.1 直升机的纵向静稳定性	70
6.2.2 直升机的航向静稳定性	72
6.2.3 直升机的横向静稳定性	72
6.3 直升机的动稳定性	73
6.3.1 模态的概念	74
6.3.2 模态特性	75
6.4 直升机的阻尼	75
6.4.1 直升机的纵向运动阻尼	75
6.4.2 直升机的航向运动阻尼	76
6.4.3 直升机的横向运动阻尼	77
6.5 直升机的气动导数	77
6.5.1 旋翼气动导数	77
6.5.2 尾桨气动导数	87
6.5.3 平尾气动导数	90
6.5.4 垂尾气动导数	92
6.5.5 机身气动导数	94
6.5.6 全机气动导数	97
6.6 直升机气动导数分析及稳定根	97
6.6.1 直升机气动导数分析	97
6.6.2 直升机稳定根	104
6.7 直升机的主要运动模态	106
6.7.1 直升机的纵向运动模态	106
6.7.2 直升机的横航向运动模态	109
第 7 章 直升机的操纵响应	111
7.1 直升机操纵性基本概念	111
7.1.1 操纵功效	111
7.1.2 操纵灵敏度	111
7.1.3 反应时差	112
7.1.4 带宽和相位滞后	112
7.1.5 快捷性	113
7.2 分析方法	113
7.2.1 操纵输入形式	114
7.2.2 操纵响应分析方法	115
7.3 直升机操纵导数	124
7.3.1 旋翼操纵导数	125
7.3.2 尾桨操纵导数	125

7.3.3	平尾操纵导数	126
7.3.4	全机操纵导数	126
7.4	直升机操纵响应	126
7.4.1	垂直上升的操纵响应	126
7.4.2	直升机对纵向周期变距的响应	127
7.4.3	直升机对横向周期变距的响应	131
7.4.4	直升机对航向(尾桨)操纵的响应	133
第 8 章	直升机的飞行品质和飞行品质规范	136
8.1	飞行品质的含义及飞行品质规范的作用	136
8.2	飞行品质评价的三维领域	138
8.2.1	任务科目基元	138
8.2.2	驾驶员的可用感示环境	140
8.2.3	直升机对操纵指令的响应类型	141
8.3	试飞员的评价——认定的飞行品质等级	146
8.4	品质参数的定量分析——预估的飞行品质等级	150
8.4.1	对操纵的姿态响应	150
8.4.2	对总距操纵的响应	152
8.4.3	轴间耦合	153
8.4.4	稳定性要求	154
第 9 章	倾转旋翼机的技术特点及飞行动力学建模	156
9.1	倾转旋翼机的技术特点	156
9.2	假设与坐标系	157
9.2.1	模型假设	157
9.2.2	坐标系及其转换	157
9.3	倾转旋翼机各部件空气动力	158
9.3.1	旋翼气动力模型	158
9.3.2	机翼气动力模型	167
9.3.3	机身及尾翼气动力模型	173
9.4	倾转旋翼机操纵混合模型	173
9.5	倾转旋翼机飞行动力学模型	178
9.6	倾转旋翼机配平	181
第 10 章	倾转旋翼机飞行模式的转换	185
10.1	概述	185
10.2	倾转旋翼机倾转过渡速度走廊	185
10.2.1	倾转过渡速度走廊的低速边界	186
10.2.2	倾转过渡速度走廊的高速边界	187
10.2.3	算例	188
10.3	倾转旋翼机直升机模式与固定翼飞机模式的转换	192
10.3.1	飞行模式转换的最优控制	193

10.3.2 最优控制的数值求解	197
10.3.3 直升机模式向飞机模式的转换	199
10.3.4 飞机模式向直升机模式的转换	203
参考文献	206
附录 A 不同坐标和符号对照表	212
附录 B 样例直升机原始参数	214
附录 C 旋翼简单导数	217
附录 D 直升机导数	223
附录 E XV-15 倾转旋翼飞行器原始参数	227
附录 F 增广 Pitt-Peters 动态入流模型系数	230
附录 G 旋翼挥舞运动方程系数	231
附录 H 右旋旋翼拉力系数、后向力系数、侧向力系数和反扭矩系数	233
致谢	234

第 1 章 绪 论

1.1 直升机飞行动力学的研究内容

1.1.1 直升机飞行动力学的内容及其相互关系

直升机飞行动力学研究直升机在飞行中的外力、运动及其控制。

直升机在飞行中所受到的外力包括空气动力、惯性力和重力。其中重力是稳态力，而空气动力和惯性力往往有宽频域的交变成分。高频空气动力会引起直升机振动。虽然振动会影响到驾驶员对飞行品质的评价，但是对于高频的力和运动，无论驾驶员还是自动驾驶仪都不能跟随并施加控制，因而在直升机飞行动力学中不予考虑。对于交变外力的研究属于直升机动力学领域中关于振动及载荷的范畴。另外，直升机在常力作用下的定常运动用性能参数来描述，如飞行速度、爬升率、升限、航程等。相关的研究属飞行性能范畴，也不在直升机飞行动力学的研究内容之中。直升机飞行动力学研究那些能改变直升机飞行轨迹和姿态的外力，以及这些外力引起的直升机运动，并且研究如何改善直升机的运动响应以满足使用任务和驾驶品质的要求。

图 1-1 示出了直升机飞行动力学的研究内容。核心是直升机的飞行动力学方程组(数学仿真模型)，它代表直升机的运动特性，取决于直升机的空气动力特性、惯性特性和几何特性。建立直升机的数学模型、确定直升机的飞行品质是直升机飞行动力学的基本内容。

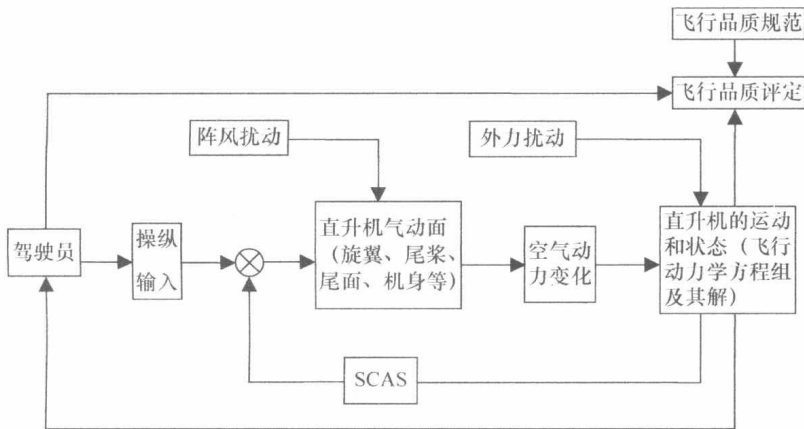


图 1-1 直升机飞行动力学的研究内容

作用在直升机上的外力变化，包括操纵输入和阵风扰动引起的空气动力变化、武器发射产生的反坐力、空投或起吊造成的重力改变等，都会使直升机产生(角)加速度，从而有(角)速度和(角)位移的变化。操纵引起的运动称为直升机的操纵响应，驾驶员希望响应是适量而及时的；其他扰动引起的运动称为扰动响应，驾驶员希望它量小而短暂。分析这两类响应的优劣属于飞行品质研究的范畴。为了改善直升机的飞行品质使之符合规范的要求，不仅