



航空装备中 常用机构与零部件 应用分析

HANGKONG ZHUANGBEIZHONG CHANGYONG JIGOU
YU LINGBUJIAN YINGYONG FENXI

陈光明 贾珂 范海蓉 彭朝勇 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

航空装备中常用机构与 零部件应用分析

陈光明 贾珂 范海蓉 彭朝勇 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了航空装备中的常用机构与零部件,包括连杆机构、齿轮、滚动轴承、滑动轴承、轴、减速器、联轴器、离合器、螺纹连接和铆接的类型、特点、选材和失效形式,并简要介绍了部分零部件的设计步骤和计算方法。

本书可以作为高等院校航空机械专业及相近专业的补充教材和参考书,也可作为一般高等院校机械专业师生的参考书,还可供从事飞行器设计和研究的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

航空装备中常用机构与零部件应用分析 / 陈光明等编著.

—北京:国防工业出版社,2011.6

ISBN 978-7-118-07674-5

I. ①航… II. ①陈… III. ①航空装备-机构②航空装备-零部件 IV. ①V241

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 173947 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 11 字数 300 字

2011 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 34.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

《航空装备中常用机构与零部件应用分析》

编 委 会

主任委员 王新洲

副主任委员 程新平

委 员 (按姓氏笔画排序)

王明新 王跃然 宋海霞 陈光明

邱求元 范海蓉 周景刚 贾 珂

彭朝勇 缪万波

前 言

航空装备是由各种不同的零部件组成的,因而,从某种意义上说,航空装备中零部件的性能、寿命和可靠性,决定了航空装备的性能、寿命及其可靠性。正因为其应用场合的特殊性,航空装备上的很多零部件与普通机械中的零部件在结构特点、性能要求等方面有着很多的不同。然而,目前国内与航空装备机械系统相关的资料很少,而传统的“机械设计基础”所研究的内容主要为普通机械中的常用机构和通用零件,与航空装备脱节明显。

为了适应任职教育的需要,我们将机械设计基础的课程内容与航空装备有机地结合起来,编写了《航空装备中常用机构与零部件应用分析》。

全书共分9章。其中第1章、第2章、第3章由陈光明编写;第4章由彭朝勇编写;第5章、第6章、第7章由贾珂编写;第8章、第9章由范海蓉编写。全书由陈光明、贾珂统稿。在编写过程中,王超、刘滔、张雪刚、蔡正乾、张艺怀、陈远志、丁广帅作了部分文字、图、表的录入工作,在此表示感谢。王建新副教授和毋伟刚工程师提供了许多宝贵的资料,在此深表感谢!

本书在编写过程中得到了王新洲教授的长期关心与鼓励,在此致以衷心的感谢!

由于作者水平和时间所限,不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2011年5月

目 录

第1章 航空装备中的连杆机构	1
1.1 连杆机构在起落装置中的应用	1
1.2 连杆机构在操纵系统中的应用	3
1.3 空间连杆机构的自由度分析	6
第2章 航空齿轮	9
2.1 航空齿轮的类型及精度	9
2.2 航空齿轮的材料	9
2.3 航空齿轮的结构形式	12
2.4 航空齿轮失效的基本形式	14
2.5 航空齿轮故障的动态监控和预防	22
第3章 航空滚动轴承	23
3.1 航空滚动轴承的类型特点	23
3.2 航空滚动轴承的选用原则	31
3.3 航空滚动轴承的失效形式及预防措施	34
3.4 航空轴承的动态监测和铁谱分析技术	43
3.5 航空轴承的材料	44
3.6 航空滚动轴承的润滑	46
第4章 航空滑动轴承	49
4.1 滑动轴承和滚动轴承的对比和选择	49
4.2 航空滑动轴承的工作特点	53
4.3 航空滑动轴承的结构、应用及参数选择	54
4.4 航空滑动轴承的材料	58
第5章 航空装备中的轴	62
5.1 概述	62
5.2 轴的结构设计	63
5.3 轴的材料	69

5.4	轴的载荷状态及失效形式	71
5.5	发动机主轴受载特点及其静强度计算举例	80
5.6	轴的振动	83
第6章	航空减速器	85
6.1	航空减速器的类型及特点	85
6.2	航空发动机减速器结构形式	88
6.3	航空发动机减速器设计步骤	103
6.4	直升机主减速器传动比的计算	106
第7章	航空联轴器及离合器	111
7.1	航空联轴器	111
7.2	航空离合器	116
第8章	航空螺纹连接	122
8.1	航空螺纹的连接形式	122
8.2	常用的航空连接螺纹	123
8.3	航空螺纹连接的预紧与防松	125
8.4	航空螺栓连接强度计算	141
8.5	螺栓组的设计	144
8.6	新型螺栓连接件简介	147
第9章	航空铆接	151
9.1	概述	151
9.2	铆接种类及其特点	151
9.3	铆缝的形式和铆钉的排列	152
9.4	铆接强度计算	154
9.5	提高铆接结构疲劳寿命的一些措施	160
9.6	新型铆钉简介	162
参考文献		168

第 1 章 航空装备中的连杆机构

连杆机构是将若干个构件用低副(转动副或移动副)连接起来的机构,因机构中具有一个不与机架直接相连的构件——连杆而得名。连杆机构广泛应用于航空装备的起落装置和操纵系统中。

1.1 连杆机构在起落装置中的应用

1.1.1 飞机起落架装置

飞机起落架装置如图 1-1 所示,图 1-1(a)为起落架收起状态,图 1-1(b)为放下起落架的中间状态,图 1-1(c)为起落架完全放下时的状态。飞机起落架装置是典型的双摇杆机构。当机轮放下后,连杆和摇杆共线。即使机轮上受到很大的作用力,但因为此时机构处于死点位置,所以起落架不会反转,从而使飞机降落更加可靠。

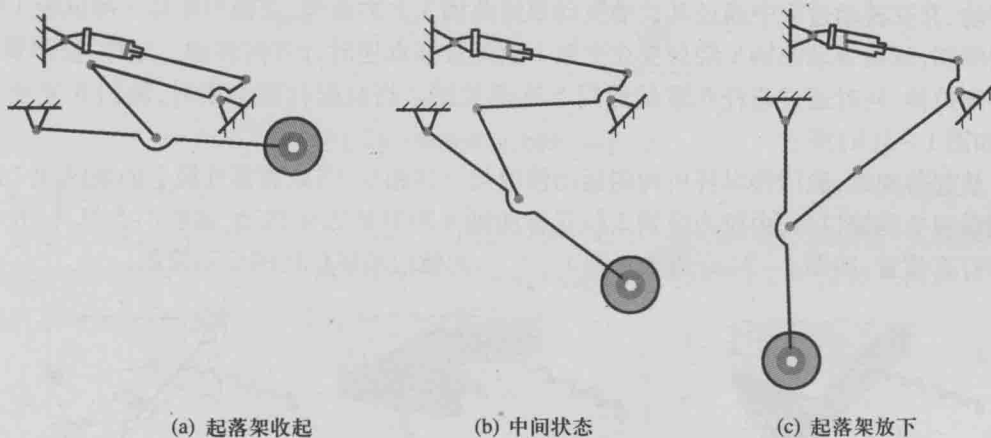


图 1-1 飞机起落架装置

1.1.2 直-9 主起落架装置

直-9 主起落架装置如图 1-2 所示,是典型摇块机构。图 1-2(a)为起落架完全放下时的状态,图 1-2(b)为收起起落架的中间状态,图 1-2(c)为起落架完全收起时的状态。

当起落架收起时,收放动作筒 1 收缩,带动活塞杆 2 向右移动,从而带动减震器 3 和机轮 4 收起,如图 1-2(b)、(c)所示;起落架放下时,正好与收起时相反。其运动简图如图 1-2(d)所示。



图 1-2 直-9 主起落架装置

1—收放动作筒；2—活塞杆；3—减震器；4—机轮。

1.1.3 直-9 主起落架舱门操纵机构

直-9 直升机的两个主起落架收起后均由舱门封严，舱门操纵机构由下舱门、上舱门和上舱门操纵机构等组成。下舱门的打开与关闭，由与收放动作筒机构连成一体的连杆直接控制。

上舱门的打开与关闭，由操纵机构操纵来实现。操纵机构主要由支架、拉力弹簧、操纵板、双臂曲柄、操纵轴和连杆组成，如图 1-3(a) 所示。

收起起落架时，收放动作筒机构带动主减震器向后上方运动。当安装在减震器外筒后侧的操纵轴 7 顶到操纵板 3 上的缺口继续上移时，操纵板 3 绕自身的铰接点顺时针方向转动，并在转动过程中通过其长槽拨动双臂曲柄 3 上的轴销，使轴销相对于操纵板 3 作径向滑移，从而带动曲柄 8 绕自身在支架 1 上的铰接点逆时针方向转动。这样，使弹簧 2 被逐渐拉伸，同时通过连杆 6 带动舱门 5 逐渐关闭。当收起行程结束时，舱门 5 完全关闭，如图 1-3(b) 所示。

放下起落架时，舱门操纵杆机构的运动情况与上述相反，当减震器外筒上的操纵轴 7 离开操纵板 3 的缺口后，由拉力弹簧 2 拉双臂曲柄 8 顺时针方向转动，使舱门 5 打开，并保持在打开位置，如图 1-3(a) 所示。图 1-3(c) 为舱门操纵机构的运动简图。



图 1-3 直-9 主起落架舱门操纵机构示意图

1—支架；2—拉力弹簧；3—操纵板；4—舱门铰接销；5—上舱门；
6—连杆；7—操纵轴（装在主起落架减震器上）；8—曲柄。

1.2 连杆机构在操纵系统中的应用

1.2.1 平行四边形机构的应用

平行四边形机构的对边长度相等,各边之间铰接,其特点是在运动中对边始终彼此平行,同一构件上的各点运动位移、速度相等。平行四边形机构常用于以下机构中。

1. 脚蹬机构

图 1-4 为脚蹬平放式脚操纵机构,其中脚蹬安装在由两根横杆和两根脚蹬杆组成的平行四边形机构上。驾驶员蹬脚蹬时,两根横杆分别绕转轴 O 和 O' 转动(转轴固定在座舱底板上),经钢索(或传动杆)蹬的传动,使操纵执行件(桨叶、方向舵)偏转。

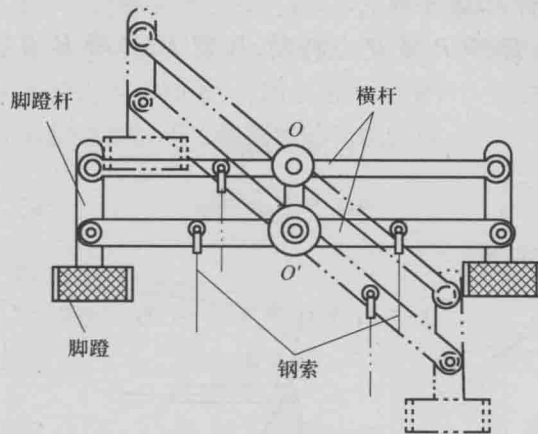


图 1-4 脚蹬平放式脚操纵机构

2. 差动叠加机构

差动叠加机构用于控制两个对称位置的操纵面,同时完成同向或差动偏转,实现两个互相垂直轴的姿态控制。差动叠加机构采用平行四边形机构,利用 T 形摇臂上的各点运动相同实现操纵面的同向控制,如图 1-5 所示。

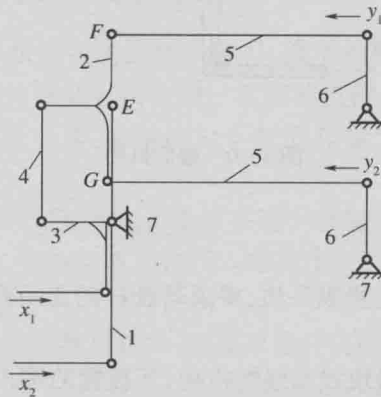


图 1-5 差动叠加机构

1—扁担摇臂; 2—T 形摇臂; 3—三角摇臂; 4, 5—拉杆; 6—摇臂; 7—支座。

当 x_2 有位移输入时,产生同向输出,即

$$y_1 = y_2 = y_E = -n_2 x_2 \quad (1-1)$$

式中, n_2 表示同向传动比。

当 x_1 有位移输入时,产生差动输出,即

$$-y_1 = y_2 = n_1 x_1 \quad (1-2)$$

3. 叠加机构

平行四边形叠加机构可用于两个大位移输入的叠加,能保证较小的非线性和两个控制的独立性。

由图 1-6 可见, $MNOH$ 是一个平行四边形。

当 x_1 有输入时,摇臂 MHK 平移 $y_1 = x_1$;

当 x_2 有输入时,摇臂 NOP 绕 O 点转动,摇臂 MKH 绕 H 点转动,两摇臂转角相同,即

$$y_2 = -n_{KP} x_2$$

$$n_{KP} = R_{KH}/R_{PO} \quad (1-3)$$

当 x_1, x_2 都有输入时,有

$$y = y_1 + y_2 = x_1 - n_{KP} x_2 \quad (1-4)$$

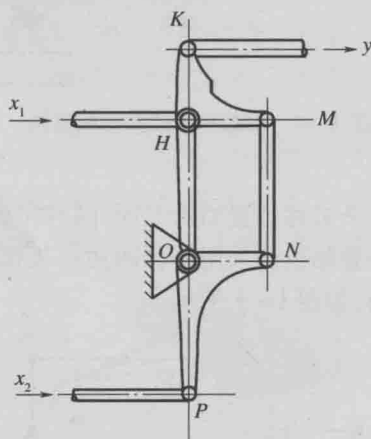


图 1-6 叠加机构

1.2.2 非线性机构

非线性机构用于为了改善操纵品质,要求驾驶杆的正负行程与操纵执行件之间不成比例的场合。

图 1-7(a) 所示为一种滑块式非线性机构,其摇臂的输入角与输出角曲线如图 1-7(b) 所示。选择合适的参数既可实现非线性操纵,又可实现差动操纵,是一种不对称的非线性机构。

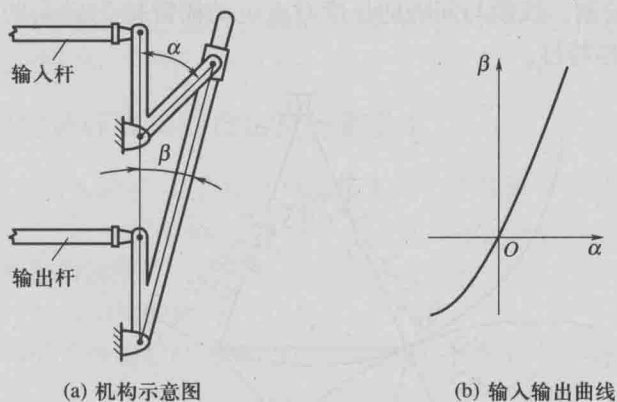


图 1-7 滑块式非线性机构

图 1-8 所示为一种三角摇臂的非线性机构,在小位移输入时,由于摇臂 1 和三角摇臂的作用使输入的运动被减小后输入,此时传动系数较小。当输入加大到一定程度时,摇臂 1 和三角摇臂又加大了输出的运动量,传动系数由小变大。这种非线性机构可不对称输出,也可对称输出,而对称性取决于三角摇臂的初始位置。

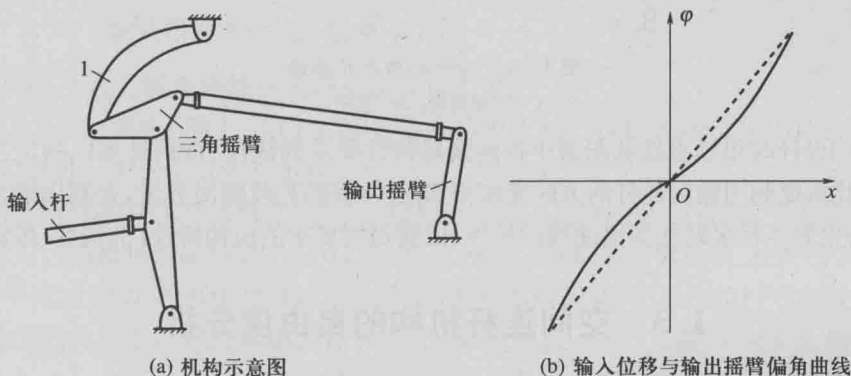


图 1-8 带三角摇臂的非线性机构

1.2.3 平面四杆机构及其图谱的应用

如图 1-9 所示,当四杆机构主动摇臂 1 绕 O_1 点等速转动时,连杆 2 上的任一点 M 的轨迹是一条各点速度都不相等的封闭曲线。不同的机构尺寸和不同的 M 点位置所得的曲线各异。若按机构的尺寸分族,按每批 n 个 M 点位置分组,所得的每批曲线加以分类即为图谱。

图谱法是机构设计的一种重要方法。操纵系统中普遍采用非线性机构,其中,以六杆非线性机构用得最多,因为它构造简单、间隙小、摩擦小、工艺简单、维修方便。利用图谱进行设计是一种简捷的方法。

六杆非线性机构的基础是双摇杆机构,构成双摇杆机构的构件尺寸条件是

$$|L + A - C| < B < |L + C - A| \quad (1-5)$$

非线性传动规律选用的图形为该族曲线中具有尖点的一种,取尖点附近的一段。选用的双摇杆机构及 M 点轨迹如图 1-9 所示。图中主动摇臂以每 3° 间隔转动, M 点轨迹

用不同间隔的线段绘制。线段与间隔的长度对应主动摇臂每 3° 转角的位移,由此表示出了 M 点运动的非线性特性。

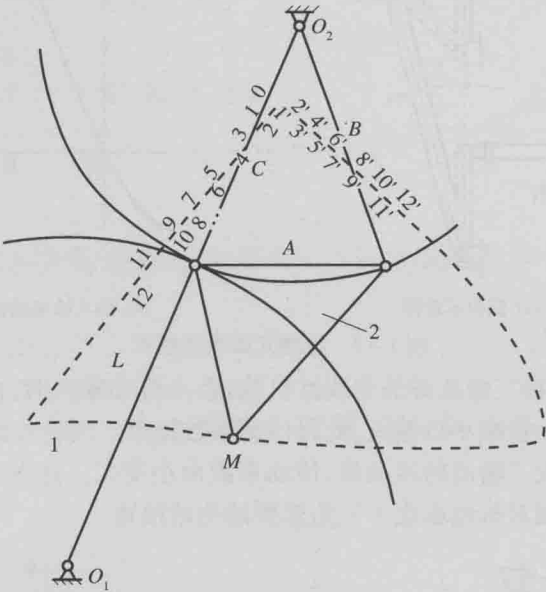


图 1-9 四杆机构及其图谱
1—主动摇臂; 2—连杆。

在机构设计时很难直接从图谱中找到满足特性要求的线段,特别是难以满足左右对称要求。因此需要利用输出连杆的方向来取得 M 点位移的有效输出分量,并利用输出摇臂的位置、初始角和半径来转化图谱曲线的特性,以获得所要求的机构特性(非线性、传动比等)。

1.3 空间连杆机构的自由度分析

直升机驾驶杆系统多为空间机构,如图 1-10 所示。

操纵系统是由许多构件组成的一个复杂的机构,为了满足飞行员操纵直升机的要求,这个机构只允许有一个自由度,也就是说确定操纵系统的运动,只能有一个独立运动——

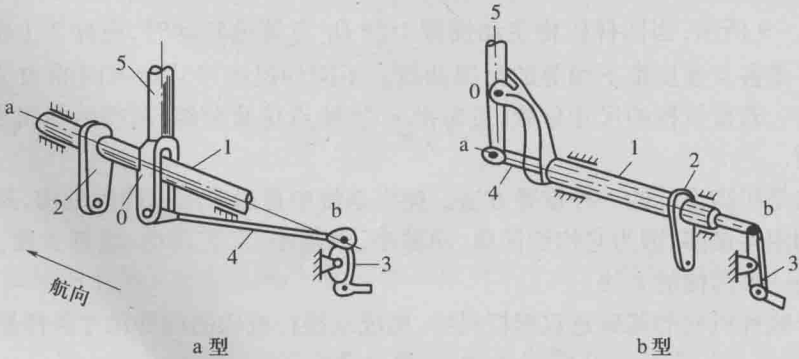


图 1-10 直升机操纵机构

1—转轴; 2—横向摇臂; 3—纵向摇臂; 4—纵向拉杆; 5—驾驶杆。

驾驶杆的运动。当驾驶杆的位置一经确定,其余构件必须按预订规律运动,这样才能实现飞行员对直升机的操纵。

1.3.1 空间连杆机构的自由度计算公式

对于作空间运动的机构,其自由度可以用下列公式计算:

$$F = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1 \quad (1-6)$$

式中 F ——机构的自由度;

n ——机构的活动构件数;

p_5 ——机构的5级副数(5级副有5个约束,1个自由度,一般的转动连接就是5级副);

p_4 ——机构的4级副数;

p_3 ——机构的3级副数(3级副有3个约束,3个自由度,球铰或球面滚珠轴承就是3级副,它可绕三个轴线转动);

p_2 ——机构的2级副数;

p_1 ——机构的1级副数。

1.3.2 操纵系统运动自由度分析

以Y-2直升机总距操纵为例分析其自由度。

Y-2总距操纵(图1-11)实际上是由若干空间四连杆机构和平面四连杆机构组成的,可以将其分为两部分进行分析:

(1) 从驾驶杆①到摇臂⑦(图1-12)这一部分是空间运动机构,它的摇臂都不在一个平面内。当操纵总距杆时,拉杆②要在XY平面和XZ平面内运动,拉杆④要在XZ平面和YZ平面内运动,拉杆⑥要在XY平面和YZ平面内运动,所以在拉杆和摇臂的接点都采用了球面滚珠轴承。它的活动构件 $n=7$,5级副数 $p_5=4$,3级副数 $p_3=3$,则自由度 $F=6n-5p_5-4p_4-3p_3-2p_2-p_1=6 \times 7-5 \times 4-3 \times 3=4$,这里多出来了三个自由度,它们是拉杆②④⑥绕各自轴线的转动所需的自由度,所以机构只有一个自由度。

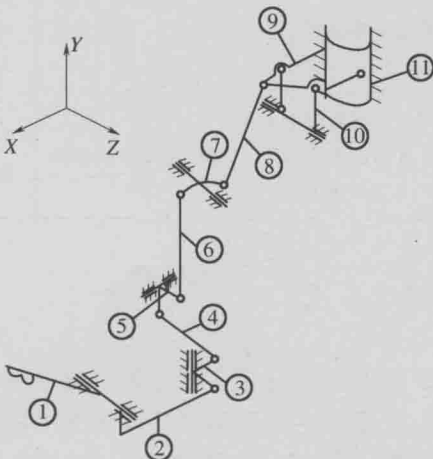


图1-11 Y-2直升机总距操纵系统

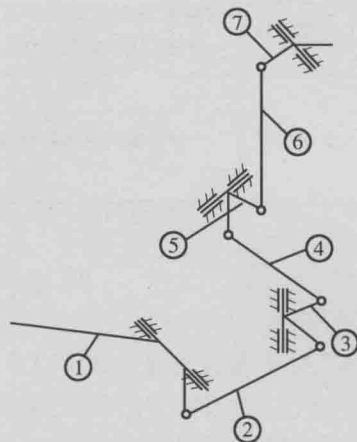


图1-12 Y-2直升机驾驶杆至摇臂传动路线

(2) 从摇臂⑦到总距滑筒⑪(图 1-13)这部分是平面运动机构。它的活动构件数 $n=5$, $p_L=7$, 则自由度 $F=3n-2p_L-p_H=3\times 5-2\times 7=1$, 自由度符合要求。但在具体构造设计时, 在拉杆⑧的两端也采用了球面滚珠轴承, 这主要是为了安装方便, 当摇臂⑦安装有偏差时, 拉杆⑧两端的球铰可以起补偿作用。

自由度符合要求了, 是不是操纵系统就一定满足飞行员操纵直升机的要求呢? 还必须检查操纵运动的方向是否正确。还以图 1-11 的 Y-2 总距操纵为例, 当提总距杆时, 总距滑筒向上运动, 即使桨叶安装角增大, 这样就符合飞行员的操纵要求。如果我们把摇臂③布置成图 1-14 所示形式, 那么当提总距杆时, 总距滑筒向下运动, 使桨叶安装角减小, 这是不允许的。所以在绘制操纵系统运动简图时, 不仅要检查自由度, 还要检查有无“反操纵”现象。所谓“反操纵”就是运动的方向与驾驶员操纵感觉相反, 这在绘制操纵系统运动简图时必须检查并加以纠正。

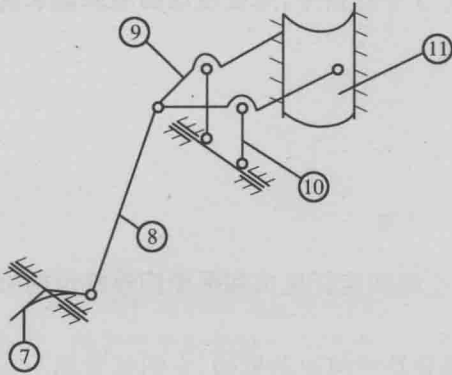


图 1-13 Y-2 直升机摇臂至总距滑筒传动路线

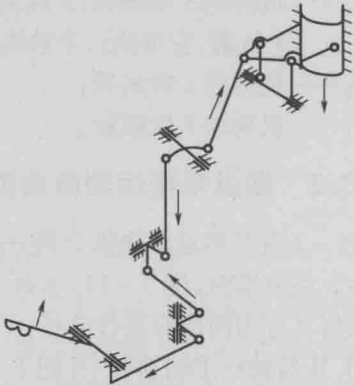


图 1-14 不同形式摇臂的传动

第2章 航空齿轮

2.1 航空齿轮的类型及精度

航空齿轮按其用途可分为四种类型：

- (1) 直升机主减速器和中间减速器主传动链齿轮传动；
- (2) 发动机减速器的齿轮传动；
- (3) 发动机、飞机和直升机附件传动；
- (4) 其他齿轮传动,包括传递运动的齿轮传动。

在前三类中,部分齿轮传动为高应力齿轮传动,其中的一部分又属于高速齿轮传动。

航空齿轮要在苛刻的工作条件下承受高载荷,并具备高的可靠性。同时,为了追求尽可能小的外形尺寸和轻的重量,齿轮的结构也需要精心设计。因此,航空齿轮具有尺寸小、重量轻、精度高、形状复杂等特点。

航空齿轮精度等级的选择取决于对其使用性能的要求,表2-1给出了常用精度等级航空齿轮的加工方法和应用范围。

表2-1 常用精度等级航空齿轮的加工方法及应用范围

精度等级	5级 (精密级)	6级 (高精度级)	7级 (比较高的精度级)	8级 (中等精度级)
加工方法	在周期性误差非常小的精密齿轮机床上范成加工或仿形加工	在高精度的齿轮机床上范成或仿形加工	在高精度的齿轮机床上范成或仿形加工	范成或仿形加工
齿面最终加工	精密磨齿	精密磨齿或剃齿	非渗碳齿轮推荐用高精度刀具滚、插或剃齿,渗碳淬火齿轮需磨或珩齿、研磨	不磨齿,必要时剃齿或研磨
应用范围	减速器动力传动齿轮	减速器动力传动齿轮,转速较高的重要附件传动齿轮	重要的附件传动齿轮	附件传动齿轮

2.2 航空齿轮的材料

由于航空齿轮的工作条件苛刻,可靠性要求高,所以对其材料的要求十分严格。航空齿轮材料要求具有高强度,良好的韧性、耐磨性、淬透性,以及优良的综合力学性能。为了满足对齿轮钢的性能要求,必须保证钢材的冶金质量和正确选择齿轮毛坯模锻件的预先热处理规范。

钢材的冶金质量对材料的力学性能,尤其是对疲劳性能有着重要的影响;而且还影响冷热加工性能。对航空齿轮钢冶金质量最重要的要求是保证钢材的金属纯净度和晶粒结构,偏析、非金属夹杂物超过允许值,以及夹杂物的形状不合适都会引起应力集中,成为产生淬火和疲劳裂纹的因素。为了保证钢材达到所要求的质量,对重要件的齿轮钢建议采用电渣重熔和真空熔炼的方法来冶炼钢材。

航空齿轮的常用材料是合金钢,均符合 GB 3077—1999 合金结构钢技术条件。常用的齿轮材料有:

1. 12CrNi3A,12Cr2Ni4A 渗碳合金钢

这两种钢具有较高的强度和韧性,12CrNi3A 钢用于附件传动齿轮,12Cr2Ni4A 钢可用于有表面耐磨、中心高强度、高韧性、承受剧烈交变载荷要求的零件,特别是截面较大、组织要求均匀一致的零件,如传动齿轮、离合器外套圈和轴等。

这两种钢的缺点是对回火脆性敏感,锻造时对白点敏感,钢凝固时较易出现枝晶偏析,引起结构不均匀,轧制或锻造时产生带状组织。

2. 18Cr2Ni4WA 渗碳合金钢

18Cr2Ni4WA 中的钨能显著提高镍钢的强度,并保持其塑性和韧性,减小钢的回火脆性。其强度优于 12Cr2Ni4A,且淬透性很好,φ200mm 以下制品在空气中即可淬透。该钢也可作调质钢使用,用于制造重要齿轮、轴、螺栓等。

3. 38CrMoAlA 渗氮合金钢

38CrMoAlA 中的铬、钼、铝均可形成稳定的氮化物。铬可提高钢的硬度和淬透性;钼可消除氮化回火脆性;提高淬透性;铝可提高氮化层硬度。该钢在航空发动机中广泛用于渗氮件,特别是在较高温度下工作的受磨损和承载大的零件,如减速器固定齿圈等。

上述材料的力学性能数据见表 2-2。

表 2-2 材料技术标准规定的几种常用齿轮钢的力学性能

齿轮钢	品种	规格/mm	热处理制度	取样 方向	σ_b	$\sigma_{0.2}$	σ_s	ψ	$\alpha_{KU}/$ (KJ/m ²)	HB
					MPa		%			
					不小于					
12Cr2Ni4A	棒材	$d\leq 200$	回火或退火	L						163 ~ 255
			780℃ ~ 810℃, 油 冷 + 150℃ ~ 170℃, 空冷	L	1030	785	12	55	980	293 ~ 388
18Cr2Ni4WA	棒材	$d\leq 200$	高温回火或正火 + 回火	L						269 ~ 197
			950℃, 空 冷 + 850℃ ~ 860℃, 空 冷 + 150℃ ~ 170℃, 空冷	L	1130	835	11	45	980	341 ~ 401
38CrMoAlA	棒材	$d\leq 300$	930℃ ~ 950℃, 油 冷 + 600℃ ~ 670℃, 油冷	L	930	785	15	50	980	285 ~ 320
					980	835	15	50	880	302 ~ 341

在直-9 机国产化研制过程中,国内根据 SA365N“海豚”所采用的法国、意大利材料系列,研制了一批新材料。这些材料都已按国外相应标准建立了标准,通过了材料鉴定和应用鉴定,达到了标准的要求和国外材料实物的冶金质量水平。这些材料的性能优于国