



### 3.1 操纵系统基础

飞机飞行操纵系统是飞机上的主要系统之一,它的工作性能好坏,直接影响着飞机飞行的性能,对于民航飞机来说,更在很大程度上影响飞机的安全性和乘坐品质。

#### 3.1.1 操纵系统的定义及分类

##### 1. 飞行操纵系统的定义

飞机飞行操纵系统是飞机上所有用来传递操纵指令、驱动舵面运动的所有部件和装置的总和,用于对飞机飞行姿态、气动外形、乘坐品质的控制。驾驶员通过操纵飞机的各舵面和调整片实现飞机绕纵轴、横轴和立轴旋转(如图 3.1-1 所示),以完成对飞机的飞行姿态和飞行轨迹的控制。

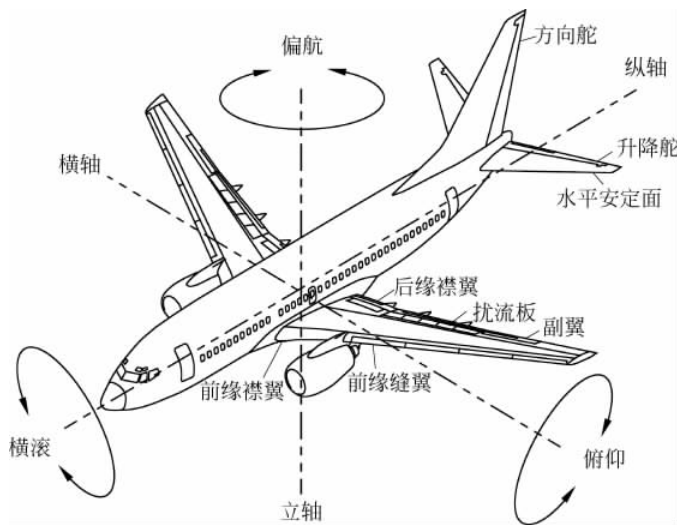


图 3.1-1 飞机绕三个轴的运动

##### 2. 飞行操纵系统的分类

飞行操纵系统分类的方法较多,一般按照操纵信号来源、信号传递方式和驱动舵面运动

的方式三种方法分类。

#### 1) 根据信号来源

根据操纵信号的来源,现今飞机飞行操纵系统可以分为两大类:人工飞行操纵系统和自动飞行控制系统。人工飞行操纵系统,其操纵信号是由驾驶员发出的,而自动飞行控制系统,其操纵信号是由系统本身产生的。自动飞行控制系统是对飞机实施自动和半自动控制,协助驾驶员工作或自动控制飞机,如自动驾驶仪。

#### 2) 根据信号传递方式

根据操纵信号传递的方式,操纵系统可以分为机械操纵系统和电传操纵系统。机械操纵系统的操纵信号由钢索、传动杆的机械部件传动,而电传操纵系统(fly by wire, FBW)的操纵信号通过电缆传动。目前正在研究的传动方式为光传操纵系统,操纵信号为在光缆中的光信号。

#### 3) 根据驱动舵面方式

根据驱动舵面的方式,操纵系统可分为简单机械操纵系统和助力操纵系统。简单机械操纵系统依靠驾驶员体力克服铰链力矩驱动舵面运动,又被称为简单机械操纵系统。简单机械操纵系统分为软式操纵系统和硬式操纵系统。简单机械操纵系统构造比较简单,主要由驾驶杆、脚蹬、钢索、滑轮、传动杆、摇臂等组成。

随着飞机尺寸和重量的增加,飞行速度的不断提高,即使使用了气动补偿,驾驶杆力仍不足以克服铰链力矩,20世纪40年代末出现了液压助力器,实现了助力操纵。目前飞机舵面的驱动装置除了常用的液压助力器外,还有电动驱动装置。

另外,根据舵面类型不同,操纵系统还可分成主操纵系统和辅助操纵系统。主操纵系统包括副翼操纵、升降舵操纵和方向舵操纵;辅助操纵系统包括增升装置、扰流板操纵和水平安定面配平操纵。

### 3. 操纵系统的发展

随着科学技术的发展,高精尖技术首先在飞机上获得了应用,在此期间,操纵系统也发生了一系列变化。

#### 1) 经典:机械操纵阶段

早期飞机操纵系统为简单机械操纵系统。随着飞机尺寸和重量的增加,飞行速度的不断提高,飞机的操纵越来越费力,即使采用了气动补偿,驾驶杆力仍不足以克服铰链力矩。在20世纪30年代首先在重型飞机的副翼操纵系统里采用了有回力的液压助力器。50年代初,又采用了无回力的液压助力器,实现了助力操纵。

#### 2) 主流:电传操纵阶段

由于在复杂的机械系统中存在着摩擦、间隙和弹性变形,始终难以解决精微操纵信号的传递问题。20世纪70年代初,成功地实现了电传操纵技术,它取代不可逆助力操纵系统而成为主操纵系统。电传操纵系统是在控制增稳系统基础上发展的必然产物,微电子技术和计算机科学的发展,可靠性理论和余度技术的建立为电传操纵系统奠定了基础,余度系统赋予它较高的安全可靠。多余度电传操纵系统在现代民航飞机中已获得大范围的应用,例如A320、A330、A380、A350、B777、B787等民航客机,采用了电传飞行操纵系统。

#### 3) 未来:光传操纵阶段

考虑到电传操纵存在着单通道可靠性较低、易受雷击和电磁脉冲干扰等问题,另外一种

更为先进的操纵系统已在 20 世纪 70 年代进入研制,这就是光传操纵(fly by light,FBL)系统。光传操纵系统以光代替电作为传输载体,以光导纤维作为物理传输媒质,是在计算机之间或计算机与远距离终端(如舵机等)之间传递指令和反馈信息的飞行控制系统。传递操纵指令的主要元件是光导纤维,它具有抗射频、核爆炸、电磁及噪声能力强,故障隔离性能好,传输数字信号速率高,频带宽、功率小和重量轻等优点,因此光传操纵系统是未来飞机飞行操纵系统发展的必然趋势。

### 3.1.2 中央操纵机构

飞机主操纵系统是由中央操纵机构和传动系统两大部分组成。由驾驶员手脚直接操纵的部分,叫作中央操纵机构。中央操纵机构由手操纵机构和脚操纵机构所组成。

#### 1. 手操纵机构

##### 1) 机械手操纵机构

手操纵机构分为驾驶杆式手操纵机构和驾驶盘式手操纵结构。图 3.1-2(a)表示一种驾驶杆式手操纵机构。前推或后拉驾驶杆时,驾驶杆绕着轴线  $a-a$  转动,经传动杆 1 和摇臂 1 等构件的传动,可操纵升降舵;左右压杆时,驾驶杆绕轴线  $b-b$  转动,这时扭力管和摇臂 2 都随之转动,经传动杆 2 等构件的传动,即可操纵副翼。

驾驶杆式手操纵机构虽然要操纵两个舵面——升降舵和副翼,但两者不会互相干扰。也就是说,单独操纵某一舵面时,另一舵面既不随之偏转,也不妨碍被操纵舵面的动作。

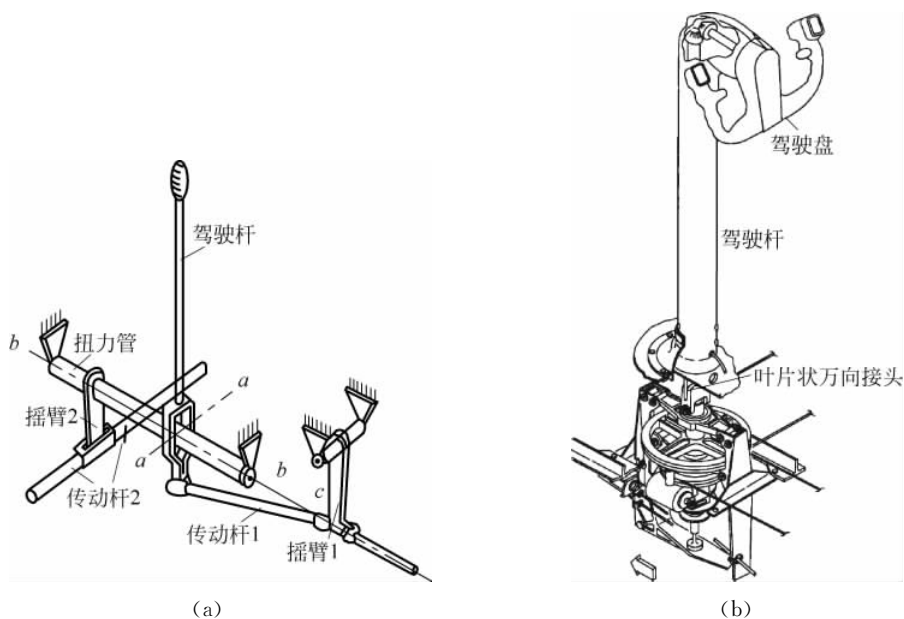


图 3.1-2 机械手操纵机构

(a) 驾驶杆; (b) 驾驶盘

图 3.1-2(b)表示一种驾驶盘式手操纵机构。驾驶盘在操纵时,通过内部的齿轮传动装置带动驾驶杆内的一根扭力管转动,扭力管通过一个万向接头带动副翼操纵钢索轮,提供操纵副翼的信号,前推或后拉驾驶盘时,可操纵升降舵。

上述两种手操纵机构相比,驾驶杆构造较简单,便于飞行员一手操纵驾驶杆,一手操纵油门手柄,但是它不便于用增大驾驶杆倾斜角度的办法来减小操纵副翼时的杆力;驾驶盘式构造较复杂,但可通过增大驾驶盘的转角,使操纵副翼省力,当然,这时使副翼偏转一定角度所需的时间要相应增长。

因此,前者多用于机动性较好而操纵时费力较小(或装有助力器)的飞机,后者多用于操纵时费力较大而机动性要求较低的中型和大型飞机。

## 2) 电传手操纵机构

(1) 侧杆式电传操纵机构。空客系列飞机的电传操纵系统采用“侧杆”操纵机构。所谓“侧杆”是“侧杆操纵器”的简称,是一种输入为力信号,输出为电信号的小型侧置手操纵机构,如图 3.1-3 所示。

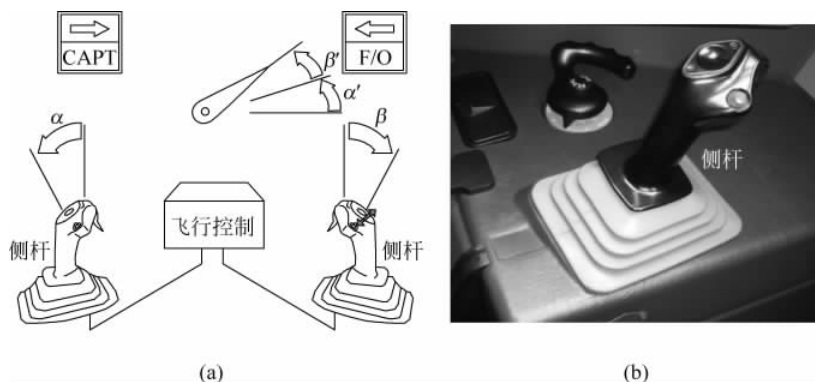


图 3.1-3 侧杆式电传手操纵机构  
(a) 侧杆操纵器原理; (b) 某型飞机侧杆操纵器特写

这种手操纵机构代替了传统的驾驶杆(或驾驶盘)。它前后、左右摆动发出互不干扰的电信号,通过电传操纵系统使飞机产生纵向和横向运动。其具体结构、力特性与驾驶员的生理特点、操纵感觉、飞机操纵性能有关。

由于侧杆操纵器重量轻,空间尺寸小,改善了驾驶员观察仪表的工作条件,克服了重力加速度给驾驶员带来的不必要困难,在操纵时,侧杆的输入杆力与舵面偏转角一一对应,机长和副驾驶的操纵信号在舵面上产生叠加效果。

侧杆操纵机构之间没有机械连接装置,当机长(或副驾驶)操纵飞机时,另一侧的侧杆不会发生联动。另外,当自动驾驶仪操纵飞机舵面运动时,侧杆不会随动,驾驶员无法根据侧杆的状态判断飞机控制情况。

## (2) 驾驶盘式电传操纵机构

波音公司在 B777 飞机上开始采用电传操纵系统,其手操纵机构仍然采用传统的驾驶盘结构,如图 3.1-4 所示。驾驶员操纵驾驶盘时,力传感器将操纵信号变为操控电信号。由于两个驾驶盘之间存在机械连接,当机长(或副驾驶)操纵飞机时,另一侧的驾驶盘会同步随动,便于掌控飞机操纵动态,有利于培训和带飞。当自动驾驶仪衔接后,自动驾驶的操纵信号可通过反向驱动作动器操纵驾驶盘,驾驶员可根据驾驶盘的动态监控自动驾驶情况。

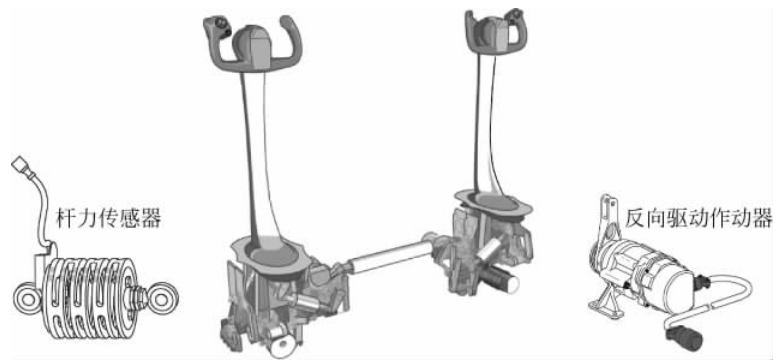


图 3.1-4 驾驶盘式电传操纵机构

## 2. 脚操纵机构

脚操纵机构有脚蹬平放式和脚蹬立放式两种。

图 3.1-5 表示一种脚蹬平放式脚操纵机构。图中的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。飞行员蹬脚蹬时,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)等的传动,使方向舵偏转。

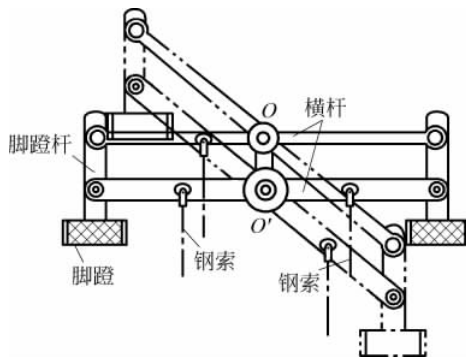


图 3.1-5 脚蹬平放式脚操纵机构

平行四边形机构的作用是保证在操纵方向舵时,脚蹬只作平移而不转动(如图中双点画线所示),以便于飞行员操纵。

图 3.1-6 为现代民航机采用的立放式脚蹬机构。脚蹬通过立杆、传动拉杆与方向舵钢索鼓轮相连。机长脚蹬和副驾驶脚蹬通过公共连杆相连,当机长或副驾驶操作方向舵脚蹬时,另一侧可脚蹬同步随动。当机长用左脚向前蹬左脚蹬时,左脚蹬向前,立杆 1 带动传动杆 1 向前,从而驱动左摇臂带动鼓轮 1 顺时针转动,驱动方向舵钢索转动,与此同时传动杆 2 向后拉,带动右脚蹬向后。

上述两种操纵机构相比,脚蹬平放式脚操纵机构,为了取得较大的操纵力臂,两脚蹬之间的距离较大;脚蹬立放式脚操纵机构,是通过增长与脚蹬连接的摇臂来获得足够的操纵力臂的,两脚蹬之间的距离可以做得较小。所以,前者多与左右活动范围较大的驾驶杆式手操纵机构组合,后者则多与驾驶盘式手操纵机构组合。

现代飞机驾驶舱仪表板布局复杂,同时为保证驾驶员正常观察窗外情况,需要确保驾驶

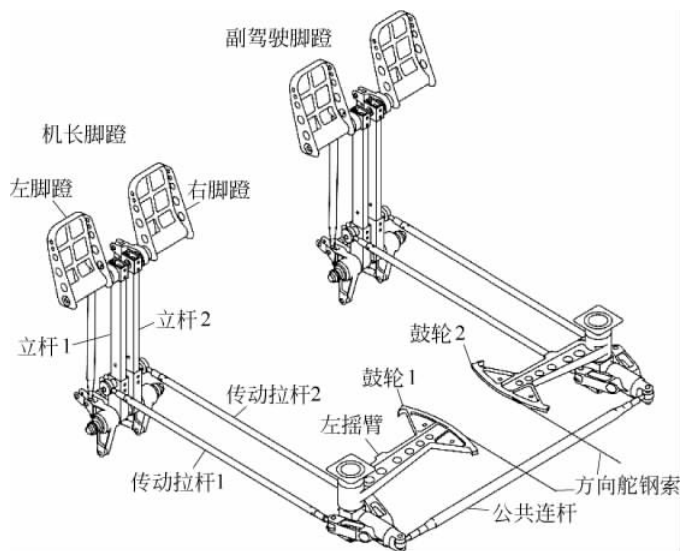


图 3.1-6 脚蹬立放式脚操纵机构

员的眼点位置固定。眼点位置固定意味着驾驶员座椅的位置相对固定,因此,为保证不同身高的驾驶员能够正常操纵飞机,脚蹬的水平位置可进行前后微调。图 3.1-7 所示为某型民航飞机的驾驶员脚蹬位置调节机构。当驾驶员调整好座椅位置后,通过摇动脚蹬位置调节手轮,调节脚蹬的前后位置,直到获得最佳腿部操纵空间。

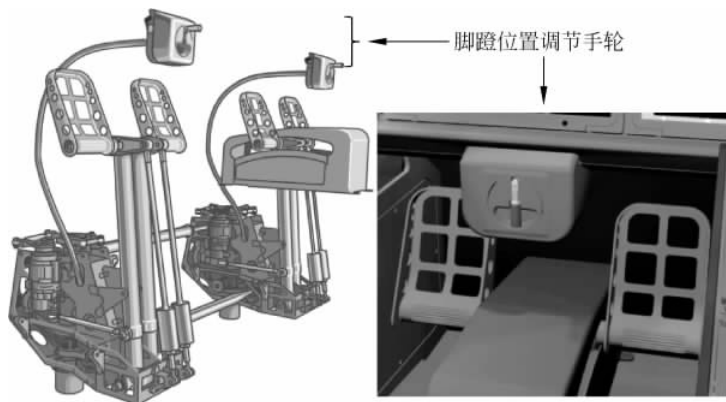


图 3.1-7 民航飞机脚蹬前后位置调节结构

除此之外,还有脚蹬的限动装置,限制脚蹬的最大活动范围,从而控制舵面的最大偏转角以符合规定,凡是可调整的限动装置应在调整好的位置上保证确实锁紧,或用保险丝保险。为了防止可能因错误调整或错误装配而使舵面的偏转角超过规定而产生危险,则在舵面附近也应有限动装置。

### 3.1.3 传动机构

传动机构的作用是将操纵机构的信号传送到舵面或助力器。在简单机械操纵系统中,传动是由一些机械机构来完成的,称为传动机构。而在助力操纵系统和电传操纵系统中,传

动是由一些机构和部件组成的,习惯上称为传动装置或传动系统。

### 1. 软式传动机构

#### 1) 钢索

钢索是由钢丝编成的,它只能承受拉力,不能承受压力。所以,在软式传动机构中,都用两根钢索构成回路,以保证舵面能在两个相反的方向偏转。

钢索承受拉力时,容易伸长。因此当飞行员操纵舵面时,舵面的偏转会落后于驾驶杆或脚蹬的动作,就像操纵系统有了问题一样。由于操纵系统的弹性变形而产生的“间隙”通常称为弹性间隙。钢索的弹性间隙太大,就会使操纵的灵敏性变差。

为了减小弹性间隙,操纵系统中的钢索在装配时都是预先拉紧的,预先拉紧的力简称“预紧力”。钢索在使用中常见的故障是断丝和腐蚀。

#### 2) 滑轮和扇形轮

滑轮通常用酚醛树脂(胶木)或硬铝制成,它用来支持钢索和改变钢索的运动方向,为了减小摩擦在支点处装有滚珠轴承,如图 3.1-8(a)所示。扇形轮也叫扇形摇臂(见图 3.1-8(b)和(c)),它除了具有滑轮的作用外,还可以改变力的大小。扇形轮多用硬铝制成,在支点处也装有滚珠轴承。

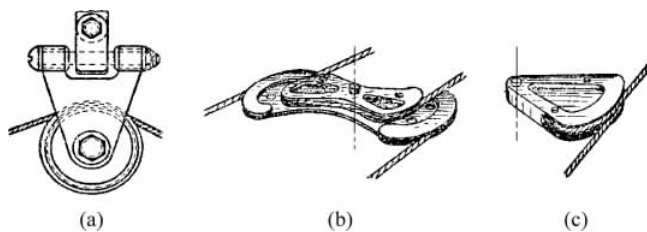


图 3.1-8 滑轮和扇形轮

(a) 滑轮; (b) 双扇形轮; (c) 单扇形轮

#### 3) 松紧螺套

松紧螺套用来调整钢索的预紧力,由两个带相反螺纹的钢索螺杆头式接头和一个两端带相反内螺纹的螺套组成,如图 3.1-9 所示。在螺套左螺纹的一端外部,刻有一道槽或滚花。转动螺套,即可使两根螺杆同时缩进或伸出,使钢索绷紧或放松。



图 3.1-9 松紧螺套

#### 4) 钢索张力补偿器

由于飞机机体上的外载荷的变化和周围气温变化的影响,飞机机体结构和飞机操纵系统之间会产生不同程度的相对变形,因而钢索可能会变松或过紧。变松将发生弹性间隙,过紧将产生附加摩擦。

钢索张力补偿器的功用正是保持钢索的正确张力,而不受上述因素的影响。某型飞机的钢索张力补偿器如图 3.1-10 所示。

滑架承受弹簧的作用可以保持钢索的正确张力。滑管顶端有一个张力指示孔,当这个指示孔刚好全部漏出时,钢索的张力是正确的,不需要张力器或其他设备测量张力。

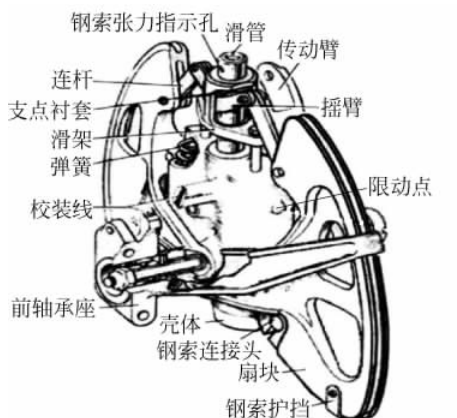


图 3.1-10 钢索引力补偿器

## 2. 硬式传动机构

### 1) 传动杆

传动杆又称为拉杆。它的特点一是不存在拉力随时变化的麻烦,二是构造简单,只靠一根管材就能传递拉力和压力。传动杆一般是细长杆,因此,当受到压力时就可能发生失稳现象,称为失去总稳定性(又称杆轴失稳)。压杆时发生失稳现象就意味着杆已损坏。

### 2) 摇臂

摇臂通常由铝合金材料制成,在与传动杆和支座的连接处都装有轴承。摇臂按臂数可分为单摇臂、双摇臂和复合摇臂三类(如图 3.1-11 所示)。

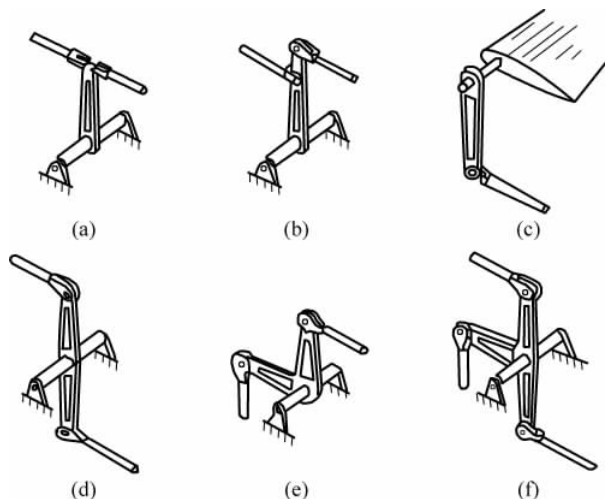


图 3.1-11 摇臂的类型

摇臂主要有以下作用:支持传动杆;放大或缩小力;放大或缩小传动杆的位移;放大或缩小传动杆的运动速度;改变传动杆运动方向;实现差动操纵。

有些飞机的副翼是差动的。所谓差动,就是当驾驶杆左右偏转同一角度时,副翼上下偏转的角度不同。这样做的目的是消除由于副翼偏转造成的两机翼助力差,消除不必要的偏

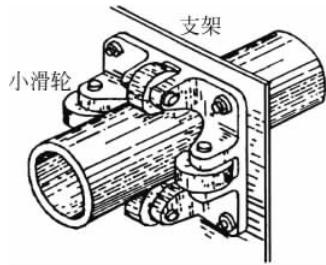


图 3.1-12 导向滑轮

航。实现差动操纵最简单的机构是差动摇臂。

### 3) 导向滑轮

导向滑轮是由三个或四个小滑轮及其支架所组成(如图 3.1-12)。它的功用是:支持传动杆,提高传动杆受压时的杆轴临界应力,使传动杆不至于过早地失去总稳定性,并且可以增大传动杆的固有频率,防止传动杆发生共振。

在传动中,传动杆要与导向滑轮摩擦,故维护中应注意检查,防止磨损。

## 3. 混合式传动机构的主要构件

现代民航飞机的操纵系统传动机构中,可能同时采用硬式传动机构元件和软式传动机构元件,构成混合式传动机构。在混合式传动机构中,可利用扭力管等形式的构件实现软、硬构件间力的传递。扭力管安装在操纵系统中需要有角运动或扭转运动的地方,如图 3.1-13 所示。

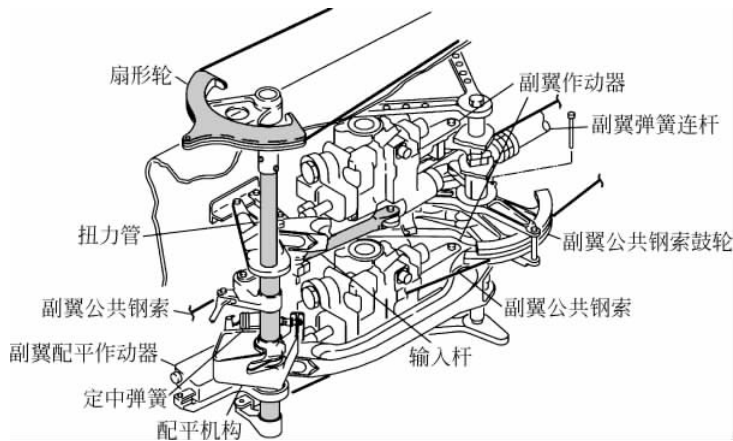


图 3.1-13 混合式传动机构

## 4. 操纵系统的传动系数

### 1) 传动系数的定义

驾驶杆(或脚蹬)移动的距离,简单称为“杆位移”,又称杆行程。它与舵面偏转角度(简称“舵偏角”)有一定的对应关系。这个对应关系是用传动系数  $K$  来表示的。

所谓传动系数  $K$  是指舵偏角  $\Delta\delta$  与杆位移  $\Delta x$  的比值(如图 3.1-14)所示,即

$$K = \frac{\Delta\delta}{\Delta x} \quad (3-1)$$

驾驶杆杆力和舵面铰链力矩之间也存在一定的关系,如果不计系统的摩擦力,驾驶杆输入的功等于克服舵面偏转的功,即

$$F \cdot \Delta x = M_j \cdot \Delta\delta \quad (3-2)$$

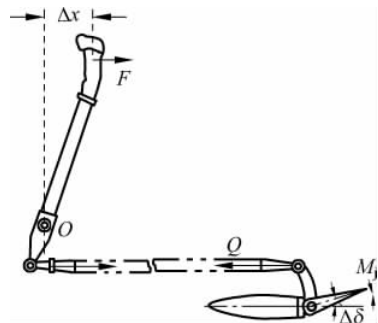


图 3.1-14 操纵系统的传动系数

由此可得传动系数的另一个表达式:

$$K = \frac{F}{M_j} \quad (3-3)$$

## 2) 传动系数的含义

根据式(3-1),传动系数表示:单位杆位移对应的舵偏角的大小。因此,操纵系统的传动系数大,飞机操纵灵敏性好;传动系数小,飞机操纵灵敏性差。

而根据式(3-3),传动系数又表示克服单位铰链力矩所需杆力的大小,即操纵系数大,操纵飞机费力;操纵系数小,操纵飞机省力。

## 3.1.4 舵面驱动装置

早期飞机操纵系统靠驾驶员的体力克服铰链力矩,即利用钢索或传动杆将驾驶员作用在驾驶杆或脚踏上的力传递到舵面的操纵摇臂,克服铰链力矩从而驱动舵面偏转。众所周知,舵面铰链力矩随着飞机舵面尺寸和飞行速度的增大而增大,当铰链力矩达到一定程度,驾驶杆(或脚踏)上的力将超过驾驶员能够承受的范围。解决舵面铰链力矩过大的有效措施是安装液压驱动装置或电动驱动装置。

### 1. 液压驱动

#### 1) 液压助力器

液压助力器是一种以液压作为工作能源的执行操纵指令的机械液压位置伺服功率放大装置,一般由液压放大器、执行元件和比较机构组成。助力器输出的机械位移,与输入指令的机械位移量成正比。

液压放大器是一种起功率放大作用的元件,下文中的控制阀(配油阀或配油柱塞)是一种典型的滑阀式液压放大器。液压执行元件实际上是一种液压作动筒,其主要作用是在液压力作用下,输出机械功。比较机构是将操纵指令和输出的反馈量进行比较,经液压放大器,控制执行元件,使执行元件的位移量满足操纵指令要求。

图 3.1-15 表示一种典型机械液压伺服助力器。它的基本组成部分为双重输入摇臂、控制阀(具有双重滑阀芯)、旁通阀和作动筒等。作动筒的活塞杆与飞机结构固定,外筒可产生输出,驱动舵面运动。

驾驶员的飞行操纵指令输送到双重摇臂的输入端(输入端具有机械挡块,防止出现过猛操作)。主输入摇臂和次输入摇臂通过扭力弹簧相连,正常操作时,两个摇臂可同步运动,驱动控制阀的主滑阀芯和次滑阀芯(相当于套在主滑阀芯外部的衬套)同步运动,当控制阀出现卡滞时,次输入摇臂将不能转动,主输入摇臂将克服扭力弹簧的力驱动主滑阀芯运动,继续操纵助力器工作。

#### 2) 载荷感觉定中机构及配平

助力操纵系统由于采用了液压助力器承担舵面载荷,因此驾驶员在操纵机构上不能感受到适当的载荷,因此要设置载荷感觉机构。图 3.1-16(a)所示为副翼操纵系统中机械载荷感觉机构,由支架、感觉弹簧、定中凸轮和一个滚轮臂构成。凸轮用螺栓连接在扭力轴上。滚轮臂连接在支架上,在弹簧作用下将滚轮压紧在凸轮的近心点上。当操作机构有输入时,传动机构驱动凸轮转动。由于凸轮为型面对称且滚轮压在凸轮的最低点,所以不论凸轮向哪个方向转动,都要推开滚轮,使滚轮臂上升,拉伸感觉弹簧。在整个操作过程中,弹簧力与