

**ВВЕДЕНИЕ  
В ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ  
АВИАЦИОННЫХ  
РУЛЕВЫХ ПРИВОДОВ**

**航空舵机系统设计引论**

奥博连斯基 Ю. Т. (Оболенский Ю. Г.)  
(俄) 叶尔马科夫 С. А. (Ермаков С. А.) 著  
苏霍鲁科夫 Р. В. (Сухоруков Р. В.)  
李志 李明华 译  
范彦明 审校

航空工业出版社

# 航空舵机系统设计引论

ВВЕДЕНИЕ В ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ  
АВИАЦИОННЫХ РУЛЕВЫХ ПРИВОДОВ

奥博连斯基 Ю. Т. (Оболенский Ю. Г.)

(俄) 叶尔马科夫 С. А. (Ермаков С. А.) 著

苏霍鲁科夫 Р. В. (Сухоруков Р. В.)

李志 李明华 译

范彦明 审校

航空工业出版社

北京

## 内 容 提 要

本书讲述了航空舵机的基础理论和计算方法,展示了这些理论和计算方法在先进机动飞机和民航客机控制上的地位和作用,并归纳总结了针对电液舵机的主要要求,研究了单通道和多通道舵机的结构布局、舵机的备份方法和原则,以及获得高可靠性舵机的方法。

本书适合航空领域专家学者、工程技术人员和高等院校学生作为参考之用。

### 图书在版编目(CIP)数据

航空舵机系统设计引论/ (俄) 奥博连斯基, 叶尔马科夫, 苏霍鲁科夫著; 李志, 李明华译. -- 北京: 航空工业出版社, 2013. 11

ISBN 978 - 7 - 5165 - 0281 - 5

I. ①航… II. ①奥… ②叶… ③苏… ④李… ⑤李… III. ①航空 - 舵机 - 系统设计 IV. ①V249

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 274568 号

北京市版权局著作权合同登记

图字: 01 - 2012 - 2624

© Оболенский Юрий Геннадьевич

© Ермаков Сергей Александрович

© Сухоруков Роман Владимирович

本作品中文专有出版权由中华版权代理中心代理取得, 由中航出版传媒有限责任公司独家出版。

## 航空舵机系统设计引论

Hangkong Duoji Xitong Sheji Yinlun

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑路 2 号院 100012)

发行部电话: 010 - 84936555 010 - 64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2013 年 11 月第 1 版

2013 年 11 月第 1 次印刷

开本: 710 × 1000 1/16

印张: 19

字数: 384 千字

印数: 1—2000

定价: 96.00 元

## 中译本序

《航空舵机系统设计引论》是由俄罗斯莫斯科航空学院奥博连斯基等教授根据他们在米高扬、苏霍伊和雅科夫列夫设计局在舵机研制方面的经验，以及在莫斯科航空学院讲授舵机系统专业的实践中编写的。于2011年出版，所以材料很新，书中除了介绍俄罗斯在这方面的经验外，还给出了国外飞机公司新型舵机的结构布局和研制方案。

航空舵机系统是控制飞机飞行的关键部件。当今无论是歼击机、轰炸机还是大型民航客机无不采用液压舵机来操纵飞机的操纵面，因此要设计好飞机必须设计好航空舵机。本书一开始就较详细地介绍了舵机在飞机上的重要性。详细介绍了飞机的飞行动力学，这在别的舵机系统书中很少见到。这样叙述有助于舵机专业的同志能很好地为飞机总体设计服务。

本书不仅讲述了舵机的构造，而且详细论述了其设计计算方法、结构选材、试验方法，以及保证可靠性的措施。

另外，本书还介绍了推力矢量的舵机和今后飞机要用的液压源和舵机综合在一起的电液静力作动器。这项技术刚开始在最大的民航客机A380及正在研发中的F-35战斗机上采用。

总之，该书作为航空专用的舵机系统设计的著作，在近年来国内或国外出版的专著中尚未见到这样理论和实际紧密结合，并有一定展望的学术著作。

此书不仅可作为高等学校的教材，可能对于从事飞机飞控系统及舵机研制的科技人员更为有用。

译者李志同志是飞机设计所的飞机设计总体专家，他在2011年获得此书后，觉得对飞机设计人员十分有用，于是主动利用业余时间，在不到一年的时间将全书译出来，以飨读者，这种热心服务航空的精神是值得学习的。

顾诵芬

# 译者序

2011年7月，俄罗斯中央空气流体动力研究院几位专家来我国进行学术交流。他们给我带来一本俄文版的新书《ВВЕДЕНИЕ В ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ АВИАЦИОННЫХ РУЛЕВЫХ ПРИВОДОВ》（《航空舵机系统设计引论》），该书是俄罗斯朋友斯拉瓦委托他们带来的，书刚出版一个星期。几位俄罗斯专家极力向我推荐此书，希望我能翻译成中文。我咨询了几位国内从事飞行控制设计的专家，他们也认为此书内容很好，因此我联系中航出版传媒有限责任公司（航空工业出版社）购买了此书版权，并于2012年底将其翻译完成。

近年来，先进机动飞机和民航客机的飞行控制正在从传统的液压舵机向多电和全电舵机发展。本书既研究了军用飞机舵机，也研究了民用飞机舵机；既分析了空客A340、A380等民用飞机操纵面舵机系统结构构造的总体布局特点，也对美国、俄罗斯现役战斗机F-15、F-16、米格-29、苏-27等所使用的舵机系统进行了详细分析。

本书虽然是作为莫斯科航空学院教材编写的，但书中内容的工程实用性很强，这也是俄罗斯航空院校教育的特点。书中第1章介绍了与飞机飞行控制相关的概念，如飞机控制舵面、舵面效率和舵机系统的概念。第2~第6章详细讲述了有关航空舵机设计的原理、动力学特性、动力学模型和流量计算方法等内容。第7和第8章分别研究了机动飞机和民航客机的舵机和液压源的结构布局。第9章介绍了速度节流调节液压舵机概念的数学模型。

本书作者奥博连斯基（1993年曾来到中国，我们一起共事了约3个月）是俄罗斯米高扬设计局的设计师，曾经担任过米高扬设计局的舵机室主任，后来来到莫斯科航空学院教书，并获得科学技术博士学位。在教学之余，奥博连斯基同另两位同事共同编写了此书，他们分别来自雅科夫列夫和苏霍伊设计局，工程经验丰富。因此，本书是俄罗斯3所著名设计局在航空舵机设计方面所积累经验的总结。

需要指出，我虽然从事飞机设计多年，同时也在莫斯科航空学院学习过，但由于专业知识和语言水平有限，书中难免还有一些翻译得不尽如人意的地方，故恳请从事航空舵机系统研究的专家、学者们不吝赐教，同时也欢迎使用此书的高等院校师生和其他读者对本书提出宝贵意见。

在本书出版之际，由衷感谢航空工业出版社为购买本书版权，策划、出版本

书的付出和努力。同时也要感谢本书的责任编辑王建青，她虽然刚从北京航空航天大学大学毕业不久，但专业素质高，做事认真，对本书的公式、图表及语言的校对和编辑一丝不苟，保证了本书高质量的出版。最后，还要感谢为本书出版提供指导和帮助的龙明灵副总经理和廖文峰编辑。

**译者**  
**2013年1月**

# 前 言

本书作者提醒读者注意，本书名称为《航空舵机系统设计引论》。在文中，“引论”的含义是：在现今和未来的机动飞机与民航客机主要舵面舵机系统范围内，研究它们的设计计算理论基础和布局技术，以扩大读者的知识面。

近年来，设计工作进入到高速发展阶段，主要与电气能量传输系统和计算机信号处理有关。在这段时间，舵机系统液压元件变化很小。这个领域的进步主要是比例电磁阀的研制，它具有由稀土材料制成的磁系统，可将液压系统的压力提高到 35MPa。而且电液舵机系统结构也发生了重大变化。目前，无论是机动飞机还是新型客机，主要使用电传操纵系统。在这些系统的所有飞行控制通道（如俯仰、滚转和偏航）内，所有攸关生死的舵面的舵机，都使用电液伺服控制。毫无疑问，使用电通道比使用机械系统和液压系统的故障率要高很多，因此，需要采取辅助安全措施。这些措施包括冗余度，无论是操纵通道本身，还是操纵系统的各个元件都需要冗余度。除此之外，在现代舵机的位置控制环节，使用了数字计算机，它们为飞行员和自动飞行控制系统处理控制信号。

因此，现代舵机系统主要包括下列组成单元：

- 完备的功能附件。它们保证将来自飞行员和自动飞行控制系统的操纵信号，借助液压执行机构转换成某个舵面偏转的机械信号。
- 计算机。它们保证舵机状态信息的数字处理，不仅可以形成舵面移动速度控制信号，而且当舵机出现故障时，能够生成舵机结构变化指令，并将其转换到故障安全状态，必要时转换到备份通道。
- 系统完好性和舵机控制的嵌入式数字检查系统。
- 备份子系统单元。它们在舵机附件出现局部故障，或者液压（或电系统）的供电子系统出现故障的情况下，保证飞行的安全操纵。

从上述所给出的现代舵机系统的特性可以看出，学习飞行器舵机专业的大学生，会接触到不同领域的知识。这其中包括液压、电气、机械和计算机技术，还有控制原理、飞行动力学等知识。

在控制舵机系统时，必须使用这些知识、方法和设备，这将远远超出一门大学专业所包含的范围。在舵机系统的具体实现过程中，参与进来的不仅有不同行业的专家，甚至包括不同企业的专家。

本书作者试图按照飞行控制系统舵机设计所需要的最重要的章节来挑选材料，

目的是使学习该系统设计的大学生，或者着手准备课程设计或毕业设计的大学生，可以很容易地找到相应的必要材料。这些材料分别为建议书、数学模型、舵机实际结构的计算方法和舵机回路参数。我们真心希望偶尔看到此书的大学生们能够这样说：“舵机设计原来是这么简单啊！”

书中提出的电液舵机实际计算与数学仿真算法，不仅被莫斯科航空学院5年级的学生在独立完成课程设计工作时多次使用，而且在其毕业论文设计阶段也被使用过。我们感谢他们用实践检验并证明了这些算法和数学模型！

在飞机设计过程中，当代工程师们广泛使用计算机技术，因为他们有能力研究若干个方案。在这种情况下，计算机技术可以做到设计实现的多方案。合理方案的选择只有专家们才能完成，他们具有广泛的知识面，能够知道某些最新成果，并将它们引入到方案中。总之，从许多可能的方案中确定出最好的，并不容易。

目前，还没有多方案优化问题的严格数学解法，因此，不得不求助于折中的设计方案，这些方案在很大程度上是基于专家们的直觉。众所周知，直觉是完全无意识的信息，它们基于专家们广泛的知识面及良好的信息储备。考虑到现有设计人员的能力和若干年后的技术发展前景，在此基础上寻找有效的设计方案，这种能力在很大程度上是一种艺术，学生们应当考虑到这一点。正因为如此，书中给出了如此之多的设计方案，它们是已经简化了的各種布局形式和结构方案。在形成舵机布局时，有时候“回忆过去”是有益的，“喜新厌旧”固然好，但有时候就是要“新瓶装老酒”，即原来的技术换上新的包装。

在多方案舵机系统设计时，如果使用条件受到极其严格的限制，则在完成设计过程的初始工作后，系统技术指标直接面临出现各种附加条件的问题，并且这些附加条件会对这些指标产生作用。这些附加条件可能带有客观特征，例如，如果存在能量形式的限制时，就将导致订货方产生客观的或者是主观的观点，他们认为，如果对使用元件形式给予限制，系统将更加可靠和容易实现。不断出现的人为限制可能会放慢寻找合理解决方案的步伐，这其中包括，根据整个系统研制方的任务要求，合作企业按照传统方法和愿望所制造的某个舵机附件被拒绝。很显然在设计过程中形成舵机原理布局并制定相应的质量评估指标时，最好有不少于3个设计方案。目前，愿望与可能性之间矛盾的最典型例子是使用电能驱动系统的执行机构。为此，必须保证系统必要的可靠性（耐久性和无故障）和操纵信号的处理精度。这样，随着方案设计工作接近尾声，需要明确和选择的方案数量就增加了。设计者始终会遇到这样的情况，解决了一个问题后，又产生了另外一个问题。

正因为如此，本书向读者们推荐的内容虽然形形色色，但在某种程度上并不十分深奥，本书内容十分广泛，涵盖了许多混合性的设计问题，这些都是舵机系



统研制中经常遇到的。大学生们（我们针对的主要读者是相关专业的大学生）在本书中可以找到：

- 液压执行机构的计算方法。因为到目前为止，液压执行机构仍然是现在飞机舵机系统的主要附件，也是将来飞机的主要附件。
- 舵机参数及其非线性对飞机稳定性和操纵性的影响评估方法指南，以及使用辅助操纵舵面保证飞机超机动性的方法。
- 飞机舵面操纵系统无故障的保证方法。这对机动飞机和民航客机舵面的安全操纵提出了更高的要求。
- 根据简化的数学模型对舵机动力学特性进行评价的方法。这些模型能够显示出舵机的基本动力学特性，考虑了极其详细模型的非线性特性，包括连接接头的弹性、输出环节与舵机质心之间的连接等因素。

本书的材料主要基于作者们在飞机设计局获得的工作经验，例如，他们在米高扬设计局和雅科夫列夫设计局的工作经验，并且书中考虑了米高扬和苏霍伊设计局在舵机研制方面的经验，以及这些设计局研究和制造现代机动飞机和旅客机工作中积累的经验。本书各章节的题目，是根据作者们在莫斯科航空学院所教授的课程及课程实践内容而确定的。

本书给出了大量国内外飞机公司舵机系统研制方案的实际关键布局 and 结构，其中包括新型飞机和不久将问世的飞机上所使用的舵机方案布局。作者认为，了解这些方案可以大大扩展年轻专家们的知识面，帮助他们建立有效的舵机系统方面的知识。

本书所提供的各章节中，第 1、3、5 章由奥博连斯基编写；第 4 章由奥博连斯基与叶尔马科夫共同编写；第 2 和第 6 章由叶尔马科夫编写，但第 2 章 2.2 和 2.3 节除外，它们由叶尔马科夫和奥博连斯基共同编写；第 7 章由奥博连斯基、叶尔马科夫和苏霍鲁科夫共同编写；第 8 章由苏霍鲁科夫编写；第 9 章由叶尔马科夫和苏霍鲁科夫共同编写。

# 目 录

<b>第 1 章 飞机飞行控制系统中的舵机</b> .....	( 1 )
1.1 飞机操纵面的概念 .....	( 1 )
1.2 舵面操纵效率的概念 .....	( 5 )
1.3 飞机舵机系统的概念 .....	( 12 )
参考文献 .....	( 20 )
<b>第 2 章 速度节流调节的液压舵机执行机构基本参数综合</b> .....	( 22 )
2.1 节流调节液压舵机输出环节速度控制的理论基础 .....	( 22 )
2.2 舵机执行机构机械特性存在不同要求的情况下, 具有速度节流 调节的舵机基本参数的确定 .....	( 31 )
2.3 舵机运动时液压作动筒的参数计算 .....	( 43 )
2.3.1 液压作动筒主要参数 .....	( 43 )
2.3.2 液压作动筒密封的结构特点 .....	( 51 )
2.3.3 电液舵机设计的典型布局举例 .....	( 55 )
参考文献 .....	( 57 )
<b>第 3 章 电液伺服放大器结构布局</b> .....	( 59 )
3.1 液压节流门 .....	( 59 )
3.2 液压电桥的概念 .....	( 62 )
3.3 机电变换器 .....	( 65 )
3.4 电液放大器结构布局 .....	( 68 )
3.4.1 静态形式的电液放大器 .....	( 68 )
3.4.1.1 静态形式液压放大器运动方程 .....	( 69 )
3.4.1.2 静态形式电液放大器运动方程 .....	( 70 )
3.4.2 具有机械反馈的无静差电液放大器 .....	( 72 )
3.4.3 具有机械反馈的无静差电液放大器运动方程 .....	( 73 )
3.4.4 电反馈无静差电液放大器 .....	( 75 )
3.4.5 电反馈无静差电液放大器运动方程 .....	( 76 )

参考文献 .....	( 78 )
<b>第 4 章 电液舵机动力学 .....</b>	<b>( 79 )</b>
4.1 带有空气动力载荷的电液舵机传递函数 .....	( 79 )
4.2 正弦波线性化方法评估典型非线性舵机的动力学特性 .....	( 88 )
4.2.1 非线性对舵机动力学特性的影响 .....	( 89 )
4.2.2 考虑“节流效应”现象的舵机动力学特性 .....	( 96 )
4.3 考虑连接接头结构弹性时, 驱动惯性对象的舵机动力学特性 .....	( 101 )
4.4 采用舵机系统状态反馈的舵机动力学特性的修正 .....	( 113 )
4.4.1 飞行器舵机调整的主要问题 .....	( 113 )
4.4.2 电液舵机动力学在广义系数平面上的表示, 以及舵机参 数最佳范围的确定 .....	( 114 )
4.4.3 舵机参量可测量的状态调节器 .....	( 117 )
4.4.4 具有状态观测装置的液压舵机调节 .....	( 123 )
4.5 跟随系统动力学特性的基本调节方法 .....	( 128 )
4.5.1 直接链中的放大调节 .....	( 128 )
4.5.1.1 串联接入微分回路的调节 .....	( 128 )
4.5.1.2 串联积分回路的调节 .....	( 130 )
4.5.1.3 串联积分—微分回路的调整 .....	( 133 )
4.5.2 反馈调整 .....	( 137 )
4.5.2.1 位置反馈 .....	( 137 )
4.5.2.2 非周期反馈 .....	( 137 )
4.5.2.3 速度反馈 .....	( 138 )
4.5.3 提高无静差阶次的方法 .....	( 139 )
4.5.3.1 邦内尔方法 .....	( 139 )
4.5.3.2 米耶洛夫方法 .....	( 139 )
4.5.3.3 索科洛夫方法 .....	( 140 )
4.5.3.4 金格方法 .....	( 140 )
4.5.3.5 小索科洛夫法 .....	( 142 )
4.5.4 并联回路校正 .....	( 142 )
4.5.4.1 控制作用校正系统 .....	( 143 )
4.5.4.2 扰动作用校正系统 .....	( 144 )
4.5.5 跟随系统动力学特性非线性的校正方法 .....	( 145 )
4.5.5.1 相位超前的非线性校正 .....	( 145 )

4.5.5.2 具有幅值衰减的非线性校正 .....	(148)
参考文献 .....	(149)
<b>第5章 舵机非线性特性对机动飞机飞行控制回路的稳定性影响 .....</b>	<b>(152)</b>
5.1 能量机动状态控制回路的稳定性, 电液舵机输出环节所需位移速度的确定 .....	(152)
5.2 精确操纵状态控制回路的稳定性, 电液舵机所需动态敏感度的确定 .....	(164)
参考文献 .....	(170)
<b>第6章 飞机电液舵机动刚度 .....</b>	<b>(171)</b>
参考文献 .....	(179)
<b>第7章 飞机舵机系统完好性的备份和机内自检测 .....</b>	<b>(181)</b>
7.1 舵机可靠性指标概念 .....	(181)
7.2 提高舵机可靠性的手段——余度结构 .....	(187)
7.3 舵机主通道和备份通道的连接方法 .....	(193)
7.3.1 子通道输出环节位移叠加 .....	(194)
7.3.2 进入到作动筒中工作液体流量的叠加 .....	(195)
7.3.3 带液压马达舵机中转轴速度的叠加 .....	(195)
7.3.4 总输出环节上力的叠加 .....	(196)
7.4 在备份舵机上, 减小由于参数偏离标准值和控制信号不一致引起的执行机构力纷争方法 .....	(200)
7.5 电液舵机正常工作机内自检测系统构建基础 .....	(205)
7.6 备份舵机系统及其附件实际实现举例 .....	(212)
参考文献 .....	(222)
<b>第8章 民用飞机舵机 .....</b>	<b>(224)</b>
8.1 民用飞机飞行控制气动舵面 .....	(224)
8.2 飞行控制系统舵机能量流的构型布局 .....	(226)
8.3 客机操纵面舵机系统构造总体布局 .....	(228)
8.4 电液舵机液压系统 .....	(237)
8.5 为减少客机中央液压系统数量而开发的舵机系统 .....	(241)
8.6 减少中央液压系统的自主式电液舵机 .....	(243)

- 8.6.1 具有工作容积调节泵的自主式电液舵机…………… (243)
- 8.6.2 电液随动传递的自主电液舵机…………… (249)
- 8.6.3 电液随动执行机构参数与其外部特性之间的主要关系式…… (251)
- 8.7 具有本地液压源的电液舵机系统…………… (258)
- 参考文献 …………… (270)
- 第9章 速度节流调节液压舵机概念数学模型 …………… (272)**
  - 9.1 “液压分配器 - 液压作动筒” 系统内液体流量平衡方程 …………… (272)
  - 9.2 节流调节舵机执行机构数学模型布局…………… (274)
  - 9.3 速度节流调节舵机执行机构简化模型…………… (281)
  - 9.4 电液舵机模型…………… (282)
  - 9.5 具有双作动筒和刚性连接活塞杆的双通道电液舵机数学模型…… (284)
  - 9.6 计算舵机执行机构静态特性所使用的动力学模型…………… (286)
  - 参考文献 …………… (289)

# 第1章 飞机飞行控制系统中的舵机

## 1.1 飞机操纵面的概念

飞机的飞行控制，如改变飞行方向、速度和高度，必须首先改变飞机的空间位置，为此，应当建立使飞机转动的力矩。飞机作为刚体绕三轴转动：纵轴（ $x$ 轴），其方向指向飞机运动方向并与飞行轨迹相切；垂直轴（ $y$ 轴），其位于轨迹平面内，垂直于纵轴；横轴（ $z$ 轴），其垂直于前两个轴<sup>①</sup>。在图1-1中给出了这些轴及其力矩。

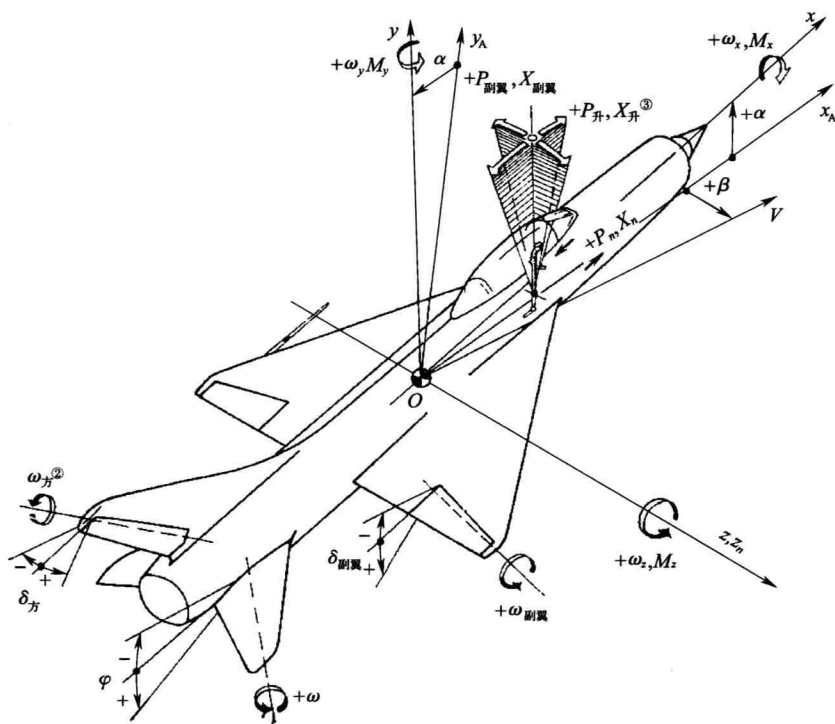


图1-1 坐标轴系方向及改变飞机空间位置的力和力矩

- ① 本文采用的是俄制坐标系，飞机气动力、力矩和角速度的下标都用俄制坐标系表示，如图1-1所示。
- ② 文中变量下标“方”均代表“方向舵”。
- ③ 文中变量下标“升”均代表“升降舵”。

——译者注

必须指出，速度矢量的方向与飞机纵轴及结构的水平线并不重合。飞机纵轴与速度矢量在  $xOy$  平面上的投影之间的夹角称为迎角  $\alpha$ ，而飞机纵轴与速度矢量在  $xOz$  平面上的投影之间夹角称为侧滑角  $\beta$ 。

为了建立飞机相对于某个轴转动的力矩，必须确定力在飞机结构上的作用点。为了产生这些力，需要利用专门的舵面，即飞机操纵面。在流动空气作用（这个作用与飞行速度和空气密度有关）下，舵面相对于气动力中性点偏转将产生气动力，这个力产生使飞机绕某个轴转动的力矩。

如果飞行员将力  $P_{\text{升}}$  施加到驾驶杆上，这个力将导致驾驶杆产生一个向前的位移  $X_{\text{升}}$ ，水平尾翼（简称平尾）向俯冲方向偏转一个角度  $\varphi$ ，就会产生一个俯仰角速度  $\omega_z$  和一个气动力矩  $M_z$ ，结果导致飞行轨迹发生改变，即出现了一个负的俯仰角  $\vartheta$ ，减小了飞机的轨迹倾角  $\theta = \vartheta - \alpha$ ，产生了一个负的垂直速度  $V_y$ ，进而导致飞行高度 ( $H$ ) 下降和飞行表速 ( $V_{\text{表}}$ ) 提高。

为了控制滚转（例如，使飞机向左侧倾斜），飞行员应当给驾驶杆施加一个力  $P_{\text{副翼}}$ ，并使驾驶杆产生一个右偏位移  $X_{\text{副翼}}$ ，左侧副翼向下偏转  $\delta_{\text{副翼}}$ ，而右侧副翼则向上偏转，如图 1-2 所示。随后，左侧机翼上的升力提高，而右侧机翼上的升力则减少，飞机产生一个滚转角速度  $\omega_x$  和气动力矩  $M_x$ 。为了保持所得到的滚转角，飞行员应当使滚转操纵的驾驶杆回到中立位置。

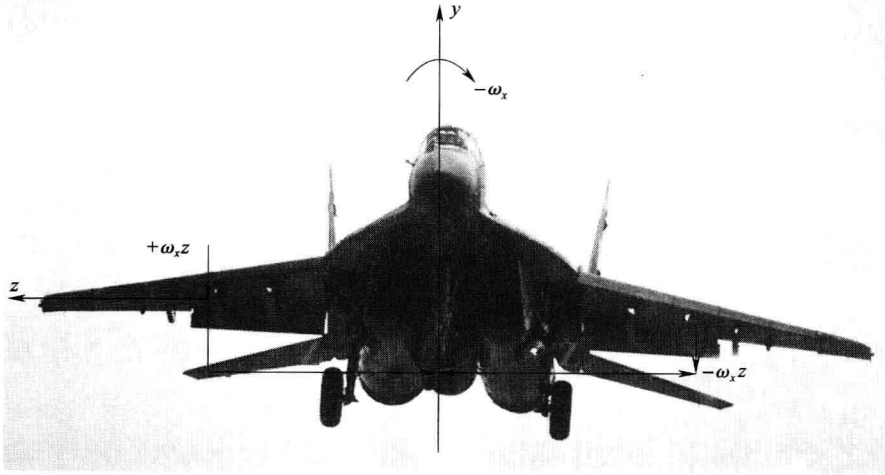


图 1-2 形成滚转角速度的布局

为了使飞机进行航向转弯，即所产生的力矩  $M_y$  使飞机绕垂直轴转弯，飞行员应当对脚蹬施加力  $P_{\text{脚蹬}}$ ，使脚蹬产生位移  $X_{\text{脚蹬}}$ 。当右脚蹬向前移动时，方向舵向右偏转  $\delta_f$ ，产生偏航角速度  $\omega_y$  和气动力矩  $M_y$ ，飞机机头向右转弯。

实际上，飞机进行航向转弯时，还会进行滚转转弯，且飞机向轨迹内侧倾斜。因此，为了完成协调转弯，飞行员不仅要对脚蹬施加力，还应当向转弯的一侧偏杆。

下面详细讲述现代飞机的布局，并确定它们有哪些操纵面。

现代飞机布局主要包括：正常式布局、无尾和鸭式布局。飞机常规布局形式是将纵向操纵面布置在靠近重心的附近。正常式布局飞机的平尾或升降舵位于重心后方，如图 1-3 所示，鸭式布局的前翼位于重心前，无尾布局飞机则没有尾翼。

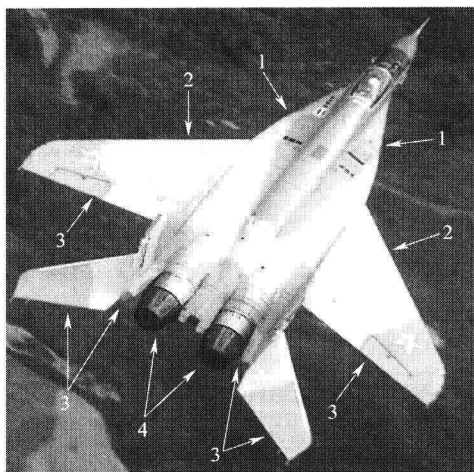


图 1-3 正常式布局机动飞机的操纵面

1—前缘边条；2—前缘机动襟翼；3—飞行控制操纵面：安定面、副翼和方向舵；4—燃气控制舵面

第四代机动飞机属于夺取空中优势的飞机，机翼上存在绕流涡系，它们是由前面的大边条和机翼前缘的机动襟翼所产生的。

纵向（俯仰）通道的主要操纵面是全动平尾，亚声速飞机则是升降舵。横向（滚转）通道采用副翼作为操纵面，它们位于机翼后缘并可以差动偏转。有时候，变后掠机翼的副翼由阻流片取代，如图 1-4 所示，这些阻流片与副翼有所不同，它们只是向上偏，而且只偏转一侧机翼上的阻流片，它们与机翼后缘之间有一段明显的距离。必要时，横向通道还使用差动偏转平尾，也称为“剪刀差”。在航向通道，即偏航通道，采用方向舵或全动垂直尾翼（简称垂尾）作为操纵面。

采用前缘襟翼和后缘襟翼作为起飞和着陆用的增升装置，有时候用前缘缝翼代替前缘襟翼，目的是为了增加机翼升力、减小着陆速度。对于某些重型飞机，阻流片也用作空中减速板，在这种情况下称其为扰流片。为了提高某些典型飞机的横向力矩，襟翼与副翼合并在一起使用时，称为襟副翼。



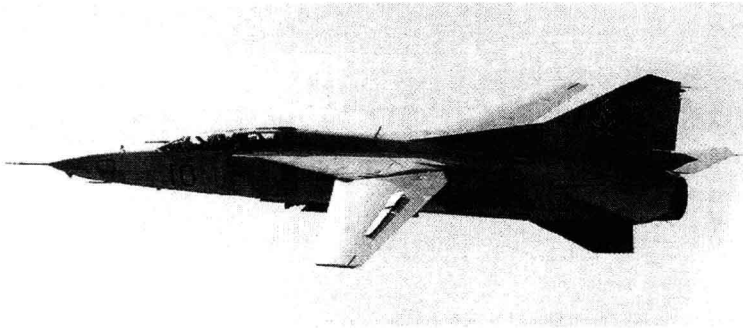


图 1-4 变后掠翼飞机米格-23 上扰流片的偏转

飞机有一种主要的气动力特性，它们决定着飞机的操纵能力，这就是舵面效率  $M_z^\delta$ 、 $M_x^\delta$ 、 $M_y^\delta$ ，它们是气动力矩对各舵面偏度的导数。

施加力的力臂越长，飞机气动舵面相对于飞机重心处各轴所形成的力矩就越大，舵面效率也就越高。因此，同正常式布局相比，无尾布局飞机的机翼更加靠近发动机（如图 1-5 所示），并具有更大的后掠角，而在机翼前缘和后缘则布置了更强的增升装置。前缘布置的是机动襟翼，后缘布置的是面积更大的升降副翼，后者既是纵向操纵面，也是横向操纵面，它们既可以同时同向偏转，也可以差动偏转。在航向操纵通道则与正常式布局的相同，通常采用方向舵。

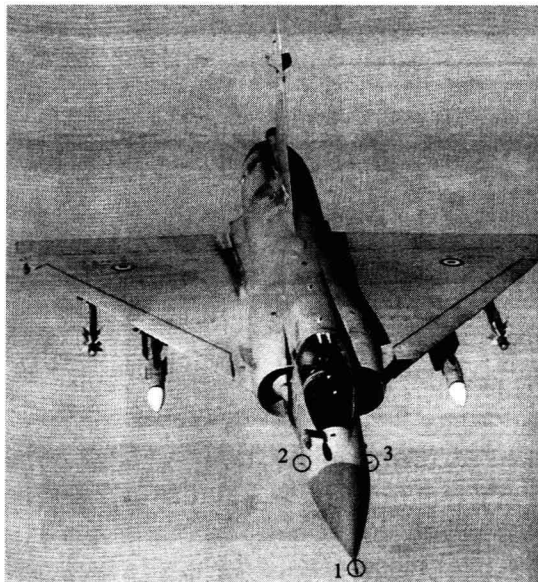


图 1-5 无尾布局形式