

飞机飘摆 与 “海豚跳”

刘汉辉 著

中国民航出版社

V323
1002

V323
1002-1

飞机飘摆与“海豚跳”

刘汉辉 著



一九九八年十月廿二日



30775499

中国民航出版社

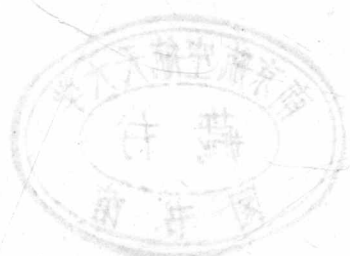
775499

图书在版编目 (CIP) 数据

飞机飘摆与“海豚跳”/刘汉辉著. —北京: 中国民航出版社, 1996. 12
ISBN 7-80110-132-4

I. 飞… II. 刘… III. 飞机-飞行控制 IV. V323.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 22220 号



飞机飘摆与“海豚跳”

刘汉辉 著

*

中国民航出版社出版发行

(北京市朝阳区光熙门北里甲 31 号楼)

邮政编码: 100028 电话: 64290477

中国民用航空总局印刷厂印刷

版权所有 不得翻印

*

开本: 850×1168 1/32 印张: 3.5 字数: 92 千字

1997 年 2 月第 1 版 1997 年 2 月第 1 次印刷 印数: 1—5 000 册

ISBN 7-80110-132-4/V · 071 定价: 12.60 元

前 言

飞机的飘摆、“海豚跳”，目前在航空界已越来越引起关注。在我国，飘摆、“海豚跳”不仅发生过，而且给飞行安全带来了严重的威胁，有的已造成了无法挽回的损失和影响。

刘汉辉教授从理论和实践两个方面对飘摆、“海豚跳”的现象、原因、原理、处置方法等进行了详细分析，这对飞行员今后如何正确认识和处置飘摆、“海豚跳”是非常有益的。

希望我国的飞行人员对这本书能认真学习、研讨，能结合亲身体会或实践，从空气动力学角度去深刻认识其产生的原理。因为，感觉到的东西不一定能理解它，只有理解了的东西，才能更深刻地认识它、掌握它。只有深刻地认识了飘摆、“海豚跳”发生的原理，我们才能在飞行中主动避免和正确处置，才能保证飞行安全。

鄢远雄

1996年9月

目 录

前言

第一章 概论

- 1.1 飘摆、“海豚跳”是有关飞机稳定性的问题 (1)
- 1.2 稳定性的基本概念 (2)
- 1.3 静稳定性与动稳定性 (3)
- 1.4 开环稳定性与闭环稳定性 (6)
- 1.5 全面理解飞机的稳定性是飞行安全的需要 (7)

第二章 飞机的稳定性

- 2.1 纵向静稳定性——迎角安定性 (9)
- 2.2 自动下俯与 Ma 数配平 (15)
- 2.3 纵向动稳定性 (17)
- 2.4 飞机对纵向操纵的反应 (20)
- 2.5 侧向静稳定性 (26)
- 2.6 侧向动稳定性 (29)

第三章 闭环系统的稳定性

- 3.1 闭环系统 (36)
- 3.2 俯仰姿态控制 (38)
- 3.3 高度和下滑轨迹控制 (42)
- 3.4 速度稳定性 (43)
- 3.5 偏航阻尼器 (47)
- 3.6 滚转阻尼器 (49)
- 3.7 适应飞机自动化技术的发展 (50)

第四章 飘摆

- 4.1 何谓飘摆 (59)
- 4.2 大迎角下产生飘摆的原因及改出 (60)
- 4.3 飘摆事件实例 (63)
- 4.4 由自动器故障造成的飘摆 (71)

第五章 “海豚跳”问题

5.1 何谓“海豚跳” (79)

5.2 操纵不当诱发的俯仰振荡 (80)

5.3 着陆跳跃 (83)

5.4 平尾结冰失速与“海豚跳” (85)

5.5 舵面松浮的影响 (91)

复习思考题 (95)

第一章 概 论

1.1 飘摆、“海豚跳”是有关飞机稳定性的问题

近年来,飘摆与“海豚跳”等问题引起了我国航空界的广泛关注。这是由于实际飞行中多次发生这类问题并严重危及飞行安全的结果。

远的有80年代的几次AN—24飞机失事,在失速坠毁之前都有机翼上下运动,“飞机左右摆动”,“左右飘摆”等现象。很明显,飞机横侧振荡运动加剧是事故的重要促成因素。

进入90年代,多种机型多次发生突然的意外倾斜或者左右摆动。有一次在高空,典型发散的飘摆运动持续达140秒,飞机坡度从 5° 增大到 35° ,若不是及时发现问题的原因,采取了正确的措施,再过1分钟飞机就很可能失去控制。

1994年6月6日,TU—154飞机因机务原因导致飞机起飞后严重飘摆,造成了164人遇难的特别重大事故,更是震惊中外。

还有不少飞机非指令性偏转和滚转的事件,波音公司在1995年8月4日专为此发了通告。

“海豚跳”事件也频繁发生。我国的BAe146飞机在1989年到1994年6月的一段时间内,仅西安和兰州两个飞行大队的飞行中就发生过6次。其他飞机亦有发生,例如1994年某AN—24飞机在放着陆襟翼后出现像“鸡啄米”那样的上下摆动,幸亏机长及时收襟翼复飞改出,但也跳了四个回合。

仅以上所举就足以说明飘摆和“海豚跳”问题的的确确值得深入研究和认真对待。特别是飞行人员和飞行安全管理人员更应

当理解其原理，掌握其发生和发展的规律。常言道“有备无患”，只有做好了充分的技术准备，才能应付飞行中可能出现的各种复杂局面，从而保证飞行安全。

那么，飘摆和“海豚跳”到底是怎么回事呢？

按照我国民航界现在流行的说法，飘摆指的是一类非指令性的飞机侧向振荡运动，这类振荡的周期在几秒到十几秒之间，振荡常呈发散，往往难以控制。振荡发生时，机翼上下摆动，飞机左右飘忽，故而形象地描述为飘摆。“海豚跳”就更形象了，指的是非指令性的飞机俯仰振荡运动，犹如海豚在水中的上下游动。这里，“飞机”可以是各操纵面都固定的传统意义上的飞机自身，也可以是自动器参与操纵的由飞机自身和自动器构成的系统。

无论带与不带自动器，飘摆和“海豚跳”从根本来说都是与飞机运动的稳定性有关的问题。这些问题可能是飞机自身固有的扰动运动模态，例如“荷兰滚”在特定飞行条件下变为发散的结果；也可能是有故障自动器的不协调操纵使飞机自身与自动器构成的闭环失去稳定性的结果；还可能是外界的激励或松浮舵面的振荡引起飞机运动共振的结果，等等。

因此，要弄清飘摆和“海豚跳”问题，首先就有必要较为深入地来研究运动的稳定性问题。

1.2 稳定性的基本概念

物体运动的稳定性是一个基本的物理概念，其严格定义较为复杂难懂，对于实际工作者来说图 1.1 所举的例子尽管不是很恰当，但能说明稳定性概念的基本内涵。

图 1.1 中的运动小球，当在位置 A 时，虽也可以达到平衡状态，但当受到扰动偏离原平衡位置后，会越偏越远，靠自身的力量不能恢复原来的平衡状态。位置 B 的情况就完全不同了，当受到扰动偏离原平衡位置时，外力除去后，小球能自动回到底部，恢复原来的平衡状态。位置 C 的情况介于两者之间，小球处在一个

光滑的水平面上，随遇而安，无所谓恢复也无所谓偏离，到哪里都可以平衡。

小球所处的三种平衡状态，性质各不相同，称状态 A 是不稳定的，状态 B 是稳定的，状态 C 是中立稳定的。

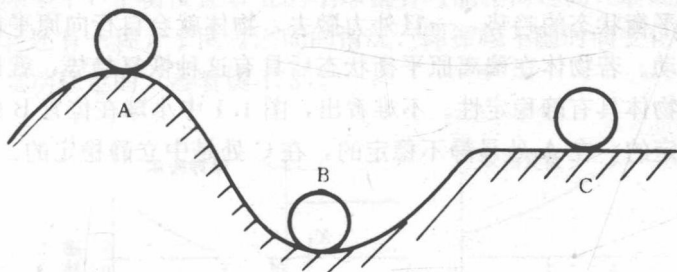


图 1.1 稳定性概念

因此，稳定性是运动物体关于其平衡状态的一种属性。若物体受外力扰动偏离了平衡状态，在外力撤去后，能自行恢复原平衡状态，则称该运动物体是稳定的；若更加偏离，则是不稳定的；介于两者之间是中立稳定的。

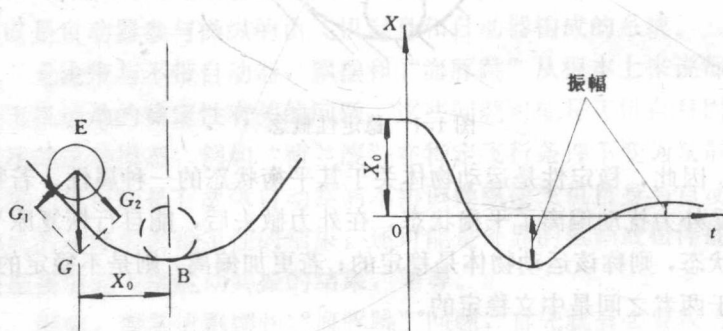
这里，“平衡状态”意味着作用于物体上的力和力矩都是互相抵消的，即总的合力和合力矩都等于 0。例如图 1.1 中的小球受到重力和台面反力两个力的作用，在 A、B、C 三个位置反力都可以正好抵消重力，因此小球在 A、B、C 三个位置都可以达到平衡状态。

1.3 静稳定性与动稳定性

本来物体恢复原来平衡状态只有一个统一的完整的运动，并无所谓“静”、“动”。但是如果综合研究稳定性问题，特别是像飞机这样受诸多外力作用的系统的稳定性问题，不仅十分复杂，而且难度很大。所以从设计使用的实际需要出发，为了简化，常分

别讨论静稳定性和动稳定性,从不同角度对稳定性问题加以研究。

参看图 1.2, 小球受外力作用偏离平衡位置 B 到位置 E 时处于斜坡, 重力 G 可分解为垂直于接触点处斜坡平面的第一分力 G_1 和平行于斜坡平面的第二分力 G_2 。 G_2 指向原平衡位置 B, 是使物体恢复原平衡状态的恢复力。在恢复力 G_2 的作用下, 物体具有恢复原平衡状态的趋势, 一旦外力撤去, 物体就会自行向原平衡位置运动。若物体在偏离原平衡状态后具有这种恢复趋势, 就称该运动物体具有静稳定性。不难看出, 图 1.1 中小球在位置 B 处是静稳定的, 在 A 处是静不稳定的, 在 C 处是中立静稳定的。



静稳定性——恢复趋势

动稳定性——恢复过程

图 1.2 静稳定性和动稳定性

静稳定性只是说有恢复平衡状态的趋势, 然而实际稳定性的好坏还要看恢复的运动过程。图 1.2 中以过 B 点的铅垂线为基准, 记小球质心到基准线的距离为 X , 表示物体偏离原平衡状态的程度。现受外力作用小球位于 E, 初始偏离量为 X_0 , 试想若 0 时刻外力撤去, 小球在恢复力 G_2 的作用下将向平衡位置 B 加速滚下; 当到达平衡位置 B 时, X 为 0, 但速度却最大, 于是在惯性作用下, 必会滚过头, 形成来回振荡运动。 X 随时间的变化将会有图 1.2 右边曲线所示的形式。图示恢复过程, 振幅越来越小, 随

着时间的增加 X 趋近于 0, 小球最终会重新停在原平衡位置 B, 称这种情况是动稳定的。振幅减小越快即振荡收敛越快, 就说该系统的动稳定性越好。反之, 如果振幅越来越大, 就说系统是动不稳定的。例如, 若图 1.1 中支撑小球的台面也在振荡, 则在某个共振频率下, 平衡位置 B 处的小球就有可能越荡越高, 最终跑出凹部。还有一种介于两者之间的情况, 即振幅不随时间变化, 称是中立动稳定的 (参看图 1.3)。

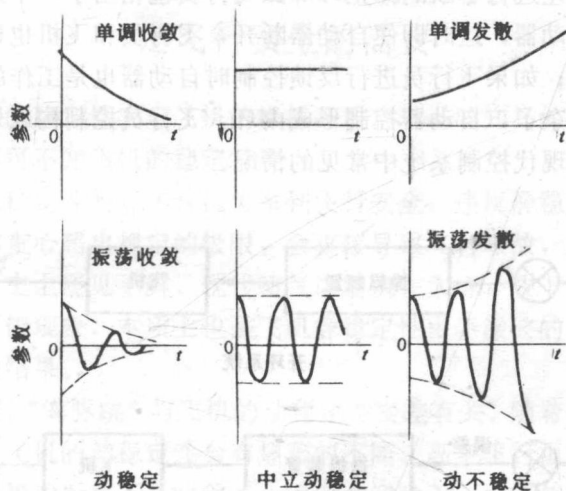


图 1.3 扰动运动的典型形式

一般来说, 处于平衡状态的运动物体受外界扰动后的运动情况是很复杂的。但理论已经证明, 在小扰动的条件下, 系统的复杂受扰运动可以看成是图 1.3 所示的几种典型扰动运动的叠加。

图 1.3 中, 振荡发散和振荡中立动稳定两种典型运动中, 在初始时刻 ($t=0$) X 都是减小的, 这就是说运动物体具有恢复原平衡状态的趋势, 是静稳定的, 但最终物体却不能回到原来的平衡位置, 不具有动稳定性。因此, 静稳定性和动稳定性是稳定性的两个侧面, 仅具有静稳定性不能保证系统的稳定性。

1.4 开环稳定性与闭环稳定性

现代航空的一个突出特点是广泛采用自动器。飞行中，当自动器断开时，飞行员驾驶的直接是飞机本身，如果只作指令操纵，则是一个开环系统；而当自动器接通时，飞行员驾驶的常常是一个带伺服控制的闭环系统（图 1.4）。如果飞行员也按飞机对指令状态的偏差进行不断的修正，那么飞行员也相当于一个进行反馈控制的自动器，这时即使自动器断开，飞行员和飞机也构成一个闭环系统；如果飞行员进行反馈控制时自动器也是工作的，那系统就更复杂了，自动器控制形成内环，飞行员控制构成外环。环中有环是现代控制系统中常见的情况。

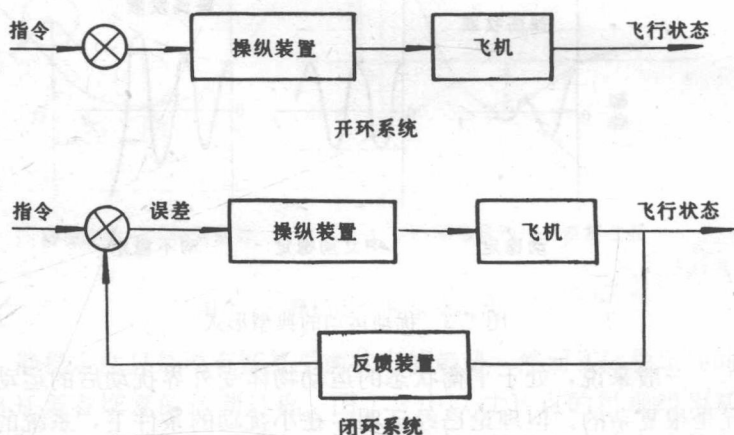


图 1.4 开环与闭环

由于闭环具有高的控制精确性，因此在飞行操纵系统中广泛采用闭环控制。

开环系统的稳定性也就是飞机本身固有的稳定性，由飞机的气动布局 and 结构等自身因素决定。而闭环系统往往由自动装置将

飞行状态的信息反馈回来，与指令进行比较，按偏差对飞机进行操纵。闭环系统的自动控制会显著改变系统的稳定性。因此，自动器接通时飞行员驾驶的“飞机”（包含自动器的闭环系统）的稳定性会显著不同于飞机固有的稳定性。当然，自动器通常是使稳定性改善，这常常是设计中采用自动器的初衷。但有的时候，例如自动器发生故障时，也会使飞机的稳定性发生意想不到的恶化。

1.5 全面理解飞机的稳定性 是飞行安全的需要

飞机的稳定性决定飞机的操纵品质。骑马要知马的特性，驾驶飞机不可不知飞机的稳定特性。

飞机稳定性的好坏直接关系到飞行安全。违反静稳定性的要求，例如重心超出规定的极限，会直接导致飞行事故，这种事例在航空历史上屡见不鲜。现代喷气运输机在大 Ma 数下可能出现的自动下俯现象，本质上也是飞机静稳定性由于激波的产生而发生反逆的结果。

飘摆、“海豚跳”与飞机的动稳定性变差有关。随着飞行状态的变化，飞机的动稳定性会有显著的不同。高空飞行由于空气密度减小飞机的振荡不易收敛；小速度大迎角下，由于气流分离的影响，飞机的动稳定性会严重恶化，有时甚至会变成发散的振荡。飞行员不了解这些变化发生发展的规律，就有可能不自觉地陷入十分被动的局面。

对于各类自动器的工作及其对飞机稳定性的影响的理解也是与飞行安全息息相关的。过去的事例表明，飞行员的操纵与自动器的操纵相互矛盾的情况有之；阻尼器发生故障使飞机产生了危险的振荡而不知所措的例子有之；颠簸飞行中，使用自动驾驶进行高度保持控制，致使闭环稳定性恶化，飞机承受的过载增大甚至导致飞机失控的证据有之。

事实上，稳定性对飞行操纵的影响无处不在。静稳定性的强

弱可能会影响到驾驶杆的轻重。在像进近这样要求严格保持飞行轨迹的飞行中,所谓速度稳定性的好坏会直接影响到油门的使用。按照英国著名试飞员大卫·戴菲斯的体会,对于速度稳定性不好的飞机很难选定对下一分钟还基本合适的油门位置,需随时调整油门,一次接一次,给进近操纵将带来很大的困难。然而飞机速度稳定性的好坏又取决于飞行员选择保持的飞行状态。

因此,稳定性对飞机的飞行有着广泛深刻的影响。飞行人员、指挥人员、安全管理人员深入学习有关理论,全面了解飞机的稳定性是使用好飞机的需要,是安全飞行的需要。在我国过去的飞行员培训中,曾经一度严重忽视航空理论。对于稳定性长期只讲到飞机本身固有的静稳定性等最基本的概念,根本就没有涉及到动稳定性、闭环稳定性、速度稳定性等问题。这就给我国飞行人员头脑中的知识库留下了严重的空缺,这种空缺本身就是对飞行安全的潜在威胁。

今天,航空的自动化程度越来越高,飞行员的驾驶功能越来越多地由自动装置所取代,管理者、决策者的作用越来越加强。到21世纪更有望实现“以人为中心的自动化”,即各种自动装置探测到的信息都呈现给飞行员,由飞行员经过综合分析判断做出决策,再指令各种自动器去执行。今天的事故资料已经表明,飞行事故的2/3是由于机组原因;而机组原因中多达50%是由于判断与决策错误。可以预料,下个世纪飞行员成了管理决策的“中心”,这个判断决策的比重必定会更高。因此,加强判断与决策能力,是当今飞行人员培训的重中之重。而进行稳定性理论补课,使飞行人员更为全面深刻地掌握有关飞行稳定性的知识,无疑是这种努力的一个重要组成部分,因而必然会对今后乃至下个世纪我国民航的飞行安全产生深远的影响。

第二章 飞机的稳定性

2.1 纵向静稳定性——迎角安定性

飞机重心在飞机对称平面内的运动以及飞机绕其横轴的转动称为飞机的纵向运动。在通常的机翼水平的飞行中，纵向运动指的是飞机在铅垂平面的上下运动和机头的俯仰转动。纵向静稳定性指的是飞机力图保持原有平衡迎角的特性，又称迎角安定性。

参看图 2.1，当外界扰动使飞机迎角增大时，机翼、机身和平尾的迎角都增大，因而都会产生附加升力。这些附加升力的合力就是整架飞机的附加升力 (ΔY)。飞机附加升力 (ΔY) 的着力点叫飞机焦点，也称飞机的空气动力中心。只要飞机焦点在飞机重心之后，附加升力 ΔY 就对重心形成使飞机低头恢复原来迎角的稳定力矩，亦即飞机具有纵向静稳定性。

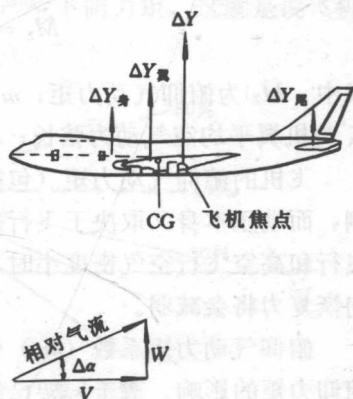


图 2.1 迎角安定性

理论和实验都证明：机翼附加升力的着力点（机翼焦点），亚音速飞行时总是在 23%—27% 平均空气动力弦处。翼形不同，略有差别，但同一翼形的焦点位置不随迎角变化。粗略地说，亚音速飞行时机翼焦点在 1/4（25%）平均空气动力弦处。若重心在 25% 以后，机翼附加升力就是起不稳定作用的力。机身也可看作是一段机翼，它的附加升力也作用在离机头约 1/4 机身长度处。通

常这个附加升力在重心之前，起不稳定作用。平尾的附加升力自然也作用在水平尾翼平均空气动力弦长的 $1/4$ 处。由于尾翼的位置，这个附加升力总在重心之后。飞机的纵向静稳定力矩主要来自平尾。正是因为平尾附加升力作用在重心之后很远，才使得总附加升力大大后移，从而使飞机焦点位置比较靠后。因而平尾是飞机具有纵向静稳定性的主要部件。

飞机焦点在重心之后是飞机具有纵向静稳定性的基本条件。飞机焦点在重心之后的距离越远，形成的稳定力矩就越大，纵向静稳定度也就越大。若飞机焦点在重心之前，飞机纵向运动就变得静不稳定了。若焦点与重心重合，则飞机纵向将是中立稳定的。因此飞机焦点有时又叫中性点。

飞机的俯仰气动力矩由下式计算：

$$M_z = m_z q b_A S$$

式中 M_z 为俯仰气动力矩； m_z 为俯仰气动力矩系数； q 为动压； b_A 为机翼平均空气动力弦长； S 为机翼面积。

飞机的俯仰气动力矩（包括迎角安定力矩）与动压 q 成正比例，而动压本身又取决于飞行速度和空气密度。不难看出，低速飞行和高空飞行空气密度小时，俯仰力矩会减小，因而飞机的纵向恢复力将会减弱。

俯仰气动力矩系数（ m_z ）代表迎角、飞机气动布局等因素对俯仰力矩的影响。对于一架已经设计好的飞机，使用中最为重要的是 m_z 随迎角的变化。因为迎角直接与升力系数相关，为了分析方便，讨论纵向稳定性时，常研究俯仰气动力矩系数（ m_z ）与升力系数（ C_Y ）的关系。图 2.2 示出这类关系曲线的典型形式。通常规定 m_z 的符号，上仰力矩为正，下俯力矩为负。 $m_z - C_Y$ 曲线的斜率为：

$$m_z^{C_Y} \approx \frac{\Delta m_z}{\Delta C_Y}$$

曲线具有负的斜率（如图 2.2 中点 1 处），就表示飞机是纵向

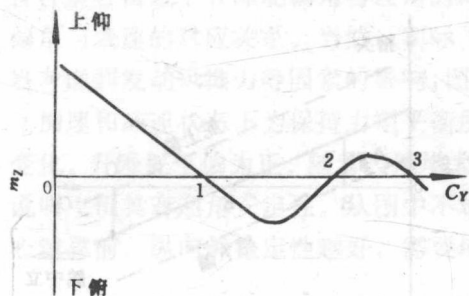


图 2.2 $m_z - C_Y$ 曲线

静稳定的。因为从平衡点(1点) C_Y 增大,迎角增大,曲线有负斜率, m_z 变为负值,即说明产生了下俯力矩使之恢复原来迎角;反之 C_Y 减小,迎角减小, m_z 为正值,则使机头上仰,也是力图恢复原来迎角,

具有静稳定性。曲线的负斜率越大,恢复力矩越大,飞机的静稳定度也就越大。2点的情况就不同了,曲线具有正的斜率,迎角增大反而产生上仰力矩,迎角减小,产生下俯力矩,这就是说飞机是静不稳定的。

飞机的重心位置对于其纵向静稳定性有十分重要的影响。因为在通常的使用范围内,飞机焦点的位置基本保持不变,位于飞机焦点之前的飞机重心后移,飞机焦点到重心的距离缩

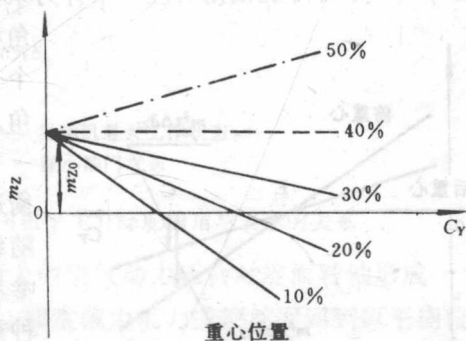


图 2.3 重心位置对纵向静稳定性的影响(示例)

短,附加升力产生的恢复力矩减小,纵向静稳定度就会降低。假如重心移到飞机焦点上,飞机纵向就变成中性静稳定的。重心再往后,就不稳定了。这些情况从图 2.3 示例可以看得很清楚。

纵向静稳定的飞机,重心位置一定时,保持升降舵中立,只在一个 C_Y 值处俯仰力矩平衡($m_z=0$)。若要用其他升力系数飞行,就要偏转升降舵来提供操纵力矩。如图 2.4 所示,若舵面中