

# 摆振理论及防摆措施

诸德培等编著

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书系统地介绍飞机机轮摆振及防摆措施的问题,总结了国内外文献和各单位的研究成果。全书分两大部分:第一部分介绍机轮摆振的理论和试验方法;第二部分介绍减摆器的构造原理、研制设计、生产工艺、试验检验和使用维护。本书理论部分由浅入深地系统介绍摆振的基本概念、各种理论和研究趋向;实践部分着重于实际经验的总结。全书各主要章节均附有实例介绍。本书可供飞机、汽车类专业的科技人员和大专院校师生参考,也可供从事起落架或车轮工作的广大生产、试验、使用和维护人员参考。

## 摆振理论及防摆措施

诺德培 等编著

\*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

850×1168<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张9<sup>3</sup>/<sub>4</sub> 257千字

1984年11月第一版 1984年11月第一次印刷 印数: 0,001— 2,450册

统一书号: 15034·2725 定价: 1.45元

## 序 言

飞机前轮摆振是飞机研制和使用中屡见的一种严重故障，是飞机结构动力学的一个重要课题。虽然飞机机轮摆振问题的主要研究已有三十余年的历史，但这一故障至今未能完全预防。此外，关于摆振研究的成果，也未见有专门书籍问世。为了适应我国航空工业建设的需要，编著者系统地总结了国内外摆振文献，集中了我国有关单位二十年来摆振研究的成果，编写了本书。

全书分摆振及减摆器两大部分。摆振理论部分由浅入深地分章介绍机轮摆振的基本概念、各种理论和研究趋向，对轮胎特性尤其作了详细叙述。摆振试验及减摆器部分则着重于实际经验，包括减摆器的构造原理、研制设计、生产工艺、试验检验及使用维护各方面。全书各主要章节均附有计算或试验的实例。本书可供飞机、汽车类专业的厂所技术人员和大专院校师生参考，也可供从事起落架或车轮工作的广大生产、试验、使用和维护人员参考。

参加本书执笔的有：诸德培（第一至六章及第一部分附录）、原宗章（第六、七章）、李云峰（第一部分附录、第八、十章）、高泽迥（第七章）、侯凤起、杭战僧（第七、十章）、黄清源（第九章）、苏开鑫、陈震明、郭俊义、葛祖德、刘锐琛、梁保华（各章实例部分），最后全书由诸德培统一整理修改。

本书承蒙西北工业大学黄玉珊教授审阅并提出许多重要的修改意见，最后对全书修改稿进行了复审。

本书的出版仅是个开端，摆振问题尚有待进一步深入研究。又由于我们水平所限，书中难免有错误，希读者批评指正。

编著者

## 目 录

## 第一部分 摆 振

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 第一章 前轮摆振概论 .....              | 1   |
| § 1.1 引言 .....                | 1   |
| § 1.2 机轮摆振的现象 .....           | 1   |
| § 1.3 摆振研究的要旨 .....           | 3   |
| § 1.4 机轮摆振的本质 .....           | 8   |
| § 1.5 前轮摆振的统计数据 .....         | 9   |
| § 1.6 运动摆振 .....              | 10  |
| § 1.7 动力摆振 .....              | 16  |
| § 1.8 摆振引起的后果 .....           | 19  |
| § 1.9 防止摆振的措施 .....           | 20  |
| 第二章 摆振的简化理论 .....             | 25  |
| § 2.1 基本假设 .....              | 25  |
| § 2.2 基准和坐标系 .....            | 31  |
| § 2.3 点接触理论 .....             | 34  |
| § 2.4 张线理论 .....              | 37  |
| § 2.5 摆振运动方程组 .....           | 47  |
| § 2.6 判别稳定性的条件 .....          | 51  |
| § 2.7 临界阻尼的理论曲线 .....         | 55  |
| § 2.8 影响摆振的因素 .....           | 61  |
| § 2.9 实例分析 .....              | 66  |
| 第三章 摆振线性理论的直接方法 .....         | 71  |
| § 3.1 引言 .....                | 71  |
| § 3.2 坐标系及转换关系 .....          | 71  |
| § 3.3 轮胎特性 .....              | 78  |
| § 3.4 结构特性 .....              | 89  |
| § 3.5 摆振运动方程组 .....           | 95  |
| § 3.6 变量置换和方程化简 .....         | 104 |
| § 3.7 判别稳定性的方法 (一) .....      | 107 |
| § 3.8 待定复参数法 ( $V-h$ 法) ..... | 112 |

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| § 3.9 实例分析 .....                        | 113 |
| 第四章 摆振线性理论的间接方法 .....                   | 132 |
| § 4.1 引言 .....                          | 132 |
| § 4.2 模拟摆振系统的闭环系统 .....                 | 133 |
| § 4.3 环节和系统的传递函数 .....                  | 135 |
| § 4.4 滚动机轮-轮胎的频率响应特性 .....              | 140 |
| § 4.5 判别稳定性的方法 (二) .....                | 146 |
| 第五章 摆振非线性理论简介 .....                     | 151 |
| § 5.1 引言 .....                          | 151 |
| § 5.2 非线性因素的影响 .....                    | 152 |
| § 5.3 实例分析 .....                        | 155 |
| 第六章 摆振试验和轮胎特性测试 .....                   | 171 |
| § 6.1 引言 .....                          | 171 |
| § 6.2 摆振台试验方法 .....                     | 172 |
| § 6.3 摆振试验实例 .....                      | 175 |
| § 6.4 摆振模型理论 .....                      | 179 |
| § 6.5 轮胎变形特性的测试(附经验数据) .....            | 183 |
| § 6.6 轮胎滚动特性的测试(附经验数据) .....            | 194 |
| § 6.7 机轮-轮胎频率特性的测试 .....                | 199 |
| § 6.8 起落架参数的测试 .....                    | 200 |
| § 6.9 实例计算 .....                        | 202 |
| 第一部分附录 飞机滑跑方向稳定性问题及其对<br>减摆器阻尼的限制 ..... | 205 |
| 一、概述 .....                              | 205 |
| 二、坐标系及基本符号 .....                        | 205 |
| 三、基本假设 .....                            | 208 |
| 四、飞机滑跑小扰动运动方程组 .....                    | 208 |
| 五、微分方程组的特征方程式 .....                     | 212 |
| 六、计算实例 .....                            | 214 |

## 第二部分 减摆器

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 第七章 减摆器原理与构造 ..... | 216 |
|--------------------|-----|

|        |                    |     |
|--------|--------------------|-----|
| § 7.1  | 引言 .....           | 216 |
| § 7.2  | 活塞式减摆器 .....       | 216 |
| § 7.3  | 叶轮式减摆器 .....       | 218 |
| § 7.4  | 操纵减摆器 .....        | 220 |
| 第八章    | 减摆器阻尼计算 .....      | 235 |
| § 8.1  | 引言 .....           | 235 |
| § 8.2  | 基本公式 .....         | 235 |
| § 8.3  | 管路的沿程压力损失 .....    | 238 |
| § 8.4  | 管路的局部压力损失 .....    | 244 |
| § 8.5  | 节流元件的压力损失 .....    | 249 |
| § 8.6  | 活塞式减摆器阻尼近似计算 ..... | 252 |
| § 8.7  | 叶轮式减摆器阻尼近似计算 ..... | 254 |
| § 8.8  | 实例计算 .....         | 255 |
| 第九章    | 减摆器阻尼的测试 .....     | 262 |
| § 9.1  | 引言 .....           | 262 |
| § 9.2  | 振动加载法 .....        | 263 |
| § 9.3  | 恒定加载法 .....        | 266 |
| § 9.4  | 阻尼测定结果的数据处理 .....  | 272 |
| § 9.5  | 阻尼线性化处理 .....      | 275 |
| § 9.6  | 几种减摆器的阻尼曲线 .....   | 277 |
| 第十章    | 减摆器的研制、工艺和使用 ..... | 280 |
| § 10.1 | 引言 .....           | 280 |
| § 10.2 | 减摆器的加工及装配 .....    | 280 |
| § 10.3 | 减摆器的耐压密封试验 .....   | 281 |
| § 10.4 | 减摆器的性能试验 .....     | 282 |
| § 10.5 | 减摆器生产中的故障排除 .....  | 283 |
| § 10.6 | 减摆器使用中的故障 .....    | 284 |
| § 10.7 | 减摆器的维护 .....       | 287 |
| § 10.8 | 减摆器的研制 .....       | 288 |
| 主要符号表  | .....              | 295 |
| 主要参考文献 | .....              | 301 |
| 其他参考文献 | .....              | 303 |

# 第一部分 摆 振

## 第一章 前轮摆振概论

### § 1.1 引 言

现代飞机广泛应用前三点起落架。

前三点起落架，由于它在起飞、着陆和滑跑中具有许多优点，所以自从三十年代起，几乎完全取代了老式后三点起落架。迄今为止，它是起落架布局的主要型式。

但是，前三点起落架也存在若干问题，前轮摆振就是一个突出问题。起落架设计人员和机场地勤人员需要注意预防和排除前轮摆振现象。摆振已成为飞机结构动力问题的主要研究课题之一。

机轮摆振的现象如何？摆振研究的要旨是什么？机轮摆振的本质又是什么？为了着手分析机轮摆振，进行定量计算，找到有效的预防措施，我们必须一开始对这些问题有一个正确的了解。

### § 1.2 机轮摆振的现象

我们先描述一下飞机前轮摆振的现象。

当飞机在起飞或着陆滑跑时，它的前轮有时会发生一种偏离其中立位置的剧烈的侧向摆动。这种摆动的组成，主要是前轮摆动部分绕其定向轴交变地转动，同时，轮胎和地面接触的部分相应地发生交变的变形。前轮的摆动又导致前起落架支柱和前机身的晃动，剧烈时，甚至形成整个机身从头部传至尾部的颤抖<sup>(1)</sup>。我们把这种复杂的振动称为飞机的前轮摆振。

在机场上可以看到发生摆振后轮胎在跑道上留下一条S形的痕迹。

轮子摆振是一种极为普遍的现象。汽车或拖拉机的可操纵前轮也常常会发生摆振。实际上,最早的摆振理论研究的对象是汽车前轮<sup>[10]</sup>。在日常生活中,当我们推动装有转向轮的小车或脚轮的家具时,也常常能观察到轮子摆振现象。

就飞机来说,摆振不仅在前三点起落架上会遇到,而在早期的后三点起落架上,尾轮就曾发生摆振<sup>[2]</sup>。近期的理论研究<sup>[3]</sup>又指出,当主起落架支柱的刚度不够时,也会发生主轮的所谓“结构型”摆振。不过其中最突出的是前轮摆振,所以本书主要针对前轮讨论,但其原理并不失去一般性。

下面我们进一步讨论前轮摆振现象的几个方面。

第一、前轮摆振的一个方面是前轮摆动部分(包括机轮、轮叉、活塞杆、扭力臂等)绕其定向轴(又称摆动轴或支柱轴)的转动(图1-1)。这相当于一个普通的复摆。

一般把复摆视为刚体,当定向轴固定时,其运动仅由摆动角 $\theta$ 决定,即是单自由度的。

摆动角 $\theta$ 这一运动自由度的存在,对于前轮(转向轮)是由飞机滑跑方向稳定性所要求并由构造所保证的,对于主轮(非转

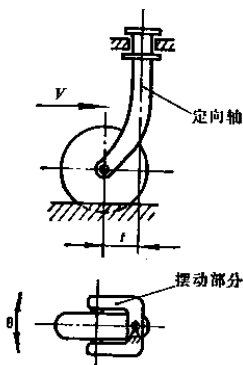


图1-1 机轮绕定向轴的转动

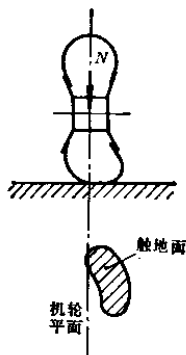


图1-2 轮胎相对于机轮的变形

向轮)或被锁住方向的尾轮是由起落架支柱及其支承结构的变形造成的,扭力臂等传动系统中有关方向的间隙,也是摆动角的一个来源。

第二、前轮摆振的另一个方面是轮胎相对于机轮的变形,这一般用轮胎触地面相对于机轮的位移来表示(图1-2)。

对于轮胎变形的假设和研究,是摆振理论中的专门问题。各种摆振理论的差异主要在于对轮胎变形的假设不同,包括所取轮胎变形参数的数目,这些参数和轮胎力及运动轨迹的关系等。

本书§2.3、§2.4、§3.3将说明,在所有主要摆振文献中对轮胎变形的假设,虽然提出的角度各有不同,其实在对应地替换符号后,各理论可以完全统一。因此,以文献作者姓氏来命名各种摆振理论并非合适。

第三、前轮摆振的又一个方面是定向轴本身的晃动,即前起落架支柱和前机身的晃动。在前轮摆振中考虑支柱运动对前轮摆动的影响,将增加振动系统的运动自由度。应用电子计算技术,有可能考虑全机(包括主轮在内)的运动。对机身及支柱运动自由度的简化,应根据结构动力特性和振动频率。在简化时,一般只考虑几个低阶的变形模态。图1-3列举了支柱的几种最简单的理想变形模态。



图1-3 支柱的几种理想变形模态

### §1.3 摆振研究的要旨

机轮摆振是一个系统动力学问题。而在轮胎变形和运动轨迹

之间，存在有非完整的约束，也就是说，用微分方程表示的运动约束关系。描述机轮摆振运动的微分方程组称为摆振运动方程组。

摆振是一种有害的振动，要防患未然。因此我们关心的是微分方程组的稳定性，或者说，是机轮中立位置(或正常运动状态)的稳定性问题。下面说明这种摆振稳定性的概念。

当飞机直线向前滑跑时，理想的情况是：机轮处于中立位置，它没有偏摆，也不受侧向力，这是一个侧向平衡的滚动状态。

自然界任何处于平衡状态的物体或系统都不免受到外界扰动。对于飞机前轮来说，引起偏摆的主要扰动有：飞机在侧风中偏航着陆，在滑跑时受到侧向撞击，前轮未处于中立位置时触地，对飞机进行操纵转弯或纠正航向（包括左右主轮不平衡的刹车，左右发动机不对称的推力，蹬方向舵操纵舵板等），机轮滚转时动不平衡等等。在这些扰动中，有的是瞬时作用的，有的是经常作用的。

根据扰动所引起的机轮的偏摆运动过程，可以决定机轮中立平衡位置的稳定性。

在不同的运动稳定性理论中，有不同的稳定性定义。本书采用著名的李亚普诺夫的经典定义<sup>[127]</sup>。这里我们不打算写出其严格的数学定义，而只说明各种有关的稳定概念。

首先，稳定性的概念是针对指定的运动参数而言的，对于某个(或某些)参数是稳定的情况，对于另外一些参数可以是不稳定的，反过来说也一样。在机轮摆振中，则是针对摆动及其牵连的运动而言的。

先讨论瞬时扰动的作用。当外界扰动消失之后，机轮后继的侧向摆动可分下列几种情况。

(1) 在经过一段过渡过程之后，机轮恢复到原来的中立平衡位置，过渡过程可以是衰减的振动(图 1-4(a))、单调的衰减(图 1-4(b))、或包含有暂时增大的衰减(图 1-4(c))。

这种情况，我们称机轮的中立平衡位置是渐近稳定的，也就

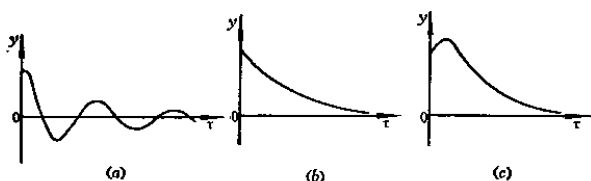


图1-4 渐近稳定的过渡过程

是说，机轮在受到外界扰动后能够自动恢复到中立平衡位置。这时我们通常说，机轮是摆振稳定的，它不会发生摆振。

(2) 在经过一段过渡过程之后，机轮进入到一种稳定的振动状态。当再次受到外界扰动后，机轮可恢复到这种稳定振动状态。过渡过程可以是减幅的（图1-5(a)）、或增幅的（图1-5(b)）。

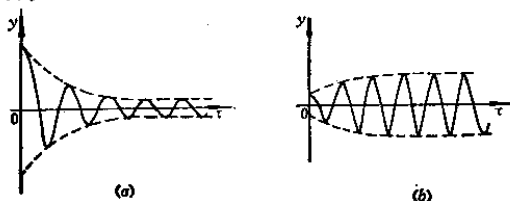


图1-5 不稳定的过渡过程

这种情况，我们称机轮的中立平衡位置是不稳定的，也就是说，机轮在受到外界扰动后，不能自动恢复到中立平衡位置；而机轮的某种振动状态是稳定的，在受到外界扰动后，它能够自动恢复。这时，我们通常说，机轮是摆振不稳定的，它会发生摆振。

(3) 过渡过程是不断发散的过程，它可以是单调地增大（图1-6(a)）、也可以是振荡地增大（图1-6(b)）。

这种情况，机轮显然也是不稳定的。我们把单调发散过程称为非周期性的不稳定，而把发散振动也称为机轮摆振。

在真实的起落架中，机轮摆动的单调发散过程是遇不到的。

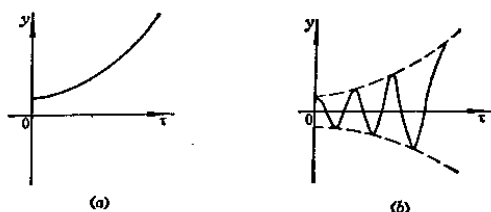


图1-6 发散过程

所以，在上述三种情况中，机轮会不会发生摆振就是机轮是不是不稳定的另一种说法。

(4) 机轮进入一种等幅的振动状态，振幅和扰动大小有关。当扰动足够小时，振幅可以小于任意预定值。当再次受到外界扰动后，振幅也相应发生变化。

这种情况，根据李亚普诺夫的定义，机轮的中立平衡位置是稳定的，但不是渐近稳定的。这时我们通常说，机轮摆振处于临界情况，或机轮刚刚会发生摆振。这种临界情况在实际上也是不容许的。

在线性理论（见 § 2.1）中，机轮摆振稳定性取决于运动微分方程组的系数，也就是取决于系统特性参数和飞机滑跑参数。我们把使摆振稳定的特性参数和滑跑参数组合的全体称为摆振的稳定区，而使摆振不稳定的参数组合的全体称为摆振的不稳定区。两个区域的分界线，或属于临界情况，或属于不稳定区的边界。

摆振研究的要旨，就是判断在特定的参数组合下摆振的稳定性，或者确定摆振的稳定区和不稳定区。对实际系统还必须考虑一定的稳定储备度，使参数组合处于稳定区的内部并充分离开边界。

上述摆振稳定性的问题在数学上归结为微分方程组的稳定性问题。线性微分方程组的稳定性问题已有多种成熟的解法。

真实的系统都是非线性的，非线性系统的稳定性研究比较困难，没有普遍的分析解法，要依靠数值解法。但李亚普诺夫的理

论证了，在小扰动下，由线性化假定得到的关于稳定性的结论，除了分界附近的情况以外，可以适用于真实系统。

在非线性系统中，扰动的大小影响到稳定区和不稳定区的分界线。这时我们把在任何扰动下都渐近稳定的系统称为全局稳定的；把在有限制条件的扰动下渐近稳定的系统称为条件稳定的。若系统在线性化假定下是渐近稳定的且具足够的稳定储备度，则这个系统在实际有限的扰动范围内是条件稳定的。

所以在摆振研究中，主要应用线性理论。对于实际系统再采取足够的稳定储备度就可以了。

上面我们讨论了在瞬时扰动下，机轮中立平衡位置的稳定性。下面介绍几点推广或补充的结论。

第一，可以证明，若机轮中立平衡位置在瞬时扰动下是渐近稳定的，则在经常扰动下也是稳定的。

第二、在线性假设下，机轮中立平衡位置的稳定性保证了机轮运动的稳定性。也就是说，飞机直线滑跑时稳定的前轮，在飞机操纵转弯时也必然是稳定的。反之，对不稳定的说法也一样。

第三、在考虑飞机前轮摆振的同时，我们往往要考虑飞机的滑跑方向稳定性。摆振稳定的飞机，其滑跑方向未必是稳定的，反之，摆振不稳定的飞机，其滑跑方向可以是稳定的，两者可以不一致。

第四、滑跑方向稳定的飞机，由于它没有固定的拘束，其侧向位置总是不稳定的。这就说明，在谈到稳定性时必须指明所针对的运动参数（或其函数）。

第五、一般对实际结构而言，在瞬时扰动下，按李亚普诺夫定义的渐近稳定系统可以正常工作；不稳定系统则不能正常工作。至于稳定而非渐近稳定的系统，即临界情况，是否能正常工作要视具体对象而定。如机轮摆角、飞机滑跑偏滚角或飞行侧滑角等必须要求是渐近稳定的；飞机滑跑方向或飞行航向等只要稳定就够了。

## § 1.4 机轮摆振的本质

本书区分机轮“摆动”和机轮“摆振”两个名词。摆动是指机轮一般的绕定向轴的偏摆运动（对于非转向轮，偏摆由结构变形引起），而“摆振”正象“颤振”一样，是一个专门的术语。

机轮摆振的定义是：以机轮摆动为主的一种自激振动。

自激振动是指自治系统稳定的或发散的周期振动。所谓自治系统，是指没有外界扰动作用的系统。飞机机轮在外界扰动消失之后，系统就是自治的。这时所发生的稳定的或发散的周期振动就称为机轮摆振。

不要把自治系统误解为不受外力的系统（这称为自由系统）。在机轮摆振时，地面对轮胎有作用力，不过这时外力不是明显地含有时间  $\tau$  的函数，它受系统本身的运动所控制，即是运动参数的函数。在非自治系统中，外界扰动（直接或间接地产生外力）是明显地含有时间  $\tau$  的函数（或随机函数），若不计系统的运动对外界扰动的影响，这就是一般的强迫振动或动力响应问题了。

也不要将自治系统误解为和外界没有能量交换的系统（这称为守恒系统）。在自激振动时，能量照例周期地源源不断地自能源输给振动系统，以补偿各种阻尼的消耗。对机轮摆振来说，能源是飞机前进时作的功。

对于线性的自治系统，运动方程组是线性的齐次微分方程；对于非自治系统，则是非齐次微分方程。自激振动就是齐次微分方程的稳定的或发散的周期解。

其次我们要注意定义中“以机轮摆动为主”这一点。

在 § 1.2 我们曾指出，机轮摆振分析中可以考虑全机包括主轮在内的运动。这时由整个运动微分方程组所解得的自激振动可以是多方面的：其中以机轮摆动为主（伴随有机身的运动和轮胎的变形）的自激振动是机轮摆振；以全机运动为主（伴随有机轮的摆动和轮胎的变形）的自激振动，则是属于飞机滑跑方向不稳定的振动。理论上还有以结构或轮胎局部变形为主的自激振动，

也不属于机轮摆振。

对自激振动作出上述区分是很重要的。由此，在建立摆振运动方程组时，就常对机身和支柱的运动作出简化，如略去主轮轮胎的运动约束或简化飞机的变形模态；反之，在建立飞机滑跑运动方程组时，就常对机轮及轮胎的运动作出简化，如采用简单的轮胎理论。

可以对自激振动作出上述区分和简化的条件是它们所处的频率范围不同，因而一种振动引起另一种振动的响应可略。若频率范围靠近，则必须综合考虑。

### § 1.5 前轮摆振的统计数据

本节我们收集实际飞机前轮摆振的一些统计数据，这对于系统的简化是很重要的。例如前述简化的合理性和摆振频率有关。

根据叩林斯 (Collins, R. L.)<sup>[3]</sup>、麦克布利立台 (McBrearity, J. F.)<sup>[4]</sup>、布拉克 (Black, R. J.)<sup>[5]</sup> 的统计，现代飞机前轮摆振的频率  $\nu$  ( $\nu = \omega/2\pi$ ) 大约在 5~30 赫的范围内。若用有些文献上称之为减缩频率，即对于滑跑路程的圆频率  $\Omega = \omega/V$  表示 ( $V$  为滑跑速度)，则相当于  $0.32 < \Omega < 6.6$  弧度/米的范围。图 1-7 表示了这个范围<sup>[5]</sup>。

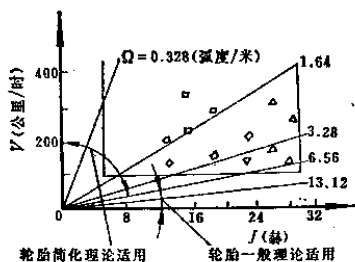


图1-7 摆振频率的统计资料

摆振轨迹的波长  $\lambda_r (=2\pi/\Omega)$  一般比轮胎触地面半长  $h_0$  要

大得多，前者为后者的 10 倍以上。

摆振时摆角的幅度一般不会太大，它和摆振频率及其他参数有关。对于正常类型的摆振，即所谓“轮胎型”摆振，在严重的情况下，例如在频率为 7 赫时摆幅可达到  $6^\circ$  左右<sup>[6]</sup>。当稳定距较小，摆振频率也较小时，摆幅也可能超过  $10^\circ \sim 20^\circ$ 。对于摆角主要由起落架支柱或减摆器传动系统弹性变形提供的所谓“结构型”摆振，相对地说频率要高些而摆幅要小些。对于摆角主要由摆动系统中的间隙或减摆器中的阻尼空程提供的所谓“间隙型”摆振，也是小摆幅的。所以对摆振现象的频率及摆幅大小进行观察，是有助于区别所发生的摆振的类型的。假如观察到机身发生频率较低，似乎历历可数，而摆幅又较大的摆动，则很可能是属于飞机滑跑方向不稳定的振动。

## § 1.6 运动摆振

在着手分析机轮摆振运动的时候，我们首先要关心轮胎的行为。

在早期的摆振文献中，例如文献[101]，往往不包括轮胎的变形，这种简化对于飞机机轮的充气轮胎是不适用的。在后来的摆振文献中，则都已考虑轮胎的变形。所谓刚性轮胎，不过是作为弹性轮胎的一种极端情况。有些文献为了分析方便，企图在刚性轮胎假定下引出摆振的某些一般规律，这样得到的结论是不足信的。关于这一点，下面还要具体举例说明。

充气轮胎在机轮摆振中起着重要的作用，如 § 1.2 所述，它主要有两方面的特性，一方面是变形和受力的关系，称为变形特性；另一方面是变形和滚动轨迹的关系，称为滚动特性。在较近的摆振文献<sup>[6, 17, 18]</sup>中，也有直接研究机轮运动和轮胎受力间的关系，即所谓机轮-轮胎综合的力学特性。关于轮胎的这些特性，在第二、三、四章内详细介绍。

早期对于阐明轮胎滚动特性有很大帮助的是一个所谓“运动摆振”（或称“静态摆振”）的试验，详见文献[2]。该文作者康

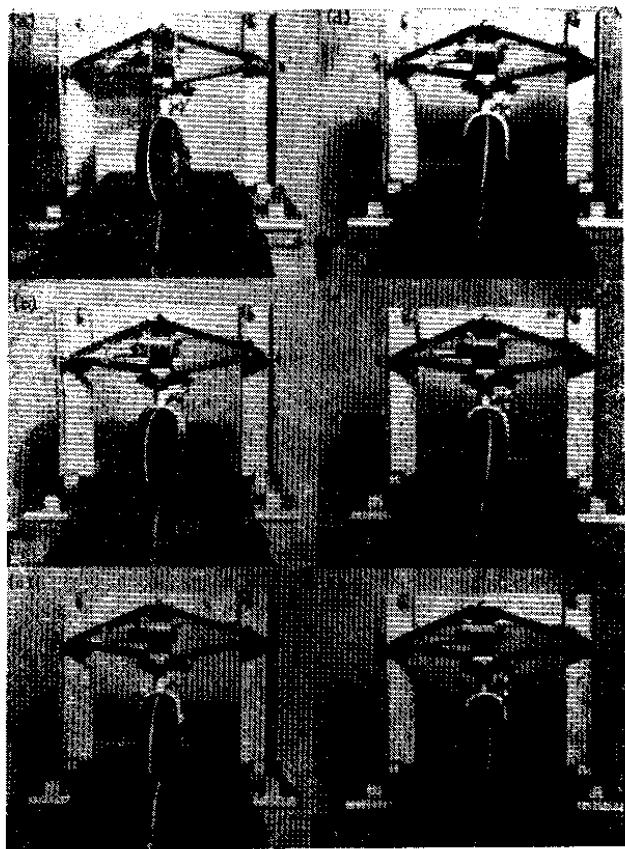


图1-8 运动摆振