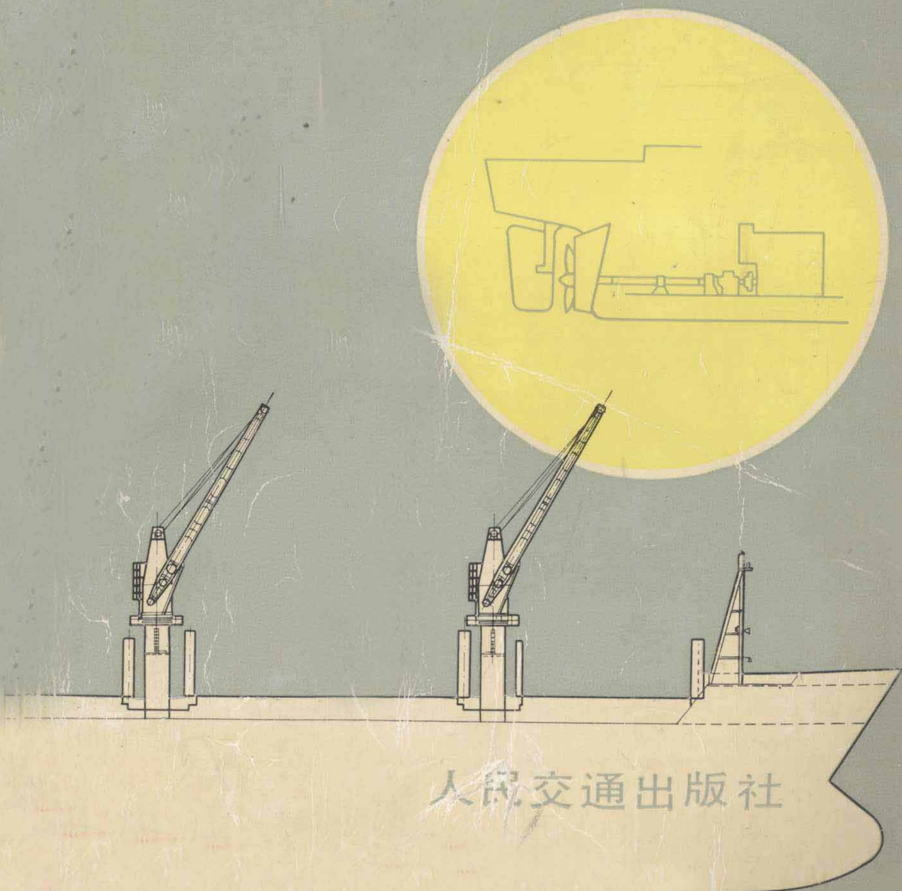
本书荣获1982年全国优秀科技图书二等奖

船舶柴油机轴系扭转振动

许运秀　李宗焜　　　等编著



人民交通出版社

船舶柴油机轴系扭转振动

许运秀　李宗焜　等编著

人 民 交 通 出 版 社

内 容 提 要

本书是根据作者多年来从事扭转振动工作的一些经验体会编著而成。书中内容除了对扭振的基本原理作了简要的介绍以外，着重阐述了如何解决实际的扭振问题。

书中对扭振当量系统转化、自由振动、干扰力矩、阻尼力矩及共振计算方法，除引用了一些新的计算公式以外，还增加了作者的经验公式和计算方法。同时，还列出了一部分柴油机、水力测功器及弹性联轴节的当量转化数据。本书比较详细地阐述了扭转振动许用应力的决定方法和轴系扭振的一般特性。另外，对典型减振器的结构特点和设计方法等也作了一些简要的叙述。

本书可供内燃机和船舶动力装置设计、制造、使用和检验部门的技术人员参考使用，亦可供高等院校内燃机和船舶动力装置专业的师生作教学参考书。

船舶柴油机轴系扭转振动

许运秀　李宗焜　等编著

人民交通出版社出版

新华书店北京发行所发行

各 地 新 华 书 店 经 售

人民交通出版社印刷厂印

开本：787×1092 $\frac{1}{32}$　印张：9.5　字数：207 千

1 9 8 2 年7月　第1版

1 9 8 4 年4月　第1版　第2次印刷

印数：2,601—4,600册　定价：1.85元

前　言

多年来，我们在船舶柴油机轴系扭转振动方面作了一些测试、计算和分析研究，在实践中取得了一些经验体会。为了总结交流这方面的工作，以供从事柴油机和船舶动力装置设计、制造和使用单位的技术人员参考使用，在有关单位的支持下，我们编著了此书。

本书旨在解决实际问题为主，对扭振问题作了较详细的介绍，并提出了作者的经验公式和计算方法，期望能达到实用的目的。但是，在实践中，还会出现比较复杂的扭振问题：如低速柴油机往复惯量产生的二次共振，以及一些新型减振器和弹性联轴节的性能和设计计算方法等。这些，在本书中都未作深入探讨，有待今后进一步研究提高。

本书作者有张公安（第一章）、李宗焜（第二、三章）、许运秀（第四、八章）、黄卓超（第五章）、聂德耀（第六章、第九章6.7节）、陆赞能（第七章）、曹关桐（第九章其余）。本书第一章～第三章及第九章由李宗焜校阅，全书由许运秀统核。由于水平所限，书中缺点和错误在所难免，恳望同行和读者批评指正，作者将不胜感激。

1981年8月于上海

目　录

第一章　扭转振动的基本原理

§1-1　定　　义

广义地说，振动就是周期性的往复运动，即经过一定的时间间隔以后，在振动系统中的所有质点均能重复本身的运动。这一定的时间间隔叫做振动的周期，一般用符号 T 表示，单位为秒。位移 x 对时间 t 的图解关系是一条曲线，例如图1.1.1(a)所示为一柴油机动力装置轴系自由端上，由扭振仪所测得的振动曲线。一般，振动规律可以直接用正弦或余弦波来表示的称简谐运动。在简谐运动中，位移x和时间 t 之间的关系可以表示为：

$$x = x_0 \sin\omega t \tag{1.1.1}$$

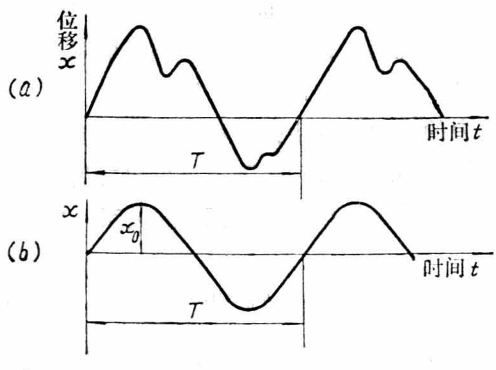


图　1.1.1

图1.1.1(b)所示为上述同一柴油机动力装置轴系自由端上，由扭振仪测得的另一转速下的运动曲线，它所描述的这种运动就是简谐运动。曲线位移的最大值 x_0 叫做振幅。

扭转振动就是在变化扭矩的作用下所产生的周期性运动，简称扭振。所以，凡是不均匀输出扭矩及吸收扭矩的机械装置中，均有可能出现扭转振动现象。如柴油机带动的任何设备或装置、电动机空压机组、电动机泵组等。

最简单的扭转振动形式如图 1.1.2 所示。其圆杆的一端

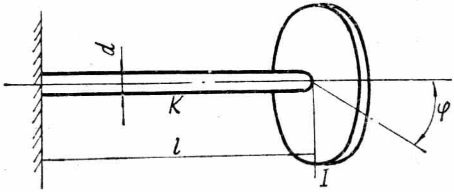


图 1.1.2

固定，另一端装一圆盘，由于圆杆的直径远小于圆盘直径，所以在受扭矩作用后，圆杆的扭转变形量会远大于圆盘。可以认为，圆杆是没有质量的弹性体，圆盘是只有质量的刚体。设圆杆直径为 d，长度为 l，圆盘的转动惯量为 I，若在圆盘上加一扭矩后立即释放，则圆盘就在圆杆的弹性力及圆盘惯性力的作用下发生扭转振动。在无其他任何阻尼的情况下发生的扭振，则称为无阻尼自由扭转振动。圆盘发生的简谐扭转振动的角位移 φ 和时间 t 的关系，参照式（1.1.1）可得：

$$\varphi = \varphi_0 \sin\omega t \qquad (1.1.2)$$

在扭转振动中，用 $f=\dfrac{1}{T}$ 表示周期的倒数，即每秒钟振动的循环数，称振动的秒频率，单位为周/秒或次/秒，通

常把每秒周数叫赫兹，而把每分钟振动的周数叫分钟频率，单位为周/分或次/分，用 F 表示，即 $F=60f$。把 ω 叫做振动的圆频率，以每秒弧度数来量度。

ω、f、F 和 T 之间的关系如下：从方程(1.1.1)、(1.1.2)和图1.1.1(b)中可知，一个周期 ωt 经过360度或 2π 弧度后正弦函数又恢复到它的初值。因此，当 $\omega t=2\pi$ 时，时间间隔 t 就等于周期 T，即：

$$T=\frac{2\pi}{\omega}(\text{秒}) \qquad (1.1.3)$$

因 f 是 T 的倒数，所以

$$f=\frac{1}{T}=\frac{\omega}{2\pi}(\text{周/秒}) \qquad (1.1.4)$$

$$F=60f=\frac{30}{\pi}\cdot\omega(\text{周/分}) \qquad (1.1.5)$$

扭转振动的圆频率为：

$$\omega=\frac{d\varphi}{dt}=\sqrt{\frac{K}{I}}(\text{弧度/秒}) \qquad (1.1.6)$$

式中：K——直径 d 圆杆的扭转刚度，其值按下式计算：

$$K=\frac{GJ}{l}(\text{公斤·厘米/弧度}) \qquad (1.1.7)$$

G——轴材料的剪切弹性模数，公斤/厘米^2；

J——圆轴的极惯性矩，厘米^4；

l——轴长，厘米。

在已知角位移 $\varphi=\varphi_0\sin\omega t$ 的简谐运动中，振动角速度可用角位移对于时间的微分来求得，即：

$$\frac{d\varphi}{dt}=\dot{\varphi}=\varphi_0\omega\cos\omega t \qquad (1.1.8)$$

所以，振动角速度也是简谐函数，并且具有最大值 $\omega\varphi_0$。振

动角加速度：

$$\frac{d\phi}{dt}=\ddot{\varphi}=-\varphi_0\omega^2\sin\omega t \qquad (1.1.9)$$

也是简谐函数，并具有最大值 $\varphi_0\omega^2$。

此外，若把圆盘的角位移 φ 用圆盘外周长上的线位移 a 表示，则振动的线位移如下式：

$$x=a\sin\omega t \qquad (1.1.10)$$

由图 1.1.3 所示，已知两个简谐振动的方程为

$x_1=a_1\sin\omega t$ 和 $x_2=a_2\sin(\omega t+\theta)$。

由于 θ 的存在，这两个振动并不在同一时间获得它们的最大位移，而是一个振动比另一个振动滞后 $\frac{\theta}{\omega}$ 秒，称 θ 为相位角或两个振动的相位差。由图 1.1.3 及其表达式可知，这两个振动有着同样的频率 ω，因此就有着同样的 f 及 F。相位角只有对相同频率的两个振动才有意义，如果频率不同，相位角就无意义了。

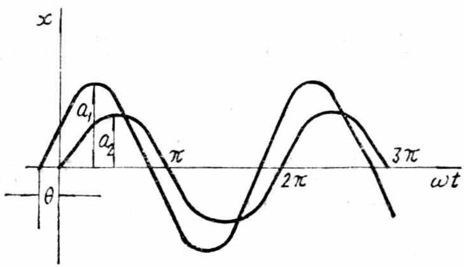


图 1.1.3

上面讨论的振动情况，实际上是单质量无阻尼自由振动，其频率值与结构参数有关；其振幅值随时间 t 而成正弦波变化。

§1-2　单质量有阻尼自由振动

作为一个振动体来说，当振动一发生时，同时也发生使振动减少的力或扭矩，这就称为阻尼力或阻尼扭矩。当阻尼很大时，也会使系统的固有频率值有所降低。本节主要讨论单质量有阻尼自由振动平衡方程的建立。

图1.2.1中下面为所加的阻尼器。可以认为阻尼扭矩及阻尼系数 C 与质量的运动速度成正比，而且阻尼扭矩的方向与振动速度的方向相反，即

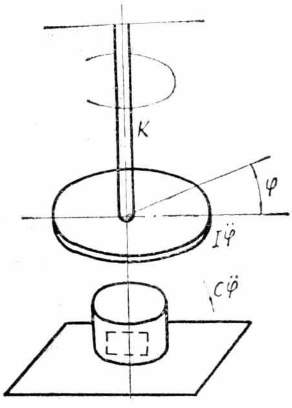


图　1.2.1

$$T_\mu = -C\dot{\varphi} \qquad (1.2.1)$$

这时，该系统的运动方程为

$$I\ddot{\varphi} = -C\dot{\varphi} - K\varphi \qquad (1.2.2)$$

移项整理得：

$$\ddot{\varphi} + \frac{C}{I}\dot{\varphi} + \frac{K}{I}\varphi = 0$$

$$(1.2.3)$$

设

$$\frac{C}{I} = 2p \text{ 则 } p = \frac{C}{2I} \qquad (1.2.4)$$

$$\frac{K}{I} = \omega_n^2 \quad \text{则 } \omega_n = \sqrt{\frac{K}{I}} \qquad (1.2.5)$$

则式(1.2.3)还可写成：

$$\ddot{\varphi} + 2p\dot{\varphi} + \omega_n^2\varphi = 0 \qquad (1.2.6)$$

上式为常系数二阶线性微分方程，则通解为：

$$\varphi = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t}$$

$$= C_1 e^{(-p+\sqrt{p^2-\omega_n^2})t} + C_2 e^{(-p-\sqrt{p^2-\omega_n^2})t}$$

$$(1.2.7)$$

式(1.2.7)表明，φ 是随时间 t 而减小的渐减性对数曲线。就是说，由于阻尼的存在，当初始的外力一经取消，圆盘的角位移很快就消失，最后为零，并无扭振产生。

§1-3 单质量有阻尼强制振动

实际的振动系统，不仅存在着阻尼，而且还有周期性干扰力矩作用。当干扰力矩的圆频率 ω_T 与系统的固有振动圆频率 ω_n 相同时，系统就发生共振。

一、单质量有阻尼强制振动方程的建立

单质量扭振系统如图 1.2.1 所示，力的平衡方程如公式(1.2.2)。设作用在系统上的周期性干扰力矩 T 为：

$$T = T_1 \sin\omega_T t$$

这时可写出单质量有阻尼强制振动的力的平衡方程：

$$I\ddot{\varphi} = -C\dot{\varphi} - K\varphi + T_1 \sin\omega_T t$$

$$I\ddot{\varphi} + C\dot{\varphi} + K\varphi = T_1 \sin\omega_T t \qquad (1.3.1)$$

这是单质量扭振系统的强制振动微分方程，将式除以 I 得：

$$\ddot{\varphi} + \frac{C}{I}\dot{\varphi} + \frac{K}{I}\varphi = \frac{T_1}{I}\sin\omega_T t \qquad (1.3.2)$$

令 $\frac{T_1}{I} = b$，$\frac{C}{I} = 2p$，$\frac{K}{I} = \omega^2{}_n$，则式(1.3.2)可写成：

$$\ddot{\varphi} + 2p\dot{\varphi} + \omega_n^2\varphi = b\sin\omega_T t \qquad (1.3.3)$$

求得通解：

$$\varphi = a e^{-pt} \sin(\sqrt{\omega_n^2 - p^2}\, t + \theta) \qquad (1.3.4)$$

当考虑式(1.3.3)非齐次的解时，还必须找一特解。现设某特解为：

$$\varphi = A\sin\omega_T t + B\cos\omega_T t \qquad (1.3.5)$$

式中：A 和B为待定系数，此解的一次及二次导数分别为：

$$\dot{\varphi} = \omega_T A\cos\omega_T t - \omega_T B\sin\omega_T t \tag{1.3.6}$$

$$\ddot{\varphi} = -\omega_T^2 A\sin\omega_T t - \omega_T^2 B\cos\omega_T t \tag{1.3.7}$$

代入式(1.3.3)中得：

$$\begin{aligned} & -\omega_T^2 A\sin\omega_T t - \omega_T^2 B\cos\omega_T t + 2p(\omega_T A\cos\omega_T t \\ & -\omega_T B\sin\omega_T t) + \omega_n^2(A\sin\omega_T t + B\cos\omega_T t) \\ = & \; b\sin\omega_T t \end{aligned} \tag{1.3.8}$$

整理后得：

$$\begin{aligned} & -(\omega_T^2 A + 2p\omega_T B - \omega_n^2 A + b)\sin\omega_T t \\ & -(\omega_T^2 B - 2p\omega_T A - \omega_n^2 B)\cos\omega_T t = 0 \end{aligned} \tag{1.3.9}$$

要使式(1.3.9)成立，必须使 sin 项及 cos 项的系数分别为零，即：

$$\left.\begin{aligned} (\omega_n^2 - \omega_T^2)A - 2p\omega_T B = b \\ 2p\omega_T A + (\omega_n^2 - \omega_T^2)B = 0 \end{aligned}\right\} \tag{1.3.10}$$

解此联立方程即可求得 A、B 系数值：

$$A = \frac{b(\omega_n^2 - \omega_T^2)}{(\omega_n^2 - \omega_T^2)^2 + (2p\omega_T)^2}$$

$$B = \frac{-2p\omega_T b}{(\omega_n^2 - \omega_T^2)^2 + (2p\,\omega_T)^2}$$

如令式(1.3.5) 中的系数 $A = a\cos\xi$；$B = a\sin\xi$，则又可表示成：

$$\varphi = a\sin(\omega_T t + \xi) \tag{1.3.11}$$

其中：

$$\left.\begin{aligned} a &= \sqrt{A^2 + B^2} = \frac{b}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega_T^2)^2 + (2p\omega_T)^2}} \\ \xi &= \arctan\frac{-2p\omega_T}{(\omega_n^2 - \omega_T^2)} \end{aligned}\right\} \tag{1.3.12}$$

由于 $\tan\xi$ 为负值，其相位要比 $A\sin\omega_T t$ 滞后 ξ 度角，其波形为正弦波。按照式(1.3.4)及(1.3.11)、(1.3.12)可得式(1.3.3)的解为：

$$\varphi = ae^{-pt}\sin(\sqrt{\omega_n^2 - p^2}\cdot t + \theta) + \frac{b}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega_T^2)^2 + (2p\omega_T)^2}}\sin(\omega_T t - \xi) \tag{1.3.13}$$

其中： $$\xi = \arctan\frac{2p\omega_T}{(\omega_n^2 - \omega_T^2)} \tag{1.3.14}$$

式(1.3.13)的第一项表示有阻尼自由振动，第二项表示受干扰力矩引起的强制振动。图 1.3.1 也就是这两种振动合成的振动情况。

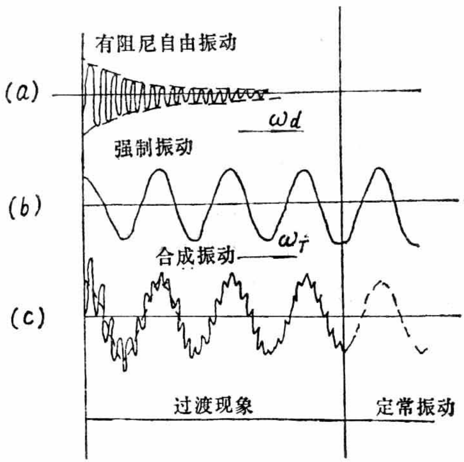


图 1.3.1

二、强制振动频率 f_T 对振动系统的影响

图 1.3.1 中，固有振动频率为干扰力矩频率的 8 倍，图

中（a）为有阻尼自由振动，（b）为干扰力矩引起的振动，两个波形的合成波形即为图中（c）所示。在$t=0$时，强制振动项为最大值，有阻尼自由振动的振幅滞后一初相位，但振幅仍相当大，所以在最初一个周期的合成振幅约为强制振动振幅的两倍。以后，有阻尼自由振动的振幅按对数衰减，最后只剩下强迫振动，其过程如图中（c）。假如两者的频率接近，就会出现共振的现象，但一般相差较大的情况为多。最初一个阶段是所谓过渡过程，自由振动只在这个阶段存在，以后就消失了。所以，实际上只存在有阻尼的强制振动，即主要就是式(1.3.13)的第二项的振动，其振幅和相位角为：

$$A_1=\frac{b}{\sqrt{(\omega_n^2-\omega_T^2)^2+(2p\omega_T)^2}} \quad (1.3.15)$$

$$\xi=\arctan\frac{2p\omega_T}{(\omega_n^2-\omega_T^2)} \quad (1.3.16)$$

由于$b=\dfrac{T_1}{I}$，$\omega_n^2=\dfrac{K}{I}$，另外从圆杆受扭可知，圆杆的扭角A_{st}与扭矩T_1成正比，与圆杆的刚度K成反比，即：

$$A_{st}=\frac{T_1}{K}\text{（弧度）} \quad (1.3.17)$$

A_{st}就是相当于圆杆受静扭矩作用时产生的扭角，称为静振幅或平衡振幅。式(1.3.15)可以改写成下式：

$$A_1=\frac{\dfrac{b}{\omega_n^2}}{\sqrt{\left(1-\dfrac{\omega_T^2}{\omega_n^2}\right)^2+\left(\dfrac{2p\omega_T}{\omega_n^2}\right)^2}}$$

$$=\frac{A_{st}}{\sqrt{\left[1-\left(\dfrac{f_T}{f_n}\right)^2\right]^2+\left(\dfrac{hf_T}{f_n}\right)^2}} \quad (1.3.18)$$

式中：f_n——系统无阻尼固有振动频率，周/秒；

f_T—— 强制振动干扰力频率，周/秒；

$h=\dfrac{2p}{\omega_n}=\dfrac{C}{\sqrt{IK}}=\dfrac{2C}{C_c}$——由阻尼力矩决定的系数，叫阻尼性系数。

式(1.3.18)还可以改写成下式：

$$M=\frac{A_1}{A_{st}}=\frac{1}{\sqrt{\left[1-\left(\frac{f_T}{f_n}\right)^2\right]^2+\left(\frac{hf_T}{f_n}\right)^2}}\quad(1.3.19)$$

式中左边表示动振幅A_1与静振幅A_{st}之比，称放大倍数，是一个无因次量，一般用M表示。

图(1.3.2)表示以h为参数时，振幅比$\dfrac{A_1}{A_{st}}$与频率比$\left(\dfrac{f_T}{f_n}\right)$的关系曲线，此曲线图给出了$\dfrac{f_T}{f_n}$为0、1……∞时的几个情况。现分析如下：

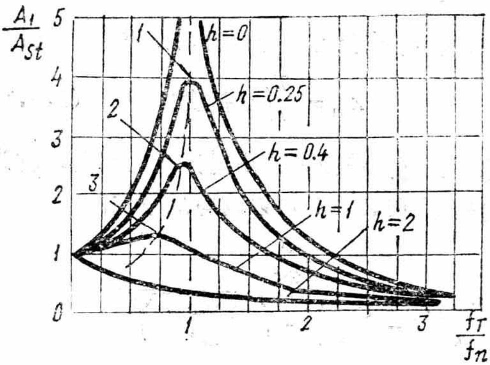


图 1.3.2

1.频率比$\dfrac{f_T}{f_n}=0$。即干扰力矩频率f_T与无阻尼固有振动