

175

电力技术继续教育科目指南丛书

汽轮发电机组振动

四川省电力工业局
四川省电力教育协会

编



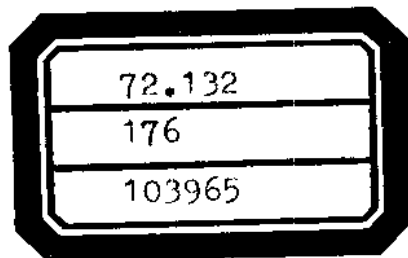
中国电力出版社

72.132
176
103965

电力技术继续教育科目指南丛书

汽轮发电机组振动

四川省电力工业局
四川省电力教育协会 编



中国电力出版社

2F86/07
内 容 提 要

本书从理论和实践上阐述了汽轮发电机组运行过程中的振动现象,振动故障诊断与分析,以及振动的消除方法等。内容有四章:振动理论;振动测试技术;机组振动故障诊断;典型振动故障分析实例。

本书作为汽轮机专业具有高、中级职称的在职专业技术人员、管理人员的继续教育培训教材,也可作为大专院校参考书。

图书在版编目(CIP)数据

汽轮发电机组振动/四川省电力工业局四川省电力教育
协会编. —北京:中国电力出版社,1998

(电力技术继续教育科目指南丛书)

ISBN 7-80125-710-3

I. 汽… II. 四… III. 汽轮发电机组·振动 IV. TM311.

14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 09223 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 邮政编码 100044)

水电印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1998年5月第一版 1999年1月北京第二次印刷

787毫米×1092毫米 32开本 3.5印张 56千字

印数 4091—7090册 定价 9.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

关于推荐使用 “电力技术继续教育丛书” 的通知

教成 [1998] 11 号

为了促进电力企业专业管理人员和专业技术人员的继续教育和岗位培训工作，四川省电力工业局、四川省电力教育协会组织编写，并由中国电力出版社出版了“电力技术继续教育丛书”八种，谨向各单位推荐使用。

中电联教育培训部

一九九八年三月十六日

《电力技术继续教育科目指南丛书》

编 委 会

主任委员： 晏玉清
副主任委员： 王龙陵 沈迪民 丁福煜 杨纯龙
委 员： 赵兴康 朱国俊 王 旭 胡家明
 李小白 熊回川 张德范 向 进
 刘兴仁 杨胜渤 廖永纲 林文静
总 编： 丁福煜
副 总 编： 王 旭 杨胜渤
主 审： 赵兴康 朱国俊

《汽轮发电机组振动》

编 审 人 员

主 编： 陈绍彬
编 写 人： 孙大川 张 鸥
审 稿 人： 潘治平 林顺卿

序

为贯彻《中国教育改革和发展纲要》中提出的职工教育要“把大力开展岗位培训和继续教育作为重点，重视从业人员的知识更新”的要求，使职工教育工作更好地为电力系统专业技术人员和管理人员拓展专业知识，提高专业技术水平和管理能力服务，为电力企业安全文明生产“双达标”、“创一流”服务，为促进电力事业的发展服务，在四川省电力工业局的领导下，四川省电力教育协会与四川省电力工业局教育处组织一批专家、教授和工程技术人员，联系电力系统的实际，结合国内外电力技术现状及发展方向，贯彻继续教育面向现代化、面向世界、面向未来的方针，注重针对性、实用性、科学性和先进性，编写了这一套《电力技术继续教育科目指南丛书》，作为对电力系统专业技术人员进行继续教育的培训教材，也为电力系统的管理人员提供一套学习资料。

本丛书共十一册，其中：《高压输电线路微机保护》、《电网无功电压管理与电压稳定》、《电网防污闪技术》、《汽轮发电机组振动》、《变电所自动化技术与无人值班》、《水电站综合自动化》、《信息高速公路与企业网》、《循环流化床燃烧技术》等八册由中国电力

出版社出版发行。另三册，即《数字数据网（DDN）通信技术》、《分散控制系统（DCS）及其应用》、《热管应用及前景》由四川省电力工业局作为资料印发。

本丛书在编写与审稿全过程中，得到了四川省电力工业局领导和有关处室的大力支持与帮助。承担编写工作的四川电力试验研究院、四川电力调度局、重庆电力职工大学、成都电力职工大学、重庆大学、成都电业局、龚咀水力发电总厂、内江发电总厂、成都水力发电学校、都江堰电力设备厂等单位以及重庆市电力工业局为丛书的编写提供了良好的工作条件，给予了极大的支持，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，错漏在所难免，诚望读者指正。

《电力技术继续教育科目指南丛书》

编 委 会

1998年3月

前 言

为了搞好继续教育，提高专业技术人员的技术水平，保证汽轮发电机组运行的安全性，我们编写了这本《汽轮发电机组振动》一书，以供汽轮机专业具有高、中级职称的在职技术人员和管理人员学习。

本书主要内容有：振动理论、振动测试技术、振动故障诊断及典型振动分析实例。内容具有一定的深度和难度。

为了使学员提高汽轮发电机组的振动理论和解决汽轮发电机组振动问题的技术水平，教学时应采取理论和实践相结合，书本知识和现场实际相结合，因材施教，循序渐进的教学方法；并组织学员考察出现典型振动的电厂，访问国内有名的振动专家等活动。学员还应注意学习的系统性和完整性，防止轻理论重实际的倾向，提高解决振动问题的实际能力。

本书应以 40 个学时完成。

编 者

1998 年 3 月

目 录

序

前言

第一章 振动理论	1
第一节 振动系统	1
第二节 简谐振动	2
第三节 谐波分析	3
第四节 单圆盘转子无阻尼振动	5
一、单圆盘转子无阻尼自由振动； 二、单圆盘转子无阻 尼强迫振动	
第五节 单圆盘转子有阻尼强迫振动	14
第六节 汽轮发电机组振动的允许值	22
第七节 振动的危害	24
第二章 振动测试技术	26
第一节 测量的主要内容	26
第二节 机组振动测量方法	27
一、测量基频振动和振动频谱； 二、轴承座动刚度的检测； 三、在各种运行参数下测量机组的振动； 四、机组不稳定 振动的测试	
第三节 振动测试表计	30
一、电涡流传感器； 二、速度传感器； 三、加速度传 感器； 四、电涡流传感器、速度传感器和加速度传感器	

的优缺点

第三章 机组振动故障诊断	37
第一节 故障诊断的种类	37
第二节 机组振动故障诊断的思维方法	37
一、直观寻找； 二、振动故障原因分析； 三、振动故障诊断	
第三节 汽轮发电机组振动分类	40
第四节 稳定普通强迫振动	41
一、转子不平衡离心力； 二、联轴器故障和转子不对中引起的激振力； 三、轴颈不圆度过大引起的激振力	
第五节 振幅、激振力和轴承座动刚度的关系	44
第六节 不稳定普通强迫振动	45
一、引起不稳定普通强迫振动的激振力； 二、不稳定不平衡故障的分类； 三、不稳定不平衡量及其轴向位置的判断； 四、随机变化的不稳定不平衡； 五、随时间变化的不稳定不平衡	
第七节 振动频率与转子转速不相符合的强迫振动 ...	56
一、电磁激振； 二、高次谐波共振； 三、分谐波共振； 四、随机振动； 五、撞击振动	
第八节 轴瓦油膜自激振动	59
一、半速涡动和油膜振荡； 二、轴瓦自激振荡的机理； 三、轴瓦自激振动的原因； 四、轴瓦自激振动的诊断	
第九节 参数振动	65
一、参数振动机理； 二、参数振动的诊断； 三、消除振动措施	
第十节 轴系的扭转振动	67
第四章 典型振动故障分析实例	69

第一节 发电机转子热弯曲的故障诊断	69
一、机组振动状况； 二、振动故障诊断	
第二节 机组带负荷后振动增大的诊断	72
一、机组振动概况； 二、振动故障诊断； 三、发电机转子平衡	
第三节 机组启动中振动过大的故障诊断	75
一、机组振动概况； 二、振动测试； 三、振动故障诊断； 四、故障处理结果	
第四节 轴瓦自激振动	77
一、振动现象； 二、振动原因分析； 三、故障处理	
第五节 摩擦激振	79
一、振动现象； 二、揭缸检查； 三、处理措施； 四、处理结果	
第六节 齿型联轴器引起的振动突变	81
一、机组振动情况； 二、联轴器齿套错位的振动变化； 三、振动突变的分析及处理	
第七节 消除落地式轴承轴向振动	84
第八节 减少汽轮发电机转子动平衡启动次数	89
一、振动状况； 二、振动分析； 三、找平衡程序	
参考文献	96

第一章

振 动 理 论

第一节 振 动 系 统

任何物体都具有弹性，一个或几个弹性体连接在一起，称为弹性系统。一个弹簧末端拴一个物体，弹簧和物体组成一个弹性系统；一个或多个旋转的转子与其相应的支持轴承也组成一个弹性系统。在火力发电厂内，诸如各种水泵、引风机、送风机及汽轮发电机组等。

弹簧末端拴着一个物体，如果不受外力，物体则是静止的，并处于平衡位置。如果用一个外力拉物体，使弹簧伸长，然后将力撤去，这个物体就会在平衡位置附近来回运动。如果系统没有受到阻力，这种运动将会继续下去。

物体在其平衡位置附近来回运动的现象，称为物体的振动。

用一个坐标就能确定某个弹性系统振动的位置，这个弹性系统称为具有一个自由度的弹性系统。若需要用多个独立的坐标才能确定弹性系统的位置，这个

弹性系统就具有多个自由度。

第二节 简 谐 振 动

实际中的振动是很复杂的，为了容易掌握，我们先研究最简单的一种振动，即简谐振动。

简谐振动的规律是，其运动的位移、速度和加速度按正弦或余弦函数规律变化。凡是周期振动，如果不是简谐振动，就是不同振幅和不同频率的多个简谐振动的合成。

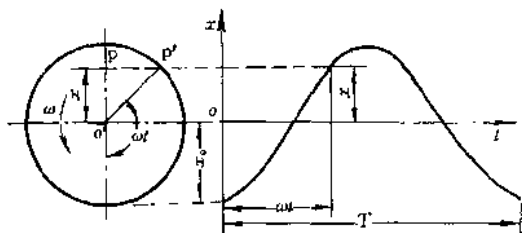


图 1-1 简谐振动

如图 1-1 所示，p 点在一个半径为 x_0 的圆周上作角速度为 ω 的匀速转动，p 点在 x 垂直轴上的投影的运动规律是：

$$x = x_0 \cos \omega t \quad (1-1)$$

x 是 p 点在垂直轴上 t 时间内运动的位移； ωt 是 p 点在 t 时间内转过的角度。

命 $f = \omega / (2\pi)$ ，则 f 是振动频率，即单位时间内

的振动次数。

命 $T = 1/f$ ，则 T 是振动周期。

p 点的运动速度可用 p 点的位移对时间取导数求得：

$$v = \frac{dx}{dt} = x_0 \omega \cos(\omega t + \pi/2) \quad (1-2)$$

p 点的运动加速度，可用它的速度对时间取导数求得：

$$a = \frac{dv}{dt} = x_0 \omega^2 \cos(\omega t + \pi) \quad (1-3)$$

由此可见，振动的位移是简谐振动，则它的速度和加速度也是简谐振动，只是速度比位移超前 90° ，加速度比位移超前了 180° 。

第三节 谐波分析

实际中所见的振动，大多数是非简谐振动，它比简谐振动要复杂得多。但是，它的波形仍为周期函数。为了分析方便，可以用傅立叶级数展开，然后分析该波形在多大振幅内含有哪几种频率分量。这种分析方法称为傅立叶分析或谐波分析。

例如一个周期为 T 的非简谐振动，自变量为 t ，其周期函数为 $F(t)$ ，可展开成三角函数的级数和：

$$F(t) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + \dots$$

$$\begin{aligned}
& + b_1 \sin \omega t + b_2 \sin 2\omega t + \cdots \\
& = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t)
\end{aligned} \tag{1-4}$$

也可表示为

$$\begin{aligned}
F(t) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega t + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\omega t \\
& \quad (n = 0, 1, 2, \cdots)
\end{aligned} \tag{1-5}$$

式 (1-5) 称为傅立叶级数。

对式 (1-5) 等号两边积分：

$$\begin{aligned}
\int_{-\pi}^{+\pi} F(t) dt &= \int_{-\pi}^{+\pi} \frac{a_0}{2} dt + \int_{-\pi}^{+\pi} \left(\sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega t \right. \\
& \quad \left. + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\omega t \right) dt
\end{aligned}$$

等号右边第二项积分为 0，得

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} F(t) dt \tag{1-6}$$

在式 (1-5) 等号两边同乘以 $\cos n\omega t$ 后积分，得

$$\begin{aligned}
\int_{-\pi}^{+\pi} F(t) \cos n\omega t dt &= \int_{-\pi}^{+\pi} \frac{a_0}{2} \cos n\omega t dt \\
&+ \int_{-\pi}^{+\pi} \left(\sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega t + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\omega t \right) \cos n\omega t dt
\end{aligned}$$

$$\text{式中} \quad a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} F(t) \cos n\omega t dt \tag{1-7}$$

类似的，在式 (1-5) 等号两边同乘以 $\sin n\omega t$ 后积分，

可得

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} F(t) \sin n\omega t dt \quad (1-8)$$

式(1-4)和式(1-5)的等号右边称为 $F(t)$ 的傅立叶级数展开式, a_n 和 b_n 称为傅立叶系数。

由式(1-4)到式(1-8)可以看出: $F(t)$ 是由不变的分量和频率为 $1/T$ 的整数倍的频率分量组成的, 其中, $f_1 = 1/T$ 称为基频, 该频率分量称为基波, 大小为基频 n 倍的频率称为 n 阶高频, 其频率分量称为 n 阶高次波。

如果将式(1-4)右边合成, 得

$$F(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (1-9)$$

式中 $c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$; $\varphi_n = \tan^{-1} \frac{b_n}{a_n}$

这种振幅 c_n 称为 $f_n = n/T$ 的谱分量。表示对应于各频率的振幅的图为频率谱。前面已表述过周期函数可表示为傅立叶级数, 其谱分量仅离散地出现在大小为基频的整数倍之处, 故称之为线谱。

第四节 单圆盘转子无阻尼振动

一、单圆盘转子无阻尼自由振动

图 1-2 所示为单圆盘转子。假设圆盘质量为 m , 位

于两支承中间，并且轴很细，重量可以不计。这样转子的质量集中在圆盘中心，成为一个最简单的对称单圆盘转子。取固定直角坐标 $AXYS$ 作为参考。圆盘运动时其中心 o' 的位置，以 x, y 表示。当轴无变形时，圆盘中心通过转轴中心线，点 o' 与 o 重合。

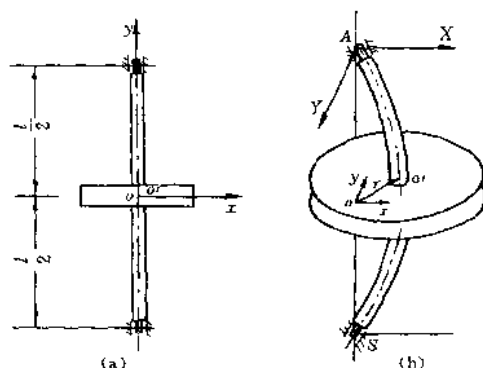


图 1-2 对称单圆盘转子

(a)原始状态;(b)受扰动后产生的自由振动

设轴中点处的刚度为 K 。它以角速度 ω 作等速旋转，此时圆盘不产生离心力。在它的一侧加一横向冲击力，假设阻力忽略不计，则转轴因有弹性而发生横向变形，圆盘中心 o' 的位置由向径 r 表示，转轴产生弯曲自由振动。当弹性恢复力和惯性力平衡时，得运动微分方程式：

$$\text{在 } x \text{ 轴方向} \quad m \frac{d^2 x}{dt^2} = F(x) = -Kx$$