

高等学校教材

工程振动 测试与分析

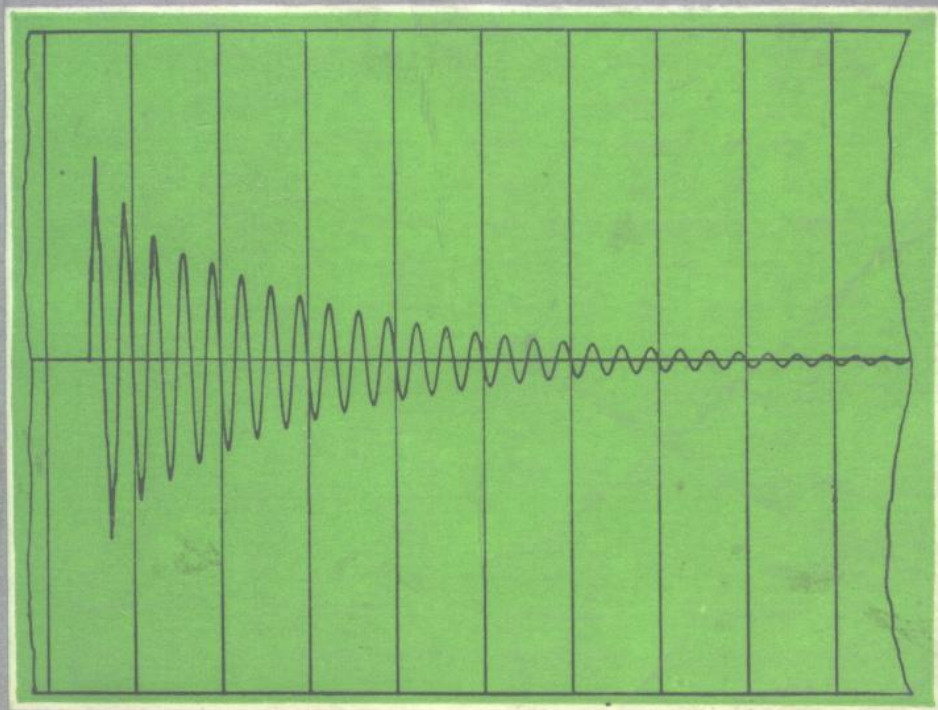
● 李方泽

● 刘馥清

● 王 正

GONGCHENG ZHENDONG

CESHI YU FENXI



高等教育出版社

高等学校教材

工程振动测试与分析

李方泽 刘薇清 王 正

高等教育出版社

(京) 112 号

内 容 提 要

本书比较全面、系统地阐述了现代工程振动的测试技术与分析方法, 在简要论述有关理论的基础上, 着重介绍当今先进的振动测试与信号处理的原理、技术及其在一些重要工程振动领域中的应用。

全书共分十章, 内容包括: 综述各种振动过程的时域、频域特征及振动系统对各种激励的响应; 目前工程中常用的几种重要的振动传感器及测量记录仪器的工作原理、技术实施及使用方法; 振动信号的频率分析及与之有关的数字信号处理技术; 振动试验中的激励设备及其控制技术; 测振仪器的校准方法、振动与冲击标准; 测试技术在结构振动模态试验及旋转机械振动状态监测和分析中的应用。

全书内容丰富、取材先进、图文并茂, 每章末附有思考练习题, 书末附有五个实验指导书。本书可作为高等理工院校研究生及本科生振动测试类课程的教材, 也可供从事振动测量和试验、状态监测、故障诊断等有关工程技术人员参考。

责任编辑 王 晶

高等学校教材

工程振动测试与分析

李方泽 刘魏清 王 正

高等教育出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

北京印刷一厂印装

开本 850×1168 1/32 印张17.75 字数440 000

1992年10月第1版 1992年10月第1次印刷

印数 0001—2 331

ISBN 7-04-003917-6/TB·205

定价 6.55 元

前 言

振动测试技术作为解决工程振动问题的一种有效手段,早已被人们所利用。在近二十多年来,随着科技、生产的发展,振动测试无论在理论上或技术和应用上都发生了令人瞩目的深刻变化。电子技术和传感器技术的进展,大大加强了振动测试的功能,提高了测量的精度和速度。各种新型振动传感器的相继问世,使得过去难度较大的振动测量,譬如微振动、特高振级的冲击、超小型物体的振动、极高频和极低频的振动、高速转子的振动及在恶劣环境中的振动等等的测量都得以实现。具有FM功能(调频式记录)的磁带记录仪进入振动测量仪器的行列,使得众多的现场实际振动信息都能真实地记录在磁带上,并可在实验室条件下予以重现,从而使振动的试验研究别开生面。进入70年代以后,微计算机的普遍推广应用,特别是FFT算法的引入(1965年首次由J.W.Cooley和J.W.Tukey提出),使得振动测试技术进入了一个新时期。在这一时期,各种基于数字信号处理原理的频率分析仪及其它以微处理器为核心的多功能信号分析仪器大量涌现,从而大大加强了对振动信号的时域及频域分析功能。在这一基础上,为适应结构动力特性研究的需要,结构的振动模态参数试验分析原理及参数识别技术得到迅速发展,从而使振动试验研究直接为结构动态设计及振动强度校核提供重要依据。此外,为环境模拟试验需要而发展起来的振动控制原理与技术,为机器设备故障诊断而发展起来的各种振动状态监测与分析系统,都是振动测试应用的重要方面,同时也充实了振动测试的理论内容。今日,振动测试实际上已成为一门多科技、生产领域,为解决结构设计、设备运行、产品试制及课题研究中有关振动问题的不可缺少的手段。

工程中多数结构都承受随时间变化的动载荷，我们称之为动力结构。譬如桥梁结构、海洋工程结构、机床、旋转机械、车辆结构及航空航天器等，它们都是承受各种动载荷的动力结构。动力结构不可避免地要出现振动。剧烈的振动将导致构件裂纹的萌生与扩展，最后使构件疲劳破坏；振动还将导致轴承等摩擦副的磨损、机构传动失灵、紧固件松脱及降低加工精度；振动还将消耗能量、降低效率；振动及其伴随噪声将恶化环境。总之，振动的危害是多方面的。振动测试的任务就是要在动力结构的设计、运行的各阶段，为消减和隔离振动及其带来的危害提供可靠的依据。

随着生产技术的发展，动力结构有向大型化、高速化、复杂化和轻量化发展的趋势，由此而带来的振动问题更为突出。在结构设计方面，过去沿用的基于静强度准则的“动荷系数”设计方法，在某些场合已不再满足要求，而需代之以基于结构动力特性的“动态设计”方法，即以结构在实际可能的动载荷作用下的响应为依据的设计方法。结构的振动模态参数是决定结构动力特性的主要参数。有了模态参数，我们即可以建立一个模态动力学模型，并由此计算结构在实际载荷作用下的响应，以及进行振动校核和必要的结构修改。对于重要的动力结构，为了可靠起见，一般要求同时通过理论计算（有代表性的为有限元法）和试验分析（有代表性的为频域法模态试验）两种途径获得模态参数，并进行相互校核和修正，最后给出一组认为比较真实的模态参数。有限元法无疑是一种极为有力的计算工具，它适用于计算各种类型结构的模态参数，且易于改变结构的各种物理参数，为结构的优化设计提供依据。但是考虑到实际结构的复杂性，很难第一次就能得心应手地建立一个符合实际的有限元计算模型。模态试验的必要性不仅在于提供了一组可靠的模态参数，而且还在于提供了某些只有通过试验手段才能获得的重要数据，比如有关结构的阻尼和刚度

等参数。

振动测试的另一重要应用是在故障诊断方面。现代机器设备要求高可靠性与高效益。为此,一种以状态监测为基础的故障诊断和预测技术得到推广和应用。它将大大增加机器设备运转的可靠性,提高设备的利用率,减少停机时间和降低维修费用。振动测量和振动信号的分析处理则是状态监测的主要组成部分。振动测量要为故障诊断提供可靠的信息,然后再结合机器设备的类型、结构特点、工况、动力学特性及其它监测参数,对设备可能存在的潜在故障做出预测。今天,在一些大型关键性机器设备上,比如发电厂的汽轮发电机组、化工厂的离心式压缩机和原子能电站的反应堆供给泵等,都配有完整的振动监测系统。这些系统不仅提供各测点的即时振动值,而且还能长期定时存储数据,以进行趋势分析。

此外,振动测试技术还直接应用于其它众多的生产技术领域,连同上述两方面的应用,计有

- (1) 结构动力特性试验研究,模态试验分析;
- (2) 运行中的机器设备的振动状态监测,故障诊断和预测;
- (3) 转子的平衡;
- (4) 振动与冲击环境的模拟试验;
- (5) 构件的疲劳强度试验;
- (6) 隔振与减振技术及措施的研究;
- (7) 人体对振动与冲击反应的研究;
- (8) 有关振动利用的研究。

基于上述工程振动试验的需求及广大读者对掌握和运用振动测试技术的愿望,作者结合多年来从事振动测试的教学与科研实践的心得,编著了本书。本书比较系统地论述了振动测试的基本原理与技术,以期读者对振动测试技术先有一个较全面的了解。在讲清基本原理与技术的基础上,本书注意介绍当代先进的测试

与分析技术以及它们的实际应用。如第六章集中讲述了数字谱分析这一先进的现代信号处理技术的原理及其在振动分析中的应用。又如第九、十章分别讨论了测试技术在结构模态试验和旋转机械振动监测、故障诊断方面的应用。

作者考虑到部分读者可能对振动基本理论不十分熟悉，这将在一定程度上影响对测试技术的理解。为此，本书在第一、二章中带有总结性地编写了有关振动过程的时域、频域描述及振动的基本理论，供读者复习和查阅。

本书其它各章的内容提要如下：第三、四章讲解振动传感器的机械接收和机电变换原理。传感器是振动电测法首当其冲的重要环节，本书花较多的篇幅讲解传感器及其测量电路，其目的是使读者能根据振动过程的时域、频域特征及测试对象的状况，正确选用传感器，以达到预期的测试效果。第五章介绍振动测试中常用的电子仪器，这些仪器包括测幅、测频、测相及各种记录仪器。本章还重点介绍了目前测试中广泛使用的磁带记录仪的原理和使用中的问题。第七章讲述振动试验中的各种类型的激励方法和激励设备。这一章的后一部分，还介绍了实现环境模拟试验的数字式闭环控制的原理。第八章讲述传感器及测振仪器的校准技术，这是保证测试可靠性的重要环节。在这一章的末尾，还介绍了目前国际国内使用的振动与冲击标准。

最后需要指出的是：振动测试技术涉及到振动理论、随机数据分析、电子学和数字信号处理等多门学科。因此，在有限篇幅内，不可能对所有涉及到的问题都作详细的论述。本书集中讲述与振动测试直接有关的问题，而对于一些外围问题只能有所取舍。比如对于一台仪器，我们较多地用框图说明电路各环节的作用，而不引入具体的线路图；对于一个传感器，我们主要用示意图说明其作用原理，而较少采用实际结构图。对涉及的许多公式，也不可能一一予以推证，而只能在引用的同时介绍有关的参考资料

料。这些都希望读者能予以谅解。为了使读者能在不多的时间内掌握好基本内容,本书对少部分进一步的内容打上“*”号,并排为小字,初学者可以先跳过这些部分。

本书的度量单位采用国际单位制,即SI单位(Le Système International d'Unités);有关振动测试的名词术语,也尽可能与国家标准“GB2298-80 机械振动、冲击名词术语”一致。

本书各章后附有少量思考及练习题,以供初学者复习之用。本书末还附有5个教学实验说明书。这些实验都是作者在多年教学过程中开设过的而且效果较好的,其中所用的仪器可根据实验室具体条件选用,或用相近的仪器代替。

本书可作高等理、工院校研究生和本科生振动测试课的教材,也可供从事振动测试工作的技术人员参考。

本书第一、六、九章由刘馥清执笔;第二、五、七、八章由王正执笔;第三、四、十章由李方泽执笔。由于作者水平所限,缺点和错误在所难免,敬希读者指正。

本书承蒙天津大学李伟忠、肖龙翔教授作了全面的审阅,李、肖二位教授长期从事振动学的教学与科研工作,造诣颇深,本书得其指点,受益匪浅,作者谨此由衷地表示感谢。

作 者

1989年12月

于北京清华大学

目 录

前言	1
第一章 振动过程的时域和频域描述	1
§ 1-1 振动过程的分类	1
§ 1-2 简谐振动过程及复振动的概念	1
§ 1-3 周期振动过程	8
§ 1-4 瞬态过程	19
§ 1-5 随机振动过程的基本特性	30
§ 1-6 随机振动的相关函数	35
§ 1-7 随机振动的功率谱密度函数	41
思考及练习	47
第二章 振动系统对激励的响应	48
§ 2-1 振动系统及其描述	48
§ 2-2 单自由度振动系统的自由响应	53
§ 2-3 多自由度振动系统的自由响应	58
§ 2-4 单自由度振动系统对简谐激励的响应	67
§ 2-5 单自由度振动系统对任意激励的响应	73
§ 2-6 多自由度振动系统对激励的响应	78
*§ 2-7 冲击响应与冲击响应谱	81
§ 2-8 振动系统对稳态随机激励的响应	89
思考及练习	91
第三章 振动测试概述	93
§ 3-1 振动的电测法及测试框图	93
§ 3-2 振动传感器的作用原理及分类	98
§ 3-3 测量系统的主要性能参数	103
§ 3-4 惯性式传感器的接收原理及其稳态响应	109
§ 3-5 惯性式传感器的冲击响应和冲击加速度的测量	120
思考及练习	130

第四章 振动传感器测量系统	131
§ 4-1 电动式传感器	131
§ 4-2 微分和积分电路	145
§ 4-3 压电效应	152
§ 4-4 压电式加速度传感器	157
§ 4-5 电荷放大器电路	164
§ 4-6 压电式加速度传感器测量系统中的一些问题	169
§ 4-7 压电式力传感器	174
§ 4-8 电涡流式位移传感器	178
*§ 4-9 压阻式加速度传感器	185
*§ 4-10 伺服式加速度传感器	194
思考及练习	199
第五章 常用的振动测试仪器及其应用	201
§ 5-1 频率测量与频率计	201
§ 5-2 指针式电压表, 便携式测振表	206
§ 5-3 数字式测振表	213
§ 5-4 相位测量及相位计	217
§ 5-5 电平记录仪	220
§ 5-6 光线示波器(振子示波器)	223
§ 5-7 磁带记录仪	228
思考及练习	239
第六章 频率分析及数字信号处理技术	240
§ 6-1 频率分析的工程意义	240
§ 6-2 带通滤波器	241
§ 6-3 模拟式频率分析仪	249
*§ 6-4 平稳信号的频率分析	256
§ 6-5 离散傅里叶变换(DFT)	264
§ 6-6 数字信号分析中的抗混滤波和加窗	270
*§ 6-7 快速傅里叶变换(FFT)	280
§ 6-8 数字信号分析仪的一般原理及功能	286

§ 6-9 数字信号分析中的选带分析技术	293
§ 6-10 数字信号分析中的平均技术	300
思考及练习	307
第七章 振动激励设备和激振技术	309
§ 7-1 激振设备的用途和分类	309
§ 7-2 机械式激振器和机械式振动台	312
§ 7-3 电动力式振动台和电动力式激振器	317
§ 7-4 液压式振动台和激振器	325
§ 7-5 不接触激振器	328
§ 7-6 压电式激振装置	332
§ 7-7 冲击力锤	333
§ 7-8 冲击试验与冲击试验台	335
§ 7-9 激振控制与振动波形的再现	337
思考及练习	347
第八章 传感器及测振仪器的校准	348
§ 8-1 校准工作的内容及重要性	348
§ 8-2 分部校准与系统校准	349
§ 8-3 静态校准	352
§ 8-4 简谐激振校准	355
§ 8-5 绝对校准法	356
§ 8-6 相对校准法(比较校准法)	363
§ 8-7 互易校准法	366
§ 8-8 压电式力传感器的电荷灵敏度的测定	368
§ 8-9 高加速度校准及冲击校准	369
*§ 8-10 振动与冲击标准简介	372
思考及练习	375
第九章 结构的模态试验分析	376
§ 9-1 模态试验概述	376
§ 9-2 机械导纳、传递函数及频响函数	377
§ 9-3 实模态的频响函数和模态参数	383

§ 9-4	复模态的传递函数和模态参数	387
§ 9-5	复模态与实模态的关系及结构阻尼情况	394
§ 9-6	频响函数的测试设备	398
*§ 9-7	频响函数估计的三种形式与噪声的影响	403
§ 9-8	频响函数测试的几种激励方式比较	407
§ 9-9	频响函数测试的其它技术问题	413
§ 9-10	用峰值法估计结构的模态参数 (SDOF 法之一)	416
§ 9-11	用圆拟合法估计结构的模态参数 (SDOF 法之二)	423
*§ 9-12	非线性加权最小二乘法 (MDOF 法之一)	433
*§ 9-13	复指数曲线拟合法 (MDOF 法之二)	437
§ 9-14	实例	441
	思考及练习	449
第十章	旋转机械的振动测试	451
§ 10-1	旋转机械振动测试概要	451
§ 10-2	相位的确定	456
§ 10-3	转轴径向相对振动的测定	460
§ 10-4	基频 ($1 \times R$) 幅值及相位的检测	463
§ 10-5	波德 (Bode) 图和极坐标图	467
§ 10-6	轴心轨迹的测试	475
§ 10-7	轴心径向平均位置的测定	482
§ 10-8	轴的径向绝对振动的测定	485
*§ 10-9	轴振动测量中机械和电的振摆信号及其补偿问题	487
§ 10-10	旋转机械振动故障的频率特征及三维频谱图	491
*§ 10-11	旋转机械振动状态监测和故障诊断的微机系统	503
	思考及练习	507
实验说明书		509
实验一	简谐振动的的基本参数测量	509
实验二	单自由度系统固有频率及阻尼比的测定	512
实验三	压电式加速度传感器及力传感器电荷灵敏度的激光干涉法校准	515

实验四	三自由度结构模型的频响函数测试及振动模态	
	参数分析	519
实验五	转子振动基本参数的测定	524
附录	分贝及其应用	528
参考书目		533
名词索引		537

第一章 振动过程的时域和频域描述

本章分别从时域和频域两个方面,描述基本的振动过程,即简谐振动过程、周期振动过程、瞬态过程和随机振动过程。阐明表征这些过程特性的各个参数的意义和计算方法。

§ 1-1 振动过程的分类

所谓振动过程,是指振动的位移、速度、加速度、力和应变等机械量随时间变化的历程。其最直观的描述是以机械量的瞬时值为纵坐标,以时间为横坐标,得到的振动记录波形。

对振动过程所含频率成分的分析有重要的工程意义。以振动过程各频率分量的幅值和相位为纵坐标,以频率为横坐标,得到的图形称为它的频谱。频谱是表征各种振动过程性质的重要内容之一。

表1-1列举出一些工程中常见的振动过程的时间历程和频谱。

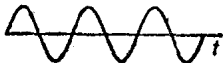
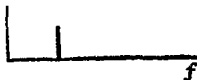
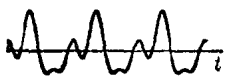
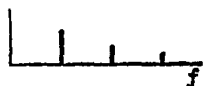
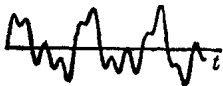
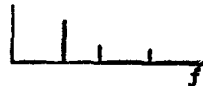
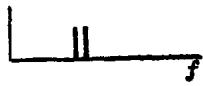
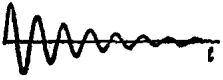
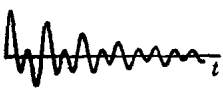
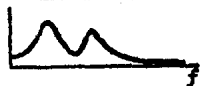
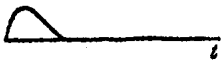
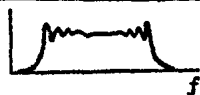
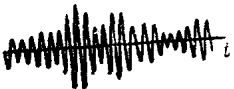
简谐振动具有单一的频率。周期振动和各种合成振动具有离散型频谱,即把它们视为若干频率不同的简谐振动的合成振动。各种瞬态过程和随机振动一般具有连续型频谱,即它们包含无限多连续分布的频率分量。

对振动过程,有多种不同的分类方法。图 1-1 给出三种分类方法,其差别在于对过程主要性质的考虑顺序不同。

§ 1-2 简谐振动过程及复振动的概念

当某一机械量 x 随时间 t 按正弦或余弦规律变化时,称之为简谐振动过程,其一般表示式为

表 1-1 常见振动过程的波形和频谱

过程名称	波 形	频 谱
简谐振动		
周期振动		
合成振动		
拍		
衰减振动		
合成衰减振动		
冲击过程		
正弦扫描		
窄带随机		
宽带随机		

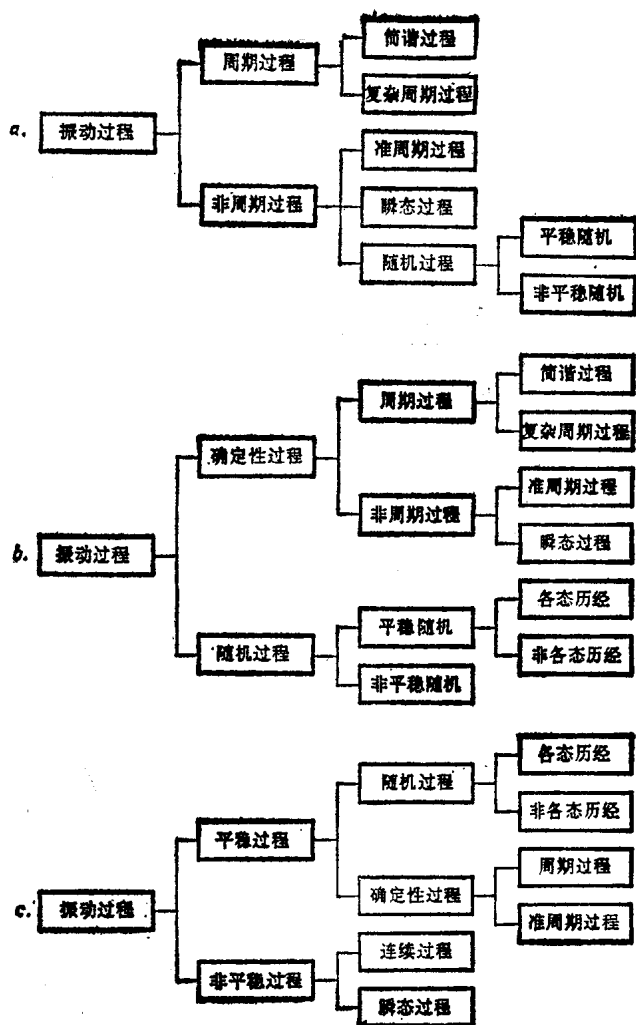


图 1-1 振动过程的三种分类方法

$$x = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (1-1)$$

式中 A 、 φ 、 ω 分别称为 振幅、初相位 和 角频率，它们是表征简谐振动过程的三个基本参量。

一次振动循环所需的时间 T 称为 周期，单位时间内振动循环的次数 f 称为 频率，它们与角频率 ω 的关系为

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}, \quad f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (1-2)$$

其中，周期 T 的单位为秒(s)，频率 f 的单位为赫兹(Hz)，角频率 ω 的单位为弧度/秒(rad/s)。

简谐振动过程还可以用复平面上的旋转矢量（称之为旋转复矢量）来描述。根据复数的含义，一复常数

$$z = a + jb \quad (j = \sqrt{-1})$$

对应于复平面上一个模为 A 、幅角为 θ 的矢量，其中

$$A = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad \theta = \arctg \frac{b}{a}$$

该复数还可表示为三角函数或复指数形式：

$$\begin{aligned} z &= A \cos \theta + j A \sin \theta \\ &= A e^{j\theta} \end{aligned}$$

我们把复平面上描述复数的矢量称为复矢量。当一个模为 A 、初始幅角为 φ 的复矢量以等角速度 ω 作逆时针旋转时，它在 t 时刻的幅角为 $\theta = \omega t + \varphi$ (图1-2)，因而有

$$\begin{aligned} z &= A \cos(\omega t + \varphi) + j A \sin(\omega t + \varphi) \\ &= A e^{j(\omega t + \varphi)} \end{aligned} \quad (1-3)$$

式(1-3)表明，一个旋转复矢量包含了简谐振动的角频率 ω 、振幅 A 和初相位 φ 三个基本参量。因此，我们称旋转复矢量 $A e^{j(\omega t + \varphi)}$ 为 复振动，并进而写成以下形式：

$$\begin{aligned} z &= A e^{j(\omega t + \varphi)} \\ &= \bar{A} e^{j\omega t} \end{aligned} \quad (1-4)$$