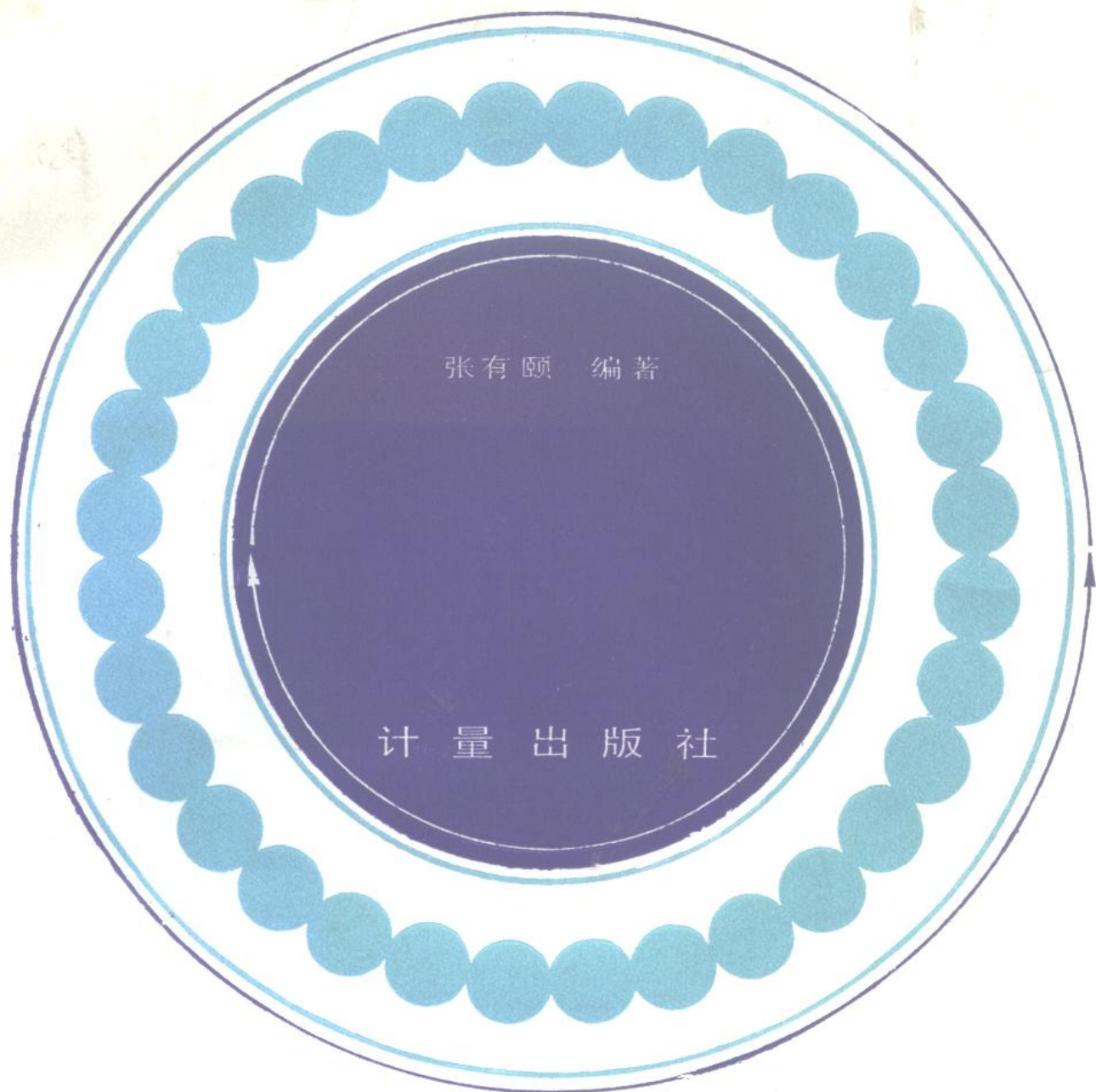




ZHUANJU CELIANG JISHU

转矩测量技术

转矩测量技术

张有颐 编著

计量出版社

1986·北京

内 容 提 要

本书比较全面地论述转矩(扭矩)测量的原理和方法,系统地介绍了各种光学、光电、磁电、磁弹、相位、应变、电容、机械、液压、气动和钢弦等转矩测量传感器和仪器;对转矩测量传感器的弹性元件的设计制造方法,和转矩信号的传输方式作了专门的叙述;分别介绍了各种水力、电力、涡电流、磁粉等转矩测量装置(测功机)和用电机、飞轮测量转矩的方法。书中对各种仪器和装置,着重阐明它们的工作原理、结构和性能的特点,测量误差产生的原因和使用中应该注意的问题。

本书可供各种机械产品的试验研究,计量检验的工程技术人员阅读,可作为大专院校各种机械专业测试技术或试验课程的补充材料,也可供有关仪器、试验装置和自动控制设备的设计人员参考。

转 矩 测 量 技 术

张有颐 编著

责任编辑 陈艳春

计量出版社出版

(北京和平里11区7号)

煤炭部出版社印刷厂排版

河北省三河县中赵甫印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

开本787×1092 1/16 印张 16

字数 378 千字 印数 1—2000

1986年2月第一版 1986年2月第一次印刷

统一书号 15210·480

定价3.70元

前 言

转矩(扭矩)测量是各种机械产品的开发研究、测试分析、质量检验、型式鉴定和节能、安全或优化控制等工作中所必不可少的内容。转矩测量传感器、仪器和装置已成为科研单位、院校、工厂实验室或检验部门的必备测试工具;也是电子计算机控制的生产或试验系统中提供转矩信息所必需的组成部分。

随着生产和科学技术的迅速发展,测量和试验技术——作为涉及多种学科的综合科学技术,正在形成独立的学科体系。仅以力学参数的测量领域为例,关于振动、应力、流量等参数的测量,各国已相继出现了许多技术专著。然而,发展是不平衡的,相比之下,转矩测量是个薄弱的环节。有关转矩测量的技术和仪器的资料,仍分散在浩如烟海的各种技术文献中,至今未见有系统的归纳与总结,而各种机器试验学或测试技术中只有简单的介绍。因此,转矩测量常常成为科研、测试、计量、检验和试验设计人员面前的棘手问题。

笔者在总结转矩测量研究的实践经验和综合国内、外有关资料的基础上,试编写了这本《转矩测量技术》,供从事转矩测量和设计、研制转矩测量传感器、仪器和装置的工作者参考。本书共分十章。第一章介绍转矩测量的基础知识;第二章分析转矩测量仪器的误差及其标定方法;第三至七章,分别介绍光学、光电、磁电、相位、应变、电容、机械、液压、钢弦等各种转矩测量传感器(转矩计)和仪器;第八章讨论转矩测量弹性元件的设计、制造方法及转矩测量信号的传输方式;第九章介绍平衡类转矩测量装置(测功机);第十章讨论能量转换类转矩测量方法。

书中对于各种测量转矩的传感器、仪器、装置和方法,着重阐明它们基本工作原理,介绍它们的结构、性能和参数的特点,指出产生测量误差的主要根源。本书既介绍各种简单易行的测量转矩的方法,也分析各国现代的转矩测量仪器和装置产品的特点,可有助于读者正确选择和使用仪器和装置。书中还探讨了一些转矩测量传感器、仪器和装置的新颖方案,对于设计和创作新仪器的读者,可能从中得到有益的启发。书中内容在一定程度上反映了转矩测量技术的当前水平和发展趋向。

本书承蒙中国计量科学研究院林鸿初、张克敏、黄澄清同志审阅,谨表衷心感谢。

把涉及面广泛而复杂的转矩测量问题,编写成《转矩测量技术》一书,毕竟是新的尝试,限于笔者水平,书中疏漏谬误之处在所难免,敬希读者给予指正。

张有颐

一九八三年五月于杭州

目 录

第一章 转矩与转矩测量仪器

第一节 转矩概述	(1)
1. 转矩	(1)
2. 转矩的单位	(2)
3. 转矩的时间历程	(3)
第二节 转矩测量仪器概述	(7)
1. 转矩测量原理	(7)
2. 转矩测量仪器的分类	(10)
3. 转矩测量仪器的显示和记录方式	(11)
第三节 转矩测量仪器的选择与使用	(13)
1. 转矩测量仪器的性能指标及其选择	(13)
2. 转矩测量仪器的安装与使用	(18)

第二章 转矩测量误差及仪器标定

第一节 测量误差理论基础	(20)
1. 测量误差基本概念	(20)
2. 测量误差的表示方法	(25)
3. 测量误差的合成	(27)
4. 间接测量误差	(29)
第二节 转矩测量误差	(31)
1. 概述	(31)
2. 转矩测量误差分析	(31)
第三节 转矩测量仪器标定	(37)
1. 概述	(37)
2. 标准转矩的精确度	(39)
3. 标定方法	(41)
4. 标定结果处理	(42)
5. 间接测量的标定和模拟校正	(47)
6. 分级标定	(47)

第三章 光学与光电转矩测量仪

第一节 闪光转矩测量仪	(49)
1. 视觉残留原理	(49)
2. 双标盘闪光转矩测量仪	(49)

3. 标尺闪光转矩测量仪	(49)
4. 自闪光转矩测量仪	(50)
第二节 投影转矩测量仪	(52)
1. 投影原理	(52)
2. 光点投影转矩测量仪	(52)
3. 标尺投影转矩测量仪	(52)
第三节 光栅转矩测量仪	(53)
1. 光栅原理	(53)
2. 圆筒光栅转矩测量仪	(54)
3. 圆柱光栅转矩测量仪	(55)
4. 圆筒光栅光电转矩测量仪	(55)
5. 平面光栅数字转矩测量仪	(56)
第四节 偏振光及光弹转矩测量仪	(57)
1. 偏振光原理及光弹原理	(57)
2. 偏振光转矩测量仪	(59)
3. 光弹转矩测量仪	(60)
第五节 激光转矩测量仪	(61)
1. 衍射原理	(61)
2. 激光衍射转矩测量仪	(62)
第六节 光格转矩测量仪	(63)
1. 光格原理	(63)
2. 光格转矩测量仪	(63)
3. 自补偿光格转矩测量仪	(66)
第七节 光隙转矩测量仪	(67)
1. 光隙转矩测量仪	(67)
2. 光隙数字转矩测量仪	(68)
第八节 光控转矩测量仪	(68)
1. 光控原理	(68)
2. 光控转矩测量仪	(69)

第四章 磁电转矩测量仪

第一节 电感转矩测量仪	(71)
1. 电感原理	(71)
2. 互感转矩测量仪	(72)
3. 差动式电感转矩测量仪	(72)
4. 环形线圈电感转矩测量仪	(73)
5. 轴向电感转矩测量仪	(74)
第二节 感应转矩测量仪	(75)
1. 感应原理	(75)

2. 感应转矩测量仪	(76)
第三节 磁化转矩测量仪	(77)
1. 磁化原理	(77)
2. 磁化转矩测量仪	(77)
第四节 磁弹转矩测量仪	(78)
1. 磁弹原理	(78)
2. 扭转磁弹转矩测量仪	(80)
3. 双线圈扭转磁弹转矩测量仪	(80)
4. 频率输出磁弹转矩测量仪	(81)
5. 剪切磁弹转矩测量仪	(81)
6. 管轴磁弹转矩测量仪	(82)
7. 表面磁弹转矩测量仪	(84)
8. 环极磁弹转矩测量仪	(85)
9. 线性化磁弹转矩测量仪	(87)
10. 霍尔元件磁弹转矩测量仪	(89)

第五章 相位转矩测量仪

第一节 相位转矩测量基础	(91)
1. 转矩与相位	(91)
2. 信号发生器	(92)
3. 信号整形	(95)
4. 信号调制	(96)
第二节 用示波器测量转矩	(98)
1. 用双踪示波器测量转矩	(98)
2. 用阴极射线示波器测量转矩	(99)
3. 用移相器测量转矩	(99)
4. 用移动信号发生器的方法测量转矩	(100)
5. 用极坐标阴极示波器测量转矩	(100)
第三节 用电压表或电流表测量转矩	(100)
1. 用交流电压表测量转矩的原理	(100)
2. 用直流电流表测量转矩的原理	(101)
3. 继电器转矩测量电路	(102)
4. 与门转矩测量电路	(103)
5. 双动圈电流表转矩测量电路	(103)
第四节 相位转矩测量仪	(104)
1. 凸轮转矩测量仪	(104)
2. 光电转矩测量仪	(104)
3. 氙光电转矩测量传感器	(105)
4. 光导纤维转矩测量传感器	(106)

5. 光电触发转矩测量仪	(106)
6. 永磁转盘转矩测量仪	(108)
7. 峰值电压转矩测量仪	(110)
8. 整形光电转矩测量仪	(111)
9. 温度补偿转矩测量仪	(112)
10. 位置补偿转矩测量仪	(113)
11. 多束光导纤维转矩测量仪	(114)
第五节 相位数字转矩测量仪	(115)
1. 相位数字电路	(115)
2. 双门数字转矩测量仪	(117)
3. 带集流环的双门转矩测量仪	(121)
4. 转齿圈数字转矩测量仪	(121)
5. 转内齿圈转矩测量仪	(121)
6. 异-或非门转矩测量仪	(122)

第六章 应变转矩测量仪

第一节 电阻应变测量基础	(123)
1. 概述	(123)
2. 电阻丝应变片	(123)
3. 应变片电桥	(125)
第二节 电阻应变测量仪	(126)
1. 电桥平衡电路	(126)
2. 放大电路	(127)
3. 振荡电路	(129)
4. 相敏检波电路	(129)
5. 低通滤波电路	(131)
6. 校正电路	(131)
7. 显示方式	(132)
第三节 应变转矩测量仪	(133)
1. 小转矩测量传感器	(133)
2. 圆盘转矩测量传感器	(133)
3. 二级刚度转矩测量传感器	(134)
4. 无集流环转矩测量传感器	(135)
5. 用电感集流环的转矩测量仪	(135)
6. 用电容及电感集流环的转矩测量仪	(137)
7. 无线电应变仪	(138)
8. 附装式无线电转矩测量仪	(139)

第七章 钢弦、电容及机械转矩测量仪

第一节 钢弦转矩测量仪	(141)
1. 钢弦振动原理	(141)
2. 钢弦转矩测量仪	(142)
3. 无线电钢弦转矩测量仪	(144)
4. 附装式钢弦转矩测量仪	(144)
第二节 电容转矩测量仪	(145)
1. 电容转矩测量仪	(145)
2. 轴向电容转矩测量传感器	(146)
3. 数字电容转矩测量传感器	(146)
第三节 机械转矩测量仪	(149)
1. 行星齿轮转矩测量仪	(149)
2. 斜齿轮转矩测量仪	(150)
3. 斜齿轮液压转矩测量仪	(150)
4. 液压转矩测量仪	(151)
5. 钢球液压转矩测量仪	(151)
6. 有泵液压转矩测量仪	(152)
7. 气动转矩测量仪	(153)

第八章 弹性元件及信号传输

第一节 弹性元件概述	(156)
1. 弹性元件的型式	(156)
2. 弹性元件的特性	(156)
第二节 弹性元件设计	(158)
1. 弹性扭轴的变形、应力与应变	(158)
2. 弹性元件的许可应力	(161)
3. 弹性扭轴的临界转速与临界转矩	(162)
4. 弹性扭轴的温度误差	(162)
5. 轴向变形弹性元件计算	(163)
第三节 弹性元件的材料	(164)
1. 对弹性元件材料的要求	(164)
2. 弹性扭轴的材料	(165)
第四节 弹性扭轴制造	(168)
1. 概述	(168)
2. 弹性扭轴的热处理	(168)
3. 弹性扭轴的稳定化处理	(170)
第五节 信号传输	(170)
1. 概述	(170)

2. 接触型集流环.....	(172)
3. 接触型集流环的滤波电路.....	(175)
4. 电感集流环.....	(176)
5. 电容集流环.....	(177)
第六节 无线电信号传输	(178)
1. 概述.....	(178)
2. 直接调频方式.....	(180)
3. 调频-调频方式	(180)
4. 调幅-调频方式	(181)
5. 脉码-调频方式	(181)

第九章 平衡类转矩测量装置

第一节 概述	(183)
第二节 平衡支承	(186)
1. 滚动支承.....	(186)
2. 双重滚动支承.....	(186)
3. 滚轮支承.....	(187)
4. 扇形块支承.....	(188)
5. 液压支承.....	(188)
6. 气压支承.....	(190)
第三节 平衡力测量机构	(191)
1. 砝码平衡力测量机构.....	(191)
2. 气动游码平衡力测量机构.....	(192)
3. 电动游码平衡力测量机构.....	(192)
4. 摆锤平衡力测量机构.....	(194)
5. 混合平衡力测量机构.....	(196)
6. 液压平衡力测量机构.....	(197)
7. 电阻应变片平衡力测量机构.....	(200)
8. 差动电感平衡力测量机构.....	(201)
9. 气动转矩测量机构.....	(203)
第四节 制动器与原动机	(204)
1. 摩擦制动器.....	(204)
2. 水力制动器.....	(205)
3. 空气制动器.....	(209)
4. 涡电流制动器.....	(210)
5. 磁粉制动器.....	(213)
6. 电机.....	(214)

第十章 能量转换转矩测量法

第一节 用直流电机测量转矩	(216)
第二节 用交流电机测量转矩	(218)
1. 交流电机的转矩及功率	(218)
2. 用转速测量仪测量转矩	(220)
第三节 用液压泵和液压马达测量转矩	(223)
第四节 用飞轮测量转矩	(223)
1. 工作原理	(223)
2. 用光线示波器测量转矩-转速特性	(225)
3. 转矩-转速特性测定仪	(227)
4. 汽车性能测试装置	(228)
附录:	(231)
1. 转矩单位换算表	(231)
2. 转矩、功率和转速速查列线图	(231)
3. 功率单位换算表	(232)
4. t 分布表	(232)
5. 我国主要城市重力加速度表	(233)
6. 砝码质量允差表	(233)
参考文献	(234)

第一章 转矩与转矩测量仪器

第一节 转矩概述

1. 转矩

使机器元件转动的力偶或力矩叫做**转动力矩**，简称**转矩**。任何元件在转矩的作用下，必定产生某种程度的扭转变形。因此，习惯上又常把转动力矩叫做**扭转力矩**，简称**扭矩**。

力偶是由作用在同一物体上的，大小相等方向相反的两个平行力形成（图1-1a）。力偶的大小用力偶矩 T 来度量，它等于力 F 与力偶臂 l 的乘积：

$$T = Fl \quad (1.1)$$

式中 l ——力偶臂，是两个平行力 F 之间的距离。

不通过物体旋转中心 O 的作用力 F ，对物体形成力矩（图1-1b）。力矩 M 的大小等于力 F 与力臂 l 的乘积：

$$M = Fl \quad (1.2)$$

式中 l ——力臂，是旋转中心 O 到力 F 之间的距离。

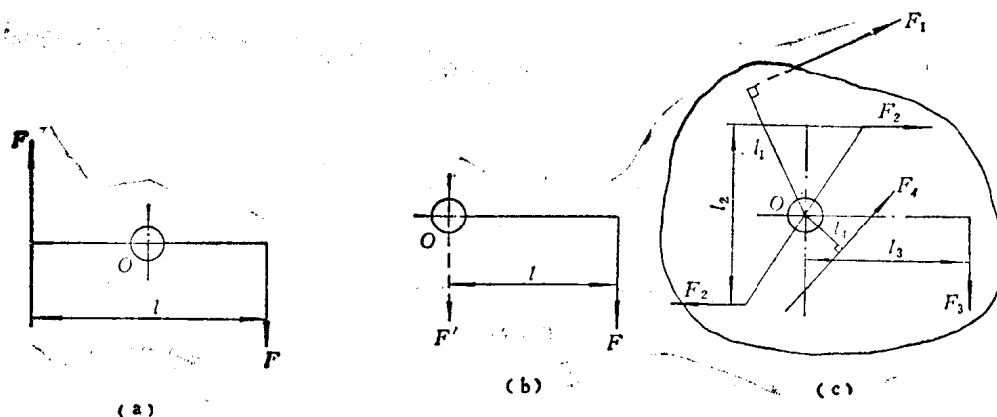


图 1-1 力矩与力偶的作用

如果在机器元件上同时作用着几个力偶和力矩（如图1-1c），则总的转矩将是各力偶矩与力矩之和：

$$\begin{aligned} T &= \sum Fl \\ &= F_1 l_1 + F_2 l_2 + F_3 l_3 - F_4 l_4 \end{aligned} \quad (1.3)$$

上式中的符号取决于力矩和力偶的作用方向，逆时针方向为正号，顺时针方向为负号。

力偶与力矩具有相同的表达式，都具有使元件旋转的效应。它们的区别在于：力偶对旋转轴无径向力作用；而力矩相当于力偶加上对旋转轴的径向作用力，此径向力 F' 的大小与作用力 F 相等，方向相同，仅作用点的位置不同。旋转轴在径向力 F' 的作用下，将受到弯矩的作用，也使轴承的摩擦阻力矩有所增加。

在机械学中，使元件转动的转矩叫驱动转矩；阻止元件转动的转矩叫制动转矩。各种动力机械，如内燃机、电动机、汽轮机、液压马达等等是产生驱动转矩的机械。各种制动器和工作机械，如发电机、空气压缩机、液压泵、螺旋推进器、钻机、车轮、水力制动器、机械制动器等是产生制动转矩的机械。各种传动机械，如齿轮传动、链条传动、液力传动，传动轴等等都是传递转矩的机械。而各种各样的机器，如飞机、船舶、拖拉机、汽车、机床、洗衣机、缝纫机、电冰箱、录音机等等，往往都是兼有动力机械、传动机械、制动机械或工作机械组合的机器整体。转矩决定着各种机械的工作能力、能源消耗、寿命、效率和安全性能等等。因此，转矩是各种机械的最重要的特征参数之一，也是各种机械试验过程中必须测量的一项参数。

2. 转矩的单位

测量任何一个物理量，实际上就是把这个物理量与规定的标准单位相比较。

转矩是力与力臂的乘积。设力的单位是 $[F]$ ；力臂，即长度的单位是 $[L]$ ，则转矩的单位是力和长度的导出单位 $[F \cdot L]$ 。

在国际单位制（代号 SI）中，长度的计量单位是米（记作 m）；力的计量单位是牛顿（记作 N）。由此可得，转矩的计量单位为牛·米（记作 N·m）。

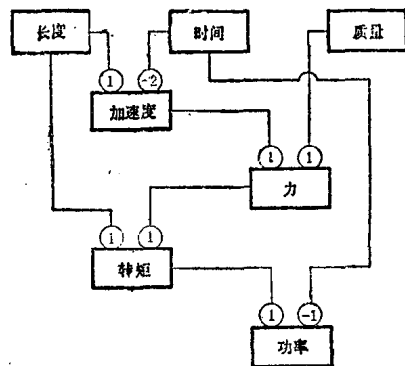


图 1-2 转矩单位导出体系

1 牛顿的力，是使 1 公斤（记作 kg）质量的物体产生 1 米每二次方秒（记作 m/s^2 ）加速度时，所需要的力。由此可见，力的单位是质量单位 $[M]$ 与加速度单位 $[A]$ 的导出单位 $[M \cdot A]$ 。而加速度本身的单位，又是长度单位 $[L]$ 与时间单位 $[T]$ 这两个基本单位的导出单位 $[L \cdot T^{-2}]$ 。图 1-2 表示了转矩单位与各基本单位之间的关系。圆圈内的数字代表对应单位的幂次。

目前，我国工程技术中习惯采用的力的计量单位是公斤力（记作 kgf）。对应的转矩的计量单位就是公斤力·米（记作 kgf·m）。对于特别大的转矩，有时采用吨力·米为单位；对于小转矩，有时采用公斤力·厘米为单位；对于特别小的转矩，有时采用克力·厘米为单位。

$$1 \text{ 吨力} \cdot \text{米} = 1000 \text{ 公斤力} \cdot \text{米};$$

$$1 \text{ 公斤力} \cdot \text{厘米} = 0.01 \text{ 公斤力} \cdot \text{米};$$

$$1 \text{ 克力} \cdot \text{厘米} = 0.00001 \text{ 公斤力} \cdot \text{米}$$

1 公斤力，等于 1 公斤质量物体的标准重量，即等于 1 公斤乘以标准加速度值（ 9.80665 米/秒^2 ）。因此，1 公斤力等于 9.80655 牛。

$$1 \text{ 牛} \cdot \text{米} = 0.101972 \text{ 公斤力} \cdot \text{米};$$

$$1 \text{ 公斤力} \cdot \text{米} = 9.80665 \text{ 牛} \cdot \text{米}.$$

各国科学技术文献中常见转矩单位的换算关系见附录 1。

转矩的测量常常与功率的测量联系在一起。在工程技术中常用的功率单位是千瓦（kW）和马力（PS）。各种功率单位的换算关系见附录 3。

转矩 T 与功率 P 及转速 n 之间的换算关系取决于它们所采用的单位。

在国际单位制中, 功率的单位用瓦特 (W), 角速度的单位用弧度每秒 (rad/s), 则转矩为:

$$T = \frac{P}{n} \text{ 牛} \cdot \text{米} \quad (1.4)$$

若功率单位用千瓦, 转速单位用转/分, 则转矩为:

$$T = 973.6 \frac{P}{n} \text{ 公斤力} \cdot \text{米} \quad (1.5)$$

若功率单位用马力, 转速单位用转/分, 则转矩为:

$$T = 716.2 \frac{P}{n} \text{ 公斤力} \cdot \text{米} \quad (1.6)$$

功率 P 、转矩 T 及转速 n 三者之间的换算关系, 可利用附录 2 的列线图迅速查得。

3. 转矩的时间历程

转矩值随时间的变化过程叫做转矩的时间历程。按照时间历程的特点, 转矩可以分为静态转矩及动态转矩两类。

静态转矩是转矩值不随时间变化, 或者随时间变化很小和很缓慢的转矩。动态转矩则是转矩值随时间变化很大和很迅猛的转矩。

应该注意, 以上所说的“动态”及“静态”转矩, 是相对转矩值而言, 不是指传动轴是静止的或是旋转的。传递静态转矩的传动轴不一定是静止的。同样, 传递动态转矩的传动轴也不一定是旋转的。

静态转矩通常包括: 静止转矩、恒定转矩、缓变转矩及微脉动转矩。

静止转矩的转矩值为常数, 传动轴静止不旋转。它的特征参数是转矩值 T 等于常数, 转速 n 等于零 (图 1-3a)。例如, 起重机吊重在空间静止时, 传动系统中所受转矩可以认为是静止转矩。

恒定转矩的转矩值仍为常数, 但传动轴以某转速旋转。它的特征参数是等于常数的转矩值 T ; 同时注明转速值 n (图 1-3b)。许多机械, 如电机、鼓风机等在稳定工作情况下的转矩可以看作是恒定转矩。

缓变转矩的转矩值随时间作缓慢变化。因为转矩变化很缓慢, 在测量转矩的短暂时间内可以认为转矩值是恒定的。一般用某时刻的转矩值 T 及对应的转速 n 值来表征这过程 (图 1-3c)。

长时间工作的搅拌机、钻机, 其工作转矩常常是缓变转矩。

微脉动转矩的转矩平均值 T_m 是常数, 但它的瞬时值有幅度不大的脉动变化 (图 1-3d)。它的特征参数有: 转矩平均值 T_m , 转矩脉动幅度 ΔT 及脉动频率 f :

$$f = \frac{1}{\tau}$$

式中 τ ——转矩脉动周期。

实际上的绝大多数机械, 如内燃机、水泵、电机等等, 它们在稳定工作情况下的转矩, 粗看象是恒定转矩, 但是, 若采用相应的转矩测量仪器来测量, 可以发现它们的转矩值都有一定程度的脉动。转矩的脉动幅度 ΔT 通常在转矩平均值 T_m 的 3—5% 以下。

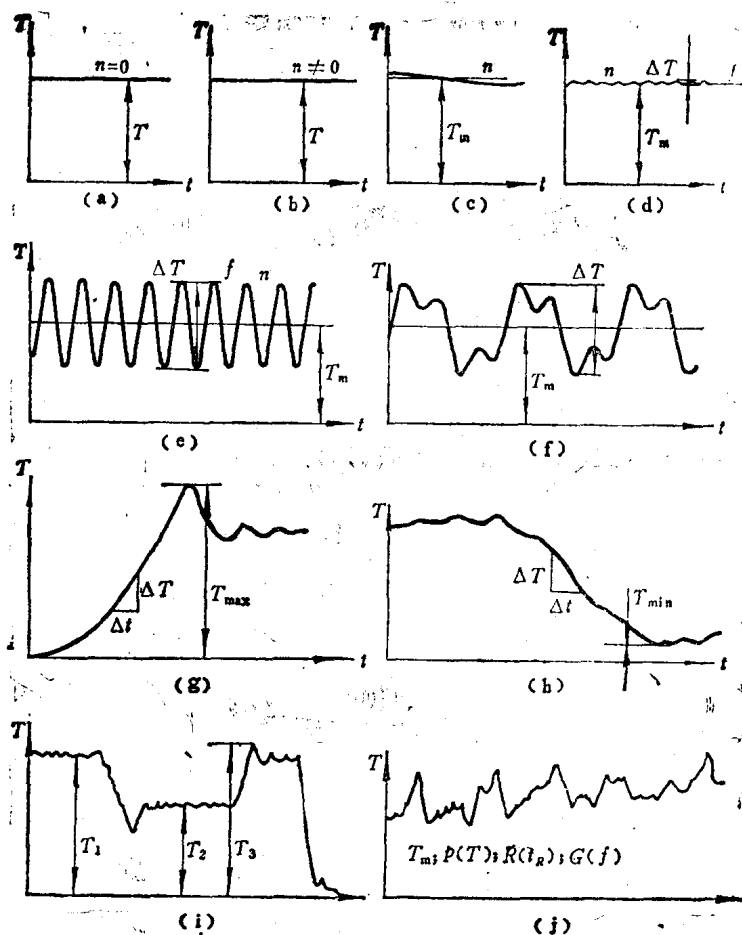


图 1-3 各种转矩的时间历程

除少数专门研究转矩脉动的情况之外，在大多数情况下一般只要求测定微脉动转矩的平均值 T_m 和对应的转速值 n_m 。静态转矩测量仪器的指示机构都具有较大的惯性，在脉动幅度比较小，脉动频率比较高的转矩作用下，仪表显示的就是转矩平均值 T_m 。

由此可见，以上四种转矩都可以用静态转矩测量仪器测定。测量的结果是转矩的单值。

如果要求专门研究机械的转矩脉动情况，则需要采用动态转矩测量仪器来测量。

动态转矩包括振动转矩，过渡转矩及随机转矩等三种。

振动转矩的转矩值是波动的，并具有一定的周期。即每隔一定的时间间隔（周期），转矩的时间历程重复循环一次。最简单的周期振动转矩是图 1-3 e 所示的余弦波振动转矩。一般传动系统所产生的扭转振动转矩常具有更复杂的形态。

各种机械的传动系统，从振动学的观点看，都是无限多质点的扭转振动系统。对于所测得的振动转矩常常要求进行傅立叶（Fourier）分析，也就是把一个复杂的周期性振动转矩的时间历程分解成许多正弦波振动转矩（图 1-4）。其中频率与原振动转矩频率相等的叫基波，其余叫各次谐波。谐波就是频率与基波频率成整数倍的波，是基波频率 2 倍的叫二次谐波，是基波频率 3 倍的叫三次谐波……余皆依此类推。一般情况是谐波次数愈高（称为高次谐波），它的振幅愈小。在实际分析工作中常将高次谐波成分忽略不计。对于一般机械的扭转

振动分析, 考虑到它的10次谐波就已足够精确的了。因此, 对动态转矩测量仪器的工作频率一般只要求它比被测振动转矩基波频率高10倍就行了。如果振动转矩的波形本身就比较接近正弦波形, 则必须考虑的谐波次数还可以降低。

对于简单的正弦波振动转矩, 可以从记录波形上直接求得它的特征参数: 转矩平均值 T_m 、转矩振幅 ΔT 、振动频率 f , 并注明对应的转速值 n 。

对于复杂的振动转矩, 可以采用专门的傅立叶分析仪进行分析, 得到各项特征参数: 转矩平均值 T_m 、最大振幅 $\Delta T_{\max}$ 、基波频率 f_1 、基波振幅 T_1 、二次谐波频率 f_2 、二次谐波振幅 T_2 …。各次谐波的振幅和频率可以用图1-5所示的离散谱来表示。

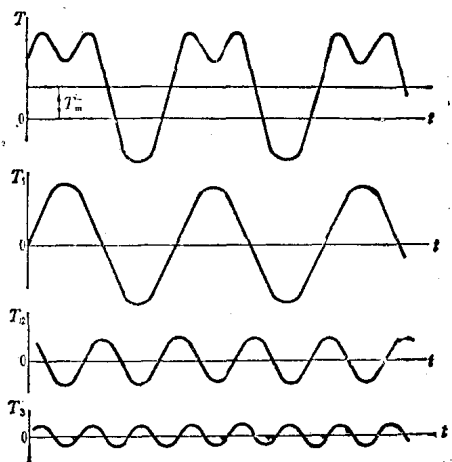


图 1-4 振动转矩的傅里叶分析

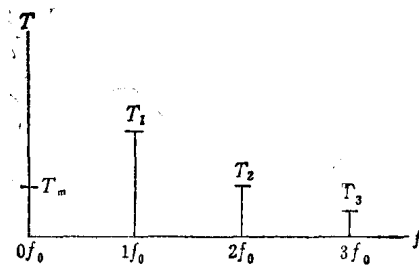


图 1-5 振动转矩的谱

实际上, 许多机械, 如多缸往复式发动机等的工作转矩是具有高次谐波分量的复杂的周期振动特性。

过渡转矩是机械从一种工作情况转换到另一种工作情况时的转矩变化过程 (图1-3g, h, i)。表征过渡过程的特征参数是: 最大转矩值 $T_{\max}$ 、最小转矩值 $T_{\min}$ 、转矩变化率 $\Delta T / \Delta t$, 同时记录转速的时间历程。

一般机械在起动过程、换挡过程、变负荷过程和制动过程中转矩都具有过渡特性。

随机转矩是一种不确定的, 无规律的变化转矩。对这种转矩过程的测量结果, 每次都不会一样。任何一次具体的测量结果只代表无限多的、可能产生的结果之一 (图1-3j)。

按照随机过程的数据处理理论, 可以用以下四个统计函数来表征随机过程的特性: 均方值、概率密度函数、自相关函数及功率谱密度函数。

转矩的平均值可表示为:

$$T_m = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} T(t) dt \quad (1.7)$$

这是描述转矩常量分量 (即不随时间变化的分量) 的特征参数。转矩的波动分量可用方差 $\sigma_{\Delta T}^2$ 来描述。

$$\sigma_{\Delta T}^2 = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} [T(t) - T_m]^2 dt \quad (1.8)$$

转矩的均方值 σ_T^2 可以表示为

$$\sigma_T^2 = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^\tau T^2(t) dt \quad (1.9)$$

或者

$$\sigma_T^2 = T_m^2 + \sigma_{\Delta T}^2 \quad (1.10)$$

式中 τ ——观察时间。

随机过程转矩的概率密度函数表示转矩的瞬时数值落在指定范围内的概率。按照图1-6a所示, $T(t)$ 值落在 T 到 $T + \Delta T$ 范围内的概率, 可取 $t_{\Delta T}/\tau$ 之比得到:

$$p(T) = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta T} \left[\lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{t_{\Delta T}}{\tau} \right] \quad (1.11)$$

式中 $p(T)$ ——概率密度函数;

$t_{\Delta T}$ ——在观察时间 τ 内, $T(t)$ 落在 T 到 ΔT 范围内的总时间;

$$t_{\Delta T} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \quad (1.12)$$

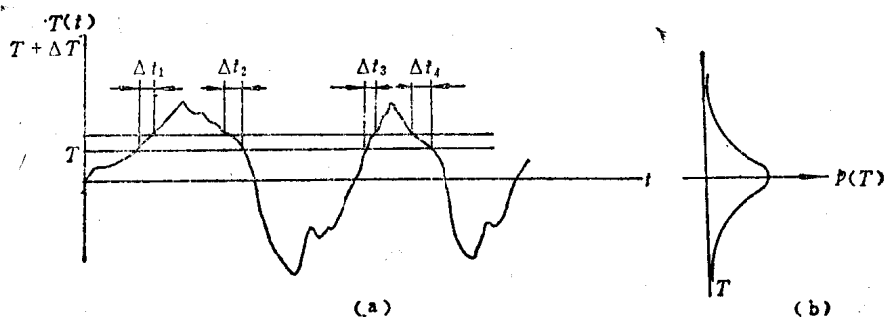


图 1-6 概率密度函数图形

常根据所求的概率密度值绘成图1-6b所示概率密度—瞬时值的关系曲线来表示转矩值的概率分布情况。

随机过程的自相关函数描述一个时刻的转矩值与另一个时刻的转矩值之间的依赖关系, 并可用下式表达:

$$R(t_R) = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^\tau T(t) T(t + t_R) dt \quad (1.13)$$

式中 t_R ——时间位移 (图1-7a)。

自相关与时间位移的关系 [$R(t_R)$ 对 t_R] 叫自相关图, 常用于表示随机过程的自相关特性 (图1-7b)。

随机转矩在 f 到 $f + \Delta f$ 频率范围内的均方值可定义为功率谱密度函数:

$$G(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta f} \left[\lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^\tau T^2(t, f, \Delta f) dt \right] \quad (1.14)$$

式中 $T(t, f, \Delta f)$ —— $T(t)$ 落在 f 到 $f + \Delta f$ 频率范围内的部分。

根据功率谱密度函数的测量结果, 可以绘制功率谱图1-8。

汽车、拖拉机、坦克通过崎岖不平地面时, 传动系中的转矩具有随机特性。对随机转矩