

电机设计 强度计算的 理论基础

张耀光 著

dienglshoji
qiangdujisuan
de lilunjichu

安徽科学技术出版社

143596

TM302
8324

钱伟长 著

电机设计 强度计算的 理论基础



京电力大 00132337

(皖)新登字 02 号

责任编辑: 王春阳

封面设计: 王国亮

责任校对: 杨小红

电机设计强度计算的理论基础

钱伟长 著

安徽科学技术出版社出版

(合肥市九州大厦八楼)

邮政编码: 230063

安徽省新华书店经销 商务印书馆上海印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 11 字数: 260 000

1992 年 10 月第一版 1992 年 10 月第一次印刷

印数: 2500

ISBN 7-5237-0757-5/TM·6 定价: 15.00 元

序

由于我国今后 20 年内能源建设的需要,大容量的热能发电机、水轮机、水力发电机的设计制造将越来越显得重要。在国际上,如瑞士、美国诸制造商,在设计制造中都各有自己的设计资料和设计公式,甚或有自己的强度设计计算软件,互不公开。在国内,现在拥有的资料公式,无非是 50 年代的苏联资料,有不少适用于中型设备,也有不少采用经验公式,还有些虽有理论基础,但出处不明,不敢随便使用。

本书的目的,是为开拓大电机强度设计计算提供必要的理论基础。这些理论基础,既不曾曾在工程基础课程材料力学中讲述,也不曾在电机强度设计这样的专业课中讲述。其实,在利用了本书提供的基础后,现有的电机强度设计还能进一步改进。对于新的电机模式型号而言,可以根据本书提供的理论基础,提出自己的强度计算程序和制成这种新型电机的计算软件。

本书的内容分三部分:第一部分(第一章至第四章)是电机零件的材料静力学,即杆、曲杆、圆环、轮子、厚壁筒、圆盘、薄壁筒的应力和变形的静力学关系。第二部分以换向片或整流片(第五章)和热套配合(第六章)为例,讲述如何利用第一部分零件或原件的静力学的成果来处理零件组合的某一部件的强度设计的。

2·序

第三部(第七、八、九章)为动力学,主要介绍了转轴的回转临界频率、单轮的轴的扭转振动、和多轮系统的轴的扭转振动,特别是并联入电网时扭振问题等。

为了适应工程技术人员的条件,讲述中极力避免使用高深的数学工具,也避免使用弹性力学。本书以卡氏定理摩尔法为基础,广泛使用影响系数来研究各种变形协调条件。从而简化了计算,数学工具也只限于微积分和常微分方程。

本书的内容有一部分取材于60年代在清华大学电机系为电机设计专业学生开设的高等材料力学的讲义,该讲义曾增删过一次。此次成稿时,又增修了不少内容,特别是第四、五、六、九章的材料,很多是新添的。本书中还修正了在我国流行的克赖苏伏斯基著《电机强度问题》和柯兹斯尼克著《转动电机力学》两本著作中的错误。

本书共有132个插图,这些插图都经高级工程师钱元凯同志按国家制图规范修正绘制,特此致谢。希望通过本书的出版,对我国自行设计大电机的工作和电机教学事业,有所助益。

钱伟长

于上海工业大学乐乎楼

目 录

第1章 绪论	1
§ 1.1 目的和任务范围	1
§ 1.2 电机强度设计中主要零件的分类和简化	2
§ 1.3 强度和变形的设计要求	3
§ 1.4 杆件拉伸,扭转,弯曲的应变能	4
§ 1.5 杆件弯曲能和横剪变形的应变能,摩尔法	12
§ 1.6 更一般的应变能表达式	19
§ 1.7 卡氏定理和摩尔公式	27
§ 1.8 广义的摩尔公式	35
§ 1.9 静不定问题	36
第2章 圆环	39
§ 2.1 曲杆的弯曲应力	39
§ 2.2 圆环受径向集中力系作用时的计算	50
§ 2.3 带辐条的转子的静不定计算	59
§ 2.4 圆环受周向均布转动力矩作用	64
§ 2.5 圆环受多个对称分布的集中力矩作用	67
§ 2.6 圆环在横向力作用下垂直于圆环平面的变形及应力	70
§ 2.7 水力发电机转子轮缘和辐条的静不定计算	74
第3章 厚壁筒及圆盘	81
§ 3.1 绪论	84
§ 3.2 回转等厚圆盘或厚壁筒的应力和变形	85

2. 目 录

§ 3.3 厚圆环盘作为曲杆近似的旋转应力	95
§ 3.4 内缘表面受均布压力时的圆盘或厚壁筒的应力和变形	99
§ 3.5 外缘表面受均布压力时的圆盘或厚壁筒的应力和变形	102
§ 3.6 实心圆柱侧向外部受均布压力所生的应力和变形	105
§ 3.7 带有轮毂、轮缘的旋转圆盘的静不定问题	106
第4章 薄壁圆筒	111
§ 4.1 薄壁圆筒对称变形的工程理论	111
§ 4.2 无限长薄壁圆筒	120
§ 4.3 半无限长薄壁圆筒	127
§ 4.4 有限长薄壁圆筒的初参数解	130
§ 4.5 有限长两端自由圆筒受集中圆圈的或分段均布的对 称载荷	139
§ 4.6 长短薄壁圆筒热套配合的静不定问题	148
附表 4.1 函数 $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$ 的数值表	154
附表 4.2 有关半无限长及无限长薄壁圆筒的结果表	156
附表 4.3 克雷洛夫函数表	162
附表 4.4 有关有限长薄壁圆筒的结果表	164
第5章 换向片或整流片的强度计算	168
§ 5.1 换向器的构造及其强度要求	168
§ 5.2 带箍环的换向片的平衡方程及其解	171
§ 5.3 带有箍环的换向器中箍环的分析和待定箍环压力的 决定	182
§ 5.4 带箍环的换向片计算举例	189
§ 5.5 带燕尾的换向片中段在约定的轴向力作用下的弯曲	201
§ 5.6 静止的换向片在紧压成形过程中轴向紧束力的变化	218
§ 5.7 转动时的轴向力	220
第6章 旋转零件的热套配合计算	223
§ 6.1 热套配合计算的基本概念	223
§ 6.2 根据给定的松脱转速 ω_0 计算配合公差	227
§ 6.3 根据给定的传递转矩值(或最大功率)计算热套配合	231

§ 6.4 热套配合的应力计算	232
§ 6.5 三种在电机中常见的热套配合问题	233
§ 6.6 汽轮发电机转子护环的配合计算	239
第 7 章 轴的回转运动的基本特性	252
§ 7.1 轴的回转的力学性质	252
§ 7.2 刻槽对轴的临界转速的影响	263
§ 7.3 摩擦对于临界转速的影响	267
§ 7.4 横装轴的临界转速	273
§ 7.5 在其它支撑条件下的回转临界转速	277
§ 7.6 轮子的陀螺运动对于临界转速的影响	279
第 8 章 轮轴系统临界转速的计算	289
§ 8.1 两轮一轴系统的临界转速	289
§ 8.2 多轮系统的临界转速	296
§ 8.3 均匀轴的临界转速及集中质量法	299
§ 8.4 重演法求临界转速	311
§ 8.5 电机转子临界转速的图解重演法	315
§ 8.6 有关陀螺运动的影响	322
第 9 章 轴的扭转振动	327
§ 9.1 扭转振动的发生及性质	327
§ 9.2 单轮轴的扭转振动	328
§ 9.3 双轮系统的轴的扭转振动	330
§ 9.4 柴油机发电机的强迫振动	333
§ 9.5 和大容量电站并联运行的同步发电机的轴的扭振频率	336
§ 9.6 多轮系统的固有频率	338

第 1 章 绪 论

§ 1.1 目的和任务范围

本书内容的长期目的,为在材料力学的基础上,给电机强度设计计算准备一定的理论基础,俾易于理解及应用现行电机强度设计计算的各种方法。

本书一方面有别于一般的材料力学,并不准备研究高等材料力学中所述及的一切问题,而只准备研究电机主要零件的强度和变形计算的若干方面。换言之,是明确的为电机强度设计计算服务的。

另一方面,本书内容并不能代替电机强度设计计算本身,因为电机强度设计计算本身包括着材料的选择、许用应力及安全系数的确定,并且还密切地结合着制造过程及精度的要求等,我们只能按电机的主要零件简化成一定的形状后,讨论这些简化部件在可能发生的典型受力状态下的应力分布及其变形计算。

§ 1.2 电机强度设计中主要零件的分类和简化

电机的设计, 由于电机的容量增大、转速提高, 而同时又要求对外廓尺寸给以一定的限制, 因此就提出了许多零件的强度问题。

高速电机的转动部分都承受着极大的惯性力, 它们有时能超过零件本身重量好几万倍。因此, 这些部件除了必须采用高强度材料外, 一定还需要改进其强度的计算方法, 以降低设计中所用的安全系数。

电机的部件种类很多, 但需要进行强度计算的, 除了螺杆、磁极尾部、槽楔、辐条、转子齿等, 能用一般材料力学的理论基础来处理其强度计算外(或近似的计算外), 其它如转子轮缘、整流子锥形压圈、转子的铁心压板, 水轮发电机的机座、联轴器、转子轭、转子的护环和中心环、带有箍环或燕尾的整流片、水轮发电机的转子盘等, 都无法简化为简单的梁或杆件来处理。上述诸部件按其形状可简化归纳为: 圆环、厚壁圆筒、薄壁圆筒和圆盘来计算研究, 而整流片可以近似地作为薄壁圆筒来处理。所有这些构件一方面受到旋转所产生的离心惯性力的作用, 另一方面受到装配所产生的约制变形的反作用力的作用。

在本书中, 也将着重研究这些构件在这一类型的受力状态下, 所产生的应力和变形。

此外, 电机的另一主要部件为轴。轴在一方面有复杂受力条件下的强度问题, 在另一方面有转轴特有的临界转速问题。由于篇幅所限, 我们将略去转轴强度问题, 而只着重于研究临界转

速的计算问题。

§ 1.3 强度和变形的设计要求

强度一词,在材料力学里被狭义地理解为构件内部某点应力达到一定极限时的限度,这个极限有时是塑性限,有时是破坏强度。但在电机设计中,强度是常被广义地理解为构件的变形超过容许的限度后,使电机失去工作效能的极限。

例如,汽轮发电机转子的护环是在热套配合的条件下,一端安在转子鼓的外侧,一端安在中心环的外侧,转子护环的要求为确定护环在最高转速时,不致和转子鼓及中心环发生松脱现象;护环一经松脱,就会发生弯曲变形而破坏转子的旋转平衡。这里必须指出,护环配合的松脱,可能在护环尚处于弹性变形时就开始了。因此,护环的设计,不是去研究护环的破坏强度,或是塑性强度,而是要正确地计算护环的松脱转速。

又例如:整流片尾部或整流片本身只要产生塑性变形,虽然并没有达到破坏的程度,但这种塑性变形就能破坏整流子的柱状外形,从而引起整流的混乱。因此,整流片的设计,要求正确地计算其塑性强度。

但是,并不是所有的电机部件都不容许塑性变形的。例如:汽轮发电机转子中心孔的表面,因离心力而产生的应力,有时可以达到和超过材料的屈服限,当达到这种情况后,塑性变形反而使应力集中效应的尖峰下降,使金属发生局部的冷硬现象。这对于整个构件并没有什么不利的地方。

从上面的讨论中可以看到,电机部件的应力和变形的计算,是电机强度设计计算中最关键的问题。我们要特别指出的是,

应力计算和变形计算是同样重要的

所有下面的讨论,主要的都把旋转惯性力当作静力来计算。但在估计容许的应力和变形时,应该考虑到可能发生的骤加冲击载荷。我们可以一般地证明骤加冲击载荷所引起的初始变形,比用同样大小的力渐加的载荷(即静载)所引起的变形大一倍。这个由于动力加载所增加的系数,应该在计算容许变形时考虑在内。

在我们所提出的课题中,交变应力不是载荷的主要方式,因此,我们将略去这一方面的讨论。

§ 1.4 杆件拉伸,扭转,弯曲的应变能

弹性体在逐渐增加外载时,发生变形的增大,在这一加载的过程中,外力做功,这种功一般地全部或部分变为变形所积蓄的位能。只要变形仍在弹性的范围内,只要加载的过程很慢,变形的动能可以略去不计,则这种功可以看作为全部变成变形所积蓄的位能,这种位能在卸载的过程中释放出来,作为该弹性体向外界做的功的弹性能。如果加载过程很快,则有一部分功变为弹性体变形的动能;又如果变形进入塑性的范围,则在卸载过程中有一部分变形的位能,业已耗于形成永久的塑性变形,只剩下的一部分变形的位能能释放出来。

在材料力学和弹性力学的计算中,我们习惯上把静力加载的过程看作是很缓慢的。因此,全部的功都积蓄成为变形的位能。同时,设弹性体仍在弹性的范围以内,移去外力,该位能可以全部释放出来,我们称这种位能为弹性应变能,或简称应变能。

从上面的讨论可以看到, 计算渐加外力所做的功和计算弹性体在该外力的作用下达到的变形中所积蓄的应变能, 是完全相同的。

试以杆件的拉伸为例: 设杆件逐渐加载达到最后拉力 P , 该时杆件的拉伸长度为 δ , 拉伸曲线如图 1.1 中的 OA , 杆件在加载过程中, 由外力所做的功等于面积 OAB , 它就等于杆件拉伸到增长 δ 时所积蓄的应变能 U , 其值为 $\frac{1}{2} P\delta$, 即

$$U = \frac{1}{2} P\delta. \quad (1.1)$$

根据拉伸的虎克定律, 设 E 为杨氏模量, F 为杆件断面面积, l 为杆件长度, 我们有

$$\delta = \frac{Pl}{EF}. \quad (1.2)$$

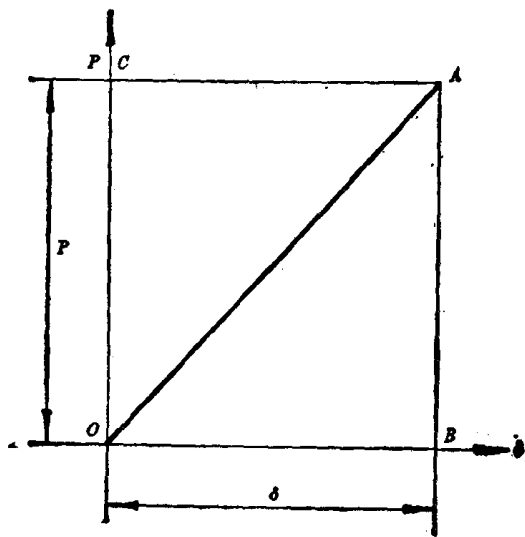


图 1.1 杆件的拉伸变形

于是, 这个杆件拉伸的应变能 U 可以写成下列两种形式:

$$U = \frac{P^2 l}{2FE} \quad \text{或} \quad U = \frac{FE\delta^2}{2l}. \quad (1.3)$$

第一种形式把应变能写成载荷 P 的函数, 第二种形式把应变能写成变形 δ 的函数. 只要杆件的材料和尺寸已知, 则应变能完全决定于 P 的值, 或完全决定于 δ 的值. 同时, 应变能和 P 的平方成正比, 或和 δ 的平方成正比; 因此, 它总是正的. 这些性质是任何变形的应变能所共有的性质.

我们也可以用应力和应变来表示应变能; 杆件拉伸的应力

$$\sigma = \frac{P}{F}, \quad (1.4)$$

应变

$$\epsilon = \frac{\delta}{l}. \quad (1.5)$$

于是, 杆件的拉伸应变能表达式(1.3)可以写作

$$U = \frac{1}{2} E\epsilon^2 \cdot Fl \quad \text{或} \quad U = \frac{1}{2E} \sigma^2 \cdot Fl. \quad (1.6)$$

其中 Fl 为杆件的总体积, 所以 $\frac{1}{2} E\epsilon^2 = \frac{1}{2E} \sigma^2$ 称为应变能密度, 即单位体积中所积蓄的应变能.

同样, 当某一元素 dV 处于纯剪应力状态下变形时, 其应变能可以证明为

$$dU = \frac{1}{2} G\gamma^2 dV \quad \text{或} \quad dU = \frac{1}{2G} \tau^2 dV. \quad (1.7)$$

其中 G 为剪力模量, γ 为该元素的剪应变, τ 为有关的剪应力.

杆件的扭转变形在杆件内部各点并不产生均匀的剪应变, 而是在杆件的表面最大、中心最小(一般为零), 因此, 杆件扭转变形的应变能可以通过在横截面上积分求得. 但是, 根据前面

的讨论, 我们也可以通过外力(即扭矩)对转角所做功来求得.

设杆件长 l , 在扭矩 M_e 作用下产生转角 φ , 则有

$$\varphi = \frac{M_e l}{GI_p}. \quad (1.8)$$

其中 GI_p 为杆件的抗扭刚度, 同时 M_e 对 φ 所做的功为杆件的扭转应变能, 即

$$U = \frac{1}{2} M_e \varphi. \quad (1.9)$$

利用(1.8)式, 这个应变能式可以写成

$$U = \frac{M_e^2 l}{2GI_p} \quad \text{或} \quad U = \frac{\varphi^2 GI_p}{2l}. \quad (1.10)$$

第一式用扭转表示应变能, 第二式用转角表示应变能. 它们和(1.3)式相似, 都是正的.

再以杆件的弯曲为例. 设长为 l 的杆件两端受弯矩 M 作用发生纯弯(例如一端夹住, 一端受弯矩 M 作用, 图 1.2), 则弯矩 M 所做的功为

$$U = \frac{1}{2} M \theta. \quad (1.11)$$

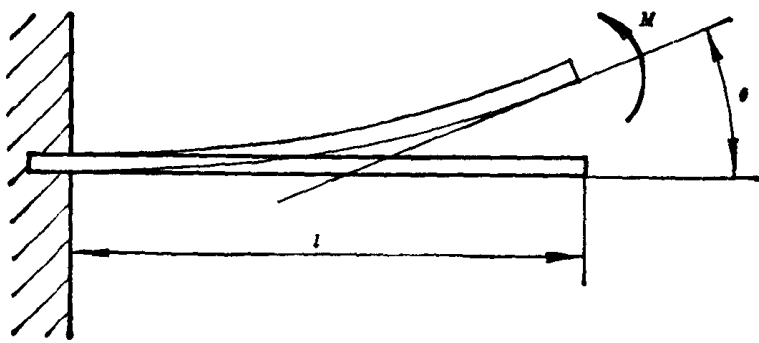


图 1.2 弯矩 M 产生的转角 θ

但是自由端的纯弯曲角位移为

$$\theta = \frac{Ml}{EI_z}. \quad (1.12)$$

因此, 纯弯的应变能为

$$U = \frac{M^2 l}{2EI_z} \quad \text{或} \quad U = \frac{\theta^2 EI_z}{2l}. \quad (1.13)$$

第一式用弯矩表示应变能, 第二式用转角表示应变能. 我们必须指出, 纯弯所积蓄的应变能也可以从拉伸应变能的表达式 (1.6) 求得. 我们可以把纯弯的杆件看作为横截面的垂交纤维处于一半拉伸一半压缩的应力状态来处理. 总的纯弯应变能等于这些微元的应变能的积分. 设横截面的中性线为 AB 线 (图 1.3), 与 AB 线垂交的纤维既无伸长, 又未缩短, 但其曲率半径 R 为 $R\theta = l$ 所决定, 即 $R = \frac{l}{\theta}$, 于是, 与 CD 线垂交的纤维产生拉伸应变 $\varepsilon = \frac{y}{R} = \frac{\theta y}{l}$, 所有通过微元截面 CD 的纤维 (它们的

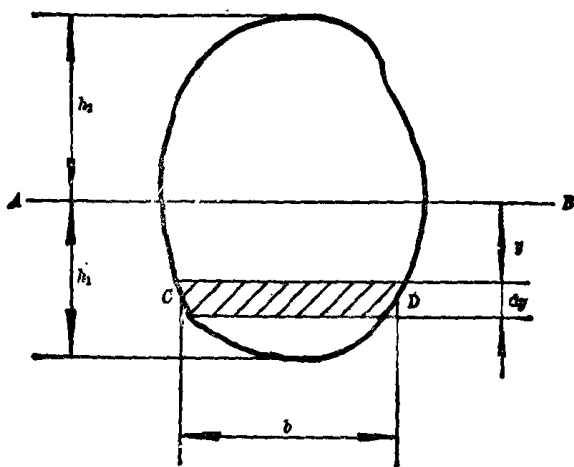


图 1.3 纯弯杆件的横截面

长度为 l 在弯曲变形中积蓄的拉伸能, 根据(1.6)式为

$$dU = \frac{1}{2} E \left(\frac{\theta y}{l} \right)^2 \cdot dA dy, \quad (1.14)$$

其中 b 为微元的宽度, 在整个截面上积分, 即得杆件 l 在纯弯状态下的应变能, 即

$$U = \frac{1}{2} E \frac{\theta^2}{l} \int_{A_1}^{A_2} b y^2 dy = \frac{1}{2} E I_z \frac{\theta^2}{l}, \quad (1.15)$$

这和(1.13)第二式完全一样.

现在让我们来研究杆件在分布的拉力、扭矩和弯矩作用下的应变能.

当杆件在分布的拉力作用(如自重载荷)时, P 不再是常量而是 x 的函数 $P(x)$, 微元长度 dx 中所积蓄的应变能, 根据(1.3)第一式为 $dU = \frac{P^2(x)dx}{2FE}$, 所以整个杆件的拉伸应变能可以通过积分求得

$$U = \int_0^l \frac{P^2(x)dx}{2FE} \quad (1.16)$$

这个积分表达式, 同样也适用于变截面的杆件(F 为 x 的函数)和材料不均匀的杆件(E 为 x 的函数), 同样, 我们也可以通过变形来表示分布拉力作用下杆件的应变能. 但是, 这里必须指出, 由于分布拉力在杆件各点所产生的应变不相等, 做的功也不相等, 因此, 无法用整个杆件的总伸长来表示总的应变能. 要用变形来描写拉伸应变能, 我们就必须要引进一个描写连续变形的量, 这个量称为各点的位移. 对于拉伸的杆件而言(图 1.4), 同一截面 c 上各点在拉伸后顺着拉伸方向移动的距离 $u(x)$, 称为截面 c 上各点的位移, 这时 c 移至 c' 处, 设离 c 点 dx 处的点 D 在拉伸后到达 D' 点, 其移动距离为 $u(x+dx) = u'$, 当 dx 很小时,