

电机及其电子控制

〔美〕 S A 纳萨尔 著
L E 昂尼韦尔

朱东旭 沈传立 叶东译

李友海校

科学出版社

1992

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书系统地论述了几种基本类型电机的原理和特性,简要阐明了机电能量转换的基本原理及电机的统一理论,同时对各类电机的应用及其电子控制作了扼要介绍。书中的部分章节介绍了与电机有关的数值计算方法和分析电机静、动态性能的统一方法,也介绍了在电机传动的电子控制中所出现的问题。本书内容反映了当今电机电磁材料、电机制造、计算机应用及电机的电子控制等方面的发展。

本书可作为高等院校有关专业的教学参考书,并可供有关的科技人员参考。

S. A. Nasar L. E. Unnewehr
ELECTROMECHANICS AND ELECTRIC MACHINES
John Wiley & Sons, Inc., 1983

电机及其电子控制

S. A. 纳萨尔 著
〔美〕 L. E. 昂尼韦尔

朱东起 施传立 叶东译

李发海 校

责任编辑 范铁夫 万钧

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1992年6月第 一 版 开本:850×1168 1/32

1992年6月第一次印刷 印张:14 1/2

印数:1—3100 字数:370 000

ISBN 7-03-002691-8/TN·118

定 价: 15.80 元

目 录

第一章 绪论	1
1.1 旋转电机的类型	3
1.2 效率、能量和损耗	8
1.3 均方根值和平均值	11
1.4 分析方法	12
1.5 机电装置的额定值和限制	14
1.6 经济性问题	17
第二章 静止交流和直流磁路	20
2.1 电磁场理论的回顾	21
2.2 磁性材料	23
2.3 磁的损耗	30
2.4 磁路	34
2.5 安培定律用于一个磁路	36
2.6 磁路方法的局限性	41
2.7 理想磁路	43
2.8 法拉第定律和感应电压	44
2.9 磁场中的能量关系	45
2.10 电感	46
2.11 含有永久磁铁的磁路	50
习题	58
第三章 变压器	64
3.1 变压器的构造和电磁结构	64
3.2 变压器理论	70
3.3 变压器实验	90
3.4 变压器的电容	95
3.5 涌流	96
3.6 一些特殊型式的变压器及变压器联接	98

习题	109
第四章 机电系统	113
4.1 电磁场产生的机械力	113
4.2 能量守恒和能量转换	115
4.3 力的方程式	116
4.4 电流和磁通的变化	126
4.5 机电系统的动力学	127
4.6 电的等值电路	138
4.7 双和多励磁系统	140
4.8 瞬时值、平均值和均方根值问题	141
习题	142
第五章 直流换向器电机	149
5.1 直流换向器电机的描述	149
5.2 电枢绕组	155
5.3 电枢电压	161
5.4 电磁转矩	164
5.5 直流换向器电机的接线方法	166
5.6 电枢和励磁电路的磁特性	171
5.7 换向	175
5.8 损耗和效率	178
5.9 实验确定电机参数	181
5.10 预先确定工作特性	182
5.11 直流换向器电机的特性	186
5.12 直流换向器电机的动力学	199
习题	206
第六章 感应电机	212
6.1 电枢绕组磁势	215
6.2 多相感应电动机的作用原理	221
6.3 转差率和转子电流的频率	222
6.4 转子等值电路	223
6.5 完整的等值电路的推导	224
6.6 由等值电路计算性能	231
6.7 由实验求等值电路	235

6.8	感应电动机的性能指标	237
6.9	感应电动机的速度控制	239
6.10	感应电动机的起动	243
6.11	单相感应电动机	245
	习题	252
第七章	同步电机	256
7.1	同步电机的结构特点	257
7.2	同步电机运行原理	263
7.3	对某些实际问题的考虑	268
7.4	同步电机的运行特性	271
7.5	同步电机的瞬变过程	284
7.6	同步电机电抗的测定	290
7.7	小型同步电动机	292
	习题	295
第八章	电动机的电子控制	298
8.1	电动机控制的一般问题	298
8.2	电压和电流波形	300
8.3	功率半导体器件	304
8.4	可控硅换向技术	318
8.5	门极和基极电路开通技术	330
8.6	相控整流器	335
8.7	续流二极管	341
8.8	斩波控制器	350
8.9	交流电动机的控制	367
8.10	控制器-感应电动机的损耗	383
	习题	385
第九章	统一电机理论	390
9.1	问题的性质和目的	390
9.2	确定电机的电感	392
9.3	定子为凸极的电机	400
9.4	隐极式电机	402
9.5	凸极转子电机	403

9.6 其它变换	407
9.7 三相变换	413
9.8 原型电机	413
9.9 时域法	415
习题	426
附录 1 符号和单位的说明	428
附录 2 单根漆包圆形电磁线表	431
附录 3 机电系统和电机分析中的计算机技术	433
参考文献	435

第一章 绪 论

本书阐述机电学原理及其在设计和分析电动机、发电机、变压器和其它机电装置中的应用。其内容涉及多种学科，包括从高等数学、计算机科学到物理和材料科学的有关电气和机械工程的许多领域。这些机电装置和系统在尺寸、结构型式、材料、转速、电气频率及其使用等方面虽各不相同，但它们都是用机电学原理进行分析的。

无疑，人类生活的每个方面几乎都离不开机电装置。今天，美国居民平均拥有的电动机数大约最少为 10 台，最多可能超过 50 台。甚至超小型汽车上，至少也有 5 台旋转电机，由于加装了排废和燃料经济系统，这个数字还要大。飞机上则需要更多的电机。机电装置关系着当今技术社会的每一个工业和制造业部门。许多旋转电机已在月球上运行，并在很多航天系统中起着重要作用；越来越多的人天天依靠电动装置——电梯和电动自行车而行动；近来，在美国几个主要的城市里发生的停电事故的影响，说明了城市生活对电机的依赖达到了何种程度。

本书讨论一个广泛而重要的课题，对于所有希望发展电技术以解决近来面临的能源、污染和贫困等问题的人们，懂得电机学原理是十分必要的。读者应根据机电装置和电机长期有用的事实来学习本书。

从前面简单列举电机的应用来看，工业部门许多方面的应用已经成熟并能满足社会的需要，研究和发工作相对地不很需要。例如，用于现代家庭垃圾处理的电动机是由相当简单的计算机程序设计的，并由全自动生产线制造；每年生产的数亿只钟表电动机的设计和制造也几乎是全部标准化的；许多类型的工业用电动机也是同样的情况。

但是,这仅仅是观察今日机电装置发展情况的一个侧面,甚至普通电动机生产厂家的常规工艺,也可能在不远的未来急剧变革。根据联邦能量局的估计,如果家用、办公室用、商用及工厂用小型电动机的效率提高 20%,美国每天就能节约 1—2 百万桶油,这种努力可以通过改变单相感应电动机的电容大小和绕组联接来实现。

现在正努力改进材料和设计来提高电动机的效率。然而要注意材料的利用率,制造和使用时对环境的影响(特别是绝缘材料)及生产这些材料的能源消耗等。例如,铝能满足应用上所要求的许多电气特性,又是世界上最丰富的金属之一,但冶炼铝的过程却要耗费大量的电能。

由于能源和环境条件等原因,普通电机在制造和运行方面正发生着变化。除此之外,许多新型的电机结构、老式结构的特殊运行、各种电机的电子控制、更经济和高效率电机的理论和设计技术等,都得到了突破性的发展和应用。许多新的应用又影响着普通的老式电机,如为了制造较高经济竞争能力的电车,可采用由晶体管逆变器供电的普通鼠笼式感应电动机或重新设计整流子电动机。其它新的应用,又联系着新型的电动机结构的设计,如为了适应航天、汽车等工业部门的需要,而正在发展的无刷直流电动机。

电机的电子控制几乎从电子时代的初期就开始应用,那时是用汞弧整流器控制电动机。然而,随着近代固态大功率装置、集成电路、低成本计算机的出现和迅速发展,电动机控制的范围、质量和精度实际上已经不受限制。

机电装置和电子线路的整体化,现在仅仅是开始。环境条件总是对电机的设计和运行提出挑战。例如,对早期的电机设计者,有效而可靠的电气绝缘是一个最困难的问题。近来,对包括核电站和一些宇宙飞船的各种形式核辐射的特定环境,旋转电机和机电装置已经有了发展,空间应用要求它们在这些环境中具有高度的可靠性。最后,由于经济的新能源的出现,机电能量转换装置需要具有与各种能源相适应的特性,这些能源包括太阳能、风能、各

种形式的核结构、煤-油转换、水力等。

本章除了介绍机电装置进一步发展的可能性外，还将讨论多数机电装置共同的基本概念，简述以后各章采用的分析方法，介绍旋转电机的主要分类。

一本书不可能解决一切所提及的问题，本书只介绍机电装置的基本知识，给出分析中某些有用的设计指南和近似计算。由于篇幅所限，许多问题无法讨论。我们相信读者会参考每章给出的参考文献，当然所列参考文献以外还会有许多有关材料，我们希望本书能促使读者进一步对这些材料进行探索。

1.1 旋转电机的类型

旋转电机分四种基本类型：直流电机，感应电机，同步电机和多相整流子电机。还有其它几种电机并不属于上述传统的电机类型，它们包括步进电动机，一般地说，它是以数字方式运行的同步电机；力矩电动机，是力矩(零或低速)运行方式的直流电机或直流无刷电机；单极电机，是法拉第盘发电机原理的变型，并用于低压大电流的电镀负载²；静电式电机，是与本书讨论的电磁式电机在理论和实际上完全不同的类型³。

1. 直流整流子电机

通常称为直流电机，它广泛地应用于电力牵引及许多工业部门，这将在第五章里讨论。

2. 感应电机

感应电动机不仅在工业部门用得很广泛，也是家庭和办公室里的主要电动设备。其广泛应用的原因在于结构简单、坚固耐用、寿命长等优点。它也能作发电机运行，并且以这种运行方式应用于航天和水力发电等方面。由于感应电动机的转子结构简单，因而可以在高速下运转。图 1.1 为在接近于 64000rpm* 高速下运行的航天用感应电动机，其电源频率为 3200Hz（参阅第六章）。

* rpm = 1r/min.

3. 同步电机

同步电机可能是结构变化最多的一类电机,在一门课程内,要了解其各种变化是困难的,同步的词意指的是速度和频率的关系,其关系(详见第七章)为

式中
$$n = 120 \frac{f}{p} \quad (1.1)$$

n = 电机转速(转/分);

f = 电源频率(赫兹);

p = 电机极数.

同步电机只能运行于同步速度,感应电动机在略低于同步速度下运行,常常称为异步电动机。当今,种类繁多的同步电机正得

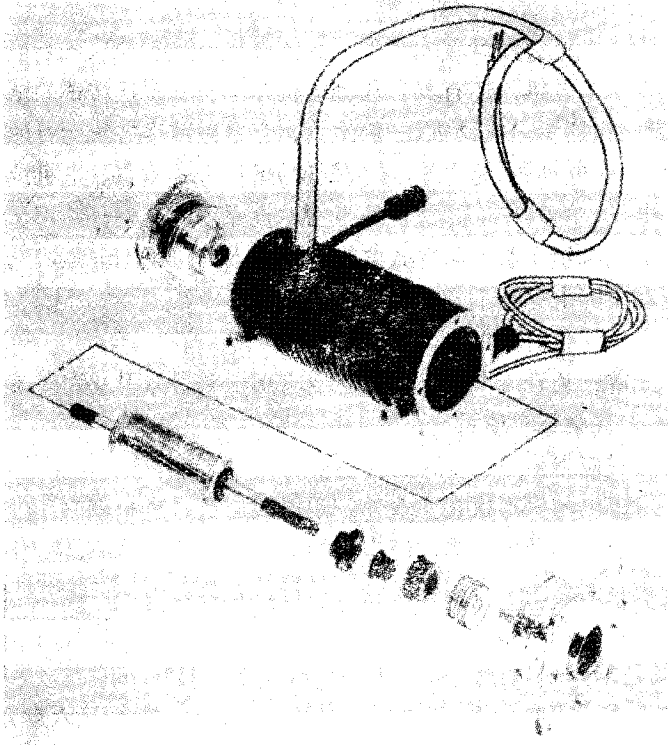


图 1.1 航天用 5hp,51b,3200Hz, 62000rpm 的感应电动机部件分解图

到广泛的应用。

(a) 普通结构。这是一般类型的同步电机（在第七章讨论），该电机转子要求直流电源励磁。它在发电厂中作发电机运行，在泵、压缩机等许多电机拖动中作电动机运行。图 1.2 为一大型发电机的剖面图。

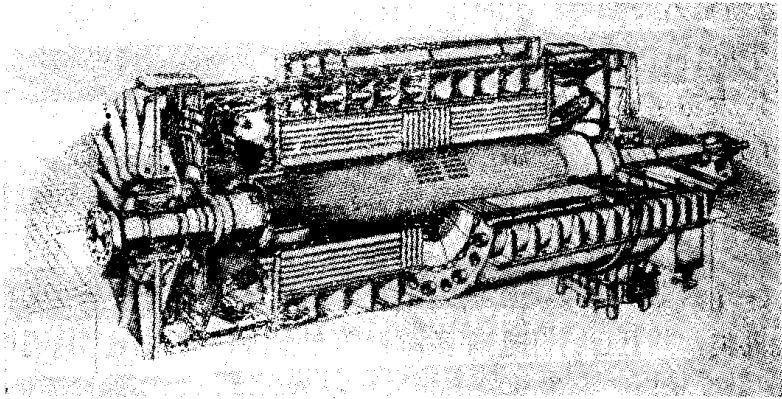


图 1.2 水冷汽轮发电机剖视图

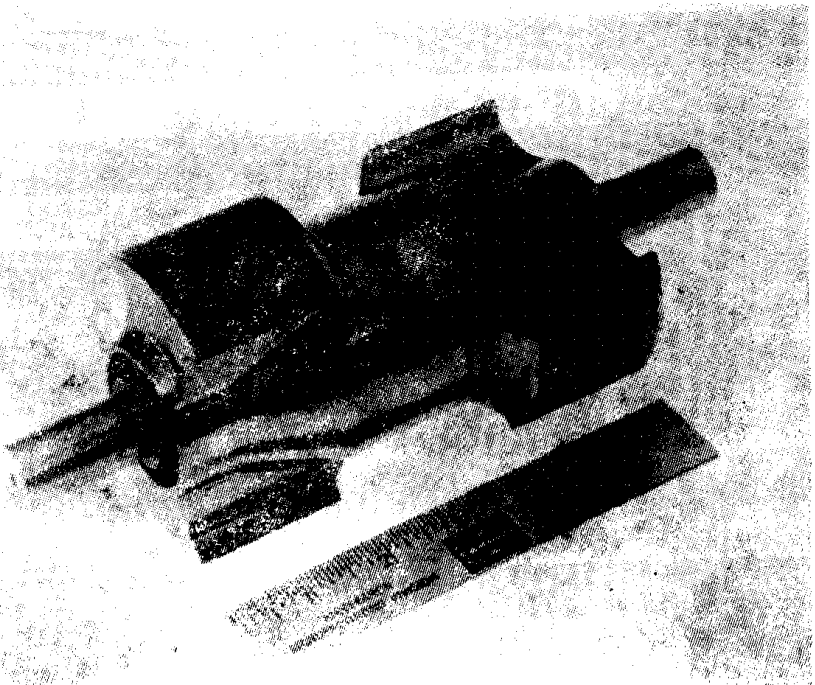


图 1.3 100kVA, 12000rpm 感应子式电机的转子

(b) 磁阻电机。这是一种没有直流励磁的普通结构的同步电机,在第四章和第七章将要讨论。它是结构最简单的电机之一,近来已用于通常由感应电动机拖动的场合。磁阻电机的功率很小,用于电钟、计时器和记录器等装置中。

(c) 磁滞电机。该电机像磁阻电机一样,只要求一侧电输入(单边励磁),磁滞电动机的转子是磁滞材料制成的实心圆柱体。它应用于电钟、电唱机和其它恒速拖动场合。近来,磁滞电动机已经用于较大功率输出的拖动,如离心机。

(d) 旋转整流励磁的交流电机。该类电机除由交流励磁发电机和装在转子上的整流器供给励磁外,与普通的同步电机结构是相同的。

(e) 感应子式电机和磁通开关。它们属于无刷同步电动机和发电机类,并且已经用于许多航天和牵引等拖动场合。如同磁阻电机一样,感应子电机和磁通开关的运行是基于可变磁阻的原理,磁阻是转子位置的函数,它可由转子设计来满足这一要求。图 1.3 表示感应子式交流发电机的转子结构,图 1.4 表示装配好的感应

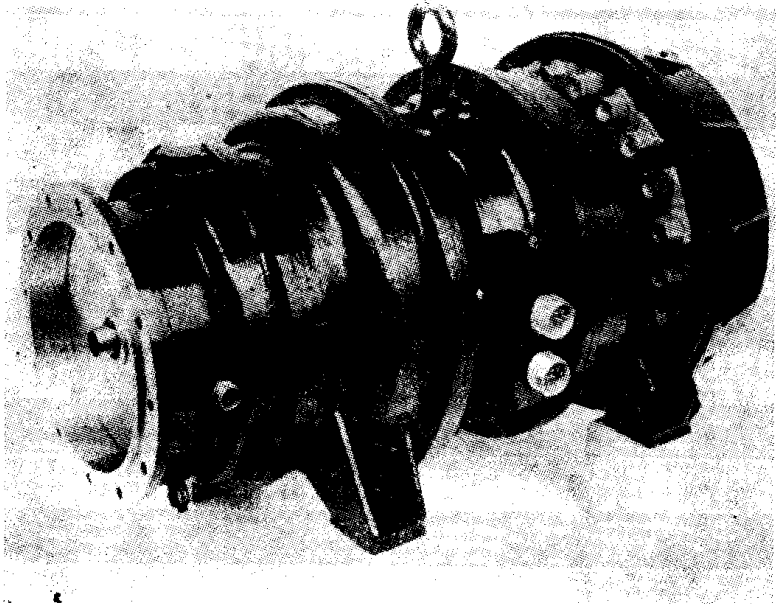


图 1.4 装配好的 520kVA,3900rpm,12 极感应子式交流发电机

子式电机。

(f) 伦德尔电机。这种电机用作汽车交流发电机，是最常见型式的同步电机(大约相当于电钟用电动机大小)，它是无刷的，但要求一个滑环供给直流励磁。该类电机亦是基于磁阻变化的运行原理。

(g) 贝克-鲁宾逊电机和纳登-赖斯电机。它为无刷同步电机，基于转子结构(变化磁阻)而工作，它们在航天事业中已经得到许多应用。

(h) 永磁电机。这是一个由永久磁铁供给励磁磁场的普通结构同步电机。由于没有励磁损耗，可以达到很高的效率，并且价格较低。图 1.5 为用于航天的永磁交流发电机转子。

高效率是永磁电机的一个特点。然而，要做到相当大的功率时，永磁电机要求采用相当昂贵的永久磁铁，如钴-铂和钴-稀土合金。并且，永磁电机是恒定的励磁磁场，没有励磁调节环节，而励磁调节是同步电机相比于感应电机的一个主要优点。

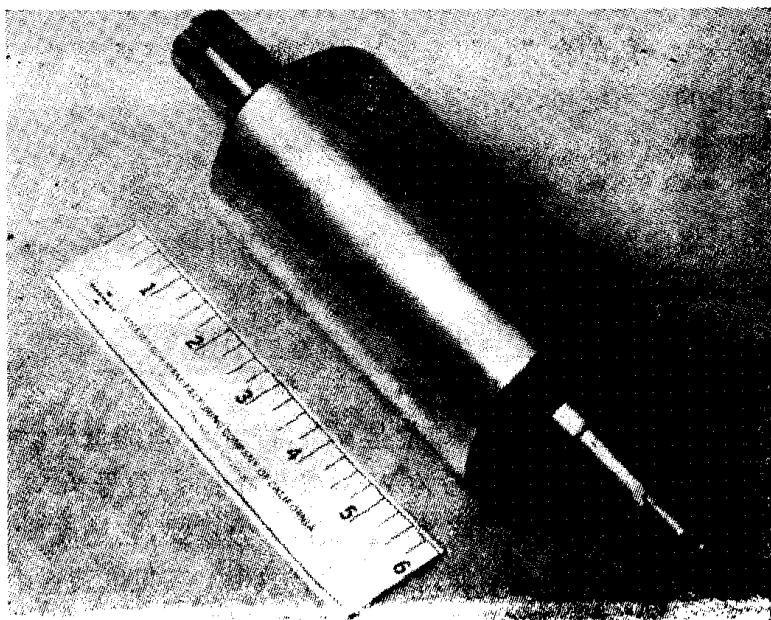


图 1.5 要求高效率、高比功率 (W/kg) 的航天应用的 $60kVA$ ， $30000rpm$ ，8 极永磁电机转子

4. 多相整流子电机

感应电机的一种常见形式是绕线式或称滑环式感应电机。这种电机是由类似于定子绕组的普通绕组代替了转子的鼠笼条和短路环，转子绕组线端通过滑环或多相整流子引出，供外部联接用。如果以不同方式给转子绕组励磁，可以得到宽范围变化的电机特性，该励磁电压和频率必须是由定、转子之间速度差值所决定的数值，它通过整流子引入转子电路。

多相整流子电机可以获得宽范围变化的调速特性，特别是在欧洲，这种早期的变速交流电动机仍在继续应用。由于用于鼠笼式感应电动机、直流电动机和同步电动机控制电压和频率的廉价电子装置的出现，多相整流子电机已失去其重要地位。

1.2 效率、能量和损耗

所有类型的机电装置应用时的一个重要因素是装置的效率，效率在不同类别物理系统中有不同的含义。事实上，人们所谈的效率有一个一般的含义，即衡量某项工作完成的好坏程度。在本书将讨论的电系统里，效率总是确定为

$$\eta = \frac{\text{输出功率或能量}}{\text{输入功率或能量}} \quad (1.2)$$

也可将能量或功率的输出、输入关系用机械损耗和电损耗表示为

$$\eta = \frac{\text{输出}}{\text{输出} + \text{损耗}} = \frac{\text{输入} - \text{损耗}}{\text{输入}} \quad (1.3)$$

在国际单位制 (SI) 中，功率单位是瓦特，符号为 W；能量单位是焦耳，符号为 J，或瓦特·秒，符号为 W·s，或瓦特小时，符号为 W·h。

今天，电机的能量利用或效率正显得十分重要，它是最重要的设计标准之一。因而，必须懂得如何计算效率。在机电装置中，效率表达式中的分子或者分母是机械功率或机械能，旋转电机的机械功率可表示为

$$P_m = T_{av} \Omega_{av} \quad (1.4)$$

式中

T_{av} = 轴上转矩, 牛顿·米;

Ω_{av} = 转轴角速度, 弧度/秒.

电机的电气端, 功率表示为

$$P_e = VI \cos\theta \quad (\text{正弦量}) \quad (1.5)$$

或

$$P_e = V_{av} I_{av} \quad (\text{直流或脉冲量})$$

式中

V = 电机端电压, 伏;

I = 线电流, 安;

θ = 功率因数角.

上述公式及全书的均方根值 (rms) 书写为大写体、无下标的符号; 时间平均值书写为大写体、带下标 av 的符号. 上述方程式计算的功率为平均功率. 上述方程式右端也常用瞬时值并记为小写体字母, 左端则为瞬时功率. 在机电系统分析中, 平均功率和瞬时功率两者的应用都是常见的. 能量 W 是功率的时间积分, 即

$$W = \int p dt \quad (1.6)$$

能量的国际单位制单位是焦耳或瓦特·秒.

1.2.1 工作周期

旋转电机在许多运行情况下, 其功率不是恒定不变而是随着时间变化的. 当功率的变化能用周期性函数描述时, 称之为工作周期. 工作周期主要用来描述电动机的负载变化, 但是, 这一概念对发电机、变压器和其它功率装置, 在一定条件下运行时同样也是有效的. 工作周期可以由输入或输出功率、轴上转矩、电枢电流或其它表征负载变化的量表示. 这种类型负载的应用实例有洗衣机、冰箱压缩机、多种形式的机床加工, 以及按规定的工作周期行驶的电气车辆.

图 1.6 表示一个简单的工作周期，它代表了许多电动机负载，如冰箱压缩机等。由于幅值可以是功率、转矩、电流或其它量，因此图中用一个通用符号 A_{\max} 表示。图 1.7 表示一个较复杂的工作周期，它是一种电气车辆典型的转矩-时间特性，如按规定方式工作的叉式起重车。注意其函数值有正有负，负值表示发电机功率、转矩或电流，意味着处于能量再生的制动运行状态，再生制动将在第五章进一步讨论。

分析工作周期的目的在于确定满足某种负载要求的电机的大小或额定值和决定能量效率。一般来说，由于工作周期内每个功率级的效率是不同的，对于运行在如图 1.7 所示几段功率级条件下的电机，必须分别计算各段的效率。

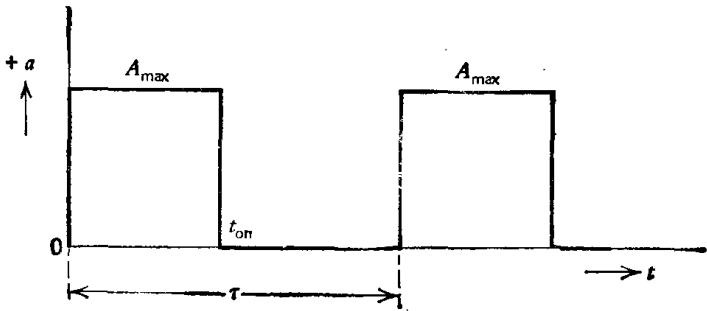


图 1.6 开/停工作周期

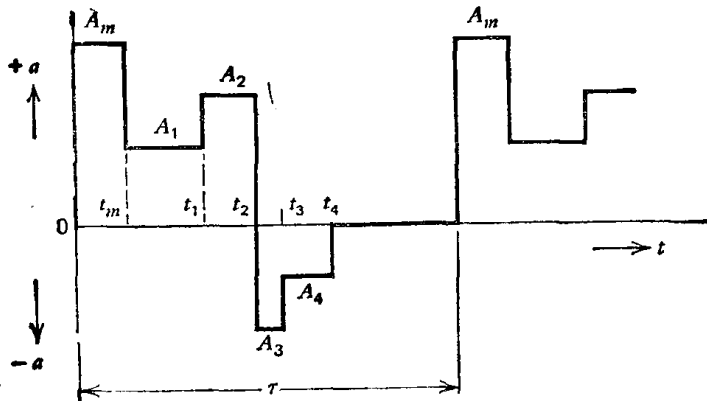


图 1.7 有再生制动运行方式的电气车辆工作周期

1.3 均方根值和平均值

读者通过电路理论的学习,对周期性电压、电流波形的均方根值 (rms)、半波平均值 (hwa) 和平均值 (av) 的概念是熟悉的。这些参量对研究和分析机电装置是有用的,如同应用于电压和电流周期性函数一样,它们也应用于 1.2 节所讨论的周期性变化的功率和转矩中。

理解机电装置的运行情况,需要考虑其中各量随时间变化的波形的性质。负载工作周期的性质提供了电机运行的条件。机电装置中的电压、电流波形对描述各种情况下的运行、控制和性能同样是有用的,因而旋转电机的分析总是基于所假定的标准波形。最通常的标准波形或有规则的波形组成傅里叶级数的一系列正弦波形、稳定或不变的波形(常称稳态直流)和图 1.6 的脉冲波形。随着旋转电机电子控制的出现,许多其它有规则的波形正变得更为常见,其中一些波形将在第八章前几节里介绍。

我们这里将修正这些参量的定义,并给出一些应用于工作周期计算方面的例子,至于与电子控制有关的电流均方根值和平均值的计算,将在第八章里举出一些例子。

随时间变化的某量 a 的均方根值,定义为

$$A = \left(\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} a^2 dt \right)^{1/2} \quad (1.7)$$

式中

a = 瞬时值;

τ = 计算均方根值的时间周期;

t = 时间,

参量的平均值必须仔细定义,对于某些周期函数,其半波平均值定义为

$$A_{HWA} = \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau/2} a dt \quad (1.8)$$