

电气传动控制

联邦德国 W. 莱昂哈特 著

科学出版社

内 容 简 介

本书是作者根据多年(特别是近10年)的教学实践和科研成果撰写的。

全书共15章,全面论述了电气传动系统,包括电气传动基础(第一~四章)、直流传动(第五~九章)、交流传动(第十~十四章)以及可控传动应用(第十五章)等四部分。其中直流传动与交流传动两部分各自包含电机、功率变换器与控制技术等三个方面。书中完整地论述了直流传动,而重点则放在交流传动上。

本书可作为高等院校电气自动化类的教师、研究生、高年级学生以及这个领域中的工程技术和研究人员的参考书。

W. Leonhard

CONTROL OF ELECTRICAL DRIVES

Springer-Verlag, 1985

电 气 传 动 控 制

[联邦德国] W. 莱昂哈特 著

吕 蔚 杰 译

陈 伯 时 校

责任编辑 李淑兰 杨 艳

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街147号

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

1988年6月第一版 开本:787×1092 1/16
1988年6月第一次印刷 印张:18 1/4
印数:0001—6,600 字数:408,000

ISBN 7-03-000385-3/TP·24

定价:4.70 元

译 者 的 话

将电能转变为机械能的电气传动技术,在国民经济中占有重要地位,在实现我国四个现代化的进程中更是起着不可估量的作用。当前我国电气传动技术的水平与国外先进水平相比尚有明显的差距。翻译本书的目的便是希望促进国内这门技术迅速发展。

本书是联邦德国不伦瑞克工业大学控制技术研究所所长 W. 莱昂哈特 (W. LEONHARD) 教授在他的 1974 年出版的德文版教科书《电气传动技术中的控制 (Regelung in der elektrischen Antriebstechnik)》一书的基础上,综合了从 70 年代中期至 80 年代中期的教学及其所领导的科研工作中的新成果重新撰写的。可以说,这一时期是电气传动技术具有划时代意义的全新的发展阶段,发展的标志是采用微电子技术在这一时期中所取得的重要成果——微处理机 (其数据处理速度与精度越来越高),实现了各类交流电动机的高性能实时控制系统。在这个发展进程中, W. 莱昂哈特教授及其研究所一直处于世界前列。本书的一个重要特点便是详尽地反映了在这方面的主要成果。无疑地,这已经、并还将对国内在这方面的研究工作起很大的帮助作用。

本书不仅是一本论述现代传动技术的专著,而且也是一本不可多得的教学参考书。作者根据长期的教学、科研经验,有机地综合了历史背景与当前状态、基础理论与先进技术、理论模型与真实系统、现有成果与研究方向,使读者能够循序渐进地掌握电气传动控制技术的基本概念、理论、典型系统,并了解该领域中的现代技术水平。作者曾应邀两次来华讲学,本书便是主要教材,受到了来自全国各地的教授、专家、青年科技工作者与教学人员的一致好评。

诚如 W. 莱昂哈特教授在他为中文版写的序言中衷心祝愿我国尽早实现工业现代化那样,他对我国具有十分友好的感情。教授两次来华,不辞辛苦,在京、汉、沪、杭等地讲学、进行学术讨论。由于他学识丰富,学术作风严谨而朴实,在科研成果与尚未解决的问题方面对我们采取坦率的态度,而且待人平易谦逊,使广大参加听讲与讨论的人员受益匪浅。为此,译者愿通过本中译本的出版对 W. 莱昂哈特教授表示深切的感谢。

上海工业大学陈伯时教授对译稿在技术内容上作了极其细致而严格的校正,在语言上作了高质量的修正与润饰。由于作者受篇幅与取舍原则所限,往往在寥寥数语中隐涵了很多信息,所以理解与翻译的难度较大,陈教授的校正工作对保证译文的正确性起了重要作用。译者谨在此对陈教授表示万分谢意。

借此机会译者愿对关心本译本出版工作的同志们以及在出版工作中克服了各种困难的出版社编辑表示感谢。

由于种种原因,译文中的错误与不当之处仍在所难免,望广大同事与读者指正,以便再版时改正。

最后需要说明的是,译文中个别地方是根据作者意见对原文改动后译出的,恕不一一注明。

译 者

1987 年 3 月于北京

中文版序言

自然科学和工程技术确实是各国人们共同为之努力的事业，背景各异的人们可以很容易地在这方面取得相同的观点，而不致因语言的障碍产生很多误解。1984年我在中国的一个月讲学旅行中对此有深切的体验，在那里，一旦语言上的鸿沟被一位专家架起的桥梁沟通后，就能够与听众进行很好的交往。因此我高兴地赞同吕先生（北京工业大学）的想法，他在陈教授（上海工业大学）的鼓励下建议将本书译成中文，他曾在不伦瑞克与我们共同度过了两年的时间，有机会与我们广泛交换了各种观点；在我的讲学旅行期间，他承担了德中之间的翻译工作。因此，由他来完成这项工作是非常合适的。

我衷心希望本书将有助于中国同事们为加速实现他们国家的工业现代化而作的努力。因为，机械能及其高效率的电气传动控制技术，毕竟是工业进步的一个至关重要的必要条件。

W. 莱昂哈特

1985年11月于不伦瑞克

前 言

作为机电能量变换器的电气传动装置在交通运输和大部分生产过程中起着重要的作用。由于工业技术的发展,用户对设备的灵巧和精确的要求日益增高,电气传动易于控制,这是它能够不断适应这种需要的重要原因。

另一方面,电动传动控制技术在过去也大大地推动了一般控制工程,导致新型控制结构的发展,并在其他控制领域中推广应用。这是因为电气传动技术的运行条件严格,能满足多种技术要求——一个电气传动装置可以实现转矩、加速度、转速或位置等各种控制,也由于大部分电气传动装置(与化工或热工过程相反)具有定义明确的结构和始终如一的动特性。

过去几年中,可控电气传动领域飞速发展,这主要是由于半导体技术在动力电子学和模拟与数字信号电子学方面的进展所促成的。后者最终发展成了微电子技术和微处理器技术。由于引入了电子开关型固体功率变换器,人们又重新开始了对交流电动机传动技术的探究,以免受直流电动机机械整流子的约束,这就产生了新的、困难的控制问题。另一方面,由于电子功率开关元件响应快而过载能力有限,就必不可少地需要加上起保护作用的控制功能,目前的发展进程看来还要持续很多年,一个新的稳定状态尚未出现。

本书是作者多年来在不伦瑞克工业大学所授相应课程的总结,最初是在1974年用德文出版的。在这次更新的英文译本中,突出体现这门技术当前的水平,而不企求包罗万象。删去了不少有趣的细节,但这未必是什么损失,因为那些细节往往早已过时。在选用素材时,也从教学法的观点上做了考虑。

读者应该预修过动力电子学、电机学和控制工程的基础知识,正如在大多数本科电气工程课程中所讲授的那样,需要补充的引证材料已列入文献备查。然而正文的内容对于那些想扩充或更新其可控电气传动方面的知识的非本行专家来说,也必定是足够的了。

可控电气传动装置由电机、功率变换器、控制设备和机械负载等几部分组成。书中以不同的深度对各部分进行了讨论。在第一至第四章中简略地概述了力学和电机学中的热效应,对于富有经验的读者,这部分可以略去不看。在第五至第九章中讨论了直流传动技术,这是目前在需要可控传动时所采用的常规方法。这一部分内容也包括了给直流电机供电的电源换流整流器。第十章从稳态与暂态都适用的对称感应电动机的通用动态模型出发,开始讨论交流传动技术。随之在第十一章中综述了交流传动用的静止变换器。控制方面的问题在第十二至第十四章中进行讨论,重点放在高动态性能的传动上;在这里,微处理器在交流电机多变量交互作用的解耦问题中被证明是极其宝贵的。最后在第十五章中叙述了与传动技术的工业应用有关的某些问题;这决不可能概括设计者在实际中可能遇到的多种多样的特殊情况,但是对于传动系统应用中的一些比较常见的特点都作了阐述。可控传动的设计,特别是功率较大系统的设计,不能只考虑到电动机轴为止,而必须对整个机电系统进行分析,这当然是显而易见的。

鉴于本书是一本应用性教科书的翻译与扩充,必然会遇到一些与符号、电路图等有关

的问题。在与有权威的顾问及出版者进行了详细磋商之后,采取了折衷的办法,即在一切可能之处都采用 IEE 所推荐的符号,但在那些容易使作者的国内读者产生混淆的地方,仍保留作者的用法。符号汇编于目录之后,所采取的基本原则是:时变量一般用小写拉丁字母表示,而大写字母则用来表示参数、平均值和相量等;希腊字母主要用来表示角度、角频率等。但仍难免有重叠之处,因为可用符号的数量有限。另外,所列文献大多来自欧洲大陆,为了弥补这个缺点,许多标题采用英文。所列参考文献当然并不完全,不过是作者易于得到的资料。书中直接引用文献之处也并不多。希望读者能以足够的耐心和谅解,容忍这些不足之处。

作者愿对两位英国同事,诺丁汉大学的 R. M. Davis 和布里斯托尔大学的 S. R. Bowes,表示真诚的感谢。他们帮助和鼓励作者对德文原版本进行更新的翻译,并花费了不少时间与精力审阅修改了原来粗陋的译文,没有他们的帮助,这项工作是不可能完成的。任何承担润饰一本外文教科书的译文的人都能体会这项工作是多么乏味和耗费时间,还要感谢这套 Springer 丛书^{*)}的编辑 J. G. Kassakian 教授和 D. H. Naunin 教授,感谢出版者,谢谢他们的合作和不断的鼓励。

W. 莱昂哈特

1984 年 10 月于不伦瑞克

^{*)} 本书是 Springer 出版社出版的“电能系统与工程丛书(Electric Energy System and Engineering Series)”中的一本。——译者注

缩写与符号

1. 方程

所有方程包含的变量,都是某个单位和一个无量纲数之积,这个无量纲数取决于单位制的选择。

某些变量由于其自身的性质,或是因为采用了标么值 (p. u.), 因而是无量纲的。

2. 字体特征

$i(t), u(t)$ 等	瞬时值	矢量, 用于多相系统
$\bar{i}, I_d, \bar{u}, U_d$ 等	平均值	$i^*(t), u^*(t), I^*, U^*$ 或 $i^*(t), u^*(t), I^*, U^*$ 等
$\hat{i}, \hat{u}$ 等	峰值	共轭复矢量或复相量
I, U 等	均方根值	${}^1i(t), {}^1u(t)$ 或 ${}^1i(t), {}^1u(t)$ 等
I, U^* 或 I, U 等	正弦变量复数相量	特定坐标系中的矢量
$i(t), u(t)$ 或 $i(t), u(t)$ 等	复数时变	$I(s) = L(i(t))$ 拉普拉斯变换

3. 符号

缩写	变量	单位
$a(s)$	电流分布率	A/m
	线加速度	m/s ²
	无量纲系数	
A	面积	m ²
b	无量纲磁场系数	
B	磁通(量)密度	T
C	电容	F
	热容量	J = Ws/°C
D	阻尼系数	
$e(t), e(t), E, E, E$	感应电压、感应电势、电动势	V
f	频率	Hz = 1/s
	力	N
$F(s)$	传递函数	
g	重力常数	m/s ²
$g(t)$	单位脉冲响应	
G	重量	N
	增益	
h	气隙	m
$i(t), i(t) I, I$	电流	A

* 黑体字符是中文译本增加的。——译者注

J	转动惯量	kgm^2
k	无量纲系数	
K	扭转刚度	Nm/rad
l	长度	m
L	电感	H
$m(t)$	转矩	Nm
M	质量	kg
	互感	H
N	匝数	
$p(t), P$	功率	W
Q	无功功率	VA
r	半径	m
R	电阻	Ω
	转速, 转/分	$1/\text{min}$
$s = \sigma + j\omega$	拉普拉斯变量	rad/s
s, x	距离	m
S	转差率	
t	时间	s
T	时间常数	s
$u(t), U, \mathbf{U}, \underline{U}$	电压	V
$v(t)$	速度	m/s
	单位斜坡响应	
V	体积	m^3
$w(t)$	单位阶跃响应	
x	控制变量	
y	动作变量	
z	扰动变量	
$z = e^{sT}$	离散拉普拉斯变量	
Y	导纳	$1/\Omega = \text{S}$
Z	阻抗	Ω
α	传热系数	$\text{W/m}^2\text{°C}$
	触发角	
	角加速度	
$\alpha, \beta, \delta, \zeta, \xi, \lambda, \mu, \rho$ 等	角坐标	rad
$\gamma = 2\pi/3$		
δ	负载角	
Δ	差分算子	
ε	转角	
ε	耦合系数	

η	效率	
ϑ 温度	温度	$^{\circ}\text{C}$
	绝对温度	K
$\Theta, \ominus$	磁动势 (m. m. f.)	A
μ	导磁系数	H/m
ν	整数	
σ	漏磁系数	
$\tau = \int \omega dt, \omega t$	标么化时间, 角度	
φ	相位移	
$\cos \varphi$	功率因数	
Φ	磁通	$\text{Wb} = \text{Vs}$
ϕ, ϕ	磁链	$\text{Wb} = \text{Vs}$
ω	角频率	rad/s

4. 下标

i_a	电枢电流
i_c	励磁电流
u_F	励磁电压
i_s	定子电流
i_R	转子电流
i_{sd}, i_{sq}	定子电流的直轴与交(横)轴分量
i_{rd}, i_{rq}	转子电流的直轴与交(横)轴分量
i_m	磁化电流
i_{mR}	代表转子磁通的磁化电流
m_d	驱动转矩
m_L	负载转矩
m_p	失步转矩
S_p	失步转差率

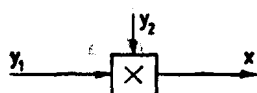
5. 图形符号

	$x(t) = \frac{1}{T} \int y dt$	积分环节
	$T \frac{dx}{dt} + x = Gy$	一阶惯性环节
	$x(t) = Gy(t - T)$	纯延迟环节



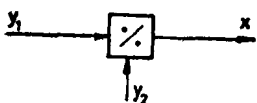
$$x = y_1 - y_2$$

求和点



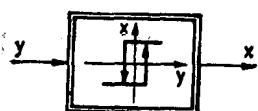
$$x = y_1 y_2$$

乘法运算



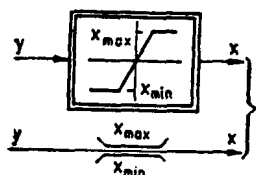
$$x = y_1 / y_2$$

除法运算



$$x = f(y)$$

非线性环节

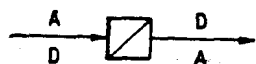


$$x = y \quad \text{当} \quad x_{\min} < y < x_{\max}$$

$$x = x_{\min} \quad \text{当} \quad y \leq x_{\min}$$

$$x = x_{\max} \quad \text{当} \quad y \geq x_{\max}$$

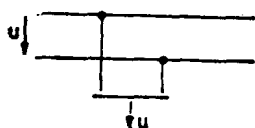
限幅器



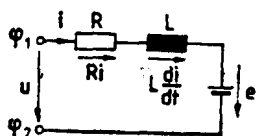
A/D 或 D/A 转换器



电流传感器



电压传感器



$$u = Ri + L \frac{di}{dt} + e$$

指示电压源 (u, e) 或电压降落 ($Ri, L \frac{di}{dt}$) 的电压箭头表示电位差, $u = \varphi_1 - \varphi_2$.
箭头方向从假定的高电位指向低电位, 因而在任何闭合回路中的电压和为零, $\sum u = 0$.

引 言

能量是任何技术与工业发展的基础。如果只能利用人工和畜力,谋取社员进步与公共福利的主要前提也就不会存在。因而一个国家按人口平均的能量消耗值表征了它的技术发展水平,在高度工业化的国家与尚不发达的国家之间这个数值的差别可高达两个数量级。

能量以潜藏的形式遍布各地(矿物燃料和核燃料、水力和潮汐能量、太阳能和风能、地热能等)。然而,要应用这些能量就必须对其进行开发,并在消费地点使其变成可以应用的形式(如化学能、机械能或热能的形式),而且其价格是人们可以接受的。这就产生了将能量从产地输送到需求点和将其转变为最终物理形态的问题。在很多场合,这两个问题可以利用电能作为中间环节而很好地得到解决,因为:

- 1) 可以在效率比较高的中心电站,从原始形式的能量(矿物燃料中的化学能、水力位能、核能)发电。

- 2) 可以低损耗长距离地输电,配电简单而费用可为人们接受。

- 3) 在终端可将电能转变为任何其他形式的能量。

电能具有这些灵活适用的特点,任何其他形式的能量是无法与之相比的。

在任何进行体力活动的地方(包括人和货物的载运或工业生产过程),其功率须在宽广范围内变化的机械能是十分重要的。为了在用能地点进行这种最终的转换,表现为电气传动形式的电力机械装置是很合适的。据估计,一个工业国家发电量的大约 60% 都是最终要被转变成机械能的。电气传动的这种支配地位,是由下列几方面决定的:

- 1) 电气传动装置在任何大小的功率下都能应用,从远小于 1W 的电子表,到大于 10^8W 的水力储仓的驱动泵。

- 2) 电气传动装置有宽广的转矩和转速范围,如轧钢机的电动机转矩大于 10^6Nm ,离心机传动的转速大于 $10^3\text{1/min}^*)$ 。

- 3) 电气传动装置几乎适用于任何工作条件,例如强迫通风或全部封闭、沉浸在液体之中、暴露于易爆的或有放射性的环境中。因为电动机既不需要带有危险性的燃料,又不排出废气,电气传动装置就不会有害于周围环境,与其他形式的原动机相比,其噪音水平也是低的。

- 4) 电气传动装置可以立即起动,可以在瞬间加上全负荷。既不需要中途加油,也不需要预热。与其他原动机相比,对维护的需求也是非常适度的。

- 5) 电动机空载损耗小,效率高,通常具有相当大的短时过载能力。

- 6) 电气传动装置易于控制,几乎可以随意改变其稳态特性,因而牵引电动机并不需要变速齿轮装置。利用电子控制可以获得高的动态性能。

- 7) 可以设计一个电气传动装置,使它能无限制地在转矩-转速平面的所有 4 个象限

^{*)} 1/min 即表示转/分,也可用 r/min 表示。——译者注

中运行,而不需要专门的可逆齿轮装置(图 0.1)。在制动时,亦即工作在第二或第四象限时,传动装置通常处于再生工作状态,将能量回馈给电网。与内燃机或涡轮机相比,这一特点是尤其富有吸引力的。

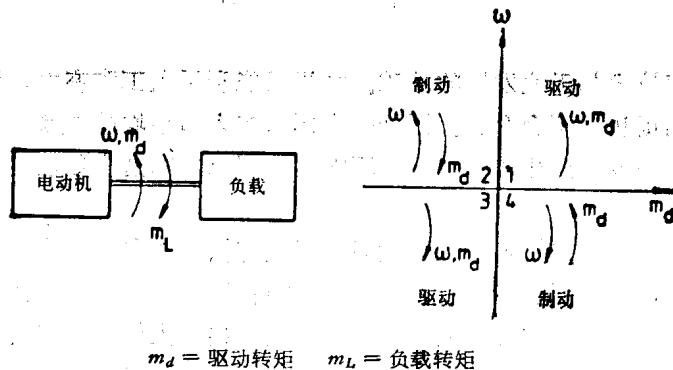


图 0.1 电气传动装置的运行方式

8) 电机具有旋转的对称性,(大部分电动机)转矩平稳,因而运行也平稳,振动极小,因为不存在使材料产生疲劳的高温,其运行寿命可以很长。

9) 电动机的种类繁多,可以很方便地与负载配合。它们可以用底座安装,或是用法兰盘安装;还可以用外部转子等等。那些从前有一根驱动轴和复杂的机械式内部传动装置的机床,现在就可以被多台单独可调的、可在准确的地方、时间和以需要的形式产生机械功的电动机组所取代。这就使机床设计者免受许多约束。

在一些专门的场合,例如车辆发动机,也可用直线式电气传动装置。

在这张长长的令人注目的特性表中,也应该把限制或妨碍电气传动应用的那些不足之处补充进去:

1) 需要连续供电,这就给车辆发动机带来了问题。如果没有轨式或悬缆式供电,就必须在车上带有电源,而它们通常是庞大、笨重并且昂贵的(蓄电池、用内燃机或涡轮机的旋转发动机、燃料电池或太阳能电池)。由于没有合适的蓄电池,至今仍限制了电气车辆的广泛使用。当今的铅酸电池的重量大约是贮有相等能量的液体燃料的 50 倍,即便是将内燃机的低效率也考虑在内。

2) 由于铁磁饱和与冷却问题,电动机的功率重量比要比高压液力传动装置的小。这一点在伺服传动中,如飞机控制面的定位装置,是很重要的。

目 录

引言	xiii
第一章 有关的力学基本原理	1
1.1 牛顿定律	1
1.2 转动惯量	2
1.3 齿轮传动的影响	4
1.4 功率与能量	5
1.5 惯量的实验测定法	5
第二章 机械传动装置的动力学	8
2.1 集总惯量传动装置的运动方程	8
2.2 不同型式的电动机和负载的稳态特性	10
2.3 稳定工作点与不稳定工作点	13
第三章 简化运动方程的积分	15
3.1 线性化方程的解	15
3.1.1 具有并激型特性的电动机的空载起动	16
3.1.2 负载转矩与转速成正比时电动机的起动	17
3.1.3 在空载转速运行中的电动机突加负载时的过渡过程	17
3.1.4 用逐级短接起动电阻器的办法起动直流电动机	18
3.2 非线性微分方程的解析解	20
3.3 数值积分与图解积分	21
第四章 电机中的热效应	24
4.1 功耗与温度限制	24
4.2 匀质物体的发热过程	25
4.3 不同的工作方式	27
4.3.1 连续工作制	27
4.3.2 短时间歇工作制	27
4.3.3 周期性间歇工作制	28
第五章 它激式直流电机	30
5.1 概述	30
5.2 微分方程与方块图	31
5.3 具有电枢控制及磁场控制时的稳态特性	33
5.3.1 电枢控制	34
5.3.2 磁场控制	35
5.3.3 电枢与磁场配合控制	37
5.4 磁通恒定时直流电动机的动态性能	38
第六章 具有串激绕组的直流电动机	43
6.1 串激电动机的方块图	43
6.2 稳态特性	46

第七章 它激直流电动机的控制	49
7.1 概述	49
7.2 直流电动机在电枢控制区的串级控制	50
7.3 直流电动机在弱磁区的串级控制	58
7.4 用旋转发电机给它激直流电动机供电	61
第八章 用作功率执行器的静止式变换器	63
8.1 电子开关器件	63
8.2 单相桥式电源换流变换器	65
8.3 三相桥式电源换流变换器	77
8.4 无功功率低的电源换流变换器	84
8.5 以变换器作为执行器的闭环控制	87
第九章 变换器供电的直流传动装置的控制	92
9.1 带电源换流变换器的直流传动装置	92
9.2 采用强迫换流的变换器的直流传动装置	98
第十章 对称三相交流感应电动机	106
10.1 动态条件下对称感应电动机的数学模型	106
10.2 正弦对称三相电压源供电时的稳态运行	114
10.2.1 定子电流,电流轨迹	114
10.2.2 稳态转矩,效率	117
10.2.3 与实际电动机的比较	121
10.2.4 感应电动机的起动	121
10.3 定子外加任意波形电压时感应电动机的一般运行	124
10.4 对称感应电动机由正弦不对称电网电压供电时的稳态运行	133
10.4.1 对称分量	133
10.4.2 单相感应电动机	136
10.4.3 交流吊车传动装置的单相电气制动器	138
10.4.4 感应电动机的不对称起动方案	139
第十一章 变速交流传动的电源装置	142
11.1 工作在高开关频率的脉宽调制(PWM)晶体管逆变器	142
11.2 具有恒定直流电压电源的脉宽调制式晶闸管变换器(电压源逆变器)	145
11.3 具有外加直流电流电源的晶闸管变换器(电流源逆变器)	149
11.4 无直流环节的交流/交流变换器(周波变换器)	152
第十二章 感应电动机传动的控制	155
12.1 具有外加正弦定子电流和开环磁通控制的感应电动机转速控制	156
12.2 外加定子电流时在磁场坐标系中对感应电动机进行控制	163
12.2.1 磁场定向原理	163
12.2.2 磁通信号的获得	169
12.2.3 电流控制环的残余滞后效应	171
12.2.4 数字信号处理	173
12.2.5 试验结果	176
12.3 由电压源逆变器供电的感应电动机在磁场坐标系中的控制	176
12.4 由电流源逆变器供电的感应电动机在磁场坐标系中的控制	180

第十三章 转速范围有限的感应电动机传动装置.....	188
13.1 定子频率恒定和转子电流用磁场定向控制的双馈感应电机	188
13.2 回收转差功率的线绕式转子感应电动机	197
第十四章 同步电动机的变频传动装置.....	202
14.1 永久磁铁励磁的同步电动机的控制	203
14.2 具有励磁绕组并用周波变换器作为定子变频电源的同步电动机的控制	211
14.3 具有直流电流环节且电机侧变换器自然换流的同步电动机	216
第十五章 可控电气传动装置的若干应用.....	224
15.1 转速控制系统	224
15.2 线性位置控制	232
15.3 具有运动目标的线性位置控制	239
15.4 具有固定目标的时间最优位置控制	243
15.5 具有运动目标的时间最优位置控制	249
参考文献.....	253
汉英术语对照索引.....	272

第一章 有关的力学基本原理

因为电气传动技术联系着机械与电气工程领域, 所以先让我们来回顾一下力学的某些基本定律。

1.1 牛 顿 定 律

假设有一质量为 M 的物体, 在一沿 s 轴方向的直线水平轨道上移动 (图 1.1a)。令 $f_d(t)$ 为沿速度 v 方向的驱动力, 而 $f_L(t)$ 为与运动方向相反的负载力, 则牛顿定律表达式为

$$f_d - f_L = \frac{d}{dt}(Mv) = M \frac{dv}{dt} + v \frac{dM}{dt} \quad (1.1)$$

式中 Mv 为机械动量。

这些力通常是与速度 v 和位置 s 有关的, 例如重力和摩擦力。

如果质量为常数, 即 $M = M_0 = \text{const}$, 方程 (1.1) 便可简化为

$$f_d - f_L = M_0 \frac{dv}{dt} \quad (1.2)$$

利用速度的定义 $v = ds/dt$, 该式便可表示为位移的二阶微分方程

$$f_d - f_L = M_0 \frac{d^2s}{dt^2} \quad (1.3)$$

而

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2} \quad (1.4)$$

是加速度。

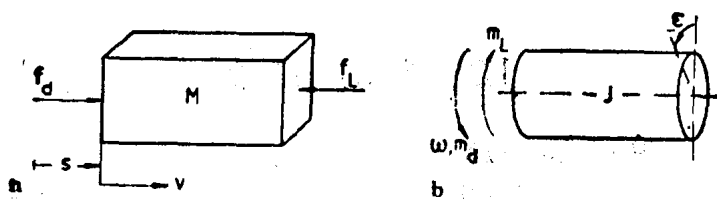


图 1.1a,b 集总质量的平移和旋转运动

如果运动是旋转式的 (电气传动装置通常就是这种情况), 便有相似的方程 (图 1.1b)

$$m_d - m_L = \frac{d}{dt}(J\omega) = J \frac{d\omega}{dt} + \omega \frac{dJ}{dt} \quad (1.5)$$

式中, m_d 为驱动转矩; m_L 为负载转矩; $\omega = 2\pi n$ 是角速度, 以后大多简称为转速; J 为旋转物体对旋转轴的转动惯量; $J\omega$ 是动量矩。 $\omega(dJ/dt)$ 项对于那些变惯量传动装置是很重要的。例如离心机和卷取机的传动装置, 它们的负载的几何形状与转速或时间有关, 几何形状可变的工业机器人也是这样。然而在很多场合, 可以假设惯量是常数, 即 $J =$

$J_0 = \text{const}$, 因此

$$m_d - m_L = J_0 \frac{d\omega}{dt} \quad (1.6)$$

若以 ε 为转角, $\omega = d\varepsilon/dt$ 为角速度, 便有

$$m_d - m_L = J_0 \frac{d^2\varepsilon}{dt^2} \quad (1.7)$$

式中

$$\alpha = d^2\varepsilon/dt^2 \quad (1.8)$$

是角加速度。

应该指出, m_d 是内部转矩, 也就是电动机转矩。它不同于电动机轴上的有用转矩。内部转矩与轴上转矩之差, 便是使电动机本身的惯量加速和克服电动机内部摩擦转矩所需的转矩。

平移运动和旋转运动常常是同时存在的, 例如在车辆发动机、电梯以及轧钢机传动装置中。图 1.2 是一力学模型, 其中一个恒定质量 M 随滑轮运动。如果忽略滑轮的质量, 且

$$m_d = r f_d, \quad m_L = r f_L \quad \text{和} \quad v = r\omega$$

便有

$$m_d - m_L = r \frac{d}{dt} (Mv) = \frac{d}{dt} (Mr^2\omega) = Mr^2 \frac{d\omega}{dt} \quad (1.9)$$

$J_0 = Mr^2$ 表示该直线移动的质量对于滑轮轴的等效转动惯量。显然, 质量 M 可以想象成是沿轮缘表面分布的。

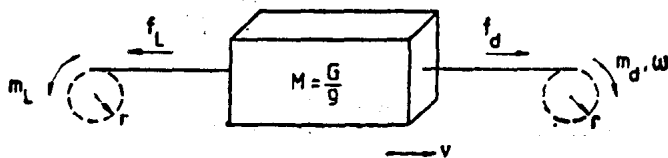


图 1.2 联系起来的直线运动与旋转运动

1.2 转动惯量

上一节中引入的转动惯量可以按下述方法求得:

有一质量为 M 的任意形状的刚体, 围绕着与重力方向垂直的轴自由旋转(图 1.3)。质量单元 dM 在一个与加速转矩单元 dm_a 相应的单元力 df_a 的作用下, 沿切线方向作加速运动

$$dm_a = r df_a = r dM \frac{dv}{dt} = r^2 dM \frac{d\omega}{dt}$$

总加速转矩可用积分求出

$$m_a = \int_0^{m_d} dm_a = \int_0^M r^2 \frac{d\omega}{dt} dM \quad (1.10)$$

由于假设物体为刚体, 全部质量单元都以相同的角速度运动, 因此