

电力半导体传动

S. B. 迪瓦恩
〔加拿大〕 G. R. 斯利蒙 著
A. 斯特拉盖



44

机械工业出版社

本书为加拿大多伦多大学教材，主要阐述由各种电力半导体电源供电的交直流变速传动，包括由单相和三相整流器供电的直流传动、斩波传动、用电力控制器的交流传动、转差能量反馈的转速控制传动、由电流源逆变器和电压源逆变器供电的感应电动机传动和同步电动机传动。书中对各类传动特性的稳态分析和正确预测作了介绍，便于读者对各种变流器和电动机间的良好配合作出选择，以满足实际应用的需要。书中每章都穿插有计算例题，每章末附有习题，书末附有习题答案。

本书可作为高等院校有关专业的教材或教学参考书，并可供从事电气传动的工程技术人员参考。

POWER SEMICONDUCTOR DRIVES

S. B. Dewan G. R. Slemon A. Straughen

John Wiley & Sons, Inc.

1984

* * *

电力半导体传动

〔加拿大〕 S. B. 迪瓦恩 G. R. 斯利蒙 A. 斯特拉盖 著

秦祖荫 杨振铭 译

*

责任编辑：孙流芳 版式设计：霍永明

封面设计：姚毅 责任校对：张媛

责任印制：郭炜

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印张 $11 \frac{3}{8}$ · 字数 291 千字

1989 年 11 月北京第一版 · 1989 年 11 月北京第一次印刷

印数 0,001—1,940 · 定价：11.40 元

*

ISBN 7-111-01347-6/TM · 173

译者的话

本书阐述了各种形式的交直流电力半导体传动，讨论了多种调速控制方案。在分析中着重介绍传动系统的工作原理、特性及各部件间的能量关系。对于各种变流器的工作原理和换相过程亦作了适当介绍。特性研究部分主要分析各种传动的稳态运行，旨在为特定的系统选择合适的变流器和电机间的配合，以及预测系统的特性。所有分析计算都从工程观点出发作了简化，并附有较多的例题作为辅助说明。

本书是加拿大多伦多大学电气工程系使用的一本教材，全书对问题的论述简明扼要，篇幅不大，但已包括了电气传动的基本内容，这就给学生留有深入思考，将问题展开的余地，有益于学生能力的培养，这一点恰恰是我国教学中的弱点。

作者所在的多伦多大学在国际上是一所有名望的大学，在电力电子技术及其重要应用领域——电力半导体传动方面的教学和研究方面作出了贡献，取得了很大成绩，他们使用本教材及其出版前的初稿已造就了一批电力半导体传动方面有成就的人才，至今他们在加拿大各大学继续从事这方面的教学和研究工作，因此译者翻译并要求出版该书的目的，意在让读者比较并吸取其中不同于我国已有传动教材的特点，开阔思路，也有益于改进国内同类课程的教学。

全书共11章，第1～5章由秦祖荫翻译，第6～11章由杨振铭翻译，在翻译过程中，对原书文字、公式及图表中已发现的错误作了更正，限于水平，译文中难免有不妥之处，欢迎读者批评指正。

译者

1987年5月

序 言

本书涉及直流和交流电动机传动,以及用这些传动技术组成的转速和位置控制系统。所用的电源有直流,也有交流。在电机和电源之间则装有各种电力半导体变流器。

我们希望本书对于从事实际工作的工程师和大学生都有用处。在多伦多大学电气工程系最后一学期的大学生课程中用本教材进行教学。研究生在专题课程中,将教材内容全部学完。

我们认为:本书读者已具备坚实的电机学和电力半导体电路的基础知识,在此设想下,本教材提供的是一种传动系统的稳态分析方法,它可以为所设想的系统确定合适的变流器和电机的规格。对暂态过程在此只是提一下,而不作详细论述,因为暂态响应和稳定性的详尽分析还有其单独的教材。

第1章介绍几种被传动的机械系统,以后几章都是关系到电源和电机的各种组合。书中所举的例子和每章末尾的习题都是致力于说明复杂系统设计的实际细节。习题中有些因素由于简化而被忽略了,但更多的因素为了有利于保持其真实性而保留下来了。教师不难为这些习题作事先准备,若函索,作者将提供本书的习题解答。全部例题和习题都已经用计算器解出来,其中有一些是用计算机程序来解决的,因为有些问题必须采用数值解法。

传动系统中一般变流器所用的半导体器件有二极管、逆阻型晶闸管(至少在北美洲,其普通名称为“晶闸管”)、双向晶闸管、功率晶体管。后两种器件在主电路中所能完成的功能也可以用一个或几个晶闸管一样完善地实现。通常,正是主电路的功率等级决定了应选用何种器件。本教材只论述晶闸管 and 二极管变流器。凡是图中所表示的门极信号都适用于晶闸管。然而必须明白,在有些情况下应选用其他类型的器件,但这种变动并不影响主电路的工作,这是本书的主题思想。

VI

书中上角标〔1〕至〔7〕指的是参考文献号。

我们深切地感谢理查德·彭纳特 (Richard Bonert) 教授已在教学中使用了本书书稿, 并参加了极有帮助的讨论; 通用电气 (G. E) 公司研究开发中心调速传动规划主任铁摩西·密勒 (Timothy Miller) 博士对书稿作了仔细审阅。书中尚存的错误和不足之处只能归咎于作者。我们也必须感谢阿美利亚·玛 (Amelia Ma) 女士化了大量时间对教材作了耐心正确的记录和编辑工作。

S. B. 迪瓦恩

G. R. 斯利蒙

A. 斯特拉盖

多伦多, 安大略

1984年7月

符 号

一般，大写斜体字母表示直流、常数、交流方均根值。小写斜体字母表示变量的瞬时值。

小写斜体字母上面加一横 ($\bar{a}$) 表示平均值。大写斜体字母上面加一横 ($\bar{A}$) 表示矢量或矢量幅值。

小写斜体字母上面加“^”符号 ($\hat{a}$) 表示峰值。

加“'”符号 (a') 表示“折算到定子”(I'_s 和 I'_M 除外，见表)。

下角标数字 (a_2) 表示谐波序数。

下角标 sh (A_{sh}) 表示所要求的 (或应有的) 变量值。

下角标 is (A_{is}) 表示变量的实际值。

下角标 R (A_R) 表示方均根值或电阻两端的电压 (或电流、或功率) 值。

其他的下角标见下表的定义。

B 粘性摩擦常数

C 电容

C_{eq} 每一相的等效电容

D 距离

e, E 电动势 (emf)

e_a, E_a 电枢或每相定子电动势

e_L 感应电动势

E_{ma} 每相定子电动势

E_{mL} 每相转子电动势

E_0 激励电动势

f 力, 频率

F 磁动势

f_s 定子频率

i_s, I_s 电枢或定子电流

I'_a	折算到定子的转子电流
I_A	转子电流
I_{ah}	谐波电流方均根值
I_C	铁心损耗电流, 电容电流
i_D	二极管电流
i_f, I_f	磁场电流
i_G	门极电流
i_l	线电流
I_m	虚部
I_{ma}, I_M	磁化电流
I'_M	折算到定子的磁化电流
I_{NL}	空载电流
i_o	变流器输出电流
i_p, I_p	变压器初级电流
i_Q	晶闸管电流
I_R	电流方均根值
I_{REF}	参考电流
i_s, I_s	电源电流
J	转动惯量
k	直流电机常数
K_i	电流纹波因数
k_T	测速发电机传递函数
k_{TR}	传感器传递函数
L	电感
L_a	电枢电感
L_f	磁场电感
L_{ls}	每相定子漏感
L_{lr}	每相转子漏感
L_L	每相漏感
$L_{m\cdot}$	每相磁化电感

XN

- m $E_s/\sqrt{2}$ (V)
- n 电动机转速, 谐波序数
- n', n'' 有效匝比
- N 匝数
- N_{re} 有效转子匝数
- N_{se} 有效定子匝数
- p 极数
- P 有功功率
- P_s 电枢功率
- $P_{s, mech}$ 每相机械功率
- P_{FL} 满载输入功率
- P_{FW} 摩擦和风阻功率
- P_i 逆变器功率定额
- P_{in} 输入功率
- P_{ms} 每相定子功率
- P_{mA} 每相转子功率
- P_{mech} 机械功率
- P_R 电阻损耗
- P_{SL} 杂散负载损耗
- P_o 输出功率
- P_w 作功功率
- PF 功率因数
- PF_i 供电系统功率因数
- PF_1 基波功率因数
- R 电阻
- R_s 电枢电阻
- R_i 每相铁心损耗电阻
- R_d 电枢回路外接电阻
- R_e 实部
- R_{r1} 每相转子回路外接电阻

R_f	磁场电阻
R_{ia}	电动机每相输入电阻
R_r	每相转子电阻
R_s	每相定子电阻
s	拉普拉斯算子, 转差率
S	视在功率
t	时间
T	转矩、气隙转矩
T_B	粘性摩擦转矩
T_C	干摩擦转矩
t_d	死区时间
T_F	摩擦转矩
T_J	惯性转矩
T_{loss}	损耗转矩
T_L	负载转矩
t_{off}	关断时间
t_{ON}	导通时间
T_p	周期时间
t_q	用于关断的时间
T_s	起动转矩
T_S	静摩擦转矩
T_w	作功转矩
t_s	滞后时间
v, V	电压
V_s	每相定子端电压
V_A	每相转子端电压
v_{AK}	阳极和阴极间电压
v_f, V_f	磁场端电压
v_{LK}, V_{LK}	直流侧电压
v_s, V_s	电源电压

XW

- v_i, V_i 电枢端电压
- v_o 变流器输出电压
- v_p, V_p 变压器初级电压
- v_R 电阻电压
- v_T 测速发电机或传感器电压
- X_d 每相直轴电抗
- X_{ia} 电动机每相输入电抗
- X_{lr} 转子每相漏抗
- X_{ls} 定子每相漏抗
- X_L 每相漏抗
- X_q 每相交轴电抗
- X_s 每相同步电抗
- X_m 每相磁化电抗
- Z 阻抗
- Z_A 每相转子阻抗
- Z_{or} 每相转子回路外接阻抗
- Z_{in} 电动机每相输入阻抗
- Z_m 每相磁化支路阻抗
- Z_s 每相定子阻抗
- α 延迟角, 相位角
- β 熄灭角, 转子位置
- γ 导通角
- ζ 阻尼系数
- η $\sin^{-1}(E_a/\sqrt{2}V)$, 效率
- θ 角位移, 相位角
- μ 重叠角
- ν 位移速度
- τ 时间常数
- τ_e 电枢电气时间常数
- τ_m 电枢机械时间常数

φ	每个极的磁通, 阻抗角
Φ	每个极的磁通
ψ	相位角
ω, Ω	角速度, 角频率
ω_b	基本转速, 基频
ω_f	滤波器谐振频率
ω_m, Ω_m	电动机角速度
Ω_m	电动机转速给定
ω_n	自然频率
ω_o	斩波角频率
ω_r	转子角频率
Ω_r	转子频率给定
ω_s	定子或电源角频率
ω_{yn}	同步速

目 录

译者的话

序言

第 1 章 变速传动系统	1
1.1 传动系统的组成部分	1
1.2 机械系统	1
1.2.1 压缩机	7
1.2.2 离心泵或风机	7
1.2.3 恒功率传动	8
1.2.4 交通运输传动	9
1.2.5 卷扬机传动	21
1.2.6 起重机起升机构	21
1.3 所需的传动特性	24
1.3.1 改变转速	27
1.4 供电电源	29
1.4.1 交流电源	29
1.4.2 直流电源	30
1.5 选择传动环节	30
习题	31
第 2 章 他励直流电动机	34
2.1 引言	34
2.2 系统模型	35
2.2.1 转速控制	37
2.3 电动机定额	41
2.4 电动机-机械动力学	43
2.5 闭环转速控制	47
习题	50
第 3 章 带电动机负载的单相整流器	53
3.1 引言	53

V

3.2 全控整流器传动	53
3.2.1 逆变器工作	65
3.2.2 双变流器	69
3.3 半控整流器传动	70
3.3.1 带再生的续流	78
3.4 整流器的传递函数	83
3.4.1 半控整流器	83
3.4.2 带再生的整流器	85
3.5 负载功率和电源电路	85
3.5.1 全控整流器	86
3.5.2 带续流的整流器	90
习题	95
第4章 带电动机负载的三相整流器	97
4.1 三相桥式整流器传动	97
4.2 带续流的三相整流器	104
4.2.1 仅有续流	104
4.2.2 带再生的续流	110
4.3 整流器的传递函数	114
4.3.1 无续流的整流器	114
4.3.2 带续流二极管的整流器	114
4.3.3 带续流和再生的整流器	114
4.4 负载功率和电源电路	117
4.4.1 无续流的整流器	117
4.4.2 带续流的整流器	120
习题	124
第5章 斩波器传动	127
5.1 引言	127
5.2 A型斩波器	127
5.3 B型斩波器	137
5.4 C型两象限斩波器	140
5.5 D型两象限斩波器	142
5.5.1 I类工作: $t_a < T_p/2$	144

5.5.2	I类工作: $T_p/2 < t_a < T_p$	145
5.5.3	负载功率和电源电路	146
5.6	E型四象限斩波器	149
5.7	斩波器的传递函数	153
5.8	斩波器的电源滤波器	154
	习题	155
第6章	三相感应电动机	158
6.1	引言	158
6.2	等效电路	159
6.2.1	端电压和频率恒定	161
6.2.2	线电流和频率恒定	163
6.3	感应电动机的转速控制	166
6.3.1	改变转子电路的电阻	167
6.3.2	改变端电压	169
6.3.3	改变电源频率	169
6.4	电动机定额	171
6.5	感应电动机试验	172
6.5.1	笼型电动机漏抗的分布	181
	习题	181
第7章	采用交流电力控制器的转速控制	184
7.1	引言	184
7.1.1	常用的控制器接法	184
7.2	对称控制器的运行	186
7.3	泵或风机传动	189
7.4	闭环系统	197
	习题	197
第8章	采用转差能量回馈的转速控制	199
	(低同步变流器串级调速)	199
8.1	引言	199
8.2	系统的运行	201
8.2.1	基本关系	204
8.2.2	比值 N_{re}/N_{se} 的限制	207

X

8.3 特性预测	208
8.3.1 系统特性的讨论	217
习题	218
第9章 电压源逆变器供电的感应电动机	219
9.1 引言	219
9.1.1 变流器组合	219
9.2 三相电压源逆变器	221
9.2.1 脉冲宽度调制	223
9.2.2 正弦脉冲宽度调制	225
9.2.3 图9.1所示的系统的优点	225
9.2.4 基本关系式和控制方法	227
9.3 气隙磁通波的幅值恒定	229
9.3.1 近似的转速-转矩特性	235
9.3.2 恒定气隙磁通密度的控制系统	240
9.4 弱磁运行	243
9.4.1 弱磁的控制系统	245
9.5 端电压与频率之比为恒值	246
9.6 电动机和逆变器的定额	248
9.6.1 逆变器的可用功率	253
习题	255
第10章 电流源逆变器供电的感应电动机	259
10.1 引言	259
10.1.1 变流器组合	259
10.2 三相电流源逆变器	261
10.3 变频电流源供电的感应电动机运行	265
10.3.1 基本关系	269
10.3.2 转子频率控制	271
10.4 弱磁高速运行	276
习题	282
第11章 同步电动机传动	285
11.1 引言	285
11.2 绕组励磁的同步电动机	287

11.2.1 等效电路	287
11.3 电压源逆变器传动	290
11.3.1 稳态运行	291
11.3.2 控制方法	297
11.3.3 弱磁运行	306
11.4 永磁式同步电动机	308
11.5 三相同步磁阻式电动机	313
11.6 电流源逆变器传动	316
11.7 周波变流器传动	323
习题	325
参考文献	328
附录 A 傅里叶分析	329
附录 B 230V 直流电动机的典型铭牌数据和参数	338
附录 C 三相、460V、60Hz标准笼型感应电动机的 试验数据	340
习题答案	342

第 1 章 变速传动系统

1.1 传动系统的组成部分

图1.1框图表示电气传动系统中易于区分的几个主要组成部分，最初只有 4 和 5 两部分特性是已知的，而 1、2 和 3 部分必须由应用工程师来设计和选取，为此，有必要清楚地对机械系统加以说明。当已经初步设计出一个预期的传动系统时，可能会发现，所用的电源在某些方面不甚合适，因而，不论控制器和电机确切性质如何，首先要研究各种可能遇到的机械系统以及它们对电源的要求，这是符合逻辑的。

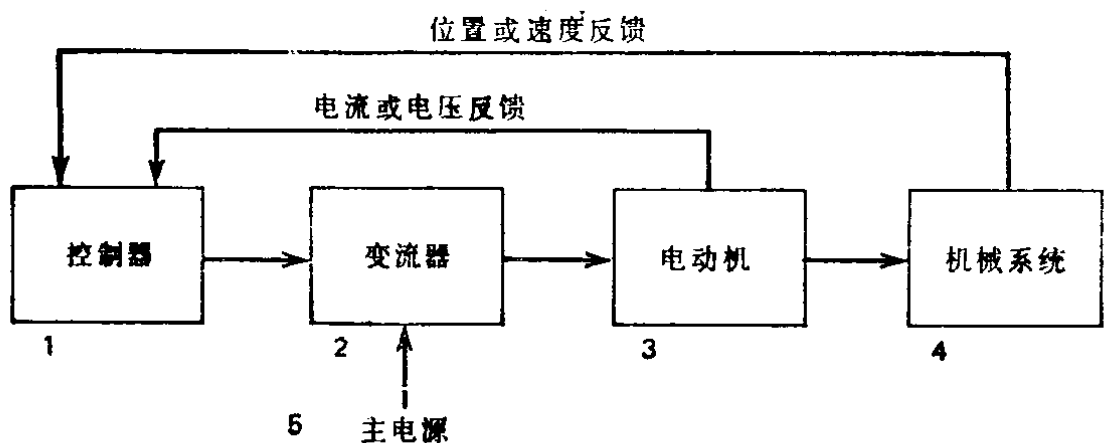


图1.1 传动系统组成框图

1.2 机械系统

机械系统从电动机来看，可视为是通过联轴器加到电动机轴上的转矩，这个负载转矩和电动机转速之间必有确定的关系，在稳态工作时，这一关系可用图1.2所示的四象限转速-转矩图来表示。图中 ω 是电动机或传动轴的角速度， T_L 是电动机产生的转矩，或是机械系统转轴上显示的负载。