

自动化电力传动系统

〔民主德国〕 R. 谢菲尔德 E. 哈贝格尔 著

Automatisierte Elektroantriebe

机械工业出版社

自动化电力传动系统

〔民主德国〕 R.谢菲尔德 著
E.哈贝格 著

杨兴瑶 译
冯敏刚 校



机械工业出版社

本书对近些年来自动化电力传动系统的巨大发展和丰富内容作了比较详细和系统的介绍。书中论述了自动化传动系统的总体设计基础、组件和装置的原理、传动系统的动态过程分析和设计方法,此外也介绍了计算机仿真和辅助设计在传动系统中的应用以及提高抗干扰性和可靠性的措施等内容。

全书侧重于工程实践和设计方法,可供从事工业自动化及其它自动控制专业的工程技术人员和广大师生阅读。

Automatisierte Elektroantriebe

Rolf Schönfeld, Ernst Habiger

VEB Verlag Technik, Berlin

1981 1. Auflage

*

自动化电力传动系统

〔民主德国〕R. 谢菲尔德 著
E. 哈贝格尔

杨兴瑶 译

冯绩刚 校

*

责任编辑:王中玉

封面设计:刘代

*

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 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $19^{7/8}$ · 字数 521 千字

1987年11月北京第一版·1987年11月北京第一次印刷

印数 0,001—3,750 · 定价:5.95元

*

统一书号:15033·6874

译 者 的 话

自动化电力传动系统主要包括普通电力传动（速度、位置、压力、张力等）控制系统、综合（分级）自动化系统以及自动生产线。它们是现代化生产的重要组成部分和基石。如何在有限的篇幅内把这样许多内容组织起来并为工程设计打下基础，的确是一件比较困难的任务。然而译者认为，本书在一定程度上实现了这一目标。为了便于读者理解，下面提出本书的一些特点，供读者阅读时参考：

1. 书中第1、2、6、8各章主要介绍自动化电力传动系统的组成和系统化的设计方法。第2章介绍的是原则性的，包括明确设计任务、选择方案（控制装置、功率装置和保护装置）、设计准则（元件选择、系统设计最佳化）以及试验和运行等系统文件的制订；第6章介绍普通电力传动控制系统的设计方法，包括模拟式和数字式直流、交流传动系统、同步传动系统、工艺链传动系统（切削力、拉力、延伸率等的调节）；而第8章主要介绍自动生产线的设计和规划，重点是程序和数字控制系统设计。

上述四章构成了本书的基础。读者如果具备了一般的电力传动系统的知识，直接阅读这四章也是可以的；

2. 如书中指出的，各种传动系统都是根据系统元件的工作方式及其结构（即元件间的相互关系）特点，在存在一定的扰动 z 作用下实现控制（操纵） w 与输出 x 之间的外部函数关系：

$$x = f(w, z)$$

基于这种观点，书中特别注意传动系统与外部的联系，即传动系统-工作机械、传动系统-电网、传动系统-操作级三个“接口”。控制系统在输入作用下通过系统内部而对外界产生作用。输入作用有人为的控制，也有不希望有的扰动。特别是对于外界对系统的扰动以及系统对外界的扰动，书中在各个章节都作了不同程度

的介绍。在第9章专门论述了抗干扰性措施和提高可靠性的措施。这在一般电力传动书籍中是不多见的；

3. 尽管书中把外部的影响放在重要地位，但在第3、4两章中仍用相当的篇幅介绍了传动系统内部的信息处理装置和功率控制装置的原理、组成和设计方法，对于初学者来说，这两章是重要的；

4. 本书第5章详细介绍了各种传动系统的动态过程分析和计算，除了介绍控制传递特性外，还分析了电路接通、切断和短路时的过渡过程，随后在第7章介绍了动态过程的计算机仿真方法。这些内容对于实际工程具有重要的意义。

5. 本书的另一特点是除了详细介绍电力传动一般控制原理、分析和设计方法外，还介绍了很多取自作者以及其它一些学者发表的论文中的研究结果。这些内容对于开拓我们的思路无疑是有帮助的，但在书中这些往往只是简略性的或结论性的作一介绍，初读起来不易理解其内容。对于这些内容读者可以有选择性地阅读；

6. 鉴于民主德国的规章制度和电工标准比较完整，其内容与我国不尽相同，遇到需要进一步了解有关规定时可在中国科学技术情报研究所标准馆等处查阅。

毋庸讳言，翻译这本书也存在一些困难。一是手头没有较完整的作者列出的一系列参考文献，对作者的意图难以表达得完整；二是书中内容涉及面广，翻译中难免挂一漏万。但是在冯缙刚教授的审校下，在洪季敏同志和玛琳女士（Brammer Mari）的协助修改下完成了这一工作。译者对此表示感谢，并欢迎读者批评指正。

译 者

前 言

工艺设备的生产率决定于所采用的电力传动方法的效能及其自动化的程度。电力电子学和信息技术领域方面的重大进步,以及电力传动在设计和计算上的彼此影响和深入发展,使我们今天能够解决比用经典传动设计方法质量要好得多的问题。

鉴于这种发展,本书不采用把传动装置作为单独对象来研究的传统做法,而是始终把它们作为自动化分级系统的基础环节来处理。从这点出发,本书将致力于为自动化传动系统的设计在其基本理论方面打下基础,并在此基础上提供有关设计方面的完整材料。

本书第1章,叙述自动化传动系统在国民经济中的意义、特点和使用方式,以及传动技术方面工程师的任务。第2章,根据电力传动系统的系统化设计方法,分析传动系统-工作机械、传动系统-电网及传动系统-操作级三个“接口”,随后论述原理方案的选择及传动系统概略和精确设计的方法。第3章简要介绍电力传动自动化所需要的组件和装置。此后几章详细研究设计方面的重点问题,即电动机同电力电子控制环节的组合作用(第4章),功率环节动态过程的计算(第5章),调节系统的设计(第6章),以及为操纵自动化传动系统所需要的工业设备的设计和规划(第8章)。现在,正确应用计算机辅助方法进行合理的设计和计算是非常重要的课题,因此在第7章对这些内容作了一些介绍。最后第9章阐述抗干扰结构和可靠性结构(特别是信息处理装置)的基本原理。

本书的初稿和正稿第2章由两个作者共同完成,其余正稿第1、3、8和9各章由E.哈贝格尔编写,第4~7章由R.谢菲尔德编写。

我们深知,本书不可能面面俱到地叙述当前自动化电力传动

方面存在的重要问题。书中的材料和侧重点是根据多年来我们同民主德国自动化电力传动领域内的主要企业、公司密切合作所积累的经验,以及高等工科院校电技术专业学生用的教学内容来选定的。

编写本书的目的是要对从事实际工作的工程师及大学生有所帮助。我们也非常希望,本书综合整理的这些已单独发表的资料能对本专业的进一步发展作出贡献。为了进一步改写好本书,作者欢迎读者提出批评意见。

本书在很多方面汇集了二十年来德累斯顿工业大学电技术部电气自动化技术领域内在教学和科研上总结的经验。我们感谢这一领域的同事们,特别是讲师、技术科学博士E.泽弗里德(E. Seefried),技术科学博士H.克鲁格(H. Krug),技术科学博士P·彼森纳尔(P. Büchner),工学博士H.奈恩道尔夫(H. Neundorf),工学博士哈马尔(Hammer),工学学士布莱斯奈德尔(Bretschneider),他们参加了很多问题的讨论。

我们感谢本书的审阅者,特别是教授、工学博士(高校授课教授)布伦德莱尔(Brendler),教授、技术科学博士布迪契(Budig),工学学士卡毕斯(Kabisch)和工学博士巴尔茨(Bartsch),感谢他们的努力和提出改正建议,这些建议无疑对本书内容和概念更加完善是有帮助的。我们也感谢K.考尔菲尔斯(K. Kaulfers)女士为本书精心抄写了大量的手稿,以及国家技术出版社艾普(Epp)女士的密切配合。

R.谢菲尔德 E.哈贝格尔
德累斯顿

主要符号

以量 g 为例说明符号不同表示法的意义

G 不随时间变化的数值或量
 g 的有效值

$\bar{G}$ 、 $\bar{g}$ 平均值

$\underline{G}$ 、 $\underline{g}$ 位置向量; 复瞬时值; 向量的模

g 瞬时值

$\hat{g}$ 峰值

Δg 量 g 随时间变化的小增量

$d g$ 、 ∂g 量 g 的微分

$$\underline{g} = \begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_n \end{pmatrix} = (g_1, g_2, \dots, g_n)^T \text{ 列向量}$$

符号的意义

a 输出量

b 加速度

c 弹性系数

d 阻尼系数

e 输入量

F 传递函数

频率特性

f 频率

f 函数

f_l 断续因数

f_N 电网频率

f_p 脉波频率

f_w 纹波因数

g 函数

h 函数

I 、 i 电流

I_d 、 i_d 直流电流

$\bar{I}_d$ 、 $\bar{i}_d$ 直流电流平均值

I_E 、 i_E 励磁电流

I_{Kr} 、 i_{Kr} 环流

I_N 额定电流

I_p p 次电网频率谐波电流有效值

Im 取虚部

J 转动惯量

j 虚数单位

k_M 电动机常数

L 电感

L_D 电抗器电感

L_E 励磁回路电感

L_e 等效电感

L_g 总电感

M 、 m 转矩

M_B 制动转矩

M_b 、 m_b 加速转矩

M_K 临界转矩

M_N 电动机额定转矩

M_W 、 m_W 阻转矩

m 质量

m 相数

VII

N 、 n	转速	t_{br}	制动时间, 滑行时间
N_N	额定转速	t_p	间歇时间
P 、 p	功率	t_H	过渡过程时间
P_M 、 p_M	机械功率	U 、 u	电压
P_N	额定功率	U_d	直流电压
P_V 、 p_V	损耗功率	U_{d0}	不可控状态下的直流电压
P_{VL}	与负载电流有关的损耗功率	$\bar{U}_d$ 、 $\bar{u}_d$	直流电压平均值
P_s	气隙功率	U_{de} 、 u_{de}	等效直流电压
p	拉普拉斯算子	U_N	额定电压
p	脉波数	U_p	p 次电网频率谐波电压有效值
q	状态变量	U_S	整流变压器星形接法相电压
Q	品质因数	U_S	滑环电压
R	调节因数	U_S	控制电压
R 、 r	电阻	U_x	由于重叠换相引起的电压降
R_A	电枢回路电阻	u_A	电枢电压
R_B	电压源(电池)电阻	u_a	输出电压
Re	取虚部	$\bar{u}_{a1}$	电流断续运行时直流电压平均值
R_m	磁阻	$\bar{u}_{M1}$	电流断续运行时电动机电压平均值
S 、 s	转差率	u_c	输入电压
T	采样周期	u_k	换算后的短路电压
T	周期持续时间	u_{s1}	控制电压
T	脉冲宽度	u_x	由重叠换相引起的电压降(换算后)
T	节拍(时钟)周期	$\bar{u}$	传动比, 占空比, 变压器变比
T_a	关断持续时间	u	控制量
T_{on}	励磁时间	V	放大系数
T_e	接通时间		
T_m	测量时间		
T_i	时滞时间		
t	时间		
t_a	起动时间		
t_B	运行时间		

V_D	可持续使用的能力
v	速度, 显示量
W	脉动系数
w	操纵量, 控制量
w	匝数
x	被调节量
X_p	线性区
X	感抗, 电抗
Y	电压降系数
Y_h	控制范围
y	被控制量
$Z、z$	阻抗
z	脉冲数
z_p	极对数
z	扰动量
z	开关操作频度
z_0	空载开关操作频度
φ	电动机轴转角
η	效率
$\theta、\vartheta$	温度
θ	平均停机间隔时间
τ	时间常数
τ_p	极距
φ	相位角
$\Psi、\psi$	磁链
ω	角速度
ω_d	穿越频率

下标的意义

A	电枢
A	工作机械
A	吸合

a	动作
B	运行
B	制动
b	加速
D	电抗器
d	整直的
d_{yn}	动态的
E	励磁
e	等效
F	正向
G	发电机
G	减速器
g	总和
j	阻挡层
$K、k$	临界
K	换相
K	电容器
k	短路
L	负载
l	转子
l	断续运行
M	电动机
M	机械的
m	平均值
$\max$	最大值
$\min$	最小值
$N、n$	额定运行
N	电网
R	阻断方向
S	调节对象
S	控制
s	定子

X

<i>s</i>	同步	<i>▼</i>	损耗
<i>S^t</i>	控制环节	<i>W</i>	电阻
<i>S^t</i>	静止状态	0	空载
<i>T</i>	晶闸管	0	稳态工作点
<i>th</i>	热的	0	静止状态

目 录

译者的话

前 言

主要符号

第1章 引论	1
1.1 电力传动技术在国民经济中的意义及其进一步发展的 长远目标	1
1.2 自动化传动系统的特性及使用形式	3
1.3 电力传动技术工程师的任务	7
第2章 自动化传动系统的设计基础	8
2.1 系统化设计的总体规划基础	8
2.1.1 设计过程的特点	8
2.1.2 设计过程的模型	9
2.1.3 评价和比较方案的方法	13
2.2 分析问题和精确阐明所提出的任务	16
2.2.1 传动系统-工作机械接口的分析和描述	17
2.2.2 传动系统-电网接口的分析和描述	24
2.2.3 传动系统-操作级接口的分析和描述	28
2.2.4 扰动量和有害量的分析和描述	31
2.3 原理方案的选择	36
2.3.1 功率部分方案的选择	36
2.3.2 控制方案和调节方案	43
2.3.3 保护方案	49
2.4 传动系统的设计和最佳化	51
2.4.1 电动机的选择、计算和匹配	51
2.4.2 控制装置的选择、计算和匹配	53
2.4.3 保护环节的选择、计算和匹配	56
2.4.4 传动系统的精确设计和最佳化	60
2.5 制造、试验和运行用系统文件的制订	61

2.5.1	线路图	61
2.5.2	作用原理的说明	64
2.5.3	试验规程	71
2.5.4	操作说明	73
第3章	电力传动自动化系统的部件和装置	75
3.1	信息输入和测量装置	75
3.1.1	指令和手控开关	75
3.1.2	给定装置和程序发送器	82
3.1.3	测量装置和极值发送器	85
3.2	信息处理装置	111
3.2.1	模拟式元件和功能单元	111
3.2.2	离散式元件和功能单元	117
3.2.3	信号转换器	144
3.3	信息输出装置	149
3.3.1	空气接触器	150
3.3.2	无触点开关	151
3.3.3	信号报警、显示和记录装置	152
3.4	信息电子设备中的电源	154
第4章	电动机与功率控制装置的组合作用	156
4.1	直流电动机的整流器电源	159
4.1.1	直流传动的外部运行特性	159
4.1.2	谐波问题及电抗器的设计	163
4.1.3	电流断续运行	169
4.2	在三相电网上运行的整流器传动装置	173
4.2.1	整流器的等效电路	173
4.2.2	整流器与旋转电机的并联运行	177
4.2.3	整流器与补偿装置的并联运行	178
4.2.4	多台整流器传动装置的并联运行	181
4.2.5	动态无功功率的补偿	184
4.3	整流器可逆运行	186
4.3.1	可逆电路原理	186
4.3.2	环流的计算	188

4.3.3 环流电抗器和平波电抗器的设计	191
4.3.4 晶闸管的负荷及电路的选择	194
4.4 直流电动机的脉冲控制	196
4.4.1 脉冲控制原理	196
4.4.2 脉冲控制器电路的选择和设计	199
4.4.3 可逆电路和制动电路	208
4.5 串级电路	211
4.5.1 利用转子附加电压调速	211
4.5.2 次同步整流器串级电路	214
4.5.3 次同步整流器串级有功和无功功率平衡的计算	217
4.5.4 次同步整流器串级的摆动转矩和附加损耗计算	220
4.6 异步电动机的电压控制	224
4.6.1 对称电压控制	224
4.6.2 电动机和控制装置的设计	227
4.6.3 不对称电压控制	233
4.7 异步电动机和同步电动机的频率控制	236
4.7.1 频率控制下电动机的基本运行特性	236
4.7.2 电动机由逆变器供电和由变频器供电	240
4.7.3 电动机与变频器的设计	253
第5章 传动系统中动态过程的计算	265
5.1 系统机电部分的动态过程	266
5.1.1 周期交变负载下电动机的计算	266
5.1.2 起动过程和制动过程	269
5.1.3 位置传动的设计	272
5.1.4 机械传动系统的传递特性	276
5.2 直流传动的动态过程	281
5.2.1 连续运行时直流传动的传递特性	281
5.2.2 整流器控制装置的传递特性	287
5.2.3 在电流断续范围内运行时直流传动的传递特性	297
5.2.4 短路过程	300
5.2.5 切断过程	305
5.3 三相交流传动中的动态过程	308

5.3.1	异步电动机的传递特性	308
5.3.2	同步电动机的传递特性	318
5.3.3	整流器控制装置和中间直流环节的传递特性	327
5.3.4	异步电动机传动装置的接通和短路过程	329
5.3.5	异步电动机传动装置的切断过程	333
第6章	电力传动调节系统的设计和参数计算	337
6.1	模拟式线性系统的结构	338
6.1.1	直流传动	338
6.1.2	直流可逆传动系统	342
6.1.3	异步电动机和同步电动机传动调节系统的结构	349
6.2	模拟式线性系统的最佳化	355
6.2.1	品质指标	355
6.2.2	无延迟输入信号时的最佳化(模最佳化)	358
6.2.3	有延迟输入信号时的最佳化(对称最佳化)	365
6.2.4	多回路系统的最佳化	368
6.2.5	具有前馈校正调节装置的最佳化	370
6.2.6	随机输入信号作用下的最佳化	372
6.2.7	调节回路最佳化的实际电路	376
6.3	非线性系统	379
6.3.1	本质非线性及其描述函数	379
6.3.2	两状态调节	383
6.3.3	具有限制的系统	387
6.3.4	非线性系统的最佳控制	390
6.4	自适应调节	393
6.4.1	自适应调节原理	393
6.4.2	直流传动系统中电枢电流的自适应调节	394
6.5	数字系统	396
6.5.1	在调节系统中应用的频率模拟信号和数字信号	396
6.5.2	数字调节系统的结构	397
6.5.3	数字调节系统典型环节的放大系数	398
6.5.4	数字调节系统典型环节的传递函数	400
6.5.5	数字调节回路的计算	403

6.6 位置传动.....	409
6.6.1 要求及可实现性限制.....	409
6.6.2 直流位置传动.....	410
6.7 同步传动.....	413
6.7.1 同步调节原理.....	413
6.7.2 频率模拟和相位模拟调节.....	414
6.7.3 电轴.....	415
6.8 工艺链传动.....	419
6.8.1 机床切削功率或切削力的调节.....	419
6.8.2 卷取带拉力的调节.....	420
6.8.3 活套的调节.....	421
6.8.4 延伸率的调节.....	422
第7章 模拟和数字计算机在传动系统仿真和 计算中的应用	425
7.1 利用迭代模拟计算机对传动系统仿真.....	425
7.1.1 迭代模拟计算机的工作能力.....	426
7.1.2 对问题编制程序.....	427
7.1.3 直流传动系统的仿真.....	430
7.1.4 整流器控制装置的仿真.....	432
7.1.5 异步电动机传动装置的仿真.....	439
7.1.6 工艺设备的仿真.....	444
7.2 应用数字计算机对传动系统的仿真和计算.....	446
7.2.1 数字计算机的工作能力.....	446
7.2.2 连续线性系统的仿真.....	449
7.2.3 开关管电路的仿真.....	452
7.2.4 计算和设计程序.....	456
第8章 控制装置的描述、规划和设计	463
8.1 基础.....	463
8.1.1 控制的主要概念和任务.....	463
8.1.2 工业控制装置的规划和设计基础.....	465
8.2 控制对象.....	469
8.2.1 典型的工业控制对象.....	469

8.2.2 过程类型和控制目标	470
8.2.3 过程数学模型的建立	472
8.3 控制装置	492
8.3.1 特征的分类	492
8.3.2 连接编程系统	501
8.3.3 存储编程系统	518
8.4 电力传动控制系统的例子	540
8.4.1 机器控制系统	540
8.4.2 设备控制系统	555
第9章 自动化传动系统的抗干扰性和可靠性结构	562
9.1 提高抗干扰性的措施	562
9.1.1 基本概念	562
9.1.2 电位扰动影响	564
9.1.3 电容扰动影响	568
9.1.4 电感扰动影响	574
9.1.5 导线上的反射现象	575
9.1.6 系统设计阶段的提高抗干扰性技术目标	577
9.1.7 在信号处理单元内的抗干扰措施	578
9.1.8 在信号传递区段上的抗干扰措施	579
9.1.9 电源系统的抗干扰措施	582
9.1.10 机壳和基准导线接地的抗干扰措施	584
9.1.11 电磁装置的抗干扰措施	586
9.1.12 整流器的抗干扰措施	589
9.1.13 抗干扰性检验	590
9.2 提高可用性和运行安全性的措施	590
9.2.1 决定可用性的参数	590
9.2.2 增长停机间隔时间的措施	591
9.2.3 缩短停机时间的措施	593
参考文献	599