

第2版

SPWM 变频调速 应用技术

张燕宾 编著

电气自动化
新技术丛书



机械工业出版社
China Machine Press

高等学校教材

电工与电子技术

主编 李 力 王硕禾

参编 魏英静 石彦丛

王小平 杜立强



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书全面系统的论述了电工与电子技术的理论。全书分为八章,第一章到第六章为电工技术部分,内容包括直流电路和交流电路的分析方法、变压器和电动机的工作原理分析及应用、低压电器及继电接触控制系统、建筑电气及安全用电。第七章和第八章为电子技术部分,内容包括模拟电子技术和数字电子技术两部分。其中模拟电子技术包括基本放大电路、集成放大电路和直流稳压电源等部分,数字电子技术包括逻辑门电路分析、组合逻辑电路分析与设计、双稳态触发器的组成、时序逻辑电路分析及555集成定时器的工作原理。每章都配有一定数量的习题。

本书可以作为土木等非电类专业的本专科学学生的教材或教学参考书,也可供有关专业师生和科技人员自学参考。

图书在版编目(CIP)数据

电工与电子技术/李力,王硕禾主编. -北京:中国电力出版社, 2001

ISBN 7-5083-0675-9

I. 电… II. ①李…②王… III. ①电工技术②电子技术
IV. ①TM②TN

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第039389号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京地矿印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2001年8月第一版 2001年8月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 14.75印张 359千字
印数0001—5000册 定价34.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

《电气自动化新技术丛书》

序 言

科学技术的发展，对于改变社会的生产面貌，推动人类文明向前发展，具有极其重要的意义。电气自动化技术是多种学科的交叉综合，特别在电力电子、微电子及计算机技术迅速发展的今天，电气自动化技术更是日新月异。毫无疑问，电气自动化技术必将在建设“四化”、提高国民经济水平中发挥重要的作用。

为了帮助在经济建设第一线工作的工程技术人员能够及时熟悉和掌握电气自动化领域中的新技术，中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会联合成立了《电气自动化新技术丛书》编辑委员会，负责组织编辑《电气自动化新技术丛书》。丛书将由机械工业出版社出版。

本丛书有如下特色：

一、本丛书是专题论著，选题内容新颖，反映电气自动化新技术的成就和应用经验，适应我国经济建设急需。

二、理论联系实际，重点在于指导如何正确运用理论解决实际问题。

三、内容深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于自学。

本丛书以工程技术人员为主要读者，也可供科研人员及大专院校师生参考。

编写出版《电气自动化新技术丛书》，对于我们是一种尝试，难免存在不少问题和缺点，希广大读者给予支持和帮助，并欢迎大家批评指正。

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会成员

主 任：黄席樾

副主任：王兆安 王志良 赵相宾

委 员：王 炎 王正元 王兆安 王志良
刘宗富 孙武贞 孙流芳 许广锡
许宏纲 朱稚清 陈伯时 陈敏逊
李永东 李序葆 赵光宙 张 浩
张敬民 周国兴 徐殿国 涂 健
夏德钤 蒋静坪 黄席樾 舒迪前
彭鸿才 霍勇进 戴先中 赵相宾

秘 书：刘凤英

《电气自动化新技术丛书》

出版基金资助单位

机械工业部天津电气传动设计研究所

深圳华能电子有限公司

北京电力电子新技术研究开发中心

天津普辰电子工程有限公司

中国电工技术学会

第 2 版 前 言

1997 年 12 月，我出版了一本名为《SPWM 变频调速应用技术》的小册子。算来已有近四年的时间了。我在近四年里：

又承接了一些工程项目的设计与调试工作，积累了一点实践经验；

主编了一本《变频调速应用实践》，又编译了日本安川公司编写的《变频调速拖动技术》一书中的“应用技术”部分（连载于《变频器世界》杂志）。通过主编和编译，使我得以脱出自己实践的窠臼，开阔了视野；

主讲了四期《变频调速应用技术》的学习班，以及许多次同样题目的讲座，使我在深入浅出的讲解方法上，又有了许多改进。

自己觉得，又有些进步了。再回过头去看看那本小册子，就总觉得有点不尽人意了。

恰在这时，出版社的孙流芳同志问我：你那本书已经印刷过好几次了，说明还是颇受欢迎的，看看有没有需要修改和补充的地方？

这可真有点两相情愿，水到渠成的味道了。

我于是迫不及待地着手整理起自己的进步来。

和初版时相比，再版后的主要特点是：

1. 在基本原理方面，突出而深入浅出地分析了异步电动机在变频调速过程中，磁通和电流的变化规律。

2. 改写了第 5 章“变频调速拖动系统的设计”，突出了不同类型的负载在实施变频调速时必须解决好的关键问题。

3. 增写了第 7 章“变频调速的实用电路基础”，这一内容是在多次举办学习班时，学员们所强烈希望的。

4. 增写了变频调速在几种典型负载中的应用实例（第 8 章～第 10 章）。

其余各章，也都有改动，但基本上保留了原貌，就不再赘述了。

我感到十分荣幸的是，成都希望集团的董事局主席刘永言先生向我提供了他所发明的拟超导技术（已获国家发明专利）的有关资料，使我能够首先向读者介绍这一新技术，谨在此致谢！

在第 1 版的前言中，我曾写道：“我属牛，我愿在这一方土地上继续地耕耘下去。”

尽管我的步履是蹒跚的，却没有停住。因此，每当隔了一段时间回首一望时，连我自己也常常觉得惊喜：又前进了一截儿！

我愿继续在这一方土地上留下我的脚印。

作 者

第 1 版 前 言

从 1994 年 10 月至 1996 年 2 月,我在《电气时代》杂志上陆续发表了 14 篇连载文章《变频调速应用技术 170 问》。此后,收到了数百位读者的来信和来电。其中,相当一部分读者都询问“什么时候出书”,更有一位热心的读者给我寄来了中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会编辑《电气自动化新技术丛书》的有关资料和通讯地址。盛情难却,我于是和编委会的喻士林副主任委员取得了联系,并在他的热情支持和鼓励下开始撰写本书。

在进行变频调速的推广应用过程中,我接触了大量的工程技术人员,比较深切地了解到他们的渴望和需求。所以,本书的第一宗旨便是,希望能为工作在生产第一线的同志们提供一点实实在在的参考资料和使用方法。

由于本书的相当篇幅是介绍变频器的各种功能和应用中的一些问题,因此,就内容而言,大多属于对现成的成果进行编撰和解释。但其中,也并非没有笔者自己的思考和发挥。主要有:

(1) 在深入浅出的讲解方式上,笔者是颇下了一点功夫的。例如,对异步电动机的一些分析方法等。

(2) 有些内容是笔者在研制变频器时深有体会而其他书中少有涉及者,如突然停电对逆变管危害的分析、环境温度对逆变过程的影响等。

(3) 也有笔者自己提出来的概念和方法。如关于变频调速时有效转矩线和有效功率线的概念、变频调速应用于恒功率负载时采用两档传动比的方法等。

(4) 笔者自己的实践经验介绍。诸如在实践中,常常会遇到需要紧急处理的问题,例如,用户手头的电位器和说明书中的要

求不符时的处理、外接制动电阻和制动单元的“土法处理”等。

有时候，由于某种原因，对设备的某些方面进行了一些不同于常规的处理，效果不错。再一论证，它居然也是一种好方法。如关于恒压供水的主体方案、关于龙门刨床要求“下垂特性”的处理等等。

此外，也有应部分读者的要求而写的内容，例如关于 PID 控制的通俗说明等。

不消说，由于笔者水平的有限，以及时间的仓促，错误之处以及内容的安排不当之处肯定是不少的。笔者十分诚恳地愿和广大读者展开讨论、交流经验，以求共同提高。

在本书编写过程中，曾得到有关单位和一些同志的热忱支持和帮助，华中理工大学陶绪楠教授仔细审阅了本书，并提出了许多宝贵意见，在此一并表示衷心的感谢。

当读者拿到此书时，我已退休。然而，在变频调速的推广应用方面，我却欲罢而不能了。我架不住读者们的热烈企盼和工程项目的诱惑。

我属牛，我愿在这一方土地上继续地耕耘下去。

作 者

常用物理量符号表

B	旋转磁场的磁感应强度
E	感应电动势的有效值或直流值 (泛指)
E_1	定子绕组的感应电动势
E_2 、 E_2'	转子绕组的感应电动势及其折算值
e	感应电动势的瞬时值 (泛指)
f	频率 (泛指)
f_N	额定频率
f_x	给定频率
f_{ox}	输出频率
f_{BA}	基本频率
f_{max}	最大频率
f_{xM}	最大给定频率
f_{BI}	偏置频率
f_H	上限频率
f_L	下限频率
f_J	回避频率
f_{JOG}	点动频率
G	重物的重力
G_N	起重机械的额定负荷
GD^2	飞轮力矩
H	扬程 (泛指)
H_T	全扬程
H_B	实际扬程
H_L	损失扬程
I	电流的有效值或直流值 (泛指)
I_M	电动机的电流
I_{MN}	电动机的额定电流
I_1	定子电流

I_2 、 I_2'	转子电流及其折算值
I_0	励磁电流
I_N	变频器的额定电流
I_C	晶体管的集电极电流
I_B	晶体管的基极电流
I_E	晶体管的发射极电流
i	电流的瞬时值 (泛指)
k_f	频率调节比
k_u	电压调节比
K_p	比例增益
m_1 、 m_2	定、转子绕组的相数
N_1 、 N_2	定、转子每相绕组的匝数
N	磁场的北极、传输带上的正压力
n	每分钟转速 (泛指)
n_M	电动机的转速
n_{MN}	电动机的额定转速
n_0	电动机的理想空载转速或同步转速
n_K	电动机的临界转速
n_L 、 n_L'	负载转速及其折算值
n_D	机床的计算转速 (分界转速)
P	有功功率 (泛指)
P_N	变频器配用电动机的容量
P_M	电动机的功率
P_{MN}	电动机的额定功率
P_L	负载功率
P_C	晶体管的耗散功率
p	电动机的磁极对数, 功率的瞬时值, 损耗功率 (泛指), 压力
p_{Cu1} 、 p_{Cu2}	定、转子的铜损
p_{Fe1} 、 p_{Fe2}	定、转子的铁损
Q	流量
Q_N	额定流量
R_L 、 R_L'	机械负载的等效电阻及其折算值
r_1	定子绕组的电阻
r_2 、 r_2'	转子绕组的电阻及其折算值

r_m	励磁支路中铁损的等效电阻
S	磁场的南极、视在功率 (泛指)
S_N	变频器的额定容量
s	转差率 (泛指)
s_N	额定转差率
s_K	临界转差率
T	转矩 (泛指)、周期 (泛指)
T_M	电动机的转矩
T_{MN}	电动机的额定转矩
T_{MK}	电动机的临界转矩
T_{MS}	电动机的起动转矩
T_B	电动机的制动转矩
T_{H0}	电动机自身的制动转矩
T_{BA}	需要附加的制动转矩
T_L, T_L'	负载转矩及其折算值
T_J	拖动系统的动态转矩
t	时间 (泛指)
t_B	降速时间
t_{ON}	晶体管的开通时间
t_{OFF}	晶体管的关断时间
U	电压的有效值或直流值 (泛指)
U_1	电源的相电压
U_L	电源的线电压
U_N	变频器的额定电压
U_D	变频器直流电路的电压
U_x	与 f_x 对应的变频器输出电压
u	电压的瞬时值、给定电压或信号电压
v	线速度
v_F, v_R	刨床的切削速度和返回速度
W	电动机消耗的电能
X, X_{max}	变频器的给定信号及其最大值
X_T	目标信号
X_F	反馈信号
x_1	定子绕组的漏磁电抗

x_2 、 x_2'	转子绕组的漏磁电抗及其折算值
x_m	励磁支路中的等效电抗
α_n	转速调节范围
α_f	频率调节范围
α_L	负载的调速范围
α_G	齿轮箱的速比
β	晶体管的电流放大倍数、电动机的过载能力
γ	脉冲的占空比
γ_B	制动电阻的容量修正系数
Δn	转速降落
δ_n	转速变化
ϵ	自动调整后的静差
ϵ_n	每相邻两档的转速差
η	效率
θ	电动机的温升
λ	传动比
μ_1 、 μ_2	动摩擦系数和静摩擦系数
σ	负荷率
τ	发热时间常数
Φ	磁通量
φ	功率因数角
ψ	定、转子磁场轴线间的夹角
ρ	物体的回转半径

缩 写 字 表

PAM	脉幅调制
PWM	脉宽调制
SPWM	正弦脉宽调制
VVVF	变压变频（常用作变频器的代号）
SCR [⊖]	普通晶闸管
GTR	电力晶体管
BJT	双极结型晶体管
IGBT	绝缘栅双极型晶体管
MOSFET	场效应晶体管
IFM	智能模块
PID	比例、积分、微分调节
PLC	可编程序控制器
AVR	自动电压调节

⊖ SCR (Semiconductor Control Rectifier) 为硅可控整流器，是 1957 年美国通用电气公司发明时命名的，后来国际电工委员会 (IEC) 将其正式定名为晶闸管 (Thyristor)，但为方便起见，习惯仍沿用 SCR 代表普通晶闸管。

目 录

《电气自动化新技术丛书》序言

第2版前言

第1版前言

常用物理量符号表

缩写字表

绪论	1
第1章 预备知识	4
1.1 电力拖动系统的工作要点	4
1.1.1 电力拖动系统的构成	4
1.1.2 电力拖动系统的稳定运行状态	4
1.1.3 电动机和负载的机械特性	5
1.1.4 电力拖动系统的瞬态过程	7
1.1.5 电力拖动系统的功率计算和传递	8
1.1.6 电力拖动系统的折算	10
1.2 调速问题综述	11
1.2.1 调速的概念	11
1.2.2 调速的意义	12
1.2.3 调速的主要指标	12
1.3 他励直流电动机概述	13
1.3.1 基本结构和电路	14
1.3.2 他励直流电动机的机械特性	15
1.3.3 他励直流电动机的调速	17
1.4 笼型异步电动机概述	20
1.4.1 基本结构	20
1.4.2 异步电动机的旋转原理	21
1.4.3 异步电动机的调速问题	22
1.5 异步电动机的转子电动势、电流和电磁转矩	23

1.5.1	转子电动势的波形和频率	23
1.5.2	转子电动势的空间分布	25
1.5.3	转子的电流、磁场和电磁转矩	26
1.6	异步电动机的等效变换	29
1.6.1	动/静变换	29
1.6.2	磁/电变换	31
1.6.3	电动机的平衡方程和能量传递过程的关系	36
1.7	异步电动机的机械特性	38
1.7.1	电磁转矩公式	38
1.7.2	自然机械特性	38
1.7.3	能量图及其与机械特性的对应关系	40
1.8	异步电动机工作状况的基本分析方法	42
1.8.1	概述	42
1.8.2	电压变化时电动机工作状态的变化(以电压升高为例)	43
1.8.3	负载变化时电动机工作状态的变化(以负载增加为例)	45
1.9	异步电动机的制动	46
1.9.1	再生制动	46
1.9.2	直流制动(能耗制动)	48
1.9.3	反接制动	49
第2章	变频调速的基础知识	51
2.1	概述	51
2.1.1	变频调速原理	51
2.1.2	变频器的类别	52
2.1.3	变频器的额定值和频率指标	53
2.2	交-直-交变频器的主电路	55
2.2.1	交-直部分	55
2.2.2	直-交部分	56
2.2.3	制动电阻和制动单元	58
2.3	逆变桥的工作原理	58
2.3.1	单相逆变桥	58
2.3.2	三相逆变桥	59
2.4	变频与变压(VVVF)	61
2.4.1	变频调速时出现的新问题	61