

SPWM变频调速 应用技术

张燕宾 编著

第4版



YZLI0890111389

电气自动化新技术丛书



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



电气自动化新技术丛书

SPWM 变频调速应用技术

第 4 版

张燕宾 编 著



YZLI0890111389



机械工业出版社

本书以帮助工作在生产第一线的电气工作者选好用好变频器为宗旨，通俗易懂。本书首先深入浅出地讲解了电力拖动系统的工作要求、异步电动机的主要理论和交-直-交变频器的基本原理，进而详细讲解了变频器中各功能的含义，进行预置的依据和方法，变频调速系统的设计、安装，变频器在水泵和风机、起重机械和电梯、金属切削机床和其他机械中的应用，并对使用中的一些问题进行了深入探讨。

本书自1997年12月出版以来，已发行52500册，深受广大读者欢迎。为更好地满足读者的需要，对本书再次进行修订。这次修订主要删去不再使用的如拟超导技术的叙述；增加直接转矩控制、IGBT的相关电路、变频器里的开关电源、变频器对被保护参数的检测方法、变频器在实施PID调节功能时的一些具体方法、电磁调速电动机的变频调速等内容。

本书可供变频器的使用、维护人员阅读，也可供变频器用户等作为培训教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

SPWM变频调速应用技术/张燕宾编著. —4版. —北京:机械工业出版社, 2011.12

(电气自动化新技术丛书)

ISBN 978-7-111-35988-3

I. ①S… II. ①张… III. ①变频调速 IV. ①TM921.51

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第197211号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:孙流芳 责任编辑:孙流芳 罗莉

版式设计:霍永明 责任校对:李锦莉

封面设计:姚毅 责任印制:杨曦

北京京丰印刷厂印刷

2012年1月第4版·第1次印刷

169mm×239mm·23印张·446千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-35988-3

定价:58.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

销售一部:(010) 68326294

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

门户网:<http://www.cmpbook.com>

教材网:<http://www.cmpedu.com>

封面无防伪标均为盗版

《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,希望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

第4届《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会成员

主 任：王 炎

副主任：王兆安 王志良 赵相宾 牛新国

委 员：王正元 王永骥 王兆安 王 旭

王志良 王 炎 牛新国 尹力明

刘宗富 许宏纲 孙流芳 阮 毅

李永东 李崇坚 陈伯时 陈敏逊

陈维均 周国兴 赵光宙 赵 杰

赵相宾 张 浩 张敬明 郑颖楠

涂 健 徐殿国 黄席樾 彭鸿才

霍勇进 戴先中

秘 书：刘凤英

第4届《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会的话

自1992年本丛书问世以来,在学会领导和广大作者、读者的支持下,至今已出版发行丛书38种33万余册,受到广大读者的欢迎,对促进我国电气传动自动化新技术的发展和传播起到了很大作用。

许多读者来信,表示这套丛书对他们的工作帮助很大,希望我们再接再厉,不断推出介绍电气传动自动化新技术的丛书。因此,本届编委会决定选择一些大家所关心的新选题,继续组织编写出版,同时对受读者欢迎的已出版的丛书,根据技术的发展,我们将组织一些作者进行修订再版,以满足广大读者的需要。

我们诚恳地希望广大读者来函,提出您的宝贵意见和建议,以使本丛书搞得更好。

在本丛书出版期间,为加快与支持丛书出版,成立了丛书出版基金,得到了中国电工技术学会、天津电气传动设计研究所等单位的支持,在此我们对所有资助单位再次表示感谢。

第4届《电气自动化新
技术丛书》编辑委员会
2002年10月12日

第4版前言

本书的第3版自2005年出版以来,又已经印刷了六次,机械工业出版社电工电子分社的牛新国社长和孙流芳编辑都说,该写第4版了。我盘点了一下,自2005年以来的六年间,因为又遇到了不少新的问题,使我对许多问题的认识,有了新的进步。可以补充的新内容已足以再出一版了。

和第3版比较,本书补充或改写的内容如下。

在第2章中:

(1) 删去了原2.9节的“拟超导技术概述”。此技术虽然获得了国家专利,但现在的变频器里已不再应用。

增写了“直接转矩控制”。直接转矩控制技术以电压和磁链的空间矢量为理论基础,本书原先并未涉及这方面的内容,故未作介绍。最近,广泛地阅读了一些讲解直接转矩控制的书籍,并且进行了归纳,讲解直接转矩控制分两个部分:

1) 通过对电压和磁链空间矢量的分析,得到电磁转矩的公式,再进一步讨论其实施原理。这部分对于变频器的使用者来说,实难以掌握,本书将不作介绍。

2) 通过砰—砰(Bang—Bang)控制得到较硬的机械特性,本书对这部分进行了深入浅出的讲解。

(2) 增加了“IGBT的相关电路”。本书第1版出版时,变频器的逆变器件还是GTR。后来改为IGBT了,因为电路是差不多的,故只介绍了IGBT的基本特点,我自己也未对IGBT的电路作深入的探讨。但在实践过程中,有许多问题暴露出来了,这才对IGBT的相关电路有了较深入的了解,补充了进来。

(3) 增加了关于“变频器里的开关电源”。这是许多读者所要求的,故补充了进来。

在第3章中,增加了“额定频率轻载时的节能运行”和“低频重载时的节能运行”,这两个内容,都是我的学员同志在听过我的讲座后创造的方法,他们很高兴地打电话告诉我,说节能效果很好。遗憾的是我没有记下他们的姓名,这实在是他们的功劳啊。

在第4章中,在各保护功能的后面,增加了变频器对被保护参数的检测方法,作为读者在判断故障原因时的参考。

在第5章中,增加了“电磁调速电动机的变频调速”。在把电磁调速电动机改造为变频调速时,人们往往想当然地考虑了几种方案,但结果却常常令人失

望。这迫使我不得不对电磁调速电动机的机械特性作比较深入的分析，并得出了解决办法，今与读者共享。

在第7章中，增加了变频器在实施PID调节功能时的一些具体方法。这是因为，常常有人反映，电力拖动系统中有了变频器后，PID调节的效果往往不尽如人意。而这里所说的PID调节，通常是指采用了变频器以外的闭环控制功能，如PLC、工控机以及某些与传感器结合的控制器等。其实，变频器自身也有PID调节功能，凡是变频调速系统，只有在采用了变频器的PID调节功能后，系统的闭环控制才比较理想。

在第12章中，改写了“变频调速的再生制动解析”的内容。一次，我在上海讲课，一位高级工程师找到我，向我询问这方面的问题。我讲解后，他一拍大腿说：“我问了许多人，都听不明白，你这一讲，我豁然开朗了。”我于是整理成一篇题为《异步电动机的再生制动问题》的文章，发表在《电世界》杂志上，今补充在这里。

愿本书能够成为我这头老黄牛在为读者提供服务方面又向前迈进了一步的脚印。

作者

第3版前言

自本书的第1版出版以来，已经有七年多了。在这七年多的时间里，我反反复复地做着同一件事：深入浅出地讲解有关变频器应用的各种问题。

起初是有些无奈的。只是因为架不住一些杂志和出版社编辑们的三寸不烂之舌，不得不重复地写着。

但后来发现，在反反复复的过程中，居然也在不断地进步。非但改进了讲解方法，就连对所讲解问题的理解上，也有所深入。加以，不少读者和用户常常向我咨询问题，迫使我不得不仔细地阅读各种变频器的使用说明书，学习各类生产机械的基本知识，思考读者和用户们提出的问题。与此同时，也使我大大地拓宽了对变频调速的应用面的了解。

人如果有了创造性劳动，就会产生兴趣。我也由此而引发了积极性，变被动为比较地主动了。

因为自己在逐渐地进步，再回过头去看以前写的东西，就又有些不满足了。因此，当出版社的孙流芳同志提出说：是不是考虑出第3版的时候，我觉得，确实也有修改和补充的必要了。

与第2版相比，第3版修改和补充的主要有：

在第1章，补充了“异步电动机的基本关系小结”。这是因为，异步电动机在电机学中是比较难学的部分，它以等效电路为分析基础，比较抽象。所以，对几个基本关系进行归纳，可以加深读者对异步电动机的了解；

在第2章，补充了对“变频器各部分的电流”的分析，因为提出这个问题的读者不在少数；

在第3章，补充了对“轻载时的节能运行”的分析，这是不少用户常常忽略的；

在第5章，针对许多用户在对原拖动系统进行变频调速改造时常常出现的问题，增加了“调速系统中的基本关系”和“变频器容量的选择”两节；

在第6章，对“变频器的测量”作了补充；

在第7章，增加了“升、降速端子及其常用控制电路”，并对“变频器的故障切换控制”一节进行了改写；

完全重写了第8章，使之更加接合生产实际，也更加充实了；

在第11章，增加了“薄膜的卷绕控制”的内容。

除此以外，还把我在各种杂志上发表的一些讨论得比较深入的文章汇集在一

起，单独成为一章，即第12章。

现在看来，我这头老黄牛在变频调速这一小方土地上，需要深耕细作的空间还相当地大呢！“路漫漫其修远兮”，我将孜孜不倦地耕作。

作者

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？

这可真有点两厢情愿，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

（注：本文原载《光明日报》1991年10月10日第4版）

（注：本文原载《光明日报》1991年10月10日第4版）

（注：本文原载《光明日报》1991年10月10日第4版）

（注：本文原载《光明日报》1991年10月10日第4版）

（注：本文原载《光明日报》1991年10月10日第4版）

（注：本文原载《光明日报》1991年10月10日第4版）

（注：本文原载《光明日报》1991年10月10日第4版）

（注：本文原载《光明日报》1991年10月10日第4版）

（注：本文原载《光明日报》1991年10月10日第4版）

（注：本文原载《光明日报》1991年10月10日第4版）

（注：本文原载《光明日报》1991年10月10日第4版）

（注：本文原载《光明日报》1991年10月10日第4版）

（注：本文原载《光明日报》1991年10月10日第4版）

（注：本文原载《光明日报》1991年10月10日第4版）

（注：本文原载《光明日报》1991年10月10日第4版）

（注：本文原载《光明日报》1991年10月10日第4版）

（注：本文原载《光明日报》1991年10月10日第4版）

（注：本文原载《光明日报》1991年10月10日第4版）

（注：本文原载《光明日报》1991年10月10日第4版）

（注：本文原载《光明日报》1991年10月10日第4版）

（注：本文原载《光明日报》1991年10月10日第4版）

（注：本文原载《光明日报》1991年10月10日第4版）

（注：本文原载《光明日报》1991年10月10日第4版）

（注：本文原载《光明日报》1991年10月10日第4版）

（注：本文原载《光明日报》1991年10月10日第4版）

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挡传动比的方法等。

(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

1997年10月

常用物理量符号

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	起重机械的额定负载
GD^2	飞轮力矩
H	扬程 (泛指)
H_0	全扬程
H_A	静扬程
H_L	损失扬程
H_G	供水扬程
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	输送带上的正压力
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	变频器配用电机的功率
P_M	电动机的功率
P_{MN}	电动机的额定功率
P_S	变频器输入的电源功率
P_S'	变频器的输出功率
P_L	负载功率 (电动机的轴功率)
P_G	流体功率
P_A	流体功率中的空载功率
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	电阻 (泛指)
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'	转子绕组及其折算值
r_m	励磁支路中铁损的等效电阻
S	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_{B0}	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_R	升速时间
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