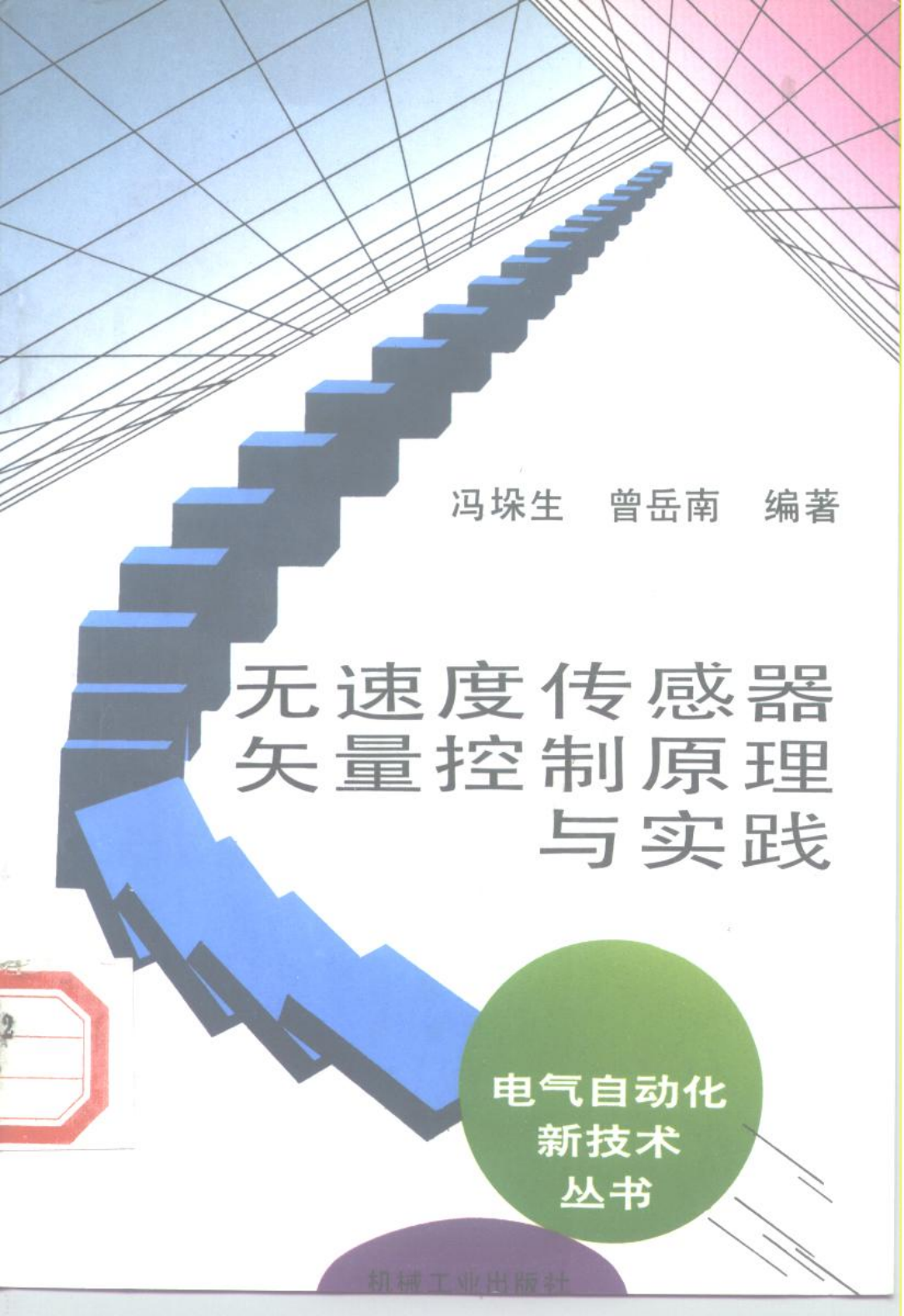




冯垛生 曾岳南 编著

无速度传感器 矢量控制原理 与实践



电气自动化
新技术
丛书

机械工业出版社

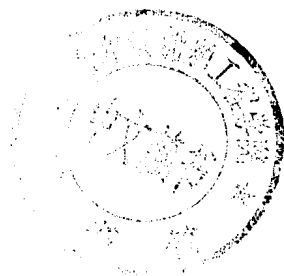
337683

电气自动化新技术丛书

无速度传感器矢量控制 原理与实践

(广东省自然科学基金资助研究项目)

冯焱生 曾岳南 编著



机械工业出版社

DV22/01

本书是作者在日本从事矢量控制技术合作研究多年，并收集了大量技术资料的基础上编写的。本书介绍了无速度传感器矢量控制系统的具体电路、工作原理、参数设计和调整方法。此外，还介绍几种典型的无速度传感器的速度观察方案。书末列出英、法、日等国最新型无速度传感器矢量控制变频器的技术数据和规格，以供读者选用。

本书特点是控制方案结合实际；参数和实验数据翔实。读者阅读本书后，不仅能掌握矢量控制的原理，也能根据书中提供的系统和电路进行实践制作。

本书以从事电气传动自动化技术的工程技术人员为主要读者，也可作为大专院校有关专业师生的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

无速度传感器矢量控制原理与实践/冯堉生·曾岳南编著. -北京:机械工业出版社, 1997. 4

(电气自动化新技术丛书)

ISBN 7-111-05446-6



I. 无… I. ①冯… ②曾… III. 无速度传感器-矢量-控制 N. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 24004 号

出 版 人: 马九荣 (北京市百万庄南街 1 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 孙流芳 版式设计: 王 颖 责任校对: 李秋荣

封面设计: 姚 毅 责任印制: 路 琳

机械工业出版社印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1997 年 4 月第 1 版·第 1 次印刷

850mm×1168mm¹/₃₂·4.875 印张·121 千字

0 001—3 500 册

定价: 10.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

《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。

本丛书选题将随新技术发展不断扩充，凡属电气自动化领域新技术均可作为专题撰写新书。我们也面向社会公开征稿，欢迎自列选题投稿。来稿或索取稿约请函寄 300180 天津市津塘路 174

号天津电气传动设计研究所转《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

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会成员

主任委员：陈伯时

副主任委员：喻士林 夏德钤 李永东

委员：（以姓氏笔划为序）

王 炎	王文瑞	王正元
刘宗富	孙 明	孙武贞
孙流芳	过孝瑚	许宏纲
朱稚清	夏德钤	陈伯时
陈敏逊	李永东	李序葆
张 浩	张敬民	周国兴
涂 健	蒋静坪	舒迪前
喻士林	霍勇进	戴先中

《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

前 言

自 1968 年德国人发明矢量控制理论以来,迄今已有 20 余年;产品开发也有 10 年左右历史,技术日趋成熟。从 1992 年开始陆续有进口的矢量控制变频器进入国内市场,但国内尚无专门阐述异步电动机无速度传感器矢量控制系统的专著。矢量控制变频器的知识含量高,体现在:一是应用自适应控制、模糊控制、人工神经网络控制等现代控制理论设计新的系统;二是新的功率器件层出不穷,GTR 已过时,并且已从 IGBT 发展到 IPM 等智能模块;三是最新微电子技术的采用十分普遍,如 32 位 DSP、新型固体混合电路(H/W)等。当今高精度通用变频器(特别是中小容量),普遍采用 DSP 无速度传感器矢量控制方案。因此,一般读者过去虽已掌握通用变频器 VVVF 技术、GTR-PWM 技术或矢量控制基本概念;但尚不能适应当前的形势,迫切需要介绍这方面新技术的专著。

本书拟从原理、实践、技术动向三方面深入浅出地介绍无速度传感器矢量控制技术,以期促进国内对该技术的研究与推广应用。

本书主题是“无速度传感器矢量控制”,但为了把问题阐述清楚,还必须从“带速度传感器矢量控制”入手。拟选择一个典型系统将两者作比较。该系统有具体电路、参数设计和调整方法,使读者不仅懂得原理,且能以本书为依据进行实践和应用。此外,本书还引入几种典型的无速度传感器的速度观测方案,介绍 DSP 在矢量控制中的应用及国际最新研究动态与产品信息。

本书第 1 章绪论主要讲述矢量控制发展史和开发研究动向。第 2 章为矢量控制基础知识,介绍异步电动机数学模型和坐标变换。第 3 章解剖一个带速度传感器(PG)矢量控制系统,该系统

全部用模拟电路组成，目的是为了便于分析各个环节的原理，容易看懂矢量控制的物理概念。第4章是在第3章基础上取消速度传感器代之以磁链和速度观测器构成无PG矢量控制系统，讲述其工作原理、系统设计，并给出静态和动态工作波形。第5章介绍典型的无速度传感器矢量控制系统实例。第6章介绍矢量控制系统参数自检测。第7章介绍DSP在无速度传感器矢量控制系统中的应用，给出硬件结构和软件设计。

本书第1~4章和第6~7章由广东工业大学冯焱生教授编写；第5章由上海大学曾岳南编写。

本书以从事电气传动自动化技术的工程技术人员为主要读者，也可作为大专院校电气自动化专业师生的选修教材。

在本书编写过程中得到电气自动化新技术丛书编委会的喻士林教授级高级工程师、陈伯时教授、李永东教授的关心和支持。特别是陈伯时教授在百忙中审阅和修改了本书的编写大纲，在此谨表示衷心的感谢。作者于1995年6月~9月应邀到日本鹿儿岛大学电气电子工学科访问期间，篠原勝次教授提供他研究室的全部研究报告和硕士、博士论文供参阅在此谨致谢意。此外，广东工业大学的领导给予许多支持和帮助，许海珠同志对本书的写作一直给予鼓励，在此一并致谢。

由于水平所限，本书的不足和漏误难免，敬希读者不吝指正。

作 者

1996年4月1日

目 录

《电气自动化新技术丛书》序言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 现代交流调速的特点	1
1.1.1 电动机的古典控制和现代控制	1
1.1.2 现代交流调速的特点	2
1.2 矢量控制技术研究的发展背景和技术动向	3
1.2.1 发展背景	3
1.2.2 技术动向	7
1.3 无速度传感器矢量控制系统的特色及产品介绍	10
第 2 章 异步电动机的数学模型和坐标变换	14
2.1 异步电动机的基本方程式	14
2.2 异步电动机的几种等效电路	17
2.2.1 T 型等效电路	17
2.2.2 异步电动机等效电路的通用形式	18
2.2.3 突出转子磁链的 T-1 型等效电路	20
2.3 坐标变换	21
2.3.1 概念	21
2.3.2 从三相到两相的静止坐标变换 (3s/2s 变换)	22
2.3.3 从两相静止到两相旋转的坐标变换 (2s/2r 变换)	24
2.4 异步电动机在不同坐标系上的数学模型	25
2.4.1 在两相 (α - β) 静止坐标系上的数学模型	25
2.4.2 在两相 (M-T) 旋转坐标系上的数学模型	27
第 3 章 矢量控制变频调速系统的原理、结构和实践	29
3.1 矢量控制基本方程式	29
3.2 转差型矢量控制变频调速系统的结构和工作原理	31
3.3 系统的单元电路和参数调试	33

3.3.1	电动机参数测定	33
3.3.2	指令值运算	35
3.3.3	两相正弦波振荡器	36
3.3.4	矢量旋转器	37
3.3.5	两相/三相变换电路	38
3.3.6	实验结果及分析	40
第4章 无速度传感器矢量控制系统的结构和速度		
	观测理论	41
4.1	无速度传感器矢量控制系统的原理和结构框图	41
4.2	速度间接观测理论	43
4.3	系统单元电路和参数计算	47
4.3.1	相电压检测	47
4.3.2	相电流检测	47
4.3.3	三相/两相变换电路	50
4.3.4	$\hat{\Phi}_2$ 运算电路及参数计算	50
4.3.5	$\hat{\Phi}_{m2}$ 、 $\hat{i}_{11}$ 运算电路	60
4.3.6	$\hat{i}_{11}^*$ 、 $\hat{i}_{m1}^*$ 、 ω_1 运算电路	60
4.4	实验结果及分析	60
第5章 典型的无速度传感器矢量控制系统		
5.1	只用电流传感器的矢量控制系统	64
5.1.1	异步电动机的标量解耦控制	64
5.1.2	电压型矢量解耦控制调速系统	65
5.1.3	转子磁链相位偏差补偿原理	69
5.1.4	速度推算原理	72
5.1.5	异步电动机无速度传感器电压解耦矢量控制系统的设计	75
5.2	电动机转速的自适应辨识系统	81
5.2.1	基于模型参考自适应的转速辨识方法	81
5.2.2	基于神经网络的自适应转速辨识方法	84
第6章 无速度传感器矢量控制系统参数的自检测		
6.1	参数自检测概述	88
6.2	电动机参数离线自设定	89

6.2.1 分类	89
6.2.2 自设定原理	89
6.2.3 自设定系统结构	93
6.2.4 自检测的实现和步骤	94
6.3 电动机参数在线自校正	97
第 7 章 DSP 在无速度传感器矢量控制系统中的应用	101
7.1 数字控制基础	101
7.1.1 微机控制系统的基本结构	101
7.1.2 数字控制的特点	102
7.1.3 数字控制基础	103
7.2 用 DSP 的异步电动机无速度传感器矢量控制系统的构成	114
7.2.1 DSP 的现状和动向	114
7.2.2 DSP 系统的结构	115
7.2.3 用 DSP 的异步电动机无速度传感器矢量控制系统的构成	119
7.2.4 相电压检测	121
7.2.5 相电流检测	121
7.2.6 i_d^* 、 i_m^* 、 ω_s 的运算	121
7.3 DSP 控制系统软件的设计	122
7.3.1 控制软件概要	122
7.3.2 各控制环节软件的设计	125
7.4 采用 DSP 的无速度传感器矢量控制系统实验结果分析	130
7.4.1 微机运算流程图	130
7.4.2 实验波形图	132
7.4.3 结论	136
附录 A 进口矢量控制变频器性能和技术规格介绍	137
A1 日本日立公司 J300 系列	137
A2 日本三菱公司 FRA240 系列	138
A3 法国施耐德集团 ATV—66 系列	139
A4 英国 CT 公司 V1100~V7500 系列	141
参考文献	142

第1章 绪 论

1.1 现代交流调速的特点

1.1.1 电动机的古典控制和现代控制

古典控制是一种力学系统的控制,主要考虑电动机稳态特性,亦即起动、调速、制动的控制。例如,调速是研究由一个状态到另一状态的速度变化状况,对电磁变化的过程考虑甚少,且着重于动力学的过渡过程。由于力学惯性时间常数大于电磁时间常数,从而掩盖了电磁过渡过程所起的作用。

现代控制是由于电力电子学的进步而开拓的领域。首先是因为电力电子器件的发展,不断出现 SCR[⊙]、GTO、GTR、IGBT 等新器件,使得电动机电源的控制非常容易,相应地也促进电动机控制技术得到飞跃的发展。古典控制时代电源调压的主力军是电动发电机组,后来又增加汞弧整流器,且只限于直流调压。因为交流电源的变频非常困难,故长期以来,所谓电动机调速实际上是指直流调速。电力电子技术首先促进了直流调速的发展,可调电源从直流发电机、汞弧整流器迅速转换为静止的电力半导体变流装置。由于其控制性能与经济指标优良,故一直处于现代电动机调速的主导地位。直流伺服电动机是机器人和 NC 机床驱动的主选方案,其高精度与快速性成为现代电动机控制的一个里程碑。

现代电动机控制的另一特点是,控制不再是单一的调速,其主要被控量是转矩。系统采用闭环控制后,被控量有多个,如速度、位置及其他物理量,最终是控制电动机轴上的转矩。不管输

⊙ SCR 是硅可控整流器(即可控硅)的英文缩写,为美国早期的产品名,后 IEC 正式定名为晶闸管(Thyristor),但为方便起见,普通晶闸管往往仍沿用 SCR 来表示。

入量是电流或电压，在静态与动态情况下，电动机的转矩响应非常重要。因此，对于这种高性能的控制，不能只考虑动力学系统的响应，而忽视电磁的过渡过程。为了加快系统的动态响应速度，要想办法减小电磁的过渡过程。

1.1.2 现代交流调速的特点

在现代电动机控制中，长期以来存在交流调速和直流调速方案之争。究竟是哪一种更优越呢？有趣的是，与其相似的电工界在19世纪末，也有过电力系统中直流与交流供电方案之争。结果经过半个世纪的论争，由于多相交流电的发明，使电力系统的交流化获得胜利。

在电力电子技术发展以前，由于交流变频困难、价格贵，且交流电动机中的同步电动机调速几乎完全依赖于变频，故古典交流调速只限于异步电动机（即感应电动机）的变极、变压、转子回路串电阻等有级调速方式，确实无法与直流调速竞争。交流电动机唯一的优势是电动机本身。其优点是结构坚固，无电刷、维修方便、重量轻、价格低等。一旦交流电动机控制技术的优势发挥以后，两者的优劣便见分晓。

近年来，由于电力电子、计算机控制以及矢量控制等技术的进步，使现代交流调速有了巨大的技术支持，如图1-1所示。电动

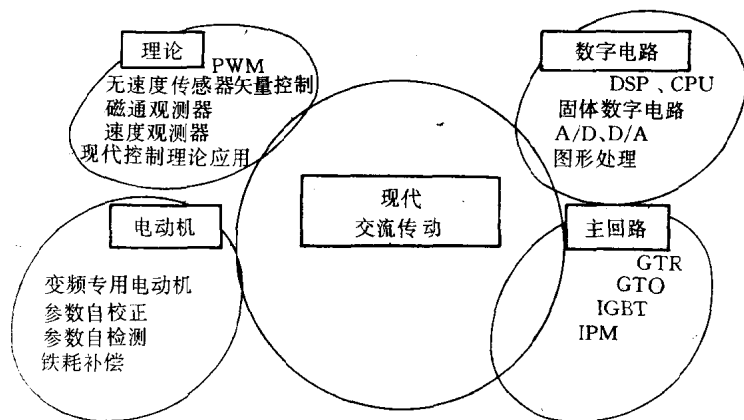


图 1-1 现代交流调速的技术支撑系统

机控制的交流化，经过近一个世纪之争，现已到了最后阶段。相信在不远的将来，在大多数领域中，由交流调速代替直流调速的时代即将到来。

1.2 矢量控制技术研究的发展背景和技术动向

1.2.1 发展背景

目前世界上矢控技术的研究与产品开发方面，德国和日本处于领先地位。我国学者早期发表文章时，常引用德国西门子公司 Blaschke 和日本三菱电机公司中野孝良(Nakano)的有关文献。矢量控制技术是德国人发明的，日本引进了德国理论，不过日本在产品开发上确实下了不少功夫。1994 年，日本电气学会特邀最早开发矢量控制产品的中野（三菱电机公司）和岩金（安川电机公司）以“矢量控制的幕后话”为主题召开了一个座谈会。他们在阐述矢量控制发展史方面比较全面和生动，现介绍给读者，一方面可了解国际上矢量控制技术发展的全过程；另一方面也可以从中吸取电工高科技产品开发的经验，期望以此促进我国该项技术的发展。

1. 矢量控制技术出现前电气传动控制的状况 矢量控制的发明和发展对电力电子和交流调速都带来巨大的冲击。矢量控制的论文发表已 20 余年；但真正实用化不过 10 年左右历史。自 1957 年美国通用电气 (GE) 公司发明 SCR 以来，以 SCR 整流器为电源的直流传动方式非常普及，可是直流调速存在如下缺点：

- (1) 电动机容量、最高转速、环境条件受到限制。
- (2) 换向器、电刷维护不便。

人们在期望能弥补上述缺点的新型交流调速方案出现。在 1970 年前后，由于快速 SCR 的出现，SCR 变频调速的研究进展很快，并进入实用化阶段。例如风机、水泵、传送带、轧钢辊道、纺织机、造纸机等生产设备上均能见到应用的例子。特别是 1973 年发生石油危机时，社会上对变频调速的风机、水泵节能效果高的事实，评价很高。销售量几乎达到和直流调速一样的水平。但由

于SCR易产生误触发而引起换相失败,造成短路,引起停机事故。后来改用电流型逆变器,增加电流反馈闭环,保护短路的功能有所改善。但总的来说,当时交流调速的技术水平不高,处于有限调速范围内,外部几乎无干扰才能稳定运转的状态,它只是一种单纯的调速装置,在比较复杂的如轧钢机可逆传动方面尚不能应用。

最初的变频调速是用开环 U/f 恒定控制。后来增加了电流环,称它为转差频率控制,改善了性能并已实用化。但系统只是从稳态公式推导出的平均值控制,完全不考虑过渡过程。这样一来,交流调速系统的稳定性、起动及低速时的转矩动态响应与用瞬时值控制的直流调速相比就略逊一筹。此外,交流调速系统主回路由于采用半导体开关电路,故转矩脉动、高次谐波、无功功率增大也成了问题。在70年代,要说用交流电动机代替直流电动机几乎是没有人会相信的。在此背景下,人们当然会去努力探索更新的交流控制方案。

不管是SCR电压型还是电流型的逆变器,必须用换相电路。用电容和电抗组成的换相电路,存在体积大、重量重、换相时间长的缺点,故希望开发出不用换相电路的自励式逆变器。

1971年,器件生产厂做出高压GTR,可用于线电压为200V的系统。这样,载波频率为3kHz的PWM逆变器开始登场。可以说,这是矢量控制研究的必经之路。其后,又开发出GTR、IGBT模块。从此,交流传动进入了伺服控制的高精领域。选择器件为突破口,无疑是正确的方向。

六七十年代,日本只在SCR电动机(无换向器电动机)方面领先,电力电子技术方面几乎都是引进欧美的技术。而德国在交流调速方面,无论是研究还是开发,一直处于领先地位。当时,他们学术界在交流电动机理论、瞬时值解析、空间矢量等电动机特性与过渡过程响应的研究均很盛行。在这种背景下,发明矢量控制是不奇怪的。

2. 发明矢量控制的先驱者们 矢量控制在国际上一般多称

为磁场定向控制 (Field Orientation), 亦即把磁场矢量的方向作为坐标轴的基准方向, 电动机电流矢量的大小、方向均用瞬时值来表示。这个理论是 1968 年首先由 Darmstädter 工科大学的 Hasse 博士发表。1971 年西门子公司的 Blaschke 又将这种一般化的概念形成系统理论, 并以磁场定向控制的名称发表。前者是在学会的论文杂志上发表; 而后者是公司研究成果, 故以专利的形式发表。

新控制方式出台后, 在理论的新意和实用前景方面是不容置疑的。但由于硬件复杂和价格高等原因, 故实际应用还不多。到 70 年代中期为止, 它只在一些电动力检测设备上作传动用。以后, 德国人又积极开展解决硬件和系统简化的研究。例如, 1980 年 Leonhard 为首的小组在应用微处理器的矢量控制的研究中取得进展, 促进了矢量控制的实用化。

矢量控制的信息最早传到日本是 1972 年, 由《富士时报》发表了 Blaschke 的译文。1975 年前后陆续有研究论文发表和专利申请, 大学和研究机关着手又稍晚一点。80 年代初, 日本厂家竞相研究矢量控制技术, 大家认为从理论上并不否认其优越性; 但要形成产品必须从性能和价格两方面解决一些实际问题, 即

- (1) 进一步消化理论, 提高应用水平。
- (2) 研究磁通矢量的直接间接检测方法。
- (3) 研制能进行复杂运算并能高速处理的控制装置。
- (4) 研制能把时域、空间分开, 控制时滞小的电力变流装置。

与此同时, 大学方面应用现代控制理论把矢量控制的理论深化, 开拓了解耦控制、速度观测、参数自设定等, 促进了无速度传感器矢量控制的发展。

3. 矢量控制技术的早期应用 矢量控制在大中容量交流传动中初次实际应用开始于 1979 年, 用于驱动造纸机。1980 年矢量控制在轧钢机主传动上用于异步电动机和同步电动机传动, 但只在系统的一部分用微机控制。产品化过程中最大的难题还是控制电路的研制。