

第2版

无速度传感器 矢量控制原理与实践

冯垛生 曾岳南 编著

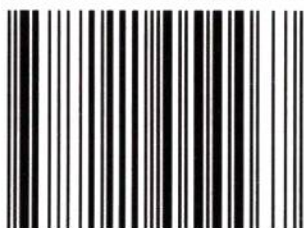
电气自动化
新技术丛书



● ISBN 7-111-05446-6/TM-661

封面设计 / 电脑制作 : 姚毅

ISBN 7-111-05446-6



9 787111 054467 >

定价：16.00 元

地址：北京市百万庄大街22号
联系电话：(010) 68326294

邮政编码：100037

网址：<http://www.cmpbook.com>

E-mail: online@cmpbook.com

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

第 2 版

(广东省自然科学基金资助研究项目)

冯垛生 曾岳南 编著



机械工业出版社

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。此外还介绍了几种典型的无速度传感器的速度推算和观测方案。书末列出了日、法、英、美、德等国最新无速度传感器矢量控制变频器的技术数据和规格,以供读者参考。

这次修订主要增加了第8、9章,内容包括无速度传感器矢量控制系统速度推算和磁通观测的理论与实践。8年来,国内外对此领域的研究受到学术界和企业的关注,成为研究热点。这次修订给出了国外知名变频器厂商的不同速度推算方案。此外,速度推算的最新理论,即模型参考自适应系统(MRAS)已从数年前的纯理论、计算机仿真研究进入了实用阶段。本书亦举出大量应用的实例和国内外基于MRAS的无速度传感器控制系统的新方案和工业应用成果。

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,也可供大专院校有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

无速度传感器矢量控制原理与实践/冯焱生,曾岳南
编著. —2版. —北京:机械工业出版社,2006.2

(电气自动化新技术丛书)

ISBN 7-111-05446-6

I. 无… II. ①冯…②曾… III. 传感器-矢量-
控制 IV. TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第001725号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:孙流芳 版式设计:霍永明 责任校对:吴美英

封面设计:姚毅 责任印制:洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2006年2月第2版·第1次印刷

850mm×1168mm $1/32$ ·7.75印张·205千字

0 001—4 000册

定价:16.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68326294
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2版前言

本书自1997年出版以来，曾接到不少读者来信，一类是探讨书中有关学术方面的问题；另一类是希望把推算转速的方法能系统地加以综合叙述。这次修订就是希望能总结一下国内外的研究现状，除理论推导外，重点是介绍应用和实验技术。但由于本人学识水平所限，视野不够开阔，总结也不尽全面，难免挂一漏万，也许还有错漏之处，望读者不吝指正。

这里要特别感谢东南大学自动化学科老前辈赵家璧教授，他曾来函和我讨论，在静止坐标系下（ $\alpha\beta$ ）异步电动机的数学模型。他发现按第2章的式（2-28）和第5章的式（5-36），推导出的 u_α 、 u_β 表达式不一致，并亲自推导了八个方程式。此事令我十分感动，一位70多岁高龄的老教授，以如此严谨的科学态度对待学术问题，值得我们后辈好好学习。

本书引用的国外文献，其特点是公式推导详细、严谨，仿真、实验数据均很齐全。例如，本书第4章的图4-6、第9章的图9-7和图9-18均是国外同一位教授Shinohara做的研究，推导特别详尽，他给出来的电路，连电压采样的分压电阻值（ $180\text{k}\Omega/10\text{k}\Omega$ ）也标出来了，可信度较高。

本书修订的原则是保留第1~7章不变，增加第8章和第9章。这两章的编写均由冯垛生教授负责。

本书修订过程中得到机械工业出版社孙流芳编审的鼓励，修订提纲经陈伯时教授认真审阅，并提出宝贵意见，广东工业大学华立学院的领导给予了大力支持，在此对他们表示衷心的感谢。

· 作 者

2005年11月20日 于广州

第1版前言

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章由广东工业大学曾岳南编写。

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，篠原胜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

常用符号表

a	加速度; 特征方程系数
B	磁通密度
C	电容
C_e	直流电动机的电动势系数
C_m	直流电动机的转矩系数
D	调速范围
E, e	感应电动势; 误差
e_1	定子反电动势
e_2	转子反电动势
$e_{\alpha 2}, e_{\beta 2}$	在 α 、 β 轴转子电动势分量
F	磁动势
f	频率
f_t	开关频率 (PWM)
GD^2	飞轮力矩
h	开环对数频率特性的频宽
I, i	电流
i	减速比
I_a, i_a	电枢电流
I_1, i_1	异步电动机定子电流
I_2, i_2	异步电动机转子电流
I_d, i_d	整流电流平均值
I_L	负载电流
i_f	直流电动机励磁电流
i_{m1}	矢量控制中 MT 坐标系定子励磁电流
i_{t1}	矢量控制中 MT 坐标系定子转矩电流
$i_{\alpha 1}$	矢量控制中 $\alpha\beta$ 坐标系 α 轴定子电流分量
$i_{\beta 1}$	矢量控制中 $\alpha\beta$ 坐标系 β 轴定子电流分量
i_{d1}	矢量控制中, dq 坐标系 d 轴定子电流分量
i_{q1}	矢量控制中 dq 坐标系 q 轴定子电流分量

- I MRAS 状态方程系数 (行列式)
- J MRAS 状态方程系数 (行列式)
- J 转动惯量
- K 控制系统各环节放大系数
- K_p 比例放大系数
- k 谐波次数
- L 电感、自感
- L_s 异步电动机定子电感
- L_r 异步电动机转子电感
- L_m 互感
- L_{so} 考虑漏感时定子等效电感 $L_{so} = L_s[1 - L_m^2/(L_s L_r)] = \sigma L_s$
- m 相数, 整流电压一周内的脉冲数
- N 绕组匝数
- n 转速
- n_1 理想空载转速; 同步转速
- n_s 对应于转差频率 ω_s 的转速
- P, p 功率
- $p = d/dt$ 微分算子
- p_m 电动机磁极对数
- Q 无功功率
- R 电阻
- R_a 直流电动机电枢电阻
- R_L 电抗器电阻
- R_s 异步电动机定子电阻
- R_r 异步电动机转子电阻
- s 转差率
- $s = \sigma + j\omega$ 拉普拉斯变量
- T_2 时间常数, 开关周期
- t 时间
- T_e 电磁转矩
- T_1 定子回路电磁时间常数
- T_2 转子回路电磁时间常数

T_m 机电时间常数
 T_L 负载转矩
 T (上角标) 行列式转置符号
 U, u 电压
 U_d, u_d 整流电压平均值
 U_f, u_f 励磁电压
 U_m 峰值电压
 U_s 电源电压
 U_1 异步电动机定子电压
 v 速度
 $W(s)$ 传递函数(开环)
 $W_d(s)$ 传递函数(闭环)
 X 电抗
 Z 阻抗
 α 转速反馈系数
 β 电流反馈系数
 γ 电压反馈系数; PWM 电压系数
 δ PWM 脉冲宽度
 Δn 转速降落
 ΔU 电压偏差
 $\Delta \theta$ 相位差
 ξ 阻尼比
 η 效率
 θ 转子位置角(电角度)
 θ_m 机械角位移
 Φ 磁通
 Φ_1 定子磁通
 Φ_2 转子磁通
 $\Phi_{\alpha 2}, \Phi_{\beta 2}$ 在 α 、 β 轴上的转子磁通分量
 $\Phi_{m2}, \Phi_{\sigma 2}$ 在 M、T 轴上的转子磁通分量
 Φ_{d2}, Φ_{q2} 在 d、q 轴上的转子磁通分量
 φ 相位角

Ψ, ψ 磁链的矢量和常量

Ψ_2 转子磁链

$\Psi_{\alpha 2}, \Psi_{\beta 2}$ 转子磁链在 α 、 β 轴上分量

Ψ_1^* 给定定子磁链

Ψ_{m2}, Ψ_{t2} 转子磁链在 M、T 轴上分量

ω_s 转差角速度，转差角频率

ω_1 同步角速度（角频率），磁通角速度，电源角频率

$\omega, \hat{\omega}$ 转子角速度和推算转子角速度（电动机轴上推算角速度）

σ 漏磁系数或漏感系数 [$\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$]

τ 积分（微分）时间常数

目 录

《电气自动化新技术丛书》序言

第4届《电气自动化新技术丛书》编辑委员会的话

第2版前言

第1版前言

常用符号表

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	16
2.1 异步电动机的基本方程式	16
2.2 异步电动机的几种等效电路	19
2.2.1 T型等效电路	19
2.2.2 异步电动机等效电路的通用形式	20
2.2.3 突出转子磁链的T-1型等效电路	21
2.3 坐标变换	23
2.3.1 概念	23
2.3.2 从三相到两相的静止坐标变换(3s/2s变换)	25
2.3.3 从两相静止到两相旋转的坐标变换(2s/2r变换)	26
2.4 异步电动机在不同坐标系上的数学模型	27
2.4.1 在两相($\alpha\beta$)静止坐标系上的数学模型	27
2.4.2 在两相(M-T)旋转坐标系上的数学模型	29
第3章 矢量控制变频调速系统的原理、结构和实践	31

3.1	矢量控制基本方程式	31
3.2	转差型矢量控制变频调速系统的结构和工作原理	33
3.3	系统的单元电路和参数调试	35
3.3.1	电动机参数测定	35
3.3.2	指令值运算	37
3.3.3	两相正弦波振荡器	38
3.3.4	矢量旋转器	39
3.3.5	两相/三相变换电路	40
3.3.6	实验结果及分析	42
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	43
4.1	无速度传感器矢量控制系统的原理和结构框图	43
4.2	速度间接观测理论	45
4.3	系统单元电路和参数计算	49
4.3.1	相电压检测	49
4.3.2	相电流检测	49
4.3.3	三相/两相变换电路	52
4.3.4	$\hat{\phi}_2$ 运算电路及参数计算	52
4.3.5	$\hat{\phi}_{m2}$ 、 $\hat{i}_{11}$ 运算电路	62
4.3.6	i_{11}^* 、 i_{m1}^* 、 ω_1 运算电路	62
4.4	实验结果及分析	63
第5章	典型的无速度传感器矢量控制系统	66
5.1	只用电流传感器的矢量控制系统	66
5.1.1	异步电动机的标量解耦控制	66
5.1.2	电压型矢量解耦控制调速系统	67
5.1.3	转子磁链相位偏差补偿原理	71
5.1.4	速度推算原理	74
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	77
5.2	电动机转速的自适应辨识系统	83
5.2.1	基于模型参考自适应的转速辨识方法	83
5.2.2	基于神经网络的自适应转速辨识方法	86
第6章	无速度传感器矢量控制系统参数的自检测	90

6.1	参数自检测概述	90
6.2	电动机参数离线自设定	91
6.2.1	分类	91
6.2.2	自设定原理	91
6.2.3	自设定系统结构	95
6.2.4	自检测的实现和步骤	96
6.3	电动机参数在线自校正	99
第7章	DSP 在无速度传感器矢量控制系统中的应用	103
7.1	数字控制基础	103
7.1.1	微机控制系统的基本结构	103
7.1.2	数字控制的特点	104
7.1.3	数字控制基础	105
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	116
7.2.1	DSP 的现状和动向	116
7.2.2	DSP 系统的结构	119
7.2.3	采用 DSP 的异步电动机无速度传感器矢量控制系统的构成	122
7.2.4	相电压检测	122
7.2.5	相电流检测	122
7.2.6	i_{dl}^* 、 i_{ml}^* 、 ω_l 的运算	124
7.3	DSP 控制系统软件的设计	124
7.3.1	控制软件概要	124
7.3.2	各控制环节软件的设计	127
7.4	采用 DSP 的无速度传感器矢量控制系统实验结果分析	133
7.4.1	微机运算流程图	133
7.4.2	实验波形图	133
7.4.3	结论	135
第8章	无速度传感器矢量控制系统中速度推算和磁通观测的新进展	140
8.1	无速度传感器矢量控制的现状	140
8.1.1	无速度传感器矢量控制 (SVC) 构成	141
8.1.2	控制方案分类	142
8.1.3	世界著名变频器厂家典型产品的 SVC 方案介绍	143