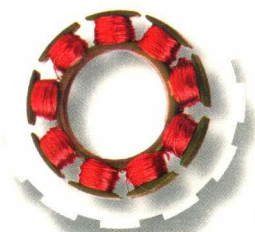
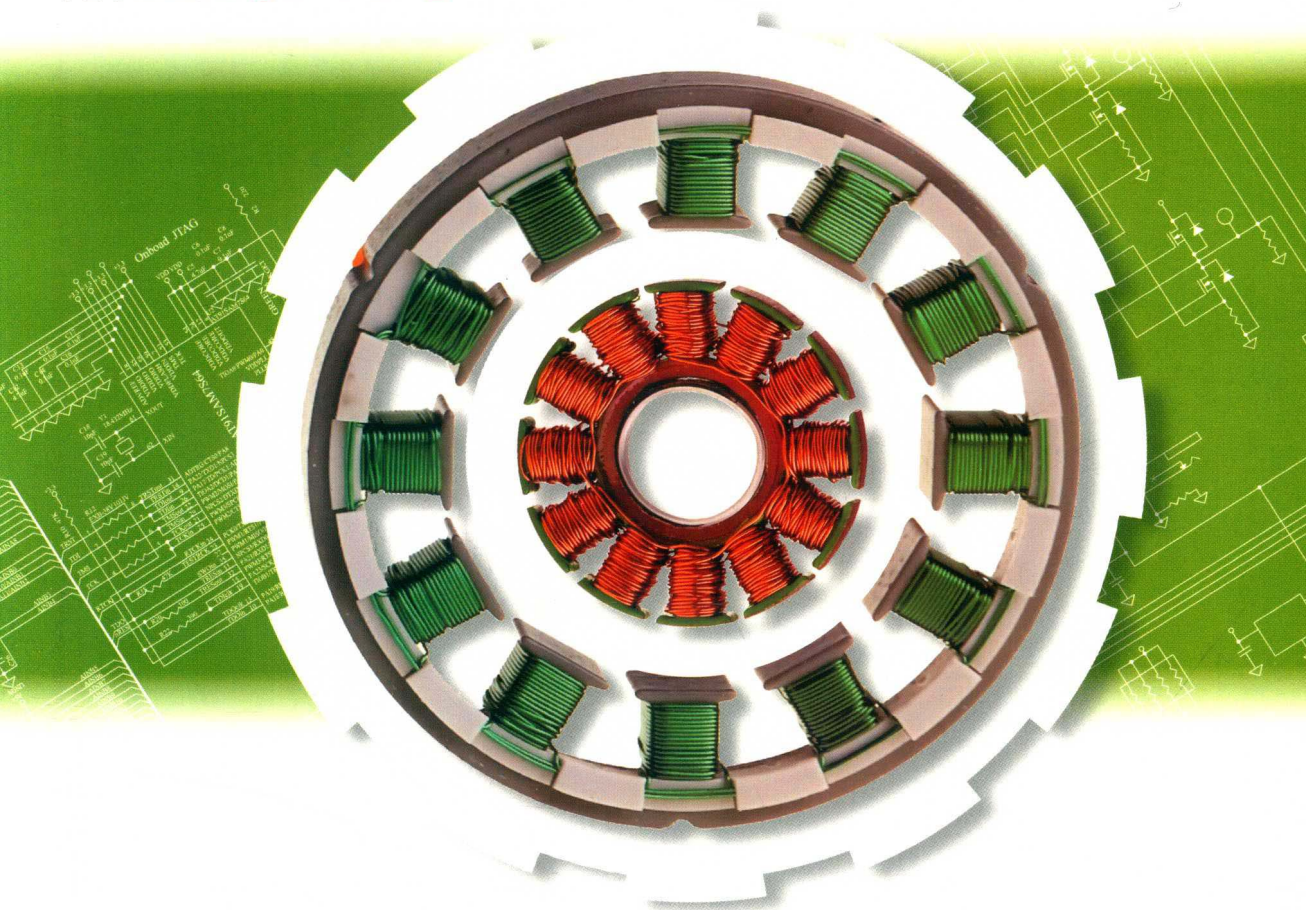


无传感器驱动 正弦波驱动 矢量控制编程



无刷直流电机 矢量控制技术

[日] 江崎雅康 著 查君芳 译



 科学出版社

无刷直流电机矢量控制技术

[日] 江崎雅康 著

查君芳 译

科学出版社

北京

图字：01-2018-4468号

内 容 简 介

本书以无刷直流电机为研究对象，从电机是如何旋转的入手，在介绍有刷直流电机的基础上，深入浅出地讲解无刷直流电机矢量控制技术。

全书分为2个部分，共9章：电机技术成了战略技术，有刷直流电机的工作原理和特征、驱动电路，无刷直流电机的特征和工作原理，无刷直流电机驱动方式的进化，无刷直流电机矢量控制理论，无刷直流电机矢量控制实际，无刷直流电机矢量控制编程，无刷直流电机矢量控制开发平台，定位伺服控制板的开发和机器人应用。

本书可用于本科、高职高专院校的电机、电子、自动化相关专业的教学，也可作为工业控制、自动化控制等行业技术人员的参考书。

ブラシレスDCモータのベクトル制御技術/ Burashiresu DC Mota no Bekutoru-Seigyo Gijutsu

Copyright ©2013/2018 by Masayasu Esaki, Susumu Koshihara, Nobuyuki Ishigooka, Hajime Sakamoto

All rights reserved.

Originally published in Japan by CQ Publishing Co., Ltd., Tokyo.

Chinese (in simplified character only) translation rights arranged with CQ Publishing Co., Ltd., Japan.

图书在版编目(CIP)数据

无刷直流电机矢量控制技术/(日)江崎雅康著;查君芳译.—北京:科学出版社,2019.1

ISBN 978-7-03-059644-4

I.无… II.①江…②查… III.无刷电机-直流电机-矢量-控制 IV.TM345

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第263259号

责任编辑:喻永光 杨 凯/责任制作:魏 谨

责任印制:张克忠/封面设计:张 凌

北京东方科龙图文有限公司制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

天津市新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年1月第一版 开本:787×1092 1/16

2019年1月第一次印刷 印张:9 3/4

字数:180 000

定价:58.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前言

小学6年级的时候，笔者就在理科实验中体验过（直流）电机（本书特指电动机）的组装。制作了磁场、电枢，绕了漆包线，是正式的电子制作。漆包线缠绕方式不对，修理碳刷（换向器）的接触不良，好不容易运转时的感动至今仍记忆犹新。

拥有近200年历史的电机技术，可以称为古典技术，是非常质朴的存在。现在，电机持续改良，作为人们生活和生产的支撑，占据着重要地位。

围绕着核能发电的是非，舆论一分为二，节电成了一个大的社会性课题。在日本国内，总耗电量 $99.96 \times 10^{10} \text{kW} \cdot \text{h}$ 的57.3%来自电机（2005年统计），照明领域内已经致力于将白炽灯及日光灯替换成LED照明设备。显而易见，最有成效的节能，是电机的节电。

调高空调的设置温度，通过洒水及搭丝瓜遮阳棚、摇扇来抵御暑热的节电是很重要，但有限度。在不损失舒适感的情况下实现节电，是件多么惬意的事情！

现在，日本国内普遍使用的是感应电机，如果替换成无刷直流电机，可以期待实现10%~50%的效率改善。

在家庭中，空调和冰箱的耗电量占据很大比例。现在，无刷直流电机的应用正以空调、冰箱、滚筒式洗衣机为中心快速发展。另外，EV（电动汽车）及混合动力车采用的也是无刷直流电机。

本书从电机是如何旋转的，到无刷直流电机矢量控制技术，都将进行深入浅出的讲解。

新型PC（个人计算机）能够在时钟秒针刚好移动一格的1s内进行 5×10^7 次9位数的加减法、乘法。无刷直流电机的矢量控制就是应用了这种计算能力的控制方式。

本书虽是面向电气、电子技术领域的技术人员的，但也想让生在环境和能源问题时代的人们阅读。暂且不论矢量控制的难懂的公式，只要大家理解了无刷直流电机矢量控制技术的概要，也许对这个世界的看法就会发生改变。

在家电大卖场的冰箱展厅，就没有感到疑惑的事情吗？并排放着同样大小的冰箱，显示的年耗电量却相差2倍以上。冰箱的隔热及压缩机会不同，但最大的区别在于压缩机用的电机。

在日本国内，“变频空调”并不是什么新鲜词汇。20世纪80年代的变频空调采用的是感应电机（Induction Motor），而90年代变为无刷直流电机，变频控制技术发生了很大的变化。

人们选择室内空调的倾向性已经发生了变化，选择EV及混合动力车的标准也在提高，大家也许能从技术人员的角度去看这些东西。

本书的策划始于2009年7月，那时笔者见到了搭载矢量引擎的ARM Cortex-M3微控制器TMPM370。历时4年，多亏了厂商（东芝）相关负责人的协助及CQ出版社相关负责人的尽职，本书终得以出版。在这个过程中，笔者常常经受日常业务的冲击，CQ出版社的编辑不厌其烦，还一直在激励笔者，真是令人钦佩。在此一并表示感谢。

目 录

第 1 部分 基础篇

第 1 章 电机技术成了战略技术

——环境和能源问题备受关注的时代

- 1.1 有近 200 年历史的电机技术是支撑人们生活和生产的重要基础..... 002
- 1.2 总耗电量的 57.3% 来自电机——电机控制技术是节电的关键..... 002
- 1.3 无刷直流电机矢量控制技术的引入..... 003
- 1.4 从感应电机到无刷直流电机的矢量控制..... 005
- 1.5 本书的目的..... 005
- 1.6 无刷直流电机矢量控制技术的发展..... 007

第 2 章 有刷直流电机的工作原理和特征、驱动电路

——从常见的电机开始讲解

- 2.1 至今仍被经常使用的有刷直流电机..... 009
- 2.2 有刷直流电机的结构和旋转机理..... 010
- 2.3 有刷直流电机的工作原理和特征..... 011
- 2.4 有刷直流电机是发电机..... 013
- 2.5 电机的启动电流和额定电流..... 015
- 2.6 电机即发电机的应用——电机制动器..... 016
- 2.7 再生制动是应用于 EV 的重要技术..... 019
- 2.8 直流电机专用的 FET 全桥驱动器 IC VN3SP30-E..... 019
- 附录 步进电机的工作原理和特点..... 022

第 3 章 无刷直流电机的特征和工作原理

——节能、长寿命、高可靠性

- 3.1 长寿命、无噪声、无尘的无刷直流电机..... 025
- 3.2 高能效的无刷直流电机得以实现..... 026
- 3.3 无刷直流电机是电动汽车的战略技术支持..... 028
- 3.4 无刷直流电机的结构..... 028
- 3.5 无刷直流电机的驱动方式..... 031
- 3.6 无刷直流电机的驱动电路..... 031
- 3.7 无刷直流电机的无传感器、方波驱动和矢量控制..... 036
- 附录 交流感应电机的工作原理..... 038

| | | |
|-------|------------------------|-----|
| 第 4 章 | 无刷直流电机驱动方式的进化 | |
| | ——无传感器驱动、正弦波驱动 | |
| 4.1 | 采用无传感器驱动的理由 | 042 |
| 4.2 | 根据线圈感应电压进行无传感器驱动的原理 | 044 |
| 4.3 | 无传感器驱动 IC TB6588 | 046 |
| 4.4 | 正弦波驱动方式的优点 | 052 |
| 4.5 | 始动时采用方波驱动, 运转时过渡为正弦波驱动 | 055 |
| 第 5 章 | 无刷直流电机矢量控制理论 | |
| | ——让电机发挥最大转矩 | |
| 5.1 | 矢量控制技术的优点 | 058 |
| 5.2 | 矢量控制的概念和控制方式、基本控制流程 | 059 |
| 5.3 | 矢量控制的电流检测方式 | 061 |
| 5.4 | 矢量控制的坐标变换 | 068 |
| 5.5 | 多用于重视成本的家电产品的无传感器控制 | 070 |
| 5.6 | 速度控制、电流控制和坐标变换 | 072 |

第 2 部分 应用篇

| | | |
|-------|------------------------------|-----|
| 第 6 章 | 无刷直流电机矢量控制实际 | |
| | ——矢量控制问题与内置矢量引擎的微控制器 TMPM370 | |
| 6.1 | 矢量控制技术用于家电产品的时代 | 076 |
| 6.2 | 矢量引擎电机控制器的规格 | 078 |
| 第 7 章 | 无刷直流电机矢量控制编程 | |
| | ——了解内置矢量引擎的微控制器 TMPM370 | |
| 7.1 | 矢量控制的软件开发环境和无刷直流电机控制流程 | 087 |
| 7.2 | 矢量控制软件由应用程序、电机控制、电机驱动三阶段构成 | 090 |
| 7.3 | 三阶段间的接口是命令和信息 | 091 |
| 7.4 | 应用程序函数、电机控制函数、电机驱动函数 | 093 |
| 7.5 | 矢量控制软件的详细数据 | 102 |
| 第 8 章 | 无刷直流电机矢量控制开发平台 | |
| | ——使用内置矢量引擎的微控制器 TMPM370 | |
| 8.1 | 概 述 | 115 |
| 8.2 | 微控制器外围电路的设计 | 122 |
| 8.3 | 无刷直流电机的驱动电路和电源电路设计 | 125 |

| | | |
|-------------------------------|---------------------------------|------------|
| 8.4 | 无刷直流电机的选型及特性 | 127 |
| 8.5 | 动作参数的修改和具备记录功能的 GUI 程序的开发 | 131 |
| 第 9 章 定位伺服控制板的开发和机器人应用 | | |
| ——使用 TPM370 驱动双足步行机器人 | | |
| 9.1 | 轻量、小型、强力的定位伺服控制板 | 134 |
| 9.2 | 定位伺服控制板的设计 | 138 |
| 9.3 | 定位控制程序的流程图 | 140 |
| 笔者介绍 | | 146 |

第 1 部分

基础篇



第 1 章 电机技术成了战略技术

——环境和能源问题备受关注的时代

〔日〕江崎雅康

1.1 有近 200 年历史的电机技术是支撑人们生活和生产的重要基础

电机的原型发明于19世纪前半叶。1821年，迈克尔·法拉第（Michael Faraday，英国）发明了最初的电机——法拉第电机（Faraday Motors）。

实用型换向器式直流电机是英国科学家William Sturgeon在1832年发明的。接着，美国的托马斯·达文波特开发了可商用的换向器式直流电机，并在1837年获得了专利权。

拥有近200年历史的电机技术，与只有40余年历史的微控制器技术及新近的互联网技术相比，可以称得上是古典技术。计算机及网络相关的技术取得快速进步而受到关注，电机技术就显得不太引人注意了。

但是，电机技术至今仍在不断改良，作为支撑人们生活和生产的重要技术，占据着重要地位。

1.2 总耗电量的 57.3% 来自电机——电机控制技术是节电的关键

围绕核能发电的是非，舆论一分为二，节电成了一项大的社会性问题。图1.1为按照用电设备统计的耗电量。虽然有点旧，但笔者觉得现在并没有太大变化，所以就刊登出来了。电机耗电量占日本国内总耗电量 $99.96 \times 10^{10} \text{kW} \cdot \text{h}$ 的57.3%。

图1.2是按领域统计的日本国内的耗电量情况。其中，电机耗电量的占比如下。

| | | |
|--------|---|-------|
| · 工业领域 | $29.49 \times 10^{10} \text{kW} \cdot \text{h}$ | 69.0% |
| · 商业领域 | $16.43 \times 10^{10} \text{kW} \cdot \text{h}$ | 56.6% |
| · 家庭领域 | $11.40 \times 10^{10} \text{kW} \cdot \text{h}$ | 40.4% |

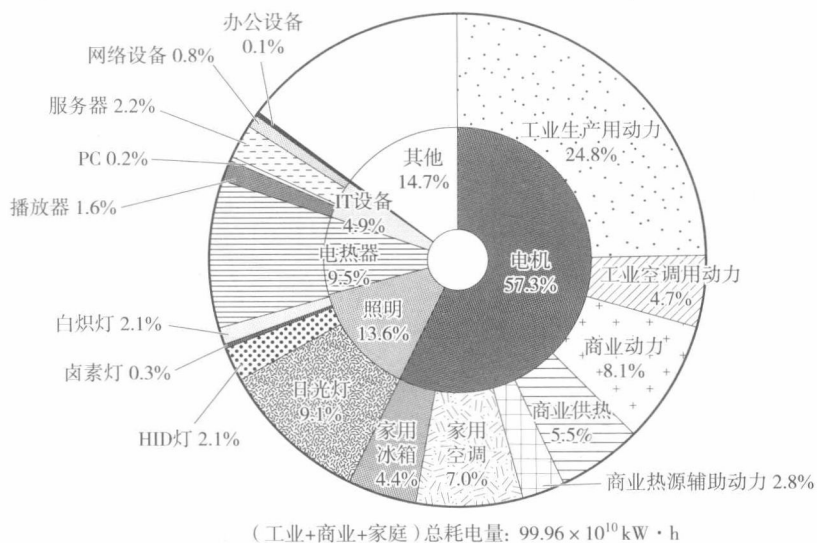


图 1.1 日本国内耗电量的统计 (2005年) [1]

照明领域已经致力于将白炽灯和日光灯替换成LED。但是，最有成效的节能，是电机的节电，这一点很明确。

调高空调的设置温度，通过洒水及搭丝瓜遮阳棚、摇扇来抵御暑热，对节电很重要，但是有限度。通过提高电机效率来节电成了技术人员的课题。

1.3 无刷直流电机矢量控制技术的引入

如图1.2(c)所示，在家庭领域，空调、冰箱的耗电量占比很大。1990年以前，空调、冰箱、洗衣机、吸尘器等家用电器使用的基本上都是感应电机。

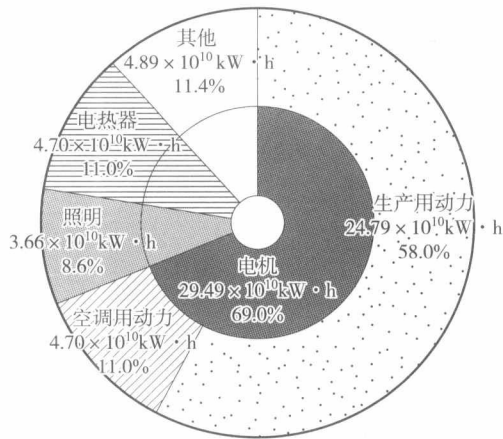
但是1990年以后，以空调、冰箱、滚筒式洗衣机为中心，无刷直流电机的矢量控制技术得到了快速引入。

在日本国内，“变频空调”并不是什么新鲜词汇。20世纪80年代的变频空调采用的是感应电机，90年代以后采用的是无刷直流电机，变频控制技术发生了很大的变化。

在家电大卖场的冰箱展厅，就没有感到疑惑的事情吗？并排放着同样大小的冰箱，显示的年耗电量却相差2倍以上。冰箱的隔热及压缩机会不同，但最大的区别在于压缩机电机的效率。

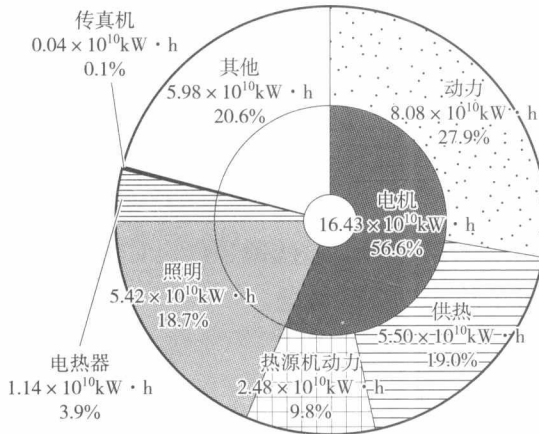
图1.3是笔者写作本书时在家电大卖场发现的电风扇新品。打出“耗电量约1/3”这么大胆的广告语，也是因为采用无刷直流电机代替了以前的感应电机。

现在，无刷直流电机仅用于空调、冰箱、滚筒式洗衣机等较贵的家电产品。这是



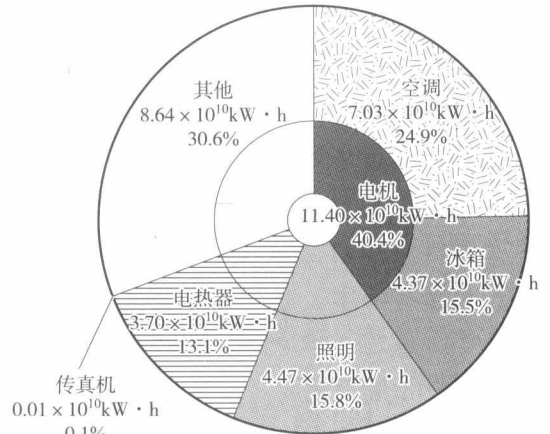
耗电量合计: $42.73 \times 10^{10} \text{ kW} \cdot \text{h}$

(a) 工业领域



耗电量合计: $29.01 \times 10^{10} \text{ kW} \cdot \text{h}$

(b) 商业领域



耗电量合计: $28.22 \times 10^{10} \text{ kW} \cdot \text{h}$

(c) 家庭领域

图 1.2 按领域统计的日本国内耗电量明细^[1]



图 1.3 采用无刷直流电机的电风扇

因为，与以前的感应电机相比，无刷直流电机的价格较高。今后，随着节电意识的增强，电机成本下降，可想而知，从电风扇到榨汁机、洗衣机、吸尘器等商品，也会采用无刷直流电机。

1.4 从感应电机到无刷直流电机的矢量控制

什么变了？首先是从感应电机到无刷直流电机的变化。无刷直流电机也称为BL直流电机（Brushless Direct Current Motor）。以前的有刷直流电机的碳刷没有了，就变成了无刷直流电机。

起初一般都是方波驱动。之后，为了抑制振动，采用正弦波驱动；为了进行位置检测，采用无霍尔元件的无传感器驱动。现在，又出现了将流入线圈的电流最大限度地转化为转矩的矢量控制技术。

对于无刷直流电机，有时也会被称为PMSM（Permanent Magnetic Synchronous Motor，永磁同步电机），现在不妨看成是同一个东西。本书中统称为无刷直流电机。

1.5 本书的目的

本书的目的是简要讲解无刷直流电机的矢量控制。如第2章，在讲述图1.4所示的插秧后除草的稻鸭机器人时，详细说明了有刷直流电机的工作原理。



图 1.4 稻鸭机器人（日本岐阜县情报技术研究所）
通过强力的履带动作进行插秧后的除草

第3章对方波驱动无刷直流电机的结构进行了说明。无刷直流电机将配合转子旋转切换电流的碳刷换成了晶体管、FET等电子开关器件，特征是寿命长、噪声小及灰尘少。

第4章，在探讨无刷直流电机的技术进步之后，对正弦波驱动、无传感器驱动等技术进行讲解。与以前的方波驱动相比，正弦波驱动具有转动平滑且振动及噪声小的特点。无传感器驱动是取消检测转子位置的霍尔元件，通过线圈产生的感应电动势检测转子位置的一项技术。

第5章对无刷直流电机的矢量控制技术的基础进行了讲解。

第6章、第7章介绍搭载了矢量引擎的微控制器TMPM370，从硬件和软件两方面具体讲解矢量控制的实际。

第8章介绍使用了搭载矢量引擎的ARM Cortex-M3微控制器TMPM370的无刷直流电机矢量控制开发平台。无刷直流电机矢量控制是充分利用32位微控制器的处理能力的高级控制技术。

使用TMPM370后，开发会变得比较容易，但并不是毫无开发经验的技术人员在一个月能掌握的技术。矢量控制开发平台是辅助开发第一阶段的主要工具。

第9章介绍定位伺服控制板的设计案例。该伺服控制板采用TMPM370，可控制200~500W的电机。将图1.5所示的伺服控制板装到图1.6所示的机器人上，进行评估实验。

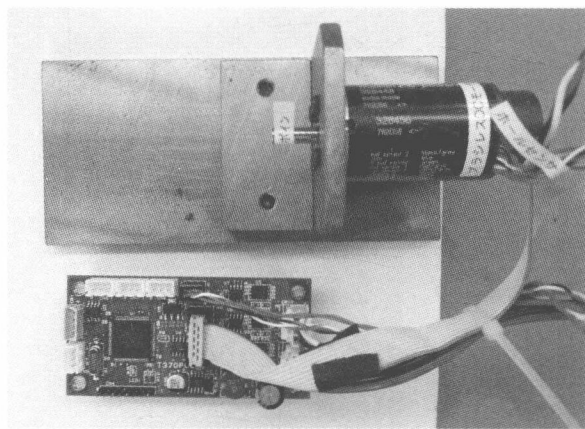


图 1.5 制作的定位伺服控制板 T370POS

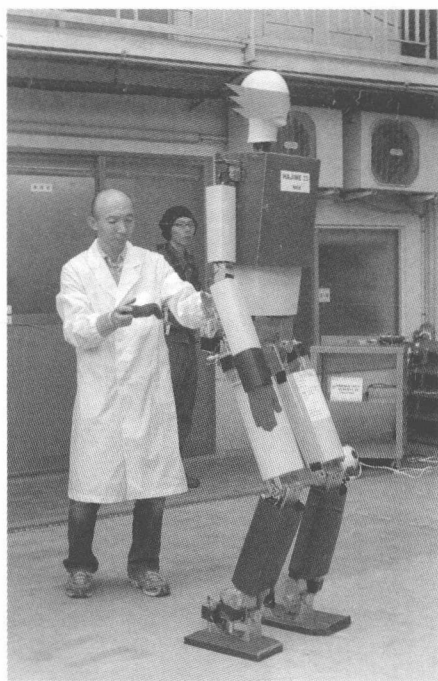


图 1.6 实际安装 T370POS: 高2m的HAJIME 机器人 33号

1.6 无刷直流电机矢量控制技术的发展

以前汽车上就用了很多电机。进入EV时代后，电机将替代发动机，成为重要的基础技术。电机功率左右着EV的能耗和续航里程，强启动转矩、无振动的电机驱动是EV的性能竞争关键技术。

东京地铁银座线，搭载了PMSM的车辆于2007年9月投入运营，后来人们对运营线路的行驶数据进行了采集。与以前的感应电机相比，结果是：

- 耗电量减小：6.8%
- 噪声的改善（65km/h）：86.7dB（感应电机）→85.0dB（PMSM）

效果得到了确认^[2]。今后，轨道交通运输设施也将引入无刷直流电机，这是值得期待的。

图1.2（a）所示工业领域的电机耗电量为69.0%，占了很大比例。图1.7、图1.8引用了日本经济产业省的资料，三相感应电机及单相感应电机的日本国内出货数据统计（2008年）如下：

- 台数：1128万（92%）
- 容量：22 767MW（92%）

其中，仅三相感应电机的耗电量就达到了日本工业领域耗电量的75%，约占总耗电量的55%。这么多的电能被用于泵、风机、压缩机等多种用途。

因为还存在技术上的问题、设备成本的问题，所以不能武断地下结论说“将这样的感应电机替换成无刷直流电机可以节电××%”。但是，考虑到全世界的环境和能源问题，从中长期来看，替换成高效率电机是时代趋势。

工业自动化用机器人，空调、冰箱、滚筒式洗衣机等家电产品，以及EV动力

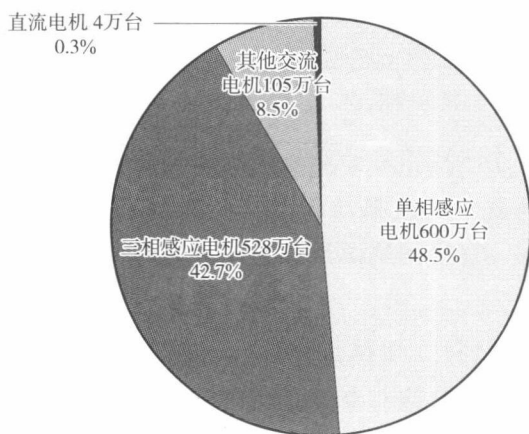


图 1.7 日本国内的三相感应电机现状——出货数量^[3]

来源：日本经济产业省生产动态统计（2008年）

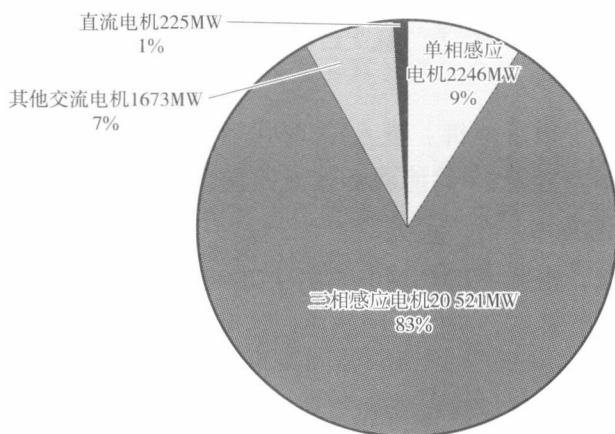


图 1.8 日本国内三相感应电机的现状——出货容量^[3]

来源：日本经济产业省生产动态统计（2008年）

源，已经开始采用无刷直流电机矢量控制技术——今后甚至会发展到所有领域。笔者是这么认为的。

电机技术已成为支撑人们生活和生产的战略技术。希望本书对大家理解最新的电机控制技术有所帮助。

参考文献

- [1] (財)新機能素子研究開発協会. 電力使用機器の消費電力量に関する現状と近未来の動向調査. 2009.
- [2] 東京メトロ銀座線車両向け PMSM 主回路システム. 東芝レビュー. 2008, 63 (6).
- [3] 経済産業省総合資源エネルギー調査会省エネルギー基準部会三相誘導電動機判断基準小委員会 (第 1 回). 三相誘導電動機の現状について. 2011.

第2章 有刷直流电机的工作原理和特征、驱动电路

——从常见的电机开始讲解

〔日〕江崎雅康

在开始无刷直流电机的讲解之前，让我们先来理解一下有刷直流电机的结构。为了切换电流的方向，有刷直流电机中设有机械接点。从塑料模型到稻鸭机器人，有刷直流电机的应用十分常见。

2.1 至今仍被经常使用的有刷直流电机

我们身边的产品中使用了各种各样的电机，其中最常见的是图2.1所示的有刷（换向器）直流电机。它历史悠久，可以说是电机的鼻祖。

有刷直流电机的结构简单，价格便宜，能产生强大的转矩（旋转力）。但是，因为有碳刷（换向器）这样的机械接点，所以存在寿命短、产生噪声及灰尘的缺点。

有刷直流电机常用于塑料模型赛车、迷你四驱车（田宫）等玩具，也

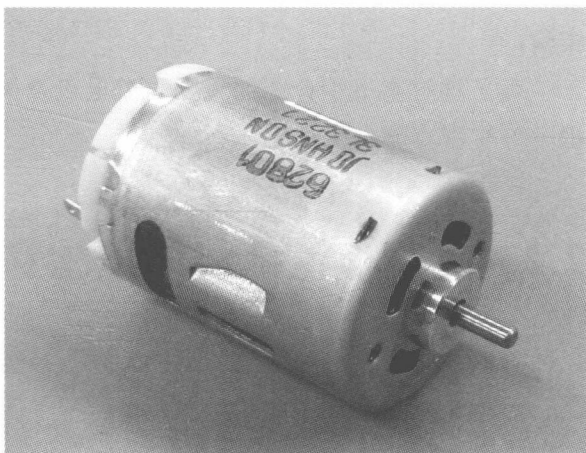


图 2.1 工业用有刷直流电机（20W）

用于电动牙刷、电动剃须刀及手机振动器等，是现在常用的电机。

介绍一个异类。图2.2是日本经济产业省委托事业开发的稻鸭机器人试制机。这个机器人可以起到稻鸭的作用，代替农药去除稻田里的杂草，减少化学肥料的使用。它也使用了2个250W的强力有刷直流电机。

仅用搭载的电池，稻鸭机器人就可以持续运行2h，完成1000m²稻田的除草（抑草）作业。稻鸭机器人在插秧后的稻田里到处活动，通过下述动作实现除草。

- ① 利用履带将水弄混浊，使太阳光线无法到达水底，从而抑制杂草的生长。
- ② 利用履带搅拌水底的泥，使在水底萌芽的杂草上浮，阻止它生长。