

An illustration in shades of orange and red depicting various industrial and mechanical components. It includes gears of different sizes, a factory building with smokestacks, a crane, a hand holding a pen, a Wi-Fi symbol, and various geometric shapes and lines, all interconnected to represent a complex industrial system.

工业运动控制

电机选择、驱动器和控制器应用

Industrial Motion Control

Motor Selection, Drives, Controller Tuning, Applications

[美] 哈肯·基洛卡 (Hakan Gürocak) 著
尹泉 王庆义 等译



机械工业出版社
China Machine Press

工业控制
与智能制造
丛书

工业运动控制

电机选择、驱动器和控制器应用

Industrial Motion Control
Motor Selection, Drives, Controller Tuning, Applications

[美] 哈肯·基洛卡 (Hakan Göroçak) 著
尹泉 王庆义 等译

常州大学图书馆
藏书章

图书在版编目 (CIP) 数据

工业运动控制: 电机选择、驱动器和控制器应用 / (美) 哈肯·基洛卡 (Hakan Gürocak) 著; 尹泉等译. —北京: 机械工业出版社, 2018.6

(工业控制与智能制造丛书)

书名原文: Industrial Motion Control: Motor Selection, Drives, Controller Tuning, Applications

ISBN 978-7-111-60339-9

I. 工… II. ①哈… ②尹… III. 工业控制系统—运动控制 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 141356 号

本书版权登记号: 图字 01-2016-8656

Copyright © 2016, John Wiley & Sons. Ltd.

All rights reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Industrial Motion Control: Motor Selection, Drives, Controller Tuning, Applications, ISBN 978-1-118-35081-2, by Hakan Gürocak, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由约翰·威立父子公司授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书内容。

本书封底贴有 Wiley 防伪标签, 无标签者不得销售。

工业运动控制: 电机选择、驱动器和控制器应用

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 张梦玲

责任校对: 殷虹

印刷: 北京文昌阁彩色印刷有限责任公司

版次: 2018 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 186mm × 240mm 1/16

印张: 15.25

书号: ISBN 978-7-111-60339-9

定价: 69.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzit@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

The Translator's Words | 译者序

随着工业 4.0 的提出以及国家相应政策的出台，以智能制造为主导的第四次工业革命已经渐行渐近。同时人工智能（AI）的飞速发展进一步推动了工业控制的自动化、智能化及应用普及。工业运动控制作为工业控制中一个重要分支，在国民经济中占有重要地位。如何根据实际应用需求，利用相关的原理，结合控制、检测、动力学、电路仿真及设计、机械设计及编程等多学科知识，去解决实际应用中的问题，是一个复杂的命题。如何将这个复杂命题分解，变成单个的模块化知识点，正是作者编写本书的目的。

本书最为突出的特点是将理论和实践紧密结合，通过大量的工程实例进行相关的理论分析和计算，为工业运动控制的设计与应用提供了翔实的资料。更为可贵的是将产品资料选择思想和设计过程步骤相结合，通过对实例的简单扩展，就可以进行一个新对象的工业运动控制设计。因此本书作为教学参考书，可以为机械和电气相关专业高年级本科生、研究生提供翔实的工程应用背景和工程应用规范；同时本书也是一本优秀的工程技术图书，工程技术人员通过对理论知识的学习并结合自身的工程实践，可以进一步提高工程设计水平，做到“知其然，知其所以然”。

本书由华中科技大学自动化学院的尹泉、中国地质大学（武汉）自动化学院的王庆义主持翻译。华中科技大学自动化学院的周永鹏教授对全书翻译给出了许多有建设性的意见。在本书初稿的翻译和后续校对过程中，研究生王雪芬、唐志伟、伍嘉伟、尹家俊、曹炳、李海春等同学也参与了部分相关的工作，在此一并表示衷心的感谢。

由于译者的水平有限，译文中难免存在错漏和不足之处，恳请广大读者予以批评指正。

译者

前言 | Preface

在过去的几十年里，学术界在机电一体化和控制的基础教育资料以及实验训练方面已经取得了显著的进步。学生可以学习了解数学控制理论、板级电子器件、接口和微处理器，并辅以教学实验设备。当新的机械工程和电气工程的毕业生成为工程师时，他们所从事的工程项目要求他们必须掌握工业运动控制技术，因为工业自动化的设计主要就是设计专门的运动控制硬件和软件。

本书介绍的是工业运动控制，它是在工业领域广泛应用的技术，也几乎是所有自动化机械和过程的核心。工业运动控制应用采用专门的装备，并且要求设计和集成系统，而控制只是系统的一部分。为了设计这样的系统，工程师需要熟知工业运动控制产品；能够将控制理论、运动学、动力学、电子学、仿真、编程和机械设计融合到一起；运用跨学科的知识处理实际应用问题。这些知识在一般的本科课程中均有涉及，但是在各自学科的场所下，学生则很难把握这些知识的联系。

我写这本书的初衷是将理论、工业机械设计范例、工业运动控制产品和实用指南融合在一起。工业运动控制应用的场景可以跨越边界将不同的学科主题紧密地联系起来。这本书的内容来源于本人的本科机电一体化课程和自动化课程的教学经验，以及与运行控制行业工程师的交流讨论。例如，即使有多种类型的电机[⊖]可供选择，我也选择以运动控制行业中输入为三相的交流伺服电机和感应电机作为关注点。本书对控制理论、电机设计和电力电子进行阐述，并将理论和实践平衡地综合在一起。书中的很多素材来源于厂商的数据手册、用户指南、产品目录，各种大学课程、网站、行业杂志的节选，以及实践工程师的经验。本书将这些素材连贯地呈现出来，在提供给学生基本知识的同时以实际应用中已解决的案例作为补充。

第1章介绍典型运动控制系统组成部分，主要内容是系统框图和各组成部分基本功能的介绍。

⊖ motor 一词原为电动机，出于工程习惯表述，本书用电机一词表示电动机。本书中的电机均指电动机。——译者注

第2章探讨一台机器的轴移动时运动曲线产生的机理。接着，概述基本运动学，阐述两种常见的运动曲线，并在最后介绍多轴协调的两种方法。

鉴于各轴和整体机器的机械设计是完成运动目标的重要因素，第3章重点阐述传动系统设计，介绍惯量折算、转矩折算和惯量比的概念，深入研究五种类型的传动装置，给出这些装置中电机的转矩-速度曲线（机械特性曲线）、齿轮箱、不同类型电机和传动机构的选择过程。

电机是目前工业运动控制中最常用的执行器。第4章以电气周期、机械周期、极对数以及三相绕组这些基础概念开始，介绍交流伺服电机和感应电机的结构和操作细节，比较了正弦换相法和六步换相法的交流伺服电机转矩性能。该章最后阐述这两种类型电机的数学模型和仿真模型。

运动控制系统中除了运动控制器以外还使用了各式各样的传感器和控制元件。第5章介绍各种用于位置测量的光学编码器、限位开关、接近传感器、光电传感器和超声波传感器，解释了传感器到I/O卡兼容性的扇入和扇出设计，展示了包括按钮、选择开关和指示灯等控制器件。该章的最后概括了电机启动器、接触器、过载继电器、软启动器和一种三线电机控制电路。

驱动器是电机和控制器之间的连接纽带。它将控制器产生的小信号放大到足以驱动电机工作的高功率的电压等级和电流等级。第6章首先介绍驱动器电子器件模块，介绍常用的脉冲宽度调制（PWM）控制技术，然后介绍应用于驱动器中基础的闭环控制结构，并深入研究单环PID位置控制和带前馈的级联的速度环与位置环，给出了控制器的数学模型和仿真模型。实现控制算法时需要调整增益，使得伺服系统每个轴尽量跟随指令轨迹。该章最后描述了前述控制算法的增益调整过程，包括一些积分器限幅的使用方法。

本书以第7章结尾，主要内容是编程和运动控制应用，研究运动控制器的直线运动模式、圆弧运动模式和轮廓移动模式。接着，介绍通用运动控制器项目中基础的可编程逻辑控制器（PLC）算法。该章结尾回顾了运动控制器通过实时计算机器的正向和逆向运动来控制一台非直角坐标的机器，比如控制一台机器人。

写这本书的挑战之一在于，市场中运动控制器硬件和软件种类繁多而且具有专用性。每一个控制器制造商在其产品中都有自己的编程语言和编程环境。因为每一款硬件都有特定的编程细节，所以我试图给出算法的大纲，而不是提供由一种特定编程语言或结构编写的完整程序。将这些算法运用到每款具体的运动控制器中需要仔细参考用户手册和制造商建议。写这本书的另一个挑战则是数字控制系统在控制器中的实现。这些采样数据系统建立在 Z 变换（ z 域）的基础上，然而几乎所有的本科生工科类课程只包含利用拉普拉斯变换（ s 域）建立的连续时间系统。因此，我选择在 s 域中建立系统控制模型。这种方法提供了一个很好的近似，因为当前的控制器采样频率很高，而它们控制的机械系统具有相对较

缓慢的动力特性。

在陈述概念的同时，尤其是面对已解决的传动系统案例时，援引了工业产品数据手册和表格中的数据。现在，每一章中的数据资料通过章尾的参考文献在网络上可以找到。随着时间的推移，制造商会更新它们的产品并且这些目录将不再适用。然而，相应的理论和实际的选择过程同样适用于类似的新产品。

本书的目的是向机械工程和电气工程的大学生介绍工业运动控制。因为许多工程师从事于运动控制系统行业，所以本书对于该行业的系统设计工程师、项目经理、工业工程师、制造工程师、产品经理、安装工程师、机械工程师、电气工程师以及程序员是一本重要的参考书。例如，第4章中的增益调整过程利用数学仿真来展示。不过如果有一个带有运动控制器的实际系统，这些步骤可以直接用于调整实际系统的参数而不需要任何仿真。同样地，第7章给出了运动控制应用常用类型（如卷绕）的算法。这些算法可以作为实际系统编程语言的起点去继续完成整个控制项目。前面已经提到，将这些算法运用到某种实际的运动控制系统硬件时，需要仔细参考产品手册和制造商的建议。

在撰写这本书的过程中，衷心感谢那些帮助过我的人。感谢 Applied Motion Systems 公司总裁 Ken Brown 先生、Concept Systems 公司总裁 Ed Diehl 先生，许多想法来自于同他们的讨论。特别感谢 Delta Tau Data Systems 公司总裁 Dimitri 先生、负责工程研究的副总裁 Curtis Wilson 先生，感谢他们为实验室和本书的撰写提供深入的技术指导。感谢机械工程师 Dean Ehnes 先生、电气工程师 John Tollefson 先生、Columbia/Okura 的有限责任公司总经理 Brian Hutton 先生，感谢他们对材料处理系统、电机和实例问题提出了有见解的观点。非常感谢我的同事——从事电气工程的梁晓东博士，感谢他提供了电机和电机驱动器章节的详细综述。感谢我以前的学生 Ben Spence 先生，他目前在 Applied Motion Systems 公司担任系统工程师，我们长期在实验室一起工作，一起讨论许多关于运动控制的技术问题，使我受益匪浅。感谢 Applied Motion Systems 公司机械工程师 Matthew Bailie 先生，感谢他对电机尺寸工序给予的指导以及提供的对于实例问题的想法。非常感谢为这本书提供产品图片的各家公司。感谢 John Wiley & Sons 出版社的资深编辑 Paul Petralia 先生和 Wiley 的 Sadra Grayson、Cliv Lawson 和 Siva Raman Krishnamoorthy，感谢他们对整本书的指导。在过去的几年教学生涯里，我很荣幸与许多优秀的学生一起来学习这些材料，真的很感谢他们有价值的反馈和建议，以及他们的热情和耐心。

在这个过程中，我发现写一本教科书是一项艰巨的工作。衷心感谢我的妻子，在过去的3年里，感谢她不断地鼓励我、支持我，使得我顺利地完成了这本书的撰写。

Hakan Girocak
Vancouver, Washington, USA

Contents 目录

参考文献	3
第4章 电机	1.8
4.1 基本概念	1.8
4.1.1 电气周期与机械周期	1.8
4.1.2 三相绕组	1.8
4.2 旋转磁场	1.8
4.2.1 霍尔传感器	1.8
4.2.2 六步换相法	1.8
交流伺服电机	1.8
4.3 转子	1.8
4.4 定子	1.8
译者序	
前言	
第1章 绪论	1
1.1 运动控制系统的组成	3
1.1.1 人机接口	3
1.1.2 运动控制器	4
1.1.3 驱动器	5
1.1.4 执行器	5
1.1.5 传动机构	6
1.1.6 反馈	7
参考文献	7
第2章 运动曲线	9
2.1 运动学基本概念	10
2.2 常见运动曲线	12
2.2.1 梯形速度曲线	12
2.2.2 S形速度曲线	16
2.3 多轴运动	21
2.3.1 摆转运动	21
2.3.2 插补运动	22
习题	22
参考文献	25

第3章 传动链设计	27
3.1 惯量和转矩折算	29
3.1.1 齿轮箱比	29
3.1.2 惯量折算	30
3.1.3 转矩折算	31
3.1.4 效率	31
3.1.5 总惯量	32
3.2 惯量比	33
3.3 传动机构	34
3.3.1 传动机构的转矩和惯量折算	34
3.3.2 带轮	35
3.3.3 丝杠	37
3.3.4 齿轮齿条传动	40
3.3.5 直线运动中的带传动	41
3.3.6 传送带	42
3.4 运动转矩的计算	44
3.4.1 加速(最大)转矩	44
3.4.2 运行转矩	45
3.4.3 减速转矩	45
3.4.4 连续(有效值)转矩	45
3.5 电机的机械特性	48
3.5.1 交流伺服电机的机械特性曲线	48
3.5.2 交流感应电机的机械特性曲线	49
3.6 电机选择	51
3.7 直接驱动电机选择	52
3.8 电机与传动机构选择	53
3.9 齿轮箱	55
3.9.1 行星伺服减速器	55
3.9.2 蜗轮减速器	56
3.10 伺服电机和齿轮减速器选择	58
3.11 交流感应电机和齿轮箱选择	67
3.12 电机、齿轮箱和传动机构选择	72
习题	75

参考文献	79
第4章 电机	81
4.1 基本概念	82
4.1.1 电气周期与机械周期	83
4.1.2 三相绕组	84
4.2 旋转磁场	84
4.2.1 霍尔传感器	84
4.2.2 六步换相法	85
4.3 交流伺服电机	87
4.3.1 转子	87
4.3.2 定子	88
4.3.3 正弦波换相	91
4.3.4 正弦波换相的转矩计算	93
4.3.5 交流伺服电机的六步换相法	95
4.3.6 采用编码器和霍尔传感器的电机定相	95
4.4 交流感应电机	96
4.4.1 定子	96
4.4.2 转子	97
4.4.3 电机的运行	97
4.4.4 直接电网恒速运行	98
4.4.5 变频驱动器变速运行	99
4.5 数学模型	100
4.5.1 交流伺服电机模型	102
4.5.2 交流感应电机模型	106
习题	110
参考文献	111
第5章 传感器和控制器件	113
5.1 光电编码器	114
5.1.1 增量式编码器	114
5.1.2 正余弦编码器	116
5.1.3 绝对式编码器	118
5.1.4 编码器的串行通信	120

5.1.5	速度估算	122
5.2	检测传感器	124
5.2.1	限位开关	124
5.2.2	接近传感器	124
5.2.3	光电传感器	125
5.2.4	超声波传感器	126
5.2.5	扇入和扇出的概念	126
5.2.6	三线传感器	128
5.3	主令控制器件	129
5.3.1	按钮	129
5.3.2	选择开关	130
5.3.3	指示灯	130
5.4	交流感应电机的控制器件	130
	习题	132
	参考文献	133
第6章	交流驱动器	135
6.1	驱动器电路	136
6.1.1	整流器和直流环节	137
6.1.2	逆变器	138
6.2	基本控制结构	143
6.2.1	级联的速度环和位置环	143
6.2.2	单环 PID 位置控制	147
6.2.3	含有前馈控制的级联闭环	153
6.3	内环	158
6.3.1	交流感应电机的内环	160
6.3.2	交流伺服电机的内环	161
6.4	控制器的仿真模型	161
6.4.1	交流感应电机矢量控制的仿真模型	161
6.4.2	交流伺服电机矢量控制的仿真模型	165
6.5	参数整定	166
6.5.1	PI 控制器的参数整定	168
6.5.2	PID 位置控制器的参数整定	171

6.5.3 带前馈增益的级联速度/位置控制器的参数整定	177
习题	183
参考文献	186
第7章 运动控制器编程与应用	187
7.1 运动模式	188
7.1.1 直线运动	188
7.1.2 圆弧运动	188
7.1.3 轮廓运动	189
7.2 编程	190
7.2.1 运动程序	190
7.2.2 PLC 功能	191
7.3 单轴运动	193
7.3.1 点动	194
7.3.2 回零	194
7.4 多轴运动	195
7.4.1 多电机单轴驱动	196
7.4.2 两轴或多轴联动	196
7.4.3 主从同步随动	197
7.4.4 张力控制	210
7.4.5 运动学	214
习题	218
参考文献	221
附录 控制理论概述	223
单位换算表	231

对材料、品种、工... 回来... 中...

... 一个...

... 一个...

... 一个...

第1章 绪论

1.1 运动控制系统的组成

一个复杂的... 计算机来实现...

- (1) 人机接口
- (2) 运动控制
- (3) 驱动
- (4) 执行器
- (5) 反馈



图 1-1 运动控制系统的组成

... 1.1.1 人机接口

... 主... 中... 解... 解... 解...

运动控制广泛应用于包装、装配、纺织、造纸、印刷、食品加工、木制品、机械设备、电子设备和半导体制造等各类行业，它是自动化机械及过程的核心。运动控制涉及控制负载的机械运动。例如，喷墨打印机的负载是墨盒，它必须高速、高精度地在纸上来回移动。再如，纸张加工机的负载——母卷筒上的纸被安装到机器中进行处理，如压纹纸巾这样的负载卷出大卷筒之后再卷入小卷筒。

每个电机带动机器部件的一部分，跟随电机旋转的部分称为轴。以喷墨打印机为例，墨盒中用于滑动的机械部件和驱动它们的电机一起组成了机器的轴。另一个打印机的轴由所有的机械部件和电机组成，用于将纸送入打印机。再如纸张加工机，承载卷纸的芯轴、皮带轮、连接电机的皮带以及电机一起构成了一个轴。

一个典型的运动控制系统需要控制轴的位移、速度、转矩和加速度。多数情况下机器含多个轴，这些轴需要进行同步的位移/速度控制。例如，数控机床工作台上的 X 轴和 Y 轴需要协调控制，才能把工件切出一个圆角。精确控制和多轴协调复杂运动的能力使得工业机器设计变得可能，如图 1-1 所示。

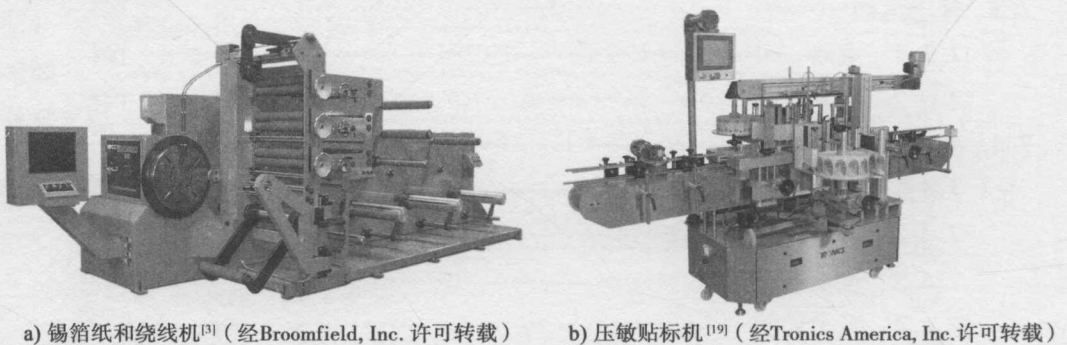


图 1-1 可精确控制多轴运动的复杂多轴机器

在可编程运动控制器出现之前，协调控制通过机械手段实现^[14]。动力轴连接到恒速运行的大电机或者引擎上。这个动力源可以用来驱动所有通过滑轮、传送带、齿轮、凸轮、连杆机构等耦合到动力轴上的机械轴（见图 1-2）。离合器和制动器用于启动或者停止各自的轴，动力轴和单个轴的齿轮比决定了各自轴的转速。驱动机构（多为长轴驱动）将协调运动传递到对应的机器部件。复杂的机器需要复杂的机械设计。长轴存在反冲、磨损、偏移的问题。最大的挑战是把产品变动引入生产系统中时需要改变齿轮减速器，然而这将带来高昂的成本和较长的开发周期。此外，驱动机构改变后重新调整机器到正确的位置是非常困难的。

随着电子器件、微处理器和数字信号处理器变得价格低廉且易于获取，计算机成为主流设备，机器上的多轴协调运动逐渐转换到计算机控制方式。在现代化的多轴机器中，每个轴都有独立的电机和电气驱动。现在用软件以电子齿轮的方式可以实现多轴协调。长轴驱动机构被电机和传动机构之间的刚性短轴和其他连接件代替。运动控制器运行程序并将产生的位置指令传给各轴的驱动器。在驱动器控制电机并闭合控制环路时，运动轨迹会实

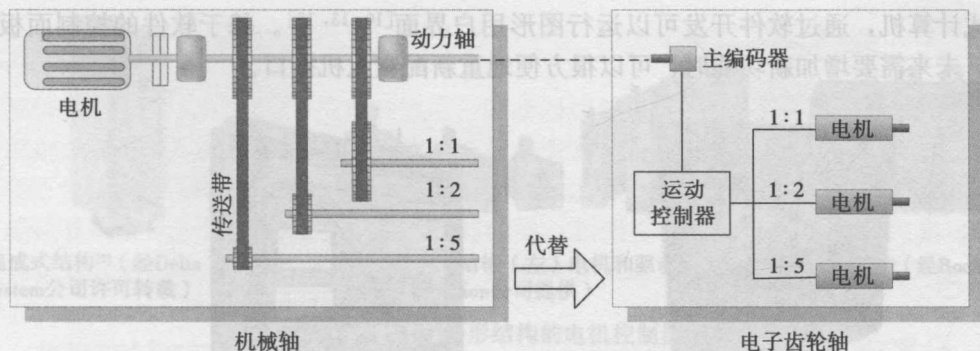


图 1-2 多轴协调

时更新。当前的典型代表技术是一个普通运动控制器同时协调控制多达 8 个轴。协调控制 60 多个轴的控制器现如今也是可以实现的。

1.1 运动控制系统的组成

一个复杂、高速、高精度的多轴协调运动控制是由一种被称为运动控制器的特殊计算机来实现的。如图 1-3 所示，一个完整的运动控制系统由以下几个部分组成：

- (1) 人机接口 (HMI)；
- (2) 运动控制器；
- (3) 驱动器；
- (4) 执行器；
- (5) 传动机构；
- (6) 反馈。

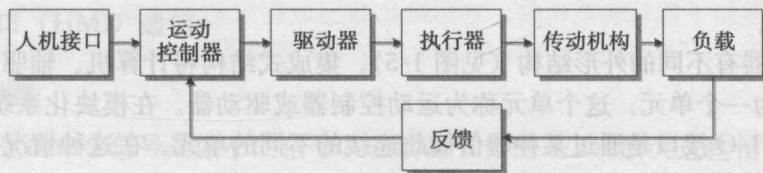


图 1-3 运动控制系统的组件

1.1.1 人机接口

人机接口用于和运动控制器进行通信。人机接口主要提供两个功能：①通过运动控制器，操作机器受控运行；②给运动控制器编程。

如图 1-4a 所示的控制面板是基于硬件的通用人机接口，用于操作机器，包括指示灯、按钮、指示器、数字量读取和模拟量测量仪。第 5 章将讨论操作界面设备，如指示灯、按钮和选择开关。控制面板也可以是基于软件的，如图 1-4b 所示，这种控制面板有触摸屏和

嵌入式计算机，通过软件开发可以运行图形用户界面^[10, 13, 15]。基于软件的控制面板优势在于，未来需要增加新功能时，可以很方便地重新配置人机接口。



图 1-4 人界接口（操作面板）用于操作机器

计算机接入运动控制器用于编程。由控制器制造商提供的定制软件可以用来编写、操作、下载和测试机器控制程序。这种软件还有测试电机、监控输入/输出 (I/O) 信号和调节控制器增益的功能。第 7 章将讲述运动、机器 I/O 管理和多轴协调的编程方法。

1.1.2 运动控制器

运动控制器是系统的“大脑”。它将运动曲线分配给各个轴，监控 I/O 并且闭合反馈回路。如第 2 章所述，基于用户或者编程者定义的设定运动参数，控制器生成一个轴的运动曲线。当机器在运行时，控制器接收每一个轴对应电机的反馈信息。当每个轴上的给定和实际位置或速度存在差异（跟随误差）时，控制器会对相应的轴发出校正命令。第 6 章将讨论各种作用于跟随误差的控制算法，用于产生减小误差的控制信号。正如第 7 章所讨论的，控制器也可以生成和管理复杂运动轮廓，包括电子凸轮、直线插值、圆弧插补、轮廓和主从协调。

运动控制器有不同的外形结构（见图 1-5）。集成式结构将计算机、轴驱动电路和机器 I/O 接口集成为一个单元。这个单元称为运动控制器或驱动器。在模块化系统中，计算机、驱动器和机器 I/O 接口是通过某种通信彼此连接的不同的单元。在这种情况下，只有计算机称为运动控制器。

一个完整的运动控制系统有如下单元。

1. 计算机

- 用户程序说明；
- 轨迹生成；
- 闭合伺服回路；
- 驱动器（放大器）的命令生成；
- 监控轴极限，安全互锁；
- 处理中断和错误，如过量的跟随（位置）误差。

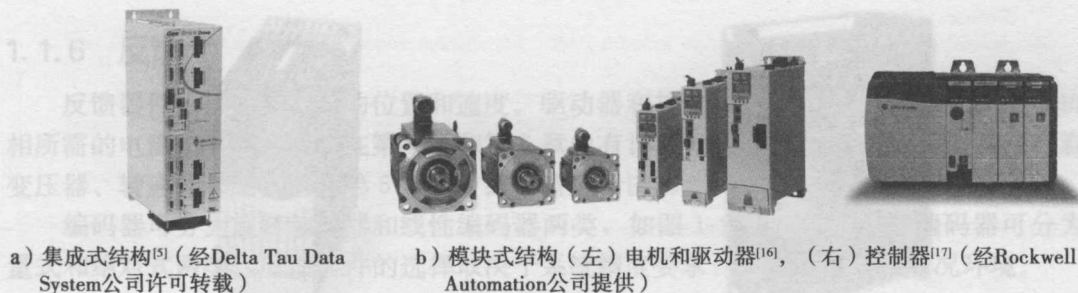


图 1-5 不同外形结构的电机控制器

2. 各轴的 I/O 接口

- 电机功率输出；
- 用于输出放大器命令的伺服 I/O 接口；
- 用于接收电机或其他外部传感器反馈信号的输入端子；
- 轴限制、归位信号和寄存。

3. 机器 I/O 接口

- 用于各类传感器，如操作按钮和接近传感器的数字信号输入端子；
- 用于驱动外部设备（通常通过继电器）的数字信号输出端子；
- 用于模拟信号传感器，诸如压力传感器、力敏传感器的模拟输入（通常是可选的）的端子；
- 用于驱动模拟设备的模拟输出（通常是可选的）的端子。

4. 通信

- 与其他外部设备、主机、平台监测系统进行网络通信，使用的协议包括 DeviceNet、Profibus、ControlNet、EtherNet/IP 或 EtherCAT；
- USB 或串行接口通信；
- 人机接口（HMI）通信。

1.1.3 驱动器

控制器产生的命令信号是微小的信号，驱动器（见图 1-6）放大这些信号至高功率的电压和电流以满足电机工作的需要。因此，驱动器也称为放大器。第 6 章将讨论驱动器闭环伺服系统的电流回路。因此，必须选择相应的驱动器匹配需要驱动的电机。

在最近的趋势中，驱动器和控制器之间的界线逐渐变得模糊，驱动器可以执行控制器的许多复杂功能。人们期望驱动器可以处理电机反馈，同时可以闭合电流环、速度环和位置环。

1.1.4 执行器

执行器是为驱动负载提供能量的装置。运动控制系统可以用液动技术、气动技术或者机电一体化技术来构建。本书使用的是三相交流伺服电机和感应电机（见图 1-7）。第 6 章将讲述电机的机电运行及其数学模型，研究了驱动器中各种电机的具体控制算法。在设计