



机工工控

工业自动化

技术丛书

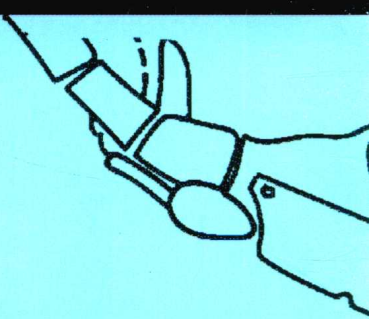
SOFTWARE PRINCIPLE OF MOTION

CONTROL SYSTEM AND ITS STANDARD
FUNCTION BLOCK APPLICATION



运动控制系统软件原理 及其标准功能块应用

彭瑜 何衍庆◎编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

工业自动化 技术丛书

SOFTWARE PRINCIPLE OF MOTION

CONTROL SYSTEM AND ITS STANDARD
FUNCTION BLOCK APPLICATION

运动控制系统软件原理 及其标准功能块应用

彭瑜 何衍庆◎编著

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书针对智能制造对运动控制软件功能的基本要求,全面论述其基础技术和知识,重点讲述 PLCopen 国际组织制定的运动控制软件功能规范的概念、原理和功能块。

全书共 8 章。第 1 章是运动控制系统的组成和 PLC 在智能制造中的定位。第 2 章是运动控制的理论基础。第 3 章论述 PLCopen 运动控制规范。第 4 章介绍运动控制规范规定的运动控制功能块。第 5 章描述运动控制的数据通信。第 6 章讨论运动控制应用问题。第 7 章是 PLCopen 运动控制规范的系统实现。第 8 章介绍西门子的 Simotion 系统。

本书可作为机械自动化、机电一体化等相关专业本科的教材,也是关注运动控制的工程技术人员的重要参考资料。

图书在版编目 (CIP) 数据

运动控制系统软件原理及其标准功能块应用/彭瑜,何衍庆编著. —北京:机械工业出版社, 2019. 4

(工业自动化技术丛书)

ISBN 978-7-111-63762-2

I. ①运… II. ①彭… ②何… III. ①运动控制-系统软件-教材 IV. ①TP24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 206938 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:时 静 李馨馨 责任编辑:李馨馨

责任校对:张艳霞 责任印制:孙 炜

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2020 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·27.75 印张·686 千字

0001-2500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-63762-2

定价: 139.00 元

电话服务

客服电话: 010-88361066

010-88379833

010-68326294

封底无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

金书网: www.golden-book.com

机工教育服务网: www.cmpedu.com

前 言

《中国制造 2025》由国务院于 2015 年 12 月公布，提出了中国制造强国建设三个十年的“三步走”战略，是我国推动制造业转型升级的第一个十年的行动纲领。其基本方针是创新驱动、质量为先、绿色发展、结构优化、人才为本。其基本原则是市场主导、政府引导、立足当前、着眼长远、整体推进、重点突破、自主发展、开放合作。战略目标是立足国情、立足现实，力争通过“三步走”实现制造强国的战略目标。其重点之一是，加快推动新一代信息技术与制造技术融合发展，把智能制造作为两化深度融合的主攻方向；着力发展智能装备和智能产品，推进生产过程智能化，培育新型生产方式，全面提升企业研发、生产、管理和服务的智能化水平，推进信息化与工业化深度融合。

众所周知，机械装备的制造加工功能一般是通过其相关部件的运动来实现的。尽管制造加工的原理常常有很大差异（如冷加工的金属切削，热加工的焊接、锻造，增材制造 3D 打印等），但是都离不开机械部件的运动。从这个意义上说，运动是机械装备的本质特征。不过，不同的工艺对运动控制的关注点有很大差异，例如机器人和数控机床关注的是路径规划、运动参数的混成缓冲等，而印刷机械、包装机械等关注的是主轴和从轴之间的同步和工艺节拍。尽管机器人和数控机床的基础都是多轴运动的协调控制，但从实际应用和控制技术的视角来分析，它们还是存在质的区别。机器人的控制主要是定位，而且是面向时间的定位；数控机床的控制是面向型面和型体轮廓的，其运动控制优先关注的是加工刀具的运动路径。由此可见，运动控制系统是确保数控机床、机器人及各种先进装备高效运行的关键环节。运动控制技术是装备制造领域的核心技术。机器人和数控机床的运动控制要求更高，这是因为其运动轨迹和运动形态远较若干专用的机械装置（如包装机械、印刷机械、纺织机械、装配线以及半导体生产设备等）复杂，而且其机械运动学和动力学的问题也显著复杂。

运动控制泛指通过某种驱动部件（诸如液压泵、直线驱动器或电动机，通常是伺服电动机）针对机械设备（或其部件）或者加工刀具，在运动过程中按照加工功能要求对其运动的基本要素如位置、速度、加速度（减速度）、加速度变化率以及转矩进行控制。

显然，运动控制技术已经在国民经济的各行各业和诸多领域发挥着重要作用，并产生了巨大的经济效益。它是控制理论在机械工程和电力工程的完美应用，它将微电子技术、电子电力技术、计算机和信息技术、传感检测技术、电机学等技术灵活结合，是一门综合性的学科。

发展先进运动控制技术具有极其重要的现实意义。我国《中国制造 2025》发布实施以来，五大工程实施效果初显；重大标志性项目取得阶段性成效；开展试点示范、落地生根效应凸显；制定分地区指南、各地差异化发展格局加快形成；制造业与互联网融合效应明显；实施专项行动、质量品牌建设取得初步成效。相信运动控制技术在不久的将来会成为中国制造的重要手段和支柱。

PLC 作为设备和装置的控制器，除了传统的逻辑控制、顺序控制、运动控制及安全控制功能之外，还承担着工业 4.0 和智能制造赋予的下列任务：

① 越来越多的传感器被用来监控环境、设备的健康状态和生产过程各类参数，这些工业大数据的有效采集，迫使 PLC 的 I/O 必须由集中安装在机架的方式转型为分布式 I/O 方式。

② 各类智能部件普遍采用嵌入式 PLC，或者微小型 PLC，尽可能地在现场就完成越来越

复杂的包括运动控制在内的控制任务。

③ 应用软件编程的平台化，进一步发展工程设计的自动化和智能化。

④ 大幅提升无缝连通能力，发挥边缘计算的强大作用，使相关的控制参数和设备的状态在需要时可直接传输至上位的各个系统和应用软件，甚至送往云端。

⑤ 在实现实体资产（包括硬件和软件）数字化的过程中提供足够的支持，便于将资产转化为数据、信息和知识。

事实上，PLC 的软件技术以 PLCopen 国际组织为先导，一直在为满足工业 4.0 和智能制造日益清晰的要求做足了准备。

IEC 61131-3 标准的制定旨在推动 PLC 在软件方面的进步，具体体现在如下几个方面：

① 编程的标准化促进了工控编程从语言到工具性平台的开放；同时为工控程序在不同硬件平台间的移植创造了前提条件。

② 为控制系统创立统一的工程应用软环境打下了坚实基础。从应用工程程序设计的管理，到提供逻辑和顺序控制、过程控制、批量控制、运动控制、传动以及人机界面等统一的设计平台，以至于将调试、投运和投产后的维护等纳入统一的工程平台。

③ 发展依托第三方仿真工具开发机电设备的控制行为，并进一步成为应用程序的自动生成工具。

④ 为适应工业 4.0 和智能制造的软件需求，IEC 61131-3 的第 3 版将面向对象的编程（OOP）纳入标准。

为此，PLCopen 国际组织注重与许多国际标准化组织和基金会（譬如 ISA、OPC 基金会等）的合作，开发了有关标准和规范，为智能制造和工业 4.0 的应用和发展打下了坚实基础。

PLCopen 国际组织考虑到用户存在运动控制软件标准化的需求，从 1996 年起就建立了运动控制规范工作组，历时十多年完成了这一具有挑战性的工作。PLCopen 开发运动控制规范的目的在于：在以 IEC 61131-3 为基础的编程环境下，在开发、安装和维护运动控制软件等各个阶段，协调不同的编程开发平台，使其能满足运动控制功能块的标准化要求。

IEC 61131-3 为机械部件的运动控制提供一种良好的架构，PLCopen 选择以此为基础，为运动控制提供功能块库，最显著的特点如下：

① 极大增强了运动控制应用软件的可复用性，从而减少了开发、培训和技术支持的成本。

② 只要采用不同的控制解决方案，就可按照实际要求实现运动控制应用的可扩可缩。

③ 功能块库的方式保证了数据的封装和隐藏，进而使之能适应不同的控制系统架构，譬如，集中的运动控制架构、分布式的运动控制架构，或者既有集中又有分散的集成运动控制架构。

④ 它不但服务于当前的运动控制技术，还能适应今后的或正在开发的运动控制技术。

可以说，IEC 61131-3 与 PLCopen 的运动控制规范的紧密结合提供了理想的机电一体化的解决方案。并由此奠定了 PLC 技术、机器人技术和数控机床技术的融合发展的基础，形成了当前智能制造装置最前沿的一个值得关注的动向。

为适应我国智能制造的发展，根据 IEC 61131-3 第三版和 PLCopen 的运动控制规范，以及 PLCopen 国际组织 2017 年公布的有关技术文件的有关内容，我们编写了本书。

本书共 8 章。第 1 章介绍运动控制系统的组成、PLC 在智能制造中的定位，并介绍运动控制技术基础。第 2 章是运动控制的理论基础，包括运动控制问题、运动控制系统的基本原理等。第 3 章介绍 PLCopen 运动控制规范，包括规范的概述、状态图、功能块接口、中止模式和混成模式等内容，是运动控制规范的基础。第 4 章介绍运动控制规范规定的运动控制功能块，

包括单轴运动控制的管理类和运动类功能块、多轴运动控制功能块、协调类运动控制功能块和同步类运动控制功能块，也介绍了回原点运动控制功能块，并讨论了安全运动的相关概念。第5章介绍了运动控制的数据通信，不仅介绍运动控制实时数据通信的基本概念，也讨论了PLC的通信，包括OPC UA实现数据通信等。第6章讨论运动控制应用问题，包括贴标机的应用、仓储系统的应用以及点位运动控制，还讨论了飞剪过程的控制和包装机械的控制等。第7章是PLCopen运动控制规范的系统实现，介绍德国ISG研究所的运动控制平台ISG Kernel、施耐德SoMachine系统和欧姆龙Sysmac Studio系统。第8章介绍西门子的Simotion系统。

本书由彭瑜、何衍庆编著。本书的编写得到PLCopen中国组织PC5的积极支持和帮助，得到上海工业自动化仪表研究院、华东理工大学等单位的关心和支持，PLCopen、西门子、施耐德及OMRON等组织和公司的有关技术人员为本书的编写提供了大量的资料和技术支持，为本书提供技术支持和帮助的还有杨静梅、张贵年、陈朕、张胜利和沈美娟等，机械工业出版社的时静编辑和李馨馨编辑也对本书的出版提供了很多帮助，谨在此一并表示诚挚的谢意。本书编写过程中，参考了相关专业书籍和产品说明书，在此向有关作者和单位表示衷心感谢。

由于编者水平所限，错漏在所难免，敬请读者不吝指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 运动控制系统的组成	1
1.1.1 运动控制和过程控制	1
1.1.2 运动控制系统的分类	2
1.1.3 运动控制系统的组成	4
1.1.4 运动控制技术的发展	4
1.1.5 运动控制技术的应用领域	8
1.2 PLC 在智能制造中的定位	9
1.2.1 《国家智能制造标准体系建设指南（2015 年版）》的智能制造标准体系参考模型	9
1.2.2 德国工业 4.0 参考模型 RAMI 4.0	11
1.2.3 美国国家标准化技术研究院的智能制造生态系统模型	15
1.2.4 日本工业价值链参考模型 IVI	18
1.2.5 PLC 在智能制造系统中的定位	21
1.2.6 标准化在智能制造中的重要作用	26
1.2.7 智能制造对运动控制的要求和运动控制的发展趋势	28
1.3 运动控制技术基础	31
1.3.1 机械系统	31
1.3.2 电气控制系统	38
1.3.3 控制基础	50
1.3.4 计算机编程基础	56
第 2 章 运动控制的理论基础	61
2.1 运动控制问题	61
2.1.1 第一类运动控制问题	61
2.1.2 第二类运动控制问题	62
2.2 运动控制系统的基本原理	62
2.2.1 坐标系和坐标变换	62
2.2.2 插补技术	66
2.2.3 S 轮廓曲线和配置文件	69
2.2.4 位置运动学和动力学方程	75
2.2.5 电机控制技术	78
2.2.6 传动和控制技术	89
2.2.7 检测技术	93
第 3 章 PLCopen 运动控制规范	115
3.1 PLCopen 规范概述	115
3.1.1 PLCopen 运动控制规范的特点	116

3.1.2	PLCopen 运动控制功能块的概念和模型	117
3.1.3	管理类运动控制功能块和运动类运动控制功能块	120
3.1.4	边沿触发功能块和电平控制功能块	124
3.2	状态图	126
3.2.1	单轴运动控制的状态图	127
3.2.2	轴组运动控制的状态图	130
3.2.3	单轴和轴组状态图的关系	131
3.2.4	运动控制功能块的状态图及其实现示例	132
3.3	功能块接口	138
3.3.1	标准规范定义的数据类型	138
3.3.2	功能块接口的一般规则	147
3.3.3	出错处理	151
3.4	中止模式和混成模式	152
3.4.1	单轴的缓冲模式	152
3.4.2	轴组的缓冲模式	159
3.4.3	轴组的过渡模式和协调运动	163
3.4.4	电子凸轮和电子齿轮	166
第4章	运动控制功能块	169
4.1	单轴运动控制的管理类功能块	169
4.1.1	MC_Power	170
4.1.2	MC_ReadStatus 和 MC_ReadMotionState	171
4.1.3	MC_ReadAxisError 和 MC_ReadAxisInfo	172
4.1.4	MC_ReadParameter 和 MC_ReadBoolParameter	172
4.1.5	MC_WriteParameter 和 MC_WriteBoolParameter	174
4.1.6	MC_ReadDigitalInput	174
4.1.7	MC_ReadDigitalOutput 和 MC_WriteDigitalOutput	175
4.1.8	MC_ReadActualPosition、MC_ReadActualVelocity 和 MC_ReadActualTorque	175
4.1.9	MC_SetPosition 和 MC_SetOverride	176
4.1.10	MC_TouchProbe 和 MC_AbortTrigger	177
4.1.11	MC_DigitalCamSwitch	178
4.1.12	MC_Reset	179
4.1.13	MC_HaltSuperimposed	179
4.1.14	MC_LimitLoad 和 MC_LimitMotion	179
4.2	单轴运动控制的运动类功能块	180
4.2.1	MC_Home	181
4.2.2	MC_Stop 和 MC_Halt	181
4.2.3	MC_MoveAbsolute、MC_MoveRelative、MC_MoveAdditive 和 MC_MoveSupperimposed	182
4.2.4	MC_MoveContiAbsolute 和 MC_MoveContiRelative	187
4.2.5	MC_MoveVelocity	190
4.2.6	MC_TorqueControl 和 MC_LoadControl	191
4.2.7	MC_PositionProfile、MC_VelocityProfile、MC_AccelerationProfile 和 MC_LoadProfile	193

4.2.8	MC_LoadSuperImposed	195
4.3	多轴运动控制功能块	196
4.3.1	多轴运动控制的管理类功能块 MC_CamTableSelect	196
4.3.2	多轴运动控制的运动类功能块	197
4.4	协调运动控制功能块	202
4.4.1	协调管理类运动控制功能块	203
4.4.2	协调运动类运动控制功能块	212
4.5	同步运动控制功能块	219
4.5.1	MC_SyncAxisToGroup	219
4.5.2	MC_SyncGroupToAxis	219
4.5.3	MC_TrackConveyorBelt	221
4.5.4	MC_TrackRotaryTable	223
4.6	原点定位运动控制功能块	223
4.6.1	MC_StepAbsoluteSwitch	225
4.6.2	MC_StepLimitSwitch	227
4.6.3	MC_StepBlock	229
4.6.4	MC_StepReferencePulse	229
4.6.5	MC_StepDistanceCoded	230
4.6.6	MC_HomeDirect	231
4.6.7	MC_HomeAbsolute	231
4.6.8	MC_FinishHoming	231
4.6.9	MC_StepRefFlySwitch	232
4.6.10	MC_StepRefFlyRefPulse	233
4.6.11	MC_AbortPsHoming	233
4.6.12	实际应用的原点定位模式	234
4.7	安全运动	236
4.7.1	安全运动监视功能概述	237
4.7.2	安全运动监控功能的示例	246
第5章	运动控制的数据通信	249
5.1	运动控制实时数据通信的基本概念	249
5.1.1	确定性联网的基本概念	251
5.1.2	运动控制对实时通信的要求	251
5.1.3	现场总线和工业以太网实时性问题	253
5.1.4	与运动控制相关的工业以太网性能比较	254
5.2	PLC 的通信	257
5.2.1	网络拓扑结构	257
5.2.2	典型可编程逻辑控制器网络系统	259
5.2.3	OPC UA 实现数据通信	265
第6章	运动控制应用	272
6.1	贴标机的应用	272
6.1.1	平面贴标机	272

6.1.2 卧式贴标机	274
6.2 仓储系统的应用	276
6.2.1 控制要求	277
6.2.2 简单方法的实现	277
6.2.3 协调运动方法的实现	279
6.3 点位运动控制	280
6.3.1 控制要求	280
6.3.2 点位控制功能块的编程	281
6.4 飞剪过程的控制	283
6.4.1 控制要求	283
6.4.2 控制程序	284
6.5 包装机械的控制	287
6.5.1 PackML	288
6.5.2 收卷过程的功能块	289
第7章 PLCopen 运动控制规范的系统实现	298
7.1 ISG 的运动控制平台 ISG Kernel	298
7.1.1 运动控制平台 ISG-MCP	300
7.1.2 PLCopen 运动控制功能块库 McpPLCopenBase	305
7.1.3 运动控制系统的实现示例	307
7.2 施耐德 SoMachine 系统	310
7.2.1 系统简介	310
7.2.2 应用示例	319
7.3 欧姆龙 Sysmac Studio 系统	322
7.3.1 系统简介	322
7.3.2 应用示例	334
第8章 西门子运动控制系统	338
8.1 系统简介	338
8.1.1 概述	338
8.1.2 硬件简介	339
8.1.3 软件简介	350
8.2 工艺包和工艺对象	354
8.2.1 工艺包和工艺对象	354
8.2.2 运动控制功能块	378
8.3 位置控制和伺服驱动	400
8.3.1 位置控制	400
8.3.2 伺服控制	405
参考文献	433

第1章 概 述

1.1 运动控制系统的组成

1.1.1 运动控制和过程控制

1. 过程控制

过程控制指工业生产过程的自动化。它以生产过程为研究对象，以所需的工艺参数为目标，通过一定的控制算法和操作，使被控的工艺参数达到或接近被设置的参数。过程控制中，被控变量是工艺参数，例如，流体流量、压力、物位、温度和流体组分或浓度等。控制手段是调节操纵变量，使被控变量达到或接近被设定的值。操纵变量可以是流体流量，也可以是电动机的转速等。这类控制系统通常要求被控变量保持恒定，因此，常被称为定值控制系统。

在石油化工、电力、冶金、纺织、建材、轻工、核能等工业生产过程中要求被控变量达到和保持在工艺操作所需的设定值，为此，需要检测和变送这些被控变量，并按一定的控制规律输出信号到执行器，调整操纵变量。

过程控制需要达到一定的目标。例如，在一定操作条件下（物料和能量平衡）确保安全、稳定和长期运行；经济效益最大化；环境污染最小化等。

与其他自动控制系统比较，过程控制具有下列特点：

① 过程控制系统由过程检测、变送和控制仪表、执行装置等组成。过程控制是通过各种类型的仪表完成对过程变量的检测、变送和控制，并经执行装置作用于生产过程。这些仪表可以是气动仪表、电动仪表；可以是模拟仪表、计算机装置或者智能仪表；也可以是现场总线仪表或无线仪表。不管采用什么仪表或计算机装置，从过程控制的基本组成来看，过程控制系统总是包括对过程变量的检测变送、对信号的控制运算和输出到执行装置，完成所需操纵变量的改变，从而达到所需控制目标（或指标）。

② 过程控制的被控过程具有非线性、时变、时滞及不确定性等特点。由于过程控制的被控过程具有非线性、时变、时滞及不确定性等特点，难以获得精确的过程数学模型，使得在其他领域（例如，航空航天）应用成功的控制策略不能移植或增加了移植的难度，因此，给控制带来困难。

③ 过程控制的被控过程多属于慢过程。与航天、运动过程的控制不同，过程控制所研究的被控过程通常具有一定时间常数和时滞，过程控制并不需要在极短时间完成。

④ 过程控制方案的多样性。由于工业生产过程的多样性，为适应被控过程特点，控制方案具有多样性。表现为：同一被控过程，因受到的扰动不同，需采用不同的控制方案，常用的控制方案有简单控制系统、串级控制系统、比值控制系统、均匀控制系统、前馈控制系统、分程控制系统、选择性控制系统以及双重控制系统等；控制方案适应性强，同一控制方案可适用于不同的生产过程控制。随着过程控制研究的深入，大量先进控制系统和控制方案得到开发和应用，例如，预测控制、解耦控制、时滞补偿控制、专家系统和模糊控制等智能控制。

⑤ 过程控制系统分为随动控制和定值控制，常用的过程控制系统是定值控制系统。它们都采用一些过程变量如温度、压力、流量、物位和成分等作为被控变量，过程控制的目的是保持这些过程变量能够稳定在所需的设定值，能够克服扰动和负荷变化对被控变量造成的影响。

⑥ 过程控制实施手段的多样性。除了过程控制方案的多样性外，实施过程控制的手段也具有多样性，尤其在开放系统互操作性和互联性等问题得到解决后，实现过程控制目标的手段更丰富。例如，用计算机控制装置实现所需控制功能；方便地更换损坏的仪表而不必考虑是否与原产品一致；方便地在控制室或现场获得仪表的信息如量程、校验日期及误差等；还可以直接进行仪表校验和调整。

2. 运动控制

运动控制系统是一类电气传动控制系统，通常以运行相关的运动控制软件的控制器为核心，以电力电子功率变换模块为执行机构，控制电动机的运动状态，完成特定的运动过程，达到控制机械装置的目的。有时也用液压控制系统完成运动控制的任务。这类控制系统的被控变量是电动机的转矩（扭矩）、转速和转角，实现对被控机械的精确位置、速度、加速度、转矩和力的控制及这些被控变量的综合控制。运动控制的执行器是被称为伺服机构的电动机，包括直流和交流伺服电动机，步进电动机等。简言之，运动控制是对机械传动装置的计算机控制，即对机械运动部件的位置、速度等进行实时控制和管理，使其按预先规定的运动参数和规定的轨迹完成相应的动作。

在机床、包装、印刷、纺织、汽车制造、仓储和装配等工业中，通常采用运动控制。

运动控制具有下列特点：

- ① 被控变量的过渡过程时间短，一般为秒及毫秒级。
- ② 传动功率范围宽，从几毫瓦到几百兆瓦，即用小功率指令信号控制大功率负载。
- ③ 调速范围大，可达 1:10000。无变速装置时，转速从几转/时到几十万转/分。
- ④ 可获得良好动态性能和较高稳速和定位精度。定位精度可达 $0.1\text{ mm} \sim 1\text{ }\mu\text{m}$ ，过渡时间小于 200 ms。
- ⑤ 电动机空载损耗小，效率高，短时过载能力强。
- ⑥ 可以四象限运行，制动时能量回馈电网。
- ⑦ 可控制单台电动机运转，也可多台协调运行，只需要调整控制方法。
- ⑧ 采用合理控制方案，可适用于任何传动应用场合。

1.1.2 运动控制系统的分类

1. 按执行电动机分类

运动控制系统按执行电动机分类可分为下列类型：

- ① 旋转式。其执行电动机可以是步进电动机、直流电动机、无刷直流电动机、交流异步电动机、交流永磁同步电动机、开关磁阻电动机等。
- ② 直线式。其执行电动机可以是永磁同步直线电动机、异步直线电动机等。

2. 按运动轨迹分类

运动控制系统按运动轨迹分类可分为下列类型：

① 点位运动控制。只对终点位置有要求，与运动的中间过程即运动轨迹无关。控制要求是对运动控制器的快速定位速度，不同的加、减速度控制等。加速时能快速到达设定速度，为此要提高系统增益和增大加速度。而在减速末端，采用 S 形曲线减速，防止系统到位时的振动。因此，在终点前应减小系统增益。这表明点位运动控制器具有能够在线可变控制参数和可变加减速曲线的能力。

② 连续轨迹运动控制。例如数控机床的运动轮廓线控制。它要求在高速运动下保证系统加工的轮廓精度，保证刀具沿轮廓运动时的切向速度恒定和具有多段程序预处理能力。

③ 同步运动控制。是多轴运动的协调控制。主要是电子凸轮和电子齿轮的系统控制。控制算法常用自适应前馈控制算法，通过自动调节控制量的幅值和相位，保证在输入端加一个前馈控制作用，以抑制周期干扰，保证系统同步控制。常用于印染、印刷、造纸、轧钢及同步剪切等行业。

3. 按伺服控制是否有反馈信号分类

运动控制按是否有反馈信号分类可分为以下类型：

① 开环控制。无检测反馈装置，执行电动机常为步进电动机。开环控制结构简单，价格低，控制指令单向，但机械传动误差没有反馈校正，位置控制精度低。

② 半闭环控制。采用安装在伺服电动机或丝杠端部的转角检测元件检测位置，虽没有组成闭环控制，但采用软件定值补偿方式，因此，可适当提高控制精度。

③ 全闭环控制。采用光栅等检测元件直接对被控机械位置检测，消除整个传动过程的传动误差，可获得很高的静态定位精度。但稳定性不高，系统设计和调整复杂。

4. 按控制方式分类

运动控制按控制方式分类可分为以下类型：

① 点位控制数控系统。对运动轨迹无特殊要求，运动时不加工，控制电路只需要具有记忆和比较功能，不需要插补运算功能。

② 直线控制数控系统。需要进行直线加工，控制电路较复杂。

③ 轮廓控制数控系统。要求控制刀具完成复杂的轮廓曲线运动，并进行加工，因此要求有插补运算和判别功能。

5. 按动力源分类

运动控制按动力源分类可分为以下类型：

① 以电动机作为动力源的电气运动控制。这是运动控制最主要的形式，约占 90% 以上。

② 以气体和液体作为动力源的气液控制。对需要大功率的运动控制应用场合，也常采用气液控制形式。它以流体压力和流体动能作为动力源，包括液压泵、液压马达和气缸等执行机构，完成机械装置的位置、速度等的运动控制。

③ 以燃料（煤、油等）作为动力源的热机运动控制。

6. 按协调控制的结构分类

运动控制按协调控制的结构分类可分为以下类型：

① 主轴/从轴运动控制结构。主轴的运动控制命令生成一个或多个从轴的运动控制命令。在这类系统中，主轴可以是实轴，也可以定义为虚轴。

② 多维的运动控制协调结构。它不区分主轴和从轴，是多个轴的集合，称为轴组。以轴组的运动实现所需的运动轨迹和路径控制。常用于解决数控机床、机器人等复杂运动控制问题。

7. 按运动控制的应用分类

运动控制按其应用分类可分为以下类型：

① 通用运动控制。基本属于主轴/从轴运动控制范畴。例如，用于印刷、包装、纺织和日用品制造（如纸质成形尿布、妇女卫生纸巾）等行业的运动控制。使用的运动控制功能基本属于 PLCopen 运动控制规范的第 1 和第 2 部分的功能块。

② 复杂运动控制。主要用于机器人、数控机床等多轴协调运动控制。使用的运动控制功能基本属于 PLCopen 运动控制规范的第 4 部分的功能块。

此外，按运动轨迹的特性分为平移、旋转和混合运动。按运动环境分为地面运动、水下运

动和空中运动等。按运动件的特性分为刚体运动、柔性体运动和刚柔体运动等。

1.1.3 运动控制系统的组成

运动控制系统是控制某些机器的位置、速度、力或力矩的随动控制系统。图 1-1 显示运动控制系统的组成。运动控制系统由下列部分组成：

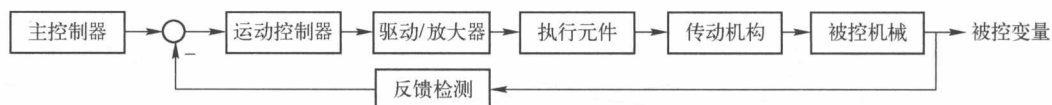


图 1-1 运动控制系统框图

① 被控机械。它是运动控制系统的最终控制对象。例如，一维或多维机械平台、机械臂或机器人等。

② 传动机构。用于实现增减速、输出力矩放大或缩小、旋转运动和直线运动转换等的装置。例如减速箱、丝杠及皮带轮等。

③ 执行元件。将电能转换为机械能的各种元件。如液压油缸、液压马达、气缸、各种电动机以及伺服电动机等。

④ 驱动/放大器。实现弱电信号放大和输出强电驱动信号的装置。例如，电力电子器件及控制电路、保护电路组成的伺服驱动器等。有时，将驱动/放大器和执行元件一起称为执行器。

⑤ 运动控制器。实现各种插补运算、运动轨迹规划及复杂控制策略等运算功能的控制装置。

⑥ 反馈检测。将被控机械的运动状态反馈给运动控制器，实现闭环控制的检测装置。例如，位置、速度、加速度检测传感器、力和力矩检测传感器等。没有反馈检测装置的系统是开环系统，具有反馈检测的系统是闭环系统。

⑦ 主控制器。用于实现人与机器信息交互的装置。主要负责运动控制的调度、运动状态显示、数据存储、数据通信和协调等功能。

运动控制系统的任务是保证坐标轴实际运动与插补产生的命令值的一致。

1.1.4 运动控制技术的发展

1. 运动控制技术的发展

运动控制系统的发展经历了从直流到交流、从开环到闭环、从模拟到数字、直到基于 PC 的伺服控制网络系统和基于网络的运动控制的过程。从运动控制器件的发展看，大致经历了下列阶段。

① 模拟电路。早期的运动控制系统一般采用运算放大器等分立元件，以模拟电路硬件连线方式构成。这类控制系统具有响应速度快、精度较高以及有较大带宽等优点。但与数字系统相比较，存在老化和环境温度的变化对构成系统的元器件参数影响很大；元器件较多，系统复杂，使系统可靠性下降；采用硬接线，修改困难；受系统规模限制，难以实现高精度、大运算量的复杂控制算法等缺点。

② 微处理器。微处理器集成了 CPU、RAM 及 ROM 等，具有运算速度快、功率消耗低、集成度高和抗扰性强等优点。但总体集成度仍较低，不具备运动控制所需的控制算法、处理速度和能力有限等缺点。

③ 通用计算机。它采用高级编程语言和相应的控制软件，配合计算机通信接口和驱动电动机的电路板，可独立组成运动控制系统。可以实现高性能、高精度的复杂控制算法，程序修

改方便。但受到通用计算机的限制，其实时性较差，体积大，难于在工业现场应用。

④ 专用运动控制芯片。专用的运动控制芯片将实现运动控制所需的各种逻辑功能和运动控制功能集成在一块专用集成电路板内，提供了一些专用控制指令，并具有一些辅助功能，使用户软件设计工作量减到最小。但由于软件算法固化，所以复杂控制算法实现困难，程序扩展性和灵活性较差。

⑤ 数字信号处理器。数字信号处理器（Digital Signal Processor, DSP）是集成极强数字信号处理能力和电动机控制系统所必需的输入、输出、模数变换和事件捕捉等外围设备能力的专用芯片，是一个实时处理信号的微处理器。具有体积小、功耗低及运算速度快等特点。近年推出的超长指令字（VLIW）结构、超标量体系结构和 DSP/MCU 混合处理器是 DSP 结构发展的新潮流。

⑥ 可编程控制器。早期可编程控制器以逻辑运算为主，不具有运动控制算法。近年来，PLCopen 组织颁布了运动控制规范，将运动控制、逻辑控制和安全结合在一个平台，实现运动控制。

表 1-1 是运动控制系统发展历史。

表 1-1 运动控制系统发展历史

阶段	分类	主要技术特征
早期	模拟	步进控制器+步进电动机+电液脉冲马达
20 世纪 70 年代	直流模拟	基于微处理器技术的控制器+大惯量直流电动机
20 世纪 80 年代	交流模拟	基于微处理器技术的控制器+模拟式交流伺服系统
20 世纪 90 年代	数字化初级	数字/模拟/脉冲混合控制，通用计算机控制器+脉冲控制式数字交流伺服系统
21 世纪至今	全数字化	基于 PC 的控制器+网络数字通信+数字伺服系统

我国运动控制技术的发展相对落后。20 世纪 80 年代开始采用通用运动控制器产品。应用规模小，应用范围窄。此外，运动控制器的运动速度较慢，精度也不高。随着对外开放政策的落实，一些国外运动控制产品进入国内，一些外商和合资企业建立，促进了运动控制技术的发展。

2. 运动控制系统的关键技术

运动控制技术是包含机械工程、电子工程、控制工程、计算机科学及传感检测技术的相互交叉和融合的综合技术。

① 精密机械技术。机械技术是运动控制的技术基础。在运动控制中，要求机械结构更简单，功能更强，一些新机构、新原理、新材料和新工艺的应用能够满足对各种应用的需要，既提高精度和刚度，又改善性能，例如，体积缩小、重量降低以及性价比提高等。

② 传感检测技术。运动控制技术需要对位置、速度和加速度等进行检测，组成反馈回路，实现伺服控制系统，为此，对传感检测技术提出更高要求，例如，高精度检测、快速检测和苛刻环境条件检测等。

③ 计算机与信息处理技术。运动控制中涉及大量运动信息，因此，除了这些信息的检测传送外，还涉及计算机与信息处理的大量工作。例如，信息的交互、运算、判断和决策等。与过程控制中采用集散控制系统不同，运动控制对信息处理时间要求更高，对信息实时性和交互要求更高。

④ 自动控制技术。在过程控制中，控制理论是基础。同样，在运动控制中，控制理论也是基础。由于被控对象不同，并且大量伺服系统的电动机是非线性被控对象。因此，高精度位置控制、轨迹控制、同步控制等都需要控制理论用于指导。

⑤ 伺服驱动技术。伺服驱动技术是在控制器输出指令下，控制驱动元件使其按照指令要

求运动，因此，需要满足运动过程动态响应等性能指标。由于不同的伺服驱动方式有不同的动态性能，因此，对 DC 伺服、AC 伺服、步进等电动机和变频技术等有更高要求。而伺服技术则从 DC 伺服转向 AC 伺服。全闭环交流伺服驱动技术、直线电机驱动技术等已经显现其优势。

⑥ 系统总体技术。运动控制技术是对整个运动系统的控制，因此，既要运动控制系统分解为各自自治又相互交互的单元，又要在总体性能要求下兼顾各个个体性能。只有这样，才能使设计的运动控制系统具有良好的性价比，满足应用要求。

3. 智能制造市场对运动控制产品和系统的要求

智能制造市场对运动控制产品和系统的要求如下：

① 性能更好。表现为能效高、改善能效算法、驱动功耗低、编码器分辨率高、运动控制通信总线速率高以及抖动小等。

② 更安全。表现为推行国际机械安全标准（UL-ISO-IEC），提供运动控制和安全控制一体化系统，采用高绝缘材料等。

③ 更智能。伺服驱动器智能算法和运动控制软件平台对不同行业和装备的针对性更强，以低制造成本为前提向绝对型定位驱动反馈发展，优化节能且降低能源损耗。

④ 更快速。提高伺服电动机轴速，高电压驱动要求采用高性能 IGBT 和 FET 器件才能满足高转速输出、低谐波，提高器件反馈带宽至 400 kHz 以上。

⑤ 噪声更小。采用新的电机设计降低振动和减少电机固有谐波，控制电机功率输入的谐波，控制电机输入电压和电流的波形以降低谐波。

⑥ 运转更平滑。利用 DSP 和 FPGA 的性能计算和存储电压电流波形，消除谐波和畸变，使运动速度和加速度更为平滑，高分辨的反馈信号和更好的运动控制总线性能也有利于运动平滑平稳。

⑦ 体积更小。运动控制产品安装的空间减小，使整体产品体积缩小。

⑧ 价格更便宜。中国制造的伺服系统比美国至少便宜 20%，运动控制系统中软件比硬件的比例更高意味着整体价格趋向于不断下降；数字驱动比模拟驱动价格便宜，性能更强；随着运动控制产品越来越广泛地运用于各行各业，生产批量越来越大，成本可迅速下降；此外，随着机械系统变得简约，整体成本也显著降低。

4. 运动控制系统存在的问题

① 长期以来，用户能够在很大范围内选择实现运动控制的硬件。不过，每种硬件都要求独自而无法兼容的开发软件。即使所要求的功能完全相同，在更换另一种硬件时，也需要重新编写软件。这一困扰运动控制用户的问题，其实质就是如何实现运动控制软件的标准化。

② 为适应应用需要，开发一体化的逻辑控制、运动控制及视觉控制开发平台是高效、快速开发智能制造生产线和智能制造装备的必然趋势。传统运动控制器虽然集成 PLC 功能，但 PLC 和运动控制是相对独立的两套软件，常需要 I/O 接口交换数据实现同步等，造成成本高、系统复杂以及维护困难。

③ 运动控制的要求不同。例如，机器人和数控机床关注的是路径规划、运动参数的混成缓冲等。机器人的路径规划还要考虑面向时间的定位（即其空间位置随时间定位），但过渡的路径受到空间位置的约束，速度要快，操作位置的定位要准确，停留时间则根据工艺加工要求确定。而数控机床的路径规划实际上要满足型面（二维）或形体（多维）切削加工的要求，追求速度与精度的平衡。印刷机械、包装机械等关注的是主轴和从轴之间的同步和工艺节拍，主要解决型面和轮廓的加工，即关注加工刀具的运动路径控制。

④ 由于运动部件有一定的质量，为保证它能准确地停在目标位置，需要按照原来已经定

义的减速值计算驱动器的速度，所计算的速度值用于生成一个优化的位置参考值，在该位置开始减速，就能让驱动器准确停在目标位置。

⑤ CNC 和机器人这些制造单元的开放架构问题。MES、ERP、CAM 等都要求制造设备层能提供基于 IT 技术的软硬件接口。而智能制造技术的实现也要求 CNC、机器人和其他制造单元和设备之间建立开放性的网络和软件接口。此外，传统 CNC 采用 G 代码编程，PLC 采用 IEC 61131-3 编程语言编程。

⑥ 运动控制系统中为了保证返回原点的准确性，常常在靠近原点的某个位置设置一个位置开关强制减速。但在需要进行许多点定位时，就很难设置多个位置开关。计算优化开始减速的位置，必须有基准位置。

PLCopen 组织开发运动控制规范的目的是解决上述存在的问题。基于 IEC 61131-3 的编程环境，将开发、设计、安装和维护运动控制软件和逻辑控制、安全控制和视觉控制等结合在一个操作平台，能够协调不同编程开发平台，满足运动控制、逻辑和安全控制以及视觉控制等应用要求。

经多年的应用，PLCopen 的运动控制规范已经成为独立于运动控制硬件的开发平台，它具有良好的可复用性，大大降低开发、应用和维护成本。它能够与 IEC 61131-3 友好地结合在同一开发环境下协调工作，也能够安装在和维护等各阶段满足应用的要求。该规范的第 4 部分规定了各种协调运动的功能块，既集合机器人、CNC 和通用运动控制的工程软件平台，也将硬件和软件一体化，成为实际应用运动控制规范的智能装备。

5. 运动控制系统的发展趋势

运动控制技术是推动工业 4.0 发展的关键技术。其发展趋势如下：

① 智能化。智能控制已经深入到运动控制系统的各个层面，智能化已经成为一切工业控制设备的流行趋势。智能化主要表现在下列方面：

- 具有参数记忆功能。系统中所有参数可通过人机界面由软件设置，并保存在运动控制系统的伺服单元内部，这些参数能够方便地在运动过程中被修改和观测。
- 具有参数自整定功能。闭环控制系统的参数整定，可通过自整定的控制算法实现，从而使控制系统运行更稳定，控制准确度更高，动态响应更快。
- 具有故障自诊断和分析功能。当系统发生故障时，系统可自动提供有用的故障信息，例如故障类型、可能引起故障的原因，同时还给出建议的检查方法和消除故障的步骤等。在很大程度上可快速寻找到故障点、缩短调试和维护时间，降低维修成本。
- 具有预定义的行业应用的宏功能，可通过简单的行业专用宏命令实现复杂的功能。

② 统一的操作平台。为了在不同应用中使用，软件平台的统一是极其重要的。为此，PLCopen 组织专家制定和完善了运动控制的标准规范。一些制造商也根据该规范开发了相应的操作平台。在该平台环境，可运行编程程序，对不同被控对象，例如，CNC、数控机床、数据加工中心及各种类型的机器人进行编程。也可通过该平台，实现人机交互，完成对伺服控制系统的控制。这些操作平台将逻辑运算、运动控制和安全集成在一起，方便了用户的应用。PLC 技术、机器人技术和 CNC 技术正在呈现融合发展的趋势。

③ 数字化。采用新型高速微处理器和专用信号处理器（DSP）代替原来的模拟电子器件，实现全数字化的伺服控制。将原来用硬件实现的伺服控制变成以软件实现的伺服控制，使控制性能得到改善，更便于控制功能的实现。例如，采用 NURBS 样条函数、多阶多项式的插补技术，采用前馈控制算法、模糊控制算法以及神经网络控制算法等。观测器和各种辨识技术被应用于运动控制系统中，极大地改善了控制系统的控制性能，为复杂的多层网络控制提供了基