

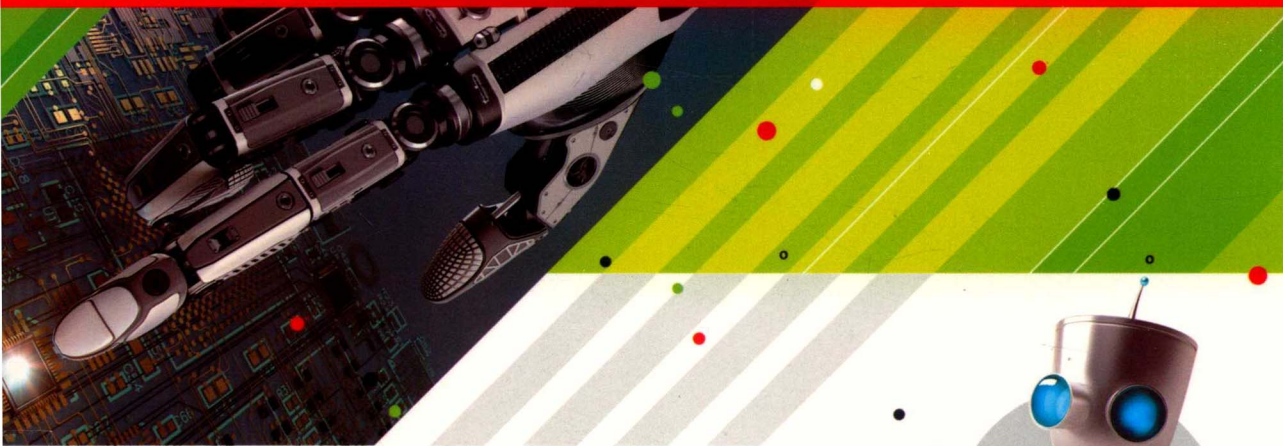



普通高等教育“十三五”规划教材
电气工程、自动化专业规划教材

运动控制系统

(第2版)

◆ 班 华 李长友 主编



 中国工信出版集团

 电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

“五”规划教材
业规划教材

运动控制系统

(第2版)

班 华 李长友 主编

责任编辑：傅晓霞

主任编辑：刘真

副编辑：李海英、李海霞

发行：北京人民邮电出版社

地址：北京市丰台区右安门外大街22号

邮编：100054

电话：(010) 67606300

网址：http://www.cpi.com.cn

2019年1月第2版

2019年1月第1次印刷

40.00元

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书以运动控制系统的组成要素为主线,全面系统地介绍了运动控制系统的基本原理、组成和设计方法。其主要内容包括绪论、经典运动控制器技术、智能运动控制器设计、执行器设计与执行器、直流电机控制技术、交流电机控制技术、伺服电机控制技术、运动系统检测技术,以及运动控制系统应用实例。同时,本书还配有电子课件和书中插图,读者可通过华信教育资源网(www.hxedu.com.cn)免费注册申请。

本书可作为高等学校自动化、电气工程、机电一体化和机械设计类专业的本科教材,也可供非电气类专业研究生,科研院所、工矿企业从事电气传动的科技工作者参考使用。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

运动控制系统/班华,李长友主编. —2版. —北京:电子工业出版社,2019.1

ISBN 978-7-121-35377-2

I. ①运… II. ①班… ②李… III. ①自动控制系统—高等学校—教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 252951 号

策划编辑:赵玉山

责任编辑:刘真平

印 刷:北京京师印务有限公司

装 订:北京京师印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:16.75 字数:428.8 千字

版 次:2012 年 8 月第 1 版

2019 年 1 月第 2 版

印 次:2019 年 1 月第 1 次印刷

定 价:46.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010)88254556, zhaoy@phei.com.cn。

前 言

运动控制系统是自动化技术的一个分支，广泛地应用于机械制造、冶金、交通运输、石油石化、航空航天、国防科技、生物工程、日用化工、医疗卫生、人居生活等方方面面。随着近期人工智能技术的快速发展，运动系统的智能控制对提升整个国民经济发展水平起着举足轻重的作用，对加快社会进步和改善人类生活都十分必要。

自 20 世纪 40 年代起，由于经典控制理论的提出，经典 PID 控制器在运动控制系统得到广泛应用，使得运动系统的稳定性和可控性大幅度提升。20 世纪 80~90 年代后，微电子技术、电力电子技术、智能控制技术迅猛发展，推进了运动控制系统的控制器智能化。尤其是近三年，随着智能装备与智能制造、机器人等工业 4.0 计划的制订，运动控制系统的智能化趋势不可逆转。

一个典型的运动控制系统由运动感知、运动控制和驱动执行组成，本书就以这三个要素作为基本架构进行编写。本书分四篇九章，第一篇是运动系统与运动控制器，涵盖本书的前三章，重点介绍有关运动系统的概念、运动控制器的组成及运动控制器的设计，考虑到智能控制技术的快速发展，控制器设计的重点放到智能控制器设计上。第二篇是执行器设计与驱动控制技术，由第 4~7 章组成，考虑到运动控制技术属于实用性很强的技术，自身发展与进化很快，之前很多同类书籍主要偏重驱动技术，忽略执行器设计基本方法，因此本篇主要对执行器的通用设计规则进行讨论，对动力形式做了全面系统的介绍。就驱动技术而言，本篇对很多传统技术的内容进行了调整，把不太具有实用性的内容做了删减，主要体现在各种电机调速控制的方法上。例如，对于直流电机调速，本书的重点是 PWM 调压调速，其他方式不予讨论；再如，对于交流电机调速，就围绕交流电机模型与解耦讲述，采用 PWM 变频调速技术的三种模式——标量控制、矢量控制和直接转矩控制。另外，着眼于最新科技，本篇专门介绍新兴执行器技术，如金属形状记忆合金、磁致伸缩和电磁流变等，使读者可以对运动控制系统的核心部件有一个更加全面的理解和掌握。本篇还有一个特点，就是从读者使用的角度系统地介绍商用交流电机变频器和商用伺服电机驱动控制器的选型原则、模式设定及接线使用。第三篇是运动感知技术，由第 8 章组成，因为近五年电动汽车与无人驾驶汽车的发展，本篇新增加了距离检测技术。第四篇是运动系统应用实例，由第 9 章组成，通过包括无人驾驶汽车在内的七个应用实例，从系统应用的角度对运动轨迹进行分析并提出控制解决方案，目的是对本书前三篇的内容进行归纳总结。

由于工科本科教学中需要压缩基本理论学时，增加实践教学环节，因此本书按照 48 学时编写。其中，理论学时为 40 学时，实践学时为 8 学时。为了扩大读者的知识面，本书增加部分章节（目录中标有星号的章节），供老师或读者选择。实践的主要内容是直流 PWM 调速控制器、交流商用变频器、商用伺服电机驱动控制器与运动检测（转速、距离、力等）。

本书共九章，第 1 章是绪论，其主要内容有五点：①运动控制研究的主要问题、第一类运动系统问题、第二类运动系统问题和运动轴的定义；②运动控制系统的组成；③运动控制系统有关术语；④运动控制系统的发展历程、发展趋势及发展运动控制技术的意义；⑤本书内容介绍与读者适用范围。

第2章主要围绕运动控制系统控制器的构成要素展开讲述,核心是运动轨迹、运动插补与控制回路;并对运动控制器的硬件构成与软件架构展开讨论,详细分析了运动控制器硬件组成中的各种可能选项,对控制器软件功能模块进行了剖析,且介绍了两款软件开发工具。

第3章是智能运动控制器设计,重点为:①模糊控制技术与模糊控制器;②自适应控制技术与自适应运动控制器。

第4章是执行器设计与执行器,重点为:①执行器设计原则与设计步骤,主要讲解驱动连接形式及相对应的负载计算方法与公式;②电动执行器;③液压执行器;④气动执行器;⑤新型执行器。

第5章主要讲述直流电机调速原理和调速驱动控制器,其主要内容包括直流电机调速的发展历程、调速调节器设计、单闭环直流电机调速系统、双闭环直流电机调速系统、多闭环直流电机调速系统;由于计算机软件技术的快速发展,现在几乎所有的直流电机速度调节与控制都利用MCU实现,故5.2.4节对直流电机调速系统控制器的数字仿真做了介绍。

第6章主要内容包括交流电机数学模型、交流电机的四大方程、交流电机的控制理论基础、交流变频调速技术基础。有关PWM可能涉及三种技术方案:PWM标量控制技术、PWM矢量控制技术和直接转矩控制技术。作为交流变频调速技术的代表——变频器,介绍变频器的基本种类、使用方法和使用模式。

第7章主要讲述有关伺服电机的调速控制原理和数学模型的建立,以PMSM伺服电机为主要对象,对交流伺服调速控制从电路到软件进行了全面介绍。同时,还对伺服电机驱动控制器做了详细讨论,希望读者掌握伺服电机驱动控制器的选型与使用方法。

第8章讲述有关运动对象的距离、位置、速度、加速度与力矩检测的方法,介绍了传感器的基本检测原理、基本结构和性能。

第9章给出了7个有关运动问题的应用实例,均从功能分析入手,研究生产流程对运动的需求和实现方法,然后搭建需要的运动系统,实现相应的运动控制功能。

本书第1~8章由资深机电一体化高级工程师班华博士编写,第9章由李长友教授编写,应用实例主要取材于班华、李长友、沈玉杰、李涛等人相关的科研项目和论文。在编写过程中借鉴了很多同类教材和论文,详见参考文献。在此,对参考文献中提及的相关文章作者表示由衷的感谢。

由于本书作者学识和水平的局限性,错误和缺陷在所难免,欢迎各位读者批评指正。

编者

2018年9月

目 录

第一篇 运动系统与运动控制器

第 1 章 绪论	2
1.1 运动控制研究的问题	3
1.1.1 第一类运动系统问题	3
1.1.2 第二类运动系统问题	8
1.2 运动控制系统	9
1.3 运动控制系统术语	10
1.4 运动控制系统的发展历程与未来发展趋势	11
1.5 本课程的主要内容和适用对象	13
第 2 章 经典运动控制器技术	15
2.1 运动控制系统简介	15
2.1.1 运动控制系统的构成	15
2.1.2 运动控制系统的任务	15
2.2 运动控制器的基本原理	16
2.2.1 运动控制器的构成	16
2.2.2 轨迹生成器	16
2.2.3 插补器	26
2.2.4 控制回路	36
2.3 运动控制器的硬件	37
2.3.1 按照运动控制器核心器件的组成分类	37
2.3.2 按照数据的传递形式分类	42
2.4 运动控制器的软件	44
2.4.1 运动控制器软件体系	44
2.4.2 运动控制器的开发应用软件简介	46
2.5 运动控制器设计要素	49
*2.6 运动控制器实例	49
习题与思考题	51
第 3 章 智能运动控制器设计	52
3.1 模糊控制技术与模糊控制器	52
3.1.1 模糊控制技术	52
3.1.2 模糊 PID 控制器及其设计	53
*3.1.3 双关节机械手	59
3.2 自适应控制技术与自适应运动控制器	63

3.2.1	自适应控制技术	63
3.2.2	自适应运动控制器设计	64
*3.2.3	模糊自适应控制器	68
	习题与思考题	70
第二篇 执行器设计与驱动控制技术		
第4章	执行器设计与执行器	72
4.1	执行器设计基础	72
4.2	电动执行部件	77
4.2.1	电动缸	77
4.2.2	电动执行阀	78
*4.3	液压执行部件	80
4.3.1	液压缸	80
4.3.2	液压马达	81
*4.4	气动执行部件	82
4.4.1	气缸	82
4.4.2	气动马达	83
4.4.3	控制回路	84
*4.5	新型执行器	85
4.5.1	压电执行器	85
4.5.2	形状记忆合金执行器	87
4.5.3	电致聚合体执行器	88
4.5.4	磁致伸缩执行器	89
4.5.5	电、磁流变液体执行器	90
	习题与思考题	96
第5章	直流电机控制技术	97
5.1	直流电机调速概述	97
5.1.1	直流电机调速的发展历程	97
5.1.2	直流电机的调速方法	98
5.1.3	直流电机 PWM 基本电路	100
5.1.4	直流 H 型可逆 PWM 变换器-电机系统的能量回馈	105
5.1.5	直流 PWM 调速系统的数学模型及机械特性	105
5.1.6	调速系统性能指标	106
5.1.7	开环调速系统的机械特性及性能指标	107
5.2	闭环调速系统与调速控制器	109
5.2.1	闭环调速系统	109
5.2.2	控制器设计	121
*5.2.3	工程方法——典型系统问题	129
5.2.4	直流电机调速系统控制器的数字仿真	136
	习题与思考题	143

第 6 章 交流电机控制技术	146
6.1 交流电机调速系统基本理论	146
6.1.1 研究交流电机解耦问题的必要性	146
6.1.2 交流电机模型	146
6.1.3 交流电机解耦分析	151
*6.1.4 交流电机在两相 (α, β) 静止坐标系下的数学模型	153
*6.1.5 交流电机在两相 (d, q) 旋转坐标系下的数学模型	154
*6.1.6 交流电机在两相 (M, T) 旋转坐标系下的数学模型	154
6.2 标量控制	155
6.2.1 电压频率协调控制的变频调速系统	156
*6.2.2 可控转差频率控制的变频调速系统	158
6.3 矢量控制	159
6.3.1 矢量控制概述	159
6.3.2 磁通开环转差型矢量控制系统	161
*6.3.3 转子磁通观测模型	162
*6.3.4 速度、磁通闭环控制的矢量控制系统	163
6.4 直接转矩控制	163
6.5 变频器	167
习题与思考题	173
第 7 章 伺服电机控制技术	175
7.1 伺服控制系统概述	175
*7.2 伺服控制系统的数学模型	176
7.2.1 直流伺服控制系统的数学模型	176
7.2.2 交流伺服控制系统的数学模型	178
*7.3 永磁同步电机交流伺服控制	179
*7.4 伺服控制系统的设计	183
7.4.1 单环位置伺服控制系统设计	183
7.4.2 双环伺服控制系统设计	186
7.4.3 三环伺服控制系统设计	188
7.4.4 PMSM 伺服控制系统设计	189
7.5 标准商用伺服驱动器应用简介	192
习题与思考题	205
第三篇 运动感知技术	
第 8 章 运动系统检测技术	208
8.1 距离检测	208
8.1.1 激光雷达	208
8.1.2 毫米波雷达和超声波雷达	209
8.1.3 摄像机(图像传感器)	210
8.2 直线位移检测	210

8.2.1	光栅	210
*8.2.2	感应同步器	213
8.2.3	磁栅式传感器	215
8.3	角位移检测	219
*8.3.1	旋转变压器	219
8.3.2	光电编码器	220
8.4	速度、加速度检测	222
*8.4.1	直流测速发电机	222
8.4.2	光电式速度传感器	223
8.4.3	加速度传感器	224
8.5	力、力矩检测	225
8.5.1	测力传感器	225
8.5.2	压力传感器	226
8.5.3	力矩传感器	228
*8.5.4	力与力矩复合传感器	228
	习题与思考题	230
第四篇 运动系统应用实例		
第9章	运动控制系统应用实例	233
9.1	无人驾驶汽车	233
9.2	高速电子锯	236
9.3	胡萝卜汁的灌装	239
*9.4	点胶机	244
*9.5	包装生产线	248
*9.6	缠绕生产线	252
*9.7	恒压供水系统	254
	参考文献	259

第一篇

运动系统与运动控制器

第1章 绪 论

当前世界各国都把人工智能与数字化制造等高技术作为产品技术升级与产业提升的核心，德国提出了工业 4.0，也称生产力 4.0，是德国政府提出的革命性创新计划。其目的就是确保德国工业在世界范围的竞争中处于领先地位。2015 年 3 月李克强总理在 12 届人大三次会议上提出了中国 2025 计划，目的是让中国进入世界制造强国。作为 2025 计划的支撑核心技术之一，发展高水平的运动控制系统对于推进我国的装备水平无疑是至关重要的。

运动是机器的本质特征。运动控制系统是机床、机器人及各类先进装备高品质和高效率运行的必要保证。运动控制技术是装备领域和制造行业的核心技术。由于实际应用对设备功能的需求是千差万别的，因此表现到实际系统对运动形式的需求上就变得五花八门。尽管运动控制系统的运动形式多种多样，但是从总体上看，可以把运动控制系统的运动类型划分为如下两大类别：

(1) 位置变化问题。其特征是被控对象空间位置发生改变，我们称之为第一类运动系统问题，有文献称之为线性轴。

(2) 周期式旋转速度变化问题。由于某一类物理量（如温度、压力、流量、转矩等）而迫使电机转速随负载的变化而变化，以满足温度、压力、流量、转矩等恒定的目的。我们把这类运动控制问题称为第二类运动系统问题，也有文献称之为旋转轴。

对第一类运动系统问题而言，被控对象的运动特征是：空间位置发生变化，在位置变化的过程中被控对象的速度或加速度发生变化。解决第一类运动系统问题的要点是：①根据牛顿运动学理论与电机拖动的基本理论，按照被控对象的空间运动轨迹，把被控对象的运动轨迹分解为空间坐标系的坐标变化；②通过对坐标系坐标的变化进行分析，建立描述运动轨迹的方程；③根据牛顿力学和运动学理论，第一类运动系统问题被转化为路程、速度、加速度和时间等几个参数关系的分析问题。第一类运动轨迹有三个要素：起始点、终止点及两点之间的连接曲线；三维空间位置控制问题是这类问题的典型代表，平面二维运动是空间三维运动的特例，直线一维运动则是平面二维运动的特例。

第二类运动系统问题是由具体的、实际生产问题演化派生出来的。例如，某小区的生活供水问题，由于用户的用水量是随机变化的，要确保用户的用水品质，从控制的角度就需要保持供水压力恒定；再如，要求某温室的温度恒定，其问题的实质是在研究循环风机通风量大小的问题，室内温度与设定的温度差决定着通风风机通风量的大小，温差越大，要求风机的循环风量越大，也就是电机的转速越高，而温差越小，要求循环风量越小，电机的转速越低。从第二类运动系统问题对控制系统的要求看，对这类对象的控制往往是与某些特定的物理量（温度、压力、流量等）相关联的，其前提条件是维持该物理量不变或者按照规定的规律变化。那么解决第二类运动系统问题的关键是：将实际对象的功能需求与电机的转速建立起函数关系，从而把实际问题转变为电机驱动速度实时控制的问题。工农业生产与人们日常生活中广泛应用的诸如风机、水泵、空调压缩机等负载都属于这个类型。有关统计资料表明，这类负载占据了整个工业生产能量消耗的 50%~60%。鉴于水泵、风机、压缩机电机的控制都是单向、周期的，因此这一类问题可以归纳为单轴运动控制的

周期式旋转控制问题。

1.1 运动控制研究的问题

1.1.1 第一类运动系统问题

什么是第一类运动系统？

定义：凡是被控制对象的空间位置或者运动轨迹随着运动而发生改变的运动问题都属于第一类运动系统问题，能够解决这一类运动问题的控制系统就是第一类运动控制系统。

因为第一类运动系统的控制在理论上完全遵循牛顿力学定律和运动学原则，为了便于对第一类运动系统进行分析与解析，我们把第一类运动系统的控制问题转化为物理学的牛顿运动学问题。把对被控对象的研究转化为对被控物体在笛卡儿坐标系中的位移、速度及加速度与运动时间的关系上。

第一类运动系统的解析关键是研究被控对象的运动轨迹，分析运动路径、运动速度、运动对象的加速度（力或者力矩）与时间的联系，利用牛顿定律建立求解方程，从而探求快速、平稳、精确的控制方法和控制策略。第一类运动控制问题均可使用典型曲线特征点对其位置轨迹或者速度轨迹加以描述，因此运动轨迹的研究实质上是分析各类运动轨迹的特征点，找出其规律性。典型的第一类运动问题有如下几类。

1. 一维运动

一维运动的特点是运动形式十分简单。其基本运动形式分为两类：一是直线运动，二是旋转运动；此外，还可以是两类基本运动的复合，如图 1-1 所示。

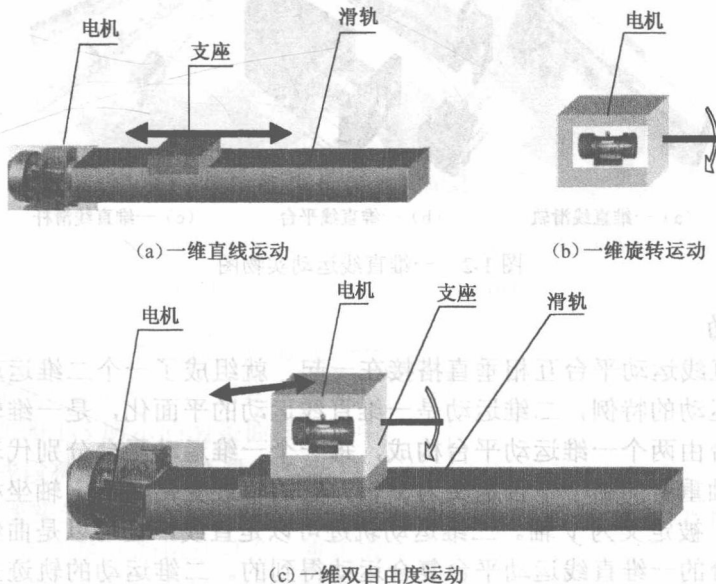


图 1-1 一维运动

图 1-1 (a) 所示是一维带电机驱动的单轴平台或者直线滑轨，其运动的特点是支座在电

机的驱动下，可以沿着滑轨做左右直线往复运动，运动的相关要素是开始位置、停止位置及两点之间的距离；图 1-1 (b) 所示是一维旋转运动，其相关要素是开始角度位、停止角度位和旋转角度值，图 1-1 (a)、(b) 所示都是一维单自由度运动；图 1-1 (c) 所示是图 1-1 (a)、(b) 的复合，具有典型的一维双自由度的运动特征，即滑轨上的支座可以沿着导轨做直线往复移动，而固定在支座上的电机可以沿着电机轴的切线方向做顺时针或者逆时针的旋转运动。常用运动学公式详见表 1-1。

表 1-1 常用运动学公式

	匀 速 度	匀 加 速 度
1	匀速度 = 路程变化量除以时间变化量 $\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$	匀加速度 = 速度变化量除以时间变化量 $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$
2	—	末速度 = 加速度与时间的乘积加上初速度 $v_t = at + v_0$
3	—	路程 = 初速度乘以时间，加上加速度与时间平方的乘积的一半 $\Delta x = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$
4	—	末速度的平方 = 初速度的平方，加上加速度与路程乘积的 2 倍 $v_t^2 = v_0^2 + 2a\Delta x$

注：空间运动都可以看成质点或者刚体运动，遵守运动学基本定律和公式。

图 1-2 所示是一维直线运动实物图。其中，图 1-2 (a) 是带电机驱动的直线滑轨，图 1-2 (b) 是不带电机驱动的直接型直线平台，图 1-2 (c) 是不带电机驱动的几款直线滑杆。

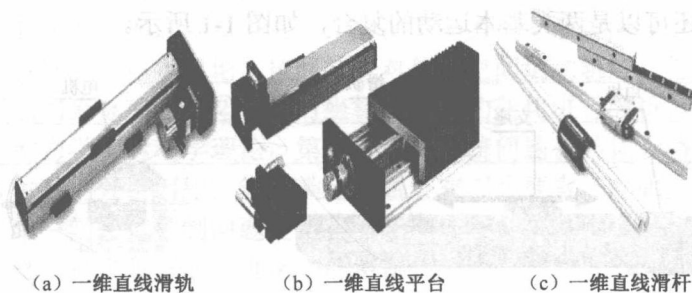


图 1-2 一维直线运动实物图

2. 二维运动

把两个一维直线运动平台互相垂直搭接在一起，就组成了一个二维运动平台。显然，一维运动是二维运动的特例，二维运动是一维直线运动的平面化，是一维轨迹的延伸和拓展。二维运动平台由两个一维运动平台构成，每一个一维运动平台分别代表一个坐标轴，其中与坐标系 x 轴重合的那个平台定义为 x 轴，它的轨迹变化就是 x 轴坐标变化；另一个平台与 y 轴重合，被定义为 y 轴。二维运动轨迹可以是直线，也可以是曲线，曲线轨迹是通过构成二维平台的一维直线运动平台复合运动得到的。二维运动的轨迹是平面曲线，直线是其特例。根据平面坐标系的约定，把二维运动轨迹分析转化为平面坐标 xy 的平面几何曲线分析。图 1-3 所示是二维运动简图，图中有一个 xy 坐标系，分别由两个独立的一维直线平台实现。

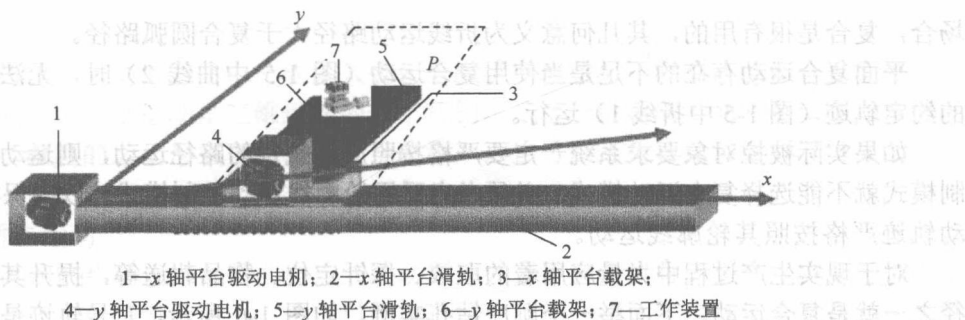
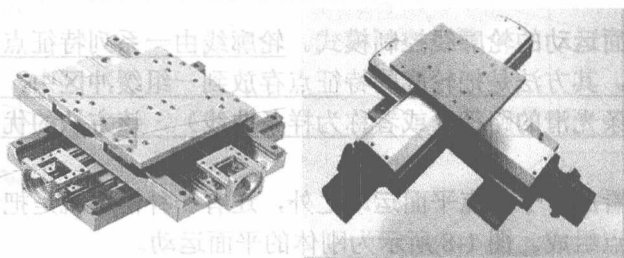


图 1-3 二维运动简图

二维运动平台的工作原理是：y 轴平台驱动电机 4 驱动 y 轴平台载架 6 在 y 轴平台滑轨 5 内做往复直线运动，即 y 轴方向运动；x 轴平台驱动电机 1 驱动 x 轴平台载架 3 在 x 轴平台滑轨 2 内做往复直线运动，即 x 轴方向运动。只要有针对性地驱动 x 和 y 轴电机，工作装置 7 就可以得到任何平面曲线轨迹。

我们把工作装置 7 当成一个运动质点，把 x、y 轴平台载架的运动轨迹看成 x、y 坐标的参数变化，那么二维运动的分析就转化为平面上质点的运动路程、质点的运动速度、质点的运动加速度及质点的运动时间等逻辑关系问题。速度、加速度是矢量，运动轨迹的速度和加速度分析就变成了速度矢量和加速度矢量的分析问题。路程是标量，不可能为负，具有单向性。时间也是标量，也具有单向性。就平面二维运动的轨迹看，轨迹的一般形式是平面曲线，直线是特例。平面运动的特点就是二维双轴的质点复合运动。

图 1-4 所示是二维运动平台实物图，其中图 1-4 (a) 是二维运动平台不带电机驱动的实物图，图 1-4 (b) 是二维运动平台带电机驱动的实物图。



(a) 二维运动平台不带电机驱动 (b) 二维运动平台带电机驱动

图 1-4 二维运动平台实物图

图 1-5 所示是平面运动的另外一种形式——平面复合运动。需要注意的是，平面复合运动是特定的轨迹段，如图 1-5 所示的两条曲线，其中折线 1 由两条直线段构成，曲线 2 是复合路径。平面复合运动在现实生产中是一类典型的运动实现形式，是两个运动单元的运动复合，使其运动轨迹都复合在一起。实现平面复合运动的必要条件是，必须指明两个运动矢量的运动方向和复合因数，并且一定要指明复合因数的比例大小。对于那些在两个运动单元之间连续运动的应用

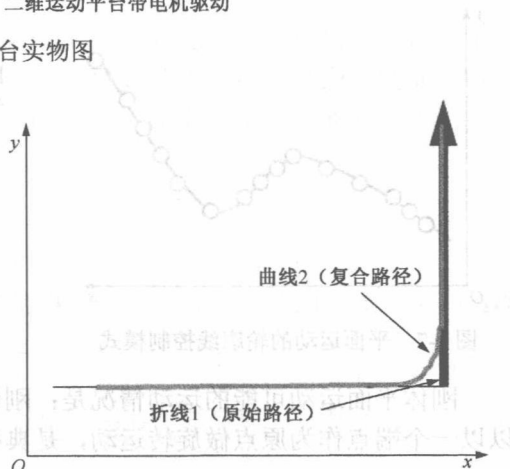


图 1-5 平面复合运动

场合，复合是很有用的，其几何意义为折线运动路径大于复合圆弧路径。

平面复合运动存在的不足是当使用复合运动（图 1-5 中曲线 2）时，无法完全按照原来的约定轨迹（图 1-5 中折线 1）运行。

如果实际被控对象要求系统一定要严格按照原始规定的路径运动，则运动控制系统的控制模式就不能选择复合运动模式，必须考虑采用轮廓线运动控制模式，以确保被控对象的运动轨迹严格按照其轮廓线运动。

对于现实生产过程中大量应用着的取放、探针定位、物品载送等，提升其效率的有效途径之一就是复合运动。下面举一个顺序钻孔实例。如图 1-6 所示，1 号轨迹是由直线组成的折线轨迹，不具有复合功能；2 号轨迹是具有复合功能的运动轨迹。据有关文献介绍，带复合功能的系统与不带复合功能的系统相比，其效率会有比较明显的提升。在图 1-6 所示的案例中具有复合功能的 2 号轨迹比没有复合功能的 1 号轨迹提升效率 10%。

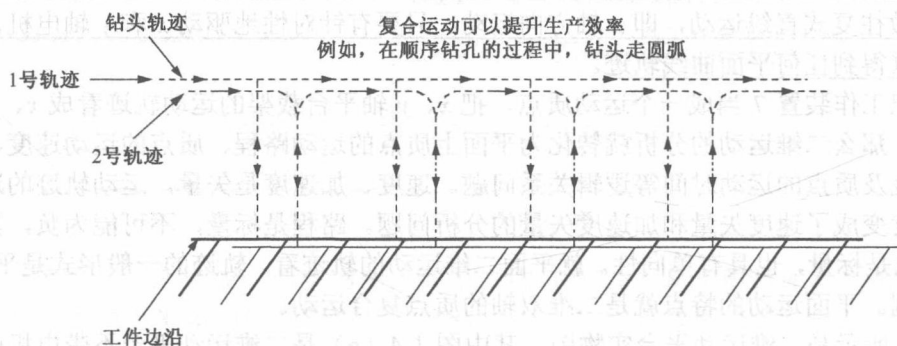


图 1-6 顺序钻孔实例

图 1-7 所示是平面运动的轮廓线控制模式。轮廓线由一系列特征点组成，系统的运动特征是按照轮廓线运动。其方法是把轮廓的特征点存放的一组缓冲区中，并保持相关数据，然后通过这些点建立一条光滑的路径（或者称为样条曲线），该方法的优点是可以确保经过了每一个特征点。

除了把平面运动看成一个质点平面运动之外，还有一种情况就是把运动对象看成一个刚体，刚体由一系列质点组成。图 1-8 所示为刚体的平面运动。

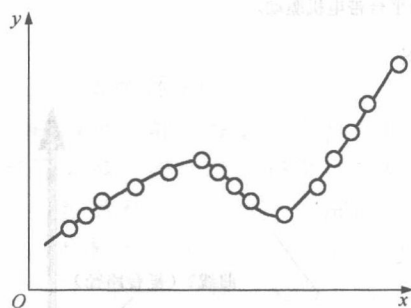


图 1-7 平面运动的轮廓线控制模式

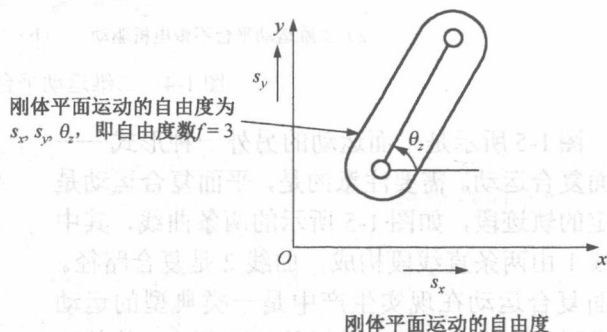


图 1-8 刚体的平面运动

刚体平面运动可能的运动情况是：刚体能够沿着 x 轴平动，也可以沿着 y 轴平移，还可以以一个端点作为原点做旋转运动，是典型的三自由度运动。

3. 三维运动

三维运动从总的运动形态可以分成两大类：三维质点运动和三维刚体运动。三维运动是二维运动的空间化，二维运动是三维运动的一个特例。三个一维运动单元的合成就是典型的三维运动，每一维度的运动形式可以是平动（位移），也可以是旋转。其运动轨迹是空间曲线。

1) 三维质点运动

三维质点运动的移动规律与平面质点的移动规律并无差异，也有三类形式：第一类为空间点对点的移动，可以是直线移动，也可以是旋转运动；第二类为复合移动，是在三个运动轴按照一定的复合比例所做的运动；第三类为空间轮廓线运动。图 1-9 所示是典型的空间质点移动矢量关系，也就是从坐标原点到空间点 (x_0, y_0, z_0) 的笛卡儿坐标关系。三维空间质点移动的轨迹问题还可以转化为复合移动问题和轮廓线追踪问题。

2) 三维刚体运动

图 1-10 所示是空间刚体运动。与图 1-8 相比，图 1-10 中放置于三维空间坐标系内的刚体 A 的运动要比二维平面刚体的运动复杂，平面刚体如前所述只有三个自由度，而空间刚体可以沿着 x 轴平动 s_x ，也可以沿着 y 轴平动 s_y ，还可以沿着 z 轴平动 s_z 。刚体 A 还可以以 x 轴为轴心做旋转运动 θ_x ，类似地，也可以以 y 轴和 z 轴为轴心做旋转运动。因此，空间刚体 A 具有沿着 x 、 y 、 z 轴的三个平移自由度和三个旋转自由度，所以空间刚体具有六个自由度。

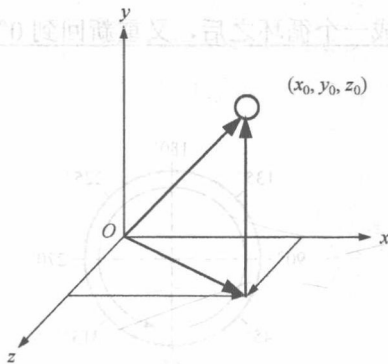


图 1-9 空间质点移动矢量关系

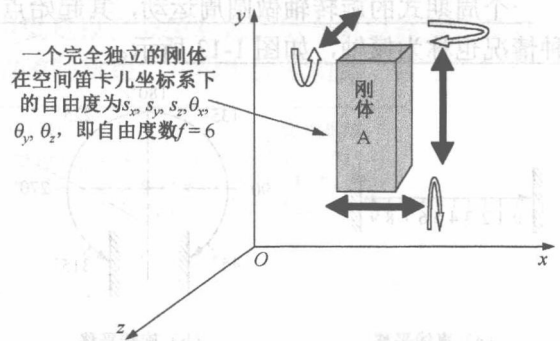


图 1-10 空间刚体运动

图 1-11 所示是三维空间平台的实物。其中，图 1-11 (a) 是龙门架式结构，其特点是受力均匀，这是最常见的一种应用形式；图 1-11 (b) 是悬臂式结构，往往是当空间受限时所采用的结构，很明显，这种结构的受力是不均匀的；图 1-11 (c) 是塔架式结构；图 1-11 (d) 是悬臂式实物图。

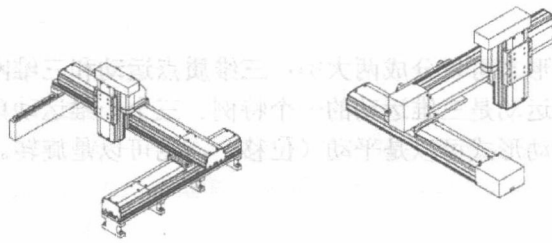
4. 运动控制系统的轴

1) 运动轴

通常，我们把一个在直线段上移动的物体或者按照预定旋转方向旋转的物体定义为运动轴。轴一般分为两类：线性轴和旋转轴。

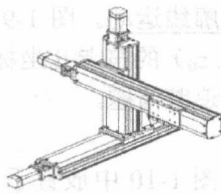
2) 线性轴

线性轴的定义：只有开始位置和结束位置，而且轴的当前实际位置一定是在其开始位置与结束位置之间。

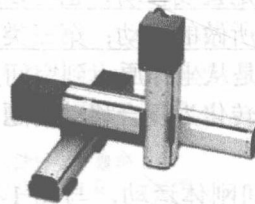


(a) 龙门架式

(b) 悬臂式



(c) 塔架式



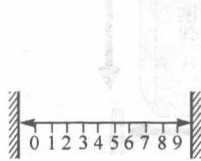
(d) 悬臂式实物图

图 1-11 三维空间平台的实物

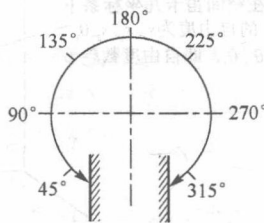
图 1-12 所示是线性轴的两种表现形式。图 1-12 (a) 是直线平移，图的左边点是起点，右边点是终点。图 1-12 (b) 是旋转平移，同样地，左边点是起点，右边点是终点。

3) 旋转轴

一个周期式的旋转轴做圆周运动，其起始点是 0° ，完成一个循环之后，又重新回到 0° 。这种情况也称为模轴，如图 1-13 所示。



(a) 直线平移



(b) 旋转平移

图 1-12 线性轴的两种表现形式

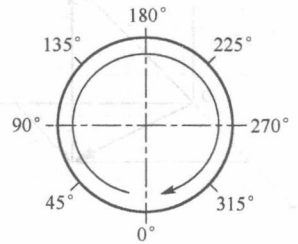


图 1-13 旋转轴

1.1.2 第二类运动系统问题

第二类运动系统问题与风机、水泵、压力、温度等大量实际生产、生活问题是相关联的。根据风机、水泵等的驱动特点，第二类运动系统的控制问题都可以转化为单轴运动控制的周期式旋转控制问题，又称模轴控制问题。

对于单轴周期式旋转控制问题，由三个要素组成：开始速度、目标速度和结束速度。图 1-14 所示是速度与时间的关系梯形图，梯形由三段构成：①从开始速度位起的加速度阶段；②恒速阶段，该阶段的典型特征是速度按照目标速度运行；③减加速度阶段，该阶段将速度降到零，到达结束速度位。