



普通高等教育“十二五”规划教材  
电气工程、自动化专业规划教材

班 华 李长友 主编

# 运动控制系统



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

电气工程、自动化专业规划教材

# 运动控制系统

班 华 李长友 主编

電子工業出版社

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、运动控制器技术、执行器技术、直流电机控制技术、交流电机控制技术、伺服电机控制技术、检测技术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](http://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生教材,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。

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. —北京:电子工业出版社,2012.8

电气工程、自动化专业规划教材

ISBN 978-7-121-17012-6

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(2012)第093781号

策划编辑:余 义

责任编辑:余 义

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:

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:15 字数:384千字

印 次:2012年8月第1次印刷

定 价:32.00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。

质量投诉请发邮件至 [zlts@phei.com.cn](mailto:zlts@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线:(010)88258888。

# 前 言

目前,运动控制系统已经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。运动控制系统作为自动化的一个主要子系统,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。

随着微电子技术与控制理论的发展,运动控制技术得到了快速发展,其趋势为产品一体化。运动控制系统的发展离不开控制理论的发展,离不开控制器的发展,离不开执行器的发展,也离不开传感器等与运动相关的检测技术的发展。

本书以运动控制系统的组成要素为主线,根据要素的功能,全面系统地介绍了运动控制系统的基本原理、组成、分析和设计方法。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,因此本书对很多传统技术的内容做了调整,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,采用技术是 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。本书专门增加一定的篇幅来介绍新兴执行器技术、金属形状记忆合金、磁致伸缩和电磁流变等,使读者可以更加全面地理解和掌握运动控制系统的核心部件。本书还有一个特点,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。另外,还通过应用实例,从运动分析的角度讲述各类运动控制系统都涉及的要素使用问题。

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。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等。

本书共 8 章,第 1 章是本书概述,其主要内容有 5 点:①运动控制研究的问题、第一类运动问题、第二类运动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,并介绍了两款软件开发工具。

第 3 章的专题是执行器,重点为:①执行器基础知识与机械设计需求;②气动执行器;③液压执行器;④电动执行器;⑤新兴执行器技术。

第 4 章主要讲述了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控制系统;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 4.2.4 节对直流电机调速系统控制器的数字仿真做了介绍。

第 5 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 6 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 7 章讲述了有关运动对象位置、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 8 章给出了 6 个有关运动问题的应用实例，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，然后搭建实现需要的运动系统，实现相应的运动控制功能。

本书第 1~7 章由班华高级工程师编写，第 8 章由李长友教授编写，应用实例主要取材于班华、李长友、沈玉杰等的相关科研项目和论文。在编写过程中借鉴了很多同类教材和论文，详见参考文献，在此不一一列举。在此，对在参考文献中提及的相关文章作者表示由衷的感谢。电子工业出版社余义编辑对文字和内容给出了很多中肯的建议，并做了大量有益的修改，付出了辛勤的劳动，在此也表示深深的感谢。

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  
2012 年 7 月

## 反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 运动控制研究的问题.....	1
1.1.1 第一类运动控制问题.....	1
1.1.2 第二类运动控制问题.....	7
1.2 运动控制系统.....	8
1.3 运动控制系统术语.....	9
1.4 运动控制系统的发展历程与未来发展趋势.....	10
1.5 本课程的主要内容和适用对象.....	11
<b>第 2 章 运动控制器技术</b> .....	13
2.1 运动控制系统简介.....	13
2.1.1 运动控制系统的构成.....	13
2.1.2 运动控制系统的任务.....	13
2.2 运动控制器的基本原理.....	14
2.2.1 运动控制器的构成.....	14
2.2.2 轨迹生成器.....	14
2.2.3 插补器.....	23
2.2.4 控制回路.....	34
2.3 运动控制器的硬件.....	40
2.3.1 按照运动控制器核心器件的组成分类.....	40
2.3.2 按照数据的传递形式分类.....	45
2.4 运动控制器的软件.....	47
2.4.1 运动控制器软件体系.....	47
2.4.2 运动控制器的开发应用软件简介.....	49
2.5 运动控制器设计要素.....	52
2.6 运动控制器实例.....	52
习题与思考题.....	54
<b>第 3 章 执行器技术</b> .....	55
3.1 执行器技术基础.....	55
3.2 电动执行部件.....	60
3.2.1 电动缸.....	60
3.2.2 电动执行阀.....	61
3.3 液压执行部件.....	62
3.3.1 液压缸.....	62

3.3.2	液压马达	64
3.4	气动执行部件	65
3.4.1	气缸	65
3.4.2	气动马达	66
3.4.3	控制回路	67
3.5	新型执行器	68
3.5.1	压电执行器	68
3.5.2	形状记忆合金执行器	69
3.5.3	电致聚合物执行器	70
3.5.4	磁致伸缩执行器	71
3.5.5	电、磁流变液体执行器	72
	习题与思考题	78
<b>第4章</b>	<b>直流电机控制技术</b>	<b>79</b>
4.1	直流电机调速概述	79
4.1.1	直流电机调速的发展历程	79
4.1.2	直流电机的调速方法	80
4.1.3	直流电机 PWM 基本电路	82
4.1.4	直流 H 型可逆 PWM 变换器-电机系统的能量回馈	87
4.1.5	直流 PWM 调速系统的数学模型及机械特性	87
4.1.6	调速系统性能指标	88
4.1.7	开环调速系统的机械特性及性能指标	89
4.2	闭环调速系统与调速控制器	91
4.2.1	闭环调速系统	91
4.2.2	调节器设计	103
4.2.3	工程方法——典型系统问题	111
4.2.4	直流电机调速系统控制器的数字仿真	118
	习题与思考题	126
<b>第5章</b>	<b>交流电机控制技术</b>	<b>128</b>
5.1	交流电机调速系统基本理论	128
5.1.1	研究交流电机的解耦问题的必要性	128
5.1.2	交流电机模型	128
5.1.3	交流电机解耦分析	133
5.1.4	交流电机在两相( $\alpha, \beta$ )静止坐标系下的数学模型	135
5.1.5	交流电机在两相( $d, q$ )旋转坐标系下的数学模型	136
5.1.6	交流电机在两相( $M, T$ )旋转坐标系下的数学模型	136
5.2	标量控制	137
5.2.1	电压频率协调控制的变频调速系统	138
5.2.2	可控转差频率控制的变频调速系统	140
5.3	矢量控制	141



5.3.1	矢量控制概述 .....	141
5.3.2	磁通开环转差型矢量控制系统 .....	143
5.3.3	转子磁通观测模型 .....	144
5.3.4	速度、磁通闭环控制的矢量控制系统 .....	145
5.4	直接转矩控制 .....	145
5.5	变频器 .....	149
	习题与思考题 .....	155
<b>第 6 章</b>	<b>伺服电机控制技术 .....</b>	<b>157</b>
6.1	伺服控制系统概述 .....	157
6.2	伺服控制系统的数学模型 .....	158
6.2.1	直流伺服控制系统的数学模型 .....	158
6.2.2	交流伺服控制系统的数学模型 .....	160
6.3	永磁同步电机交流伺服控制 .....	161
6.4	伺服控制系统的设计 .....	165
6.4.1	单环位置伺服控制系统设计 .....	165
6.4.2	双环伺服控制系统设计 .....	168
6.4.3	三环伺服控制系统设计 .....	170
6.4.4	PMSM 伺服控制系统设计 .....	172
6.5	标准商用伺服驱动器应用简介 .....	175
	习题与思考题 .....	188
<b>第 7 章</b>	<b>检测技术 .....</b>	<b>189</b>
7.1	直线位移检测 .....	189
7.1.1	光栅 .....	189
7.1.2	感应同步器 .....	192
7.1.3	磁栅式传感器 .....	194
7.2	角位移检测 .....	197
7.2.1	旋转变压器 .....	197
7.2.2	光电编码器 .....	199
7.3	速度、加速度检测 .....	200
7.3.1	直流测速发电机 .....	200
7.3.2	光电式速度传感器 .....	201
7.3.3	加速度传感器 .....	202
7.4	力、力矩检测 .....	203
7.4.1	测力传感器 .....	203
7.4.2	压力传感器 .....	204
7.4.3	力矩传感器 .....	206
7.4.4	力与力矩复合传感器 .....	207
	习题与思考题 .....	208

<b>第 8 章 运动控制系统应用实例</b> .....	210
8.1 高速电子锯 .....	210
8.2 胡萝卜汁的灌装 .....	213
8.3 点胶机 .....	218
8.4 包装生产线 .....	221
8.5 缠绕生产线 .....	224
8.6 恒压供水系统 .....	227
<b>参考文献</b> .....	231

# 第1章 绪 论

运动是机器的本质特征。运动控制系统是保证机床、机器人及各类先进装备高质和高效运行的关键环节。运动控制技术在装备领域和制造行业的核心技术。由于设备功能千变万化，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，我们把运动控制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控制问题。

(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控制问题。

对第一类运动控制问题而言，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。解决第一类运动问题的要点是根据牛顿运动学理论与电机拖动的基本理论，按照被控制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。然后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；根据牛顿力学和运动学理论，第一类运动控制问题被转化为路程、速度、加速度和时间等几个参数关系的分析问题。表述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；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。

第二类运动控制问题是由具体的、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；再例如，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。通过前述分析发现，这些要求都能与电机的转速建立起函数关系，因此第二类运动控制问题就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。据有关统计资料表明，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 第一类运动控制问题

凡是被控制对象的空间位置或者轨迹随着运动而发生改变的運動控制系统，都属于第一类运动控制系统。

因为第一类运动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控制问题进行分析与解析，我们把第一类运动控制问题转化为物理学的牛顿运动学问题。把被控对象的研究转化为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。

第一类运动控制的核心是研究被控制对象的运动轨迹，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。

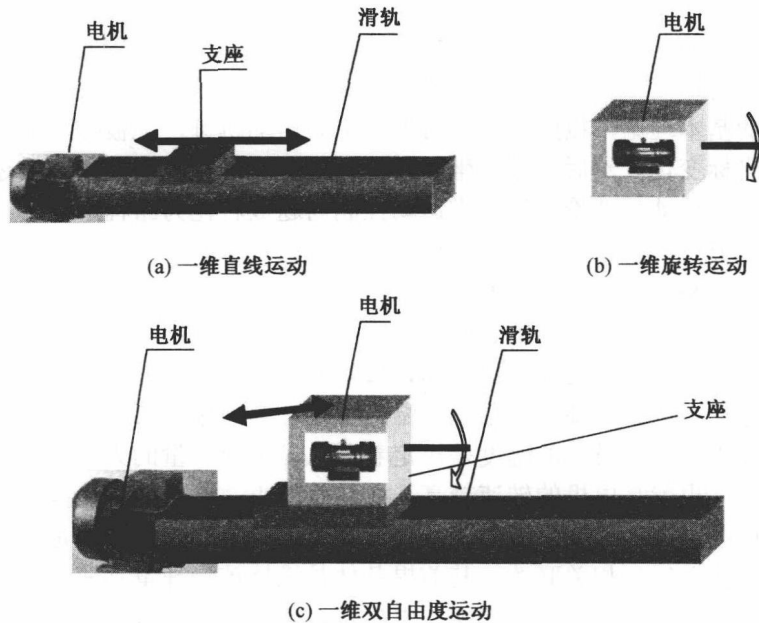


图 1-1 一维运动

图 1-1(a)所示的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，运动的相关要素是起始位置、终止位置及两点之间的距离；图 1-1(b)所示的是一维旋转运动，其相关要素是起始角度位、终止角度位和旋转角度；图 1-1(a)、(b)都是一维单自由度运动；图 1-1(c)所示的是图 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。

图 1-2 所示的是一维直线运动的几款实物。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)是不带驱动电机的几款直线滑杆。

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。

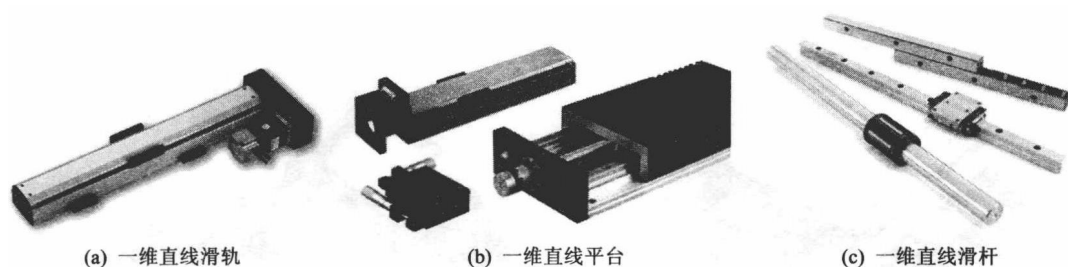


图 1-2 一维直线运动实物图

## 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平台构成, 每一个一维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 所示的是一个二维平台的组成示意图, 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。

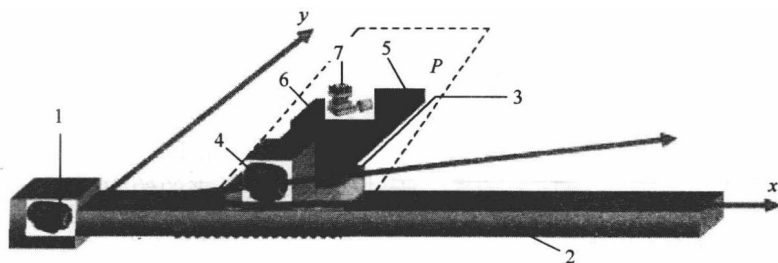


图 1-3 二维运动简图

1— $x$  轴平台驱动电机; 2— $x$  轴平台滑轨; 3— $x$  轴平台载架;  
4— $y$  轴平台驱动电机; 5— $y$  轴平台滑轨; 6— $y$  轴平台载架; 7—工作装置

二维平台的工作原理是,  $y$  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 所示的是二维平台的实物，其中图 1-4(a)是  $xy$  平台不带电机驱动的实物图，图 1-4(b)是  $xy$  平台带电机驱动的实物图。

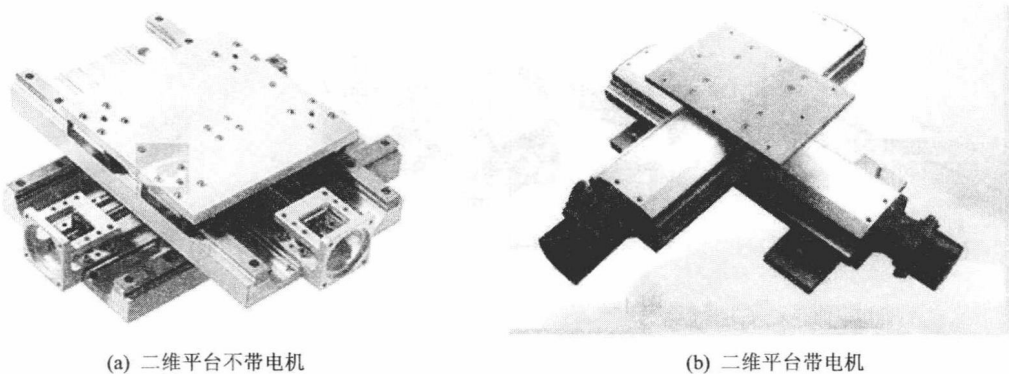


图 1-4 二维平台的实物图

图 1-5 所示的是平面运动的另外一种形式——复合运动。需要注意的是，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 是由两条直线段构成的，曲线 2 是复合路径。

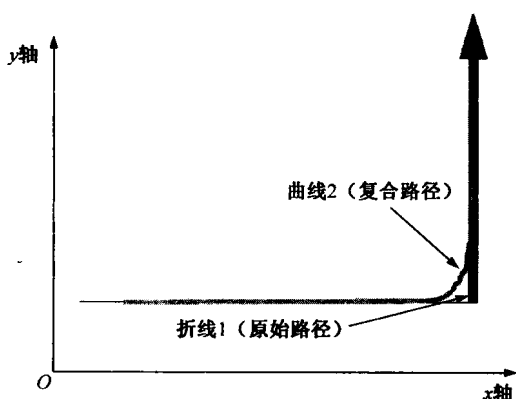


图 1-5 平面复合运动

复合运动在现实生产中是一类典型的运动实现形式，如图 1-5 所示，复合运动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。

复合运动存在的不足是当使用复合运动时，无法完全按照原来的约定轨迹运行。

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的话，那么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的例子。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%。

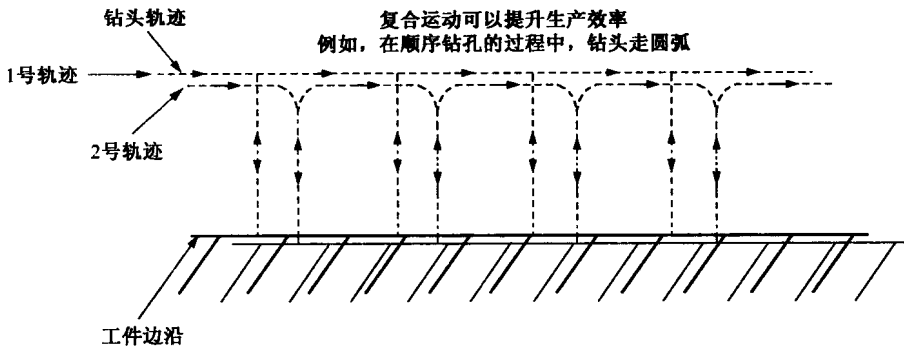


图 1-6 复合（融合）例

图 1-7 所示的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到一组缓冲区中，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，刚体是由一系列质点组成的。图 1-8 所示的是刚体的平面运动图。

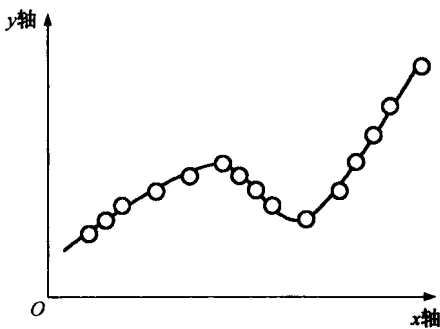


图 1-7 平面运动的轮廓线控制模式

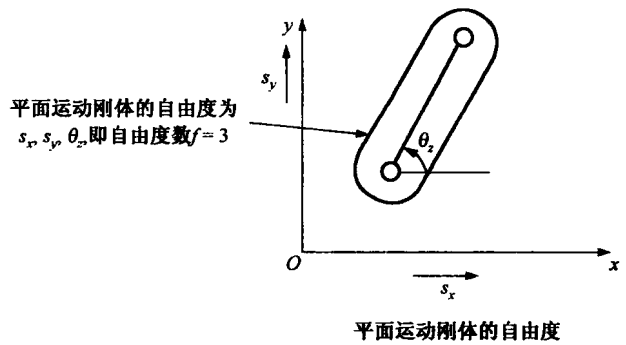


图 1-8 刚体的平面运动图

平面刚体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移动规律无差异，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 所示的是典型的空

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 所示的是一个放置于三维空间坐标系内的一个刚体 A。与图 1-8 比较, 图 1-10 中刚体 A 的运动要比二维平面刚体运动复杂, 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  $\theta_x$ , 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  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个轴的平移自由度和三个旋转自由度。所以空间刚体具有 6 个自由度。

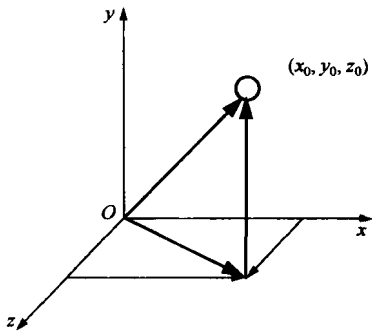


图 1-9 空间质点移动矢量关系

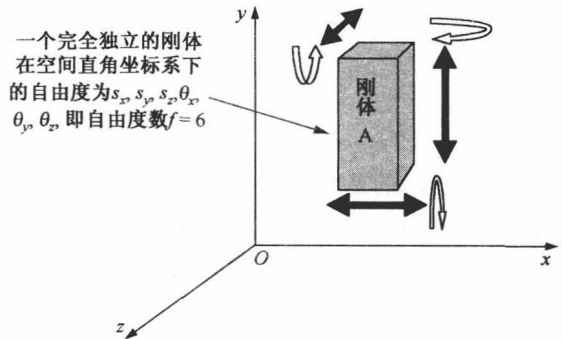


图 1-10 空间刚体运动

图 1-11 所示的是四个三维平台的实物。其中, 图 1-11(a)是龙门架式结构三维平台, 结构特点是受力均匀, 这是最常见的一种应用形式; 图 1-11(b)是悬臂梁式结构, 往往是当空间受限时所采用的结构, 很明显, 这种机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。

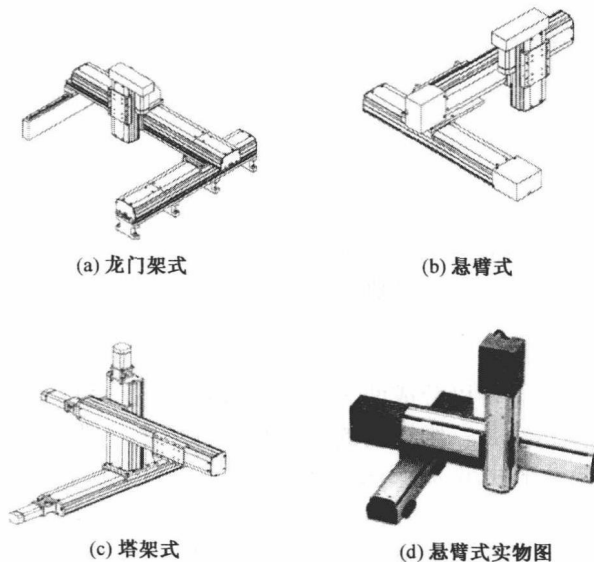


图 1-11 三维平台的实物



## 4. 运动控制系统的轴

### 1) 运动轴

通常，我们把一个定义在直线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

线性轴的定义为：只有初始位置和结束位置，而且轴的当前实际位置一定是在其初始位与结束位之间，如图 1-12 所示。

图 1-12 所示的是两种表现形式。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)是旋转移位，同样地，左面点是起点，右面点是终点。

### 3) 旋转轴

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

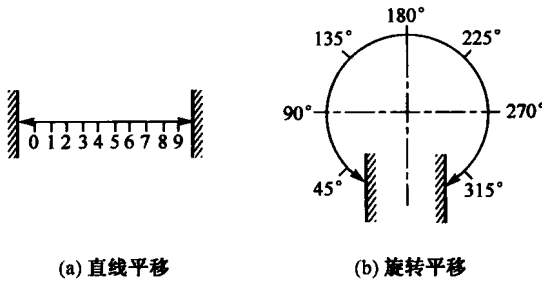


图 1-12 线性轴的形式

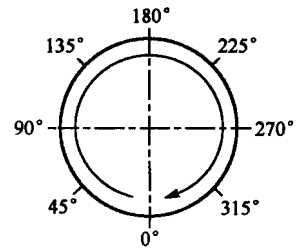


图 1-13 旋转轴

## 1.1.2 第二类运动控制问题

第二类运动控制问题与风机、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。

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 所示的是一个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。

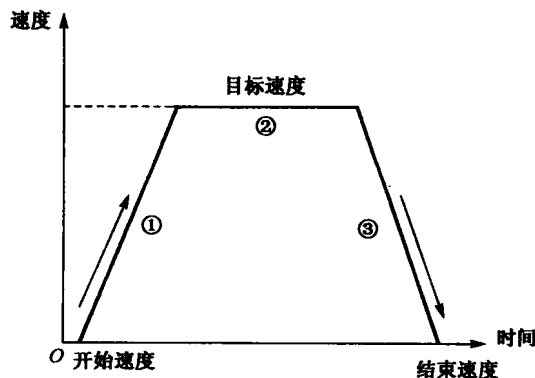


图 1-14 速度与时间的关系梯形图