



国际制造业先进技术译丛

 Springer

工业自动化中的 驱动与控制

Drives and Control
for Industrial Automation



[新]

陈国强 (Kok Kiong Tan) 著
安迪·苏加那·普特拉 (Andi Sudjana Putra)
刘磊 谢宗涛 孙帅 译

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际制造业先进技术译丛

工业自动化中的驱动与控制

[新] 陈国强 (Kok Kiong Tan) 著
安迪·苏加那·普特拉 (Andi Sudjana Putra) 译
刘磊 谢宗涛 孙帅



机械工业出版社

Drives and Control for Industrial Automation

by Kok Kiong Tan and Andi Sudjana Putra

Copyright © 2011 Springer London

Springer London is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved.

This title is published in China by China Machine Press with license from Springer. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书由 Springer 授权机械工业出版社在中国大陆地区（不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区）出版与发行。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2014-7786 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

工业自动化中的驱动与控制/ (新加坡) 陈国强, (新加坡) 安迪·苏加那·普特拉著; 刘磊, 谢宗涛, 孙帅译. —北京: 机械工业出版社, 2016.9

(国际制造业先进技术译丛)

书名原文: Drives and Control for Industrial Automation

ISBN 978-7-111-55015-0

I. ①工… II. ①陈…②安…③刘…④谢…⑤孙… III. ①工业自动控制—研究 IV. ①TB114.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 238193 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: 舒雯 责任编辑: 舒雯

责任校对: 刘岚 封面设计: 鞠杨

责任印制: 常天培

河北新华第一印刷有限责任公司印刷

2017 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·10 印张·194 千字

0 001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-55015-0

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

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

本书以工业伺服驱动技术和控制技术为主要内容，介绍了液压伺服系统、气动系统、电力驱动系统、压电驱动器和伺服驱动控制系统，书中详细介绍了各种工业伺服和驱动的基本原理、结构和特点，以及现场总线协议和通用现场总线。此外，本书总结了工业运动控制的发展趋势，特别是超精密机加工、微制造、微组装、精密计量测试及相应的驱动技术。本书的主要读者对象是对驱动、传感器、控制系统设计感兴趣的工程技术人员，尤其是那些致力于系统设计与控制同时需要在驱动与控制系统方面有很广知识面的技术人员，本书也非常适合作为“控制系统”“机电一体化系统设计”“工业驱动”“设备与传感器”等课程的教材。

译丛序言

一、制造技术长盛永恒

先进制造技术是20世纪80年代提出的,由机械制造技术发展而来。通常可以认为它是将机械、电子、信息、材料、能源和管理等方面的技术,进行交叉、融合和集成,综合应用于产品全生命周期的制造全过程,包括市场需求、产品设计、工艺设计、加工装配、检测、销售、使用、维修、报废处理、回收利用等,以实现优质、敏捷、高效、低耗、清洁生产,快速响应市场的需求。因此,当前的先进制造技术是以产品为中心,以光机电一体化机械制造技术为主体,以广义制造为手段,具有先进性和时代感。

制造技术是一个永恒的主题,与社会发展密切相关,是设想、概念、科学技术物化的基础和手段,是所有工业的支柱,是国家经济与国防实力的体现,是国家工业化的关键。现代制造技术是当前世界各国研究和发展的主题,特别是在市场经济高度发展的今天,它更占有十分重要的地位。

信息技术的发展并引入到制造技术,使制造技术产生了革命性的变化,出现了制造系统和制造科学。制造系统由物质流、能量流和信息流组成,物质流是本质,能量流是动力,信息流是控制;制造技术与系统论、方法论、信息论、控制论和协同论相结合就形成了新的制造学科。

制造技术的覆盖面极广,涉及机械、电子、计算机、冶金、建筑、水利、电子、运载、农业以及化学、物理学、材料学、管理科学等领域。各个行业都需要制造业的支持,制造技术既有普遍性、基础性的一面,又有特殊性、专业性的一面,制造技术具有共性,又有个性。

我国的制造业涉及以下三方面的领域:

- 机械、电子制造业,包括机床、专用设备、交通运输工具、机械设备、电子通信设备、仪器等;
- 资源加工工业,包括石油化工、化学纤维、橡胶、塑料等;
- 轻纺工业,包括服装、纺织、皮革、印刷等。

目前世界先进制造技术沿着全球化、绿色化、高技术化、信息化、个性化和服务化、集群化六个方向发展,在加工技术上主要有超精密加工技术、纳米加工技术、数控加工技术、极限加工技术、绿色加工技术等,在制造模式上主要有自动化、集成化、柔性化、敏捷化、虚拟化、网络化、智能化、协作化和绿色

化等。

二、图书交流源远流长

近年来,国际交流与合作对制造业领域的发展、技术进步及重大关键技术的突破起到了积极的促进作用,制造业科技人员需要及时了解国外相关技术领域的最新发展状况、成果取得情况及先进技术应用情况等。

必须看到,我国制造业与工业发达国家相比,仍存在较大差距。因此必须加强原始创造,在实践中继承和改造,学习国外的先进制造技术和经验,提高自主创新能力,形成自己的创新体系。

国家、地区间的学术、技术交流已有很长的历史,可以追溯到唐朝甚至更远一些,唐玄奘去印度取经可以说是一段典型的图书交流佳话。图书资料是一种传统、永恒、有效的学术、技术交流方式,早在20世纪初期,我国清代学者严复就翻译了英国学者赫胥黎所著的《天演论》,其后学者周建人翻译了英国学者达尔文所著的《物种起源》,对我国自然科学的发展起到了很大的推动作用。

图书是一种信息载体,图书是一个海洋,虽然现在已有网络、光盘、计算机等信息传输和储存手段,但图书更具有广泛性、适应性、系统性、持久性和经济性,看书总比在计算机上看资料要方便,不同层次的要求可以参考不同层次的图书,不同职业的人员可以参考不同类型的技术图书,同时它具有比较长期的参考价值 and 收藏价值。当然,技术图书的交流具有时间上的滞后性,不够及时,翻译的质量也是个关键问题,需要及时、快速、高质量的出版工作支持。

机械工业出版社希望能够在先进制造技术的引进、消化、吸收、创新方面为广大读者做出贡献,为我国的制造业科技人员引进、纳新国外先进制造技术的出版资源,翻译出版国际上优秀的制造业先进技术著作,从而能够提升我国制造业的自主创新能力,引导和推进科研与实践水平不断进步。

三、选择严谨质高面广

1) 精品重点高质 本套丛书作为我社的精品重点书,在内容、编辑、装帧设计等方面追求高质量,力求为读者奉献一套高品质的丛书。

2) 专家选择把关 本套丛书的选书、翻译工作均由国内相关专业的专家、教授、工程技术人员承担,充分保证了内容的先进性、适用性和翻译质量。

3) 引纳地区广泛 主要从制造业比较发达的国家引进一系列先进制造技术图书,组成一套“国际机械工程先进技术译丛”。当然其他国家的优秀制造科技图书也在选择之内。

4) 内容先进丰富 在内容上应具有先进性、经典性、广泛性,应能代表相关专业的技术前沿,对生产实践有较强的指导、借鉴作用。本套丛书尽量涵盖制造业各行业,例如机械、材料、能源等,既包括对传统技术的改进,又包括新的设计方法、制造工艺等技术。

5) 读者层次面广 面对的读者对象主要是制造业企业、科研院所的专家、研究人员和工程技术人员, 高等院校的教师和学生, 可以按照不同层次和水平要求各取所需。

四、衷心感谢不吝指教

首先要感谢许多积极热心支持出版“国际机械工程先进技术译丛”的专家学者, 积极推荐国外相关优秀图书, 仔细评审外文原版书, 推荐评审和翻译的知名专家, 特别要感谢承担翻译工作的译者, 对各位专家学者所付出的辛勤劳动表示深切敬意, 同时要感谢国外各家出版社版权工作人员的热心支持。

本套丛书希望能对广大读者的工作提供切实的帮助, 欢迎广大读者不吝指教, 提出宝贵意见和建议。

机械工业出版社

译者序

我们非常高兴将此书介绍给广大国内读者。感谢 Springer 出版社和机械工业出版社对翻译出版此书提供的帮助。最后,在翻译此书的过程中,李静做了大量校对和整理工作,在此表示感谢。

译者

2016 年 8 月于西安

前言

工业自动化在现代工业中扮演着非常重要的角色，尤其是在这个高精度快速生产的时代。工业自动化的目标是在工业领域中用合理的费用来实现快速高效的生。工业自动化最适合大规模生产同质化产品，然而大部分行业生产的产品数量较低。在这种状况下，我们的挑战就是如何在合理的安装成本下发展自动化系统，因此广大读者对与之相关的知识技术的需求也与日俱增。

在工业自动化中，控制系统与驱动是密不可分的两个部分，本书重新整理了与工业自动化控制与驱动相关的资料，从伺服控制宏观角度写起，重点介绍了用于实现精确控制的主要驱动类型，包括液压伺服、气动驱动、电力驱动和压电驱动。每一章都对执行器、传感器、控制器主要部件进行了详细讨论，考虑到上述驱动的控制原理相似，因此没有深入分析控制理论，而是将与运动控制自身相关的技术和理论单独放在第5章中讨论。同样，数字通信协议单独放在了第6章，并总结了运动和数字化精确控制的重要性和快速发展趋势。第7章对运动控制进行了更为通用的介绍。本书体现了机电一体化的整体性、细微差别和协同集成性，也反映了当前工业自动化协同效应的现实问题。

忽略机电一体化之间的细微差别，本书的结构非常适合循序渐进的教学。同时每一章的内容都可以在不影响读者理解的情况下独立学习。本书的读者范围很广，包括工业自动化专业的学生、技术人员、工程师和科研人员等。本书使用了简洁的基础知识和语言，如用方程的基本原理解释一些确切的概念，这样既不会降低初学者的积极性，又不会使基础扎实的读者觉得冗余。想了解工业自动化领域各种传感器、执行器、控制器应用的读者通过本书可以有所收获。读者也会发现这本书所反映的当前工业采用的方法和观点，至今非常合理且简单易懂，而且可以联系到自己以前所学的专业知识。

液压和压电驱动，以及控制原理和数字通信协议的引入都是为了使本书能够涵盖控制系统的每个方面。本书的讨论从每个设备的发展和基本原理到组装系统的过程。书中各执行器、传感器、控制系统和组装系统的协同一致性也展示了当前工业的应用趋势。本书的主要读者对象是对驱动、传感器、控制系统设计感兴趣的专家、工程师和学生。本书也非常适合作为“控制系统”“机电一体化系统设计”“工业驱动”“设备与传感器”课程的教材。对于专业人士，本书最适合那些致力于系统设计与控制同时需要在驱动与控制系统方面有较宽较深入认识的读者。

为了准确地向读者介绍每一个概念，本书配有很多插图，尤其是为了体现出工业系统的工作原理和结构。

如果没有同事和朋友们的慷慨帮助，本书就不可能完成。作者要在此向以下这些人表达最真诚的谢意，他们分别是 Dr. Huang Sunan, Dr. Zhao Shao, Dr. Tang Kok Zuea 和 Mr. Chen Silu，他们都对本书提供了非常珍贵的参考资料。作者也要感谢以下这些人，他们分别是 Mr. Oliver Jackson, Ms. Aislinn Bunning 和 Ms. Charlotte Cross，他们对本书的编辑和出版都做出了很大贡献。最后，我要向我的家人表示感谢，感谢他们对我的爱和支持。

新加坡 Kok Kiong Tan Andi Sudjana Putra

目 录

译丛序言

译者序

前言

第1章 伺服控制系统概述	1
1.1 伺服控制系统的目标	1
1.2 伺服控制单元	4
1.2.1 测量	4
1.2.2 驱动	4
1.2.3 功率调制	5
1.2.4 控制	5
1.2.5 系统集成	6
第2章 液压伺服和气动驱动	7
2.1 伺服液压和气动驱动概述	7
2.2 液压和气动驱动基础	9
2.2.1 基本定义和原理	9
2.2.2 液压油	11
2.2.3 流体驱动的优势	12
2.3 液体驱动系统的构成	13
2.3.1 主电源	13
2.3.2 液压泵	13
2.3.3 液压马达	17
2.3.4 液压活塞/液压缸	20
2.3.5 控制阀	22
2.3.6 传感器	28
2.3.7 辅助设备	31
2.4 基本液压回路	34
2.4.1 恒流系统	34
2.4.2 恒压系统	34
2.4.3 恒功率系统	34
2.4.4 液压回路的联锁	35

第3章 电力驱动系统	36
3.1 电力驱动概述	36
3.2 电动机	38
3.2.1 步进电动机	39
3.2.2 直流电动机	42
3.2.3 交流电动机	45
3.2.4 线性电动机	50
3.3 电力电子	52
3.3.1 直流-直流转换器	53
3.3.2 直流-交流转换器	58
3.3.3 交流-交流转换器	60
3.3.4 交流-直流转换器	61
3.4 传感器	63
3.4.1 位置测量	63
3.4.2 速度测量	66
3.4.3 加速度测量	66
3.4.4 转矩测量	66
3.5 电力驱动程序的配置	67
第4章 压电驱动器	70
4.1 固态驱动器和压电致动器	70
4.2 压电效应	71
4.3 非线性压电致动器	73
4.4 压电致动器的机械连接	75
4.4.1 缺口接头	77
4.4.2 交叉带轴和车轮铰链	77
4.4.3 被动接点	78
4.4.4 标准旋转接头	79
4.4.5 标准平移接头	80
4.5 应用实例	80
第5章 控制系统的伺服驱动器	86
5.1 开环控制与闭环控制	86
5.2 伺服控制器的挑战	86
5.2.1 系统设计	87
5.2.2 非线性动力学	87
5.2.3 扰动	92

5.3 伺服控制结构	93
5.3.1 轨迹发生器	94
5.3.2 反馈控制	94
5.3.3 前馈补偿	103
5.3.4 状态反馈观测器	104
5.3.5 陷波滤波器	105
5.4 实现	106
5.4.1 数字控制	106
5.4.2 模拟控制	109
5.5 IEC 61131-3 编程标准	110
5.5.1 梯形图	111
5.5.2 指令列表 (IL)	112
5.5.3 结构化文本 (ST)	112
5.5.4 顺序功能图 (SFC)	113
5.5.5 功能框图 (FBD)	114
5.5.6 连续功能图 (CFC)	116
第6章 数字通信协议	117
6.1 现场总线的发展	117
6.1.1 分布式控制系统	117
6.1.2 私有协议的问题	120
6.2 现场总线协议栈	121
6.2.1 物理层	122
6.2.2 链路层	124
6.2.3 网络层	126
6.2.4 应用层	127
6.2.5 用户层	127
6.2.6 遍历堆栈	127
6.3 通用现场总线	127
6.3.1 CANopen 总线	127
6.3.2 过程现场总线	128
6.3.3 基础现场总线	129
6.3.4 火线	130
6.3.5 Sercos 总线	131
6.3.6 以太网	131
6.4 液压/气动和电动驱动的应用	132

6.4.1 液压/气动驱动器的现场总线	133
6.4.2 电驱动装置的现场总线	134
第7章 运动控制的发展趋势	135
7.1 背景	135
7.1.1 纳米技术	135
7.1.2 生物技术	135
7.2 超精密加工	136
7.2.1 超精密主轴	136
7.2.2 准分子激光微加工	137
7.3 微制造	138
7.3.1 光刻技术	138
7.3.2 微机电系统 (MEMS)	138
7.4 微组装	138
7.5 精密计量测试	139
7.6 驱动技术	139
7.6.1 微制造	139
7.6.2 微装配	140
7.6.3 微计量	140
参考文献	142

第 1 章 伺服控制系统概述

术语 Servo 起源于拉丁语 Servus，意思是受雇人或跟随者，以这个角度看，伺服控制系统可以定义为一个控制所需变量，密切跟踪用户指定目标的系统。由于生活在亚历山大城的 Ktesbios（约公元前 200 年）发明了水钟，所以伺服控制系统的产生一般都归功于 Ktesbios。而现代伺服控制的持续发展始于 1788 年，詹姆斯·瓦特发明了飞球调速器用于控制蒸汽机的速度。随后的流量阀和流量调节装置的发明都对伺服控制做出了很大的贡献。历史上工业革命和技术革命的出现都极大地促进了伺服控制系统的发展。除了这些“硬件”的发明，数学方法和控制算法也被重新进行了设计。例如李亚普诺夫在 1890 年发明的稳定性判据和 1920 年发明的频域分析法。在第二次世界大战期间，伺服电动机应用在多种军事应用上，如精确制导和导弹控制、军事目标跟踪和导航系统，这些都推动了伺服控制领域的发展。

如今伺服控制已经成为几乎每一个自动化系统或过程的组成部分，包括在制造业、化工、石化、运输、军事和生物医学等方面，上述伺服控制的广泛定义仍然成立，但本着对当今产品和生产过程更加严格的要求，对伺服控制系统跟踪性能方面的期望已经显著提高。

本书内容专注于运动控制系统在应用领域的伺服控制，但是本书中所讨论的一些话题仍然适用于其他应用领域，如过程控制系统。

1.1 伺服控制系统的目标

伺服控制系统的目标通常都是一个被控信号用指定的速度和精度跟踪一个参考输入信号（有时也称为设定点），同时要保持系统的鲁棒性使被控信号一直沿预定轨迹变化，但有时也会有一些不可预期的扰动影响。

在运动控制应用领域，伺服控制涉及运动使能器（即执行器）的控制以实现执行器所连接负载期望的运动轨迹。无论是运动变量，如距离、位置、速度、加速度，还是运动诱导变量，如力和转矩等，扰动都会造成控制过程中出现负载变化和运动阻力，如摩擦力、弹力、齿槽力等。

伺服控制系统的参考信号输入到伺服控制系统，它可用于优化产品质量或过程性能，下面用两个例子来说明这一点。

例 1.1（注塑机）注塑成型机的冲头速度曲线会影响到其中塑料部件制造的

精度和一致性。其优化填充横截面取决于多种因素，如特定的树脂的材料特性和冲头的几何形状，并且它通常采用计算机仿真软件设计生成整个系统的模型。图 1.1 所示为冲头速度曲线的一个例子，采用期望曲线作参考信号，注塑机伺服控制系统迫使冲头速度以最小偏移量跟踪曲线。

图 1.1 所示为注塑成型系统的最佳冲头速度曲线。速度曲线是一种非常典型的速度曲线，在填充初期横截面积增大，此后横截面保持恒定。冲头速度曲线可以分为五部分，曲线的第一部分用于填充浇道，速度快速增长后保持恒定；第二部分曲线速度迅速减小以消除栅极喷射；第三部分曲线对应填充腔的增大横截面积；而第四部分是填充腔的恒定横截面部分；最后第五部分曲线速度减小，以消除冲洗和过度包装影响。上述所有目标都必须在很短的填充时间内完成。

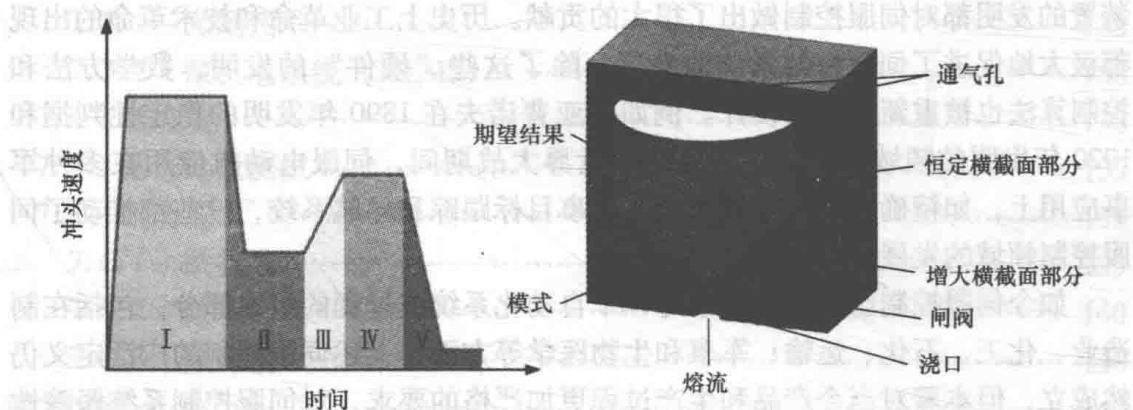


图 1.1 注塑成型系统的最佳冲头速度曲线

在上述注塑成型机应用实例中操作参数是不连续的。由于各种原因也有许多连续运动的需求，我们将在下面的例子中给出。

例 1.2（飞行控制）有经验的飞行员能够让飞机非常平滑地起飞，使飞机上的乘客和乘务员的不适程度为最小。飞机沿着跑道的速度曲线决定了起飞的平滑性。图 1.2 所示为三种典型场景下飞机平滑起飞速度曲线。飞行员通过伺服控制系统来跟踪这条曲线。我们既可以是在真实飞机上，也可以通过飞行模拟器来培训飞行员。

伺服控制系统性能通过测量目标参考信号与跟踪性能指标来评估，通常基于均方根跟踪误差。对于点对点跟踪（如参考信号阶跃变化）可以使用传统性能指标，包括上升时间、超调量和稳态误差。图 1.3 所示为这些指标和系统单位阶跃响应的关系，这是一种典型二阶系统，阶跃响应的变化会导致输出超过设定值，振荡一段时间，逐渐下降到设定值的稳定区间。我们通常用一个比率来表示超调量，图 1.3 的表达式如下

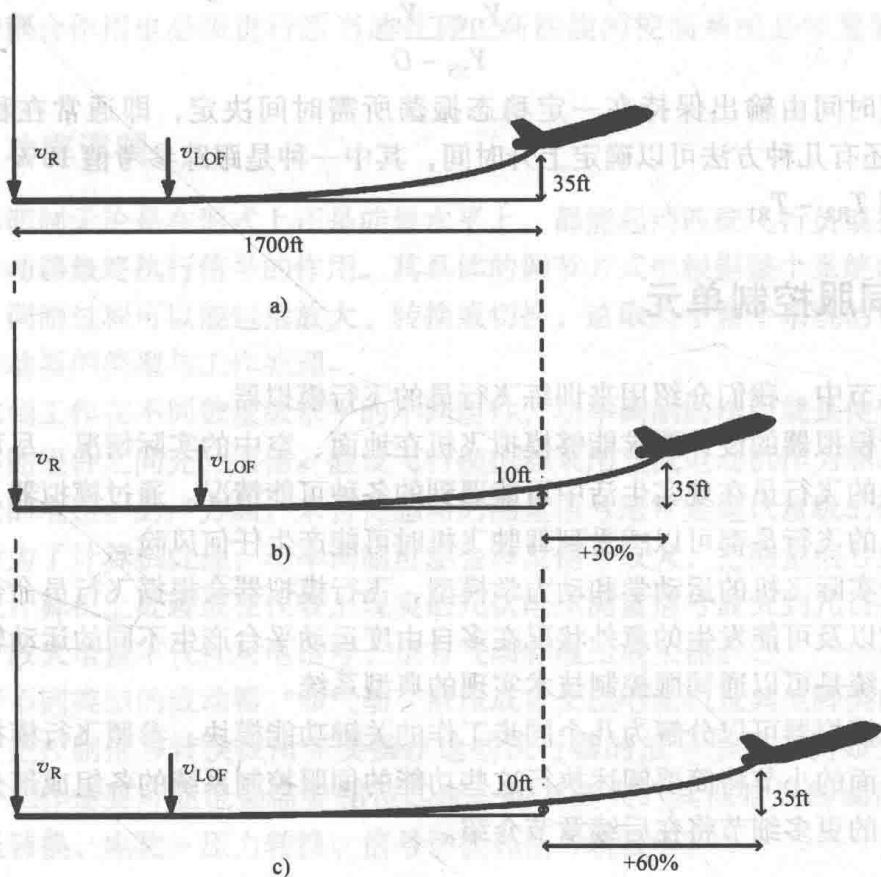


图 1.2 飞机平滑起飞速度曲线 (包括转速 v_R , 脱离速度 v_{LOF})

a) 正常旋转 b) 低速旋转 c) 欠旋转

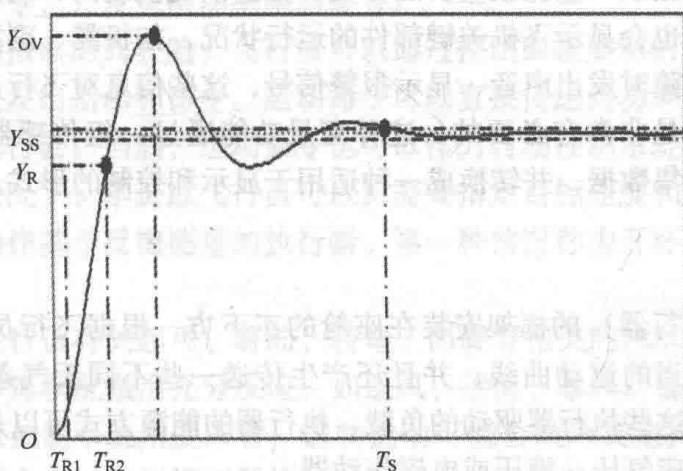


图 1.3 阶跃响应的传统性能指标 (O 表示原点, Y_{SS} 表示稳态值, Y_{OV} 表示超调量, Y_R 表示上升值, T_R 表示上升时间, T_S 表示稳定时间)