

**ASEA**

培训与考试指定参考丛书

**ASEA**  
**ASEA**

自动化系统工程师资格认证



# 机械制造自动化

中国自动化学会 ASEA 办公室 组编

吴惕华 主编



 **机械工业出版社**  
CHINA MACHINE PRESS

ASEA 培训与考试指定参考丛书

# 机械制造自动化

中国自动化学会 ASEA 办公室 组编

吴惕华 主编

蔡满军 王振臣 参编



机械工业出版社

本书全面地介绍了机械制造自动化的基本知识、控制技术、控制系统的分析和设计、应用现状和最新发展。主要内容包括电力拖动及其控制系统、继电控制系统及控制元件、可编程序控制技术、数控技术、工业机器人、先进制造系统、控制系统工程设计等。

本书内容丰富、覆盖面广、重点突出、联系实际，叙述深入浅出，可读性强。不仅是自动化系统工程师资格认证（ASEA）培训和考试的指定参考书，也可供机械行业的其他工程技术和管理人员自学，或作为大专院校有关专业师生的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

机械制造自动化/中国自动化学会 ASEA 办公室组编.  
—北京:机械工业出版社,2006.4  
(ASEA 培训与考试指定参考丛书)  
ISBN 7-111-18766-0

I. 机… II. 中… III. 机械制造-自动化技术-工程  
技术人员-资格考核-自学参考资料 IV. TH165

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 025378 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)  
责任编辑:陈振虹 版式设计:张世琴  
责任校对:程俊巧 责任印制:洪汉军  
北京京丰印刷厂印刷  
2006 年 5 月第 1 版·第 1 次印刷  
787mm×1092mm  $\frac{1}{16}$  12.5 印张·303 千字  
0 001—4 000 册  
定价:22.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换  
本社购书热线电话 (010) 68326294  
编辑热线电话 (010) 88379739  
封面无防伪标均为盗版

# 自动化系统工程师资格认证 (ASEA)

## 领导小组

戴汝为 吴启迪 孙优贤 李衍达 孙柏林 马正午 李爱国

## 培训与教材编审委员会

主 任	吴惕华 (河北省科学院)
常务副主任	萧德云 (清华大学, 兼丛书执行主编)
副 主 任	韩崇昭 (西安交通大学)
秘 书 长	刘朝英 (河北科技大学)
	胡毓坚 (机械工业出版社)
委 员	(按姓氏笔画排序):
	马竹梧 (冶金自动化院)
	尹怡欣 (北京科技大学)
	王建辉 (东北大学)
	王钦若 (广东工业大学)
	刘祥官 (浙江大学)
	刘朝英 (河北科技大学)
	关新平 (燕山大学)
	孙鹤旭 (河北工业大学)
	杨煜普 (上海交通大学)
	金以慧 (清华大学)
	胥布工 (华南理工大学)
	段建民 (北京工业大学)
	胡毓坚 (机械工业出版社)
	董春利 (大连职业技术学院)
	廖晓钟 (北京理工大学)
	潘立登 (北京化工大学)

# 编者的话

为适应在我国开展自动化系统工程师资格认证 (Automation System Engineer Accreditation, ASEA) 的需要, 中国自动化学会全国 ASEA 办公室决定, 由 ASEA 培训与教材编审委员会负责策划、组织编写了这套《ASEA 培训与考试指定参考丛书》。全套丛书共有 20 本左右, 从 2006 年起开始陆续出版问世, 计划用 2~3 年时间完成, 以满足广大自动化系统工程技术人員参加不同层面的 ASEA 培训与考试的需求。

本套丛书主要面向 ASEA 考试, 同时兼顾 ASEA 培训及后续的工程教育, 分五大类出版: (1) 自动化专业基础知识, 包括自动控制理论、自动化控制系统、仿真技术、自动化元件等; (2) 自动化技术基础知识, 包括计算机控制、网络与通信、单片机技术、监控组态技术、嵌入式系统等; (3) 行业自动化专业知识, 包括石油化工自动化、电站过程自动化、冶金工业自动化、机械制造自动化、轻工与制药自动化、煤炭工业自动化、农业自动化、交通智能管理、航空航天自动化、军事工业自动化、建筑智能化、企业信息化、数字化服务、自动化系统工程设计、自动化项目管理等; (4) 自动化专业技能知识, 包括过程控制技能、运动控制技能、计算机控制技能等; (5) ASEA 培训与考试指南, 包括 ASEA 报考范围、考试规则、评审标准及有关 ASEA 的综合问答等。

本套丛书采用了“单元”与“模块”结构的编写风格, 每本书将所要涵盖的自动化知识分成若干“单元”, 每个“单元”由若干“模块”组成, 每个“模块”又按“知识点”、“知识点分析”和“考试训练”分节论述。其中, “知识点”给出本“模块”所应包含的知识要点, 起到画龙点睛的作用; “知识点分析”则以论述或实例的方式对本“模块”所涉及的知识点进行深入分析; “考试训练”就所述的知识点, 从考试训练的角度, 列出或设计出多种考试训练题, 包括思考题、论述题、综合题、设计题、计算题、选择题等题型, 并对考试训练题作必要的分析, 给出解题概要或提示, 以供备考之用。采用这种独具一格的编写风格是从 ASEA 培训与考试的实际需要出发的, 可以使参加 ASEA 培训与考试的学员以较高的效率掌握应知应会的知识点并以较快的速度进入临考状态。应该说, 这是一套系统性和实用性强, 既具有创新性和先进性, 又富有特色的 ASEA 培训与考试参考用书。

本套丛书的主要读者群是准备参加 ASEA 培训与考试的自动化专业及相关专业的工程技术人员和高等学校的本科生与研究生等。我们希望它既是 ASEA 培训与考试指定用书, 也能为广大自动化工程技术人员的知识更新与继续学习提供适合的参考资料。衷心感谢自动化同仁们的热情支持, 并欢迎对本丛书提出批评和意见。

ASEA 培训与教材编审委员会  
2006 年 1 月于北京

# 序

为了逐步改变我国长期以来专业技术职称终身制的状况，不惟学历、不惟资历、以业绩和能力作为考核标准，进行社会化的专业技术资格认证，并逐步实现与国际接轨，在中国科协的领导下，中国自动化学会于2004年在自动化领域开始策划、开展了自动化系统工程师资格认证（Automation System Engineer Accreditation, ASEA）。这是落实中央人才工作会议精神，积极推进专业技术职称改革的一个重要举措，对充分开发和利用我国自动化人才资源，更好地为社会主义现代化建设服务也具有重要的意义。

中国科协学会学术部专门为这项工作进行了批复，要求中国自动化学会“按照国家有关政策，借鉴国外先进经验，积极探索，认真做好自动化系统工程师的培训、考核、认证以及相应的服务工作，并及时总结经验，推动学会改革发展，促进工程师资格的国际互认，促进我国专业技术人才成长和学科发展，不断提高技术人员水平，为我国自动化事业的发展做出新的更大贡献”。这正是我们开展 ASEA 工作的目的和准绳。

为了顺利开展 ASEA 工作，中国自动化学会专门成立了 ASEA 领导小组，下设 ASEA 办公室并分设若干委员会与工作部，依靠全国自动化领域的专家、教授和学者，按照中国科协的指示精神，正在一步一个脚印地开展起来了。

《ASEA 培训与考试指定参考丛书》是在 ASEA 办公室领导下，由 ASEA 培训与教材编审委员会策划、组织编写的，这是一项非常有意义的基础性工作。这套为 ASEA 培训和考试专门设计的参考丛书，内容涵盖自动化专业基础知识、自动化技术基础知识和国民经济主要行业的自动化专业知识，编写风格独树一帜，确有成效地将先进性、实用性和系统性有机地结合起来。在这套参考丛书的编写过程中，充分发挥了高等院校强大的师资力量，也全力调动了自动化企业技术人员的参与，从 ASEA 培训与考试的实际需要出发，全面考虑了理论和技能两个方面的知识考核，充分保证了 ASEA 的质量和水平。

相信本套参考丛书的出版，将为 ASEA 提供特色鲜明的培训与考试资料，对 ASEA 工作一定会起到积极的作用，对大学后的继续教育也是一套宝贵的参考资料。在此，我谨向参与这套参考丛书编写的自动化技术工程师、高校老师，致以诚挚的感谢。对参考丛书的整体结构到每本书的内容所存在的不足甚至谬误之处，还望使用本套参考丛书的各界人士不吝批评指正。

戴汝为 院士

2006年1月于中国科学院

# 前 言

机械制造是自动化技术的主要应用领域之一。日新月异的自动化技术为机械制造传统产业的改造，生产技术水平的提升和产品更新换代注入了强大活力。机电一体化、数控加工技术、集成制造系统等高新自动化技术的问世，标志着机械制造生产方式和理念正在发生深刻变化。开展自动化系统工程师资格认证就是为了适应我国经济发展和科技进步的需要，意在进一步激励行业自动化技术人员不断创新和再学习的积极性，提高综合素质，促进人才竞争，规范任职水准，推动国际互认。这也是组织编写本书的宗旨。

本书是 ASEA 认证培训与考试指定参考丛书中的一本，编写内容和风格不同于一般教材的框架，内容体系以“系统”为主线将控制电器元件、控制装置、控制方法和应用技术等内容有机地结合在一起；以实际应用为重点，突出基本概念，覆盖面广，实用性强。编写风格是以“单元—模块”为基本结构，而每个模块按“知识点—知识点分析—考试训练”格式展开。其中，每一模块的“知识点”介绍了应掌握的基本知识；“知识点分析”则是对知识点逐一进行简明扼要的论述和分析；“考试训练”是以考题形式给出了所要掌握的重点和资格论证考试的基本形式。这将有利于申报资格认证的读者掌握为获取证书必要的“应考应知”，使本书贴近读者，用起来得心应手。

全书共六个单元，由河北省科学院吴惕华教授担任主编。燕山大学王振臣副教授编写了第一、三单元和第二单元的模块一、二，燕山大学蔡满军副教授编写了第四、六单元和第二单元的模块三、四，吴惕华教授编写了第五单元并对全书统稿。河北省自动化研究所和燕山大学电气工程学院的有关领导对本书的编写工作给予了大力支持和帮助，一并在此致谢。

限于作者水平，加之首次尝试编写这类参考书并采用“单元—模块”编写格式，书中错误和不妥之处，请读者批评指正。

作 者

# 目 录

编者的话  
序  
前言

概论 ..... 1

## 第一单元 电力拖动基础 ..... 4

- 模块一 电力拖动系统动力学 ..... 4
- 模块二 直流电动机工作特性 ..... 8
- 模块三 异步电动机工作特性 ..... 14
- 模块四 电动机选用的原则与方法 ..... 21

## 第二单元 机械制造设备的电气 控制系统 ..... 29

- 模块一 常用继电控制元件及其选择  
方法 ..... 29
- 模块二 继电器控制系统分析与设计 ..... 39
- 模块三 可编程序控制器应用基础 ..... 57
- 模块四 可编程序控制系统分析与设计 ..... 80

## 第三单元 电力拖动控制系统 ..... 88

- 模块一 直流电动机调速系统 ..... 88
- 模块二 异步电动机调速系统 ..... 100
- 模块三 永磁无刷直流电动机控制

系统 ..... 110

## 第四单元 数字控制技术与工业

机器人 ..... 116

- 模块一 数控系统的结构与工作原理 ..... 116
- 模块二 数控机床的驱动与位置控制 ..... 125
- 模块三 数控加工编程技术 ..... 136
- 模块四 工业机器人及其控制技术 ..... 144

## 第五单元 先进机械制造自动化 技术 ..... 161

- 模块一 计算机辅助设计与计算机  
辅助制造 ..... 161
- 模块二 柔性制造与智能制造技术 ..... 166
- 模块三 虚拟制造技术 ..... 170
- 模块四 现代集成制造系统 ..... 172

## 第六单元 机械制造控制系统工程 设计 ..... 177

- 模块一 工程设计基本任务与步骤 ..... 177
- 模块二 控制系统电气信息文件编制 ..... 182

参考文献 ..... 189



# 概 论

机械制造业是经济发展与社会发展的物质基础，制造业的发达与先进程度是国家工业化的重要表征之一，无论是实现农业现代化、工业现代化、国防现代化，还是科技现代化都离不开强大的机械制造业。随着经济全球化、高新技术革命浪潮和信息社会的到来，对机械制造业的发展提出了更高的要求，机械制造业正面临着新的历史性发展机遇和更加严峻的挑战。当今的机械制造业已与信息技术、自动化技术等学科密切结合和交叉发展，形成了多专业知识与技术集成的机械制造业发展思路，使机械制造自动化技术进入了更加快速的发展时期。这一进程也必将对我国从事自动化技术的工程技术人员提出更高的要求。

## 1. 机械制造自动化技术的发展历程和趋势

自 18 世纪中叶瓦特发明蒸汽机而引发工业革命以来，自动化技术就伴随着机械化得到了迅速发展，至今自动化技术已成为机械制造业重要而不可缺少的组成部分。从其发展历程看，自动化技术大约经历了 4 个发展阶段：

① 19 世纪 70 年代，出现了用纯机械方式控制的单机自动化制造系统；1924 年第一条采用流水作业的机械加工自动线在英国出现，标志着自动化制造技术由单机自动化转向更高级形式的自动化系统。第二次世界大战前后，采用电、液控制的刚性自动化加工装置有很大发展，机械制造自动化系统得到迅速的普及，其技术也日趋完善。

② 从 20 世纪 50 年代初到 60 年代中期，数字控制技术的出现是制造自动化技术发展史上的一个里程碑。第一台数控机床于 1952 年在美国麻省理工学院研制成功并逐渐在中、小批量生产中得到使用。1959 年在美国出现的第一台工业机器人，1961 年在美国采用的计算机控制制造自动化系统，1965 年出现的第一台计算机数控机床，都具有很重要的意义，标志数字加工制造自动化技术开始发展，为实现更高级别的制造自动化系统提供了平台。

③ 从 20 世纪 60 年代中期到 80 年代中期，出现了以数控机床和工业机器人为基础组成的柔性制造自动化系统。1967 年英国研制成功用计算机控制 6 台数控机床的可变制造系统，这个系统被称为最早的柔性制造系统，它的出现成功地解决了多品种、小批量复杂零件生产的自动化及降低成本和提高效率的问题。随着工业机器人技术和数控技术的发展和成熟，逐渐形成小型制造自动化系统即柔性制造单元。

④ 从 20 世纪 80 年代开始，以先进制造管理技术、先进加工技术以及计算机辅助技术相结合的各类综合集成自动化技术，即先进制造技术开始发展，其代表就是计算机集成制造系统。由于这是一种综合应用自动化、计算机、传感、通信、网络、管理等技术的最新成果，集多种高技术于一体的现代化制造技术，具有高度的开放性和集散性、高度自组织和自学习的智能性，已成为当前机械制造自动化技术研究、开发和应用的热点，并代表了制造业 21 世纪自动化技术的发展方向，从而达到最大限度的优质、高效、低耗和节能的目的，成为未来占主导地位的新型制造方式。

## 2. 机械制造控制系统综述

单纯的机械化设备由工作机构、传动机构和原动机组成，其控制方式主要靠工作机构和

传动机构的机械配合。随着以电器元件为主的自动控制系统的广泛应用，不仅使设备的性能明显提高，而且使机械结构大为简化。这种控制主要借助于由开关、按钮、继电器、接触器等电器元件组成的机械设备的电气控制系统实现的，称为继电器—接触器控制系统。其主要控制对象是三相交流异步电动机，通过所用电器的“接通”或“断开”，控制电动机的启动、制动、反转和调速。由于控制过程是断续的，从控制方式上看，这种继电器—接触器控制属于断续控制或开关量控制。因其简单、易掌握、价格低、易维修，许多通用机械设备至今仍广泛采用这种控制系统。但是，它也存在功耗大、体积大、控制方式完全固定不灵活的缺点。

对一些调速性能要求较高的生产机械，开关量控制往往不能满足要求，因此出现了直流发电机—电动机调速系统。直流电动机具有起动转矩大、容易进行无级调速的特点；但它需要直流电源。一般直流电源是由一台交流电动机拖动一台直流发电机提供的。这种直流发电机—电动机调速系统中的电压和电流可以连续变化，属于连续控制，具有理想的调速性能；但这种系统存在所用的电机数量多、占地面积大、噪声大和效率低等缺点。20世纪60年代后，出现了晶闸管电动机自动调速系统。这种系统中的直流电源由晶闸管组成的可控整流电路提供，具有体积小、重量轻、效率高和控制灵敏等许多优点，所以得到了普遍应用。

20世纪80年代以后，随着半导体技术、大规模集成电路和计算机控制技术的发展与应用，交流电动机调速技术有了很大发展。与交流电动机相比，交流电动机具有体积小、重量轻、制造简单、坚固耐用等优点；与直流调速相比，交流调速具有单机容量和转速可大大高于直流电动机，易于维护，简单和可靠性高，能用于带有腐蚀性、易爆性、含尘气体的特殊环境中等优点。因此，交流调速自问世以来很快就成为研究和开发热点，特别是采用半导体变流技术的交流调速系统的实现等关键性技术的突破，矢量控制等新兴控制技术的应用，使交流调速具有直流调速的优越调速和控制性能，交流调速系统才得以实现和广泛应用，从而结束了长期以来直流调速的主导地位。当前，交流调速控制系统已从实用阶段进入扩大应用、系列化的新阶段，交流变频调速器、矢量控制伺服单元及交流伺服电动机已日益广泛地应用于工业中。

顺序控制是使机械设备的动作和生产过程按预先规定的逻辑顺序自动进行的一种控制方式，以满足生产工艺和适应工业自动化及生产过程变动节奏加快的要求。20世纪60年代末发展起来的顺序控制器（也称程序控制器）就具有逻辑运算、顺序操作、定时、计数程序转移、程序分支和程序循环等功能，有的还具有算术运算和数值比较等功能。它不仅用于单机控制，而且用于组合机床、多机群控和生产线的自动控制等场合。其主要特点是：编制程序和改变程序方便、通用性和灵活性强、工作稳定可靠、使用维修方便、原理简单易懂、装置体积小、设计和制造周期短，可用它替大量的继电器。

近年来，可编程序控制器（PLC）在工业过程包括机械制造自动化系统中的应用日益广泛。可编程序控制器是在继电器控制和计算机控制的基础上发展起来的产品，是专为在工业环境下应用而设计的以微处理器为核心，将自动化、计算机、通信等技术融为一体的新型工业自动化装置，是带有存储器，可以编程，能存储和执行命令，进行逻辑运算、顺序控制、定时、计数和算术运算等数字运算操作的控制器。PLC以其强大的功能及其使用上的硬件结构和编制程序简单、通用性和灵活性强、安装维修方便、抗强电磁干扰、工作可靠等优点而获得广泛应用。目前，PLC已远远超越早期仅用于开关量逻辑控制的局面，在运动控制、过程控制、集散控制系统等许多领域都有应用。随着PLC的功能越来越强大，已成为机械制

造自动化中必不可少的控制装置。

机械制造控制技术伴随着计算机技术的发展而不断更新,尤其是20世纪70年代以来,随着计算机技术迅猛发展和在各个领域的广泛应用,对机械制造自动化同样产生深刻的影响。各类计算机控制系统、数控加工、工业机器人、机电一体化等先进控制技术相继出现和应用,控制系统的功能和性能发生了质的飞跃,机械自动化进入了数字化、智能化的新阶段。计算机的应用,使机械制造由刚性自动化向柔性自动化方向发展,同时计算机开始从代替体力劳动领域向部分脑力劳动领域伸展,在工业企业技术和管理各方面都相继实现自动化过程,并在各自范围内达到最优,形成了向以综合化、集成化、智能化为特征的先进制造系统发展的趋势。

上述的各种控制系统均为电气控制系统范畴。液压、气动控制系统和电气控制系统一样,由于各自的特点,在不同的场合也得到了相应的应用。而且,现代控制技术、电子、计算机技术与液压、气动技术的结合,使液压、气动控制也在不断创新。电气控制系统和液压、气动控制系统都将充分发挥各自的优势,在相应的生产和技术领域不断发展。

### 3. 本书的性质和任务

现代工业自动化既是自动化理论和技术应用的学科,伴随着控制理论的不断成熟、不断创新而发展;同时又是一门综合性应用学科,包括单机自动化、工业生产系统自动化和工业生产管理系统自动化等3方面,涉及自动化技术、电子技术、计算机技术、通信网络技术等很多学科。特别是计算机技术给工业自动化带来了深刻的影响和变革。因此,为了胜任所担负的职责和任务,要求机械制造自动化工程师应具备扎实的自动控制理论专业知识和计算机应用技术知识。同时,还应熟悉本专业,掌握有关机械制造自动化的专业技术知识和技能。

本书为满足机械制造自动化系统工程师培训和考试的实际需要而编写的,主要内容包括电力拖动基础和控制系统、机械制造设备的继电控制系统、可编程序控制器应用、数字控制技术与工业机器人、先进机械制造自动化技术、机械制造控制系统工程设计等。内容体系是以控制系统为主线,将控制电气元件、控制装置、控制方法和应用等部分有机的组织在一起,以把握基本概念和技术、强调实际中的问题为重点,使读者通过学习掌握必备的最基本的、适用的机电系统自动化知识。

# 第一单元 电力拖动基础

## 模块一 电力拖动系统动力学

### 一、知识点

电力拖动系统动力学是研究各种电动机调速系统的基础，本模块对电力拖动系统构成作了基本介绍；对电力拖动系统工作机构的折算原则和方法作了说明；关于常用负载的机械特性类型、电力拖动系统的运动方程等问题也作为电力拖动基础知识在这里介绍<sup>[1]</sup>。

### 二、知识点分析

#### 1. 电力拖动系统的构成

电力拖动系统一般由四部分构成：电动机、工作机构、控制设备及电源如图 1-1 所示。

电动机把电能转换成机械动力，用以拖动生产机械；工作机构是生产机械为执行某一任务的机械部分；控制设备由各种控制电机、电器、自动化元件及工业控制计算机等组成，用以控制电动机的运动，从而对工作机构的运动实现自动控制；控制设备和电动机都要在电源的支持下才能工作。在电动机带动工作机构工作时，往往要经过变速或变换运动方式后再传给生产机械的工作机构。运动方程式研究电动机带动负载的力学问题。

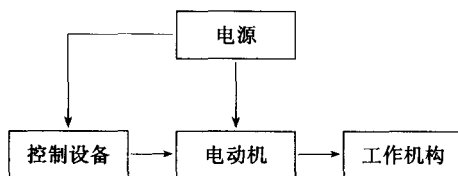


图 1-1 电力拖动系统示意图

#### 2. 工作机构转矩、力、飞轮矩和质量的折算

##### (1) 工作机构转矩 $T'_z$ 的折算

##### 1) 电动机工作在电动状态

此时电动机带动工作机构，功率由电动机向工作机构传送，传动损耗由电动机承担，电动机发出的功率比生产机械消耗的功率大，按传送功率不变的原则，有如下关系：

$$T_z = \frac{T'_z}{\eta_c \left( \frac{\Omega}{\Omega_z} \right)} = \frac{T'_z}{\eta_c j} \quad (1-1)$$

式中， $j$  为电动机轴与工作机构间的转速比， $j = \frac{\Omega}{\Omega_z} = \frac{n}{n_z}$ 。

##### 2) 电动机工作在发电制动状态

此时工作机构带动电动机，功率传送方向与电动状态时相反，即由工作机构向电动机传送，传动损耗功率由工作机构承担，传动到电动机轴上的功率小。同样，按传送功率不变的原则，其关系为

$$T_z \Omega = T'_z \Omega_z \eta_c \quad (1-2)$$

$$T_z = \frac{T'_z}{j} h_c \quad (1-3)$$

在式 (1-2) 和式 (1-3) 中, 转速比  $j$  为电动机轴与工作机构轴转速之比。传动机构如系多级齿轮或带轮变速, 而已知每级速比为  $j_1$ 、 $j_2$ 、 $j_3 \cdots$ , 则总的速比  $j$  为

$$j = j_1 j_2 j_3 \cdots \quad (1-4)$$

$\eta_c$  传动机构总效率, 在使用多级传动时, 如各级效率为  $\eta_{c1}$ 、 $\eta_{c2}$ 、 $\eta_{c3} \cdots$ , 则  $\eta_c$  为

$$\eta_c = \eta_{c1} \eta_{c2} \eta_{c3} \cdots \quad (1-5)$$

### (2) 工作机构直线作用力的折算

某些生产机械具有直线运动的工作机构: 如起重机的提升机构, 其钢绳以力  $F_z$  吊起质量为  $m_z$  的重物  $G_z$ , 以速度  $v_z$  等速上升或下降。这将在电动机轴上反映一个阻转矩, 折算的原则仍是以传送功率不变, 传动损耗用传动效率考虑。

折算时也要考虑功率传送方向, 分两种情况。

#### 1) 电动机工作在电动状态

此时电动机带动工作机构, 使重物上升。

$$T_z \Omega = \frac{F_z v_z}{\eta_c}$$

把电动机角速度化成每分钟转速  $n$ ,  $\Omega = \frac{2n\pi}{60}$ , 则上式变成

$$T_z = 9.55 \frac{F_z v_z}{n \eta_c} \quad (1-6)$$

式中,  $F_z$  为工作机构直线作用力 (N);  $v_z$  为重物提升速度 (m/s);  $\eta_c$  为提升传动效率;  $T_z$  为力  $F_z$  折算为电动机轴上的阻转矩 (N·m)。

#### 2) 电动机工作在发电制动状态

此时工作机构带动电动机, 使重物下放。

$$T_z = 9.55 \frac{F_c v_z \eta'_c}{n}$$

式中,  $v_z$  为重物下放速度 (m/s);  $\eta'_c$  为下放传动效率。

在提升与下放传动损耗相等的条件下, 下放传动效率  $\eta'_c$  与提升传动效率  $\eta_c$  之间有关系式

$$\eta'_c = 2 - \frac{1}{\eta_c} \quad (1-7)$$

### (3) 传动机构与工作机构飞轮矩的折算

在多轴系统中, 必须将传动机构各轴的转动惯量  $J_1$ 、 $J_2$ 、 $J_3 \cdots$  及工作机构的转动惯量  $J_z$  折算到电动机轴上, 用电动机轴上一个等效的转动惯量  $J$  来反映整个拖动系统转速不同的各轴的转动惯量的影响。各轴转动惯量对运动的影响直接反映在各轴转动惯量所存储的动能上, 因此折算必须以实际系统与等效系统储存动能相等为原则。折算公式为

$$GD^2 = GD_d^2 + \frac{GD_1^2}{\left(\frac{n}{n_1}\right)^2} + \frac{GD_2^2}{\left(\frac{n}{n_2}\right)^2} + \cdots + \frac{GD_z^2}{\left(\frac{n}{n_z}\right)^2} \quad (1-8)$$

式中,  $n$  为转速 (r/min);  $GD^2 = 4gJ$ 。

一般情况下, 在系统总的飞轮矩中, 占最大比重的是电动机轴上的飞轮矩, 其次是工作机构轴上的飞轮矩的折算值, 占比重较小的是传动机构各轴上的飞轮矩的折算值。

#### (4) 工作机构直线运动质量的折算

以起重机为例, 重物  $G_z$  提升或下放, 在其质量  $m_z$  中存储有动能。由于重物的直线运动由电动机带动, 是整个系统的一部分, 因此必须把速度  $v_z$  的质量  $m_z$  折算到电动机轴上, 用电动机轴上的一个转动惯量为  $J'_z$  的转动体与之等效。折算的原则是转动惯量  $J_z$  中及质量  $m_z$  中储存的动能相等, 即

$$J'_z \frac{\Omega^2}{2} = m_z \frac{v_z^2}{2}$$

把  $J'_z = \frac{(GD_z^2)'}{4g}$ ,  $\Omega = \frac{2n\pi}{60}$  及  $m_z = \frac{G_z}{g}$  代入上式并化简, 得

$$(GD_z^2)' = 365 \frac{G_z v_z^2}{n^2} \quad (1-9)$$

其中,  $365 = \left(\frac{60}{\pi}\right)^2$ 。

通过上述分析, 可以把多轴拖动系统折算成一个单轴拖动系统。这样, 仅用一个运动方程式即可研究实际多轴系统的静态与动态问题。

### 3. 负载的机械特性

生产机械的机械特性可分成 3 大类: 恒转矩负载、恒功率负载和风机泵类负载。

#### (1) 恒转矩负载

恒转矩负载的负载的转矩是一个恒值, 不随转速  $n$  变化而改变。它又可以分为两类:

①摩擦类负载。它的特性曲线如图 1-2a 所示, 位于 I、III 象限。例如, 传送带、搅拌机、挤压机、采煤机、运输机和机床的进给机构等都属于这类负载。

②位能恒转矩负载。它的特性曲线如图 1-2b 所示, 位于 I、IV 象限。例如, 提升机、起重机和电梯等。它的负载转矩是由重物重力造成的。

#### (2) 恒功率负载

这类负载的转矩  $T$  与转速  $n$  成反比。它的特性曲线如图 1-2c 所示。例如车床的切削负载、轧钢、造纸机和塑料薄膜生产线的卷取等即是这类负载。

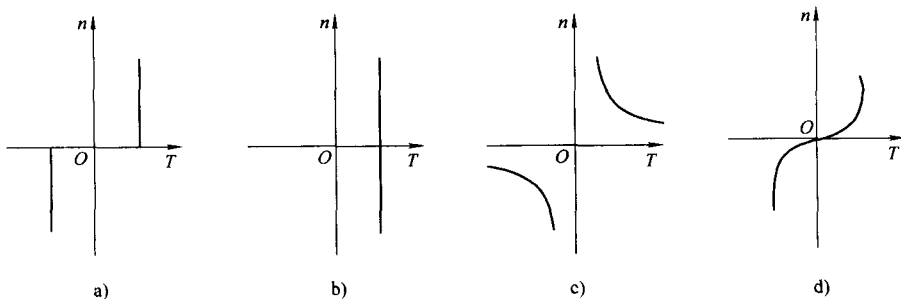


图 1-2 生产机械的负载特性

### (3) 泵类风机负载

这类负载的转矩随转速的增大而改变, 可表示为  $T = kn^2$ 。例如: 风机、水泵和油泵等。它的特性曲线如图 1-2d 所示。

## 4. 运动方程

### (1) 运动方程式

电动机在电力拖动系统中作直线运动或旋转运动时, 必须遵循下列两个基本的运动方程式。

对于直线运动, 方程式为

$$F - F_z = m \frac{dv}{dt} \quad (1-10)$$

式中,  $F$  为拖动力 (N);  $F_z$  为阻力 (N);  $m \frac{dv}{dt}$  为惯性力, 如果质量  $m$  的单位为 kg, 速度  $v$  的单位为 m/s, 时间  $t$  的单位为 s, 则惯性力的单位与  $F$  及  $F_z$  相同, 为 N。

与直线运动相似, 旋转运动的方程式为

$$T - T_z = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-11)$$

式中,  $T$  为电动机产生的拖动转矩 (N·m);  $T_z$  为阻转矩 (N·m);  $n$  为转速 (r/min);  $GD$  称为飞轮矩 (N·m<sup>2</sup>),  $GD^2 = 4gJ$ 。

### (2) 运动方程式中转矩的正负号分析

运动方程式通常以电动机轴为研究对象, 一般形式为

$$\pm T - (\pm T_z) = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-12)$$

如先规定某一旋转方向为正方向, 则转矩  $T$  的方向如果与所规定的正方向相同, 上式  $T$  前带正号, 相反时带负号。而阻转矩  $\pm T_z$  在式 (1-12) 中已带有总的负号, 因此其正负号的规定与转矩  $T$  的规定相反。

而在反转方向, 则转矩  $T$  如与反转的方向相同时取负号, 相反时取正号; 阻转矩  $T_z$  如与反转的方向相同时取正号, 相反时取负号。

加速转矩  $\frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$  的大小及正负号由转矩  $T$  及阻转矩  $T_z$  的代数和来决定。

## 5. 电动机拖动系统的制动方法

电动机拖动系统有两种方法实现制动, 即能耗制动和再生制动。

能耗制动的特点是: 机械能通过电动机消耗在制动电阻上, 系统结构简单, 效率低。

再生制动的特点是: 机械能通过电动机和供电装置返回电网, 系统结构复杂, 能量利用率高, 性能好。

## 三、考试训练

了解电力拖动系统的构成; 掌握工作机构转矩  $T'_z$  的折算、工作机构直线作用力的折算、传动机构与工作机构飞轮矩的折算以及工作机构直线运动质量的折算公式的使用; 理解运动方程式的物理意义并熟知运动方程式中转矩的正负号分析方法; 了解生产机械的机械特性的类型及分类方法。

1. 电力拖动系统由那些部分构成？各部分的作用是什么？

**参考答案：**电力拖动系统由电动机、工作机构、控制设备以及电源等四部分组成。

电动机把电能转换成机械动力，用以拖动生产机械；工作机构是生产机械为执行某一任务的机械部分；控制设备用以控制电动机的运动，从而对工作机构的运动实现自动控制；电源部分为控制设备和电动机提供电源。

2. 在转矩和力的折算中应遵循什么原则？飞轮矩和直线运动的质量折算的原则是什么？

**参考答案：**在转矩和力的折算中应遵循传送功率不变的原则。

飞轮矩折算时必须以实际系统与等效系统储存动能相等为原则；而在直线运动的质量折算时应按转动惯量  $J_z$  中及质量  $m_z$  中储存的动能相等为原则。

3. 生产机械的机械特性可分为哪几类？

**参考答案：**生产机械的机械特性可分成 3 大类，它们分别是恒转矩负载、恒功率负载和风机泵类负载。

4. 运动方程式中转矩的正负号是如何规定的？

**参考答案：**如先规定某一旋转方向为正方向，则转矩  $T$  的方向如果与所规定的正方向相同，折算公式中  $T$  前带正号，相反时带负号。而阻转矩  $\pm T_z$  在式 (1-12) 中已带有总的负号，因此其正负号的规定与转矩  $T$  的规定相反。

在反转方向，则转矩  $T$  如与反转的方向相同时取负号，相反时取正号；阻转矩  $T_z$  如与反转的方向相同时取正号，相反时取负号。

加速转矩  $\frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$  的大小及正负号由转矩  $T$  及阻转矩  $T_z$  的代数和来决定。

5. 电动机拖动系统的制动方法有哪些？各有什么特点？

**参考答案：**电动机拖动系统有两种方法实现制动，即能耗制动和再生制动。

能耗制动的特点是：机械能通过电动机消耗在制动电阻上，系统结构简单，效率低。

再生制动的特点是：机械能通过电动机和供电装置返回电网，系统结构复杂，能量利用率高，性能好。

## 模块二 直流电动机工作特性

### 一、知识点

直流电动机的工作特性是直流电动机应用的基础；介绍直流电动机的起动方式和特点；给出直流电动机的不同调速方法以及各自的特点；总结直流电动机的制动特性和常用方法<sup>[5]</sup>。

### 二、知识点分析

#### 1. 直流电动机特性

##### (1) 机械特性方程式

他励直流电动机机械特性  $n = f(T)$ ，如式 (1-13)：

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R}{C_e C_M \Phi^2} T \quad (1-13)$$



式中,  $U$  为电枢端电压;  $C_e$  为电动势常数;  $R$  为电枢电阻;  $C_M$  为转矩常数;  $\Phi$  为气隙磁通。

当  $U$ 、 $R$ 、 $\Phi$  为常数时, 在  $T-n$  平面上, 他励直流电动机机械特性是一条向下倾斜的直线, 随转矩  $T$  的增大, 转速  $n$  会降低。转速降落常用  $\Delta n$  表示

$$\Delta n = \frac{R}{C_e C_M \Phi^2} T = \beta T \quad (1-14)$$

式中,  $\beta$  为机械特性的斜率  $\beta = \frac{R}{C_e C_M \Phi^2}$ ,  $\beta$  愈大,  $\Delta n$  愈大, 表示机械特性愈软, 反之表示机械特性为较硬特性。

## (2) 固有特性与人为特性

他励直流电动机电枢电压及磁通均为额定值, 电枢没有串接电阻时的机械特性被称为固有特性, 其方程为

$$n = \frac{U_e}{C_e \Phi_e} - \frac{R_a}{C_e C_M \Phi_e^2} T \quad (1-15)$$

人为特性有三种, 是通过改变电动机参数的方法得到的。

### 1) 电枢串接电阻时的人为特性

在电压和磁通为额定值的条件下, 在电枢回路串入电阻  $R_w$  时, 人为特性为

$$n = \frac{U_e}{C_e \Phi_e} - \frac{R_a + R_w}{C_e C_M \Phi_e^2} T \quad (1-16)$$

在这种特性中, 理想空载转速  $n_0$  不变, 而其斜率  $\beta$  随串入电阻的增大而加大。

### 2) 改变电枢电压时的人为特性

此时电枢不串电阻, 励磁保持额定, 改变电枢电压, 特性方程式为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi_e} - \frac{R_a}{C_e C_M \Phi_e^2} T \quad (1-17)$$

显然, 随着电压的改变, 特性在坐标平面上垂直移动, 即各条特性是平行的。

### 3) 减弱电动机磁通时的人为特性

此时电压为额定值, 不串电阻, 磁通在小于额定值的前提下可大小改变, 人为特性为

$$n = \frac{U_e}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_M \Phi^2} T \quad (1-18)$$

当磁通减弱时, 理想空载转速增大, 堵转电流不变, 堵转转矩降低。

## 2. 直流电动机起动

### (1) 他励直流电动机的起动方法

他励直流电动机起动时必须保证先有磁场, 而后加电枢电压。

为防止过大的电流冲击, 不允许全压直接起动, 而是逐渐提高电枢电压。

在手动调节电压时, 要注意电压不能升得太快, 否则仍可能产生过电流; 在自动控制系统中, 电压调节及电流的限制由闭环系统自动完成。比如转速、电流双闭环系统中的电流环, 在速度调节器限幅输出的作用下, 电流环限制了起动电流和堵转电流。

### (2) 他励直流电动机起动的过渡过程

#### 1) 电枢串固定电阻全压起动的过渡过程