



21世纪高等职业技术教育 机电一体化专业规划教材
数控技术

电机与

电力拖动

■ 主 编 姜玉柱
■ 副主编 曾现峰 张旭涛

Dianji yu
dianli tuodong

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

21 世纪高等职业技术教育机电一体化·数控技术专业规划教材

电机与电力拖动

主 编 姜玉柱
副主编 曾现峰 张旭涛

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书主要包括电力拖动系统动力学、直流电机原理、直流电机的电力拖动、变压器、三相异步电机绕组、异步电机原理、三相异步电机的电力拖动、三相同步电机、电力拖动系统中电机的选择、微控电机。全书以直流电机及其拖动和异步电机及其拖动为重点内容。

本书以培养机电一体化应用型人才为目标, 为了使学生牢固地掌握本专业所必需的基本理论和基本技能, 书中注意加强基本概念、基本分析方法和基本技能的培养和训练, 体现高等职业教育的特点。本书在内容叙述上, 力求通俗易懂, 由浅入深地阐明问题。对于一些理论性较强的内容, 注意数学分析与物理概念相结合, 使教材易教易学。为了启发学生对所学的内容进行独立思考、加深理解、掌握重点, 在各章之后列有小结、思考题和习题。

本书是高等职业教育机电一体化专业的规划教材, 主要供高等学校机电一体化专业、数控技术专业学生作教材使用, 也可供大专院校电气自动化专业学生和从事自动化专业的工程技术人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

电机与电力拖动 / 姜玉柱主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2006. 8
ISBN 7 - 5640 - 0773 - 7

I. 电… II. 姜… III. ①电机-高等学校: 技术学校-教材 ②电力传动-高等学校: 技术学校-教材 IV. ①TM3 ②TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 084908 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (办公室) 68944990 (批销中心) 68911084 (读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京圣瑞伦印刷厂

开 本 / 787 毫米 × 960 毫米 1/16

印 张 / 19.75

字 数 / 383 千字

版 次 / 2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

印 数 / 1 ~ 4000 册

定 价 / 29.00 元

责任校对 / 郑兴玉

责任印制 / 李绍英

图书出现印装质量问题, 本社负责调换

出版说明

当前，高度发达的制造业和先进的制造技术已经成为衡量一个国家综合经济实力和科技水平的重要标志之一，成为一个国家在竞争激烈的国际市场上获胜的关键因素。

如今，中国已成为制造业大国，但还不是制造业强国。我们要从制造业大国走向制造业强国，必须大力发展以数控技术为主的先进制造技术，提高计算机辅助设计与制造（CAD/CAM）的技术水平。

制造业要发展，人才是关键。尽快培养一批高技能人才和高素质劳动者，是先进制造业实现技术创新和技术升级的迫切要求。高等职业教育既担负着培养高技能人才的任
务，也为自身的发展提供了难得的机遇。

为适应制造业的深层次发展和数控技术的广泛应用，根据高等职业教育发展与改革的新形势，北京理工大学出版社组织知名专家、学者，与生产制造企业的技术人员反复研讨，以教育部《关于加强高职高专人才培养工作的若干意见》等文件对高职高专人才培养的要求为指导思想，确立了“满足制造业对人才培养的需求，适应行业技术改革，紧跟前沿技术发展”的思路，编写了这套高职高专教材。本套教材力图实现：以培养综合素质为基础，以能力为本位，把提高学生的职业能力放在突出位置，加强实践性教学环节，使学生成为企业生产服务一线迫切需要的高素质劳动者；以企业需求为基本依据，以就业为导向，增强针对性，又兼顾适应性；课程设置和教学内容适应技术发展，突出机电一体化、数控技术应用专业领域的新知识、新技术、新工艺和新方法；教学组织以学生为主体，提供选择和创新的空間，构建开放、富有弹性、充满活力的课程体系，适应学生个性化发展的需要。

本套教材的主要特色有：

1. 借鉴国内外职业教育先进教学模式，顺应现代职业教育教学制度的改革趋势；
2. 以就业为导向，进行了整体优化；
3. 理论与实践一体化，强化了知识性和实践性的统一。

本套教材适合于作为高职高专院校机电一体化、数控技术、机械制造及自动化、模具设计与制造等专业的课程教学和技能培训用书。

北京理工大学出版社

前 言

本书以培养机电一体化应用型人才为目标，在注重基础理论教育的同时，突出实用性、针对性和先进性。结合我国高等职业教育的现状，在保留经典理论体系的同时，注意吸收新的科技成果，注重加强基本概念、基本分析方法和基本技能的培养和训练，体现高等职业教育的特点。在内容叙述上，力求通俗易懂，由浅入深地阐明问题。对于一些理论性较强的内容，注意数学分析与物理概念相结合，使教材易教易学。

本书将“电机学”、“电力拖动”、“控制电机”等课程有机地结合在一起，编写的重点放在使用较多的电机上。在内容的叙述上，强调电机的结构、基本工作原理、主要性能和实际应用意义，对理论的分析采用淡化的手段，在阐述物理意义的基础上给出公式，而不是通过理论推导得出。

全书共分为 10 章，主要包括电力拖动系统动力学、直流电机原理、直流电机的电力拖动、变压器、三相异步电机绕组、异步电机原理、三相异步电机的电力拖动、三相同步电机、电力拖动系统中电机的选择、微控电机等内容。全书以直流电机及其拖动和异步电机及其拖动为重点内容。每一章后面附有小结、思考题和习题，供复习和练习用。

本书的特点如下：

1. 将电机原理、电力拖动与控制电机等内容有机地结合为一个整体。
2. 以电力拖动系统中应用最广泛的他励直流电机和三相异步电机及其电力拖动为重点。
3. 对基本原理和基本概念进行阐述，并始终强调基本理论的实际应用。阐述电机原理时紧密围绕着电力拖动，并着重分析电机的机械特性。
4. 文字阐述方面层次清楚，概念准确，通俗易懂，深入浅出。

5. 内容阐述循序渐进，富于启发性，便于自学。

6. 针对各章内容中的重点和难点，精心编写了大量的例题、思考题和习题。题目具有典型性、规范性、启发性和趣味性，能很好地引导学生掌握本课程的主要理论，培养学生解决工程实际问题的能力。

本书紧密结合工程实际，结合企业的用人需求和最新的技术发展，可作为高职高专机电、数控、电气技术、工业电气自动化、供用电技术、发电厂及电力系统、楼宇自动化等专业的专业基础课教材，也可供有关教师和工程技术人员参考。

本书由江苏联合职业技术学院姜玉柱主编，曾现峰、张旭涛副主编。其中，前言、绪论、第1、9章由姜玉柱编写，并对全书统稿；第2、3、4、10章由曾现峰编写；第5、6、7、8章由张旭涛编写。

本书在编审过程中，得到江苏联合职业技术学院徐州机电工程分院有关同志的大力支持，在此向他（她）们表示衷心感谢。此外，本书在编写过程中查阅了大量参考文献，也在此向原作者表示深深的谢意。

由于编者水平所限，加之时间紧迫，书中错误及不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

目 录

绪论	(1)
0.1 电力拖动及其发展概况	(1)
0.2 本课程的性质、内容、任务和要求	(3)
第1章 电力拖动系统动力学	(4)
1.1 电力拖动系统概述	(4)
1.2 电力拖动系统的转矩及基本运动方程式	(8)
1.3 多轴系统的简化	(13)
小结	(20)
练习题	(21)
第2章 直流电机原理	(22)
2.1 直流电机的用途、结构与分类	(22)
2.2 直流电机的基本原理	(28)
2.3 直流电机的电枢绕组	(30)
2.4 直流电机的电枢电动势、电磁转矩和电磁功率	(36)
2.5 直流电机的功率、电动势和转矩平衡方程式	(39)
2.6 直流发电机	(41)
2.7 直流电机的电枢反应及换向	(45)
小结	(49)
练习题	(50)
第3章 直流电机的电力拖动	(52)
3.1 他励直流电机的机械特性	(52)
3.2 他励直流电机的启动	(58)
3.3 他励直流电机的调速	(60)

3.4	他励直流电机的反转与制动	(63)
3.5	串励直流电机的电力拖动	(69)
3.6	复励直流电机的电力拖动	(74)
3.7	电力拖动系统的过渡过程	(76)
	小结	(89)
	练习题	(90)
第4章	变压器	(93)
4.1	变压器的用途、结构及铭牌数据	(93)
4.2	变压器的空载运行	(101)
4.3	变压器的负载运行	(109)
4.4	标么值	(121)
4.5	变压器参数的测定	(123)
4.6	变压器的运行特性	(128)
4.7	变压器的连接组别	(132)
4.8	变压器的并联运行	(140)
4.9	仪用变压器	(145)
4.10	自耦变压器	(150)
4.11	电焊变压器	(152)
	小结	(155)
	练习题	(156)
第5章	三相异步电机绕组	(160)
5.1	三相异步电机绕组概述	(160)
5.2	三相单层绕组	(166)
5.3	三相双层绕组	(172)
	小结	(177)
	练习题	(177)
第6章	异步电机原理	(178)
6.1	三相异步电机的用途、结构及铭牌数据	(178)
6.2	旋转磁场	(187)
6.3	三相异步电机的工作原理	(190)
6.4	三相异步电机的转矩与电压、功率的关系	(198)

小结	(204)
练习题	(205)
第7章 三相异步电机的电力拖动	(206)
7.1 三相异步电机的机械特性	(206)
7.2 三相异步电机的启动	(209)
7.3 三相异步电机的调速	(215)
7.4 三相异步电机的反转与制动	(220)
小结	(226)
练习题	(226)
第8章 三相同步电机	(228)
8.1 同步电机的结构和工作原理	(228)
8.2 同步电机功率因数的调整	(234)
8.3 同步电机的启动方法	(239)
8.4 同步补偿机	(243)
小结	(244)
练习题	(245)
第9章 电力拖动系统中电机的选择	(246)
9.1 电机选择的原则	(246)
9.2 电机的发热与冷却过程	(250)
9.3 连续工作制电机的容量选择	(254)
9.4 短时工作制电机的容量选择	(263)
9.5 重复短时工作制电机的容量选择	(266)
9.6 电机容量选择的工程方法	(269)
小结	(271)
练习题	(271)
第10章 微控电机	(273)
10.1 伺服电机	(273)
10.2 测速发电机	(278)
10.3 步进电机	(280)
10.4 交磁放大机	(284)

10.5 永磁电机	(286)
10.6 微型同步电机	(291)
10.7 自整角机	(294)
10.8 旋转变压器	(298)
小结	(300)
练习题	(303)
参考文献	(305)

绪 论

0.1 电力拖动及其发展概况

电力拖动是指用电动机拖动生产机械的工作机构，并使之运转的一种方法。由于电能具有变换、传输、分配、使用和控制都比较方便、经济，而且易于大量生产、集中管理、远距离传输和实现自动控制等优点，所以，电力拖动获得了广泛应用。目前，在生产中大量使用的各式各样的生产机械，如车床、钻床、铣床、造纸机、轧钢机等，都采用电力拖动。

0.1.1 电力拖动系统的组成

生产的不断发展对生产工艺也不断提出更高的要求。例如，要求加工精度高，调速范围广，快速启动、制动和反转等。这些要求均通过控制设备控制电机来实现，因此，形成了由电机、传动机构、生产机械、控制设备及电源等主要部分组成的电力拖动系统，如图 0-1 所示。

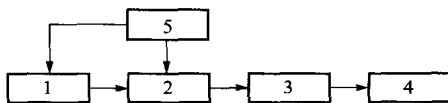


图 0-1 电力拖动系统的结构图

1—控制设备；2—电机；3—传动机构；
4—工作机构；5—电源

其中，电机是机电能量转换设备，它把从电源输入的电能转换为生产机械所需要的机械能；或运行于发电状态，将生产机械的机械能转换成电能。电源是电机和控制设备的能源，可利用发电机将机械能转变为电能，也可运用静止变流装置供电。控制设备用来控制电机的运转，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。传动机构是在电机与生产机械的工作机构之间传递动力的装置，如减速箱、传动带、联轴器等，用来实现速度和运动方式的变换。

0.1.2 电力拖动的特点

- ① 方便经济：电能的生产、变换、传输都比较经济，分配、检测和使用比较方便。
- ② 效率高：电力拖动比蒸汽、压缩空气的拖动效率要高，且传动机构简单。
- ③ 调节性能好：电机的类型很多，具有各种运行特性，可适应不同生产机械的需要，且电力拖动系统的启动、制动、调速、反转等控制简便、迅速，能实现较理想的控制目的。

④ 易于实现生产过程的自动化：由于电力拖动可以实现远距离控制与自动调节，且各种非电量（如位移、速度、温度等）都可以通过传感器转变为电量作用于拖动系统，因而能实现生产过程的自动化。

0.1.3 电力拖动的发展过程

按电力拖动系统中电机的组合数量来分，电力拖动的发展过程经历了成组拖动、单电机拖动和多电机拖动 3 个阶段。

最初，电力拖动代替了蒸汽或水力的拖动。当时，电机拖动生产机械的方式是通过天轴实现的，称为“成组拖动”。它是由一台电机拖动一组生产机械，从电机到各生产机械的能量传递以及在各生产机械之间的能量分配完全用机械方法，靠天轴及机械传动系统来实现。电机远离生产机械，车间里有大量的天轴、长带和带轮等。这种拖动方式能量传递过程中的损耗大、效率低，生产率低，灰尘大，劳动条件与卫生条件很差，而且易出事故，不能利用电机的调速性能，不能实现自动控制。另外，如果电机发生故障，则成组的生产机械将停车，甚至整个生产可能停顿，因此已被淘汰。

20 世纪 20 年代开始采用单电机拖动，即由一台电机拖动一台生产机械。这样，电机与生产机械在结构上配合密切，可以用电气方法调节每台生产机械的转速，从而进一步简化中间传动机构，提高了效率，而且易于实现生产机械运转的全部自动化。

20 世纪 30 年代，随着现代工业生产的迅速发展，生产机械越来越复杂，一台生产机械上往往有许多运动部件。如果仍用一台电机拖动，则传动机构将十分复杂，因此，出现了一台生产机械中由多台电机分别拖动不同的运动部件的拖动方式，称为多电机拖动。这种拖动简化了生产机械的传动机构，提高了传动效率，且容易实现自动控制，提高劳动生产率。目前，常用的生产机械大多数采用这种拖动方式。

从电力拖动的控制方式来分，可分为断续控制系统和连续控制系统两种。在电力拖动发展的不同阶段，两种拖动方式占有不同的地位，且呈现交替发展的趋势。

随着电力拖动的出现，最早产生的是由手动控制电器控制电机运转的手动断续控制方式，随后逐步发展为由继电器、接触器和主令电器等组成的继电接触式有触点断续控制方式。这种控制系统结构简单、工作稳定、成本低、维护方便，不仅可以方便地实现生产过程的自动化，而且可实现集中控制和远距离控制，所以，目前生产机械中仍广泛采用这种控制系统。但这种控制只有通和断两种状态，其控制作用是断续的，即只能控制信号的有无，而不能连续地控制信号的变化。为了适应控制信号连续变化的场合，又出现了直流电机连续控制。这种控制方式可充分利用直流电机调速性能好的特点，得到高精度、宽范围的平滑调速系统。属于这种连续控制的系统有：20 世纪 30 年代出现的直流发电机—电机组调速系统；20 世纪 40 至 50 年代的交磁电机扩大机—直流发电机—电机调速系统以及 20 世纪 60 年代出现的晶闸管—直流电机调速系统。

近年来,随着电子技术和控制理论不断发展,相继出现了顺序控制、可编程无触点断续控制、采样控制等多种控制方式。在电机的调速方面,已形成了电子功率器件与自动控制相结合的领域。不但晶闸管一直流电机调速系统得到了广泛应用,而且交流变频调速技术发展迅速,在许多领域,交流电机变频调速系统有取代晶闸管一直流电机调速系统的趋势。

0.2 本课程的性质、内容、任务和要求

电机与电力拖动基础教材是把电机学和电力拖动基础两门课程有机结合为一门课程的教材。本课程既具有很强的理论性,又具有一定的实践性,是工业自动化专业的一门重要的技术基础课,在本专业学习中占有重要的地位,为后续学习“半导体变流技术”、“自动控制原理”、“电力拖动自动控制系统”、“近代交流调速”及“计算机控制技术”等课程准备必要的基础知识。

本课程主要研究电机与电力拖动系统的基本理论问题。在电机拖动系统中,电机是其中的机电能量转换装置。本课程从使用电机观点出发,研究电机的基本结构、工作原理、内部电磁物理过程、功率关系和机械特性等问题,重点放在研究电机启动、制动、调速三大问题上;系统地讨论电机拖动系统的静态和动态特性,为学生掌握本专业知识和学习后续课程打下必要的理论基础。

本课程的任务是使学生掌握常用交、直流电机、控制电机及变压器等的基本结构与工作原理以及电力拖动系统的运行性能、分析计算、电机选择与实验方法,为学习后续课程打下必要的理论基础。

在学完本课程之后,应达到下列要求。

- ① 掌握常用交、直流电机及变压器的基本理论(电磁关系、能量关系等)。
- ② 掌握控制电机的工作原理、特性及用途。
- ③ 掌握分析电机机械特性及各种运行状态(启动、反接制动、能耗制动、回馈制动)的基本理论。
- ④ 掌握电力拖动系统中电机参数调速方法的基本原理和技术经济指标。
- ⑤ 掌握电力拖动机械过渡过程的基本特性及其主要的分析方法,了解机械惯性和电磁惯性同时作用时对直流电力拖动过渡过程的影响。
- ⑥ 掌握选择电机的原理与方法。
- ⑦ 掌握电机与电力拖动系统的基本的实验方法与技能,并具有熟练的运算能力。
- ⑧ 了解电机与电力拖动今后发展的方向。

第 1 章

电力拖动系统动力学

1.1 电力拖动系统概述

现代工业生产中，大多数生产机械都采用以电机作为原动机拖动生产机械运动，来完成相应的生产任务，这种拖动方式称为电力拖动。随着生产的不断发展，对生产工艺也不断提出更高的要求。例如，要求加工精度高，调速范围广，快速启动、制动和反转等。这些要求均通过控制设备控制原动机实现，因此，形成了由电机、传动机构、生产机械、控制设备及电源等组成的电力拖动系统。电力拖动系统为电气与机械综合的系统。电机及其供电电源的作用是把电能转化成机械能；传动机构的作用是将机械能转化成所需要的运动形式，并进行传递与分配；生产机械最终完成生产工艺任务；控制设备是控制系统按照生产工艺的要求来动作，并对系统起保护作用或进行更高层次的自动化控制。

电力拖动系统的发展是按照从低级到高级、从简单到复杂的一般规律，从最初的成组拖动，再经过单电机拖动，发展到多电机拖动。交、直流两大电力拖动系统在电力拖动发展史上，一直相互补充、相辅相成、交替发展。直流电力拖动系统发展已基本完善。近年来，交流电力拖动系统已成为世界电力拖动研究的中心课题，其技术也日趋成熟，处于扩大应用、系列化的新阶段。

现代电力拖动在新型电机、大功率半导体器件、大规模集成电路、电子计算机及现代控制理论发展的控制下，发生了巨大的变革，由单机自动化本身高层次的发展扩展到生产过程与管理的自动化。例如，柔性制造系统（FMS）是机械与电气自动化技术高度结合的产物，是数控机床、数控加工中心，智能机器人、自动化仓库、自动化检测与运输技术等新型机电一体化高度技术产品，以及计算机辅助设计，辅助制造、生产管理控制等软件技术高度发展、综合利用的结晶。

1.1.1 典型机械负载特性

生产机械的运动具有多种形式，如车床的主轴做旋转运动，龙门刨床的工作台做直线往

复运动，吊车的卷扬机构做上下直线运动，冲剪床的执行机构做简谐运动等。在电力拖动系统中，原动机是电机，做旋转运动。为了获得各种不同形式的运动，电力拖动采用了各种传动机构，如齿轮、齿条、卷筒、钢绳、曲柄连杆机构等，这就构成了电力拖动系统的多种形式。

在各个工业领域中应用的生产机械是众多的，其机械传动图也是各式各样的，不可能对它们一一介绍，下面仅介绍一些典型生产机械作为研究电力系统动力学的基础。通过这些典型生产机械的分析，还可以总结一些生产机械负载所具有的共同特点。

1.1.2 典型工作机械及其机械传动图

生产机械为完成运动和加工任务所需的机械能量是由电机提供的。表示传递机械能量的相互连接的机械部件总和称为机械传动图。最简单的工作机械为离心式通风机，其机械传动图如图 1-1 (a) 所示。

电机 M 的转子通过联轴节 LZ 直接与通风机的叶轮轴 EL 相连，所有运动部分都以同一转速运转。通风机叶轮工作时产生的阻转矩 T_{fz} 与角速度 Ω 的关系（见图 1-1 (b)）为

$$T_{fz} = \Delta T_{fz} + (T_{fzN} - \Delta T_{fz}) \left(\frac{\Omega}{\Omega_N} \right) \quad (1-1)$$

式中 T_{fzN} ——对应于额定转速 Ω_N 时的通风机额定阻转矩；

ΔT_{fz} ——通风机叶轮轴承摩擦转矩。

在这里，电机与通风机具有相同的额定转速，因此，二轴直接联结称为单轴拖动系统，其机械传动图也最为简单。图 1-2 (a) 为车床主轴机械传动图。电机 M 通过三角皮带轮 PD 和多对齿轮 CL 带动主轴 ZZ。在主轴上安装被加工工件，当它旋转时，与刀具 DJ 作用产生切削力 F 和切削阻转矩

$$T_{fz} = Fr \quad (1-2)$$

式中 r ——切削半径。

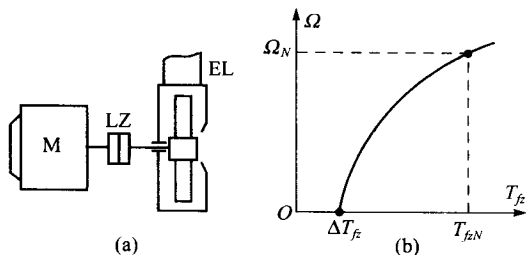


图 1-1 通风机机械传动图及其转矩特性

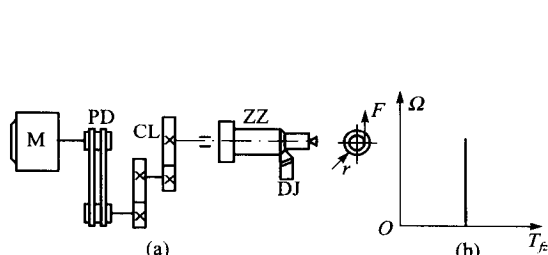


图 1-2 车床主轴机械传动图及其转矩特性

在横向（外圆）切削时，如保持切削力 F 不变，则切削阻转矩与转速无关（如图 1-2

(b) 所示);但在纵向(端面)切削时,如仍保持切削力不变,则转矩将随工件切削半径的减少而成比例地减小。作用在电机轴上除切削转矩 T_{fs} 外,还有机械传动链中各部件的损耗转矩,如轴承摩擦、齿轮啮合和三角皮带滑动摩擦等。

如图 1-2 所示,电机通过各类减速装置带动工作轴的系统称为多轴拖动系统。

所有作用力和转矩皆由摩擦来产生的工作机械,可以用桥式起重机的行车机构作为例子,如图 1-3 (a) 所示。电机 M 经过两级减速齿轮 CL 带动行车 XC 的一对主动车轮 ZL,克服由轴承滑动摩擦和车轮沿铁轨的滚动摩擦所引起的阻力而运行。当电机断电后,由电磁抱闸 BZ 产生制动转矩使行车迅速停车。

考虑到摩擦力和摩擦转矩与正压力成比例,有

$$F = kG (f + \mu r) / R \quad (1-3)$$

式中 f ——车轮的滚动摩擦系数;

μ ——轴承的滑动摩擦系数;

G ——行车的总重力(重量);

R ——车轮半径;

r ——轴颈半径;

k ——轮缘系数。

在上述例子中存在摩擦,因此,滑动摩擦力与速度之间存在着复杂的非线性关系,所以,摩擦力 F 与机械速度 v 之间也呈非线性关系,如图 1-3 (b) 中的曲线 1 所示。但在大多数机械中,静摩擦力 ($v=0$) 略大于动摩擦力,故在分析时可以认为 $F = \text{常数}$,如图 1-3 (b) 中的曲线 2 所示。但应注意,有的机械(如长距离传送带)的静摩擦力可能超过正常运行时摩擦力的 30% ~ 40%。在这种情况下,不考虑摩擦与速度的关系就不行了。

考虑到轮缘与铁轨侧面的摩擦力,尤其是当行车歪斜时,这种摩擦大为增加,在公式中要引入轮缘系数 k 。除了上述的阻力及相应的阻转矩外,还有减速齿轮的摩擦损耗转矩。

比较上述三种机械可以看出,通风机和机床主轴由于结构和工艺特点只在单方向运行,故称为不可逆拖动系统。而行车机构却应在正反两个方向运行,称为可逆拖动系统,其相应的 $F=f(v)$ 曲线(如图 1-3 (b) 所示)绘在正反两个方向。摩擦力或转矩永远是与运动方向相反的。

可逆拖动的另一个典型例子可用如图 1-4 (a) 所示的起重机械传动图来说明。电机 M (轴上装有抱闸 BZ) 经过两级减速齿轮 CL 带动卷筒 JT 旋转,并通过钢绳提升或下降重物 G 。这个力的方向永远向下而与速度的方向无关,因而,其特性曲线如图 1-4 (b) 所示。