本专著受国家自然科学基金项目“基于知识自动化理论的变电站健康运行方法研究（U1804149）”支持
受“华北水利水电大学高层次人才科研启动项目”资助
受 2018 年度校级教学团队“电力系统分析教学团队”项目支持

多电机共直流母线建模与节能控制技术

李继方　著

中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

本专著受国家自然科学基金项目“基于知识自动化理论的变电站健康运行方法研究（U1804149）”支持
受“华北水利水电大学高层次人才科研启动项目”资助
受 2018 年度校级教学团队“电力系统分析教学团队”项目支持

多电机共直流母线建模与节能控制技术

李继方　著

中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn
·北京·

内 容 提 要

本书以多电机共直流母线系统为研究对象，依据系统节能的思想，从系统基本结构出发，开展基础研究。根据耗能状态电机不能完全吸收制动状态电机再生电能的不同的处理方法，对多电机共直流母线系统进行分类，给出不同系统的系统结构。通过分析系统组成，得出系统广义模型。然后研究多电机共直流母线系统建模方法，逐一建立广义模型中各子系统的混杂模型，进而得到系统整体模型，以该模型为基础开展多电机协调调度及能量管理研究。最后以西门子公司开发的 S120 伺服控制驱动系统为基础建立多电机共直流母线系统的实验系统，开展系统实验研究，并通过所建模型以多起重机系统为背景，仿真研究系统性能。既从系统角度研究了混杂系统的建模方法，建立了多电机共直流母线混杂系统模型，又针对具体传动设备研究了开关变换器切换系统的统一建模方法。本书既可作为相关专业研究生、科研人员学习参考用书，也可作为从事电机传动系统节能的工程技术人员学习、设计参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

多电机共直流母线建模与节能控制技术 / 李继方著
. -- 北京 : 中国水利水电出版社, 2020.5
ISBN 978-7-5170-8764-9

Ⅰ. ①多… Ⅱ. ①李… Ⅲ. ①母线－研究 Ⅳ.
①TM645.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第149510号

书　　名	**多电机共直流母线建模与节能控制技术** DUO DIANJI GONG ZHILIU MUXIAN JIANMO YU JIENENG KONGZHI JISHU
作　　者	李继方　著
出版发行	中国水利水电出版社 （北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座　100038） 网址：www. waterpub. com. cn E－mail：sales@waterpub. com. cn 电话：（010）68367658（营销中心）
经　　售	北京科水图书销售中心（零售） 电话：（010）88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排　　版	中国水利水电出版社微机排版中心
印　　刷	清淞永业（天津）印刷有限公司
规　　格	170mm×240mm　16 开本　10.5 印张　206 千字
版　　次	2020 年 5 月第 1 版　2020 年 5 月第 1 次印刷
定　　价	**58.00** 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

序

李继方教授的《多电机共直流母线建模与节能控制技术》一书系统深入地研究了多电机共直流母线系统的节能控制问题，从系统基本结构出发，开展基础研究；根据耗能状态电机不能完全吸收制动状态电机再生电能的不同的处理方法，对多电机共直流母线系统进行分类，给出不同系统的系统结构；通过分析系统组成，得出系统广义模型，并建立了多电机共直流母线混杂系统模型；以该模型为基础开展多电机协调调度及能量管理研究。

作者在上海海事大学攻读博士学位期间，努力学习，刻苦专研，在其博士论文研究领域取得了丰硕的研究成果。《多电机共直流母线建模与节能控制技术》一书是这些研究成果的结晶，出版社慧眼识珠，将该书编辑出版，填补了多电机系统节能与能量管理图书的空白。

节能减排是应对全球能源短缺和气候变化的主要途径之一，也是我国经济可持续发展的战略举措。本书的出版可供相关领域的研究者和工程技术人员学习参考，也可为管理与决策人员提供借鉴。



2020 年 3 月 22 日

前　言

节能减排是社会发展的长远方针，也是当前的紧迫任务。吸收和利用电机制动再生电能已成为电机系统节能的重要途径。为回收和利用电机制动再生的电能，多电机共直流母线系统应运而生。虽然共直流母线系统在生产实际中已得到广泛应用，但对系统的基础研究还非常薄弱，致使系统在使用过程中还存在节能效率不高、有时不能正常运行等问题，因此建立多电机共直流母线系统模型，开展系统能量管理及多电机协调调度的研究，不仅具有广泛应用前景，而且具有重要的科学意义。

以国家自然科学基金河南联合基金项目《基于知识自动化理论的变电站健康运行方法研究》（项目批准号：U1804149）为依托，以港口变电站健康运行为基础，以港口多起重机共直流母线为研究对象，用系统节能的观点，从系统的结构出发，重点研究多电机共直流母线系统的建模与健康运行方法。通过引入广义模型的概念，采用混杂系统理论逐一建立各子系统的混杂模型，进而得到系统的整体模型。通过引入混杂自动机理论，把对电路的控制转换成对储能系统不同状态转移条件的控制，提出基于混杂自动机理论的储能系统能量管理策略模型。通过对电机分布均匀度的定义，建立了基于扩展活动周期图的多电机共直流母线节能系统模型，提出了基于均匀分布理论的多电机协调调度算法。该调度算法能有效调度电机工作状态，使处在制动状态电机再生的电能最大限度地被处在耗能状态电机吸收和利用，实现系统节能，并保持了直流母线电压和功率的稳定，保障变电站的健康运行。

作者多年来一直从事多电机共直流母线系统的混杂系统建模与节能调度、电力电子系统的切换系统建模与智能控制、电力系统及其装置故障诊断与健康运行等方面的研究，主持和参与（主要完成

人）本研究方向的项目十多项。师从汤天浩教授已 12 年，恩师多年来对我教学和科研给予了悉心指导，对我家庭给予莫大的帮助，在此表示衷心的感谢！感谢科研团队及其成员为项目的顺利完成所付出的辛苦劳动，同时也感谢他们多年来给予的大力支持和帮助！

本书受华北水利水电大学高层次人才科研启动项目资助。

本书可作为港口和油田、多起重机等间歇用电场合的工作技术人员和电力电子装置及系统的故障诊断与健康运行等相关科研人员的参考用书。由于作者学术水平和实践经验有限，书中难免有错误之处，恳请批评指正。

作者

2019 年 9 月

主要变量符号

R_{b}：耗能电阻

U_{b}：控制单元动作电压阈值

P_{maxb}：系统最大回馈功率

P_{avb}：系统平均回馈功率

a：电阻降额系数

P_{rb}：回馈单元功率

I_{PM}：控制单元最大工作电流

P_{db}：双向变换器功率

E_{smax}：系统最大储能容量

U_{scmax}：超级电容饱和电压

U_{scmin}：超级电容放电最小电压

η_{r}：系统整流单元效率

η_{e}：电机系统电动效率

η_{b}：电机系统制动效率

E_{store}：系统存储能量

E_{out}：系统输出能量

E_{savemax}：最大节能量

E_{savemin}：最小节能量

η_{savemax}：最大节能效率

η_{savemin}：最小节能效率

$i_{\mathrm{RE}}(t)$：整流子系统瞬时电流

$i_{\mathrm{SD}}(t)$：储能子系统瞬时电流

$u_{\mathrm{c}}(t)$：电容电压

$P_{\mathrm{MM}}(t)$：多电机子系统瞬时功率

$\boldsymbol{x}(t)$：状态变量

$\boldsymbol{u}(t)$：输入变量

$\boldsymbol{y}(t)$：输出（或量测）变量

$\sigma(t)$：取值于$\overline{\mathbb{N}}^{\mathrm{def}}=\{1,2,3,\cdots,N\}$的逐段常数信号

$\boldsymbol{F}\in R^{n\times n}$：储能元件相关对角阵

$\boldsymbol{A}_{\sigma(t)}\in R^{n\times n}$：与电路参数和开关器件状态有关矩阵

$\boldsymbol{R}_0$、$\boldsymbol{R}^p$：耗能元件矩阵

$\boldsymbol{S}_0$、$\boldsymbol{S}^p$：状态变量与开关器件状态关系矩阵

$\boldsymbol{B}_0$、$\boldsymbol{B}^p$：输入变量输入矩阵

$\sum_i$：第 i 个子系统

α_i：第 i 个子系统的占空比

β_i：第 i 子系统在切换平衡点的占空比

β_{eq}^p：第 p 对开关在切换平衡点的占空比

k_i^p：第 i 个子系统第 p 对开关状态

x_{eq}：切换平衡点

Ω_i：第 i 个子系统的能量衰减域

i_{leq}：切换平衡点的电感电流

P_{source}：网侧供电功率

P_{motor}：电机耗能功率

P_{storage}：储能系统功率

C_{sc}：理想超级电容

R_{ESR}：超级电容等效串联内阻

R_{EPR}：超级电容等效并联电阻

u_{dc}：直流母线电压

u_{dceq}：切换平衡点直流母线电压

u_{sc}：超级电容电压

$\eta_{recycling}$：制动能量回收率

Δu_{dc}：直流母线电压波动峰值之差

Δu_{sc}：超级电容储能系统一次充放电前后端电压差值

I_{scmax}：超级电容最大充放电电流

U_{high}：状态 S_2 转移到状态 S_1 时电压阈值

U_{high0}：状态 S_1 的恒定参考电压

U_{low0}：状态 S_3 转移到状态 S_2 时的 u_{dc}参考电压

U_{ihigh}：状态 S_2 转移到状态 S_3 的电压阈值

U_{ilow}：状态 S_4 的恒定参考电压

U_{low}：状态 S_3 转移到状态 S_4 的电压阈值

$P_{ji}(t)$：第 i 个临时实体在第 j 个状态的资源占用量

$T_{ji}(t)$：第 i 个临时实体在第 j 个状态的持续时间

$S_{ji}(t)$：第 i 个临时实体在第 j 个状态的状态标识

$\boldsymbol{C}_i^k$：第 i 个临时实体与第 k 个永久实体的关联标识

$Q_k(t)$：第 k 个永久实体的资源量

Q_{max}^k：第 k 个永久实体最大资源量

$P_c(t)$：逆变器损耗功率

$P_{em}(t)$：电机损耗功率

$P_m(t)$：机械损耗功率

$P_k(t)$：动能功率

$P_p(t)$：势能功率

η_c：逆变器效率

η_m：机械传动效率

η_{eq}：起重机系统的等效效率

J_m：被拖动对象的转动惯量

J_e：电机系统自身的转动惯量

V_s：定子侧电压

R_s：定子侧电阻

L_s：定子侧电感

L_r：转子侧电感

R_r：转子侧电阻

L_m：定子侧磁化电感

T_m：电机整个周期平均运行时间

B：电机分布均匀度

w_i：第 i 个电机系统功率的加权

A：加权系数

ΔB：电机分布均匀度变化量

Δt_i：第 i 个电机协调调度时间

T_e：拖动电机的电磁转矩

J_{eq}：等效转动惯量

T_L：负载等效阻力矩

J_0：负载电机的转动惯量

T_L'：模拟实际负载转

目　录

序

前言

主要变量符号

第 1 章　绪论 …… 1

1.1　课题背景与研究意义 …… 1

1.1.1　研究背景 …… 1

1.1.2　技术需求 …… 3

1.2　多电机共直流母线系统的应用与研究现状 …… 3

1.2.1　系统节能与多电机共直流母线系统 …… 3

1.2.2　多电机共直流母线系统的应用 …… 6

1.2.3　多电机共直流母线系统的研究现状 …… 7

1.2.4　多电机共直流母线系统存在的问题 …… 10

1.3　本书的主要内容 …… 11

1.3.1　本书的结构与框架 …… 12

1.3.2　各章主要内容 …… 13

第 2 章　系统结构与广义模型 …… 15

2.1　多电机共直流母线系统的组成及特点 …… 15

2.1.1　交-直-交变频器共直流母线时的连接问题 …… 15

2.1.2　多电机共直流母线系统的组成 …… 15

2.1.3　多电机共直流母线系统的特点 …… 16

2.2　多电机共直流母线的系统结构 …… 17

2.2.1　耗能系统结构 …… 17

2.2.2　馈能系统结构 …… 20

2.2.3　储能系统结构 …… 22

2.3　基于多电机协调调度的储能系统结构 …… 24

2.3.1　不同系统结构能流分析 …… 24

2.3.2　不同系统结构性能对比 …… 27

2.3.3 在储能结构系统中引入多电机协调调度 …… 28
2.4 系统广义模型 …… 29
2.4.1 多电机共直流母线系统广义模型 …… 30
2.4.2 基于多电机协调调度的储能系统结构广义模型 …… 32
2.5 采用混杂系统建模的原因及其建模方法 …… 33
2.6 本章小结 …… 35
第 3 章 基于切换系统的电力电子装置统一建模方法 …… 36
3.1 开展基于切换系统的电力电子装置建模方法研究的意义 …… 36
3.2 切换系统原理 …… 37
3.2.1 切换系统的概念与特点 …… 37
3.2.2 切换系统建模方法 …… 38
3.3 开关变换器切换系统统一建模方法 …… 39
3.3.1 开关变换器切换系模型 …… 39
3.3.2 系统稳定性与切换律 …… 40
3.3.3 开关变换器切换系统模型的统一建模方法和步骤 …… 44
3.4 开关变换器的切换系统模型 …… 47
3.4.1 DC－AC 变换器的切换系统模型 …… 47
3.4.2 三电平 DC－DC 变换器的切换系统模型 …… 49
3.5 不可控整流器的切换系统模型 …… 53
3.5.1 整流器的等效电路 …… 53
3.5.2 整流器的切换系统模型 …… 54
3.6 本章小结 …… 58
第 4 章 储能子系统切换系统建模及能量管理策略 …… 59
4.1 储能子系统建模与系统能量管理的必要性 …… 59
4.2 储能子系统切换系统模型 …… 60
4.2.1 多电机共直流母线储能子系统结构 …… 60
4.2.2 多电机共直流母线储能子系统等效电路 …… 61
4.2.3 多电机共直流母线储能子系统切换系统模型 …… 63
4.2.4 储能子系统切换控制律 …… 65
4.2.5 储能子系统储能和放电的仿真研究 …… 66
4.3 系统能量管理策略 …… 70
4.3.1 能量管理策略的目标 …… 70
4.3.2 基于混杂自动机的能量管理策略模型 …… 72
4.3.3 系统能量管理策略的仿真研究 …… 80

4.4 本章小结…… 85
第 5 章 多电机子系统动态活动周期图模型与协调调度 …… 86
5.1 多电机子系统建模的必要性及采用活动周期图法建模的原因 …… 86
5.1.1 多电机子系统建模及开展多电机协调调度的必要性 …… 86
5.1.2 采用活动周期图法建模的原因 …… 87
5.2 动态活动周期图建模方法…… 88
5.2.1 稳态活动周期图…… 88
5.2.2 活动周期图的新扩展——动态活动周期图 …… 89
5.2.3 动态活动周期图的建模步骤 …… 92
5.3 多电机子系统动态活动周期图模型…… 92
5.3.1 多电机子系统活动周期图 …… 92
5.3.2 实体资源量 …… 95
5.4 电机系统功率…… 97
5.4.1 电机系统回馈功率 …… 97
5.4.2 电机系统耗能功率 …… 99
5.4.3 起重机系统能流分析 …… 100
5.5 基于均匀分布理论的多电机协调调度算法 …… 103
5.5.1 基于活动周期图的多电机调度机理 …… 103
5.5.2 基于均匀分布理论的协调调度算法 …… 105
5.6 多电机子系统动态活动周期图模型仿真方法 …… 109
5.6.1 动态活动周期图模型的仿真方法 …… 109
5.6.2 电机状态持续时间的产生…… 110
5.7 本章小结 …… 111
第 6 章 多电机共直流母线实验系统与实验仿真研究…… 112
6.1 多电机共直流母线实验系统设计 …… 112
6.1.1 S120 技术要点 …… 112
6.1.2 实验系统设计 …… 113
6.1.3 负载模拟设计 …… 115
6.2 实验研究 …… 118
6.2.1 实验系统的实验研究 …… 118
6.2.2 多电机系统实验与仿真 …… 124
6.2.3 多电机协调调度实验研究…… 128
6.3 多电机共直流母线系统仿真分析 …… 130
6.3.1 多电机共直流母线系统仿真模型与仿真参数 …… 131

6.3.2 多电机系统直流母线功率仿真分析 …… 132
6.3.3 加入储能系统与能量管理后多电机共直流系统仿真分析 …… 135
6.3.4 协调调度后多电机共直流母线系统的仿真分析 …… 136
6.4 本章小结 …… 142
第 7 章 总结与展望…… 143
7.1 研究工作总结 …… 143
7.2 研究展望 …… 144
参考文献 …… 146

第1章 绪 论

本章从研究背景、技术需求两个方面阐述了开展多电机共直流母线混杂系统建模、能量管理与多电机协调调度研究的意义，回顾了系统节能的概念以及多电机共直流母线系统的产生，概述了系统的研究现状以及存在的问题。本章最后对本书的主要研究内容及研究框架作了介绍。

1.1 课题背景与研究意义

1.1.1 研究背景

能源是人类生活和社会发展所依赖的重要资源。随着社会的发展和人们生活水平的提高，人类对能源的需求越来越大。世界人口由20世纪初的15.7亿到20世纪末的60亿，增长了2.8倍，而能量总消耗量由7.7亿t增长到210亿t，增长了27倍，人均消耗量增长了近4倍，使消耗总量呈现指数上升。从已知储量测算，煤炭我国可开采不足100年，全世界不足300年；石油、天然气我国可开采50年，全世界不足100年，能源短缺已是全人类所面临的重大问题之一[1,2]。

从能源占有量来看，我国人口众多，能源资源相对匮乏已是一个不争的事实。我国人口占世界总人口的21%，已探明的煤炭储量占世界储量的11%、原油占世界储量的2.4%、天然气仅占世界储量的1.2%。人均能源资源占有量不到世界平均水平的一半，石油仅为1/10[3]。

从能源供需关系来看，我国尽管加大了能源开发和节能的力度，但仍有较大的需求缺口，需要依靠进口能源来解决。在采用先进技术、推进节能、加速可再生能源开发利用以及依靠市场力量优化资源配置的条件下，2018年约缺能18.7%，到2050年能源缺口将增大到24%左右。随着我国工业化、城镇化的快速发展，能源供需矛盾更显突出[4]。

从能源利用率来看，我国的能源利用效率与世界先进水平相比存在较大差距，单位GDP能耗比世界平均水平高2.4倍，比美国、欧盟、日本分别高2.5倍、4.9倍、8.7倍[5]。

因此无论是从我国的资源形势，还是从经济发展的需求来看，目前我国能源利用效率低、消耗高、浪费大，能源匮乏与环境承载能力弱，能源供需矛盾

突出是制约我国经济发展的主要瓶颈，节能减排和开发新能源是未来发展的必然之路[6,7]。《中华人民共和国节约能源法》指出：节能减排既是我国经济社会发展的一项长远战略方针，也是当前一项紧迫的任务。我国已经明确“十三五”期末单位国内生产总值能源消耗要比“十二五”期末降低15%，将节能减排目标与经济增长目标放在同等重要的位置上[8]。当前我国正进入整体节能时代，节电产业已上升为21世纪我国最重要的国家战略之一。

海运承载着世界贸易总量的2/3，作为沟通海运和其运输方式的集装箱码头，已成为物流、资金流、信息流的交汇中心。随着港口生产快速发展，港口自动化、现代化、机械化进程不断推进，电力消耗量大、电能污染严重等问题日益明显，港口节能已成为我国节能减排的一个重点。为建设资源节约型、环境友好型水路交通，按照国务院有关节能减排工作的要求，交通部相继发布实施了一系列行业节能减排指导意见。尽管随着生产规模化、专业化程度的提高，港口能源单耗已呈下降趋势，但仍存在较大的节能减排空间。

图1.1为国内某个集装箱码头的生产耗能情况。港口的装卸生产能耗占港口总能耗比例最大，是影响港口能耗的最大因素。如集装箱码头：生产用能占总能耗的80%以上，而生产用能中，主要装卸设备（岸桥、场桥）用能量最大，其中岸桥用电就占装卸生产用能量的20%～30%。如果通过共用直流母线技术，将岸桥和场桥工作中的再生能量加以回收，而不回馈电网，不但可以减小电网负担，又可以节约电能，更可以减小对电网的谐波污染[9]。

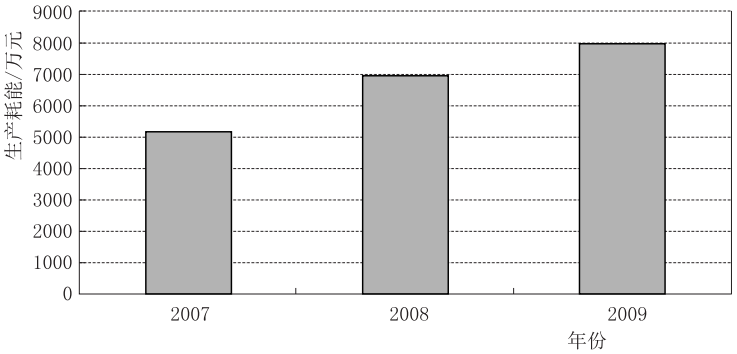


图1.1 国内某个集装箱码头的生产耗能情况

全自动化码头是港口自动化的发展趋势，一经提出，备受世界各国关注，也成为人们研究的热点。全自动化码头为港口节能提供了广阔的空间，也为多电机协调调度节能提供了平台[10]。因此开展多电机共直流母线混杂系统建模、能量管理与多电机协调调度研究，对于降低港口能源单耗，实现资源节约、环境友好的水路交通具有重要的意义。

1.1.2 技术需求

在港口起重机的作业过程中，当起重设备所驱动的负载（重物）下降时，重物释放储存的势能，通过机械传动系统，驱动电机，使电机运行在第二或第四象限，处在制动发电状态；或当重物从高速到低速（含停车）减速时，由于重物、机械传动系统、电机的机械惯性，电机也有可能运行在第二或第四象限，处于制动发电状态。

在工农业生产和人们生活中，许多电气设备需要快速的减速或停止，要求电机频繁的启动和制动，如油田瞌头机、脱水机、拉丝机、离心机、比例连动控制系统等，由于机械设备及大型电机的惯性，将会带动电机运行在第二或第四象限，处于制动发电状态。

该部分电机制动再生的电能反馈到电机传动系统中，会产生泵升电压，造成设备损坏。为了避免上述问题发生，长期以来人们没有将该部分能量充分利用，而是白白将其浪费掉，这与我国目前提出的节能战略格格不入[11-15]。

研究表明，这部分被白白浪费掉的再生电能非常大，如在港口起重机系统中，起重电机再生电能是系统提升重物消耗电能的37%～63%[16]；在采油系统中，抽油机用电机有33.67%的时间处于发电状态，发电量占总用电量的12.85%[17]；在轨道交通中，电力机车回馈再生能量一般为牵引能量的30%～40%，甚至更多[18]。如果能将这部分电机制动时再生的巨大能量充分利用起来，系统的节能效果将会非常可观。

为了回收并利用这部分巨大的再生电能，人们采用共用直流母线技术，通过共用的直流母线，使耗能状态电机吸收并利用制动状态电机再生的电能。目前对共用直流母线技术的研究比较薄弱，可以说刚刚起步，还缺乏全面的、整体的、系统的深入研究。系统在运行过程中还存在诸多问题，如共用直流母线技术后系统的可靠运行、电机制动再生电能的回收、共直流母线系统方案的设计、节能效率的进一步提高、直流母线功率波动的减小等，因此开展多电机共直流母线系统的建模、能量管理与多电机协调调度研究具有重要的意义。

1.2 多电机共直流母线系统的应用与研究现状

1.2.1 系统节能与多电机共直流母线系统

1.2.1.1 系统节能

在工业生产中，人们只习惯于研究如何提高生产装置中单台设备的性能和运行效率，实际上任何一个生产过程或生产装置，总是由各类设备，包括电气

的、机械的、仪表的等有机组合起来，是一个既相互关联又相互制约，进而协调工作的整体。孤立地去研究系统中某一单体设备的节能，不仅节能效果有限(例如，用高效 YX 型电机代替 JO2 型电动机，额定效率只能提高 2%～4%，即使采用各种电机节能控制器，也只能把电机的运行效率再提高 2%～3%)，而且有时某些节能措施还可能对装置中其他设备或生产过程产生不良影响。

大量事例分析表明，能量损失往往不是由于单台设备的效率不高，而是由组成系统的结构不合理或运行环节间相互影响所造成。有时组成系统的各个单台设备可能都是高效低耗的先进设备，但由于结构不合理或者在运行、调节过程中，设备间相互制约的影响，可能整体效率较低，造成的浪费要比单台设备所造成的浪费多得多。反之，有时组成系统的各单台设备效率可能不高，但通过合理的综合、统一和协调调度却可以大幅提高系统的节能效率，以较少的投资取得较好的节能效果。

基于此思想，人们提出了系统节能的概念。依据这一概念，在工业生产中的任何一个生产装置或过程都可以看成是一个系统，都是由一些环节或功能元件有机组合在一起并具有特殊功能的整体；这个整体在完成某项操作或实现某个生产过程时，都是由这些功能元件联合并相互协调共同完成的。所谓系统节能，就是通过对具体系统的分析、综合，从整体出发，采取具体节能技术措施，在满足同样需要和完成相同任务的条件下，尽可能多地回收利用设备回馈能量，降低能量供给，减小无谓损耗，提高系统电能的有效利用率。

系统节能的方法一般有两种：

(1) 设备节能，指的是科研单位、制造厂家通过使用新工艺、新材料和新技术研制一种高效低耗的节能产品，这不是本书的研究对象。

(2) 系统节能，就是在分析和综合的基础上，通过对给定系统的改造、合理运行和科学管理等方法的节能。这里所说的系统分析、综合主要是指弄清楚给定系统的结构是否合理；系统中各功能元件及相互关系对系统影响的程度；弄清楚系统中能量消耗是否合理，有没有浪费，设备回馈的能量是有效利用等，以便能从整体出发，采取合理、行之有效的节能措施，这正是本书的研究重点。

1.2.1.2 多电机共直流母线系统的提出

多电机共直流母线系统就是基于系统节能的思想而产生的。

随着电力电子技术的发展，高性能交流调速系统应运而生。交流电机与直流电机相比具有突出的优越性能，如直流电机具有换向器和电刷，因而必须经常检查维修，换向火花使它的应用环境受到限制，换向能力限制了直流电机的容量和速度等，采用交流电机代替直流电机应用于调速系统已成为电力拖动技

术发展的一种趋势。目前交流传动系统被广泛应用在各类工业系统中，其系统结构如图 1.2 所示。

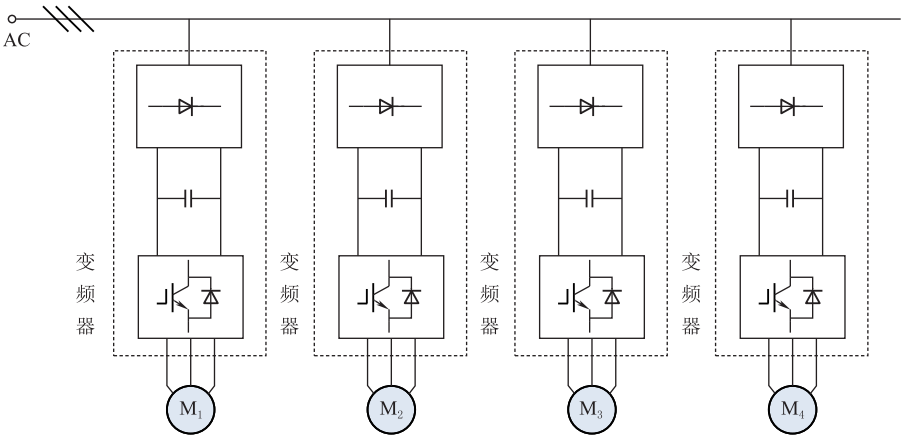


图 1.2　多电动机交流传动系统

然而，在有多台交流电机传动的工农业生产系统中，每台交流电动机都要使用一台变频器来驱动，每台变频器都包含有整流和逆变两个单元，这种传动方式设备多，传动效率低，很不经济。在许多生产线上，存储了大量待释放的机械能，电机制动再生的电能要不断回馈电网或消耗在耗能电阻上。为了回收并利用这部分电能，达到节能、提高设备运行可靠性、减少设备投资量和设备占地面积等目的，人们提出了多台电动机公用直流母线的传动方式，系统结构如图 1.3 所示。

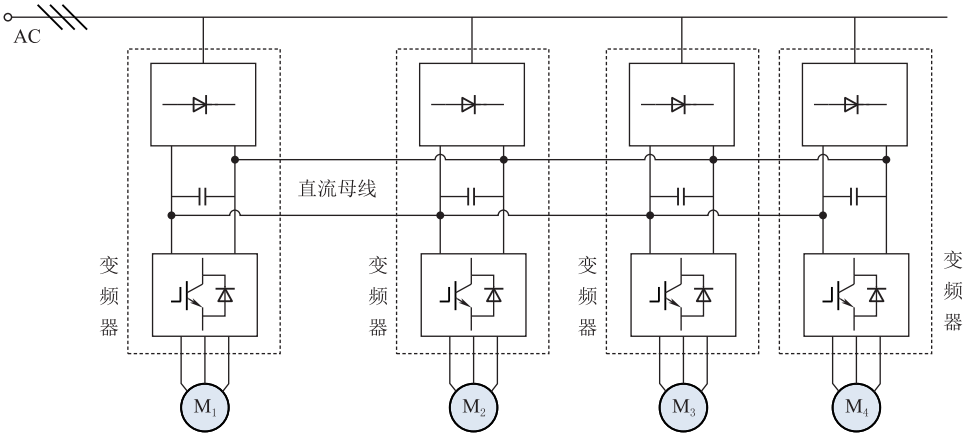


图 1.3　多电机共直流母线系统示意图