

**The Control System of Electromagnetic
Speed Regulation of Shearers**

电磁调速电牵引采煤机控制系统

刘建功 著

煤炭工业出版社

电磁调速电牵引采煤机控制系统

The Control System of Electromagnetic Speed
Regulation of Shearers

刘 建 功 著

煤 炭 工 业 出 版 社

• 北 京 •

图书在版编目 (CIP) 数据

电磁调速电牵引采煤机控制系统/刘建功著. —北京:
煤炭工业出版社, 2006

ISBN 7-5020-2847-1

I. 电… II. 刘… III. 采煤机—控制系统

IV. TD421.6

中国版本图书馆CIP数据核字 (2006) 第007404号

煤炭工业出版社 出版发行
(北京市朝阳区芍药居35号 100029)
网址: www.cciph.com.cn
北京房山宏伟印刷厂 印刷



*

开本 850mm×1168mm¹/₃₂ 印张 5¹/₄

字数 125 千字 印数 1—1,200

2006 年 5 月第 1 版 2006 年 5 月第 1 次印刷

社内编号 5631 定价 18.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换



刘建功, 男, 生于1956年, 工学博士, 教授级高级工程师。现任河北邯郸矿业集团有限公司董事长。1990年获全国煤炭系统优秀青年知识分子称号; 1999年被国家煤炭工业局评为拔尖人才, 并享受国务院政府特殊津贴。

近年来, 主持研究的电磁调速电牵引采煤机、矿井提升机计算机控制、主井防坠器、倾斜煤层综合机械化采煤工艺等20余项科技成果分获煤炭工业协会科技进步一等奖, 河北省科技进步二等奖、三等奖, 原煤炭部科技进步二等奖、三等奖, 原河北省煤炭厅科技进步一等奖等。并取得电磁调速电牵引采煤机、采煤机制动、煤矿井下研石充填等3项国家发明专利, 5项实用新型专利。在国内外著名刊物上发表论文20余篇, 编写的两本工程用书已由兵器工业出版社和煤炭工业出版社出版。

内 容 提 要

本书通过分析电牵引采煤机的使用情况,对电磁调速电动机的特性和采煤机对控制系统的要求,进行了详细的理论研究、试验和实际工作面采煤机工况研究,论证了采用电磁调速作为电牵引采煤机调速系统的优越性;根据采煤机实际负载特性,研究了适合采煤机工作特点的变转矩-最大转矩保护的调速控制方式;在采煤机牵引力范围之内,利用控制系统的调节功能,及时根据负载转矩的变化,调节采煤机的输出转矩,保持电磁转矩和负载转矩相等;在对电磁调速电动机的原理进行描述的基础上,建立了电磁调速电牵引控制系统的数学模型;按照采煤机的实际需要,在采煤机上研究并实施了变转矩-最大转矩保护控制方式的速度、电流双闭环计算机控制系统,在现场使用中取得很好的控制效果;研究了采煤机电动运行与制动运行状态转换的判断依据,实现了电磁调速电牵引采煤机制动运行;最后,介绍了这种控制准确、功能完善、使用面广的新型采煤机控制系统在煤炭企业推广应用的情况。

Abstract

In this dissertation, the author analyses the electrical shearer working results and does a detailed theory research, test and working site evaluation to its requirement for the character of electromagnetic speed regulation motor and control system. Prefers that using electromagnetic speed regulation as the timing system for the electrical shearer, studies the timing control principle of maximum torque protection that the changing torque is suitable for the shearer working condition according to its actual loading capacity. In order to keep the electromagnetism torque and loading torque equal, using the control system's regulate function to regulate the shearer output torque according to the loading torque changing condition in the range of the shearer haulage capacity. The author makes some mathematical model of electromagnetic speed regulation haulage system on the basis of describing the electromagnetic speed regulation motor theory and firstly tests and implements to use the changing torque-the maximum torque protection control rate, current double closed loop computerized system to get the good control results according to the shearer actual working requirement. The author also studies judgement reference for the shearer motor from running changed into braking condition, solves the electromagnetic speed regulation shearer braking running problem. It's a new type of accuracy control, perfect function, wide using shearer control system and promoted to apply to coal mining enterprises.

前 言

电磁调速系统的突出优点是：牵引功率大、控制功率小、容易升压，并且结构简单、容易维护、制造成本低。有资料表明，开发新型的电磁调速电牵引采煤机及其系列产品适合中国国情，其性能价格比高，具有较广阔的市场前景，对促进我国采煤技术的机械化、高产高效化有重要意义。

笔者在攻读博士学位期间，对电磁调速电动机的特性和采煤机对控制系统的要求进行了详细的理论研究，建立了电磁调速电牵引控制系统的数学模型，提出了适合采煤机工作特点的变转矩-最大转矩保护调速控制方式。在理论研究的基础上，结合多年的生产管理实践，进行了大量的试验和实际工作面采煤机工况研究，成功实施了变转矩-最大转矩保护控制方式的速度、电流双闭环计算机控制系统的现场应用，取得了很好的控制效果。在实施本研究项目的河北金牛能源股份有限公司，全面推广使用了电磁调速电牵引采煤机，共有MG-668D、MXP5.0-500D、MXP3.5-500D、MXP-350D、MG132/13-DW 几种型号，采高从1.1m到5m，生产原煤近20Mt，最高日产达到万吨。目前，全国约有8家煤炭企业使用着40多台电磁调速电牵引采煤机，在安全生产和高效生产上都有良好的表现。

技术创新是增强企业竞争力、促进企业持续发展的重要手段，是依靠科技生产力达到安全、高效生产的重要途径。把电磁调速技术应用于电牵引采煤机是采煤机在调速方式上的创新。本研究项目中的全部技术均拥有自主知识产权，从理论的建立到关键技术的实施都体现了自主和创新。

在本书的写作过程中，笔者力求简洁地反映理论建立和技术实施的全貌和本质，略去对已知一般知识的赘述，突出对理论关键点和技术创新点的阐释。本书既是理论研究又是应用总结，希望本书的出版能对采煤技术的创新有所启发和借鉴。本书的核心内容来自笔者的博士论文，王汝琳教授对本书的写作给予了精心的指导，在此表示衷心的感谢。书中难免存在一些不当之处，欢迎各界朋友指正，以使本书在促进技术创新、实现煤炭企业的安全生产方面发挥应有的作用。

作 者

2006 年 2 月

目 录

1 引言	1
1.1 国内外采煤机控制系统发展现状	1
1.2 交流变频调速系统	3
1.2.1 变频调速的矢量控制	3
1.2.2 恒转矩特性	6
1.2.3 恒功率调速方式	8
1.3 开关磁阻调速方式	8
1.3.1 开关磁阻电机的特点	9
1.3.2 开关磁阻电机的控制方式	10
1.4 采煤机的制动运行	11
1.5 电牵引采煤机控制系统概述	13
1.5.1 电牵引采煤机控制系统面临的问题	13
1.5.2 电磁调速电牵引采煤机控制系统的特点	14
2 电磁调速电动机工作原理	17
2.1 概述	17
2.2 电磁调速电动机的结构与原理	18
2.3 电磁调速电动机的机械特性	21
2.3.1 自然机械特性	22
2.3.2 人工机械特性	23
2.3.3 电磁调速电动机的调整精度	24
2.4 电磁调速电动机的传递效率	25
2.5 电磁调速电动机的应用	26

2.5.1	电磁调速电动机性能的改进	26
2.5.2	电磁调速电动机的应用	27
3	电磁调速电牵引采煤机控制方式的确定	30
3.1	采煤机稳定运行条件	30
3.2	采煤机的牵引	34
3.3	采煤机的负载特性与调速方式分析	36
3.3.1	负载特性	36
3.3.2	电磁调速电牵引采煤机调速的几个关键因素	37
3.3.3	采煤机常用的调速方式	42
3.4	电磁调速电牵引采煤机调速方式的讨论	44
3.4.1	电磁转矩的调整	44
3.4.2	最大转矩保护	46
3.5	变转矩-最大转矩保护调速控制方式	46
3.5.1	速度对采煤机效率的影响	46
3.5.2	速度反馈的作用	47
3.5.3	电磁调速电牵引采煤机的控制方式	48
3.6	本章小结	49
4	电磁调速电牵引采煤机控制系统的数学模型	50
4.1	电磁调速电牵引采煤机对控制系统的要求	50
4.2	系统的微分方程	51
4.2.1	励磁回路的微分方程	51
4.2.2	单一速度反馈系统的微分方程	55
4.2.3	负载转矩不变时的微分方程	57
4.3	微分方程的线性分析	59
4.3.1	励磁回路	60
4.3.2	电力拖动运动方程	60
4.4	系统的传递函数	62

4.4.1 各环节的传递函数	62
4.4.2 系统的闭环传递函数	65
4.4.3 闭环系统的特征方程	69
4.4.4 系统的开环传递函数	69
4.5 本章小结	70
5 电磁调速电牵引采煤机控制系统的设计	72
5.1 电磁调速电动机开环传递函数的频域分析	72
5.1.1 电磁调速电动机部分的传递函数	73
5.1.2 传递函数结构图	73
5.1.3 参数的计算	74
5.1.4 电磁调速电动机的开环传递函数频域特性	76
5.2 电流环的设计	78
5.2.1 电流环的结构及预期开环对数频率特性	78
5.2.2 电流环与开环放大倍数和动态性能指标的关系	81
5.3 速度环的设计	82
5.3.1 电流调节器的等效传递函数	82
5.3.2 速度调节器的设计及预期开环对数频率特性	84
5.3.3 速度环的参数与动态性能指标关系	86
5.3.4 速度环开环传递函数的频域特性	88
5.4 采样系统的确定	90
5.4.1 采样频率的确定	91
5.4.2 采样信号的处理	92
5.4.3 信号的恢复	93
5.5 系统的稳定性分析	94
5.6 本章小结	96
6 电磁调速电牵引采煤机的制动运行	98
6.1 制动运行的分析	98

6.1.1 采煤机制动运行的特点	98
6.1.2 采煤机下行与制动力的关系	100
6.1.3 制动运行过程的分析	101
6.2 制动转矩的产生	103
6.2.1 变转矩对负载变化的适应	104
6.2.2 电磁调速电动机产生制动转矩的条件	105
6.2.3 运行状态转换的判据	109
6.3 制动运行的调节过程	109
6.4 本章小结	114
7 电磁调速电牵引采煤机控制系统的实现	115
7.1 控制用 PLC 的选择	115
7.2 速度和电流信号的采集	116
7.2.1 电流信号的采集与处理	116
7.2.2 速度信号的采集与处理	117
7.3 速度、电流双闭环调节功能的实现	118
7.3.1 PI 调节器的计算机处理方式	119
7.3.2 电流环参数的整定	120
7.3.3 速度环参数的整定	120
7.3.4 控制系统的完成	121
7.3.5 控制系统的启动过程	124
7.4 电磁调速电牵引采煤机的制动运行	127
7.4.1 电动运行与制动运行的转换	127
7.4.2 手动制动和自动制动	130
7.5 双电磁调速电动机的转矩平衡	131
7.6 电磁调速电牵引采煤机的试验	133
7.6.1 电磁调速电牵引采煤机试验台	133
7.6.2 电磁调速电牵引采煤机控制系统的试验	134
7.7 本章小结	140

8 电磁调速电牵引采煤机控制系统的应用	142
8.1 缓倾斜工作面的使用	142
8.2 大倾角工作面的使用	145
8.3 机载高压喷雾降尘及调高的使用	147
9 结语与展望	149
参考文献.....	152

1 引 言

随着大功率综合机械化采煤技术和高产高效矿井建设的发展,对采煤机牵引力和牵引可靠性的要求越来越高。电牵引采煤机摒弃了液压牵引系统易受井下恶劣环境污染的工作油液,实现电机一次能源转换,效率大为提高,并且使用现代控制理论和计算机控制技术,采煤机的控制系统有了很大的改变。因此,电牵引系统已成为采煤机牵引系统的发展趋势。

目前,电牵引采煤机已在国外高产高效综采工作面中占据主导地位,其中在美国占100%,在德国占56%,在澳大利亚占52%。我国从20世纪80年代后期开始研究交流变频调速电牵引采煤机,90年代初期研究成功样机。10多年来,在采煤机的系列设计、控制系统及功能完善上作了大量研究,开发出系列交流变频电牵引采煤机,已在国内煤矿逐步推广使用。

近年来,在交流变频调速电牵引采煤机发展的同时,又展开了开关磁阻调速和电磁调速电牵引采煤机的研究,并取得较大的进展,为电牵引采煤机的发展起到了很大的促进作用。

1.1 国内外采煤机控制系统发展现状

20世纪70年代中期,德国艾柯夫公司和美国久益公司相继研制出最早的直流电牵引采煤机。此后,世界上各主要采煤机研究制造公司均对电牵引采煤机进行了大量的研究开发。80年代后期涌现出了大量电牵引采煤机机型,并出现了交流电牵引采煤机。90年代,随着现代科学技术的飞速发展,开发出集电子电力、微电子、信息管理以及计算机智能技术于一体的大功率电牵引采煤机。如美国久益公司、英国朗艾道公司、德国艾柯夫公司的EDW-DR

系列、日本三井三池制作所等电牵引采煤机。电牵引采煤机以其性能参数优越、可靠性高、自动化程度高、操作方便、控制灵活、监控保护及检测功能完善和经济效益好等众多优点在国际上被迅速推广使用。

自1976年成功开发直流电牵引采煤机后,德国艾柯夫公司基本上停止了液压牵引采煤机的开发研究,90年代开发了SL系列横向布置交流变频电牵引采煤机,近年来又开始了电磁调速电牵引采煤机的研究。

英国BJD公司应用Leeds大学的开关磁阻调速专利技术,于1991年为考文垂煤矿研制了开关磁阻调速电牵引采煤机,其牵引部采用了双35kW开关磁阻调速电动机。

1991年我国煤科总院上海分院与波兰科玛克合作,研制成功国内第一台交流变频调速薄煤层强力爬底板采煤机以后,西安煤矿机械厂1995年开发了直流电牵引采煤机,接着,辽源、鸡西、太原矿山机械厂等煤机厂相继生产了交流变频电牵引采煤机,对电牵引采煤机在我国的推广起到了推动作用。值得注意的是,近几年以来,有关机构和厂家开始研究制造开关磁阻和电磁调速电牵引采煤机,并取得进展,形成百花齐放的可喜局面,这势必为我国电牵引采煤机的发展起到巨大的推动作用。

将电磁调速技术应用于电牵引采煤机是一项新技术,新型机载式计算机PLC控制电磁调速电牵引将成为我国电牵引采煤机一种新的牵引方式。

作为电磁调速器本身而言,在其他行业,电磁调速装置的设计与制造技术水平已相当先进,已有成功的应用,且在许多场所继续应用。电磁调速系统的突出优点是:结构简单、容易维护、制造成本低、牵引功率大、控制功率小、容易升压、电控箱短。通过分析国内电牵引采煤机的现状,开发新型的电磁调速电牵引采煤机及系列产品适合中国国情,具有较广阔的市场前景,性能价格比高,能满足我国厚煤层、中厚煤层和薄煤层电牵引采煤机的

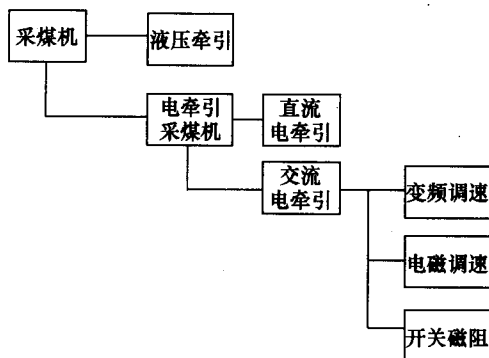


图 1.1 采煤机的发展

Fig 1.1 The development of mining shearer

需要。

采煤机的发展状况如图 1.1 所示。

1.2 交流变频调速系统

交流变频调速技术在电牵引采煤机的应用中，基本采用矢量控制技术，能够实现额定转速以下恒扭矩调速，额定转速至最大转速恒功率调速，为适应大倾角工作面的需要，采用了四象限运行和带电阻运行方式。

1.2.1 变频调速的矢量控制

由于异步电动机的数学模型是一个高阶、非线性的多变系统，虽然通过坐标变换可以降阶并简化，但非线性和多变量的实质并没有改变，所以异步电动机的转矩难以控制。为此，许多专家进行了多年研究，1971 年德国西门子公司 F. Blaschke 提出了“感应电机磁场定向的控制原理”，美国 P. C. Custman 和 A. A. Clack 申报了“感应电机定子电压的坐标变换控制”专利。经过在实践中不断改进，后者能使异步电动机得到和直流电动机一样的调速

特性。由于异步电动机磁场定向控制是定子电流作为具有垂直分量的空间矢量来处理的，所以称之为矢量控制。

为了模拟直流电动机的转矩控制方法，在保证异步电动机产生同样的旋转磁动势的原则下，通过坐标变换方法，将异步电动机的三相绕组等效为 MT 两相绕组。根据等效模型（图 1.2），原交流电动机转子总磁链 ψ_2 就是等效直流电动机的磁通； M 绕组相当于直流电机的励磁绕组； i_{M1} 相当于励磁电流； T 绕组相当于等效静止电枢绕组； i_{T1} 相当于与转矩成正比的电枢电流。

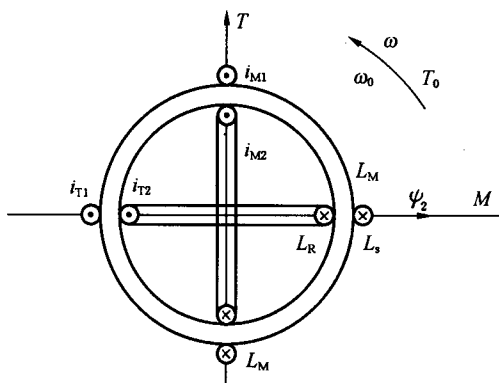


图 1.2 等效直流电动机模型

Fig 1.2 Equivalent model of DC motor

通过异步电动机的坐标变换可以将交流电动机的转矩控制模拟成直流电动机的控制，在转矩控制时，一般采用保持主磁通不变调节控制电枢电流的方法，即保持总磁链 ψ_2 不变，而改变 T 轴的转矩电流分量，而异步电动机变频调速时，频率改变是调节控制电流的转矩分量 i_{T1} ，因此电流和频率动态协调关系也应是矢量控制时必须遵循的基本方程。

对于鼠笼型异步电动机，其转子短路，端电压为零，在 MT 坐