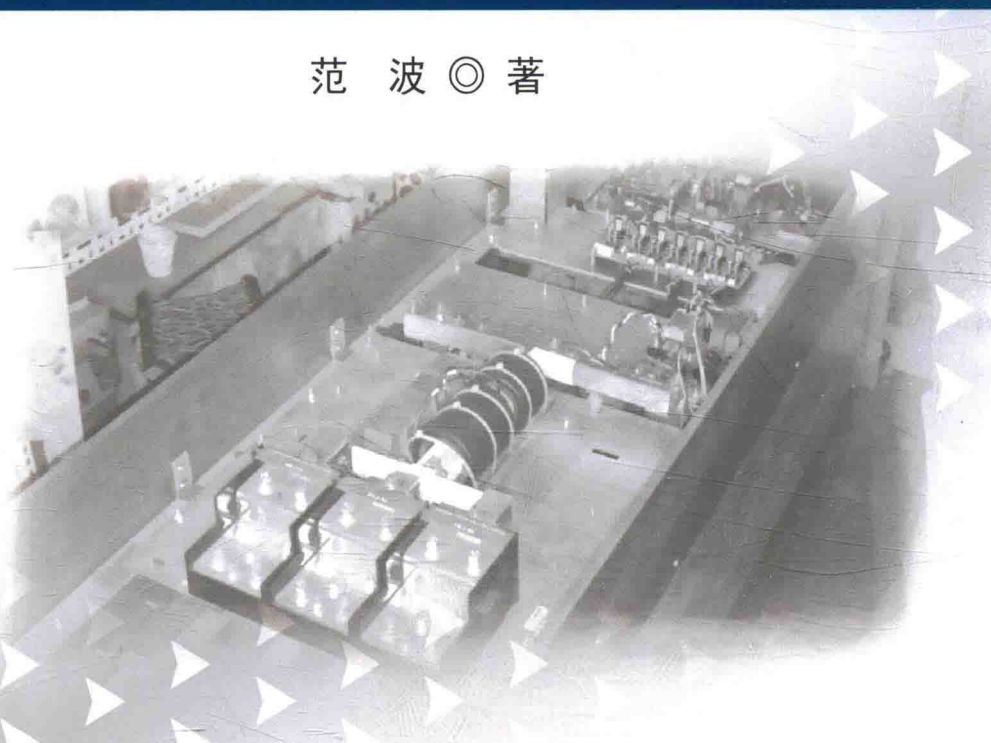


矿用大功率变频调速 关键技术研究与应用

范 波 © 著



科学出版社

矿用大功率变频调速关键 技术研究与应用

范 波 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

大功率交流调速技术在矿用提升设备调速中得到了越来越多的应用,解决矿用设备快速启制动与四象限运行等控制问题具有十分重要的理论与现实意义。本书以符合工况下的矿用提升交流调速系统为研究背景,针对感应电机参数识别方法、LCL 滤波的 PWM 整流器控制、矢量控制预励磁启动技术、双 PWM 变频协调控制等问题进行了深入研究,为提高大容量位能负载交流调速系统控制的稳定与安全以及节能减排效率,提供新的思路与理论依据。

本书内容为作者近年来的研究成果,包含相关领域的研究热点与创新。本专著可供从事电力电子技术、交流调速系统、电气传动技术和矿山机电系统研究、设计和应用的科技人员和高等院校师生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

矿用大功率变频调速关键技术研究与应用/范波著. —北京:科学出版社, 2016. 3

ISBN 978-7-03-047546-6

I. ①矿… II. ①范… III. ①矿井提升机-变频调速-研究 IV. ①TD63

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 044456 号

责任编辑:张海娜 霍明亮 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:蓝正设计

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2016 年 3 月第一次印刷 印张:11

字数:250 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

矿井提升机是现阶段煤矿行业日常生产中所必备的大型提升机械设备,在煤矿生产中主要是用来将煤矿从井下提升到地面高度。矿井提升机同时也是联系井上与井下的重要途径,这就要求矿井提升机的性能必须达到相应的客观要求,矿井提升机在整个运行过程中必须保证运行的安全性、流畅性,避免一切可能产生的故障。根据“国家对落后的耗能过高的用能产品实行淘汰制度”的规定,企业为满足节能降耗,提高经济效益的需要,矿用提升机电动机转子串电阻调速这种落后的能耗过高的产品必将被新型的先进节能产品所代替,平稳无级调速的、节能率高的变频交流调速装置必将成为矿用提升机电控装置配套的主流。

变频调速技术涉及电子、电工、信息与控制等多个学科领域,属于国家大力推广的高性能节能产品,并已广泛应用于工农业生产的各个领域。采用变频调速技术是节能降耗、改善控制性能、提高产品产量和质量的重要途径,在生产中已取得了良好的应用效果和显著的经济效益。但是,通用变频器的拓扑结构使其不能直接用于像矿用提升机这样需要快速启动、制动和频繁正、反转的调速系统。矿井提升机变频调速系统要求具有整流环节网侧电流正弦化,运行于单位功率因数,并且能够实现能量双向流动等运行特性。因此,在能源资源日趋紧张的今天,使矿用大容量提升机能精确制动、具有良好的动态性能的变频调速系统无疑对研究节能降耗具有十分重要的现实意义。

矿井提升机属于大功率电机,在提升过程中速度的调节是必不可少的,在实际运行中提升机交流调速电控装置应满足以下要求:①负载是恒转矩性质的,在上升以及下降中,能实现电机的平稳无级调速;②矿井提升机需要具备较硬的机械特性曲线,在运行阶段不因负载的突然变化而造成运行故障。这两个要求对矿井提升机实际的生产和保证矿井提升机的良好提升性能起着至关重要的作用。矿井提升机变频调速系统的良好运行,才能保证生产的顺利,因此在变频系统的控制策略上,必须进行不断的改善,才能适应相应的工作状况要求。

本书共 13 章。第 1 章介绍了矿井提升机系统设备在国内外的发展与现状,简要描述了矿井提升机电力传动的研究现状,并对矿井提升机的调速性能进行了分析。第 2 章描述了感应电机的数学模型,分析了传统电机参数辨识方法,研究了基于变频器自身资源实现的电机参数辨识方案,给出了具体的实施方式。第 3 章对矢量控制中的磁链观测器进行了改进,用非线性正交方法提高了其对参数变化的适应能力,部分解决了困扰传统电压模型的积分饱和偏移问题,提高了精度和

应用范围。第4章以电机的数学模型为基础,建立了基于矿产资源评价系统(MRAS)的全阶磁链观测器,其中在磁链的估算中,拟采用电压模型和电流模型的复合形式;同时,改善反馈矩阵,实现了两个模型的平滑切换。第5章构建了基于模型参考自适应的矢量控制系统,给出了以MRAS的全阶磁链观测器为参数辨识的方法,通过搭建无速度传感器矢量控制系统的仿真模型,验证了设计方法的可行性。第6章分析了脉冲宽度调制(PWM)整流器工作原理,给出LCL滤波的PWM整流器拓扑结构及其在静止 α - β 坐标系下的数学模型,并利用坐标变换的概念,推导出LCL滤波的PWM整流器在两相同步旋转 d - q 坐标系下的数学模型。第7章详细介绍了LCL滤波器的传统设计方法,分析了传统方法的缺点,并提出了采用粒子群算法对LCL滤波器进行参数优化设计,计算和仿真结果表明,粒子群算法比传统算法简单有效。第8章讨论了PWM整流器固定开关频率控制策略,针对LCL滤波器存在的谐振问题,提出一种基于LCL滤波的PWM整流器无阻尼控制策略。利用系统延时和固定开关频率控制本身的阻尼,通过调节PI调节器的采样时间实现系统稳定。第9章将交流电机定子的磁链概念融合到直接功率控制中,通过虚拟磁链的矢量估算和定向瞬时功率,得到了基于虚拟磁链的直接功率控制方法,在非理想电网时能实现对PWM整流器的良好控制。第10章与第11章详细分析了基于矢量控制的直流预励磁以及交流预励磁启动方案,同时对直流预励磁启动方案和交流预励磁启动方案进行了对比并分析了两种预励磁方案的适用场合,验证了预励磁启动方案在实际中的有效性。第12、13章分别基于负载的电流信息前馈和功率信息前馈,研究了双PWM变频协调控制策略。根据异步电机的数学模型计算出负载的电流,将此电流前馈给整流器部分双闭环控制中的电流内环,形成负载电流信息前馈控制;根据瞬时功率和双PWM变频系统的功率流动情况,估算出负载的功率,将负载功率前馈给整流器,构建负载功率的前馈通道,仿真与实验表明了双PWM变频系统的工作性能良好。

面向矿井提升机的大功率交流调速系统研究一直是电气工程与自动控制领域的研究热点,如何尽量发挥设备能力的同时降低能耗是衡量电控系统的重要指标。通过大功率变频调速技术研究的不断深入,会不断涌现出更多的新理论与应用,更好地服务于国民经济发展。

由于作者水平有限,书中难免有不足之处,欢迎广大读者提出宝贵意见。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 矿井提升机系统概述	2
1.2.1 矿井提升设备的发展历程	2
1.2.2 国内提升设备的发展与现状	3
1.3 矿井提升机电力传动的发展现状	4
1.3.1 绕线转子异步电动机转子回路串金属电阻调速系统	5
1.3.2 绕线转子异步电动机转子回路串液体电阻调速系统	5
1.3.3 发电机-电动机直流可逆调速系统	6
1.3.4 晶闸管-电动机直流可逆调速系统	6
1.3.5 绕线转子异步电动机转子串级调速系统	7
1.3.6 交流电动机交-交变频调速系统	8
1.4 矿井提升机调速性能分析	8
1.4.1 矿井提升机直流调速性能分析	8
1.4.2 提升机交流调速性能分析	9
1.5 交流变频调速技术的发展现状	11
1.6 本书的结构和内容安排	13
参考文献	14
第 2 章 感应电机数学模型及参数辨识方法基础	16
2.1 引言	16
2.2 感应电机数学模型	16
2.2.1 感应电机在两相同步旋转坐标系上的数学模型	17
2.2.2 按转子磁链定向的感应电机矢量控制方程式	17
2.3 感应电机参数离线辨识的传统方法	18
2.3.1 空载试验	19
2.3.2 堵转试验	20
2.4 感应电机参数离线辨识的改进方法	22
2.4.1 直流试验	22

2.4.2 单相试验	23
2.4.3 空载实验	24
2.4.4 离散傅里叶变换	25
2.5 本章小结	27
参考文献	27
第3章 基于正交反馈双补偿方法的转子磁链观测器	29
3.1 引言	29
3.2 转子磁链观测器	29
3.2.1 适于模拟实现的转子磁链电流模型	30
3.2.2 适于数字实现的转子磁链电流模型	31
3.2.3 转子磁链电压模型	31
3.3 转子磁链观测方法的改进	32
3.3.1 电压模型及其误差分析	33
3.3.2 非线性正交补偿	34
3.3.3 磁链观测响应速度的改进	35
3.3.4 仿真及结果分析	35
3.4 本章小结	38
参考文献	39
第4章 基于模型参考自适应的全阶磁链观测	40
4.1 引言	40
4.2 转子磁链观测模型	41
4.2.1 电流模型	41
4.2.2 电压模型	42
4.3 感应电机全阶磁链观测模型	43
4.3.1 全阶状态观测器理论基础	43
4.3.2 异步电机状态空间模型	43
4.3.3 模型参考自适应控制原理	46
4.3.4 改善的全阶磁链观测器数学模型	46
4.3.5 电机转速的获取	48
4.4 全阶磁链观测器反馈矩阵的设计	48
4.4.1 转子磁链观测器的复合形式	48
4.4.2 反馈矩阵的设计	50
4.5 仿真及结果分析	51
4.6 本章小结	54

参考文献	54
第 5 章 基于无速度传感器的感应电机矢量控制方案	55
5.1 引言	55
5.2 无速度传感器矢量控制方案	55
5.3 基于 MRAS 的矢量控制	56
5.3.1 基于 MRAS 的全阶磁链观测和速度估算	57
5.3.2 矢量控制算法推导	58
5.3.3 电压空间矢量脉宽调制技术	59
5.3.4 仿真及结果分析	62
5.4 本章小结	64
参考文献	64
第 6 章 LCL 滤波的 PWM 整流器拓扑结构和数学模型	65
6.1 引言	65
6.2 LCL 滤波的电压型 PWM 整流器拓扑结构	65
6.3 LCL 滤波的三相电压型 PWM 整流器数学模型	66
6.3.1 $a-b-c$ 坐标系下的数学模型	66
6.3.2 $\alpha\beta$ 坐标系下的数学模型	68
6.3.3 $d-q$ 坐标系下的数学模型	70
6.4 LCL 滤波器阻尼方法研究	73
6.4.1 LCL 滤波器无源阻尼方法	74
6.4.2 LCL 滤波器有源阻尼方法	74
6.5 本章小结	76
参考文献	76
第 7 章 基于粒子群算法的 LCL 滤波器参数设计	78
7.1 引言	78
7.2 LCL 滤波器的参数设计原则	78
7.3 LCL 滤波器传统的设计方法	81
7.3.1 分布设计法	81
7.3.2 简易设计法	82
7.4 基于粒子群算法的 LCL 滤波器参数智能优化设计	82
7.5 仿真及结果分析	85
7.6 本章小结	87
参考文献	87

第 8 章 基于 LCL 滤波的 PWM 整流器无阻尼控制	88
8.1 引言	88
8.2 PWM 整流器固定开关频率控制概述	88
8.3 基于无阻尼控制的 LCL 滤波 PWM 整流方法	90
8.3.1 无阻尼控制原理	90
8.3.2 无阻尼控制策略实现	91
8.4 仿真及结果分析	93
8.4.1 较高直流电压输出时系统仿真	94
8.4.2 正常直流电压输出时系统仿真	97
8.5 本章小结	101
参考文献	101
第 9 章 基于虚拟磁链的 PWM 整流器直接功率控制	103
9.1 引言	103
9.2 虚拟磁链的估算	103
9.2.1 磁链概念和估算	103
9.2.2 PWM 整流器虚拟磁链的估算	104
9.2.3 基于虚拟磁链的瞬时功率的计算	107
9.3 直接功率控制	108
9.4 基于虚拟磁链的直接功率控制系统的设计与实现	110
9.4.1 基于虚拟磁链的直接功率控制系统结构	110
9.4.2 积分初值问题	112
9.5 仿真及结果分析	116
9.6 本章小结	118
参考文献	119
第 10 章 基于直流预励磁的矢量控制启动方案	120
10.1 引言	120
10.2 直流预励磁矢量控制启动方法	120
10.2.1 直流预励磁矢量控制中励磁电流及转矩电流分析	121
10.2.2 直流预励磁矢量控制中磁链相角分析	123
10.2.3 传统矢量控制启动和直流预励磁启动的比较	124
10.3 基于矢量控制的直流预励磁启动方案模型	125
10.3.1 直流预励磁控制中励磁电流、转矩电流取值原则	125
10.3.2 直流励磁时间选取原则	126
10.4 仿真及结果分析	126

10.5 本章小结	129
参考文献	129
第 11 章 基于交流预励磁的矢量控制启动方案	130
11.1 引言	130
11.2 交流预励磁矢量控制启动方法	130
11.2.1 交流预励磁矢量控制中励磁电流及转矩电流分析	132
11.2.2 交流预励磁矢量控制中磁链相角分析	133
11.2.3 传统矢量控制启动和交流预励磁启动的比较	134
11.3 基于矢量控制的交流预励磁启动方案模型	134
11.3.1 交流预励磁控制中励磁电流、转矩电流取值原则	134
11.3.2 交流励磁时间选取原则	135
11.4 仿真及结果分析	135
11.5 本章小结	137
参考文献	138
第 12 章 基于负载电流前馈的双 PWM 变频协调控制	139
12.1 引言	139
12.2 双 PWM 变频系统独立控制存在的问题	139
12.3 负载电流前馈补偿技术的研究	140
12.3.1 负载电流的计算	140
12.3.2 PWM 整流器双闭环控制	142
12.3.3 负载电流前馈补偿原理	143
12.4 仿真及结果分析	146
12.5 本章小结	150
参考文献	150
第 13 章 双 PWM 变频负载功率前馈协调控制	152
13.1 引言	152
13.2 基于固定开关频率的直接功率控制	152
13.3 基于负载功率前馈的协调控制	154
13.3.1 负载功率前馈补偿原理	154
13.3.2 负载功率前馈协调控制的动态分析	156
13.3.3 负载功率的估算	158
13.4 仿真及结果分析	160
13.5 本章小结	165
参考文献	165

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

矿井提升机是煤矿、有色金属矿生产过程中的重要设备。提升机的安全、可靠、有效地高速运行,直接关系到企业的生产状况和经济效益。矿井提升系统具有环节多、控制复杂、运行速度快、惯性质量大、运行特性复杂的特点,且工作状态经常交替转换。虽然矿井提升系统本身有一些安全保护措施,但是由于现场使用环境条件恶劣,造成了各种机械零件和电气元件的功能失效,以及操作者的人为过失和对行程监测研究的局限性,使得现有保护未能达到预期的效果,致使提升系统的事故至今仍未能消除^[1]。一旦提升机的行程失去控制,没有按照给定速度曲线运行,就会发生提升机超速、过卷事故,造成楔形罐道、箕斗的损坏,影响矿井正常生产,甚至造成重大人员伤亡,给煤矿生产带来极大的经济损失。

所以提升机调速控制系统的研究一直是社会各界人士共同关注的一个重大课题。电气控制方式在很大程度上决定了提升机能否实现平稳、安全、可靠地起制动运行,避免了严重的机械磨损,防止较大的机械冲击,减少机械部分维修的工作量,延长提升机械的使用寿命。随着矿井提升系统自动化,改善提升系统的性能,以及提高提升设备的提升能力等要求,对电气传动方式提出了更高的要求。对矿井提升机电气传动系统的要求是:有良好的调速性能,调速精度高,四象限运行,能快速进行正、反转运行,动态响应速度快,有准确的制动和定位功能,可靠性要求高等^[2]。

目前,我国地下矿山矿井提升机的电气传动系统主要有:对于大型矿井提升机,主要采用晶闸管变流器-直流电动机传动控制系统和同步电动机矢量控制交-交变频传动控制系统。这两种系统大都采用数字控制方式实现控制系统的高自动化运行,效率高,有准确的制动和定位功能,运行可靠性高,但造价昂贵,中小矿井难以承受。对于中小型提升机,则多采用交流绕线式电动机转子切换电阻调速的交流电气传动系统,即 TKD 电控系统^[3]。这种电气传动系统设备简单,但属于有级调速,提升机在减速和爬行阶段的速度控制性能较差,特别在负载变动时很难实现恒加减速控制,经常会造成过放或过卷事故。提升机频繁的启动和制动工作过程会使转子串电阻调速产生相当严重的能耗,另外转子串电阻调速控制电路复杂,接触器、电阻器、绕线电机电刷等容易损坏,影响生产效益。

将变频调速技术应用于矿井提升机是矿井提升机电气传动系统的发展方向。对于现采用 TKD 电控系统的中小型矿井,随着变频调速技术的发展,交-直-交电压型变频调速技术已开始在矿井提升机改造中应用。变频器的调速控制可以实现提升机的恒加速和恒减速控制,消除了转子串电阻造成的能耗,具有十分明显的节能效果。变频器调速控制电路简单,克服了接触器、电阻器、绕线电机电刷等容易损坏的缺点,降低了故障和事故的发生。随着变频调速技术及可编程序控制器(PLC)发展和应用的成熟与普及,变频器可以实现矿井提升机的连续无级调速,装备 PLC 的提升机在矿山中得到广泛应用,并以其结构紧凑、安装灵活、性能稳定、可靠性高、节能环保等突出优点,赢得了广大用户的认同。采用 PLC 控制,已成为厂家及用户的首选方案。它不仅减少了设备维护量,缩短维修时间,更重要的是可以大大提高提升机运行的安全性和可靠性,提高生产效率。

经过理论分析与工程调研,我们认为:研究与开发矿井提升机大功率变频调速控制系统对提高矿井提升机的安全性、可靠性以及运输效率具有重要的现实意义。

1.2 矿井提升机系统概述

1.2.1 矿井提升设备的发展历程

1872 年,世界上出现了第一台由蒸汽机拖动的单绳缠绕式提升机。自此,在近 150 年的历史中,矿井提升设备随着生产需求的变化和技术的进步,得到了不断的发展:1877 年德国人葛培设计出第一台单绳摩擦式提升机;1938 年多绳摩擦提升设备的研制,满足了深井提升的需求;1958 年南非超千米矿井使用了多绳缠绕式提升机;1988 年德国安装了第一台同步电动机与摩擦轮内的内装式提升机。

现代矿井提升设备由大型机械-电气机组组成,提升容器在有限的运距(提升高度)内往返高速运行,其速度、加速度、减速带要求严格且准确的控制。因此,除传力、承力及运载机械部件外,还需配备完善的拖动控制、安全监测及设备信号灯系统与设备,矿井提升设备外观图如图 1.1 所示。

目前全世界运行的矿井提升设备,最大速度达到 $20 \sim 25 \text{ m/s}$,一次提升量达到 50 t ;拖动电机容量已超过 1 万 kW ,井深超过 2000 m (分段提升超过 3600 m)。由于矿井生产的强化和集中化,以下矿井为了满足生产量及不同提升任务的要求,经常在一个井筒安装多台提升机——机群。例如,瑞典的某矿在 1 个矩形提升塔上安装了 12 台多绳摩擦式提升机,并采用集中控制。

随着现代技术进步及采矿工业的发展,矿井提升设备在机械结构、工艺、设计理论及方法、拖动控制及安全监测等方面都有了很大发展。例如,中低压及中高



图 1.1 矿井提升设备外观图

压盘式闸及液压站、硬齿面行星齿轮传动等应用；内装式同步电动机主轴装置的研制与应用；利用系统工程方法对矿井提升系统进行方案设计与改造；矿井提升系统的模块化及仿真都取得了较新的成就；拖动类型除直流电动机拖动调速、异步电动机拖动调速外，交-交变频器供电的同步电动机拖动方案已在大型矿井提升机得到应用；由 PLC 构成的提升工艺控制、安全回路、监测回路、行程控制器、制动控制及井筒信号系统已有典型产品。

1.2.2 国内提升设备的发展与现状

早在公元前 1100 年左右，我国古代劳动人民就发明了辘轳，用手摇辘轳的方法提升地下矿物，这就是现代提升机的始祖。但是由于我国长期处于封建社会，工业技术没有得到正常发展，直到全国解放时，我国还不能生产矿井提升机。1953 年抚顺重型机器厂为我国制造了第一台单绳缠绕式提升机；1958 年洛阳矿山机器厂（现为中信重工机械股份有限公司）开始仿制苏联 EM 型矿井提升机，并在改进国外产品的基础上，于 1961 年自行设计和制造了我国第一台 JKM2×4 型多绳摩擦式提升机，1971 年又在 XKT 型提升机的基础上设计、制造了 JK 系列单绳缠绕式提升机，此系列提升机采用了新的结构形式和先进技术，提升机的能力比老系列提升机平均提高 25%，其质量也相应地有所减少。现作为国家定型产品成批生产，并销售到十几个国家。1992 年又生产了直连式的多绳摩擦式提升机，为我国深部开采和开采大产量的矿井及直流电机拖动的推广应用，提供了性能良好、技术先进的设备。

目前，大多数中小型矿井采用斜井绞车提升，传统斜井提升机普遍采用交流绕线式电机串电阻调速系统，电阻的投切用继电器-交流接触器控制。这种控制系统由于调速过程中交流接触器动作频繁，设备运行的时间较长，交流接触器主触头易氧化，引发设备故障。另外，提升机在减速和爬行阶段的速度控制性能较差，

经常会造成停车位置不准确;提升机频繁的启动、调速和制动,在转子外电路所串电阻上产生相当大的功耗,节能较差;这种交流绕线式电机串电阻调速系统属于有级调速,调速的平滑性差;低速时机械特性较软,静差率较大;启动过程和调速换挡过程中电流冲击大;中高速运行振动大,安全性较差。鉴于此有必要对提升机的控制方式及调速性能做进一步的分析。

提升机工作原理:煤矿井下采煤,采好的煤通过斜井用提升机将煤车拖到地面上来。煤车厢与火车的运货车厢类似,只不过高度和体积小一些。在井口有一绞车提升机,由电机经减速器带动卷筒旋转,钢丝绳在卷筒上缠绕数周后挂上一列煤车车厢(单提升,多数煤矿都采用单提升),在电机的驱动下将装满煤的列车从斜井拖上来;卸载完成后,再将空车在电机的拖动下沿斜井放下去。当提升机需要停车时,从操作台发出停车指令,从而对卷筒进行抱闸制动。

矿井提升的整个过程可以分为五个阶段:加速阶段、等速阶段、减速阶段、爬行阶段、停车抱闸阶段。加速阶段是提升机从静止状态启动加速到最高速度;等速阶段是提升机的主要运行阶段,提升机以最高速度稳速运行;减速阶段是提升机从最高速度减速到爬行速度;爬行阶段是箕斗定位和准备安全停车阶段。

矿井提升的工作特点:箕斗在一定的距离(井深)内,以较高的速度往复运行,完成上升与下降的任务。鉴于在矿井提升机的工作特点,为确保提升机能够达到高效、安全、可靠地连续工作,其必须具备良好的机械性能,良好的电气控制设备和完善的保护装置。

我国能生产矿井提升机的企业主要有洛阳矿山机器厂(现为中信重工机械股份有限公司)、上海冶金矿山机器厂、山西机器制造公司等大型的制造工厂,他们都能够生产各种大型的矿井提升机。锦州、重庆矿山机器厂及湖南株洲煤矿机器厂能够生产 1.6m 以下矿井绞车,其中株洲煤矿机器厂、山西机器制造公司还可以生产 1.6m 液压防爆绞车,以满足煤矿、冶金矿山的需要。

从国内外看矿井提升机的发展,都在采用最新的技术、工艺、材质,使提升设备向大型化,高效率,体积小,重量轻,能力大,安全可靠、运行准确和标准化、集成化、智能化方向发展。

1.3 矿井提升机电力传动的发展现状

矿井提升机从电力传动而言,可分为交流传动与直流传动两大类。我国在 20 世纪 80 年代之前,绝大多数矿井提升机采用绕线转子异步电动机转子回路串电阻的交流传动方式,而少数则采用发电机-电动机组直流调速系统(G-M 系统,曾称 F-D 系统)。随着矿井的规模越来越大,对一些要求提升容量大,速度快的中大型矿井,提升机一般采用电枢可逆或磁场可逆的晶闸管直流供电的直流调速系

统。而随着世界电力半导体技术和交流同步机传动的开发和生产,矿井提升棚传动装置又向交流传动方式发展,一些矿井提升机开始采用大容量交-直-交变频器和交-交变频器供电的交流传动系统。

1.3.1 绕线转子异步电动机转子回路串金属电阻调速系统

该方案的电动机转速调节是靠改变转子回路串联的附加电阻来实现的,如图 1.2 所示。这种调速方法简单,曾被广泛使用。显然这是有级调速,并且调速时能耗很大,属于转子功率消耗型调速方案。在加速阶段和低速运行时,大部分能量(转差能量)以热能的形式消耗掉了,因此电控系统的运行效率较低。这种调速方案为在低同步状态下产生制动转矩,需采用直流能耗制动方案(即动力制动),或采用低频制动。用这种方法调速时,由于电机的极对数与施加于其定子侧的电压频率都不变,所以电机的同步转速或理想空载转速也不变,调速时机械特性随着转子回路电阻的增大而变软,从而大大降低了电气传动的稳态调速精度。在实际应用中,由于串入电机转子回路的附加电阻级数受限,无法实现平滑的调速。

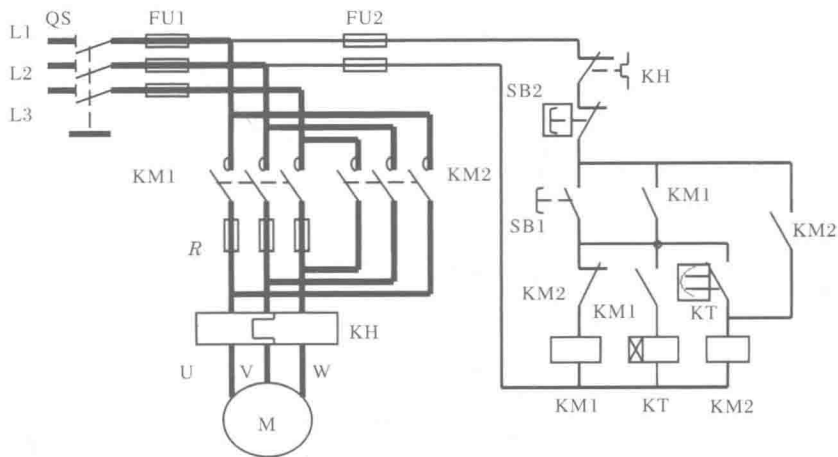


图 1.2 转子回路串电阻调速系统示意图

然而,这种调速方案存在着调速性能差、运行效率低、运行状态的切换死区大及调速不平滑等缺点。但目前在我国的各种矿山中,这种方案使用得相当普遍,以后将面临着技术改造的问题。

1.3.2 绕线转子异步电动机转子回路串液体电阻调速系统

此方案因电阻可无级的调节,所以能实现加速、正力减速以及爬行的平滑控制,负力减速采用动力制动装置。液体电阻调速这一技术在英国比较成熟。英国

的 Peeble 公司曾来我国推荐采用,但由于价格昂贵,对水的电解质有严格要求,另外还需要设循环冷却水系统,因此在国内没有被推广。

1.3.3 发电机-电动机直流可逆调速系统

发电机-电动机调速系统(G-M 系统)^[4]如图 1.3 所示。直流可逆调速系统中直流电动机的励磁电流是恒定的,通过改变直流发电机的输出电压来改变直流电动机的转速。直流发电机一般由同步电动机带动的,其输出电压是靠改变直流发电机的励磁电流的大小来实现的。直流发电机的励磁电流是通过电机扩大机的励磁实现控制和调节的。20 世纪 60 年代以前大型调速传动装置基本采用这种方案。

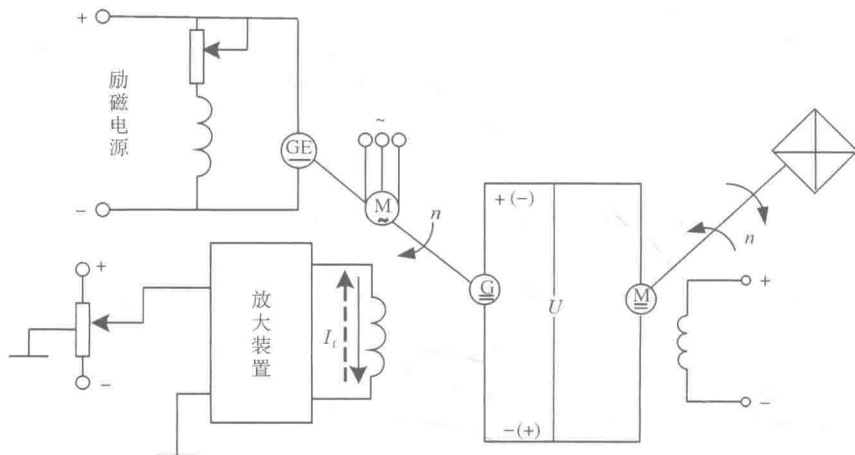


图 1.3 G-M 拖带系统电气调速示意图

该方案的特点是可实现无级调速,电动状态与制动状态的切换是快速平滑的,即能满足四象限平滑调速的要求,由于采用了速度闭环控制调速精度也比较高。本系统在启动时的无功冲击小,且功率因数较高,而且还可向电网提供超前无功功率,以改善电网的功率因数。但本方案有一系列缺点,运行效率还是比较低的,因为功率变换的效率是同步电动机和直流发电机组两台电机效率的乘积,通常变流机组的效率只是 0.8 左右(考虑直流发电机组平时不停机),占地面积大,噪声大,维护工作量大,耗费金属量大,用电量大等。因此,这种传动形式除个别情况下适用外,不再是今后发展的方向。

1.3.4 晶闸管-电动机直流可逆调速系统

晶闸管-电动机调速系统(V-M 系统)如图 1.4 所示,由晶闸管变流器代替旋转变流器,可以提高功率变换的运行效率。晶闸管变流器的运行效率可达 0.95

