

高等学校教学用书

矿山机械的 自动控制系统

姚承三 杨仲平 编



中国矿业学院出版社

TD-63
Y-231

高等学校教学用书

矿山机械的自动控制系统

姚承三 杨仲平 编

· 8

中国矿业学院出版社

620703

内 容 提 要

本书是工业电气自动化专业“自动控制系统”课程的通用教材,全书共分九章,主要包括F-D调速系统,KZ-D不可逆调速系统,KZ-D可逆调速系统,KZ-D调速系统的动态设计,直流脉冲调速,可控硅串级调速系统,随动系统,并对几种矿山主要机械的自动控制系统进行了简明扼要的介绍。

本书除作为教材使用外,还可供有关工程技术人员参考。

责任编辑 胡玉雁

高等学校教学用书
矿山机械的自动控制系统
姚承三 杨仲平 编



中国矿业学院出版社出版

江苏省新华书店发行 中国矿业学院印刷厂印刷

开本787×1092毫米 1/16 印张 14.25 字数 339千字

1987年10月第1版 1987年10月第1次印刷

印数 1—2800册

ISBN 7-81021-011-4/TP·3

统一书号: 15443·025

定价: 2.40元

前 言

本书根据煤炭系统高等学校电气自动化专业的教学计划编写，作为该专业的“自动控制系统”课程的通用教材，也可作为煤矿工程技术人员的参考书。

由于煤炭工业的复杂性和分散性，自动控制对象与其它各行业相比有一系列特点。本教材编写时考虑了这些特点，所以定名为“矿山机械的自动控制系统”。

由于教学计划时数有限，不可能详细讨论矿山应用的所有机械，只能选择煤矿中的几种主要机械，贯彻理论与实践相结合，系统性与全面性相结合，矿山现状与将来发展相结合的原则进行简明扼要的讨论。由于水平有限，繁简是否得体，尚望各校同志和矿山工程技术人员提出宝贵意见；错误不当之处，也请指正。

本书第二章讨论了F-D系统的工作原理。这是由于第一，F-D系统是KZ-D系统的基础；第二，在我国煤炭工业中至今仍有很多大型提升设备拖动属于这种类型；第三，特大型提升机拖动装置有采用KZ-F-D系统的趋势，所以仍予以保留。其中交磁放大机一节，本应在“电机与拖动”课程中讲解，但因该课程属于基础技术课，讨论不可能很详尽，而且不可能应用自控理论的传递函数、反馈、框图等来论述，所以予以保留和补充。但如学生已具备这方面的知识，可以将此节作为自学内容或精简。

本书第九章随动系统是选学内容。随动系统在矿山企业应用虽较少，但为了使学生对自动控制系统有一个全面的了解，需要学习这方面的知识。如果学时不足，可作为自学内容。

本书第一、二、三、四、五、九各章由中国矿业学院姚承三教授编写；第六、七、八等章由西安矿业学院杨仲平教授编写。全书由山西矿业学院贾济雨付教授审校，并承西安矿业学院魏泽国教授、淮南矿业学院路世瑞付教授、中国矿业学院刘允斌付教授等同志提供资料或审阅原稿，特此致谢。

一九八六年六月

115F30/04

目 录

第一章 矿山机械的分类及其对自动控制系统的要求.....	(1)
第一节 矿山机械的分类及电力拖动.....	(1)
第二节 提升机的工作特点及其对自动控制系统的要求.....	(3)
第三节 通风机的特点及其对自动控制系统的要求.....	(5)
第四节 矿山排水设备的特点及其对自动控制系统的要求.....	(6)
第五节 电机车的工作特点和对自动调速的要求.....	(6)
第六节 自动控制系统的技术性能指标.....	(7)
第二章 直流发电机-电动机组 (F-D) 调速系统.....	(10)
第一节 F-D调速系统的分类及构成.....	(10)
第二节 交磁放大机的原理和工作特性.....	(12)
第三节 F-D调速系统的工作原理和稳态特性.....	(19)
第四节 F-D调速系统的动态工作特性.....	(31)
第五节 F-D调速系统的参数计算实例.....	(36)
第六节 给定积分器的原理及设计.....	(43)
第三章 可控硅-电动机 (KZ-D) 不可逆调速系统.....	(46)
第一节 KZ-D系统的分类和开环机械特性.....	(46)
第二节 带转速负反馈的KZ-D闭环调速系统.....	(53)
第三节 带转速负反馈和电流负反馈的双闭环KZ-D调速系统.....	(62)
第四章 KZ-D可逆调速系统.....	(71)
第一节 可控硅-电动机系统的可逆运行与机械特性.....	(71)
第二节 有环流KZ-D可逆调速系统.....	(75)
第三节 逻辑无环流系统.....	(82)
第四节 错位无环流系统.....	(93)
第五节 磁场反向的KZ-D可逆调速系统.....	(100)
第五章 KZ-D调速系统的动态设计.....	(111)
第一节 电子最佳化动态设计方法.....	(111)
第二节 对数频率特性法.....	(121)
第六章 电机车的直流脉冲调速.....	(140)
第一节 直流脉冲调速的原理及方案.....	(140)
第二节 脉冲调速过渡过程分析.....	(143)

第三节	反振式脉冲调速电路的参数选择	(148)
第四节	工矿电机车可控硅脉冲调速实例	(153)
第五节	脉冲调速中的“失控”保护	(157)

第七章 可控硅串级调速系统 (161)

第一节	串级调速的基本原理和机械特性	(161)
第二节	串调系统的动态分析	(168)
第三节	串级调速系统在矿山的应用实例	(170)

第八章 矿山提升机自动控制系统的实例及改进性能的措施 (172)

第一节	KZ-D电枢换向系统的实例	(172)
第二节	KZ-D磁场换向系统的实例	(185)
第三节	交流异步拖动提升机的动力制动系统	(198)
第四节	改进提升机控制系统性能的措施	(205)

第九章 随动系统 (211)

第一节	随动系统的基本类型和构成	(211)
第二节	自整角机与旋转变压器	(213)
第三节	双通道自整角机随动系统	(215)
第四节	随动系统的传递函数和稳态品质	(219)

注：带*号的章节是选择性内容，可以根据学时多少决定是否讲解，或作自学内容。

第一章 矿山机械的分类及其 对自动控制系统的要求

第一节 矿山机械的分类及电力拖动

矿山机械种类繁多,按性质可分为固定机械和移动机械两大类。固定机械包括提升、通风、排水和压气设备。移动机械包括电机车、综采机组、链板及胶带输送机、装载机等。

按电动机容量和用电量大小而言,矿山固定机械占较大的比重。其中提升电动机和压气、通风机电动机容量多超过 1000kW,国外提升电动机和压气电动机容量有达 10000kW 者,国内大提升电动机也达 4000~5000kW。从耗电量分析,有的矿以通风耗电为主,但有的矿则以排水耗电为主,视当地地质条件和矿井情况而异。

从机械的功能来说,移动机械是为采掘和运输服务。综采机组开采出来的煤炭或矿石,通过链板输送机、胶带输送机和电机车运送到井底车场,再通过提升机或大胶带输送机提升到地面。通风机是为矿井通风安全服务的,特别在沼气矿井中,风量不足会引起沼气积聚乃至发生沼气爆炸。排水也是为了防止矿井水淹,保证安全生产条件和设备安全。至于压气机的作用,则在于提供风动工具的动力。其重要性视矿井瓦斯条件和采用掘进、回采工艺而定。在国外,压风设备电耗占全矿电耗 25%;金属矿可达 75%。

从电力拖动及控制系统的复杂性来说,提升设备的要求最高;因为提升机的启动、停止及稳定运行需要严格按速度图执行。因此需要应用自动控制原理的各项原则和方法。和其它行业相比,冶金系统的轧钢机和兵器系统的火炮、雷达随动系统要求更大的快速性和准确性;但是由于提升高度、提升机和提升容器(箕斗或罐笼)的类型、工作水平的数目及其相互的距离变化使提升机的工作方式的复杂性很突出,因而设计提升机的自动控制系统也比较困难。另外,由于负载(煤)的情况因煤质和含水量不同变化范围很大,也给自动控制系统带来一系列的问题。

利用斜井大胶带输送机将煤炭直接送到地面,其优点是连续性输送,输送能力很大,工作可靠而且经济。如用宽 2 m 的胶带和 3 m/s 的速度,输送能力可达每小时一万吨。在我国年产二百万吨以上的矿井中,用大胶带输送机代替竖井提升已逐渐增多,采用直流或交流拖动均有。

通风机在我国以采用轴流式扇风机为多,拖动方式基本上是采用不调速的同步电动机或异步电动机,其控制系统比较简单。但是如果要实现通风系统的闭环调节,则有必要考虑电动机的自动调速,如采用异步机串级调速等。同步电动机启动多采用可控硅自动投励。

水泵采用交流异步电动机和程序控制,不需要闭环控制。水泵自动化的问题主要是根据水仓水位自动开停水泵,各台水泵轮换工作(以保证各台磨损一致),自动切除有故

障的水泵并投入备用泵,以及必要的保护和监视设备(如流量保护、轴承过热保护、不上水警报等)。水泵的容量最好按一、二台水泵就能将全矿井涌水量排出来选择。这样,排水系统和控制系统就比较简单。

电机车的拖动采用直流串激电动机,以获得良好的牵引特性。控制系统的新趋势是采用可控硅脉冲调速代替用控制器和起动电阻进行起动、停止和串并联调速。由于矿用电动机较小,自动化程度远不及铁道干线电力机车。

压气机的拖动采用同步电动机或异步电动机。同步电动机可采用可控硅自动励磁系统。压气站自动化的作用在于根据矿井需用压气量来改变压气机运行台数,属于开环控制。

井下链板和胶带输送机及装载机都采用异步电动机拖动,由于容量不大,一般选用鼠笼型电动机,转速不可调。

综采机组在我国发展很快。国产的机组有80和170kW电动机;进口机组容量达300kW以上。目前正在研究综采机组的闭环控制和全部自动化的问题。

综上所述,矿山机械的分类见图1-1。

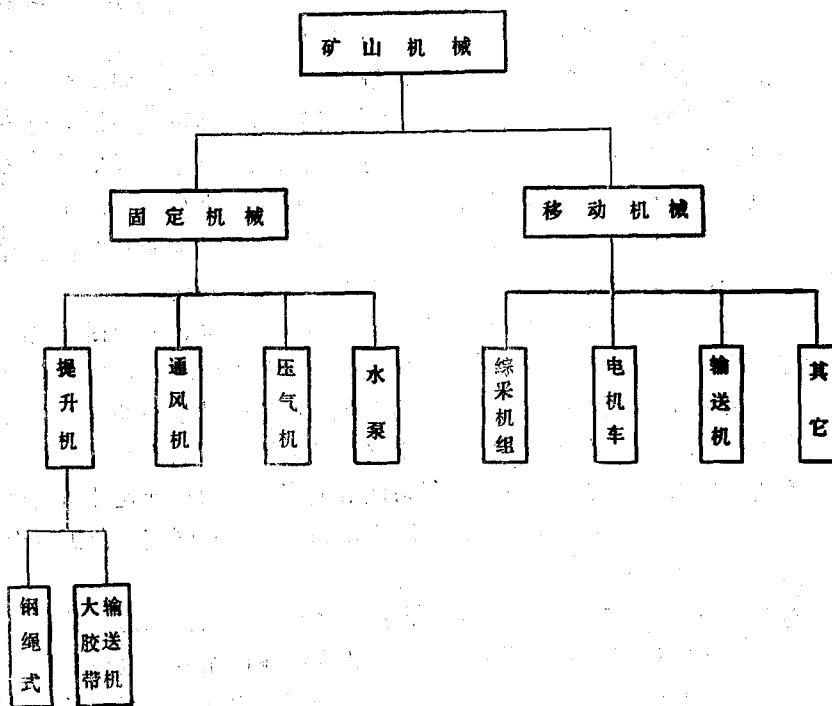


图1-1 矿山机械的分类

由于矿山机械种类繁多,如果按生产机械分类来研究这门课程,就会显得杂乱无章,且有交叉重复,不利于教学。因此较好的方式是根据自动控制和拖动的类型来叙述。即按F-D系统、KZ-D系统、交流串级调速系统、随动系统等来叙述,则系统性和理论性较强,也便于理解。学者理解这些内容后,对矿山机械的具体自动控制系统可以自已分析、掌握,收到事半功倍的效果。

讨论中不能不有所侧重:就机械类别而言,侧重矿山固定机械,特别是提升机;就控

制类别而言，侧重于闭环系统和可逆系统；就电流类别而言，侧重于直流；交流断续控制已在“矿山电力拖动与控制”课程中叙述，于此不再赘述。

第二节 提升机的工作特点及其对自动控制系统的要求

目前最常见的提升系统有两种：一种是提升机放在井塔上的多绳静力平衡提升系统（图1-2a），另一种是提升机安装在地面上的单绳不平衡提升系统（1-2b）。

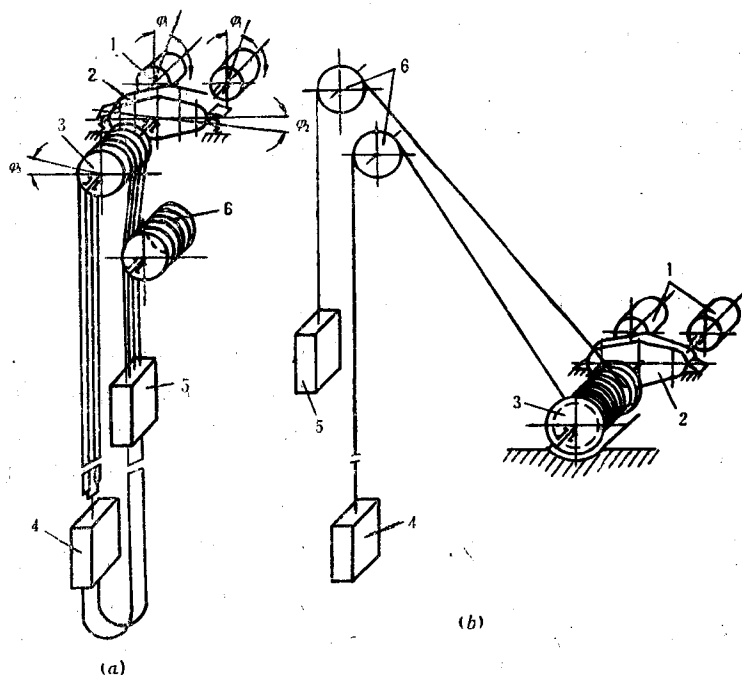


图1-2 提升系统图

a—多绳提升系统；b—单绳提升系统

1—提升电动机；2—减速器；3—主导轮（滚筒）；4、5—提升容器；6—偏导轮

箕斗提升设备的工作方式是比较简单的，它的任务是按照给定的速度图将货载提升到一定的高度。金属矿一般每经过三、四年就要改变一次提升高度，因而速度图必须随之改变。大多数煤矿的提升高度在较长的时间内保持不变。

在整个提升运输系统中，除提升设备外，还包括井底煤仓设备和地面的破碎-分选厂。在实行综合自动化时，对箕斗提升实现完全自动控制，即在无人干预的情况下，按照给定的速度图运行，不仅要保证提升设备本身工作的可靠性，还必须保证井底煤仓设备和地面分选厂的工作可靠性。所以自动箕斗提升系统中装载自动化和箕斗称重检测装置是重要的环节。每一提升循环开始的启动指令是由箕斗装卸检测装置发出，或由信号工根据检测装置的指示发出指令信号。

罐笼提升设备是辅助的提升设备，用来升降人员、坑木、设备、各种材料及炸药和矸石等，在一些中小型矿井中，罐笼也用作提煤的主要设备。

下放吊在罐笼下面的长材料或大件设备是最复杂的工作方式，此时调度作业要占去很

多时间,并且要求提升机与辅助机械(绞车或电机车)之间的配合准确。由于工作情况变化较大,采用半自动控制或远距离(在井口或在罐笼中)控制比较合适;无人操作比较困难。

箕斗提升的计算速度图是五阶段或六阶段的。图1-3a表示带不翻转箕斗的平衡提升设备在正常的荷载提升时的计算速度图和力图,虚线表示速度图,实线表示力图。因为提升容器在卸载曲轨上运行的速度不许超过 0.6m/s ,所以在提升循环的末尾有一个低速爬行阶段。起动时加速也分二个阶段,开始加速度小一些,当提升容器脱离卸载曲轨后,可提高加速度;加速阶段完了,进入稳速运行阶段;稳速运行完了,开始减速阶段,然后就是爬行阶段,最后再制动停车。提升容器在稳速运行阶段加到设备上的力只有提升载荷、钢绳重量和运动阻力所决定的静态力。在加速和减速阶段应考虑系统的惯性力。

计算速度图各阶段速度以直线表示,各阶段转折点是突变的。但实际速度图则是平缓过渡的,因为加速度的变化率不可能太大,而且加速度太大对钢绳和部件的机械寿命也不利。

在爬行阶段需要正向(电动)力,在减速阶段需加负力或正力,或自由滑行,视具体条件而定。

图1-3b表示翻转箕斗或翻转罐笼的不平衡提升设备在额定负载时的计算速度图和力图。

与采用不翻转容器的提升系统相比,这种提升设备在提升开始时所需的力要更大些,因为在翻转时,提升容器的部分重量转移到曲轨上,因而增加了系统的不平衡。爬行阶段终了时不平衡程度最大。

罐笼提升设备的计算速度图为三阶段速度图,即分为:加速、稳速运行和减速三段。图1-3c表示这种速度图,图中还表示了各阶段所需的力,从图中还可看到调罐作业所需的力图(F_1 、 F_4 、 F_5)。

提升设备的电力拖动应满足下列要求:

(1) 容器以低速($0.3\sim 1\text{m/s}$)离开罐座或罐座梁;

(2) 对各种类型的立井及斜井(30° 以上)提升设备,其提升容器的减速度不得超过 1m/s^2 (巷道倾角在 30° 以下时,减速度不得超过 0.7m/s^2)。

(3) 升降人员时,立井和斜井(30° 以上)的加速度限制在 1m/s^2 以下。

(4) 对摩擦提升,在整个工作过程中要避免钢丝绳打滑。

稳速运行时的最大稳定速度,应与电动机轴上的负载变化及运动方向无关。

在提升的最后阶段,容器以低速爬行来补偿调节系统工作的误差。要求能实现准确停

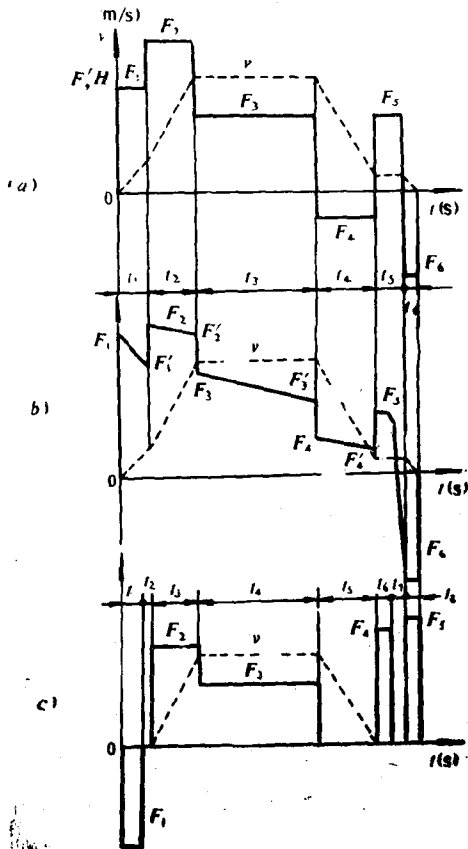


图1-3 箕斗及罐笼提升的速度图和力图

车, 并在不采用机械制动的情况下使容器停在指定的水平上。

对卷筒式罐笼提升, 其爬行距离应取 $0.5 \sim 1.0 \text{ m}$; 对摩擦轮式罐笼提升取 $1.0 \sim 1.5 \text{ m}$; 对卷筒式箕斗提升取 $2.5 \sim 3.5 \text{ m}$; 对摩擦轮式箕斗提升取 $3 \sim 5 \text{ m}$ 。

在自动直流电力拖动的提升设备中, 控制系统应保证在最大速度时有 $\pm 1\%$ 的精度; 而在检查井筒低速运行时有 $\pm 10\%$ 的精度。

对矿井提升设备来说, 最好的自动控制系统应考虑限制加速度和初加速度。提升机的行程调节系统应保证实现需要的速度图, 而不受负载变化的影响, 同时速度偏差不应达到使保护装置动作的数值。

第三节 通风机的特点及其对自动控制系统的要求

矿井主扇是工作在通风网络上的, 通风网络的参数经常变化, 并存在漏风和自然通风的现象, 出事故时需要反风。

在矿井生产过程中, 由于采掘工作面的推进、巷道网络形状的改变、向更深水平开采时瓦斯涌出量及温度的提高等, 使通风阻力 R (或等积孔 A)、通风量 Q 和矿井负压 H 等通风网络的主要参数发生变化。

通风网络阻力的变化将引起其特性的变化, 从而使通风机工况发生变化, 即矿井实际通风量大于或小于需要的数值。参看图1-4, 通风量小于计算值 ($Q' < Q$), 将使矿井通风恶化, 这是违反《煤矿安全规程》的; 通风量大于计算值 ($Q'' > Q$) 也是不希望的, 因为这会使巷道风速增大, 以致超过允许值, 同时也使设备的效率降低。

因此矿井主扇的合理运行方式应该是使通风量不变或按一定的规律改变。方法是通过人为地改变通风机或通风网络特性, 即调节通风机的工况点来实现。

在矿井通风中有时需要改变风流方向, 即反风。《煤矿安全规程》要求主扇要保证 10 min 内实现反风, 同时反风后巷道的风量应不少于扇风机额定风量的 60% 。

目前在矿井通风上应用的轴流式和离心式通风机基本上都是恒速工作的, 同时备有调节工况点的专门装置, 因此一般采用不调速的交流电动机 (同步电动机和异步电动机)。近年来开始采用异步电动机-可控硅串级调速的拖动系统。同步电动机的起动采用可控硅自动励磁。

主扇自动化的要求为:

(1) 主扇应有连续记录通风量和负压的自动记录仪器, 以及在主扇的工作偏离给定参数 (包括通风量、负压、电动机和扇风机轴承温度) 时, 向控制台发出信号的装置。

(2) 应能对主扇电动机实现远距离起动、停车, 并在必要时实现反风。

现在的主要科研课题是矿井通风系统的综合自动化 (即通风系统闭环调节)。其中包括研制检测矿井瓦斯、一氧化碳、氧、煤尘、风速、负压等参数的传感器和仪表, 并将数据传送到地面调度站, 最后通过电子计算机对数据进行处理、运算并发出

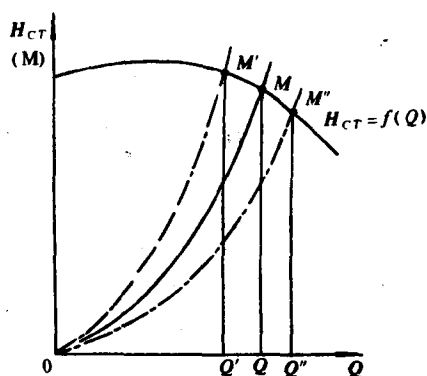


图1-4 通风机的工况和通风网路阻力的关系

指令对通风网路和通风机进行参数调节。

第四节 矿山排水设备的特点及其对自动控制系统的要求

矿井中一般将涌水汇集到井底车场水仓，再用水泵排到地面。中央水泵房的主排水设备台数和容量根据矿井涌水量来选择。除主排水设备外还有辅助排水设备，设在采区和井底水窝，其作用是将水排到大巷或水仓。当煤层底板起伏不平时采用分级排水设备。

排水设备都采用离心式多级水泵，其扬程根据排水高度而定，流量则根据最大涌水量来确定。

排水设备的拖动电动机多为双鼠笼型异步电动机。大型水泵采用 6000V 高压异步电动机。

采用自动控制可使排水设备工作更加可靠、经济，并且可以远距离监视其工作，便于管理，可以实现水泵房无人值班。

对排水设备自动化的要求如下：

- (1) 能根据水仓水位上升或下降到一定位置，自动起动或停止电动机。
- (2) 起动电动机前应先向水泵灌水；灌水完成后发出信号，并起动电动机。
- (3) 高压电动机的起动应考虑油开关的自动合闸。
- (4) 在起动电动机时，排水管的主阀门应先不打开（停泵时关闭），使电动机空载起动，可以降低起动电流。
- (5) 当电动机起动后，缓缓打开主阀门，使电动机负荷逐步增加，可以采用电动阀门担负开闭阀门的任务。
- (6) 如因吸水管底阀漏水或其他原因发生不上水故障，应发出不上水信号，并关闭主阀门，切断电动机，并起动另一台水泵。
- (7) 停泵时应先关闭主阀门，然后停泵，否则会发生水锤现象，打坏水泵轮叶。
- (8) 当有几台水泵时，应实现水泵的轮换起动，以保证水泵磨损一致。
- (9) 应设置水泵轴承过热保护，水泵流量下降或不上水保护，控制回路失压保护等故障保护，发生故障时应停泵。
- (10) 因涌水量过大而超过危险水位时，应发出警报信号；又如水泵起动后，水位仍然上升，应能再开一台水泵或几台水泵。
- (11) 有故障的水泵应有闭锁，在排除故障前不许起动。

第五节 电机车的工作特点和对自动调速的要求

在我国，大巷运输主要依靠电机车。沼气矿井一般采用蓄电池式防爆型或特殊防爆型电机车，在无沼气或低沼气矿可采用架线式电机车。

蓄电池式电机车从装在机车上的蓄电池组取得电源，架线式电机车则由牵引变流所通过架设在巷道中的架空接触线取得电源。

电机车采用直流串激电动机作为牵引电动机。直流串激电动机具有优良牵引特性，起动力矩大，起动电流小，在电源电压降低时只影响速度而不影响力矩，和复激电动机相比，其外型尺寸较小，便于装在电机车车架上；当负载增加时，转速自动降低，因而从电源吸取的功率基本不变，对牵引变流所有利。

对电机车电动机的调速要求是不高的,所以一般不必采用闭环控制调速。但是电机车起动和停止频繁,利用起动电阻起动,消耗大量电能,而且控制器接点易烧毁,维修量很大,所以采用直流脉冲调速是有益的。特别是在蓄电池式电机车中,因蓄电池组容量有限,所以节约电能值得重视。关于脉冲调速的原理,本书将简要介绍。

由于井下矿用电机车是属于小型机车,运输距离较短,巷道曲折,所以实现无人驾驶比较困难,也没有很大的价值。但是电机车的调度采用信集闭系统,可缩短作业时间,避免撞车和追尾事故,提高电机车的利用率和运输生产率。关于信集闭系统将在其他课程中讨论,本书不叙述。

第六节 自动控制系统的技术性能指标

自动控制系统依其调节对象的不同可分为自动调速系统、自动调温系统和随动系统(位置调节系统)。在矿山企业中,主要研究自动调速系统。

自动调速系统的技术性能指标分静态和动态两方面。

自动调速系统的静态(稳态)性能指标有下列几种:

1. 调速范围

电动机最高转速 n_{max} 与最低转速 n_{min} 之比叫做调速范围,通常用字母 D 表示,

$$D = \frac{n_{max}}{n_{min}} \quad (1-1)$$

所谓最高转速 n_{max} 与最低转速 n_{min} 是指在额定负载下的最高转速和最低转速。

各种生产机械对调速范围的要求不相同,例如龙门刨要求调速范围 $D = 20 \sim 40$,热连轧机则要求 $D \leq 10$,提升机的 $D \approx 30$ 。

2. 静差率

电动机在某一转速下稳定运行,当负载由空载变化到满载,转速降落 Δn_{sd} 与理想空载转速(即假定电动机无空载损失时的转速) n_0 的比值,称为静差率 δ ,通常以百分数表示。

$$\delta = \frac{\Delta n_{sd}}{n_0} \times 100\% = \frac{n_0 - n_{sd}}{n_0} \times 100\% \quad (1-2)$$

一般调速系统对静差率的要求是指在最低稳态转速条件下的静差率,即空载转速为最小值 n_{0min} 时的静差率,

$$\delta = \frac{\Delta n_{sd}}{n_{0min}} \times 100\% \quad (1-3)$$

式(1-1)中的 n_{min} 可按以下方法求得

$$n_{min} = n_{0min} - \Delta n_{sd} = \frac{\Delta n_{sd}}{\delta} - \Delta n_{sd} = \Delta n_{sd} \frac{1-\delta}{\delta}, \quad n_{max} = n_{sd}$$

$$\therefore D = \frac{n_{max}}{n_{min}} = \frac{n_{sd}}{\Delta n_{sd}(1-\delta)} \quad (1-4)$$

式(1-4)说明 D 、 δ 和 Δn_{sd} 三者之间有一定的关系,即要求的静差率愈高,允许的调速范围愈小。

自动调速系统的动态性能指标有下列几种:

1. 稳定性

一个自动调速系统必须是稳定的。当突加指令信号,或负载、电源等发生干扰或变动

时, 输出信号(速度)能在有限调节时间内达到或恢复到一定的稳定值, 即有限的输入能得到有限的输出, 输出信号是收敛的, 而不是发散的。

稳定性的判定可根据自动控制原理采用奈魁斯特法、根轨迹法和伯德图法。假定系统的闭环传递函数为

$$W_B(s) = \frac{W(s)}{1 + W(s)H(s)} \quad (1-5)$$

式中 $W(s)$ 为系统前向回路的传递函数, $H(s)$ 为反馈部分的传递函数。根据特征方程

$$1 + W(s)H(s) = 0 \quad (1-6)$$

来判定系统的稳定性。

一般根据 $W(j\omega)H(j\omega)$ 的奈魁斯特图或伯德图确定相位裕量和增益裕量。

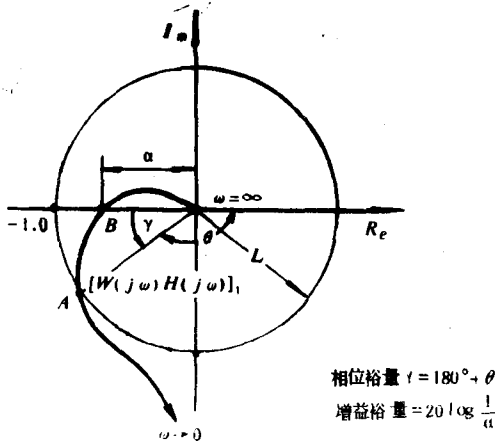


图1-5 相位裕量和增益裕量的定义图

根据图 1-5, $W(j\omega)H(j\omega)$ 轨迹与单位圆的交点 A 的相位角为 $-\theta$, $\gamma = 180^\circ - \theta$ 即称为相位裕量, 一般要求相位裕量等于 $30^\circ \sim 60^\circ$ 。 $W(j\omega)H(j\omega)$ 与负实轴的交点 B 的幅值 α 的倒数 $1/\alpha$ 称为增益裕量, 用 dB 表示,

$$\text{增益裕量 (dB)} = 20 \log (1/\alpha) \quad (1-7)$$

用伯德图法也可求得相位裕量和增益裕量(可参考自动控制原理)。一般要求增益裕量为 $4 \sim 12 \text{ dB}$ 。

根据闭环幅频特性的谐振峰值 M_p 也可判定系统是否稳定,

$$M_p = |W_B(j\omega)|_{\max} = \left| \frac{W(j\omega)}{1 + W(j\omega)H(j\omega)} \right|_{\max} \quad (1-8)$$

M_p 之值为 $1.0 \sim 1.4$ 之间时, 系统是稳定的。

2. 超调量 $\sigma\%$

从图 1-6 可看出, 当系统输入为单位阶跃信号时, 其输出响应 $C(t)$ 超过输入 $R(t)$ 的峰值 C_m 与稳定值 C_∞ 之差被 C_∞ 除的百分值称为超调量 $\sigma\%$,

$$\sigma\% = \frac{C_m - C_\infty}{C_\infty} \times 100\% \quad (1-9)$$

一般要求超调量小, 应根据具体情况确定。

3. 过渡过程时间 T_p

从加上输入信号, 到输出量等于稳定值的 95% 时为止的时间, 称为过渡过程时间 T_p (参见图 1-6)。过渡过程时间要求短, 但 T_p 与 $\sigma\%$ 有矛盾, T_p 短导致增大 $\sigma\%$, 压低 $\sigma\%$ 又导致延长 T_p , 所以只能根据生产机械的要求综合考虑。

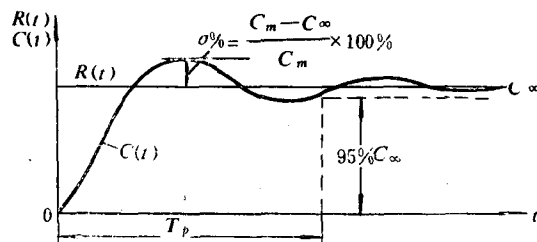


图1-6 超调量 $\sigma\%$ 和过渡过程时间 T_p

4. 振荡次数

输出量围绕稳定值振荡次数也是一项动态性能指标。良好的自动调速系统要求振荡次数少，一般不超过 1 ~ 2 次。

5. 抗干扰能力的动态指标

系统抗干扰能力的动态性能指标可以用突加阶跃扰动时输出响应的最大动态降落百分数 $\Delta C_{\max}\%$ ，及经过干扰后恢复到稳态值的 95% 以内所需要的时间 T_f 来表示，参看图 1-7， T_f 称为恢复时间。 $\Delta C_{\max}\%$ 和 T_f 都要求小，视具体生产机械而异。

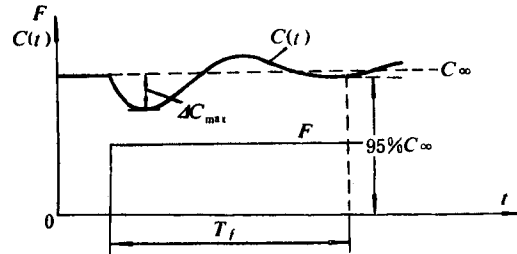


图1-7 抗干扰动态性能指标

第二章 直流发电机-电动机组 (F-D) 调速系统

第一节 F-D调速系统的分类及构成

在矿山固定机械中采用交流拖动系统，还是采用直流拖动系统，主要决定于设备容量的大小和对调速性能的要求高低，以及起动是否频繁。例如在 1000 kW 以上的大型提升机、钢绳牵引胶带输送机，因容量较大、起动频繁，要求调速性能高，特别是在自动化系统中采用交流拖动是不合适的，一般都采用直流拖动系统。

直流拖动调速系统大体上可分为发电机-电动机调速系统（简称 F-D 系统），可控硅-电动机调速系统（简称 KZ-D 系统），可控硅励磁的发电机-电动机调速系统（简称 KZ-F-D 系统）。

根据“电机及拖动”课程知道：改变直流电动机的电枢电压和励磁磁通可以实现很广泛的范围内无级调速。改变电枢电压或励磁磁通需要功率变流和放大装置，如磁放大器、可控硅、交磁放大机等。直流发电机本身也是一种放大装置，即在励磁回路中输入较小的电功率，而在电枢回路中获得强大的电功率输出。

一、F-D调速系统

利用改变直流发电机电压来控制直流电动机转速的调速系统称发电机-电动机调速系统。图 2-1 表示 F-D 调速系统的构成，图中 F 表示直流发电机，D 表示直流电动机。F 由交流异步电动机 YD（或用同步电动机）拖动。在 YD 机轴上同时装有励磁发电机 LF，用来向 F 和 D 的磁场绕组供电。发电机 F 的磁场是大小可调（用变阻器）和方向可逆的（用接触器 1C~4C 改接）。电动机 D 的磁场大小可调，而方向不变。

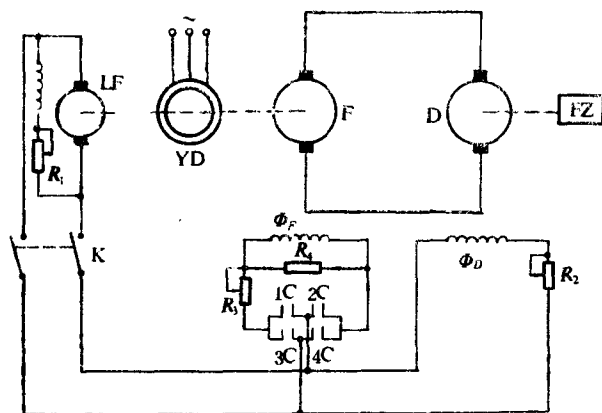


图2-1 F-D系统的构成

R_1, R_2, R_3 —磁场变阻器； R_4 —磁场放电电阻；
1C~4C—磁场反向接触器

这种系统的缺点是所用电机台数多，设备容量大（发电机容量和电动机相等，并需要拖动电动机），效率低，噪音大，维修复杂（旋转机械）。优点是能平滑无级调速和再生制动，调速范围可达30左右。

F-D系统的开环机械特性方程为

$$n = \frac{E}{C_e} - \frac{R_F + R_d}{C_e C_m} M \quad (2-1)$$

式中 n ——电动机转速，r/min；

E ——发电机电势，V；

R_F, R_d ——发电机及电动机电枢回路电阻，Ω；

C_e ——电动机电势常数, $V/r/min$;

C_m ——电动机转矩常数, $N \cdot m/A$ 。

式 (2-1) 代表的机械特性如图2-2所示。

从图2-2可看出, 在调节发电机电势 ($E_1, E_2, \dots$) 时, 机械特性为一组平行直线; I、III象限代表正、反向电动状态; II、IV象限则代表正向、反向反馈 (再生) 制动状态。在制动状态下, 电动机作为发电机运转, 而发电机作为电动机带动异步电动机, 使其超同步转速运转, 向电网反馈电能。

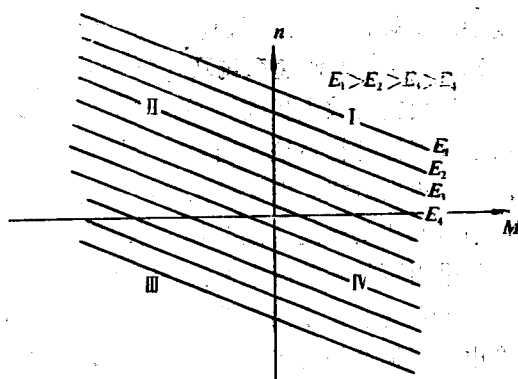


图2 2 F-D系统的机械特性

二、JF-D 调速系统

用交磁放大机 (又称电机放大器) JF 代替图 2-1 中的发电机, 便组成交磁放大机-电动机系统, 简称JF-D 系统。图2-3 表示这种调速系统的构成。

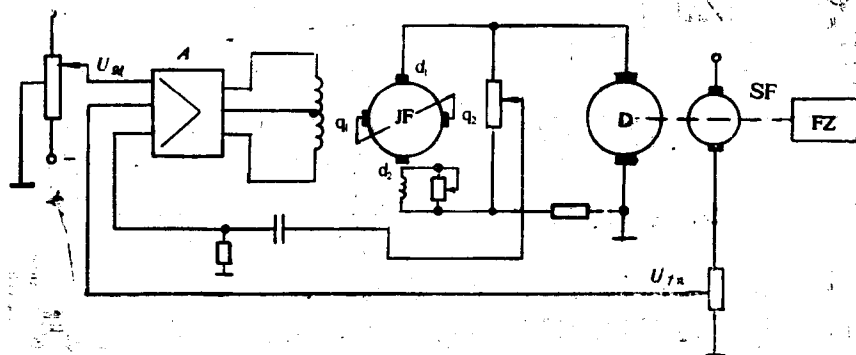


图2-3 JF-D调速系统的构成

图中 JF 为交磁放大机。所谓交磁放大机是交轴磁场电机放大机的简称。它的转子 (磁极) 构造与普通直流电机的电枢类似, 但在整流子上有两对电刷 (参看图2-5); 一对 d_1 、 d_2 装在电机纵轴 (磁场) 方向上, 另一对 q_1 、 q_2 装在电机交轴 (与磁场垂直) 方向上。纵轴电刷与负载连接, 交轴电刷则用导线短接。当控制绕组 (即磁场绕组) W_f 中流过小电流 I_f (几十毫安) 时, 在交轴上产生电势 E_q , E_q 产生 I_q 。因为 q_1 、 q_2 是短接的, I_q 很大。 I_q 产生磁通 ϕ_q , ϕ_q 又产生直轴电势 E_d , E_d 向负载送电。所以交磁放大机实质上相当于二级功率放大。功率放大系数可达2000~10000。(例如国产ZKK-12J型交磁放大机 $K_p = 2400$; ZKK-110型交磁放大机 $K_p = 11000$)。交磁放大机的详细工作原理在下节中叙述。

图 2-3 中 JF 的磁场由放大器 A 供电, 放大器的输入端综合了给定电压 U_{ad} , 速度负反馈电压 U_{fn} , 及并联反馈电压 (电压负反馈、电流正反馈等), 使电动机调速。放大器包括电压放大级和功率放大级。电压放大可由带各种反馈的运算放大器组成, 功率放大器可以用并联平衡直流放大的形式或差动相敏放大的形式。