

摘 要

中国铝业中州分公司成立于 2001 年，其前身为中州铝厂，中州铝厂建厂初期为烧结法氧化铝厂。熟料窑是烧结法氧化铝厂核心设备，其传动系统为七十年代初期直流传动系统，受当时技术水平限制，电气传动为两套二极管整流系统串联供电、串电阻启动、励磁回路串联电动变阻器调速、控制方式为继电器逻辑控制的传动系统，该系统存在着故障率高、调速性能差、效率低的弊端。

随着电力电子及微电子技术的飞速发展，全数字直流控制技术日臻成熟，在我厂 3#窑磨工程建设伊始，结合当时投资紧张以及技术发展状况，笔者提出了以西门子全数字直流调速控制器为核心与国内成熟的 SCR 技术相结合，进行二次开发的全数字直流调速方案，并进行了系统设计及调试工作。本文详细分析了系统机械特性，建立了传动系统数学模型，研究了在给定及扰动作用下系统动态响应过程，完成了系统工程设计，描述了系统调试实验过程及实验分析。工程实际应用表明，该系统基本上满足了熟料窑传动系统的控制要求。

本文论述了该系统设计思路、系统原理，详细阐述了设计过程、系统调试以及应用结果，同时提出了本系统不足之处以及改进的技术路线，为今后熟料窑电气传动技术进步指明了方向。

关键词：回转窑，双直流传动，直流数字控制器

ABSTRACT

Rotating kilns is key equipments in alumina production process. The drive system is DC drive system, which appeared in the early 1970s. The DC drive system is composed of a series-wound diode rectification power supply system, a series-wound resistance startup system, a series-wound rheostat speed governing system and a relay control system. And the DC drive system is higher failure rate, badder speed control performance, and more inefficient.

With electric power electron and micro-electronics developing, The digital DC control technology matured. A digital DC speed governing project was put forward, when the third Rotating kiln construction was taken up. The core of the project was the full digital speed governing control unit produced by Siemens. And the SCR technology was a important part in the project.

The idea, theory and design of the system were expatiated in the paper. The debugging and result were given. The flaw of the system was indicated, and a technical route was given to ameliorate the system.

KEYWORDS Rotating kiln Double DC drive DC didgital controllor

原创性声明

本人声明，所提交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了论文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中南大学或其他单位的学位或证书而使用过的材料。与我共同工作的同志对本研究所作的贡献均已在在论文中作了明确的说明。

作者签名：张荣海 日期：2006年6月25日

关于学位论文使用授权说明

本人了解中南大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留学位论文，允许学位论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以采用复印、缩印或其它手段保存学位论文；学校可根据国家或湖南省有关部门规定送交学位论文。

作者签名：_____ 导师签名：张荣海 日期：2006年6月29日

第一章 绪论

目前,我国氧化铝行业正处于一个蓬勃发展阶段,然而随着铝土矿资源的制约,高品位铝土矿供应日趋紧张,正在成为国内氧化铝行业可持续发展的瓶颈,而处理低铝硅比的烧结法氧化铝工艺越来越显示出其强大的生命力。

熟料窑是烧结法氧化铝生产过程的核心热工设备,其作用是将铝土矿、石灰、碱液、生料煤磨制调配出的生料浆烧制成熟料,生料浆由窑尾喷入,给煤系统由喷煤管、鼓风机组成,煤粉由窑头鼓风机吹入,由窑尾两台风机作为引风系统。熟料烧结过程由烘干、预热、分解、烧成、冷却五个理化反应阶段。

熟料窑受诸多因素影响,负载特性表现为起动惯量大、负载波动频繁,异常工况下负载转矩波动范围极大(例如窑尾结圈积料、筒体变形等)。熟料窑运行工况直接影响其台时产能和运转率,而熟料窑传动系统的性能是影响熟料窑工况的重要因素之一。根据熟料窑的工艺特点,要求其电气传动系统具有较好的起动性能和平滑的调速能力,良好的抗负载干扰能力,优异的设备可靠性^[1]。

1.1 熟料窑结构及电气传动现状

熟料窑主体结构为 $\Phi 4.5m \times 100m$ 的圆形筒体,斜度3.5%。筒体支撑分为四档,每档通过领圈与一对托轮接触支撑,其传动系统在三档位置,由两台直流电动机通过各自的减速机、小齿轮与固定在筒体上的大齿圈进行联结。熟料窑最高转速 $2.57r/min$,台时产能最高已达 $65t$,带料后重量约为 $1700t$,正常运转需用容量 $220kw$ ^[2]。

熟料窑由两台型号为 $ZD_2-132-1B$ 的直流电动机拖动,功率 $200KW$,额定电流 $498A$,额定电压 $440V$,励磁电压/电流为 $220V/18A$,转速为 $400 \sim 1200r/min$,效率 92.5% ,过载能力为1.6倍电动机额定输出转矩,其相应的允许过载时间为 $60s$, $30s$ 过载能力约为2倍电动机额定转矩^[3]。

目前,我国氧化铝行业熟料窑直流调速系统,绝大多数仍采用七十年代不可控调速技术,即电枢电源由两套三相二极管桥式整流电源串联组成,励磁电源由两套三相二极管桥式整流电源串联组成;电机起动为串联三级电阻起动,机械特性较软;电机调速是在励磁回路串联两台电动变阻器(10级调速),通过改变励磁电流进行弱磁调速,系统效率低;该系统起动、调速、联锁控制、保护等功能的实现,采用继电器控制方式,控制接点多达180多个。该系统易出现起动电阻烧毁、电动变阻器触头卡死烧蚀、控制保护电路故障频繁等设备故障,因此对熟料窑操作极为不利^[4]。

因此该系统已经不能适应熟料窑对电气传动系统的技术要求,熟料窑电气传动系统更新换代势成必然。

1.2 电气传动技术综述

熟料窑电气传动系统按其工程技术领域来讲,归属于电气传动自动化技术范畴。电气传动自动化技术是以生产机械的驱动装置-电动机为自动控制对象、以微电子为核心、以电力电子装置为执行机构,在自动控制理论的指导下,组成电气传动控制系统,控制电动机的转速按给定的规律自动调节,使之既满足生产工艺要求,又具有提高设备效率、降低能耗、提高产品质量、降低劳动强度的最佳效果。

电气传动自动化技术是一门多学科,多行业交叉的新兴产业和技术领域。随着电力半导体器件和微电子技术的迅猛发展以及自动控制理论、计算机辅助设计、自诊断技术和数据通信技术的深入发展,它正以日新月异的速度迅速更新换代^[5]。

目前,国内外在大型设备电气传动系统中,存在着直流调速和交流调速两大主流系统,直流调速和交流调速都属于变流调速,两种调速方式随着元器件的开发及电机技术的发展而发展,各有千秋,直流调速和交流调速共同推动了电机变流技术的发展。

1. 交流调速系统

交流变频调速技术是20世纪80年代发展起来的新技术,虽然历史不长,却在各个领域中得到广泛的应用,它通过改变电源频率和电压使交流电机实现平滑调速^{[5][6][7]}。但由于交流变频调速主从控制技术发展较晚,因

此限制了变频技术在多电机传动领域的应用。

所谓主从控制技术就是专门为多电机传动应用而发展的一种技术,变频器之间通过光纤连接,其中一台变频器设置为主机,其他变频器设置为从机,电机硬轴连接。主机实行速度控制,从机实行转矩控制,从机的转矩、速度控制信号由主机根据自身的转矩输出比例进行计算给出,可以有效地控制负载的平衡。在正常的运行范围内,从机的速度调节器输出为零,从机时刻跟随主机的转矩给定,保持了负载的平衡。如果主从机速度略有偏差(速度给定值-实际转速值),且速度偏差处于一定的窗口范围内,窗口控制将使从机速度调节器的输入和输出保持为零,从机跟随主机的转矩给定,满足负载的平衡要求。如果速度偏差超出窗口范围,窗口控制把速度偏差与速度调节器相连,速度调节器输出增加或减少内部转矩给定,停止转速的进一步上升或下降,直至达到新的平衡,这一技术2000年以后才逐渐趋于成熟^[8]。

由于熟料窑电气传动为两台电动机硬轴联结,运行过程中要求两台电动机负荷分配均匀,两台电机转速一致,交流变频调速由于技术原因难以实现两台电机负荷分配均匀的要求,因此熟料窑电气传动系统无法采用交流变频调速,只能选择直流调速传动系统。

2. 直流调速系统

直流调速是指在直流传动系统中人为地或自动地改变电动机的转速,以满足工作机械负载转矩对不同转速的要求。从机械特性上来看,就是通过改变电动机的参数或改变外加电压的方法,来改变电动机的机械特性,从而改变它与工作机械特性的交点,改变电动机的稳定运行速度。

直流调速系统可分为有级调速和无级调速,有级调速的转速只有有限的几级,调速范围有限且不易实现调速自动化,而无级调速可以平滑调节转速,转速变化均匀,适应性强且容易实现调速自动化。

直流调速方案可采用电枢回路串联电阻调速、改变电枢电压调速、改变磁通调速三种类别。电枢回路串电阻调速,因其机械特性变软,系统转速受负载影响较大,轻载时达不到调速目的,重载时产生堵转现象且长期运行能耗较高,其控制多采用接触器、继电器方式,可靠性差。调压调速属于恒转矩调速,机械特性较硬,在轻载时或负载转矩较大时也能得到稳

定转速，电机能够工作在四个象限，启动平滑，能实现回馈制动，控制功率小，因此应用广泛。改变磁通调速又称弱磁调速，属于恒功率调速。弱磁调速时，理想空载转速与磁通成反比，即磁通减弱，机械特性斜率与磁通平方成反比。在高速下由于电枢电流去磁作用增大，转速波动较大，换向性能也会下降，因此采用弱磁调速范围有限。

在他励直流电动机调速方法中，基速以上调速为弱磁调速，其调速极限受电机机械强度和换向条件限制，基速以下调速为调压调速，调速极限受转速稳定性影响。一般情况下，大型设备直流调速方案多采用调压和弱磁两种相结合的调速方案^[5]。

3. 国内外直流调速装置发展现状

目前，国内外广泛使用的直流调速系统多为全数字的可控硅直流调速传动装置。

八十年代后期开始，为了迅速改变我国电气传动的落后状况，经国家机械工业部和对外经济贸易部批准，陆续有一些公司和企业引进国外先进技术和设备，并逐步自己研制、开发了相关的电气产品，它们向各类企业、单位提供了对重大设备改造服务和技术服务。目前这种产品和技术同时向国内外提供服务。例如，武汉新达重型机电工程有限公司是一家从事机电产品的研制、开发和机床设备技术改造的专业化公司。他们的机电产品也包括多种可控硅直流调速装置，如 KZD 系列可控硅直流调速装置、同时利用国内外相关产品和技术为多家企业、单位提供了对重大设备及重型机床改造服务。首钢控制设备公司是一家中国自动化和电气传动设备生产的主要厂家之一，该公司自行开发设计制造的一种通用型全数字控制单元，该系统具有系统参数设定、配置优化处理、多路保护检测和外围连锁等多种功能，适用于冶金、电子、机械、纺织、化工等行业的直流传动控制设备。在 1996 到 1999 年采用 Rockwell 公司的 Reliance AutoMax 多 CPU 32 微处理器分布式数字控制系统、西门子 6RA24 全数字系列控制装置、西门子公司 SIMADYN-D 多 CPU32 位处理器控制系统、GE 公司 DV-300, AV-300 系列交直传动设备等，为首钢和其他国内外(津巴布韦)有关部门的重型设备、中型机床提供了改造和技术服务。国内还有其它公司及其产品，如包钢电器修造厂及其特大功率底吹风冷全数字可控硅直流调速装置；上海

交通大学电力学院实验室生产的可控硅直流调速装置;内蒙古包头勤岳电控设备有限公司及其研制的风冷全数字大容量可控硅直流调速装置;湖北省襄樊市万特电气有限公司及其可控硅直流调速装置;武汉宝德机电有限公司及其应用全数字直流调速装置改造龙门刨床;张家港市金帆电源有限公司及其 KZC2-C 系列、ZSK1 系列、ZSK22 系列可控硅直流调速装置;南京数企资讯科技有限公司及其全数字直流调速系统;重庆蓝天电气传动有限公司及其 LT4 型可控硅直流电机调速器;北京四通电机技术有限责任公司及其四通 BL 系列永磁无刷直流调速装置等几十家相关公司。

目前国内外广泛使用的直流调速装置多数为西门子公司八二年改型后的可控硅直流调速传动装置,如 6RA23、6RA24、6RA27、6RA70 系列直流调速装置,其特点是调速范围宽,调速精度高,体积小,重量轻,尤以可靠性好著称目前。此外,国际上广为使用并在我国使用较普及的直流调速装置还有;英国欧陆公司的 SSD 系列直流调速系统,590 系列、591 系列全数字直流调速系统等;英国雪普电气集团的雪普模拟型·雪普数字型、雪普掌上型直流调速器以及 ABB 直流调速系统等等^{[9][10][11][12][13][14][15][16][17]}。

从直流调速系统发展历史来看,主回路调速方案经历了电动机-发电机组供电的调速系统、晶闸管-电动机系统、调压调磁控制系统,调速装置经历了磁放大器、串电阻继电控制、SCR 模拟调速、SCR 数字调速、SCR 全数字微电子技术控制及具有较强的远程通讯能力。从控制理论发展来看,直流调速系统经历了从开环控制到反馈控制、从古典控制理论到现代控制理论(例如最优控制、自适应控制、模糊控制)等一系列转变。从电力电子器件发展,经历了大功率二极管到 SCR(晶闸管)以及高集成的智能功率器件的发展历程。

因此,直流调速系统无论从控制理论或者是硬件系统以及系统信息集成,直流调速系统已经日臻成熟。

1.3 课题来源及课题概述

中州铝厂 1998 年以前,由于生产规模小(只有两台熟料窑),氧化铝年产量只有 15 万吨左右,生产成本高,企业经营长期处于亏损状态。为迅速扭转长期亏损的经营局面,厂部决定自筹资金(其中包括职工集资部

分)，建设3号窑磨工程（即增加一台熟料窑、一台原料磨），工程总投资6000万元。该项目从1998年7月份设计开始到年底投入运行，1999年元月份实现了达产达标，同年我厂第一次走出了生产经营困境，出现了生产盈利的可喜局面。

笔者受厂部委托，承担了3号窑磨工程电气系统设计工作，而电气系统的重点和难点部分就是熟料窑电气传动系统的设计工作。本系统设计任务为：电气传动系统方案制定；主回路和控制回路设计；直流传动系统负载特性和电机特性分析以及数学模型建立；直流调速系统设计以及动态性能分析；直流调速系统软件设计；系统调试以及运行分析。

综合电气传动技术分析和国内外直流传动技术的发展现状，笔者提出了3号熟料窑电气传动系统技术方案：熟料窑仍采用双直流电动机硬轴联结、两台电机电枢回路串联、励磁回路串联的传动方案，而电枢回路采用SCR三相全控桥可控整流电路，励磁回路采用SCR两相半控桥可控电路；调速方式采用基速以下调压调速，基速以上弱磁调速，调速控制采用全数字西门子直流控制器，操作控制采用PLC控制。

本文共分五章，第一章为绪论部分，重点描述熟料窑生产工艺及电气传动自动化技术概况，直流传动技术发展以及课题背景及来源；第二章为熟料窑直流传动系统主回路设计，重点分析了系统机械特性、主回路设计以及直流传动系统数学模型；第三章为系统控制回路设计及其系统动态分析，重点确立了调速系统结构、调节器设计、系统动态特性分析；第四章为直流调速系统全数字化实现，分析阐述了西门子直流调速器硬件连接、软件系统结构和软件组态，完成系统控制线路设计以及软件系统组态设计。第五章为系统调试，本章阐述了系统调试的方法步骤以及运行分析，指出了本系统的优点和需要进一步改进的地方。

第二章 熟料窑直流传动系统主回路设计

本章重点阐述熟料窑负载特性和直流电动机性能，分析了熟料窑电气传动方案的理论基础，进行了主回路电气设计，建立了直流传动系统数学模型，为调速系统动态结构设计奠定了理论基础。

2.1 熟料窑负载特性分析

熟料窑是一种慢速转动设备，窑速一般控制在 $0.856 \sim 2.5 r/min$ 之间。由于熟料窑负载转矩影响因素较多，例如熟料窑产能、热态变形、熟料不同工艺条件下的安息角、容重、筒体位置、各档承重变化等诸多不确定因素影响，因此其负载转矩波动频繁，个别情况下波动范围较大。其负载特性综合分析如下：

1. 传动速比大

在低速段（ $0.856 r/min$ 以下），表现为恒转矩特性，负载转矩大，且相对稳定。在高速段（ $0.856 \sim 2.5 r/min$ ），呈现恒功率特性，最大输出转矩与转速成反比^[18]。

2. 起动力矩大

熟料窑起动转矩影响因素较多，例如上次停窑工况，物理想化状况，停窑时间，弯曲变形，油膜伤失程度，物料温度，上述因素难以确切量化。窑传动系统起动转矩是由堵转转矩和越过窑内物料滚落点转矩决定的。

堵转状态下，负载转矩基本不变，摩擦转矩比正常运转摩擦转矩高出 $5 \sim 10$ 倍，窑的堵转转矩为异常工况下的负荷转矩加上困难条件下的静摩擦转矩，其值约为正常负荷转矩（ M_N ）的 3.45 倍，该堵转转矩仅维持窑从静到动的瞬间，一旦窑脱离堵转点开始转动时，构成窑静阻转矩的摩擦转矩随之降低，降幅一般不低于正常运行转矩的 30% ，故脱离堵转点的窑阻转矩降至 $2.8 M_N$ 。

窑起动并脱离堵转点之后，随窑转动负荷转矩继续增大直至转过 $5 \sim 10$ 度，物料开始滚落负荷转矩至最大，相应于约 10 度的滚落点负荷转矩，

约为 $1.3M_N$ ，对于异常工况下停窑再启动，其值为 $1.4M_N$ 。另一方面，在窑转过 $5\sim 10$ 度过程中轴承油膜逐渐形成，摩擦转矩迅速降低，其值取 $0.3\sim 1.7M_N$ 的算术平均值，即约 1 倍的正常运转转矩作为（参考）滚落点摩擦转矩，故窑内物料滚落点转矩为 $(1.0+1.4)M_N = 2.4M_N$ [14]。

窑在正常运转过程中，约 30% 为摩擦转矩，70% 为（物料）负荷转矩。掉窑皮严重时负荷转矩增加约 $150\%M_N$ 。不过该过程持续时间较短，一般不会超过 20 分钟。窑结圈对摩擦转矩影响不大，但使负荷转矩增大（不高于掉窑皮的影响）且呈周期性波动，持续时间长。窑体变形弯曲导致窑转矩增大，伴随激烈的周期性波动，这种强迫振荡运动状态，其均方根负载转矩通常不会使电机过载。

由于回转窑经常在满载情况下启动，此时托轮轴与轴瓦之间的摩擦力矩很大，而且还要克服窑体和物料的惯性，因此一般要求电机的起动力矩为 $2.5M_N$ 左右。

3. 加速转矩高

对于按恒电流（恒转矩）方式启动的窑，至少获得 $1.1M_N$ 的剩余转矩用于窑加速。在按 3.5 倍正常运转负载电流恒流启动条件下，窑启动时间通常不大于 5 秒。

负载的恒功率和恒转矩区对传动方案选择有很大影响，电动机在恒磁调速时最大输出转矩不变，表现为恒转矩调速特性，而在弱磁调速时，最大输出转矩与转速成反比，表现为恒功率调速特性。如果电机的恒功率与恒转矩区一致，则电机及电源装置功率最小，但若恒功率区很宽，要继续维持上述关系，将要求特殊的宽弱磁调速范围电机，电机成本增加，因此，需要寻求一个折中方案，适当增加电机功率，减小弱磁范围。

4. 熟料窑调速特点

根据熟料烧结工艺的要求，物料在窑内的反应时间相对稳定，要求熟料窑转速相对平稳，保证物料化学反应所需要的时间。熟料窑属于热工设备，强烈的启动冲击和转速的频繁波动将引起严重的机械故障和热工制度的破坏，从而引起窑的波动，导致熟料窑台时产能和运转率的下降。因此要求传动系统能够实现“零速启动”和平滑的速度调节。

直流电动机负载率应满足窑在异常工况下负荷转矩为正常负荷转矩的

150%时电动机不过载，在此前提下，富裕的转矩量可通过弱磁升速加以利用。

1. 熟料窑负载转矩计算：

$$\text{正常运转时负载转矩： } T1 = \frac{220 \times 9550}{400} = 5253 N \cdot m \quad (2-1)$$

$$\text{负荷转矩： } T11 = 0.7 \times T1 = 3676 N \cdot m \quad (2-2)$$

$$\text{摩擦转矩： } T12 = 0.3 \times T1 = 1576 N \cdot m \quad (2-3)$$

$$\text{异常工况下窑运转转矩： } T2 = 1.5 \times T11 + T12 = 5253 N \cdot m \quad (2-4)$$

异常工况下停窑再启动堵转转矩

$$T3 = 1.5 \times T11 + 8 \times T12 = 18122 N \cdot m \quad (2-5)$$

2. 直流电动机转矩计算^{[19][20][21]}

$$\text{额定转矩： } T_e = \frac{2 \times 200 \times 9550}{400} = 9550 N \cdot m \quad (2-6)$$

$$\text{上限转速输出转矩： } T_{n,\max} = \frac{2 \times 200 \times 9550}{1200} = 3183 N \cdot m \quad (2-7)$$

$$\text{过载转矩（高速时）： } T_{c,\max} = 1.6 \times T_{N\max} = 5094 N \cdot m \quad (2-8)$$

$$\text{启动电流： } I_s = \frac{U_e}{R_a + R_q} = \frac{440}{0.04 + 0.48} = 660 A \quad (2-9)$$

R_a 为电枢电阻， R_q 为启动电阻（三级电阻启动时设计值）。

$$\text{电机启动转矩： } T_s = 2T_e(I_s / I_e) = 12656 N \cdot m \quad (2-10)$$

电动机启动（堵转）转矩（2 倍 30s 过载能力）

$$T_{ST} = 2 \times T_e \times \frac{1200}{400} = 57300 N \cdot m \quad (2-11)$$

3. 直流电动机校验

$$\text{额定及以下转速正常运转负载率： } R_l = \frac{T1}{T_e} \times 100\% = 55\% \quad (2-12)$$

$$\text{启动转矩倍数： } \frac{T_s}{T_{n,\max}} = 2.4 \quad (2-13)$$

$$\text{启动转矩余量} = \left(\frac{T_{ST}}{T_3} - 1 \right) \times 100\% = 216\% \quad (2-14)$$

由以上看出，各项技术指标均满足窑正常和异常工况下连续运转以及重载启动要求。

2.2 直流电动机机械特性分析

1、电动机自然机械特性^{[20][21][22][23]}

电枢电阻：

$$R_a = \frac{U_e I_e - P_e}{2I_e^2} = \frac{440 \times 498 - 200 \times 1000}{2 \times 498^2} = 0.0385 \Omega \quad (2-15)$$

电势常数与磁通乘积：

$$C_e \Phi = \frac{U_e - I_e R_a}{n_e} = \frac{440 - 498 \times 0.0385}{400} = 1.0525 \left(\frac{V}{r/\min} \right) \quad (2-16)$$

$$\text{转矩常数与磁通乘积：} C_m \Phi = 9.55 C_e \Phi = 10.051 \left(\frac{N \cdot m}{A} \right) \quad (2-17)$$

$$\text{额定电磁转矩：} M_{e_m} = C_m \Phi I_e = 5005.58 (N \cdot m) \quad (2-18)$$

$$\text{额定输出转矩：} M_e = 9.55 \times \frac{P_e}{n_e} = 4775 (N \cdot m) \quad (2-19)$$

$$\text{空载转矩：} M_0 = M_{e_m} - M_e = 231 (N \cdot m) \quad (2-20)$$

$$\text{理想空载转速：} n_0 = \frac{U_e}{C_e \Phi} = 418 r/\min \quad (2-21)$$

$$\text{斜率：} \beta = \frac{\Delta n}{M} = \frac{R_a}{C_e \Phi C_m \Phi} = 0.04 \quad (2-22)$$

$$\text{自然机械特性：} n = n_0 - \beta M = 418 - 0.004 M \quad (2-23)$$

2. 双电动机硬轴联接合成特性

两台电动机的硬轴联结是指两台电动机同轴联结或通过传动机构联系起来，二者共同带动一台生产机械，以减少拖动系统飞轮矩，两台他励直流电动机各自的机械特性相同，轴上输出的合成机械特性，其转矩相当于同一转速下单机机械特性的两倍，这样，总的负载转矩由两台电动机平均分担，合成特性比每台电动机机械特性要硬一些，因此，如果同一型号

的两台电机硬轴联结，两电机机械特性相同，则负载在两电机间分配均匀，每台电机能得到充分利用，如图 2.1 所示。

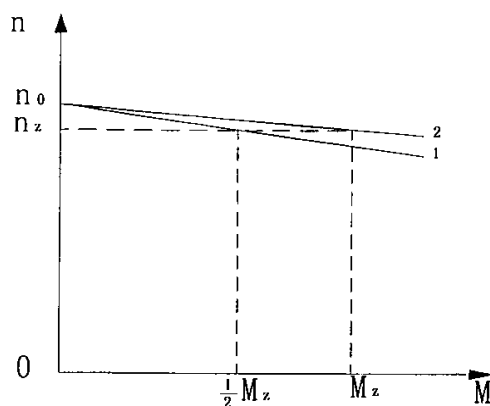


图 2.1 他励直流电动机双机拖动特性

但是，在一般情况下，即使型号相同的两台电动机，由于制造上的原因，往往可能出现电枢电阻或磁通不相等的情况，导致两电机的特性不相同，如图 2.2 所示。特性 1 和 2 分别为电机 1、2 的机械特性，显然，电机 1 电枢电阻大于电机 2 电枢电阻，此时负载在两电机间就不能平均分配了，电机 1 承担的负载大于电机 2。

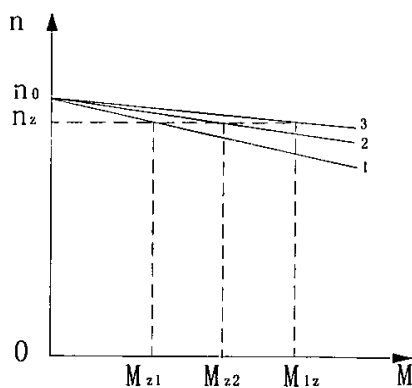


图 2.2 电枢电阻不同的两电机硬轴联结特性

为克服这一矛盾，采用两台电机电枢回路串联，励磁回路串联，流经两电机电流相同，两电机磁通又较接近，因此，负载在两电机间分配就比较均匀，如图 2.3 所示。

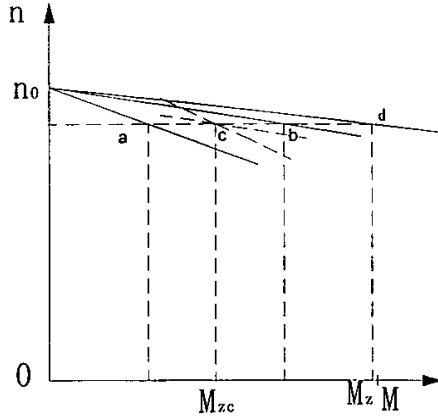


图 2.3 两电机串联联结时双机拖动特性

由于两电机硬轴联结，则两者转速相同此时两电机电枢电压分别为：

$$U_1 = C_e \Phi n + I_a R_{a1} \tag{2-24}$$

$$U_2 = C_e \Phi n + I_a R_{a2} \tag{2-25}$$

如果 $R_{a1} > R_{a2}$ ，则 $U_1 > U_2$ ；由于 $U_1 + U_2 = U$ ，显然， $U_1 > 0.5U$ ， $U_2 < 0.5U$ ，则电机 1 机械特性平行上移，电机 2 机械特性平行上移，两电机交点对应的每台电机的转矩是一样的，电机因电枢串联而得以均匀分配。

3. 双直流电机串联连接的等效电路分析

直流调速主回路电气连接如图 2.4 所示，两电机电枢回路和励磁回路分别串联连接。

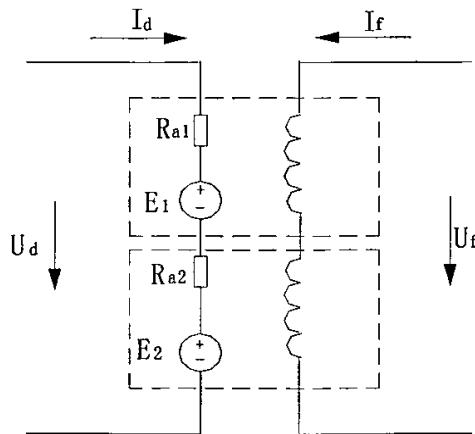


图 2.4 直流调速主回路电气连接

$$\begin{aligned} U_d &= E_1 + I_d \times R_{a1} + E_2 + I_d \times R_{a2} \\ &= (C_{e1} \times K_1 + C_{e2} \times K_2) \times n \times I_f + (R_{a1} + R_{a2}) \times I_d \end{aligned} \tag{2-26}$$

式中

E_1 、 E_2 ：分别为两台电机电枢反电动势；

R_{a1} 、 R_{a2} ：分别为两台电机电枢电阻，二者之和用 R_a 表示；

C_{e1} 、 C_{e2} ：分别为两台电机电动势常数，二者相等用 C_e 表示；

K_1 、 K_2 ：分别为两台电机励磁系数（在一定线性范围内为常数）；

二者之和用 K_f 表示。

U_d 电枢整流电压， I_d 电枢电流， I_f 励磁电流

则式 (2-23) 转变为

$$U_d = C_e \times K_f \times n \times I_f + R_a \times I_d \quad (2-27)$$

因此两台直流电动机串联连接，从电气外特性来看，完全可以按照串联连接的单台电机处理，具有单台电机的动态性能。

基于以上分析，确定熟料窑电气传动主回路方案（如图 2.5 和图 2.6 所示）。

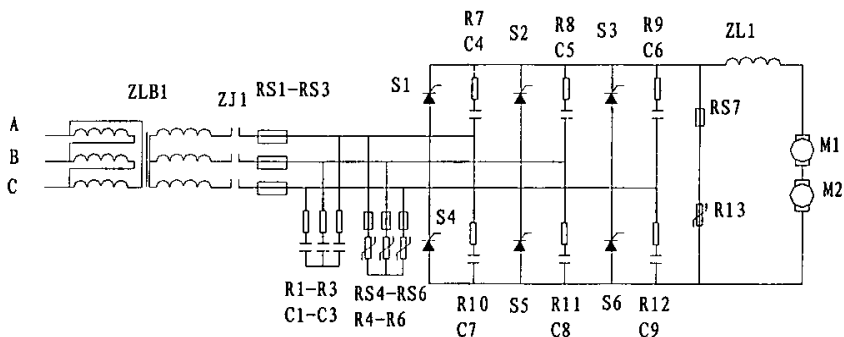


图 2.5 直流调速系统电枢回路方案

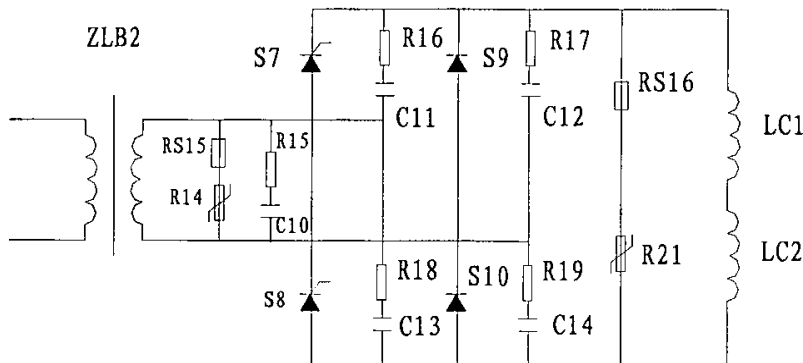


图 2.6 直流调速系统励磁回路方案

由图可知, 两台电机电枢回路串联运行, 其供电系统由 6.3kV 整流变压器供电, 三相 SCR 全控整流桥输出 0~880V 连续可调直流电压 (由于两台直流电机电枢额定电压为 440V, 因此串联运行电压为 880V), 实现基速 (400r/min) 以下无级平滑调速。

励磁回路为两相半控桥可控整流电路, 励磁电流调节范围在 18~2.75A 之间连续调节, 从而达到 400~1200r/min 无级平滑调速。

2.3 直流传动系统主回路设计

1. 电枢回路设计^{[5][23]}

如图 2.5 所示, 熟料窑直流传动系统电枢回路采用三相全控桥式整流电路, 在交流侧有阻容吸收、压敏电阻保护和熔断器保护, 直流侧有: 压敏电阻保护, 晶闸管并联阻容吸收换相过电压保护。

(1) 交流变压器的计算:

二次相电压:

$$U_{v\phi} = \frac{U_{m_n} + \left(\frac{I_{m_{\max}}}{I_{m_n}} - 1 \right) I_{m_n} \times R_{m_a} + n \times U_{df}}{K_{uv} \left(b \cos \alpha_{\min} - K_x \times \frac{e}{100} \times \frac{I_{T_{\max}}}{I_{T_n}} \times df \right)} =$$

$$= \frac{440 \times 2 + (1.5 - 1) \times 498 \times 0.1 \times 2 + 2}{2.34 \times (0.95 \times 1 - 0.06 \times 0.5 \times 1.5 \times 0.1)} = 421V \quad (2-28)$$

$$U_{v_l} = \sqrt{3} U_{v\phi} = \sqrt{3} \times 421 = 730V$$

取 $U_{v_l} = 750V$, 则 $U_{v\phi} = 433V$

式中: U_{m_n} : 电动机额定电压 (V); I_{m_n} : 电动机额定电流 (A);

$I_{m_{\max}} / I_{m_n}$: 系统允许过载倍数; R_{m_n} : 电动机电枢回路电阻 (Ω);

n : 电流通过晶闸管的元件数; U_{df} : 晶闸管正向瞬态压降, 取 1.5V;

K_{uv} : 整流电压计算系数, 取 2.34; b : 电网电压波动系数;

K_x : 换向压降计算系数, 取 0.5; α_{\min} : 最小滞后角, 取 $\cos \alpha_{\min}$ 取 1;

e : 变压器短路电压百分值, 取 6;

二次相电流:

$$I_{v\phi} = K_{IV} \times I_{d_n} = 0.816 \times 498 = 407.86A \quad (2-29)$$

变压器容量：

$$S_T = S_1 = S_2 = m_2 \times \frac{K_{IV}}{K_{UV}} U_{d0} \times I_{dn} = 3 \times \frac{0.816}{2.314} \times 880 \times 498 = 458 \text{ KVA} \quad (2-30)$$

式中： K_{IV} 为二次相电流的计算系数，查表后取0.816；

I_{dn} ：在晶闸管供电时， $I_{dn} = I_{mn}$ （电动机额定电流）；

选择整流变压器为：630KVA，6.3KV/750V。

（2）晶闸管的选择计算：

$$U_{RRM} \geq 2 \sim 3 \cdot \frac{K_{UT} U_{V\phi}}{n K_U} = (2 \sim 3) \frac{2.45 \times 433}{2 \times 0.8} = 1989 \text{ V} \quad (2-31)$$

K_{UT} ：为电压计算系数，查表后取2.45； $U_{V\phi}$ ：电源进线相电压的有效值； n ：为整流元件串联数； K_U ：均压系数，一般取 $K_U = 0.8 \sim 0.9$ ，本设计取 $K_U = 0.8$ 。

额定电流：

$$\begin{aligned} I_{FAV} &\geq 1.0 \sim 2.0 \frac{K_{IT} I_{d \max}}{K_I n_p} \\ &= (1 \sim 2) \frac{0.367 \times 498 \times 1.5}{0.8 \times 1} \\ &= 685 \text{ A} \end{aligned} \quad (2-32)$$

式中： K_{IT} ：电流计算系数，取0.367； $I_{d \max}$ ：最大整流电流值；

K_I ：均流系数，取0.8-0.9； n_p ：晶闸管的并联个数。

考虑到熟料窑工况条件复杂，负载变化范围大，要保证设备的安全稳定运转，必须留下较大的安全余地，选择晶闸管型号为：KP3200V/2500A。

（3）直流回路电抗器的选择：

由于电动机电枢和变压器存在漏感，因而增大了直流回路的等值电抗，在设计和计算附加电抗器的容量是，应根据等效电路折算后，从所需的总电感中扣除。电机电感：

$$\begin{aligned}
 L_M &= 19.1 \frac{CU_{MN}}{2pn_{MN}I_{MN}} \times 10^3 \\
 &= 19.1 \times \frac{0.1 \times 880 \times 10^3}{2 \times 2 \times 400 \times 498} \\
 &= 2.11 \text{ mH}
 \end{aligned} \tag{2-33}$$

式中： C ：变压器短路电压百分值，取 10%； p ：励磁绕组极对数，2；
 n_{MN} ：电动机额定转速； I_{MN} ：电动机额定电流； U_{MN} ：电动机额定电压。

变压器电感折算到二次绕组每相电感量：

$$\begin{aligned}
 L_T &= K_{TL} \frac{e}{100} \frac{U_{V\phi}}{\omega I_{dN}} \times 10^3 \\
 &= 1.22 \times \frac{6}{100} \times \frac{433}{2 \times 3.14 \times 50 \times 498} \\
 &= 0.202 \text{ mH}
 \end{aligned} \tag{2-34}$$

式中： K_{TL} ：交流变压器漏电感计算系数，查表取 1.22； I_{dN} ：额定整流电流； ω ：电源角频率

则附加平波电抗器电感量：

$$\begin{aligned}
 L_{md} &= K_{md} \frac{K_{UV} U_{V\phi}}{\delta I_{MN}} - L_M - L_T \\
 &= 0.34 \times \frac{2.34 \times 433}{0.1 \times 498} - 2.11 - 0.202 \\
 &= 4.56 \text{ mH}
 \end{aligned} \tag{2-35}$$

式中： K_{md} ：平波电抗器计算系数，查表取 0.34。

(4) 保护装置计算：

交流阻容式保护回路，主要用以抑制变压器及空载切断时可能出现的尖峰瞬变过电压，在无抑制回路条件下，其瞬变电压峰值可达正常值的 8-10 倍。

$$\text{电容 } C = K_c \frac{I_{02\phi}}{fU_2} = 10000 \times \frac{407.86 \times 5\%}{50 \times 433} = 9.4 \mu\text{F} \tag{2-36}$$

$$\text{电阻 } R = K_n \frac{U_2}{I_{02\phi}} = 1.83 \times \frac{433}{407.86 \times 5\%} = 38.7 \Omega \tag{2-37}$$

电阻功率

$$\begin{aligned}
 P_R &= (2 \sim 3)(K_P I_{02\phi})^2 R \\
 &= (2 \sim 3)(0.0625 \times 407.86 \times 5\%)^2 \times 38.7 \\
 &= 125W
 \end{aligned} \tag{2-38}$$

式中： K_c 电容计算系数，查表取 10000；

$I_{02\phi}$ ：折算到二次侧的空载电流有效值(A)； U_2 ：二次电压有效值(V)； K_R ：电阻计算系数，查表取 1.83； f ：电源频率； K_n ：电阻功率计算系数，查表取 0.0625；考虑到交流侧还有其他电压抑制电路，以上参数适当选择小一些，选：C：4.7 μ F, 1000V；R：38 Ω ，100W。

在变压器低压侧，采用压星形接法敏电阻的保护电路，抑制 SCR 过电压。压敏电阻额定电压：

$$U_{1MA} \geq 1.33\sqrt{2}U_{2\phi} = 1.33 \times \sqrt{2} \times 433 = 814V \tag{2-39}$$

取 $U_{1MA}=1000V$ 。

泄放电流通值：

$$I_{Rm} = \sqrt{\frac{3}{2}K_2 I_{02I}} = \sqrt{1.5 \times 0.2 \times 407.86 \times 5\%} = 11.17KA \tag{2-40}$$

式中： K_2 ：能量转换系数，查表取 0.2； I_{02I} ：三相变压器空载线电流有效值；取 $I_{Rm}=30KA$ 。选择压敏电阻型号为：1000V/30KA。

晶闸管换相过电压保护计算：

由于晶闸管存在载流子效应，当元件在反向电压作用下，其载流子迅速消失，恢复阻断时由于回路电感的作用（变压器漏感和进线变流电感）在元件两端出现换相过电压，可能导致晶闸管反向击穿，通常用跨接在晶闸管两端 RC 回路来抑制。根据参考文献计算得：R 40 Ω /1000W，C 0.47 μ F/2000V。

2. 直流传动系统励磁回路设计

(1) 整流变压器的选择：

$$\begin{aligned}
 U_{V\phi} &= \frac{U_N}{K_{UV} [b \cos \alpha_{\min} - K_r \frac{e}{100}]} \\
 \text{二次相电压：} &= \frac{220 \times 2}{0.9 \times (0.95 \times 1 - 0.707 \times \frac{6}{100})} \\
 &= 538 V
 \end{aligned} \tag{2-41}$$

式中： U_{rn} ：额定励磁电压（V）； K_x ：换向压降计算系数，取 0.707

变压器二次相电流：

$$I_{V\phi} = K_{IV} I_{dn} = 1 \times 15 = 15A \quad (2-42)$$

式中： I_{dn} ：在晶闸管励磁时，则等于额定励磁电流，即 $I_{dn} = I_{rn}$ ；

$$\begin{aligned} S_T &= S_1 = S_2 \\ &= m_2 \frac{K_{IT}}{K_{UV}} U_{d0} I_{dV} \\ \text{变压器容量:} & \\ &= 1 \times \frac{1}{0.9} \times 520 \times 15 \\ &= 8.67 \text{ KVA} \end{aligned} \quad (2-43)$$

选择变压器型号为：10KVA，380V/520V。

(2) 晶闸管的选择：

晶闸管额定电流：

$$\begin{aligned} I_{FAV} &\geq 1.0 \sim 2.0 \frac{K_{IT} I_{d\max}}{K_I n_p} \\ &= (1 \sim 2) \frac{0.45 \times 15}{0.8 \times 1} = 8.4 \sim 16.9A \end{aligned} \quad (2-44)$$

选择晶闸管为 KP1500V/30A，同样选择二极管为 30A/1500V。

保护回路参数可按照设计手册选取。

2.4 直流传动系统数学模型

1. 直流电动机数学模型^{[24][25][26][27][28]}

由于双直流电动机硬轴联结的传动系统，其电气连接为电枢回路串联，励磁回路串联，根据前面分析结果可知，从电机电气外特性来看，完全可以看成两台电动机串联为一台电机数学模型来处理。熟料窑属于重载设备，因此不会出现电流断续现象，在电流连续条件下，如果不需要表现出电枢电流，那么直流电动机电压和转速间的传递函数为：

$$W_D(s) = \frac{N(s)}{U_{do}(s)} = \frac{1/C_e}{T_m T_I S^2 + T_m S + 1} \quad (2-45)$$

$N(s)$ ：电动机转速； C_e ：电动机电势常数； $U_{do}(s)$ ：电动机电枢电

压； $T_m = \frac{GD^2 R}{375 C_e C_m}$ ：拖动系统机电时间常数； $C_m = \frac{30}{\pi} C_e$ ：电动机额定磁

通时转矩常数； $T_l = \frac{L}{R}$ ：电枢回路电磁时间常数； L ：电枢电感； R ：电

枢电阻； GD^2 ：飞轮矩。

由式（2-42）可知，直流电动机动态结构为二阶振荡环节。

2. SCR 整流装置和触发装置数学模型

SCR 整流装置和触发装置数学模型可近似看作一阶惯性环节（三相桥式整流电路最大失控时间为 3.33ms，因此，一般来讲远小于其他环节的时间常数，因此这种近似是合理的），其传递函数为：

$$W_s(s) = \frac{U_{do}(s)}{U_k(s)} = \frac{K_s}{T_s s + 1} \quad (2-46)$$

$U_k(s)$ ：触发电路控制电压； K_s ：触发电路放大倍数； T_s ：整流电路失控时间。

根据以上分析，可以确立双直流传动系统动态结构(如图 2.7 所示)。

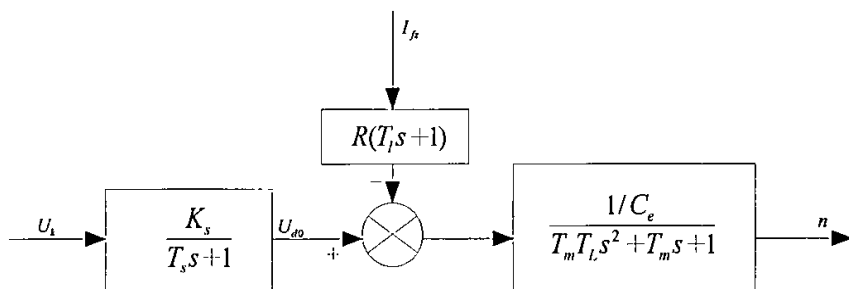


图 2.7 双直流传动系统动态结构

由图可知，SCR 可控整流直流传动系统动态结构，是由一个一阶惯性环节和一个二阶振荡环节串联组成。

2.5 小结

本章重点分析了熟料窑负载特性和直流电动机硬轴联结的双机合成特性，从而确定了直流传动系统主回路结构，设计计算了主回路元器件规格，分析了直流传动系统数学模型，从分析结果来看，直流传动系统是由一个一阶惯性环节和一个二阶振荡环节串联组成的系统，为设计直流调速系统调节器奠定了基础。

第三章 系统控制回路设计及动态分析

本章根据直传动系统数学模型分析结果，确立熟料窑直流调速系统方案以及分析该方案的动态性能。根据第二章分析结果，SCR 直传动系统动态结构，是由一阶惯性环节和二阶振荡环节串联组成，因此系统易产生振荡和超调，为使系统具有较好的静态、动态特性，系统必须增加反馈调节装置，来提高系统品质。

3.1 直流调速系统原理

在他励直流电动机的调速方法中，普遍采用调压调速和弱磁调速相结合的调速方案，即基速以下调节电枢电压，基速以上弱磁升速。直流调速普遍采用转速电流双闭环调速系统，分别为调节转速和电流，二者之间实行串级联接，即以转速调节器输出作为电流调节器输入，再用电流调节器输出作为可控硅触发装置的控制电压，两种调节器作用互相配合，相辅相

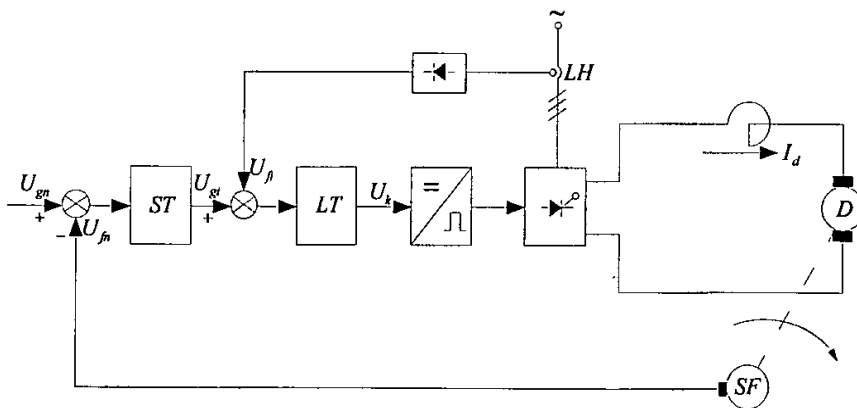


图 3.1 转速、电流双闭环调速系统

成。从闭环反馈的结构上，电流环在里面，转速环在外面，这就形成转速、电流双闭环调速系统，如图 3.1 所示（适用于双电机串联传动调速方案）
[25][30][31][32][33]。

在调压调速系统中要进行弱磁调速，有独立和非独立控制励磁两种方案，前者需设计单独的励磁电流调节器，调磁电位器需和调压电位器配合

的输出则已减少到与弱磁电流相应的电压值。

3.2 直流调速系统调节器设计

转速、电流双环调速系统是一种多环系统。设计多环系统的一般方法是：先内环后外环，一环一环地进行设计。因此先从电流环入手，首先设计电流调节器，然后将电流环看作是转速调节系统中的一个环节，再设计转速调节系统，这种系统通常称为直流串级调速系统。

1. 电流环动态结构及简化

电流环中电流调节器最常用的是PI调节器。由于电流检测信号常常含有交流分量，须加滤波，同时为了补偿反馈通道中惯性环节，在给定通道也加入一个时间常数相同的惯性环节，电流调节环动态结构如图 3.3 所示。

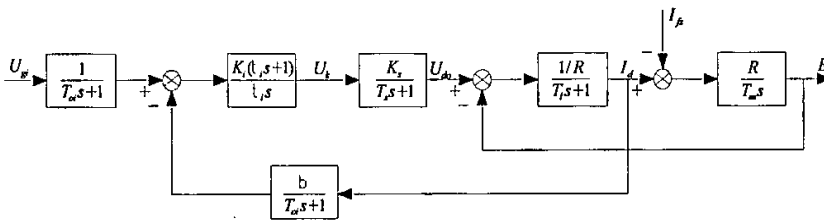


图 3.3 电流调节环动态结构图

U_g 为电流调节器输入电压， βI_d 为电流反馈电压，调节器输出为触发装置控制电压 U_k 。 K_i 、 τ_i 分别表示电流调节器的比例系数和时间常数。 T_{oi} 是电流给定及反馈滤波时间常数。

由于电流调节过程比转速及反电势变化过程快得多，在设计电流调节器时，可不考虑反电势变化的影响，则电流环结构可简化为图 3.4。

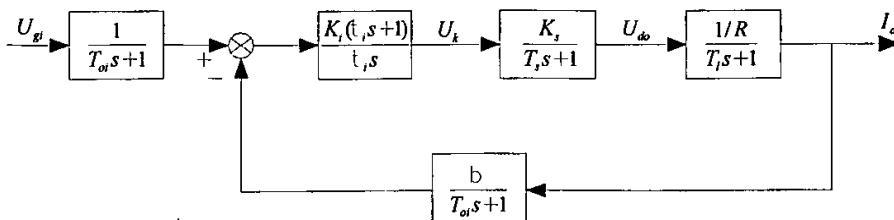


图 3.4 不考虑反电势变化的影响时电流调节环动态结构图

在把给定及反馈滤波作用合并起来，等效于环内，则得到图 3.5。

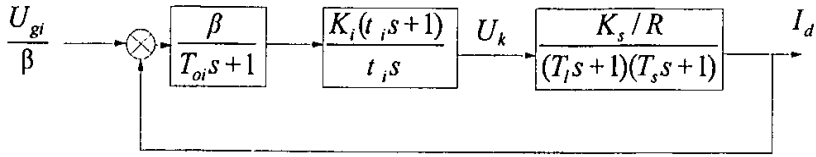


图 3.5 给定及反馈滤波作用合并起来时电流环结构图

一般来讲 T_s 和 T_i 都比 T_i 小得多，可当作小参数近似处理，取 $T_{\Sigma i} = T_s + T_{oi}$ ，则电流环简化为图 3.6。

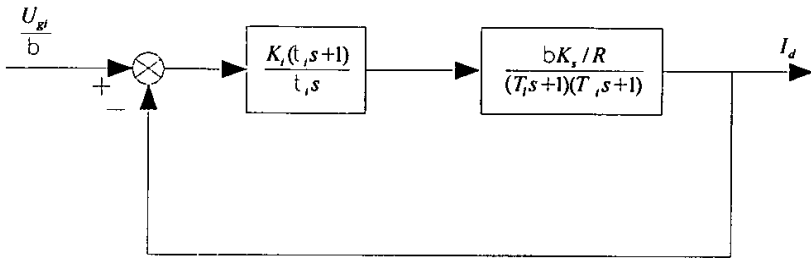


图 3.6 小时间常数近似处理后的电流环结构图

直流调速系统从稳态要求上看，希望电流环做到无静差，所以可采用典型 I 型系统，从动态要求上看，电流环的一项重要作用就是保持电枢电流在起动过程中不超过允许值，因而不希望超调，或者超调越小越好，因此也应该把电流环校正成典型 I 型系统。为把电流环校正成典型 I 型系统，显然应该采用 PI 调节器，而且应选择：

PI 调节器积分时间常数 $\tau_i = T_i$ ，使调节器零点对消掉调节对象的大时间常数极点，动态结构图简化为图 3.7。

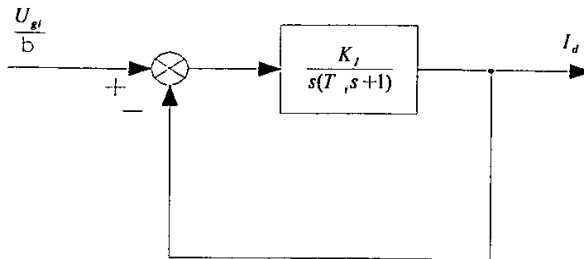


图 3.7 典型 I 型电流环

2. 电流调节器参数设计

由于要求超调量小, 取阻尼比 $\xi = 0.707$, 这时超调量 $\sigma\% = 4.3\%$, 由典型 I 型系统对数幅频特性求出:

$$\omega_c = K_I = \frac{1}{2T_{\Sigma i}} \quad (3-2)$$

$$\text{调节器比例系数和积分时间常数: } K_I = \frac{T_I R}{2K_s \beta T_{\Sigma i}}, \quad \tau_i = T_I \quad (3-3)$$

$$\text{电流调节器传递函数 } K_I \frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s} \quad (3-4)$$

3. 转速调节器设计

当电流环设计好以后, 可以把它看作是转速环内的一个环节, 求其等效传递函数, 然后就可以用与电流环类似的方法设计转速环。

电流环的传递函数为

$$\frac{\beta I_d(s)}{U_{gi}(s)} = \frac{\tau_i s + 1}{\frac{\tau_i R}{K_i k_s \beta} s(T_I s + 1)(T_{\Sigma i} s + 1) + (\tau_i s + 1)} \quad (3-5)$$

由于电流环是按典型 I 型系统设计的, 并取: $\tau_i = T_I$;

$$K_I = \frac{K_i K_s \beta}{\tau_i R} = \frac{1}{2T_{\Sigma i}}, \text{ 则}$$

$$\frac{I_d(s)}{U_{gi}(s)} = \frac{\frac{1}{\beta}}{2T_{\Sigma i}^2 s^2 + 2T_{\Sigma i} s + 1} \quad (3-6)$$

上式表明, 电流环相当于一个二阶振荡环节, 其自然振荡时间常数为 $\sqrt{2}T_{\Sigma i}$, 阻尼比 $\xi = 0.707$ 。

对转速环来讲, $2T_{\Sigma i}$ 只是转速调速系统小参数, 可以忽略高次项, 因此电流环可以简化成一阶惯性环节, 对转速环频率特性中频段不会产生多大的影响。因此电流环的等效传递函数可以简化成:

$$\frac{I_d(s)}{U_{gi}(s)} = \frac{1}{\beta} \frac{1}{2T_{\Sigma i} s + 1} \quad (3-7)$$

图 3.8 表示按典型 I 型系统设计时电流环的对数幅频特性（不考虑比例系数 $1/\beta$ ）。

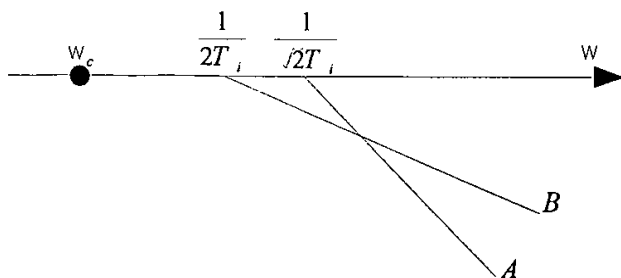


图 3.8 按典型 I 型系统设计的电流环频率特性

特性 A 是式 (3-6) 表示的实际环节的渐近特性，特性 B 是式 (3-7) 所示的等效环节渐近特性。当转速环的 $\omega_c \ll \frac{1}{\sqrt{2}T_{\Sigma i}}$ 及 $\frac{1}{2T_{\Sigma i}}$ 时实际特性与等效特性的差别只影响整个调速系统开环频率特性的高频段。

用等效传递函数表示电流环后，整个调速系统动态结构如图 3.9 所示。图中 α 是转速反馈系数， T_{on} 转速反馈滤波时间常数，和电流环一样，为了补偿反馈通道惯性作用，引入了同样时间常数的转速给定滤波环节。又由于：

$$M - M_{fz} = C_m(I_d - I_{fz}) = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} = \frac{C_e C_m}{R} T_m \frac{dn}{dt} \quad (3-8)$$

电流到转速的传递函数是：

$$\frac{n(s)}{I_d(s) - I_{fz}(s)} = \frac{R}{C_e T_m s} \quad (3-9)$$

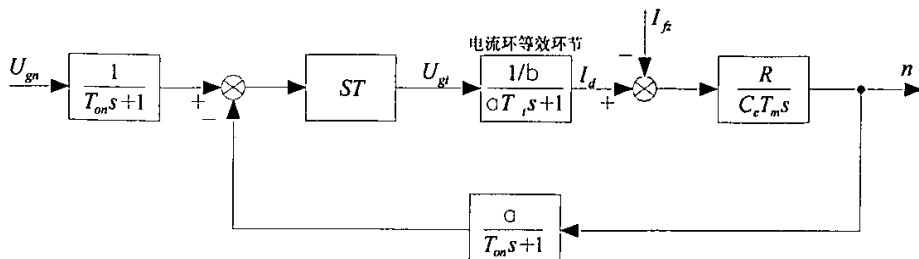


图 3.9 调速系统动态结构

把滤波惯性环节等效的移动到转速环内，并用小时间常数之和 $T_{\Sigma n}$ 代替

T_{on} 和 $\alpha T_{\Sigma r}$: $T_{\Sigma n} = \alpha T_{\Sigma r} + T_{on}$, 则转速环动态结构图可以进一步简化为图 3.10。

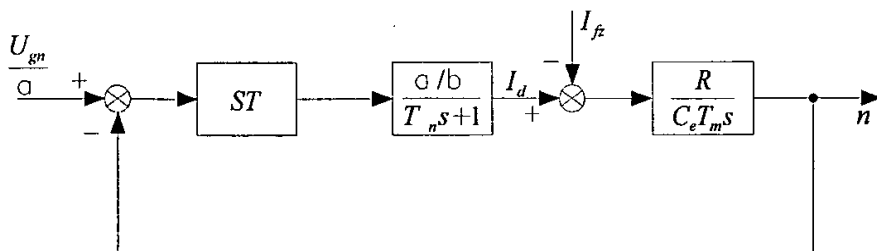


图 3.10 滤波环节和小时间常数处理后的调速系统动态结构

4. 转速调节器参数设计

由图 3.10 可知，如果允许调速系统在负载扰动下有静差，则 ST 只要比例调节器即可，按要求将调速系统设计成无静差调速系统，则 ST 必须设计成 PI 调节器，即按典型 I 型系统设计就可以了，如果要成为无静差调速系统，则 ST 必须按典型 II 型系统进行设计，则 ST 的传递函数为：

$$K_n \frac{\tau_n s + 1}{\tau_n s} \quad (3-10)$$

则调速系统的开环传递函数是：

$$W_n(s) = \frac{K_n a R (\tau_n s + 1)}{\tau_n \beta C_e T_m s^2 (T_{\Sigma n} s + 1)} = \frac{K_N (\tau_n s + 1)}{s^2 (T_{\Sigma n} s + 1)} \quad (3-11)$$

其中 PI 调节器的积分时间常数：

$$\tau_n = h T_{\Sigma n} \quad (3-12)$$

转速开环增益：

$$K_N = \frac{K_n a R}{\tau_n \beta C_e T_m} = \frac{h + 1}{2 h^2 T_{\Sigma n}^2} \quad (3-13)$$

因而 PI 调节器的比例系数：

$$K_n = \frac{h + 1}{2 h} \cdot \frac{\beta C_e T_m}{a R T_{\Sigma n}} \quad (3-14)$$

中频宽 h 应选多大，要看系统对跟随性能和抗扰性能的要求来决定，就抗干扰性能来讲， $h=5$ 较为合适，如果要求超调量小， $h=7 \sim 10$ 才好，如何更好地选择 h ，要看系统对跟随性能和抗干扰性能的要求来定。关于直流调速性能的动态特性以及抗干扰能力将在后面章节叙述。

3.3 直流调速系统的动态分析

1. 直流调速系统静、动态品质

从系统静态特性上看，电流负反馈使静特性有变软的趋势，但是有转速环包在外面，电流负反馈对于转速环来说相当于扰动作用，只要转速调节器放大倍数足够大，而且没有饱和，则电流负反馈的作用就能得到抑制，转速调节器设计为比例积分调节器，整个系统就是一个无静差的调速系统。一旦转速调节器饱和，，则只有电流环起作用，系统表现为恒流调节系统，静特性呈现出很陡的下垂段特性^{[24][34][35][36][37][38][38]}。

从动态响应过程上看，突加给定电压，转速负反馈还来不及反应出来，转速调节器很快处于饱和状态，输出限幅值，经过电流调节器，使电机很快起动。起动后，虽然转速反馈电压增长了，由于积分作用，只要还小于转速给定电压，转速调节器仍维持饱和，直到转速超过给定值，才开始使转速调节器的输出电压降下来。因此，在整个升速过程中转速调节器一直是饱和的，相当于转速调节器处于开环状态，系统在电流调节器的恒值调节作用之下，保证电机在恒定的最大电流下起动。直到转速超调后，转速环发挥作用，使转速渐趋稳定。

由此看来，这样组成的双闭环系统，在突加给定的过渡过程中表现为恒流调节系统，在稳定和接近稳态运行过程中表现为无静差调速系统。既发挥了转速和电流两个调节器各自的作用，又避免了单环系统的缺陷，从而获得了良好的静、动态品质。

2. 限幅输出的比例积分调节器的动态响应

由于转速和电流两个调节器都采用 PI 调节，而且都具有限幅功能，其传递函数如式 (3-4) 和 (3-10) 所示。调节器输出的控制信号可分为比例部分和积分部分，其动态过程如图 3.11 所示。

当偏差信号 ε 是阶跃信号 ε_1 时，比例部分 U_{1p} 突变为 $K_p \varepsilon_1$ ，积分部分则按线性增长（图 a 所示），经过时间 t_m ， U_1 达到限幅值 U_{1m} ，而

$$U_{1m} = K_p \varepsilon_1 + \frac{K_p \varepsilon_1}{\tau_1} \int_0^m dt = K_p \varepsilon_1 \left(1 + \frac{t_m}{\tau_1}\right) \quad (3-15)$$

$$\text{因此, } t_m = \tau_1 \left(\frac{U_{1m}}{K_p \varepsilon_1} - 1 \right) \quad (3-16)$$

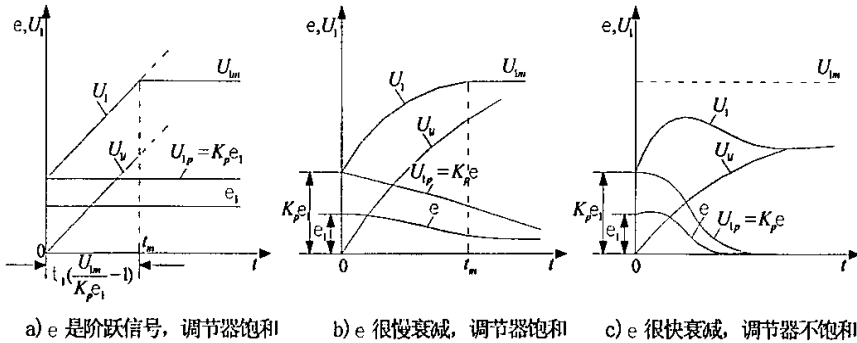


图 3.11 PI 调节器的动态响应

然而在实际系统中 ε 只是一开始突变到 ε_1 , 随着 U_{sc} 的增长, ε 便逐渐降低, 那么 U_1 是否能够升到限幅值, 就要看 U_1 的增长和 ε 的衰减哪一方快了。如果调节对象的滞后时间常数远大于调节器的时间常数 τ_1 , 则 ε 下降较慢, 由于调节器的积分作用, 尽管 ε 在下降, U_1 仍继续增长, 在 ε 衰减到零以前还来得及升到限幅值。如果对象时间常数较小, ε 下降较快, 当积分量还来不及把 U_1 抬高到限幅值以前, ε 已经衰减到零, U_1 也就不能在增长了, 这时调节器就不会饱和。

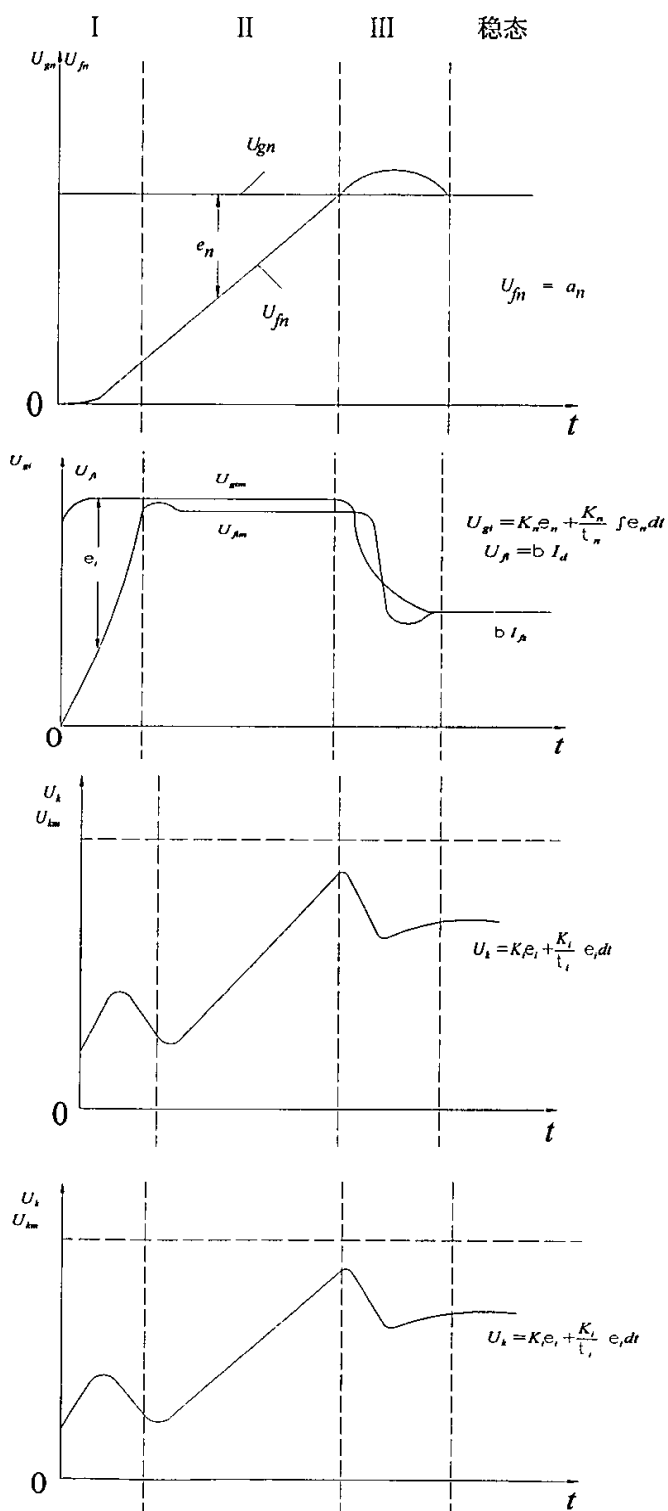
在动态过程中, PI 调节器输出电压 U_1 是否饱和, 对系统波形很有影响。 U_1 一旦饱和了, 只有 ε 变成负值, 即 $U_{sc} > U_{sr}$, 才有可能使之退出饱和, 因此, U_{sc} 必然超调。另外, 如果调节对象中含有积分环节, 则不论调节器是否饱和, 输出 U_{sc} 也一定超调, 因为到稳态时, U_1 一定要等于零才行, 这样也需要 ε 变成负值, 才能把 U_1 拉回到零。

3. 直流调系统突加给定时的动态响应

系统突加给定的动态过程是衡量系统的重要方面, 对于双闭环直流调速系统, 在突加给定起动过程中转速调节器输出电压、电流调节器输出电压、电动机电枢电流和转速的动态响应波形如图 3.12 所示。

系统突加给定时整个过程分为三个阶段:

第一阶段为电流上升阶段, 突加给定电压 U_{gn} 后, 由于电动机机电惯性较大, 转速增长慢, 转速调节器输出饱和达到限幅值 U_{gim} , 该饱和值加到电流调节器输入端, 使电流调节器输出 U_k 上升, 因而可控硅整流电压、电



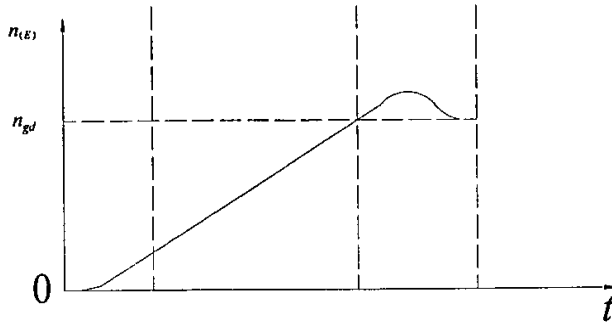


图 3.12 双闭环调速系统起动过程动态波形

枢电流很快升高设计选定的最大值 I_{dm} 为止, 此时电流负反馈电压与其给定电压平衡, 即 $\beta I_{dm} = U_{gim}$, ST 的输出限幅值正是按照这个要求确定的。

第二阶段为恒流升速阶段, 从电枢电流升高到最大值 I_{dm} 开始, 一直到升速到给定值为止, 这是起动过程主要阶段。在该阶段, 转速调节器饱和, 系统表现为恒值电流 I_{dm} 调节系统, 系统加速度恒定, 转速和反电动势都按线性规律上升, 因此, 起动过程中电流调节器是不应该饱和的, 同时可控硅环节也不应饱和, 这就决定了其时间常数的选择, 不应该让它比调节对象的时间常数 T_l 小得太多。

第三阶段为转速调节阶段, 当转速上升到给定值时, 转速调节器输入偏差为零, 由于积分作用, 其输出仍饱和, 电机继续加速, 使转速超调, 超调后, 转速调节器输入偏差为负, 退出饱和状态, 其输出电压也就是 LT 的给定电压 U_{gr} 立即从限幅值降下来, 主电流也因而下降, 但由于其仍大于负载电流, 在一段时间内转速仍继续上升, 直至小于负载电流, 电动机才开始在负载的阻力下减速, 直至稳定 (如果系统的动态品质不好, 可能振荡几次以后才能稳定)。在该阶段, 转速、电流调节器同时起作用, 转速环起主导作用, 电流环则是力图使电枢电流尽快地跟随转速调节器的输出 U_{gr} , 电流内环形成一个电流随动系统。

稳态时, 转速等于给定值, 电流等于负载电流, 转速、电流调节器输入偏差电压均为零, 但由于积分作用, 他们都有恒定的输出。

综上所述, 在起动大部分时间内, 转速调节器起着饱和的非线性控制作用, 保证电流环的恒值调节, 实现了时间最优控制, 因而能够充分发挥电动机的过载能力。

如果给定信号只在小范围内变化，则转速调节器来不及饱和，整个过程只有第一、三两个阶段系统一直是一个线性范围内的串级调速系统，电流环始终表现为电流的随动系统，合理选择电流环时间常数使之抵消控制对象的主要时间常数，则加快系统的动态响应。

4. 调速系统的动态抗干扰性能

(1) 电网电压干扰

在电压波动的扰动作用下电流环的动态结构如图 3.13 所示。

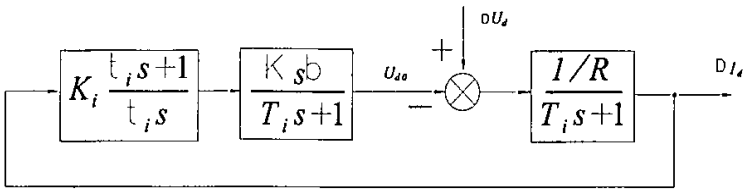


图 3.13 电压扰动作用下电流环的动态结构

其中 ΔU_d 是由于电源电压波动引起的整流电压变化量， ΔI_d 是受干扰后整流电流的变化量。PI 调节器由比例和积分两个部分。当电压突然降低时，电枢电流在受到 T_i 延缓后，比例部分立即起到作用，使整流电压 U_{d0} 升高，从而抑制电流的下降。随后，积分部分起作用，使电流恢复到原

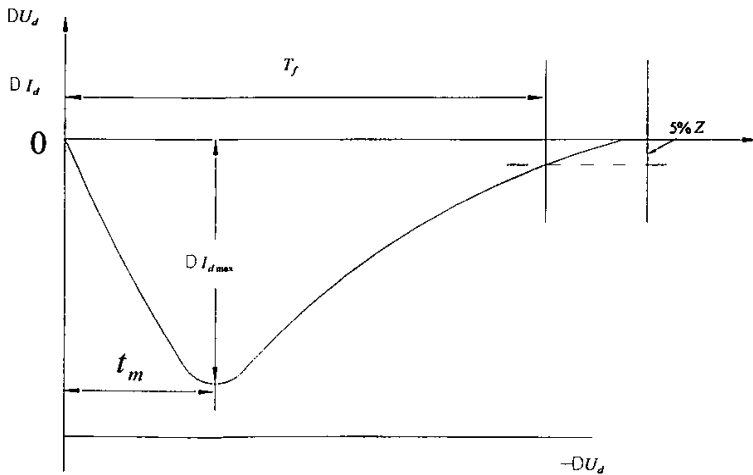


图 3.14 电源电压突降时电枢电流的动态过程

来数值。由于有积分作用，稳态时电流是无静差的。电流的动态降落和恢复过程如图 3.14 所示。

一般来讲，调节器的比例系数 K_i 越大，则调节作用越强，电流的动态降落越小，而积分时间常数 τ_i 越小，则电流恢复得越快。因此，为了提高

系统的动态抗干扰性能，应将比例系数选得大一些，积分时间常数选得小一些。但是对于突加给定的跟随作用来说，情况恰恰相反。如果希望超调量小，则需减少比例系数而增大积分时间常数，两个方面对调解器参数是矛盾的。

(2) 系统跟随能力

双闭环直流调速系统外环为转速环，设计为典型 II 型系统，其开环幅频特性如图 3.15 所示。

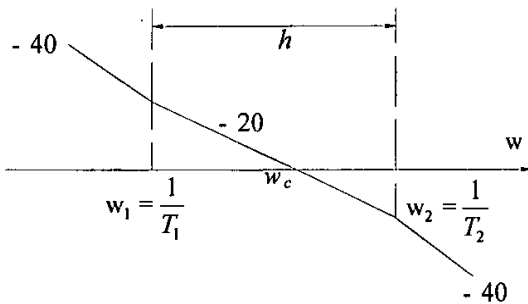


图 3.15 典型 II 型系统开环幅频特性

典型 II 型系统开环幅频特性特征量有三个： $\omega_1 = \frac{1}{T_1}$ ， $\omega_2 = \frac{1}{T_2}$ ， ω_c 。

这三个参量一经选定，该系统就完全确定了，为分析方便，引入中频段宽度 h ，由于中频段对系统的动态品质起着决定性作用，因此 h 是一个关键参数。

$$h = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{T_1}{T_2} \quad (3-17)$$

一般情况下， T_2 是调节对象固有参数，只有 K 和 T_1 是可以配置的。从频率特性上看，改变 T_1 ，就是改变了中频宽 h ；而 T_1 确定后，相当于改变了截止频率 ω_c 。因此，对典型 II 型系统的动态设计便归结为 h 和 ω_c 这两个参量的选择问题。

典型 II 型系统是一个三阶系统，其闭环系统的幅频特性如图 3.16 所示。其中谐振峰值 M_p 是特性曲线的最大值，相应的频率用 ω_p 表示。一般来说， M_p 的大小与闭环系统阶跃响应超调量 $\sigma\%$ 直接相关。 M_p 越小，超调量越

小，系统的相对稳定性越强。

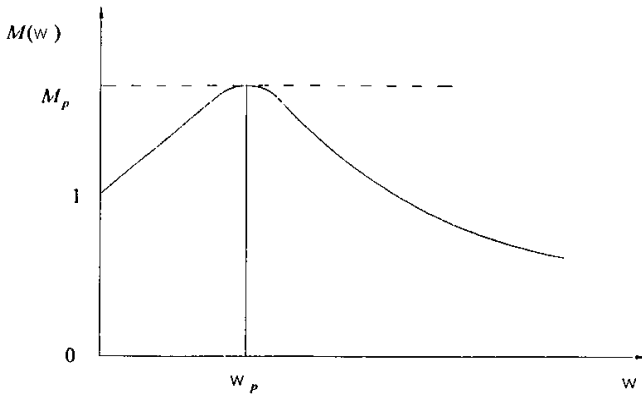


图 3.16 闭环系统的幅频特性

对于典型 II 型系统，在中频宽 h 一定的情况下，变更开环特性的截止频率 ω_c （也就是开环增益 K ），闭环特性的谐振幅值显然也要改变。根据控制理论，当符合以下两个关系时，所对应的 M_p 是最小的。

$$\frac{\omega_2}{\omega_c} = \frac{2h}{h+1} \tag{3-18}$$

$$\frac{\omega_c}{\omega_1} = \frac{h+1}{2} \tag{3-19}$$

有的书上称之为“最佳频比”，这时，最小的 M_p 与 h 也有着简单关系。

最小谐振幅值、最佳频比与中频宽的曲线关系如图 3.17 所示。

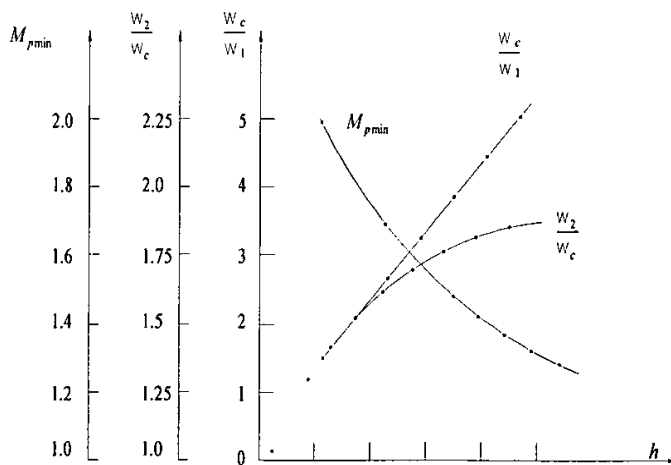


图 3.17 最小谐振幅值、最佳频比与中频宽的关系

由图可知，若按最小谐振峰值的准则选择参数，就能降低系统的振荡

指标，因而减少系统超调量，然而当 $h > 10$ 效果就不同了。经验证明，在 1.2~1.5 之间系统的动态性能较好，有时也允许达到 1.8~2.0，所以 h 可以在 3~10 之间选择。

从另一方面看，如果给出系统允许的谐振峰值，同样可以确定中频宽，确定了 h 和 ω_c ，要计算系统参数就很容易了。

$$T_1 = hT_2 \tag{3-20}$$

$$K = \frac{h+1}{2h^2T_2^2} \tag{3-21}$$

(3) 负载干扰

由于熟料窑的运行工况较为复杂，因此其负荷一直处于变化状态（一般情况下在小范围内变化，只在极个别情况变化较大），由于他处在电流环外，还是要通过转速调节器调节才行。

当 ST 为 PI 调节器，给定固定不变时，可令 $U_{gn} \rightarrow 0$ ， $n \rightarrow \Delta n$ ，则由图 3.9 得出在负载扰动下的系统动态结构图，如图 3.18 所示：

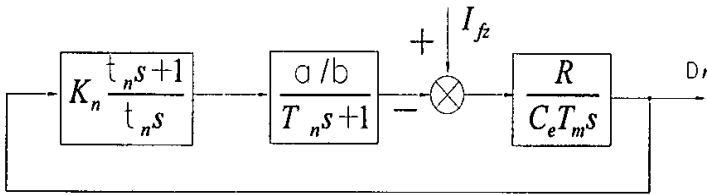


图 3.18 负载扰动下的系统动态结构图

其中转速反馈作用通过 ST 和电流环表现为对 $(-I_{fz})$ 的负反馈，再把

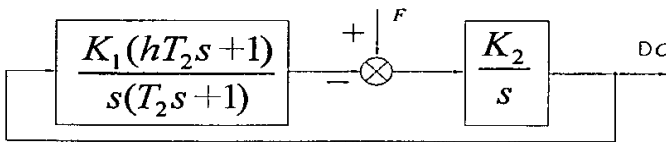


图 3.19 典型 II 型系统抗干扰作用结构

参数换成典型 II 型系统的设计参数，则典型 II 型系统抗干扰作用的一般结构如图 3.19 所示。典型 II 型系统在扰动作用下的动态降落和恢复过程如图 3.20 所示。图中列出了 $h=4, 5, 6$ 三种情况的动态降落过程曲线。

当 h 值一定时，可以得出在扰动 $(-F)$ 作用下动态降落 ΔC 的过度过程，

根据计算机模拟结果， h 越小，则抗负载扰动性能越好，但 h 小于 5 以后，由于振荡次数增多，则过渡过程时间反而加长了，因此就抗负载扰动能力来讲，以 $h=5$ 最好。

但从系统跟随性能指标来讲，如果要求超调量小， h 应该选择大一些，例如 $h=7\sim 10$ 才好，如果既要抗干扰能力强，又要超调量小，从计算数据上看，似乎是矛盾的。实际上，在大多数情况，在大多数情况下，在突加给定起动过程的大部分时间内，ST 输出是饱和的，超出了线形工作范围，

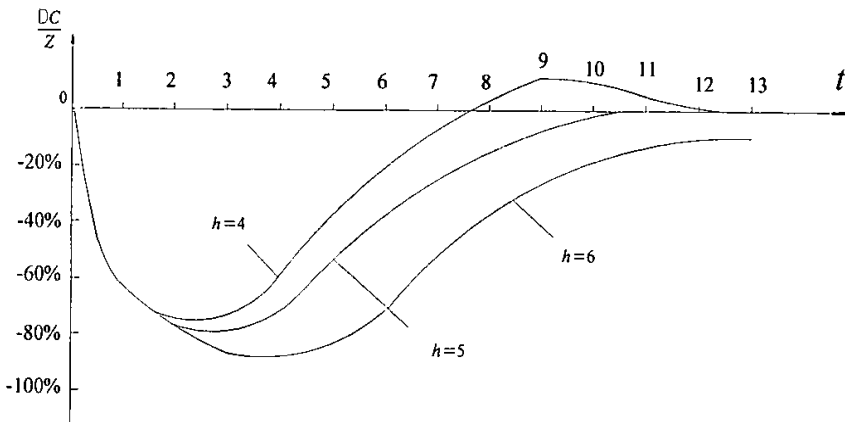


图 3.20 典型 II 型系统在扰动作用下的动态降落和恢复过程

则按线性计算的超调量就不对了，这就牵涉到 ST 饱和时的起动超调问题。

(4) 速度调节器饱和时的起动超调问题

如果速度调节器没有饱和限幅的约束，可以在很大线形范围内工作，那么，起动时转速的过渡过程曲线如图 3.21 所示。

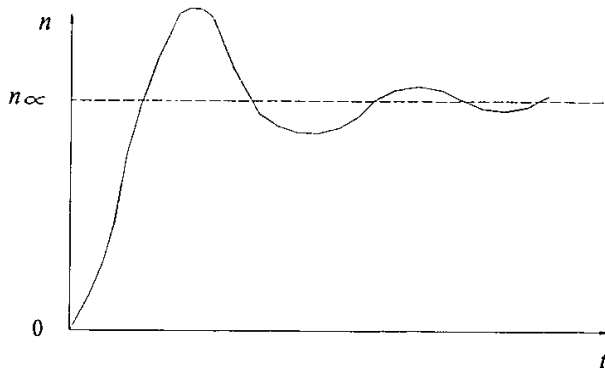


图 3.21 ST 不饱和电机起动时转速的过渡过程曲线

超调量大小由 h 值而定，对于典型 II 型系统来说，其数值是不会太小的。实际上，突加给定后不久，ST 就进入饱和状态，输出恒定的给定电压

使电动机在恒流条件下起动，而转速则按线形增长，如图 3.22 所示，虽然起动过程比没有限幅时小得多，但是为了保证起动电流不超过允许值，因此这是必需的。

转速调节器饱和以后，只有当转速升到稳态值 n_{∞} ，反馈电压将要超过给定电压，转速偏差开始变为负值，才有可能使 ST 退出饱和。刚刚退出饱和时，由于电动机电流将要超过给定电压仍大于负载电流，电动机仍然加速，直至电机电流小于负载电流，转速才能降下来，因此必然有超调。但是这已经不是线性系统的超调，而是经历饱和和非线性区域之后产生的超调，可以称作退饱和超调。退饱和和超调的超调量是多大，这要视具体的初始起动条件而定。

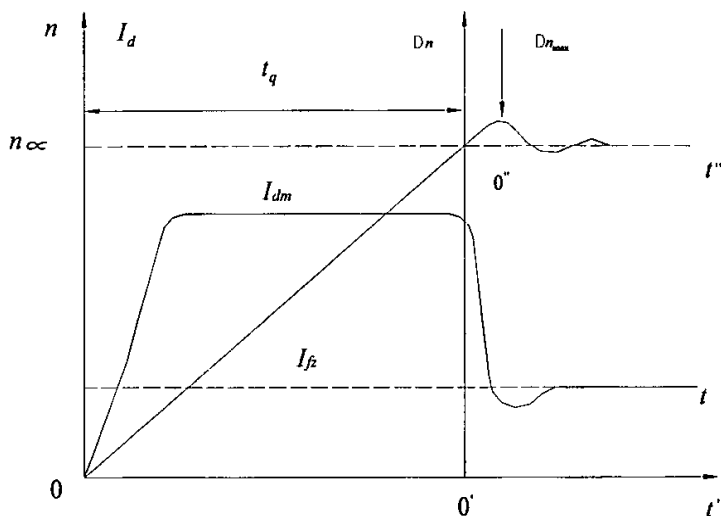


图 3.22 ST 饱和和电机起动时转速的过渡过程曲线

退饱和和超调量的大小与动态速降的大小一致，也就是说，考虑 ST 饱和时系统系统的跟随性与抗干扰性能是一致的。这样一来，按典型 II 型设计时，无论从哪方面来看，都以选择 $h=5$ 为好，这就使转速调节器的参数设计简便得多了。

应该指出，超调量与许多因素有关，例如：转速环两个时间常数、开环机械特性动态速降、负载变化量、稳态转速值。例如低速起动，超调量将会大幅增加。

3.4 小结

本章根据直流传动数学模型，提出了调速系统设计方案和调节器结构，从理论上定性分析了系统动态性能，包括：转速、电流双闭环直流调速系统静态、动态品质；限幅输出的比例积分调节器的动态响应；双闭环调速系统突加给定时的动态响应；对电网电压波动、系统跟随能力、负载扰动等系统调节动态过程，提出了系统比例系数、积分时间常数、谐振峰值、中频宽、截止频率等参数对系统过渡过程中的超调量和稳定性以及快速跟随能力的影响，提出了这些参数工程设计关系和一些实际经验数据。

第四章 直流调速系统的全数字化实现

本章重点研究熟料窑直流调速系统全数字化实现，其中包括全数字直流调速器电气联结和软件系统结构以及软件组态。根据第二章和第三章分析结果，确立了直流调速系统方案，即在恒转矩调速范围内电枢回路采用采用转速、电流双闭环直流调速系统，在恒功率调速范围内采用具有 EMF 闭环控制的非独立控制励磁的调速系统。综合国内外直流调速技术发展水平，拟采用西门子 6RA 24 系列全数字直流调速器来完成直流调速功能。

4.1 6RA24 系列全数字直流调速器特点

西门子 6RA24 系列直流调速器为全数字紧凑型直流调速控制器，电动机的调速是无级且分为两个区域，低于额定转速采用调压调速，高于额定转速采用弱磁调速^{[39][40][41]}。

该装置共有 4 个模拟输入，5 个模拟输出，8 个开关量输入，4 个开关量输出信号。所有的开环和闭环控制和通讯功能由 16 位微处理器实现。该装置所对应的电枢电压由三相全控整流桥提供（对本系统单象限工作而言），励磁回路采用单相半控桥方案。

6RA24 是以 16 位 CPU 为核心的数字控制装置。硬件部分如图 4.1 所示，由软件板、电子板、I/O 板，整流器接口板等组成。软件部分为模块式结构，由各种函数、运算器，PID 调节器，转换开关等组成。通过对 I/O 端子及软件模块进行组态，可以构成各种复杂的控制策略。具有良好的人机界面，可以显示 255 种故障信息，包括电源故障，接口故障，驱动故障，起动故障，检查 SCR 故障，内部故障，外部故障，电机故障等八大类故障。

直流调速控制器动态结构，可为电枢可逆的逻辑无环流直流调速系统提供双闭环控制，电流环为内环，速度环为外环，它借助于电枢电流反向可在四个象限内运行，其中 1, 3 象限为电动状态，2, 4 象限为发电状态。电枢回路采用转速，电流双闭环反馈控制，励磁回路采用反电动势及励磁电流双闭环反馈调节。

转速环和电流环为比例积分 (PI) 调节器, 励磁电流调节器和电动势调节器也为比例积分 (PI) 调节器。

转速给定信号通过预处理 (积分、滤波、规格化), 与测速发电机来的转速反馈信号 (通过带通滤波、微分、规格化进行预处理过后) 进行比较, 其差值经过速度调节器比例积分及限幅运算, 作为转矩给定信号。转矩与磁通相除得到电枢电流给定信号, 再经过限幅与积分运算, 与电枢电流进行比较, 其差值送入电流调节器进行比例积分运算, 控制数字触发器移项, 得到六个可调的触发脉冲。

电枢额定电压减去电枢额定电流乘以电枢电阻得到电机电动势 EMF 给定值, 与 EMF 反馈值进行比较, 其差值经过 EMF 调节器比例积分运算后再进行限幅控制, 得到励磁电流给定值, 与励磁电流反馈进行比较, 其差值经过励磁电流调节器比例积分运算, 再经过励磁触发信号限幅, 控制励磁回路数字触发器移相, 得到两个可调的触发脉冲。

因此从理论上讲, 西门子 6RA24 系列直流调速器完全能够满足熟料窑双直流传动系统技术要求。

此外, 从系统实际运行情况来看, 该系列直流调速装置以其高性能、高可靠性、免维护性能在全球得到了广泛应用。

虽然全套西门子直流调速装置技术成熟、性能可靠, 但因其价格昂贵, 导致初期投资高昂。因此, 本文提出了一种适合中国国情的设计方案, 即利用西门子直流控制器的优异性能与国内成熟的 SCR 技术相结合, 进行二次开发, 使得新设计的熟料窑直流调速系统性价比大为提高, 从而走出了一条适合我国国情的设备改造的新路子。

4.2 6RA24 直流调速器硬件联结

1. 接线端子功能

西门子 6RA24 系列全数字直流调速器结构附录一所示。接线端子功能分配如下:

(1) 功率单元

电枢回路整流电路交流侧三相电源接入 1U1、1V1、1W1, 直流输出连接到 1C (正极)、1D (负极), 励磁回路整流电路交流侧接入 3U1、3W1, 直

流输出连接到 3C (正极)、3D (负极)。

(2) 电子器件电源

接线端子 5U1、5W1, 两相交流 380V (+15%~-25%), 额定电流 0.5A (-35%, 1 分钟)。

(3) 测速发电机输入

测速机输入端子 101、102、103 (输入电压为 80~250V、25~80V、8~25V, 端子 104 为测速机地, 本系统使用端子 102、104 为转速反馈信号, 转速测量由测速发电机提供 (0~110V))。

(4) 设定输入参考电压

端子 4、5 为本地电位器转速给定 (0~10V), 对应 0~1200rpm, 装置内部 S4 开关选择 1 (若选择 2 则为 4~20mA); 端子 6、7 为上位机 (即 DCS) 转速给定 (4-20mA), 对应 0~1200rpm, 装置内部 S5 开关选择 2 (若选择 1 则为 0~10V)。

(5) 端子 1U、1V、1W 为电枢回路整流器同步信号, 取自同步变压器二次侧, 交流 380V; 端子 X3-1、2, X3-3、4 为电枢回路整流器交流侧电流取样信号, 电流互感器变比 1000/5; 端子 3U2、3W2 励磁电源交流电压取样, 交流 380V; 端子 AO2、3D1 为电机励磁直流电压取样, 直流 0~220V; 端子 AO2、120 为电机励磁直流电压取样, 直流 0~440V; 电枢电流取样, 0~750A/0~75mV; 励磁电流取样, 0~30A/0~75mV; 端子 36 为故障确认控制命令, 用上升沿确认该信号, 在故障取消并得到确认后, 整流器从故障状态转至开关合闸禁止状态, 在 37 加上一个低电平信号, 开关合闸禁止状态才能取消; 端子 37 为进线接触器 (即电枢回路整流变压器二次侧接触器 ZJ1) 控制命令, 高电平 (直流 24V) 接通, 低电平断开; 14、端子 38 为控制器使能控制信号, 高电平使能, 低电平禁止。

2. 直流调速器控制逻辑设计

根据西门子直流调速器逻辑控制功能设计出双直流调速系统控制电路, 如附录二所示。

熟料窑直流调速系统操作控制要求两地控制, 即“本地”(整流机室)和“中央控制室(即中控)”两地控制, 控制逻辑由 LOGO PLC 实现。中控控制为 DCS 系统, 其模拟 I/O 和数字 I/O 即可以硬线联结, 亦可以通过通

讯联结，由于当时未能解决通讯协议问题，因此，采用前一种联结方式。需要说明的是，目前已可以实现通讯联结，通讯联结方式既可以减少连接线，同时也提高了系统抗干扰能力。

PLC 输入点：I2 为停车输入信号，I3 为启动输入信号，Q2 为励磁接触器合闸信号，Q3 为开车信号。HK 转换开关为控制地选择，HK1 为爬行和运行选择。

当设备发出运行命令即 I3 输入高电平后，经 PLC 运算发出励磁接触器合闸信号即 Q2 吸合，励磁接触器 ZJ2 吸合，ZJ2 辅助接点接入控制装置，控制励磁触发并达到电机满励磁状态。

I3 接到启动命令并延时 2 秒钟（电机达到满励磁并稳定的时间），Q3 闭合，给控制装置发出启动命令，使控制器使能，同时发出电枢整流电路接触器合闸命令，即控制器内 K3 吸合，控制继电器 ZJJ0 吸合，进而主接触器 ZJ1 吸合，电枢回路整流器一次侧送电，调节转速给定即可使电机旋转。

停车时，I2 接到停车命令，Q3 迅速断开，控制器处于禁止状态同时 K3 断开，ZJJ0 断开，ZJ1 断开，切断电枢回路。

I2 接到停车命令后 0.1 秒后 Q2 断开，ZJ2 断开，切断励磁回路。

当控制器检测到系统故障时，迅速切断 ZJ1 和 ZJ2，使电枢和励磁回路断电。

关于电机爬行（即试验状态）操作逻辑关系本文不一一描述。

4.3 6RA24 系列直流控制器软件系统

1. 6RA24 系列直流控制器软件特点

6RA24 软件系统功能非常强大，由各个功能块组成，如附录三所示。

6RA24 软件系统主要由 EMF 控制功能，闭环速度控制功能，电枢电流控制换向、逻辑控制、触发单元功能，励磁电流控制、励磁触发单元功能块，模拟输入选择功能块，设定点功能块，模拟输出选择功能块，谐波函数发生器功能块，转矩限幅功能块、电流限幅功能块共 11 个基本功能块组成。

在输入输出功能方面，能够提供模拟输入输出、数字输入输出多种组

态功能，能够针对不同操作控制场合灵活组态应用；在调速控制方面，提供了电枢回路转速、转矩、电流、电压反馈限幅控制功能，提供了转速、转矩、电流、电压前馈补偿功能，励磁回路提供了励磁电流、EMF 的调节、限幅、前馈补偿功能，所有这些功能可以自由组态。

这些功能块都是由数字软件（又叫软件模块）实现的，但可以象阅读模拟系统的电路图一样，“读”它们。

除了基本功能的功能块（象斜波函数发生器、速度调节器、限幅器、闭环电流调节器、闭环电动势调节器等）以外，还有工艺调节器和许多可自由配置的功能块，象加法器、乘法器、除法器、反号器、转换开关、门坎等，有了这些功能就可以完成更复杂的闭环控制功能；另外，整流器中还设有一方波发生器，其幅值和频率均可用参数调整。

整流器使用参数设置和连接量组态，可以对上述功能块自由组合，这种自由组合的能力是指在各个功能块之间的连接量能够由参数选择；在软件中使用所有的重要计算量和信号量在存储单元中各数字值，它们可作为“连接量”使用。用连接量可存取的量相当于模拟回路中的测量点。这些量都有他们自己的特定“连接量编号”。通过对软件系统参数设置和连接量的自由组态，可以构成我们所需要的控制方案。

因此，6RA24 直流控制器强大且灵活的软件功能，使得直流调速系统软件设计变得非常简便，而且能够构成系统所需的各种复杂控制策略。

2. 6RA24 系列直流控制器参数结构

6RA24 系列直流控制器参数结构参数安排如下：

参数 P000—P099：显示参数；确定 SIMOREG 整流器；确定功率部分；整流器控制。

参数 P100—P599：此范围内有四个参数组，每个参数编号指定四个数值，每一个数值，对应一个参数组。电机参数定义；确定脉冲编码器；“电动机接口”选择；最优闭环控制；设定监控和极限值；设定基本整流器工艺功能。

参数 P054 定义四组参数中，显示哪组参数通过开关量输入功能使能。

参数 P056 指示出起作用的参数组注释：从 2.00 版软件起 2 至 4 组参数可首先起作用。

参数 P600—P999: 构成闭环控制; 定义整流器的硬件接口; 配置基本整流器串行接口; 屏蔽故障 / 错误信号; 其它。

参数 PT001—PT999: 从 2.00 软件起使用操作面板并通过参数 P900 来选择模板, 才能进入工艺模板参数。

3. 6RA24 系列直流控制器连接量

(1) 特殊连接量

所有的没有规格化信息的连接器都要按标准规格化, 标准规格化: $16384 = 100\%$ 所有的无信息的连接器作为变流器的额定 (标称) 值, 例如对 K131 下述值有效 100% 对应 $16384 =$ 变流器额定电流。

K000 固定值 0% ; K001 固定值 100% (负极限: -100%); K002 参数专用标准连接器 (与选择的参数有有关)。

(2) 模拟输入

K003~K007 为模拟输入设定, 用以组态模拟输入功能 (端子 4 和 5、端子 XT-101 至 XT-104, P706—709、端子 6 和 7、端子 8、端子 10)。

(3) 模拟输出

K015~K018 为模拟输出设定 (端子 14、P741—P744、端子 16、端子 18、端子 20)。

(4) 电枢调节控制连接器

K100~K252 电枢调节连接器, 用于组态电枢回路调节。

(5) 励磁电流控制

K260~K293 励磁调节器连接器, 用于组态励磁回路调节。

(6) 通用连接器

K300~K394 为通用连接器, 用于连接、电枢电压、励磁电压、电源频率、电机输出、工作时间、控制字和自定义控制字、状态字、限幅、故障报警、开关量 I/O 状态、优化运行、相电压过拐点、电枢触发数据、微处理器运行数据。

4. 6RA24 系列直流控制器部分名词解释

(1) 连接量的插入点

通过指定选择参数定义的软件模块和功能块的输入叫做“插入点”, 为了实现这种输入点的设定, 可将需要的信号值的连接量作为输入量送入指

定的选择参数。在功能图中插入点是以选择开关的形式表现的。所有适用的连接量（与接点号相一致）都连接到了开关各个接点上。选择参数设定的值（连接量编号）控制选择开关的设定，定义哪个连接量被选择。

这种由参数控制的选择开关就可将各个功能块连接起来。

（2）参数插入

功能图中除了用以选择信号参数外，还有将各个功能块“连接”（配置）起来的参数，这些参数即可以定义运行方式，也可定义功能的参数值。例如：

参数 P224 是定义速度调节器的给定值与实际值的极性，同时它还可以将速度调节器的 P 部分和 I 部分设定到零，以实现纯比例和纯积分调节。

P703 的十位数字定义由端子 XA . 4 、 XA . 5 输入的主给定值信号是电压信号（±10V）电流 4 — 20mA 信号，还是电流 0 — 20mA 信号。而其个位数字则定义了连接量 K003 接入的模拟主给定值是带符号值、绝对值、取反值还是绝对值后取反值。

P704 定义 PT1 元件的滤波时间常数，这一滤波器是用于主给定值滤波的。

P155 和 P156 则定义了电枢电流调节器的比例增益和积分时间常数。

（3）开关量输入功能

功能图中示出了使用“开关量输入功能”的可能的插入，使用信号选择参数将各个功能块（软件块）“连接”起来。

（4）计算周期、时间滞后

与模拟输入、输出、开关量输出和接口相关的功能以及与工艺调节器、马达电位计、给定值发生器、斜坡函数发生器、速度调节器和电枢电流调节器相关的功能的调用和计算，都与电枢触发脉冲的周期同步（即，50Hz 供电频率时每 3.333ms 为一周期）。开关量输入和自由功能块的处理是以每两个电枢触发脉冲的周期为周期的（即，50Hz 供电频率时每 6.667ms 为一周期）。与闭环 EM 和励磁电流控制相关的功能的调用和计算与励磁回路触发脉冲的周期同步（即，50 Hz 供电频率时每 10ms 为一周期）。

新设置的参数需要在 20ms 以后起作用，优化运行后生成的参数也需要在 20ms 以后起作用。当通过串行口传送参数时，应该注意到在参数使

用之前，必须经过 20ms 的处理，例如：电枢触发周期。

一旦可任意配置的功能块被“连接”，软件模块将以下述特定的顺序依次处理：加法器 1，乘法 / 除法器 1，通用除法器，反号器 1，转换开关 1，带滤波器绝对值发生器 1，限幅值监视器 1，加法器 2，乘法 / 除法器 2，自由配置的特性曲线（参考第 7 张功能图的中间部分）反号器 2，转换开关 2，限幅器，带滤波器绝对值发生器 2，限幅值监视器 2（参考第 9 张功能图的下层部分）加法器 3+死区，乘法 / 除法器 3，反相器 3，转换开关 3，为了避免不必要的延时，在使用这些功能块时应该考虑这一特定顺序。

具有相应计算周期的其它所有模块的处理顺序基本上如功能图中所示的顺序。

4.4 6RA24 系列直流调速系统软件组态过程

根据软件系统参数功能，软件系统设计过程，实际上就是根据控制策略对控制器参数组态过程，组态结果如附录四所示。

需要系统组态的参数可以分为以下几个部分：

系统基本参数定义，包括：整流机功率部分定义、整流器控制的设定、电动机的定义；速度环组态，包括：模拟输入/输出选择（本系统未用到模拟输出信号）、设定点输入、斜波函数发生器、闭环速度控制；电枢电流环组态，包括：转矩和电流限幅、电枢电流控制换相、逻辑控制以及触发单元；励磁系统组态，包括：EMF 控制、励磁电流控制和励磁触发单元；开关量组态。

表中所列参数分为三部分：

一部分为基本参数，如整流器和电动机的额定电压、额定电流、模拟输入输出、数字输入输出选择，设定点选择，斜波函数发生器，闭环速度控制，转矩、电流限幅，电枢电流控制换相、逻辑控制、触发单元，EMF 控制，励磁电流控制、励磁触发单元、开关量等软件模块控制字的设定，用以构造直流调速系统动态结构，这一部分参数需要事先确定。

还有一部分参数，出厂前已经给出缺省值（表中所列这部分参数是优化运行后的数据），在系统调试优化运行过程中自动更新，如电动机的电枢电阻、电感、励磁电阻、磁化曲线，电流调节器、速度调节器、励磁电

流调节器、电动势调节器的比例系数和积分时间常数等。这样一来我们可以省去这些参数的工程计算过程，由于给出的电气传动系统数据误差，即使通过工程计算得出这些动态数据，与最优值也有较大误差。

直流调速系统软件组态过程如下：

1. 基本参数组态

该过程较为简单，根据系统基本结构和额定数据组态即可。

2. 速度调节环组态

(1) 模拟输入选择

本系统共用到三个模拟输入信号，即本地转速给定输入（接入端子 4、5）、中控室转速给定输入（接入端子 6、7）、转速反馈输入信号（接入端子 XT-101、XT-104），由参数 P700-P714 进行组态。由于速度反馈来自“主实际值”通道，因此参数 P083 设定为 1，表示速度反馈来自端子 XT101-XT104。

两个转速给定输入信号切换由外部控制地选择电路进行转换（参考附录二）。本地转速给定信号为绝对值输入的 0~10V 电压信号对应转速 0~1200r/min 的电机转速，控制器电子线路板 S4 开关至置 1，主控制字 P703 设定为 01。中控室转速给定信号为绝对值输入的 4~20mA 电流信号对应转速 0~1200r/min 的电机转速，控制器电子线路板 S5 开关至置 2，主控制字 P713 设定为 11。转速反馈信号为绝对值输入的 0~110V 电压信号，接入 XT-101 端子，主控制字 P708 设定为 11。

P700 为本地给定信号的分辨率，该参数表示给定输入是在规定的测量时间内的平均值，它规定了 A/D 变换器可实现的最小分辨率及测量时间，给定 A/D 变换周期地执行。变换周期和测量时间有关。当输入一个模拟的阶跃信号，在最早出现的数字之间有一段延时，该延时用于内部处理，也是转换周期，与每一触发周期同步，读出 A/D 转变换数据值，A/D 转换前的硬件滤波时间常数为 1ms，P700 设定为 12 比特，最长转换周期为 1.2698ms。P701 为本地给定信号的规格化参数，这个参数定义了模拟量为 10V 设定所产生的百分数，根据对应关系为 100%。P702 本地给定信号的偏置，该参数为叠加在主设定的值，用于误差校正，设定为 0。P703 为主设定控制字，其参数设置为 1，亦即主设定为绝对值信号，BEF=0 表明信号来

自主设定, P704 本地给定信号的滤波时间, 主设定增加了一个近 1ms 的固定硬件滤波器, 通过以上主设定信号处理过程, 将该信号与连接器 K003 (main setpoint) 相连接。

P706 为转速反馈信号的规格化参数, 由于测速发电机为 0~110v 对应 0~2000 r/min, 而最高转速为 1200 r/min, 其对应的测速发电机测量值为 66V, 因此其参数值为 66V。P707、P709 分别为转速反馈信号的偏置、滤波时间, 与本地转速给定的设定相同, 转速反馈信号经处理后与连接器 K004(main actual value)相连接。中控室转速给定信号参数设置与本地转速给定信号设置相似(通过外部电路逻辑转换, 连接量为 K003)。

(2) 设定点输入设置

参数 P628 设置为 2, 将主设定点 (main setpoint) 连接器 K003 与连接器 K213 连接, 当系统发出启动指令(将在开关量输入功能中介绍), BEF 为 1, 调节器使能, 参数 P627 设置为 2, 因此连接器 K213 与 K212 接通, 经过参数 P317 转速限幅后连接至连接器 K211, 此时 BEF17、12、13、15、20 为低电平, 因此将连接器 K211 连接至 K198, 亦即处理后的 K003 连接直到了 K198, 从而完成了输入点设置功能, K198 作为斜波函数发生器的输入。

(3) 斜波函数发生器设置

BEF24 设置为 0, 使得斜波函数发生器正限幅起作用, K198 与 K194 连接, 参数 P623 设置为 2、P470 设置为 0(设置为 1 则为张力/比例控制), 因此连接器 K193 直接作为斜波函数发生器输入。

在无紧急停车指令输入且 BEF10 为 0 时, 连接器 K193 与 K192 连接, 作为斜波函数发生器输入, 使电机启动按一定规律进行(由斜坡函数发生器参数进行设定), 连接器 K170 作为转速调节器的输入(speed setpoint)。

(4) 闭环速度控制

由前面几章分析可知, 本系统设计为转速电流串级调速系统, 转速调节器为 PI 调节器, 因此转速环控制字参数 P084 设定为 1, 表示系统为速度闭环控制, P223 为 0, 表示摩擦及转动惯量补偿禁止, P224 为 11, 表示 PI 起作用, 亦即转速调节器为比例积分调节器。

在无紧急停车指令(shutdown 为高电平 1)输入且 P608 为 2、BEF4=1 时, 连接器 K170 作为转速调节器的输入(speed setpoint)与连接器 K168

连接, P228 为速度调节器设定的滤波时间, 在系统优化运行过程中自动设定, 因此速度给定 K170 经 P228 滤波后与 K174 连接, 作为速度调节器的转速给定输入。

参数 P609 设置为 2、P083 设置为 1, 将速度反馈信号 K004(main actual value) 与 K167 连接, BEF 设置为 0, K167 极性不变, P200、P201、P202、P203、P204 为速度反馈带通滤波 (优化运行自行设定), P205 为微分作用 (本系统设计为零), 因此, K004 经过处理与 K165 连接, 作为速度调节器的反馈输入。

这样, 经过处理后的速度给定 (speed setpoint) 与速度反馈 (main actual value) 分别与连接量 K174 和 K165 连接。

P225、P226 为速度速度调节器的比例积分时间常数, 在系统优化运行过程中自动设定 (P227、P500~P561 为调节器调节特性软化参数, 本系统未采用), 经过 PI 运算后的速度调节器输出连接量为 K160。

BEF41 为主从驱动开关量选择, 由于本系统为单套整流装置, 因此 BEF41=0, 在无快速停车信号时 (即 BEF4=1), K160 与 K147 连接, 参数 P607 设置为 2, 将 K147 与 K145 连接, 因此 K145 作为转矩给定信号 (torque setpoint)。

通过以上参数组态, 确定了转速环的转速给定及反馈通道以及转速调节器为 PI 调节器, 从而完成了转速环的软件结构设计, 而调节器参数则是由系统优化运行获得。

3. 电流调节环组态

(1) 转矩限幅、电流限幅设置

电流环控制字 P170 设置为 10, 确定系统为电流控制转矩限幅控制方式。参数 P605、P606 设置为 2, 可变转矩限幅不起作用, P180 为正转矩限幅值, P180 与磁通量 (来自磁化曲线) 相除作为电流限幅的输入, 参数 P601 设置为 2 且无快速停车信号 (BEF=1), 即连接量 K145 经转矩限幅计算后与电流限幅输入连接器 K133 相连接。P109 设置为 0, 与速度有关的电流限幅禁止。参数 P603、P604 设置为 2, 表示两个转矩方向可变转矩限幅无效, P109 设置为 0, 表示电流限幅与转速无关, 参数 P076 设置为 2 (P075 不起作用)。因此电流限幅只与 P171 和 P077 有关。

P171 为电流限幅值, P077 为热减弱总系数(即由于设备环境温度、海拔高度等因素的影响, 降低电流限幅值, 亦即降功率使用功能)。

通过以上设置将连接器 K133 与 K120 连接, 作为电枢电流给定值, 亦即电流调节器的给定输入(amature current setpoint)。

(2) 电枢电流控制换向、逻辑控制、触发单元设置

电流调节器的给定输入(amature current setpoint) K120 经过积分作用与 K119 连接, 经绝对值运算后与 K118 连接。这里的积分作用与设备状态有关, 新设备时 P157 设置为 0, 即只在转矩发生作用时起作用, 运行时间较长的设备 P157 设置为 1, 即积分一直起作用, 而且积分时间常数 P158 不是一固定值, 需根据情况调整。

参数 P602 设置为 2, 电流反馈(internal amature current actual value) 连接量 K117 经过绝对值运算后与 K115 连接作为电枢电流反馈(actual value)。因此 K118 与 K1175 分别作为电流调节器的给定与反馈输入的连接量。

根据第三章可知, 本系统电流环设计为 PI 调节, 因此参数 P154 设定为 11, 即电流调节器设计为比例积分调节器。比例系数和积分时间由参数 P155、P156 设定, 在优化运行过程中自动设定。电流环输出直接控制电枢触发脉冲, 由参数 P600 设定(其值为 2)。由于系统工作在第一象限, 因此最小触发角为 5, 因此参数 P074 为 1, P150 为 5。P153 设置为 0, 电流前馈补偿不起作用, 在无紧急停车信号且 P600 设置为 2 时, 电流调节器输出 K110 与连接器 K101 连接。由于本系统工作在第一象限, 因此不需要电流换向, BEF60 设置为 0, 因此 K101 与 K100 连接, K100 作为电枢回路触发控制信号。

4. 励磁控制系统组态

本系统励磁控制部分设计为 EMF 和励磁电流两个调节器, 其结构为串级连接。

(1) 反电动势控制(EMF 控制)设置

参数 P082 设置为 011, 表示用内部电势闭环控制的弱磁运行, 在弱磁范围内, 即在电机额定速度以上(起始弱磁速度, 电动机电势 EMF 保持恒定, 额定值 EMF 设定(K289) = $P101 - P100 \times P110$, 即电枢额定电压减去

电枢额定电流与电枢额定电阻之积。P615 设定为 2，因此 K289 与 K288 连接作为 EMF 调节器的给定值 (setpoint)。

EMF 的反馈 (internal EMF actual value) K287 经过绝对值运算与 K286 连接，由于 P616 设置为 2，因此，K286 与 K285 连接作为 EMF 的反馈。因此 P273 设置为 1，EMF 前馈控制起作用。电机起动过程中，达到额定转速之前，满励磁起动，此时 EMF 控制器不起作用，当电机达到额定转速时系统自动弱磁运行，此时，磁化曲线与 EMF 控制器输出之和作为励磁给定。

参数 P274 设置为 0011，表示 EMF 设置为 PI 调节器，其比例及积分时间常数在优化运行过程中自动设定。

P082 设置为 011、P611 设置为 2，将 EMF 输出和前馈输出之和 K280 与 K276 连接起来作为励磁电流限幅输入，P613 设定为 2，电机励磁电流正限幅为电机额定励磁电流 P102，电机最小励磁电流 P103 在励磁优化运行时设置为小于 P102 的一半，优化运行后在根据实际情况进行调整与 1200r/min 相对应的励磁电流值。励磁电流限幅输出 K275 作为励磁电流调节器给定值 (field current setpoint)。

(2) 励磁电流控制及励磁触发单元设置

由于 P082 设置为 011，因此系统固定励磁无效，即励磁电流调节器给定无论何时都由 K275 控制，将 K275 与 K268 连接，K268 即为励磁电流调节器给定值 (setpoint)。

参数 P612 设置为 2，励磁电流反馈 K266 直接作为励磁电流调节器反馈值。

P253 设置为 01，励磁电流前馈控制起作用，用以补偿励磁回路电阻的分压作用。P254 为 11，励磁电流调节器设置比例积分调节器，比例增益 P255 和积分作用时间在优化运行过程中自动设定。

调节器输出与前馈控制输出之和，K260 与 K252 连接，P610 设置为 2，则 K252 与 K251 连接，作为励磁控制限幅输入，经过限幅 P250 输出 K250 作为励磁触发装置控制信号。

5. 开关量组态

(1) 开关量输入功能 (BEF) 组态

开关量输入状态由参数 P010.00 显示 (连接量编号为 K335)，如图

4.1 所示。



图 4.1 开关量输入状态显示

各数位表示含义如下（数位 8~15 系统未用）：

0：端子 37（接通）

1：端子 38（工作使能）

2：端子 39（开关量选择输入 1， P401 设定“设定输入”（BEF17~23、“点动”（BEF13~14）或“爬行”（BEF15~16）输入）

3：端子 40（开关量选择输入 2， P402 设定“设定输入”（BEF17~23、“点动”（BEF13~14）或“爬行”（BEF15~16）输入）

4：端子 41（开关量选择输入 3， P403 设定“设定输入”（BEF17~23、“点动”（BEF13~14）或“爬行”（BEF15~16）输入）

5：端子 42（开关量选择输入 4， P404 设定“设定输入”（BEF17~23、“点动”（BEF13~14）或“爬行”（BEF15~16）输入）

6：端子 43（开关量选择输入 5， P405 设定“设定输入”（BEF17~23、“点动”（BEF13~14）或“爬行”（BEF15~16）输入）

7：端子 36（开关量选择输入 6， P406 设定“设定输入”（BEF17~23、“点动”（BEF13~14）或“爬行”（BEF15~16）输入）

数段亮或“1”相应端子起作用（为高电平信号），数段暗或“0”相应端子不起作用（为低电平信号）。

参数 P640 和 P641 设定为 19，控制字 STW 和自定义控制字 STWF 无效，BEF 仅由输入端子控制。

端子 37、38 功能固定，P769 设定为 0，即高电平开车或爬行，低电平为停车信号。

端子 39~43、36 功能选择由参数 P761~766 定义。

P761 设定为 15，开关量输入功能 BEF15 起作用，由端子 39 控制，BEF15 为爬行功能，仅在系统试车和调试时使用。

P762 设定为 33，开关量输入功能 BEF33 起作用，由端子 40 控制，0 表示使用第一组参数。

P763 设定为 9，开关量输入功能 BEF9 起作用，由端子 41 控制，BEF9 为斜坡函数发生器使能功能。信号电平：0 斜坡函数发生器禁止，1 斜坡函数发生器使能，如果端子被参数化为“斜坡函数发生器使能”后，当该端子使能后时，斜坡函数发生器才能使能。如果被参数化为“斜坡函数发生器使能的端子开路，那么“斜坡函数发生器”被禁止其出为 0，传动系统以电流限幅值减速，整流装置没有断开电源，当斜坡函数发生器再次使能，它就按照选定的斜率，加速至设定值。

P766 设定为 5，开关量输入功能 BEF5 起作用，由端子 36 控制。BEF5 输入功能为故障确认，信号电平为上升沿（信号至少延续 10ms）故障确认。

P764、P765 设定为 0，端子 41、42 不起作用。

（2）开关量输出功能组态

P771 设定为 3，表示开关量输出端子 46 作为开关量选择输出 1 功能选择，输出高电平表示为无故障，低电平为故障状态。P770 和 P775 设定为 0，表示该信号不取反和无延时。

4.5 小结

本章全面分析阐述了西门子 6RA24 系列全数字直流控制器硬件结构特点和端子功能说明，设计了直流调速系统控制电路。根据直流调速系统结构要求，结合西门子 6RA24 系列全数字直流控制器软件结构，进行了系统参数设置，完成了直流调速系统软件组态。

第五章 系统调试

本章重点介绍熟料窑直流调速系统调试方法步骤和系统运行性能分析。

5.1 系统参数化步骤

当系统根据设计图纸安装接线完成后，进行下列检查：系统接线并校线，确认系统接线无误；对电动机、整流变压器、电抗器进行实验检查，与出厂数据进行比较核实；检查直流控制器插入式跨线器 XJ1-XJ13 位置，应与系统配置对应，然后进入系统参数化阶段^{[39][40][41]}。

1. 操作控制面板

操作控制面板如图 5.1 所示：

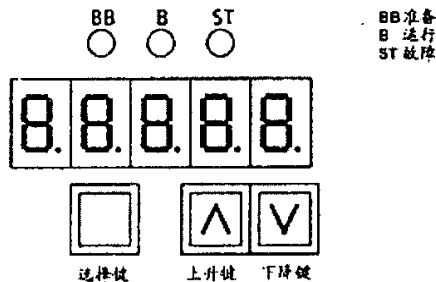
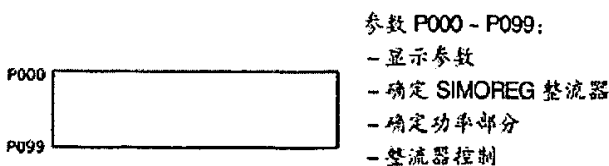


图 5.1 操作控制面板

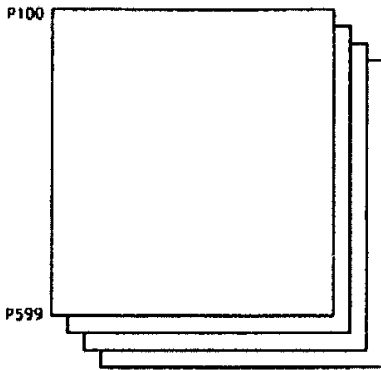
如图所示，选择键功能是在参数方式、数值方式、变址方式之间转换；上升键和下降键功能分别是选择更高或更低的参数编号、增加或减少选定和显示的参数值；

2. 参数化步骤

系统参数化就是利用操作控制面板改变参数值，使整流器起作用。系统参数安排如下（如图 5.2 至 5.5 所示）：

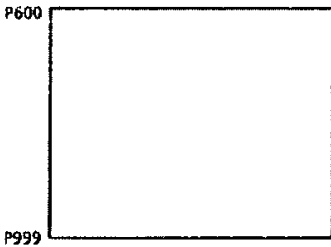


5.2 参数 P000-099



参数 P100 - P599:
 此范围内有四个参数组, 每个参数编号指定四个数值, 每一个数值, 对应一个参数组。
 - 电机参数定义
 - 确定脉冲编码器
 - “电动机接口”选择
 - 最优闭环控制
 - 设定监控和极限值
 - 设定基本整流器工艺功能

图 5.3 参数 P100-599



参数 P600 - P999:
 - 构成闭环控制
 - 定义整流器的硬件接口
 - 配置基本整流器串行接口
 - 屏蔽故障/错误信号
 - 其它

图 5.4 参数 P600-999



参数 PT001 - PT999:
 从 2.00 软件起使用操作面板并通过参数 P900 来选择模板, 才能进入工艺模板参数

图 5.5 参数 PT600-999

参数 P054 定义四组参数中, 显示哪组参数通过开关量输入功能起作用, 参数 P056 指示出起作用的参数组。

通过上述操作面板和参数组功能介绍, 我们可以对系统组态参数进行输入从而完成系统参数化。需要说明的一些参数:

电机数据: 根据电机铭牌, 必须将输入电机参数数据

P100 : 电枢电流设计值 30 (电流互感器换算)

P101 : 电枢电压设计值 440

PI02 : 励磁电流设计值 2.75 (换算值)

P114 : 电机热时间常数

速度实际值传感器的资料:

P083 = 1 : 确定测速机输入

P706 = 66V (在最高速度时测速机电压)

P708 = 10, 测速机接到端子 1 01 (范围 80V — 250V)

P082 = 011 : 励磁由进线接触器来控制 (励磁脉冲由进线接触器来控制接通 / 关断, 内部 EMF 闭环控制作为励磁电流设定值 (在电机额定转速之上, 随速度增加而减弱励磁, 从而保持 EMF 为一常数)。

其他参数按照系统组态参数输入。

5.2 最优化运行

系统优化运行时传动装置的运行状态必须处于 07 或更高 (输入关断), 用键参数 P051 选择优化运行。

P051 = 25 电枢和励磁前馈控制和电流控制的优化 (持续时间约 40s) 参数 P110、P111、P112、P155、P156、P255、P256、P884 和 P887 自动地被设定。

在电流调节器优化运行时被调整的电流极限无效, 电机额定电流的 75% 将持续约 500ms 而且个别电流峰值几乎达到电机额定电流的 120%。

P051 = 26 速度调节器优化 (持续最少 6s) 参数 P225、P226 和 P228 自动地被设定。

在执行速度控制器优化运行时, 不仅要考虑 P200 中设定的速度实际值滤波, 而且在 P083 = 1 时还要考虑 P709 中设定的主实际值滤波。对于 P200 < 20ms 时, P225 (增益) 应限制到 30.0。速度调节器优化运行时也设定 P228 (速度设定值滤波) 和 P226 (速度调节器积分时间) 来优化阶跃给定时的性能。

在速度调节器优化过程中, 电机最大以电机额定电流的 45% 加速, 电机可能达到最高速度的 20% 左右。

P051 = 27 弱磁的优化运行 (持续时间约 1 分钟)

参数 P117 到 P139、P275 和 P276 也被自动设定。

为了确定励磁特性, 在优化运行过程中, 励磁电流的设定值从 P102 设定的额定电机励磁电流的 100 % 开始减小, 最小减少到 8 %。在这一优化运行期间参数 P103 设定一个小于 P102 的 50 % 的值, 根据 P103 将励磁电流设定限制到一个最小值。

这一点对于有非常强的电枢反应的无补偿电机是有必要的。励磁特性从最小励磁电流设定的测量开始，线性地近似到零。为了执行这一优化运行，必须将最小电机励磁电流(P103)参数设定为额定电机励磁电流(P102)的50%。

P051=28，摩擦和转动惯量的优化运行（持续时间最少40S，参数P520到P530、P540自动设定。完成这个优化过程后，必须手动设置P223=1表示摩擦和转动惯量补偿有效。当执行这个优化运行时，不允许将ST设定成纯P调节器或具有调节器特性软化功能。

在用P051=25、26、27、28选定所需优化运行后，按选择键，出现图5.6所示的提示符：



图 5.6 按选择键提示符

按上升键执行优化运行，操作面板出现如图5.7显示，按下将建则不执行优化运行（中断）。



图 5.7 优化运行提示符

处于工作状态01.0以上等待“运行”，在简单操作面板上，第一位“-”上下移动表示在优化运行过程中，它是一个工作状态显示。

在分别优化运行过程中，优化运行是以一个分布顺序来完成的，此时，在面板上显示出代码编号，表示分别优化运行有效，这样就指定了当前所执行的程序步骤，如图5.8所示。



图 5.8 优化运行步骤显示

根据以上步骤完成系统接线，系统参数化以及按照步骤进行优化运行就完成了系统的调试工作，通过优化运行，系统调节器等调节参数自动设定。由此可以看出，本系统功能十分强大，不需要设计人员对转速、电流、励磁等调节器的参数进行繁琐的计算，而通过系统优化运行软件对调速系

统进行数学模型辨识，从而自动计算并修正调节器参数缺省信息。

5.3 系统运行监控

1. 系统运行状态

直流调速系统运行状态由参数 P000 显示，分别有十三类状态，为系统调试和运行提供了帮助。

01 状态（准备状态）

包括 01.，01.0~01.6 共 7 种状态，分别描述如下：

等待使能信号；抱闸释放，延时运转；等待端子 38 使能信号；等待控制字第 3 位运转使能信号；点动命令取消后的延时时间；等待励磁反接已经完成；优化运行使能信号延时时间；通过线路接触器闭合信号返回等待使能。

02 状态（备用）

03 状态（相测试）

包括 03.0~03.1，功能描述：

等待晶闸管检查完毕；等待电源对称度检查完毕。

04 状态（等待电压）

04.0 状态，等待 1U1、1V1、1W1D 的电压。

05 状态（等待励磁电流）

05.0 等待励磁电流实际值大于 50%给定值。

06 状态（主接触器闭合前的等待状态）

06.0 为等待辅加条件接入，06.1 等待谐波斜波函数发生器。

07 状态（合闸等待）

07.0 为等待 37 端子接通；07.1 等待控制字 0 位接通；07.2 等待输入外部停车命令；07.3 等待设定值复位完成；07.5 等待读入设置参数完成。

08 状态（等待确认禁止通电）

08.0 通过输入 SHUTDOWN (OFF1) 命令，等待禁止合闸确认。

09 状态（快速停车 OFF3）

09.0 通过端子输入快速停车；09.1 通过控制字第 2 位输入快速停车；09.3 内部存储快速停车。

010 状态（电源断开 OFF2）

010.0 通过端子输入断开电源命令；010.1 通过控制字第1位断开电源；
010.2 通过端子 105、107 输入急停命令；010.3~010.5 通讯用。

011（故障状态）

011.0 故障信号显示，红色 LED 亮。

012（电子板通电）

012.0 辅加板通电；012.1 基本整流器电子板通电。

013（电子板无电压）

显示暗，等待 5U1、5W1 电压。

2. 故障信息

当系统发生故障时，开关量输出功能“故障”设置成低电平，状态字 ZSW 第 3 位设置成高电平；驱动系统停止运行；在操作面板上显示故障信息 Fxxx(xxx=故障数码闪烁，电子板上红色 ST 亮。

故障信息仅对某一运行状态有效，运行状态在各自的故障信息说明中做了规定，如果以前的故障信息已确认，新的故障信息才能显示。

6RA24 系列直流调速控制器共显示 F001~F255 种故障，包括电源故障（F001~009）、接口故障（F010~029）、驱动故障（F031~048）、启动故障（F050~060）、检查晶闸管的故障信息（F061~096）、内部故障（F100~113）、外部故障（F121~255）。

3. 报警信息

如果发生一个或几个报警，将出现开关量“报警”输出置低电平，状态字 ZSW 的位 7 置 1，电子板上 ST 闪烁。

实际报警显示由参数 P049、P050 来指示，W00~W14 报警，P049 显示如图 5.9：



图 5.9 报警显示

段亮或“1”有报警，段暗或“0”无报警，具体报警信息本文不再详述。

5.4 系统运行分析

经过前面几节分析，系统运行前，首先要进行系统参数化，然后进行系统优化运行对系统模型进行辨识，计算并更改调节器参数缺省值，这一过程实际就是调节器参数设计计算过程，免除了人工复杂的工程计算过程，这是该系统最重要的特色之一，完成这些工作后系统即可投入正式运行。

在系统突加转速给定时，用示波器观察了电机电流和转速的动态变化过程如图 5.10 和 5.11 所示：

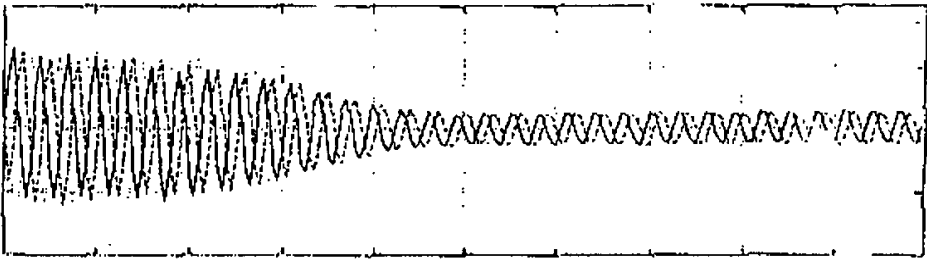


图 5.10 突加转速给定时电机电枢电流波形

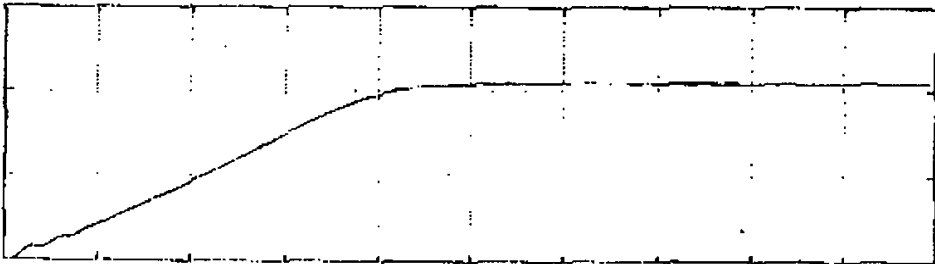


图 5.11 突加转速给定时电机转速波形

由突加转速给定时电机电流和转速的动态波形可知，电机电枢电流迅速达到由 LT 给定的限幅值，电机恒流起动，而电机转速则按给定积分作用按照一定斜率直线上升，当转速达到给定值时，电机电流开始迅速下降，转速和电流进入稳态，与第三章动态性能分析基本吻合。

通过生产实践表明，该系统自投入以来，极少出现硬件故障，系统硬件设计可靠性非常高，能够适应恶劣的运行环境。另外，在系统运行过程中，由于发热元件大幅度减少新系统比老系统室内温度降低 10℃左右，因此，系统运行效率较高。

但是，由于系统优化过程是在轻载状态下进行，因此在实际运行过程中，在负载大范围波动且波动频繁情况下，系统易出现转速、电流大幅度波动，严重时出现系统振荡等现象，这时需频繁人工细调调节器参数，给生产运行带来不便，同时测速发电机性能不稳定也带来了系统不能稳定运行的弊病。在今后的工作中需作进一步改进。

5.5 小结

本章对双闭环全数字直流调速系统调试方法步骤进行了详细论述，首先对系统接线进行检查，然后进行一些常规试验（例如变压器、电动机、互感器等电气设备进行常规试验，这些工作完成后，即可进行系统通调。首先进行参数化步骤，然后进行系统优化运行，完成系统调试工作。通过系统运行分析指出了本系统存在的优点和不足之处。

结 论

熟料窑全数字直流调速系统,从 1998 年 3#窑磨工程开始进行研发设计并得到成功运用,历经 4、5、6 号熟料窑系统持续改进,目前该系统已处于成熟应用阶段。

该系统与早期熟料窑直流系统相比主要优点如下:

1. 从系统结构来讲:

原系统为七十年代初国家定型产品(丹东整流器厂生产),电枢回路由两套二极管整流系统串联,为两台直流电动机串联电枢供电(励磁回路已然),电机起动为串电阻起动,起动后直接加速到基速 400rpm,起动冲击电流大,系统调速为励磁回路串联两台电动变阻器,10 级有级调速。此外,系统电气控制为继电器逻辑控制,控制接点多达 181 个。该系统结构复杂,每台窑电气传动设备多达 18 台套。

由本人设计的全数字直流调速系统,将西门子全数字直流调速控制器与国内成熟的 SCR 整流技术相结合,进行二次研究开发,实现了全数字无级调速(0~1200 r/min 无级调速),继电控制为 PLC 控制,该系统设备仅 3 台套,系统结构简单,通过不断改进,已经走入成熟应用阶段。

2. 从系统可靠性和运行效率来讲:

原系统如果起动接触器因电气故障不能切除起动电阻,将导致电阻烧毁,从而引起电气火灾,由于电动变阻器动静触头频繁相对移动,容易产生烧蚀、卡死等电气事故,控制接点多,每年每台熟料窑电气事故多达上百起。

而新系统可靠性非常高,经过运行实践表明,设备故障由原来每年每台窑上百起事故减少为六台窑 10 次以内,对稳定熟料窑操作,大幅度提高熟料窑台时产能和运转率奠定了较好的基础,同时大幅度减少了职工劳动强度,经济效益和社会效益十分显著。

此外,由于老系统发热元件多,电阻器长期运行,造成系统发热严重,运行效率低下,而新系统起动为零速起动,对机械设备无冲击;由于发

热元件较少,设备运行效率高,新系统比老系统室内温度降低 10℃度左右。

3. 从系统投资来讲:

原系统价值在 40 万元,新系统投资在 22 万元左右,土建投资比原来节省 50 万元,因此新系统比老系统投资减少 70 万元左右。

综合以上分析,熟料窑全数字调速系统产生了可观的经济效益和社会效益。

但是,由于熟料窑属于热工设备,工况复杂,受工艺过程、操作水平、设备状况等诸多因素影响,容易造成窑内结圈、积料、筒体变形、窑体上下行极限位置摩擦、托轮角度变化、测速发电机性能等因素影响,导致负荷波动较大、转速反馈误差较大,从而导致窑速波动较大频繁出现,而本系统表现出对大负荷波动调节能力较差,也就是说本系统从控制原理来讲对一些类似冲击性负载调节能力不足。尽管反复调整电流环、转速环、EMF 的比例积分时间常数,但收效甚微。因此如何提高系统对大范围频繁波动的负载特性的适应能力,将是今后努力改进的地方。

参考文献

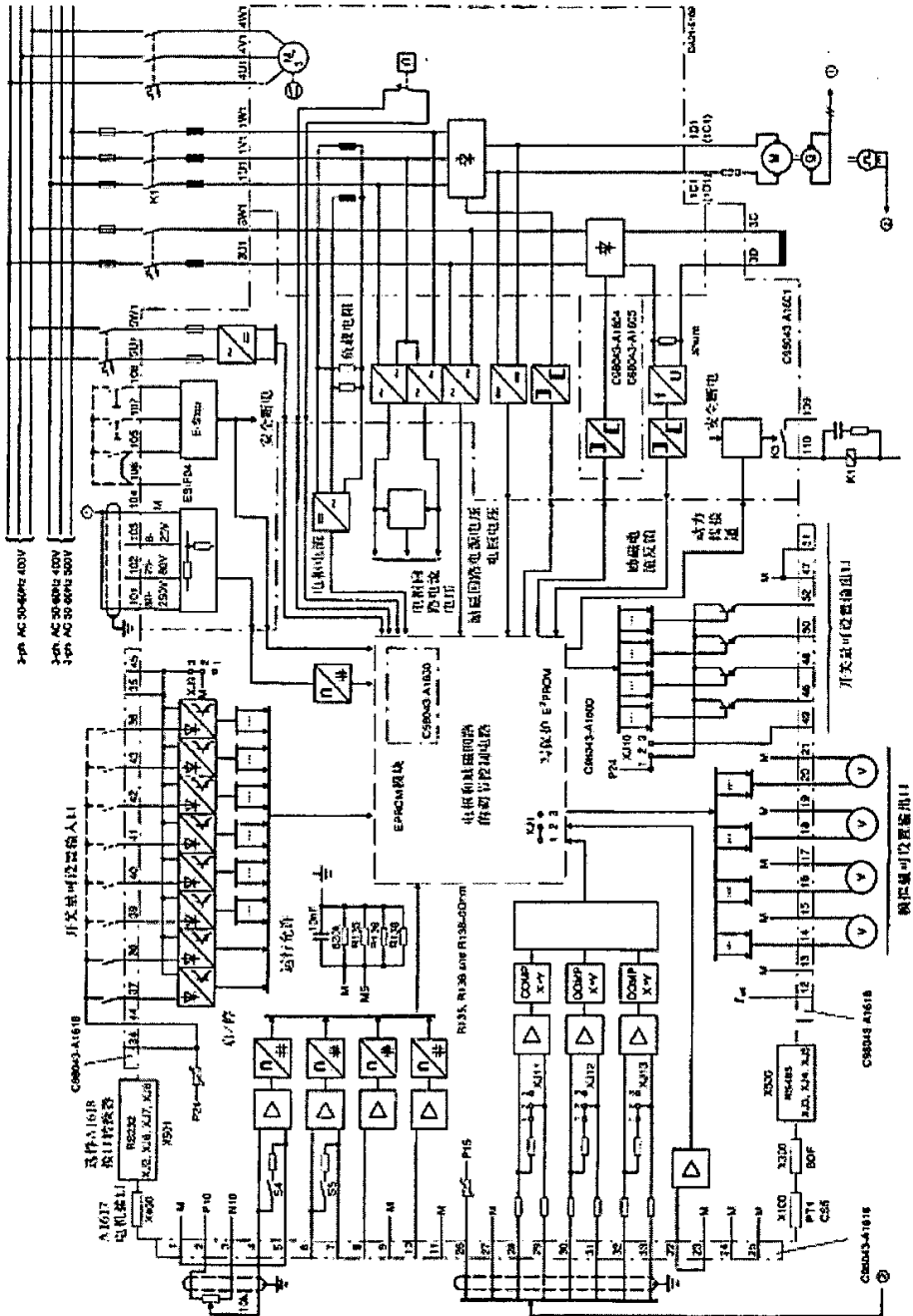
- [1] 梅剑珊. 氧化铝生产工艺 [M]. 第 1 版. 北京: 中国有色金属工业总公司, 1990:56-85
- [2] 沈阳铝镁设计院. 回转窑设计图 [Z]. 沈阳: 刘常林, 1992
- [3] 上海电机厂. 直流电动机说明书 [Z]. 上海: 1988
- [4] 沈阳铝镁设计院. 熟料烧成(传动)设计 [Z]. 沈阳: 王运玲, 1987
- [5] 孙流芳、牛新国. 边萌(天津电气传动研究所). 电气传动自动化技术手册 [M]. 第 1 版. 北京: 机械电子工业部出版, 1992: 288-367
- [6] 刘竟成. 交流调速系统 [M]. 第 1 版. 上海: 上海交通大学出版社, 1984: 1-50
- [7] 姜汉. 交流调速系统 [M]. 第 1 版. 华中理工大学出版社, 1990: 3-25
- [8] ABB 电气传动系统有限公司. ACS800 主从应用指南 [Z]. ABB 电气传动系统有限公司, 2002
- [9] 谢卓辉. 直流调速系统的全数字控制 [J]. 福州大学学报, 2001 (12)
- [10] 杜青秀. 全数字直流传动装置的构成及其应用 [J]. 起重运输机械报, 1999 (3)
- [11] 姜孝华. 数字式直流传动系统的专家智能控制 [J]. 电气传动自动化, 1999 (2)
- [12] 乔忠良. 全数字直流调速装置及工程应用 [J]. 太原理工大学学报, 2002 (2)
- [13] 杨颖. 中板厂四辊压下电控系统改造 [J]. 冶金动力学报, 2001 (1)
- [14] 俞肇庆. 不可逆双环调速系统超调抑制分析 [J]. 电工技术学报, 1994 (9)
- [15] 高安邦. K(G)S 高精度调速系统的原理剖析 [J]. 自动化技术, 1989 (4)
- [16] 冯顶尊. 用全数字调速系统改造落地铣床 [J]. 机床电器,

2003. 30(2)

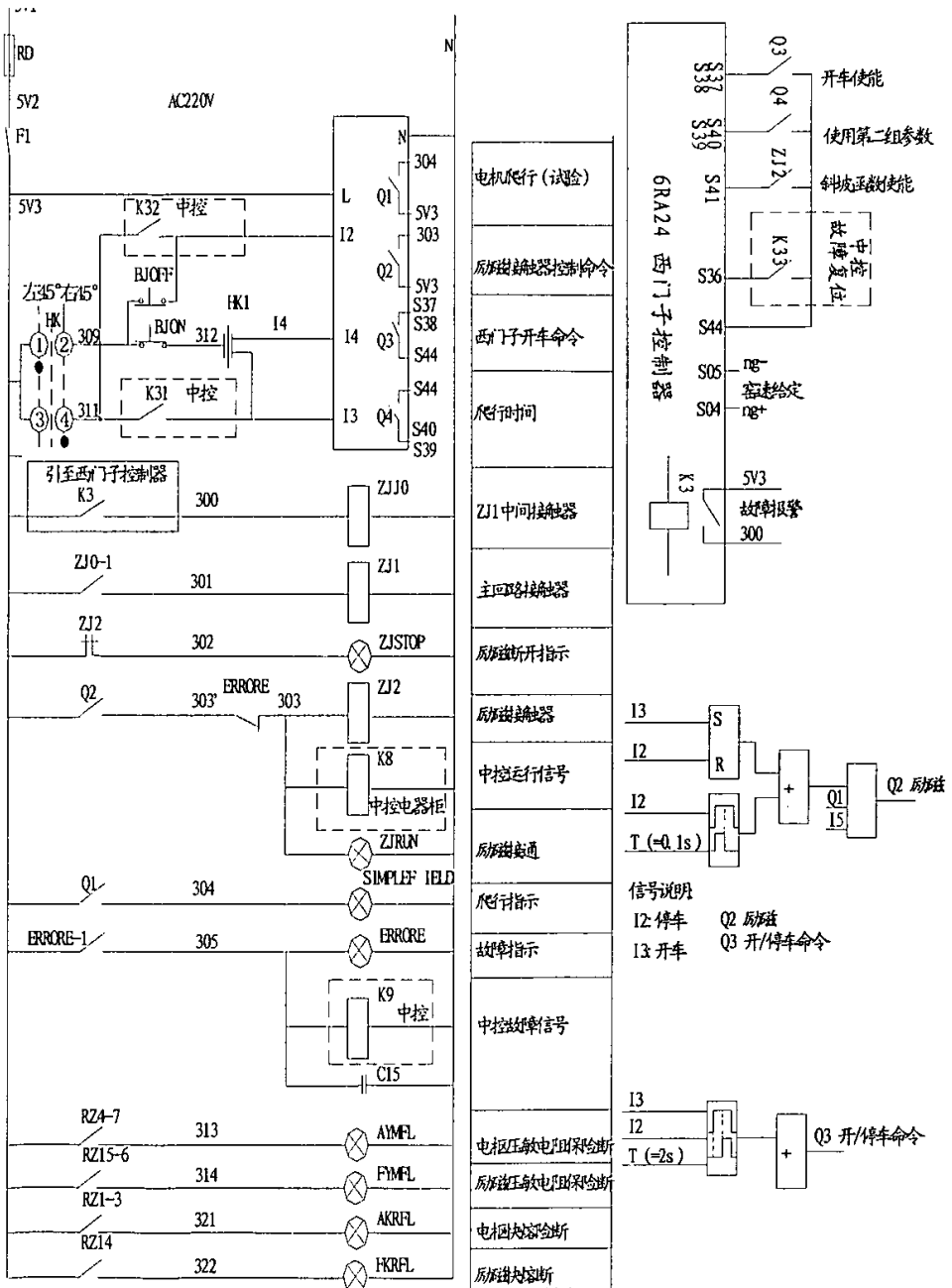
- [17] 陈飞. 控制在直流调速系统中的应用 [J]. 自动化与仪表, 2003
- [18] 鲁明先. 回转窑晶闸管直流调速系统若干问题探讨 [J]. 水泥, 2003 (12)
- [19] 顾绳谷. 电机及拖动基础 [M]. 第 1 版. 北京: 机械工业出版社, 1980: 72-162, 256-259
- [20] 李发梅. 电机与拖动基础 [M]. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 1994: 7-56
- [21] 蔡方耀. 电动机应用计算指南 [M]. 第 1 版. 北京: 中国计划出版社, 304-326
- [22] 任礼维、林瑞光. 电力拖动基础 [DB/OL]. 第 1 版. 超星数字图书馆, SSID:10202357 , 1994: 44-88
- [23] 黄俊. 半导体变流技术 [M]. 第 1 版. 北京: 机械工业出版社, 1986: 48-84, 161-180
- [24] 陈伯时. 自动控制系统 [M]. 第 1 版. 北京: 机械工业出版社, 1981: 65-202
- [25] 蔡尚峰. 自动控制理论 [M] . 第 1 版. 机械工业出版社, 1981: 20-55
- [26] 吴忠强 张秀玲 刘志新等 . 自动控制原理 [DB/OL]. 第 1 版. 超星数字图书馆, SSID:11306119 , 2004: 10-68
- [27] 黄真棠、许纪. 机械控制工程 [M]. 第 1 版. 广州: 华南理工大学出版社, 2001: 129-284
- [28] 孙虎章. 自动控制原理 [M]. 第 1 版. 北京: 中央广播电视大学出版社, 1984: 11-174
- [29] 彭侠夫. 系统控制与设计 [DB/OL] (第 1 版) . 超星数字图书馆, SSID: 10194443, 1997: 33-209
- [30] 赵长安. 控制系统设计手册 [DB/OL] (第 1 版) . 超星数字图书馆, SSID: 10184227, 1991: 12-37
- [31] 范正翘. 电力传动与自动控制系统 [DB/OL] (第 1 版) . 超星数字图书馆, SSID: 11160932, 2003: 15-64

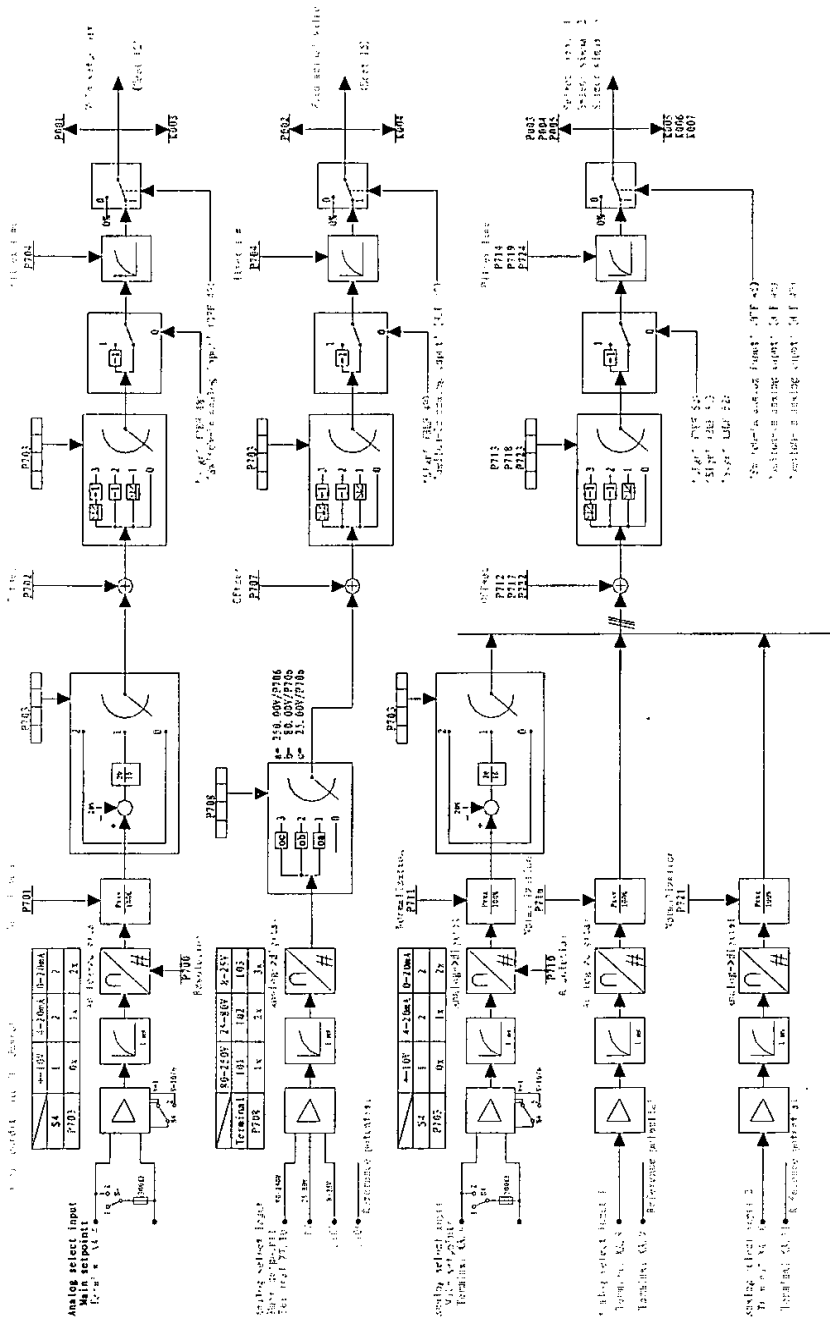
- [32] 冯焱生 邓则名. 电力传动与自动控制系统 [DB/OL]. 超星数字图书网, SSID: 11179729, 1998: 1-87
- [33] 夏新顺. 拖动自动控制系统指导 [DB/OL]. 超星数字图书网, SSID: 10710278, 1988: 20-28
- [34] 王益群. 《控制工程基础》 [DB/OL]. 超星数字图书网, SSID: 10331604, 2001: 40-45
- [35] 中南大学. 系统动力学 [M] (内部教程). 长沙:中南大学, 2002. 5: 147-183
- [36] 孙志毅. 控制工程基础 [DB/OL]. 超星数字图书网, SSID: 11413378, 2004: 52-93
- [37] [美]丹尼尔·皮·散特. 自动控制系统技术 [DB/OL]. 超星数字图书网, SSID: 10132383, 1986: 132-146
- [38] 王广雄. 自动控制系统设计 [DB/OL]. 超星数字图书网, SSID: 10179362, 1986: 131-195
- [39] 西门子电气传动有限公司 (SEDL). SIMOREG DC Master 6RA24 系列全数字直流调速装置使用说明书 [Z]. 德国西门子公司:1999
- [40] 西门子电气传动有限公司 (SEDL). SIMOREG DC Master 6RA27 系列全数字直流调速装置使用说明书 [Z]. 德国西门子公司:1999
- [41] 西门子电气传动有限公司 (SEDL). SIMOREG DC Master 6RA70 系列全数字直流调速装置使用说明书 [Z]. 德国西门子公司: 1999

附录一 直流控制器外部接线图

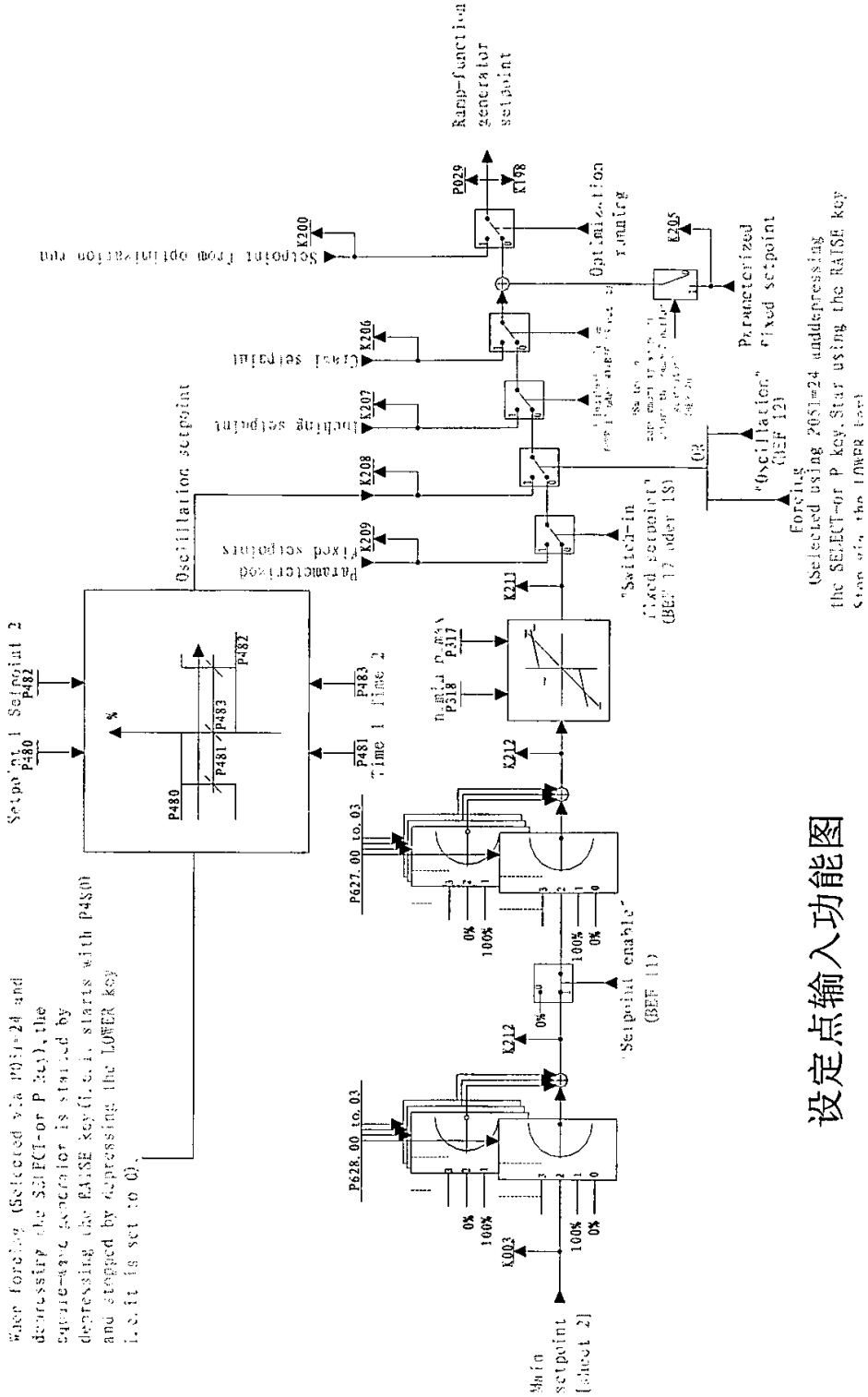


附录二 直流调速系统控制原理图





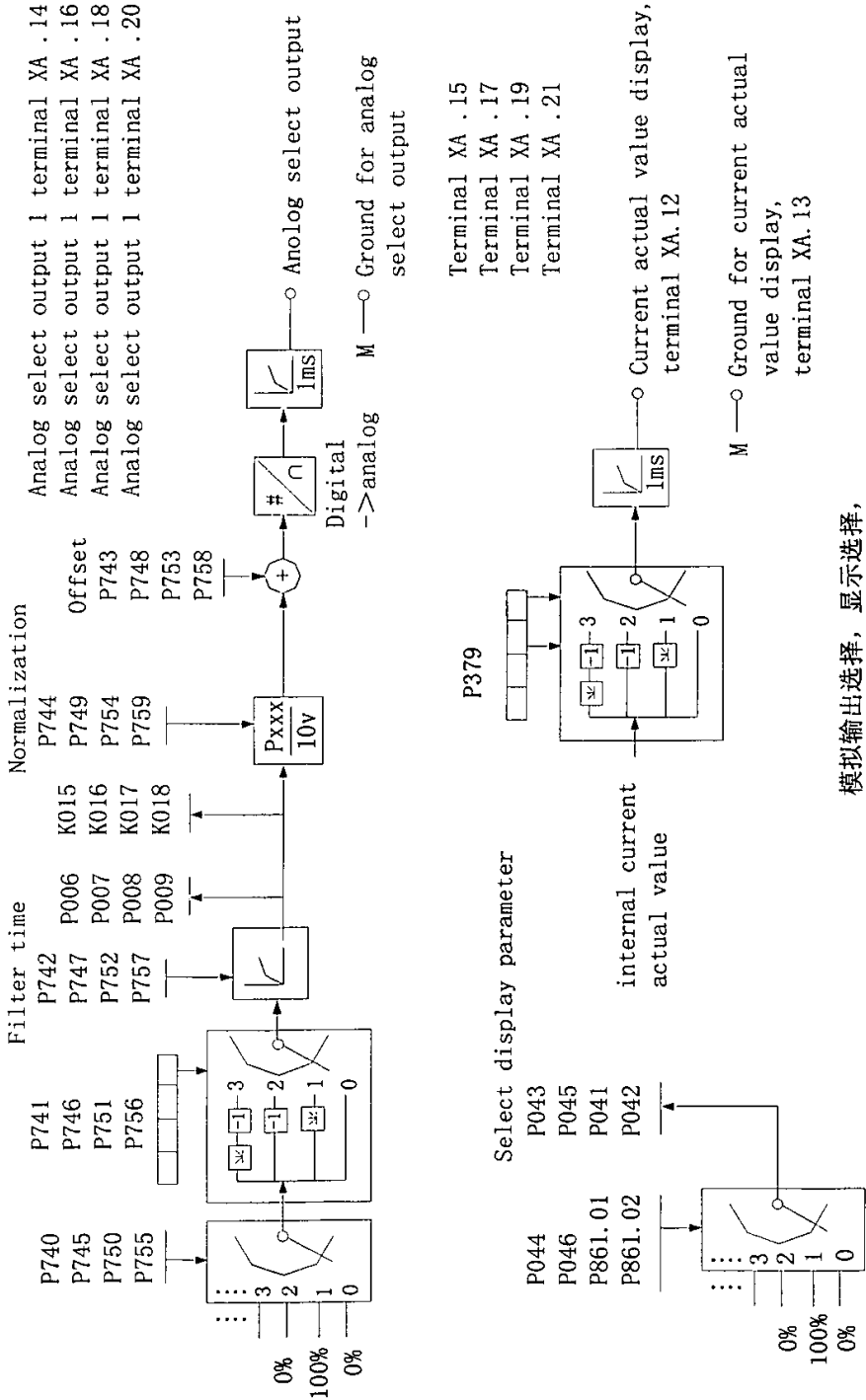
模拟输入选择图



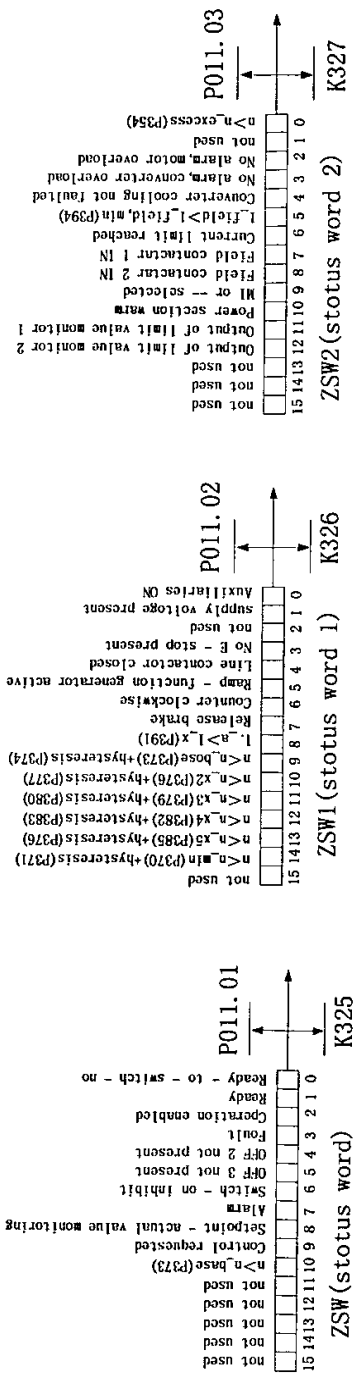
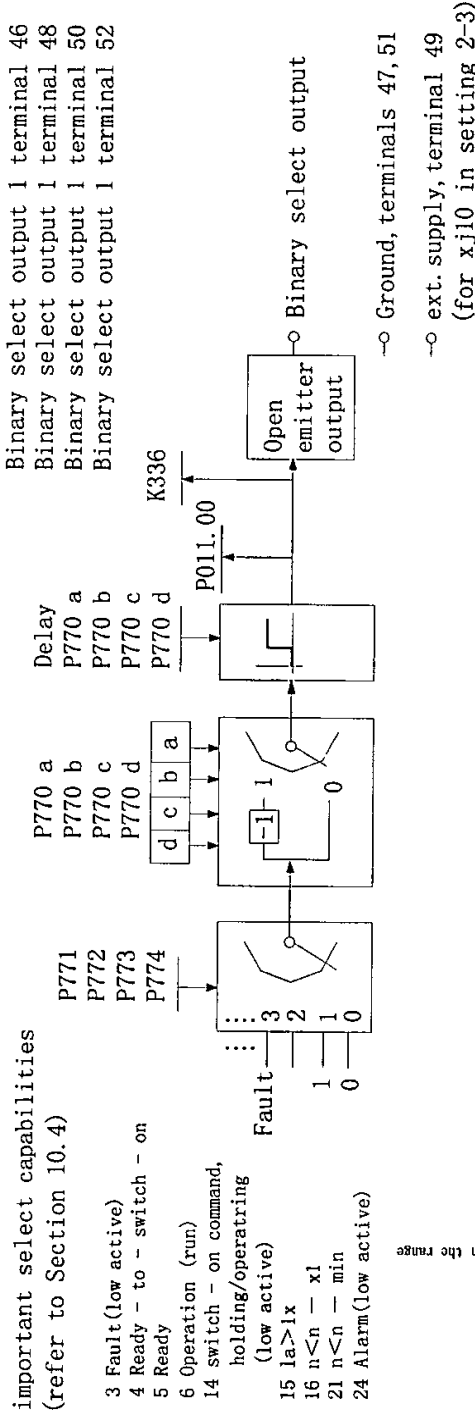
When forcing (Selected via P011=24 and depressing the SELECT or P key), the square-wave generator is started by depressing the RAISE key (i.e., it starts with P480) and stopped by depressing the LOWER key (i.e., it is set to 0).

设定点输入功能图

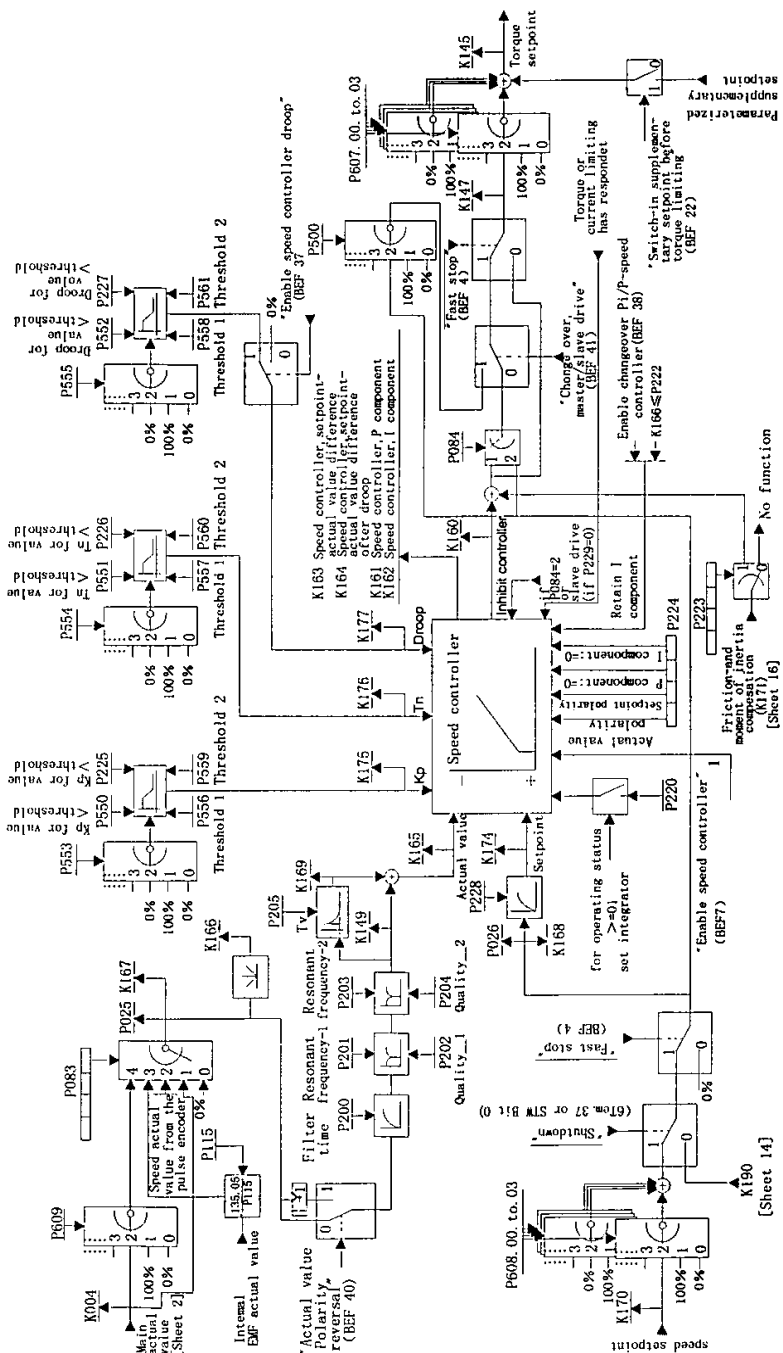
Forcing
 (Selected using P011=24 and depressing
 the SELECT or P key. Start using the RAISE key
 Stop via the LOWER key)



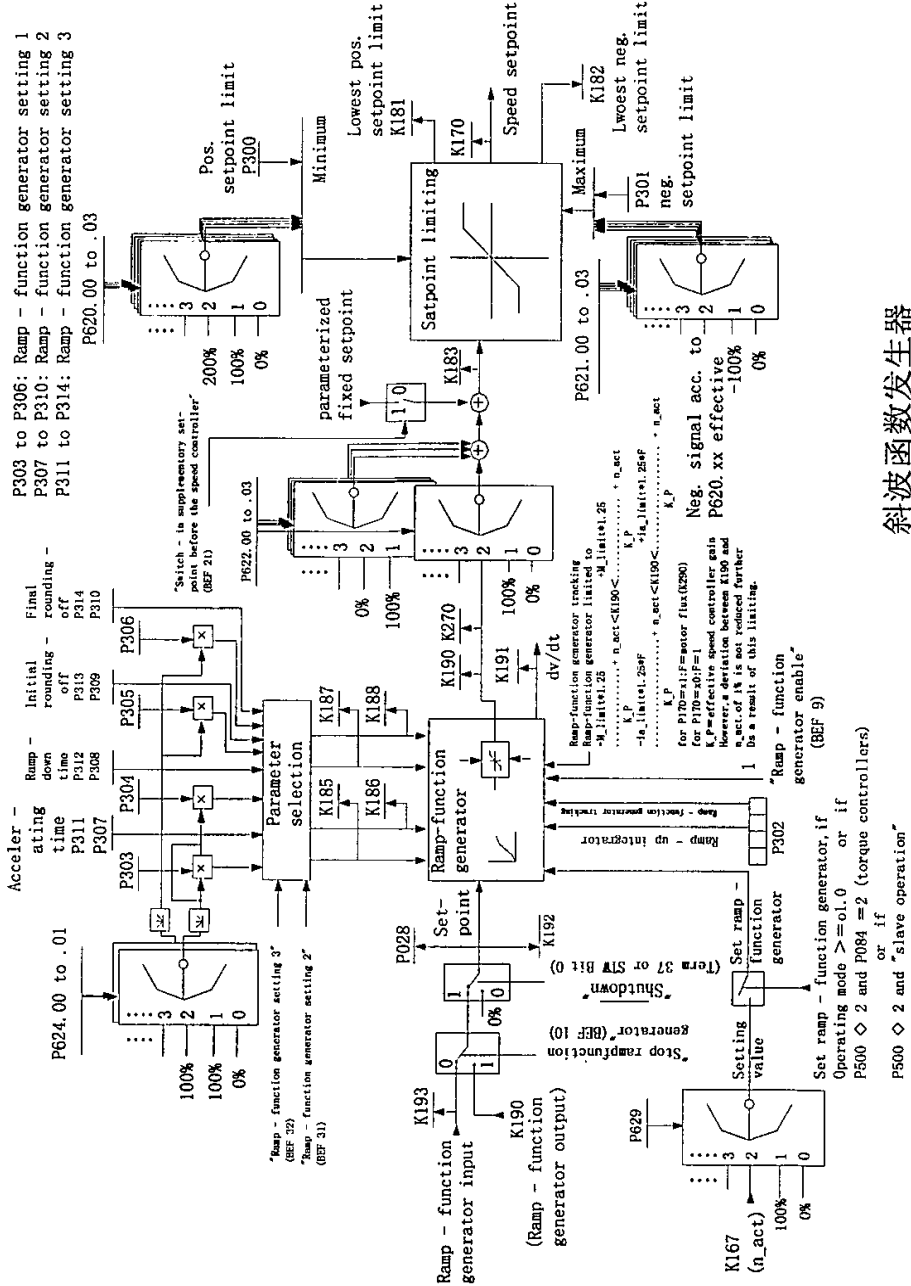
模拟输出选择, 显示选择, 电流实际值显示



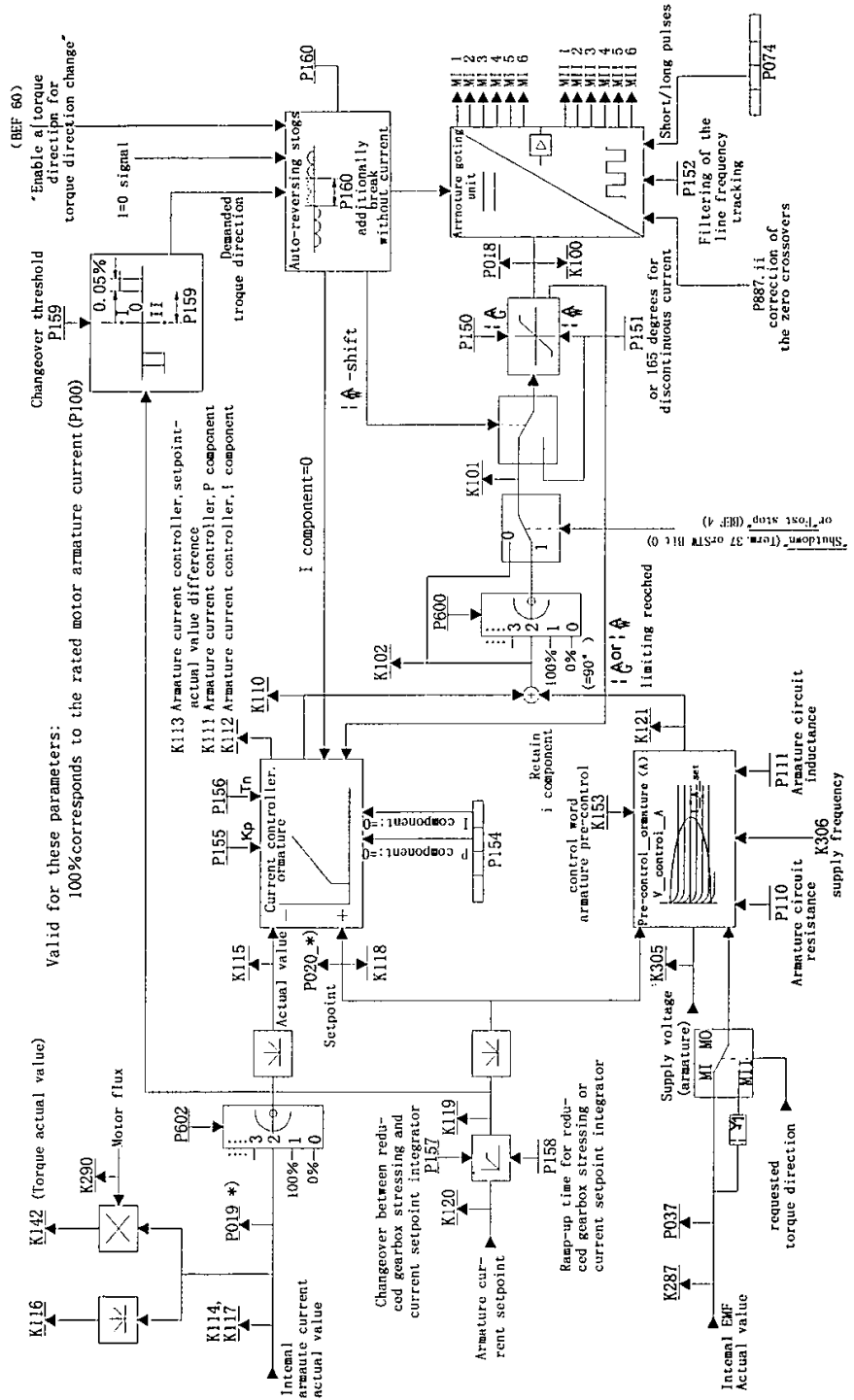
开关输出选择及状态字



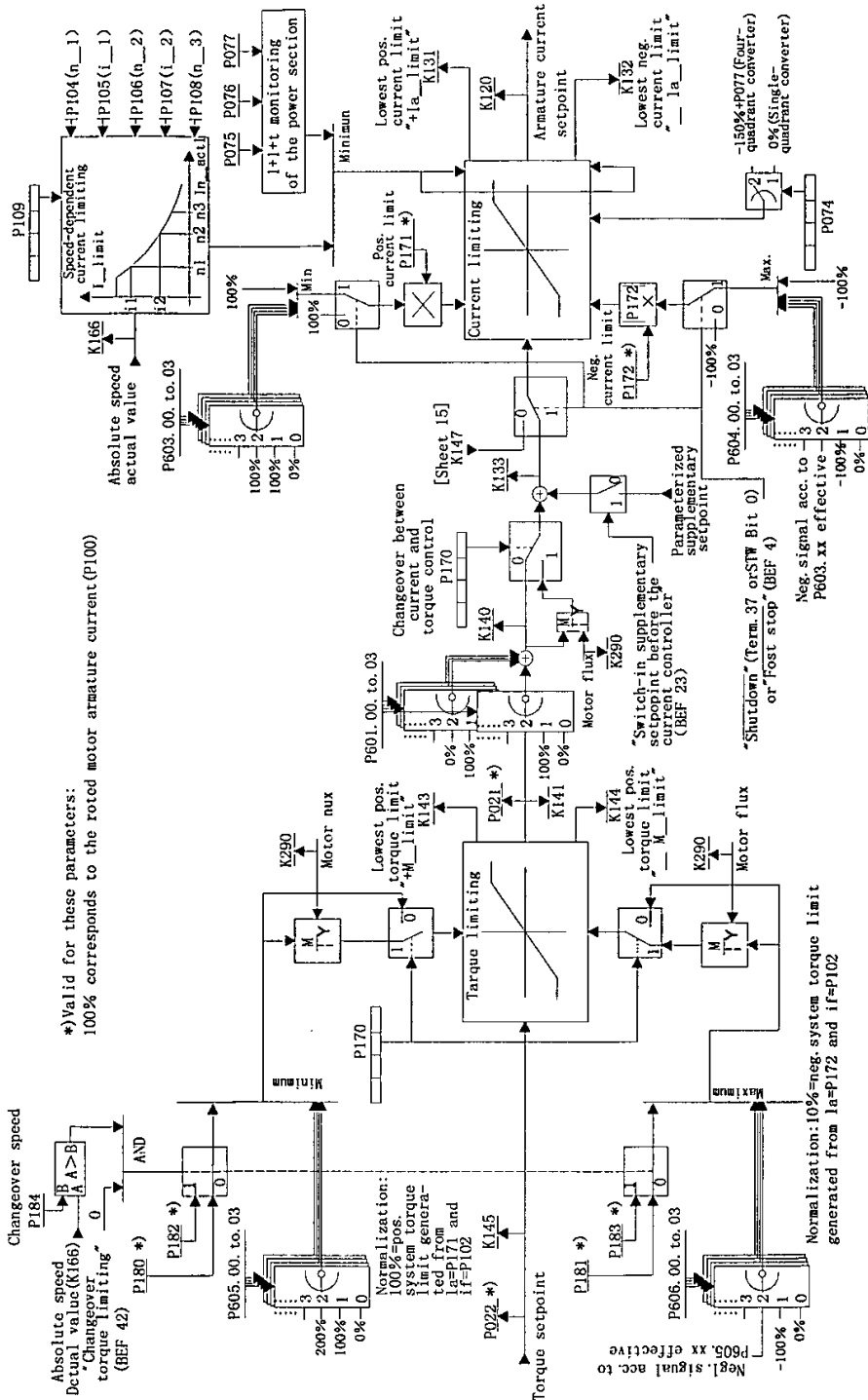
闭环速度控制



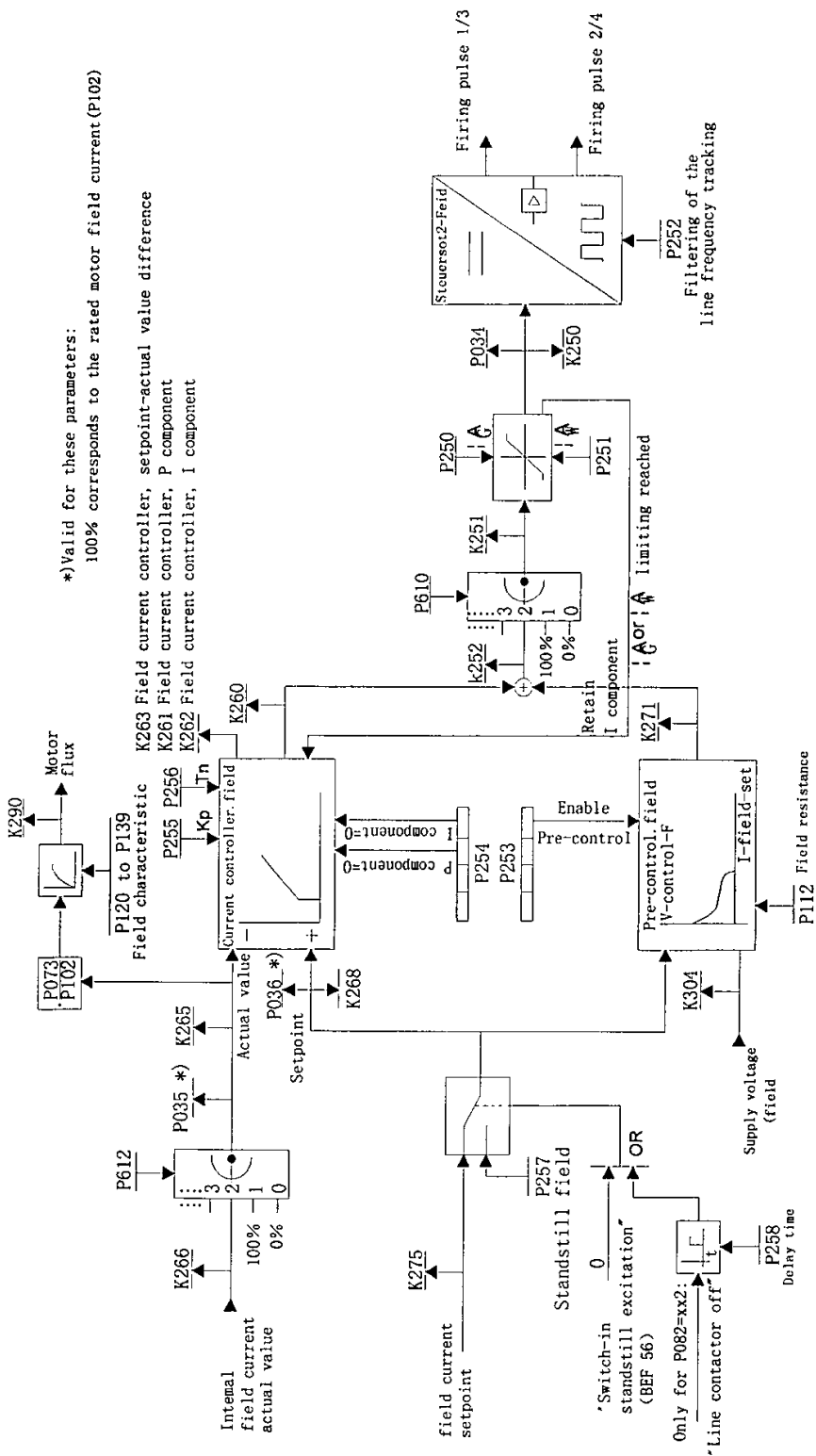
斜坡函数发生器



电机电流控制换向，逻辑控制，触发单元

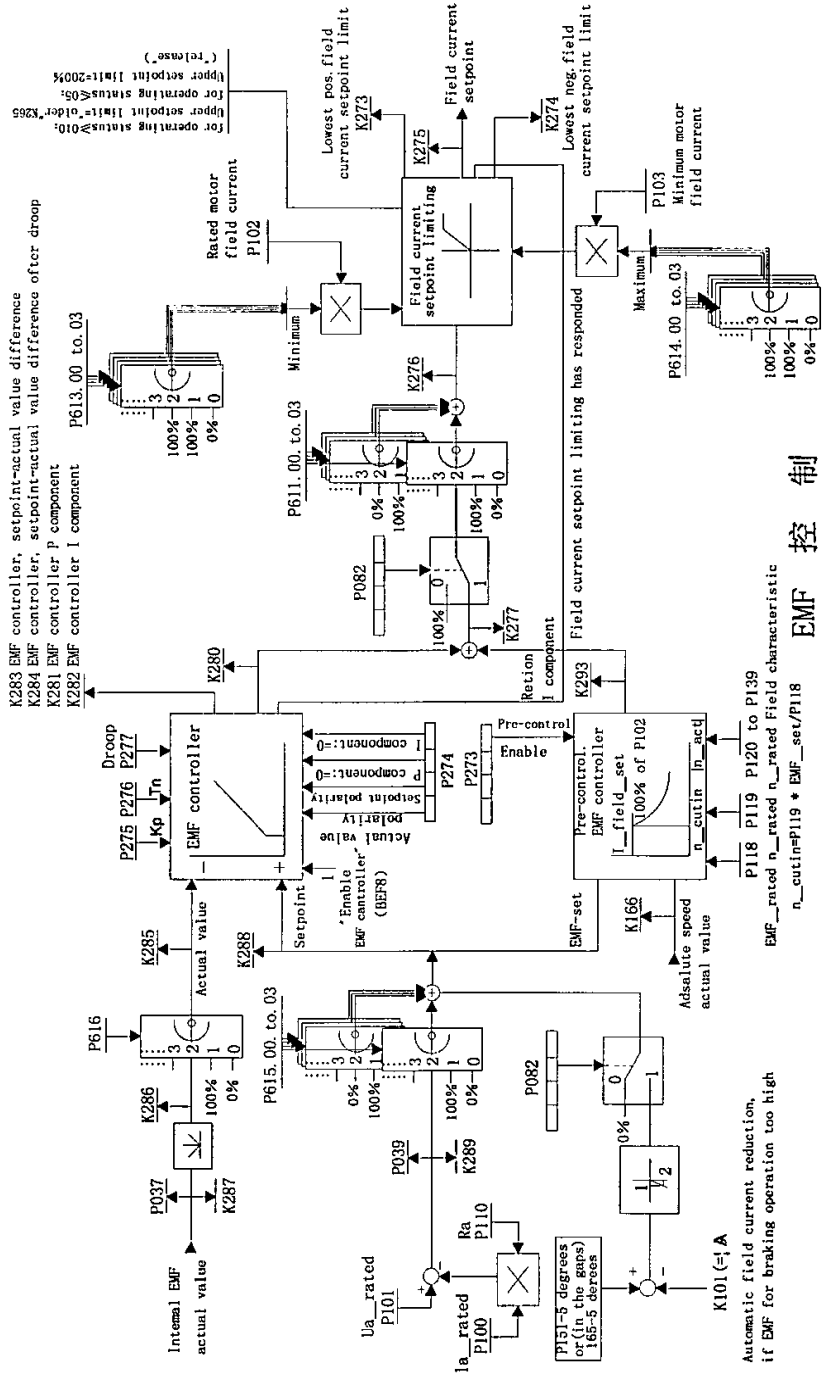


转矩限幅, 电流限幅



*)Valid for these parameters:
 100% corresponds to the rated motor field current (P102)

励磁电流控制，励磁触发单元



附录四 直流调速系统软件参数组态表

序号	参数代码	设定值	功能描述
整流机功率部分定义			
1	P072	30	电枢额定电流（功率端子 1C1、1D1 处的直流输出电流）
2	P073	5	励磁额定电流（功率端子 3C、3D 处直流输出电流）
3	P074	1	单象限整流器
整流器控制的设定			
1	P082	2	自动投入 P257 设定的固定励磁
2	P083	1	速度来自主通道实际值(K004, 端子 101、104)
3	P084	1	速度闭环控制方式
电动机的定义			
1	P100	27.5	电枢额定电流（互感器换算而来）
2	P101	440	电枢额定电压
3	P102	4.5	电机额定励磁电流（换算）
4	P103	0.73	电机励磁最小电流（调试实验数据）
5	P109	0	与速度有关的电流限幅禁止
6	P110	0.834	电枢电阻（在电枢和励磁的前馈、电流控制的优化过程中，该参数可自动设定）
7	P111	38.25	电枢电感（在电枢和励磁的前馈、电流控制的优化过程中，该参数可自动设定）
8	P112	60	励磁电阻（优化运行后数据）
9	P117	1	励磁特性（P118-139）有效，在励磁弱磁控制优化过程中自动设置
10	P118	421	额定电动势，在励磁弱磁控制优化过程中自动设置
11	P119	34.9	额定转速，在励磁弱磁控制优化过程中自动设置，P118/P119 确定了弱磁控制
12	P120-139		磁化曲线，在励磁弱磁控制优化过程中自动设置

模拟输入选择			
1	P700	12	主设定分辨率
2	P701	100%	主设定的规格化
3	P702	0	主设定偏置
4	P703	1	主设定控制字
5	P001		K003
6	P706	66	主实际值规格化
7	P707	0	主实际值偏置
8	P708	11	主实际值控制字, 绝对值输入
9	P002		K004
10	P710		模拟输入选择 1 分辨率
11	P711	100%	模拟输入选择 1 规格化
12	P712	0	模拟输入选择 1 偏置
13	P713	11	控制字, 绝对值电流输入
14	P003		K003
设定点输入			
1	P628.00	2	主设定
2	P628.01	2	主设定
3	P628.02	2	主设定
4	P628.03	2	主设定
5	P627.00	2	主设定
6	P628.01	2	主设定
7	P628.02	2	主设定
8	P628.03	2	主设定
9	P317	100%	最高转速限幅
10	P318	0%	最低转速限幅
11	P029		K918
12	P315	100%	斜坡函数发生器输入正限幅
13	P623.00	2	斜坡函数发生器设定输入限幅的输出
14	P623.01	2	斜坡函数发生器设定输入限幅的输出

15	P623.02	2	斜坡函数发生器设定输入限幅的输出
16	P623.03	2	斜坡函数发生器设定输入限幅的输出
17	P470	0	张力/速比控制断开
斜坡函数发生器			
1	P302	20	斜坡上升积分器工作,在第一次达到设定值时,根据 P302 设置斜坡函数发生器发生转换
2	P303	10	斜坡上升时间 1, K185
3	P304	10	斜坡下降时间 1, K186
4	P305	1.23	初始圆弧 1, K187
5	P306	1.31	最终圆弧 1, K188
6	P307	29.36	斜坡上升时间 2, K185
7	P308	10	斜坡下降时间 2, K186
8	P309	0	初始圆弧 2, K187
9	P310	0	最终圆弧 2, K188
10	P622.00	2	斜坡函数发生器输出
11	P622.01	2	斜坡函数发生器输出
12	P622.02	2	斜坡函数发生器输出
13	P622.03	2	斜坡函数发生器输出
14	P300	100%	斜坡函数发生器输入正限幅
15	BEF9	1	斜坡函数发生器使能
16	P170	10	转矩控制禁止但转矩限幅起作用
闭环速度控制			
1	K174		速度给定
2	P223	0	速度调节器前馈控制禁止
3	P224	11	实际值、设定值正符号接入, PI 起作用
4	P225	12.5	速度调节器 P 增益,在速度调节器优化运行时自动设定
5	P226	0.854	速度调节器积分作用时间,在速度调节器优化运行时自动设定
6	P227	5%	速度调节器特性软化,在速度调节器优化运行时自动设定

7	P228	60	速度调节器设定的滤波时间, 在速度调节器优化运行时自动设定
8	P084	1	速度调节器起作用
9	P553	0%	速度调节器自适应功能不起作用
10	P554	0%	速度调节器自适应功能不起作用
11	P555	0%	速度调节器自适应功能不起作用
12	K165		实际值
13	P200	4	速度调节器实际值 D 的滤波时间
14	P201	0	第一级带阻滤波器的谐振频率
15	P202	0.5	第一级带阻滤波器的品质
16	P203	0	第二级带阻滤波器的谐振频率
17	P204	0.5	第二级带阻滤波器的品质
18	P205	0	速度调节器实际值通道中 D 分量微分作用时间
19	P609	2	速度调节器实际值来自主设计值
20	P083	1	速度调节器实际值来自主设计值
转矩、电流限幅			
1	P180	300%	正转矩限幅 1
2	P181	-300%	负转矩限幅 1
3	P182	300%	正转矩限幅 2
4	P183	-300%	负转矩限幅 2
5	P184	0%	转矩限幅转换速度(该功能由 BEF42 禁止)
6	P605.00	2	正转矩可变限幅选择(无效)
7	P605.01	2	正转矩可变限幅选择(无效)
8	P605.02	2	正转矩可变限幅选择(无效)
9	P605.03	2	正转矩可变限幅选择(无效)
10	P606.00	2	负转矩可变限幅选择(无效)
11	P606.01	2	负转矩可变限幅选择(无效)
12	P606.02	2	负转矩可变限幅选择(无效)
13	P606.03	2	负转矩可变限幅选择(无效)
14	P170	10	电流控制, 转矩限幅起作用(被电机磁通除)

15	P601.00	2	电枢电流调节器设定选择(电流限幅前)为转矩限幅输出
16	P601.01	2	电枢电流调节器设定选择(电流限幅前)为转矩限幅输出
17	P601.02	2	电枢电流调节器设定选择(电流限幅前)为转矩限幅输出
18	P601.03	2	电枢电流调节器设定选择(电流限幅前)为转矩限幅输出
19	P604.00	2	转矩方向 1 可变电流限幅选择无效
20	P604.01	2	转矩方向 1 可变电流限幅选择无效
21	P604.02	2	转矩方向 1 可变电流限幅选择无效
22	P604.03	2	转矩方向 1 可变电流限幅选择无效
23	P109	0	与速度有关的电流限幅禁止
24	P171	100%	转矩方向 1 的电流限幅
25	P603.00	2	转矩方向 2 可变电流限幅选择无效
26	P603.01	2	转矩方向 2 可变电流限幅选择无效
27	P603.02	2	转矩方向 2 可变电流限幅选择无效
28	P603.03	2	转矩方向 2 可变电流限幅选择无效
29	P172	-100%	转矩方向 2 的电流限幅
电枢电流控制换相、逻辑控制、触发单元			
1	P154	11	电流调节器 PI 起作用
2	P155	0.09	电枢电流调节器增益, 在电枢及励磁电流调节器优化过程中自动设置该参数
3	P156	0.197	电枢电流调节器增益, 在电枢及励磁电流调节器优化过程中自动设置该参数
4	P600	2	触发单元输入来自电流调节器输出
5	P074	1	单象限整流器, 输出窄脉冲(0.89ms, 16度)
6	P150	5	α 角 G 限幅
EMF 控制			
1	P615.00	2	电势调节器输入由内部电势实际值给定

2	P615.01	2	电势调节器输入由内部电势实际值给定
3	P615.02	2	电势调节器输入由内部电势实际值给定
4	P615.03	2	电势调节器输入由内部电势实际值给定
5	P082	11	励磁\电枢同时分合,用内部电势闭环控制弱磁运行,必须利用有效的励磁特性曲线
6	P273	0	EMF 调节器前馈控制禁止
7	P274	11	EMF 调节器控制字,实际值、设定值带符号接入, P、I 功能有效
8	P275	0.4	电动势调节器 P 增益,在弱磁优化过程中该参数自动设置
9	P276	0.24	电动势调节器积分作用时间,在弱磁优化过程中该参数自动设置
10	P277	1	电动势调节器特性软化,在弱磁优化过程中该参数自动设置
11	P082	2	自动投入 P257 设定的固定励磁
12	P611.00	2	励磁电流调节器设定输入来自电势调节器输出
13	P611.01	2	励磁电流调节器设定输入来自电势调节器输出
14	P611.02	2	励磁电流调节器设定输入来自电势调节器输出
15	P611.03	2	励磁电流调节器设定输入来自电势调节器输出
16	P613.00	2	励磁电流可变限幅无效
17	P613.01	2	励磁电流可变限幅无效
18	P613.02	2	励磁电流可变限幅无效
19	P613.03	2	励磁电流可变限幅无效
20	P102		电机额定励磁电流
21	P614.00	2	励磁电流可变下限幅无效
22	P614.01	2	励磁电流可变下限幅无效
23	P614.02	2	励磁电流可变下限幅无效
24	P614.03	2	励磁电流可变下限幅无效
25	P103		电机最小励磁电流

励磁电流控制、励磁触发单元			
1	P253	0	励磁前馈控制禁止
2	P255	10.56	励磁电流调节器 P 增益，在电枢和励磁电流调节器和前馈控制的优化过程中自动设置
3	P256	0.658	励磁电流调节器积分作用时间，在电枢和励磁电流调节器和前馈控制的优化过程中自动设置
4	P610	2	励磁触发单元输入来自励磁电流调节器输出
5	P250	0	励磁 α 角 G 限幅

致 谢

首先感谢我的导师王恒升老师，在毕业设计期间，王老师给予了高层次的指导，使论文的写作得以顺利完成。在此谨向王老师致以诚挚的敬意和衷心的感谢。

其次感谢我的企业导师牟学民老师，在论文的写作、修改，资料的提供上面给予我大力的帮助，在此谨向牟老师致以诚挚的敬意和衷心的感谢。

同时，感谢公司同仁的大力协助，在毕业设计期间给予我许多帮助和支持。

攻读学位期间主要的研究成果

一、论文发表情况

- [1] 王恒升, 张荣涛. 变频调速在熟料窑传动系统中的应用. 变频器世界. 2006, 06 期。

二、参加科研情况

1. 中国铝业科研项目, 新型气体悬浮焙烧炉自动控制系统开发与应用, 经审查核实被确认为河南省科学技术成果。
2. 中国铝业产业化项目, 高压变频技术在风机种的应用, 作为项目策划人员主持了方案制订、工程实施。
3. 中国铝业产业化项目(与中南大学合作), 生料浆自动配料系统, 参与了电气、自控方案制订、工程组织。
4. 中国铝业产业化项目, 赤心离心快速分离产业化, 作为工程项目负责人, 承担了整个工程施工组织和电气、自控系统方案制定。
5. 中国铝业中州分公司技改项目, CO₂ 压缩机和高压压缩机在线检测, 承担了该项目的论证、方案制定、施工组织, 并成功地投入生产运行。
6. 中国铝业中州分公司基建项目, 7#窑磨工程, 承担了电气、自控系统方案制订工作, 正在施工。
7. 中国铝业中州分公司基建项目, 3~6 号窑磨工程, 承担了电气、姿控系统方案制定、参与了系统设计、组织了部分项目施工、主持了电气自控、自控系统调试工作。
8. 中国铝业中州分公司大修项目, 天车变频及 PLC 控制改造、熟料溶出 PLC 集中控制系统、同步电动机励磁系统技改、熟料窑计算机控制系统、电除尘系统技术改造、高压配电系统综合自动化改造、煤气发生炉 PLC 集中控制、石灰炉 PLC 集中控制、堆取料机自动堆料、等项目, 承担了项目方案制定、参与了系统设计、组织了工程施工。