

2001 年上海大学博士学位论文

5

绕线式异步电机转子IGBT斩波 调阻调速系统的研究

作者：沈天飞

专业：控制理论与控制工程

导师：陈伯时

龚幼民



上海大学出版社

2001 年上海大学博士学位论文

绕线式异步电机转子 IGBT 斩波 调阻调速系统的研究

作 者: 沈天飞

专 业: 控制理论与控制工程

导 师: 陈伯时

龚幼民

上海大学出版社

· 上 海 ·

Shanghai University Doctoral Dissertation (2001)

Speed Adjustable System of Wound-Rotor Induction Motor with IGBT Chopper Controlled Resistance in Rotor Circuit

Candidate: Shen Tianfei

Major: Control Theory & Control Engineering

Supervisors: Prof. Chen Boshi
Prof. Gong Youmin

Shanghai University Press

• Shanghai •

上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查，确认符合上海大学博士学位论文质量要求。

答辩委员会名单：

主任：	周国兴	教授，同济大学	200092
委员：	陈敏逊	教授，上海交大	200030
	邵丙衡	教授，同济大学	200331
	许宏纲	正高工，上海港口设计研究院	200082
	汤天浩	教授，上海海运学院	200135
	朱平平	教授，上海大学	200072
	陶生桂	教授，同济大学	200331
导师：	陈伯时	教授，上海大学	200072
	龚幼民	教授，上海大学	200072

评阅人名单:

周国兴	教授, 同济大学电气工程系	200092
何湘宁	教授, 浙江大学	310027
许宏纲	正高工, 上海港口设计研究院	200082

评议人名单:

赵家璧	教授, 东南大学自控系	210018
叶芃生	教授, 上海交大电气工程系	200030
陶生桂	教授, 同济大学电气工程系	200331
杨 耕	教授, 清华大学自动化系	100084

答辩委员会对论文的评语

沈天飞同学在其博士学位论文《绕线式异步机转子 IGBT 斩波调阻调速系统的研究》中,对起重机用绕线式交流电机采用转子斩波调阻与定子调压相配合的控制方法进行了深入的分析 and 研究,提出了相应的工程设计方法。论文作者还成功地用人工神经网络解决 IGBT 在 PSPICE 中组合模型静态特性参数的辨识,提出一种改进的自适应变步长梯度算法。论文的研究内容具有工程使用价值和理论意义。

论文的主要工作体现在以下几个方面:

1. 建立了采用 IGBT 转子斩波调阻调速系统的准动态数学模型,导出了斩波器的占空比与等效电阻之间的非线性关系,为设计这种调速系统打下基础。

2. 提出斩波回路电阻,电容以及调节器的工程设计方法,使系统满足预期的性能指标。此外,还适当地辅以定子降压调速的方法,以改善调速性能,扩大调速范围。

3. 应用 BP 网络提出组合模型静态特性参数的辨识方法,提出一种改进的自适应变步长梯度算法,能有效地跳出局部极小,并加快收敛速度。

在答辩中,能正确地回答答辩委员会所提出的问题。

以上的工作表明,论文作者具有坚实宽广的本专业基础知识和系统的专业知识,具有良好的独立科研的能力。

答辩委员会表决结果

经答辩委员会无记名投票，一致通过论文答辩，建议授予工学博士学位。

答辩委员会主席：**周国兴**

2001年3月7日

摘 要

我国目前大部分起重机的拖动电机是绕线式异步电动机,一般采用有级开环调速方法,为了适应现代化生产的要求,亟待进行技术改造,在有些应用场合,转子斩波调阻调速法是一种比较经济实用的方法。基于可控硅的绕线式电机的转子斩波调阻法是一个已经成熟的技术,为了适应电力电子技术的发展,本文探讨了基于 IGBT 的转子斩波调阻调速法。采用 IGBT 的斩波电路可以省去原来可控硅电路所需的平波电抗器和强迫关断电路,因此斩波电路结构可以得到极大的简化。文中提出了以 IGBT、二极管、电阻和电解电容等四个元器件组成的斩波电路,经实验和仿真证明不仅能有效地调节转子电阻,而且同时兼有 IGBT 关断吸收电路的作用,能显著改善 IGBT 的关断轨迹。本文建立了该调速系统的准动态数学模型,首次推导出了 IGBT 的占空比与斩波电路等效电阻之间的非线性关系,并给出了该斩波回路的工程设计方法,确保了所选择的电阻和电容值不仅能使系统达到指定的调速范围,而且还能使 IGBT 在关断时避免承受功率尖峰。鉴于有些应用场合需要有轻载低速的工作点,本文在转子斩波调阻的基础上,增加了定子降压调速,推导出了定子电压的计算公式。本文还给出了该系统的动态结构框图,提出了电流环和转速环的 PI 调节器的设计方法,实现了起重机的无级调速和闭环控制。

为了用电路仿真软件 PSPICE 辅助本课题的研究工作,本文以 IGBT 为例研究了 PSPICE 中组合模型特性参数的辨识问

题, 并成功地将 BP 神经网络应用于 IGBT 组合模型静态特性参数的辨识, 使得器件手册上的静态特性可以通过人工神经网络的运算方便地转换为相应的组合模型参数, 为组合模型参数的辨识寻找到了—条捷径。

鉴于用于 IGBT 组合模型静态特性参数辨识的 BP 网络在训练时存在很多局部极小点的情况, 本文提出了一种改进的自适应变步长梯度算法 (IAVSG), 使网络避免了陷入局部极小点。采用该算法后, 网络训练时的收敛速度大为提高。

关键词 异步电机调速, 转子斩波调阻, 组合模型, 神经网络

Abstract

Wound-rotor induction motors are used in a large amount of cranes in our country, and are controlled in discrete steps and open loop. These equipments are not suitable in some areas nowadays. So their reforming has become quite urgent. In some cases, rotor resistance chopper control scheme is economic and efficient. The thyristor-chopper control scheme has already been investigated thoroughly. This paper probes into the rotor resistance IGBT chopper control system for the induction motor to follow the development of modern power electronics. The IGBT-controlled chopper circuit can be greatly simplified as the smoothing inductor and commutation circuit of the thyristor-controlled chopper circuit are no more required. In this paper a novel chopper circuit consisting only four elements: one IGBT, one diode, one resistor and one electrolytic capacitor is presented. Experiments and simulation have shown that the circuit can not only adjust the resistance in the rotor circuit efficiently, but also absorb the spikes across IGBT when the switch is turned off, and the turn-off track of IGBT can be improved a lot. The equivalent circuit of the motor with this circuit has been analyzed in detail, and the nonlinear mapping between the equivalent resistance and the duty cycle is deduced. The value of the resistor and capacitor can be determined according to the design method given in the paper so that the specified speed ratio can be

achieved and the power spikes across IGBT when it is turned-off can be weakened or avoided. In our system, the stator voltage control is also applied as a secondary strategy, so that the motor can also run at low speeds with light load. The practical calculation method of the stator voltage has also been introduced.

In order to simulate the above system with old version of PSPICE, we have investigated the identification of model parameters of IGBT composite model in this software, and BP neural network has been applied. With the help of neural network, the steady-state behavior related parameters of IGBT can be acquired quite easily.

During the training of the BP network in this application, we have observed that there exist a large amount of local minimal points. We have developed an improved adaptive variable step gradient (IAVSG) algorithm, so that the net can jump out of the local minimums more efficiently, and the convergence speed can be greatly increased.

Key words asynchronous motor drive, rotor resistance chopper control, composite model, neural network

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 绕线式异步机转子斩波调阻调速的应用背景	1
1.2 绕线式异步机转子斩波调阻调速的发展 历史和现状	3
1.3 电力电子系统的计算机仿真	6
1.4 本文的工作	8
第二章 IGBT 的电路仿真模型	10
2.1 电力电子器件的电路仿真模型	10
2.2 IGBT 的原理及物理模型	12
2.3 IGBT 的宏观模型	23
2.4 本章小结	25
第三章 PSPICE 中 IGBT 组合模型静态特性参数	27
3.1 PSPICE 中 IGBT 的组合模型参数	27
3.2 用于 IGBT 组合模型静态特性参数辨识 的 BP 网络	33
3.3 BP 网络的一种改进的自适应学习算法	44
3.4 本章小结	48
第四章 异步电动机转子 IGBT 斩波调阻调速的准动 态数学模型	50
4.1 绕线式异步电机折算到转子侧的等效电路	50
4.2 电机转子斩波调阻电路的准动态数学模型	54

4.3 等效电阻的理论计算与仿真结果比较	67
4.4 转子斩波调阻调速系统的机械特性	78
4.5 本章小结	88
第五章 异步电动机转子 IGBT 斩波调阻调速系统	
的设计	89
5.1 斩波回路器件参数的工程设计方法	89
5.2 转子斩波调阻调速与定子调压调速的配合	99
5.3 系统动态模型及调节器设计	103
5.4 本章小结	114
第六章 总结与展望	115
参考文献	118
致 谢	127

第一章 绪 论

1.1 绕线式异步机转子斩波调阻调速的应用背景

起重机在工矿企业、港口、仓库、建筑工地等部门的应用是相当广泛的，其主要功能是提升和下放各种货物，是一些行业中必不可少的重要设备。在我国，目前大部分起重机的拖动电机是绕线式异步电动机，一般采用开环控制的定子换相序反向及转子串电阻调速方法。

转子串电阻调速是指在三相转子电路中分别串入同样大小的电阻 R_s ，改变 R_s 的值即可改变电机的速度，这是绕线电机最简单的速度控制方案之一。其机械特性的特点是：在不同的转子电阻时，机械特性的理想空载转速 n_1 (即同步转速) 不变，电动机的最大转矩 T_m 也不变，但特性曲线运行段的机械特性硬度随 R_s 的增大而变软。因此，在一定的负载转矩下，可以获得不同的稳定运行速度。

由于这种调速方法可以在低起动电流下提供高起动转矩，功率因数能得到改善，而且方法简单，易于实现，初期投资少，因此广泛地应用于象起重机这种带有间隙性负载且需要高起动转矩的生产机械，避免了大起动电流对电网的严重干扰。

通过定子换相序及转子绕组串多级电阻的调速方法，起重

机可以运行在正向电动、反向电动和倒拉反接制动等三种工作状态。在一般情况下,在提升物品的整个过程中,电动机均工作在正向电动状态。起动时,外接电阻全部串入转子绕组中,以限制电机的起动电流并增大起动转矩;随后用电器控制转子外接电阻的逐级切除,完成起动过程。各级电阻的大小及所需级数是根据额定负载时电机的最大起动电流和最小起动电流决定的。起动后,司机给出的调速指令由电器控制增加或减少转子外接电阻来实现。

在下放货物时,需根据货物的轻重,采用不同的调速方法。当下放轻物时,负载转矩较小,由于电机和传动机械部分存在摩擦转矩,负载转矩可能小于摩擦转矩,此时,应使电机工作在第三象限的反向电动状态,以推动负载下放。当下放的物品较重时,电机的输入电源正接,在转子侧加大电阻让电机运行在第四象限,即倒拉反转状态,通过切换转子侧外加电阻的大小以控制下放物体的速度。

由于这种调速方法在低速时机械特性较软,低速特性静差度较大,因而它的调速范围受到了限制。另外,在电阻切除及加入的瞬间,电机的输出转矩突变,会对机械设备产生冲击,同时容易引起被吊物的振动、摇摆等问题;特别是当被吊物为易碎易爆品,或在一些要求准确定位的场合,转子串电阻有级调速几乎无法使用。而且,起重机的频繁起动、停止,使得交流接触器也频繁地动作,故障率很高,大大地增加了维护工作量。因此,在一些企业,对采用这种调速方法的起重机进行改造,已成为一种迫切的需要。

交流电机的调速方法大致可以分为三大类^[1]: ①转差功率消耗型,如调压调速,转子串电阻调速等; ②转差功率回馈型,

如串级调速；③转差功率不变型，如变频调速等。在传动和电力电子高度发展的今天，这些调速方法都得到了很大的发展和完善。对于起重机调速系统的改造，应该从经济实用的角度出发，为此，我们采用转子斩波调阻调速方法。这种方法保留了原来调速方法的优点，同时，又克服了有级调速的缺点，可以采用闭环控制，使速度的改变变得非常平滑，而且还可以沿用原有的一些装置，如电阻箱。与定子斩波调压调速相比，其定子电流波形畸变很小，对电网干扰小。

1.2 绕线式异步机转子斩波调阻调速的发展历史和现状^[2-18]

绕线式异步机转子斩波调阻调速方法是在转子串电阻调速的基础上发展而来的。20 世纪中叶，随着大功率半导体器件的出现，原先由手工控制的转子外接电阻值可以通过三相整流桥和斩波器进行调节，消除了传统变阻式控制方法的一些缺点。图 1.1 给出了这种控制方法的原理。

斩波器 Z 是一种由控制电路操纵的功率开关。当斩波器处于“通”模式时， X 、 Y 两端的等效电阻 R^* 等于零。当斩波器处于“断”模式时， R^* 等于外部电阻 R_{ex} 。连续地使功率开关通和断，在每个周期中，一段时间斩波器处于“通”模式，其余时间处于“断”模式，改变“通”模式的占空比，就能等效地获得从零到 R_{ex} 的可变电阻 R^* 。这样，从电气上实现了转子外接电阻连续且无触点的变化，形成一种脉宽调制（PWM）的控制方案。令 Z 的导通时间为 T_{on} ，关断时间为 T_{off} ，则斩波周期 $T_{ch} = T_{on} + T_{off}$ ，占空比 $\alpha = T_{on}/T_{ch}$ 。整流电流在导通期间增

大, 在关断期间衰减, 图 1.2 给出了 PWM 控制方案的典型整流电流波形。

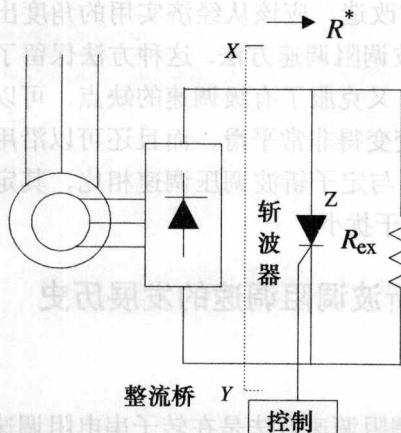


图 1-1 转子斩波调阻原理图

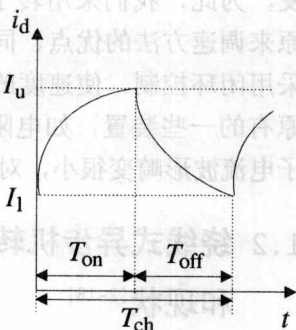


图 1-2 整流电流波形

20 世纪 60 年代中期, 德国首先尝试了绕线式异步电动机转子可控硅斩波调阻方案^[2]。到了七八十年代, 加拿大^[3,4]、印度^[5-8]和埃及^[9,10]等国家陆续有几个研究小组对这种调速系统进行了深入的研究, 我国也从 80 年代开始应用和研究这种调速方法^[11-14]。根据转子外接电阻值改变时电机临界转矩不变的特点, 他们将转子可控硅斩波调阻法应用于绕线机的起制动过程, 使电机在起制动时工作于最大转矩, 大幅度地降低了起制动时间。斩波器的使用使系统可以进行闭环控制, 他们在系统中引入了速度和电流的双闭环控制, 克服了传统调阻法机械特性软和响应慢的问题, 使系统的静动态特性得到了显著的提高。他们的工作还涉及了对该种调速系统的稳态性能的详尽研究,