

# 晶闸管驱动电路的数字控制优化及其在电机调速系统中的应用实践

邓军

杭州汉安半导体有限公司 浙江杭州 310000

**【摘要】**伴随工业自动化与节能减排需求的驱动，为优化电机调速系统，提升晶闸管驱动电路性能是关键，为攻克传统晶闸管驱动电路存在的控制精度欠佳、响应缓慢以及能源浪费等难题。采用数字控制技术开展优化，经由控制算法的优化、硬件电路的更新及通信监测系统的健全，做到对直流与交流电机调速的精准契合，实现人工智能与物联网技术融合，加深系统的智能水平层次，优化后的电路极大提升了控制精准度、响应速度及能源效能，为电机调速系统智能化、高效化的发展铺就有效道路。

**【关键词】**晶闸管驱动电路；数字控制优化；电机调速系统；人工智能；物联网

Digital control optimization of thyristor drive circuit and its application in motor speed control system

Deng Jun

Hangzhou Hanan Semiconductor Co., LTD.Zhejiang Hangzhou 310000

**【Abstract】** Driven by the demands of industrial automation and energy conservation, optimizing motor speed control systems and enhancing the performance of thyristor drive circuits is crucial. To address issues such as poor control accuracy, slow response, and energy waste in traditional thyristor drive circuits, digital control technology is employed for optimization. This involves refining control algorithms, updating hardware circuits, and improving communication monitoring systems to achieve precise alignment between DC and AC motor speed control. By integrating artificial intelligence and IoT technologies, the system's intelligence level is significantly enhanced. The optimized circuit greatly improves control accuracy, response speed, and energy efficiency, paving an effective path for the intelligent and efficient development of motor speed control systems.

**【Key words】** thyristor drive circuit; digital control optimization; motor speed control system; artificial intelligence; Internet of Things

## 引言

伴随工业 4.0 及“双碳”目标不断推进，电机调速系统对高精度、高响应和节能运行的要求进一步提高，传统晶闸管驱动电路受模拟控制局限影响，难以契合复杂工况需要，数字控制技术凭借精确运算及灵活管控的长处，为晶闸管驱动电路的优化指引新路径。调速应用从直流电机拓展到交流电机范畴，从控制算法的升级迈向智能技术的融合，系统性的优化手段不光打破传统技术瓶颈，还推动电机调速系统往智能化、自适应化迈进，在工业制造、交通出行等范畴呈现出广泛应用前景与重大技术意义。

## 一、晶闸管驱动电路在电机调速系统中的应用现状与问题

### （一）晶闸管驱动电路应用情况

在工业生产运行阶段，工厂采用的电机驱动设备，好似纺织机械的电机速度控制体系，仰仗晶闸管驱动电路精密调节电机转速，保证织物生产实现稳定高效；冶金设备里的大型电机也借助此电路达成调速，实现不同冶炼工艺对电机动力的需求。交通运输而言，对电动汽车动力电机实施调速，采用晶闸管驱动电路，灵活把控电机转速，适应多元路况与驾驶期盼；此技术同样为电动公交车的电机调速系统所采用，增进运行稳定性与能源利用效率。

### （二）现存问题分析

在实施调速的阶段，负载变动、电网电压波动等情况极易对电机转速产生干扰，引发明显的转速振荡，无法匹配高精度加工设备对转速精度要求极高的工作场景，响应速度缓慢的弊端同样明显可见，电机开始启动瞬间，电路不能迅

速输出足量的驱动电压，引发启动时间拉长；因关断延迟，滑行距离变得过长；负载瞬间突变之际，调速系统无法迅速调整转速，威胁到设备的运行安全<sup>[1]</sup>。电路当中晶闸管通断所产生的功率损耗，以及线路元件造成的电能消耗，引发能源利用效率欠佳，长期运行令企业用电成本大幅上扬，违背了节能减排的相关要求，亟待解决。

## 二、数字控制优化策略及原理

### （一）数字控制技术引入

传统晶闸管驱动电路采用模拟式的控制方式，其信号易受环境温度、电磁干扰的侵害，造成控制精度急剧降低，数字控制技术把数字信号当作基础，靠数字信号处理器实施精准运算，大幅度降低干扰的效应，实现更精准的速度调控。响应速度而言，传统模拟电路有元件延迟等问题存在，数字控制技术借由高速芯片，可迅速处理电机状态数据，迅速调整晶闸管触发脉冲，让电机启动、负载突变时的响应及时性增强，数字控制技术优势展露无遗，迫切需要引入它优化晶闸管驱动电路。

### （二）具体优化策略

数字控制技术应用后，在算法、硬件及监测系统等多维度提高了晶闸管驱动电路在电机调速里的性能，先进控制算法乃核心要点，改进的PID算法凭借比例、积分、微分环节协同发力，实时把电机实际转速与设定值对照，快速应对偏差以消除稳态误差，阻止转速超过预期的设定值；模糊控制算法对转速偏差等信息实施模糊化处理，按照规则灵动调整触发角，做到不同工况下转速的精准调控。硬件创新是支柱，高性能微控制器借助强大运算能力迅速实施复杂算法，协同优质传感器和优化后的信号采集电路，精准采集并传送电机运行数据；恰当的电路布局可降低信号的损耗与干扰，强化系统稳定性<sup>[2]</sup>。高效通信与监测系统为可靠后盾，高精度传感器实时采集电机的转速、电流、温度等数据参数，依靠高速通信协议传输至数字控制系统，系统依据数据反馈迅速调整控制方案，应对过载、过热等异常变故，实现电机调速系统稳定可靠工作。

## 三、数字控制优化后的晶闸管驱动电路在电机调速系统中的应用实践

### （一）实践方案设计

以构建高可靠性测试环境为核心，开展实验平台搭建，在驱动电路一侧，采用TI公司的TMS320F28379D型DSP作为核心控制部件，它的300MHz主频与浮点运算模块，能高效应对复杂数字控制算法；将西门康SKKD系列三相全控桥用作品闸管模块，该器件体现出低导通压降与高di/dt耐受能力，切实降低电路损耗。电机选型采用11kW交流异步电机匹配，其额定转速达到1480r/min，额定转矩为71.6N·m，适应多种工况的测试要求，各设备以双绞屏蔽电缆进行相互连接，主回路采用LEM品牌霍尔电流传感器，精准采获电机电流的信号；转速监测采用海德汉ERN1387型增量式编码器，每转动一圈输出2048个脉冲，与DSP的正交编码模块协同实现高精度转速测定。把示波器接入触发信号的输出端口，实时查看晶闸管导通的时间序列；功率分析仪与主电路实现串联，同步采集电压、电流及功率数据，保证实验数据的完整全面与精准无误，为模拟出逼真的工业环境，实验安排了三类典型应用场景，在恒速加工对应场景里面，仿造纺织机械主轴的工作情形，稳定地把电机负载设为额定转矩的70%，持续开机运行2小时，审定系统于长时间稳定状态下的转速维持能力；物流运输场景而言，仿真叉车频繁开启及停止的作业模式，安排电机每分钟完成8次从零速开始加速至额定转速再进行制动的循环，验证系统在高动态切换阶段的响应稳定性；营造动态负载瞬间变化场景，采用磁粉制动器在电机运转当中瞬间施加或去除50%额定转矩，模拟起重机起吊重物时的工作状况变化，评价系统应对负载突变的迅速调节能力，各场景均采用重复测试机制，保证实验结果的可信水平。

### （二）实践结果分析

传统晶闸管驱动系统在恒速运行时，受电网波动与负载扰动影响，电机实际转速在1370~1600r/min间波动，难以满足精密加工设备要求。经数字控制优化后，引入自适应PID控制算法与卡尔曼滤波技术，系统对转速偏差的补偿响应时间缩短至20ms，实际转速稳定在1472~1488r/min区间。在长时间运行测试中，连续2小时的转速波动范围控制在±8r/min以内，显著提升了调速系统的稳定性与精度，达到数控机床等高精度设备的应用标准。优化后的驱动电路在电机启动性能上实现显著突破，从静止加速至1480r/min的时间由3.2秒缩短至1.5秒，得益于预励磁控制策略与快速电流环调节，启动瞬间电流峰值降低30%，有效减少机械冲击<sup>[3]</sup>。在负载突变场景下，当电机转矩突增50%时，系统凭借模糊控制算法与实时状态反馈，在120ms内完成触发角调整，转

速仅下降 30r/min 后迅速恢复稳定；而传统系统需 500ms 响应，且转速最大下降达 80r/min，易引发设备振动与运行异常。功率分析仪监测数据显示，在相同负载工况与运行时长下，传统晶闸管驱动电路平均功率损耗达 300W，主要源于触发延迟导致的非同步导通损耗与线路阻抗发热。经数字优化后，通过精准的触发角控制与硬件电路优化，系统损耗降低至 180W。在持续 2 小时的测试中，优化前能耗为 2.4kW·h，优化后降至 1.8kW·h，单位时间节能 0.6kW·h。进一步分析可知，数字控制算法减少了晶闸管的无效导通时间，同时低损耗器件与高效散热设计降低了硬件运行功耗，有效提升了系统能源利用率。

#### 四、晶闸管驱动电路数字控制优化的应用拓展与技术深化

##### （一）在不同类型电机调速系统中的拓展应用

直流电机机械特性硬、启动转矩大的情况而言，采用优化控制策略以实现精准调速，在大功率直流电机的调速操作中，采用自适应变结构控制算法，与数字信号处理器相结合，实时掌握电枢电流与转速状态，实时灵活调整晶闸管触发角，对负载改变进行补偿，维持转速的平稳性。以轧钢机当作例子，数字控制系统能按照轧制工艺阶段迅速更改控制模式，保证电机在高速、低速重载工况下皆可高效地运行，优化驱动电路的硬件组成，采用具备低导通电阻的晶闸管模块与高效滤波电路，增进系统整体效率，适应多种功率等级直流电机。在交流电机调速范畴，该技术的前景同样十分宽广，就异步电机而言，采用矢量控制技术联合数字信号处理，把定子电流分解成励磁电流与转矩电流分量，依靠精确把控晶闸管触发角，实现转速与转矩的独自控制，改进调速动态水

平，鉴于同步电机转速与电源频率达成同步的特性，采用直接转矩控制举措，快速检知定子磁链及转矩，实时调整触发脉冲，实现高水准的转速调节，依照鼠笼式、绕线式等别样交流电机的特性区别，对硬件参数匹配及控制算法设定进行优化，更进一步提高调速系统整体性能与实用性。

##### （二）结合新兴技术的深化发展

机器学习算法学习大量电机运行数据，构建电机运行状态与最优控制参数映射，自适应调整控制策略，强化学习算法让系统试错学习晶闸管触发策略，适应复杂工况。深度学习算法凭借强大特征提取，分析电机振动、电流波形数据，预测故障并调整控制策略，防止故障。人工智能融入数字控制系统，使晶闸管驱动电路控制策略更智能灵活，助力电机调速系统自主优化与高效运行，物联网技术为电机调速系统监测管理提供新方案，在电机及驱动电路部署温度、振动、电流等传感器，实时采集运行参数，经物联网通信传输至云端，管理人员用移动终端或电脑远程监控，查看转速、电流、温度数据，发现异常及时处理。基于物联网的故障预警系统，用大数据分析机器学习算法分析数据，预测电机故障，提前规划维护，减少停机时间。

#### 结语

数字控制技术优化晶闸管驱动电路，解决传统电路在电机调速控制精度低、响应慢和能源效率差问题。改进算法、升级硬件、完善通信监测系统，适配直流和交流电机调速，提升系统性能。融合人工智能与物联网技术，提高电机调速系统智能化程度。这一优化策略为工业生产、交通运输等领域提供高效方案，指明电机调速系统可持续发展与智能化方向，推动相关行业技术进步。

#### 参考文献

- [1]王文东, 吴朝阳, 王淦平, 等. 可级联的压控晶闸管同步驱动电路[J]. 强激光与粒子束, 2025, 37 (02): 140-143.
- [2]刘隆晨, 张康, 喻悦箫, 等. 模拟换流阀长期运行工况的高压大功率晶闸管电热联合老化系统研制[J]. 电工电能新技术, 2024, 43 (02): 20-28.
- [3]张琦, 集成化 IGCT 门极驱动电路系统结构. 陕西省, 西安派瑞功率半导体变流技术股份有限公司, 2023-07-01.
- [4]魏海波, 梅建伟, 刘杰. 双向晶闸管的数字化移相触发控制器设计[J]. 机电工程技术, 2021, 50 (06): 43-45+73.

作者简介: 邓军, 出生年月: 1971 年 6 月, 男, 民族: 汉, 籍贯: 湖北省荆门市, 学历: 本科, 职称: 工程师, 研究方向: 半导体信息技术。