

电流传感器简介

引言

电流监测是电源管理、电机驱动和电池管理等系统里的基础功能。无论是优化效率、进行状态反馈，还是实现过流和短路保护，都离不开对电流的准确测量。

从原理上看，电流测量分为直接式和间接式。直接式采用分流器，串联在电路里测量压降，方法简单、线性度好。间接式通过检测电流产生的磁场来测量，本身带有电气隔离。间接式主要有三种：电流霍尔、磁通门和电流互感器。它们的工作原理、适用场合和成本各不相同，工程上需要根据实际需求选择。本文梳理这四种电流检测方案的技术特点和选型要点，为电流监测与限流保护电路的设计提供参考。

分流器

分流器是电流检测最直接的方式。在电流通路中串联一个已知阻值的电阻，电流流过时在其两端产生压降，通过测量这个压降即可得到电流值。分流器的优点是结构简单、线性度好、成本低，能够同时测量直流和交流，带宽可达 MHz 级别。它的主要缺点是没有电气隔离，大电流时电阻发热明显，需要在阻值和功耗之间折中。

分流器的选型需要关注三个基本方面。首先是封装尺寸，小封装对机械应力敏感，适当增大电阻体长度有助于吸收热膨胀、减轻焊点疲劳，在温度变化大的场合更可靠。其次是阻值选择，阻值过大会增加功耗和发热，阻值过小则检测信号太弱、容易被噪声淹没，需要根据电流量程和放大器输入范围来折中。最后是热性能，电阻的功率等级要留有余量，温度系数(TCR)直接影响不同温度下的测量精度，宽温工作的场合应选用 TCR 较低的类型。

电流霍尔检测

电流霍尔传感器利用霍尔效应来测量电流。当电流流过导体时会在周围产生磁场，霍尔元件将磁场强度转换为电压信号输出，从而间接测量电流。由于检测元件与载流导体之间通过磁场耦合，电流霍尔具备电气隔离能力，且能测量直流和交流各种波形。

根据工作方式的不同，电流霍尔分为开环式和闭环式两种。

开环电流霍尔的工作原理是“磁聚集-直接测量”。被测电流通过导线时产生的磁场，由高磁导率磁芯聚集并导向气隙中的霍尔元件。霍尔元件在恒定电流驱动下，输出与磁场强度成正比的霍尔电压，经放大调理后得到与电流成比例的输出信号。开环式结构简单，成本较低，体积小，适合对精度要求适中、成本敏感的通用监测场合。其精度一般在 $\pm 1\% \sim 2\%$ 左右，受磁芯非线性影响；带宽通常低于 50kHz，适合工频和常规频率的电流检测。

闭环电流霍尔在开环基础上引入了负反馈补偿机制。霍尔元件感测磁芯气隙中的磁场后输出电压信号，该信号经放大后驱动绕在磁芯上的补偿线圈产生反向磁场。当补偿磁场与被测电流产生的磁场大小相等、方向相反时，磁芯内净磁通为零，系统达到平衡状态。此时补偿电流精确正比于被测电流，比例关系由线圈匝数比决定。由于工作在零磁通状态，闭环式的精度显著提高，可达 $\pm 0.5\%$ 以下，线性度也更好；带宽超过 100kHz，响应速度达到亚微秒级，适合高频瞬态电流检测和高性能驱动系统。其代价是成本较高（约为开环的 2~3 倍），体积也稍大。

两种方案相比，开环式成本低、体积小，适合大批量、精度要求不高的通用场合；闭环式精度高、响应快，适合精密测量和严苛环境。选型时根据系统对精度、带宽、成本和安装空间的实际需求来确定。

磁通门电流传感器

磁通门传感器利用高磁导率磁芯在交变激励下的饱和特性来测量电流。传感器内部有一个绕有激励线圈的磁芯，激励信号使磁芯周期性地进入正、反饱和状态。当被测电流产生的磁场叠加在磁芯上时，会使两个方向的饱和时间不对称，通过检测这种不对称即可得到与被测电流成正比的输出。

磁通门传感器的突出优点是分辨率高、线性度好、温漂小，能够精确测量直流和小电流，典型精度可达 0.1% 甚至更高。由于磁芯工作在饱和状态，对外部杂散磁场也有较强的抑制能力。它的主要缺点是电路复杂、成本较高，带宽较窄（通常只有几 kHz），不适合高频或快速瞬态电流的测量。

磁通门传感器常用于需要高精度直流或低频电流测量的场合，例如漏电流检测、绝缘监测、电池管理系统中的微小电流

测量，以及实验室级电流基准等。

电流互感器

电流互感器基于变压器原理，初级绕组（或穿心导线）流过被测交流电流，在磁芯中产生交变磁通，次级绕组感应出比例电流。通过在次级接一个负载电阻，可以将电流信号转换为电压信号。

电流互感器的优点是结构简单、成本低、天然隔离，适合测量大电流交流信号，在电力系统和工业设备中应用广泛。它的局限性也很明显：无法测量直流或稳恒电流，低频响应差，而且磁芯存在饱和问题，当电流过大或含有直流分量时可能导致测量失真。

在实际使用中，电流互感器主要用于工频或中高频交流电流的监测，例如交流输入端的电流检测、电机相电流检测等。对于需要同时测量交流和直流的场合，则不能单独使用电流互感器。

四种检测方式的对比与选择

为了便于选型，将四种方案的关键特性汇总如下：

表 1.不同电流传感器对比

检测方式	测量类型	典型精度	带宽	适用场景
分流器	直流/交流	±0.1%~±1%	MHz 级	中小电流、高精度、低成本
电流霍尔（开环）	直流/交流	±1%~±2%	<50kHz	通用隔离测量，几十至几百安
电流霍尔（闭环）	直流/交流	±0.5%以下	>100kHz	高精度、宽频带、快速响应
磁通门	直流/低频	±0.1%以下	几 kHz	微小电流、漏电流、精密测量
电流互感器	仅交流	±0.5%~±1%	工频至中高频	大电流交流测量，如电网、电机

实际选型时，如果不需要隔离且电流不大，常使用分流器检测电流；需要隔离且电流在几十到几百安范围时，可以选择开环电流霍尔，对精度和响应速度有较高要求则可以选择闭环电流霍尔；如果需要测量测量漏电流这类微小直流或低频信号时，可以选择精度较高的磁通门传感器；如果需要测交流大电流，常使用电流互感器。