

# 用于磁流变液体阻尼器的可控电流放大器

刘泽西

(华中科技大学控制科学与工程系,湖北省武汉市 430074)

**摘 要:**磁流变液体是最有发展前途的智能材料之一,具有良好的电控性和广泛应用前景。可控电流放大器在磁流变液体应用中起着调节磁场强度的作用,它的性能影响磁流变液体的快速反应速度。文中提出一种可调 PWM (脉宽调制) 闭环控制电流放大器,元器件少,成本低廉,调节容易,控制方便。不仅适用于磁流变液体磁场控制,还可用于许多电机、照明、电动执行机构和电加热器场合。闭环控制电流放大器由 PWM 芯片 DRV103、闭环电流反馈电路和占空比信号电压线性变换 3 部分组成。给出了电路设计、调试方法和实验结果。

**关键词:** PWM; 闭环电流放大器; 磁流变液体

**中图分类号:** TN722.7

## 0 引 言

磁流变液体 (Magnetorheological Fluids) 是一种新型相变材料。它是一种由高磁导率、低磁滞性的微小 (微米甚至纳米级) 软磁性颗粒和非导磁体液体混合而成的磁性粒悬浮液<sup>[1]</sup>。当无磁场时,悬浮的微粒铁颗粒自由地随液体运动;当施加磁场时,这些悬浮的微粒铁颗粒被互相吸引,形成一串串链式结构从磁场一极到另一极,此时磁流变液体就在毫秒级的瞬间由牛顿流体变成塑性体或有一定屈服剪应力的粘弹性体。当改变磁场线圈中的电流从而获得不同强度的磁场,磁流变液的屈服剪应力也发生变化,即在强磁场作用下,抗剪切力很大,呈现出高粘度、低流动性的液体特性;在零磁场条件下呈现出低粘度的特性。其剪切屈服强度与磁场强度 (或电流大小) 具有稳定的对应关系。正是磁流变液的这种流变可控性使其能够实现阻尼力的连续可变,从而达到对振动的主动控制目的。

磁流变液体属于国际研究前沿技术,在车辆、机械、航空航天、舰船、建筑等领域具有广泛的应用前景。磁流变液体技术越来越多地应用到振动的主动控制和扭矩传递场合,像冲击吸收器、防振动变阻尼器、凯迪拉克汽车的悬挂系统、大型建筑工程的抗震隔离装置、离合器、柔性夹具、光学器件抛光等,甚至在医学领域,人工义肢也采用磁流变液体技术<sup>[1-3]</sup>。LORD 公司已经研制出了适用于 Rheonetic 系列磁流变器件的电流控制器 RD-3002。它可以工作在手动调节和外加电压控制调节两种方式下,能与计算机或 PLC 构成闭环控制系统。RD-3002 需要外加 12 V/2 A 的电源,输出电

流为 0~2 A,价格较贵<sup>[4]</sup>。文献 [5] 采用摩托罗拉公司 MC68HC908GP32 MCU 为核心设计了用于磁流变阻尼器的电流控制系统。文献 [6] 用美国 TEXAS 仪器公司推出的 16 位定点通用数字信号处理芯片为核心开发出精确可控的电流控制器。但这些研究与开发较为复杂,不能脱离计算机工作而且成本较高。在现场调试磁流变液体阻尼装置时尤为不便。

本文提出一种简便紧凑的可控 PWM (脉宽调制) 闭环电流放大器,具有精度高、线性度好、效率高、调试方便和成本低等特点,不仅可用于磁流变液体阻尼装置,也可用于任何电磁线圈电路、加热器或照明电路。

## 1 DRV 系列 PWM 驱动器结构

电磁线圈的电流控制方法通常有电压控制和电流控制两种。电压控制法是调节线圈的端电压来控制通过电磁线圈的电流;电流控制法是在全额电压下改变电磁线圈的电流大小。由于负载变化,例如线圈电阻由于温度而变化,仅调控电压会带来电流误差。磁场强度正比于电流大小,而且阻尼缸要求反应很快。假定一个负载电阻是 5  $\Omega$ ,某时刻该负载需要 1 A 电流,对于电压控制型放大器,此时需要负载电压控制为 5 V。对于电流控制型放大器,此时负载电压可能是 12 V 或更高,在一个信号脉冲输入的一瞬间,负载电流将超出 1 A,然后回复到 1 A。电流上升波形如图 1 所示。同样的线圈电流下,电流控制型放大器的电流上升时间明显小于电压控制型放大器的上升时间。这是由于全额电压下,电流型放大器能更快通过线圈,而且电流型放大器容易实现电流补偿。撤消信号脉冲后,两种类型的放大器波形基本重合,这是由于线圈放电成指数衰减的缘故。

收稿日期: 2006-10-31。

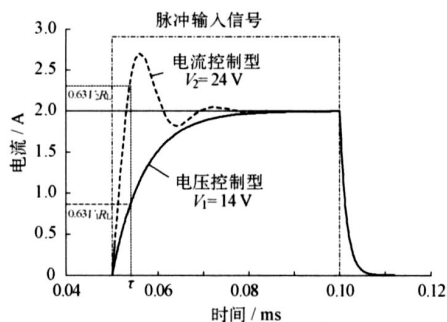


图 1 电流控制放大器与电压控制放大器的响应波形

传统的线性输出电源为电子系统提供了持续的电压;不过,这种供电方式工作在半导体器件线性区,将会造成大量的电能损耗。在采样控制理论中有一个重要结论:冲量相等而形状不同的窄脉冲加在具有惯性的环节上时,其效果基本相同。SPWM(正弦 PWM)法就是以该结论为理论基础,用脉冲宽度按正弦规律变化而与正弦波等效的 PWM 波形即 SPWM 波形控制逆变电路中开关器件的通断,使其输出的脉冲电压的面积与所希望输出的正弦波在相应区间内的面积相等,通过改变调制波的频率和幅值则可调节电路输出电压的频率和幅值或调节电路输出电流。PWM 采用数字输出方式驱动模拟电路,以获得最高的能源传输效率并节省功率并具有更高可靠性,可调控的 PWM 能够更精密地控制负载电流。

美国 TEXAS 仪器公司专为驱动继电器、电磁线圈、电动执行机构、加热器及照明优化设计生产了 PWM 集成芯片系列,DRV103 是其中之一,其尺寸为 5 mm × 6 mm,可调延时时间、可调振荡频率、可调占空比及价格低,使它广泛适用于各种场合。DRV103 有开关驱动和连续驱动两种工作方式。DRV103 能够设置为原始封闭模式,在这个模式下,能够自动地切换到省电方式。图 2 显示 DRV103 的简略框图及引脚。

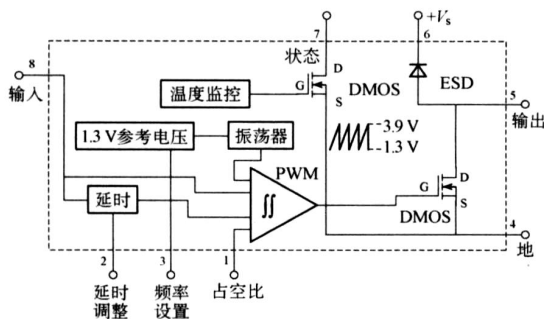


图 2 DRV103 原理框图

脚 1 连接到一个比较器和一个电流源 ( $= 2.75 I_{ref}$  而  $I_{ref} = 1.3V/R_{freq}$ )。脚 1 可通过一个电阻  $R_{PWM}$  接地,或连接一个模拟电压来调整占空比。这个模拟电压范

围在 1.3 V ~ 3.9 V 之间。当 PWM 频率设置在 25 kHz,  $R_{PWM}$  被取为 75 k 时,占空比为 10%;  $R_{PWM}$  被取为 200 k 时,占空比为 90%。若用模拟电压或 D/A 转换器时,模拟电压或 D/A 转换器必须能够提供灌电流能力 ( $= 2.75 I_{ref}$  而  $I_{ref} = 1.3V/R_{freq}$ )。

脚 2 是设置上电后 DRV103 从 DC (100% 占空比) 转到 PWM 模式的初始时间,即延时调节。它在内部连接到一个 3  $\mu$ A 的电流源和一个 2.6 V 阈值的比较器。当脚 2 上电压低于 2.6 V 时,DRV103 是 100% 占空比输出。当此脚悬空时,延时时间为 18  $\mu$ s。这是由内部寄生电容引起的。若有需要更少时间,它可以连接到 +5 V,延时时间可减少到 1  $\mu$ s。当脚 2 接上 10  $\mu$ F 电容时,延时时间可到 11  $\mu$ s。PWM 频率是通过脚 3 的接地电阻值设定。DRV103 内部振荡器的频率范围在 500 Hz ~ 100 kHz。但是在 500 Hz 下,外接电阻值将达到 10 M $\Omega$ 。脚 2 将成为高阻抗输入节点,会对电噪信号非常敏感。当 PWM 频率是 10 kHz、25 kHz 和 50 kHz 时外接电阻值分别为 523 k $\Omega$ 、205 k $\Omega$  和 100 k $\Omega$ 。

DRV103 通过一个功率 DMOS 管输出 3 A 驱动电流 (脚 5),足够驱动中小型电磁线圈。其导通电阻为 0.5  $\Omega$ ,确保低功耗。最高上升速率限制的栅极驱动能够减少 RFI/EMI 辐射噪声。当驱动电感负载时,DRV103 内部的钳位二极管 ESD 不能取代外部放电二极管。脚 7 是故障指示输出。当过电流或过热时,提供一个灌电流通道来驱动发光二极管,最大灌电流限制在 10 mA 之内。脚 8 是 TTL 电平兼容的输入端口,高于 1.7 V 时,DRV103 提供 PWM 输出;低于 1.7 V 时,DRV103 无 PWM 输出。脚 8 不能直接连接到电源上,否则会损坏 DRV103。脚 6 是电源,其范围是 +8 V ~ +32 V,它必须大于负载供电电压。

DRV103 电特性参数 (典型值) 如下:

输出电流 (脚 5) 1.5 A, SO-8 封装 (U);

输出电流 (脚 5) 3 A, 功率 PAD<sup>TM</sup> 封装 (H);

最大电流限制 (脚 5) 3.5 A, 超过此值,归零;

导通电阻 0.4  $\Omega$ ;

输出时饱和电压 +0.4 V,  $I_o = 1$  A;

数字控制输入 (脚 8) +2.2 V ~ +5.5 V (TTL 电平), 高电平使能;

恒定 DC 输出对 PWM 延时 (脚 2) 110 ms, 取决于外部电容;

占空比调节 (脚 1) 10% ~ 90%;

占空比精度  $\pm 2\%$ , 25 kHz, 50% 占空比;

非线性 1% FSR;

动态响应: 输出电压上升时间 0.2  $\mu$ s, 输出电压下

降时间  $0.2\ \mu\text{s}$ , 振荡频率范围  $0.5\ \text{kHz} \sim 100\ \text{kHz}$ ,  $R_{\text{osc}}$

$= 205\ \text{k}$ ,  $f = 25\ \text{kHz}$ ;

工作温度  $-55 \sim +125$  ;

温度保护  $+160$  ,  $+140$  时恢复;

故障输出 (脚 7)  $5\ \text{V}$ ,  $20\ \text{k}$  上拉到  $+5\ \text{V}$ ;

故障输出灌电流  $2\ \text{mA}$ ;

电源供给范围 (脚 6)  $+8\ \text{V} \sim +32\ \text{V}$ 。

注: 输出电流被 DRV103 功率耗散所限。当达到输出电流上限, 输出电流将被置为 0。恒定 DC 输出对 PWM 延时  $= 1.1 C_D \times 10^6$  ( $C_D$  单位为 F)。功率 PAD<sup>TM</sup> SO-8 (H) 封装在散热片下长期最大工作电流为  $2\ \text{A}$ 。

图 3 展示了 PWM 控制电压与占空比的关系。

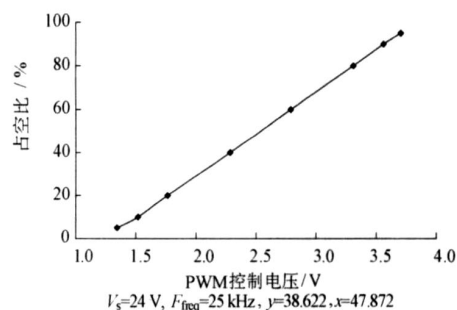


图 3 PWM 控制电压与占空比的关系

## 2 磁流变液体可控电流放大器

利用 DRV103 开发出的磁流变液体可控电流放大器电路如图 4 所示。

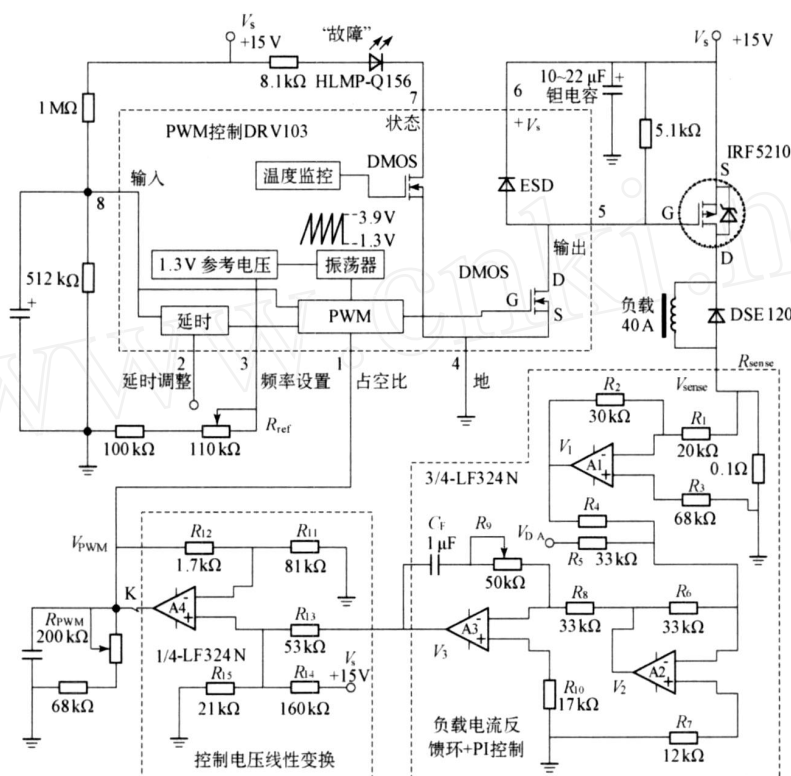


图 4 可控 PWM 电流放大器电路

可控电流放大器由 PWM 控制 DRV103、负载电流反馈环节、占空比电压信号线性变换 3 部分组成。由于在磁流变液体研究中需要大电流进行多种性能实验, 特地在 DRV103 输出增加一级电流驱动, 使之最大驱动电流能够达到  $40\ \text{A}$ 。这级驱动采用 International Rectifier 公司生产的 HEXFET 功率 MOSFET 管 RF5210, 其最大工作电流为  $40\ \text{A}$ , 反向电压为  $100\ \text{V}$ , 导通电阻为  $0.06$ 。若需要更大的输出电流, 可采用 RF4905, 其最大工作电流为  $74\ \text{A}$ , 反向电压为  $55\ \text{V}$ , 导通电阻为  $0.02$ 。快速恢复外延二极管 DSE120 为电磁线圈放电提供快速通道, 保护 MOSFET 管

RF5210。PWM 振荡频率可调, 当该电阻  $R_{\text{ref}}$  调到  $205\ \text{k}$  时, 振荡频率设置在  $25\ \text{kHz}$ , 该电阻  $R_{\text{ref}}$  调到  $100\ \text{k}$  时, 振荡频率设置在  $50\ \text{kHz}$ 。但是, 若振荡频率设置在  $50\ \text{kHz}$ , 占空比调节将会发生变化, 不再是图 3 所示曲线。上电后系统自动地工作 (自动使能), 无须另加控制信号。

当温度变化引起负载电阻值改变会带来电流不稳定, 进而影响磁流变液体阻尼效果。磁流变液体可控电流放大器可设计成电流反馈控制型, 如图 5 所示。即在负载上串联一个采样电阻  $R_{\text{sense}}$ , 取出电流信号, 输入一个负反馈放大器 A1, 取出电压  $V_1$ :

$$V_1 = -\frac{R_2}{R_1} V_{\text{sense}} \quad (1)$$

经过误差比较放大器 A2, 当  $R_4 = R_5 = R_6$  时, 有误差输出电压  $V_2$ :

$$V_2 = -\left( V_{D/A} - \frac{R_2}{R_1} V_{\text{sense}} \right) \quad (2)$$

经过 P 运算, 其输出  $V_3$  为:

$$V_3 = -\left( \frac{R_9}{R_8} V_2 + \frac{1}{R_8 C_F} V_2 dt \right) \quad (3)$$

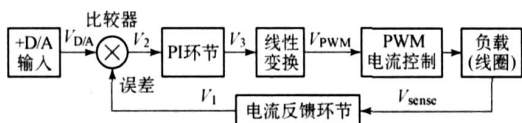


图 5 电流负反馈型 P 控制器框图

在一个确定不变的 D/A 输入信号下, 若负载电流由于温度而变大, 则  $V_{\text{sense}}$  变大, 根据式 (3),  $V_3$  将变小, 占空比减小, 导致输出电流减小从而抵消负载电流的增大, 维持负载电流稳定。若考虑到当大电流时, 采样电阻功耗太大, 发热严重, 可取消电流反馈回路。

考虑到许多新的 D/A 转换器不具有灌电流能力, 而且 D/A 的输出通常是  $0\text{ V} \sim +10\text{ V}$ , 若直接将 D/A 接入脚 1, 将会出现大的死区, 除非在软件编程上做分隔。为了方便使用, 需要对占空比输入控制电压作一线性变换。根据图 3, 设 PWM 调节方程为:

$$y_1 = a_1 x_1 + b_1 \quad (4)$$

D/A 转换器输出方程为:

$$y_2 = a_2 x_2 + b_2 \quad (5)$$

考虑同样的输出效果,  $y_1 = y_2$ , 则可求出两个输入之间的关系:

$$x_1 = \frac{a_2}{a_1} x_2 + \left( \frac{b_2 - b_1}{a_1} \right) \quad (6)$$

式中:  $a_2/a_1$  是在新坐标系中的缩小和旋转因子;  $(b_2 - b_1)/a_1$  是在新坐标系中的平移因子。

为了实现这个线性变换, 采用高速单电源四运放 LF324N (A4) 作为电压输入信号变换适配器。根据下式适当选择外围电阻参数<sup>[7]</sup>:

$$V_{\text{PWM}} = \frac{R_{11} + R_{12}}{R_{11}} \left[ \frac{R_{14} R_{15}}{R_{13} (R_{14} + R_{15}) + R_{14} R_{15}} V_s + \frac{R_{13} R_{15}}{R_{14} (R_{13} + R_{15}) + R_{13} R_{15}} V_3 \right] \quad (7)$$

当 D/A 输出为  $0\text{ V}$  时, 运算放大器 A4 输出为  $1.3\text{ V}$ ; 当 D/A 输出为  $10\text{ V}$  时, A4 输出为  $3.9\text{ V}$ , 正好在占空比调节范围。 $100\text{ pF}$  电容是为了改善大电流在快速开关时的波形而并接在占空比调节电阻上。 $200\text{ k}$  电位器可以手动调节系统输出, 无需连接计算

机或 D/A, 手动调节时须断开开关  $K_0$ 。

采用本电流放大器驱动电磁铁 OP2025 (其内阻为  $3.5\ \Omega$ ), GM04 高斯表用来测量电磁铁 OP2025 的磁场强度, D/A 输出电压与输出电流及磁场强度的关系测量结果如图 6 所示, 其线性回归误差为  $\pm 1\%$ , 当 D/A 输出为  $10\text{ V}$  时, 占空比为  $100\%$ , 功率场效应管全开通, 电源电压加在负载上, 显示出良好控制效果。

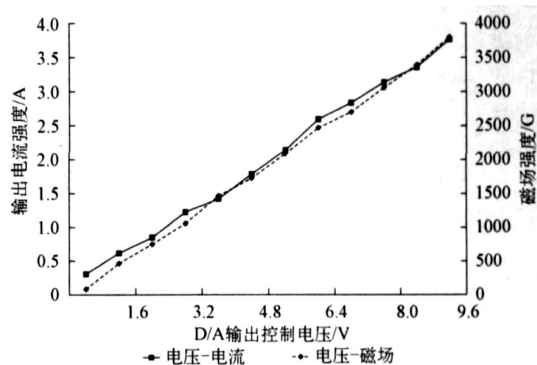


图 6 D/A 输出电压与输出电流及磁场强度的关系

图 7 给出不同电流 (磁场) 强度下用粘度仪测量自制磁流变液体的机械特性。当在  $3.6\text{ A}$  电流下, 磁流变液体的粘度比无电流时增加至少 2 个数量级。

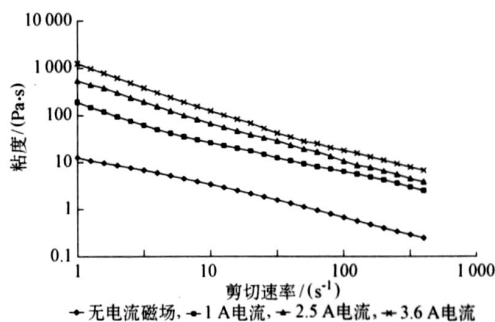


图 7 不同输出电流 (磁场) 强度下磁流变液体的特性

### 3 结束语

磁流变液体可控电流放大器能够线性地改变磁场强度, 实现变阻尼工作。该可控电流放大器由高度集成的 PWM 芯片构成。在全额电压下, 电磁线圈能够快速响应电流变化, 即变阻尼缸能迅速提供不同阻尼。这个特性应用在高速运动的对象时尤为重要。可控电流放大器体积小、成本极低, 不仅可用于磁流变液体, 还满足许多场合的特殊要求。整个系统能脱离计算机而独自工作, 各种参数方便设置及可调。采用电流闭环补偿温度漂移, 系统能长期稳定工作, 控制效果好。实验曲线及结果给出 D/A 控制电压与磁场强度的关系, 显示出很好的控制效果。

## 参 考 文 献

- [1] STANWAY R. Smart fluids: current and future developments [J]. Materials Science and Technology, 2004, 20(8): 931-939.
- [2] 张琳. 磁流变技术在气动控制中的工程应用 [J]. 液压与气动, 2005(6): 31-34.
- [3] 陈爱军, 廖昌荣, 余森, 等. 电磁流变液流变特性测试技术的研究进展 [J]. 机械工程材料, 2005, 29(1): 1-3.
- [4] Lord Corporation Product Brochure & Technical Report[R], 2004.
- [5] 陈军, 萧蕴诗, 岳继光, 等. 基于 M68HC08 的磁流变阻尼器控制系统设计 [J]. 微计算机信息 (测控仪表自动化), 2004(1): 25-26.
- [6] 余森, 李传兵, 廖昌荣, 等. 基于 DSP 的磁流变阻尼器的控制方法 [J]. 半导体技术, 2001, 26(9): 63-66, 72.
- [7] 蔡锦福. 运算放大器原理与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.

刘泽西 (1984-), 男, 美国坦普尔大学博士研究生, 主要研究方向为自动化检测与控制。

## Controllable Current Amplifier for Magnetorheological Damper

L IU Zexi

(Department of Control Science and Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Magnetorheological fluids have become known as “smart fluids” or intelligent materials. They have well-controlled properties and a great applicative expectation. This paper mainly focuses on the current amplifier, which is one of the important parts in any MR application system. The current amplifier consists of 3 parts: a PWM IC chip DRV103, a closed-loop current control circuit and a linear transform circuit of the duty cycle adjust voltage. The current amplifier has a few components. It is low in cost and easy to adjust. The paper describes the functions of the PWM IC chip and how to use it. The detailed circuitry of the current amplifier is explained and experimental results are discussed.

**Keywords:** pulse width modulation; current amplifier; magnetorheological fluids

(上接第 3 页)

## 参 考 文 献

- [1] 林冒禄. 天线测量技术 [M]. 成都: 成都电讯工程学院出版社, 1981: 86-88.
- [2] 丁志刚, 李刚民. 单片微型计算机原理与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1990: 37-38.
- [3] 杨适. 线性集成电路器件及应用手册 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1990: 67-68.
- [4] 王幸之, 王雷. 单片机应用系统抗干扰技术 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000: 57-59.

问 建 (1980-), 男, 工程师, 从事电磁兼容技术研究。

## Design on Antenna Pattern Automatic Measurement

WEN Jian, HOUM insheng

(Beijing Aeronautical Technology Research Center, Beijing 100076, China)

**Abstract:** The antenna pattern is an important performance parameter of radar, and its automatic measurement is possessed of an important position in radar performance measurement. The principle of antenna pattern automatic measurement is introduced, and an automatic measurement system of radar antenna pattern is designed. The circuit and principle of signal sample and data processing are analyzed. The control circuit is composed of single chip microcomputers, and angle-digital converter is adopted. The system whose signal extraction, angle extraction, data processing and pattern plotting are automatic has the quality of high accuracy, high testing velocity, high reliability and low price. The hardware of this system and the principle of signal extraction and data processing are analyzed.

**Keywords:** radar; antenna pattern; automatic measurement; single chip microcomputer