

# 一种电压控制 CMOS 电调谐第二代电流传输器(ECCII)

李沁莲, 陈向东, 王丽娜, 梁建

(西南交通大学 信息科学与技术学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 提出了一种电压跟随能力强、功耗低、调节范围大的 CMOS 电调谐第二代电流传输器(ECCII), 通过引入对称的 CMOS 电流舵电路, 保证了电流传输精度, 电流增益连续可调, 调节因子  $-2 \leq K \leq 2$ , 同时避免了电流镜的过多使用, 减小了电流损耗. 采用电压调控方式, 增大了电流输入范围; 将电流输入端和电流加减电路隔离, 保证了精确的电压跟随能力. 采用 TSMC 0.35  $\mu\text{m}$  工艺参数, 在  $\pm 1.5\text{V}$  电源供电的条件下对电路进行了 Hspice 模拟,  $V_Y/V_X$  和  $I_Z/I_X$  的  $-3\text{ dB}$  带宽分别为 83.5 MHz 和 136 MHz, 功耗为 1.751 5 mW. 该电路在可调谐连续时间电流模式滤波器的设计中有广泛的应用前景.

**关键词:** 电流舵; CMOS 电调谐第二代电流传输器(ECCII); 电流模式滤波器

**中图分类号:** TN432; TN722.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-7180(2011)06-0062-05

## A Voltage-Controlled CMOS Electronically Tunable Second Generation Current Conveyor (ECCII)

LI Qin-lian, CHEN Xiang-dong, WANG Li-na, LIANG Jian

(School of Information Science & Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** A Voltage-Controlled double output CMOS electronically tunable second generation current conveyor (ECCII) with strong voltage following ability, high precision and low power dissipation was presented. The introduction of the balanced configuration of differential pairs used as current steering elements insure the current transfer accuracy and also make the current gain of the proposed ECCII can be controlled electronically by adjusting the gain control voltage of the ECCII with a current gain between  $-2$  and  $2$ ; the using of the current steering elements also reduces the current consumption by avoiding excessive use of current mirror; the voltage control mode increases the current input range; the isolation of current input terminal from current plus/minus circuits ensure accurate voltage following ability. Using CSMC 0.35  $\mu\text{m}$  CMOS process model, the HSPICE simulation results show that  $V_Y/V_X$  and  $I_Z/I_X$  have  $-3\text{ dB}$  bandwidth of 83.5 MHz and 136 MHz for the proposed ECCII respectively, the proposed circuit power consumption is 1.751 5 mW. The ECCII has comprehensive applications in the tunable current mode continuous time filters.

**Key words:** current steering; CMOS electronically tunable second generation current conveyor (ECCII); current mode continuous time filters

### 1 引言

近年来,在模拟电路设计中,由于电流模式电路在速度、带宽和精度方面的优势而受到越来越广泛的关注.同时,电流模式电路在数学运算电路,如加、减、乘电路中也优于电压模式电路.一种著名的

电流模式电路是第二代电流传输器(CCII)<sup>[1]</sup>. CCII 作为最有用的有源积木块被广泛用于滤波器的设计<sup>[2]</sup>.但是由于许多应用要求滤波器具有可调的性能参数,这就使得固定电流增益的 CCII 不能满足要求.因此可变电流增益电流传输器受到更多的关注.一些文献提出了基于电流平方电路的 ECCII,通过

改变电流比调节增益<sup>[3-5]</sup>,严重限制了输入电流的范围,影响低增益电流的传输精度,且其增益范围是单极性的;电流输出端和电流加减电路直接相连,严重影响了电压跟随能力.本文提出了一种增益调节范围宽、功耗低、电压跟随能力强的 ECCII.

## 2 电路结构描述与分析

### 2.1 电调谐第二代电流传输器(ECCII)

理想情况下,ECCII 的电路符号如图 1 所示,其端口电流、电压的关系如下矩阵方程所示.

$$\begin{bmatrix} i_y \\ v_x \\ i_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm k & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ i_x \\ v_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

由式(1)可知,ECCII 的 X 端电压跟随 Y 端电压;Z 端电流以倍数  $\pm k$  随 X 端电流变化,且可被电调谐.

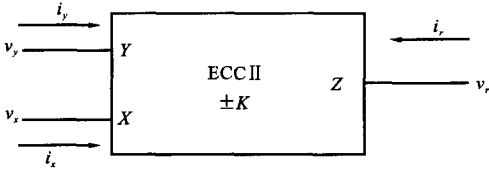


图 1 ECCII 的电路符号

### 2.2 电流舵增益可调电流镜

本文引入了一个电流舵增益可调电流镜<sup>[6]</sup>,如图 2 所示.

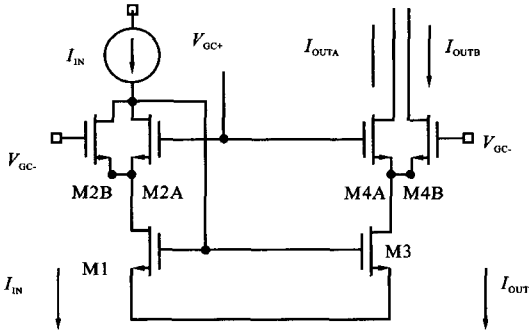


图 2 电流舵电路

通过将普通的低压共源共栅电流镜的部分晶体管拆分成相互匹配的晶体管对 M2A, M2B 和 M4A, M4B, 从而在电流镜的输入和输出端形成差分对,就变成了增益可调电流镜.通过将控制电压  $V_{GC+}$  和  $V_{GC-}$  加在两个差分对的输入端就可实现电流增益的调制.这使得两个差分对的源端(即 M1 和 M3 的漏端)都有相同的共模电压,即 M1 和 M3 的漏源电压相等.由于 M1 和 M3 有相同的栅源电压和漏源电压,拆分晶体管后的电流镜仍然是一个精确的电流镜,有  $I_{OUT} = I_{IN}$ .  $I_{OUT}$  通过 M4A 和 M4B

分成  $I_{OUTA}$  和  $I_{OUTB}$ . 电流的分配由差分对的输入电压  $V_{GC+}$  和  $V_{GC-}$  控制.当  $V_{GC+} = V_{GC-}$  时,输出电流平均拆分:  $I_{OUTA} = I_{OUTB} = I_{IN}/2$ . 当  $V_{GC+} - V_{GC-} > V_{DSatM4}$  时,电流都流入 M4A:  $I_{OUTA} = I_{OUT}$ ,  $I_{OUTB} = 0$ . 可见图 2 是一个增益连续可调电流镜,电流增益  $0 \leq A_I \leq 1$ . 这就是电流舵增益可调电流镜(CSPCM).

### 2.3 电调谐第二代电流传输器

本文提出了一种基于电流舵增益可调电流镜的电调谐第二代电流传输器(ECCII),如图 3 所示.

电路由三个模块组成,CCII、电流加减电路和电流放大电路.

i 中所示为 CCII<sup>[7]</sup>,互补连接的两个差分对用来在 Y 端和 X 端提供轨对轨的作用,晶体管 M1、M2 将共模电平范围提高到正的电源电压, M3、M4 将信号摆幅延伸到负电源电压.通过由 M5、M6、M7 和 M8 所构成的电流镜的作用,可以将差分管中的电流集中到 M1 和 M2 的漏端.晶体管 M9、M10 迫使这些电流相等,从而有  $V_x = V_y$ . 电路采用 AB 类输出的晶体管 M15、M16 来提供必要的缓冲作用,同时也具备轨对轨的摆幅能力.利用 M17、M25 和 M18、M24 分别对 M15、M16 的简单电流复制.电压负反馈降低了电流输入端(X 端)的阻抗.

$$Z_X \approx \frac{1}{(g_{M2} + g_{M4})g_{M14}(r_{ds9} // r_{ds6} // r_{ds1})} \quad (2)$$

ii 中是电流加减电路,产生电流放大电路需要的输入信号  $I_B + I_X$  和  $I_B - I_X$ ,  $I_{B2} = I_{B1} = I_B$ ,其余的管子和电流源构成电流放大电路.

iii 是电流放大电路,它由两个匹配的电流舵增益可调电流镜(M46—M57)和两个共源共栅电流镜(M38—M45)构成,两个电流舵增益可调电流镜分别对输入电流  $I_B + I_X$  和  $I_B - I_X$  进行拆分,由于两个电流舵增益可调电流镜的控制电压是一样的,故其对电流的拆分比例也是一样的,易知:

$$I_{M47} = A_I I_{IN1} = (1 - A_I)(I_B + I_X) \quad (3)$$

$$I_{M43} = A_I(I_B + I_X) \quad (4)$$

$$I_{M55} = A_I(I_B - I_X) \quad (5)$$

$$I_{M44} = (1 - A_I)(I_B - I_X) \quad (6)$$

故有

$$I_Z = I_{M44} + I_{M43} - I_{M55} - I_{M47} = (4A_I - 2)I_X \quad (7)$$

其中  $A_I = K'(V_{IN})$ , 且  $0 \leq A_I \leq 1$ ,  $I_B \geq I_X$ .

共源共栅电流镜使得 Z 端的输出阻抗能够满足应用的要求,由于 MOS 管的宽长比对称设置,故有

$$Z_Z \approx \frac{1}{2}(g_{M43}r_{ds43}r_{ds40})(g_{M55}r_{ds55}(1/g_{M54})) \quad (8)$$

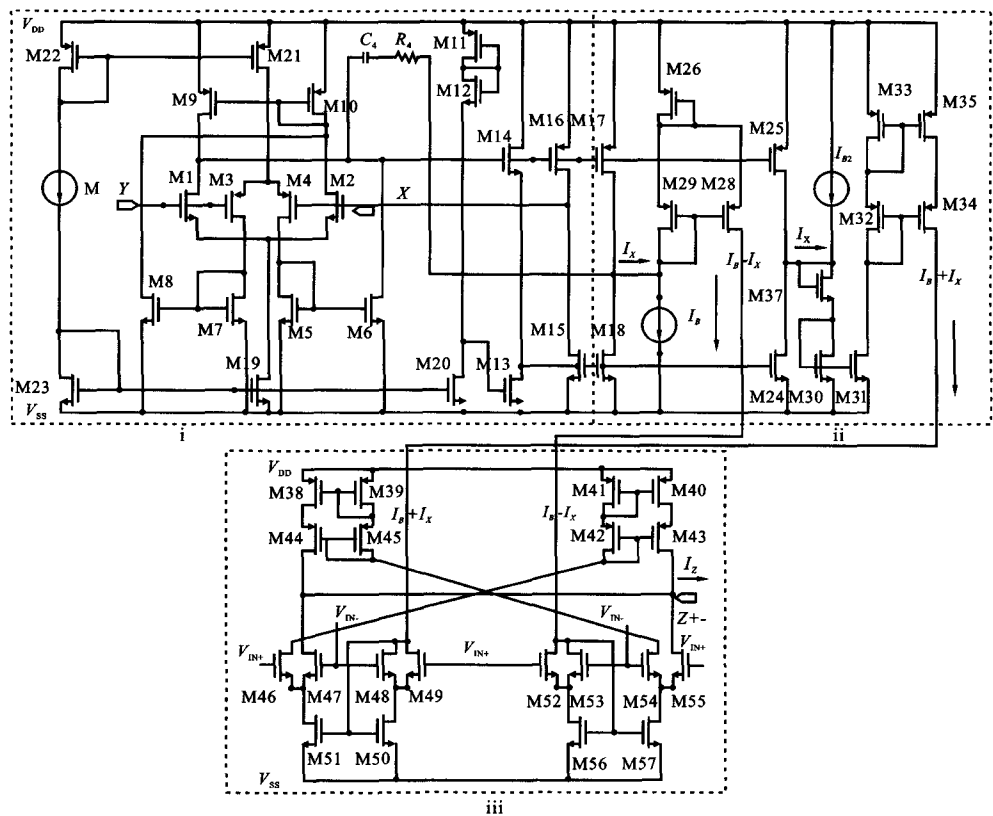


图 3 本文提出的 ECCII

由于本文采用加减电路的输入电流与电流输入端(X 端)隔离的方式, 后级电路不会影响 X 端的电压跟随能力, 电路在整个电源电压的范围内具有良好的跟随能力.

文献[3-5]通过控制电流  $I_A$  调节电流增益(增益为  $I_Z = \frac{I_B}{I_A}I_X$ ), 电路的固有弊端使其输入电流必须满足  $|I_B| + |I_X| \leq 2I_A$ , 电流镜的单向传输特性使得必须同时满足  $I_B \geq I_X$ , 这就严重限制了输入电流的范围, 降低了低增益区的电流传输精度. 由于本文中电路采用电压控制电流增益, 只需满足  $I_B \geq I_X$  即可, 输入电流范围较宽.

3 仿真结果与分析

为了证实电路的性能, 对上述提出的 ECCII 的电路进行了 HSPICE 模拟仿真. 仿真模型采用 TSMC 0.35μm CMOS 工艺参数, 图 3 中各 MOS 管的尺寸如表 1 所示.  $V_{DD} = -V_{SS} = 1.5\text{ V}$ , 偏置电流  $I_1 = 6\text{ }\mu\text{A}$ ,  $I_B = 50\text{ }\mu\text{A}$ . 电路的静态功耗为 1.751 5 mW.

将 Z 端接地, X 端接阻抗 1 MΩ, 对 Y 端在 -1.5 V 到 +1.5 V 的范围内进行直流扫描得到图

4 所示的 X 端对 Y 端的直流电压跟随特性曲线. 从图中可以看出, 在 -1.5 V 到 +1.5 V 的范围内, X 端对 Y 端具有良好的跟随能力. X 对 Y 端的小信号电压增益幅频特性如图 5 所示, 其 -3 dB 带宽为 83.5 MHz.

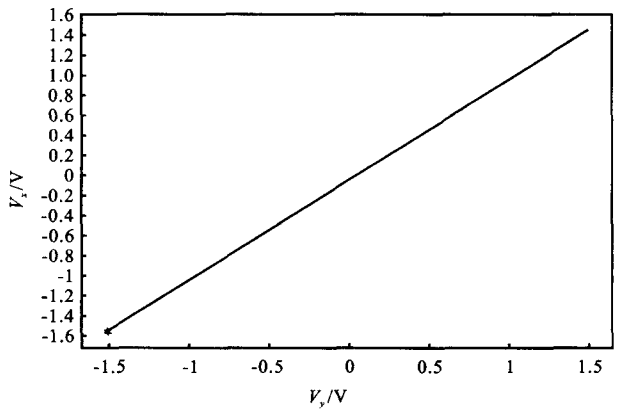


图 4 X 端对 Y 端的直流电压跟随特性

图 6 是使输出电流分别放大 2、3/2、1、1/2、-2、-3/2、-1 和 -1/2 倍时的直流传输特性曲线, 图 7 是放大 2、3/2、1 和 1/2 倍的幅频特性曲线, 其中单位增益时, -3 dB 带宽为 136 MHz.

将 Y 端接地, 从 -50 μA 到 50 μA 对 X 端进行

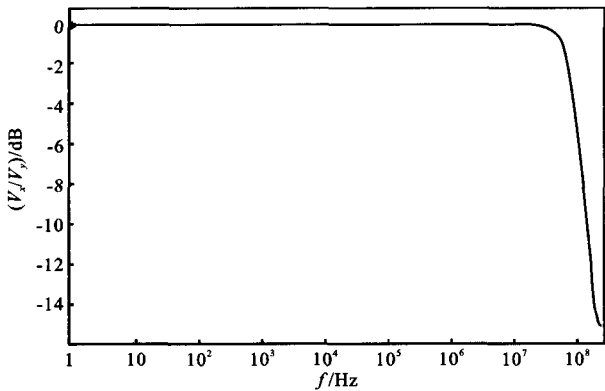


图 5 X 端对 Y 端的小信号电压增益幅频特性

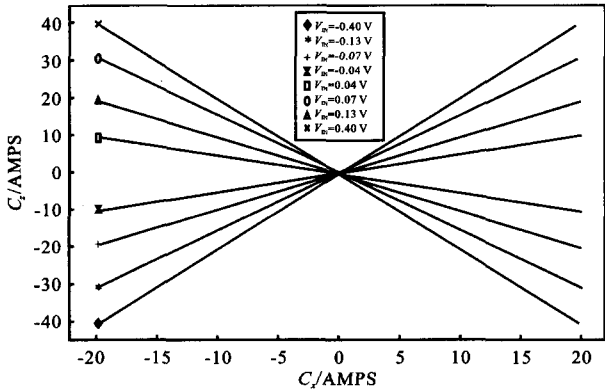


图 6 Z 端对 X 端的直流传输特性

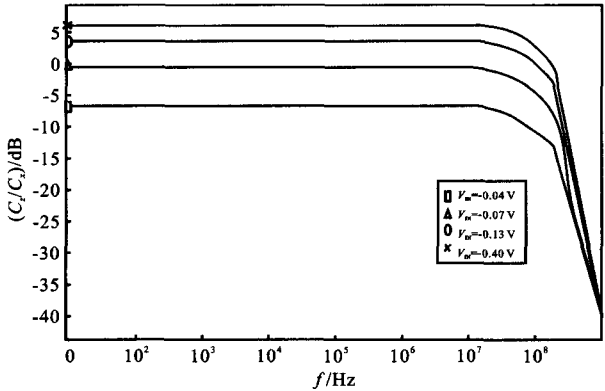


图 7 Z 端对 X 端的交流幅频特性

直流扫描,X 端的输入电阻不高于 22.852 9 Ω,电  
流输出端 Z 端的输出阻抗不低于 197.833 6 kΩ.Y  
端的阻抗为 1e20Ω.

4 应用

参照文献[3]中的结构,如图 8 所示,利用本文  
提出的 ECCII 搭建了一个滤波器,并仿出了低通和  
高通曲线,如图 9 所示.由结构图可知:

$$\frac{I_{lp}}{I_{in}} = \frac{\frac{k_1 k_2}{C_1 C_2 R_1 R_2}}{S^2 + \frac{1}{C_1 R_1} S + \frac{k_1 k_2}{C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad (9)$$

$$\frac{I_{hp}}{I_{in}} = \frac{S^2}{\frac{1}{C_1 R_1} S + \frac{k_1 k_2}{C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad (10)$$

式中, $k_i$  是 ECCII 的电流增益,低通和高通滤波器的  
增益分别为 $(k_3/k_2)$ 和 1.极点角频率 $\omega_0$ 和品质因子  
Q 的表达式如下:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_1 k_2}{C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad Q = \sqrt{\frac{k_1 k_2 C_1 R_1}{C_2 R_2}} \quad (11)$$

由以上分析可知,可以在不改变 $\omega_0$ 和 Q 的情况  
下,通过调节  $k_3$  来改变低通滤波器的增益.

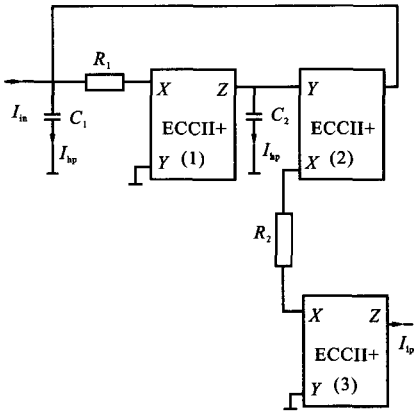


图 8 基于 ECCII 的滤波器的结构图

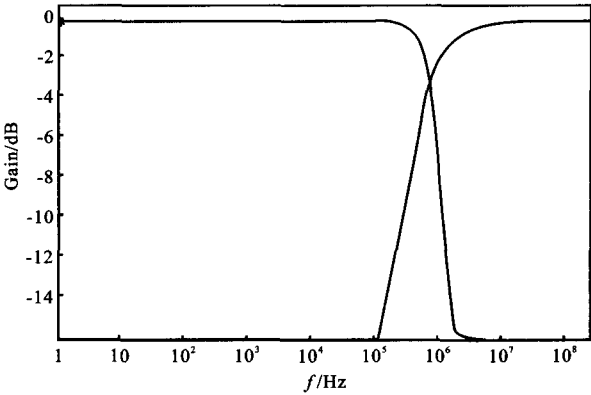


图 9 基于 ECCII 的滤波器的低通和高通曲线

表 1 MOS 管的尺寸

| MOS 管       | 尺寸/ $\mu\text{m}$ | MOS 管                        | 尺寸/ $\mu\text{m}$ |
|-------------|-------------------|------------------------------|-------------------|
| M5~M10,M14  | 1.4/0.7           | M1~M4                        | 10.5/0.7          |
| M11~M12     | 14/1.4            | M26                          | 140/0.7           |
| M13         | 2.1/0.7           | M28~M29                      | 56/1.4            |
| M15,M18,M24 | 31.5/1.4          | M32~M35                      | 35/0.7            |
| M16,M17,M25 | 70/1.4            | M37                          | 3.5/0.7           |
| M19,M20,M23 | 0.7/0.7           | M38~M45                      | 112/0.35          |
| M21,M22     | 1.75/0.7          | M46~M54,M52~M54              | 28/0.7            |
|             |                   | M30, M31M50, M51,<br>M56,M57 | 28/1.4            |

## 5 结束语

文中提出了一种电压跟随能力强、低功耗、调节范围大的电压控制 CMOS 电调谐第二代电流传输器(ECCII),通过引入对称的 CMOS 电流舵电路,保证了电流传输精度,电流增益连续可调,调节因子 $2 \leq K \leq 2$ ,同时避免了电流镜的过多使用,减小了电流损耗.采用电压调控方式,增大了电流输入范围.将电流输入端和电流加减电路隔离,保证了精确的电压跟随能力.采用 TSMC 0.35  $\mu\text{m}$  工艺参数,在 $\pm 1.5\text{ V}$ 电源供电的条件下对电路进行了 Hspice 模拟, $V_Y/V_X$ 和 $I_Z/I_X$ 的 $-3\text{ dB}$ 带宽分别为 $83.5\text{ MHz}$ 和 $136\text{ MHz}$ ,功耗为 $1.7515\text{ mW}$ . $X$ 端的输入电阻不高于 $22.8529$ ,电流输出端 $Z$ 端的输出阻抗不低于 $197.8336\text{ k}\Omega$ , $Y$ 端的阻抗为 $1\text{e}20\Omega$ .通过验证,该电路可用于可调谐连续时间电流模式滤波器的设计.

## 参考文献:

- [1] Shahram Minaei, Onur Korhan Sayin, Hakan Kuntman. A new CMOS electronically tunable current conveyer and its application to current-mode filters[J]. Kuntman IEEE Trans Circuits Syst, 2006, 53(7): 1448-1456.
- [2] Abuelmaattim T, Bentrucia A, Alshahrani SM. A novel mixed mode current conveyor based filter[J]. International Journal of Electronics, 2004, 91(3): 191-197.

- [3] Shahra Minaei, Onur Korhan Sayin, Hakan Kuntman. A new CMOS electronically tunable current conveyer and its application to current-mode filters[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2006, 53(7): 1448-1457.
- [4] Surakamponporn W, Kumwachara K. CMOS based electronically tunable current conveyer[J]. Electronic Letters, 1992, 28(14): 1316-1317.
- [5] 宋树详, 严国萍. 一种新型 CMOS 电调谐第二代电流传输器(ECCII)[J]. 半导体技术, 2007, 32(12): 1077-1080.
- [6] Jaime RamirezAngulo, Garimella Sri Raga Sudha, Garvajal R G, et al. New gain programmable current mirrors based on current steering[J]. IEEE Trans Circuits Syst, 2006, 2(49): 162-165.
- [7] 彭建华, 陈向东, 杜广涛. 一种轨对轨输入的低压低功耗 CMOS 电流传输器[J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(11): 72-76.

## 作者简介:

李沁莲 女, (1985—), 硕士研究生. 研究方向为低压低功耗 CMOS 模拟集成电路设计.

陈向东 男, (1967—), 教授, 博导. 研究方向为微电子技术、信息获取技术及新型传感器.

王丽娜 女, (1986—), 硕士研究生. 研究方向为低压低功耗 CMOS 模拟集成电路设计.

梁建 男, (1985—), 硕士研究生. 研究方向为低压低功耗 CMOS 模拟集成电路设计.

(上接第 61 页)

- [5] IETF RFC 3720, Internet small compute system interface (iSCSI)[S]. IETF, 2003.

## 作者简介:

田龙 男, (1984—), 硕士研究生. 研究方向为软件工程与

网络软件.

张延园 男, (1954—), 教授. 研究方向为网络存储、软件工程.

张晓 男, (1978—), 副教授. 研究方向为网络存储.