DOI: 10.3724/SP.J.1187.2013.00992

增量位移集成光电传感器设计*

刘 阳 吴宏圣 杨 帆 许家林
(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

摘 要: 为了提高处理增量位移信息的集成光电传感器输出信号的有效精度,降低输出阻抗,以保证光电传感器的性能。基于 0.35 μm CMOS 工艺,采用 Cadence 设计了 1 款用于处理增量位移信号的光电传感器,并对关键参数进行了理论推导以及验证。实验结果表明,该光电传感器输出信号有效精度优于 10 bit,输出阻抗低于 5 Ω,各项性能指标均符合行业标准,并且能够稳定地运行。

关键词: 增量位移; 光电传感器; 有效精度; 输出阻抗
中图分类号: TN492 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.3030

Design of the incremental displacement integrated photoelectricity sensor

Liu Yang Wu Hongsheng Yang Fan Xu Jialin
(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to improve the output signal effective precision of the integrated photoelectric sensor that processes the incremental displacement information, reducing output impedance, and ensuring the performance of photoelectric sensor. A photoelectric sensor for processing incremental displacement signal based on 0.35 μm CMOS technology with Cadence is designed, and the key parameters are analyzed theoretically. The experimental results show that the photoelectric sensor output signal effective precision is more than 10 bit, the output impedance is less than 5 Ω, the performance meet industry standards and can run stably.

Keywords: incremental displacement; photoelectric sensor; effective precision; output impedance

1 引 言

随着高精密高速测量设备的广泛应用,位移传感器成为了必不可少的核心元件。所设计的用于处理增量位移信号的集成光电传感器就是其中重要的一种,其具有体积小、集成度高、非机械接触、响应速率快等优点,是光栅位移测量装置的核心部件之一,成为行业的关注焦点[1-2]。

目前国外的光栅尺生产厂家主要有: 德国 HEIDENHAIN、西班牙 FAGOR 以及日本 MITUTOYO,其中德国 HEIDENHAIN 的市场份额最大,其绝对式光栅尺的分辨率达到 0.01 μm,而西班牙 FAGOR 以及日本 MITUTOYO 的绝对式光栅尺的分辨率达到 0.05 μm。国内主要的光栅尺生产厂家主要有: 长春禹衡、深圳万濠、广州诺信以及苏州怡信等,国内的光栅尺厂商主要生产的是编码器以及增量式光栅尺,而国内自主研发绝对式光栅尺一直处在空白阶段。因此,设计 1 款绝对式光栅尺是十分必要的。而本研究所设计的用于处理增量位移信号的集成光电传感器正是该绝对式光栅尺的核心部分之一,本设计最大的优势是将高响应率的 PIN 光电二极管探测器阵列与后续的采用半导体工艺集成在一块硅片上,这样可以降低系统体积,提高光栅尺速度以及加速度等指标,并且失效率大大降低。另外一个优势是,可以将传统的四场扫描的方式改进为单场扫描的方式,提高的信号质量以

收稿日期: 2013-04 Received Date: 2013-04
* 基金项目: 国家科技重大专项(2013ZX04007021); 吉林省光电子产业孵化专项资金项目(FH0022)

及抗污染能力。

基于 0.35 μm CMOS 工艺，采用 Cadence 软件设计了 1 款用于处理增量位移信号的集成光电传感器[3-4]，对影响增量位移信息的参数如有效精度、输出阻抗以及稳定性进行了分析与设计[5-7]。从噪声 NOISE 角度来设计保证了本集成光电传感器输出信号的有效精度高于 10 bit，输出阻抗低于 5 Ω，并且保证了本集成光电传感器高速稳定地响应，结果表明本设计的集成光电传感器是 1 款综合性能良好的芯片。

2　增量位移集成光电传感器介绍

所设计的用于处理增量位移信号的集成光电传感器的结构图[8-9]，主要包括 3 个部分：4 组结构相同的光电二极管（PD_1、PD_2、PD_3 和 PD_4）、4 组结构相同的电流转电压放大器（OP_1、OP_2、OP_3 和 OP_4）以及 2 个结构相同的减法器（OP_5 和 OP_6）。当 4 组光电二极管被莫尔条纹光信号照射后，产生四组幅值相同但相位彼此相差 90° 的光电流 $i(0°)$、$i(90°)$、$i(180°)$ 和 $i(270°)$，这 4 组光电流经过电流转电压放大器后，输出 4 组幅值相同但相位彼此相差 90° 的电压信号 $v(0°)$、$v(90°)$、$v(180°)$ 和 $v(270°)$，最后，$v(0°)$ 和 $v(180°)$ 被减法器 OP5 相减输出正弦信号 VSIN。同样，$v(90°)$ 和 $v(270°)$ 被减法器 OP6 相减输出余弦信号 VCOS。其中，正弦信号 VSIN 和余弦信号 VCOS 幅值相同（通常为 1 V）但相位相差 90°，通过对这 2 路信号的分析，便可得到增量位移信息，所以这 2 路信号的输出特性直接影响了增量位移的精确度，下面对有效精度、输出阻抗以及稳定性 3 个重要的输出特性进行分析推导。

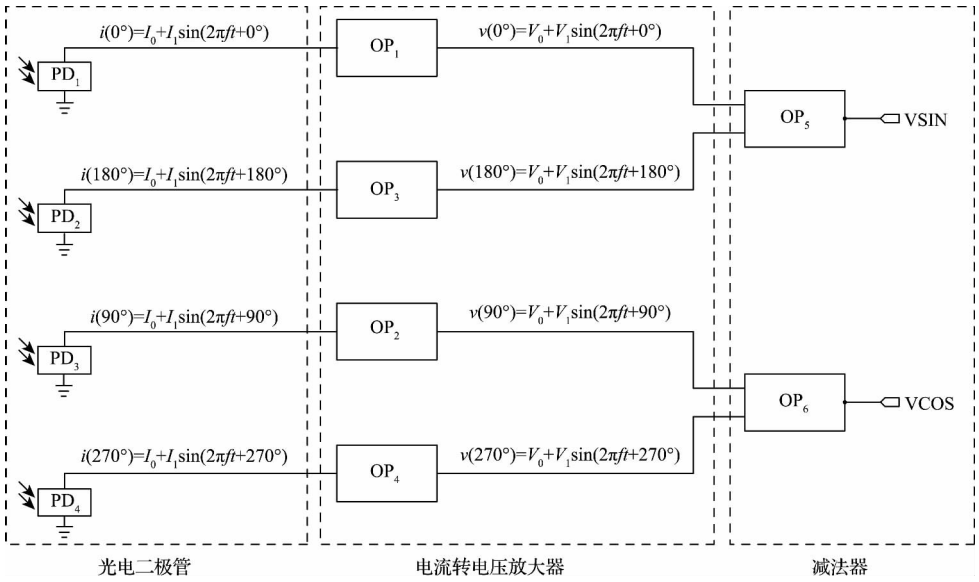


图 1　增量位移集成光电传感器结构

Fig. 1　Structure of the incremental displacement integrated photoelectric sensor

3　增量位移集成光电传感器的输出特性分析

3.1　有效精度分析

正弦信号 VSIN 和余弦信号 VCOS 的有效精度直接影响着增量细分的份数，是系统分辨率的绝对性因素之一，因此，高的有效精度是非常必要的，从输出信号中含有的噪声角度来进行分析：

所设计的光电传感器的噪声主要包括热噪声和闪烁噪声[10-11]，VSIN 或 VCOS 中掺杂的噪声等效为该路输出噪声带宽内的噪声，而噪声带宽等于该路信号 −3 dB 截止频率的 π/2 倍。通常增量位移测量系统的 −3 dB 截止频率为 150 kHz，输出增量信号 VSIN 和 VCOS 的摆幅为 1 V，则输出的增量信号 −3 dB 截止频率的 π/2 倍为 235.5 kHz，即该路噪声带宽为 235.5 kHz，为了保证本集成光电传感器工程实用的有效性，关注本电路的各个器件

如光电二极管 PD、MOS、电容 CAP 以及电阻 RES 在不同工艺差别(corner) 下,同时在 3 个环境温度 -40℃、27℃和 125℃时,利用 Cadence 中的 NOISE 仿真功能,对输出增量信号 VSIN 和 VCOS 中含有的信噪比 SNR(signal noise ratio) 进行后仿真,并利用有效精度 ENOB(effective number of bits) 公式进行计算,如式(1) 所示。

$$ENOB = \frac{SNR - 1.76}{6.02} \tag{1}$$

结果如表 1 所示。

表 1 正弦信号 VSIN 或余弦信号 VCOS 有效精度

Table 1 ENOB of VSIN or VCOS

componets	corners[1]	*SNR*(-40℃) /dB(V)	*ENOB*(-40℃) /bit	*SNR*(27℃) /dB(V)	*ENOB*(27℃) /bit	*SNR*(125℃) /dB(V)	*ENOB*(125℃) /bit
PD	tm/wp/ws	65.557	10.598	65.164	10.532	64.768	10.466
MOS	tm/wp/ws/wo/wz	65.557	10.598	65.164	10.532	64.768	10.466
CAP	tm	65.557	10.598	65.164	10.532	64.768	10.466
CAP	wp	64.997	10.504	64.637	10.445	64.219	10.375
CAP	ws	65.998	10.671	65.582	10.602	65.206	10.539
RES	tm	65.557	10.598	65.164	10.532	64.768	10.466
RES	wp	64.185	10.370	63.841	10.312	63.506	10.257
RES	ws	66.654	10.780	66.263	10.715	65.846	10.646

注: corner 指集成电路不同的制造工艺通常有一下几种: tm = typical mean, wp = worst case power, ws = worst case speed, wo = worst case one, wz = worst case zero

从表 1 可见,本光电传感器能够保证输出正弦信号 VSIN 或余弦信号 VCOS 的有效精度 ENOB 大于 10 bit。

3.2 输出阻抗 Rout

增量信号 VSIN 和 VCOS 的输出阻抗直接影响着增量位移信息的幅度和有效精度,因此,设计成低输出阻抗[12]是十分必要的。所设计的光电传感器的输出阻抗主要由减法器 OP_5 和 OP_6 决定,其内部结构如图 2 所示:

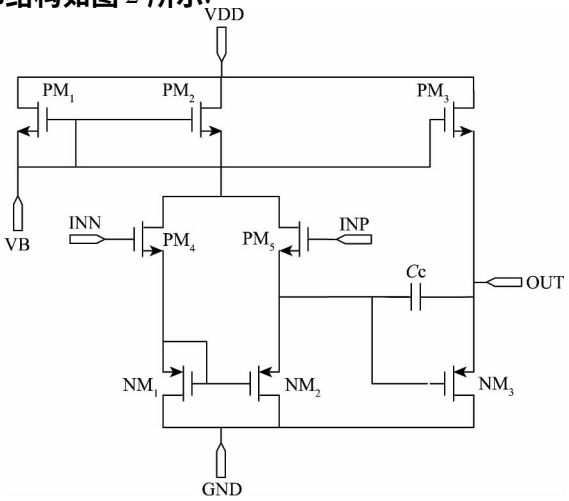


图 2 减法器 OP_5 和 OP_6 内部结构

Fig. 2 Internal structure of subtracter OP_5 and OP_6

通过分析可知,OP_5 的反馈类型为电压-电压反馈[13],该类型的输出阻抗为:

$$R_{out} = \frac{r_{out}}{1 + \beta A} \tag{2}$$

式中: r_{out} 为 OP_5 的开环输出阻抗:

$$r_{out} = \frac{1}{g_{dsPM_3} + g_{dsNM_3}} = \frac{1}{21.97u + 27.89u} = 20.05\ \text{k}\Omega \tag{3}$$

β 为反馈因子:

$$\beta = \frac{R_5}{R_{f5} + R_5} = \frac{10.04\ \text{k}\Omega}{50.88\ \text{k}\Omega + 10.04\ \text{k}\Omega} = 0.268 \tag{4}$$

A 为开环增益:

$$A = 115.6\ \text{dB} \tag{5}$$

则输出阻抗:

$$R_{out} = 0.625\ \Omega \tag{6}$$

同样,为了保证本集成光电传感器的工程实用的有效性,对本电路的各个器件如光电二极管 PD、MOS、电容 CAP 以及电阻 RES,在各种器件的工艺差别 corner 下,同时在 3 个环境温度 -40℃、27℃和 125℃时,利用 Cadence 中交流 AC 的仿真功能,在增量信号 VSIN 和 VCOS 的输出端加测试电流,该测试电流的直流为 100 μA,振幅是 1 V,相位为 0,截止频率 150 kHz 的条件下进行后仿真,结果如表 2 所示。

从表 2 可见，在温度为 27℃、低频 50 Hz、典型的工艺参数 tm 下，理论计算本文所设计的集成光电传感器的增量信号 VSIN 和 VCOS 的输出阻抗 R_{out} 为 625 mΩ，后仿真结果比理论计算值稍有偏差，但都小于 5 Ω，符合行业标准。

3.3　稳定性

对所设计的集成增量位移光电传感器的稳定性，采用在光源端和电源端两个方面分别加入阶跃激励信号，分别观察输出信号 VSIN 的时域响应，此方法能够更准确直观有效地观察系统的稳定性[14]。利用 Cadence 中瞬态 tran 的仿真功能，在 PD_1 加一直流测试电流信号，直流值为 160 nA，在 PD_3 加阶跃测试电流信号，阶跃值为 320 nA，跳变时间为 10 ps。后仿真结果如图 3 所示。

表 2　增量位移集成光电传感器的输出阻抗

Fig. 2　Output impedance of the incremental displacement integrated photoelectric sensor

components	corner	R_{out}(−40℃,150 kHz, I_{dc} = 100 μA) /mΩ	R_{out}(27℃,150 kHz, I_{dc} = 100 μA) /mΩ	R_{out}(125℃,150 kHz, I_{dc} = 100 μA) /mΩ	R_{out}(27℃, 50 Hz, tm,theory) /mΩ
PD	tm/wp/ws	1 661	2 310	3 226	625
MOS	tm/wp/ws/wo/wz	1 676	2 310	3 251	
CAP	tm/wp/ws	1 669	2 297	3 231	
RES	tm/wp/ws	1 663	2 330	3 236	

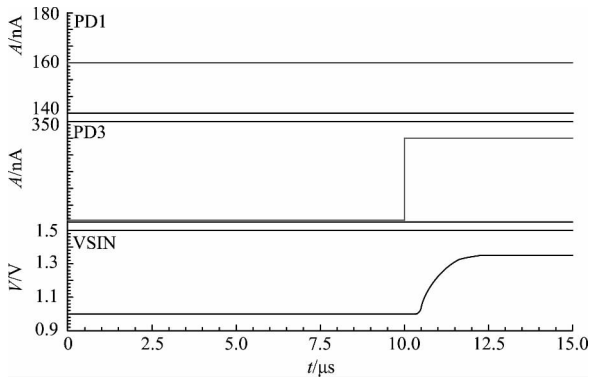


图 3　光源干扰时增量位移集成光电传感器的稳定性

Fig. 3　Stability of the incremental displacement integrated photoelectric sensor with optical source interfere

从图 3 可以看出，当光源有阶跃信号时，减法器 OP5 输出电压 VSIN 是稳定的，建立时间大约为 2.4 μs。

利用 Cadance 中瞬态 tran 的仿真功能，在电源 VDD 上加一阶跃测试电压信号，阶跃值为 3.3 V，跳变时间为 1 μs。后仿真结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出，当在电源 VDD 输入源有阶跃信号时，减法器 OP5 输出电压 VSIN 是稳定的，建立时间大约为 8.24 μs。

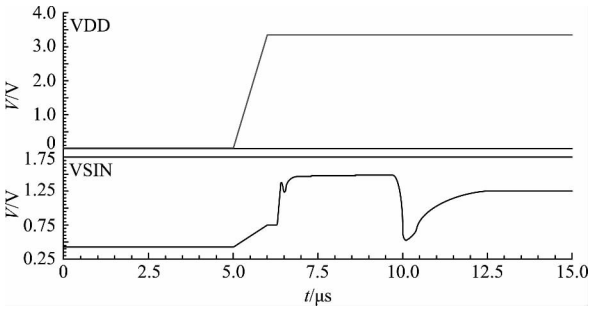


图 4　电源干扰时增量位移集成光电传感器的稳定性

Fig. 4　Stability of the incremental displacement integrated photoelectric sensor with voltage source interfere

从图 3 和图 4 综合可见，当输入的摩尔条纹光信号或者光电传感器电源发生阶跃性变化时，本文所设计的电路是能够在较短的时间达到稳定状态，保证了增量信号 VSIN 和 VCOS 稳定的输出。

4　结　论

设计了一种用于处理增量位移信息的集成光电传感器，对影响增量位移信息准确度的有效精度特性进行了详细分析与设计，同时，对输出阻抗以及稳定性也进行了细致的推导。采用 0.35 μm CMOS 工艺完成设计，并给出后仿真结果，集成光

电传感器的有效精度优于 10 bit，输出阻抗低于 5 Ω，能够稳定地抑制莫尔条纹和电源造成的干扰，已应用于光栅位移测量装置中。

目前，该集成光电传感器已经成功应用在我单位自主研发的绝对式光栅尺中，测得系统的分辨率可以达到 0.03 μm，较国际先进水平德国 HEIDENHAIN 稍有差距。本设计产品已在国内多家数控企业试用，还需要进一步对本设计在真实的应用环境中进行长期的可靠性验证，不断完善性能。

参考文献

[1] 杨孟，徐卫明，肖林，等. 增量式光栅编码器在激光扫描雷达的应用研究 [J]. 传感器与微系统，2012，31(3)：36-42.
YANG M，XU W M，XIAO L，et al. Application research on incremental optical grating encoder in laser scanning radar [J]. Transducer and Microsystem Technologies，2012，31(3)：36-42.

[2] 蒋晶，蒋东方，高航. 高可靠性增量式光电编码器接口电路设计 [J]. 测控技术，2009，28(2)：1-4.
JIANG J，JIANG D F，GAO H. A high accuracy interface circuit design for incremental photoelectric encoder [J]. Measurement & Control Technology，2009，28(2)：1-4.

[3] 袁江，邱自学，邱建新. 集成激光位移传感器和编码器的曲面仿形测头研究 [J]. 仪器仪表学报，2010，31(11)：2489-2494.
YUAN J，QIU Z X，QIU J X. Research on free-form surfacemeasurement system with integrated laser displacement sensor and linear encoder [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument，2010，31(11)：2488-2494.

[4] 刘小康，费业泰，彭东林. 时栅位移传感器智能化实现方法研究 [J]. 仪器仪表学报，2008，29(6)：1139-1142.
LIU X K，FEI Y T，PENG D L. Research on intelligentization method for time grating displacement sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument，2008，29(6)：1139-1142.

[5] 王兴，贾晓虎，郝春丽. 基于增量式光电编码器位移传感器研究 [J]. 电子设计工程，2012，20(5)：155-158.
WANG X，JIA X H，HAO CH L. Research of the sensor about displacement based on the increment photoelectricity encoder [J]. Electronic Design Engineering，2012，20(5)：155-158.

[6] 王直，施晓敏，丁建军，等. 增量式光电编码器信号处理电路的设计与实现 [J]. 电子设计工程，2012，20(2)：212-123.
WANG ZH，SHI X M，DING J J，et al. Design and implementation of signal processing circuit for incremental optical encoder [J]. Electronic Design Engineering，2012，20(5)：155-158.

[7] 高伟，王云龙，金勇. 增量式光电编码器在交流伺服系统中的应用 [J]. 电器自动化，2011，33(6)：36-38.
GAO W，WANG Y L，JIN Y. Incremental photoelectric encoder applies in AC servo system [J]. Electrical Automation，2011，33(6)：36-38.

[8] 杜颖财，王希军，王树洁. 增量式编码器自动检测系统 [J]. 电子测量与仪器学报，2012，26(11)：993-998.
DU Y C，WANG X J，WANG SH J. Auto-detection system of incremental encoder [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument，2012，26(11)：993-998.

[9] 于唤唤，张宏伟，张晓杰. 触针式光电三维微位移测量系统设计及标定 [J]. 电子测量与仪器学报，2012，26(7)：616-627.
YU H H，ZHANG H W，ZHANG X J. Design and calibration of three- dimensional micro-displacement measuring system with photoelectric stylus [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument，2012，26(7)：616-627.

[10] 陈树维，王春华，曹小冬. 低电压低功耗宽带 CMOS 低噪声放大器的设计 [J]. 微电子学，2012，42(5)：627-631.
CHEN SH W，WANG CH H，CAO X D. Design of a wideband low-voltage and low-power CMOS LNA [J]. Microelectronics，2012，42(5)：627-631.

[11] 齐凯. 基于噪声抵消技术的 CMOS 宽带 LNA 设计 [J]. 微电子学，2012，42(5)：623-626.
QI K. Design of a CMOS wideband LNA using noise canceling technique [J]. Microelectronics，2012，42(5)：623-626.

[12] 佟强，张东来，徐殿国. 分布式电源系统中变换器的输出阻抗与稳定性分析 [J]. 中国电机工程学报，2011，31(2)：57-64.
TONG Q，ZHANG D L，XU D G. Output impedance and stability analysis of converters in distributed power systems [J]. Proceeding of the CSEE，2011，31(2)：57-64.

[13] 姚信安，胡世平，宋飞. 高性能计算机总线变换器输出阻抗优化设计 [J]. 计算机应用，2012，32(6)：1772-1777.

YAO X AN, HU SH P, SONG F. Output impedance optimization for bus converter in high-performance computer [J]. Journal of Computer Applications, 2012, 32(6): 1772-1777.

[14] 母一宁,李平,于林韬,等. 应用于增量式光电编码器的相关自适应滤波方法 [J]. 光子学报, 2011, 40(10): 1452-1458.
MU Y N, LI P, YU L T, et al. Relative self-adaptive filtering method applied to internal optoelectric encoder [J]. ACTA Photonica Sinica, 2011, 40(10): 1452-1458.

作者简介

刘阳,1986 年出生,2012 年于吉林大学获得硕士学位,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究实习员。目前主要研究方向为光栅尺增量位移测量电路方面的研究。
E-mail: liuy_ciomp@163.com

Liu Yang was born in 1986, received master degree from Jilin University in 2012. Now, he is research intern fellow in Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences. His present research interests include the design of the grating incremental displacement circuits.

吴宏圣,1974 年出生,2003 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所副研究员。目前主要从事光电位移检测技术方面的研究。
E-mail: wu9321@163.com

Wu Hongsheng was born in 1974, received M. Sc. degree from Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences in 2003. Now, he is associate professor in Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences. His present research interests include photoelectric displacement detection technology.

杨帆,1984 年出生,2010 年于同济大学获得硕士学位,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所助理研究员。主要从事光电位移机械设计方面的研究。
E-mail: yangfan-84@163.com

Yang Fan was born in 1984, received master degree from Tongji University in 2010. Now, he is assistant researcher fellow in Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences. His present research interests include the design of photoelectric displacement about machinery.

许家林,1984 年出生,2010 年于东南大学获得硕士学位,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所助理研究员。主要从事运动控制方面的研究。
E-mail: 360936849@163.com

Xu Jialin was born in 1984, received master degree from Noutheast University in 2010. Now, he is associate professor in Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences. His present research interests include motion control technology.