光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.04.020

环境温度对红外测温精度的影响及补偿方法研究

代少升*，吴纪红

（重庆邮电大学 通信与信息工程学院，重庆 400065）

摘　要： 针对在线式红外测温仪的测温精度易受环境温度影响，导致测温误差增大的问题，提出一种基于环境温度的红外测温补偿方法，以减少测温误差。首先根据红外测温原理，搭建了红外测温实验平台，获取了不同环境温度下的测温数据；然后利用最小二乘法原理对提取的测温误差均值进行误差－环境温度的曲线拟合，得到了红外测温补偿模型；最后对其进行了实验验证。实验结果表明，使用该补偿模型对红外测温数据进行补偿，得到的红外测温值与真实目标温度值的最大相对误差为0.29％，说明提出的补偿方法降低了环境温度对红外测温的影响，有效提高了红外测温精度。

关键词： 红外测温；环境温度；测温精度；补偿方法；测量误差

中图分类号： TN219　**文章编号：** 1001－5868(2021)04－0551－05

Study on Influence of Ambient Temperature on the Accuracy of Infrared Temperature Measurement and Compensation Methods

DAI Shaosheng，WU Jihong

（School of Communication and Information Engineering，Chongqing University of Posts and Telecommunications，Chongqing 400065，CHN）

Abstract： Aiming at the problem that the temperature measurement accuracy of the online infrared thermometer is easily affected by the environmental temperature，which causes big measurement error，an infrared temperature measurement compensation method based on the environmental temperature is proposed to improve the measurement accuracy. First，based on the principle of infrared temperature measurement，an infrared temperature measurement experiment platform was built，and temperature measurement data under different ambient temperatures were obtained. Then，using the principle of least square method to fit the extracted mean value of temperature measurement error to the curve of error-ambient temperature，the infrared temperature measurement compensation model was obtained. Finally，experiments were carried out to verify. The results show that using the compensation model to compensate the infrared temperature measurement data，the maximum relative error between the infrared temperature measurement value and the true temperature value of the measured target is 0.29％. It shows that the compensation method effectively reduces the measurement error of the infrared temperature measurement system caused by environmental temperature changes，and improves the measurement accuracy.

Key words： infrared temperature measurement；ambient temperature；temperature measurement accuracy；compensation method；measurement error

收稿日期：2021－05－02.

* **通信作者：**代少升

0 引言

自 20 世纪 80 年代以来，红外测温技术凭借其响应快、非接触和测温距离远等优点被广泛应用于医疗、钢铁等行业，极大地提高了生产效率和产品质量[1]。在实际应用中，影响红外测温的因素很多，特别是工业生产车间，环境复杂，影响因素更多：发射率、环境温度、光照、测温距离、粉尘、电磁干扰等都会对红外测温精度产生很大的影响。通常情况下，红外测温仪测量的温度值并非目标的真实温度，而是受诸多因素影响后的温度值。因此，如何提高红外测温精度是许多研究人员一直密切关注的问题。沈久利等研究了不同发射率对红外热图像测温系统的影响，并推导出了基于修正目标发射率，提高红外热成像测温系统精度的数学模型[2]。贾桂锋等研究了不同的测温距离对红外热成像测温系统的影响，并提出了基于距离的红外热成像测温校正方法[3]。魏绍亮等研究了不同的光照强度对强反光体表面红外测温系统的影响，提出了改善环境光照对红外测温精度影响的补偿算法[4]。然而关于环境温度对红外测温系统测量精度影响的研究文献相对较少。本文首先详细分析了红外测温原理，包括影响红外测温精度的主要因素，搭建了红外测温实验平台。然后通过实验揭示了环境温度变化对红外测温精度的影响，并根据最小二乘法原理对提取的实验测温数据进行拟合分析，进而构建基于环境温度的红外测温补偿模型，并在实验室展开红外测温实验。

1 红外测温原理

自然界中，任何绝对温度大于零的物体都会向外界辐射不同强度的能量。物体向外辐射的能量按波长的分布情况与物体表面温度有着密切的关系[5-6]。而普朗克辐射定律可以描述该关系，其表达式为

$$M(\lambda,T)=\frac{c_1\lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T}-1} \tag{1}$$

式中，$M(\lambda,T)$为黑体光谱辐射出射度，c_1 为第一辐射常数，$c_1=3.741\times10^{-16}$ W·cm^2；c_2 为第二辐射常数，$c_2=1.438\,8\times10^{-2}$ W·K；λ 为光谱辐射的波长；T 为黑体的绝对温度。当 $\exp(c_2/\lambda T)\gg1$ 时，普朗克公式可以由维恩位移公式替代，表示为

$$M_b(\lambda,T)=c_1\lambda^{-5}e^{-c_2/\lambda T} \tag{2}$$

维恩位移定律指出，一个物体的温度越高，其辐射谱的波长越短，并且中心峰值波长会向短波方向偏移[7]。但实际测温时，进入探测器的辐射能不仅有待测目标的辐射能，还有待测目标反射周围环境的辐射能以及大气辐射能[8]。因此待测目标表面的光谱辐射度可以表示为

$$L_\lambda=\varepsilon_\lambda M_b(\lambda,T_{obj})+(1-\alpha_\lambda)M_b(\lambda,T_{sur}) \tag{3}$$

式中，ε_λ 为待测目标的发射率，T_{obj} 为待测目标的温度，$\varepsilon_\lambda M_b(\lambda,T_{obj})$为待测目标的光谱辐射度，$M_b(\lambda,T_{sur})$为周围环境的光谱辐射度，$\alpha_\lambda$ 为待测目标表面的吸收率，T_{sur} 为环境温度。式(3)中前一项表示待测目标表面的光谱辐射度，后一项表示目标表面反射周围环境的光谱辐射度[9]。则作用于红外测温系统的辐射照度如图 1 所示。其主要来源分别有周围环境、待测目标以及大气环境，可表示为

$$E_\lambda=A_{obj}d^{-2}[\tau_{a\lambda}\varepsilon_\lambda M_b(\lambda,T_{obj})+\tau_{a\lambda}(1-\alpha_\lambda)\cdot M_b(\lambda,T_{sur})+\varepsilon_{a\lambda}M_b(\lambda,T_{atm})] \tag{4}$$

式中，A_{obj} 为红外测温仪最小张角对应的目标可视面积[10]，d 是待测目标到红外测温仪的距离。一般情况下，$A_{obj}d^{-2}$ 为常数，$\tau_{a\lambda}$ 为大气的光谱透射率，$\varepsilon_{a\lambda}M_b(\lambda,T_{atm})$为大气光谱辐射度，$\varepsilon_{a\lambda}$ 为大气发射率，T_{atm} 为大气温度。

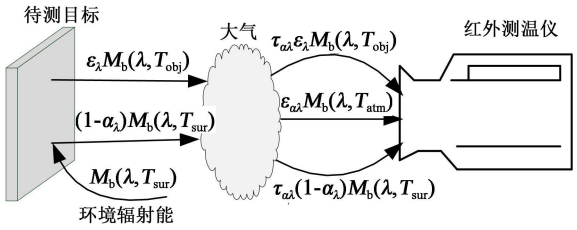

图 1 红外测温系统接收能量示意图

探测器会把接收到的红外辐射能量转换为电流信号，即对入射的红外辐射能量在响应波段 $\Delta\lambda\in[\lambda_{min},\lambda_{max}]$ 上进行积分[11]。因此，红外辐射能和电流的转换关系可以表示为

$$I_o=\int_{\Delta\lambda}A_R R_\lambda E_\lambda\tau_f d\lambda \tag{5}$$

式中，I_o 为探测器输出的电流信号，E_λ 是红外测温系统接收的辐射照度，A_R 为红外聚焦透镜的面积，R_λ 为红外探测器的光谱响应率，τ_f 为光学系统的透射率。探测器的输出电流经过 I/V 转换电路得到输出电压信号，表示为

$$V_{out}=\int_{\Delta\lambda}RA_{obj}d^{-2}A_R\tau_f R_\lambda[\tau_{a\lambda}\varepsilon_\lambda M_b(\lambda,T_{obj})+\tau_{a\lambda}(1-\alpha\lambda)M_b(\lambda,T_{sur})+\varepsilon_{a\lambda}M_b(\lambda,T_{atm})]d\lambda \tag{6}$$

式中，R 为负载。从上式可以看出，影响红外测温的因素很多。但实际上，测温系统硬件确定之后，透镜的有效面积、光学系统的透射率、负载也随之确定。令 $K=RA_{\mathrm{R}}\tau_{\mathrm{f}}$，式(6)可以简化为

$$V_{\mathrm{out}}=KA_{\mathrm{obj}}d^{-2}\int_{\Delta\lambda}R_{\lambda}[\tau_{\alpha\lambda}\varepsilon_{\lambda}\cdot M_{\mathrm{b}}(\lambda,T_{\mathrm{obj}})+\tau_{\alpha\lambda}(1-\alpha_{\lambda})M_{\mathrm{b}}(\lambda,T_{\mathrm{sur}})+\varepsilon_{\alpha\lambda}M_{\mathrm{b}}(\lambda,T_{\mathrm{atm}})]\mathrm{d}\lambda \quad (7)$$

由式(7)可知，在红外测温仪的瞄准视角和黑体发射率一定时，影响红外测温精度的因素主要有环境温度和测温距离。但为了研究环境温度对红外测温精度的影响规律，实验中保持测温距离不变。

2　实验

本文使用武汉凯尔文光电科技有限公司生产的高温黑体来模拟目标辐射源，最高温度可达 990 ℃，温度分辨率为 0.1 ℃，黑体发射率为 0.97，有效辐射面为 Φ100 mm。探测器选择 ig22 系列的光子探测器，针对特定波段，其响应速度快，比探测率高，有效响应波段范围为 $\Delta\lambda\in(450,2\,300)$ nm。此外选择数字温度传感器来监测环境温度变化，其测温范围为－55～＋125 ℃，测温响应速度快、精准度高。整个测温实验在步入式环境实验室内进行。

详细实验步骤如下：1)固定在线式红外测温仪到黑体的直线距离为 80 cm，通过测温仪的瞄准镜，调整其镜头正对高温黑体的发热腔，以保证目标辐射的红外线可以充满整个测温视场；2)连接好数据传输线，打开电脑软件和在线式红外测温仪，等待测温系统预热稳定。设置高温黑体内部发热腔为 600 ℃，待黑体稳定之后，即可测温；3)在上述温度下，逐渐增大环境温度，不同环境温度下测温 10 次，对其取平均值以降低测量误差和人为操作的影响。以 2 ℃为间隔，在 18～54 ℃范围内往返测量 8 次。实测数据见表 1。

3　实验结果分析

从表 1 所示高温黑体在 600 ℃温度下测量得到的 8 组温度数据不难看出，环境温度的升高会导致测温结果大于真实温度值。在 18～28 ℃范围内，红外测温仪基本稳定。但从 28 ℃开始逐渐产生测量误差，并且随着环境温度的升高测量误差逐渐增大。由此可见，环境温度的变化对在线式红外测温仪的测量精度影响较大，为了提高红外测温精度，必须对测温结果进行一定的补偿。为了更好地分析表 1 中的数据，使用 Matlab 软件画出测温数据的折线图，如图 2 所示。

表 1　不同环境温度下测温结果(单位：℃)

环境温度/℃	实验序号							
	1	2	3	4	5	6	7	8
18	599.4	600.2	599.8	600.3	600.1	600.5	599.7	599.8
20	600.4	601.1	600.7	600.3	599.6	600.5	600.9	600.8
22	601.3	600.4	601.8	599.2	600.7	599.4	600.5	601.6
24	600.6	599.2	600.5	600.7	600.3	599.1	600.8	600.7
26	600.9	601.1	600.8	601.7	600.8	600.9	601.6	600.8
28	601.4	602.2	601.5	602.8	601.4	601.5	602.3	601.6
30	602.4	602.7	602.3	603.5	602.1	602.7	603.4	602.3
32	603.3	604.5	602.7	604.4	603.6	603.5	604.1	603.4
34	605.5	605.7	604.3	606.1	605.8	604.4	606.3	604.6
36	606.4	607.8	606.5	608.4	606.9	605.2	608.3	604.7
38	608.6	608.5	607.7	610.3	608.4	607.5	610.8	606.1
40	612.7	612.4	611.8	613.5	612.3	611.7	614.2	608.6
42	616.5	615.8	614.1	617.7	616.5	615.4	618.2	614.3
44	621.7	621.4	619.5	621.8	621.3	620.6	623.4	620.9
46	627.4	628.8	626.2	628.4	627.7	627.1	629.5	625.6
48	635.5	636.6	634.2	635.8	635.5	636.3	636.7	633.1
50	644.6	645.2	643.8	646.7	644.3	643.4	646.5	642.7
52	654.2	655.6	653.9	656.2	654.5	653.8	656.6	652.9
54	665.4	666.7	663.8	667.5	665.2	664.9	667.3	662.6

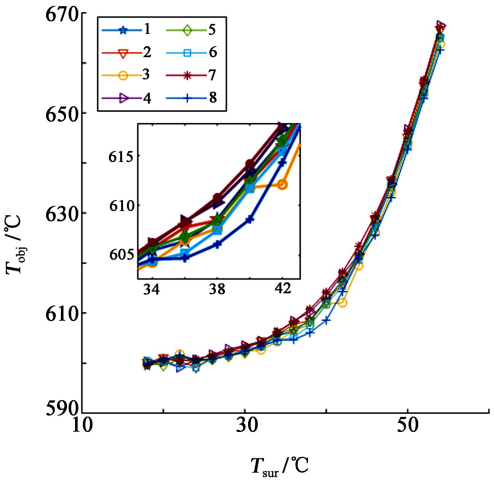

图 2　实际测量的 8 组温度数据图

由图 2 知，8 次测量的温度数据随着环境温度的升高有着相似的变化趋势。说明实验结果有效并且存在一定的变化规律。但是为了得到待测目标的真实温度值，还需要进一步得到测量误差，构建环境温度与测量误差之间的曲线关系。对表 1 所示不同环境温度下的 8 组测温数据求测温误差均值，并绘制出折线图，如图 3 所示。

从图 3 中的曲线可以看出，测量误差随着环境温度的升高单调递增。因此可根据最小二乘法原理来构建测量误差和环境温度之间的函数关系。所谓的最小二乘法就是通过使误差平方和最小，来拟合出最合适的函数表达式[12]。如求 t，T 之间的对应

关系 $T=f(t)$ 时，必须使式(8)中的平方和的值最小。

$$\sum_{i=1}^{N}(f(t_i)-T_i)^2, i=1,2,3,\cdots,N \tag{8}$$

式中，N 为样本数据个数，t 和 T 为样本数据。

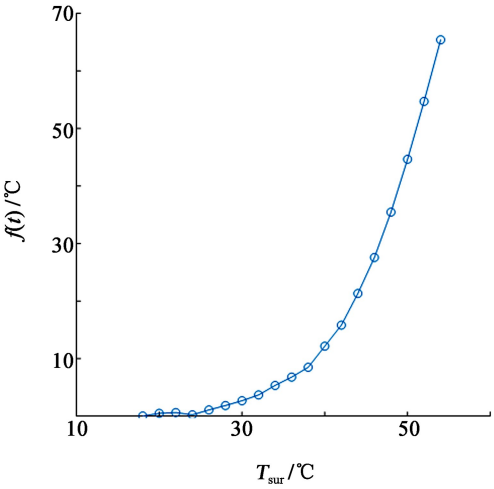

图 3 测量误差均值与环境温度关系曲线

最小二乘法可以拟合多种类型的函数，如多项式函数、指数函数、正弦函数等。通过对图 4 的观察，发现测量误差呈抛物线变化，所以温度补偿函数的类型可初步定为多项式函数：

$$f(t)=a_0+a_1t^1+\cdots+a_kt^k \tag{9}$$

式中，$f(t)$ 为测量误差，t 为环境温度，k 决定多项式拟合阶数，$a_0,a_1,\cdots,a_k$ 为拟合的多项式系数。考虑到微处理器的处理速度，t 的阶数不易过高，但又必须保证误差不宜过大[13]。经多元函数求极值、矩阵运算等，最终求解出多项式的系数，得到了测量误差与环境温度之间的函数关系为

$$f(t)=0.002\,302t^3-0.167\,2t^2+4.182t-34.82 \tag{10}$$

则基于环境温度的红外测温补偿模型可以表示为

$$T_0=T_c-0.002\,302t^3+0.167\,2t^2-4.182t+34.82 \tag{11}$$

式中，T_0 为待测目标的真实温度值，T_c 为红外测温仪测量的温度值。通过温度补偿模型对测温数据进行补偿，计算补偿后的温度与目标真实温度之间的差值[14]，同时也计算出测量误差和补偿误差，以此来评估补偿模型的优劣[15]。补偿结果如表 2 所示。

由表 2 知，补偿前，红外测温数据最大相对误差为 11.28%。经过补偿模型修正后，最大相对误差为 0.29%。为了方便地观察补偿后的温度与目标真实温度以及测量温度的变化趋势，对表 2 中的数据画出折线图，如图 4 所示。

表 2 补偿前后的温度数据对比

环境温度/℃	测量温度/℃	真实温度/℃	测量误差/%	补偿后温度/℃	补偿误差/%
18	599.2	600	0.13	599.49	0.09
20	600.5	600	0.08	600.14	0.02
22	602.4	600	0.40	601.62	0.27
24	600.7	600	0.12	599.63	0.06
26	601.3	600	0.22	599.95	0.01
28	601.6	600	0.27	599.87	0.02
30	602.2	600	0.37	599.88	0.02
32	603.8	600	0.63	600.57	0.10
34	605.9	600	0.98	601.33	0.22
36	606.5	600	1.08	600.05	0.01
38	609.1	600	1.52	600.12	0.02
40	613.5	600	2.25	601.23	0.21
42	616.6	600	2.77	600.16	0.03
44	622.1	600	3.68	600.51	0.09
46	627.4	600	4.57	599.57	0.07
48	636.5	600	6.08	601.23	0.21
50	645.6	600	7.60	601.56	0.26
52	653.8	600	8.97	599.58	0.07
54	667.7	600	11.28	601.76	0.29

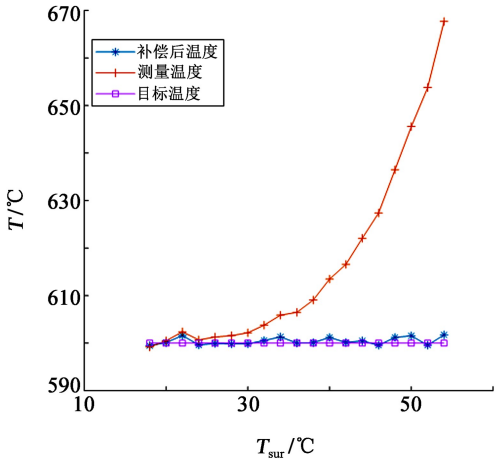

图 4 补偿前后的温度对比曲线图

由图 4 知，环境温度越高，未经补偿的温度值偏离真实温度值越严重。补偿后的温度值在真实温度值附近上下浮动，说明该补偿模型可以很好地抑制环境温度的影响，提高红外测温仪的测温精度。故可将该补偿模型作为在线红外测温仪的温度补偿模型。

4 结论

本文着重研究了环境温度对在线式红外测温仪测温精度的影响。在环境温度 18～28 ℃范围内，红外测温仪的测温性能基本稳定。之后随着环境温度的升高，测温误差逐渐增大。通过对实验获取的温度数据进行拟合分析，最终得到了基于环境温度的红外测温补偿模型。使用该补偿模型对红外测温结果补偿后，其最大相对误差仅为 0.29%，提高了红

外测温精度。

参考文献：

[1] 程元国，邓　霄，李灵傲，等. 基于温度残差补偿法的 NTC 热敏电阻温度检测及应用[J]. 半导体光电，2019，40(2)：226-230.
Cheng Yuanguo，Deng Xiao，Li Ling'ao，et al. NTC thermistor temperature detection and application based on temperature residual compensation method [J]. Semiconductor Optoelectronics，2019，40(2)：226-230.

[2] 沈久利，张玉存. 不同发射率下红外热图像的非稳态温度场测量研究[J]. 计量学报，2019，40(5)：810-815.
Shen Jiuli，Zhang Yucun. Research on the measurement of unsteady temperature field of infrared thermal image under different reflectance[J]. Acta Metrology，2019，40(5)：810-815.

[3] 贾桂锋，武　墩，蒙俊宇，等. 测量距离对生猪红外热成像测温的影响及校正[J]. 传感器与微系统，2019，38(11)：62-64，68.
Jia Guifeng，Wu Dun，Meng Junyu，et al. The influence of measuring distance on pig infrared thermal imaging temperature measurement and its correction[J]. Sensor and Microsystem，2019，38(11)：62-64，68.

[4] 魏绍亮，韩连伟，程奉玉. 改善环境光照对强反光体表面红外测温精度影响的补偿算法研究[J]. 红外技术，2020，42(12)：1179-1184.
Wei Shaoliang，Han Lianwei，Cheng Fengyu. Research on compensation algorithms for improving the influence of environmental illumination on the accuracy of infrared temperature measurement on the surface of strong reflectors [J]. Infrared Technol.，2020，42(12)：1179-1184.

[5] 舒　倩. 提高回转窑测温精度的补偿方法研究[D]. 重庆：重庆邮电大学，2019.
Shu Qian. Research on compensation method to improve the temperature measurement accuracy of rotary kiln [D]. Chongqing：Chongqing University of Posts and Telecommunications，2019.

[6] Dini V，Salvo P，Janowska A，et al. Correlation between wound temperature obtained with an infrared camera and clinical wound bed score in venous leg ulcers[J]. Wounds A Compendium of Clinical Research & Practice，2015，27(10)：274.

[7] Dai Shaosheng，Tan Wei，Yu Liangbing，et al. Pseudo-color coding algorithm for infrared scanning temperature measuring system ofrotary kiln[J]. Infrared Phys. and Technol.，2018，94：110-117.

[8] Manara J，Zipf M，Stark T，et al. Long wavelength infrared radiation thermometry for non-contact temperature measurements in gas turbines [J]. Infrared Physics and Technology，2017，80：120-130.

[9] 高　远，李　松. 温度控制与温度补偿双模式的 APD 驱动电路设计[J]. 半导体光电，2019，40(6)：869-873.
Gao Yuan，Li Song. Design of APD drive circuit with dual modes of temperature control and temperature compensation [J]. Semiconductor Optoelectronics，2019，40(6)：869-873.

[10] 石东平，吴　超，李孜军，等. 基于反射温度补偿及入射温度补偿的红外测温影响分析[J]. 红外与激光工程，2015，44(8)：2321-2326.
Shi Dongping，Wu Chao，Li Zijun，et al. Analysis of the influence of infrared temperature measurement based on reflected temperature compensation and incident temperature compensation[J]. Infrared and Laser Engineering，2015，44(8)：2321-2326.

[11] 王军帅，田军委，张　杰，等. 一种红外测温的误差建模与补偿方法[J]. 西安工业大学学报，2021，41(1)：40-45.
Wang Junshuai，Tian Junwei，Zhang Jie，et al. An error modeling and compensation method for infrared temperature measurement[J]. J. of Xi'an Technological University，2021，41(1)：40-45.

[12] 葛泽勋，曹　秒，安志勇. 基于距离补偿的红外测温系统设计[J]. 长春理工大学学报(自然科学版)，2019，42(2)：57-60，64.
Ge Zexun，Cao Miao，An Zhiyong. Design of infrared temperature measurement system based on distance compensation[J]. J. of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)，2019，42(2)：57-60，64.

[13] 孙　成，潘明强，王阳俊，等. 噪声对红外测温性能的影响研究[J]. 红外技术，2019，41(4)：370-376.
Sun Cheng，Pan Mingqiang，Wang Yangjun，et al. Research on the influence of noise on infrared temperature measurement performance[J]. Infrared Technol.，2019，41(4)：370-376.

[14] 孙志远，朱　玮，乔彦峰. 红外测温过程中灰度值漂移的修正[J]. 中国光学与应用光学，2010，3(4)：391-396.
Sun Zhiyuan，Zhu Wei，Qiao Yanfeng. Correction of gray value drift during infrared temperature measurement [J]. Chinese Optics and Applied Optics，2010，3(4)：391-396.

[15] 廖盼盼，张佳民. 红外测温精度的影响因素及补偿方法的研究[J]. 红外技术，2017，39(2)：173-177.
Liao Panpan，Zhang Jiamin. Research on influencing factors and compensation methods of infrared temperature measurement accuracy[J]. Infrared Technol.，2017，39(2)：173-177.

作者简介：

代少升(1974－)，男，河南潢川人，博士，教授，主要从事红外成像技术系统及 SOPC 嵌入式系统设计与开发。