

基于查找表的车载经纬仪测角误差修正技术

佟刚, 崔明

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 车载平台的变形对光电经纬仪测角精度将产生一定的影响, 使车载经纬仪难以达到高精度测量的目的; 为了提高车载经纬仪静态测角精度, 提出了基于查找表的静态测角误差事后补偿技术: 首先, 推导出车载经纬仪的静态测角误差修正模型。然后, 利用安放在经纬仪垂直轴上的倾角传感器采集车载平台变形特征值; 最后, 构建映射函数, 建立输入值和输出值之间的查找关系, 即高精度的查找表; 实验数据分析结果表明: 该方法能有效补偿因为车载平台变形而带来的静态测角误差, 使方位测角精度提高 $46''$, 高低测角精度提高 $20''$; 为实现车载经纬仪高精度测量提供了理论依据和技术支持。

关键词: 车载平台; 静态测角精度; 倾角传感器; 查找表

Technology of Angle Measuring Error Correction Based on LUT for Vehicular Theodolite

Tong Gang, Cui Ming

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Changchun 130033, China)

Abstract: The deformation of vehicular platform will have a certain influence to the angle measuring precision of photoelectric theodolite, so it is difficult for the theodolite vehicle to measure with high-precision. In order to improve the static angle measuring precision of vehicle theodolite, bring the compensation technology of static angle measuring error after task based on look-up table. First, derive the correction model of static angle measuring error for vehicular theodolite. Then, using inclinometer placed in the vertical axis to collect the deformation characteristics value of vehicular platform. Finally, establish mapping function, build the relationship of search between input values and output values, namely high-precision of look-up table. The experimental data shows that: This method can effectively compensate static angle measuring error by deformation of vehicle platform, make azimuth precision improved $46''$ and elevation precision improved $20''$. It provides a theoretical reference and technical support for high-precision measurement of vehicle theodolite.

Key words: vehicular platform; static angle measuring precision; inclinometer; look-up table

0 引言

国内靶场中光电经纬仪工作模式主要有两种: 固定站式和机动站式。固定站式常见形式是固定塔台式, 机动站式常见形式是车载式。然而在实际工作中, 无论是固定塔台式还是车载机动式, 都是布放在地面的地基环上, 在静止基座状态下使用。而国外靶场中的光测设备多采用车载不落地工作模式, 测量精度与国内固定站式相当, 可以在较大的地理范围内灵活布站, 满足靶场大范围机动测量的需要。

车载不落地工作模式是指设备到达指定目的地后, 通过液压支撑系统把载车整体抬起, 使橡胶轮胎离开地面, 从而隔离来自轮胎的不稳定因素。车载经纬仪整体调平精度和经纬仪落到地基环上的调平精度相差较大, 必然对光电经纬仪的跟踪测量精度产生影响。如果经纬仪质量比较小, 同时车载平台的刚性比较好的情况下, 平台的变形也比较小, 对测角精度影响不大; 如果经纬仪质量比较大, 平台就会在经纬仪的工作过程中发生变形, 降低经纬仪的测角精度。因此对车载平台变形实时测量并进行事后测角误差修正是提高车载经纬仪测角精度的关键^[1]。

1 车载平台变形的测量

1.1 倾角传感器的选择

倾角传感器是用来测量载体倾斜状态的, 即用于测量待测物体(或平台)相对于标准水平面的倾斜角度, 已广泛应用于仪表测量、工业自动化、航空航海等领域。其工作原理与“摆”相同, 即利用地球重力加速度工作, 根据“摆”在重力场范围内保持其垂直向下的方向特性来设计的^[2-3]。

由于车载经纬仪正常工作时平台变形在 $\pm 1^\circ$ 之内, 为了保证车载平台变形值测量的精度与实时性, 我们选用了加拿大 MCS 公司的 SANG-D005FT 双轴倾角传感器, 其主要优点是: 精度高; 稳定性好; 输出数率高。技术参数如表 1 所示。

表 1 倾角传感器技术参数

测量范围	$\pm 5^\circ$
测量精度	0.003°
分辨率	0.0005°
通讯频率	40Hz

1.2 倾角传感器的安放

倾角传感器在车载经纬仪上安放位置的选择对测量车载平台变形的准确性至关重要。变形测量可以看成是平台绕固定点转动角的测量, 固定点应该在经纬仪垂直轴上, 因此将倾角传感器安装在经纬仪垂直轴轴心位置, 倾角传感器的输出值才是工作基准面和绝对水平面的夹角^[4]。如图 1 所示。

收稿日期: 2010-11-29; 修回日期: 2011-01-09。

基金项目: 国家 863 发展计划资助项目(2008AA7034320B)。

作者简介: 佟刚(1978-), 男, 辽宁人, 工学博士, 主要从事光电精密跟踪测量技术方向的研究。

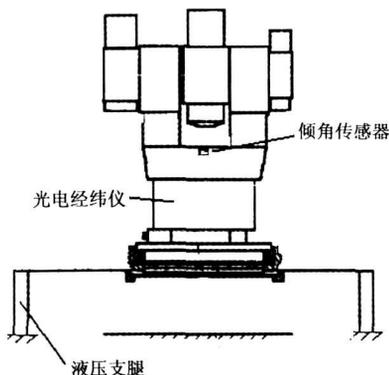


图 1 倾角传感器固定位置

安装时, 使倾角传感器底面与经纬仪垂直轴轴心延长线垂直, 与大地水平面平行。倾角传感器的 X 轴正向与主镜正镜水平时在同一垂直面内并平行, Y 轴正向与水平轴在同一垂直面内并平行, 并且倾角传感器的 X 轴正向始终与经纬仪的正北方向重合。

安装完毕后, 要对倾角传感器做初始化调试和输出值测试, 使倾角传感器 X 轴、Y 轴的输出值在经纬仪方位角 0 ~ 360° 范围内任一位置为零或接近于零。如图 2 所示。

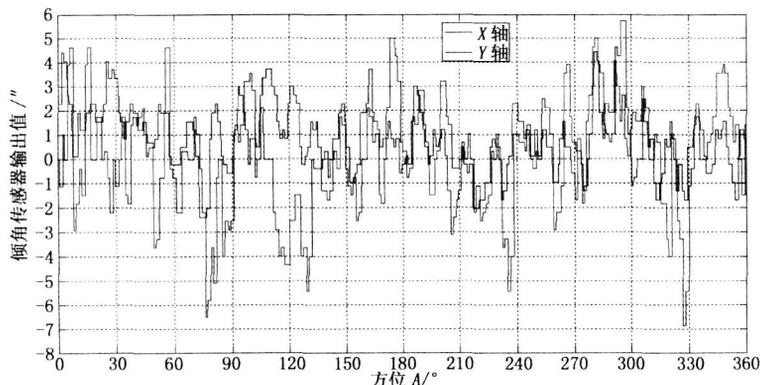


图 2 倾角传感器初始输出值

1.3 倾角传感器的数据采集

倾角传感器串口输出的接口格式是 RS232, 经数据采集系统接口电路转换成 TTL 信号, 接入单片机 MSP430F149, 数据采集系统将倾角传感器信息和编码器信息、时间信息一起送到车载经纬仪的数据通讯系统, 由数据通讯系统打包将这些信息发到控制计算机并存储。倾角传感器的工作频率选为 40Hz, 波特率为 9600。工作框图如图 3 所示。

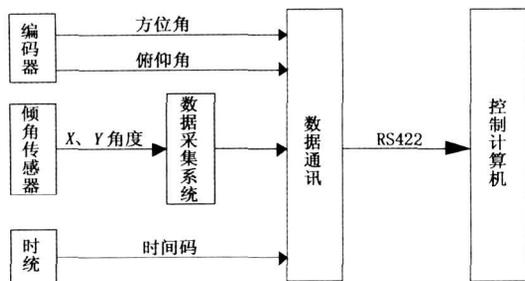


图 3 平台变形量数据采集系统

2 静态测角误差修正模型的建立

一般经纬仪都固定在车载平台的中心, 连接处的局部是绝

对刚性的, 车载平台变形时, 经纬仪的垂直轴与平台平面仍然是垂直的, 因此将平台变形归结到垂直轴倾斜, 即经纬仪垂直轴与铅垂线有一个夹角, 从而导致车载经纬仪在工作过程中有较大的测角误差。由此可知车载经纬仪静态测角误差的修正既是修正垂直轴倾斜造成的测角误差。根据垂直轴倾斜误差对经纬仪测角精度的影响公式^[5-6]:

$$\begin{cases} \Delta A_i = i \sin(A_H - A_M) \tan E_M \\ \Delta E_i = i \cos(A_H - A_M) \end{cases} \quad (1)$$

式中, ΔA_i 、 ΔE_i : 方位角、高低角测角误差; A_M 、 E_M 为目标实测编码器值, i 为垂直轴倾斜误差, A_H 为实际垂直轴线在水平面上的投影线与方位角 (即定向线) 之间的夹角, 称为垂直轴倾斜方向。如图 4 所示。

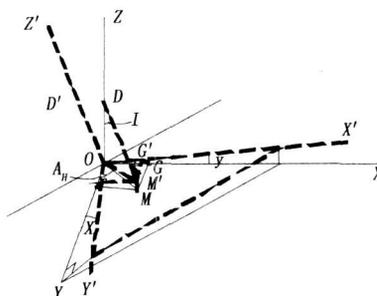


图 4 垂直轴倾斜误差及倾斜方向

$OXYZ$ 为 $O'X'Y'Z'$ 平移所得, 设在新坐标系 $OXYZ$ 中有一点 $D(0, 0, 1)$, D' 为平移前的位置, M 为 D 在 OXY 平面上的投影, M' 为 D' 在 $O'X'Y'$ 平面上的投影。则:

$$A_H = \arctan \frac{y}{x} = \arctan \frac{-\sin Y \cdot \cos X}{-\sin X} = \arctan(\sin Y \cdot \tan X) \quad (2)$$

$$I = 90 - \arctan \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \arctan \frac{\sqrt{\sin^2 X + \sin^2 Y \cos^2 X}}{\cos Y \cos X} \quad (3)$$

X 、 Y 为倾角仪输出值, A_H 、 I 值可通过上述公式求得, 这样因平台变形带来的测角误差 ΔA 、 ΔE 也可以求得, 因此, 只要确定每个时刻的 I 和 A_H 就能够计算出该时刻相对应的测角真值。

3 创建查找表

在计算机科学中, 查找表是用简单的查询操作替换数值计算的数据结构。查找表法是将一一对应的输入输出数据存放在表格中, 然后对于任意一个输入值, 通过查表的方法搜索匹配的数据对, 从而获得相应的输出值。查找表法精度较高, 通用性强, 能满足非线性转换的需要^[7]。

实现基于查找表的车载经纬仪静态测角误差的修正, 首先要建立查找表, 构建查找表可分为 3 个步骤:

- (1) 特征值采样: 将光电经纬仪方位 0~ 360° 按照一定的采样间隔获取车载平台的变形值。
- (2) 绘制曲线: 将特征值输入 Matlab, 绘制特征曲线。
- (3) 构造函数: 根据特征曲线, 构造映射函数。

3.1 特征值采样

基于经纬仪方位角 0~ 360° 对车载平台变形进行特征值采

样, 方位每隔 10° 记录一次平台变形值, 对每组平台变形值取均值, 特征值如表 2 所示。

表 2 查找表特征值

方位角(°) 变形(°)	0	10	20	30
X 轴	- 10 4	41. 7	29. 7	20. 6
Y 轴	113	26. 4	41. 3	61. 1
	40	50	60	70
X 轴	14. 1	9. 74	7. 42	6. 92
Y 轴	74. 2	86. 2	102	122
	80	90	100	110
X 轴	7. 92	10. 2	13. 7	17. 8
Y 轴	164	246	301	340
	120	130	140	150
X 轴	22. 5	27. 6	32. 7	37. 8
Y 轴	280	256	195	152
	160	170	180	190
X 轴	42. 2	46. 0	48. 9	50. 8
Y 轴	107	63. 2	18. 3	- 23. 3
	200	210	220	230
X 轴	51. 1	49. 9	46. 8	41. 5
Y 轴	- 60. 9	- 93. 4	- 119	- 138
	240	250	260	270
X 轴	33. 8	23. 6	10. 4	- 5. 86
Y 轴	- 147	- 146	- 134	- 108
	280	290	300	310
X 轴	- 25. 4	- 48. 7	- 75. 8	- 107
Y 轴	- 68. 5	- 12. 8	14. 6	38. 6
	320	330	340	350
X 轴	- 142	- 108	- 72. 4	- 30. 9
Y 轴	71. 4	90. 1	98. 2	106

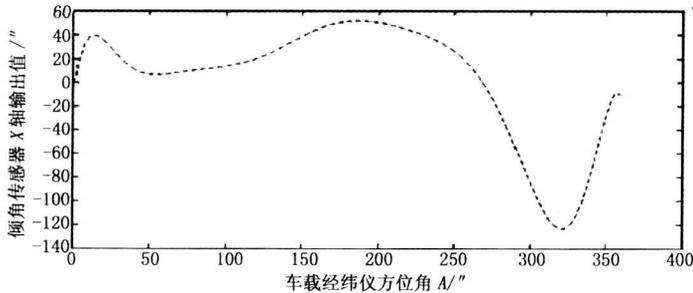


图 5 方位角与倾角传感器 X 轴输出值的关系

3.2 绘制曲线

采集完平台变形特征值后, 使用 Matlab 软件中曲线拟合功能绘制出曲线。曲线拟合是对实验数据进行分析时经常遇到

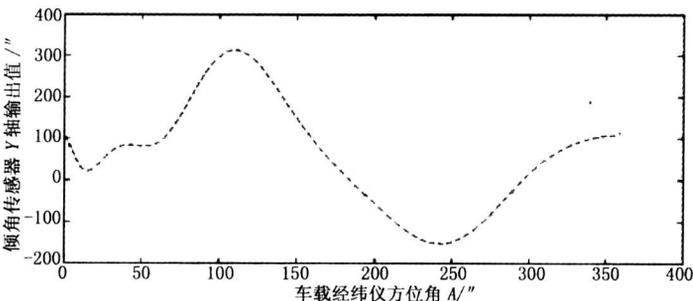


图 6 方位角与倾角传感器 Y 轴输出值的关系

的问题, 它指根据一组或多组实验数据绘制出一条可以用数学公式表示的曲线的过程。测量的特征数据点有时候在这条曲线上, 而有时候会无限接近但不在这条曲线上。评价绘制的曲线是否准确地表示了测量数据, 最常用的方法是看特征数据点与绘制曲线上的对应点之间的平方误差是否最小, 这种方法称为最小二乘曲线拟合。在实际应用中, 可以选择任何一组基本函数实现最小二乘曲线拟合, 最常用的方法是使用多项式。Matlab 提供了函数 polyfit 用于实现最小二乘多项式曲线拟合。

曲线拟合有很广泛的应用范围, 例如消除测量噪声、填充丢失的采样点、插值 (对采样点之间的数据估计)、外推 (对采样范围之外的数据进行估计)、数据的差分、数据的合成、求解某个基于离散数据的对象的速度轨迹 (一阶导数) 和加速度轨迹 (二阶导数) 等^[8]。

图 5 和图 6 是根据表 2 拟合出的车载经纬仪方位角与平台变形关系的曲线。

3.3 构建方程

实际应用中, 在进行曲线拟合时对多项式阶次的选择是任意的。从数学原理上讲, 两个点可以唯一定义一条直线 (或一阶多项式); 3 个点可以唯一定义一个二次曲线 (或二阶多项式), 依此类推, $n+1$ 个数据点可以唯一定义一个 n 次曲线 (或 n 阶多项式)。

依据以上原则, 根据每段数据的特点, 将方位角 0~ 360° 分成 4 个部分, 为 0~ 90°、90°~ 180°、180°~ 270°、270°~ 360°, 分别构造相应的映射函数。这样分段构建函数使得建立的查找表精度高, 更加接近实测值。

0~ 90° 方程为:

$$\begin{cases} \varphi = -1.3993 \times 10^{-8} \cdot A^6 + 4.2939 \times 10^{-6} \cdot A^5 - 5.1587 \times 10^{-4} \cdot A^4 + 0.030579 \cdot A^3 - 0.91222 \cdot A^2 + 11.608 \cdot A - 10.168 \\ \theta = 2.1222 \times 10^{-8} \cdot A^6 - 6.4069 \times 10^{-6} \cdot A^5 + 7.7381 \times 10^{-4} \cdot A^4 - 0.04658 \cdot A^3 + 1.4284 \cdot A^2 - 18.83 \cdot A + 112.48 \end{cases} \quad (4)$$

90°~ 180° 方程为:

$$\begin{cases} \varphi = -2.9167 \times 10^{-11} \cdot A^6 + 2.6394 \times 10^{-8} \cdot A^5 - 9.7389 \times 10^{-6} \cdot A^4 + 1.8352 \times 10^{-3} \cdot A^3 - 0.18277 \cdot A^2 + 9.3837 \cdot A - 193.12 \\ \theta = 1.6942 \times 10^{-8} \cdot A^6 - 1.3786 \times 10^{-5} \cdot A^5 + 4.6016 \times 10^{-3} \cdot A^4 - 0.80462 \cdot A^3 + 77.491 \cdot A^2 - 3885.4 \cdot A + 79308 \end{cases} \quad (5)$$

180°~ 270° 方程为:

$$\begin{cases} \varphi = -3.1944 \times 10^{-11} \cdot A^6 + 4.2843 \times 10^{-8} \cdot A^5 - 2.3873 \times 10^{-5} \cdot A^4 + 7.0338 \times 10^{-3} \cdot A^3 - 1.1596 \cdot A^2 + 102.28 \cdot A - 3759.4 \\ \theta = 2.3333 \times 10^{-10} \cdot A^6 - 3.1544 \times 10^{-7} \cdot A^5 + 1.7708 \times 10^{-4} \cdot A^4 - 0.052615 \cdot A^3 + 8.7308 \cdot A^2 - 772.93 \cdot A + 28902 \end{cases} \quad (6)$$

270°~ 360° 方程为:

$$\begin{cases} \varphi = 1.7322 \times 10^{-8} \cdot A^6 - 3.3437 \times 10^{-5} \cdot A^5 + 2.6799 \times 10^{-2} \cdot A^4 - 11.415 \cdot A^3 + 2725.4 \cdot A^2 - 3.4582 \cdot 10^5 \cdot A + 1.8221 \cdot 10^7 \\ \theta = 1.3779 \times 10^{-8} \cdot A^6 - 2.6022 \times 10^{-5} \cdot A^5 + 2.0435 \times 10^{-2} \cdot A^4 - 8.5412 \cdot A^3 + 2004.1 \cdot A^2 - 2.5026 \cdot 10^5 \cdot A + 1.2993 \cdot 10^7 \end{cases} \quad (7)$$

采用 Visual C++ 6.0 创建基于公式 (4)、(5)、(6)、(7) 的查找表, 能够以有限的测量数据估计无限的平台变形值, 同时便于控制计算机的访问, 提高数据处理速度。

4 实验验证

某型号的车载经纬仪静态测量值如表 3 所示。

表 3 车载经纬仪静态测量值

	方位(°)	高低(°)
水平光管正镜	101.548	359.767
水平光管倒镜	281.543	180.232
高角光管正镜	10.327	64.991
高角光管倒镜	190.322	115.020

将表 3 中测量值带入车载经纬仪静态测角精度

结算公式可得 $A_{精度} = 59' 21''$, $E_{精度} = 30' 2''$ 。

将表 3 中测量值带入查找表, 找出对应的平台变形值, 算出测角误差, 补偿后的值如表 4 所示。

表 4 修正后的测量值

	方位(°)	高低(°)
水平光管正镜	101.548	359.762
水平光管倒镜	281.543	180.235
高角光管正镜	10.338	64.985
高角光管倒镜	190.332	115.014

将表 4 中修正后的测量值带入车载经纬仪静态测角精度结算公式可得 $A_{精度} = 13' 22''$, $E_{精度} = 10' 2''$ 。

5 结论

利用倾角传感器测量车载平台变形值, 并以此为基础建立基于经纬仪方位角与倾角传感器输出值关系的查找表。将测量值带入车载经纬仪静态测角误差修正公式, 比较修正前后的测角精度, 可以看出这种修正方法能使车载经纬仪的静态测角精

度方位从原来的 $59' 21''$ 提高到 $13' 22''$, 高低从原来的 $30' 2''$ 提高到 $10' 2''$ 。另外还在其他车载经纬仪上做了相同的实验, 得到了同样的效果, 表明基于查找表的车载经纬仪静态测角误差修正公式和平台变形测量方法的正确性。为车载经纬仪在工程中的应用提供了理论支撑和技术参考。

参考文献:

[1] 佟 刚, 王 涛, 吴志勇, 等. 高精度倾角传感器在测量车载平台变形中的应用 [J]. 光学精密工程, 2010, 18 (6): 1347-1353.

[2] David. Parker, Frederic. W. Shelton, etal. Calibration and modeling of a dual-axis inclinometer [J]. Precision Engineering, 2005: 384-385.

[3] 吴 军, 周文祥, 雷金娥, 等. 基于 DSP 的数字倾角仪的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (11): 2337-2341.

[4] Kibrick R, Robins on L, Wallace V, et al. Tests of a precision tiltmeter system for measuring telescope position [J]. SPIE, 1998, 3351: 342-353.

[5] Gawronski W, Baher F, Quintero O. Azimuth Track Level Compensation to Reduce Blind Pointing Errors of the Deep Space Network Antennas [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2000, 42 (2): 28-38.

[6] 李 增, 吴志勇, 佟 刚, 等. 车载经纬仪的静态指向误差补偿 [J]. 光学精密工程, 2010, 16 (4): 924-927.

[7] Gawronski W, Baher F, Gama E. Track level compensation look-up table improves antenna pointing precision [J]. SPIE, 2002, 6273: 1-9.

[8] 朱仁峰. 精通 Matlab 7 [M]. 北京: 清华大学出版社. 2006.

(上接 1790 页)

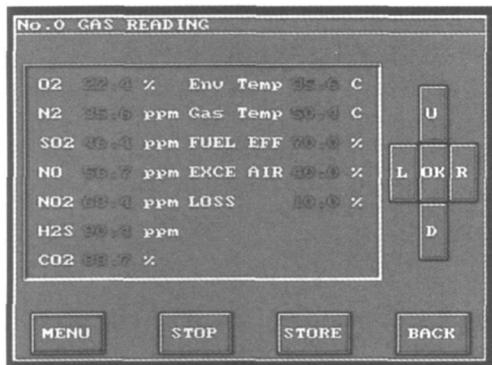


图 7 五种气体实时监测数据显示图

4 数据分析

将测量的气体浓度保存到移动设备中, 例如 U 盘等。通过计算机将 U 盘中的数据导入到数据库中进行分析, 绘制出每种气体的浓度曲线, 根据给定的标准浓度判断烟气中的气体成分是否过量, 是否对人体造成伤害, 为环保部门提供数据。本论文数据分析使用的数据库为 Access, 计算机显示以及曲线绘制使用 VB6.0 开发。通过 VB6.0 开发的前台操作界面来读取 Access 数据库中的数据, 绘制出各种气体的浓度曲线, 以及与标准大气气体浓度进行对比, 获取气体浓度超标的气体, 并将数据提供给环保部门, 为环保部门

对污染源排放企业进行整顿体整提供数据证明。

5 结论

基于 ARM 的便携式烟气分析仪是以 ARM 为核心的软硬件平台的嵌入式系统。通过使用 ARM7TDMI 微处理器、LCD 显示电路、微型光谱分析仪位搭建硬件平台, 使用 $\mu C/OS-II$ 、 $\mu C/GUI$ 搭建软件平台^[7]。通过运用紫外线光源光谱分析的方法, 克服了传统传感器使用寿命的缺陷; 同时由于不同气体对紫外线最佳吸收波段的差异, 可以同时多种气体进行测量并避免了交叉干扰。运用了著名的比尔定律作为计算气体浓度的算法, 计算出的气体浓度经测试精度控制在 2% 的精度范围内, 为环保部门检测空气中污染气体浓度提供可靠数据。

参考文献:

[1] 雷天学. 便携式烟气分析仪的现状 [J]. 环境监测管理与技术, 1998, (4): 19.

[2] 吴玉田, 方慧生. 褶合光谱分析法和 UV/Vis- 褶合光谱仪研究 [J]. 第二军医大学学报, 1995, (6): 504-506.

[3] 石宝松, 孙守红, 张 伟. CCD 在便携式光谱分析仪中的应用 [J]. 电子测量技术, 2010, (11): 84-86.

[4] 刘晓军, 杨中田, 刘政华. 基于 ARM7TDMI 核微处理器的嵌入式系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2005, 13 (11): 1282-1283.

[5] 陈涉岗. 探讨 Lambert- Beer 定律在试验中的应用形式 [J]. 计量学报, 1985, (1).

[6] 赵守福. $\mu C/OS-II$ 移植到 ARM7TDMI 详解 [Z]. 2009.

[7] 王 增. $\mu C/OS-II+ \mu C/GUI+ LPC2131$ 在嵌入式手持无线点菜系统中的应用 [J]. 科技情报开发经济, 2009, (5): 104-109.