

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.08.015

基于 MEMS 技术 FDM 3D 打印机自适应调平系统^{*}

张毅,王莎,李盼盼,王兴迪,周亚男

(西京学院机械工程学院,西安 710123)

摘要:针对熔融沉积成型(FDM)3D打印机在使用过程中出现的打印模型粘接不牢、翘曲变形和抽丝等问题,基于微电机系统(MEMS)技术设计了一种4点式自适应调平系统。该系统利用MEMS双轴倾角传感器测量打印平台的倾角以确定位于最高点的调节点,运用调平算法计算其它3个调节点的举升高度调节量,使用机电式调平机构采用逐高式调平方法实现打印平台的水平调节。研究表明,该系统具有原理简单,调平时间短,可靠性高等特点,能够满足3D打印机调平的性能指标要求,还可推广应用于其它各类调平系统。

关键词:微电机系统技术;熔融沉积;3D打印机;调平系统

中图分类号:TP391.73 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2017)08-0070-05

Self-Leveling System of FDM 3D Printer Based on MEMS Technology

Zhang Yi, Wang Sha, Li Panpan, Wang Xingdi, Zhou Yanan

(School of Mechanical Engineering, Xijing University, Xi'an 710123, China)

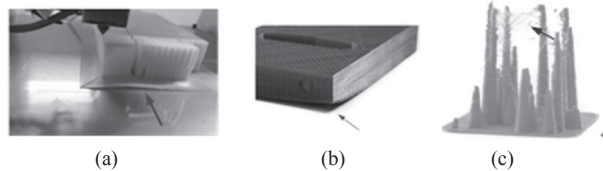
Abstract : In order to solve defects of the working process of fused deposition modeling (FDM) 3D printer, such as unstable bonding, warping and spinning, a four-point-type self-leveling system based on MEMS technology was established. Firstly, A MEMS dual-axis tilt sensor was used to measure the inclination of the printing platform in order to determine the adjustment point at the highest position. Secondly, a leveling algorithm was set up to calculate lift-height adjustments of the other three adjustment points. Finally, a leveling method using the adjustment point at the highest position as a benchmark was adopted to realize horizontal adjustment of the printing platform by an electro-mechanical leveling mechanism. The result shows that the leveling system has the advantages of simple principle, short leveling time, high reliability and so on, which can meet the performance requirements of the leveling of 3D printer, and can also be applied to other kinds of leveling systems.

Keywords : MEMS technology ; fused deposition modeling ; 3D printer ; leveling system

熔融沉积成型(FDM)3D打印机以热熔性丝状材料为原料,在电阻式加热器的作用下将丝状材料加热至熔融状态,喷头在打印平台上方设定的高度按照打印程序指定的轨迹运动,使得喷嘴将熔融态的材料涂覆在打印平台上,材料冷却后形成打印对象的第一层二维截面轮廓,之后打印平台按照设定值下降一个层厚,反复重复以上步骤直至整个打印对象完全成型^[1]。由于设备结构简单、易于操作、成型材料费用低廉、总体的性价比较高等特点,FDM 3D打印机在工业设计、航空航天、教育、汽车、医疗和土木工程等领域得到了广泛的应用^[2]。

现有的3D打印技术通常是以打印平台为基准零点,然后使喷头相对打印平台沿X、Y和Z轴方向做空间运动来完成立体构型,因此打印平台的水平度以及打印平台与喷头之间的距离对打印质量有着直接的影响,如果解决不好,则会出现熔融材料挤出困难、喷嘴刮蹭打印平台、打印材料与打印平台粘接

不牢、打印件底部翘曲、凌空抽丝等现象^[3-4],图1为不平整的打印平台导致的打印缺陷图。



a—粘接不牢; b—翘曲变形; c—抽丝

图1 不平整的打印平台导致的打印缺陷图

为了避免出现上述问题,现有的大多数FDM 3D打印机在打印平台上均设置人工调平装置,其示

^{*}陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2013JM8040),西京学院科研基金项目(XJ150109),西京学院教学改革研究项目(JGGH1601),西京学院研究生教育教学改革研究项目(XJYJ1606),西京学院研究生创新基金项目

联系人:张毅,博士,高级工程师,硕士研究生导师,主要从事计算机辅助设计、机械系统设计与应用、快速成型制造等方面的研究

稿日期:2017-05-13

意图如图 2 所示。将打印机喷头移动到调节点正上方,通过观察、手动或者利用工具旋转调平螺母,调节打印喷头与打印平台上各调节点的高度,完成调平工作。使用人工调节的方法找平,当调节其中一个点的时候,会对其它点产生影响,因此需要多次调节,过程繁琐,误差较大,不能保证打印平台上各调节点与打印喷头的距离一致;同时在打印过程中,由于 3D 打印机的振动或人为因素的影响,也会造成调平螺母的松动,进而影响打印质量,甚至造成产品报废^[5]。

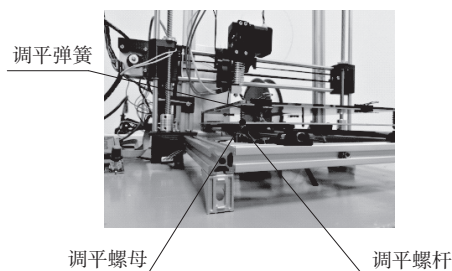


图 2 打印平台的人工调平装置

针对人工调平中存在的诸多问题,许多专家学者在打印平台的自动调平方面开展了大量的研究工作。谭跃刚等^[6]基于双发射差分式光电传感器原理,采用反距离加权插值(IDW)算法,提出了一种双发射差分式光电检测与补偿方法,用于工作台调平以提高其平面度。宗殿栋等^[7]修改现有桌面级 3D 打印机常用的开源 Marlin 固件,并将 Z 轴限位开关安装于固定支架上,设计了一种新型自动调平装置,可保证 Z 轴回零后打印头距离底板 0.1~0.2 mm。该方法需要保证 Z 轴传感器的初始位置,同时需要手动保证热板平整且水平。杨国锋等^[8]利用安装在支撑底板上的激光对准器,精确测量支撑底板的位移偏差,然后借助控制器驱动调节电机旋转,实现支撑底板的水平调节。针对大尺寸平台的调平问题,韩加军等^[9]利用拆分的方法将平台划分为若干个精度可靠的单元平台,并通过拼接结构将它们相互连接在一起。对每一个单元平台进行 3 点测距,依据测量数据采用升降机构调整平台的水平度,当将所有的单元平台调平后,则构成了一个整体调平的打印平台。

为了进一步解决 FDM 3D 打印机打印平台的调平问题,笔者研发一种基于微电机系统(MEMS)技术的 FDM 3D 打印机自适应调平系统,以实现 3D 打印机在工作准备阶段和打印过程中的自动调平,确保 3D 打印质量。

1 系统结构与功能

基于 MEMS 技术^[10]的 FDM 型 3D 打印机自适应调平系统主要由打印平台、MEMS 双轴倾角传感器、机电式调平装置、平台托架和控制装置等组成,自适应调平系统结构框架图如图 3 所示。

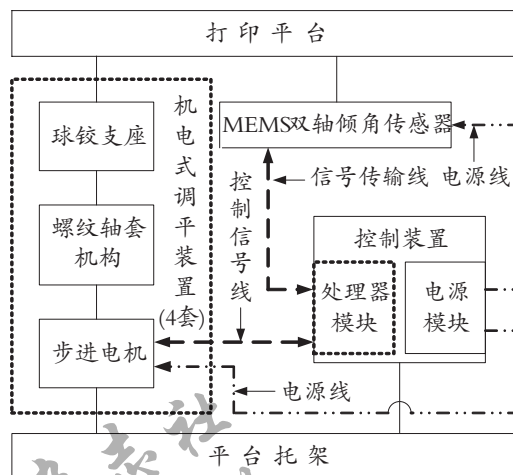


图 3 自适应调平系统结构框架

矩形打印平台用于承载打印的模型,在其 4 个角上分别设置有调节点,4 套机电式调平装置借助球铰支座在调节点的下方支撑打印平台。平台托架作为调平系统的基础,用于固定步进电机,确定机电式调平装置的支撑位置。平台托架能够在步进电机的驱动下,依据打印程序设定的层厚沿着 Z 轴移动,以实现成型。MEMS 双轴倾角传感器安装在打印平台的底侧,用于检测打印平台相对于水平面的倾角,并将检测信息输送到控制装置。控制装置基于逐高式调平技术^[11],利用调平算法计算出用于驱动机电式调平装置所属步进电机的脉冲信号数量。4 套机电式调平装置,依据控制装置输送的脉冲信号,分别在其所属步进电机的驱动下,利用螺纹轴套机构,调整打印平台 4 个调节点的高度,使得打印平台保持水平。控制装置还用于为机电式调平装置和 MEMS 双轴倾角传感器输送电能。

2 水平度测量与调平精度

打印平台相对于水平面的位置,会发生左右翻转和前后俯仰等变化,因此选用 MEMS 双轴倾角传感器来测量打印平台相对于水平面上相互垂直的两个方向的倾斜角,在此基础上计算出平台的水平度。

MEMS 双轴倾角传感器是一种基于惯性原理的加速度传感器,能够把 MCU, MEMS 加速度计、模数转换电路和通讯单元集成在一起,用于测量以水平面为参考平面的双轴倾角变化,并能直接输出

倾角等数据^[12]。

以高精度双轴倾角传感器为例,定义两个灵敏轴相对于基准平面的转角,图4为打印平台倾角测量装置图。将传感器固定在打印平台的下侧,要求其安装面与打印平台的底面平行,则传感器的两个灵敏轴相对于水平面的倾角即为打印平台相对于水平面上两个相互垂直的 X, Y 轴的倾角,见图4b,重力加速度 g 在两个灵敏轴 X', Y' 上的分量可表示为:

$$g_{x'} = g \cdot \sin(\alpha) \quad g_{y'} = g \cdot \sin(\beta) \quad (1)$$

式中: $g_{x'}, g_{y'}$ ——表示重力加速度 g 在 X', Y' 轴上的分量;

α, β ——表示 X', Y' 轴相对于水平面的倾角。

由公式(1)可得:

$$\alpha = \arcsin(g_{x'}/g) \quad \beta = \arcsin(g_{y'}/g) \quad (2)$$

当由传感器获取 α, β 值后,打印平台的水平度 φ 可按式(3)计算。

$$\varphi = \frac{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + 2\alpha \times \beta \times \cos \gamma}}{\sin \gamma} \quad (3)$$

式中: γ —— X', Y' 两轴的夹角。

在双轴倾角传感器中 X' 和 Y' 轴相互垂直,如果两个灵敏轴的控制精度为 $\pm\delta$,则打印平台的调平精度 A_L 为:

$$A_L \leq \sqrt{2} \delta \quad (4)$$

由公式(4)可知,打印平台的调平精度主要取决于传感器的精度。GEMAC高精度双轴倾角传感器的两个灵敏轴的控制精度为 $\pm 0.1^\circ$,因此FDM 3D打印机自适应调平系统的调平精度可达 0.14° 。

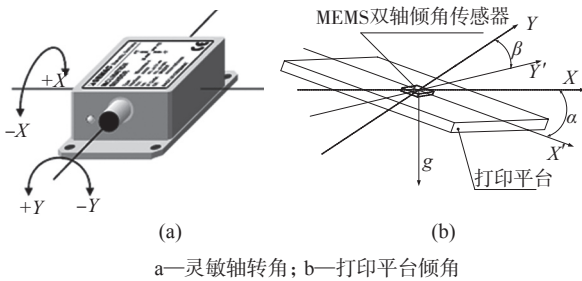


图4 打印平台倾角测量装置

3 调平控制方法

水平装置的调平方法,常见的有三点式、四点式、六点式,甚至更多点式的调平方式^[13-14]。针对FDM 3D打印机的框架式结构特点,选择采用四点式方法来调整打印平台。与三点式调平相比,四点式调平的稳定性好,抗倾覆能力强,调平精度也更高^[15]。

利用MEMS双轴倾角传感器采集的倾角信息,

可确定打印平台4个调节点中的最高点。MEMS双轴倾角传感器和4个调节点在打印平台上的位置如图5所示。依据测得的双轴倾角 α, β 的正负值信息,判断位于最高点的调节点的规则如表1所示。

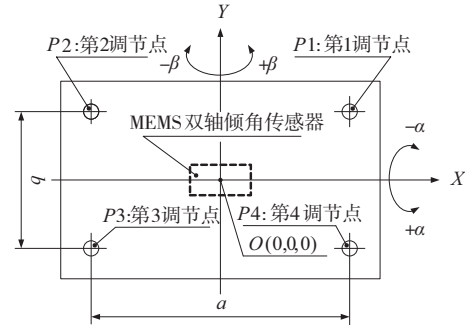


图5 打印平台倾角测量

表1 位于最高点的调节点的判断规则

序号	倾角 α, β 测量值的正负性	位于最高点的调节点
1	$\alpha > 0, \beta > 0$	第2调节点
2	$\alpha > 0, \beta < 0$	第1调节点
3	$\alpha < 0, \beta > 0$	第3调节点
4	$\alpha < 0, \beta < 0$	第4调节点

采用逐高式调平方法对打印平台进行调平,一旦确定位于最高点的调节点后,便可将其作为调平的基准点,计算其它3个调节点在与水平面垂直的 Z 轴上的举升高度调节量。

在打印平台上建立直角坐标系如图5所示,水平方向调节点与调节点的距离为 a ,垂直方面调节点与调节点的距离为 b ,则4个调节点的坐标分别为 $P_1(\frac{1}{2}a, \frac{1}{2}b, 0), P_2(-\frac{1}{2}a, \frac{1}{2}b, 0), P_3(-\frac{1}{2}a, -\frac{1}{2}b, 0)$ 和 $P_4(\frac{1}{2}a, -\frac{1}{2}b, 0)$,假设用MEMS双轴倾角传感器测量打印平台相对于 X, Y 轴的倾角测量值分别为 $\alpha < 0, \beta > 0$,则最高点为 P_3 调节点。以 P_3 调节点为基准点,则4个调节点在 Z 轴上的举升高度调节量 $Z_{p1}, Z_{p2}, Z_{p3}, Z_{p4}$ 可分别计算如下:

$$\begin{cases} Z_{p1} = a\beta + ba \\ Z_{p2} = ba \\ Z_{p3} = 0 \\ Z_{p4} = a\beta \end{cases} \quad (5)$$

控制装置的处理模块依据4个调节点的举升高度调节量,利用步进电机的步距角、螺纹轴套机构的螺距等数据,分别计算出在打印平台调平时需要给每一个步进电机所发送的步进脉冲信号的数量。步进电机在这些脉冲信号的作用下,驱动电机调平装置沿着 Z 轴提升处于低点的3个调节点的高

度,使其与位于最高点的调节点平齐,实现对打印平台调平的目的。

4 机电式调平装置

基于四点调平方法设计的机电式调平装置,采用矩形布置方式,分别置于平台托架上 4 个调节点正下方的位置。这种布置方式可使机电式调平装置的支撑力均匀作用于打印平台,有效地提高平台的抗颠覆能力,增强其稳定性。同时,机电式调平装置便于打印平台在任何位置调平后进行锁定,以保证平台的状态不变。

机电式调平装置由步进电机、螺纹轴套机构和球铰支座等组成,其示意图如图 6 所示。螺纹轴套由螺纹轴和螺纹套组成,其中螺纹轴与步进电机的输出轴连在一起,并随着步进电机的输出轴同步转动。螺纹套的一端同支撑打印平台的球铰支座连接在一起,另一端则借助螺纹结构同螺纹轴连接在一起并可绕着螺纹轴旋转。这种螺旋传动方式可将螺纹轴的旋转运动转化为螺纹套和球铰支座沿着 Z 轴的直线运动,从而实现调节点的逐高式调平。



图 6 机电式调平装置

步进电机的步距角是指控制装置每发送一个步进脉冲信号电机输出轴所转动的角度。在调平 P_i 调节点时,则控制装置需要发送的步进脉冲信号的数量(N_{ps})可计算如下:

$$N_{ps} = \frac{360Z_{pi}}{\theta P} \quad (6)$$

式中: N_{ps} ——步进脉冲信号的数量;

θ ——步进电机的步距角;

P ——螺纹轴套机构的螺距;

Z_{pi} ——机电式调平装置对应的调节点 P_i 的举升高度。

5 自适应调平

自适应调平是指 3D 打印机在工作准备阶段以及工作过程中,利用 MEMS 双轴倾角传感器采集打印平台的倾角信息,依据判断规则自动确定位于最高点的调节点,然后运用调平算法计算其它 3 个调节点的举升高度调节量,并在此基础上计算出对应

于 3 个调节点的步进电机各自调平所需的步进脉冲数量,最后在步进电机的驱动下机电式调平机构采用逐高式调平方法调整调节点的高度,以使打印平台始终处于最佳的水平状态。自适应调平系统的基本结构如图 7 所示。

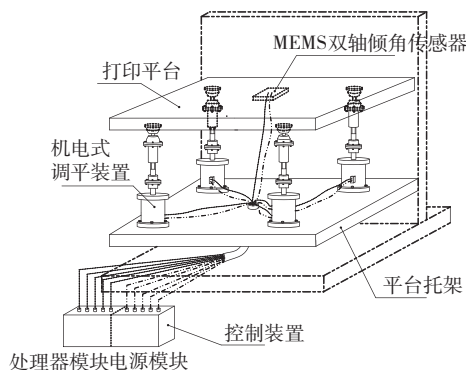


图 7 自适应调平系统的基本结构

打印平台的自适应调平分为两个阶段:(1)打印工作准备阶段的调平;(2)打印过程中的调平。在 3D 打印准备阶段,需要对打印平台进行初始调平。而在打印过程中,每完成一层的打印任务,打印平台都需要根据打印程序的指令,沿着 Z 轴沉降一个层厚的距离,然后开始打印下一层。为了确保每一层的打印质量,打印平台需要始终保持水平,因此在每一层打印结束后,都需要对打印平台进行一次水平度的检测和调平。基于 MEMS 技术的 FDM 3D 打印机的自适应调平流程如图 8 所示,其中的设定值指的是打印平台的调平精度要求。

6 结论

基于 MEMS 的 FDM 3D 打印机自适应调平系统,可在 3D 打印机的工作准备阶段以及打印过程中,利用 MEMS 双轴倾角传感器实时采集打印平台的水平度信息,使用判断规则确定位于最高点的调节点,采用逐高式 4 点调平技术,借助机电式调平装置实现打印平台的自适应调平。该系统可使打印平台始终保持水平,有效地解决了 FDM 3D 打印机在使用过程中容易出现的熔融材料挤出困难、喷嘴蹭打印平台、打印材料与打印平台粘接不牢、打印件底部翘曲、凌空抽丝等问题。

参考文献

- [1] Dudek P. FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements[J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2013, 58(4):1415-1418.
- [2] Shi Z, Peng Y, Wei W. Recent advance on fused deposition modeling[J]. Recent Patents on Mechanical Engineering, 2014, 7(2):122-130.

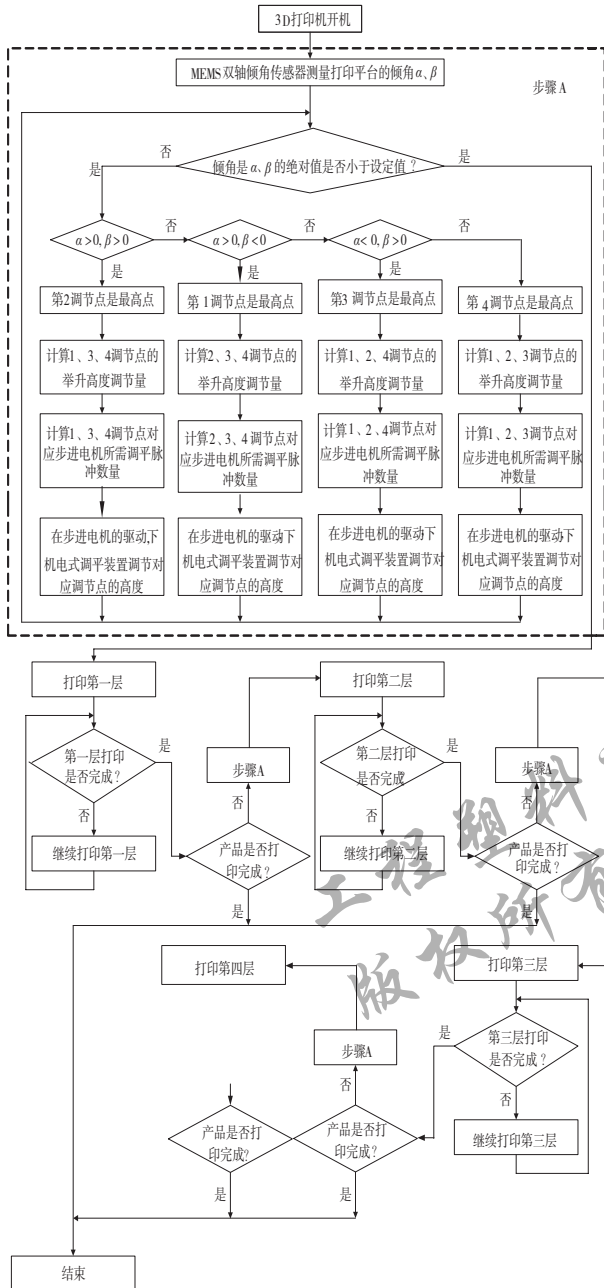


图8 自适应调平流程

- [3] 赵天婵, 黄海. 基于3D打印的熔融沉积快速成型工艺若干问题研究[J]. 机械工程师, 2016(4):22-23.
Zhao Tianchan, Huang Hai. Study on rapid prototyping process of fused deposition based on 3D printing[J]. Mechanical Engineer, 2016(4):22-23.
- [4] 邓佳文, 王冰, 沈峰, 等. 基于熔融挤压快速成型的3D打印关键技术发展现状[J]. 化工新型材料, 2016(10):36-38.
Deng Jiawen, Wang Bing, Shen Feng, et al. Development status of key technology of 3D printing based on fused deposition modeling[J]. New Chemical Materials, 2016(10):36-38.
- [5] 袁泽林, 方辉, 黄纪刚, 等. Kossel 3D 打印机精度影响因素及微调方法研究[J]. 制造技术与机床, 2016(4):21-27.

Yuan Zelin, Fang Hui, Huang Jigang, et al. Research on influence factors and adjusting method of the accuracy of Kossel 3D printer[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2016(4):21-27.

- [6] 谭跃刚, 孙君雨, 张帆. 3D 打印工作台平面度的差分式光电检测与补偿[J]. 武汉理工大学学报, 2016, 38(2):87-92.
Tan Yuegang, Sun Junyu, Zhang Fan. Differential photoelectric detection and compensation of dual emission for flatness of 3D printing work plane[J]. Journal of Wuhan University Technology, 2016, 38(2):87-92.
- [7] 宗殿栋, 汪地, 李卫成, 等. 基于 Marlin 固件桌面级 3D 打印机自动调平装置设计[J]. 工业控制计算机, 2016, 29(4):85-86, 88.
Zong Diandong, Wang Di, Li Weicheng, et al. Design of automatic leveling device based on marlin firmware desktop 3D printer[J]. Industrial Control Computer, 2016, 29(4):85-86, 88.
- [8] 杨国锋. 一种 3D 打印机底座调平装置:CN, 204936231 U[P]. 2016-01-06.
Yang Guofeng. 3D printer chassis levelling device:CN, 204936231 U[P]. 2016-01-06.
- [9] 韩加军, 李豹, 章赣阳, 等. 一种大尺寸熔融沉积 3D 打印机调平装置及其调平方法:中国, 104626582A[P]. 2015-05-20.
Han Jiajun, Li Bao, Zhang Ganyang, et al. Leveling device and leveling method of large-size fused deposition 3D printer:CN, 104626582A[P]. 2015-05-20.
- [10] Choudhary V, Iniewski K. Mems: Fundamental technology and applications[M]. Boca Raton: CRC Press, 2013.
- [11] 赵静一, 杨宇静, 康绍鹏, 等. 自行式液压平板车四点支撑“面追逐式”调平策略的研究与应用[J]. 机床与液压, 2015, 43(15):57-60.
Zhao Jingyi, Yang Yujing, Kang Shaopeng, et al. Research and application of four-point support “flat chasing style” leveling strategy on self-propelled hydraulic transporter[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015, 43(15):57-60.
- [12] Artese G, Perrelli M, Artese S, et al. POIS, a low cost tilt and position sensor: design and first tests[J]. Sensors, 2015, 15(5):10 806-10 824.
- [13] 王峰, 席广辉, 陶焱, 等. 基于 CAN 总线的八点机电式自动调平系统设计[J]. 电子世界, 2015(14):44-45.
Wang Feng, Xi Guanghui, Tao Ye, et al. Design of electromechanical eight-point automatic leveling system based on CAN bus[J]. Electronics World, 2015(14):44-45.
- [14] 张艳兵, 姚舜才, 任作新. PLC 控制的 4 点调平系统[J]. 华北工学院学报, 2004, 25(3):198-200.
Zhang Yanbing, Yao Shuncai, Ren Zuoxin. Four-point leveling system controlled by PLC[J]. Journal of North China Institute of technology, 2004, 25(3):198-200.
- [15] 李晓松, 蔡艳芳. 基于 CAN 总线的机电式四点自动调平系统设计与实现[J]. 火控雷达技术, 2010, 39(2):99-102.
Li Xiaosong, Cai Yanfang. Design and implementation of electromechanical four-point automatic leveling system based on CAN bus[J]. Fire Control Radar Technology, 2010, 39(2):99-102.