

可调低温环境压力传感器校准装置实现

李正兵, 李永斌, 田宝云, 王小丽

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 介绍了压力传感器超低温环境下现场校准装置原理及组成, 论述校准装置主要技术指标计算方法、温度调节控制算法, 结合液氧推进剂条件压力参数校准要求, 给出了试验现场压力传感器校准装置具体实现方案。通过低温传感器现场校准数据与不确定度计算, 验证了低温压力传感器校准装置的可行性和数据准确性。

关键词: 低温试验装置; 标准压力源; 传感器校准; 不确定度计算

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2016) 04-0103-07

Realization of calibration device for adjustable cryogenic pressure sensor

LI Zhengbing, LI Yongbin, TIAN Baoyun, WANG Xiaoli

(Xi'an Aerospace Propulsion Test Technique Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: The composition and principle of field calibration unit for the pressure sensor under cryogenic environment are introduced. The theoretical computation method and the temperature controlling algorithm of the main index of the calibration unit are also described. Combining the requirements of pressure parameter calibration for the liquid rocket engine, the certain realization scheme of the field calibration unit for pressure sensor is put forward. Finally, the feasibility and reliability of the calibration unit for the cryogenic pressure sensor is verified by computing the cryogenic pressure sensor calibration data and its uncertainty.

Keywords: cryogenic test apparatus; standard pressure source; sensor calibration; uncertainty calculation

0 引言

液氧/煤油低温推进剂发动机试验中, 压力参数测点最多, 是直接反映发动机及试验系统性能的关键参数。低温压力测量可以采用常温压力传

感器加引压管的方式或者直接采用低温压力传感器来测量。常温压力传感器连接引压导管用于低温液体压力测量时, 压力测量响应慢, 存在明显滞后, 无法获得压力的高频脉动值; 有时在测量低温流体的稳态压力时, 与实际压力值也会存在

收稿日期: 2016-02-15; 修回日期: 2016-06-13

基金项目: 国防技术基础科研项目(JSJC2013203A001)

作者简介: 李正兵 (1968—), 男, 研究员, 研究领域为发动机试验测控技术

差别。由于在不同温度条件下,受传感器敏感元件材料热胀冷缩、内部结构和制造工艺的影响,致使传感器产生零点漂移和灵敏度温度漂移。一般传感器难以在大范围内(室温变化到液氧温区)进行零点温漂和灵敏度温度补偿,因此对压力传感器的测量结果有较大影响。目前我国尚无低温压力传感器超低温校准装置,低温压力传感器均是在室温条件下校准,这与传感器实际使用工况相差甚远。据统计液氧低温环境给压力传感器性能产生影响,其引起的测量误差最大达3%。所以,开展超低温环境下压力传感器现场校准技术研究十分必要。

1 主要技术指标

- 1) 校准温度范围: 80~300 K;
- 2) 压力校准范围: 0.1~30 MPa;
- 3) 实验舱从 293 K 降低到 89 K 所需时间: ≤ 60 min;
- 4) 真空舱抽至 1 000 Pa 时间: ≤ 60 s;
- 5) 低温压力传感器现场校准装置不确定度: $U=0.3\%$, ($k=2$)。

2 低温压力传感器现场校准装置原理

2.1 低温压力传感器校准装置原理

低温压力传感器现场校准装置系统原理组成如图 1 所示,主要由压力传感器低温试验装置、标准压力源控制器、模块化配气台与工控机数据采集装置组成,利用试验液氮容器给低温试验装置杜瓦提供液氮。

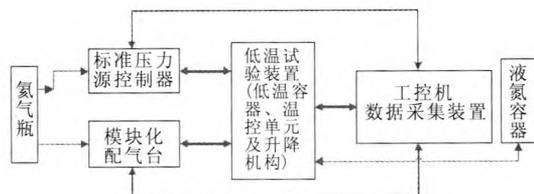


图 1 低温压力传感器现场校准装置原理图
Fig. 1 Principle diagram of field calibration unit for pressure sensor

当恒温舱内温度降低到需要低温时,启动抽

真空系统对真空舱夹层抽真空,工控机应用程序控制压力标准源分档输出待校压力值,采集低温压力传感器输出数据,按照最小二乘法计算校验数据,实现低温环境下压力传感器现场校准。通过分析不同温度下传感器校准性能数据,研究传感器特性在低温条件变化规律。

低温试验装置主要由低温容器、温控单元与升降机构组成。低温容器包括低温杜瓦、真空舱、恒温舱与汇流排等组成部分,其系统组成原理如图 2 所示。汇流排安装在恒温舱内,设置多个被校准压力传感器安装接口。

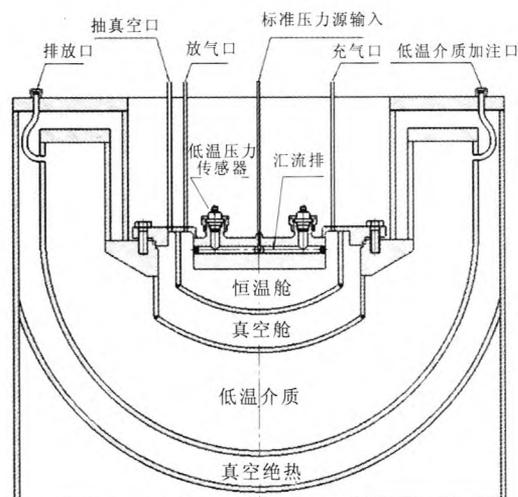


图 2 低温试验装置低温容器组成原理图
Fig. 2 Principle diagram of cryogenic vessel for cryogenic test apparatus

2.2 低温试验装置漏热计算

低温试验装置在 80 K 时漏热最大,恒温舱漏热主要有以下几方面:

2.2.1 低温杜瓦内外筒的固体热传导

低温条件下,物体热传导计算公式如下:

$$Q_1' = \frac{\lambda}{L} A (T_2 - T_1)$$

式中: λ 为不锈钢在 79 K 到 300 K 内的平均导热系数, $\lambda=12.6$ W/(m·k); A 为内外筒截面积,取 1.65×10^{-3} m²; T_2 为热壁温度,取 300 K; T_1 为冷壁温度,取 79 K; L 为颈管传热长度,取 400 mm。综上所述可得内外筒固体传导最大热流 $Q_1'=11.43$ W。

2.2.2 绝热中的气体传热

在自由分子状态下, 分子间互相碰撞几率低于分子与壁碰撞几率, 气体导热不再决定于气体分子间互相交换能量, 此时气体导热为

$$Q_2' = k \alpha \rho p (T_2 - T_1) \times A$$

式中: k 为导热系数 (剩余气体为空气时 $k=1.200$); α 为热适应系数, 取 1; p 为夹层真空度; T_2 为热壁温度; T_1 为冷壁温度; A 为冷壁表面积。

低温试验装置有两处残余气体漏热: 一处为内腔体向真空舱漏热, 分析计算得出 $q_2' = 24$ W; 一处为向真空夹层漏热: 据设计参数计算得出 $q_2'' = 2.18$ W; p 为夹层真空度 (5.5×10^{-3}); T_2 为热壁温度 (300 K); T_1 为冷壁温度 (80 K); A 为冷壁表面积 (1.5 m^2)。

综上计算可得气体传热量:

$$Q_2' = 24 + 2.18 = 26.18 \text{ W}$$

2.2.3 绝热中的辐射传热

试验低温杜瓦采用真空多层绝热结构, 在内胆上采用起皱的镀铝薄膜包扎。其辐射传热计算公式为

$$Q_3' = \frac{E \cdot \sigma \cdot A (T_2^4 - T_1^4)}{n+1}$$

式中: E 为两表面间的有效辐射比; A 为冷壁表面积, $A = 1.5 \text{ m}^2$; σ 为斯蒂藩-玻耳兹曼常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T_2 为热壁温度, $T_2 = 300 \text{ K}$; T_1 为冷壁温度, $T_1 = 77 \text{ K}$; n 为辐射屏层数, $n = 35$ 。

注: 有效辐射比 $E = \frac{1}{\frac{1}{e_1} + \frac{1}{e_2} - 1}$, e_1 表示不锈钢

材料在 77 K 时的发射率 0.048, e_2 表示不锈钢材料在 300 K 时的发射率 0.08, 可算得 $E = 0.03$ 。

综上可算得, 试验低温杜瓦向恒温室辐射漏热按上面公式计算

$$Q_3' = 2.12 \text{ W}$$

2.2.4 其他漏热

由于试验低温杜瓦的增压管道、真空阀门与接头等也存在漏热, 统一估算热损耗 Q_4' 约为 6 W。

总漏热 $Q = 11.43 + 26.18 + 2.12 + 6 = 45.67 \text{ W}$

每小时消耗液氮量: $V = 45.67 / 44.6 = 1.02 \text{ L}$

2.3 加热器功率选择

根据上述计算, 实验舱在 80 K 时, 热交换功率为 46 W, 考虑到升温需要, 将加热器功率设定为 60 W。为保证实验舱温度均匀性, 在实验舱外壁均等设置 4 个 15 瓦加热模块。

2.4 实验舱降温时间计算

初步设计实验舱与传感器共计质量 6 kg, 导热系数 $\lambda = 12.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 比热容 $500 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 表面换热系数为 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 从常温 293 K 降到 90 K 所需时间计算如下:

$$\tau = \frac{mc \cdot \Delta T}{h \lambda A} = \frac{6 \times 500 \times 203}{12.6 \times 10 \times 1.5} = 3222 \text{ s} \approx 53.7 \text{ min}$$

即经过约为 54 min 恒温室可以从室温降到 90 K。

2.5 真空舱抽真空时间计算

根据低温试验装置低压室容积设计值为 25 L, 当实验舱温度恒定时, 低压室工作压力为 $p_g = 100 \text{ kPa}$, 2X-1 型机械泵最低抽气能力为 10 Pa, 其抽速为 4 L/s。真空舱从 100 kPa 抽至 1 kPa 所需时间按下式计算:

$$t = K_q \frac{V}{S_p} \lg \frac{p_g}{p} = 2.3 \times \frac{25}{4} \times \lg \frac{100}{1} = 28.8 \text{ s}$$

3 低温压力传感器现场校准装置设计

3.1 低温试验装置

3.1.1 低温容器

压力传感器校准低温试验装置低温容器结构如图 3 所示。试验低温杜瓦主要用来存储液氮冷却恒温舱, 试验低温杜瓦采用高真空、多层超级绝热结构, 可维持试验低温恒温环境; 汇流排安装在恒温舱内, 其上部设计压力传感器接口; 恒温舱与吊装法兰焊接, 吊装法兰与低温试验装置上端法兰用橡胶圈密封连接; 低温杜瓦法兰上有液氮加注口和排放口, 真空舱端面设置抽空口、测温口 (监测试验低温杜瓦液氮液位) 与真空检测口等; 吊装法兰上有连接压力标准源接口、控温引线芯座、压力传感器引出 55 芯插座接口等。

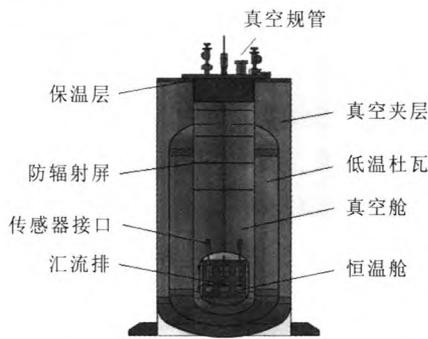


图3 压力传感器校准低温试验装置低温容器结构图
Fig. 3 Structure of cryogenic vessel for cryogenic pressure sensor calibration unit

3.1.2 温控系统

温控系统由 PLC 控制器、触摸屏、加热模块、温度传感器和抽真空单元等组成。PLC 控制器主要完成液氮液位检测、传感器校准恒温舱温度设定及温度恒定控制功能。触摸屏实现人机交互，用于显示低温容器参数及按键控制。加热模块用于汇流排加热升温。温度传感器用于液氮液位测量，当液氮浸没传感器探头时，温控系统触摸屏显示其液位高度。抽真空单元包括真空硅管与真空泵，当恒温舱冷却到设定温度时，通过触摸屏控制真空泵对真空舱抽真空。PLC 控制器根据汇流排实际温度和设定温度的关系，采用 PID 算法控制加热器的加热功率，实现恒温舱内压力传感器温度恒定。为保证恒温室具有良好的温度场均匀性，恒温室内部添加由紫铜制成的导热笼，并均等分布 4 个加热模块，确保汇流排温度场均匀。加热布局如图 4 所示。

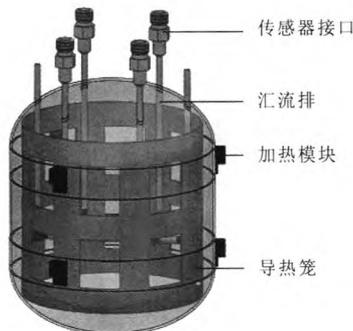


图4 恒温舱加热器结构图
Fig. 4 Structural diagram for heater of thermostatic tank

3.1.3 升降机构

升降机构包括直线光轴、螺母螺杆机构、整体龙门机架、移动机架等部件。直线光轴、螺杆螺母机构平行固定安装在整体龙门机架上，吊装法兰通过移动机架安装在直线光轴和螺母螺杆机构上，升降过程中，测控单元在最高与最低处通过行程开关自动关停升降，实现对升降机构的保护。

螺杆的上下端可以转动，固定在整体龙门机架的轴座里。移动机架和实验舱吊装法兰采用螺纹连接固定。工作时，使用电机转动螺杆，带动移动机架和吊装法兰上下移动。升降机构设有上下止点，行程 650 mm，运动到最高、最低点时行程传感器输出信号关断升降电机。实验舱升降采用两轴联动方式，保证升降运行更加平稳可靠。

3.2 标准压力源

标准压力源单元主要由数字压力控制器、增压泵、高压气体管路以及控制阀等组成。氦气瓶通过增压泵给压力控制器提供气源，压力控制器输出通过 $\Phi 4$ 高压软管连接到低温试验装置被检的压力传感器，标准压力源的工作原理图如图 5 所示。数字压力控制器与被校低温压力传感器组成一个完整的闭合系统。

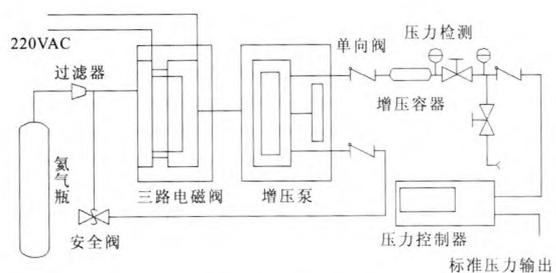


图5 标准压力源控制原理图
Fig. 5 Control principle diagram of standard pressure source

当气源压力低于被校传感器所需压力时，增压泵自动启动，通过数字压力控制器加压至设定值，压力稳定后，工控机采集系统读取被校传感器输出数据，再依次输出下一档压力值，直至完成整个校准过程。

3.3 模块化配气台

模块化配气台主要由控制器、触摸屏、减压阀、电磁阀、金属软管、压力表及管路连接件组成, 主要用于低温试验装置恒温舱充气、真空舱氮气置换, 同时为标准压力源提供氮气气源。控制器主要完成气源压力检测、减压器输出压力控制及电磁阀控制等功能。触摸屏完成配气台工艺流程显示、减压阀输出压力设置等人机交互功能。气源进入配气台后, 一路供应给标准压力源, 气源与标准压力源之间设置电磁阀, 控制氮气输出; 另一路供应配气减压系统, 气源经减压阀后分为两路, 一路用于低温试验装置恒温舱充气, 另一路用于真空舱充填置换。

3.4 工控机数据采集装置

工控机数据采集装置主要包括工控机、信调器与测量装置等部分。工控机主要完成压力标准源通信与控制、传感器输出信号采集与数据处理。信调器主要完成传感器输出微小信号放大与滤波, 传感器所需恒压源与恒流源输出, 并具有程控电压输入、并电阻及输入端短路、标准信号输出等功能。

测量装置具有热电偶和模拟电压信号采集功能, 采集通道配置与数据输出均通过因特网与工控机进行通信, 每个通道带有独立的信号调理通路, 可实现热电偶冷端自动补偿, 不同频率低通滤波, 每个信号通路提供完全的端对端自校准。采集过程中, 可以根据需要在本地或远程进行数据记录。

4 液氧条件低温压力传感器校准

4.1 传感器校准前准备

低温试验装置安装完成后, 利用配气台输出 0.2 MPa 低压氮气, 对低温压力传感器校准装置真空舱与恒温舱进行氮气置换 3 次后, 使用液氮转注罐对低温杜瓦加注液氮。

4.2 低温试验装置降温试验

设置恒温舱温度为 80 K, 液氮加注完成后开始计时, 恒温舱温度下降数据如表 1 所示, 当恒温舱温度到 90 K 和 80 K 时, 所需时间分别为 60 min 与 83 min。

表 1 恒温舱降温时间数据

Tab. 1 Cooling time data of constant temperature tank

时间	累积时间/ min	温度 1/K	温度 2/K	真空压力/ kPa
13:06	0	283.1	283.2	80
13:16	10	262.6	261.7	39
13:21	15	228.0	226.4	43
13:51	45	105.7	105.5	31.9
14:06	60	89.9	90.0	28
14:21	75	82.1	82.2	26
14:29	83	80.0	80.1	25

4.3 压力传感器低温校准

通过触摸屏设定校准温度值, 当恒温舱温度达到设定温度时, 利用压力标准源依次输出标准压力, 对传感器进行 3 遍 6 档进行校准, 测量装置采集传感器数据, 校准完成后, 计算并保存校验结果, 90 K 温度条件校准数据见表 2。

80~100 K 温度区间传感器斜率数据见表 3。从表 3 可以看出, 传感器斜率随着温度的升高而降低。

5 液氧低温压力校准装置不确定度评定

根据液氧低温压力传感器现场校准装置组成单元, 分析影响压力传感器现场校准不确定度原因, 确定影响低温压力现场校准结果的不确定度分量如下:

- 1) 标准压力源仪表引入的不确定度分量 u_1 ;
- 2) 标准压力源控制装置引入的不确定度分量 u_2 ;
- 3) 恒温舱温度变化引入的不确定度分量 u_3 ;
- 4) 系统泄露引入的不确定度分量 u_4 ;
- 5) 测量装置引入的不确定度分量 u_5 ;
- 6) 测量重复性引入的不确定度分量 u_6 。

表 2 90 K 温度条件下压力传感器现场校准数据
Tab.2 Field calibration data of pressure sensor at temperature of 90 K

CH1						CH2					
采集电压						采集电压					
0.350	1.254	2.181	3.108	4.035	4.965	0.350	1.238	2.139	3.045	3.952	4.866
0.350	1.258	2.186	3.113	4.040	4.965	0.354	1.241	2.148	3.055	3.962	4.866
0.350	1.256	2.183	3.110	4.037	4.964	0.354	1.240	2.147	3.057	3.963	4.866
0.348	1.256	2.185	3.112	4.038	4.964	0.352	1.241	2.149	3.055	3.961	4.866
0.348	1.255	2.180	3.108	4.035	4.964	0.351	1.238	2.149	3.053	3.960	4.866
0.346	1.258	2.184	3.111	4.038	4.964	0.352	1.250	2.148	3.054	3.961	4.866
物理量						物理量					
0	6	12	18	24	30	0	6	12	18	24	30
M(斜率)=6.492e+000			N(截距)=-2.757 3e+000			M(斜率)=6.629e+000			N(截距)=-2.379 3e+000		
L(非线性%)0.2%			H(滞后值%)0.08%			L(非线性%)0.18%			H(滞后值%)0.12%		
R(重复性%)0.09%			A(准确度%)0.23%			R(重复性%)0.18%			A(准确度%)0.28%		

表 3 不同温度条件下传感器斜率数据
Tab. 3 Slope data of sensor at different temperature

温度/K	校准量程/MPa	CH1		CH2	
		斜率	截距	斜率	截距
80	30	6.517 5	-2.531 1	6.655 3	-2.325 8
90	30	6.492 2	-2.757 8	6.629 3	-2.379 2
100	30	6.474 5	-2.700 9	6.631 2	-2.301 1
110	30	6.477 7	-2.763 3	6.622 4	-2.425 7
120	30	6.472 6	-2.778 1	6.613 6	-2.393 9
130	30	6.468 1	-2.769 2	6.602 3	-2.331 3
140	30	6.464 3	-2.507 6	6.603 4	-2.250 5
150	30	6.455 5	-2.456 7	6.605 2	-2.280 2
160	30	6.446 8	-2.4823	6.601 3	-2.292 5

根据国家计量技术规范 JJF1509.1 《测量不确定度评定与表示》，液氧低温压力现场校准装置不确定度分量计算如下：

- 1) 标准压力源仪表引入的不确定度分量 u_1
压力标准源精度 0.01%FS，按照 B 类均匀分

布评定方法，取包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，标准不确定度为

$$u_1 = \frac{0.01\%}{\sqrt{3}} = 0.006\%$$

- 2) 标准压力源控制装置温度变化引入的不

确定度分量 u_2

根据标准压力源给定指标, 标准不确定度为

$$u_2=0.02\%$$

3) 环境温度变化引入的不确定度分量 u_3

通过仿真计算与实验, 实验舱温度变化 0.5 K, 引起的校准装置不确定度

$$u_3=0.03\%$$

4) 系统泄露引入的不确定度分量 u_4

检定装置在正常校准过程中, 系统存在微小的泄漏量, 但不影响系统正常使用, 装置可以稳定的控制压力和测量, 估值为

$$u_4=0.01\%$$

5) 采集装置引入的不确定度分量 u_5

数据采集装置测量误差为 0.1%, 按照 B 类均匀分布评定方法, 取包含因子 $k=\sqrt{3}$, 标准不确定度

$$u_5=\frac{0.1\%}{\sqrt{3}}=0.06\%$$

6) 测量装置重复性引入的不确定度分量 u_6

根据标准不确定度的 A 类评定, 使用低温压力现场校准装置进行重复测量 n 次, 测量结果的算术平均值

$$\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^n x_k$$

测量值与算术平均值的残差

$$v_k=x_k-\bar{x}$$

方差

$$s(x_k)=\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n v_k^2}{n-1}}=\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_k-\bar{x})^2}{n-1}}$$

测量结果标准不确定度

$$u_6=\frac{s(x_k)}{\sqrt{n}}=\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_k-\bar{x})^2}{n(n-1)}}=0.1$$

以上各不确定度分量相互独立, 故

$$u_c=\sqrt{u_1^2+u_2^2+u_3^2+u_4^2+u_5^2+u_6^2}=0.125$$

$$U=k \cdot u_c=2 \times 0.125=0.25$$

通过对低温压力现场校准装置的不确定度分析统计计算, 该装置的扩展不确定度为 0.3%, ($k=2$)。

6 结论

利用液氮冷却方式研制完成的低温压力传感器校准装置, 多次用于低温压力传感器现场校准试验, 传感器校准装置低温温度连续可调, 校准过程便捷, 系统稳定, 安全可靠, 技术指标满足要求, 已成功应用于低温推进剂发动机及组合件试验。

参考文献:

- [1] 赵万明. 液氧/煤油发动机试车主要参数测量方法研究[J]. 火箭推进, 2006, 32(5):51-56.
ZHAO Wanming. Research of measuring method in the LOX/kerosene engine tests [J]. Journal of rocket propulsion, 2006, 32(5): 51-56.
- [2] 胡立荣. 低温压力传感器校准系统研制与应用[J]. 低温工程, 2013 (4): 60-64.
- [3] 李正兵. 发动机内部压力传感器自动校准技术[J]. 火箭推进, 2011(6): 67-69.
LI Zhengbing. Automatic calibration technology of pressure sensor in rocket engine[J]. Journal of rocket propulsion, 2011, 37(6): 67-69.
- [4] 李彤. 涡轮泵水力试验系统扭矩现场校准技术研究[J]. 火箭推进, 2015(3): 73-79.
LI Tong. Field calibration technology for torque of turbopump hydraulic test system[J]. Journal of rocket propulsion, 2015, 41(3): 73-79.
- [5] 陈国邦. 低温传热与设备 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [6] 马小军. 可编程控制器及其应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 2007.

(编辑: 王建喜)