

温包型温度传感器的工质选择

王战生

(航空工业太原航空仪表有限公司, 太原 030006)

摘要:为研究温包型温度传感器在航空发动机和飞机控制系统中的应用,对温包型温度传感器的充填工质进行了分析。根据工质的热力学特性及传感器的使用温度范围,将温包分为气态、液态、蒸汽态3种类型,阐述了不同类别工质的物理特性与温度变化的关系,汇集了常见工质的主要特性参数,归纳了根据传感器用途选择工质的原则。结果表明:气态工质的计算符合范德华方程;液态工质则按照体积膨胀计算;蒸汽态工质可按照项-谭方程进行设计计算。根据以上方法设计的不同温包已在多种发动机和飞机附件中得到应用。

关键词:温包;工质;温度传感器;控制系统;航空发动机

中图分类号: V233.7+31

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2018.03.014

Working Medium Choice for Thermometer Bulb Type Sensor

WANG Zhan-sheng

(AVIC Taiyuan Aero-instruments Co., Ltd. Taiyuan, China, 030006)

Abstract: In order to study the application of thermometer bulb type temperature sensor in aeroengine and aircraft control system, the working medium filled in thermometer bulb type temperature sensor was analyzed. According to the thermodynamic properties of the working medium and temperature range of the sensor, the temperature bulb is divided into three types: gas, liquid and vapour. The relationship between the physical properties and temperature variation of different types of working medium is described, and the main characteristics parameters of common working medium are collected, then the principle of choosing the working medium according to the sensor application are summarized. The results shows that the calculation of gas medium is consistent with Van der Waals equation; the liquid medium is calculated according to the volume expansion; and the vapour medium can be designed and calculated according to Xiang-Tan equation. Different thermometer bulbs designed according to the above method has been applied in many other aeroengine and aircraft accessories.

Key words: temperature bulb; working medium; temperature sensor; control system; aeroengine

0 引言

温包型温度传感器属于物敏型机械式温度敏感元件,其工作原理是利用某些物质受热膨胀,将温度的变化转化为位移量或力的变化而输出。温包型温度传感器具有工作可靠耐用、抗干扰、动态特性良好、安装简便等优点,在制冷空调、工业控制领域得到了广泛应用,在航空发动机及飞机控制系统中主要用来测量压气机进口的空气总温、燃油和滑油温度等^[1]。

“温包”来源于对“bulb”的音译和意译的结合,其典型应用有以下2种形式:(1)将传感器的输出通过仪表指示被测温度时,构成压力式(或膨胀式)温度计;(2)将输出变形通过执行机构(如阀门、开关等)对被测温度进行反馈调节时,构成温度调节器或温度控制器^[2]。

本文对温包型温度传感器内部充填的工作介质进行了研究,根据工质的热力学特性及传感器的使用温度范围,将其分为气态、液态、蒸汽态3种类型,阐

收稿日期:2017-09-16 基金项目:航空动力基础科研项目资助

作者简介:王战生(1970),男,研究员级高级工程师,主要从事航空发动机控制系统中膜盒、波纹管等敏感元件的技术研究工作;E-mail: 13503542098@163.com。

引用格式:王战生.温包型温度传感器的工质选择[J].航空发动机,2018,44(3):81-85. WANG Zhansheng. Working medium choice for thermometer bulb type sensor[J]. Aeroengine, 2018, 44(3): 81-85.

述了温度变化导致的工质物理状态参数变化规律及其在传感器设计计算中的一般原则^[9]。其中蒸汽态工质的计算涉及流体的饱和蒸汽压方程,属于流体热物理化学研究的热点范畴。介绍了国内理论物理学界近年来在该领域取得的国际领先的研究成果,首次将该成果用于温包型温度传感器的工业应用领域。文中范例均来源于作者所在单位的产品实例,可供有关使用和研究部门借鉴参考。

1 温包工质的分类与计算

根据传感器外型结构的不同,可分为整体式温包和远传式温包,如图1所示。整体式温包由波纹管或焊接波纹管与两端接头零件组合焊接而成,内腔充灌液体工质后通过接头零件(或毛细管)封严,成为封闭的液囊^[4]。构成温包的常见弹性元件包括膜盒、波纹管、焊接波纹管、包端管等。远传式温包中的弹性元件也被称为动力件,动力件和感受被测温度的液囊(温包)之间通过导管连接并构成封闭的内腔,其内填充工质。在工作时温包被置于测量区域感受所测温度,工质的膨胀通过导管传递至动力件后输出。

根据工质在工作温度区间所处的形态,可将温包分为以下3种类型。

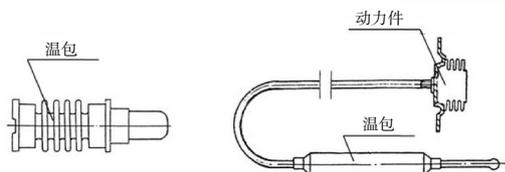


图1 温包型温度传感器的典型结构

1.1 气态(G态)温包

气态温包工作温度区间位于工质临界温度以上,内腔压力 P 高于工质临界压力 P_c ,并随工作温度 T 升高而升高,弹性元件在 P 作用下产生变形输出位移。 P 、 T 符合范德华(Van der Waals)方程

$$(P+a \cdot V_m^{-2})(V_m-b)=R \cdot T \quad (1)$$

式(1)是在理想气体状态方程 $PV=nRT$ 的基础上,引入分子吸引力修正系数 a 及分子容积修正系数 b 而得来的, a 和 b 统称为范德华常量,其值由试验测定。

式(1)可改写为

$$P=R \cdot T(V_m-b)^{-1}-a \cdot V_m^{-2} \quad (2)$$

式中: $V_m=V \cdot n^{-1}$,为摩尔体积(也称为比容),与气体种类无关,其中 V 为容器容积, n 为气体摩尔数(即充入

气体的物质的量,与充气压力相关),当弹性元件的工作变形引起的温包容积的变化量远小于温包初始容积时,可视 V 为常数, V_m 也即为常数; $R=8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,为摩尔气体常量。

代入式(2), P 、 T 呈现为线性关系

$$P=8.314T(V_m-b)^{-1}-a \cdot V_m^{-2} \quad (3)$$

常用气态工质的特性参数见表1。

表1 常用气态工质特性参数

工质	熔点 / K	沸点 / K	临界温度 / K	临界压力 / MPa	$a / (\text{Pa} \cdot \text{m}^6 \cdot \text{mol}^{-2})$	$b / (10^{-4} \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1})$
氦	1.3	4.2	5.2	0.23	0.03457	0.237
氢	14.0	20.3	32.9	1.3	0.02472	0.266
氟	24.6	27.2	44.4	2.7	0.02138	0.171
氮	63.1	77.3	126.0	3.4	0.14084	0.391
氧	54.8	90.2	154.7	5.1	0.13780	0.318
甲烷	88.7	111.7	191.1	4.6	0.22828	0.427
氨	195.0	239.7	405.3	11.5	0.42253	0.371
水	273.2	373.2	647.3	22.4	0.55364	0.305

气态温包的应用案例如图2所示。某型发动机的进口温度传感器即采用内部充氦气的温包敏感元件,内部充氦压力为0.16 MPa,最高耐压为1.8 MPa^[7]。进口温度传感器将发动机的进气温度信号转换为液压信号,通过燃油调节器、喷口调节器自动调节发动机的供油量和喷口面积,满足发动机在全包线范围的正常工作。

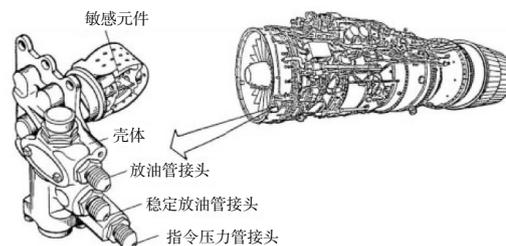


图2 某发动机的温度传感器

1.2 蒸汽态(V态)温包

蒸汽态温包工作温度区间位于工质沸点以上、临界温度以下,温包内腔压力对应于工质的饱和蒸汽压力,弹性元件在饱和蒸汽压的作用下产生变形输出位移。

1个多世纪以来,各国学者提出了数十种蒸汽压方程,著名的有Clapeyron、Antonine、Wagner方程等,

但存在精度低、适用范围窄、参数繁杂使用不便等不足^[8-13]。中国学者在 20 世纪末提出的项 - 谭方程,因具有高精度、普适性等物理数学特点而广受瞩目

$$\ln P_r = (a_0 + a_1 \tau^{1.89} + a_2 \tau^{5.67}) \ln T_r \quad (4)$$

式中: $T_r = T/T_c$, 为对比温度, T_c 为临界温度; $P_r = P/P_c$, 为对比压力, P_c 为临界压力; $\tau = 1 - T_r$ 。

常用工质的项 - 谭蒸汽压方程的参数和临界参数见表 2^[5]。

表 2 常用工质的项 - 谭蒸汽压方程的参数和临界参数

工质	T_c / K	P_c / kPa	a_0	a_1	a_2
氯	416.90	7972	6.2303934	7.4768028	16.8668022
二氧化碳	304.14	7377	6.8459954	10.2023639	9.3596926
甲烷	190.55	4598	5.8730454	6.2328014	13.0721578
乙烷	305.33	4872	6.3071766	7.4704213	17.0958137
丙烷	369.80	4239	6.5058050	8.6776247	18.0116214
丁烷	425.20	3800	6.8169203	8.7767181	23.7680492
苯	561.75	4875	6.8274055	9.3424149	24.1741504
R11	471.15	4487	6.8364825	8.4543343	22.0910034
R12	385.00	4140	6.7078209	8.7711563	18.4986419
R22	369.30	4988	6.8810015	9.4782534	20.3845615
R32	351.56	5828	7.2578385	9.4490681	21.9283714
R113	487.48	3410	7.0347939	9.9693718	22.8604393
R123	456.87	3665	7.1775141	10.4138793	23.9151554
R134	391.80	4635	7.2538010	10.6227800	24.9711600
R142b	410.29	4041	6.9320800	9.5676460	22.2139900
R134a	374.18	4056	7.4153543	10.9633932	23.8982505
R152a	386.41	4516	7.1844580	9.9360630	22.0584600
甲醇	512.64	8097	8.6744747	13.6874294	9.9776945
乙醇	513.92	6148	8.7832966	17.7977390	-0.5206533
乙酸	592.71	5786	8.3844595	9.7876320	29.3230476
氟化乙烯	375.31	5027	6.9000082	9.1229134	16.2281970
五氟 - 氯丙酮	410.65	2877	7.4567761	11.6200160	26.5720901
六氟 - 丙酮	357.25	2841	7.5193353	12.1870098	24.4911994
丙酮	508.10	4696	7.3772659	10.0870218	23.4207172
乙醚	466.74	3637	7.1713705	10.3994998	24.3123378
2- 甲基丁烷	460.95	3390	6.9268680	9.2696428	22.4417114
1- 正戊醇	588.20	3910	8.1858768	18.9232025	53.7686767
环己烷	553.64	4075	6.8125544	9.4143829	23.2468109
五氟 - 甲苯	534.50	2710	8.1846466	12.7024135	32.9377937
甲苯	591.72	4105	7.1260095	9.8132839	24.3763809
乙苯	617.12	3605	7.3136659	10.4335994	26.1998558
邻 - 二甲苯	630.25	3733	7.3749661	10.3818836	25.9129962
间 - 二甲苯	616.97	3536	7.4402280	10.6410732	25.2128753
对 - 二甲苯	616.15	3511	7.4417310	10.3619289	26.6721134

常用氟利昂类工质的饱和蒸汽压 P 与温度 T 的对应关系如图 3 所示。该图是根据对比态定律及热力学相似理论计算绘制,并经试验验证。从图中可见, P 与 T 成非线性关系, P 增加比 T 快得多。所以, V 态工质温包在工作中的上限温度需严格控制,以防温度过高导致传感器超压而破坏失效。

通常也称采用 G、V 态工质的温包为压力式温包。蒸汽态温包的应用案例如图 4 所示。某直升机

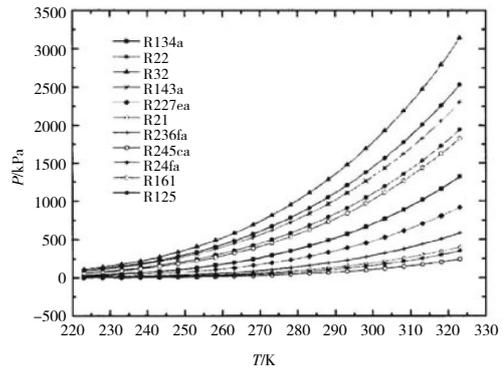
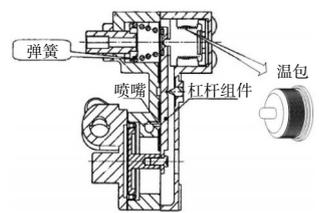


图 3 饱和蒸汽压 - 温度曲线

附件的进气道防冰组件中的温包感受环境温度的变化,环境温度升高时 (-20 ~ 13 °C), 温包膨胀而克服弹簧的压缩力,带动



杠杆组件围绕支点逆时针摆动,增加喷嘴与杠杆组件间的距离,达到调节下游压力的作用;反之亦然。

1.3 液态(L 态)温包

液态温包工作温度区间位于工质熔点以上、沸点以下,弹性元件在工质的体积膨胀作用下产生变形输出位移,其体积增量 ΔV 与 $t/^\circ C$ 的关系为

$$\Delta V = V_0(at + bt^2) \quad (5)$$

式中: V_0 为 0 °C 时的体积。

或者按下式计算

$$\Delta V = \alpha V_0 \Delta T \quad (6)$$

式中: α 为平均体膨胀系数。

而弹性元件的位移 S 、有效面积 A_0 与 ΔV 的关系为

$$S \cdot A_0 = \Delta V \quad (7)$$

由式(5)、(7)可直接得出温包的温度 - 位移关系为线性关系

$$S = V_0(at + bt^2)/A_0 \quad (8)$$

常用液态工质的体积膨胀系数见表 3。通常称采用 L 态工质的温包为(体)膨胀式温包。由式(8)可知,(体)膨胀式温包的位移与有效面积成反比。所以在容积尺寸相同的情况下,为了提高温包的灵敏度,应尽量减小弹性元件的有效面积。

液态温包的应用较为广泛(如图 5 所示),普遍用于航空发动机附件中的进气总温、燃油温度等测量,测

表3 常用液态工质特性参数

序号	液体名称	$\alpha / \times 10^3$ (20 °C)	温度范围 / °C	$a / \times 10^3$	$b / \times 10^6$
1	甲醇	1.259	-38 ~ 70	1.18557	1.56493
2	乙醇	1.12	0 ~ 78	1.04139	0.7863
3	乙二醇	0.638	11 ~ 136	0.5657	1.7074
4	正丙醇	0.956	0 ~ 94	0.7743	4.9689
5	异丙醇	1.094	0 ~ 83	1.04345	0.44303
6	异戊醇	1.04	-70 ~ 100		
7	乙醚	1.656	-15 ~ 38	1.51324	2.35918
8	正丙醚	1.354	0 ~ 88	1.2132	3.9318
9	异丙醚	1.452	0 ~ 67	1.2872	4.2923
10	石油醚	2.26	-190 ~ 0	1.46	1.60
11	正戊醚	1.11	-50 ~ 150		
12	丙酮	1.487	0 ~ 54	1.324	3.809
13	苯	1.237	11 ~ 81	1.17626	1.27755
14	甲苯	1.099	0 ~ 100	1.028	1.779
15	对甲基异丙苯	1.0	-68 ~ 150		
16	正戊烷	1.656	-190 ~ 30	1.50697	3.435
17	异戊烷	1.680	0 ~ 27	1.46834	5.09626
18	异己烷	1.445	0 ~ 55	1.37022	0.97649
19	氯化乙烯	1.161	-28 ~ 84	1.11893	1.0469
20	甲酸甲酯	1.563	0 ~ 10	1.35824	10.538
21	丙酸甲酯	1.304	0 ~ 74	1.3049	-1.3275
22	乙酸乙酯	1.389	-36 ~ 72	1.2585	2.95688
23	硝酸乙酯	1.299	9 ~ 72	1.1290	4.7915
24	二甲基硅油	0.96	-50 ~ 200		
25	苯甲基硅油	0.96	-50 ~ 200		
26	煤油	0.96	-50 ~ 100		

温区间为 $-50 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 。^[6]

2 温包工质的选取

工质与构成温包的弹性元件、导管等载体零件的材料之间应该互相呈现惰性、互不溶解、不发生化学反应,无腐蚀或应力腐蚀倾向,以确保温包在寿命期内可靠工作。工质在工作温度区间应性状稳定,不应分解失效。

当温包设定的工作温度区间对应多种形态工质可供选择时,应选择L态工质,制成膨胀式温包。L态工质应满足以下要求:(1)有较大的体膨胀系数、并在感温区段内线性度好;(2)有较小的密度与黏度,在低



图5 各型膨胀式温包温度传感器

温时有较好的流动性。膨胀式温包易于实现线性的温度-位移特性,同时便于匹配弹性元件。仅需控制弹性元件有效面积一致,即可保证温包性能的一致,在批量生产中更易于实现稳定生产。膨胀式温包的位移与有效面积成反比,所以在容积尺寸确定的情况下,采用有效面积小的、细长的波纹管类弹性元件作为温包载体,有助于提高温包的灵敏度。当工作条件一致时,由于液体体积压缩弹性模量远大于气体,膨胀式温包具有比压力式温包更大的力输出特性,可以用于直接驱动执行机构。

V态温包则一般作为温度开关使用,适用于工作区间温差较小、灵敏度要求高的场合。G态温包要求弹性元件满足预定的压力-位移特性,同时工作压力较高,对系统提出了较高的耐压要求。压力式温包的输出特性易于受环境气压、温度变化的影响,带来温包特性误差。选择G、V态工质时,应考虑环境气压和温度变化对温包特性的影响,必要时予以补偿。

在选用远传式结构时,无论充灌何种工质,设计时都应尽可能减小动力件的腔容积,以减小动力件所处环境温度变化对温包特性的附加影响。对温包测量精度要求较高时,可以通过增加结构尺寸与动力件一致的温度补偿器、与动力件配对使用的方式,来补偿和消除环境温度变化造成的附加误差。

对温包动态性能即时间常数有较高要求时,应优先选择导热系数较大、比热容小的工质和载体材料(见表4),并且尽可能减小温包体积。

表4 不同工质的适用范围^[1]

性能	液态	气态	蒸汽态
下限温度 /K	220	70	220
上限温度 /K	470	820	630
时间常数 /s	2 ~ 9	0.5 ~ 4	1 ~ 7
输入温度与输出位移关系	线性	线性	非线性

3 温包工质的充注

充注工质时,除了常规的高效、无泄漏、无污染等基本工艺要求外,普遍采用真空充注工艺,以尽可能将温包内腔空气排出后被工质所充满。否则在膨胀式温包内将由于气体的存在而产生非线性误差。在充注膨胀式温包前,应对硅油类工质进行加温和真空等脱水、脱气处理,尽可能排除溶解在工质中的气体杂质的影响^[14]。

V 态温包在工作过程中,存在着感应温度转化成压力传递的过程。只有当感温系统中气液共存时,才能够完成这一转换^[15]。为使得感温系统能够正常工作,感温包内的充注液的状态必须是气液两相,感温系统的压力始终为饱和蒸汽压力。

4 结束语

虽然温包类温度传感器的工作原理简单,但每种温包都是综合了热物理-弹性力学原理的小微复杂机械系统,在批量生产时实现集中一致的温度-位移特性和达到较高的合格率并不容易。研制时首先进行计算仿真,设计方案在投产前还需通过试验批的验证。在温包结构设计上应设置工艺调节环节、预留调整余量,以便根据试验结果进行微调修正,快速迭代形成满足性能要求的技术方案。

参考文献:

- [1] 樊思齐. 航空发动机控制 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008: 114-115.
FAN Siqi. Aeroengine control[M]. Xi'an: Northwest Industry University Press, 2008: 114-115. (in Chinese)
- [2] 陈儿同, 袁曙明. 冰箱化霜温控开关温度特性全自动测试台[J]. 上海机械学院学报, 1994, 16(3): 91-94.
CHEN Ertong, YUAN Shuming. Automatic device for testing temperature properties of defrosting switches in refrigerators [J]. Journal of Shanghai Institute of Mechanical Engineering, 1994, 16(3): 91-94. (in Chinese)
- [3] 陈六平, 童叶翔. 物理化学[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 9-10.
CHEN Liuping, TONG Yexiang. Physical chemistry[M]. Beijing: Science Press, 2011: 9-10. (in Chinese)
- [4] 梁燕波, 童景山. HFC 类工质饱和液密度、蒸汽压和汽化热的推算 [J]. 天然气化工, 2005, 30(5): 72-75.
LIANG Yanbo, TONG Jingshan. Prediction of saturated densities, vapour pressures and vaporization-heats for HFC working substances [J]. Natural Gas Chemical, 2005, 30(5): 72-75. (in Chinese)
- [5] 项红卫. 流体的热物理化学性质——对应态原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 170-182
XIANG Hongwei. Thermal and physical chemistry of fluids: corresponding states principle and application [M]. Beijing: Science Press, 2003: 170-182. (in Chinese)
- [6] 孙希任. 航空传感器实用手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1995: 302-303.
SUN Xiren. Aviation sensor utility manual [M]. Beijing: China Machine Press, 1995: 302-303. (in Chinese)
- [7] 黄朝辉. 航空发动机燃油控制组件典型零组件失效与预防 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 156-157.
HUANG Chaohui. Fuel control system of aeroengine failure and prevention of typical components [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015: 156-157 (in Chinese)
- [8] 刘战国, 周齐国, 余岚. 饱和水蒸气密度与压力及温度的回归方程[J]. 暖通空调, 2001, 31(4): 100-101.
LIU Zhanguo, ZHOU Qiguo, YU Lan. Density-pressure and density-temperature regression equations of saturated vapour [J]. HV&AC, 2001, 31(4): 100-101. (in Chinese)
- [9] 吴义彬. 饱和蒸汽压下单元液体的物态方程及其应用 [J]. 江西科学, 2010, 28(5): 593-603.
WU Yibin. State equation of the unitary liquid and its application under saturated vapor pressure [J]. Jiangxi Science, 2010, 28(5): 593-603. (in Chinese)
- [10] 毕小平, 刘成俊, 葛新. 论蒸汽压的若干问题[J]. 河北师范大学学报(自然科学版), 1997, 21(4): 412-414.
BI Xiaoping, LIU Chengjun, GE Xin. Several problems about pressure [J]. Journal of HeBei Normal University (Nature Science), 1997, 21(4): 412-414. (in Chinese)
- [11] 刘国杰, 史济斌, 朱良. 液体的饱和蒸气压与内压[J]. 化学学报, 1991, 49: 1071-1077.
LIU Guojie, SHI Jibin, ZHU Liang. Saturated vapor pressure and internal pressure for liquids [J]. Journal of Chemistry, 1991, 49: 1071-1077. (in Chinese)
- [12] 杨建一, 郑学明, 于奕峰. 液体饱和蒸气压概念在化工过程中的应用[J]. 河北轻化工学院学报, 1996, 39(17): 55-58.
YANG Jianyi, ZHENG Xueming, YU Yifeng. Application of the concept of saturation vapour pressure to the process of chemical engineering [J]. Journal of HEBEI Institute of Chemical Technology and Light Industry, 1996, 39(17): 55-58. (in Chinese)
- [13] 肖德航. 饱和蒸汽压与液面曲率关系的微观解释[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2004, 9(3): 59-61.
XIAO Dehang. Micro-interpretation of relationship between saturated vapour pressure and curvature of liquid surface [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2004, 9(3): 59-61. (in Chinese)
- [14] 张声良, 滕敏, 屈晓声, 等. 传感器的真空循环注油法[J]. 传感器技术, 1997, 16(3): 16-18.
ZHANG Shenglian, TENG Min, QU Xiaosheng, et al. Injecting oil method of vacuum circulation on sensor [J]. Journal of Transducer Technology, 1997, 16(3): 16-18. (in Chinese)
- [15] 徐博, 江挺候, 陈江平, 等. 热力膨胀阀感温元件特性实验研究[J]. 制冷学报, 2011, 32(2): 30-34.
XU Bo, JING Tinghou, CHEN Jiangping, et al. Study on temperature sensing bulb of thermal expansion valve [J]. Journal of Refrigeration, 2011, 32(2): 30-34. (in Chinese)

(编辑: 张宝玲)