

建筑科学研究报告

REPORT OF BUILDING RESEARCH

1981

No. 10

热敏电阻恒温风速计的研制

Research and Fabrication of Thermister
Constant Temperature Anemometer

中国建筑科学研究院
CHINESE ACADEMY OF BUILDING RESEARCH

提 要

HF-1 和 HF-2 型便携式热敏电阻恒温风速计采用直径为 0.4 毫米的珠状热敏电阻作为测速探头, 其电路比较简单, 精度较高, 量程宽, 线性刻度 (二型), 性能稳定, 耗电省, 使用方便。

本文介绍了这两种风速计的工作原理和简易风温自动补偿电路的设计方法, 并讨论了探头的互换问题。对探头的分散性, 提出按探头的工作温度相同和耗散系数比相近这两个条件进行互换的观点。最后还对热敏电阻阻值飘移所产生的误差进行理论分析, 并提出解决办法。

目 录

一、概况	(2)
二、恒温风速计的热敏电阻探头	(5)
(一) 测头结构	(5)
(二) MF-52型、MF-12-0.25型热敏电阻的特性	(5)
三、HF-1型恒温风速计	(10)
(一) HF-1型恒温风速计电路	(10)
(二) 风温自动补偿和探头的互换	(12)
(三) 风速计性能试验	(18)
四、HF-2型恒温风速计	(23)
(一) 仪表线路和工作原理	(23)
(二) 风温补偿	(26)
(三) 线化处理	(29)
(四) 仪表环境温度补偿	(32)
(五) 互换处理	(34)
(六) 仪表的校准	(36)
(七) 仪表误差	(37)
(八) 微风速的测量	(41)
〔附录〕	(43)
〔1〕 (8)式成立的必要条件推导	(43)
〔2〕 公式(13)的推导	(43)
〔3〕 公式(15)的推导	(43)
〔4〕 风速计误差换算	(44)
〔5〕 QDF型与HF型风速计主要性能比较表	(46)
参考文献	(46)

Research and Fabrication of Thermistor Constant

Temperature Anemometer

Chen Kemin

Lu Zishan

Xue Jabin

Wang Yingmei

Abstract

Type HF-1 and Type HF-2 portable thermistor constant temperature anemometers use bead thermistors of 0.4mm diameter as probes. The advantages of these anemometers are simplification of electrical circuit, high accuracy, wide range, steady performance, less consumption of electrical energy, convenience of usage and linear graduation (Type HF-2).

The operating principle of these two anemometers, the design method of simple electrical circuit for automatic air temperature compensation and the interchangeability of probes are described. It is believed that interchange of probes is possible provided they have the same operating temperature and similar ratios of heat dissipation constant. Finally, the errors caused by drift of the value of thermistor resistance are analysed and some methods for solving drift problem are recommended.

热敏电阻恒温风速计的研制

空气调节研究所

陈克敏 卢紫珊 薛家滨 王英梅

一、概 况

空气调节中气流速度的测量是很重要的,气流速度范围大体介于0.05米/秒~20米/秒之间,室内气流速度介于0.05米/秒~0.5米/秒,这是气流速度测量的主要方面,也是评价气流组织好坏的主要参数之一;美国的ADPI指标就是由温度和气流速度组成的,这里的气流速度指的是时间平均流速。

测量平均流速的仪表,国外已有多种商品,如德国的Fuess热线风速计、美国的Anemostat风速计、荷兰的德耳特TNO探头等。我国北京环境保护仪器厂生产的QDF型热线风速计也是同类仪表。它们应用恒电流原理,线路简单,属于传统仪表。

由于集成电路的普及,原来比较复杂的恒温原理已开始得到应用,如日本KANOMAX风速计,应用恒温原理,采用集成电路,具有温度补偿,在精度和扩大量程方面改进了传统仪表;另一方面,自1973年西德W. Finkelstein提出,鉴于人体的皮肤能感觉每秒一次左右的气流速度变化,舒适风速应由平均风速、频率和振幅三项指标综合评定后,已开始出现新型风速计,这些新型风速计的特点是具有快速响应,温度自动补偿和可外接数据处理装置,以及应用恒温原理和采用半导体热敏电阻探头等。

考虑到我国仍采用平均风速作为评定指标,为了把恒温原理应用到空调风速测量中,以改进传统仪表,并为今后研制新型风速计准备条件,开展了恒温风速计的研制。

恒温风速计实质上是一个自动调节系统,在不同风速下使处于不同热平衡状态的探头工作温度基本维持不变,即阻值基本恒定,于是,探头所消耗的功率等于在该风速下传递给周围空气的热量。

热平衡关系式^[1]如下所示:

$$\xi = f(V) = \frac{I_R^2 R_t}{t - t_s} \quad (1)$$

其中: ξ ——耗散系数,毫瓦/度;

$$\xi = A + BV^n$$

A, B, n——随探头的热参数、形状、尺寸、结构和气流特性所决定的常数;

V——气流速度,米/秒;

t_s ——气流温度,°C;

I_R ——热敏电阻上通过的电流,毫安;

t——热敏电阻的工作温度,°C;

R_t ——对应于工作温度t的热敏电阻的阻值,千欧。

探头消耗电能随风速不同而不同,所以流经探头的电流和加在探头上的电压以及与之相应的电量,皆可以作为风速的测量。

恒温风速计的工作原理是恒温原理。其与恒流原理比较，恒流原理敏感元件工作于变温、变阻状态，这种状态容易使敏感元件疲劳，影响工作稳定性。恒温原理则与此不同，敏感元件基本上工作在恒温状态，稳定性好。

恒温原理比恒流原理对变化的风速有较好的频率响应。这是因为在恒温原理中，热头的温度基本恒定，而不是象恒流原理那样热头经常处于变温状态，因此克服了频率变换时热惰性影响造成的频率响应降低现象。

另外恒温原理可以有利于实现线性化和热头的温度补偿，测量范围广。

综上所述，恒温法比恒流法具有很多优点。此外，近年来由于固体器件放大器的发展，高增益、低噪声的放大器比较容易实现，从而打开了恒温风速计制作的方便之门，所以在国内恒流原理的风速计逐渐被恒温原理所取代。

1978年底，我们完成了三台恒温风速计样机，其中两台为 HF-1 型（见图甲），一台为 HF-2 型（见图乙）。它们具有以下特点：

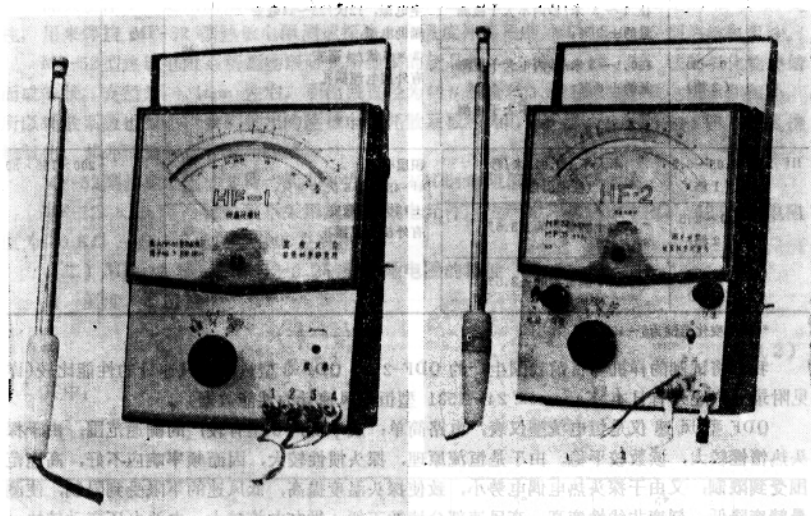


图 甲

图 乙

1. 采用半导体珠状热敏电阻作为测温探头，并对热敏电阻的阻值漂移和参数的分散性进行研究分析，提出计算方法，采取补偿和具体措施。

2. 具有精确的温度补偿，在 $5 \sim 40^{\circ}\text{C}$ 范围内，补偿误差为 $\pm 1\%$ 左右。除了应用常用的补偿原理之外，还提出同时补偿因空气物理性质改变所引起的影响的补偿方法。结合空调特点，采用“零”风速校准可以达到精确的温度补偿。

3. 具有各有特色的分立元件线路和固体组件线路两种方案，可供选择。分立元件方案具有稳定性好，抗干扰性强，操作简便，价格便宜，它的测温探头的引线采用三线制，组件方案结构紧凑、可靠，且采用二极管线性化，该方案测温指示表盘为线性刻度。

4. 根据目前我国要求量测平均风速的现状，设计了积分电路，便于读取平均风速。仅

表稍作改革，即可快速测量和记录瞬时风速，以及外接其它装置。

5. 测速用的 MF-52 型珠状热敏电阻探头系新疆物理研究所的新品种，其优点是体积小，粒径只有 0.4 毫米左右，对气流的阻挡作用小，热惯性小，反应快，耗散系数低，约 0.1 毫瓦/°C，耗电少，加热电流约为 5~15 毫安，可用普通电池供电，灵敏度低，探头工作在 130°C 时，阻值约为 300 欧姆，阻值变化约为 5 欧姆/°C，它比一般热线风速计要高几十倍，例如日本 KANOMAX 6141 型便携式恒温风速计所用热线为铂丝，探头阻值约 20 欧姆，阻值变化约为 0.08 欧姆/°C，因此对放大器要求可以降低，有利于简化电路，降低成本。

它们的分项性能如下：

仪 表 型 号	量 程 (米/秒)	误 差*	供 电	刻 度	重 量 (公斤)	尺 寸 (毫米)
			电 压/电 流			
HF-1 型	0~3 (1 档)	在 0.1~1 米/秒内，不大于被 测量的 ±4%； 在 1~3 米/秒内不大于被测 量的 ±1%。	积层电池 4F-45-2 型 6 伏共 4 只。 主电源：12 伏/23~44 毫安 辅助电源： 2×6 伏/4 毫安 有外接电源插孔	非 线 性	2	200×155×80
	0~20 (2 档)	在 0.1~20 米/秒内不大于被测 量的 ±6%； 在 2~20 米/秒内不大于被测 量的 ±1%。				
HF-2 型	0.05~0.5 (1 档)	不大于 ±0.01 米/秒 (按恒温计)	积层电池 4F-45-2 型 6 伏共 4 只。 主 12 伏/23 毫安 有外接电源插孔	非 线 性	3	200×155×80
	0~2.5 (2 档)	不大于被测量的 ±3.5%				
	0~20 (3 档)	不大于被测量的 ±3.5%				

* 阻值变化范围为 5~40%

我们将试制的样机与目前我国生产的 QDF-2、QDF-3 型热敏电阻风速计的性能比较（详见附录三，还有日本 KANOMAX 24-1531 型恒温风速计的性能数据）。

QDF 型风速计是恒电流型仪表，电路简单，成本低，3 型有较广的测速范围，由于探头热惯性较大，读数较平稳。由于是恒流原理，探头惯性较大，因而频率响应不好，高速范围受到限制；又由于探头热电偶电势小，致使探头温度提高，低风速的下限受到限制，使测量精度降低；刻度非线性度高，高风速部分读数不便；供电电流较大，电池电压变动较快，手动调准较频繁。

HF-1 型和 HF-2 型则是恒温型仪表，使用热敏电阻探头，且具有风温补偿线路，它优于 QDF 型的性能是频率响应好，稍加改装则可测量瞬时风速；高速范围从原理上不受限制，可进一步扩大；探头工作温度低，直径细小，精度高，能测至 0.03 米/秒的低速；HF-1 型刻度非线性度有所改善，HF-2 型 2 档 3 档为线性指示，高速部分读数方便准确，HF-1 型供电电流小，零点不用经常调整，使用方便；HF-2 型供电电流比 QDF 型稍小，手动调准操作的频繁度稍好。

恒温型仪表虽较之恒流型电路复杂，但 HF-1 型立足于分立元件，成本便宜，除表头外，线路元件低于 40 元。HF-2 型使用固体器件，且具有线性器及相应的仪表温度补偿线路，所以造价较高，除表头外，线路元件约 160 元。

二、恒温风速计的热敏电阻探头

(一) 测头结构

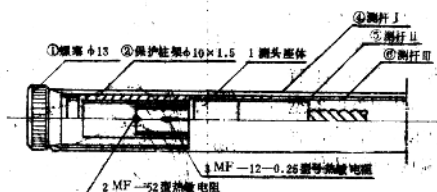


图 1

测头的结构如上图所示。测杆采用北京环保仪器厂 QDF-2 A 型热球式电风速计测杆。

测头座体 1 是用四氟乙稀棒制做成筒，耐高温，绝缘好。座体上面固定四根磷铜支柱，用来焊接 MF-52 型热敏电阻测温探头 2 和温度补偿用的 MF-12-0.25 型热敏电阻 3。

MF-52 型热敏电阻系新疆物理研究所提供的新品种，它由锰、镍、铜、铁的氧化物烧结而成珠状，直径为 0.4mm 左右，引出线直径为 40μ 铂金丝。由于珠状热敏电阻体积很小，所以耗散系数也很小，我们采用的热敏电阻耗散系数约为 0.1 mw/°C 左右。为了防止空气接触氧化，其外面涂一层玻璃粉烧结。

MF-52 型热敏电阻的 B 值约为 3000 左右。25°C 时电阻值为 1 KΩ 左右。

MF-12-0.25 型热敏电阻系采用武汉无线电元件厂生产的片状热敏电阻，在 35°C 时电阻值为 10 KΩ 左右。B 值约为 3000 左右。

(二) MF-52 型、MF-12-0.25 型热敏电阻的特性

1. 温度-电阻特性

$$R_t = R_{25} e^{B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{25}} \right)} \quad (2)$$

其中：

R_t ——元件在 $t^\circ\text{C}$ 时的电阻值，欧；

表 1

测头号 热敏 电阻 测头温度(°C)	2°		4°		5°		6°		备 注
	R 测	R 补	R 测	R 补	R 测	R 补	R 测	R 补	
	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	(Ω)	
0	4.0645 _±	26.380 _±	3.9610 _±	26.079 _±	4.0435 _±	26.180 _±	3.720 _±	24.634 _±	
25	2.0646 _±	10.334 _±	2.0425 _±	10.309 _±	2.1127 _±	10.301 _±	1.8925 _±	10.233 _±	
30.1	1.8057 _±	8.5236 _±	1.7895 _±	8.6144 _±	1.8385 _±	8.5203 _±	1.6571 _±	8.5630 _±	
70	835.14	2.7414 _±	744.72	2.4699 _±	796.33	2.24354 _±	685.13	2.46353 _±	
100	490.56	1.170861 _±	429.13	1.052 _±	488.76	914.3	398.43	1.05555 _±	
130	308.03	532.47	267.8	433.6	299.47	407.37	244.63	437.32	实际 129.91°C

R_{25} ——元件在 25°C 时的电阻值，欧；

T —— $t^{\circ}\text{C} + 273$ ，度（绝对温度）

T_{25} —— $25^{\circ}\text{C} + 273$ ，度（绝对温度）

B ——元件的温度常数， K 。

为了求得准确的热敏电阻温度特性，我们把 MF-52 型、MF-12-0.25 型热敏电阻放在冰点槽和恒温油槽中，直接测出 $0 \sim 130^{\circ}\text{C}$ 不同温度下的阻值。

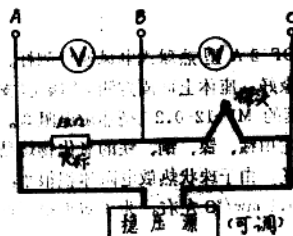


图 2

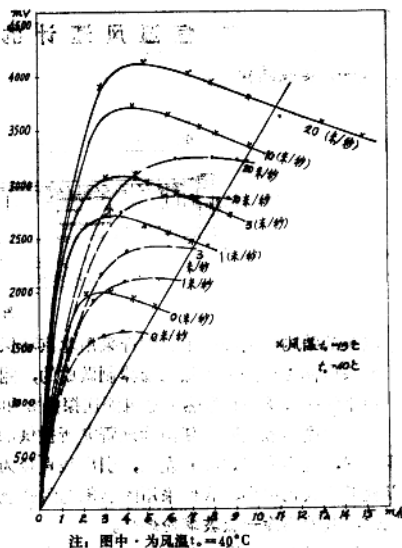


图 3

以 $1/10$ 精度的水银温度计指示温度，以 0.05% 级 QJ 19 型单双臂电桥和高灵敏度光电检流计测量电阻，精度为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。各测头所有的热敏电阻的数值列于表 1。

表 2

试验条件 (米/秒)		伏 安 特 性										
13°C	0	I (mA)	0.043	0.098	0.29	0.724	2.21	3.09	4.37	5.4		
		U (mV)	132	289	742	1250	2000	2010	1950	1880		
	1	I (mA)	0.102	0.378	1.26	3.2	4.95	6.00	7.03	7.7		
		U (mV)	300.0	981	2250	2720	2620	2570	2480	2430		
	3	I (mA)	0.1	0.333	1.54	3.14	4.52	6.35	7.28	8.82		
		U (mV)	300	923	2630	3070	3060	2940	2870	2790		
	10	I (mA)	0.102	0.548	4.38	6.02	7.42	8.22	9.78			
		U (mV)	330	1218	3720	3640	3530	3480	3360			
	20	I (mA)	0.098	0.3	1.53	2.9	4.83	6.92	7.93	9.77	12.1	14.88
		U (mV)	298	872	2940	3900	4130	4030	3950	3880	3630	3450
40°C	0	I (mA)	0.078	0.298	0.585	2.41	2.95	3.80	4.52	4.92		
		U (mV)	122	438	730	1565	1610	1640	1640	1620		
	1	I (mA)	0.09	0.542	1.6	2.48	4.02	5.84	6.5			
		U (mV)	143	762	1690	1950	2110	2150	2120			
	3	I (mA)	0.095	0.53	1.39	2.87	4.05	6	7.1			
		U (mV)	153	750	1350	2150	2380	2430	2410			
	10	I (mA)	0.095	0.55	3.16	2.42	3.80	5.3	6.35	7	8.7	
		U (mV)	153	800	1624	2260	2750	2870	2910	2940	2880	
	20	I (mA)	0.095	0.585	1.66	2.8	4.50	6.26	8.05	9.15	9.62	
		U (mV)	251	852	1960	2650	3100	3250	3260	3230	3215	

2. 测速探头的风速伏安特性

不同风速, 不同风温下的伏安特性是恒温风速计工作过程的体现和选择探头的依据, 我们是在一个小型的变温风管内部点试验求得, 线路示于图 2, 探头放入风管内有一定的风温风速下, 以精度为 $\pm 0.1\%$ 的精密电压表测出探头和标准电阻 $R_{\text{标}}$ 的电压值, 即可获得风速伏安特性。以 8 号 MF-52 型热敏电阻探头为例, 数据如表 2 和图 3 所示。

3. 探头的稳定性

热敏电阻风速探头的工作温度为 120°C 左右, 取经常工作的 2° 、 4° 、 6° 探头和很少工作的 5° 探头及平时不工作置于室内自然温度环境中的 103° 、 120° 、 105° 、 129° 、 114° 分别进行稳定性考察。热敏电阻温度补偿探头工作于常温, 也对它作了稳定性考察。

考察方法采用长期观察其 0°C 阻值漂移。用天然冰制作冰点槽, 精确度可达到 $0^{\circ}\text{C} \pm 0.01^{\circ}\text{C}$, 热敏电阻探头插入玻璃试管插入冰水中, 稳定适当的时间, 用 0.05% 级 QJ 19 型单双臂电桥和高灵敏度光点检流计测出 R_t 值。数据如表 3、表 4 所示。

从半年的试验数据看表 3 中经常工作的 4 号、6 号探头稳定性最好。6 号探头半年漂移 -0.25% , 4 号探头在半年后使用中损坏, 2 号探头在 78 年 4 月份到 9 月份稳定性是好的, 11 月测得的 0°C 阻值由 $4.0532\text{K}\Omega$ 突然变到 $6.3081\text{K}\Omega$, 经分析认为由于此探头连续工作十几小时而发生, 在工作中我们还发现过有类似的探头发生同样的现象, 这方面的问题, 以

MF-52 型 热 敏 电 阻

表 3

时 间	测头号	2		4		5		6	
		R_0	ΔR_0	R_0	ΔR_0	R_0	ΔR_0	R_0	ΔR_0
		(K Ω)	(%)	(K Ω)	(%)	(K Ω)	(%)	(K Ω)	(%)
1978.2.14									
1978.3.7									
1978.4.25									
1978.4.27		4.0492	0	4.0011	0	4.1142	0	3.724	0
1978.7.31		4.0645	0.38	3.9919	-0.23	4.0439	-1.7	3.720	-0.11
1978.8.1									
1978.9.26		4.0532	0.1	3.9893	-0.296	4.0315	-2.0	3.7077	-0.44
1978.11.23		6.3081	55.8			4.0444	-1.7	3.7148	-0.25

时 间	测头号	103*		120*		105*		129*		114*	
		R_0	ΔR_0	R_0	ΔR_0	R_0	ΔR_0	R_0	ΔR_0	R_0	ΔR_0
		(K Ω)	(%)	(K Ω)	(%)	(K Ω)	(%)	(K Ω)	(%)	(K Ω)	(%)
1978.2.14		6.7607	0	6.6354	0	6.586	0	5.5961	0	4.0767	0
1978.3.7		6.6000	2.5	6.6124	0.35	6.5731	0.2	5.6021	0.1	4.0679	0.22
1978.4.25		6.5265	3.5	6.5992	0.55	6.5588	0.4	5.5915	0.08	4.0596	0.24
1978.4.27											
1978.7.31											
1978.8.1		6.3892	5.5	6.5595	1.1	6.5205	1	5.5593	0.7	4.0400	0.9
1978.9.26											
1978.11.23											

MF-12-0.25 型 热敏电阻

表 4

时 间	测头号	1*		2*		4*		6*	
		R_0	ΔR_0	R_0	ΔR_0	R_0	ΔR_0	R_0	ΔR_0
		(K Ω)	(%)	(K Ω)	(%)	(K Ω)	(%)	(K Ω)	(%)
1978.4.27		25.938	0	25.902	0	24.536	0	24.472	0
1978.7.31		26.180	-2.9	26.380	1.8	24.679	0.58	24.634	0.66
1978.9.26		25.688	-0.96	26.17	1.0	24.251	-1.16	24.092	-1.55
1978.11.23		25.810	-0.49	26.302	1.5	24.264	-1.1	24.230	-0.99

后还要进一步观察。5号探头不经常工作，又未老化，因此从开始漂移大而逐渐趋于稳定。103号、120号、105号、122号、114号是置于室温自然情况下不工作的探头，半年来除103号漂移5.6%，稳定性较差外，其余都不超过1.1%。

表4是温度补偿探头，是MF-12-0.25型热敏电阻，1号、2号、4号、6号经过半年的稳定性试验，1号、6号半年漂移不超过1%，2号、4号半年漂移不超过1.5%。

4. 探头的机械强度

热敏电阻风速探头的机械强度的强弱，关系仪表的使用条件和使用期限。

MF-52型球状热敏电阻能承受拉力达5克左右。我们把焊有探头的测杆从0.3~1.6米高处以自由落地，这样反复多次，其探头热敏电阻仍完好无损，说明MF-52型热敏电阻具有一定的机械强度，不怕震动，是牢靠的。由于引线为40 μ 的铂丝，使用时仍需注意保护。

5. 测速探头的方向性

我们采用的MF-52型热敏电阻，几何形状虽然是球状的，但是由于制造工艺是手工制作，不是理想球状，另外测杆上还带有两根肋，因此对气流方向有反映。表5为3号表4号测杆的方向性试验结果。

从表5实验数据看出，探头如果不垂直气流方向，是对测量有一定影响的，随着偏离的角度越大，误差也越大，因此测量时，应尽量使探头垂直于气流方向，以减少方向的影响。

风 速 计 方 向 性 试 验 3 号 表

4 号 测 杆

78.11.2

表 5

测 杆 方 向		仪 表 读 数 <格>			供 电 电 压 <伏>		
		1米/秒	3米/秒	20米/秒	E_1	E_2	E_3
正常顺时针	0°	63.8*	99.2*	99.8	6	12	18
	15°	63.2*	98*	98.2			
	30°	61.5*	96*	96			
逆 时 针	15°	63.7*	98.5*	98.4			
	30°	63.3*	98*	97.1			

* 0—3米/秒量程

6. 测温探头的耗散系数

热敏电阻耗散系数，是测温探头的主要参数之一。根据[1]，耗散系数和风速间的函数关系可由公式表示： $\xi = a + b(v)^n$ (3)。作者提到在风速是零的时候电流通过热敏电阻所产生的热量大部分经过引线传出去，然后散到空气中，一小部分传到珠体表面散到空气中。因为风速极小时，珠体本身只靠自然对流和热辐射两种形式散热，珠的直径小，温度又低，这两种形式散热很少，以上就是常数 a 的来历。当风速渐渐加大时，珠和丝在气流中散热也渐渐加强，这就使探头的散热量随之增大，增长的快慢反映在 b 、 n 的大小上。热敏电阻的耗散系数具有分散性。我们对 MF-52 型作了初步试验，同样具有分散性，表 6 列出了 2 号、4 号、6 号、8 号探头的 a 、 b 、 n 值，表 7 列出了不同风速下的耗散系数值。

不同风速下的耗散系数同 1 m/s 风速下耗散系数的比值列入表 8。

表 6

编号 \ 参数	a	b	n	备 注
2*	0.114	0.076	0.49	
4*	0.139	0.095	0.467	
6*	0.146	0.099	0.48	
8*	0.097	0.071	0.478	

表 7

不同风速 编 号 $v \text{ m/s}$	0 m/s	1 m/s	3 m/s	10 m/s	20 m/s
2*	0.114	0.19	0.244	0.348	0.448
4*	0.139	0.234	0.298	0.417	0.524
6*	0.146	0.246	0.315	0.446	0.568
8*	0.097	0.167	0.213	0.297	0.375

表 8

$\xi a / \xi_1$ 编 号	$\frac{\xi_0}{\xi_1}$	$\frac{\xi_1}{\xi_1}$	$\frac{\xi_3}{\xi_1}$	$\frac{\xi_{10}}{\xi_1}$	$\frac{\xi_{20}}{\xi_1}$
2*	0.6	1	1.28	1.83	2.83
4*	0.59	1	1.27	1.78	2.24
6*	0.60	1	1.29	1.82	2.30
8*	0.58	1	1.28	1.78	2.26

从上述数据可以看到，热敏电阻的耗散系数具有相当的分散性，但是耗散系数却有着相近的，例如：2 号和 6 号，4 号和 8 号。这里 2 号、4 号、6 号的引线皆为 40μ 的铂丝，支架相同，而且是同一批制作。8 号的引线为 25μ 的铂丝，支架型式也不同。

温风速计则要求输出信号为电压。当输入为0~10毫伏时,输出为3.3~8.5伏。(2)该放大器的相敏特性不够理想,当输入反相信号高于50毫伏时,放大器出现反相自激(也称“反相调制”),使放大器输出信号随输入反相信号的增大而增大,直至饱和。这种工况是恒温风速计不能容许的。因为风速计在工作过程(当风速突然改变时)中,不可避免地会出现超调量,而产生反相信号。如果其值较大,放大器的相敏特性不好,就会出现反相调制工况而使恒温系统失控,风速计不能正常工作。(3)该放大器供电电压较高(12伏,50伏),放大器体积稍大,不符合便携式要求。为此我们对放大器作了如下改进:

①选频放大器的负载采用高Q值的L、C谐振回路,以提高放大器的选频特性,使产生“反相调制”的幅值条件不能满足,以消除反相调制”。其具体措施是,采用二级谐振放大器,其电感线圈采用中间抽头方式,磁罐留有足够的间隙,以减少磁路的损耗,获得高的Q值,确保选频放大器有良好的选频特性。

②选频放大器的频率由1 KHz提高到18 KHz,以缩小放大器的体积,加宽放大器的频带,改善风速计的动特性。由于调制频率较高,原 $\phi 26 \times 18$ 磁罐可改用 $\phi 14 \times 8$ 小型磁罐,线圈圈数也相应减少。

③放大器电源由12伏改为6伏,稳压部分主电源用12伏供电,辅助电源电压为6伏。

3. 自激振荡调制式直流放大器和检波放大器

放大器电路(如图5),由输入滤波电路(C_1 、 R_1 和 C_2),场效应管调制级 BG_1 ,三级选频放大器(BG_2 、 BG_3 和 BG_4),检波放大器 BG_5 ,以及反馈网络(B_1 、 D_1 和 D_2 等)组成。

选频放大器和调制管组成一个自激振荡器,选频放大器的反馈电压经隔直电容 C_{11} 由 BG_5 集电极取出,作为调制器的驱动电源加到 BG_1 的栅源之间。自激振荡调制式直流放大器实质上是一个幅度受输入信号控制的放大器,输入信号大,振幅就大,输入信号小,振幅就小,振荡器的频率则是放大器的频率所决定。当输入信号反向时,选频放大器的反馈电压即反向而不能产生自激。

由晶体管 BG_5 组成检波放大器,其静态工作电流为20~30微安,其作用是将调制放大器输出的交流信号经检波加以放大。只有在输入信号正半周时, BG_5 才处于导通工作状态,将输入信号加以放大,在集电极得到放大的半波脉动电流,由隔离变压器 B_1 送出,经整流(D_1 和 D_2)滤波之后,加于放大器输入端,构成深度负反馈,以保证放大器工作稳定可靠,线性度好。调整电阻 R_1 数值,即可改变放大器闭环增益。

经 BG_5 放大的半波脉动电流经 C_{11} 滤波之后,由 BG_2 、 BG_3 的发射极电阻($R_{10}+W_1$)取出,以改变稳压电源的输出电压。

4. 稳压电源

和一般稳压电源不同,恒温风速计对稳压电源的要求是:(1)输出电压应随着风速的改变而改变;(2)当风速不变时,输出电压应保持恒定。

1型风速计所用稳压电路见图6。其工作原理和一般联型稳压电源相似,由复合管(BG_6 和 BG_7)作为输出电压调整管(即功率放大级,它接成射极输出器), BG_8 为比较放大器(推动级), R_{11} 、 R_{12} 为采样分压电

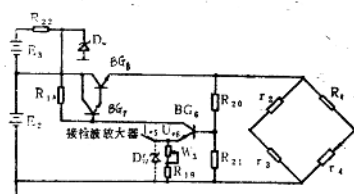


图6 1型风速仪稳压电源电路图

路。由于要求稳压电源的输出电压为可变，故将稳压电源的基准电压输入端所接的标准稳压管 DW' (如图6虚线所示) 改接成一电阻 ($W_1 + R_{11}$)。当检波放大器输出为零 (电桥平衡) 时，由于 BG_1 和 BG_2 之间加入深度负反馈，流过电阻 ($W_1 + R_{11}$) 的电流不变；稳压电源输出电压不变。当检波放大器有输出时，流过电阻 ($W_1 + R_{11}$) 的电流 I_1 增大，使 U_{sc} 增高，相当于基准电压增高，稳压电源输出也相应增高。为了提高输出电压的稳定性，采用二组电池供电，主电源 E ，电压为12伏，辅助电源总电压为18伏 (由 E_1 和 $E_2 = 6$ 伏串联而得)， BG_1 的电源由 R_{11} 和 D_1 组成的稳压电路供电。

当放大器输入信号约为 $0 \sim 10$ 毫伏时，稳压电源输出电压约为 3.2 伏 ~ 8.5 伏。当环境温度在 $0 \sim 45^\circ\text{C}$ 范围内变化时，稳压电源输出电压的温度约为 -0.01 伏/ 10°C 。

5. 表头指示电路

桥路供电电压经过风温自动补偿分压电路 (由风温补偿热敏电阻 R_{11} 、 R_{12} 和 R_{13} 组成) 分压，再经 R_{14} 、 W_1 (或 $W_1 + R_{11}$) 和 C_{11} 组成的积分电路，以获得风速的平均值。当风速为零时，桥路供电电压有一恒定值，为了使表头在零风速时指零，还加入 R_{15} 、零点调节电位器 W_2 和 R_{16} 组成的分压电路，其电压由稳压管 D_2 取出。K 为量程选择开关，当 K 在 1 位置时，K 将表头短接，以保护表头。电位器 W_2 和 W_1 分别为 $0 \sim 3$ 米/秒档和 $0 \sim 20$ 米/秒档仪表满量程调节电位器，供风速计调整和校准时使用。

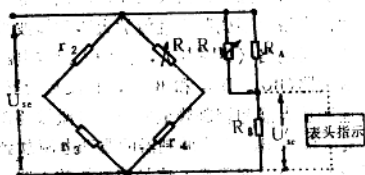


图7 恒温风速计风温自动补偿电路

(二) 风温自动补偿和探头的互换

1. 风温自动补偿

根据热平衡方程式，在图7所示的电路中，桥路供电电压 U_{sc} 和探头耗散系数 $\xi(v)$ 的关系可用下式表示：

$$U_{sc} = \left(1 + \frac{1}{i}\right) \sqrt{\xi(v) R_1 (t - t_1)} \quad (4)$$

式中， $i = \frac{R_1}{R_2} = \frac{V_1}{V_2}$ ，桥路上、下桥臂电阻分压比，对等臂电桥而言， $i = 1$ 。

由上式可见，桥路供电电压 U_{sc} 不仅是风速 v 的函数，而且是风温 t_1 的函数。在风速不变的条件下，若 t_1 升高， U_{sc} 下降，当 t_1 降低时则相反。图8为实测所得的在不同风温时，桥路供电电压和风速的关系特性。试验结果表明， U_{sc} 随风温变化而改变，尤其是在高风速时更为显著。例如，在风速 0 米/秒时为 -0.022 伏/ $^\circ\text{C}$ ，其误差为 -0.57% / $^\circ\text{C}$ (仅表量程为 $0 \sim 20$ 米/秒)，在风速 20 米/秒时为 -0.035 伏/ $^\circ\text{C}$ ，其误差为 -0.93% / $^\circ\text{C}$ 。由此可见，实现风温自动补偿，使风速读数不随风温变化，是恒温风速计必须

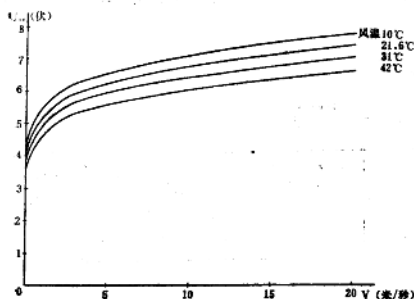


图8 电桥供电电压—风速曲线 [2°测杆]

解决的重要问题之一。

1型风速计采用分压器式风温补偿电路^①(见图7)，它由风温补偿热敏电阻 R_t 和精密电阻 R_B 相串联，为了使 R_t 的非线性特性得到改善，还在 R_t 两端并联一线化电阻 R_A 。由图7可见，分压器输出电压为：

$$U'_{sc} = \frac{U_{sc} \textcircled{2}}{1 + \frac{R_A \parallel R_t}{R_B}} \quad (5)$$

式中： $R_A \parallel R_t$ 为 R_A 和 R_t 的等效并联电阻，其表达式为：

$$R_A \parallel R_t = \frac{R_t \cdot R_A}{R_t + R_A} \quad (6)$$

将(4)式代入(5)式得：

$$U'_{sc} = \left(1 + \frac{1}{i}\right) \sqrt{\xi(v) R_t (t - t_1)} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{R_t \parallel R_A}{R_B}\right)} \quad (7)$$

选择补偿电路参数，若能满足下式：

$$M = \frac{\sqrt{\frac{t - t_1}{R_t \parallel R_A}}}{1 + \frac{R_t \parallel R_A}{R_B}} = \text{常数} \quad (8)$$

则(7)式可简化为：

$$U'_{sc} = \left(1 + \frac{1}{i}\right) M \sqrt{\xi(v) R_t} \quad (9)$$

由(9)式可见，当风温补偿电路参数满足(8)式时，则风速是风温补偿电路输出电压 U'_{sc} 函数的唯一参变量，和风温无关，从而实现了风温的自动补偿。这种补偿方法的精度仅由探头的工作温度，风温变化范围以及补偿元件的温度特性所决定，和探头的温度特性无关。所以，对不同特性的探头都可采用这一方法。采用这种方法具有通用性和灵活性，便于实现探头的互换，尤其适合于热敏电阻恒温风速计。

风温补偿电路实际上是一恒流电路，在一定风速的条件下，如果风温温度增高 Δt_1 ，则桥路供电电压降低 ΔU_{sc} ，随风温变化的热敏电阻 R_t 的阻值相应减少 ΔR_t ，当分压电路参数满足(8)式时，则 R_t 和 R_A 的等效并联电阻相应减少，正好使流过分压电路的电流保持不变。因

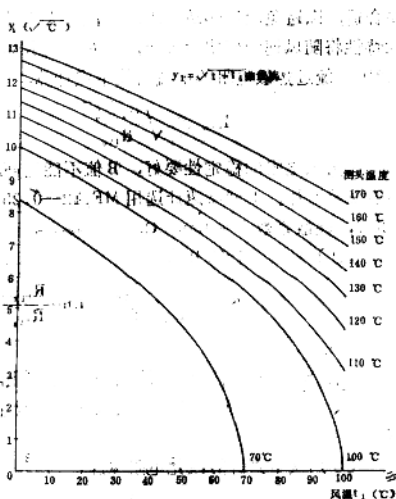


图 9

① 在文献[3]中提出了分流器式手动风温补偿方法，在文献[4]中提出用运算放大器进行风温补偿。本文所用补偿方法的基本原理和[3]、[4]相同。

② 假设表头指示电路等效电阻 R_n 满足下式： $R_n \gg R_B$ 。

此,分压器输出电压不随风温变化而改变,仅和风速有关。

实际上,(8)式所要求条件只能近似地实现,这是由于,(8)式分子为函数 $y_1 = 1/\sqrt{t-t_1}$,它是探头工作温度和风温温差的函数,其特性为抛物线。图9为探头在不同的工作温度时函数 $y_1 = 1/\sqrt{t-t_1}$ 的曲线族。由图可见,在风温较低时,曲线比较平直,随着风温的增高,曲线逐渐变陡(即 $\frac{dy_1}{dt_1}$ 增大);当探头工作温度较高时,曲线比较平直可线性化部分较长,另外

(8)式分母为函数 $y_2 = 1 + \frac{R_{11}}{R_2} \frac{R_A}{R_2}$,它是由风温补偿热敏电阻的特性、线性电阻 R_A 和分压电阻 R_2 的参数所决定的。如所周知,热敏电阻的温度特性为指数函数,经线性化之后,其非线性特性可以得到改善。

当风温变化范围较大时,由于 $y_1(t_1)$ 和 $y_2(t_1)$ 的变化规律不一致而使 M 值变化较大,从而使风温补偿误差增大。只有当风温在一定范围内变化(如 $5 \sim 40^\circ\text{C}$),曲线 $y_1(t_1)$ 和 $y_2(t_1)$ 可以用两直线段代替[即 $y_1(t_1) = y_1(t_{10}) + y'_1(t_{10})\Delta t_1$, $y_2 = y_2(t_{10}) + y'_2(t_{10})\Delta t_1$],合理选择补偿电路参数,使两线段的斜率比和截距比相等 $\left[\frac{y'_1(t_{10})}{y_2(t_{10})} = \frac{y_1(t_{10})}{y_2(t_{10})}\right]$ 时,(8)式成立,

风温自动补偿才有可能实现^①。

2. 风温补偿电路的计算

(1) 首先选择风温补偿热敏电阻 R_{11} ,使它满足下列条件:

①由于 R_{11} 串接在桥路输出端, U_0 较高,故要求热敏电阻的耗散系数 ξ ^②及标称阻值要合适,以避免流过热敏电阻的电流过大而导致热敏电阻体发热。如果 R_{11} 温升较大,其补偿特性将随风速的变化而改变,因而产生附加误差。通常要求在静止空气中其温升不超过 0.3°C 。流过热敏电阻的电流可按下式计算:

$$I_{11\max} \leq \sqrt{\frac{0.3\xi}{R_{11}}} \quad (10)$$

②热敏电阻的稳定性要好, B 值不能过高。 B 值过高时经线性化处理后其误差较大,会使补偿误差增加。1型风速计选用 MF 12—0.25 型热敏电阻,在温度为 25°C 时其标称阻值为 $10\text{K}\Omega$,耗散系数 $\xi = 4\text{mW}/^\circ\text{C}$ 。

(2) 按下式计算 B 值:

$$B = \frac{T_{11} \times T_{12}}{T_{11} - T_{12}} \times \ln \frac{R_{112}}{R_{111}} \quad (11)$$

式中:

R_{111} 、 R_{112} ——当风温分别为: $t_1 = t_{11}$ (上限)、 $t_1 = t_{12}$ (下限) 时补偿热敏电阻的阻值;

T_{11} 、 T_{12} ——分别用绝对温度表示的风温上、下限值; $T_{11} = 273 + t_{11}$, $T_{12} = 273 + t_{12}$, $^\circ\text{K}$ 。

(3) 按下式计算线性化电阻 R_A :

$$R_A = \frac{B - 2T_{10}}{B + 2T_{10}} R_{110} \quad (12)$$

注:① 当 M 的一阶导数: $M'(t_1) = 0$ 时,就可得出这一结论。详见附录[1]。

② 在有关手册中,热敏电阻的耗散系数用 H 这一符号表示。

③ B 及 R_A 计算公式的推导见文献[5]。