

文章编号: 1000-8055(2004) 05-0708-05

合成电阻在发动机控制半物理仿真 接口模拟器中的应用

张天宏, 丁毅, 牟路勇

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 将电子合成电阻技术应用于半物理仿真接口模拟器中, 以模拟热电阻传感器。在提高电阻合成精度、扩展桥压范围、提高极性适应能力、多通道之间的隔离以及非线性特性拟合等方面提出了有效的解决办法。经过实验标定, 证明该合成电阻具有 $0.02\ \Omega$ 的稳态精度, 并且在程序的控制下具有良好的动态电阻模拟能力, 可以满足航空发动机控制半物理仿真试验的需要。

关键词: 航空、航天推进系统; 电子合成电阻; 热电阻; 半物理仿真试验; 接口模拟器
中图分类号: V 233. 7 **文献标识码:** A

Application of Electronic Synthesized Resistor to Matter-in-Loop Simulation Experimentations of Aero-Engine Control Systems

ZHANG Tianh-hong, DING Yi, MOU Lu-yong

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A kind of synthesized resistor is proposed to emulate thermal resistors in an inter-face simulator. Several key problems of synthesis are discussed in detail, such as the precision im-provement of synthesized resistor, the voltage scope expansion of resistor's application circuits, the synthesis circuits adaptation for positive or negative voltage, the multi-channel synthesis circuits development on one board, and the nonlinear characteristic curve fitting. The calibration experi-ments show that, the steady state accuracy of this synthesized resistor is better than $0.02\ \Omega$, and under the control of programming, it has good dynamic resistance simulation capability, therefore, it is very suitable for matter-in-loop simulation experimentation of aero-engine control system.

Key words: aerospace propulsion system; electronic synthesized resistor; thermal resistor; matter-in-loop simulation experimentation; interface simulator

在航空发动机控制半物理仿真试验中, 控制对象发动机采用运行于计算机上的数学模型, 控制器是真实的物理部件, 控制系统中的传感器和

执行机构可以根据试验的需要采取物理部件或电子模拟器^[1,2], 如图 1 所示。由于难以实时模拟发动机的动态物理温度, 温度传感器总是采取电子

收稿日期: 2003- 09- 14; 修订日期: 2004- 01- 09

基金项目: 国防科研基金重大资助项目(K 1601060711)

作者简介: 张天宏(1968-), 男, 江苏仪征人, 南京航空航天大学能源与动力学院副教授, 主要从事航空发动机控制及计算机测控技术研究。

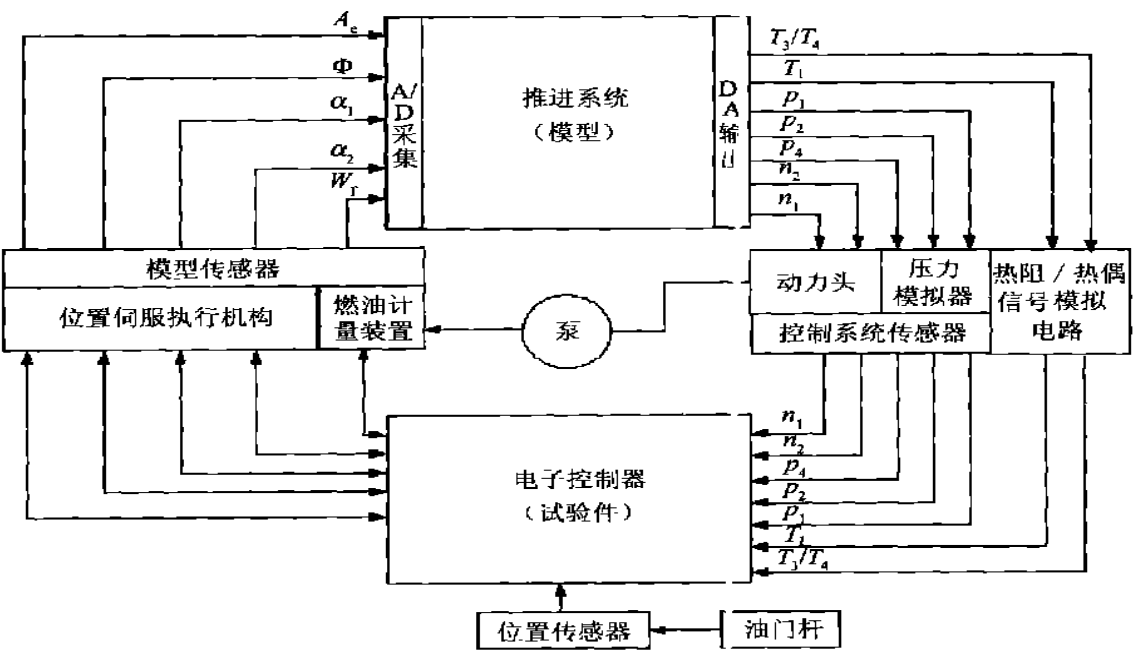


图 1 航空发动机控制半物理仿真试验系统

Fig. 1 A matter-in-loop simulation system of aeroengine control

模拟的方式。航空发动机上一般采用两种温度传感器:一种是用于测量发动机进口温度、燃油温度、滑油温度等低温参数的热电阻传感器;另一种是用于测量涡轮后温度和排气温度等高温信号的热电偶传感器。热电偶传感器的模拟在原理上相对简单,只要实现电压信号的衰减并采取有效的噪音抑制手段,而热电阻传感器的模拟一直以来没有很好的解决办法。

电子模拟的热电阻温度传感器通常采用以下几种方法^[2,3]:(1)通过继电器或电子开关切换精密电阻箱中不同电阻的组合得到可变的阻值;(2)用数字电位器,通过切换半导体电阻来得到可变的阻值;(3)通过伺服电机驱动电位器得到可变的阻值。方法(1)体积大,分辨率差,且因串接了继电器接触电阻而使精度下降;方法(2)由于串入较大的开关导通电阻、温度稳定性差使精度不能得到保证,且难以得到很高的分辨率;方法(3)体积大,而为了得到精密的电阻值必须采用高分辨率的编码器和 A/D 转换器,这样导致成本过高。

用运放等构成单口网络,通过编程得到输入电压及电流的比值,即可获得可编程的线性电阻^[4,5]。这种阻抗合成技术可获得很高精度的输出电阻,如 WAVETEK 公司的 9100 型多功能校准仪就采用了合成电阻^[6]。本文将这种合成电阻技术应用于发动机控制半物理仿真试验中,并在提高电阻合成精度、扩展桥压范围、提高极性适应能

力、多通道之间的隔离等方面提出了有效的解决办法,并对试验结果进行了分析。

1 电阻合成的原理

合成电阻的电路原理如图 2 所示^[5],由输入运放 A_1 、D/A 转换器、输出运放 A_2 和标准电阻 R_0 构成。施加于标准电阻一端的输入电压值 U_i 经过缓冲放大、比例调节后,反馈到标准电阻的另一端,以此来控制输入电流,从而确定输入电阻值。

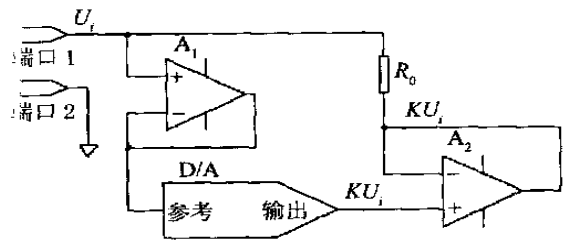


图 2 电阻合成的原理

Fig. 2 The principle of synthesized resistor

运算放大器 A_1 接成电压跟随器形式,输出电压为 U_i ,作为 D/A 转换器的基准电压。D/A 转换器采用电压输出型乘法转换器,使基准电压即使减小到接近零也可得到较好的比例输出。D/A 转换器的传输系数 K 由输入到 D/A 的数字信号决定,其输出电压为 $K \cdot U_i$ 。由于 A_2 工作于线性

放大状态时两输入端电位相等, 因此 A_2 的反相端电压也为 $K \cdot U_i$ 。合成电阻的输入电流通过标准电阻 R_0 流向运放 A_2 的输出端。这样, 施加于标准电阻上的电压为 $U_i - K \cdot U_i$, 电流为 $I_i = (U_i - K \cdot U_i) / R_0$ 。由于运放 A_1 的同相端输入电流为零, 则对输入端来讲, 可得合成电阻为:

$$R = \frac{U_i}{I_i} = \frac{R_0}{1 - K} \quad (1)$$

即标准电阻倍增了 $1/(1 - K)$ 倍。当 $K = 0$ 时, 电阻不变; 当 $K = 0.9$ 时, 电阻放大 10 倍。所以, 可以通过改变 D/A 转换器的输入数字量以调整 K 值来改变合成电阻值。标准电阻 R_0 可以通过模拟电子开关选择为 10Ω 100Ω $1 \text{ k}\Omega$ $10 \text{ k}\Omega$ 从而可得到输出 100Ω $1 \text{ k}\Omega$ $10 \text{ k}\Omega$ $100 \text{ k}\Omega$ 等连续电阻量程。电路中, 运算放大器 A_1 连接成电压跟随器的形式, A_2 接近单位增益, 并接入校正电容, 因此可得到稳定的合成电阻。

2 提高电子合成的精度

热电阻温度传感器阻值变化灵敏度比较小, 如 PT100 热电阻在 $0^\circ\text{C} \sim 300^\circ\text{C}$ 温度范围内对应的电阻值在 100Ω 和 200Ω 之间。如果根据前述电阻合成的原理, $R = R_0 / (1 - K)$, 取 R_0 为 100Ω 则 K 的有效工作范围为 $0 \sim 0.5$, 相当于 D/A 工作范围的一半, 如图 3 所示。这样就造成合成电阻的控制精度降低一半。

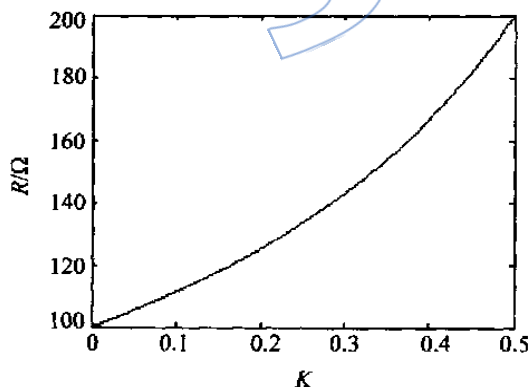


图 3 $R = R_0 / (1 - K)$

Fig. 3 $R = R_0 / (1 - K)$

在图 2 的 D/A 输出端和 A_2 的同相输入端之间串接一个反相放大器 A_3 , 如图 4 所示, 这样, 施加于标准电阻上的电压为 $U_i - (-K \cdot U_i)$, 电流为 $I_i = (U_i + K \cdot U_i) / R_0$ 。由于运放 A_1 的同相端输入电流为零, 则对输入端来讲, 可得合成电阻:

$$R = \frac{U_i}{I_i} = \frac{R_0}{1 + K} \quad (2)$$

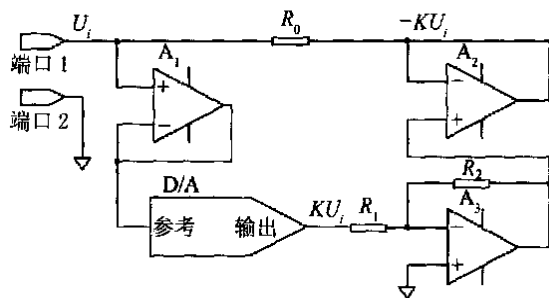


图 4 电阻合成电路的改进

Fig. 4 A improved circuit of resistor synthesis

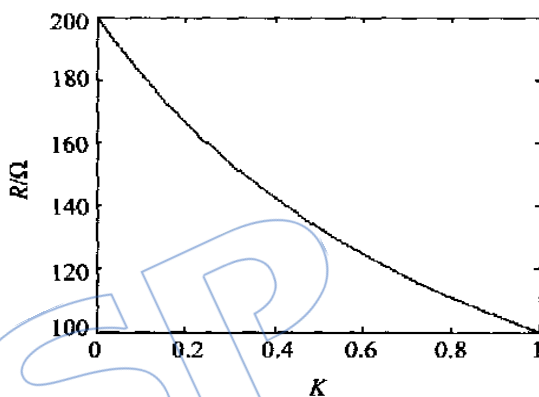


图 5 $R = R_0 / (1 + K)$

Fig. 5 $R = R_0 / (1 + K)$

即标准电阻衰减了 $1/(1 + K)$ 倍。当 $K = 0$ 时, 电阻值不变; 当 $K = 1.0$ 时, 电阻值衰减为一半。所以, 可以取 R_0 为 200Ω , 对应 $100 \sim 200 \Omega$ 的合成电阻, K 的工作范围为 $0 \sim 1.0$, 充分利用了 D/A 的工作范围, 如图 5 所示。

3 扩展桥压范围

桥压范围受到 D/A 电路参考电压范围的限制。对于电压输出型的 D/A 电路, 其参考电压一般在 5 V , 2.5 V 或 1.2 V 以内, 对应满幅输出为 5 V , 2.5 V , 1.2 V , 也有的 D/A 电路内部带 2 倍的放大器, 如 TLV5618 的满幅输出电压是参考电压的 2 倍。为了扩展电阻应用电路的桥压范围, 可以通过运算放大器对输入电压进行适当的缩放得到合适的参考电压, 再通过运放对 D/A 的输出进行适当的放缩, 得到期望的合成电阻值。这样处理几乎不存在桥压范围的限制问题。

4 实现极性适应能力

热电阻传感器的应用电路一般采用三线制的电桥工作方式, 且热电阻靠电桥的参考端。在图 6

的电桥中, 一般在 R_4 的位置连接热电阻。此时将电桥的端点与模拟电路的端口 1 连接, 电桥的 $V+$ 参考端与模拟电路的参考端即端口 2 连接, 此时模拟电路的 $U_i = V+$, 合成电阻上的电流从端口 2 流入运放 A_2 的输出端。

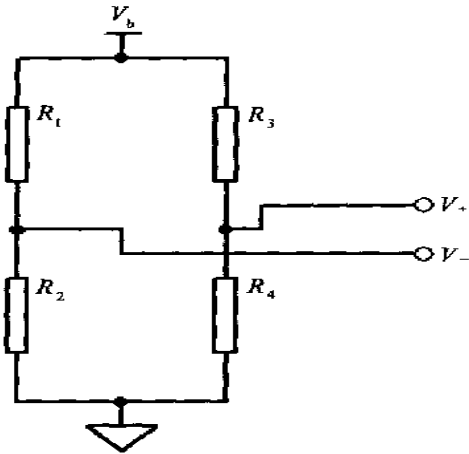


图 6 热电阻应用电路

Fig. 6 A application circuit of thermal resistor

但是, 也有一些应用电路中, 将热电阻安装在电桥的 R_3 位置, 此时将电桥的 $V+$ 端点与模拟电路的端口 1 连接, 电桥电源的正端 V_b 与模拟电路的参考端即端口 2 连接, 于是合成电路的 U_i 为 $V+$ 与 V_b 之差, 是个负电压, 为了用于 A/D 的参考电压, 利用运算放大器构成反相放大器以改变电压的极性从而得到正的参考电压 $-U_i$, 即 V_b 与 $V+$ 之差, 合成电阻上的电流从运放 A_2 的输出端流入端口 2。

为了使热电阻合成电路对应用电路的极性具有自动适应能力, 可以在 A_1 的输出端加一个电压极性判断电路, 通过模拟电子开关自动切换反相放大器电路, 以保证 A/D 的参考电压总是正极性。这种具有极性适应能力的电阻合成电路, 同样适用于正负极性的恒流源应用电路, 如四线制的电阻测量电路。

5 多通道之间的隔离

在航空发动机控制半物理仿真试验系统中, 需要模拟多路热电阻传感器, 且测量电路是相互独立的, 各个通道的桥压也是独立的, 如果在一个合成电路板上实现多路热电阻的模拟, 则存在参考端不一致的问题。解决办法是通过 DC-DC 隔离电源, 使通道之间的参考地隔离, 从而使合成电阻适用于具有不同参考地或不同桥压的应用电路。

需要说明的是, 要注意开关电源模块可能对电阻合成电路造成干扰, 应尽量选用低纹波、带屏蔽的电源模块, 在各个运放的电源端焊接去耦电容, 在运放的反馈电阻上并联高频过滤电容。

如果采用串行数字接口的 D/A 电路, 可以考虑将 D/A 电路与控制电路(如单片机)之间隔离, 方法是通过 DC-DC 隔离电源, 使 D/A 电路与控制电路的参考地隔离, 数字信号通过光电耦合器传输, 这样处理可以防止电阻合成电路对应用电路造成干扰, 使电路的适应性增强, 可靠性提高。

6 试验结果分析

基于上述技术手段, 本文采用 12 位 D/A 电路 TLV5618、精密运放电路 OP27、精密电阻及 200 Ω 的标准电阻构成电阻合成电路, 实验结果如表 1 所示。

表 1 合成电阻值			
Table 1 The values of synthesized resistors			
K	理论值/ Ω	通道 0/ Ω	通道 1/ Ω
0.000 0	200.00	197.32	199.93
0.062 5	188.24	185.73	188.16
0.125	177.78	175.48	177.64
0.187 5	168.42	166.32	168.17
0.250 0	160.00	158.04	159.64
0.312 5	152.38	150.55	151.95
0.375	145.45	143.74	144.93
0.437 5	139.13	137.52	138.50
0.500 0	133.33	131.83	132.63
0.562 5	128.00	126.60	127.24
0.625	123.08	121.76	122.25
0.687 5	118.52	117.28	117.65
0.750 0	114.29	113.13	113.37
0.817 5	110.34	109.25	109.38
0.875	106.67	105.64	105.65
0.937 5	103.23	102.25	102.16
1.000 0	100.00	99.10	98.89

实验结果表明, 合成电阻的理论值与实际值之间, 以及不同通道的合成电阻值之间存在差异。造成这种差异的原因是: (1) 运放存在失调电压, 导致零点的偏移; (2) 确定放大器增益的电阻存在一定的偏差, 导致增益偏离理论值; (3) 标准电阻与标称值的差异。

由于运放零点的偏移, 会导致合成电阻值的

大小与输入电压有关,所以必需通过调零电路加以消除。于是可以用下式来拟合实际特性曲线:

$$R = \frac{R_0 + c}{1 + bK} \quad (3)$$

其中, b 是对放大器增益的修正, c 是对实际标准电阻的修正。

尽管表 1 中的合成电阻值之间存在差异,但是每个通道的重复性令人满意。相隔 10 天在 20℃ 温差的环境下试验时最大误差在 0.02 Ω 以内,完全可以满足实验室环境下航空发动机控制半物理仿真试验的要求。

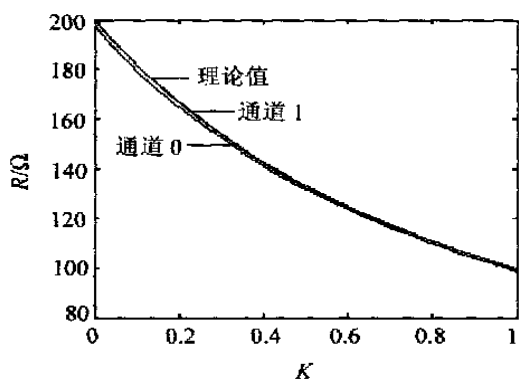


图 7 合成电阻的拟合曲线

Fig. 7 Fitting curves of synthesized resistors

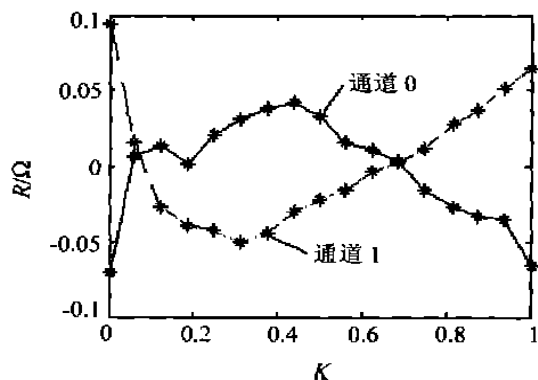


图 8 拟合误差

Fig. 8 Fitting errors

但是如何以一定的精度合成期望的阻值? 一种比较简单的方法是利用表 1 中各个通道的实验标定数据对特性曲线进行分段线性化。然而,即使

分成 10 段也会造成最大 1 Ω 的误差,原因是合成电路的本质非线性造成的。如果采用多项式拟合的方法,即使采用 4 次曲线,误差仍然有 0.3 Ω。利用公式(3)式,通过最小二乘非线性拟合,分别求取 2 个通道的 b 和 c ,可以达到 0.02 Ω 的拟合精度。图 7 是合成电阻的拟合曲线,图 8 是曲线拟合的误差曲线。这样由期望的 R 通过公式(3)求 K ,即可合成期望的阻值。

7 结 论

本文利用电子合成电阻模拟热电阻的动态阻值,用于发动机控制半物理仿真试验系统中发动机模型和电子控制器之间的接口模拟。通过改变合成电阻电路中基准电阻控制端的电压极性,提高了电子合成的精度;通过运算放大器在 D/A 电路的前后对参考电压和控制电压范围的调整,扩展了合成电阻工作桥压的范围;通过电压极性判断电路、电子开关电路、运算放大器构成的反相电路,使合成电路具有正负极性桥压的适应能力;通过 DC-DC 隔离电路,使通道之间的参考地隔离,从而使合成电阻适用于具有不同参考地或不同桥压的应用电路。本文所开发的接口模拟器已经在航空发动机控制半物理仿真试验系统中应用成功。

参考文献:

- [1] 黄向华. 发动机数控系统智能解析冗余技术[D]. 南京: 南京航空航天大学, 1998.
- [2] 黄向华, 孙健国. 发动机数控系统智能容错技术的半物理仿真研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2000, 32(2): 224-228.
- [3] 陈永煌. 可编程标准电阻发生器[J]. 安徽机电学院学报, 2000, 15(2): 66-68.
- [4] Glaser, John S. A Simple Low-Loss Linear Negative Resistor Emulator[R]. IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, 2002, 1: 173-178.
- [5] 唐慧强, 黄惟一. 校准仪中精密合成电阻的设计[J]. 电子技术应用, 2003, 3: 34-36.
- [6] Wavetek Corporation. Model 9100 - Universal Calibration System[R]. Wavetek Application Documents, 1994.