doi:10.11887/j.cn.202106012 http://journal.nudt.edu.cn

高精度程控电阻网络生成算法设计*

朱利文[1],于 雷[1],金传喜[1],陈盼辉[1],贾正荣[2],刘明辉[1]
(1. 海军工程大学 核科学技术学院,湖北 武汉 430033;
2. 海军工程大学 舰船综合电力技术国防科技重点实验室,湖北 武汉 430033)

摘 要:为了提高高精度程控电阻的设计效率,建立高精度电阻网络的物理模型和数学模型,提出一种高精度程控电阻网络生成算法。该算法根据给定的量程和精度,基于主电阻网络、补偿电阻网络和偏移电阻的组合方式,自动生成高精度程控电阻网络。以量程90~250 Ω、精度5 mΩ的需求为例,在MATLAB平台上对算法进行仿真验证,仿真结果验证了算法的可行性。结果表明生成的程控电阻网络满足目标量程和精度的需求,算法解算时间仅为18.128 s。相比于人工设计的方式,该算法大大提高了设计效率。

关键词:自动测试系统;程控电阻;阻值分解;继电器导通电阻
中图分类号: **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2021)06-095-07

Design of algorithm for high-precision programmable resistance network generation

ZHU Liwen[1], *YU Lei*[1], *JIN Chuanxi*[1], *CHEN Panhui*[1], *JIA Zhengrong*[2], *LIU Minghui*[1]
(1. College of Nuclear Science and Technology, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;
2. National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to improve the design efficiency of the high-precision programmable resistance network, the physical and mathematical models of the high-precision resistance network were established, and a high-precision programmable resistance network generation algorithm was proposed. The algorithm automatically generates a high-precision programmable resistor network based on the combination of the main resistance network, compensation resistance network and offset resistance network, according to the given range and accuracy. Taking the requirement of measuring range 90~250 Ω and accuracy 5 mΩ as an example, the algorithm was simulated and verified on the MATLAB platform, and the simulation results verified the feasibility of the algorithm. The results show that the generated programmable resistor network meets the requirements of target range and accuracy, and the algorithm solution time only needs 18.128 s. Compared with the manual design, this algorithm greatly improves the design efficiency.

Keywords: automatic test system; programmable resistance; resistance decomposition; relay on-resistance

在自动测试系统中,程控电阻的应用越来越广泛。程控电阻为自动测试系统提供所需的电阻值,可应用于热电阻温度传感器(Resistance Temperature Detector, RTD)、电阻应变式压力传感器、高度传感器以及电位器式位移传感器等电阻类传感器的校准与测试[1]。

自20世纪80年代开始,国内外均开展了程控电阻的研究工作,但进展均不理想[2]。21世纪初以来,随着计算机技术、先进电子技术及元器件工艺的发展,逐渐发展出了多种程控电阻信号源。其中,成熟应用的主要有两类:电子合成电阻和程控继电器电阻网络[3]。

电子合成电阻目前研究较多,它通过编程控制输入电压和输入电流的比值,从而实现可变阻值的输出[3-4]。常用的设计方法是基于场效应管实现可变阻值输出,包括控制场效应管导通程度[5]、利用叠加场效应管结构实现变阻[6]、浮动节点电压控制线性可变电阻[7]、接地电压控制的正电阻器[8]、接地和浮动电流控制可调电阻[9]。行鸿彦等[10]通过控制栅源电压实现的可变电阻,其阻值范围为75.703~141.004 Ω,分辨率为0.025 Ω。美国福禄克公司推出能够用于Pt100测温仪表校准的多参数校验仪525B,在5~400 Ω的范围内,能够实现1 mΩ的步进输出[11]。

* **收稿日期**:2020-05-12
基金项目:军内科研资助项目(HJ20182A070216)
作者简介:朱利文(1992—),男,湖南长沙人,博士研究生,E-mail:15172535460@163.com;
于雷(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:yulei301@163.com

哈尔滨工业大学的王冰和喻佳健[3,12]相继提出了电流型和电压型两种电路方案,最终实现了高精度模拟基准电阻源。然而,上述电子合成电阻由于使用有源二端口网络,只能模拟电阻的性能而不能等效于实体电阻,因而可能出现与二次仪表激励电路不匹配的问题,在应用中受到一定的限制[3]。

程控继电器电阻网络使用已经连接好的精密电阻链,通过继电器选择性地将相邻的多个电阻进行组合输出[4]。继电器切换实体电阻网络的方式,可解决有源二端口不匹配等问题,其应用范围比电子合成电阻更广。2012 年,美国国家仪器推出了一种具有代表性的 16 位电阻板卡 PXI - 2722,实现了 0.25 ~ 16 320 Ω 的输出电阻范围,步进为 0.25 Ω,精度等级为 0.5%[13]。2016 年,英国品英公司推出了一种基于 PXI 和 PCI 接口的 RTD 仿真器,阻值范围为 90 ~ 250 Ω,分辨率为 0.008 Ω,精度等级为 0.1%[14]。虽然精度等级实现了一定程度的提升,但量程范围内阻值偏差仍达到 0.25 Ω。因此,现有程控继电器电阻网络在实现毫欧级精度时存在明显不足。

在高精度输出场合,由于继电器导通阻值、基准电阻初始精度等影响,传统程控继电器电阻网络的设计较为复杂[15]。

本文针对高精度程控继电器电阻网络设计困难的问题,提出一种高精度程控电阻网络生成算法,该算法根据阻值范围和精度需求,自动生成继电器电阻网络。首先为程控继电器电阻网络建立模型,进行数学描述,将新型程控继电器电阻网络设计为主电阻、补偿电阻以及偏移电阻三个部分,提出阻值分解算法和子模块阻值逼近算法对主电阻网络进行设计,提出精度计算算法对电阻网络精度进行理论计算;然后分别对主网络和补偿网络进行优化,最后以一组需求为例,对算法进行验证。

1 问题建模

电阻源设计实质上是一个优化问题,问题表述为在可用电阻集合 $\Omega=\{R_{a,i}\}$ 中选择任意数量的电阻,构成一个电阻源,该电阻源能够在[$R_{\min}$, $R_{\max}$)内连续取值,在满足约束条件的前提下优化目标函数。因此,电阻源网络设计可以用数学语言描述为:

目标函数:选用的电阻总数最少。

约束条件:对于任意设置的阻值 $R_{\text{set}}\in[R_{\min},R_{\max})$,其与电阻源输出的实际阻值 R_{prac} 之间的差值满足精度要求 ΔR,即

$$|R_{\text{set}}-R_{\text{prac}}|<\Delta R$$

定义 1 电阻网络结构为多个基准子模块串联,每个子模块物理模型如图 1 所示,设开关变量为 b_i,b_i 取 1 为闭合,b_i 取 0 为断开,则电阻网络的总电阻可以表示为

$$R=\sum_{i=1}^{n_{\text{R}}}[b_iR_{i,1}+(1-b_i)R_{i,0}] \tag{1}$$

其中,n_{R} 为子模块数量,$R_{i,1}$ 为开关闭合时每个基准子模块的电阻,$R_{i,0}$ 为开关断开时每个子模块的电阻。

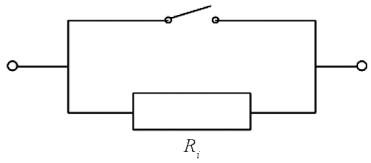


图 1 电阻网络子模块物理模型

Fig. 1 Physical model of resistance network sub-module

首先给出定理 1,说明理想情况下构建电阻网络所需的电阻子模块数量。

定理 1 在理想情况下(对于 $\forall i, R_{i,1}=0$),构建取值范围[0,$R^*_{\max}$)的电阻网络,精度为 ΔR,至少需要 $n_{\text{R},\min}$ 个电阻,其中

$$n_{\text{R},\min}=\lceil\log_2\frac{R^*_{\max}}{\Delta R}\rceil \tag{2}$$

式中,$\lceil\cdot\rceil$ 为向上取整。

证明:命题等效于构建取值范围为[0,$R^*_{\max}/\Delta R$)、精度为 1 的电阻网络,因此将开关变量表示为二进制数,即

$$B=b_1\cdots b_i\cdots b_{n_{\text{R}}} \tag{3}$$

其中,b_1 为最高有效位(Most Significant Bit, MSB),$b_{n_{\text{R}}}$ 为最低有效位(Least Significant Bit, LSB)。则 B 能够表示的最大数字为 $2^{n_{\text{R}}}-1$,表示精度为 1,因此至少需要 $n_{\text{R},\min}$ 个电阻才能以 1 的精度覆盖[0,$R^*_{\max}/\Delta R$)范围,其中 $n_{\text{R},\min}=\lceil\log_2\frac{R^*_{\max}}{\Delta R}\rceil$。此时,每个开关对应子模块在开关断开时的电阻值为 $R_{i,0}=2^{i-1}\Delta R$,即子模块理想阻值。 □

实际电阻网络的取值范围是[$R_{\min}$,$R_{\max}$)而非[0,$R^*_{\max}$),但是可以通过在[0,$R^*_{\max}$)的电阻网络前(后)串联一个阻值为 $R_{\min}$ 的电阻的方式实现,定理 2 对这种情况进行了说明。

定理 2 在理想情况下,构建取值范围[$R_{\min}$, $R_{\max}$)的电阻网络,精度为 ΔR,至少需要 $n_{\text{R},\min}+1$ 个电阻,其中

$$n_{\mathrm{R,min}} = \lceil \log_2 \frac{R_{\max} - R_{\min}}{\Delta R} \rceil \tag{4}$$

证明:根据定理 1,定理 2 显然成立。 □

定理 1 与定理 2 给出了理论上构成电阻网络所需的最小电阻数量,然而,实际中的可选用电阻阻值并不总是 $2^{i-1}\Delta R$,因此需要在可用的电阻中选择合适的电阻逼近阻值 $2^{i-1}\Delta R$。

定理 3　从可用电阻集合 $\Omega = \{R_{a,i}\}$ 中任选电阻逼近阻值 R_{t},最大误差 ΔR_{t} 的取值范围为 $\Delta R_{\mathrm{t}} < \min\{R_{a,i}\}$。

证明:采用反证法证明。假设最大误差 $\Delta R_{\mathrm{t}} \geqslant \min\{R_{a,i}\}$,则可以在 Ω 中选取 n_{t} 个阻值为 $\min\{R_{a,i}\}$ 的电阻,从而有

$$\Delta R_{\mathrm{t}}^{*} = \Delta R_{\mathrm{t}} - n_{\mathrm{t}}\min\{R_{a,i}\} < \min\{R_{a,i}\}$$

其中

$$n_{\mathrm{t}} = \lfloor \frac{\Delta R_{\mathrm{t}}}{\min\{R_{a,i}\}} \rfloor \tag{5}$$

$\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整,因此有修正过的最大误差 $\Delta R_{\mathrm{t}}^{*} < \min\{R_{a,i}\}$,与假设矛盾。 □

定理 4　在理想情况下,从可用电阻集合 $\Omega = \{R_{a,i}\}$ 中任选电阻,依次逼近阻值 $R_{i,0} = 2^{i-1}\Delta R$,构成电阻网络 $[R_{\min}, R_{\max})$,最大误差 $\Delta R_{\max} < n_{\mathrm{R,min}}\min\{R_{a,i}\}$。

证明:根据定理 2,构成电阻网络需要至少 $n_{\mathrm{R,min}}$ 个电阻子模块,从 $\Omega = \{R_{a,i}\}$ 中任选电阻逼近每个子模块的阻值 $R_{i,0} = 2^{i-1}\Delta R$,子模块逼近误差 ΔR_i 小于 $\min\{R_{a,i}\}$,因而有

$$\Delta R_{\max} = \sum_{i=1}^{n_{\mathrm{R,min}}} \Delta R_i < n_{\mathrm{R,min}}\min\{R_{a,i}\}$$

□

2　电阻网络生成算法设计

根据上述问题建模,为实现阻值范围为 $[R_{\min}, R_{\max})$ 的电阻源,本文提出一种电阻网络生成算法。由该算法生成的电阻网络包括主电阻网络(Main Resistance Network, MRN)、补偿电阻网络(Compensation Resistance Network, CRN)以及偏移电阻网络(Offset Resistance Network, ORN)。

电阻源的设计思路为首先设计阻值 $[0, R_{\max} - R_{\min})$ 的主电阻网络,之后在考虑开关闭合阻值的条件下求解主电阻网络在 $[0, R_{\max} - R_{\min})$ 上的最大逼近误差,而后使用补偿电阻网络修正这一误差,最后根据 $R_{\min}$ 以及主电阻网络、补偿电阻网络的零点偏移设计偏移电阻。

2.1　主电阻网络设计

主电阻网络的设计主要与目标电阻源的量程、精度以及可选基准电阻有关,主电阻网络的主要作用是解决量程范围的跨度 $[0, R_{\max} - R_{\min})$。在进行主电阻网络的设计中,重点要关注的是在满足量程范围前提下,实现电阻数量最少。具体的设计包括阻值分解、子模块阻值逼近以及主电阻网络生成与优化。

首先是阻值分解,其目的在于将主电阻网络的阻值 $[0, R_{\max} - R_{\min})$ 分解为 $n_{\mathrm{R,min}}$ 个子模块阻值 $R_{\mathrm{t},i}$,如算法 1 所示,其中 R_{main} 为主电阻网络阻值。阻值分解算法为主电阻网络中的子模块阻值的选取提供依据。

算法 1　阻值分解

Alg. 1　Resistance decomposition

输入:$R_{\mathrm{main}}, \Delta R$

输出:子模块阻值 $R_{\mathrm{t},i}$

```
1. 设定最大阻值初值 R_{a_1,k}|_{k=0} = R_main
2. for k = 1 : n_{R,min}
3.     if R_{a_1,k} < ΔR
4.         完成阻值分解 break
5.     else
6.         R_{a_1,k+1} = R_{a_1,k}
7.         R_{t,k} = R_{a_1,k}
8.     end
9. end
```

然后是子模块阻值逼近,用于从可选电阻集合 $\Omega = \{R_{a,i}\}$ 中选择尽量少的基准电阻以逼近每个子模块的阻值 R_{t},具体如算法 2 所示。

算法 2　子模块阻值逼近

Alg. 2　Sub-module resistance approximation

输入:$R_{\mathrm{t}}, \Omega = \{R_{a,i}\}$

输出:逼近 R_{t} 的所有电阻集合 Ψ

```
1. 设定初值 R_{t,k}|_{k=0} = R_t
2. for k = 1 : n_{R,min}
3.     for i = 1 : length(Ω)
4.         δR_i = R_{t,k} − R_{a,i}
5.     end
6.     选取 |δR_i| 最小且 δR_i ≥ 0 的对应 R_{a,i}, 记为 R_{a,i,k},
       并加入集合 Ψ
7.     R_{t,k+1} = R_{t,k} − R_{a,i,k}
8.     if R_{t,k} < min{R_{a,i}}
9.         break
10.    end
11. end
```

在算法 2 中,由于可能选用相同的电阻逼近 R_{t},即集合 Ψ 中可能存在重复元素,因而集合 Ψ 并不严格满足集合中元素的唯一性。

对于第 i 个子模块阻值 $R_{\mathrm{t},i}$,即逼近电阻集合为 Ψ_i,通过 Ψ_i 构成的实际子模块阻值记为 $R_{\mathrm{rt},i}$。

最后是主电阻网络生成与优化。算法 1 输入的是主电阻网络阻值 R_{main},满足 $R_{\mathrm{main}} > R_{\max} - R_{\min}$,以使主电阻网络阻值覆盖 $[0, R_{\max} - R_{\min})$。在 $[R_{\max} - R_{\min}, +\infty)$ 范围内取 R_{main} 作为算法 1 的输入,之后再通过算法 2 得到主电阻网络的结构,主电阻网络内的电阻数量与 R_{main} 的取值相关,因此需要以 R_{main} 作为变量对主电阻网络内的电阻数量进行优化。算法 3 可生成主电阻网络,并可对电阻数量进行优化。

算法 3 主电阻网络生成与优化

Alg. 3 Generation and optimization of MRN

输入:$R_{\max}, R_{\min}, \Delta R, \Omega = \{R_{a,i}\}$

输出:主电阻网络

1. $R_{\mathrm{m_range}} = R_{\max} - R_{\min}$
2. **for** R_{input} 从 $[R_{\mathrm{m_range}}, +\infty]$ 范围内取值
3. 调用算法 1 与算法 2 生成电阻网络
4. 统计电阻网络中所有电阻的数量
5. **end**
6. 选取电阻数量最少的网络作为主电阻网络

2.2 补偿电阻网络设计

考虑主电阻网络存在逼近误差 $n_{\mathrm{R,min}}\min\{R_{a,i}\}$,同时考虑非理想情况下,开关闭合时的电阻值 $R_{i,1} > 0$,因此实际的主电阻网络逼近误差极有可能大于理论值 $n_{\mathrm{R,min}}\min\{R_{a,i}\}$,故还需要一个补偿电阻网络用于修正主电阻网络的逼近误差。

每个开关闭合后考虑继电器电阻的实际阻值 $R_{i,1}$,即对于每个 i,有

$$\begin{cases} R_{i,1} = \dfrac{1}{\dfrac{1}{R_{\mathrm{rt},i}} + \dfrac{1}{R_{\mathrm{relay}}}} \\ R_{i,0} = R_{\mathrm{rt},i} \end{cases} \tag{6}$$

其中,R_{relay} 为继电器阻值。因此主电阻网络的零点偏移为

$$R_{\mathrm{main},0} = \sum_{i=1}^{n_{\mathrm{R}}} R_{i,1} \tag{7}$$

之后,需要先计算主电阻网络在 $[0, R_{\max} - R_{\min})$ 上的取值精度,再根据最大误差设计补偿电阻网络。

补偿电阻网络的设计主要关注目标电阻源的精度,因此首先需要得到电阻网络的精度,其计算方法如算法 4 所示。

在算法 4 中,*Solve_B*( ) 是根据电阻网络模型求解开关阵列的算法,本文采用逐次逼近的算法[15]。该算法将目标阻值与开关对应的权值逐一比较。如果目标阻值大于权值,则该开关为断开,目标阻值减去权值;否则,开关为闭合。按照此方法,直到所有权值参与比较。*Solve_R*( ) 是根据电阻网络开关阵列计算实际电阻值的函数,即定义 1。

算法 4 电阻网络精度计算

Alg. 4 Resistance network accuracy calculation

输入:$R_{i,0}, R_{i,1}, R_{\max}, R_{\min}, \Delta R, R_{\mathrm{main},0}$

输出:整个量程范围内的最大差值 *Error*

1. $R_{\mathrm{s}} = 0$
2. $Error = 0$
3. **while** $R_{\mathrm{s}} <= R_{\max} - R_{\min}$
4. $B = Solve_B(R_{\mathrm{s}} | \mathrm{Main})$
5. $R_{\mathrm{sv}} = Solve_R(B | \mathrm{Main}) - R_{\mathrm{main},0}$
6. 求解差值 $tError = |R_{\mathrm{sv}} - R_{\mathrm{s}}|$
7. **if** $tError > Error$
8. 记录历史最大差值 $Error = tError$
9. **end**
10. $R_{\mathrm{s}} = R_{\mathrm{s}} + \Delta R$
11. **end**

特别地,*Solve_B*( ) 求解的开关阵列对应实际电阻值总是小于给定电阻值,其目的在于为后续增加的补偿电阻网络提供条件。

将算法 4 中得到的量程范围内最大差值 *Error* 记为 δR_{main},下一步为根据 δR_{main} 进行补偿电阻网络设计。与主电阻网络不同,补偿电阻网络应当更加注重精度而非减少电阻数量。对此,采用算法 5 进行补偿网络的优化求解。

算法 5 补偿电阻网络生成与优化

Alg. 5 Generation and optimization of CRN

输入:$\delta R_{\mathrm{main}}, \Delta R, \Omega = \{R_{a,i}\}$

输出:补偿电阻网络

1. **for** R_{comp} 从 $[\delta R_{\mathrm{main}}, +\infty)$ 范围内取值
2. 调用算法 1 与算法 2 生成电阻网络
3. 调用算法 4 计算电阻网络在 $[0, \delta R_{\mathrm{main}})$ 内的最大阻值误差
4. **end**
5. 选取最大阻值误差最小值对应网络结构的结果作为补偿电阻网络,若存在多个值,则选取其中电阻数量最少的结果

2.3　偏移电阻网络设计

偏移电阻网络的主要作用包括两个:一个是为量程范围做整体平移,使主电阻网络需要解决的量程为[0,$R_{max}-R_{min}$),而非设计目标量程[R_{min},R_{max}),这有利于主电阻网络基准电阻的灵活选择;另一个是,由于$R_{i,1}>0$,主电阻网络与补偿电阻网络在开关均闭合时存在零点偏移,偏移电阻网络还应考虑这一阻值,即考虑主电阻网络零点偏移$R_{main,0}$和补偿电阻网络零点偏移$R_{comp,0}$等误差对最终输出的影响。

因此,偏移电阻网络阻值R_{offset}为

$$R_{offset}=R_{min}-R_{main,0}-R_{comp,0} \tag{8}$$

3　仿真结果与分析

3.1　算法仿真与分析

以输出 90 ~250 Ω 阻值范围为例,对算法进行验证。目标精度设置为 5 mΩ,选择接触电阻小的继电器,其典型值为 1.2 mΩ。

算法 3 仅给出了优化思路,具体的求解方法可以采取遍历、线性搜索、进化算法等。考虑本实例规模较小,可采用遍历的方法。遍历范围为[$R_{max}-R_{min}$, 5($R_{max}-R_{min}$)),即[160 000, 800 000)。使用 MATLAB 进行仿真,遍历过程如图 2 所示。

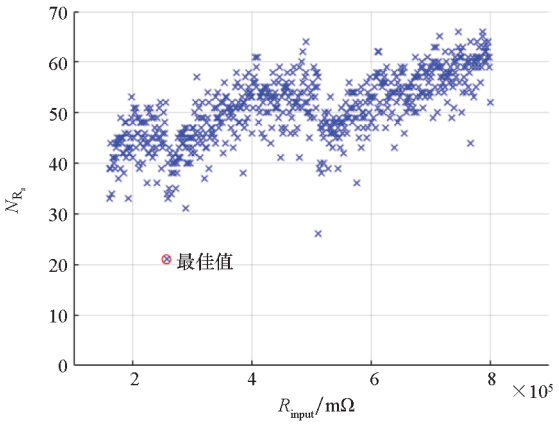


图 2　主电阻网络遍历过程

Fig. 2　Traversal process of MRN

图 2 中R_{input}为输入算法 3 的阻值,N_{R_s}为对应该阻值通过算法 1 与算法 2 得到的电阻数量。以图 2 中N_{R_s}最小的点为最佳值,最终得到主电阻网络电阻数量为 21,主电阻网络阻值分布如表 1 所示。

表 1　主电阻网络阻值分布

Tab. 1　Resistance distribution of MRN

序号	对应开关	子模块阻值/mΩ	电阻数量	电阻阻值/mΩ
1	b_1 MSB	128 000	2	127 000,1 000
2	b_2	64 000	1	64 000
3	b_3	32 000	1	32 000
4	b_4	16 000	1	16 000
5	b_5	8 000	1	8 000
6	b_6	4 000	1	4 000
7	b_7	2 000	1	2 000
8	b_8	1 000	1	1 000
9	b_9	500	1	500
10	b_{10}	250	1	250
11	b_{11}	125	1	125
12	b_{12}	62	3	50,10,2
13	b_{13}	31	2	30,1
14	b_{14}	15	1	15
15	b_{15}	7.3	2	6.3,1
16	b_{16} LSB	3	1	3

与算法 3 类似,算法 5 仅为求解思路,具体优化方法同样采用遍历算法。与主电阻网络不同,补偿电阻网络更加注重输出精度。

补偿电阻网络遍历过程如图 3 所示,图中R_{input}为输入算法 5 的最大误差,$R_{maxError}$为对应该输入的补偿电阻网络最大阻值误差。R_{input}的遍历范围为[δR_{main},$5\delta R_{main}$),即[14,70)。以图 3 中$R_{maxError}$最小的点为最佳值,可得到对应的补偿电阻网络阻值分布如表 2 所示。

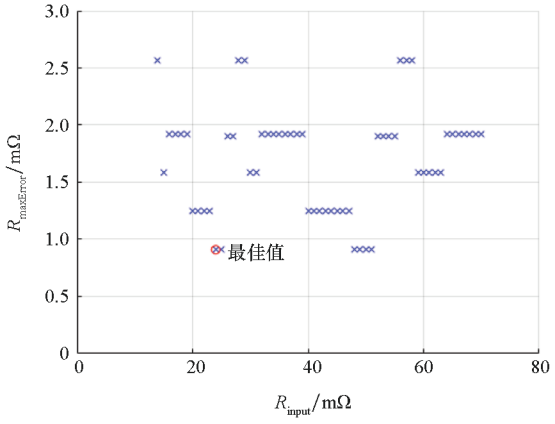


图 3　补偿电阻网络遍历过程

Fig. 3　Traversal process of CRN

表 2 补偿电阻网络阻值分布

Tab. 2 Resistance distribution of CRN

序号	对应开关	子模块阻值/mΩ	电阻数量	电阻阻值/mΩ
1	b_1 MSB	12	2	10,2
2	b_2	6	2	5,1
3	b_3 LSB	3	1	3

仿真得到 $R_{\text{main},0}$ 值为 18.5 mΩ，$R_{\text{comp},0}$ 值为 2.95 mΩ，再由式(8)可得 R_{offset} 为 89 978.55 mΩ。最终，该程控继电器电阻网络仿真输出精度为 4.431 3 mΩ，满足目标精度要求。

该算法解算时间仅为 18.128 s。相比于人工设计的方式，本文提出的方法大大提高了设计效率。

3.2 目标精度与基准电阻数量分析

前文采用的优化准则是主网络电阻数量最少的原则，本小节综合考虑目标精度与基准电阻，对整体最优方案深入探讨。

以输出 90 ~ 250 Ω 阻值范围为例，选择接触电阻典型值为 1.2 mΩ 的继电器，分别设定目标精度为[2,10]毫欧级，利用本文算法进行求解。

目标精度与实现精度对比如表 3 所示。结果表明，理论上可以满足目标精度为[2,10] 毫欧级的精度要求。

表 3 目标精度与实现精度对比

Tab. 3 Comparison of target and realization accuracy

单位：mΩ

精度要求	实现精度	精度要求	实现精度
2	1.988 1	7	6.808 8
3	2.999 3	8	7.753 5
4	3.854 1	9	8.951 8
5	4.431 3	10	8.800 7
6	5.619 9		

目标精度与电阻数量之间的关系如图 4 所示。在实现毫欧级目标精度时，总体上遵循的规律为目标精度越高，需要的电阻数量越多。但是，可能存在奇点，如图 4 中目标精度为 6 mΩ 的情况。对于奇点，可利用高目标精度方案与低目标精度方案的包含关系，即目标精度高的方案可满足目标精度低的需求，从目标精度更高方案中选择电阻数量最少的方案作为最终结果。

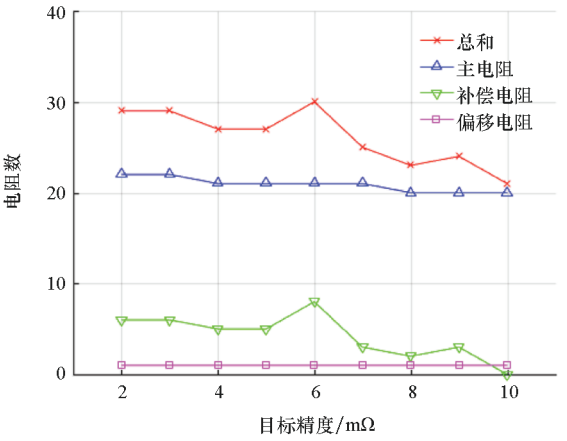


图 4 精度与电阻数量之间的关系

Fig. 4 Relationship between accuracy and number

因此，联合考虑电阻数量和精度两个维度来选择最终的算法时，存在两种可能结果：一种是由算法求解该目标精度得到的电阻数量为最少；另一种是算法求解更高目标精度得到的电阻数量为最少。

综上，综合考虑电阻数量和精度，为生成最佳方案，可采用的策略为，先按本文算法求出满足该目标精度的电阻网络，而后考虑更高目标精度对应的电阻网络，通过比较电阻数量，选出同时满足目标精度需求和电阻数量最少的最优方案。

此外，当阻值精度设定为 10 mΩ 时，便可不需要补偿电阻网络，这也验证了补偿电阻网络的主要作用范围为毫欧级精度。

4 结论

针对高精度程控继电器电阻网络设计复杂的问题，提出一种高精度程控继电器电阻网络生成算法，该算法根据需求量程和精度，自动生成继电器电阻网络。

仿真结果表明，根据本文算法得到的继电器电阻网络可满足目标精度要求。该算法大大提高了设计效率，具有较好的工程应用价值。

参考文献(References)

[1] 张天宏，丁毅，黄向华. 用于电阻类传感器校准的电子合成电阻[J]. 传感器技术，2004，23(10)：53 - 55.
ZHANG Tianhong，DING Yi，HUANG Xianghua. Electronic synthesized resistor for calibration of resistor-type sensors[J]. Journal of Transducer Technology，2004，23(10)：53 - 55.(in Chinese)

[2] TSAO S H. A 25-bit reference resistive voltage divider[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement，1987，IM - 36(2)：285 - 290.

[3] 王冰. 嵌入式高精度电阻源的研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2016.

WANG Bing. Research on embedded resistance source with high precision[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)

[4] 赵桂明. 基于继电器模块的程控电阻发生器[J]. 计量技术, 2017(4): 30 – 31.
ZHAO Guiming. Program-controlled resistance generator based on relay module [J]. Measurement Technique, 2017(4): 30 – 31. (in Chinese)

[5] BANU M, TSIVIDIS Y. Floating voltage-controlled resistors in CMOS technology [J]. Electronics Letters, 1982, 18(15): 678 – 679.

[6] JEON H, KOBAYASHI K W. Linear voltage controlled variable resistor using body potential in SOI process [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2016, 26(10): 816 – 818.

[7] KUSHIMA M, INABA M, TANNO K, et al. Design of a floating node voltage-controlled linear variable resistor circuit[C]//Proceedings of the 47th Midwest Symposium on Circuits and Systems, 2004: I – 85 – I – 88.

[8] YUCE E, MINAEI S, HERENCSAR N. Grounded voltage controlled positive resistor with ultra low power consumption[J]. Elektronika Ir Elektrotechnika, 2014, 20(7): 45 – 50.

[9] ARSLANALP R, YUCE E K, TOLA A T. Low-component count BJT technology-based current-controlled tunable resistors and their applications[J]. IET Circuits, Devices & Systems, 2013, 7(1): 21 – 30.

[10] 行鸿彦, 赵晨, 余炳莹, 等. JFET 高精度可变电阻器的设计及其应用[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(8): 1884 – 1891.
XING Hongyan, ZHAO Chen, YU Bingying, et al. Design of voltage-controlled resistor based on JFET and its application in automatic weather station signal simulator [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(8): 1884 – 1891. (in Chinese)

[11] Fluke Corporation. Fluke 525B temperature/pressure calibrator datasheet[EB/OL]. (2007 – 10 – 06) [2021 – 05 – 02]. https://dam-assets.fluke.com.cn/s3fs-public/525bgseng0000.pdf? PVT9O739LxYBCWjHoSeIthJJjF8TMPXn.

[12] 喻佳健. 高精度电阻校准仪的设计与实现技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
YU Jiajian. Research on the design and implementation technology of high precision resistance calibrator [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)

[13] National Instruments. NI PXI-2722 specifications [EB/OL]. (2017 – 04 – 14) [2021 – 05 – 02]. http://www.ni.com/pdf/manuals/375813b.pdf.

[14] Pickering Interfaces. PXI RTD simulator module 40 – 262 [EB/OL]. (2018 – 10 – 9) [2021 – 05 – 02]. https://www.pickeringtest.com/content/downloads/datasheets/40 – 262D.pdf.

[15] 陈盼辉, 郭立峰, 金传喜. 一种数控精密电阻源的设计与实现[J]. 测控技术, 2016, 35(2): 121 – 123.
CHEN Panhui, GUO Lifeng, JIN Chuanxi. Design and implementation of a digital precision resistance generator[J]. Measurement & Control Technology, 2016, 35(2): 121 – 123. (in Chinese)