AnyProg

C++ 数学优化包

pangpang@hi-nginx.com

2019 年 12 月 1 日

目录

Chapter 1

起源

应该有一个 C++ 版的 LINGO。
它必须免费、高效而且易用。
它必须以 C++ 的方式解决 LINGO 需要面对的问题。
它的名字是：AnyProg[1]。

[1] Any Programming。

Chapter 2

功能

AnyProg 可用于求解以下模型定义的所有问题:

$$\begin{aligned} \min_{x \in \mathbf{R}^n} \quad & f(x) \\ \texttt{s.t.} \quad & g_i(x) \le 0, \qquad i = 0, \cdots, m_s - 1 \\ & h_j(x) = 0, \qquad j = 0, \cdots, m_t - 1 \\ & x_k \in [L_k, U_k], \qquad k = 0, \cdots, n - 1 \end{aligned} \tag{2.1}$$

其中，f 是目标函数，g_i 和 h_j 分别是不等式约束函数 (m_s 个) 和等式约束函数 (m_t 个)，x 是一个 n 维实变量，其分量 x_k 位于闭区间 $[L_k, U_k]$。模型 (2.1) 不仅适合于连续优化问题，也适合于离散优化问题，还适合于混合优化问题。对 AnyProg 来说，更重要的概念是解的全局性，而不是变量的连续性。同时，目标函数和约束函数是否线性并不重要，AnyProg 并不区别看待它们。

AnyProg 能处理的问题的类型十分广泛：**LP**[1]、**QP**[2]、**NLP**[3]、**MILP**[4]、**MIQP**[5]、**MINLP**[6]。此外，它也能进行数据的非线性最小二乘拟合，以及非线性方程组的求解。

---

[1]线性优化
[2]二次优化
[3]非线性优化
[4]混合整数线性优化
[5]混合整数二次优化
[6]混合整数非线性优化

Chapter 3

技巧

3.1 线性优化

线性优化的模型定义最好采用矩阵方式，类似于 MATLAB。如例 (3.1)：

$$
\begin{aligned}
\min_{x \in \mathbf{R}^2} \quad & f(x) = 8x_0 + x_1 \\
\texttt{s.t.} \quad & g_0(x) = \quad x_0 + 2x_1 \quad \geq -14 \\
& g_1(x) = \quad -4x_0 - x_1 \quad \leq -33 \\
& g_2(x) = \quad 2x_0 + x_0 \quad \leq 20 \\
& x_i \geq 0, \quad i = 0, 1
\end{aligned}
\tag{3.1}
$$

对于不等于约束，如果采用的是 $\geq$ 方式，则两边乘以 -1 使之反转。如此，原问题可用矩阵表示如下：

$$
obj = \begin{pmatrix} 8 \\ 1 \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} -1 & -2 \\ -4 & -1 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}, b = \begin{pmatrix} 14 \\ -33 \\ 20 \end{pmatrix}.
$$

在 AnyProg 中，类 `real_block` 用来表示矩阵。因此，例 (3.1) 模型定义如下：

```cpp
#include <anyprog/anyprog.hpp>

int main(int argc, char** argv)
{
    size_t dim = 2;
    anyprog::real_block obj(dim, 1), A(3, dim), b(3, 1);
    obj << 8, 1;
    A << -1, -2,
        -4, -1,
        2, 1;
    b << 14, -33, 20;

    anyprog::optimization::range_t range = { 0, 100 };

    anyprog::optimization opt(obj, range);
```

```
    opt.set_inequation_condition(A, b);
    auto ret = opt.solve();
    anyprog::optimization::print(opt.is_ok(), ret, obj);
    return 0;
}
```

编译、运行后可知，解是 $f(6.5,7)=59$。本例不包含等式约束。若有，则可效法 A、b，炮制 Aeq 和 beq，然后使用方法 `set_equation_condition(Aeq,beq)` 添加等式约束，继而求解。本例中的 `range` 是范围，表示 $\forall i, x_i \in [0,100]$。若变量的不同分量有不同的范围限制，可用容器 `std::vector` 包装范围类 `range_t` 列表，并按顺序定义各分量范围。若有较好初值，则可替换范围参数。使用范围参数意味着初值是随机的，有可能不能求解。此时可多次运行程序。随机初值引起解的不确定性问题。解决该问题的最佳方法是用 `search` 方法取代 `solve` 方法；前者对应于全局解，后者对应于局部解。使用该方法时，对于局部解较少的模型，务必减少前两个参数[1]的数值。

3.2 二次优化

二次优化的模型定义如下：

$$\begin{aligned}
\min_{x\in\mathbf{R}^n} \quad & f(x)=\frac{1}{2}x^T H x + c^T x \\
\texttt{s.t.} \quad & A\boldsymbol{.}x \le b \\
& Aeq\boldsymbol{.}x = beq \\
& x_k \in [L_k, U_k], \quad k=0,\cdots,n-1
\end{aligned} \tag{3.2}$$

该模型用矩阵形式表示。在求解该类模型时，最好的方式就是顺其自然。比如下例:

$$\begin{aligned}
\min_{x\in\mathbf{R}^2} \quad & f(x)=\frac{1}{2}x_0^2 + x_1^2 - x_0x_1 - 2x_0 - 6x_1 \\
\texttt{s.t.} \quad & g_0(x) = \quad x_0 + x_1 \qquad\qquad \le 2 \\
& g_1(x) = \quad -x_0 + 2x_1 \qquad\quad \le 2 \\
& g_2(x) = \quad 2x_0 + x_1 \qquad\qquad \le 3 \\
& x_i \ge 0, \quad i=0,1
\end{aligned} \tag{3.3}$$

其矩阵表示如下：

$$H=\begin{pmatrix}1 & -1\\ -1 & 2\end{pmatrix}, A=\begin{pmatrix}1 & 1\\ -1 & 2\\ 2 & 1\end{pmatrix}, b=\begin{pmatrix}2\\2\\3\end{pmatrix}, c=\begin{pmatrix}-2\\-6\end{pmatrix}$$

因此，它的模型定义为：

```
#include <anyprog/anyprog.hpp>

int main(int argc, char** argv)
{
```

[1]`search` 方法的前两个参数的默认值分别是 100 和 30，这是专门应对变态测试模型的基本配置。对于局部解较少的普通模型，两个数值都可以大幅度降低；一般设置 10 和 3 即可。

```
    size_t dim = 2;
    anyprog::real_block H(dim, dim), c(dim, 1);
    H << 1, -1,
        -1, 2;
    c << -2, -6;

    anyprog::optimization::function_t obj = [&](const anyprog::real_block& x) {
        anyprog::real_block ret = 0.5 * (x.transpose() * H * x) + c.transpose() * x;
        return ret(0, 0);
    };

    anyprog::real_block A(3, dim), b(3, 1);
    A << 1, 1,
        -1, 2,
        2, 1;
    b << 2, 2, 3;

    anyprog::optimization::range_t range = { 0, 100 };

    anyprog::optimization opt(obj, range, dim);
    opt.set_inequation_condition(A, b);
    auto ret = opt.solve();
    anyprog::optimization::print(opt.is_ok(), ret, obj);
    return 0;
}
```

编译、运行，其解为 $f\left(0.666667, 1.33333\right) = -8.22222$

3.3 非线性优化

非线性优化是最直观地匹配模型 (2.1) 的优化类型。如下例 (3.4)：

$$
\begin{aligned}
\max_{x\in\mathbf{R}^2} \quad & f\left(x\right) = \log x_0 + \log x_1 \\
\text{s.t.} \quad & g_0\left(x\right) = \quad x_0 - x_1 \quad\quad \le 0 \\
& h_0\left(x\right) = \quad x_0 + 2x_1 \quad = 5 \\
& x_i \ge 0, \quad i = 0, 1
\end{aligned}
\tag{3.4}
$$

这个例子即有不等式约束，也有等式约束。同时，该模型是求最大值而非最小值，可通过目标函数乘以 -1 来转换为标准形式。如此，该模型可定义如下:

```
#include <anyprog/anyprog.hpp>

int main(int argc, char** argv)
{
    size_t dim = 2;
    anyprog::optimization::function_t obj = [](const anyprog::real_block& x) {
        return -log(x(0)) - log(x(1));
    };

```

```
    std::vector<anyprog::optimization::inequation_condition_function_t> ineq = {
        [&](const anyprog::real_block& x) {
            return x(0) - x(1);
        }
    };

    std::vector<anyprog::optimization::equation_condition_function_t> eq = {
        [&](const anyprog::real_block& x) {
            return x(0) + 2 * x(1) - 5;
        }
    };

    anyprog::optimization::range_t range = { 0, 10 };

    anyprog::optimization opt(obj, range, dim);
    opt.set_inequation_condition(ineq);
    opt.set_equation_condition(eq);
    auto ret = opt.solve();
    anyprog::optimization::print(opt.is_ok(), ret, obj);
    return 0;
}
```

编译、运行获得解：$f(1.66667, 1.66667) = 1.02165$。例子 (3.4) 或许过于简单了。然而，无论目标函数和约束函数取何种形式，从 AnyProg 的角度来说，它们并无差异——重要的是描述模型的结构，而非模型的具体构造。

有时，人们希望在求解时使用函数梯度信息。其实，这并非必须。实际上，这常常费力不讨好。

对于无约束的情况，也可以通过 AnyProg 提供两个静态方法 fminbnd 和 fminunc 进行求解。假设需要求解 Rosenbrock[2]函数 $f(x) = 100\left(x_1 - x_0^2\right)^2 + (1 - x_0)^2$ 的最小值，变量范围限制为 $\forall i, x_i \in [-10, 10]$。那么，求解程序会很简单：

```
#include <anyprog/anyprog.hpp>

int main(int argc, char** argv)
{
    size_t dim = 2;
    anyprog::optimization::function_t obj = [](const anyprog::real_block& x) {
        return 100 * pow(x(1) - pow(x(0), 2), 2) + pow(1 - x(0), 2);
    };

    anyprog::optimization::range_t range = { -10, 10 };

    auto ret = anyprog::optimization::fminbnd(obj, range, dim, 1e-10);
    anyprog::optimization::print(true, ret, obj);

    return 0;
}
```

当然，若有较理想初值，也可使用 fminunc 求解：

```
#include <anyprog/anyprog.hpp>
```

[2]该函数的全局解 $x = (1, 1)^T$，对应的函数值是 0。请参考：http://mathworld.wolfram.com/RosenbrockFunction.html。

```cpp

int main(int argc, char** argv)
{
   size_t dim = 2;
   anyprog::optimization::function_t obj = [](const anyprog::real_block& x) {
      return 100 * pow(x(1, 0) - pow(x(0, 0), 2), 2) + pow(1 - x(0, 0), 2);
   };

   anyprog::real_block param(dim, 1);
   param.fill(0);

   auto ret = anyprog::optimization::fminunc(obj, param, 1e-10);
   anyprog::optimization::print(true, ret, obj);

   return 0;
}
```

3.4 整数优化

整数优化不仅包括纯整数优化:$\forall i, x_i \in \mathbf{Z}$，也包括混合整数优化:$\exists i, x_i \in \mathbf{Z}$。所谓整数，既指一般整数的情况：$\exists i, x_i \in \mathbf{Z}$，也指 0 | 1 值的情况：$\exists i, x_i \in \{0, 1\}$。

整数优化通过两个途径达到: 第一、调用 `set_enable_integer_filter` 或者 `set_enable_binary_filter` 方法，第二、调用 `set_filter_function` 方法。前者适合于纯整数优化，后者则适合混合整数优化。此二途径对所有符合模型 (2.1) 的优化问题均有效。`set_enable_integer_filter` 方法保证解的每一分量皆为限制范围内的整数，`set_enable_binary_filter` 方法则保证解的每一分量不是 0 便是 1。

来看例子 (3.5)：

$$
\begin{aligned}
\min_{x \in \mathbf{R}^2} \quad & f(x) = 0.5x_0^2 + 0.5x_1^2 - 2x_0 - 2x_1 \\
\text{s.t.} \quad & g_0(x) = \quad -x_0 + x_1 \quad \leq 2 \\
& g_1(x) = \quad x_0 + 3x_1 \quad \leq 5 \\
& g_2(x) = \quad x_0^2 + x_1^2 - 2x_1 \quad \leq 1 \\
& x_i \geq 0, \quad i = 0, 1 \\
& x_0 \in \mathbf{Z}
\end{aligned}
\tag{3.5}
$$

该例子[3]仅要求 x_0 为整数。此时，需要通过 `set_enable_integer_filter` 方法来进行必要的配置：

```cpp
#include <anyprog/anyprog.hpp>

int main(int argc, char** argv)
{
   size_t dim = 2;
   anyprog::optimization::function_t obj = [&](const anyprog::real_block& x) {
      return 0.5 * x(0) * x(0) + 0.5 * x(1) * x(1) - 2 * x(0) - 2 * x(1);
   };

```

[3] https://inverseproblem.co.nz/OPTI/index.php/Probs/MIQCQP

```
    std::vector<anyprog::optimization::inequation_condition_function_t> ineq = {
        [](const anyprog::real_block& x) {
            return -x(0) + x(1) - 2;
        },
        [](const anyprog::real_block& x) {
            return x(0) + 3 * x(1) - 5;
        },
        [](const anyprog::real_block& x) {
            return x(0) * x(0) + x(1) * x(1) - 2 * x(1) - 1;
        }

    };

    anyprog::optimization::range_t range = { 0, 100 };

    anyprog::optimization opt(obj, range, dim);
    opt.set_inequation_condition(ineq);
    opt.set_filter_function([](anyprog::real_block& x) {
        x(0) = round(x(0));
    });
    auto ret = opt.search(10,3);
    anyprog::optimization::print(opt.is_ok(), ret, obj);
    return 0;
}
```

其全局解为：$f(1, 1.33333) = -3.27778$。

3.5 TSP 问题

3.6 Assignment 问题

3.7 数据拟合问题

3.8 方程组求解

Chapter 4

展望