arXiv:2601.01604v1 [stat.CO] 4 Jan 2026

grangersearch：集成 tidyverse 的穷举式格兰杰因果关系检验 R 包

Nikolaos Korfiatis*
爱奥尼亚大学

摘要

本文介绍 grangersearch，这是一个用于对多个时间序列进行穷举格兰杰因果关系搜索的 R 包。该软件包提供：（1）跨多个变量的穷举成对搜索；（2）自动优化滞后阶数并进行可视化；（3）兼容 tidyverse 的语法，支持管道运算符和非标准求值；（4）通过 `tidy()` 和 `glance()` 方法与 broom 生态系统集成。该软件包封装了 vars 基础设施，同时提供简洁的探索性因果分析接口。我们介绍其统计方法，通过实例演示该软件包，并讨论应用研究人员需要考虑的实际问题。

关键词：格兰杰因果关系、时间序列分析、VAR 模型、穷举搜索、tidyverse、R。

1. 引言：R 中的格兰杰因果关系

理解时间序列变量之间的因果关系，是经济学、金融学、神经科学及许多其他领域中的一个基础问题。尽管真正的因果关系在哲学上十分复杂，仅凭观察数据也难以确立，Granger（1969年）提出了一种基于可预测性的实用且可检验的因果关系概念：如果变量 X 的过去值能够提供有助于预测另一个变量 Y 的信息， X 且这些信息超出了 Y 自身过去值所包含的信息， Y 那么就称

格兰杰因果关系检验已应用于众多不同领域。在宏观经济学中，Sims （1972）曾著名地运用这一方法研究货币与收入关系；而Kraft 和 Kraft （1978年）则率先将其用于能源经济学。包括 Hiemstra 和 Jones （1994年）在内的金融市场研究人员扩展了这一方法，用于研究价格—成交量动态关系；神经科学家也将格兰杰因果关系用于脑连接分析（Seth、Barrett 和 Barnett 2015）。其统计学基础是向量自回归（VAR）模型（Sims1980），Lütkepohl （2005年）提供了全面的论述，而关于因果解释的讨论则见Peters、Janzing 和 Schölkopf（2017）。

尽管格兰杰因果检验广受欢迎，但应用研究者在R（R Core Team 2024年）中实施这类检验仍然颇为繁琐。主要基础设施由**vars**软件包（Pfaff2008）提供，该软件包通过各项函数提供全面的 VAR 建模功能

*信息学系，爱奥尼亚大学，Plateia Iatrou Tsirigoti 7，希腊科孚岛 GR-49100。电子邮件：nkorf@ion.gr

例如 `VAR()`和 `causality()`。然而，用户必须手动指定变量对、构建适当的模型设定，并解读原始输出。**lmtest** 软件包（Zeileis 和 Hothorn，2002）提供了一个更简单的 `grangertest()`函数，用于双变量分析，但缺乏多变量搜索功能。**MSBVAR**软件包提供了 `granger.test()`用于生成所有成对检验矩阵的功能，但其开发已停滞。近来，**bruceR** 软件包新增了 `granger_causality()`，可在更广泛的工具包中进行多变量检验；而**NlinTS** 软件包（Hmamouche 2020年）则利用神经网络将格兰杰因果关系扩展至非线性情境。然而，这些解决方案都无法与Wickham、Averick、Bryan、Chang、McGowan、François、Grolemund、Hayes、Henry、Hester 等人2019年提出的 tidyverse 生态系统无缝集成，而该生态系统已成为现代R 工作流程的核心。

本文介绍 grangersearch，这是一个基于 vars 基础架构构建的 R 包，提供以下功能：

- 通过单一函数接口检验双向因果关系
- 对多个时间序列变量进行穷尽式成对搜索
- 自动优化滞后阶数并进行可视化
- 兼容 tidyverse 的语法，支持管道运算符和非标准求值
- 包含所有相关检验统计量的结构化输出对象
- 与**broom**软件包（Robinson2014）生态系统集成

本文其余部分安排如下。第2 节回顾格兰杰因果检验所依据的统计方法。第3 节比较现有的 R 语言格兰杰因果分析软件。第4 节介绍**grangersearch**的设计与功能。第5节通过使用**vars**软件包中的加拿大宏观经济数据集，展示具体示例，并讨论实际应用中的注意事项、局限性和潜在扩展。第7 节总结全文。

2. 统计方法

2.1. 格兰杰因果关系

格兰杰因果关系的概念基于两个原则：（1）原因先于结果发生；（2）原因包含关于结果的独特信息，而这些信息无法从其他来源获得（格兰杰 1969年）。

形式上，设$\{X_t\}$ 和$\{Y_t\}$ 是两个平稳时间序列。我们称 X 格兰杰导致 Y，如果：

$$\sigma^2(Y_t|Y_{t-1}, Y_{t-2}, \ldots) > \sigma^2(Y_t|Y_{t-1}, Y_{t-2}, \ldots, X_{t-1}, X_{t-2}, \ldots) \tag{1}$$

其中，$\sigma^2(Y_t|\cdot)$表示在给定条件信息的情况下，对 Y_t 进行最优线性预测的方差。换言之，如果纳入 X 的过去值后，对 Y 的预测效果超出仅使用 Y 的过去值所能达到的效果，则称 X 格兰杰导致 Y。

2.2. 向量自回归模型

格兰杰因果关系检验通常使用向量自回归（VAR）模型（Sims 1980年）实现。阶数为 p的双变量VAR模型，记作VAR（p），可写为：

$$Y_t = \alpha_1 + \sum_{i=1}^{p} \beta_{1i} Y_{t-i} + \sum_{i=1}^{p} \gamma_{1i} X_{t-i} + \varepsilon_{1t} \tag{2}$$

$$X_t = \alpha_2 + \sum_{i=1}^{p} \beta_{2i} X_{t-i} + \sum_{i=1}^{p} \gamma_{2i} Y_{t-i} + \varepsilon_{2t} \tag{3}$$

其中 α_1，α_2 为截距，β_{ji} 和 γ_{ji} 为自回归系数，而 ε_{1t}，ε_{2t} 为可能存在同期相关的白噪声误差项。假设这些误差满足 $\mathrm{E}[\varepsilon_{jt}] = 0$，对于 $t \neq s$有 $\mathrm{E}[\varepsilon_{jt}\varepsilon_{js}] = 0$，并且 $\mathrm{E}[\varepsilon_{jt}\varepsilon_{kt}] = \sigma_{jk}$（可能非零）。

2.3. 假设检验

检验 X 是否 Granger 导致 Y 可归结为检验系数 γ_{1i} 在方程2 中是否联合为零：

$$H_0 : \gamma_{11} = \gamma_{12} = \cdots = \gamma_{1p} = 0 \tag{4}$$

在原假设下，X 的滞后值不会提供关于 Y 的额外预测信息，超出 Y 自身滞后值所包含的信息。

该假设可以通过标准的 F 检验来检验：将受限模型（不包含 X 个滞后项）与非受限模型（包含 X 个滞后项）进行比较。检验统计量为：

$$F = \frac{(\mathrm{RSS}_R - \mathrm{RSS}_U)/p}{\mathrm{RSS}_U/(T - 2p - 1)} \tag{5}$$

其中，RSS_R 和 RSS_U 分别表示受限模型和非受限模型的残差平方和，T 表示样本量，p 表示滞后阶数。在 H_0 下，该统计量渐近服从 $F(p,\ T - 2p - 1)$ 分布。

grangersearch 软件包会双向执行此检验——检验 X 是否是 Y 的格兰杰原因，以及 Y 是否是 X 的格兰杰原因——从而全面呈现两个时间序列之间的预测关系。

2.4. 滞后阶数选择

在 VAR 设定中，滞后阶数 p 的选择至关重要，并会显著影响检验结果。滞后项过少可能无法捕捉真实的动态关系，而滞后项过多则会降低统计功效，并可能因估计了不必要的参数而引入伪相关。

信息准则为滞后阶数选择提供数据驱动的指导。最常用的准则是赤池信息准则（AIC）和贝叶斯信息准则（BIC）：

$$\mathrm{AIC}(p) = \log|\hat{\Sigma}_p| + \frac{2pK^2}{T} \tag{6}$$

$$\mathrm{BIC}(p) = \log|\hat{\Sigma}_p| + \frac{pK^2 \log(T)}{T} \tag{7}$$

软件包	双变量	多变量	搜索	Tidyverse	broom	活跃
vars	✓	✓	—	—	—	✓
lmtest	✓	—	—	—	—	✓
MSBVAR	✓	✓	✓	—	—	—
bruceR	✓	✓	—	—	—	✓
NlinTS	✓	—	—	—	—	✓
grangersearch	✓	—	✓	✓	✓	✓

表1：用于格兰杰因果关系检验的 R 包比较。“多变量”表示支持多变量（条件）格兰杰因果关系。“搜索”表示自动对变量进行成对搜索。“Tidyverse”表示兼容管道操作并支持非标准求值。“Broom”表示支持 `tidy()`/`glance()` 方法。“活跃”表示截至2024年仍在持续维护。

其中，$\hat{\Sigma}_p$ 是 VAR(p) 模型的残差协方差矩阵估计值，K 是变量数量，T 是样本量。由于惩罚项更重，BIC 倾向于选择更简约的模型，而 AIC 可能会选择更大的滞后阶数。vars 包提供`VARselect()`用于计算这些准则。

另一种方法是在**grangersearch**中实现的，即考察格兰杰因果关系检验结果对多种滞后设定的敏感性。在一系列合理的滞后阶数下仍保持显著的结果，能够为稳健的因果关系提供更有力的证据（Toda和Yamamoto 1995年）。

2.5. 平稳性与协整

标准的格兰杰因果关系检验假设所分析的时间序列是（弱）平稳的。当时间序列非平稳（存在单位根）时，检验统计量可能不服从其假设分布，从而可能导致伪推断。

因此，研究人员应在进行格兰杰因果分析之前检验平稳性。常见方法包括增广迪基-富勒（ADF）检验和 Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin（KPSS）检验。非平稳时间序列通常可以通过差分转化为平稳序列。

当非平稳时间序列存在协整——即共享一个随机趋势——时，采用向量误差修正模型（VECM）框架比采用差分向量自回归模型（Toda 和 Yamamoto 1995年）更合适。**vars** 软件包提供了协整分析工具，例如函数 `ca.jo()` 和 `vec2var()`。当前版本的**grangersearch** 假设序列平稳；未来版本计划支持协整系统的处理。

3. R 中现有的格兰杰因果关系软件

表1 概述了提供格兰杰因果关系检验功能的R 软件包。每个软件包都体现了不同的设计理念和目标用例。

该**vars** 软件包（Pfaff2008）提供了 R 中最全面的 VAR建模基础设施。它的 `causality()` 函数在完整的多变量框架内，同时实施格兰杰因果关系检验和瞬时因果关系检验，并以系统中的所有其他变量为条件。这种方法在统计上十分严谨，但要求用户预先指定 VAR模型，并且

手动解读输出结果。该软件包适用于验证性分析，尤其适合对因果结构有具体假设的研究者。

该**lmtest** 软件包（Zeileis 和 Hothorn 2002）通过 `grangertest()`提供了更简单的接口，可使用标准线性模型工具进行双变量格兰杰因果检验。虽然易于使用，但它一次只能检验一个方向，也不支持多变量搜索。

MSBVAR 包过去提供了 `granger.test()`，用于生成所有成对格兰杰因果检验的矩阵。这项功能可谓预示了 grangersearch 的穷举搜索方法。不过，该软件包自 2015 年以来便未更新，且与近期的 R 版本不兼容。

bruceR 包将 `granger_causality()` 纳入其更全面的统计工具集。它支持基于 VAR 模型的多变量检验，但不支持自动搜索变量对，也未集成 tidyverse。

NlinTS 包使用神经网络模型（VARNN）将格兰杰因果关系扩展到非线性情境。这解决了标准线性格兰杰因果关系的一个重要局限，但该软件包侧重于方法论，而非工作流程集成。

grangersearch 软件包采用了不同的方法：将穷举搜索能力与兼容 tidyverse 的接口相结合。现有软件包要求用户手动指定变量对，而 grangersearch 会自动在多个变量中进行发现，因此适用于探索性分析。通过管道运算符和非标准求值与 tidyverse 约定集成，确保该软件包能够自然融入现代 R 工作流；结构化输出对象和 broom 兼容性则支持可复现研究实践。

4. 包描述

4.1. 安装

该**grangersearch** 软件包可使用**devtools** 软件包（Wick- ham、Hester、Chang 和 Bryan 2024 年）从 GitHub 安装：

```
R> devtools::install_github("nkorf/grangersearch")
```

该软件包依赖**vars**（Pfaff 2008) 进行 VAR 模型估计，依赖**rlang**（Henry 和 Wickham 2024年) 进行整洁求值，依赖**tibble**生成 tibble 输出，并依赖**generics** 进行 S3 方法注册。

4.2. 核心函数：granger_causality_test()

用于双变量检验的主要函数是 `granger_causality_test()`。其函数签名如下：

```
granger_causality_test(.data = NULL, x, y, lag = 1, alpha = 0.05,
  test = "F")
```

参数如下：

组成部分	描述
`x_causes_y`	逻辑值，指示 X 是否在水平 α
`y_causes_x`	逻辑值，指示 Y 是否在水平 α
`p_value_xy`	p-值，用于检验 $X \to Y$
`p_value_yx`	p-值，用于检验 $Y \to X$
`test_statistic_xy`	F-统计量，用于 $X \to Y$ 检验
`test_statistic_yx`	F-统计量，用于 $Y \to X$ 检验
`lag`	VAR设定中使用的滞后阶数
`alpha`	用于检验的显著性水平
`n`	观测数量
`x_name, y_name`	输入变量名称

表2：`granger_causality_test()`返回的“`granger_result`”对象的组成部分。

`.data` 包含时间序列变量的可选数据框或 tibble。

`x, y` 包含时间序列的数值向量，或（如果提供了 `.data` ）未加引号的列名。

`lag` 用于指定 VAR模型滞后阶数的整数（默认值：1）。

`alpha` 假设检验的显著性水平（默认值：0.05）。

`test` 检验类型；目前仅支持 `"F"`。

该函数返回一个类为“`granger_result`”的 S3对象，其中包含因果关系两个方向的检验结果。表2介绍了各组成部分。

4.3. tidyverse 集成

grangersearch 的一项关键设计目标是与 tidyverse生态系统无缝集成（Wick-ham 等人 2019）。该软件包支持**magrittr** 管道（`%>%`）和原生 R 管道（`|>`，该管道于 4.1.0 版本中引入）：

```
R> library("grangersearch")
R> data("Canada", package = "vars")
R>
R> # Using native pipe
R> Canada |> granger_causality_test(e, U, lag = 2)
R>
R> # Using magrittr pipe
R> Canada %>% granger_causality_test(e, U, lag = 2)
```

非标准求值（NSE）允许在使用数据框时不加引号地传入列名，从而让代码更易读，也与其他 tidyverse 函数保持一致：

```
R> # Unquoted column names (with data frame)
R> granger_causality_test(Canada, e, U)
R>
R> # Equivalent explicit specification
R> granger_causality_test(x = Canada$e, y = Canada$U)
```

该软件包提供 `tidy()`和 `glance()` 遵循 **broom** 惯例的方法（Robinson2014）。 `tidy()` 方法返回一个 tibble，每个因果关系方向对应一行：

```
R> result <- Canada |> granger_causality_test(e, U, lag = 2)
R> tidy(result)

# A tibble: 2 x 6
  direction cause effect statistic   p.value significant
  <chr>     <chr> <chr>      <dbl>     <dbl> <lgl>
1 e -> U    e     U          16.7  0.0000003 TRUE
2 U -> e    U     e           1.23 0.298     FALSE
```

`glance()` 方法返回一个单行 tibble，用于汇总整体检验结果：

```
R> glance(result)

# A tibble: 1 x 5
    lag alpha     n x_name y_name
  <dbl> <dbl> <int> <chr>  <chr>
1     2  0.05    84 e      U
```

4.4. 穷举搜索：granger_search()

`granger_search()` 函数可对多个变量执行穷举式的成对格兰杰因果关系检验：

```
granger_search(.data, ..., lag = 1, alpha = 0.05, test = "F",
  include_insignificant = FALSE)
```

参数如下：

`.data` 包含时间序列变量的数据框或 tibble。

... 使用 tidyselect 语法进行可选的列选择。如果省略，则会检验所有数值列。

`lag` 整数滞后阶数，或要搜索的滞后项向量。

`alpha` 用于筛选结果的显著性水平。

`include_insignificant` 逻辑值；如果为 `FALSE`（默认），则仅返回显著关系。

对于包含 K 个数值列的数据集，该函数会检验所有 K（$K-1$）个有向变量对，并按 p 值排序返回结果。如果提供了滞后项向量（例如 `lag = 1:4`），函数会检验每个滞后阶数，并为每个变量对报告 p 值最小的结果。
该函数返回一个类别为“granger_search”的 `plot()` 方法，用于生成因果关系矩阵可视化（示例请参见第5 节）。

4.5. 滞后阶数选择：granger_lag_select()

该 `granger_lag_select()`函数系统地评估多个滞后阶数下的格兰杰因果检验：

```
granger_lag_select(.data = NULL, x, y, lag = 1:4, alpha = 0.05,
  test = "F")
```

该函数返回一个类别为“granger_lag_select”的 S3 对象，其中包含每个所检验滞后阶数的详细结果。A `plot()` 方法可视化 p-值在不同滞后阶数设定下的变化，帮助研究人员评估结果的稳健性并确定最优滞后阶数。

4.6. S3 方法

该软件包为所有结果对象提供直观的 `print()` 和 `summary()` 方法。对于“granger_result”：

```
R> result <- Canada |> granger_causality_test(e, U, lag = 2)
R> print(result)

Granger Causality Test
======================

Observations: 84, Lag order: 2, Significance level: 0.050

e -> U: e Granger-causes U (p = 0.0000)
U -> e: U does not Granger-cause e (p = 0.2983)
```

5. 示例

我们使用 vars 包中的 `Canada` 数据集演示 grangersearch。该数据集包含 1980 年第一季度至 2000 年第四季度的加拿大宏观经济数据。四个变量分别是： `e`（就业）、 `prod`（劳动生产率）、 `rw` （实际工资）和 `U` （失业率）。该数据集已广泛用于计量经济学教学与研究。

5.1. 基本双变量检验

我们首先加载数据，并考察就业（`e`）与失业（`U`）之间的关系：

```
R> library("grangersearch")
R> data("Canada", package = "vars")
R>
R> # Test with lag order 2
R> result <- Canada |>
+    granger_causality_test(e, U, lag = 2)
R> result

Granger Causality Test
======================

Observations: 84, Lag order: 2, Significance level: 0.050

e -> U: e Granger-causes U (p = 0.0000)
U -> e: U does not Granger-cause e (p = 0.2983)
```

结果表明，存在单向的格兰杰因果关系：就业显著预测失业（$p < 0.0001$），但失业并不能显著预测就业（$p = 0.30$）。这一发现与劳动力市场理论一致，在该理论中，就业变化通常先于失业率变化。

5.2. 获取整洁输出

`tidy()` 方法便于与 tidyverse 工作流集成：

```
R> library("dplyr")
R>
R> tidy(result) |>
+    filter(significant) |>
+    select(direction, statistic, p.value)

# A tibble: 1 x 3
  direction statistic   p.value
  <chr>         <dbl>     <dbl>
1 e -> U         16.7 0.0000003
```

5.3. 穷举成对搜索

为了发现数据集中所有显著的格兰杰因果关系，我们使用 `granger_search()`：

```
R> search_results <- Canada |>
+    granger_search(lag = 2, alpha = 0.05)
R> search_results

Granger Causality Search Results
================================
```

```
4 variables tested: e, prod, rw, U
12 directed pairs examined at lag order 2
4 significant relationships found (alpha = 0.05)

Results (sorted by p-value):
  cause  effect   p.value  lag  significant
  e      U       0.0000003   2  TRUE
  prod   rw      0.0003      2  TRUE
  e      prod    0.0127      2  TRUE
  rw     U       0.0387      2  TRUE
```

该搜索在 5% 显著性水平下识别出四种显著的预测关系。就业对失业和生产率均存在格兰杰因果关系，生产率对实际工资存在格兰杰因果关系，而实际工资对失业存在格兰杰因果关系。这些发现表明，加拿大劳动力市场中可能存在一条合理的因果链。

如需纳入所有经过检验的变量对，无论其是否显著：

```
R> Canada |>
+    granger_search(lag = 2, include_insignificant = TRUE) |>
+    tidy() |>
+    head(8)

# A tibble: 8 x 5
  cause effect   p.value   lag significant
  <chr> <chr>      <dbl> <int> <lgl>
1 e     U      0.0000003     2 TRUE
2 prod  rw     0.000300      2 TRUE
3 e     prod   0.0127        2 TRUE
4 rw    U      0.0387        2 TRUE
5 prod  U      0.0784        2 FALSE
6 U     rw     0.196         2 FALSE
7 rw    prod   0.246         2 FALSE
8 U     e      0.298         2 FALSE
```

5.4. 因果关系矩阵可视化

`plot()` 方法应用于“granger_search”对象时，会生成因果关系矩阵可视化：

```
R> plot(search_results)
```

图 1 展示了生成的图。左侧面板显示当行变量对列变量存在格兰杰因果关系时的 p 值；右侧面板显示相反方向的结果。显著关系（$p < 0.05$）对应的单元格以蓝色显示，其余单元格则为灰色。

5.5. 滞后阶数选择

To a评估研究发现对滞后设定的稳健性，我们使用 `granger_lag_select()`：

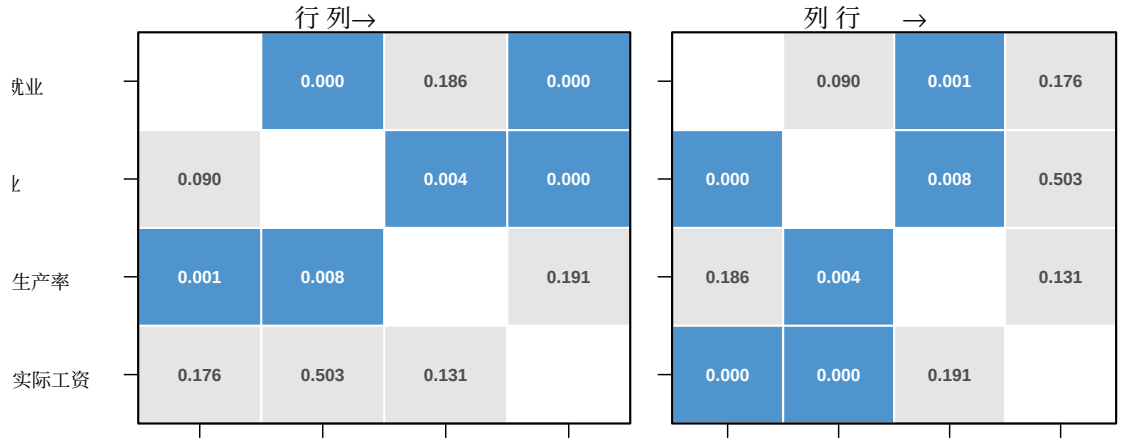

图 1：加拿大宏观经济数据的因果关系矩阵。蓝色单元格表示在 5% 显著性水平上具有统计显著性的格兰杰因果关系；灰色单元格表示不显著的关系。左侧面板检验行变量是否格兰杰导致列变量；右侧面板则显示反向关系。

```
R> lag_analysis <- Canada |>
+    granger_lag_select(e, U, lag = 1:8)
R> lag_analysis

Granger Lag Selection Analysis
==============================

Variables: e -> U (and reverse)
Lag orders tested: 1, 2、3、4、5、6、7、8
Significance level: 0.05

Summary:
  e -> U: Significant at all 8 lag orders
  U -> e: Never significant

Best lag (by minimum p-value):
  e -> U: lag = 2 (p = 0.0000003)
  U -> e: lag = 1 (p = 0.1652)
```

`plot()` 方法可视化展示 p 值如何随滞后阶数变化：

```
R> plot(lag_analysis)
```

图 2展示了生成的图表。在所有测试的滞后阶数下，就业都会格兰杰导致失业（实线始终低于显著性阈值），而反向关系始终不显著。这种一致性有力地支持了该发现的稳健性。

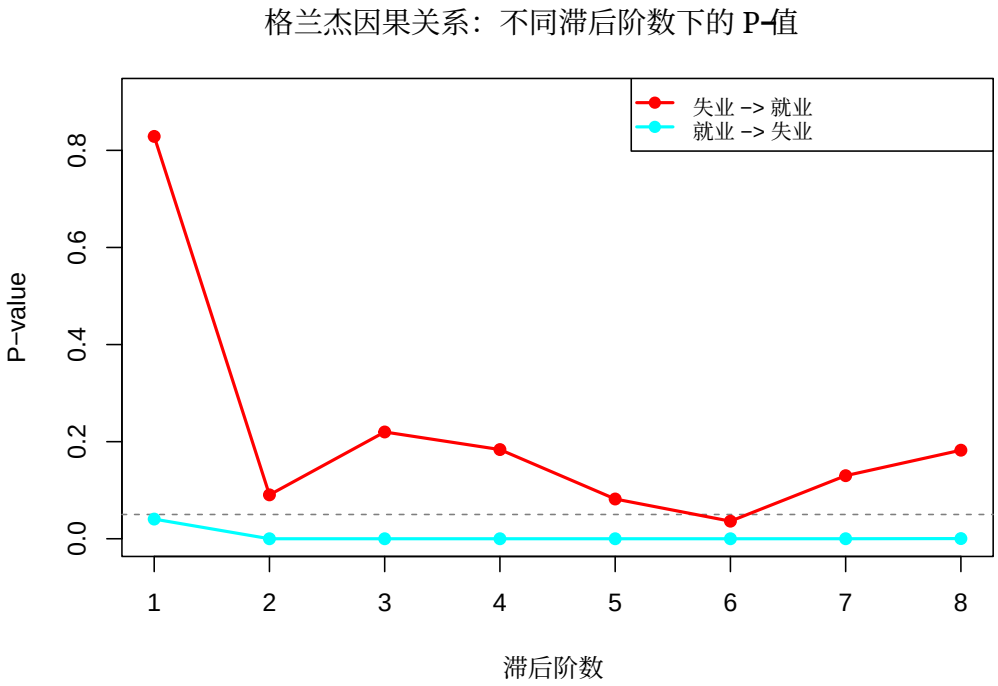

图2：就业与失业的滞后阶数选择分析。该图展示了滞后阶数为 1–8 时两个方向格兰杰因果关系的 p- 值。水平虚线表示显著性阈值（$\alpha = 0.05$）。无论滞后设定如何，就业始终是失业的格兰杰原因。

5.6. 搜索多个滞后项

当最优滞后阶数未知时， `granger_search()` 可以同时评估多个滞后项：

```
R> Canada |>
+    granger_search(lag = 1:4, alpha = 0.05) |>
+    tidy()
```

```
# A tibble: 4 x 5
  cause effect   p.value   lag significant
  <chr> <chr>      <dbl> <int> <lgl>
1 e     U       0.0000003     2 TRUE
2 prod  rw      0.000300      2 TRUE
3 e     prod    0.0127        2 TRUE
4 rw    U       0.0387        2 TRUE
```

指定多个滞后项时，该函数会针对每个显著变量对报告产生最小p值的滞后阶数。

6. 讨论

6.1. 实用建议

正确应用格兰杰因果检验需要注意若干问题。
首先，研究人员应在开展检验前确认时间序列平稳。应对每个时间序列进行单位根检验，例如增广迪基-富勒（ADF）检验或 KPSS 检验；分析前应对非平稳序列进行适当差分。

其次，滞后阶数的选择会显著影响检验结果。AIC 和 BIC 等信息准则可为滞后阶数选择提供指导，而 vars 中的 `VARselect()`函数可方便地实现这一过程。本软件包中的 `granger_lag_select()`函数则提供了另一种方法，允许研究人员直观地查看检验结果如何随不同滞后设定而变化。在多个合理的滞后阶数下仍保持显著的结果，能提供更有力的证据。

第三，当对许多变量对进行穷举搜索时，可能需要进行多重检验校正。对于 K 个变量，需要进行 $K(K-1)$ 次检验。较为保守的方法包括 Bonferroni校正，或使用 Benjamini-Hochberg程序控制错误发现率。

最后，在解读结果时保持适当的谨慎非常重要。格兰杰因果关系衡量的是预测关系，而不是哲学意义上的因果机制（Peters 等人 2017）。变量 X 格兰杰导致变量 Y 这一发现表明，X 的过去值能够提高对 Y 的预测，但并不能排除两个变量都受某个未观测共同原因驱动的可能性。

6.2. 局限性

当前实现存在若干局限。穷举搜索执行的双变量检验不会对数据集中的其他变量进行条件控制。真正的多变量格兰杰因果关系检验会同时对所有其他变量进行条件控制，从而提供更稳健的推断，但其实现复杂得多。vars 中的 `causality()` 函数提供了此功能。

该软件包仅在假设检验中实现 F-检验，并假设关系是线性的。对于非线性应用，NlinTS 包提供了基于神经网络的替代方法。该软件包还假设输入时间序列是平稳的，且不提供内置的协整系统处理功能。

6.3. 未来工作

未来版本可能会加入：条件多变量检验、自动平稳性诊断及差分建议、非线性扩展、用于高维结果的网络可视化，以及内置的多重检验校正。

7. 总结

gr angersearch 软件包为格兰杰因果关系检验提供了一个简单的接口，并可 d

在 R 中进行发现。该软件包将严谨的统计方法与现代 R 编程实践相结合，使更广泛的受众也能使用这种计量经济学方法。
主要贡献包括：(1) 穷举式成对搜索功能，可自动发现多个变量之间的因果关系；(2) 提供带可视化功能的滞后阶数优化工具，以实现稳健的模型设定；(3) tidyverse 集成，确保软件包能够自然融入现代数据分析工作流；以及 (4) 与 broom 生态系统兼容的结构化输出对象。

该软件包旨在帮助研究人员分析经济学、金融学及其他需要理解变量之间时间依赖关系的学科领域中的时间序列数据，研究其中的预测性因果关系。

计算细节

本文中的结果使用 R 4.5.1 及以下软件包获得：**grangersearch** 0.1.0、**vars** 1.6-1、**rlang**1.1.4、**tibble** 3.2.1，以及 **dplyr** 1.1.4。R 本身及所有使用的软件包均可从 Comprehensive R Archive Network (CRAN) 获取，网址为 https://CRAN.R-project.org/。**grangersearch** 软件包可从 GitHub 获取，网址为 https://github.com/nkorf/grangersearch。

致谢

作者感谢 vars 包的开发者提供底层 VAR建模基础设施。tidyverse生态系统和 rlang 软件包为 grangersearch 的设计理念与实现作出了重要贡献。

参考文献

Granger CW（1969年）。“通过计量经济模型和交叉谱方法研究因果关系。”《计量经济学》, **37**(3), 424–438. doi:10.2307/1912791. Henry L, Wickham H（2024年）。*rlang*：基础类型、核心 *R* 和*“tidyverse”*功能的函数。R 包版本 1.1.4，URL https://CRAN.R-project.org/package=rlang。Hiemstra C, Jones JD（1994年）。“检验股价与成交量关系中的线性和非线性格兰杰因果关系。”《金融学杂志》, **49**(5), 1639–1664. doi:10.1111/j.1540-6261.1994.tb04776.x。Hmamouche Y（2020年）。*NlinTS*：用于检测时间序列中非线性因果关系的模型。R 包版本 1.4.5，URL https://CRAN.R-project.org/package=NlinTS。Kraft J, Kraft A（1978年）。“能源与国民生产总值之间的关系。”《能源与发展杂志》,**3**(2), 401–403。Lütkepohl H（2005年）。多元时间序列分析新导论。施普林格。doi:10.1007/978-3-540-27752-1。

Peters J, Janzing D, Schölkopf B（2017年）。因果推断要素：基础与学习算法。麻省理工学院出版社。ISBN 9780262037310。Pfaff B（2008年）。vars：VAR建模。R 包版本 1.6-1，URL https://CRAN.R-project.org/package=vars。R Core Team（2024年）。R：用于统计计算的语言和环境。R 统计计算基金会，维也纳，奥地利。URL https://www.R-project.org/。Robinson D（2014年）。“broom：用于将统计分析对象转换为整洁数据框的 R 包。” arXiv 预印本 arXiv:1412.3565。doi:10.48550/arXiv.1412.3565。Seth AK, Barrett AB, Barnett L（2015年）。“神经科学和神经影像学中的格兰杰因果分析。”《神经科学杂志》，35(8), 3293–3297。doi:10.1523/JNEUROSCI.4399-14.2015。Sims CA（1972年）。“货币、收入与因果关系。”《美国经济评论》，62(4), 540–552。Sims CA（1980年）。“宏观经济学与现实。”《计量经济学》，48(1), 1–48。 doi:10.2307/1912017。Toda HY, Yamamoto T（1995年）。“可能含有单整过程的向量自回归中的统计推断。”《计量经济学杂志》，66(1-2), 225–250。doi:10.1016/0304-4076(94)01616-8。Wickham H, Averick M, Bryan J, Chang W, McGowan LD, François R, Grolemund G, Hayes A, Henry L, Hester J, 等（2019年）。“欢迎使用 tidyverse。”《开放源代码软件杂志》，4(43), 1686。doi:10.21105/joss.01686。Wickham H, Hester J, Chang W, Bryan J（2024年）。devtools：让 R 包开发更轻松的工具。R 包版本 2.4.5，URL https://CRAN.R-project.org/package=devtools。Zeileis A, Hothorn T（2002年）。lmtest：检验线性回归模型。R 包版本 0.9-40，URL https://CRAN.R-project.org/package=lmtest。

A. 计算复杂度

穷举式格兰杰因果关系搜索的计算成本取决于变量数量 K、观测数量 T 和滞后阶数 p。对于每个 $K(K-1)$ 有向变量对，都必须估计一个 VAR(p) 模型，普通最小二乘法需要执行 $O(T \cdot p^2)$ 次运算。因此，总体复杂度为 $O(K^2 \cdot T \cdot p^2)$。

对于包含 $K \leq 20$ 个变量、 $T \leq 1000$ 个观测值和 $p \leq 10$ 个滞后项的典型应用，在现代硬件上，计算可在几秒内完成。对于规模更大的问题，未来版本可以实现并行计算。

B. 与 vars::causality() 的比较

vars 包中的 `causality()` 函数可在拟合的 VAR 模型中执行格兰杰因果关系检验。与 grangersearch 相比，主要区别包括：

- vars 要求先对所有变量拟合 VAR模型；grangersearch 则为每一对变量拟合双变量模型。
- vars 实现的是条件格兰杰因果关系（控制其他变量）；grangersearch 实现的是无条件双变量检验。
- vars 一次检验一对变量；grangersearch 则提供穷举搜索。
- grangersearch 提供 tidyverse 集成和 broom 兼容性。

对于使用预先指定 VAR模型的验证性分析，vars 更合适。对于旨在发现潜在关系的探索性分析，grangersearch 能提供更精简的工作流程。