

# **Thống kê Công nghiệp hiện đại**

## **với ứng dụng viết trên R và MINITAB**

Ấn bản thứ hai

WILEY- 2014

Người dịch

**Nguyễn V. M. Mẫn**

với sự cộng tác của

**Nguyễn An Khương**

**Phan Phúc Doãn**

**Vương Bá Thịnh**

**Thạch Thanh Tiền**

**Tô Vũ Song Phương**

**ĐẠI HỌC QUỐC GIA TP HỒ CHÍ MINH**

# Mục lục

---

<i>Lời nói đầu của Ấn bản thứ hai</i>	xviii
<i>Lời nói đầu của Ấn bản đầu tiên</i>	xxi
<i>Lời nói đầu của Người dịch</i>	xxi
<b>Phần I: Các Nguyên lý Suy diễn và Phân tích Thống kê</b>	<b>2</b>
<b>1 Vai trò của Thống kê trong Công nghiệp và Dịch vụ Hiện đại</b>	<b>3</b>
1.1 Các bộ phận chức năng trong công nghiệp và dịch vụ	3
1.2 Mâu thuẫn Năng suất - Chất lượng	5
1.3 Phương pháp chữa cháy	7
1.4 Kiểm tra sản phẩm	8
1.5 Điều khiển quá trình	9
1.6 Chất lượng nhờ thiết kế	10
1.7 Chất lượng thông tin và hiệu quả thống kê thực tiễn	13
1.8 Tóm tắt Chương 1	15
1.9 Bài tập Chương 1	16
<b>2 Thống kê mô tả để Phân tích Sự biến thiên</b>	<b>19</b>
2.1 Hiện tượng ngẫu nhiên và tính đa dạng của các tập dữ liệu	19
2.1.1 Ví dụ thực tiễn	19
2.2 Độ chuẩn xác và độ chính xác của các phép đo	24
2.3 Tổng thể và mẫu	26
2.4 Phân tích mô tả các giá trị mẫu	26
2.4.1 Tần suất của biến ngẫu nhiên rời rạc	27
2.4.2 Tần suất của biến ngẫu nhiên liên tục	32
2.4.3 Thống kê của mẫu được sắp thứ tự	34
2.4.4 Thống kê vị trí và thống kê phân tán	36

2.5	Các khoảng dự đoán . . . . .	40
2.6	Kỹ thuật bổ sung cho phân tích dữ liệu thăm dò . . . . .	41
2.6.1	Biểu đồ hộp . . . . .	42
2.6.2	Sơ đồ phân vị . . . . .	43
2.6.3	Sơ đồ Thân và lá . . . . .	44
2.6.4	Các thống kê bền vững cho vị trí và độ phân tán . . . . .	45
2.7	Tóm tắt Chương 2 . . . . .	48
2.8	Bài tập Chương 2 . . . . .	50
<b>3</b>	<b>Mô hình xác suất và Phân phối xác suất</b>	<b>55</b>
3.1	Xác suất cơ bản . . . . .	55
3.1.1	Biến cố và Không gian mẫu: Diễn tả hình thức của thí nghiệm . . . . .	55
3.1.2	Phép toán cơ bản với các biến cố- phép hợp, giao tập hợp . . . . .	57
3.1.3	Xác suất của biến cố . . . . .	60
3.1.4	Hàm xác suất cho việc lấy mẫu ngẫu nhiên . . . . .	62
3.1.5	Xác suất có điều kiện và sự độc lập của các biến cố . . . . .	64
3.1.6	Công thức Bayes và ứng dụng của nó . . . . .	66
3.2	Biến ngẫu nhiên và các phân phối xác suất tương ứng . . . . .	68
3.2.1	Phân phối rời rạc và phân phối liên tục . . . . .	69
3.2.2	Kì vọng (trung bình) và các moment của các phân phối . . . . .	75
3.2.3	Độ lệch chuẩn, phân vị, độ đo méo lệch và độ nhọn . . . . .	77
3.2.4	Hàm sinh moment . . . . .	80
3.3	Các phân phối xác suất rời rạc . . . . .	81
3.3.1	Phân phối nhị thức . . . . .	81
3.3.2	Phân phối siêu bội . . . . .	84
3.3.3	Phân phối Poisson . . . . .	87
3.3.4	Phân phối hình học và phân phối nhị thức âm . . . . .	91
3.4	Đại lượng ngẫu nhiên liên tục . . . . .	94
3.4.1	Phân phối đều trên khoảng số thực . . . . .	94
3.4.2	Phân phối chuẩn (Gauss) và log-chuẩn . . . . .	95
3.4.3	Phân phối mũ . . . . .	102
3.4.4	Phân phối Gamma và phân phối Weibull . . . . .	105
3.4.5	Phân phối Beta . . . . .	108
3.5	Phân phối đồng thời, phân phối biên và phân phối có điều kiện . . . . .	110
3.5.1	Hàm phân phối đồng thời và phân phối biên - Trường hợp tổng quát . . . . .	110

3.5.2	Hiệp phương sai - Hệ số tương quan	113
3.5.3	Phân phối có điều kiện	116
3.6	Phân phối xác suất đa biến	119
3.6.1	Phân phối bội thức	119
3.6.2	Phân phối đa siêu bội	120
3.6.3	Phân phối Gauss hai biến	121
3.7	Phân phối của các thống kê có (theo) thứ tự	123
3.7.1	Phân phối của $X_{(1)}$ và $X_{(n)}$	124
3.7.2	Phân phối của các $X_{(i)}$ khác	125
3.8	Về tổ hợp tuyến tính của nhiều biến ngẫu nhiên	126
3.8.1	Kì vọng và phương sai của tổ hợp tuyến tính các biến ngẫu nhiên	126
3.8.2	Tiêu chuẩn hội tụ cho dãy của biến ngẫu nhiên	127
3.8.3	Hàm sinh moment và áp dụng	129
3.9	Sự xấp xỉ mẫu lớn	130
3.9.1	Luật số lớn	130
3.9.2	Định lý giới hạn trung tâm	131
3.9.3	Xấp xỉ một số phân phối bằng phân phối Gauss	132
3.10	Vài phân phối khác của các thống kê từ các mẫu Gauss	134
3.10.1	Phân phối chi bình phương	134
3.10.2	Thống kê “Student” $t$	137
3.10.3	Phân phối $F$ cho biến tỉ lệ hai phương sai	139
3.11	Tóm tắt Chương 3	140
3.12	Bài tập Chương 3	141
<b>4</b>	<b>Suy diễn thống kê và Phương pháp bootstrap</b>	<b>151</b>
4.1	Đặc trưng mẫu của các ước lượng	151
4.2	Một số phương pháp ước lượng điểm	155
4.2.1	Ước lượng tham số dùng phương trình moment	156
4.2.2	Ước lượng tham số dùng phương pháp bình phương tối thiểu	157
4.2.3	Ước lượng điểm nhờ tối đa hàm khả năng (cơ may)	158
4.3	So sánh các ước lượng mẫu	160
4.3.1	Các khái niệm cơ bản	160
4.3.2	Một số kiểm định giả thuyết một mẫu thông dụng	164
4.4	Khoảng tin cậy cho một tham số tổng thể	172
4.4.1	Khoảng tin cậy cho trung bình $\mu$ khi biết $\sigma$	174

4.4.2	Khoảng tin cậy cho trung bình $\mu$ khi chưa biết $\sigma$ . . . . .	174
4.4.3	Khoảng tin cậy cho phương sai $\sigma^2$ (phân phối Gauss) . . . . .	175
4.4.4	Khoảng tin cậy cho tỷ lệ $p$ . . . . .	175
4.5	Khoảng dung sai . . . . .	177
4.6	Kiểm định tính phân phối chuẩn dùng các sơ đồ xác suất . . . . .	179
4.7	Kiểm định mức phù hợp mô hình với dữ liệu . . . . .	183
4.7.1	Kiểm định chi-bình phương (cho mẫu lớn) . . . . .	183
4.7.2	Kiểm định Kolmogorov-Smirnov . . . . .	185
4.8	Các thủ tục ra quyết định bằng phương pháp Bayes . . . . .	186
4.8.1	Phân phối tiên nghiệm và phân phối hậu nghiệm . . . . .	187
4.8.2	Phương pháp ước lượng và kiểm định Bayes . . . . .	191
4.8.3	Khoảng tin cậy Bayes cho trường hợp tham số thực . . . . .	194
4.9	Lấy mẫu ngẫu nhiên từ phân phối tham chiếu . . . . .	196
4.10	Phương pháp lấy mẫu bootstrap . . . . .	198
4.10.1	Phương pháp bootstrap . . . . .	198
4.10.2	Thẩm định phương pháp bootstrap . . . . .	199
4.10.3	Ưu điểm nổi bật của phương pháp bootstrap . . . . .	200
4.11	Kiểm định giả thuyết bootstrap . . . . .	200
4.11.1	Kiểm định bootstrap và khoảng tin cậy cho trung bình . . . . .	201
4.11.2	Kiểm định-t cho trung bình của trường hợp cỡ mẫu nhỏ . . . . .	202
4.11.3	Kiểm định-t để so sánh hai trung bình . . . . .	204
4.11.4	Kiểm định và khoảng tin cậy bootstrap cho phương sai . . . . .	207
4.11.5	Kiểm định so sánh tham số trên nhiều mẫu . . . . .	207
4.12	Khoảng dung sai bootstrap . . . . .	211
4.12.1	Khoảng dung sai bootstrap cho các mẫu Bernoulli . . . . .	211
4.12.2	Khoảng dung sai cho các biến ngẫu nhiên liên tục . . . . .	213
4.12.3	Khoảng dung sai cho các phân phối phi chuẩn . . . . .	215
4.13	Kiểm định phi tham số . . . . .	216
4.13.1	Kiểm định dấu hiệu . . . . .	217
4.13.2	Kiểm định ngẫu nhiên . . . . .	218
4.13.3	Kiểm định Wilcoxon thứ hạng đánh dấu . . . . .	221
4.14	Mô tả các gói MINITAB (tải về được từ Phụ lục VI) . . . . .	222
4.15	Tóm tắt Chương 4 . . . . .	223
4.16	Bài tập Chương 4 . . . . .	224

<b>5</b>	<b>Sự biến đổi nhiều chiều và mô hình hồi quy</b>	<b>231</b>
5.1	Biểu diễn và phân tích đồ họa	231
5.1.1	Biểu đồ phân tán	231
5.1.2	Biểu đồ hộp đa biến	233
5.2	Tần suất nhiều chiều	236
5.2.1	Phân phối tần số đồng thời của hai biến	237
5.2.2	Phân phối xác suất có điều kiện	240
5.3	Hệ số tương quan và phân tích hồi quy	241
5.3.1	Hiệp phương sai và Hệ số tương quan	241
5.3.2	Tìm đường thẳng hồi quy phù hợp với dữ liệu	244
5.4	Phân tích hồi quy đa biến	251
5.4.1	Hồi quy hai biến	251
5.5	Hồi quy từng phần và hệ số tương quan từng phần	256
5.6	Hồi quy tuyến tính đa biến (hay đa tuyến tính)	259
5.6.1	Xác định mô hình hồi quy đa tuyến tính- trường hợp tổng quát	259
5.6.2	So sánh hai mô hình hồi quy tuyến tính đơn biến	263
5.7	Kiểm định $F$ từng phần và tổng tuần tự của các bình phương	264
5.8	Xây dựng mô hình: Thuật toán hồi quy từng bước	266
5.9	Chẩn đoán hồi quy	271
5.10	Phương pháp phân tích kết cục hữu hạn: Hồi quy logistic	274
5.11	Phân tích phương sai: Kiểm định so sánh các trung bình	277
5.11.1	Mô hình thống kê	277
5.11.2	Phương pháp phân tích phương sai đơn giản	277
5.12	Khoảng tin cậy đồng thời: Kiểm định so sánh nhiều tham số	281
5.13	Bảng tiếp liên	285
5.13.1	Cấu trúc của các bảng tiếp liên	285
5.13.2	Chỉ số liên kết trong bảng tiếp liên	289
5.14	Phân tích dữ liệu được phân loại (định tính)	295
5.15	Tóm tắt Chương 5	296
5.16	Bài tập Chương 5	298
	<b>Phần II: Lý thuyết Lấy mẫu Chấp nhận</b>	<b>304</b>
<b>6</b>	<b>Lấy mẫu cho Ước lượng đại lượng của Tổng thể hữu hạn</b>	<b>305</b>
6.1	Lấy mẫu và Bài toán Ước lượng	305
6.1.1	Các định nghĩa căn bản	305

6.1.2	Lấy mẫu ngẫu nhiên từ một tổng thể hữu hạn . . . . .	306
6.1.3	Ước lượng mẫu của các đại lượng tổng thể và phân bố mẫu của chúng . . . . .	307
6.2	Ước lượng với các mẫu ngẫu nhiên đơn giản . . . . .	311
6.2.1	Tính chất của trung bình mẫu và độ lệch chuẩn mẫu dưới cơ chế RSWR . . . . .	312
6.2.2	Tính chất trung bình mẫu và phương sai mẫu dưới cơ chế RSWOR . . . . .	314
6.3	Ước lượng trung bình sử dụng lấy mẫu phân tầng . . . . .	318
6.4	Sự phân bố mẫu theo tỉ lệ và tối ưu . . . . .	320
6.5	Mô hình dự đoán dùng các biến giải thích biết trước . . . . .	323
6.6	Tóm tắt Chương 6 . . . . .	328
6.7	Bài tập Chương 6 . . . . .	329
<b>7</b>	<b>Kế hoạch Lấy mẫu cho Kiểm tra Sản phẩm</b>	<b>331</b>
7.1	Giới thiệu tổng quan . . . . .	331
7.2	Kế hoạch lấy mẫu một giai đoạn cho các thuộc tính . . . . .	333
7.3	Xác định xấp xỉ kế hoạch lấy mẫu . . . . .	338
7.4	Kế hoạch lấy mẫu hai giai đoạn cho các thuộc tính . . . . .	339
7.5	Lấy mẫu tuần tự . . . . .	342
7.5.1	Kiểm định SPRT của Wald . . . . .	342
7.5.2	Đặc trưng của SPRT . . . . .	345
7.6	Lấy mẫu chấp nhận cho các biến . . . . .	348
7.7	Điều chỉnh sự thanh tra các lô sản phẩm . . . . .	350
7.8	Các tiêu chuẩn quốc gia và quốc tế . . . . .	353
7.9	Kế hoạch lấy mẫu lướt qua lô hàng cho các thuộc tính . . . . .	354
7.10	Tiêu chuẩn kiểm tra Deming . . . . .	358
7.11	Các bảng biểu cho lấy mẫu chấp nhận đã xuất bản . . . . .	360
7.12	Tóm tắt Chương 7 . . . . .	361
7.13	Bài tập Chương 7 . . . . .	362
	<b>Phần III: Điều khiển Quá trình Thống kê</b>	<b>364</b>
<b>8</b>	<b>Các Kỹ thuật và Nguyên lý cơ bản của Điều khiển Quá trình</b>	<b>365</b>
8.1	Các Khái niệm căn bản của Điều khiển Quá trình Thống kê . . . . .	365
8.2	Vận hành một quá trình dùng các sơ đồ điều khiển . . . . .	379
8.3	Lập biểu đồ kiểm soát: Các nghiên cứu năng lực quá trình . . . . .	384
8.4	Các chỉ số năng lực quá trình . . . . .	387
8.4.1	Chỉ số năng lực quá trình $C_p$ và $C_{pk}$ . . . . .	387

8.4.2	Ước lượng các chỉ số năng lực quá trình . . . . .	388
8.5	Bảng công cụ để kiểm soát quá trình và cải tiến quy trình . . . . .	390
8.6	Phân tích thống kê của các lược đồ Pareto . . . . .	393
8.7	Biểu đồ kiểm soát Shewhart . . . . .	397
8.7.1	Biểu đồ kiểm soát cho các thuộc tính . . . . .	399
8.7.2	Biểu đồ kiểm soát cho các biến . . . . .	401
8.8	Tóm tắt nội dung Chương 8 . . . . .	406
8.9	Bài tập Chương 8 . . . . .	407
<b>9</b>	<b>Phương pháp Kiểm soát Quá trình Thống kê Nâng cao</b>	<b>411</b>
9.1	Kiểm tra tính ngẫu nhiên . . . . .	411
9.1.1	Kiểm tra số lượng loạt số . . . . .	412
9.1.2	Giá trị thử nghiệm lớn hơn và nhỏ hơn một ngưỡng xác định . . . . .	413
9.1.3	Số lượng loạt tăng và giảm . . . . .	416
9.1.4	Kiểm tra số lượng loạt tăng và giảm . . . . .	417
9.2	Biểu đồ kiểm soát Shewhart có chỉnh sửa cho trung bình mẫu . . . . .	418
9.3	Kích thước và tần số lấy mẫu cho biểu đồ kiểm soát Shewhart . . . . .	420
9.3.1	Thiết kế mẫu kinh tế cho biểu đồ trung bình mẫu . . . . .	420
9.3.2	Gia tăng độ nhạy của biểu đồ $p$ . . . . .	422
9.4	Các biểu đồ kiểm soát tổng tích lũy (CUSUM) . . . . .	425
9.4.1	Sơ đồ (Thủ tục) kiểm soát cận trên của Page . . . . .	425
9.4.2	Nền tảng lý thuyết . . . . .	428
9.4.3	Thủ tục kiểm soát cận dưới và hai phía của Page . . . . .	430
9.4.4	Chiều dài loạt số trung bình, Xác suất cảnh báo sai và Độ trễ trung bình có điều kiện . . . . .	434
9.5	Sự phát hiện Bayes . . . . .	439
9.5.1	Giới thiệu . . . . .	439
9.5.2	Thống kê Shirayev-Roberts (S.R.) . . . . .	440
9.6	Theo dõi quá trình . . . . .	444
9.6.1	Thủ tục trung bình trượt theo cấp độ mũ (EWMA) . . . . .	445
9.6.2	Thủ tục ước lượng Bayes của trung bình hiện hữu (BECM) . . . . .	448
9.6.3	Bộ lọc Kalman . . . . .	449
9.6.4	Kế hoạch đo lường chất lượng (QMP) của Hoadley . . . . .	451
9.7	Kiểm soát quá trình tự động . . . . .	454
9.7.1	Mô hình hóa . . . . .	454
9.7.2	Quy tắc tỉ lệ . . . . .	454



9.7.3	Mô hình hóa với hàm chi phí . . . . .	455
9.7.4	Tối thiểu hóa kỳ vọng của hàm phạt . . . . .	456
9.7.5	Biểu đồ EWMA trong điều khiển quá trình . . . . .	457
9.8	Tóm tắt Chương 9 . . . . .	457
9.9	Bài tập Chương 9 . . . . .	458
<b>10</b>	<b>Điều khiển Quá trình Thống kê Đa biến</b>	<b>463</b>
10.1	Giới thiệu . . . . .	463
10.2	Tổng quan về phân tích dữ liệu đa biến (MDA) . . . . .	468
10.3	Các chỉ số năng lực quá trình đa biến . . . . .	470
10.3.1	Chỉ số năng lực quá trình đa biến theo Chen . . . . .	471
10.3.2	Chỉ số năng lực quá trình đa biến theo Haridy, Wu và Castagliola . . . . .	472
10.4	Ứng dụng nâng cao của biểu đồ kiểm soát đa biến . . . . .	474
10.4.1	Các kịch bản biểu đồ kiểm soát đa biến . . . . .	474
10.4.2	Các mục tiêu xuất phát bên trong quá trình . . . . .	474
10.4.3	Việc sử dụng mẫu tham khảo bên ngoài . . . . .	476
10.4.4	Các mục tiêu được gán bên ngoài quá trình . . . . .	477
10.4.5	Các đơn vị đo lường được xem như là các lô hàng . . . . .	478
10.4.6	Phân rã biến và các chỉ số giám sát . . . . .	479
10.5	Thông số kỹ thuật dung sai đa biến . . . . .	480
10.6	Tóm tắt Chương 10 . . . . .	483
10.7	Bài tập cuối Chương 10 . . . . .	485
<b>Phần IV</b>	<b>Thiết kế và Phân tích Thí nghiệm Thống kê</b>	<b>486</b>
<b>11</b>	<b>Thiết kế Thống kê Cổ điển và Phân tích Thí nghiệm Thống kê</b>	<b>489</b>
11.1	Các Bước Cơ bản và các Nguyên tắc Chủ đạo . . . . .	489
11.1.1	Các định nghĩa căn bản . . . . .	489
11.2	Phân khối và ngẫu nhiên hóa các thí nghiệm thống kê . . . . .	494
11.3	Mô hình cộng tính và không cộng tính . . . . .	495
11.3.1	Trường hợp một yếu tố . . . . .	495
11.3.2	Trường hợp nhiều yếu tố . . . . .	496
11.4	Phân tích các thiết kế khối hoàn chỉnh và ngẫu nhiên . . . . .	497
11.4.1	Trường hợp nhiều khối, hai giải pháp cho mỗi khối: so sánh ghép cặp . . . . .	497
11.4.2	Trường hợp nhiều khối, $t$ giải pháp cho mỗi khối . . . . .	504
11.5	Thiết kế khối không đầy đủ và cân bằng (BIBD) . . . . .	507

11.5.1	Các định nghĩa tổ hợp . . . . .	507
11.5.2	Phân tích ANOVA cho một BIBD . . . . .	508
11.6	Thiết kế vuông Latin . . . . .	512
11.6.1	Phân tích ANOVA cho thiết kế vuông Latin, một bản sao . . . . .	512
11.6.2	Phân tích ANOVA cho thiết kế vuông Latin, nhiều bản sao . . . . .	513
11.7	Thiết kế nhân tố đầy đủ . . . . .	517
11.7.1	Cấu trúc của thiết kế nhân tố (yếu tố) . . . . .	517
11.7.2	Phân tích ANOVA cho thiết kế nhân tố đầy đủ . . . . .	518
11.7.3	Ước lượng các ảnh hưởng chính và tương tác . . . . .	524
11.7.4	Thiết kế nhân tố kiểu $2^m$ . . . . .	526
11.7.5	Thiết kế nhân tố kiểu $3^m$ . . . . .	536
11.8	Phân khối và lặp một phần các thí nghiệm của thiết kế $2^m$ . . . . .	544
11.8.1	Phân chia từng phần một thiết kế - trường hợp $2^{3-1}$ . . . . .	545
11.8.2	Phân chia từng phần một thiết kế - trường hợp $2^{m-k}$ . . . . .	547
11.9	Khảo sát các mặt đáp ứng . . . . .	551
11.9.1	Các thiết kế bậc hai . . . . .	552
11.9.2	Vài thiết kế bậc hai cụ thể . . . . .	555
11.9.3	Tiếp cận miền của suất lượng tối ưu . . . . .	562
11.9.4	Sự biểu diễn chính tắc . . . . .	563
11.10	Tóm tắt Chương 11 . . . . .	565
11.11	Bài tập Chương 11 . . . . .	565
12	<b>Chất lượng nhờ Thiết kế Thống kê</b> . . . . .	<b>569</b>
12.1	Kiểm soát chất lượng sớm, thiết kế tham số và phương pháp Taguchi . . . . .	570
12.1.1	Tối ưu hóa sản phẩm và quy trình . . . . .	571
12.1.2	Các giai đoạn chính trong thiết kế sản phẩm và quá trình . . . . .	573
12.1.3	Các tham số thiết kế và các yếu tố nhiễu . . . . .	575
12.1.4	Các thí nghiệm thiết kế tham số . . . . .	575
12.1.5	Các thống kê hiệu năng . . . . .	577
12.2	Các ảnh hưởng của tính phi tuyến tính . . . . .	578
12.2.1	Ước lượng giải tích cho kỳ vọng và phương sai của biến đáp ứng $y$ . . . . .	579
12.2.2	Ước tính kỳ vọng và phương sai của biến đáp ứng bằng mô phỏng . . . . .	580
12.3	Các thiết kế của Taguchi . . . . .	582
12.4	Chất lượng nhờ Thiết kế trong Công nghiệp Dược phẩm . . . . .	584
12.4.1	Giới thiệu về Chất lượng nhờ Thiết kế . . . . .	584

12.4.2	Chất lượng nhờ Thiết kế - dùng Thiết kế Nhân tố đầy đủ	586
12.4.3	Chất lượng nhờ Thiết kế- bộ hồ sơ và hàm mong muốn	590
12.4.4	Chất lượng nhờ Thiết kế- Không gian thiết kế	592
12.5	Các thiết kế khoan dung (hay dung sai)	593
12.5.1	Thiết kế khoan dung trong công nghiệp	593
12.5.2	Chương trình R và kết quả	595
12.6	Vài nghiên cứu công nghiệp cụ thể khác	598
12.6.1	Thử nghiệm Quinlan tại công ty Flex Products, Inc.	598
12.6.2	Tối ưu hóa thời gian đáp ứng máy tính	601
12.7	Tóm tắt Chương 12	604
12.8	Bài tập Chương 12	605
<b>13</b>	<b>Các Thí nghiệm trên Máy tính</b>	<b>609</b>
13.1	Giới thiệu về Thí nghiệm trên Máy tính	609
13.1.1	Thế nào là Thí nghiệm trên Máy tính?	610
13.1.2	Về lựa chọn lưới	611
13.2	Thiết kế Các Thí nghiệm trên Máy tính	615
13.3	Phân tích Các Thí nghiệm trên Máy tính	620
13.3.1	Lịch sử của mô hình Kriging	620
13.3.2	Xác lập mô hình Kriging	621
13.4	Các bộ giả lập ngẫu nhiên	625
13.5	Tích hợp các thí nghiệm vật lý với các thí nghiệm máy tính	627
13.6	Tóm tắt Chương 13	628
13.7	Bài tập Chương 13	629
<b>Phần V:</b>	<b>Phân tích Độ Tin cậy và Phân tích Sự Sống còn</b>	<b>631</b>
<b>14</b>	<b>Phân tích Độ Tin cậy</b>	<b>633</b>
14.1	Các khái niệm căn bản	635
14.1.1	Các phạm trù (phân loại) thời gian	635
14.1.2	Hàm độ tin cậy và các hàm liên quan	637
14.2	Độ Tin cậy Hệ thống	638
14.2.1	Hệ thống tuần tự và song song	638
14.2.2	Hệ thống gồm $k$ hệ con lấy ra từ $n$ hệ con	640
14.3	Tính sẵn sàng của các hệ thống sửa chữa được	643
14.3.1	Mô hình hóa các quá trình đổi mới	643

14.3.2 Hàm đổi mới hệ thống . . . . .	644
14.3.3 Hàm mật độ đổi mới hệ thống . . . . .	645
14.4 Các loại quan sát về biến thời gian đến khi lỗi (TTF) . . . . .	651
14.5 Phân tích đồ họa từ dữ liệu hoạt động của một hệ thống . . . . .	653
14.6 Ước lượng phi tham số độ tin cậy:	
Phương pháp Kaplan Meier . . . . .	657
14.6.1 Sự thu hồi nghiên cứu xảy ra trên từng khoảng thời gian . . . . .	657
14.6.2 Sự thu hồi nghiên cứu kết hợp với đa kiểm duyệt . . . . .	657
14.6.3 Thu hồi nghiên cứu khi không thể ghi nhận được thời điểm hệ bị lỗi . . . . .	658
14.7 Ước lượng tham số phân phối hoạt động của hệ thống . . . . .	659
14.7.1 Ước lượng khả năng tối đa cho hàm phân phối TTF dạng mũ . . . . .	660
14.7.2 Ước lượng khả năng tối đa của các tham số Weibull . . . . .	664
14.8 Thuyết minh độ tin cậy . . . . .	667
14.8.1 Kiểm định nhị thức . . . . .	668
14.8.2 Thời gian sống của hệ tuân theo phân phối mũ . . . . .	669
14.8.3 Xác định cỡ mẫu trung bình dùng kiểm định tỷ số xác suất tuần tự . . . . .	671
14.9 Thử nghiệm tuổi thọ tăng tốc - ALT . . . . .	678
14.9.1 Mô hình nhiệt độ Arrhenius . . . . .	678
14.9.2 Các mô hình khác . . . . .	679
14.10 Thủ tục đột trong (sàng lọc sớm) sản phẩm lỗi . . . . .	679
14.11 Tóm tắt Chương 14 . . . . .	681
14.12 Bài tập Chương 14 . . . . .	682
<b>15 Ước tính và Dự báo Độ tin cậy theo phương pháp Bayes</b>	<b>687</b>
15.1 Phân phối tiên nghiệm và phân phối hậu nghiệm . . . . .	687
15.2 Hàm thiệt hại và ước lượng Bayes . . . . .	692
15.2.1 Ước lượng Bayes phi phân phối của độ tin cậy . . . . .	693
15.2.2 Ước lượng Bayes của độ tin cậy cho các phân phối tuổi thọ mũ . . . . .	694
15.3 Khoảng ước đoán và khoảng tin cậy Bayesian . . . . .	695
15.3.1 Ước lượng độ tin cậy phi phân phối . . . . .	695
15.3.2 Ước lượng độ tin cậy cho phân phối tuổi thọ mũ . . . . .	696
15.3.3 Các khoảng dự đoán . . . . .	697
15.4 Khoảng khả tín cho sự sẵn sàng tiệm cận của hệ sửa chữa được- phân phối mũ . . . . .	699
15.5 Phương pháp Bayes thực nghiệm . . . . .	700
15.5.1 Ước lượng Bayes thực nghiệm cho phân phối Poisson . . . . .	701
15.5.2 Thủ tục Bayes thực nghiệm tham số cho phân phối mũ . . . . .	702

15.6 Tóm tắt Chương 15 . . . . .	703
15.7 Bài tập Chương 15 . . . . .	704
<i>Một số gói tính toán trong phần mềm R</i> . . . . .	717
<i>Tài liệu tham khảo và đọc thêm</i> . . . . .	719

# Lời nói đầu của Ấn bản thứ hai

---

Cuốn sách này viết về thống kê công nghiệp hiện đại và các ứng dụng, sử dụng phần mềm R và MINITAB. Nó là ấn bản thứ hai được mở rộng từ cuốn sách mang tên *Thống kê Công nghiệp hiện đại: Thiết kế và Quản lý Chất lượng và Độ tin cậy*, nhà xuất bản Wadsworth Duxbury năm 1998. Cấu trúc sư phạm của cuốn sách kết hợp cách tiếp cận thực tế với nền tảng lý thuyết và sự hỗ trợ của máy tính. Quyển sách được soạn cho sinh viên và giảng viên có quan tâm tới việc nghiên cứu các phương pháp hiện đại bằng cách kết hợp cả ba yếu tố trên.

**Phần mềm sử dụng trong sách.** Ấn bản này cung cấp các ví dụ và thủ tục bằng ngôn ngữ R hiện đang rất phổ biến, và cũng sử dụng MINITAB. Mỗi một trong hai ngôn ngữ này mang lợi thế đặc thù riêng. R là ngôn ngữ lập trình mã nguồn mở cho tính toán thống kê và đồ họa dựa trên ngôn ngữ lập trình S được tạo ra bởi John Chambers trong khi làm việc tại Bell Labs vào năm 1976. R hiện được phát triển bởi nhóm phát triển nòng cốt, trong đó Chambers là thành viên. MINITAB là phần mềm thống kê ban đầu được phát triển tại Đại học bang Pennsylvania bởi Barbara Ryan, Thomas Ryan, Jr, và Brian Joiner vào năm 1972. Với quyển sách này, bạn có một cơ hội thú vị để tìm hiểu và làm quen với hai phần mềm thống kê công nghiệp hiện đại, riêng R có phiên bản tương thích cho Mac OS.

**Làm sao bạn đọc tận dụng đầy đủ ưu điểm của cuốn sách này?** Bạn cần có sự quan tâm tới các vấn đề trong thống kê công nghiệp, có một nền tảng toán học phù hợp và sẵn sàng học hỏi bằng cách giải quyết vấn đề với các ứng dụng phần mềm. Năm phần của cuốn sách có thể được nghiên cứu trong các kết hợp khác nhau với phần I- phần nền tảng cho toàn bộ quyển sách. Do đó cuốn sách có thể được sử dụng trong các cuộc hội thảo hoặc khóa học về *Lấy mẫu chấp nhận*, *Kiểm soát qui trình thống kê*, *Thiết kế thí nghiệm* và *Độ tin cậy*.

**Phương pháp sư phạm.** Không nhằm mục đích dạy lập trình, cũng không bao gồm mọi tùy chọn và tính năng có sẵn trong các phần mềm, mục đích của chúng tôi là trình bày cho sinh viên, nhà nghiên cứu và người sử dụng thống kê công nghiệp hiện đại các ví dụ về những gì có thể được thực hiện với các nền tảng phần mềm; và hơn nữa khuyến khích việc tìm hiểu thêm các tùy chọn. Mục tiêu tối hậu là giúp các bạn sẵn sàng và thuận tiện xác định những phần mềm nào sẽ được sử dụng trong hoàn cảnh cụ thể. Một phụ lục được chuẩn bị đặc biệt, có thể tải về từ trang web của cuốn sách, cung cấp một giới thiệu về R, các đoạn mã R theo từng chương; và các hướng dẫn hiệu quả cho việc cài đặt và sử dụng MINITAB. Các phần mềm này còn được dùng để mô phỏng. Chúng tôi tin rằng việc giảng dạy thống kê công nghiệp hiện đại kết hợp với mô phỏng sẽ cung cấp môi trường đúng đắn và hiệu quả để đạt được kinh nghiệm thực tiễn có ý nghĩa.

Quyển sách cung cấp nền tảng lý thuyết và cách tiếp cận thực tế phối hợp với nhau. Để đạt được điều này, quyển sách chứa đựng hơn 40 bộ dữ liệu điển hình cho nghiên cứu các bài toán thực tế, tiêu

biểu cho những gì ta gặp phải khi giải quyết công việc có sử dụng thống kê trong kinh doanh và công nghiệp. Số liệu, hình ảnh minh họa trong cuốn sách đã được tạo ra bằng R hay MINITAB sẽ được nêu rõ ràng. Phiên bản thứ hai này bao gồm đóng góp của Tiến sĩ Daniele Amberti, người đã viết gói `mistat` trong R. Công trình của ông đã được hỗ trợ bởi i4C ([www.i4CAnalytics.com](http://www.i4CAnalytics.com)) và chúng tôi rất biết ơn Amberti khi sử dụng gói này. Thay đổi kế nữa là ấn bản lần này được xuất bản bởi **Wiley and Sons**, và chúng tôi gửi lời cảm ơn Heather Kay và Richard Davies đã hỗ trợ chuyên môn và động viên trong quá trình xuất bản.

Lời cảm ơn kế tiếp được gửi tới khách sạn Genova ở Porta Nuova vùng Turin, nơi mà chúng tôi đã trải qua hàng giờ xử lý các văn bản *LaTeX* bằng *Git*, dùng phần mềm *RStudio*. Trong thực tế, toàn bộ cuốn sách, với mã và các tập dữ liệu R đã được biên soạn hoàn chỉnh, là một minh chứng cho những gì mà việc nghiên cứu có thể tạo ra. Gerry Hahn, Murat Testik, Moshe Pollak, Gejza Dohnal, Neil Ullman, Moshe Miller, David Steinberg, Marcello Fidaleo, Inbal Yahav và Ian Cox đã đọc góp ý cho các bản nháp của các chương mới, trong ấn bản thứ hai này, vốn được mở rộng từ cuốn sách gốc năm 1998. Chúng tôi cảm ơn họ vì các nhận xét sâu sắc. Cuối cùng, chúng tôi xin ghi nhận sự giúp đỡ của Marco Giuliano người đã dịch hầu hết các tập tin *TeX* từ phiên bản 1998 đến *LaTeX* và Marge Pratt đã giúp chế bản bằng *LaTeX* tạo ra sản phẩm sau cùng của chúng tôi.

Bạn nên đọc và sử dụng cuốn sách này kèm với một trang web dành riêng cho cuốn sách, nơi chứa sẵn các phần mềm và các file dữ liệu được sử dụng để tải về. Địa chỉ trang web cuốn sách là

[www.wiley.com/go/modern\\_industrial\\_statistics](http://www.wiley.com/go/modern_industrial_statistics).

Trang này chứa:

1. một giới thiệu về R, của Giáo sư Stefano Iacus từ Đại học Milan [trong Phụ lục I],
2. phần nhắc lại đại số ma trận dùng cho thống kê [Phụ lục II],
3. mọi mã R trong cuốn sách, như gói `mistat` [Phụ lục III], mã R cũng có sẵn trên trang web của R-Cran,
4. mã nguồn của gói `mistat` (`mistat 1.0.tar.gz`) cho R [Phụ lục IV],
5. mọi bộ dữ liệu như các file `csv` (`csvFiles.zip` và thư mục chứa `csvFiles` của gói `mistat`) [Phụ lục V],
6. các gói lệnh MINITAB cơ bản, [Phụ lục VI]; cùng với các công cụ bổ sung (`add-ins`) trong MINITAB được sử dụng trong sách [Phụ lục II], và
7. hướng dẫn lời giải cho một số bài tập [Phụ lục VII].

Chúng tôi đặc biệt cảm ơn Giáo sư Iacus vì những đóng góp hào phóng của ông. Nếu bạn không quen thuộc với R, bạn nên xem tài liệu hướng dẫn này, được chuẩn bị đặc biệt bởi một trong những nhà phát triển nòng cốt của R. Tài liệu trên trang web của cuốn sách nên được coi là một phần của cuốn sách. Chúng tôi thực sự mong muốn nhận được thông tin phản hồi, ý kiến đóng góp từ sinh viên, giảng viên, các nhà nghiên cứu và các nhà thực hành, và hy vọng cuốn sách sẽ giúp các nhóm đối tượng khác nhau đạt được thành tựu cụ thể và có ý nghĩa với các công cụ và phương pháp thống kê công nghiệp.

**Ron S. Kenett**

Raanana, Israel and Turin, Italy; [ron@kpa-group.com](mailto:ron@kpa-group.com)

**Shelemyahu Zacks**

Binghamton, New York, USA; [shelly@math.binghamton.edu](mailto:shelly@math.binghamton.edu)

# Lời nói đầu của Ấn bản đầu tiên

---

*Thống kê Công nghiệp Hiện đại* cung cấp các công cụ cho những ai mong muốn đạt đến sự hoàn hảo trong các quá trình công nghiệp. Việc tìm hiểu các khái niệm và phương pháp trong cuốn sách này sẽ giúp bạn hiểu những gì cần thực hiện để đo lường và cải thiện chất lượng sản phẩm, dịch vụ đẳng cấp thế giới.

Thông qua cuốn sách này, bạn đọc sẽ nhận ra sự cần thiết phải cải tiến liên tục các quá trình công nghiệp để đạt được chất lượng, độ tin cậy, năng suất và lợi nhuận cao. Hơn nữa độc giả cũng sẽ thấy rằng chỉ bản thân các kỹ thuật quản lý, chẳng hạn như quản lý chất lượng tổng thể, hoặc tái cấu trúc quá trình kinh doanh là không đủ để đạt được mục tiêu nói trên, mà còn phải cần đến việc áp dụng mạnh mẽ thủ tục thống kê được thiết kế đặc biệt, như trong Mục 1.2 đã trích lời của Robert Galvin.

Các thủ tục thống kê được thiết kế để giải quyết vấn đề công nghiệp, được gọi là **Thống kê Công nghiệp**. Mục tiêu của chúng tôi khi viết cuốn sách này là cung cho các sinh viên kỹ thuật, các sinh viên chuyên ngành thống kê, và các nhà thực hành những khái niệm, ứng dụng và cách sử dụng các phương pháp thống kê công nghiệp từ cơ bản đến nâng cao, được thiết kế cho việc kiểm soát và nâng cao chất lượng cũng như độ tin cậy.

Ý tưởng viết một cuốn sách về thống kê công nghiệp hình thành sau nhiều năm hợp tác làm tư vấn công nghiệp, tham gia các hội thảo và hội nghị chuyên đề về giảng dạy, cũng như việc giảng dạy tại các trường đại học. Chúng tôi nhận thấy rằng hiện không có cuốn sách nào đáp ứng được nhu cầu của chúng tôi cả về nội dung lẫn phương pháp tiếp cận. Vì vậy chúng tôi quyết định hoàn chỉnh các bài giảng của mình thành cuốn sách này. Mục đích của chúng tôi là biên soạn một cuốn sách có nội dung bao gồm nhiều kỹ thuật hiện đại và toàn diện, được trình bày trong sáng và dễ thực hành theo.

Ron S. Kenett  
Shelemyahu Zacks  
1998



Trang này cố tình để trống.

## Lời nói đầu của Người dịch

---

**Thống kê học** có thể được mô tả ngắn gọn nhất là khoa học về sự không chắc chắn. Trong khi chữ “thống kê” và “dữ liệu”, đối với công chúng thường được sử dụng thay thế cho nhau, thống kê thực sự vượt xa sự tích lũy đơn thuần của dữ liệu. Vai trò của một nhà thống kê là: a) Thiết kế việc thu thập dữ liệu theo một cách thức giảm thiểu sự thiên vị và các yếu tố gây nhiễu, và đồng thời tối đa hóa nội dung thông tin, b) Kiểm tra chất lượng của dữ liệu sau khi nó được thu thập, và c) Phân tích dữ liệu bằng một phương cách mà nó mang đến cái nhìn sâu sắc hoặc thông tin hỗ trợ cho kỹ sư, nhà công nghiệp, quản lý hay chuyên viên nghiên cứu đưa ra quyết định.

Dữ liệu đang ngày càng phổ biến trong xã hội của thế kỷ 21. Các loại dữ liệu đủ loại, kích cỡ và cấu trúc đang xuất hiện trong mọi ngành khoa học của nhân loại, sinh ra hay thâm nhập sâu vào các cơ quan chính phủ và thương mại của chúng ta. Vì lý do này, các nhà thống kê có thể xác định hay phát minh ra nhiều cách thức mà nhờ đó công việc của họ đã có đóng góp một cách có ý nghĩa và có phần khác biệt so với phần còn lại của khảo cứu khoa học và phát minh kỹ nghệ.

Tuy nhiên, hiện đang có sự hạn chế trong nhận thức của công chúng đối với sự ích lợi lớn lao trong thực tiễn của khoa học thống kê, nhất là ở các quốc gia đang phát triển như Việt Nam. Khoa học gia và nhà quản lý có xu hướng cho rằng thống kê (gồm số liệu, với thông tin mô tả đơn giản và quyết định định lượng kém chặt chẽ rút ra từ đó) như cơ sở hạ tầng, và giống như các loại cơ sở hạ tầng, nó không nhận được đủ công nhận cho vai trò của nó. Nhà thống kê, với vài trường hợp ngoại lệ nổi bật, cũng đã không muốn hoặc không thể giao tiếp, bày tỏ với phần còn lại của thế giới về giá trị (và hứng thú) của công việc của họ.

Quyển sách này, của các nhà thống kê công nghiệp và ứng dụng chuyên nghiệp phương Tây, mang nhiều tư tưởng cách tân và rất thực tế, đã ra đời với mục tiêu khiêm tốn là lấp đầy *khoảng cách còn lại* đó. Chúng tôi, với tư cách người dịch và hiện đang làm nghiên cứu trong môi trường Việt Nam, hiểu các bất cập hiện hữu. Do đó nhóm dịch thuật mong muốn chuyển tải trung thực những quan điểm cách mạng trong thống kê học trong 20 năm gần đây, tư duy thống kê thực tiễn và một vài tiếp cận lý thuyết mới của các tác giả tới các sinh viên đại học (đặc biệt khối kỹ thuật, công nghệ, quản trị và sản xuất), các kỹ sư, nhà thực hành chuyên nghiệp, nhà khoa học và nhà quản lý...

Với mục tiêu hướng đến giới thiệu nhiều phương pháp mới cùng với các ví dụ thực tế có tầm ứng dụng cao, đôi khi các tác giả trình bày khá vắn tắt các kết quả toán học nền tảng, hay rút gọn các lập luận chi tiết. Trong các trường hợp như vậy, khi thấy cần thiết cho sự theo dõi của người đọc, chúng tôi mạnh dạn bổ sung thêm một số giải thích chi tiết, hay tính toán số áp dụng ngay khái niệm vừa nêu, mà sẽ được trình bày với cỡ chữ nhỏ hơn.

Phần I (Chương 1– 5) cung cấp kiến thức nền tảng cho cả bộ sách, phần còn lại của quyển sách gồm Chương 6– 10 (Phần II và III), Chương 11– 15 (Phần IV và V) là các phần nâng cao, bao gồm phương pháp lấy mẫu, thiết kế thí nghiệm thống kê trong công nghiệp và lý thuyết phân tích độ tin cậy và sự sống còn của các hệ thống động phức tạp.

Chúng tôi hy vọng bạn đọc tìm thấy được niềm vui và sự phấn khích khi sử dụng được các phương pháp trong quyển sách, dù là đang còn đi học ở trường hay đang mày mò trong phòng thí nghiệm, công xưởng, đi khảo sát hiện trường hay đang băn khoăn khi đưa ra một quyết định quan trọng trước một núi dữ liệu có quá nhiều trường hợp ngoại lai. Chuyển tải một nội dung khoa học phong phú, về lý thuyết cũng như khía cạnh áp dụng thực tế sâu rộng, sự sai sót là không tránh khỏi. Đó không phải lỗi của các tác giả, mà hoàn toàn do người dịch. Chúng tôi chân thành mong nhận được góp ý và phê bình của các bạn để các phần chuyển ngữ sau trung thực hơn, phục vụ người đọc tốt hơn.

Bản dịch này được ra đời nhờ sự hỗ trợ tốt nhất của Viện Nghiên cứu Cao cấp về Toán tại Hà Nội. Người dịch đặc biệt gửi lời cảm ơn GS TS Nguyễn Hữu Dư và TS Nguyễn Kỳ Nam đã quan tâm sâu sát tới công việc này.

Nguyễn V. M. Mẫn

mannguyen@hcmut.edu.vn

# Các Thí nghiệm trên Máy tính

---

Trong kỹ thuật công nghiệp, các mô hình số phức tạp (tức là các đoạn *mã máy tính*) thường được phát triển cho mục đích dự đoán, để tăng tính an toàn và độ tin cậy của một số quy trình, để tối ưu hóa một số tính chất hiệu năng hệ thống và / hoặc hiệu chỉnh một số thông số. Trong bối cảnh này, việc định lượng và xem xét, quan tâm tới sự không chắc chắn của các thông số đầu vào và dữ liệu đầu vào của hệ thống mô phỏng là rất cần thiết. Trong chương này, ta sẽ trình bày các vấn đề cơ bản để giải quyết các vấn đề liên quan đến quản lý tính bất định (không chắc chắn) của mô hình, như:

1. Làm thế nào để định lượng sự không chắc chắn (tính bất định) của các **biến hệ thống đầu vào** trong một khuôn khổ xác suất? Cách nào chuyển tải tính bất định thông qua mô hình số nhằm để suy ra các **tính chất thống kê của các biến đầu ra** hệ thống? Làm sao để hiểu được mối quan hệ giữa biến đầu vào và đầu ra của hệ thống? Đây là bước **phân tích độ nhạy** và ta sẽ tập trung vào các phương pháp thống kê của phân tích độ nhạy toàn cục.
2. Cách thức tính gần đúng mã máy tính với một mô hình toán học gọi là “**metamodel**”. Ta sẽ tập trung vào các metamodel quá trình Gaussian, ở Mục 13.3 mà, nhờ vào tính chất ngẫu nhiên của nó, cho phép ta tính các dự báo với mức độ tin cậy cao.

## 13.1 Giới thiệu về Thí nghiệm trên Máy tính

**Thí nghiệm dùng mô hình trên máy tính** (hay *thí nghiệm trên máy tính*) đã trở nên rất phổ biến trong nhiều lĩnh vực khoa học và công nghệ. Trong thí nghiệm trên máy tính, các quá trình vật lý được mô phỏng bằng cách chạy một đoạn mã máy tính mà tạo ra dữ liệu đầu ra với các giá trị đầu vào cho trước. Trong các **thử nghiệm dùng mô hình vật lý** (*physical experiment*, gọn hơn thí nghiệm vật lý), dữ liệu được tạo ra trực tiếp từ một quá trình vật lý, từ sự vận hành một máy móc, hay đối tượng vật chất cụ thể. Trong cả hai loại thí nghiệm vật lý và **thí nghiệm trên máy tính**, một nghiên cứu được thiết kế để trả lời các câu hỏi nghiên cứu cụ thể, và các phương pháp thống kê thích hợp là cần thiết để thiết kế thí nghiệm và để phân tích các dữ liệu kết quả.

Chương 11 và 12 đã trình bày các phương pháp và nhiều ví dụ như thế. Trong chương này ta tập trung vào các thí nghiệm trên máy tính (thí nghiệm máy tính) và các phương pháp thiết kế và phân tích cụ thể có liên quan đến các thí nghiệm như vậy.

### 13.1.1 Thế nào là Thí nghiệm trên Máy tính?

Do lỗi thực nghiệm, một thí nghiệm vật lý sẽ sinh ra các kết quả khác nhau cho các lần thử nghiệm khác nhau tại cùng các **thiết lập đầu vào**. Mặt khác, các thí nghiệm máy tính là tất định và các dữ liệu đầu vào như nhau sẽ luôn luôn cho **kết quả đầu ra** giống nhau. Vì vậy, không có nguyên tắc nào trong số các nguyên tắc làm thống kê thực nghiệm truyền thống, gồm phân khối (*blocking*), ngẫu nhiên hóa và lặp lại, có thể được sử dụng trong việc thiết kế và phân tích dữ liệu (sinh ra từ) thí nghiệm máy tính.

Các **thí nghiệm máy tính** bao gồm một số lần chạy một đoạn mã mô phỏng và các kết hợp (tổ hợp) các mức của các yếu tố tương ứng với một tập hợp con của các mã đầu vào. Bằng cách xem các lần chạy máy tính như là một hiện thực (*realization*) của một **quá trình ngẫu nhiên**, một khung thức thống kê có sẵn cho cả hai việc thiết kế vị trí của các điểm thử nghiệm, và phân tích các kết xuất hay đáp ứng thu được. Sự khác biệt chính giữa các thí nghiệm số trên máy tính với các thí nghiệm vật lý (trên mô hình thực) là sự khó khăn luận lý (*logical*) trong cách xác định nguồn gốc của sự ngẫu nhiên cho các thí nghiệm máy tính.

Sự phức tạp của các **mô hình toán học**, khi được hiện thực trong các **chương trình máy tính**, chính chúng có thể sinh ra các nguồn tương đương với nhiễu ngẫu nhiên. Trong một đoạn mã phức tạp, một số lượng các thông số và sự lựa chọn mô hình cung cấp cho người sử dụng nhiều mức độ tự do, theo đó sinh ra một sự biến đổi (tiềm năng) của các **kết quả đầu ra** của mô phỏng. Các ví dụ bao gồm các thuật toán giải pháp khác nhau (như là phương pháp ẩn hay chính xác để giải các phương trình vi phân), cách tiếp cận để rời rạc hóa các khoảng và các ngưỡng hội tụ của các kỹ thuật lặp trong **tính toán số**. Từ góc nhìn có ý nghĩa này, một **lỗi thực nghiệm** có thể được xem xét trong phân tích thống kê của các **thí nghiệm máy tính**. **Bản chất của lỗi thực nghiệm** trong cả hai loại thí nghiệm, *vật lý và mô phỏng*, là sự thiếu hiểu biết của chúng ta về các hiện tượng và lỗi nội tại của các phép đo.

Với các nhà khoa học thực nghiệm thì các hiện tượng trong thế giới thực thường là quá phức tạp để kiểm soát (được lỗi thử nghiệm) bằng cách xác định tất cả các yếu tố ảnh hưởng đến đáp ứng của thí nghiệm. Thậm chí khi có thể kiểm soát được, thì các dụng cụ đo lường vật lý, thường là không lý tưởng, sản sinh ra các vấn đề về tính đúng đắn (*accuracy*) và độ chính xác (*precision*, xem từ Mục 2.2). Nhà nghiên cứu hay kỹ sư có thể đạt được kiến thức hoàn hảo trong các thí nghiệm vật lý chỉ khi tất cả các nhân tố thử nghiệm được kiểm soát và đo mà không có lỗi. Các hiện tượng tương tự xảy ra trong các thí nghiệm máy tính. Một đoạn mã phức tạp có nhiều bậc tự do trong việc hiện thực nó, thường là không kiểm soát được.

- Một trường hợp cụ thể khi tính ngẫu nhiên bị mang (bắt buộc đi) vào các thí nghiệm máy tính bao gồm các chương trình của phương pháp phần tử hữu hạn (FEM, *Finite Element Method*) phổ biến. Những mô hình này được áp dụng trong một loạt các lĩnh vực kỹ thuật như điện từ trường, động lực học chất lỏng, thiết kế cơ khí, và thiết kế xây dựng. Các **mô hình toán học** FEM được dựa trên một **hệ phương trình vi phân** riêng phần (đạo hàm riêng), được định nghĩa trên miền không- thời gian, nhằm để xử lý các bài toán động, hoặc bài toán trạng thái ổn định tuyến tính hay phi tuyến tính.
- Phần mềm FEM có thể xử lý các cấu trúc, hình dạng rất phức tạp cũng như sử dụng với một loạt các thuộc tính vật liệu, các điều kiện biên và tải. Ứng dụng của mô phỏng FEM yêu cầu sự phân chia miền không gian thành một số hữu hạn các miền con, gọi là các **phần tử hữu hạn**, và rồi giải các hệ thống vi phân riêng phần trong mỗi miền phụ, sao cho trường hàm liên tục trên biên của nó.
- Các nhà thực nghiệm đầy kinh nghiệm về FEM nhận thức được rằng kết quả của các mô phỏng phức

tạp (hình dạng phức tạp, phương trình cấu trúc phi tuyến tính, các bài toán động, các tiếp xúc giữa các bộ phận khác nhau, vv...) có thể rất nhạy với sự lựa chọn thông số của mô hình **đa tạp vi phân** (*manifold*). Độ tin cậy của các kết quả FEM là một chủ đề quan trọng cho một mô phỏng duy nhất, và thậm chí còn quan trọng hơn cho một loạt các **thí nghiệm máy tính**. Các tham số mô hình được sử dụng trong sự rời rạc hóa của các cấu trúc hay mô hình hình học có thể sẽ là quan trọng nhất. Sự rời rạc hóa của mô hình hình học bao gồm một tập hợp các điểm (nghĩa là các nút của lưới) và, một tập hợp các phần tử (các mảnh cong hai chiều hoặc khối ba chiều), chúng được xác định thông qua một ma trận kết nối mà các dòng liệt kê các nút ứng với biên của các phần tử mảnh hay khối (là các cột của ma trận). Nhiều bậc tự do có sẵn cho các nhà phân tích chọn lựa khi phải xác định một lưới trên một mô hình nhất định. Một số lượng vô hạn các lưới có thể được tạo ra bằng cách thay đổi vị trí và số lượng của các nút, hình dạng và số lượng các phần tử (mảnh hay khối). Các lưới khác nhau bất kỳ trong chúng sẽ tạo ra các kết quả khác nhau.

- Làm thế nào ta có thể mô hình hóa các tác động của các lưới khác nhau trên hàm đáp ứng thực nghiệm? Về nguyên tắc, sự rời rạc hóa mịn hơn sẽ dẫn đến xấp xỉ của lời giải số tốt hơn, ngay cả khi những **bất ổn định số** (*numerical instabilities*) có thể xảy ra do sử dụng các lưới quá mịn. Trong một mức xấp xỉ hợp lý, một ảnh hưởng có hệ thống có thể được gán cho mật độ lưới; nó sẽ là một yếu tố ảnh hưởng cố định (*fixed-effect factors*) nếu nó được bao gồm trong thí nghiệm.
- Một số **đặc tính topo** (*topological features*) như vị trí nút, hình dạng mảnh cong hai chiều hoặc khối ba chiều, theo nhà phân tích thì không thấy có ảnh hưởng có ý nghĩa để xem xét, lại là các nguồn sinh ra sự biến đổi ngẫu nhiên. Ta có thể giả định rằng chúng được chọn ngẫu nhiên khi ta tiến hành thí nghiệm, hoặc chúng là các nhân tố có ảnh hưởng ngẫu nhiên (*random-effect factors*) với các thành phần phương sai nhiễu (*nuisance variance components*) nếu chúng được bao gồm như là các **nhân tố thực nghiệm**.

### 13.1.2 Về lựa chọn lưới

Sự lựa chọn lưới cũng có một tác động kinh tế trực tiếp khi độ phức tạp tính toán gia tăng cỡ lũy thừa theo số lượng các phần tử (nhắc lại như là các mảnh cong hai chiều hoặc khối ba chiều). Trong trường hợp của thí nghiệm máy tính, vấn đề cân bằng giữa độ tin cậy và chi phí thử nghiệm cần được giải quyết một cách cẩn thận. Về nguyên tắc, đối với bất kỳ đầu ra của một chương trình tính toán số, mô hình tất định sau đây giữ đúng:

$$y = f(x) + g(x; u) \quad (13.1)$$

trong đó hàm  $f$  biểu diễn cho sự phụ thuộc của đầu ra  $y$  theo véc tơ (*tham số kỹ thuật*)  $x$  của các nhân tố thử nghiệm, và  $g$  mô tả sự đóng góp của các *tham số mô hình*  $u$ , mà là cần thiết cho việc thiết lập mô hình máy tính. Vì hàm  $g$  có thể có các tương tác với các tham số kỹ thuật,  $x$  cũng là một đối số của hàm  $g$ . Nhìn chung một kỹ sư quan tâm đến sự ước lượng hàm  $f$  trong khi xem  $g$  như một yếu tố nhiễu. Tổng quát, ta có hai tùy chọn có sẵn để phân tích các thí nghiệm máy tính:

- (1) xem các **tham số mô hình** như các nhân tố thực nghiệm bổ sung hoặc
- (2) giữ chúng cố định trong toàn bộ quá trình thử nghiệm.

Tùy chọn đầu tiên cho phép sự ước lượng của mô hình tất định, sẽ thể hiện trong Phương trình (13.5). Đây là một lựa chọn tốt vì ảnh hưởng của cả hai loại **tham số kỹ thuật** (*engineering parameters*)

và **tham số mô hình** (*model parameters*) trên đáp ứng thực nghiệm có thể được lượng giá. Tuy nhiên, điều này yêu cầu một nỗ lực thử nghiệm mà thường chúng ta không thể kham nổi được về chi phí.

Ta cũng có thể giữ mọi tham số mô hình tại một giá trị cố định trong thí nghiệm, chỉ có số hạng đầu tiên  $f$  của mô hình (13.1) có thể được ước tính. Điều này dẫn đến một thí nghiệm ít tốn kém, nhưng sẽ có hai nhược điểm nguy hiểm: a) sự hiện hữu của ảnh hưởng của các **tham số mô hình** của hàm  $g$  trong (13.1) có thể gây ra sự thiên vị trong hàm đáp ứng, và b) các ước tính về ảnh hưởng của các tham số kỹ thuật bị sai lệch do sự tương tác giữa các **tham số mô hình** và **tham số kỹ thuật** có trong hàm  $g$ .

**Bảng 13.1:** Các mô hình khác nhau cho các thí nghiệm trên máy tính

Mô hình chọn lựa	Công thức	Bản chất mô hình	Ưu điểm	Nhược điểm
Tham số mô hình cố định	$y = f(x)$	Tất định	Không đắt tiền	sự thiên vị và sự biến dạng của ảnh hưởng của các tham số kỹ thuật
Ảnh hưởng của tham số mô hình được bao gồm trong thí nghiệm	$y = f(x) + g(x; u)$	Tất định	Chính xác hơn, ảnh hưởng hệ thống của $u$ có thể được phát hiện	Cần lập trình nhiều hơn
Ngẫu nhiên hóa vài tham số mô hình mà có ảnh hưởng ngẫu nhiên	$y = f(x) + g^*(x; u) + \epsilon$	Ngẫu nhiên	Khả năng tinh chỉnh lỗi thực nghiệm	Thậm chí cần lập trình nhiều hơn nữa

Một cách tiếp cận khác là ngẫu nhiên hóa trong suốt quá trình thử nghiệm những **tham số mô hình** mà ảnh hưởng của chúng có thể được giả định một cách hợp lý là các biến ngẫu nhiên Gauss với trung bình bằng không. Trong trường hợp này, mô hình cơ bản trở thành một mô hình ngẫu nhiên

$$y = f(x) + g^*(x; u) + \epsilon \quad (13.2)$$

với  $g^*$  là một hàm đại diện cho sự đóng góp hỗn hợp của **tham số kỹ thuật** và một số **tham số mô hình** có ảnh hưởng cố định (*fixed-effects*), sau khi các tham số mô hình khác có ảnh hưởng ngẫu nhiên (*random-effects*) đã được phân bổ vào tính toán lỗi thực nghiệm. Bất kỳ tham số mô hình nào mà bị nghi ngờ là có một sự tương tác đáng kể với một số **tham số kỹ thuật** nên được phân loại là một yếu tố thực nghiệm (*experimental factor*) để cho độ lệch ảnh hưởng có tính hệ thống của các **tham số kỹ thuật** như thế được ngăn ngừa. Ngẫu nhiên hóa các thông số mô hình mang lại hai lợi ích đồng thời sau.

- Một mặt, các mô hình đã đạt được một thành phần ngẫu nhiên mà tương đương với các lỗi thực nghiệm trong các thí nghiệm vật lý. Bằng cách này, lý do của các lần thí nghiệm lặp lại một lần nữa được chứng minh, theo đó ta đưa vào một cấp độ đo lường tự nhiên cho các hiệu ứng, và ta cũng thực thi được các kiểm định mức ý nghĩa thống kê thông thường.
- Mặt khác, dù không cần bất kỳ một nỗ lực thực nghiệm nào thêm, các tương tác khả dĩ giữa các **tham số mô hình** ngẫu nhiên và các **tham số kỹ thuật** không làm tăng sự biến dạng hay thay đổi của

ảnh hưởng của các **tham số kỹ thuật** hoặc các **nhân tố thực nghiệm**. Hơn nữa ta có thể điều chỉnh các **lỗi thực nghiệm** của thí nghiệm máy tính đến các **lỗi thực nghiệm** của một thí nghiệm vật lý liên quan. Trong trường hợp nhiều tham số  $u$  có mặt, thì nhiều khả năng là giả định phân phối chuẩn cho các lỗi ngẫu nhiên là hợp lý.

Bảng 13.1 ở trên, được chuyển thể từ công trình của Romano và Vicario (2002) tóm tắt nhiều phương pháp tiếp cận cho các thí nghiệm máy tính. Một trong những phương pháp mô hình hóa áp dụng cho các dữ liệu thí nghiệm máy tính là **Kriging**, cũng được gọi là mô hình *Quá trình Gaussian*. Mục 13.3 được dành riêng cho phương pháp Kriging để phân tích dữ liệu. Trong suốt chương này ta đề cập đến mô phỏng piston của Ví dụ 2.1 và sau đó là các ví dụ 4.13, 4.23, 4.24, 4.25, trong Chương 8 và trong Chương 11. Một phiên bản R của mô phỏng này, **pistonSimulation**, được bao gồm trong gói *mistat*. Ta mô tả tiếp theo đây nền tảng toán học của bộ mô phỏng piston.

**Ví dụ 13.1.** Dữ liệu chu kỳ piston đã giới thiệu trong Ví dụ 2.1 được tạo ra bởi phần mềm mô phỏng chuyển động một piston trong một xi lanh. Chuyển động thẳng của piston được chuyển thành chuyển động tròn bằng cách kết nối một que thẳng vào một đĩa. Piston di chuyển nhanh hơn bên trong xi lanh thì sự quay đĩa nhanh hơn, và do đó động cơ sẽ chạy nhanh hơn. Hiệu suất của piston được đo bằng thời gian nó cần để hoàn thành một chu kỳ, chỉ trong vài giây. Mục đích của mô phỏng là nghiên cứu những nguyên nhân của sự thay đổi trong chu kỳ piston. Các yếu tố sau đây (được liệt kê dưới đây với các đơn vị và phạm vi của chúng) ảnh hưởng đến hiệu suất của piston:

- $M$  = khối lượng piston (Kg), 30 – 60
- $S$  = diện tích mặt piston ( $m^2$ ), 0.005 – 0.020
- $V_0$  = thể tích khí gas ban đầu, ( $m^3$ ) 0.002 – 0.010
- $k$  = độ cứng lò xo ( $N/m$ ), 1000 – 5000
- $P_0$  = áp lực không khí ( $N/m^2$ ),  $9 \times 10^4$  –  $11 \times 10^4$
- $T$  = nhiệt độ môi trường ( $K$ ), 290 – 296
- $T_0$  = nhiệt độ khí gas nạp vào ( $K$ ), 340 – 360

Các nhân tố này ảnh hưởng đến biến chu kỳ Cycle Time thông qua dãy các phương trình vi phân

$$\text{Cycle Time} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{k + S^2 \frac{P_0 V_0}{T_0} \frac{T}{V^2}}} \quad (13.3)$$

với

$$V = \frac{S}{2k} \left( \sqrt{A^2 + 4k \frac{P_0 V_0}{T_0} T} - A \right) \quad \text{và} \quad A = P_0 S + 19.62M - \frac{kV_0}{S}. \quad (13.4)$$



**Adjust Sample Size**

This simulator will generate data grouped into samples of a specified size from the piston simulator.

Number of Samples:  Sample Size:  Number of data points: 20

**Adjust Initial Input Settings**

Piston Weight, M (Kg):	30	<input type="range" value="30"/>	60	Current Setting: 45
Piston Surface Area, S (m <sup>2</sup> ):	0.005	<input type="range" value="0.005"/>	0.020	Current Setting: 0.0125
Initial Gas Volume, V <sub>0</sub> (m <sup>3</sup> ):	0.002	<input type="range" value="0.002"/>	0.010	Current Setting: 0.006
Spring Coefficient, K (N/m):	1000	<input type="range" value="1000"/>	5000	Current Setting: 3000
Atmospheric pressure, P <sub>0</sub> (N/m <sup>2</sup> ):	0.0009	<input type="range" value="0.0009"/>	0.0011	Current Setting: 0.001
Filling Gas Temperature, T <sub>0</sub> (K):	340	<input type="range" value="340"/>	360	Current Setting: 350
Ambient Temperature, T (K):	290	<input type="range" value="290"/>	296	Current Setting: 293

Allow T to change over time? ☒ No ☐ Yes

**Manage Settings**

Name and save your settings, or recall saved settings, before running the simulator.

Save Settings

Recall Settings

**Run Simulator**

**Hình 13.1:** Thanh thao tác của chức năng “Piston Simulator” trong JMP. Khi số khởi tạo bộ sinh ngẫu số không reset, mỗi lần mô phỏng sinh ra các số khác nhau. Ngoài ra, các mức của áp lực không khí  $P_0$  tính theo đơn vị  $10^{-8}$ .

Sự ngẫu nhiên của biến chu kỳ Cycle Time được tạo ra bằng cách sinh ra các quan sát của các yếu tố với các giá trị thiết lập xung quanh các điểm thiết kế với nhiều cộng thêm vào các giá trị danh nghĩa. Hình 13.1 cho thấy bảng điều khiển hoạt động của chức năng “Piston Simulator” trong các ứng dụng JMP. Để thay đổi các phương án (cách xử lý, hay cách xử lý tổ hợp mức yếu tố), ta chỉ cần di chuyển thanh trượt sang trái hoặc phải. Để cài đặt nó, sau khi cài đặt JMP, download tập tin `com.jmp.cox.ian.piston.jmpaddin` từ website của cuốn sách và nhấp đúp vào nó, ta sẽ mở ra được chức năng “Piston Simulator” trong menu chính JMP. Ta có thể chạy giả lập nhờ thiết lập bằng tay cách xử lý tổ hợp hoặc bằng cách sử dụng mảng thực nghiệm được thiết kế thống kê.

Trong chương này, các mảng ta sẽ tham khảo được gọi là các **thí nghiệm lấp đầy không gian** (*space filling experiments*), hay gọn hơn **thí nghiệm đầy không gian**. Bộ mô phỏng được sử dụng trong bối cảnh của **kiểm soát quá trình thống kê** (SPC) (Chương 8). Ở đây, ta sử dụng nó trong bối cảnh các **thí nghiệm máy tính** được thiết kế một cách thống kê. Phần tiếp theo sẽ đề cập về việc thiết kế các **thí nghiệm trên máy tính**. Ta sẽ thảo luận các thí nghiệm lấp đầy không gian, dùng cụ thể cho các thí nghiệm máy tính mà các cách xử lý tổ hợp có thể được thiết lập một cách tự do, không có ràng buộc vật lý ở các cấp độ cụ thể. Mục 13.3 kể đó bàn về các mô hình được sử dụng trong phân tích thí nghiệm máy tính. Những mô hình này được gọi là mô hình **Kriging**, **DACE** hoặc mô hình **Quá trình Gaussian**. Chúng sẽ được giới thiệu ở mức độ tổng quan, được thiết kế để cung cấp một sự hiểu biết cơ bản về các tính chất, mà không đi sâu vào việc phát triển lý thuyết. ■

## 13.2 Thiết kế Các Thí nghiệm trên Máy tính

Thí nghiệm qua mô hình máy tính đã trở nên rất phổ biến. Ta giới thiệu ở đây hai mẫu **thiết kế thống kê** phổ biến cho các thí nghiệm như vậy: thiết kế đều và thiết kế siêu khối (*hypercube*) Latin. Giả sử rằng nhà thực nghiệm cần ước lượng trung bình tổng thể  $\mu$ , của đáp ứng  $y$  trên miền thử nghiệm  $X$ .

### Thiết kế đều

**Thiết kế thống kê** tốt nhất cho mục đích này là thiết kế mà có phân phối thực nghiệm xấp xỉ với phân phối đều. Ý tưởng này xuất hiện đầu tiên trong các phương pháp lấy tích phân số cho các bài toán có số chiều cao (bài toán nhiều chiều), gọi là phương pháp *quasi-Monte Carlo*, được đề xuất vào đầu những năm 1960. Hàm sai biệt  $D(\cdot)$ , hoặc độ đo của tính đều, lượng hóa sự khác biệt giữa **phân phối đều** và **phân phối thực nghiệm** của thiết kế. Các thiết kế với sự sai biệt nhỏ nhất được gọi là các thiết kế đều (*uniform designs*).

Có thể có nhiều hình thức khác nhau của **hàm sai biệt**, tùy thuộc vào chuẩn (*norm*) toán học được sử dụng khi đó để đo sự khác biệt giữa **phân phối đều** và **phân phối thực nghiệm** của thiết kế. Nói chung, **hàm sai biệt** là một thống kê kiểm định độ phù hợp mô hình (*goodness-of-fit*) kiểu Kolmogorov-Smirnov, xem Mục 4.7.2. Khi ước lượng  $\mu$  trong mô hình trung bình tổng thể thì thiết kế đều có sai số trung bình bình phương (MSE) tối ưu theo trung bình khi giả sử rằng  $h$  ngẫu nhiên, và có sai số trung bình bình phương tối ưu theo trị cực đại khi giả định rằng  $h$  tất định. Điều này ngụ ý rằng thiết kế đều là một loại thiết kế bền hay mạnh mẽ (*robust design*, xem Chương 12).

### Thiết kế (siêu khối) Latin

Thiết kế (siêu khối) Latin được tạo ra dễ dàng. Chúng đạt được tính đều tối đa trong mỗi biên đơn biến của miền thiết kế, theo đó cho phép nhà khoa học thực nghiệm sử dụng các mô hình mà có khả năng nắm bắt được sự phụ thuộc phức tạp của biến phản ứng theo các biến đầu vào. Một lý do khác góp phần vào sự phổ biến của các thiết kế Latin là chúng không có các thí nghiệm lặp (đi lặp lại). [Bạn xem thêm Mục 11.6.] Trong các thí nghiệm trên máy tính, thí nghiệm lặp không cung cấp thêm thông tin vì khi chạy một đoạn mã máy tính xác định hai lần đều cho giá trị đầu ra giống hệt nhau.

Thiết kế Latin là một lớp rất lớn của các thiết kế mà, tuy nhiên, không nhất thiết phải thực hiện tốt theo các điều kiện tiêu chuẩn như tính trực giao hay làm đầy không gian.

**Định nghĩa 13.1.** Ma trận  $D$  cỡ  $n \times m$  được gọi là một thiết kế (siêu khối - hypercube) Latin của  $n$  thử nghiệm cho  $m$  yếu tố nếu mỗi cột của  $D$  là một hoán vị của  $1, \dots, n$ . Thiết kế Latin khác biệt rõ rệt so với thiết kế khác là ở chỗ mỗi yếu tố trong một thiết kế Latin có số lượng mức chọn bằng với kích thước thử nghiệm.

Gọi  $y = f(x_1, \dots, x_m)$  là một hàm thực với  $m$  biến được định nghĩa trên một miền  $D$ , xác định bởi  $0 \leq x_j \leq 1, j = 1, \dots, m$ . Hàm này đại diện cho mô hình máy tính tất định trong trường hợp các thí nghiệm máy tính hoặc toán tử tích phân trong trường hợp lấy tích phân số.

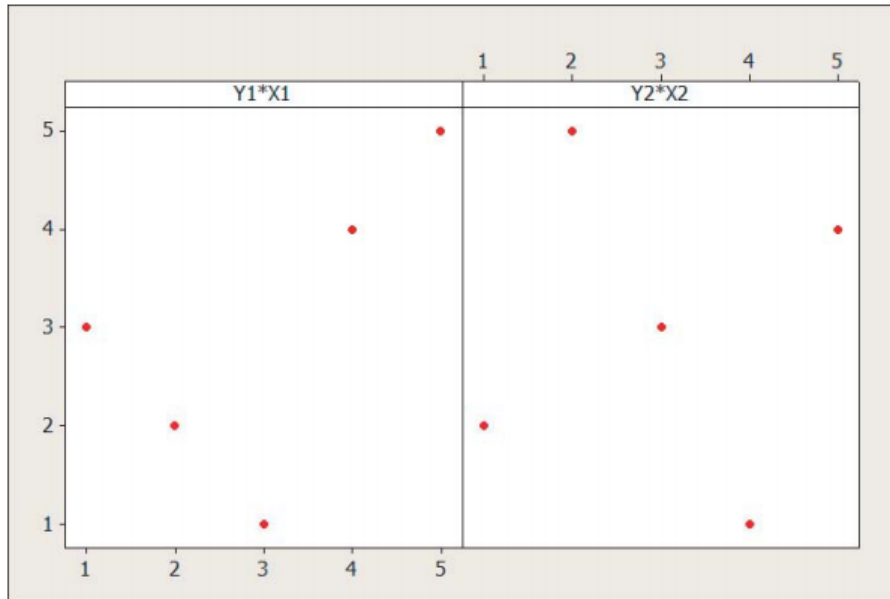
Có hai cách tự nhiên tạo ra các điểm thiết kế được dựa trên một thiết kế Latin cho trước. Với  $n$  điểm

được cho bởi  $(x_{i1}, \dots, x_{im})$  khi  $i = 1, \dots, n$ , ở cả hai cách ta dùng các phương trình, theo thứ tự là

$$x_{ij} = \frac{d_{ij} - 0.5}{n}, \quad \text{và} \quad x_{ij} = \frac{d_{ij} - u_{ij}}{n},$$

trong đó  $u_{ij}$  là các biến ngẫu nhiên độc lập với cùng phân phối đều trên  $(0,1]$ . Sự khác biệt giữa hai phương pháp có thể được nhìn thấy như sau.

Khi ta chiếu lên mỗi một trong  $m$  biến  $x_i$ , cả hai phương pháp đều có tính chất là một và chỉ một trong  $n$  điểm thiết kế nằm trong  $n$  khoảng con được xác định bởi  $[0, 1/n), [1/n, 2/n), \dots, [(n-1)/n, 1]$ .



Hình 13.2: Hai thiết kế Latin (D1 trái và D2 phải) có  $n = 5$  thử nghiệm cho  $m = 2$  yếu tố

Phương pháp đầu tiên cho ta các điểm giữa của những khoảng này trong khi phương pháp thứ hai cung cấp các điểm mà được phân phối đều trong các khoảng tương ứng của chúng. Hình 13.2 trình bày hai thiết kế Latin có  $n = 5$  thử nghiệm cho  $m = 2$  yếu tố. Dù cả hai thiết kế đều là Latin, thiết kế D2 cung cấp một phạm vi bao phủ miền thiết kế cao hơn khu vực thiết kế của thiết kế D1. Điều này đặt ra sự cần thiết phải phát triển các phương pháp cụ thể cho việc lựa chọn thiết kế Latin tốt hơn. Các thiết kế Latin được tạo ra rất dễ dàng. Bởi ta chỉ cần kết hợp một số hoán vị của  $1, \dots, n$ , thì ta có được một thiết kế Latin. Không có hạn chế nào trên số lượng  $n$  các thử nghiệm và số yếu tố  $m$ . Vì một thiết kế Latin có  $n$  mức khác nhau cho mỗi yếu tố, nó đạt được tính đều tối đa theo mỗi biến biên đơn lẻ. Hai tính chất hữu ích suy ra được từ sự kiện này là: (1) một thiết kế Latin thể hiện cho nhà thực nghiệm thấy cơ hội mô hình hóa sự phụ thuộc phức tạp của biến đáp ứng trên mỗi một trong các biến đầu vào; và (2) không có mức chọn lặp lại trong mỗi yếu tố.

**Quan sát 13.1.** Theo định nghĩa thì một siêu khối Latin không đảm bảo một tính chất nào trong hai hay nhiều hơn biến (nhân tố) biên. Do đó, tùy người sử dụng tìm ra “hoán vị đúng” để thiết kế tìm được có tính chất mong muốn nào đó trong thiết kế Latin hai chiều (tức là thiết kế có dạng bảng hình chữ nhật) hoặc nhiều chiều hơn. Một chiến lược đơn giản ta nên sử dụng là tính ra một thiết kế Latin ngẫu nhiên mà trong đó các hoán vị được lựa chọn ngẫu nhiên. Điều này giúp ta loại bỏ các mô thức (lỗi) hệ thống có thể có trong thiết kế kết quả, nhưng không có đảm bảo rằng thiết kế đó sẽ hoạt động tốt theo các tiêu chí thiết kế hữu ích khác (về mặt thống kê).

Một **thiết kế Latin** sẽ cung cấp một phạm vi bao trùm tốt cho **miền thiết kế** nếu tất cả các điểm là cách xa nhau, nghĩa là, không có hai điểm này là quá gần nhau. Ý tưởng này có thể được phát triển một cách hình thức hơn nhờ sử dụng tiêu chí khoảng cách lớn nhất của trị nhỏ nhất (*maximin*), theo đó các thiết kế nên được lựa chọn bằng cách tối đa giá trị  $\min_{i \neq j} \{d(p_i, p_j)\}$ , với  $d(p_i, p_j)$  biểu thị cho khoảng cách giữa các điểm thiết kế  $p_i, p_j$ . Khoảng cách Euclid được sử dụng phổ biến, nhưng các loại khoảng cách khác cũng rất hữu ích nữa.

**Ví dụ 13.2.** Để tính một **thiết kế lấp đầy không gian** với bộ giả lập piston, ta vào chức năng “Make Table of Inputs” trong tiện ích “Piston Simulator” của giao diện JMP, và nạp vào các yếu tố trong cửa sổ “Space Filling Design” của DOE. Điều này dẫn đến Hình 13.3. Trong cửa sổ đó thì biến đáp ứng Cycle Time (*Y*) đã được thiết lập cho trị mục tiêu là 0.5 giây, và cận đặc điểm kỹ thuật là 0.4 và 0.6 giây. Trong R, một **thiết kế Latin** cho bộ giả lập piston tính ra được với đoạn mã sau đây:

```
> install.packages('lhs')
> library(lhs)
> set.seed(123)
> Des <- maximinLHS(n=14, k=7)
> Des[, 1] <- Des[, 1] * (60-30) + 30
> Des[, 2] <- Des[, 2] * (0.02-0.005) + 0.005
> Des[, 3] <- Des[, 3] * (0.01-0.002) + 0.002
> Des[, 4] <- Des[, 4] * (5000-1000) + 1000
> Des[, 5] <- Des[, 5] * (110000-90000) + 90000
> Des[, 6] <- Des[, 6] * (296-290) + 290
> Des[, 7] <- Des[, 7] * (360-340) + 340
> Ps <- pistonSimulation(m=Des[,1],
s=Des[,2],
v0=Des[,3],
k=Des[,4],
p0=Des[,5],
t=Des[,6],
t0=Des[,7],
each=50, seed = 123)
> Ps <- simulationGroup(Ps, 50)
> aggregate(Ps[, !names(Ps)%in% "group"], by=Ps["group"], mean)
group m s v0 k
1 1 36.62212 0.007813297 0.007568935 3595.822
2 2 49.10798 0.011938304 0.008609783 3496.177
3 3 35.36337 0.009661298 0.004197461 1801.839
4 4 49.44634 0.013502478 0.006661239 2613.445
5 5 30.18488 0.014946074 0.006240249 3167.794
6 6 56.67459 0.018643301 0.002408431 2951.778
7 7 41.83358 0.019111462 0.007988155 1929.663
8 8 43.15736 0.008518263 0.009761732 3904.293
9 9 55.38200 0.013850142 0.003156083 2389.257
10 10 45.80667 0.015913435 0.009102252 4894.507
```

```

11 11 52.47176 0.005411918 0.005432476 1286.767
12 12 33.68118 0.006867006 0.004783999 4316.534
13 13 59.55691 0.010381630 0.002809665 1249.966
14 14 39.24817 0.017647417 0.005422265 4520.682

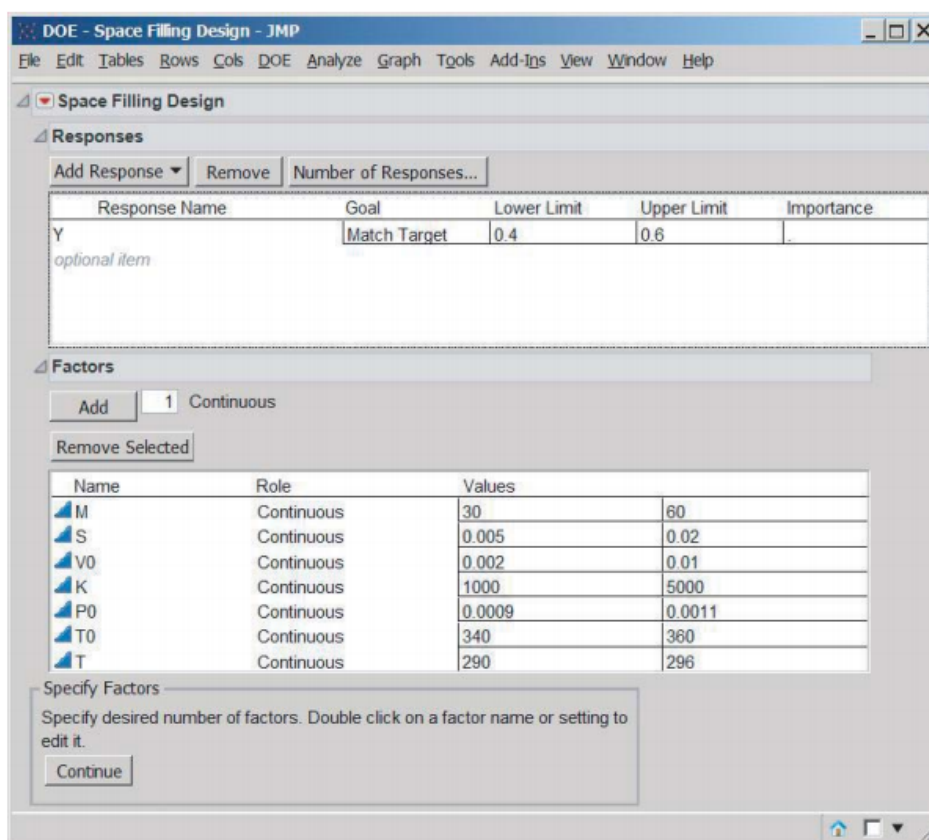
```

*p0 t t0 seconds*

```

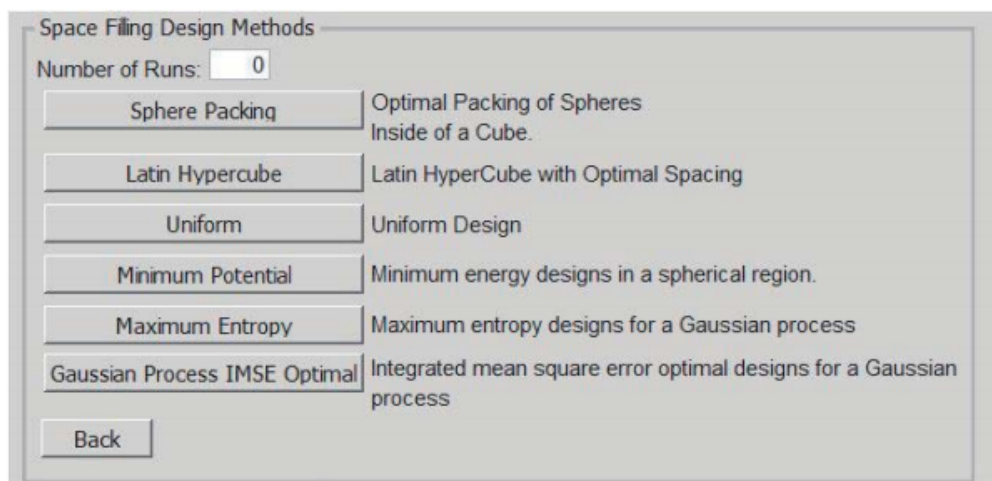
1 94715.03 291.1205 352.5042 0.4598097
2 98367.78 295.1039 345.7948 0.5197513
3 105881.90 292.8769 348.9075 0.5150990
4 91676.45 291.7229 347.8876 0.5085084
5 101152.42 293.0866 344.9420 0.3439924
6 104123.67 290.8368 355.0723 0.3081748
7 98628.26 294.1292 356.4851 0.4348759
8 104423.29 292.3265 359.0797 0.5218061
9 101906.55 295.4136 340.7806 0.4471062
10 90744.06 293.7113 343.8991 0.4169061
11 108564.19 294.3320 353.4552 0.9176922
12 96794.58 295.9345 358.0183 0.3917533
13 93781.92 291.6819 341.6746 0.7658336
14 108573.13 290.4252 350.2119 0.3008740

```



Hình 13.3: Thiết lập các đáp ứng và nhân tố trong thiết kế làm đầy không gian cho bộ giả lập piston (JMP)

Bấm chọn “Continue” trên JMP ta mở ra cửa sổ mới chứa nhiều **thiết kế thử nghiệm** (Hình 13.4). Chọn nút “Latin Hypercube” sẽ cho thiết kế như trong Hình 13.5. Một hình ảnh đồ họa của thiết kế làm đầy không gian này cho 7 nhân tố được thể hiện ở Hình 13.6. Như trong Hình 13.4, các thiết kế khác cũng có sẵn. Trong Mục 13.3 ta sẽ chạy bộ giả lập piston cho mỗi một trong 14 lần thử nghiệm. Ta sẽ tập trung bàn về các mô hình mà sẽ được dùng cho phân tích **thí nghiệm trên máy tính** trong phần kế tiếp sau. ■



Hình 13.4: Chọn thiết kế trong thí nghiệm làm đầy không gian cho bộ giả lập piston (JMP)

Space Filling Latin Hypercube

Factor Settings

Run	M	S	V0	K	P0	T0	T
1	53.07692	0.01769	0.00938	2538.462	0.00107	343.0769	291.8462
2	41.53846	0.00962	0.00262	1615.385	0.00099	341.5385	293.6923
3	39.23077	0.00615	0.00385	4384.615	0.00105	344.6154	290.0000
4	30.00000	0.01885	0.00631	3461.538	0.00098	340.0000	294.1538
5	50.76923	0.01654	0.00200	5000.000	0.00095	346.1538	292.3077
6	36.92308	0.01308	0.00815	4076.923	0.00090	350.7692	290.9231
7	34.61538	0.01077	0.00323	1923.077	0.00101	360.0000	294.6154
8	57.69231	0.00500	0.00446	3153.846	0.00092	355.3846	292.7692
9	46.15385	0.00731	0.01000	1000.000	0.00096	347.6923	293.2308
10	55.38462	0.01538	0.00569	3769.231	0.00104	358.4615	290.4615
11	43.84615	0.00846	0.00754	4692.308	0.00102	349.2308	295.0769
12	32.30769	0.01423	0.00877	2230.769	0.00110	356.9231	291.3846
13	48.46154	0.02000	0.00508	2846.154	0.00093	353.8462	296.0000
14	60.00000	0.01192	0.00692	1307.692	0.00108	352.3077	295.5385

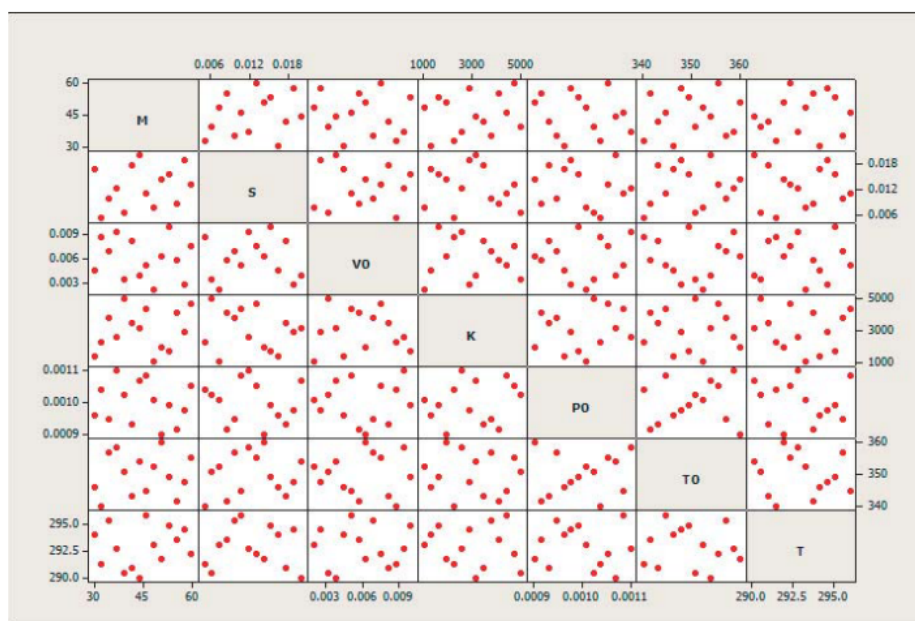
Design Diagnostics

Design Table

Make Table Back

Hình 13.5: Thiết kế hypercube Latin Latin cho bộ mô phỏng piston (JMP)





Hình 13.6: Thiết kế hypercube Latin Latin cho bộ mô phỏng piston (MINITAB)

## 13.3 Phân tích Các Thí nghiệm trên Máy tính

### 13.3.1 Lịch sử của mô hình Kriging

Như đã nêu ở Mục 13.1, (mô hình) Kriging đã được phát triển để mô hình hóa dữ liệu không gian trong **Thống kê Địa lý** (*Geostatistics*). Matheron (1963) đặt tên phương pháp này theo DG Krige, một kỹ sư khai thác mỏ người Nam Phi trong những năm 1950 đã phát triển các phương pháp thực nghiệm để ước lượng phân phối của mức quặng sắt thực sự ở toàn bộ (tổng thể) khu mỏ dựa trên các lớp quặng mẫu. Đồng thời những ý tưởng tương tự đã được phát triển trong Khí tượng học bởi LS Gandin (1963) ở Liên Xô. Gandin đặt tên phương pháp là **Nội suy tối ưu** (*Optimal Interpolation*).

Các đặc điểm chính của các mô hình Kriging là rằng xu hướng không gian có thể được mô hình hóa bằng cách sử dụng các cấu trúc tương quan không gian, tương tự như mô hình chuỗi thời gian, trong đó các quan sát được giả định là phụ thuộc. Tuy nhiên, các mô hình không gian cần phải được linh hoạt hơn các mô hình chuỗi thời gian, như là có sự phụ thuộc đa cấp trong nhiều hướng. Nói chung, tiếp cận này là một phương pháp dự đoán tuyến tính không gian tối ưu dựa trên tối thiểu hóa trung bình tổng bình phương các lỗi (MSE).

Việc sử dụng Kriging cho mô hình dữ liệu từ các thí nghiệm máy tính ban đầu được mang tên là **Thiết kế và Phân tích thí nghiệm máy tính** (DACE, *Design and Analysis of Computer Experiments*) do Sacks và cộng sự đặt ra (1989). Mô hình Kriging còn được gọi là mô hình Quá trình Gaussian (*Gaussian Process*, ví dụ như trong JMP). Các thí nghiệm máy tính có thể có nhiều biến đầu vào trong khi mô hình không gian chỉ có hai hoặc ba. Các thuật toán DACE sử dụng một mô hình mà xem đầu ra tất định của mã máy tính như là một thể hiện cụ thể (*realization*) của một quá trình ngẫu nhiên. Mô hình phi tham số này đồng thời xác định các biến quan trọng và xây dựng một yếu tố dự báo mà thích nghi với các hiệu ứng phi tuyến và **ảnh hưởng tương tác** trong dữ liệu.

### 13.3.2 Xác lập mô hình Kriging

Giả sử ta có một biến đáp ứng đơn trị vô hướng  $Y = y(\mathbf{x})$  duy nhất, là hàm của các vec tơ đầu vào  $\mathbf{x}$  có  $d$ -chiều. Đáp ứng tất định  $y(\mathbf{x})$  được xem như là một *hiện thực* (realization) của hàm ngẫu nhiên

$$Y(\mathbf{x}) = \beta + Z(\mathbf{x}). \quad (13.5)$$

Quá trình ngẫu nhiên  $Z(\mathbf{x})$  được giả định có trung bình 0 và hàm hiệp phương sai

$$\text{Cov}[Z(\mathbf{x}_i), Z(\mathbf{x}_j)] = \sigma^2 R(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) \quad (13.6)$$

giữa các giá trị  $Z(\mathbf{x}_i)$  và  $Z(\mathbf{x}_j)$  quan sát được tại hai biến đầu vào giá trị vec tơ  $\mathbf{x}_i$  và  $\mathbf{x}_j$ , trong đó  $\sigma^2$  là phương sai quá trình, và  $R(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$  là hệ số tương quan. Thiết kế và phân tích thí nghiệm máy tính (DACE), với  $\theta_k \geq 0$  và  $0 \leq p_k \leq 2$ , sử dụng hàm tương quan

$$R(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \prod_{k=1}^d \exp(-\theta_k |x_{ik} - x_{jk}|^{p_k}). \quad (13.7)$$

Ý cơ bản đằng sau hàm hiệp phương sai này là các giá trị của  $Y$  tại các điểm “gần” nhau trong không gian thiết kế nên có tương quan hay liên quan chặt chẽ hơn so với các điểm ở “xa” nhau. Do đó, ta sẽ có thể ước tính giá trị của  $Y(\mathbf{x})$  tại **một điểm mới** bằng cách tận dụng các giá trị quan sát thấy ở các điểm mà có *một mối tương quan cao với điểm quan sát mới* đó. Các tham số trong hàm tương quan xác định biến nào trong nhóm biến đầu vào là quan trọng trong việc đo khoảng cách giữa hai điểm.

Ví dụ, một giá trị lớn của  $\theta_k$  có nghĩa là chỉ có một lân cận nhỏ của các giá trị tại biến này được coi là “gần gũi” với một điểm đầu vào cho trước, và thường sẽ tương ứng với một điểm đầu vào với một ảnh hưởng mạnh mẽ. Trong mô hình này, cấu trúc hiệp phương sai được xác định thông qua hàm  $R(\cdot, \cdot)$  hơn là bởi các **variogram**, như thường làm trong lãnh vực Địa Thống kê (Geostatistics). Tất cả các tham số chưa biết được ước tính bằng cách sử dụng ước lượng khả năng tối đa (MLEs). Vì tối đa hóa toàn cục là có vấn đề từ góc độ tính toán, một thuật toán giả tối đa hóa được áp dụng bằng cách sử dụng một tiếp cận “từng bước”, khi ở mỗi bước các tham số cho một yếu tố đầu vào là “tự do” và tất cả các biến còn lại đều bằng nhau.

- Cho trước các tham số tương quan  $\theta$  và  $p$ , (biểu thức) **ước lượng khả năng tối đa** của  $\beta$  là

$$\hat{\beta} = (\mathbf{J}' \mathbf{R}_D^{-1} \mathbf{J})^{-1} (\mathbf{J}' \mathbf{R}_D^{-1} \mathbf{y}), \quad (13.8)$$

trong đó  $\mathbf{J}$  là vec tơ toàn số 1, và  $\mathbf{R}_D$  là ma trận vuông cỡ  $n$  gồm các trị tương quan  $R(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ .

- Ước lượng bình phương nhỏ nhất tổng quát hóa, và **ước lượng khả năng tối đa** của  $\sigma^2$  là

$$\hat{\sigma}^2 = (\mathbf{y} - \mathbf{J}\hat{\beta})' \mathbf{R}_D^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{J}\hat{\beta})/n. \quad (13.9)$$

- Dự đoán không chệch tuyến tính tốt nhất (BLUP, *best linear unbiased predictor*) tại một điểm  $\mathbf{x}$  chưa được thử nghiệm hay quan sát, là

$$\hat{y}(\mathbf{x}) = \hat{\beta} + \mathbf{r}'(\mathbf{x}) \hat{\mathbf{R}}_D^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{J}\hat{\beta}), \quad (13.10)$$



với  $\mathbf{r}(\mathbf{x}) = [R(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}), R(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}), \dots, R(\mathbf{x}_n, \mathbf{x})]'$  là vector của các hệ số tương quan giữa các giá trị  $Z()$  tại các điểm thiết kế  $\mathbf{x}_i$  và tại điểm mới  $\mathbf{x}$ . Tổng quát thì BLUP nội suy trị đầu ra quan sát được tại các điểm  $\mathbf{x}$  mà nằm trong tập dữ liệu huấn luyện.

**Ví dụ 13.3.** Ta dùng lần nữa bộ giả lập piston bằng cách áp dụng các ứng dụng tiện ích trong JMP. Trên thiết kế Latin của Hình 13.5, ta chạy giả lập bằng cách nhấn vào nút “Run Simulator”. Điều này thêm một cột  $Y$  chứa trị chu kỳ vào bảng JMP cho các giá trị của các yếu tố mà được xác định bởi mảng thử nghiệm. Hộp phía trên bên phải trong JMP bao gồm hai mô hình, mô hình sàng lọc và một mô hình (Kriging) Gaussian. Nhấp vào mũi tên màu đỏ, ta có thể chỉnh sửa các mô hình hay chỉ đơn giản là chạy chúng. Trong R một ứng dụng của mô hình Gaussian trông như sau:

```
> install.packages("DiceEval")
> library(DiceEval)
> data(LATHYPPISTON)
> Dice <- modelFit(LATHYPPISTON[, !names(LATHYPPISTON) %in% "seconds"],
                  LATHYPPISTON[, "seconds"],
                  type = "Kriging",
                  formula=~ .,
                  control=list(trace=FALSE))
```

```
> Dice$model
```

```
Call:
```

```
km(formula = ..1, design = data[, 1:f], response = data[, f +
  1], control = ..2)
```

```
Trend  coeff.:
```

	Estimate
(Intercept)	-5.5479
m	0.0047
s	-18.7901
v0	120.7077
k	0.0001
p0	675.7679
t	0.0303
t0	-0.0129

```
Covar. type : matern5_2
```

```
Covar. coeff.:
```

	Estimate
theta(m)	18.6575
theta(s)	0.0200
theta(v0)	0.0024
theta(k)	6516.2661
theta(p0)	0.0000
theta(t)	3.6451
theta(t0)	5.0568

```
Variance estimate: 0.01418025

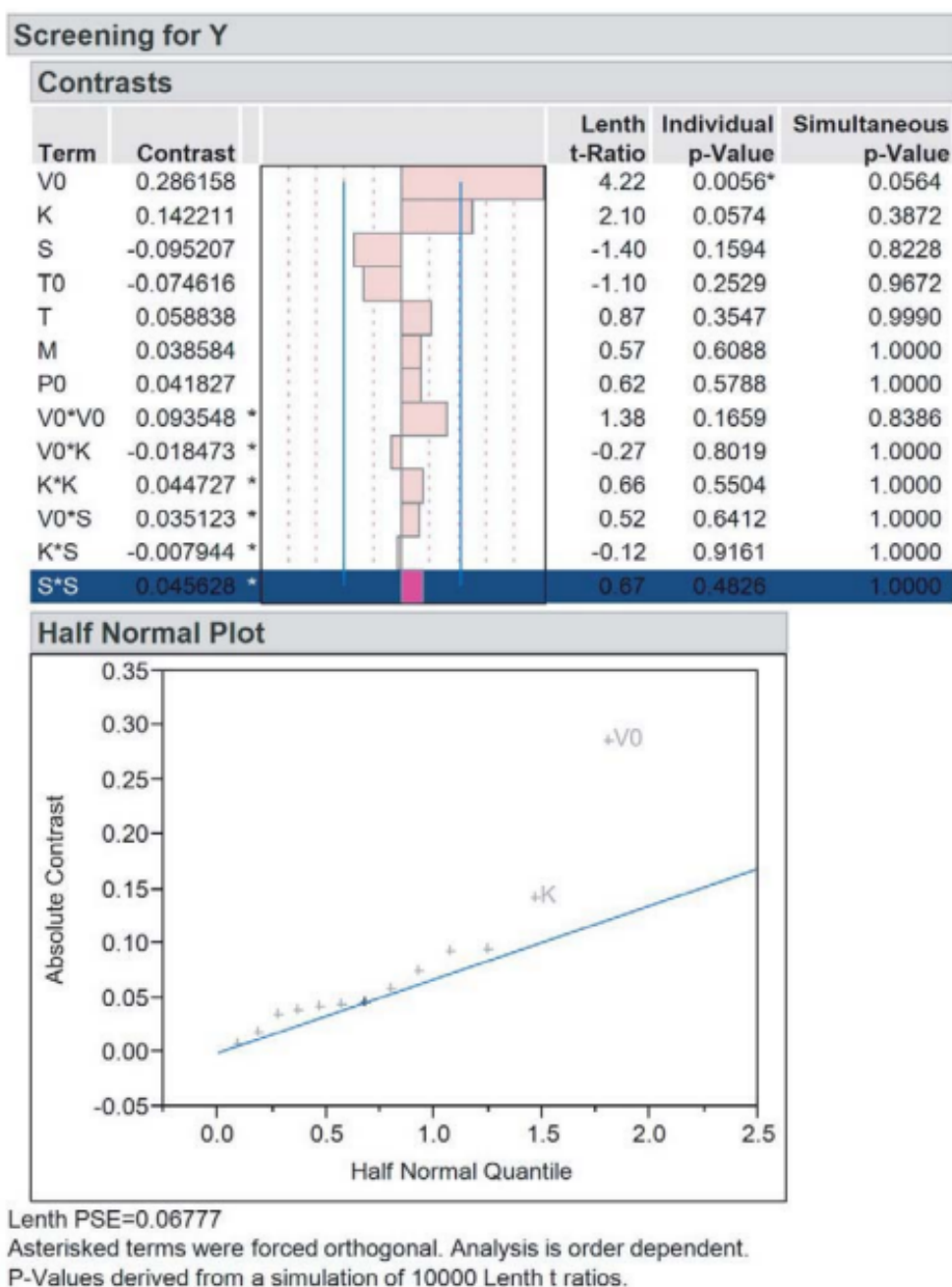
> Dice <- modelFit(scale(x=LATHYPPISTON[, !names(LATHYPPISTON) %in% "seconds"],
                        LATHYPPISTON[, "seconds"],
                        type = "Kriging",
                        formula= ~ .,
                        control=list(trace=FALSE))

> Dice$model
Call:
km(formula = ..1, design = data[, 1:f], response = data[, f +
  1], control = ..2)

Trend  coeff.:
              Estimate
(Intercept)  0.4910
           m   0.0363
           s  -0.0795
          v0   0.3178
           k   0.1405
          p0   0.0256
           t   0.0712
          t0  -0.0738

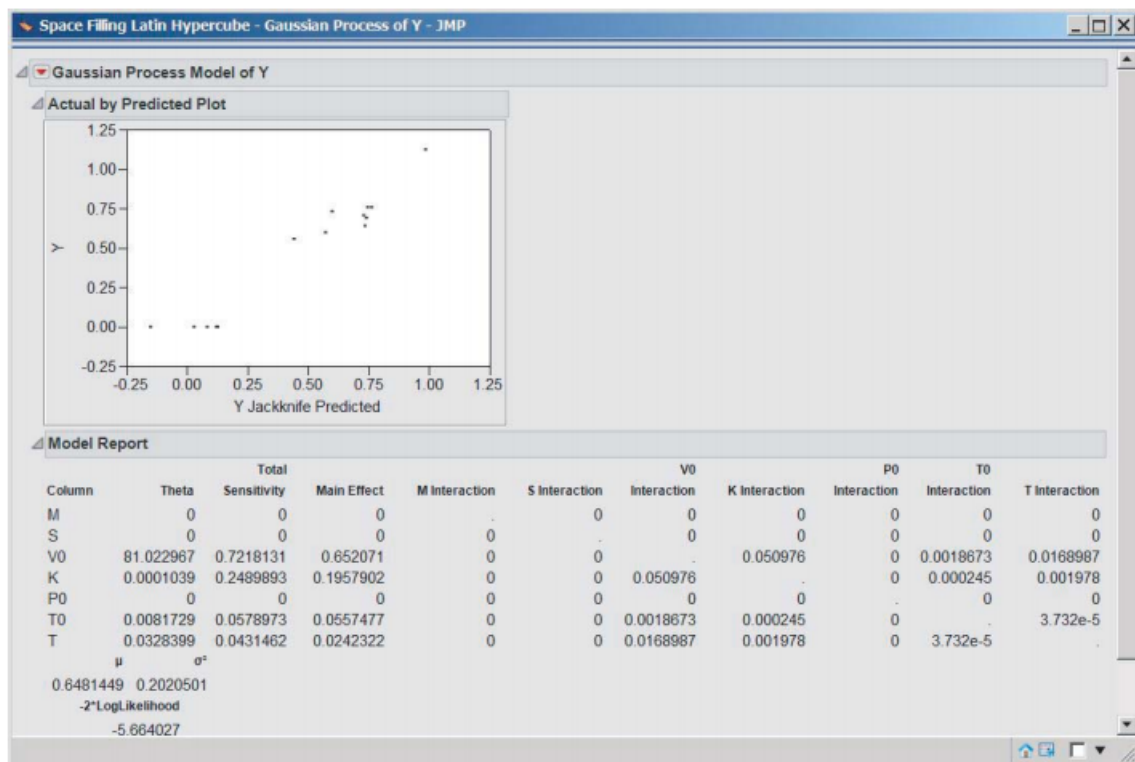
Covar. type : matern5_2
Covar. coeff.:
              Estimate
theta(m)     6.2152
theta(s)     0.8028
theta(v0)    0.7725
theta(k)     6.2152
theta(p0)    6.2152
theta(t)     6.2152
theta(t0)    6.2152
Variance estimate: 0.01488352
```

Chạy mô hình sàng lọc sản sinh ra Hình 13.7. Ta có thể thấy rằng khối lượng gas ban đầu,  $V_0$ , và hệ số lò xo,  $K$ , là hai yếu tố có ý nghĩa duy nhất. Điều này đã được xác định bằng cách khớp một thiết kế sàng lọc với mô hình đa thức gồm các **ảnh hưởng chính** và các tương tác hai nhân tố. Sơ đồ nửa chuẩn của các ảnh hưởng chính và tương tác của chúng xác nhận kết quả này. Nhấp vào “Run Mode” sẽ tạo ra một phân tích hồi quy biên của các yếu tố có đánh dấu bởi các thanh màu. Trong thiết lập của Hình 13.7 điều này tạo ra một phân tích về ảnh hưởng bậc hai của  $S$ , diện tích bề mặt piston.



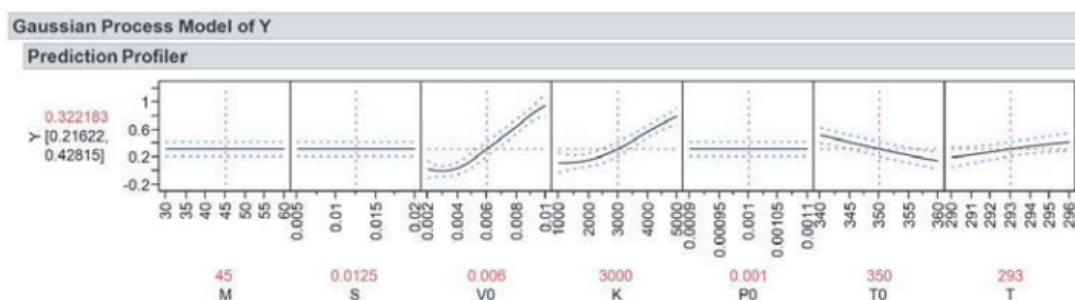
**Hình 13.7:** Các tác động chính và các tương tác của các yếu tố trong thí nghiệm mô phỏng chu kỳ piston, sử dụng thiết kế khối Latin (JMP)

Chạy mô hình Gaussian tạo ra Hình 13.8, trong đó trình bày các tham số mô hình được ước tính và một đánh giá về độ tốt của sự phù hợp dữ liệu bằng cách sử dụng phương pháp **Jackknife**, một kỹ thuật rất giống với **bootstrapping**, đã được trình bày trong Chương 4. **Phương pháp Jackknife** xem xét các ước tính tham số cho tập dữ liệu đầy đủ mà không có một quan sát, cho tất cả các quan sát. Trong phương pháp này người ta có thể so sánh giá trị quan sát được với giá trị dự đoán từ mô hình, như thể hiện trong phần đầu của Hình 13.8. Các điểm nằm trên đường thẳng ( $Y = X$ ) chỉ ra một sự phù hợp tốt của mô hình vì các điểm dữ liệu đã quan sát được dự đoán tốt bằng mô hình.



Hình 13.8: Ước tính của các tham số DACE trong thí nghiệm mô phỏng chu kỳ piston dùng thiết kế khối Latin (JMP)

Trong Hình 13.9 ta trình bày cùng hồ sơ JMP đó, một lần nữa, khẳng định rằng chỉ có  $V_0$  và  $K$  có ảnh hưởng đến trung bình của chu kỳ.



Hình 13.9: JMP profiler cho thấy hiệu quả biên của các yếu tố của thiết kế khối Latin trong thí nghiệm mô phỏng chu kỳ piston

## 13.4 Các bộ giả lập ngẫu nhiên

Quá trình thực hành kỹ thuật truyền thống bổ sung vào hệ thống thiết kế tất định các dự đoán với các yếu tố an toàn hoặc các biên độ thiết kế, nhằm để cung cấp một số bảo đảm đáp ứng các yêu cầu (sản xuất đạt chất lượng, tối ưu nguồn lực...) trong sự hiện diện của tính không chắc chắn và sự biến đổi khi mô hình hóa các giả định, các điều kiện biên, điều kiện sản xuất, vật liệu, và việc sử dụng của khách hàng.

Thực hành kỹ thuật hiện đại được áp dụng các phương pháp **Chất lượng nhờ Thiết kế** nhằm để giải thích cho các phân phối xác suất của các **đặc tính hiệu năng** của thành phần hoặc hệ thống. Chương 12 đã đưa ra một số ví dụ như vậy, bao gồm cả các **phương pháp thiết kế mạnh mẽ** (*robust design approach*) phát triển bởi Genichi Taguchi tại Nhật Bản. Tại hãng Pratt và Whitney ở Mỹ, Grant Reinman và nhóm của ông đã phát triển một phương pháp thiết kế nhấn cho sự biến đổi (*design for variation*, DFV) mà kết hợp cùng các nguyên tắc tương tự (Reinman et al, 2012.). Trong chương này, ta tập trung vào một yếu tố thiết yếu của kỹ thuật **Chất lượng nhờ Thiết kế** hiện đại, đó là **thí nghiệm trên máy tính**.

Khung thức mô phỏng thử nghiệm trên máy tính mới này đã kích thích sự phát triển của các loại **thiết kế thử nghiệm** và phương pháp phân tích mới mà được phát triển chuyên biệt theo các nghiên cứu này. Ý tưởng cốt yếu trong **thiết kế thử nghiệm** mô phỏng máy tính đã được xây dựng để đạt được gần như sự bao phủ đều của miền thử nghiệm. Thiết kế thường được sử dụng phổ biến nhất, cái gọi là thiết kế (*hypercube*) Latin đã được trình bày trong Mục 13.2. Trong các thiết kế Latin, mỗi yếu tố được đưa vào một số lượng lớn các cấp độ, một lựa chọn mà hầu như là không thể trong các thí nghiệm vật lý nhưng rất dễ dàng khi thử nghiệm trên một bộ mô phỏng.

Trong các thí nghiệm sử dụng máy tính cho các bài toán **thiết kế bền vững** (*robust design*), sự thay đổi trong kết quả đầu ra bị nảy sinh thông qua sự không chắc chắn trong các yếu tố đầu vào. Cách thức trực tiếp nhất để đánh giá sự thay đổi như vậy là tạo ra bộ mô phỏng đầu ra cho một số lượng vừa phải hay rất lớn các thiết lập đầu vào (xem Mục 13.2). Tuy nhiên, nếu bộ mô phỏng là chậm và / hoặc đắt tiền, một chương trình như vậy có thể không được thực tế. Mô hình giả lập ngẫu nhiên (*stochastic emulator*), cũng được gọi là một **siêu mô hình** *metamodel*, cung cấp một giải pháp đơn giản bằng cách thay thế bộ mô phỏng với một trình giả lập cho phần lớn các tính toán.

Các bước quan trọng của phương pháp **giả lập ngẫu nhiên** là như sau:

1. Bắt đầu với một **thiết kế Latin** (hoặc các **thiết kế lấp đầy không gian**) có kích thước vừa phải.
2. Sử dụng **bộ mô phỏng** để tạo ra dữ liệu tại các điểm trong thiết kế.
3. Mô hình hóa dữ liệu mô phỏng để tạo ra một bộ giả lập, được gọi là **giả lập ngẫu nhiên**.
4. Sử dụng kỹ thuật hợp lệ hóa chéo (*cross-validation*) để xác minh rằng bộ giả lập đại diện chính xác cho **bộ mô phỏng**.
5. Tạo ra một **thiết kế lấp đầy không gian** mới. Mỗi cấu hình trong thiết kế này là một thiết lập danh nghĩa tiềm năng mà ta sẽ đánh giá tính chất của phân phối đầu ra.
6. Tại mỗi cấu hình trong thiết kế mới, lấy mẫu một số lượng lớn các điểm từ các yếu tố nhiễu, và tính toán dữ liệu đầu ra từ **giả lập ngẫu nhiên**.
7. Xây dựng các mô hình thống kê mà liên kết các tính năng của phân phối đầu ra cho các thiết lập của yếu tố thiết kế. Những mô hình này chính chúng có thể là các bộ giả lập.

Cách tiếp cận này có thể làm giảm đáng kể gánh nặng tính toán tổng thể bằng cách sử dụng **giả lập ngẫu nhiên**, chứ không phải là bộ mô phỏng, nhằm tính toán các kết quả ở bước 6. Các bộ giả lập ngẫu nhiên là công cụ chính của tiếp cận **Chất lượng nhờ Thiết kế** trong các tổ chức, nơi mà đã kết hợp thành công các thí nghiệm mô phỏng với việc thiết kế được phẩm, với phương pháp phân tích và các quy trình quy mô.

## 13.5 Tích hợp các thí nghiệm vật lý với các thí nghiệm máy tính

### (A) Tiếp cận kết hợp thông tin

Ta có thể kết hợp thông tin từ ý kiến của các chuyên gia với thông tin từ thí nghiệm trên máy tính và thí nghiệm (trên mô hình) vật lý thật để thu được một **mô hình hồi quy** đơn giản có dạng:

$$Y = f(X, \beta) + \varepsilon. \quad (13.11)$$

**Dữ liệu từ thí nghiệm mô hình vật lý.** Trong mô hình này  $X$  đại diện cho không gian thiết kế tương ứng, véc tơ  $\beta$  đại diện cho các giá trị của các hệ số mô hình, và  $Y$  biểu thị cho  $k$  quan sát. Điều này đạt được bằng cách mô hình hóa dữ liệu thực nghiệm vật lý, cho bởi

$$Y_p \sim N(X_p \beta, \sigma^2 I) \quad (13.12)$$

trong đó  $\sigma^2$  là phương sai thực nghiệm biểu diễn cho tính bất định của các đáp ứng do các điều kiện thực nghiệm và do hệ thống đo lường.

Thay vì thuần túy dựa vào các thí nghiệm vật lý để thiết lập sự phân bố của hàm đáp ứng trong **không gian thiết kế**, trước tiên ta bắt đầu bằng cách đưa ra các ước tính từ các ý kiến chuyên gia, và rồi thêm các kết quả từ các **thí nghiệm trên máy tính**. Các kết quả từ các thử nghiệm vật lý sau đó được lồng ghép với hai nguồn thông tin này.

**Dữ liệu từ ý kiến chuyên gia.** Giả sử ta có  $e$  ý kiến chuyên gia. Các ý kiến chuyên gia về các giá trị của  $\beta$  có thể được mô tả như các phân vị của véc tơ biến ngẫu nhiên có phân phối Gauss

$$Y_0 \sim N(X_0 \beta + \delta_0, \sigma^2 \Sigma_0) \quad (13.13)$$

trong đó  $\delta_0$  là độ chệch về quan điểm hay góc nhìn cụ thể giữa các chuyên gia.

Giả sử ta có các **phân phối tiên nghiệm** sau đây cho các tham số chưa biết  $\beta$  và  $\sigma^2$

$$\beta | \sigma^2 \sim N(\mu_0, \sigma^2 C_0) \quad (13.14)$$

$$\sigma^2 \sim IG(\alpha_0, \gamma_0) \quad (13.15)$$

trong đó  $N(\mu, \sigma^2)$  biểu thị phân phối Gauss và  $IG(\alpha, \gamma)$  là phân phối gamma đảo. Sử dụng định lý Bayes, **phân phối hậu nghiệm** kết quả của  $\beta$  trở thành:

$$\pi(\beta | \sigma^2, \eta, y_0) \sim N((X_0' \Sigma_0^{-1} X_0 + C_0^{-1})^{-1} z, \sigma^2 (X_0' \Sigma_0^{-1} X_0 + C_0^{-1})^{-1}) \quad (13.16)$$

với

$$z = X_0' \Sigma_0^{-1} (y_0 - \delta_0) + C_0^{-1} \mu. \quad (13.17)$$

**Dữ liệu từ thử nghiệm trên máy tính.** **Dữ liệu thực nghiệm trên máy tính** có thể được mô tả bởi

$$Y_c \sim N(X_c \beta + \delta_c, \sigma^2 \sigma_c). \quad (13.18)$$

**Tóm tắt.** Kết hợp các kết quả này với các **phân phối hậu nghiệm** ý kiến chuyên gia ta thu được một phân phối hậu nghiệm thứ hai và sau đó thêm vào các ước tính từ các thí nghiệm vật lý thông qua một mô phỏng MCMC (*Markov Chain Monte Carlo*), ta tính ra được phân phối sau cùng cho  $\beta$ . Sơ đồ hóa tiến trình trên ta có sơ đồ

$$\text{Stage1}(\mathbf{Y}_0) \rightarrow \text{Stage2}(\mathbf{Y}_0 + \mathbf{Y}_c) \rightarrow \text{Stage3}(\mathbf{Y}_0 + \mathbf{Y}_c + \mathbf{Y}_p). \quad (13.19)$$

## (B) Tiếp cận thí nghiệm trung thành biến

Một cách tiếp cận liên quan gọi là “thí nghiệm trung thành biến” (*variable fidelity experiment*) đã được đề xuất trong Huang và Allen (2005) để kết hợp các kết quả từ các thí nghiệm được tiến hành ở các cấp độ tinh tế khác nhau. Ta hãy xem một ví dụ, kết hợp các tính toán đơn giản trong Excel, với kết quả từ việc kết hợp một phần mềm mô phỏng với các thí nghiệm vật lý thực tế. Mô hình kết hợp là:

$$Y(\mathbf{x}, l) = \mathbf{f}_1(\mathbf{x})' \beta_1 + \mathbf{f}_2(\mathbf{x})' \beta_2 + Z_{\text{sys}}(\mathbf{x}, l) + \epsilon_{\text{means}}(l) \quad (13.20)$$

trong đó  $l = 1, \dots, m$  là mức trung thành của hệ thống thí nghiệm, còn  $Z_{\text{sys}}(\mathbf{x}, l)$  là **lỗi hệ thống** và  $\epsilon_{\text{means}}(l)$  là **lỗi ngẫu nhiên** ( $l = 1$  ứng với hệ thống thực).

Giả định rằng ta biết **ma trận hiệp phương sai**  $V$  và  $\mathbf{Y}$  là vec tơ chứa dữ liệu từ  $n$  thí nghiệm, thì ước lượng bình phương tối thiểu của  $\beta_1$  là

$$\hat{\beta}_1 = (\mathbf{X}_1' V^{-1} \mathbf{X}_1)^{-1} \mathbf{X}_1' V^{-1} \mathbf{Y}. \quad (13.21)$$

Kết luận, cả hai mô hình gồm, (A) mô hình tích hợp mà ở đó ta kết hợp ý kiến chuyên gia với các thí nghiệm mô phỏng và thí nghiệm vật lý; và (B) là mô hình thí nghiệm mức độ trung thành biến; đã được chứng minh hữu ích trong các ứng dụng thực tế, nơi các thí nghiệm được tiến hành trong các điều kiện khác nhau, và kinh nghiệm biết trước đã được tích lũy. Để biết thêm về thí nghiệm máy tính, tích hợp thí nghiệm máy tính với thí nghiệm vật lý và giả lập ngẫu nhiên, bạn đọc có thể xem Ruggeri et al, 2007.

## 13.6 Tóm tắt Chương 13

Thí nghiệm máy tính được tích hợp trong các hoạt động sản phẩm và dịch vụ phát triển hiện đại, công nghệ tiên tiến cung cấp các nền tảng kỹ thuật số để nghiên cứu các đặc tính khác nhau của các thiết kế gợi ý, mà không cần phải thể chất cụ thể hóa.

Chương này trình bày về các thí nghiệm máy tính và các kỹ thuật đặc biệt cần thiết khi thiết kế thí nghiệm như vậy và kết quả phân tích của họ. Một ví dụ cụ thể của thí nghiệm này là giả lập piston sử dụng trong suốt cuốn sách để chứng minh các khái niệm và các công cụ thống kê. Trong mô phỏng này tiếng ồn ngẫu nhiên là gây ra các biến kiểm soát bản thân, một cách tiếp cận phi tiêu chuẩn trong mô hình hóa các hiện tượng vật lý. Các thí nghiệm được bảo hiểm bao gồm không gian diện thiết kế và hypercubes Latin. Việc phân tích các kết quả thí nghiệm được dựa trên mô hình **Kriging** hoặc mô hình



**DACE.** Chương này còn bàn về các khái niệm về một mô phỏng ngẫu nhiên mà một mô hình có nguồn gốc từ các kết quả mô phỏng được sử dụng để tối ưu hóa việc thiết kế một cách mạnh mẽ. Một phần đặc biệt thảo luận về một số phương pháp để tích hợp các phân tích của máy tính và thí nghiệm vật lý.

Các khái niệm chính và các công cụ được giới thiệu trong chương này bao gồm:

- Mô phỏng
- Thiết kế lấp đầy không gian
- Thiết kế khối Latin
- Mô hình Kriging
- Metamodel
- Bộ giả lập
- Bộ giả lập ngẫu nhiên
- Thử nghiệm trên mô hình vật lý
- Mô hình phân cấp (*Bayesian Hierarchical Model*)
- Mức trung thành

## 13.7 Bài tập Chương 13

**Bài tập 13.1.** Ta xét bài toán sinh nhật sau đây.

Giả sử 365 ngày trong một năm, nếu có 10 người trong một bữa tiệc, xác suất  $p$  mà các ngày sinh nhật của họ rơi vào những ngày khác nhau là bao nhiêu? Chứng minh rằng nếu có nhiều hơn 22 người trong nhóm, thì xác suất  $q$  rằng ít nhất 2 người sẽ có ngày sinh nhật trong cùng một ngày phải lớn hơn  $1/2$ :  $q > 1/2$ .

Ta sẽ làm lại bài tập này bằng cách sử dụng mô phỏng trên máy tính. JAVA applet có sẵn tại địa chỉ <http://www-stat.stanford.edu/susan/surprise/Birthday.html> mô phỏng bài toán sinh nhật. Chứng minh rằng nếu có nhiều hơn 22 người tham gia buổi tiệc, thì xác suất ít nhất 2 người có cùng ngày sinh phải lớn hơn  $\frac{1}{2}$ .

**Bài tập 13.2.** Thí nghiệm phễu Deming được thiết kế để chỉ ra rằng một phản ứng không phù hợp với nguyên nhân thay đổi chung sẽ làm cho vấn đề tồi tệ hơn. Nguyên nhân chung và các nguyên nhân đặc biệt ảnh hưởng đến quá trình theo thời gian đã được thảo luận trong Phần III. Trong việc minh họa thực tế, một cái phễu được đặt trên một mục tiêu tròn. Mục đích là để thả một viên bi qua phễu càng gần mục tiêu càng tốt. Một cây bút hoặc bút chì được sử dụng để đánh dấu nơi viên bi thực sự chạm mục tiêu. Thông thường, phải thực hiện 20 lần hoặc nhiều hơn để thiết lập mô hình và mức độ của sự biến đổi đối với mục tiêu.

Phễu đại diện cho nguyên nhân chung ảnh hưởng đến hệ thống. Bất chấp những cố gắng tốt nhất của người thực hiện, viên bi sẽ không rơi chính xác vào mục tiêu sau mỗi lần thực hiện. Người thực hiện có thể phản ứng với biến đổi này thông qua một trong bốn cách:



- (1) không di chuyển các phễu;
- (2) đo khoảng cách từ chỗ viên bi va chạm đến mục tiêu và di chuyển phễu bằng với khoảng cách đó, nhưng theo hướng ngược lại (sai số có quan hệ với vị trí trước đó);
- (3) đo khoảng cách từ chỗ viên bi va chạm đến mục tiêu và di chuyển phễu bằng với khoảng cách đó theo hướng ngược lại, nhưng bắt đầu từ mục tiêu (sai số có quan hệ với mục tiêu); và
- (4) di chuyển phễu một cách chính xác qua vị trí va chạm cuối cùng.

Bạn hãy sử dụng R, MINITAB để so sánh bốn chiến lược bằng cách mô phỏng dữ liệu.

Macro MINITAB cho mô phỏng phễu có thể tải về từ trang web <http://www.minitab.com/enAU/support/macros/default.aspx?action=code&id=25>. Có thể xem mô phỏng thí nghiệm trên trang web <http://www.symphonytech.com/funnelexp.htm>.

**Bài tập 13.3.** Sử dụng Uniform Design, hãy sinh ra Stochastic Emulator cho mô phỏng piston để đạt được 0.2 giây thời gian chu kỳ với độ phân tán nhỏ nhất.

**Bài tập 13.4.** Sử dụng Latin Hypercube Design, hãy sinh ra Stochastic Emulator cho mô phỏng piston để đạt được 0.2 giây thời gian chu kỳ với độ phân tán nhỏ nhất. So sánh các kết quả này với kết quả đạt được trong bài tập 13.3

# Chỉ mục

---

## biểu đồ kiểm soát

cho dữ liệu biến, 363

cho dữ liệu thuộc tính, 363

ý nghĩa thống kê, 161

ý nghĩa thiết thực - công nghệ, 161

Địa Thống kê, 607

Định lý

Chebychev, 77

giới hạn trung tâm, 131, 653

Pearson, 184

Điều khiển Quá trình Thống kê, 351

đáng tin cậy, 619

đồ thị tuyến tính, 569

đòn bẩy, 272

đặc tính topo, 597

độ đo

hiệu năng, 556

độ chính xác, 24

độ dốc, 79, 244

độ lệch, 244

độ lệch chuẩn, 77

$\alpha$  cắt, 48

mẫu, 37

độ lệch tiêu chuẩn

của các giá trị đáp ứng, 272

độ méo lệch, 77, 78

độ méo lệch mẫu, 37

độ nhọn, 77, 79

độ nhọn mẫu, 37

độ phân giải, 535

độ phân tán, 24

độ phù hợp

mô hình với dữ liệu, 151

độ tin cậy, 621

hoạt động tiệm cận, 635

độ trễ

trung bình có điều kiện, 419, 425

độc lập, 65, 624

lẫn nhau, 65

theo cặp, 65

độc lập với nhau, 115

đại lượng tổng thể, 305

được kết nối

song song, 624

tuần tự, 624

đưa vào dân, 266

đa hồi quy, 251

đa kiểm duyệt, 644

điều khiển quá trình một cách thống kê, 9

điều khiển quá trình thống kê, 140

điểm

ngoại lai, 47

điểm bất thường, 42

điểm chuẩn- NSCORES, 179

điểm thay đổi, 423

điểm yên ngựa, 550

ảnh hưởng

tương tác, 479

của các tương tác, 504

chính, 479, 482, 483

tương tác/ phối hợp, 483

ước lượng

điểm của tham số tổng thể, 154

bình phương tối thiểu, 157

bảo hiểm, 644

Bayes, 194, 679

Bayes của trung bình hiện hữu, 429

Bayes thực nghiệm, 687

- bootstrap cho độ lệch chuẩn, 199
- gộp, 282
- không chệch, 154
- không chệch tuyến tính tốt nhất, 525
- không thiên vị, 154
- khả năng quan sát dữ liệu tối đa, 423
- khoảng của tham số tổng thể, 154
- nhất quán, 154
- ước lượng
  - khả năng quan sát dữ liệu tối đa, 159
- ước lượng bootstrap
  - cho độ lệch chuẩn, 636
- tứ phân vị
  - mẫu thứ ba, 35
- tỉ lệ  $F$ , 139, 489
- thử nghiệm
  - tuổi thọ tăng tốc, 664
- bất đối xứng, 78
- Bất đẳng thức
  - Schwarz, 241
- Bất đẳng thức Bonferroni, 373
- bất đẳng thức Bonferroni, 381
- bất đẳng thức Chebychev, 136
- bất ổn định số, 597
- bất thường, ngoại lai, 41
- bí danh, 533
- binh phương nhỏ nhất, 511
- bài toán lựa chọn mô hình, 266
- bộ sinh số đồng dư tuyến tính, 59
- bản sao
  - độc lập, 482
- bảng
  - tiếp liên, 285
  - ANOVA, 278
- bảng kiểm tra, 375
- bảng phân phối xác suất, 70
- bảng tiếp liên, 231
- Bayes thực nghiệm tham số, 688
- biến
  - ngẫu nhiên, 68
  - đáp ứng, 251
  - định lượng, 231
  - định tính, 231
  - dự báo, 251
  - Gauss chuẩn tắc, 96
  - giải thích, 231, 251
  - hồi quy (giải thích hay dự báo), 251
  - mã hóa, 236
  - phân loại, 231
  - quan sát, 231
  - tiền lượng (biến hồi quy, giải thích), 301
- biến đáp ứng, 475
- biến cố, 56
- biến cố
  - chắc chắn, 56
  - không thể, 56
- biến cố rời nhau từng đôi, 60
- biến hồi quy, 259
- biến liên tục, 26
- biến ngẫu nhiên, 20
  - độc lập, 113
  - liên tục, 72
  - rời rạc, 81
  - chi-bình phương với d.f.  $n - 1$ , 135
  - liên tục, 69
  - nhị thức, 81
  - rời rạc, 69
- biến rời rạc, 26
- biểu đồ
  - $T^2$ , 448
  - đa phân tán, 232
  - c, 363
  - cột, 27
  - CUSUM, 412
  - hộp, 42
  - hộp đa biến, 233
  - hộp-và-râu, 42
  - Ishikawa, 377
  - kiểm soát, 9
  - kiểm soát đa biến, 447
  - kiểm soát dựa trên trung bình trượt theo cấp độ mũ, 430
  - np, 363
  - p, 363
  - Pareto chiều/ chuẩn, 377
  - phân bố, 231
  - phân tán, 231

- tán xạ, 231
- tán xạ 3D, 233
- tần số, 33
- tần suất, 33
- biểu đồ u, 363
- cấp độ, mức chọn của nhân tố được kiểm soát, 476
- cách bố trí thí nghiệm, 476
- cách xử lý tổ hợp, 493
- công thức Bayes, 189, 675
- càng lớn càng tốt, 557
- càng nhỏ càng tốt, 557
- cận
  - đặc điểm kỹ thuật, 369
  - điều khiển, 360
  - cảnh báo, 382
  - kiểm soát, 360, 382
  - kiểm soát dưới, 364
  - kiểm soát trên, 364
  - từ chối, 382
- cận dung sai
  - dưới, 178
- cận dung sai dưới, 334
- cận khoan dung trên và dưới, 335
- cỡ mẫu, 151
- chất lượng
  - đầu ra trung bình, 336
- Chất lượng nhờ Thiết kế, 12, 16, 555
- chất lượng nhờ thiết kế, 473
- chất lượng thông tin- InfoQ, 13
- chất lượng theo thiết kế, 7
- Chỉ số
  - Cramer, 292
  - tiếp liên trung bình bình phương, 292
  - Tschuprow, 292
- chiều dài
  - hoạt động, 619
  - loạt số, 403, 418
  - loạt số trung bình, 403, 418
- chu kỳ, 629
- chu trình phản hồi
  - bên ngoài, 360
  - nội bộ/ bên trong, 360
- chuẩn thực hành sản xuất tốt hiện hữu, 570
- chuẩn xác, 24
- CUSUM, 409
- dạng chính tắc, 550
- dạng chuẩn hóa, 99
- danh sách, 62
- diễn dịch
  - lầm lẫn, 534
  - sai lệch, lầm lẫn, 531
  - sai lệch, lẫn lộn, 534
- giá trị
  - bất thường, 47
  - khởi đầu chính, 416
  - bất thường, bất thường, 40
- giá trị  $F$ -từng phần, 265
- giá trị dự đoán, 252
- giá trị P của kiểm định, 164
- giả thuyết
  - đổi (thay thế) của  $H_0$ , 160
  - gốc, đầu tiên, hay vô hiệu  $H_0$ , 160
  - gốc, hay vô hiệu  $H_0$ , 174
  - thống kê - statistical hypothesis, 160
- giải pháp / cách xử lý tổ hợp, 482
- giải pháp, cách xử lý, 481
- giải thích được, 252
- giao hoán, 58
- giao thức thực hiện, 476
- hồi quy
  - đáp ứng định tính, 251
  - đa biến, 251
  - logistic, 251, 275
  - từng phần, 256
- hàm
  - độ tin cậy, 623
  - đổi mới, 630
  - cường độ lỗi, 630
  - cường độ sửa chữa, 631
  - mất mát, 557, 678
  - mật độ đổi mới, 632
  - nguy cơ tức thời, 623
  - tốc độ lỗi, 623
  - tốc độ lỗi tích lũy, 623
  - tổn thất, 191
  - tỷ số tín hiệu với nhiễu, 564

- thiệt hại, 557, 678
- Gauss mở rộng, 95
- Gauss tổng quát, 95
- khả năng (cơ may) quan sát dữ liệu, 159
- khả tích, 115
- mật độ xác suất, 72
- quyết định, 191
- quyết định Bayes, 192
- tổn thất, 194
- hàm
  - sinh moment, 80, 82
- hàm đặc trưng
  - hoạt động, 406
- hàm cấu trúc, 624
  - tuần tự, 625
- hàm của biến ngẫu nhiên, 115
- hàm giá trị thực, 68
- hàm khả năng, 423
- hàm mật độ
  - đồng thời, 111
  - biên, 111
  - dự đoán, 687
  - biên liên kết, 111
  - có điều kiện, 116
  - xác suất, 69, 72
- hàm mật độ xác suất
  - có điều kiện, 190
  - hậu nghiệm, 189
  - tiên đoán, 189, 674
  - tiên đoán đồng thời, 190
  - tiên đoán có điều kiện, 191
  - tiên nghiệm, 187, 674
- hàm mong muốn, 576
- hàm năng lượng, 163
- hàm phân phối
  - đồng thời, 110
  - dự đoán, 683
  - xác suất, 70, 72
  - có điều kiện, 116
  - Gauss chuẩn tắc, 97
  - liên kết, 110
- hàm số
  - Gamma, 105
  - Gauss, 96
- hàm sẵn sàng, 630
- hàm sinh moment (m.g.f.), 95
- hệ phương trình chuẩn, 259
- hệ số
  - xác định, 245
  - tương quan từng phần, 265
- hệ số hồi quy, 244
- hệ số đa tương quan, 252
- hệ số biến thiên, 40
- hệ số góc, 244
- hệ số tự do, 244
- hệ số tương quan
  - đa biến bình phương, 252
  - từng phần, 256
- hệ số tương quan mẫu, 242
- hệ thống thông minh, 104
- hội tụ theo xác suất, 127
- hạt nhân của hàm khả năng, 677
- họ tham số, 155
- hướng dốc lên mạnh nhất, 548
- hiệp phương sai mẫu, 241
- hiệu ứng
  - của các tương tác, 504
- hiệu quả thống kê, 14
- hiệu quả thống kê thực tế, 14, 617
- kế hoạch
  - đo lường chất lượng, 435
  - lấy mẫu đơn (một giai đoạn), 327
  - lấy mẫu kép (hai giai đoạn), 327
- kế hoạch lấy mẫu
  - lướt qua lô hàng, 340
- kết hợp, 58
- kích thước mẫu, 151
- kì vọng có điều kiện, 117
- kỹ thuật thống kê đa biến, 11
- Kỹ thuật về tính bất định, 104
- không bị lẫn lộn, 480
- không có sự tương tác, 569
- không chuẩn xác, 24
- không gian
  - tham số, 187, 673
- không gian tham số, 155
- không hoàn lại, 306
- không kỳ dị, 477

- không liên kết, 291
- khả năng bảo trì, 621
- khả năng, năng lực của quá trình, 304
- khoảng
  - khả tín, 195
  - lấy mẫu, 408
  - thời gian đo, 408
  - dung sai, 41
  - tin cậy Bayes, 195
  - tin cậy Bayes cân xứng, 196
- khoảng cách
  - Cook, 273
  - hợp lý, 273
- khoảng dự đoán Bayesian, 683
- khoảng dung sai
  - không phụ thuộc vào phân phối (chuẩn), 215
  - Bootstrap, 212
- khoảng khoan dung của khách hàng, 558
- khoảng khoan dung của nhà sản xuất, 558
- khoảng tứ phân vị, 40
- khoảng tin cậy
  - bootstrap, 199
  - mật độ hậu nghiệm cao nhất, 195
  - bootstrap, 636
- Khoa học hành vi, 104
- khung dữ liệu, 30
- kiểm định
  - $F$ -tuần tự, 265
  - $F$  từng phần (partial  $F$ -tests), 265
  - chất lượng, 317
  - dấu (hiệu), 217
  - giả thuyết thống kê, 151
  - hoạt động tăng tốc, 620
  - Kolmogorov-Smirnov, 185
  - phi phân phối, 217
  - phi tham số, 223
  - tỷ lệ xác suất tuần tự, 329
  - tỷ số xác suất tuần tự, 412, 657
  - Wilcoxon hạng được đánh dấu, 221
- kiểm định giả thuyết- hypothesis testing, 162
- kiểm định ngẫu nhiên, 218
- kiểm duyệt
  - ngẫu nhiên, 638
  - phải, 638
  - theo tần số, 638, 650
  - theo thời gian, 638
- kiểm soát chất lượng sớm (*off-line*), 556
- kiểm soát ngẫu nhiên, 438
- Kiểm soát Quá trình Thống kê, 344
- Kiểm soát quy trình thống kê, 16
- kiểm toán
  - chất lượng, 317
- kiểm tra
  - giảm nhẹ, 339, 347
  - thắt chặt, 339, 347
  - bình thường, 339, 347
- kiểm tra - giám sát
  - trong quá trình, 304
- lắp ráp mới hàn, 478
- lấy mẫu
  - có hoàn lại, 306
  - chấp nhận, 9
  - chấp nhận theo các thuộc tính, 317
  - không hoàn lại, 306
  - kiểm tra, 9
  - lướt qua vài lô hàng, 304
- lấy mẫu chấp nhận, 26
- lấy mẫu ngẫu nhiên có hoàn lại, 26
- lấy mẫu ngẫu nhiên không hoàn lại, 26
- lý thuyết
  - chọn mẫu, 199
- lý thuyết xếp hàng, 104
- lô hàng, 318
- lọc Kalman, 433
- Lagrangian, 314
- liên tục tuyệt đối, 72
- loạt số, 402
- loạt số, loạt kết quả thử, 396
- log-khả năng, 159
- luật của kì vọng lặp, 118
- luật của tổng phương sai, 118
- Luật yếu số lớn, 130
- mức ý nghĩa
  - đạt được, 164
- mức ý nghĩa (thống kê) của kiểm định, 162
- mức ý nghĩa thống kê, 223
- mức độ phân khối, 532

- mức độ tin cậy của khoảng, 172
- mức chấp nhận, 318
- mức chất lượng
  - chấp nhận được, 9, 318
  - giới hạn, 318
- mức khác biệt, 282
- Mô hình
  - Nghiên cứu Quy trình, 11
- mô hình
  - đa tạp vi phân, 597
  - cộng tính, 483
  - giả lập ngẫu nhiên, 612
  - kết cục hữu hạn, 274
  - không cộng tính, 483
  - log chuẩn Arrhenius, 665
  - logistic, 251
  - năng lượng ngược, 665
  - tắt định, 23
  - thống kê, 151
  - thống kê tham số, 155
  - tuyến tính, 244
- mô hình thống kê, 476
- mô hình tuyến tính động, 438
- mô phỏng, 21
- mặt đáp ứng, 537
  - bậc hai, 538
  - tuyến tính, 538
- mật độ liên kết, 111
- mạch chỉnh lưu, 220
- mục tiêu
  - làm thí nghiệm, 475
  - nguyên cứu, 475
- mảng
  - ngoài, 568
  - trực giao, 568
  - trong, 568
- mảng trực giao, 477
- Mẫu
  - Bernoulli, 212
- mẫu, 26, 151
  - bootstrap, 199
- mẫu ngẫu nhiên, 26
  - đơn giản, 306
  - có hoàn lại, 306
  - có hoàn lại, RSWR, 82
  - không hoàn lại, 306
  - không hoàn lại, RSWOR, 87
  - phân theo tầng, 306
- ma trận
  - đa phân tán, 232
  - phân tán đa biến, 232
- ma trận hồi quy, 259
- ma trận phương sai-hiệp phương sai, 300
- miền
  - dùng sai, 454
- miền bác bỏ, 162
- miền chấp nhận- acceptance region, 162
- moment, 75
- moments trung tâm, 75
- MTTF, 646, 665
  - của hệ thống, 662
  - thời gian trung bình cho đến khi hệ có lỗi, 623
- năng lực quá trình, 4, 360
- ngưỡng bác bỏ, 186
- ngẫu nhiên, 477
- ngẫu nhiên có hoàn lại, 62
- ngẫu nhiên hóa, 480
- ngẫu nhiên không hoàn lại, 62
- ngẫu số, 307
- Nghịch lý Chất lượng - Năng suất, 6
- nguyên cứu
  - năng lực quá trình, 368
- nguyên cứu năng lực quá trình
  - biến, 369
  - thuộc tính, 368
- nguồn sinh nhiễu, 561
- nguyên lý
  - bình phương tối thiểu, 251
- nguyên nhân
  - đặc biệt, 354
  - gán ghép được, 354
  - thứ cấp, 376
- nguyên nhân phổ biến, 354
- nhóm con hợp lý, 369
- nhân tố (yếu tố) được kiểm soát, 475
- nhân tử Lagrange, 314
- nhị thức, 63

- phép đo, giá trị đo, 475
- phép biến đổi Laplace, 629
- phép thử, 55
- phân bố
  - tần số, 27
- phân bố lấy mẫu của một ước lượng, 308
- phân bố tối ưu, 313
- phân chia
  - từng phần các thí nghiệm, 531
- phân hoạch, phân vùng, 59
- Phân phối
  - Bootstrap, 198
  - Bootstrap Thực nghiệm, 198
  - Bootstrap, 636
  - Bootstrap Thực nghiệm, 636
- phân phối, 58
  - $F$  (Fisher) với  $\nu_1$  và  $\nu_2$  bậc tự do., 139, 489
  - đa siêu bội, 121
  - $\chi^2$ , 134, 649
  - đối xứng, 78
  - đều, 186
  - đồng thời của 2 biến rời rạc, 112
  - bội thức, 119
  - biên, 111
  - có điều kiện, 240
  - Cauchy, 76
  - chi bình phương, 135
  - chuẩn (phân phối Gauss), 179
  - gamma, 105
  - mẫu, 152
  - nhị thức, 81, 84, 91, 161
  - nhị thức âm, 93, 436
  - Poisson, 87, 91, 627
  - siêu bội, 85
  - tần số, 27
  - tần số đồng thời, 237
  - thời gian hoạt động, 623
  - thời gian sống, 623
  - tham chiếu, 201
  - tham chiếu thực nghiệm, 196
  - tuổi thọ, 623
  - Weibull, 107, 634
  - xác suất, 69
  - Beta, 108
  - chuẩn, 95
  - Gauss, 95
  - Gauss chuẩn tắc, 96
  - Gauss hai biến, 121
  - hình học, 92
  - mũ, 102
  - nhị thức, 78
  - Student hay  $t$  với bậc tự do  $\nu$ , 137
- phân phối hoạt động, 619
- phân phối liên hợp, 678
- phân phối Pareto, 621
- phân phối tham khảo, 484
- Phân tích
  - ANOVA, 494, 497, 503
- phân tích
  - ANOVA, 499
  - hồi quy, 231
  - hồi quy đa biến, 251
  - tương quan, 231
- phân tích phương sai, 277, 488
- phân vùng, 67
- phân vị, 140, 489
  - thứ  $p$  của phân phối, 77
  - của phân phối mũ, 102
  - thứ  $p$  của một biến ngẫu nhiên  $X$ , 83
- phân vị của phân phối Gauss chuẩn, 98
- phân vị mẫu thứ  $p$ , 35
- phân vị,
  - bách phân vị của phân phối, 83
- phần dư chuẩn, 273
- phần nguyên, 71, 92
- phần tử sinh, 533
- phụ thuộc, 64
- phụ thuộc một cách thống kê, 240
- Phòng đoán Hiệu quả Thống kê, 7
- phương sai mẫu, 152
- phương pháp
  - bình phương tối thiểu, 244
  - Bayes thực nghiệm tham số, 436
  - bootstrap, 186, 223
  - các phương trình moment, 689
  - Jackknife, 610
  - moment, 156
- phương pháp đa biến, 231



- phương pháp hồi quy tuyến tính, 231
- phương pháp luận mặt đáp ứng, 471
- phương sai, 75
  - dự báo, 574
  - lỗi, 574
- phương sai có điều kiện, 117
- phương sai mẫu, 37
- phương trình
  - hồi quy, 244
- phương trình chuẩn tắc (normal equation), 299
- power function, 168
- quá trình
  - liên tục theo thời gian, 662
  - Poisson, 662
- quá trình đổi mới, 629
- quá trình hàn sóng, 478
- quá trình ngẫu nhiên, 596
- quần thể thống kê, 26, 151
- Quản lý Chất lượng (QM), 6
- quản trị
  - chất lượng nhờ thiết kế, 10
- quan sát
  - được kiểm duyệt, 638
  - bất thường, 45
- quy hoạch động, 440
- quy tắc tỉ lệ, 438
- ràng buộc tương phản tuyến tính, 491
- rủi ro
  - của người sản xuất, 319
  - của người tiêu dùng, 319
  - của nhà sản xuất, 319
  - tiên nghiệm, 191
  - Bayes, 192
  - hậu nghiệm, 194, 679
- số chấp nhận, 320
- số mẫu trung bình, 325, 658
- số trung vị, 78
- Sáng kiến Six Sigma của Motorola, 6
- sự độc lập
  - giữa nhiều biến ngẫu nhiên, 114
- sự chấp nhận/ thừa nhận, 318
- sự hội tụ theo xác suất, 127
- sự phân bố mẫu, 310
- sự sẵn sàng vận hành, 622
- sản phẩm
  - hư hỏng, 318
  - không đủ/ không đáp ứng chuẩn, 318
- sơ đồ
  - lưu chuyển, 375
  - luồng- khối, 375
  - nhân quả, 377
  - tán xạ, 377
- sơ đồ điều khiển, 363
- sơ đồ phân vị, 43
- sơ đồ Q-Q chuẩn- Normal Q-Q Plot, 179
- sơ đồ tương tác nhân tố, 508
- sai lầm (lỗi suy diễn- inference error), 161
- sai số, 244
  - chuẩn, 154
  - do dụng cụ đo, 24
  - do người đo, 24
- sai sót hiếm, 354
- siêu bội, 63
- so sánh
  - cặp, 480
- suy diễn
  - thống kê, 152
- suy diễn
  - thống kê, 41
- suy luận
  - thống kê, 152
- tích chập, 629
- tính bền vững, 46
- tính chất quên, 104
- tính sẵn sàng, 619, 621, 622
  - thực chất, 622
- tối đa mẫu, 35
- tối thiểu mẫu, 35
- tứ phân vị, 35
  - mẫu thứ nhất, 35
- tác động
  - của các tương tác, 504
- tầm vực mẫu, 35, 386
- tần số, 27
  - đồng thời, 237
  - biên, 237

- liên kết, 237
- tích lũy, 27
- tương đối, 27
- tương đối tích lũy, 28
- tần suất, 27
  - có điều kiện, 291
  - tích lũy, 28
- tẩy rửa làm sạch, 478
- tổ hợp xử lý, 277
- tổn thất
  - dự kiến, 187
- tổng số kiểm tra trung bình, 338
- tổng thể thống kê, 26, 151
- tỉ lệ
  - các linh kiện không đáp ứng chuẩn, 318
  - lỗi quá trình, 408
  - sản phẩm khiếm khuyết của quá trình, 408
- tỉ số
  - hàm beta không đầy đủ, 109
- tương phản tuyến tính, 520
- thí nghiệm, 55, 59
  - dùng mô hình vật lý, 595
  - dựa trên máy tính, 561
  - lắp đầy không gian, 600
  - máy tính, 595
  - nhân tố, 471, 562
  - nhân tố đầy đủ, 503
  - trên máy tính, 595
  - vật lý, 561
- thí nghiệm được lên kế hoạch, 11
- thí nghiệm được thiết kế một cách thống kê, 471
- Thống kê
  - Địa lý, 606
- thống kê, 34, 155
  - đủ, 159
  - đủ tối thiểu, 685
  - bền vững, 47
  - chi-bình phương, 291
  - hiệu năng, 564
  - khả năng, 685
  - mẫu, 152
  - Shiryayev-Roberts, 424
  - thứ *i*, 34
  - thứ tự, 34
  - vị trí, 35
- thống kê cho xu hướng trung tâm, 35
- thống kê kiểm định
  - t*, 202
  - student, 202
- thứ tự ngẫu nhiên, 476
- thông tin tiên nghiệm, 673
- thời gian
  - hoạt động, 622
  - hoạt động theo lịch trình, 621
  - không hoạt động, 622
  - vận hành, 621
  - vận hành theo lịch, 622
- thời gian
  - giữa 2 lần đến liên tiếp, 104
  - phục vụ, 104
- thời gian cho đến khi lỗi, 629
- thời gian cho đến khi sửa chữa, 629
- thời gian lưu trữ, 622
- thời gian rồi, 621
- thử nghiệm
  - tuổi thọ tăng tốc, 662
  - thời gian sống tăng tốc- ALT, 662
- thử nghiệm tuổi thọ tăng tốc, 621
- tham số, 69
  - định nghĩa, 531, 535
  - định nghĩa độc lập, 533
  - xác định, 531, 535
- tham số thiết kế, 561
- Thang Chất Lượng, 16
- Thang Chất lượng, 2
- thiết kế
  - không kỳ dị, 540
  - độ khoan dung, 559
  - bền vững, 612
  - bảo hòa, 568
  - hệ thống, 559
  - khoan dung, 559
  - một phần, 532
  - nhân tố đầy đủ, 503
  - tổ hợp, 494
  - tổng hợp có trung tâm, 541
  - thí nghiệm (DOE), 471
  - tham số, 559

- trực giao, 540
- xoay được, 541
- thiết kế bậc hai, 538
- thiết kế khối
  - đầy đủ ngẫu nhiên, 481
  - hoàn chỉnh ngẫu nhiên, 490
  - không đầy đủ cân bằng, 481
  - không đầy đủ và cân bằng, 493
- thiết kế khoan dung, 561
- thiết kế thí nghiệm, 11
- thiết kế thí nghiệm thống kê, 4
- thiết kế tham số, 559, 561
- thuật toán hồi quy từng bước, 266
- trợ dung, thổi sạch bề mặt, 478
- trị mặc định là tốt nhất, 557
- trung bình
  - hai mẫu độc lập, 139, 489
  - $\alpha$ -cắt, 46
  - hình học, 39
  - mẫu, 152
  - tổng thể, 75
  - tiếp liên bình phương, 302
  - toàn thể, 209
  - mẫu, 36
- trung bình trượt theo cấp mũ, 429
- trung vị, 35
- vấn đề kinh niên, 354
- vô hạn đếm được, 69
- vec tơ
  - các thành phần chính, 456
- xác suất
  - có điều kiện, 64
  - cảnh báo sai, 418, 425
  - hậu nghiệm, 67, 424
  - tiên nghiệm, 67, 423
  - tiên nghiệm, 67, 191

# Một số gói tính toán trong phần mềm R

---

- AcceptanceSampling Kiermeier A (2008). “Visualizing and Assessing Acceptance Sampling Plans: The R Package AcceptanceSampling.” *Journal of Statistical Software*, 26(6), <http://www.jstatsoft.org/v26/i06/>.
- boot Canty A and Ripley BD (2012). *boot: Bootstrap R (S-Plus) Functions*. R package version 1.3-7.
- Davison AC and Hinkley DV (1997). *Bootstrap Methods and Their Applications*. Cambridge University Press, Cambridge. ISBN 0-521-57391-2, <http://statwww.epfl.ch/davison/BMA/>.
- car Fox J and Weisberg S (2011). *An R Companion to Applied Regression*, Second edition. Sage, Thousand Oaks, CA, <http://socserv.socsci.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion>.
- DiceDesign Franco J, Dupuy D, Roustant O, Damblin G and Iooss B (2013). *DiceDesign: Designs of Computer Experiments*. R package version 1.3, <http://CRAN.R-project.org/package=DiceDesign>.
- DiceEval Dupuy D and Helbert C (2011). *DiceEval: Construction and Evaluation of Meta-models*. R package version 1.1, <http://CRAN.R-project.org/package=DiceEval>.
- DiceKriging “DiceKriging, DiceOptim: Two R Packages for the Analysis of Computer Experiments by Kriging- Based Metamodeling and Optimization.” *Journal of Statistical Software*, 51(1), pp. 1–55, <http://www.jstatsoft.org/v51/i01/>.
- DiceView Richet Y, Deville Y and Chevalier C (2012). *DiceView: Plot Methods for Computer Experiments Design and Surrogate*. R package version 1.3-0, <http://CRAN.R-project.org/package=DiceView>.
- Dodge Godfrey AJR and Govindaraju K (2012). *Dodge: Functions for Acceptance Sampling Ideas Originated by H.F. Dodge*. R package version 0.7, <http://CRAN.R-project.org/package=Dodge>.
- DoE.base Groemping U and Amarov B. (2013). *DoE.base: Full Factorials, Orthogonal Arrays and Base Utilities for DoE Packages*. R package version 0.23-4, <http://CRAN.R-project.org/package=DoE.base>.
- e1071 Meyer D, Dimitriadou E, Hornik K, Weingessel A and Leisch F (2012). *e1071: Misc Functions of the Department of Statistics (e1071)*, TU, Vienna. R package version 1.6-1, <http://CRAN.R-project.org/package=e1071>.
- FrF2 Groemping U (2013). *FrF2: Fractional Factorial Designs with 2-Level Factors*. R package version

- 1.6-6, <http://CRAN.R-project.org/package=FrF2>.
- ggplot2** Wickham H (2009). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer, New York. ISBN 978-0-387-98140-6, <http://had.co.nz/ggplot2/book>.
- grid** R Core Team (2013). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, <http://www.R-project.org/>.
- lattice** Sarkar D (2008). *Lattice: Multivariate Data Visualization with R*. Springer, New York. ISBN 978-0-387-75968-5, <http://lmdvr.r-forge.r-project.org>.
- LearnBayes** Albert J (2012). *LearnBayes: Functions for Learning Bayesian Inference*. R package version 2.12, <http://CRAN.R-project.org/package=LearnBayes>.
- lhs** Carnell R (2012). *lhs: Latin Hypercube Samples*. R package version 0.10, <http://CRAN.R-project.org/package=lhs>.
- mistat** Amberti D (2012). *mistat: Data sets, functions and examples from the book: "Modern Industrial Statistics" by Kenett, Zacks and Amberti*. R package version 1.01.
- mvtnorm** Genz A, Bretz F, Miwa T, Mi X, Leisch F, Scheipl F and Hothorn T (2012). *mvtnorm: Multivariate Normal and t Distributions*. R package version 0.9-9994, <http://CRAN.R-project.org/package=mvtnorm>.
- Genz A and Bretz F (2009). *Computation of Multivariate Normal and t Probabilities*, series Lecture Notes in Statistics. Springer-Verlag, Heidelberg. ISBN 978-3-642-01688-2.
- qcc** Scrucca L (2004). "qcc: an R package for quality control charting and statistical process control." *R News*, 4/1, pp. 11–17. <http://CRAN.R-project.org/doc/Rnews/>.
- rsm** Lenth RV (2009). "Response-Surface Methods in R, Using rsm." *Journal of Statistical Software*, 32(7), pp. 1–17, <http://www.jstatsoft.org/v32/i07/>.
- survival** Therneau T (2013). *A Package for Survival Analysis in S*. R package version 2.37-4, <http://CRAN.Rproject.org/package=survival>.
- Therneau, T. and Grambsch, P.M. (2000). *Modeling Survival Data: Extending the Cox Model*. Springer, New York. ISBN 0-387-98784-3.
- tseries** Trapletti A and Hornik K (2013). *tseries: Time Series Analysis and Computational Finance*. R package version 0.10-31., <http://CRAN.R-project.org/package=tseries>.

## Tài liệu tham khảo và đọc thêm

---

- Adams, B.M. (2008) Selection of Control Charts, in *Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability*, Ruggeri, F., Kenett, R.S. and Faltin, F. (Editors in Chief), John Wiley, Chichester, and WileyInterscience.
- Aoki, M. (1989) *Optimization Of Stochastic Systems: Topics in Discrete-Time Dynamics*, (Second Edition), Academic Press, New York.
- Barnard, G. A. (1959) Control Charts and Stochastic Processes, *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, **21**, 239–271.
- Bayarri, M., Berger, J., Paulo, R., Sacks, J., Cafeo, J., Cavendish, J., Lin, C-H and Tu, J. (2007) A Framework for Validation of Computer Models, *Technometrics*, **49**(2), 138–154.
- Box, G.E.P, Bisgaard, S. and Fung, C. (1988) An Explanation and Critique of Taguchi's Contributions to Quality Engineering, *Quality and Reliability Engineering International*, **4**(2), 123–131.
- Box, G.E.P and Draper, N.R. (1987) *Empirical Model-Building and Response Surfaces*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Box, G.E.P, Hunter, W.G. and Hunter, S.J. (1978) *Statistics for Experimenters*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Box, G.E.P and Kramer, T. (1992) Statistical Process Monitoring and Feedback Adjustment: A Discussion, *Technometrics*, **34**, 251–285.
- Box, G.E.P and Tiao, G. (1973) *Bayesian Inference in Statistical Analysis*, Addison-Wesley, Reading, MA.
- Bratley, P, Fox, B.L. and Schrage, L.E. (1983) *A Guide to Simulation*, Springer-Verlag, New York.
- Castagliola, P and Castellanos, J.V. (2005) Capability Indices Dedicated to the Two Quality Characteristics Cases, *Journal of Quality Technology and Quantitative Management*, **2**(2), 201–220.
- Chan, L.K., Cheng, S.W., and Spiring, F.A. (1991) A Multivariate Measure of Process Capability, *International Journal of Modelling and Simulation*, **11**, 1–6.
- Chen, H. (1994) A Multivariate Process Capability Index Over a Rectangular Solid Tolerance Zone, *Statistics Sinica*, **4**, 749–758.
- Cochran, W.G. (1977) *Sampling Techniques*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Colosimo, B.M. (2008) Bayesian Control Charts, in *Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability*, Ruggeri, F., Kenett, R.S. and Faltin F. (Editors in Chief), John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, and Wiley-Interscience, 2008.

- Craven, P. and Wahba, G. (1979) Smoothing Noisy Data with Spline Functions: Estimating the Correct Degree of Smoothing by the Method of Generalized Cross-Validation, *Numerische Mathematik*, **31**, 377–403.
- Daniel, C. and Wood, F.S. (1971) *Fitting Equations to Data: Computer Analysis of Multifactor Data for Scientists and Engineers*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Dehand, K. (1989) *Quality Control, Robust Design, and the Taguchi Method*, Wadsworth and Brooks/Cole, Pacific Grove, CA.
- Deming, W.E. (1967) A Tribute to Walter A. Shewhart, *The American Statistician*, **21**(2), 39–40.
- Deming, W.E. (1982) *Quality, Productivity and the Competitive Position*, Center for Advanced Engineering Studies, Cambridge, MA.
- Deming, W.E. (1991) *Out of the Crisis*, MIT Press, Boston, MA.
- Derringer, G. and Suich, R. (1980) Simultaneous Optimization of Several Response Variables, *Journal of Quality Technology*, **12**(4), 214–219.
- Dodge, H.F. and Romig, H.G. (1929) A Method of Sampling Inspection, *Bell System Technical Journal*, **8**, 613–631.
- Dodge, H.F. and Romig, H.G. (1959) *Sampling Inspection Tables* (Second Edition), John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Draper, N.R. and Smith, H. (1981) *Applied Regression Analysis* (Second Edition), John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Duncan, A.J. (1956) The Economic Design of X Charts Used to Maintain Current Control of a Process, *Journal of American Statistical Association*, **51**, 228–242.
- Duncan, A.J. (1971) The Economic Design of X Charts When There Is a Multiplicity of Assignable Causes, *Journal of American Statistical Association*, **66**, 107–121.
- Duncan, A.J. (1978) The Economic Design of p-Charts to Maintain Current Control of a Process: Some Numerical Results, *Technometrics*, **20**, 235–243.
- Duncan, A.J. (1986) *Quality Control and Industrial Statistics* (5th Edition), Irwin, Homewood, IL.
- Faltin, F., Kenett, R.S. and Ruggeri, F. (2012) *Statistical Methods in Healthcare*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
- Fang, K.T., Lin, D.K., Winker, J.P. and Zhang, Y. (2000) Uniform Design: Theory and Application, *Technometrics*, **42**, 237–248.
- Figini, S., Kenett, R.S. and Salini, S. (2010) Integrating Operational and Financial Risk Assessments, *Quality and Reliability Engineering International*, **26**(8), 887–897.
- Friedman, J.H. (1991) Multivariate Adaptive Regression Splines, *Annals of Statistics*, **19**, 1–67.
- Friedman, J.H. and Stuetzle, W. (1981) Projection Pursuit Regression, *Journal of the American Statistical Association*, **76**, 817–823.
- Fuchs, C. and Kenett, R.S. (1987) Multivariate Tolerance Regions and F-tests, *Journal of Quality Technology*, **19**, 122–131.
- Fuchs, C. and Kenett, R.S. (1988) Appraisal of Ceramic Substrates by Multivariate Tolerance Regions, *Journal of the Royal Statistical Society, Series D*, **37**, 401–411.

- Fuchs, C. and Kenett, R.S. (1998) *Multivariate Quality Control: Theory and Application*, *Quality and Reliability Series*, Vol. 54, Marcel Dekker, New York.
- Gandin, L.S. (1963) *Objective Analysis of Meteorological Fields*. GIMIZ, Leningrad.
- Gertsbakh, I.B. (1989) *Statistical Reliability Theory*, Marcel Dekker, New York.
- Ghosh, S. (1990) *Statistical Design and Analysis of Industrial Experiments*, Marcel Dekker, New York.
- Gibra, I.N. (1971) Economically Optimal Determination of the Parameters of X-Bar Control Chart, *Management Science*, **17**, 635–646.
- Goba, F.A. (1969) Biography on Thermal Aging of Electrical Insulation, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, **EI-4**, 31–58.
- Godfrey, A.B. (1986) The History and Evolution of Quality in AT&T, *AT&T Technical Journal*, **65**, 9–20.
- Godfrey, B.L. and Kenett, R.S. (2007) Joseph M. Juran: A Perspective on Past Contributions and Future Impact, *Quality and Reliability Engineering International*, **23**, 653–663.
- Good, I.J. (1965) *The Estimation of Probabilities: An Essay on Modern Bayesian Methods*, MIT Press, Cambridge, MA.
- H-107 (1959) *Single Level Continuous Sampling Procedures and Tables for Inspection by Attribute*, Government Printing Office, Washington, DC.
- H-108 (1959) *Sampling Procedures and Tables for Life and Reliability Testing (Based on the Exponential Distribution)*, U.S. Department of Defense, Quality Control and Reliability Handbook, Government Printing Office, Washington, DC.
- Haridy, S., Wu, Z. and Castagliola, P. (2011) Univariate and Multivariate Approaches for Evaluating the Capability of Dynamic-Behavior Processes (Case Study), *Statistical Methodology*, **8**, 185–203.
- Hoadley, B. (1981) The Quality Measurement Plan, *Bell System Technical Journal*, **60**, 215–271.
- Hoadley, B. (1986) Quality Measurement Plan, in *Encyclopedia of Statistical Sciences*, Vol. 7, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Hoadley, B. (1988) QMP/USP: A Modern Approach to Statistical Quality Auditing, in *Handbook of Statistics*, Vol. 7,
- Krishnaiah, P.R. (Ed.), Elsevier Science Publishers, Oxford, pp. 353–373.
- Hotelling, H. (1931) The Generalization of Student's Ratio, *Annals of Mathematical Statistics*, **2**, 360–378.
- Hotelling, H. (1947) Multivariate Quality Control, Illustrated by the Air Testing of Sample Bombsights, in *Techniques of Statistical Analysis*, O. Eisenhart, M. Hastay and W.A. Wallis (Editors), McGraw-Hill, New York.
- Huang, D. and Allen, T. (2005), Design and Analysis of Variable Fidelity Experimentation Applied to Engine Valve Heat Treatment Process Design, *Journal of the Royal Statistical Society, Series C*, **54**(2), 443–463.
- ICH Guidelines Q8-Q11,  
<http://www.ich.org/products/guidelines/quality/article/quality-guidelines.html>, retrieved 15-8-2012.
- Ishikawa, K. (1986) *Guide to Quality Control* (Second Edition), Asian Productivity Organization, UNIPAB Kraus International Publications.



- Jackson, J.E. (1985) Multivariate Quality Control, *Communications in Statistics: Theory and Methods*, **14**, 2657–2688.
- Jalili, M., Bashiri, M. and Amiri, A. (2012) A New Multivariate Process Capability Index Under Both Unilateral and Bilateral Quality Characteristics, Wileylibrary.com, DOI: 10.1002/qre.1284.
- Jensen, F. and Petersen, N.E. (1982) *Burn-In: An Engineering Approach to the Design and Analysis of Burn-In Procedures*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- John, P.W.M. (1990) *Statistical Methods in Engineering and Quality Assurance*, Wiley, New York.
- John, S. (1963) A Tolerance Region for Multivariate Normal Distributions, *Sankhya*; Series A, **25**, 363–368.
- Juran, J.M. (Ed.) (1979) *Quality Control Handbook* (Third Edition), McGraw-Hill, New York.
- Juran, J.M. (Ed.) (1995) *A History of Managing for Quality*, ASQ Quality Press, Milwaukee, WI.
- Juran, J.M. and Gryna, F.M. (1988) *Juran's Quality Control Handbook* (Fourth Edition), McGraw-Hill, New York.
- Kacker, R.N. (1985) Off-line Quality Control, Parameter Design, and the Taguchi Method (with Discussion), *Journal of Quality Technology*, **17**, 176–209.
- Kelly, T., Kenett, R.S., Newton, E., Roodman, G. and Wowk, A. (1991) Total Quality Management Also Applies to a School of Management, in *Proceedings of the 9th IMPRO Conference*, Atlanta.
- Kenett, R.S. (1983) On an Exploratory Analysis of Contingency Tables, *Journal of the Royal Statistical Society*, Series D, **32**, 395–403.
- Kenett, R.S. (1991) Two Methods for Comparing Pareto Charts, *Journal of Quality Technology*, **23**, 27–31.
- Kenett, R.S. (2012) Applications of Bayesian Networks, <http://ssrn.com/abstract=2172713>.
- Kenett, R.S. and Baker, E. (2010) *Process Improvement and CMMI for Systems and Software*, Taylor & Francis, Auerbach CRC Publications, Boca Raton, FL.
- Kenett, R.S., Coleman, S. and Stewardson, D. (2003) Statistical Efficiency: The Practical Perspective, *Quality and Reliability Engineering International*, **19**, 265–272.
- Kenett, R.S. and Kenett D.A. (2008) Quality by Design Applications in Biosimilar Technological Products, *ACQUAL, Accreditation and Quality Assurance*, **13**(12), 681–690.
- Kenett, R.S. and Pollak, M. (1996) Data Analytic Aspects of the Shirayev-Roberts Control Chart, *Journal of Applied Statistics*, **23**, 125–137.
- Kenett, R.S. and Raanan, Y. (2010) *Operational Risk Management: A Practical Approach to Intelligent Data Analysis*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, Kindle Edition, 2011.
- Kenett, R.S. and Salini, S. (2008) Relative Linkage Disequilibrium Applications to Aircraft Accidents and Operational Risks, *Transactions on Machine Learning and Data Mining*, **1**(2): 83–96. The procedure is implemented in a rules R Package. Version 0.6–6, Mining Association Rules and Frequent Itemsets.
- Kenett, R.S. and Salini, S. (2012) *Modern Analysis of Customer Surveys: With Applications Using R*, John-Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
- Kenett, R.S. and Shmueli, G. (2013) On Information Quality, *Journal of the Royal Statistical Society*, Series A (with discussion), **176**(4), <http://ssrn.com/abstract=1464444>.
- Kenett, R.S. and Zacks, S. (1992) Process Tracking Under Random Changes in the Mean, Technical Report School of Management, State University of New York, Binghamton.

- Kenett, R.S. and Zacks, S. (1998) *Modern Industrial Statistics: Design and Control of Quality and Reliability*, Duxbury, Belmont, CA.
- Kotz, S. and Johnson, N.L. (1985) *Encyclopedia of Statistical Sciences*, Wiley, New York.
- Kotz, S. and Johnson, N.L. (1994) *Process Capability Indices*, Chapman and Hall, New York.
- Liebman, B.S. and Saperstein, B. (1983) A Proposed Attribute Skip-Lot Sampling Program, *Journal of Quality Technology*, **15**, 130–140.
- Lin, K.M. and Kacker, R.N. (1989) Optimizing the Wave Soldering Process, in *Quality Control Robust Design, and The Taguchi Method*, Khorsrow Dehand (Ed.), Wadsworth Brooks/Cole, Pacific Grove, CA, pp. 143–157.
- Lucas, J.M. (1982) Combined Shewhart: CUSUM Quality Control Schemes, *Journal of Quality Technology*, **14**, 51–59.
- Lucas, J.M. and Crosier, R.B. (1982) Fast Initial Response for CUSUM Quality Control Scheme: Give Your CUSUM a Headstart, *Technometrics*, **24**, 199–205.
- Mann, N.R., Schaffer, R.E. and Singpurwalla, N.D. (1974) *Methods for Statistical Analysis of Reliability and Life Data*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Martz, H. and Walker, R. (1982) *Bayesian Reliability Analysis*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Matheron, G. (1963) Principles of Geostatistics, *Economic Geology*, **58**, 1246–1266.
- McKay, M.D., Beckman, R.J. and Conover, W.J. (1979) A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code, *Technometrics*, **21**, 239–245.
- MIL-STD-105E (1989) *Sampling Procedures and Tables for Inspection by Attributes*, Government Printing Office, Washington, DC.
- MIL-STD-414 (1957) *Sampling Procedures and Tables for Inspection by Variables for Percent Defectives*, Government Printing Office, Washington, DC.
- Myers, M.D., A.I. Khuri and W.H. Carter (1989) Response surface methodology: 1966–1988, *Technometrics*, **31**(3), 137–157.
- Nasr, M. (2007) *Quality by Design (QbD) – A Modern System Approach to Pharmaceutical Development and Manufacturing – FDA Perspective*, FDA Quality Initiatives Workshop, Maryland, USA.
- Nelson, W. (1992) *Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans and Data Analysis*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Oikawa, T. and Oka, T. (1987) New Techniques for Approximating the Stress in Pad-Type Nozzles Attached to a Spherical Shell, *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 188–192.
- Page, E.S. (1954) Continuous Inspection Schemes, *Biometrika*, **41**, 100–114.
- Page, E.S. (1962) A Modified Control Chart with Warning Limits, *Biometrika*, **49**, 171–176.
- Pao, T.W., Phadke, M.S. and Sherrerd, C.S. (1985) Computer Response Time Optimization Using Orthogonal Array Experiments, *IEEE International Communication Conference, Chicago, Conference Record*, **2**, 890–895.
- Peck, D.S. and Trapp, O. (1978) *Accelerated Testing Handbook*, Portola Valley, CA: Technology Associations.
- Phadke, M.S. (1989) *Quality Engineering Using Robust Design*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

- Phadke, M.S., Kacker, R.N., Speeney, D.V. and Grieco, M.J. (1983) Quality Control in Integrated Circuits Using Experimental Design, *Bell System Technical Journal*, **62**, 1275–1309.
- Press, S. (1989) *Bayesian Statistics: Principles, Models and Applications*, Wiley, New York.
- Quinlan, J. (1985) Product Improvement by Application of Taguchi Methods, in Third Supplier Symposium on Taguchi Methods, American Supplier Institute, Inc., Dearborn, MI.
- Rathore, A.S. and Mhatre, R. (2009) *Quality by Design for Biopharmaceuticals*, JohnWiley and Sons, Inc., Hoboken, NJ.
- Reinman, G. et al. (2012) Design for Variation, *Quality Engineering*, **24**, 317–345.
- Roberts, S.W. (1966) A Comparison of Some Control Chart Procedures, *Technometrics*, **8**, 411–430.
- Romano, D. and Vicario, G. (2002) Reliable Estimation in Computer Experiments on Finite Element Codes, *Quality Engineering*, **14**(2), 195–204.
- Ruggeri, F., Kenett, R. and Faltin, F. (2007) *Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Ryan, B.F., Joiner, B.L. and Ryan, T.P. (1976) *Minitab Handbook*, Duxbury Press, Belmont, CA.
- Sacks J., Welch W.J., Mitchell T.J., and Wynn H.P. (1989) Design and Analysis of Computer Experiments, *Statistical Science*, **4**(4), 409–435.
- Scheffé, H. (1959) *The Analysis of Variance*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Shewhart, W.A. (1926) Quality Control Charts, *Bell System Technical Journal*, **5**, 593–603.
- SUPAC (1997) Food and Drug Administration, Center for Drug Evaluation and Research (CDER) Scale-Up and Postapproval Changes: Chemistry, Manufacturing, and Controls; In Vitro Release Testing and In Vivo Bioequivalence Documentation, Rockville, MD, USA.
- Taguchi, G. (1987) *Systems of Experimental Design*, D. Clausing (Ed.), Vols 1–2, UNIPUB/Kraus International Publications, New York.
- Taguchi, G. and Taguchi, S. (1987) *Taguchi Methods: Orthogonal Arrays and Linear Graphs*, American Supplier Institute, Dearborn, MI.
- Tsiamirtzis, P. and Hawkins, D.M. (2008) Bayesian Statistical Process Control, in *Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability*, Ruggeri, F., Kenett, R.S. and Faltin F. (Editors in Chief), John Wiley and Sons, New York, and WileyInterscience.
- Tsokos, C. and Shimi, I. (1977) *The Theory and Applications of Reliability with Emphasis on Bayesian and Non-Parametric Methods*, Academic Press, New York.
- Tsong, Y., Hammerstrom, T., Sathe P., and Shah, V. (1996) Statistical Assessment of Mean Differences Between Two Dissolution Data Sets, *Drug Information Journal*, **30**, 1105–1112.
- Wang, F.K. and Chen, J.C. (1998) Capability Index Using Principal Components Analysis, *Quality Engineering*, **11**(1), 21–27.
- Weindling, J.I. (1967) Statistical Properties of a General Class of Control Charts Treated as a Markov Process, Ph.D. Dissertation, Columbia University, New York.
- Weindling, J.I., Littauer, S.B. and S.E. Olivera, J. (1970) Mean Action Time of the X-Bar Control Chart with Warning Limits, *Journal of Quality Technology*, **2**, 79–85.
- Welch, W.J., Yi, T.K, Kang, S.M. and Sacks, J. (1990) Computer Experiments for Quality Control by Param-

- eter Design, *Journal of Quality Technology*, **22**, 15–22.
- Woodall, W.H. and Montgomery, D.C.R. (1999) Research Issues and Ideas in Statistical Process Control, *Journal of Quality Technology*, **31**, 376–386.
- Yashchin, E. (1985) On a Unified Approach to the Analysis of Two-Sided Cumulative Sum Control Schemes with Headstarts, *Advances in Applied Probability*, **17**, 562–593.
- Yashchin, E. (1991) Some Aspects of the Theory of Statistical Control Schemes, *IBM Journal of Research Development*, **31**, 199–205.
- Zacks, S. (1992) *Introduction to Reliability Analysis: Probability Models and Statistical Methods*, Springer-Verlag, New York.

# DANH MỤC LOẠT SÁCH THỐNG KÊ TRONG THỰC TIỄN

## *Human and Biological Sciences*

- Berger – Selection Bias and Covariate Imbalances in Randomized Clinical Trials
- Berger and Wong – An Introduction to Optimal Designs for Social and Biomedical Research
- Brown and Prescott – Applied Mixed Models in Medicine, 2nd Edition
- Carpenter and Kenward – Multiple Imputation and its Application
- Carstensen – Comparing Clinical Measurement Methods
- Chevret (Ed.) – Statistical Methods for Dose-Finding Experiments
- Ellenberg, Fleming and DeMets – Data Monitoring Committees in Clinical Trials: A Practical Perspective
- Hauschke, Steinijans and Pigeot – Bioequivalence Studies in Drug Development: Methods and Applications
- Källén – Understanding Biostatistics
- Lawson, Browne and Vidal Rodeiro – Disease Mapping with Win-BUGS and MLwiN
- Lesaffre, Feine, Leroux and Declerck – Statistical and Methodological Aspects of Oral Health Research
- Lui – Statistical Estimation of Epidemiological Risk
- Marubini and Valsecchi – Analysing Survival Data from Clinical Trials and Observation Studies
- Millar – Maximum Likelihood Estimation and Inference: With Examples in R, SAS and ADMB
- Molenberghs and Kenward – Missing Data in Clinical Studies
- Morton, Mengersen, Playford & Whitby – Statistical Methods for Hospital Monitoring with R
- O’Hagan, Buck, Daneshkhah, Eiser, Garthwaite, Jenkinson, Oakley and Rakow Uncertain Judgements: Eliciting Expert’s Probabilities
- Parmigiani – Modeling in Medical Decision Making: A Bayesian Approach
- Pintilie – Competing Risks: A Practical Perspective
- Senn – Cross-over Trials in Clinical Research, 2nd Edition
- Senn – Statistical Issues in Drug Development, 2nd Edition
- Spiegelhalter, Abrams and Myles – Bayesian Approaches to Clinical Trials and Health-Care Evaluation
- Walters – Quality of Life Outcomes in Clinical Trials and Health-Care Evaluation
- Welton, Sutton, Cooper and Ades – Evidence Synthesis for Decision Making in Healthcare

Whitehead – Design and Analysis of Sequential Clinical Trials, Revised 2nd Edition

Whitehead – Meta-Analysis of Controlled Clinical Trials

Willan and Briggs – Statistical Analysis of Cost Effectiveness Data

Winkel and Zhang – Statistical Development of Quality in Medicine

#### *Earth and Environmental Sciences*

Buck, Cavanagh and Litton – Bayesian Approach to Interpreting Archaeological Data

Chandler and Scott – Statistical Methods for Trend Detection and Analysis in the Environmental Statistics

Glasbey and Horgan – Image Analysis in the Biological Sciences

Haas – Improving Natural Resource Management: Ecological and Political Models

Haas – Introduction to Probability and Statistics for Ecosystem Managers

Helsel – Nondetects and Data Analysis: Statistics for Censored Environmental Data Illian, Penttinen, Stoyan and Stoyan- Statistical Analysis and Modeling of Spatial Point Patterns

Mateu and Muller (Eds) – Spatio-Temporal Design: Advances in Efficient Data Acquisition

McBride – Using Statistical Methods for Water Quality Management

Webster and Oliver – Geostatistics for Environmental Scientists, 2nd Edition

Wymer (Ed.) – Statistical Framework for Recreational Water Quality Criteria and Monitoring

#### *Industry, Commerce and Finance*

Aitken – Statistics and the Evaluation of Evidence for Forensic Scientists, 2nd Edition

Balding – Weight-of-evidence for Forensic DNA Profiles

Brandimarte – Numerical Methods in Finance and Economics: AMATLAB-Based Introduction, 2nd Edition

Brandimarte and Zotteri – Introduction to Distribution Logistics

Chan – Simulation Techniques in Financial Risk Management

Coleman, Greenfield, Stewardson & Montgomery (Eds) – Statistical Practice in Business and Industry

Frisen (Ed.) – Financial Surveillance

Fung and Hu – Statistical DNA Forensics

Gusti Ngurah Agung – Time Series Data Analysis Using EViews

Jank and Shmueli (Ed.) – Statistical Methods in e-Commerce Research

Kenett (Ed.) – Operational Risk Management: A Practical Approach to Intelligent Data Analysis

Kenett (Ed.) – Modern Analysis of Customer Surveys: With Applications using R

Kenett and Zacks – Modern Industrial Statistics: With Applications in R, MINITAB and JMP, 2nd Edition

Kruger and Xie – Statistical Monitoring of Complex Multivariate Processes: With Applications in Industrial Process Control

Lehtonen and Pahkinen – Practical Methods for Design and Analysis of Complex Surveys, 2nd Edition

Ohser and Mücklich – Statistical Analysis of Microstructures in Materials Science

Pasiouras (Ed.) – Efficiency and Productivity Growth: Modelling in the Financial Services Industry

Pourret, Naim and Marcot (Eds) – Bayesian Networks: A Practical Guide to Applications

Ruggeri, Kenett and Faltin – Encyclopedia of Statistics and Reliability

Taroni, Aitken, Garbolino and Biedermann – Bayesian Networks and Probabilistic Inference in Forensic Science

Taroni, Bozza, Biedermann, Garbolino and Aitken – Data Analysis in Forensic Science